

行政院原子能委員會

委託研究計畫研究報告

高完整性混凝土處置容器混凝土品質提升及品質檢測方法評估

Enhance the quality and inspection method for high integrity
concrete disposal container

計畫編號：108A008

受委託機關(構)：國立中央大學

計畫主持人：黃偉慶

聯絡電話：03-4227151#34136

聯絡電話：(公) 03-4257062 (宅) 02-27016775

E-mail address：t321655@ncu.edu.tw

研究期程：中華民國 108 年 3 月至 108 年 12 月

研究經費：新臺幣 56 萬元

核研所聯絡人員：陳鈺沛

報告日期：2019 年 11 月 25 日

目錄

目錄.....	2
摘要.....	10
壹、計畫緣起與目的.....	12
貳、文獻回顧.....	16
參、研究方法與過程.....	42
肆、主要發現與結論.....	60
伍、結論.....	97
陸、參考文獻.....	98

圖目錄

圖 2.1 不同養護溫度對火山灰水泥砂漿抗壓強度之影響(Kaffayatullah Khan et al., 2017).....	16
圖 2.2 養護溫度對活性粉混凝土強度之影響 (莊美玲, 2014)	17
圖 2.3 養護溫度對活性粉混凝土強度之影響 (Lee and Chisholm, 2005)	18
圖 2.4 同養護溫度之奈米氧化鎂 28 天抗壓強度 (Song et al, 2018)	18
圖 2.5 試體切割方式示意圖	22
圖 2.6 不同鋼纖維添加量之混凝土乾縮圖(Bandelj et al.,2011)	23
圖 2.7 不同水膠比或混凝土對表面濃度之影響(Sherman R.M., 1996)	25
圖 2.8 程式 Life-365 介面	28
圖 2.9 程式 Life-365 使用介面	28
圖 2.10 服務年限(初始階段 t_i +腐蝕階段 t_p).....	31
圖 2.11 代碼 W40D55 差值法與程式結果比較圖 (彭琦茵, 2015)...	33
圖 2.12 實驗與推估模型之濃度剖面比較(Ann et al., 2009).....	34
圖 2.13 實驗與推估模型之濃度剖面比較(Song et al., 2008)	34
圖 2.14 無連續浸泡之氯離子濃度剖面圖(Erik et al., 2003).....	35
圖 2.15 有連續浸泡之氯離子濃度剖面圖(Erik et al., 2003).....	35
圖 2.16 各時間名稱之定義圖(Nokken et al., 2006)	36

圖 2.17 各時間之實驗及推估濃度剖面圖(Kim et al., 2016).....	39
圖 2.18 表面氯離子隨時間變化圖(Peng et al., 2016).....	40
圖 2.19 表面氯離子隨時間變化圖(Pack et al., 2010).....	41
圖 3.1 粗粒料粒徑分佈曲線圖	44
圖 3.2 細粒料粒徑分佈曲線圖	45
圖 3.3 流程圖.....	46
圖 3.4 試體的切割尺寸圖	51
圖 3.5 混凝土浸泡 NaCl 溶液示意圖.....	51
圖 3.6 試體分層示意圖	51
圖 3.7 研磨後的試體與其分層粉末	52
圖 3.8 孔隙率試驗試體	54
圖 3.9 孔隙率試驗圓柱試體	55
圖 3.10 混凝土試體電阻係數量測示意圖	57
圖 3.11 混凝土試體切割方式.....	57
圖 3.12 Imagej 試驗步驟	58
圖 3.13 水貫入深度試驗試體裝置示意圖(BS EN 12390-8).....	59
圖 4.1 M 配比坍度試驗.....	60
圖 4.2 C 配比坍度試驗.....	60
圖 4.3 C 配比各養護方式對抗壓強度之影響.....	61

圖 4.4 M 配比各養護方式對抗壓強度之影響.....	62
圖 4.5 C 配比不同養護方式與乾縮率關係圖.....	63
圖 4.6 M 配比不同養護方式與乾縮率關係圖.....	63
圖 4.7 C 配比常溫養護各齡期分層濃度圖.....	64
圖 4.8 C 配比 80°C 養護三天各齡期分層濃度圖.....	65
圖 4.9 C 配比 80°C 養護四天各齡期分層濃度圖.....	65
圖 4.10 C 配比 90°C 養護兩天各齡期分層濃度圖	66
圖 4.11 M 配比常溫養護各齡期分層濃度圖.....	66
圖 4.12 M 配比 80°C 養護三天各齡期分層濃度圖.....	67
圖 4.13 M 配比 80°C 養護四天各齡期分層濃度圖.....	67
圖 4.14 M 配比 90°C 養護兩天各齡期分層濃度圖.....	68
圖 4.15 M 配比 90°C 養護三天各齡期分層濃度圖.....	68
圖 5.1 配比 C 實驗數據與費克第二定律預測曲線.....	70
圖 5.2 配比 M 實驗數據與費克第二定律預測曲線.....	70
圖 5.3 配比 C 各齡期與瞬時擴散係數關係圖.....	71
圖 5.4 配比 M 各齡期與瞬時擴散係數關係圖.....	72
圖 5.5 配比 C 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖.....	73
圖 5.6 配比 M 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖.....	74
圖 5.7 配比 C 常溫養護瞬時擴散係數推估及實驗數據對照圖	75

圖 5.8 配比 M 常溫養護瞬時擴散係數推估及實驗數據對照圖	75
圖 6.1 配比 C 養護完成後即受氯離子入侵濃度剖面推估圖	77
圖 6.2 配比 M 養護完成後即受氯離子入侵濃度剖面推估圖	77
圖 7.1 C 配比養護方式與孔隙率關係圖	78
圖 7.2 M 配比養護方式與孔隙率關係圖	79
圖 7.3 M 配比養護方式與孔隙率關係圖	80
圖 7.4 M 配比養護方式與孔隙率關係圖	80
圖 8.1 C 配比 7 天齡期孔隙體積分布圖	81
圖 8.2 C 配比 28 天齡期孔隙體積分布圖	82
圖 8.3 C 配比 90 天齡期孔隙體積分布圖	82
圖 8.4 C 配比 183 天齡期孔隙體積分布圖	82
圖 8.5 C 配比 365 天齡期孔隙體積分布圖	83
圖 8.6 C 配比 730 天齡期孔隙體積分布圖	83
圖 8.7 C 配比 1085 天齡期孔隙體積分布圖	83
圖 8.8 M 配比 7 天齡期孔隙體積分布圖	84
圖 8.9 M 配比 28 天齡期孔隙體積分布圖	84
圖 8.10 M 配比 90 天齡期孔隙體積分布圖	85
圖 8.11 M 配比 183 天齡期孔隙體積分布圖	85
圖 8.12 M 配比 365 天齡期孔隙體積分布圖	85

圖 8.13 M 配比 730 天齡期孔隙體積分布圖	86
圖 8.14 M 配比 1085 天齡期孔隙體積分布圖	86
圖 8.15 C 配比 7 天齡期孔隙結構關係圖	87
圖 8.16 C 配比 28 天齡期孔隙結構關係圖	87
圖 8.17 C 配比 90 天齡期孔隙結構關係圖	87
圖 8.18 C 配比 183 天齡期孔隙結構關係圖	88
圖 8.19 C 配比 365 天齡期孔隙結構關係圖	88
圖 8.20 C 配比 730 天齡期孔隙結構關係圖	88
圖 8.21 C 配比 1085 天齡期孔隙結構關係圖	89
圖 8.22 M 配比 7 天齡期孔隙結構關係圖	89
圖 8.23 M 配比 28 天齡期孔隙結構關係圖	90
圖 8.24 M 配比 90 天齡期孔隙結構關係圖	90
圖 8.25 M 配比 183 天齡期孔隙結構關係圖	90
圖 8.26 M 配比 365 天齡期孔隙結構關係圖	91
圖 8.27 M 配比 730 天齡期孔隙結構關係圖	91
圖 8.28 M 配比 1085 天齡期孔隙結構關係圖	91
圖 9.1 C 配比齡期與電阻率關係圖	92
圖 9.2 M 配比齡期與電阻率關係圖	93
圖 10.1 圓柱試體上、中、下層之鋼纖維數量分析圖	95

圖 11.1 配比 C 不同養護方式水貫入深度比較圖.....96

圖 11.2 配比 M 不同養護方式水貫入深度比較圖.....96

表目錄

表 2.1 不同搗實方式之各層鋼纖維分佈	22
表 2.2 程式 Life-365 參數設定範圍與試驗配比參數	29
表 2.3 美國各地氯離子成長速率及最大表面氯離子濃度值歸納表	30
表 2.4 台東與 Florida 各月均溫 (單位: °C)	30
表 2.5 計算濃度剖面方法比較	33
表 2.6 受氯離子入侵之混凝土時間因子可能範圍	39
表 3.1 試驗材料的化學成分	43
表 3.2 粗、細粒料物理性質	44
表 3.3 化學藥劑使用用途及來源	45
表 3.4 混凝土配比 C 與 M (單位: kg/m ³)	49
表 3.5 水泥漿塊配比	49
表 3.6 養護方法	50
表 5.1 配比 C 及 M 瞬時擴散係數及表面氯離子濃度迴歸分析結果	69
表 5.2 配比 C 與配比 M 瞬時擴散係數與時間的關係	73
表 10.1 十顆試體間之鋼纖維含量變異性分析	94
表 10.2 圓柱試體上、中、下各層之鋼纖維含量變異性分析	94

中文摘要

關鍵詞：容器混凝土、氯離子擴散係數、高溫養護

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，利用提高溫度進行養護，使用參數有：(1)常溫 23°C、(2)80°C 熱水三天、(3)80°C 熱水四天、(4)90°C 熱水兩天及(5) 90°C 熱水三天，觀察是否能提升混凝土耐久性，以評估預定混凝土配比高溫養護的效能，再依據 ASTM C1556 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剖面濃度，此外，由於預定採用配比添加鋼纖維以增強混凝土抗彎強度，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。

為了改善混凝土品質採用之高溫養護，分別進行抗壓強度試驗、混凝土乾縮試驗及表面電阻率試驗，以觀察混凝土後續水化之情形；並以氯離子浸泡試驗、孔隙率與孔隙結構探討混凝土抵抗混凝土受氯離子侵入之效果。實驗成果發現，採用高溫養護容器混凝土配比確實能有效加速卜作嵐反應縮短養護齡期，在混凝土抗壓強度及電阻率的提升，且降低孔隙率、氯離子擴散係數及改善體積穩定性的效果都較常溫養護佳。

Abstract

This study investigate the use of steel fiber reinforced concrete in the manufacture of high-integrity containers for disposal of low-level radioactive wastes. The concrete mix C was used to place the container and the cap. In the determination of chloride diffusion coefficient for concrete mixes, test specimens were prepared according to ASTM C1556 standard, and the chloride ion diffusion coefficient and the time factor of the concrete mix were obtained. In this test, the specimens were soaked in sodium chloride solution for at least 35 days, and the chloride concentration profile along the distance from the surface of exposure was measured. In addition, high-temperature curing was adopted to assess the improvements in concrete quality. The curing parameters considered are: (1) 23 °C water curing, (2) 80 °C hot water curing for three days, (3) 80 °C hot water curing for four days, (4) 90 °C hot water curing for two days, and (5) 90 °C hot water curing for three days. Also, in order to enhance the flexural strength of concrete, steel fiber is added to the mixture, a statistical method is established for the evaluation of the distribution of steel fibers in concrete.

In order to improve the quality of concrete by high-temperature curing, compressive strength test, dry shrinkage test and surface resistivity test were carried out to observe the hydration of concrete, and the durability of concrete was investigated by porosity and pore structure measurements. The results show that high-temperature curing does improve the characteristics relating to durability of concrete. These include increased compressive strength and resistivity, reduce porosity and chloride diffusion coefficient, and enhanced volume stability under service environment.

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用過核子燃料，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。近年來核能技術普及核能電廠除役計畫，自醫療機構、核電廠、工業機構等所產生之低放射性廢棄物，其存放議題日益重要。

台灣電力公司預估現在運轉中及除役產生之放射性廢棄物約 75 萬桶及目前蘭嶼貯存場經過重新檢整過後儲存量約 10 萬桶，考量到各核電廠內皆設有暫存場接近滿貯狀態及蘭嶼貯存場不再對外接收貯存廢棄物桶，興建低放射性廢棄物最終處置設施更顯得重要。

關於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，也就是利用多層的防護措施，將放射性廢棄物隔絕於生物圈之外；由於工程障壁需持續的提供圍阻功能，因此探討障壁材料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是必須的。目前最終處置場候選場址可能位於濱海區域且採取淺地層處置，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，以提供國內低放射性廢棄物進行最終處置參考。

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，考慮到放射性廢棄物之核種半衰期，為了不影響人類生活，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可能使用之混凝土配比受到氯離子入侵之服務年限。

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，且在養護期間為混凝土品質較脆弱的時間，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，針對配比養護技術加以改善，提高養護溫度至 90°C，並以不同養護齡期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、孔隙率、孔徑分布、水密性、乾縮、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混凝土材料，受氯離子入侵向混凝土內部擴散，並推估至鋼筋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 與填充材料配比 M，依據 ASTM C1556 製作標準試體，養護至不同之預定齡期，然後浸泡於氯化鈉溶液至少 35 天，依據 ASTM C1152 取得在不同深度之氯離子濃度，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) 參考 ACI 所發表的程式 Life-365，依其針對鋼筋混凝土受氯離子入侵之服務年限推估方法，發展出一套計算程序，應用於推估處置設施用混凝土之使用年限。

(三) 利用萬能試驗機進行抗壓試驗，對不同養護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較。

(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)量測配比混凝土隨齡期增加的收縮變化量，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。

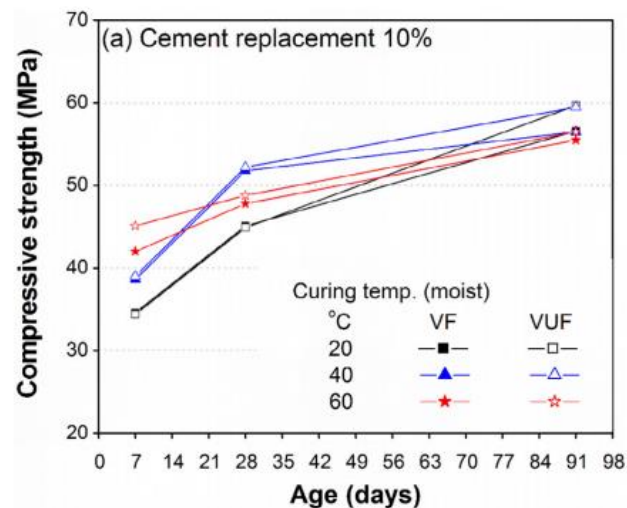


圖 2.1 不同養護溫度對火山灰水泥砂漿抗壓強度之影響

(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，顯示高溫養治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。

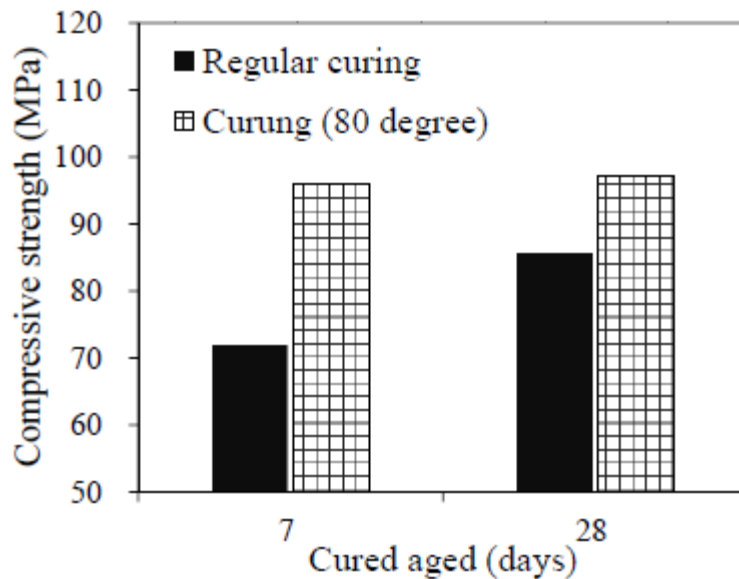


圖 2.2 養護溫度對活性粉混凝土強度之影響 (莊美玲, 2014)

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。

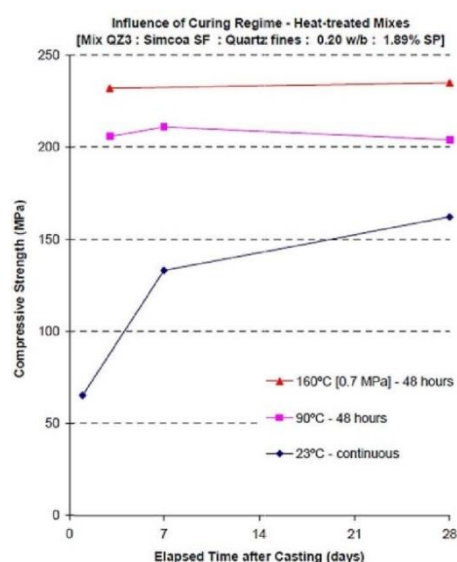


圖 2.3 養護溫度對活性粉混凝土強度之影響 (Lee and Chisholm, 2005)

Song et al.(2018)利用三種養護溫度 20、40、60℃持續養護至 28 天之不同取代量之奈米氧化鎂進行水泥漿體抗壓試驗，所得試體抗壓強度如圖 2.4 所示，研究成果顯示出在不含量下，養護溫度越高增加水化速度使水化產物越多，改善水泥漿內部結構減少孔隙，使內部結構密集，提升抗壓強度，證實養護溫度的提升有助於抗壓強度之發展。

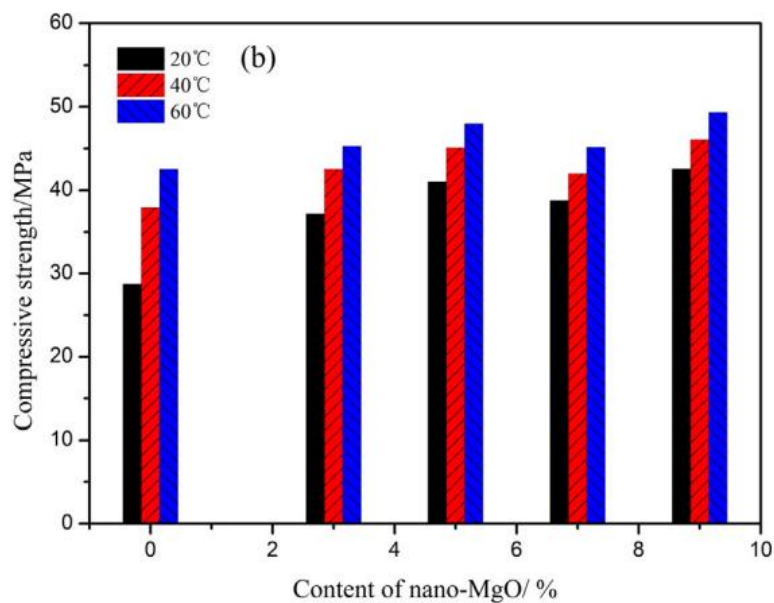


圖 2.4 養護溫度之奈米氧化鎂 28 天抗壓強度(Song et al., 2018)

二、 養護溫度對混凝土孔隙的影響

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、 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。

四、 混凝土表面電阻率試驗方法

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，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浸泡試驗（例如 ASTM C1556）亦有良好的相關性。

五、 影響電阻率因素

Rob B. 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。故量測的探頭間距應大於最大粒料粒徑，避免影響電阻率量測。

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。溫度效應可能隨試體水分含量而變化，溫度升高一度可使飽和混凝土的電阻

率降低 3%，乾混凝土的電阻率可降低 5%。

混凝土中若含鋼筋等高導電材料，會使測得之表面電阻率降低許多。

Chen et al. (2014)研究指出，電阻率會隨試體含水量而有所變化，當試體在乾燥及 40%相對溼度的空氣中測量試體的表面電阻有不穩定或未檢測到的情況發生，因此在試體量測表面電阻時必須潤濕。

王心荻(2009)製作圓柱試體使用相同探頭間距，量測不同尺寸試體時，需依試體尺寸及使用的間距所測得之電阻率，乘上對照的修正系數 K 值，才能求得接近真實的電阻值，而量測矩形試體時，若能避免流通電流不穿透混凝土，則不須修正常數修正電阻值。

六、鋼纖維分布均勻性

Su Tae Kang(2011)認為如果鋼纖維分佈不均勻，並且呈垂直取向於負載方向時，則在混凝土的抗拉強度效果將會降低。

不同搗實的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 a、b、c 試體面如圖 2.5 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 2.1 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。

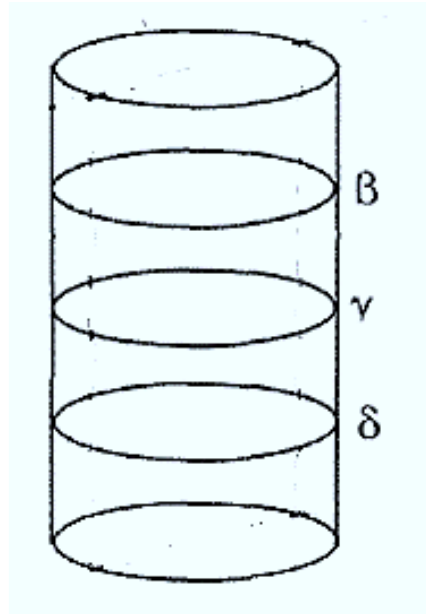


圖 2.5 試體切割方式示意圖

表 2.1 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、 乾縮試驗

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。

Bandelj(2011)分別添加 0.25%、0.5%、0.75%、1%、1.5%及 2%鋼纖維製作水膠比為 0.36 的鋼纖維混凝土，各別量測在不同齡期下的乾縮量，如圖 2.6 所示，隨鋼纖維添加量增加，混凝土乾縮量減少，在 2%的鋼纖維含量顯示出最小的乾縮量，並於齡期 14 天時，添加 2%鋼纖維之混凝土自收縮率約為比沒有添加鋼纖維的混凝土低 35%，表示添加鋼纖維可以有效降低混凝土收縮。

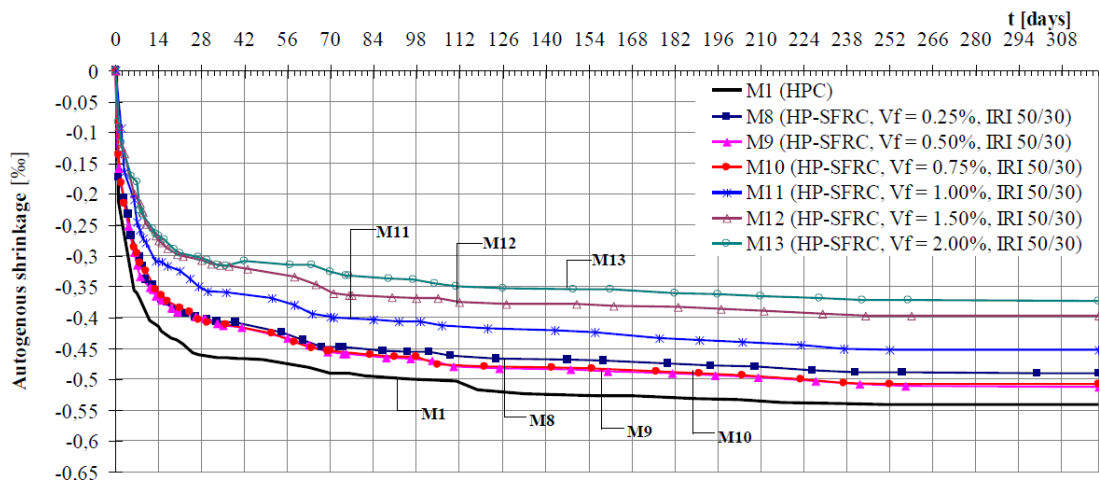


圖 2.6 不同鋼纖維添加量之混凝土乾縮圖(Bandelj et al.,2011)

八、氯離子擴散

(一)氯離子擴散機制

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藉由濃度梯度，從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(Ordinary diffusion)，另外有因壓力、溫差、外力所引起之壓力擴散(Pressure diffusion)、因溫度而加速離子移動的熱擴散(Thermal diffusion)及利用電流等強制力移動的強制力擴散(Force diffusion)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)。

離子離散運動：離散運動(Dispersion)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)。

(二)添加卜作嵐摻料對氯離子擴散影響

Leng et al.(2000)在添加礦物摻料方面，添加飛灰、爐石粉等礦物摻料能有較佳抵抗氯離子入侵的能力，減少暴露在含氯環境下結構物所含鋼筋的腐蝕機率，其原因有下列四點：

1. 添加飛灰和爐石粉可以改善混凝土孔徑大小和孔隙形狀的分布。
2. 當飛灰與爐石粉經水化反應後，較能形成更多的 C-S-H 膠體吸附氯離子和阻擋氯離子擴散路徑。
3. 添加飛灰及爐石粉之混凝土比普通混凝土有較多的 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 AlOH^{2+} 、 Si^{4+} ，這些離子可以限制氯離子於混凝土的擴散能力與移動能力。

4. 飛灰和爐石粉中含有較多的 C_3A 可以吸附更多的氯離子，形成佛萊第鹽類 (Friedel's salt, $Ca_3Al_2O_6 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$)。佛萊第鹽類會吸附在水泥漿體上，使得孔徑尺寸縮小，形成蜿蜒的孔徑路徑，使氯離子不易通過。

Sherman R. M. (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。

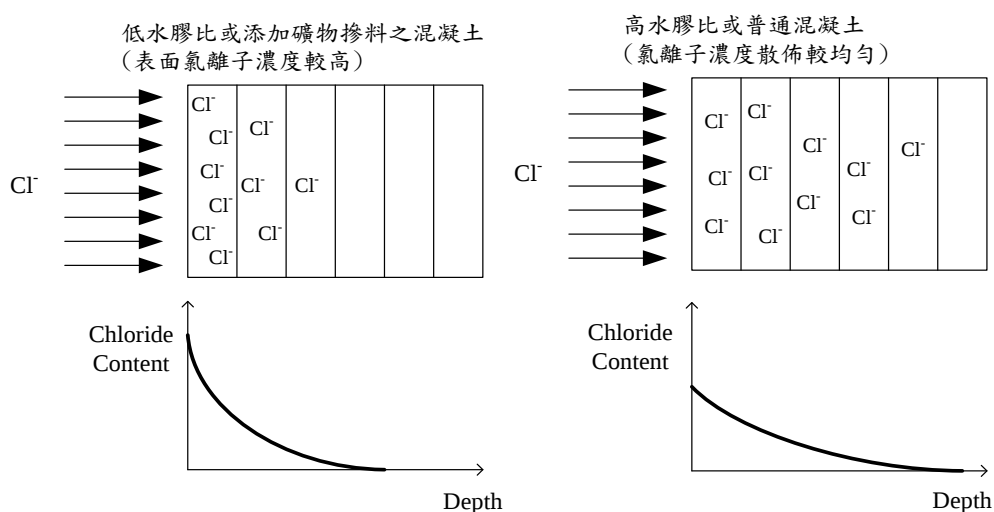


圖 2.7 不同水膠比或混凝土對表面濃度之影響(Sherman R.M., 1996)

(三)氯離子擴散係數及時間因子

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(2.1)所示：

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (2.1)$$

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(2.2)所示：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

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(2.1)與式(2.2)可得式(2.3)：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2.3)$$

若簡化成單一擴散方向，可得式(2.4)：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.4)$$

式(2.4)即為費克第二定律，又稱擴散方程式(Diffusion equation)，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(2.5)：

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_a \cdot t}}\right) \quad (2.5)$$

其中 $C(x, t)$ ：在深度 x 與暴露時間 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

當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 m²/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，利用最小平方差(Least Square Method)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，此兩數值代表此試體浸泡於特定氯化鈉環境的時間下，氯離子在混凝土內部擴散且累積的情況。由於混凝土中水泥因時間改變，水化程度增加，使得孔隙率下降，氯離子在混凝土內部擴散的能力受阻擋，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 Life365 介紹

(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 2.8 及圖 2.9 所示。



圖 2.8 程式 Life-365 介面

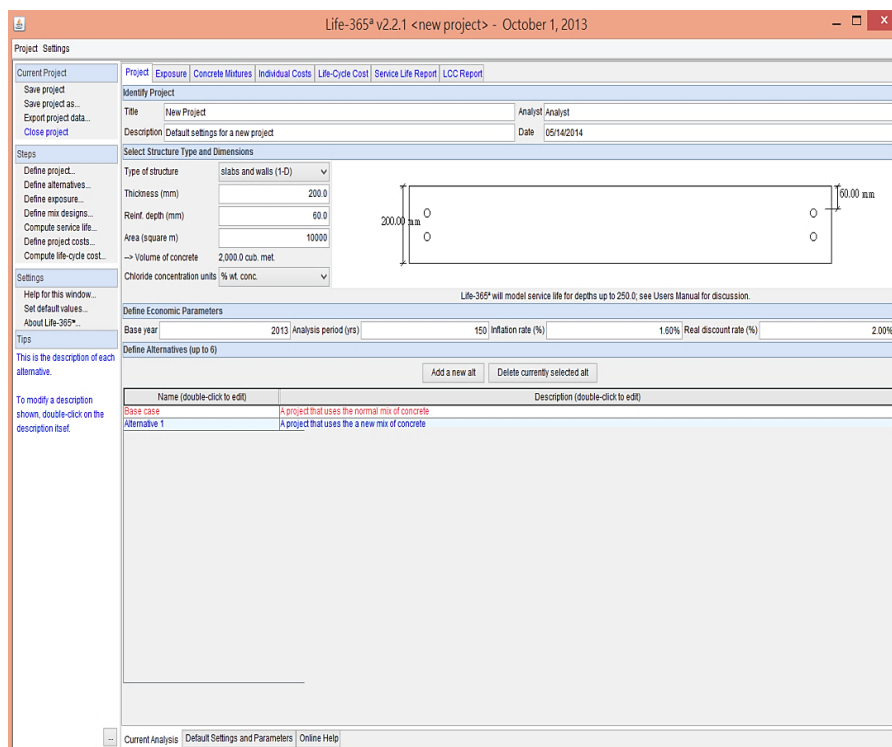


圖 2.9 程式 Life-365 使用介面

(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所需要維修的時間，使用者需輸入多項參數。

結構物基本性質與混凝土材料參數如表 2.1 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			試驗配比參數			
	參數	設定範圍	HIC-C	HIC-M	C	M
結構物 基本性質	厚度(mm)	75-2500	75			
	保護層厚度 (mm)	30-75	35			
混凝土 材料參數	水膠比	0.25~0.60	0.26	0.24	0.24	0.26
	飛灰含量 (%)	0.00~50.00	21.35	0	23.52	0
	爐石含量 (%)	0.00~70.00	18.56	20.97	14.38	20.93
	矽灰含量 (%)	0.00~15.00	4.11	16.14	4.60	16.18

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、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 美國各地氯離子成長速率及最大表面氯離子濃度值歸納表

Zone	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 所示。

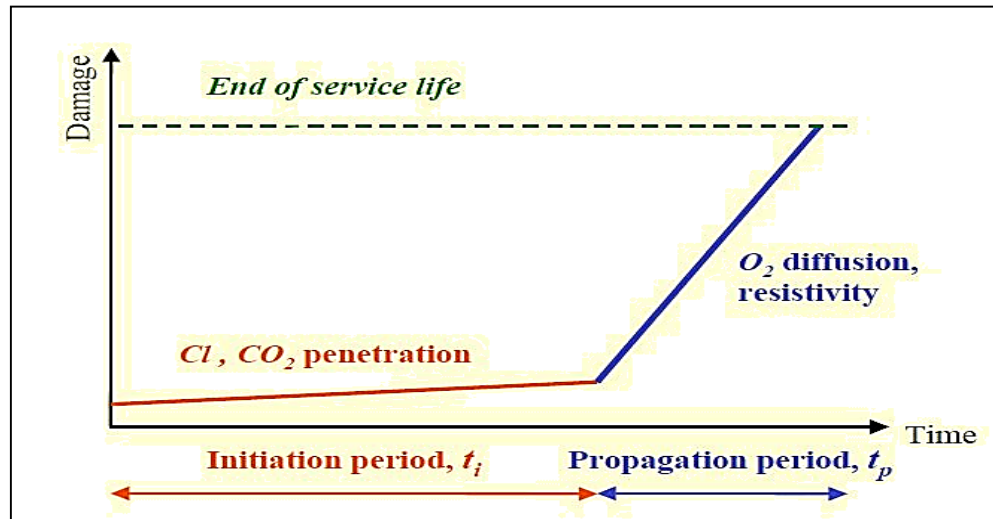


圖 2.10 服務年限(初始階段 t_i +腐蝕階段 t_p)

(三)計算與驗證

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(2.6)，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算法，所得濃度剖面並與 Life-365 結果比對。以 W40D55 為

例，由表 2.5 可以得知其中以差值法為最符合 Life-365 程式方法。

$$\sigma_{est} = \sqrt{\frac{\sum(Y-Y')^2}{N}} \quad (2.6)$$

其中，Y：真值

Y'：預測值

N：組數

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 55mm 之狀況(W40D55)進行濃度剖面計算，結果如圖 2.11，由圖中可見所發展差值法計算程序與 Life-365 結果相當吻合。

表 2.5 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

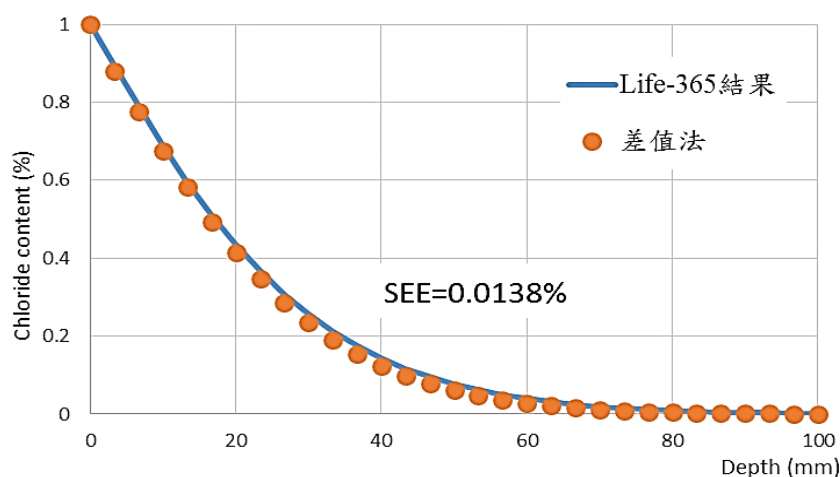


圖 2.11 代碼 W40D55 差值法與程式結果比較圖 (彭琦茵，2015)

十、服務年限推估模式

(一)表層氯離子

Ann et al. (2009)及 Song et al.(2008)量測試體氯離子濃度剖面時，由於混凝土試體表面受外界環境影響造成表層濃度較低，量測出的濃度剖面如圖 2.12 及圖 2.13，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，在受外界環境影響得到的氯離子濃度剖面，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。

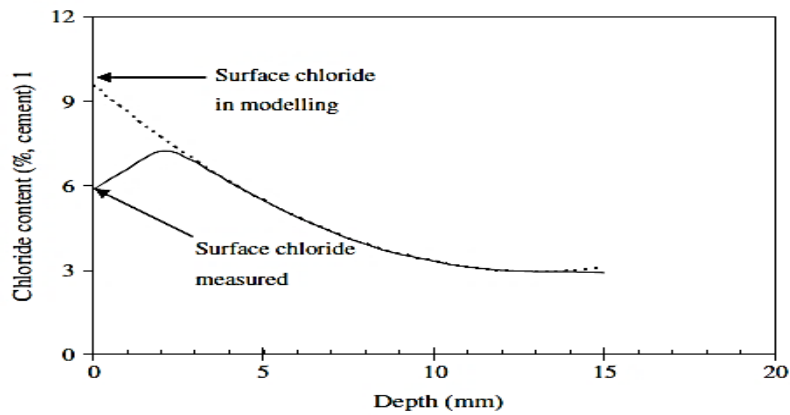


圖 2.12 實驗與推估模型之濃度剖面比較(Ann et al., 2009)

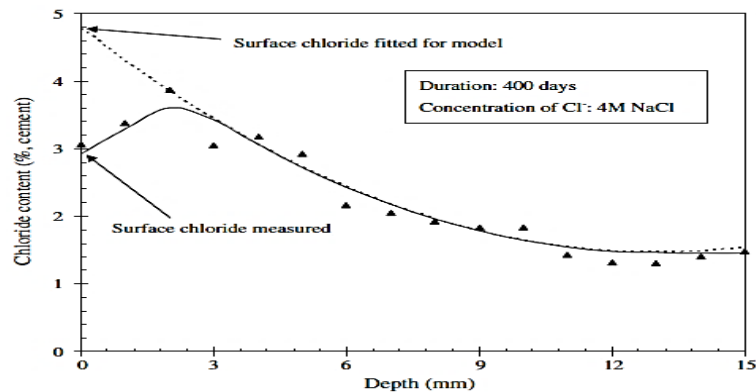


圖 2.13 實驗與推估模型之濃度剖面比較(Song et al., 2008)

Erik et al.(2003)使用不同實驗條件：(1)浸泡 26%氯化鈉溶液 2 小時，放置 65%相對濕度環境下養護 60 天，進行氯離子濃度滴定，如圖 2.14 所示；(2)連續浸泡 30 天之 3%氯化鈉溶液，即進行氯離子滴定，如圖 2.15 所示。Erik 發現試體離開含氯環境與測定氯離子試驗的時間間隔長短將影響表層氯離子濃度含量，原因在於離開含氯環境後，為與外界環境達到平衡狀態而造成表層濃度下降，因此試體若連續接觸含氯環境，並不影響表層的氯離子濃度，可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。

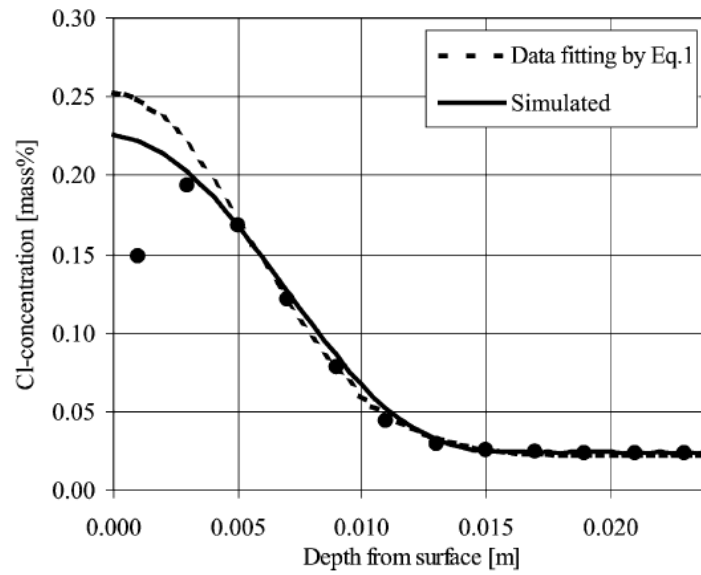


圖 2.14 無連續浸泡之氯離子濃度剖面圖(Erik et al., 2003)

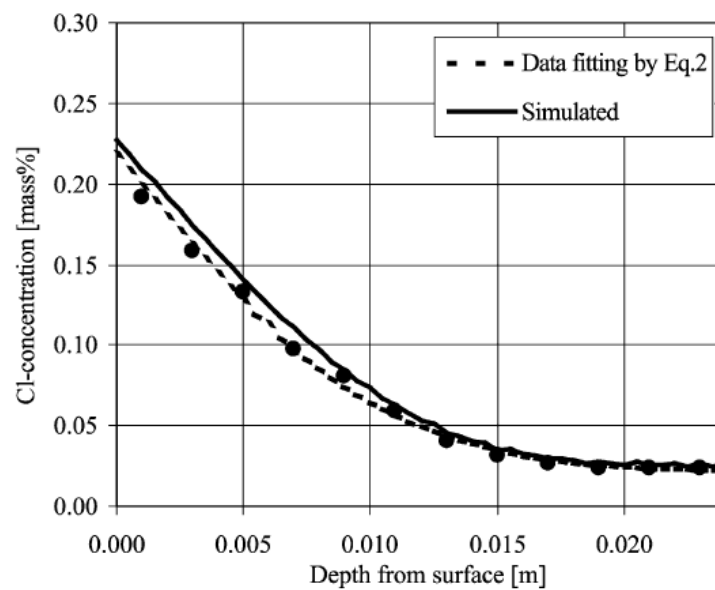


圖 2.15 有連續浸泡之氯離子濃度剖面圖(Erik et al., 2003)

(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(apparent diffusion

coefficient, D_{app})稱該齡期為總時間(total time, t_{total})，如圖 2.16 所示，其總時間為養護 28 天+浸泡氯化鈉時間。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(effective time, t_{eff})，故有效時間(t_{eff})相對應之擴散係數為瞬時擴散係數。

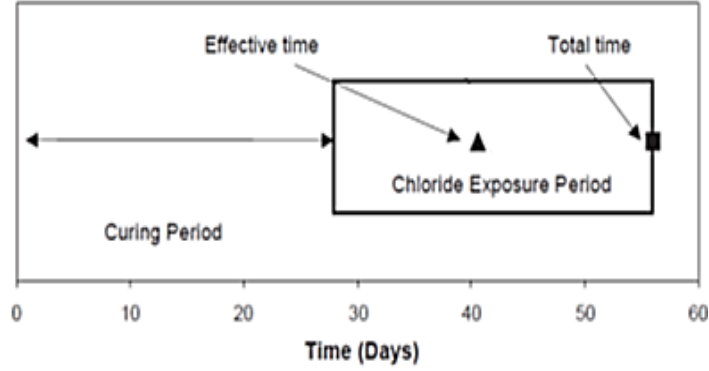


圖 2.16 各時間名稱之定義圖(Nokken et al., 2006)

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)。

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

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

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

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

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 在進行服務年限推估時，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(2.11)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 2.6。

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，將試體浸泡於氯化鈉水溶液，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 2.6 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，亦可使時間因子 m 值提高，因為較低的水膠比以及添加高含量的卜作嵐材料其混凝土孔隙結構較

為緻密，具有較少的孔隙，氯離子擴散路徑受阻故擴散速率下降較快，因此具有較高的時間因子 m 。

表 2.6 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 25%爐石粉取代	0.96
	8%矽灰取代 25%爐石粉取代	1.19

(四)表面氯離子推估方式

Kim et al.(2016)運用 ClinConc 比較實驗值與預測各時間點氯離子濃度，發現隨時間增加從表層至各深度之氯離子濃度也會隨之增加，並與預測曲線相關性良好，如圖 2.17 所示

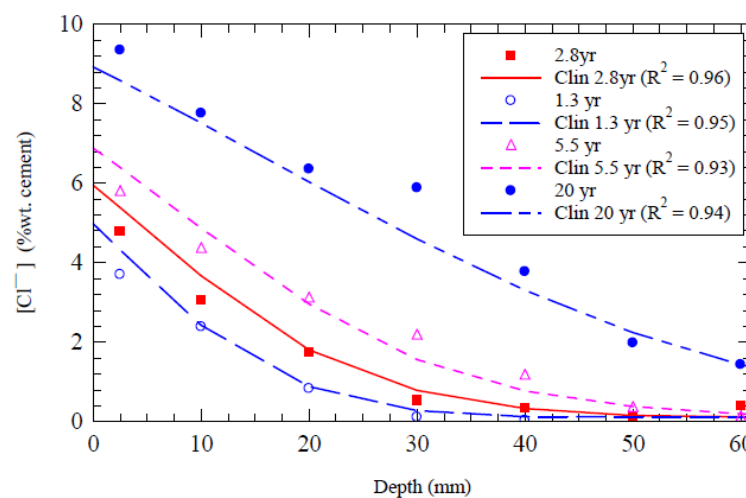


圖 2.17 各時間之實驗及推估濃度剖面圖(Kim et al., 2016)

Peng et al.(2016)使用不同類型混凝土來研究在自然或人工模擬環境下混凝土表面氯離子濃度隨時間的相關變化，如圖 2.18 所示，顯示了表面氯離子濃度會時間增加而增加，但會因為混凝土的水化作用及孔隙率而造成表面氯離子濃度不同。

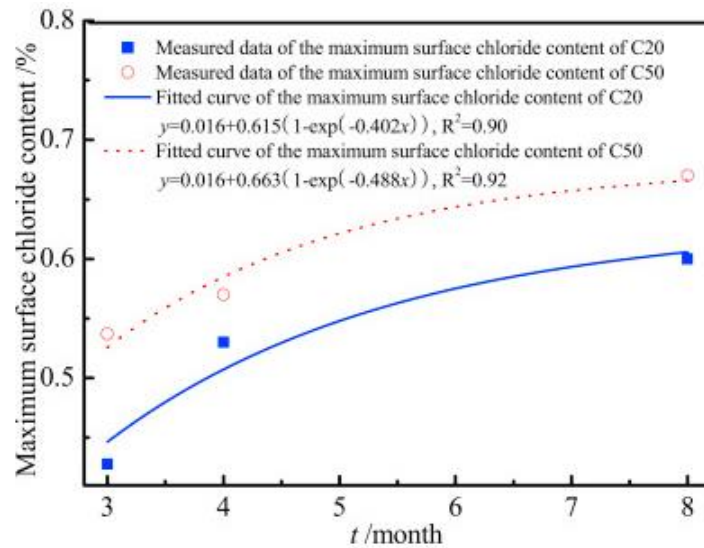


圖 2.18 表面氯離子隨時間變化圖(Peng et al., 2016)

Pack et al.(2010)使用兩種混凝土：(1)普通混凝土(OPC)；(2)高爐渣混凝土(GGBS)，暴露於濱海地區並量測不同時間點之表面氯離子濃度，如圖 2.19 所示，顯示表面氯離子濃度與時間的相關程度，並考量時間提出計算表面氯離子之方程式(2.12)

$$C_s(t) = \alpha [\ln(\beta t + 1) + k] \quad (2.12)$$

t 是以年為單位的暴露時間

α ， β 和 k 分別是膠結材料參數

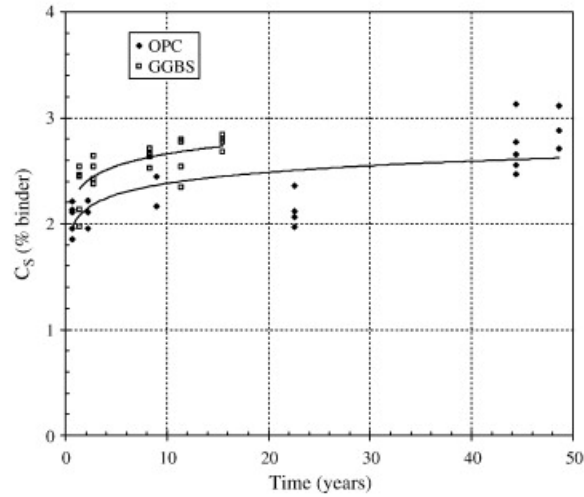


圖 2.19 表面氯離子隨時間變化圖(Pack et al., 2010)

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(2.13)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。

$$C_s = \alpha \ln(t) + \gamma \quad (2.13)$$

其中， α 、 γ ：材料參數

參、 研究方法與過程

一、 實驗材料

選擇最終處置工程障壁材料可能採用的混凝土配比，製作試體並進行高溫養護處理，以探討混凝土品質提升的效果。針對混凝土試體進行基本物理性質試驗，包括抗壓強度、孔隙率、氯氣吸附試驗、壓力下水貫入試驗、電阻率等。

由於低放射性廢棄物最終處置設施可能設置於濱海地區，為探討混凝土受氯離子入侵的行為，模擬氯離子於混凝土內部以單一方向進行入侵的長期試驗，藉以瞭解氯離子入侵的情形。

(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，其化學成份列於表 3.1 中。

(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，其化學成份列於表 3.1 中。

(三) 爐石

爐石為煉鋼廠在煉鐵過程中所產生的副產品，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，其化學成份列於表 3.1 中。

(四) 矽灰

矽灰為提煉含有矽金屬與鐵矽合金的礦物中所獲得的副產品。由於矽灰可與水泥水化所生成的氫氧化鈣發生卜作嵐反應而形成具膠結性的物質，補填粒料與漿體界面的孔隙，，有助於降低孔隙量，增加混凝土的緻密性。本文所使用矽灰之化學成分列於表 3.1。

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

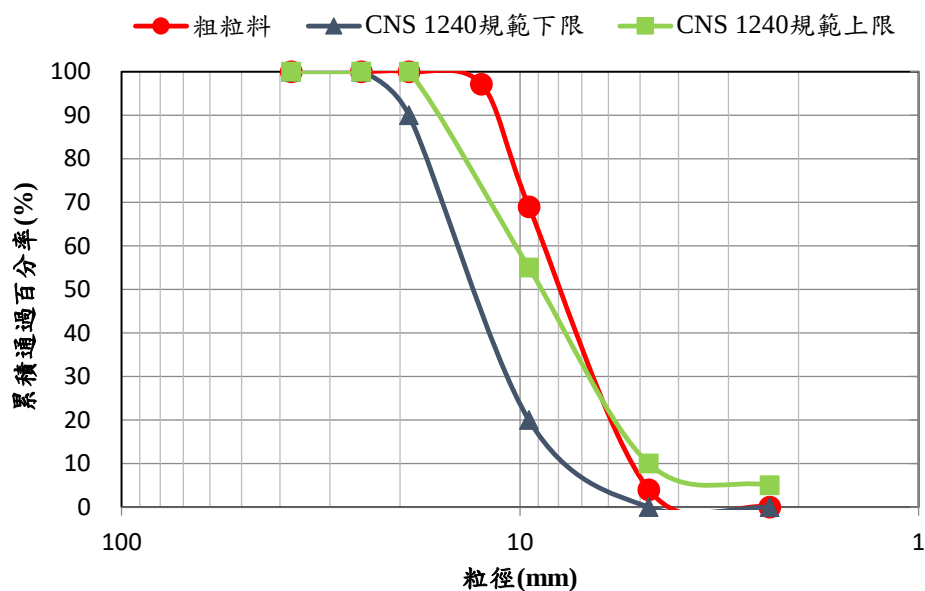


圖 3.1 粗粒料粒徑分佈曲線圖

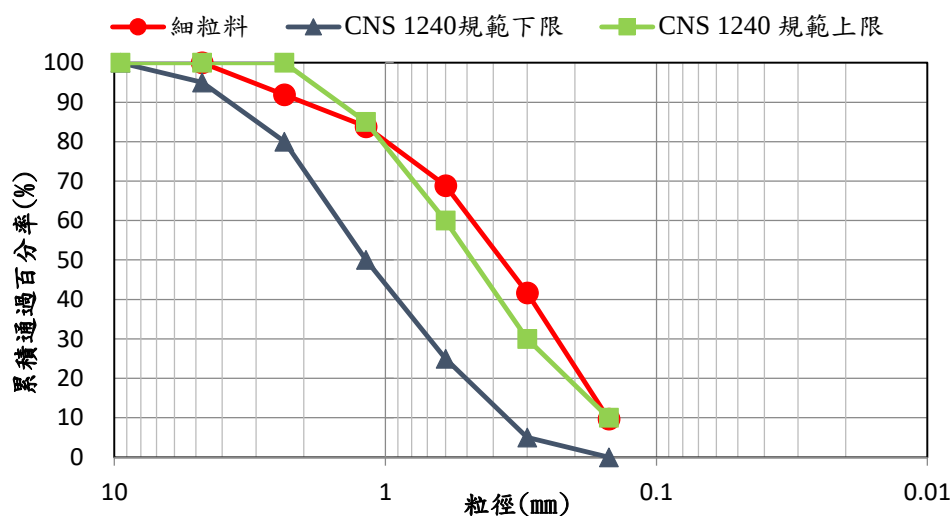


圖 3.2 細粒料粒徑分佈曲線圖

(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)	調配氯離子浸泡試驗溶液	日本小島公司(試藥級)
濃硝酸(HNO ₃)	氯離子含量試驗的藥劑	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

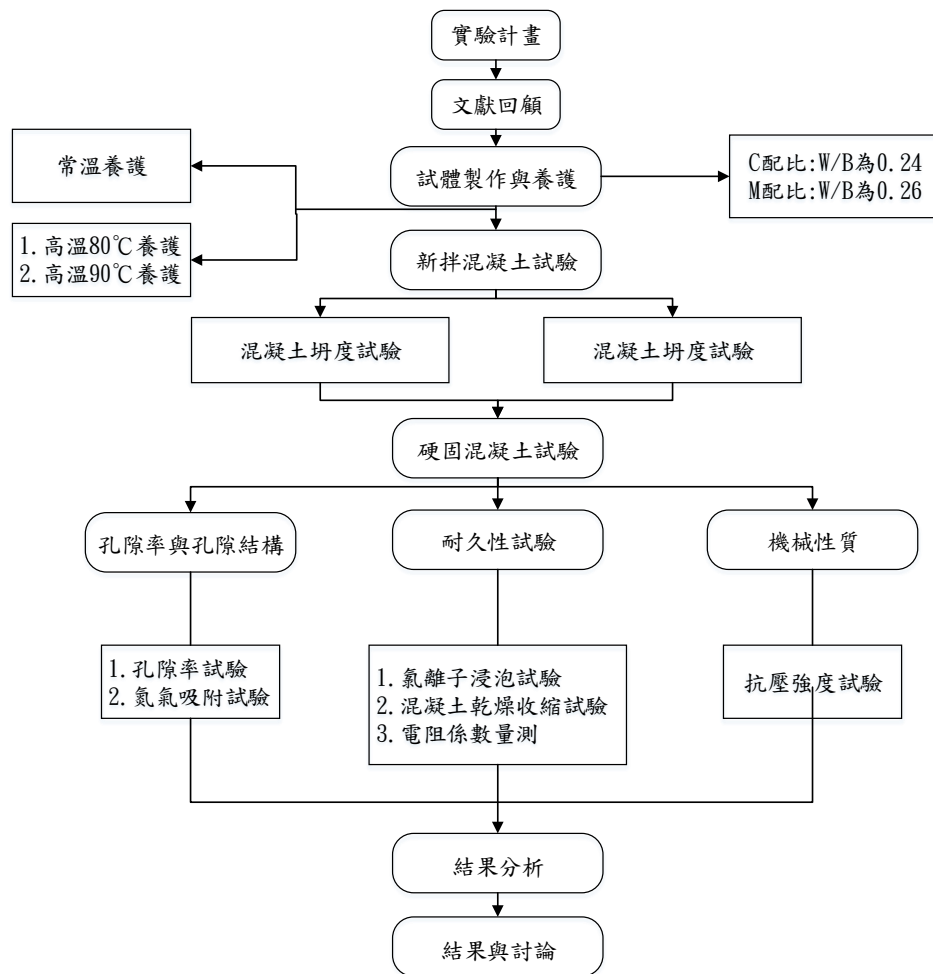


圖 3.3 流程圖

為探討高溫養護方式對混凝土的影響，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，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，進行長時間的混凝土耐久性試驗，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 90°C 之不同養護時間養護後，同時進行硬化

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是否有因為二次水化反應而影響孔隙大小及減少數量。

因不同養護方法，可能會影響混凝土之乾燥收縮性質，而過量的收縮可能會造成混凝土內部的裂縫生成，進而降低混凝土之耐久性，因此以乾燥收縮試驗檢測經高溫養護過後的混凝土其收縮特性。抗壓強度試驗為檢測混凝土品質較簡易的方式，若混凝土之抗壓強度不良，則耐久性不佳的機率也較高，因此藉由抗壓強度試驗來檢測混凝土品質，並由抗壓強度數值來檢視混凝土的強度是否有隨著水化反應及齡期的增加而有增強的趨勢。而表面電阻率試驗則可以快速評估混凝土的耐久性，電阻值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，則會增加有害物質進入混凝土內部的難度。

三、 實驗流程

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，在先前研究團隊所使用 ASTM C1556 的數據基礎下，為探討是否有其他方式能提高混凝土耐用度，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)、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，主要添加的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，利用硬固後的混凝土接受不同的養護方式，待達到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齡期 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的情況，針對其擴散行為進行探討。依據 ASTM C1556 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 進行氯離子含量測定，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混凝土容器(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. 水含藥劑先放入拌合容器，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	26.0	747.2	936.1	117	135.7	23.7
M	0.26	603.4	-	200.8	155.2	-	1094.3	-	253.0	10.9

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

合水量應為配比中 water+water(ssd)-藥劑重量

(二)水泥漿塊配比

將可能使用於承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，如下表所示，量測其孔隙率。

表 3.5 水泥漿塊配比

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	至預定齡期
90-2D	90	2
90-3D	90	3

五、實驗方法

(一)氯離子浸泡試驗

氯離子浸泡試驗參照 ASTM C1556，內容如下所述

- 1.將表 3.4 所提供的配比製作成 $\varnothing 10 \times 20$ cm 混凝土試體，浸泡在飽和石灰水中。
- 2.到達試驗齡期後將試體取出，用自來水刷洗標本，並分為三部分如圖 3.4 所示，第一部分為浸泡氯化鈉溶液，規定厚度必須大於 75 mm，而第二部分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 3.4 第一部分 $\varnothing 10 \times 7.5$ cm 混凝土試體，利用環氧樹脂與混凝土試體緊密結合，須注意切割面不需塗上環氧樹脂。
- 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 24hr 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 3.5 所示。

6.將到達試驗齡期的試體取出，並待試體乾燥後使用研磨機將試體分層研磨，而深度如圖 3.6 所示。要量測初始值的試體研磨成一條直線，每層磨 2mm，共磨五層，將其粉末均勻混和裝袋；將有浸泡過氯化鈉溶液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 3.7 所示。

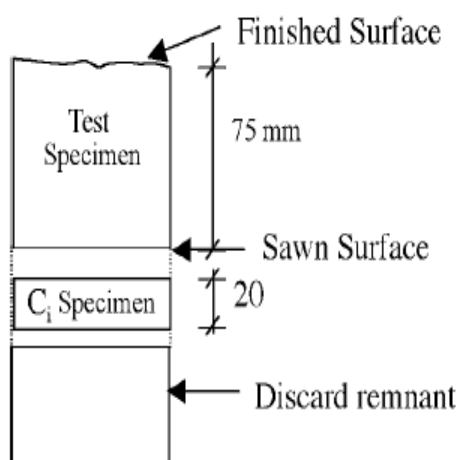


圖 3.4 試體的切割尺寸圖

圖 3.5 混凝土浸泡 NaCl 溶液示意圖

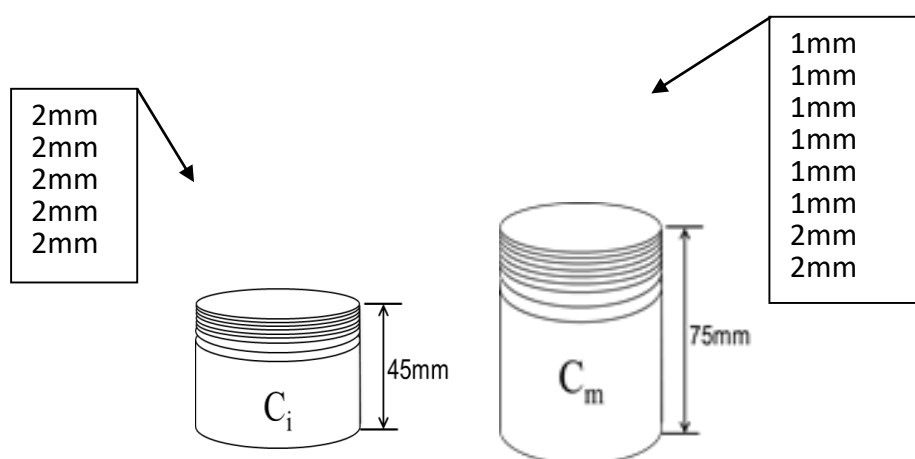


圖 3.6 試體分層示意圖



(a)



(b)

圖 3.7 研磨後的試體與其分層粉末

總氯離子含量試驗參照 ASTM C 1152，步驟如下所述：

- 1.取出 5g 粉末於 250ml 燒杯中，加入 37.5ml 蒸餾水，輕微搖晃使粉末與蒸餾水融合。
- 2.加入 12.5ml 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，需注意不可過度沸騰，否則可能會導致氧化物揮發，故使液體沸騰 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。
- 6.取 37.5mL 煮沸蒸餾水逐步使用，直到試液的泥漿完全沖洗至過濾紙上。
- 7.將濾液倒入燒杯中，過濾完的最終濾液約為 87.5 ml。
- 8.使用 0.05N AgNO₃ 進行滴定，當電位差值達到最大時，表示已達滴定終點，得到此數據後利用公式求其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

(二)漿體孔隙率試驗

製作水泥漿試體，尺寸為 2.5×2.5×1.25 cm 之試體，如圖 3.8 所示。分別測定 7、28、90、183 及 365 天之孔隙率數值並參照 ASTM C642-13，步驟如下：

- 1.到達試驗齡期後取出試體，放入烘箱 24hr，烘箱溫度為 $110^{\circ}\text{C}\pm 5$ ，待試體冷卻後秤其重量，直至恆重小於 0.5%，即得烘乾重(代號 A)。
- 2.將試體浸泡於水中，不少於 48hr，直至重量變化小於 0.5%，即得浸泡水中的面乾內飽和重(代號 B)。
- 3.將試體放入水中煮沸 5 小時，煮沸完成後等待冷卻，冷卻的時間不少於 14 小時，即得浸泡與煮沸的面乾內飽和重(代號 C)。
- 4.將試體取出並放入水中秤重，即得浸泡與煮沸的水中重(代號 D)。



圖 3.8 孔隙率試驗試體

(三)混凝土孔隙率試驗

製

作

1.試體到達齡期後將其取出，放入溫度 $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 烘箱 24 小時冷卻後秤其重量，直至恆重小於 0.5%，即得烘乾重 (代號 A)。

ϕ

1

0

*

2

- 2.再將烘乾之試體浸泡於真空環境的水中，不少於 48 小時，直至恆重小於 0.5 %，即得浸泡水直到面乾內飽和重(代號 B)。
- 3.將其試體進行煮沸 5 小時，等待冷卻不少於 14 小時，即得浸泡與煮沸的面乾內飽和(代號 C)。
- 4.最後將試體取出秤水中重，即得浸泡與煮沸的水中重(代號 D)。



圖 3.9 孔隙率試驗圓柱試體

(四)氮氣吸附試驗(ASAP)

製作水泥漿試體，試體尺寸為 $2.5 \times 2.5 \times 1.25$ cm，如圖 3.8 所示。到達試驗齡期後，先將待測樣品放入 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 的烘箱內約 24 小時，藉以去除殘留於樣品上之水分，並透過研磨以得到通過#30 篩之粉末，最後置入 77 K 之氮氣吸附儀進行孔徑大小分佈之量測。

(五)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 25mm 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。

(六)硬固水泥砂漿乾燥收縮試驗

本實驗參考 CNS11056 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。

將水泥砂漿灌入試體尺寸 $25 \times 25 \times 285 \text{mm}$ 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，經過 24 小時後才進行脫模，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。

避免水分無法散失，存放於相對濕度 $50 \pm 2\%$ 、溫度 23°C 環境中乾養護，並量測各齡期之長度變化量，以計算其乾縮率。

(七)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，再使用電阻儀予以紀錄所量測之電阻值，量測方法如圖 3.10 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並清潔表面，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 度開始依序量測後，計算平均電阻率。

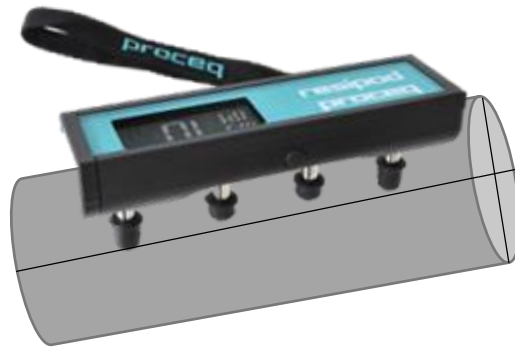


圖 3.10 混凝土試體電阻係數量測示意圖

(八)鋼纖維分佈影像分析軟體(Imagej)

本研究試驗方法如圖 3.11 所示，將 $\varnothing 10 \times 20\text{cm}$ 的試體切成 $\phi 10 \times 5\text{cm}$ ，劃分不同區塊以進行分析，並將圖像轉換成對比分明的圖像，利用影像分析，計算出面積內的鋼纖維數量，影像分析軟體(Imagej)試驗步驟如下：

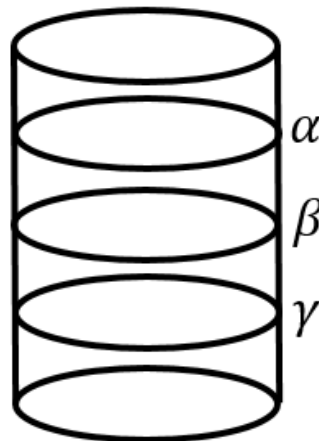


圖 3.11 混凝土試體切割方式

- 1.以高畫素相機拍攝試體照片。
- 2.設定程式中的比例尺。
- 3.利用色差選取試體鋼纖維的部分。

4.設定選取鋼纖維面積的大小。

5.計算鋼纖維所占的面積及數量。

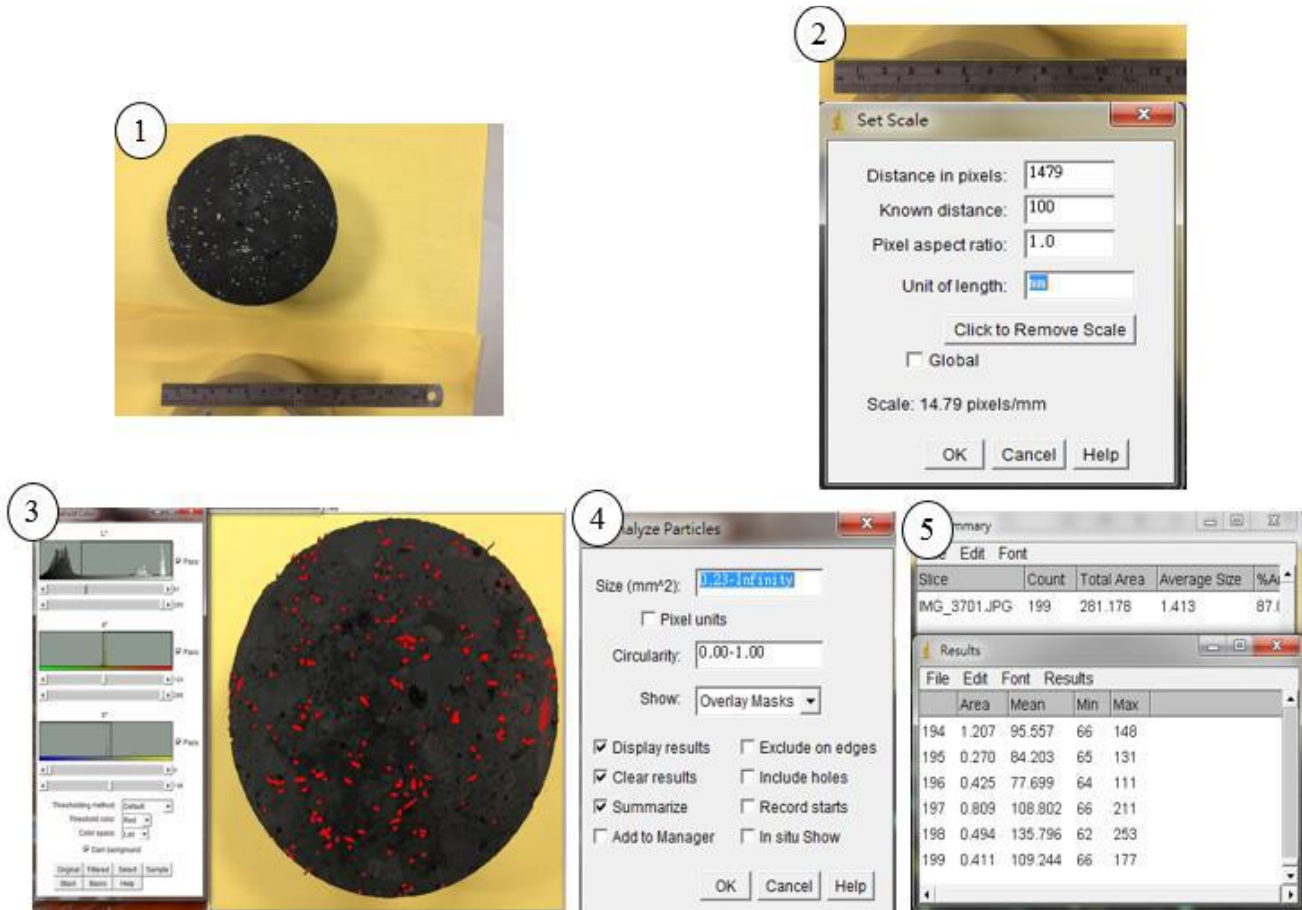


圖 3.12 Imagej 試驗步驟

(九)水貫入深度試驗

依 BS EN 12390-8 規範，製作尺寸為 $\varnothing 15 \times 10 \text{ cm}$ 的混凝土圓柱試體，利用固定水壓施加於試體面，使水滲透進試體內部，待試驗結束後再將試體進行劈裂並量測水的最大貫入深度，試驗結果以 mm 表示，試驗步驟如下：

- 1.待混凝土試體養護至預定齡期後，擦拭其外部水分並放置於模具上，於鋼板與試體面之間放置直徑 7.5 公分的密封環，並將鋼板鎖緊及以水平氣泡確認裝置是否水平。
- 2.於試體頂面利用氮氣施加 $500\pm 50\text{kPa}$ 水壓，持續 72 ± 2 小時。
- 3.將試體利用劈裂試驗座從中心劈開，以直尺量測試體的最大水貫入深度，讀數單位以 mm 表示。

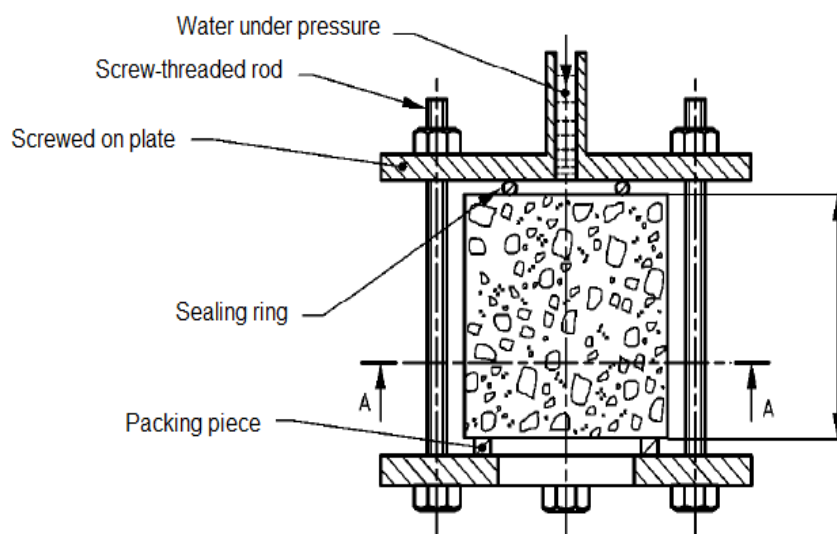


圖 3.13 水貫入深度試驗試體裝置示意圖(BS EN 12390-8)

肆、 主要發現與結論

一、 混凝土坍度與凝結時間

進行坍度試驗結果如下圖所示，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 配比為 0 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 配比有搗實困難之問題，因而易於發生蜂窩的情況，但在製造試體時因有震動台之幫助，所以試體製作並不會出現蜂窩之現象。



圖 4.1 M 配比坍度試驗



圖 4.2 C 配比坍度試驗

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，比一般水泥砂漿凝結時間稍長一些，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變慢。

二、 抗壓強度試驗

抗壓強度是用來判斷混凝土品質的重要依據之一，一般以抗壓強度作為衡量混凝土品質的指標試驗，本研究的目的是在於比較不同的養護方式對混凝土力學性質之影響。

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並比較 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。

觀察使用高溫浸水養護方式的試體抗壓強度，如圖 4.3、4.4 所示，結果顯示熱養護試體之抗壓強度，其早期強度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，而值得注意的是經熱水養護的試體其彼此的強度差異並沒有特別顯著。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。

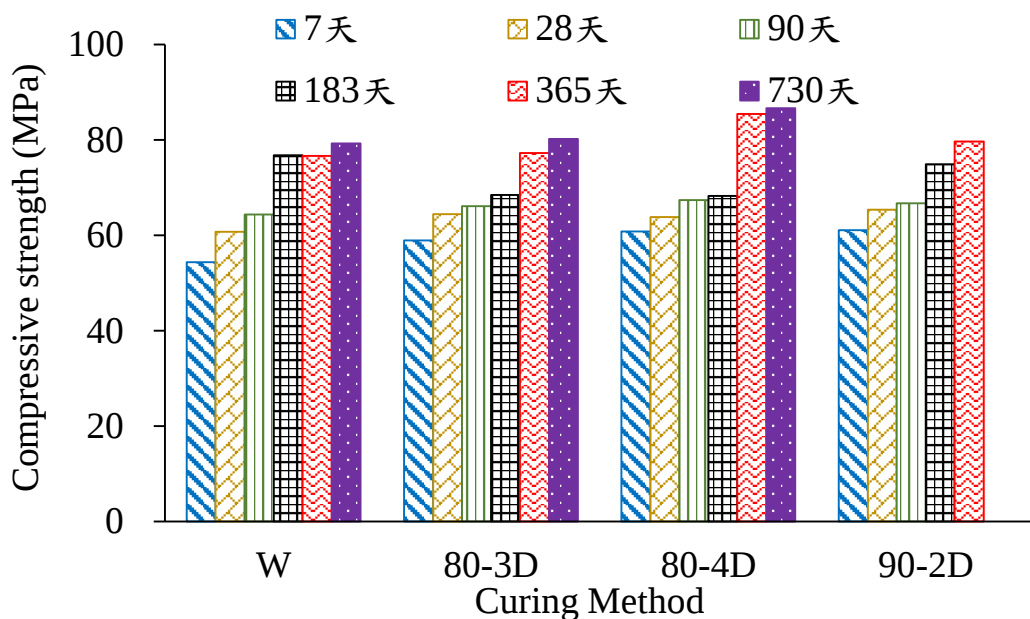


圖 4.3 C 配比各養護方式對抗壓強度之影響

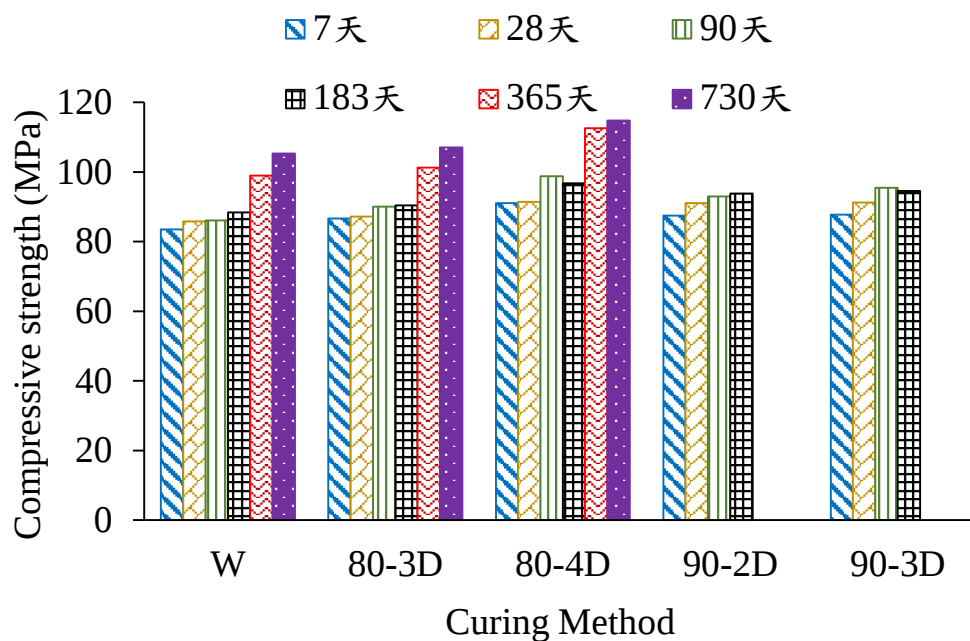


圖 4.4 M 配比各養護方式對抗壓強度之影響

三、 混凝土乾縮試驗

乾縮試驗主要為量測隨齡期增加的混凝土體積變化量，若混凝土乾縮率高則可能因體積變化而產生裂縫，影響混凝土障壁功能。

由實驗結果圖 4.5、4.6 可以看出，混凝土經過熱養護後乾縮率降低，與常溫養護的試體相比有明顯減少的現象。

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。

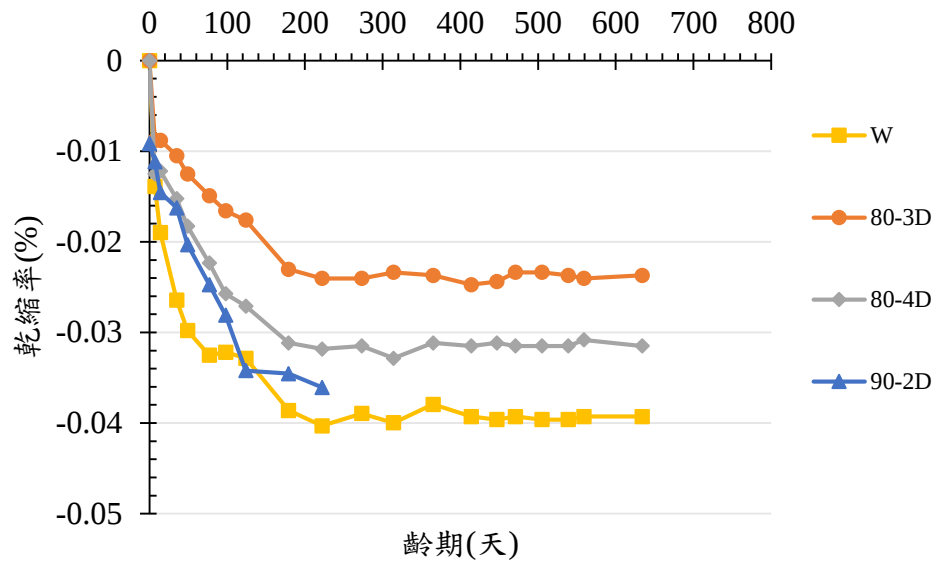


圖 4.5 C 配比不同養護方式與乾縮率關係圖

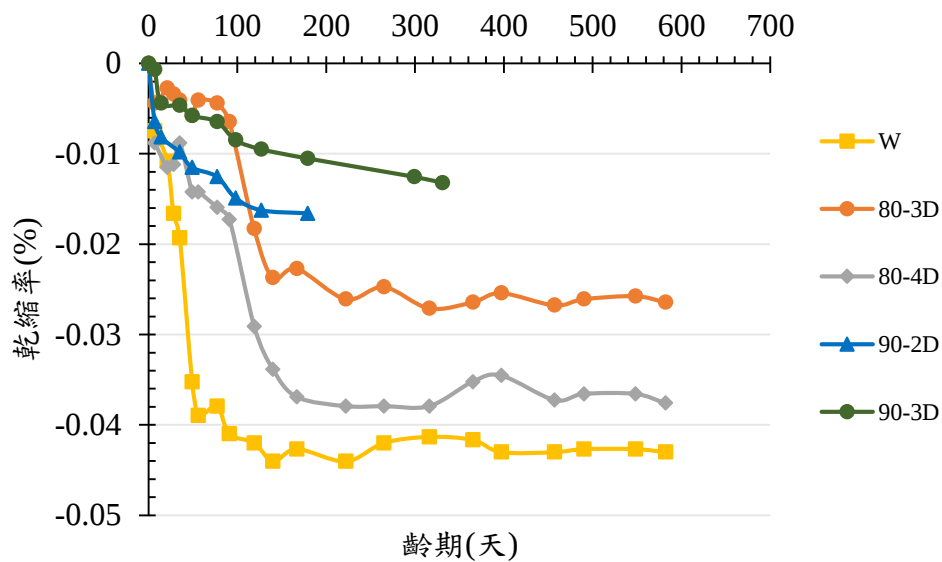


圖 4.6 M 配比不同養護方式與乾縮率關係圖

四、氯離子浸泡分層濃度

由氯離子濃度剖面圖，可明顯看出養護齡期越長之混凝土受氯離子入侵時，越能夠將氯離子有效的阻擋在表層，使氯離子無法快速向內擴散，因混凝土水化程度較完全，使氯離子較難向內部入侵。

比較經高溫養護後的試體，在早期時，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反應增快，提升早期阻擋氯離子滲透的能力，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。

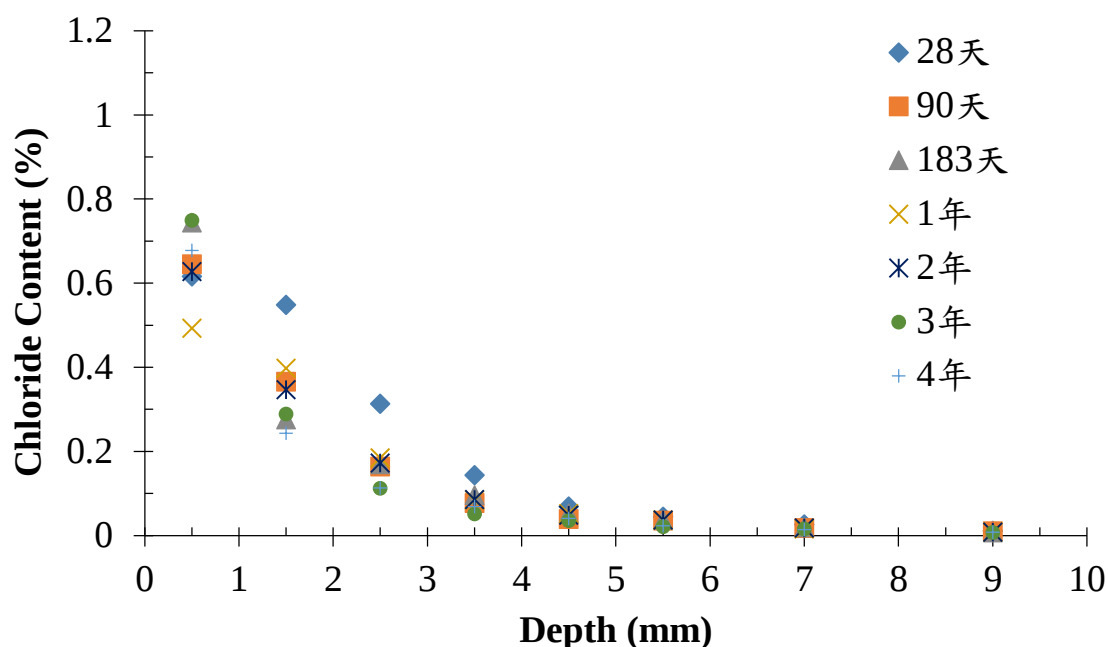


圖 4.7 C 配比常溫養護各齡期分層濃度圖

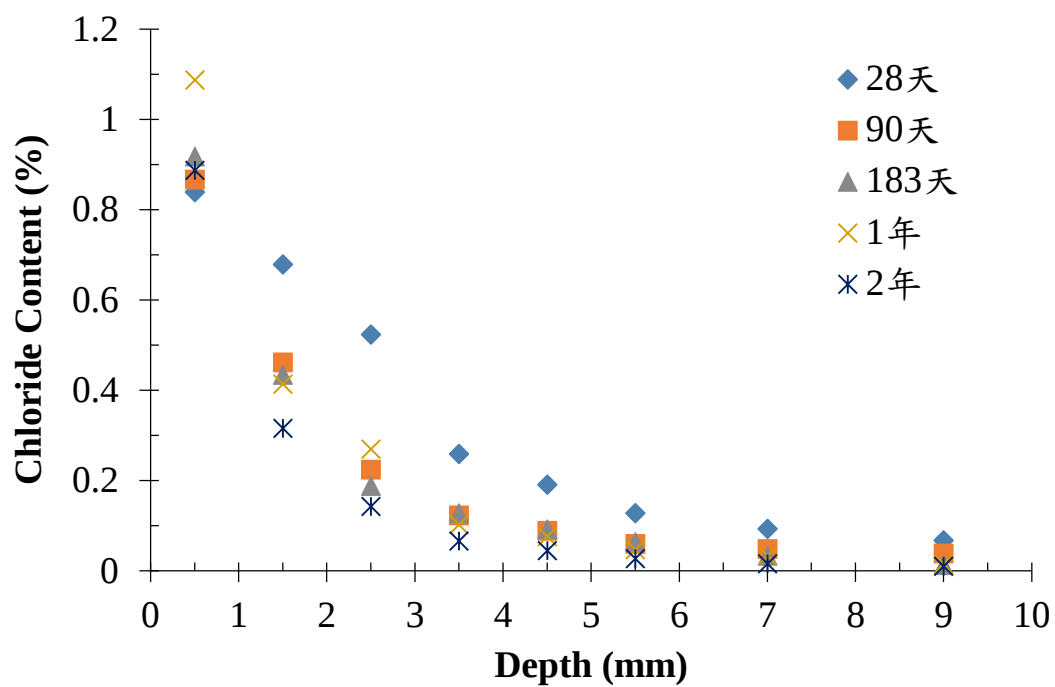


圖 4.8 C 配比 80°C養護三天各齡期分層濃度圖

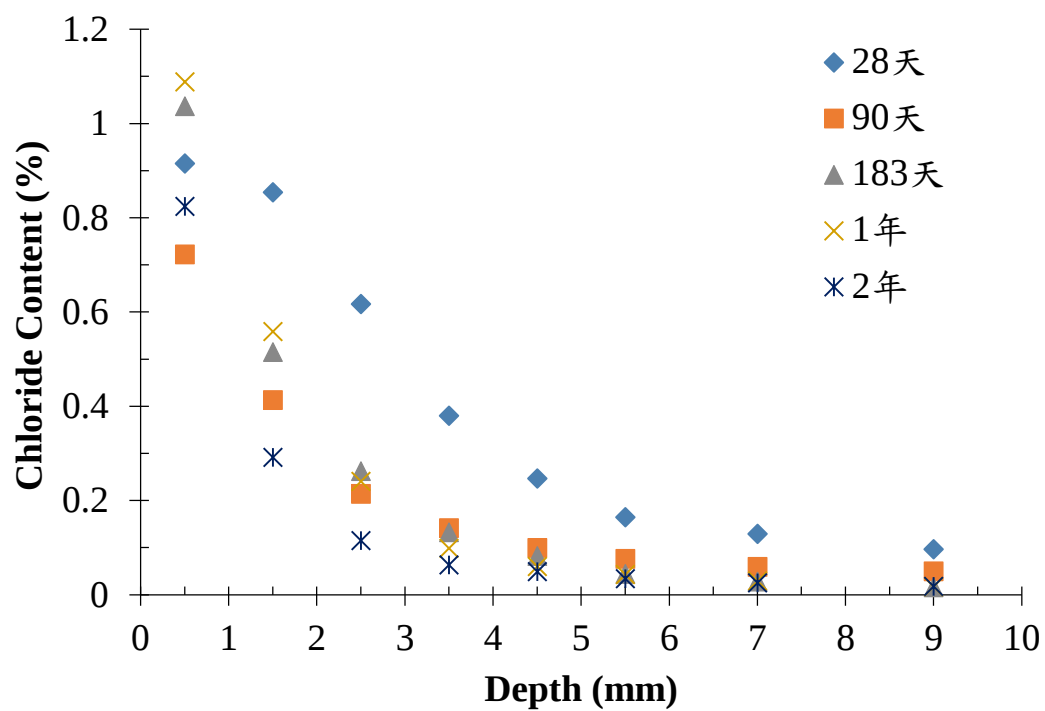


圖 4.9 C 配比 80°C養護四天各齡期分層濃度圖

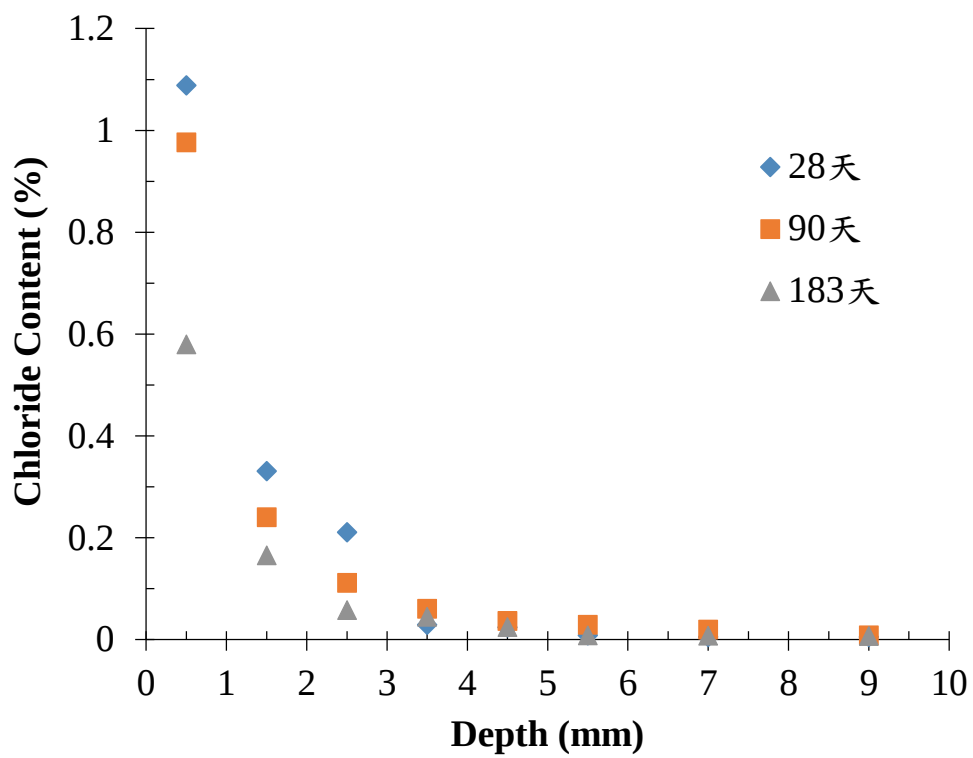


圖 4. 10 C 配比 90°C養護兩天各齡期分層濃度圖

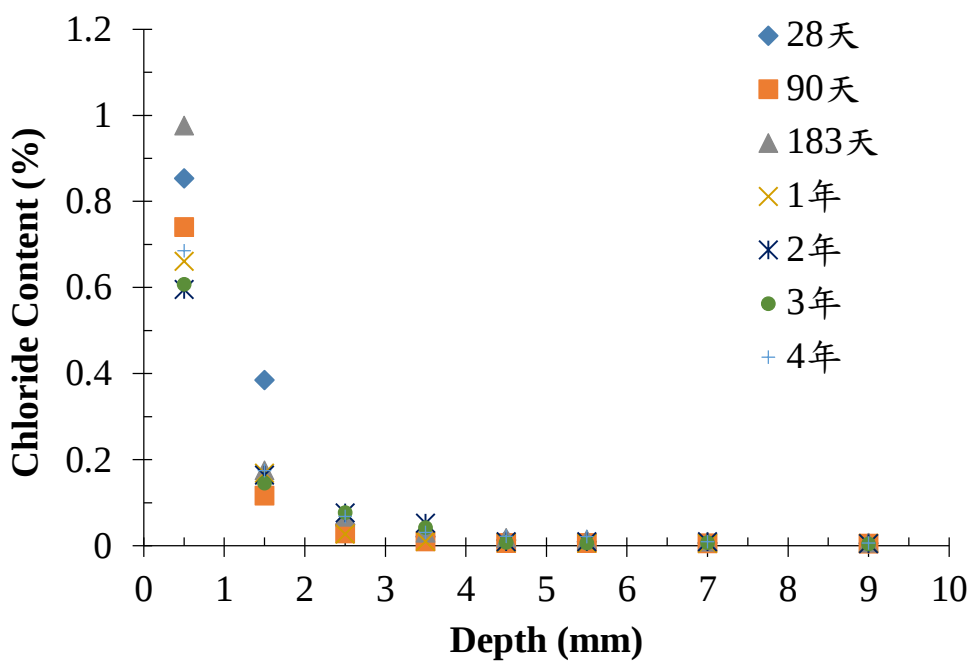


圖 4. 11 M 配比常溫養護各齡期分層濃度圖

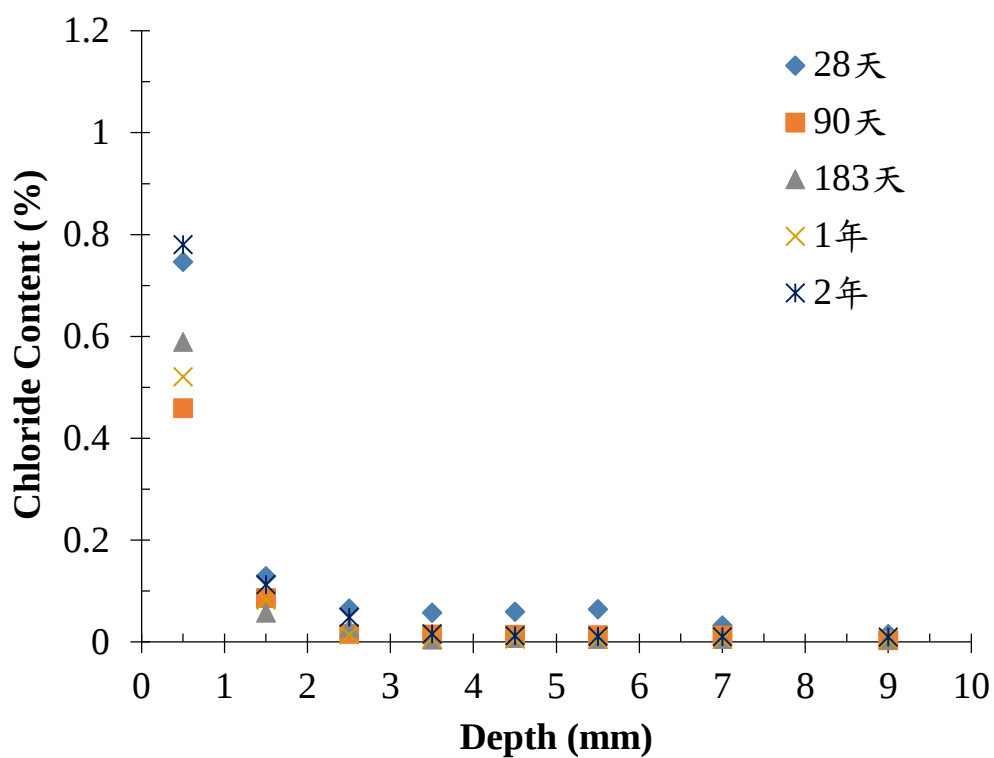


圖 4.12 M 配比 80°C 養護三天各齡期分層濃度圖

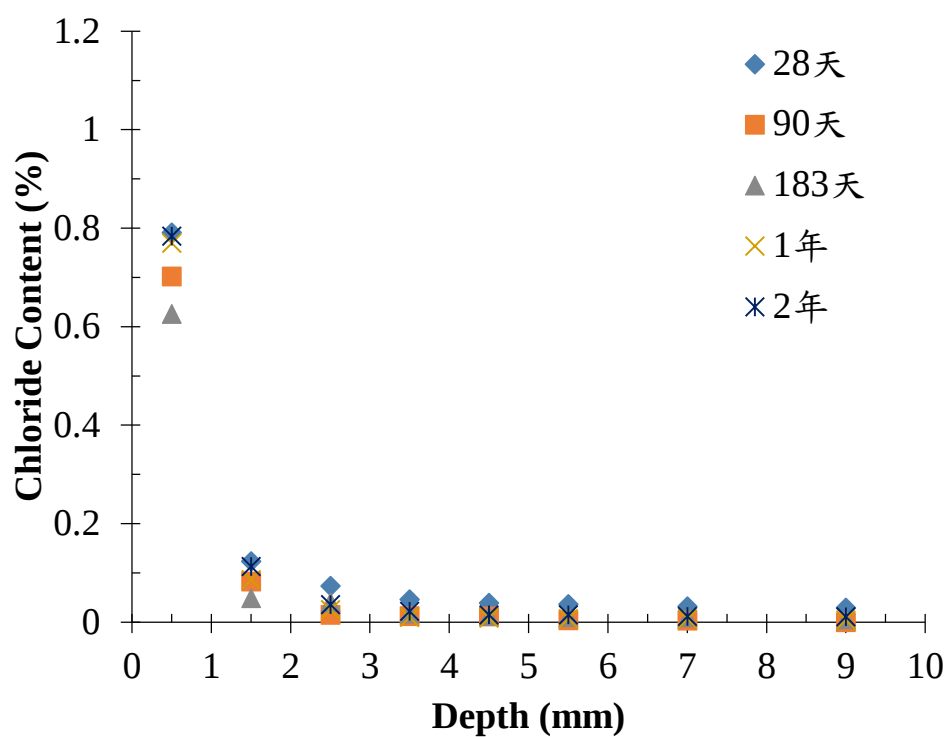


圖 4.13 M 配比 80°C 養護四天各齡期分層濃度圖

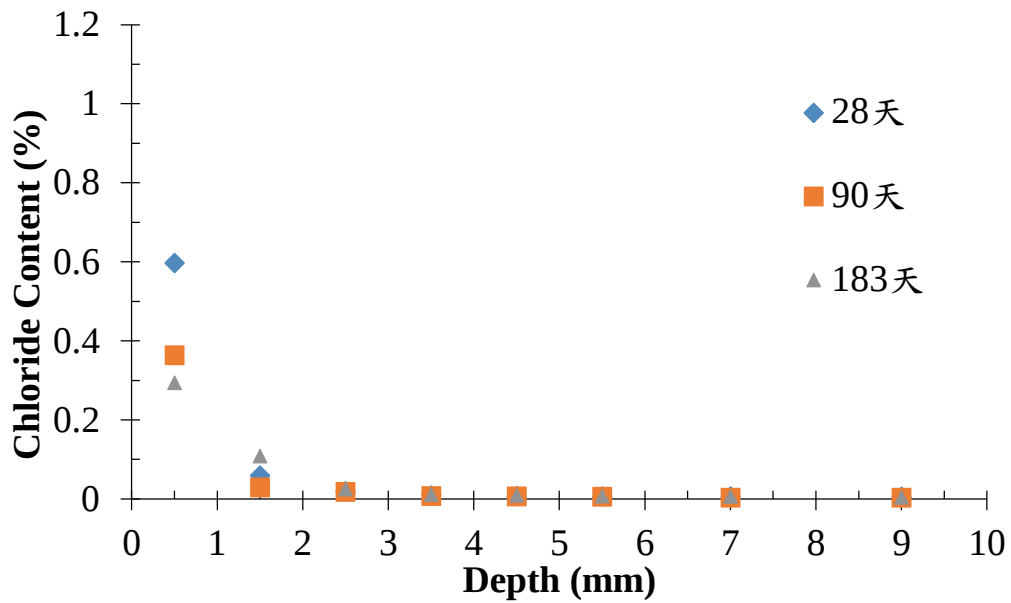


圖 4.14 M 配比 90°C 養護兩天各齡期分層濃度圖

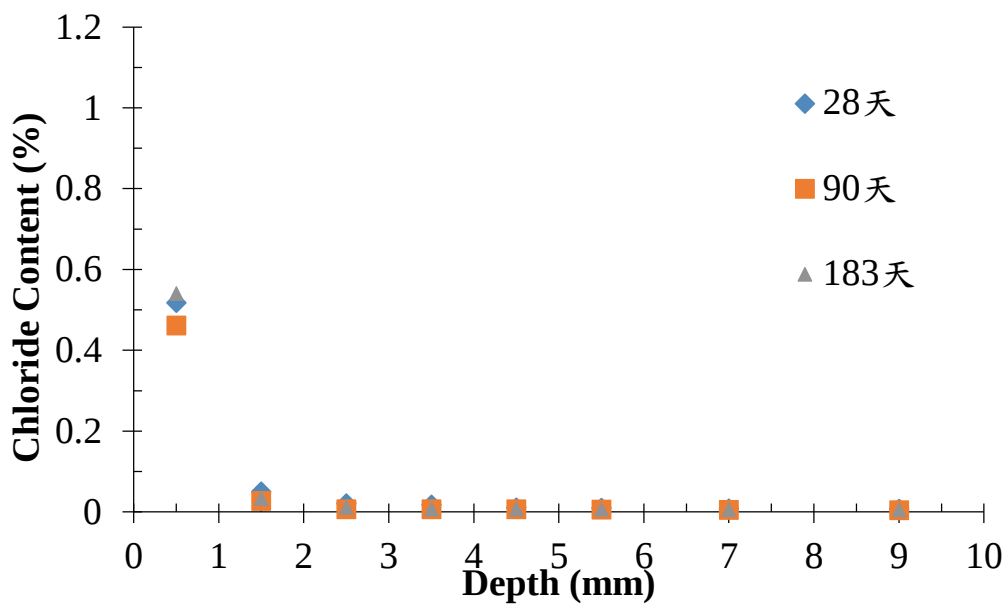


圖 4.15 M 配比 90°C 養護三天各齡期分層濃度圖

五、 配比抗氯離子劣化速率模式

(一)瞬時擴散係數 D 與表面氯離子濃度 C_s

將實驗數據代入費克第二定律後求得氯離子濃度剖面及對應之擴散係數與表面氯離子濃度，各不同時間之結果如表

5.1 所示。利用費克第二定律求得養護不同齡期試體於不同深度的氯離子含量，稱為預估值，建立預估值與實驗數據兩者間的相關性求出判定係數 R^2 ，如圖 5.1、5.2 所示，以第 4 年數據為例，可以看到配比 C 及配比 M 之 R^2 皆大於 0.7，表示實驗數據與費克第二定律之間有很高的吻合度。

表 5.1 配比 C 及 M 瞬時擴散係數及表面氯離子濃度迴歸分析結果

配比名稱	浸泡時間 (days)	C_s (% weight concrete)	D ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	R^2
C	28	0.768	1.360	0.973
	90	0.798	0.651	0.997
	183	0.940	0.446	0.967
	365	0.610	1.050	0.980
	730	0.763	0.689	0.996
	1095	1.012	0.343	0.994
	1460	0.910	0.342	0.983
M	28	1.187	0.325	0.994
	90	1.294	0.124	0.999
	183	1.644	0.139	0.996
	365	1.032	0.181	0.999
	730	0.874	0.226	0.986
	1095	0.926	0.193	0.987
	1460	1.044	0.197	0.994

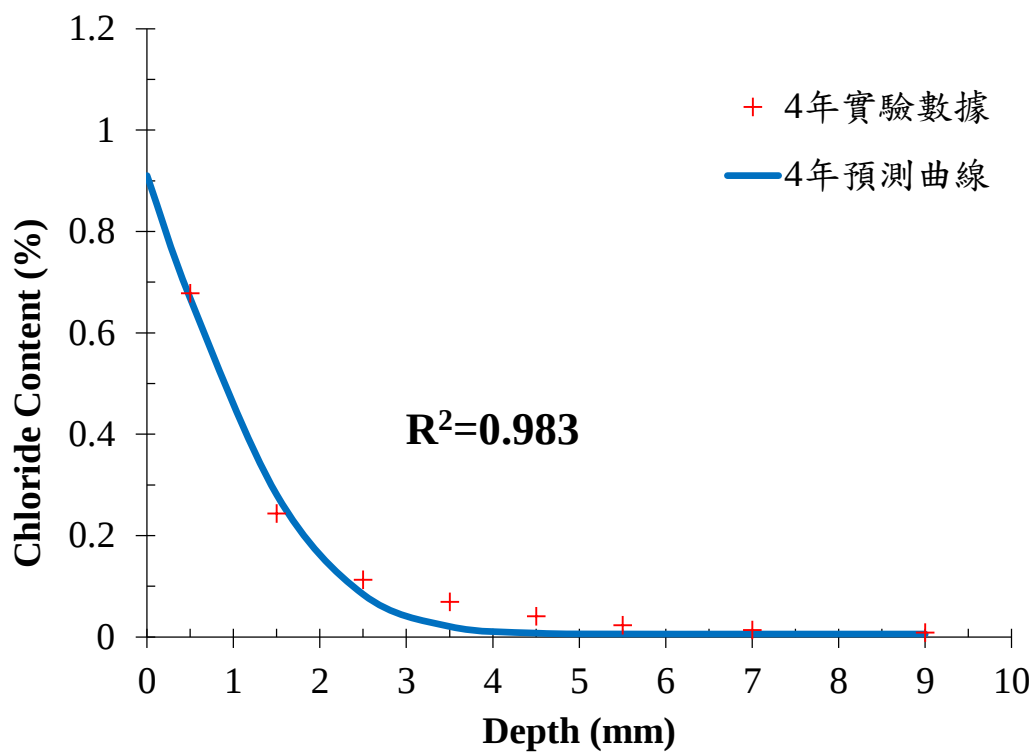


圖 5.1 配比 C 實驗數據與費克第二定律預測曲線

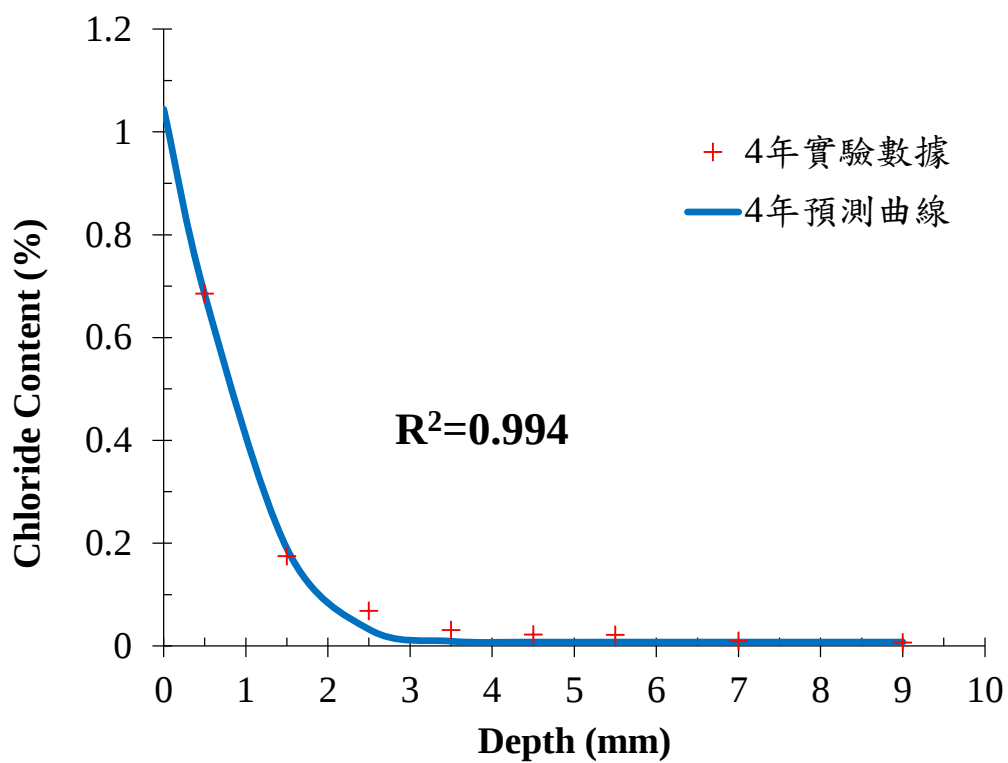


圖 5.2 配比 M 實驗數據與費克第二定律預測曲線

(二)擴散係數關係圖

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於飽和石灰水養護到預定齡期，再浸泡於 $165 \pm 1 \text{ g/L}$ 氯化鈉溶液中，待浸泡 36 天後，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。常溫養護試體於齡期 28 天、90 天、183 天、365 天、2 年、3 年及 4 年。

以下為各齡期瞬時擴散係數與表面氯離子關係圖，隨齡期越長水化程度增加，故能夠將氯離子有效的阻擋在表層，無法快速向內擴散，其瞬時擴散係數隨齡期增加而下降。表面氯離子濃度隨時間增加而遞減，其原因為隨齡期增加其水化程度增加，所以表面氯離子才會呈現遞減的狀態。

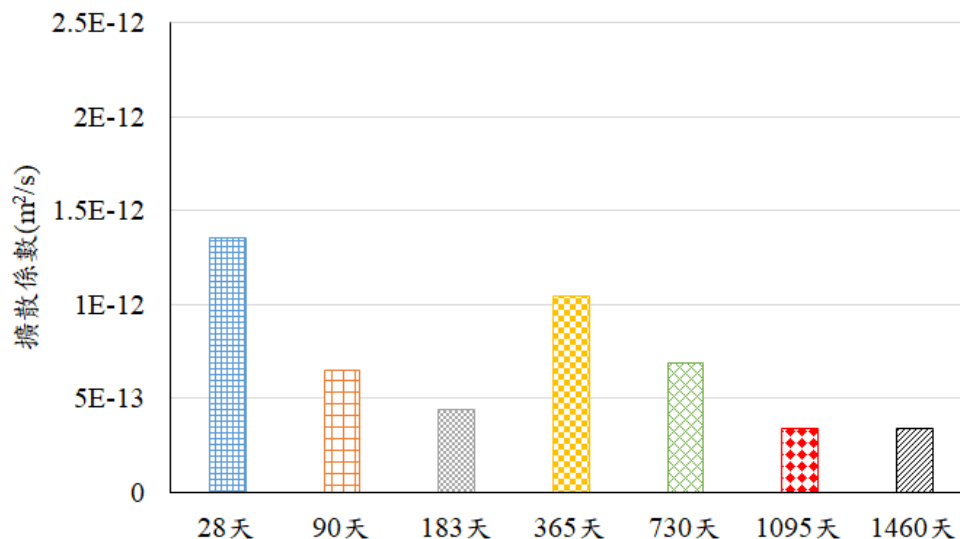


圖 5.3 配比 C 各齡期與瞬時擴散係數關係圖

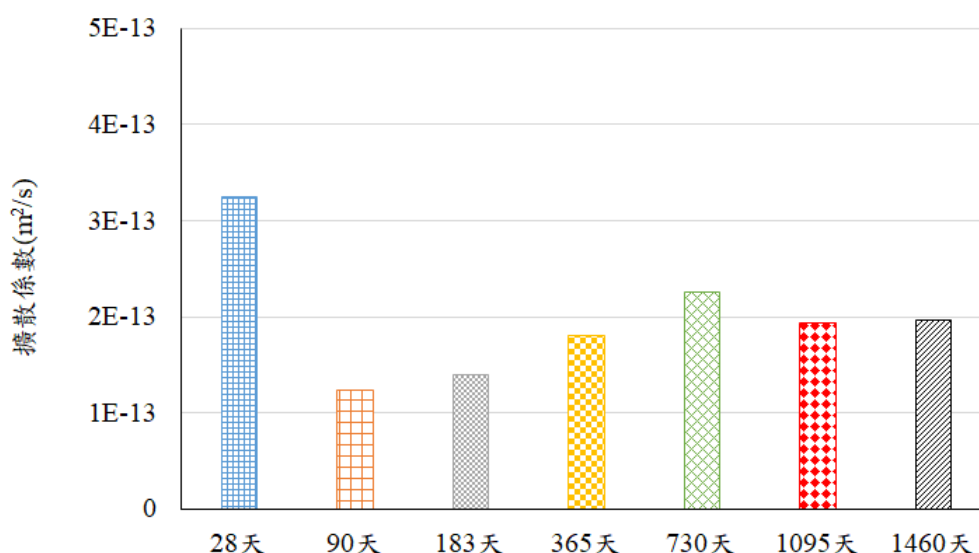


圖 5.4 配比 M 各齡期與瞬時擴散係數關係圖

(三)擴散係數與時間因子 m 值計算

依據 ASTM C1556 方法進行量測，其試驗結果所測得之氯離子含量即為試體於該齡期瞬時擴散係數的氯離子濃度剖面，因此不需要進行有效時間的轉換。表 5.2 為配比 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 5.5 與圖 5.6，得到配比 C 時間因子 $m=0.319$ ；配比 M 時間因子 $m=0.016$ ，時間因子 m 為試體隨著齡期增加其擴散係數下降的速率，可以發現配比 M 相當緻密，試體在短時間內即達到很低的擴散係數，這點可由表面氯離子濃度數據看出，多數氯離子已被擋在外層，以致其時間因子相當低，也顯示本研究所使用的配比可以提供相當好的阻擋氯離子能力。

表 5.2 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($\times 10^{-12}$ m ² /s)	
28	1.360	0.325
90	0.651	0.124
183	0.446	0.139
365	1.050	0.181
730	0.689	0.226
1095	0.343	0.193
1460	0.342	0.197

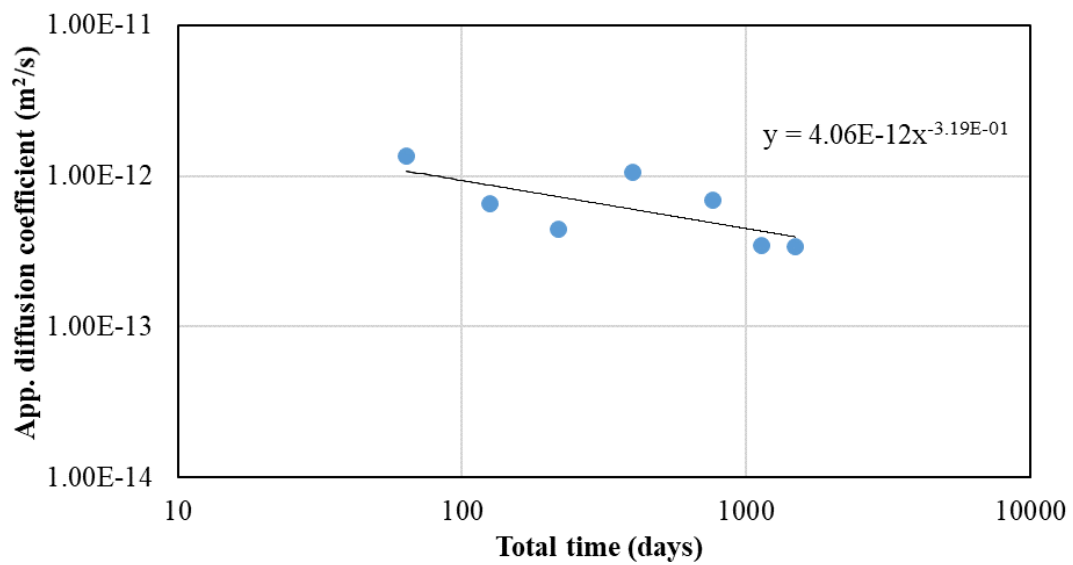


圖 5.5 配比 C 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖

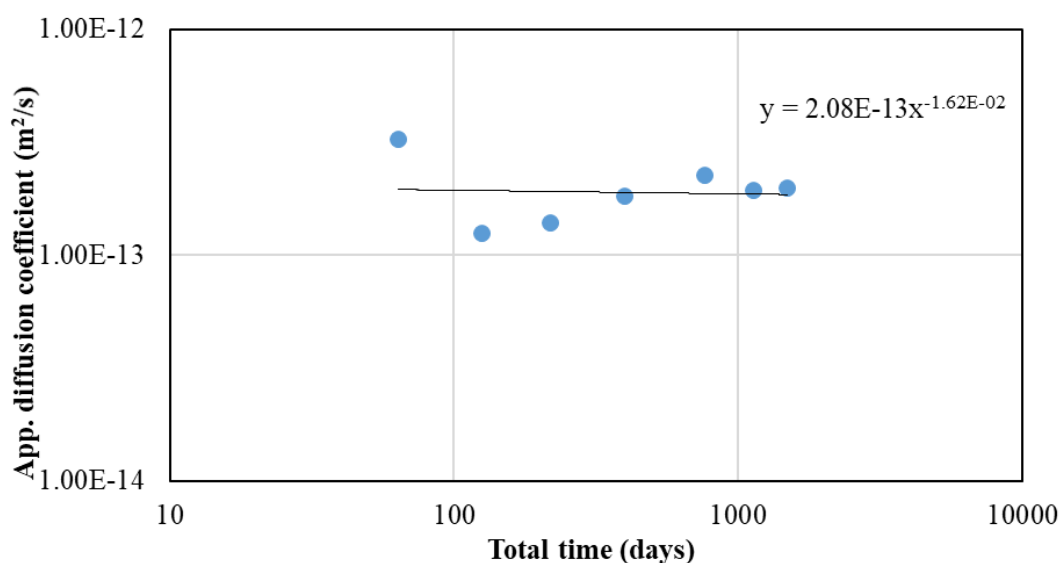


圖 5.6 配比 M 齡期與瞬時擴散係數之雙對數圖

(四)瞬時擴散係數之推估方法

本研究依據 ASTM C1556 規範製作配比 C 及配比 M 之試體，將試驗養護於飽和石灰水中到預定齡期，再浸泡於 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，參考時間擴散係數值(D_{ref})即為瞬時擴散係數 $1.40E-12$ m²/s，時間因子為前述所得推算結果($m=0.319$)，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，假設 25 年時混凝土水化作用才完成，25 年後的瞬時擴散係數等於 $D_{(25 \text{ 年})}=2.21E-13$ m²/s，以此方式推算的結果與實驗量測之結果進行對照，如圖 5.7 所示。

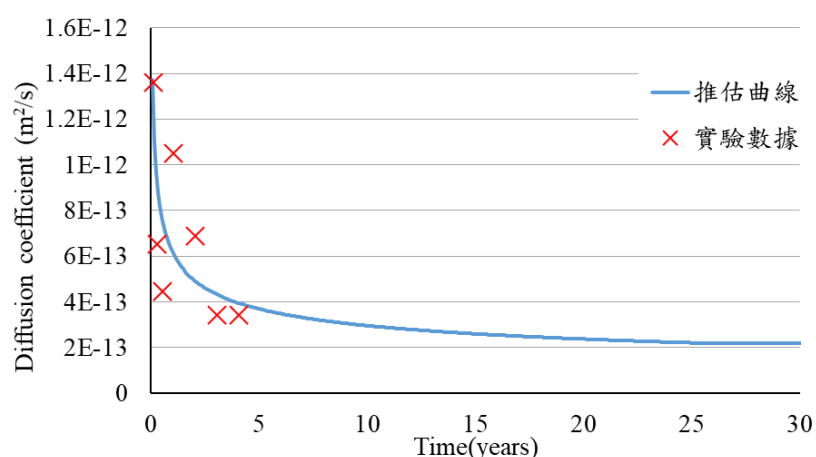


圖 5.7 配比 C 常溫養護瞬時擴散係數推估及實驗數據對照圖

如前述方法，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 $1.97E-13 \text{ m}^2/\text{s}$ ，以 30 天為時間步驟推算至 25 年的瞬時擴散係數，假設 25 年時混凝土水化作用完成，則 25 年後的瞬時擴散係數等於 $D_{(25 \text{ 年})} = 1.80E-13 \text{ m}^2/\text{s}$ ，如圖 5.8 所示，由於配比 M 之時間因子推算結果($m=0.016$)非常低，表示配比 M 水化程度在早期即趨於完全，導致擴散係數隨時間降低情形極為有限。

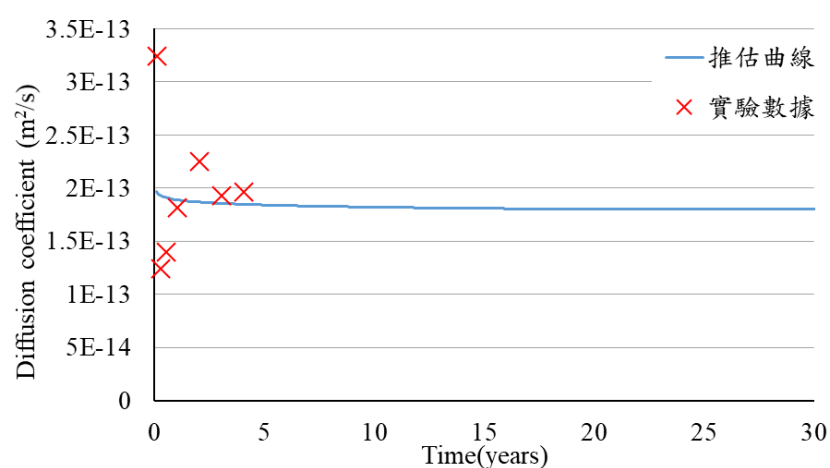


圖 5.8 配比 M 常溫養護瞬時擴散係數推估及實驗數據對照圖

六、服務年限推估

參照 ASTM 規範進行之實驗齡期至第四年，故依上述以最保守之推估方式進行推估，係假設混凝土於製作及養護完成後，於濱海環境立即遭受氯離子入侵，針對混凝土於製作完成後短時間內受氯離子入侵之服務年限推估，其低放射性廢棄物處置容器厚度為 7 公分，為避免氯離子快速向內部入侵確保安全性，故採保守推估至容器厚度 3.5 公分處，探討其氯離子濃度是否超過腐蝕門檻值 0.05%。

以推估配比 C 累積氯離子濃度剖面 50 年為例，將擴散係數及表面氯離子濃度，以 30 天為一個間隔，第一個時間步驟(0 天至 30 天)，計算每增加 30 天之表面氯離子濃度差值及擴散係數值，再代入費克第二定律求得各層深度之氯離子濃度值後，以此類推，直至 50 年之表面氯離子濃度差值及擴散係數值，代入費克第二定律後，將 0 至 50 年相同深度之氯離子濃度以累加法加總。

但是因為 ASTM 試驗數據無法進行表面氯離子濃度累積情形之推估，所以利用 AASHTO 所推估之 15 年最大表面氯離子濃度值 $C_{\max}$ 進行推估，每個時間步驟以表面氯離子濃度的差值及擴散係數，代入費克第二定律，而暴露時間則需扣除達到最大表面氯離子濃度 15 年之數據，將超過最大值 15 年至 50 年的氯離子濃度累加後，以原累加值(0 年至 50 年)扣除，得到 50 年濃度剖面線。

圖 6.1、圖 6.2 為配比 C 與配比 M 短時間內受氯離子入侵濃度剖面推估圖，係以累加法計算至 500 年，由圖可以看到採用配比 C、M 製作之混凝土盛裝容器，保守推估其氯離子濃度於 500

年時氯離子含量在深度 35 mm 處，配比 C 為 0.0253% 及配比 M 為 0.0395% 皆低於門檻值 0.05%，表示本研究所採用配比製作之混凝土試體緻密性高，混凝土內部孔隙連通路徑少，有足夠抵抗氯離子入侵能力，故推估配比 C 與配比 M 之服務年限也能超過 500 年。

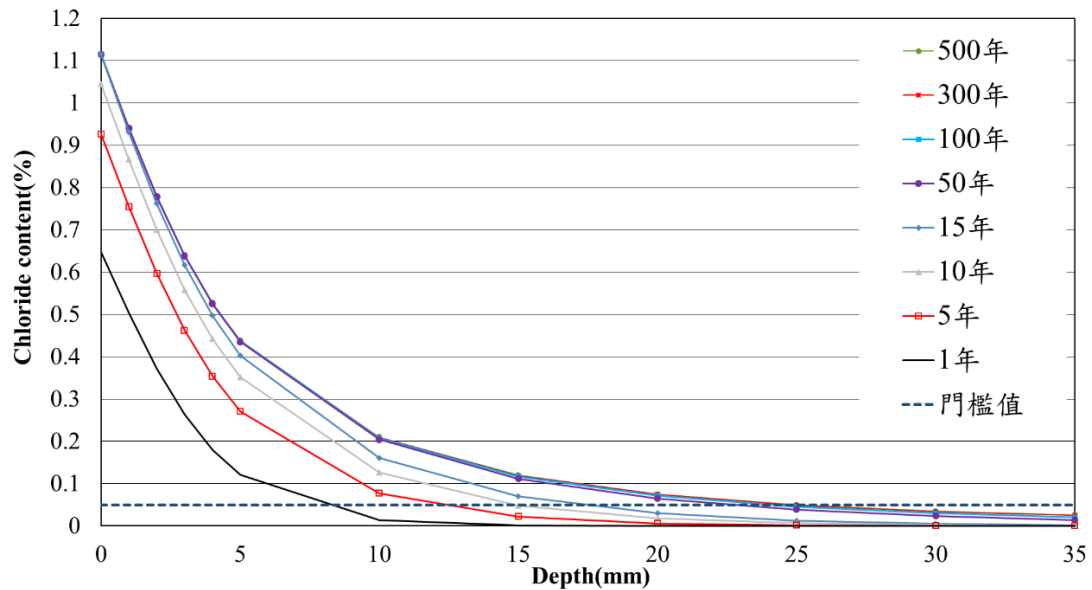


圖 6.1 配比 C 養護完成後即受氯離子入侵濃度剖面推估圖

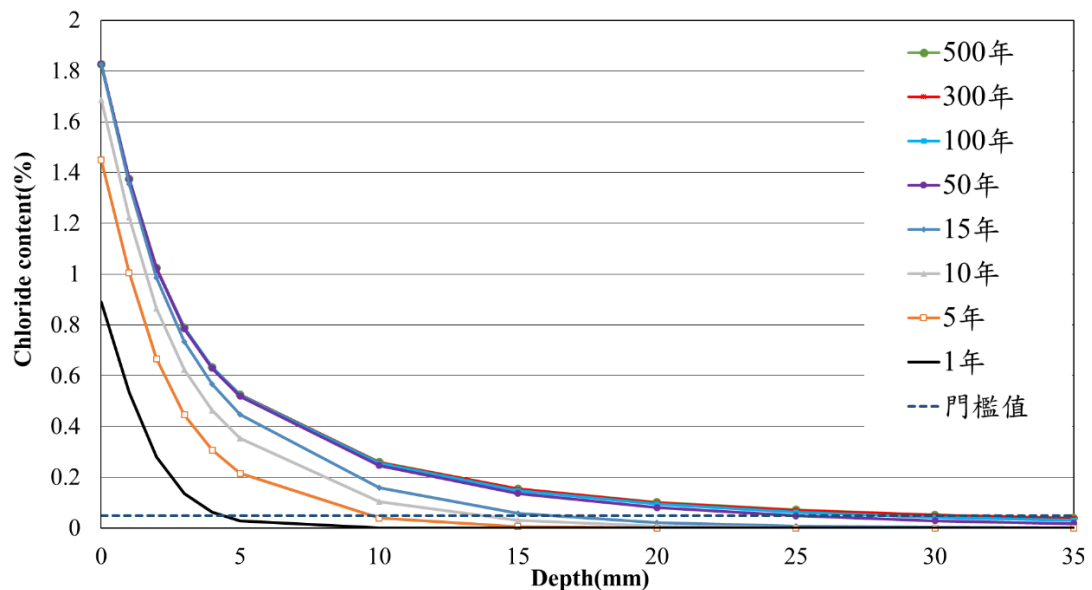


圖 6.2 配比 M 養護完成後即受氯離子入侵濃度剖面推估圖

七、 孔隙率

(一)混凝土孔隙率

氯離子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的關係。

圖 7.1、7.2 為各養護方式之試驗結果，可以發現熱水養護的試體其孔隙率皆較常溫養護低，顯示具有較佳的品質；而經過熱養護後的試體其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升試體的緻密程度。

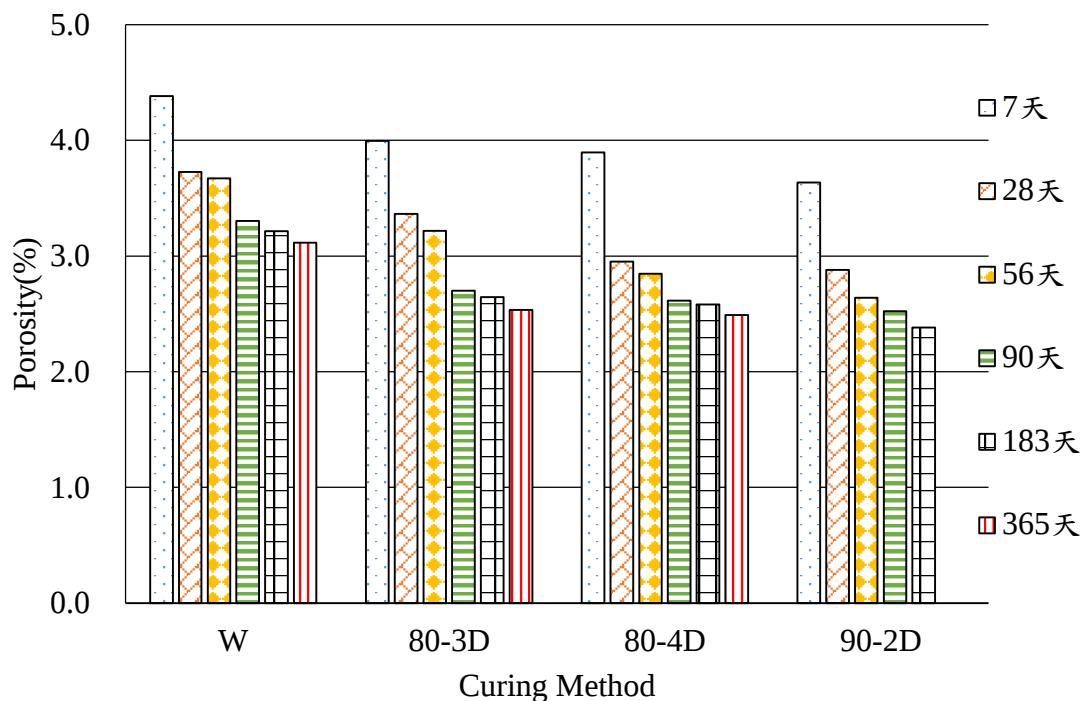


圖 7.1 C 配比養護方式與孔隙率關係圖

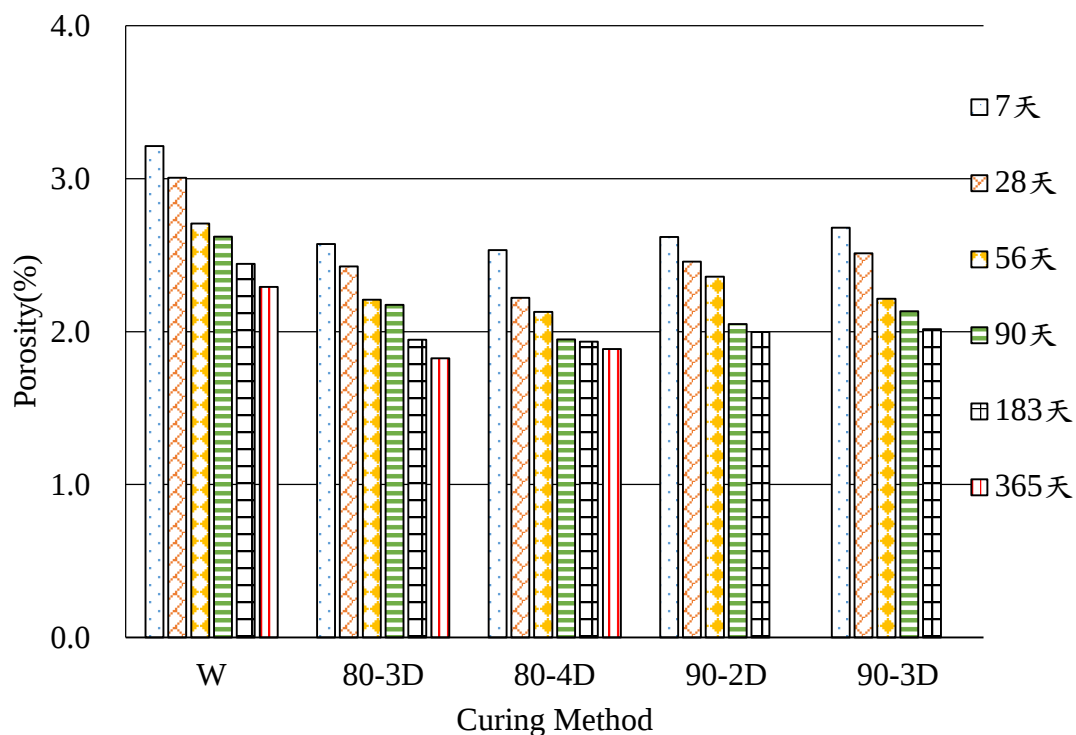


圖 7.2 M 配比養護方式與孔隙率關係圖

(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。其目的在於了解試體內部孔隙的含量，當試體孔隙率越高，代表有害物質進入試體內部越容易，故混凝土的耐久性就越差。

圖 7.3、7.4 為各養護方式試體於齡期之試驗結果，可以發現經過熱水養護後的試體其孔隙率有下降的趨勢，可見高溫養護可以有效加速卜作嵐反應，使 C-S-H 膠體快速生成填補孔

隙，使得連通孔隙變成封閉孔隙，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提升試體的緻密程度。

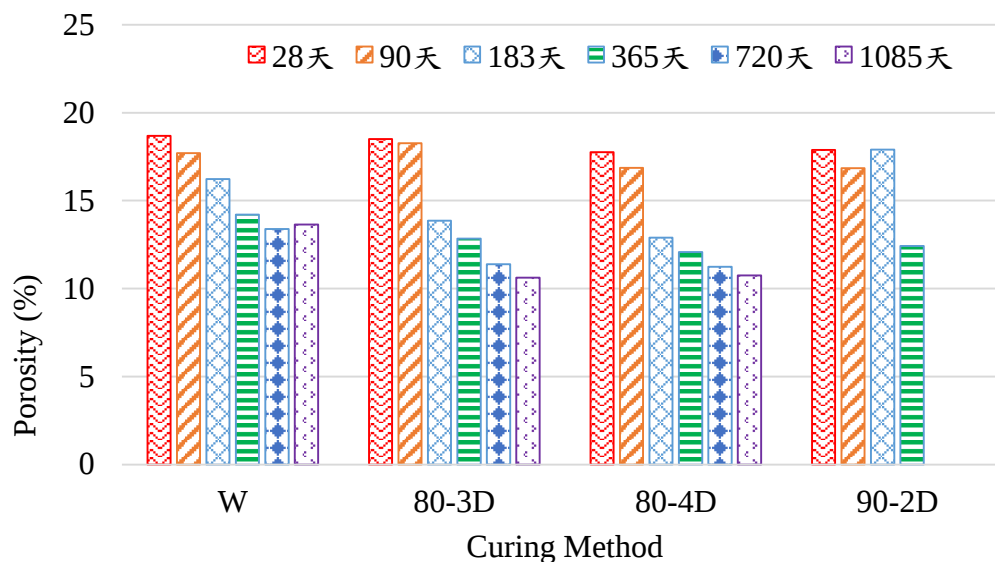


圖 7.3 C 配比養護方式與孔隙率關係圖

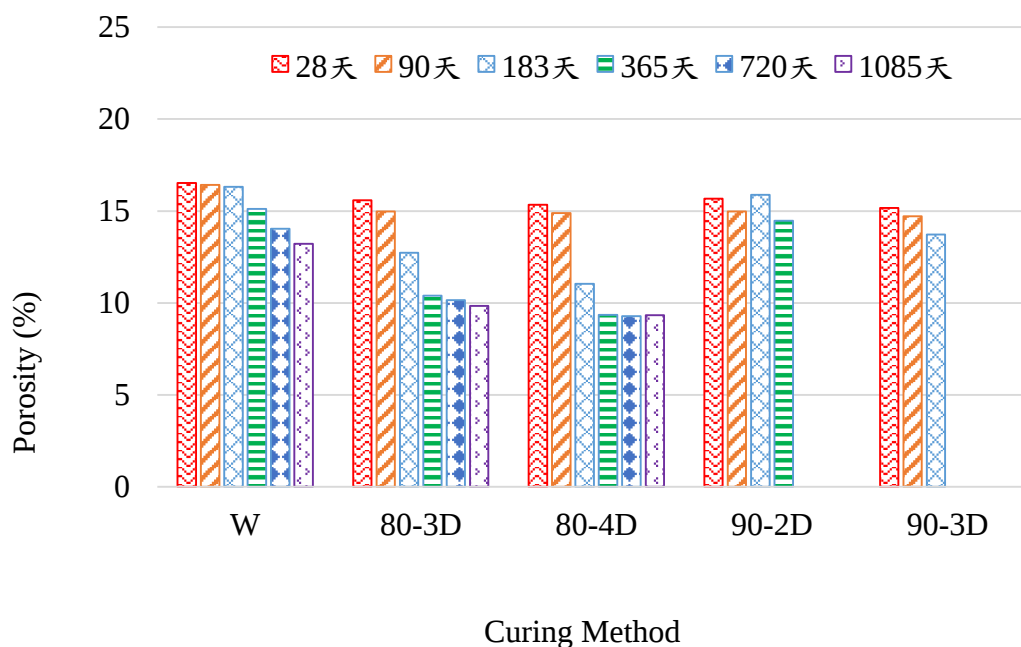


圖 7.4 M 配比養護方式與孔隙率關係圖

八、 氮氣吸附儀-孔徑分布

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可以分為中大毛細孔隙(>50 nm)、中孔孔隙(2.5 nm - 50 nm)、膠體孔隙(<2.5 nm)，水泥系材料的孔隙隨配比而變化，除了孔隙大小的因素外，孔隙間的連通程度對其性質而言也很重要。

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，並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使用的卜作嵐材料用量就較多，填充粒徑顆粒間的孔徑，增加其密實性。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。

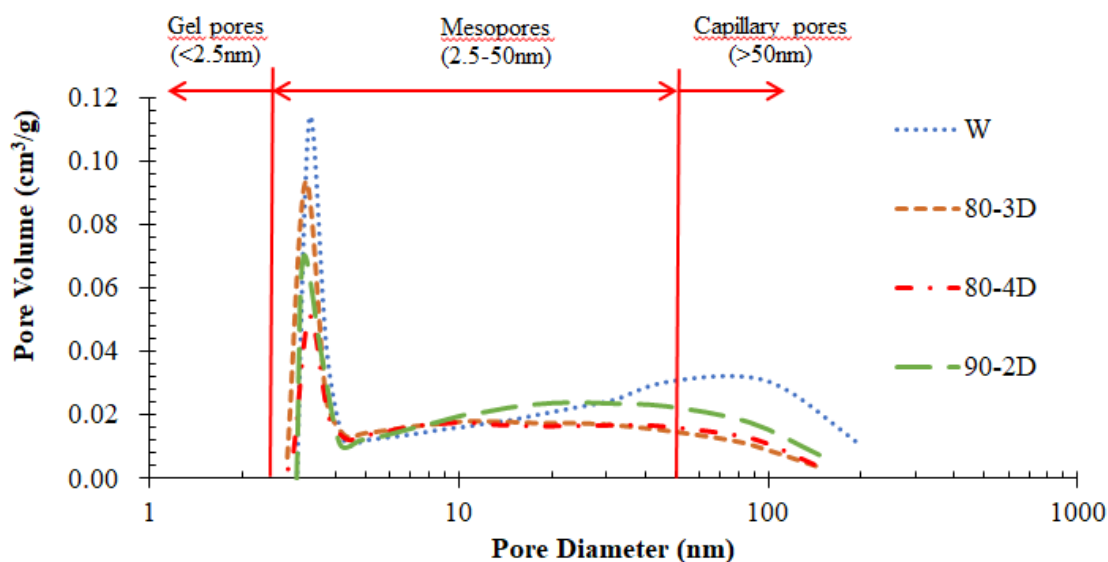


圖 8.1 C 配比 7 天齡期孔隙體積分布圖

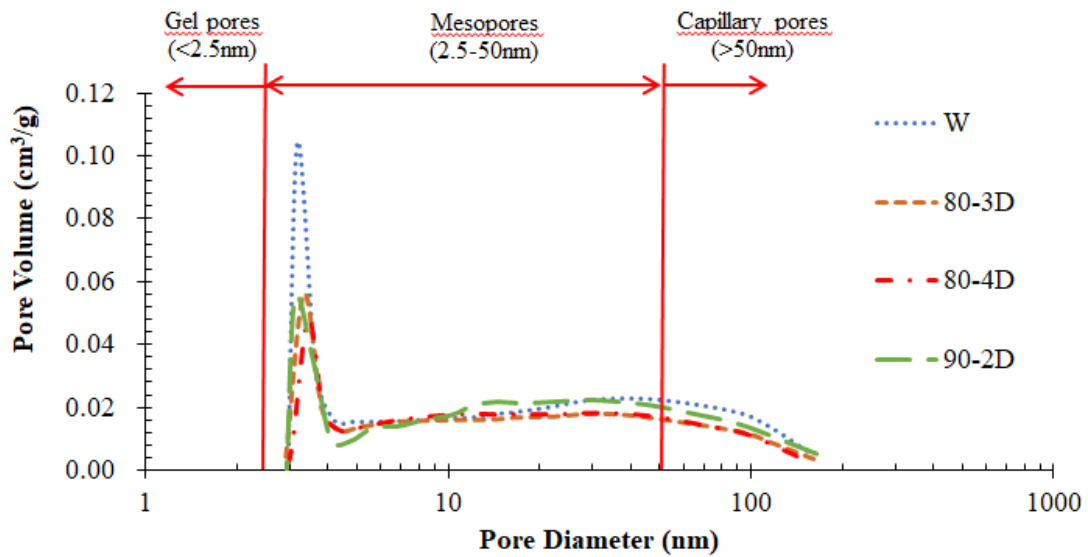


圖 8.2 C 配比 28 天齡期孔隙體積分布圖

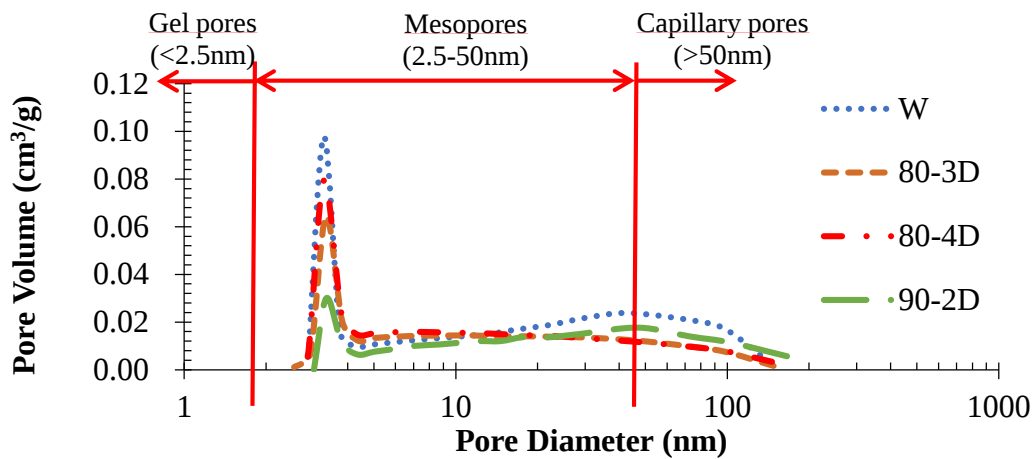


圖 8.3 C 配比 90 天齡期孔隙體積分布圖

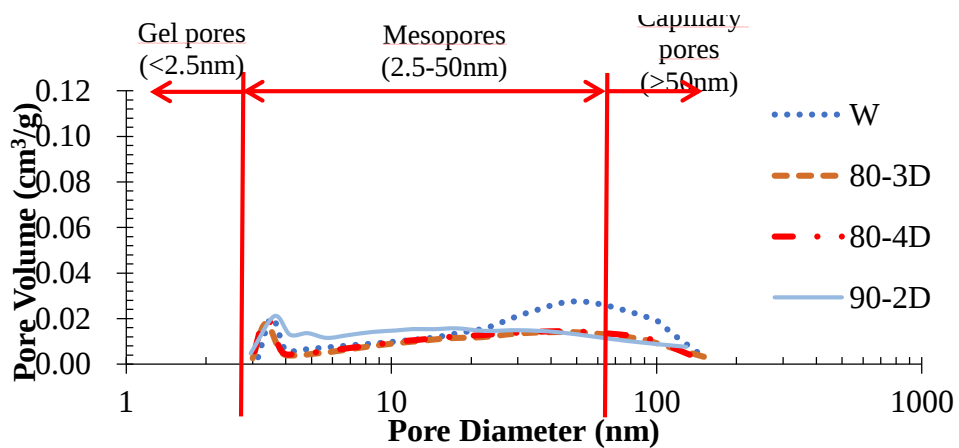


圖 8.4 C 配比 183 天齡期孔隙體積分布圖

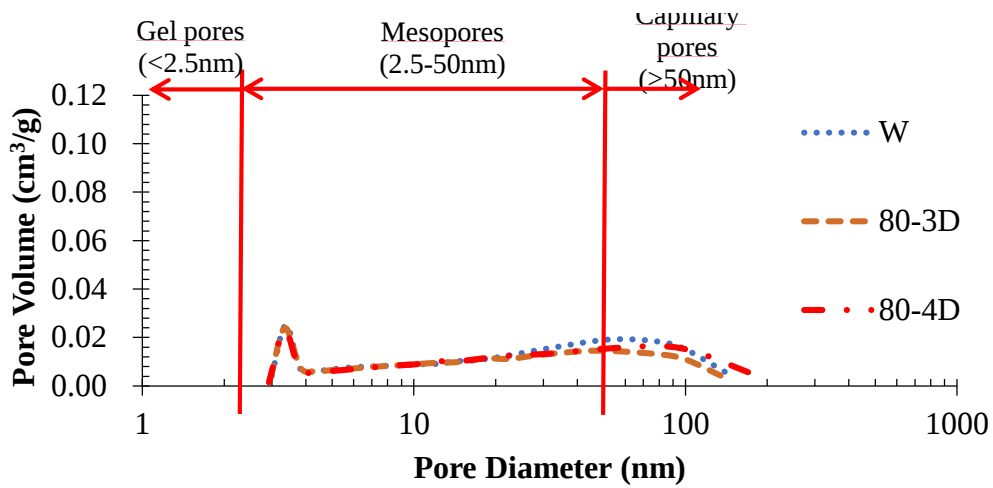


圖 8.5 C 配比 365 天齡期孔隙體積分布圖

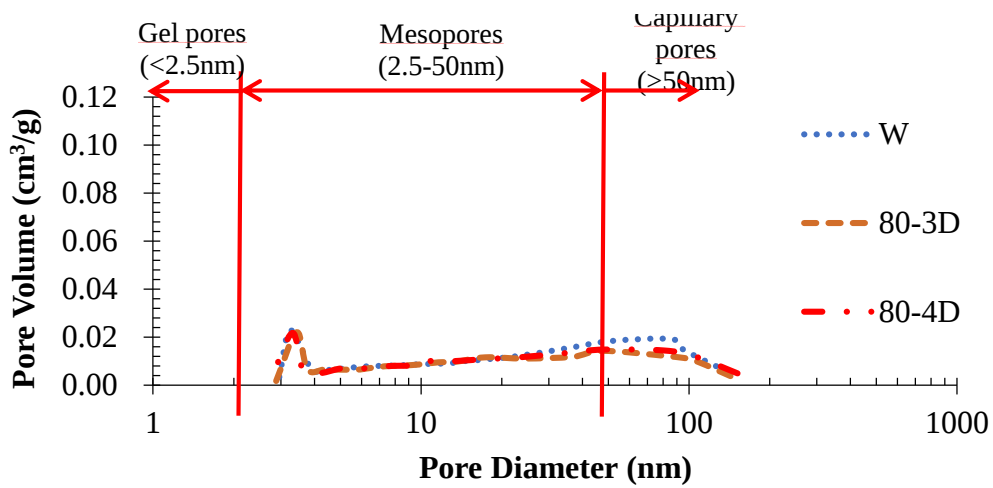


圖 8.6 C 配比 730 天齡期孔隙體積分布圖

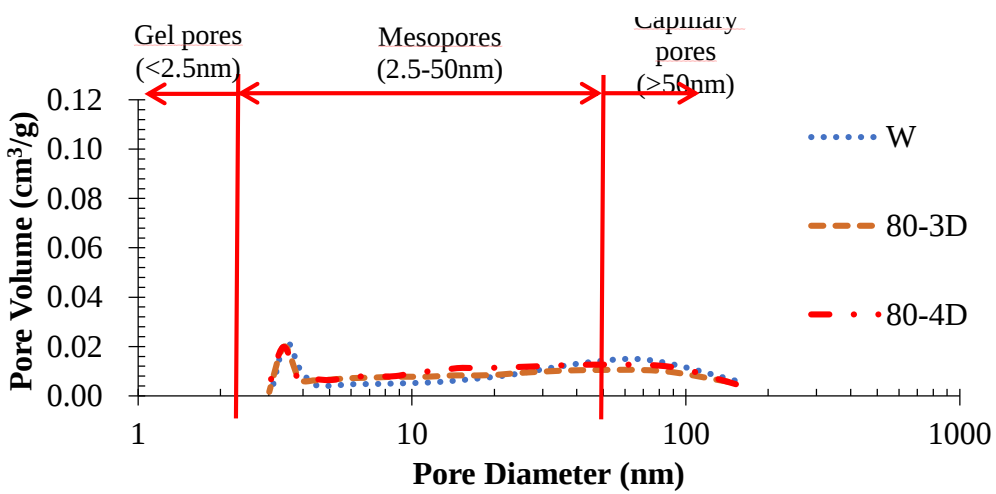


圖 8.7 C 配比 1085 天齡期孔隙體積分布圖

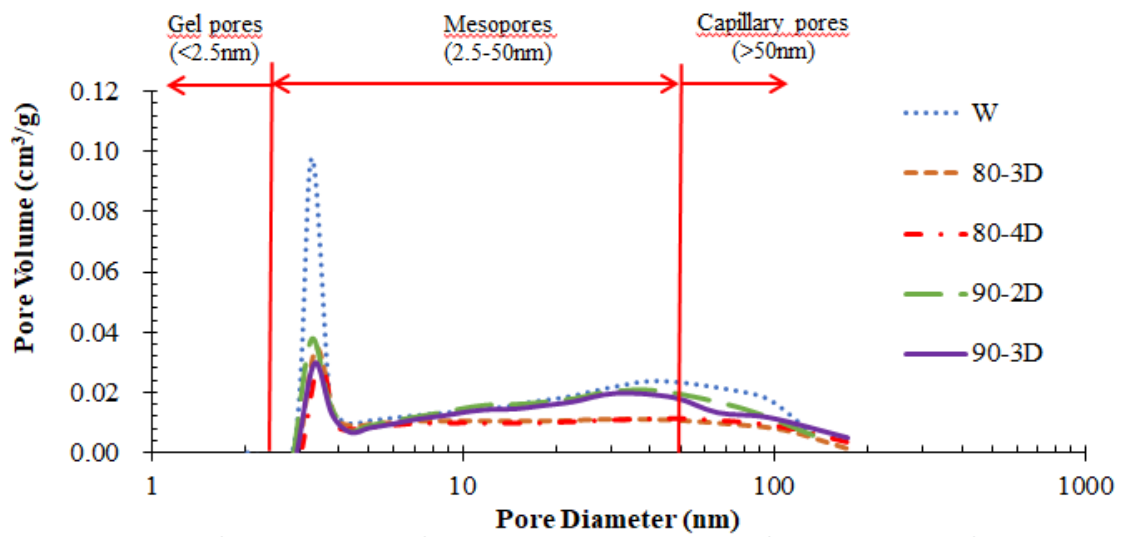


圖 8.8 M 配比 7 天齡期孔隙體積分布圖

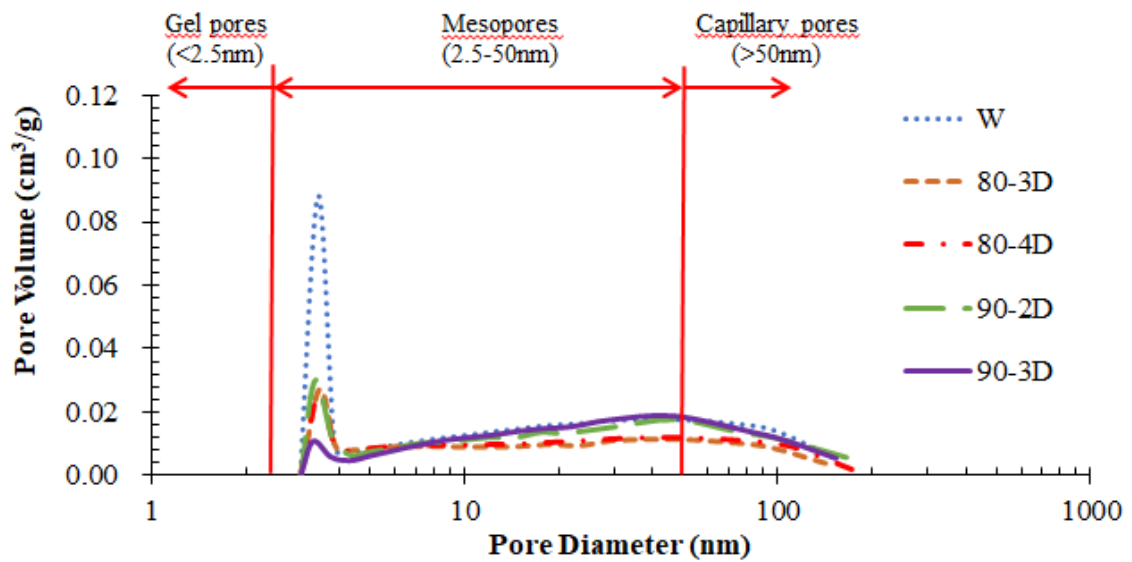


圖 8.9 M 配比 28 天齡期孔隙體積分布圖

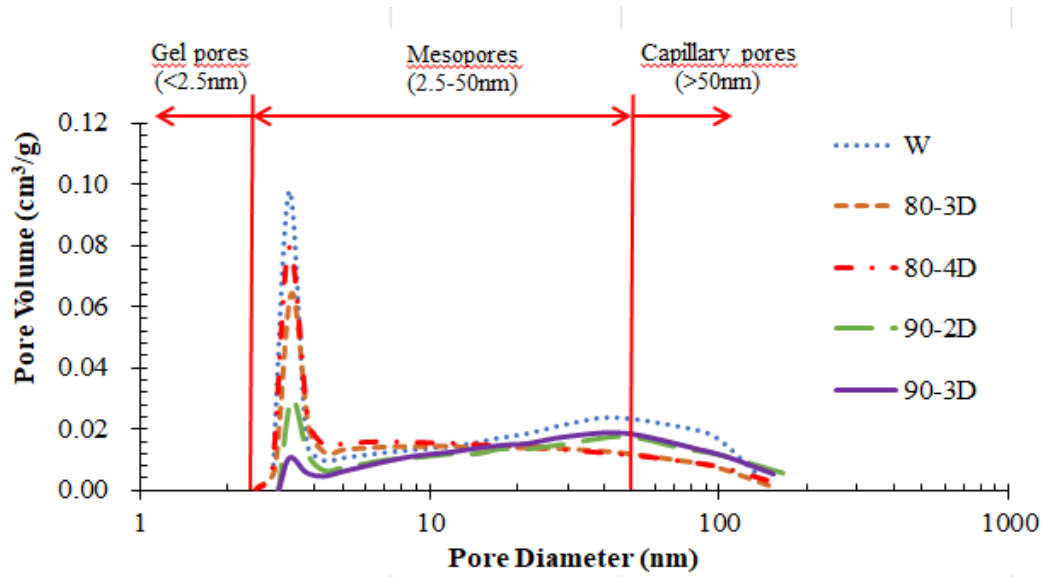


圖 8.10 M 配比 90 天齡期孔隙體積分布圖

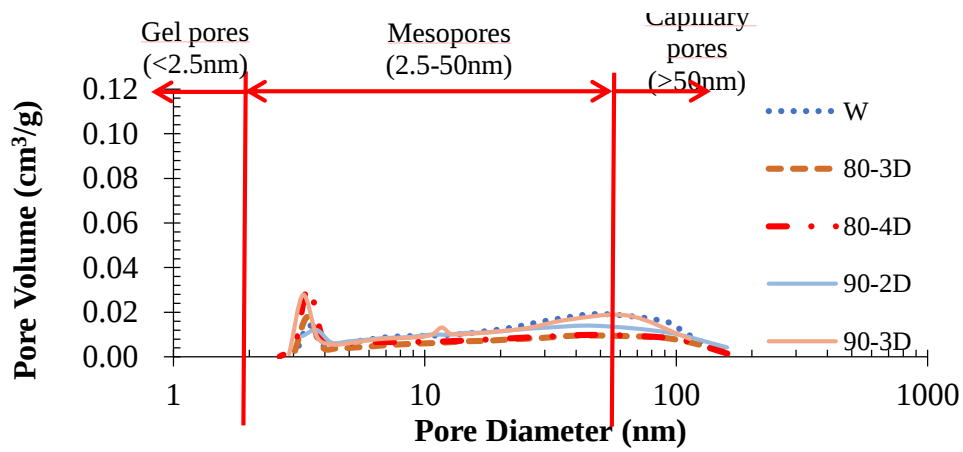


圖 8.11 M 配比 183 天齡期孔隙體積分布圖

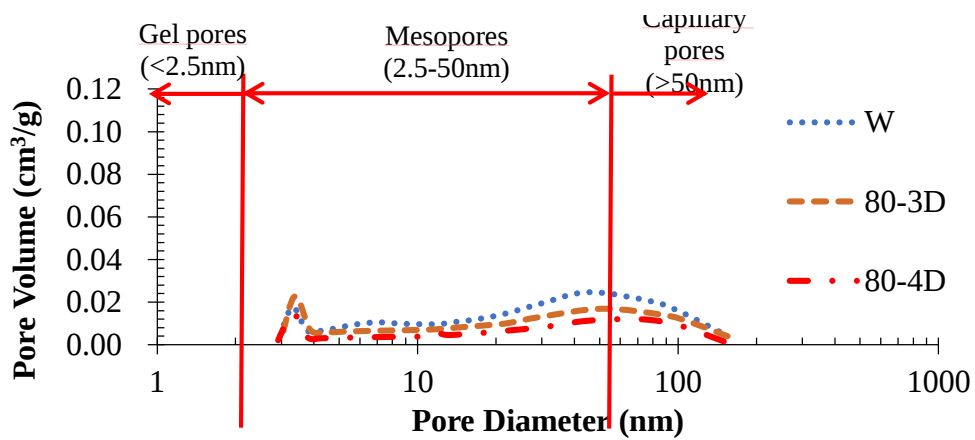


圖 8.12 M 配比 365 天齡期孔隙體積分布圖

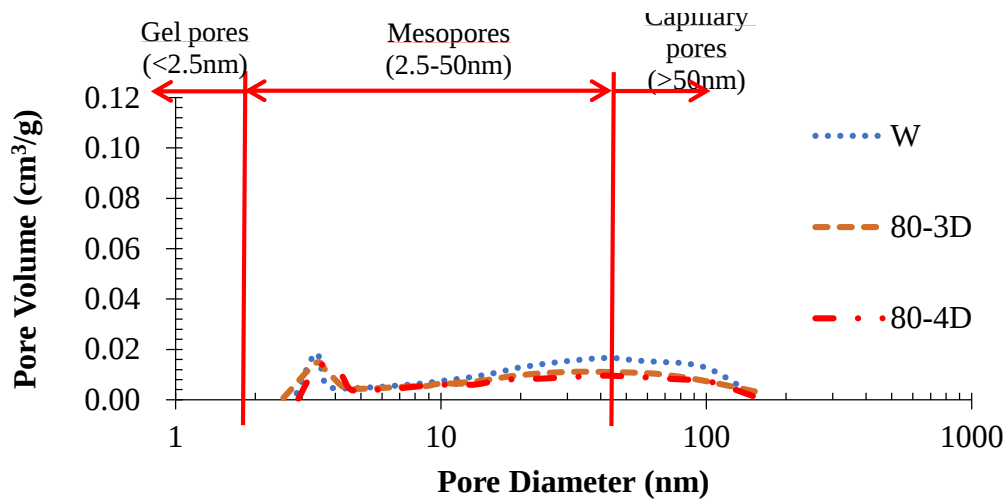


圖 8.13 M 配比 730 天齡期孔隙體積分布圖

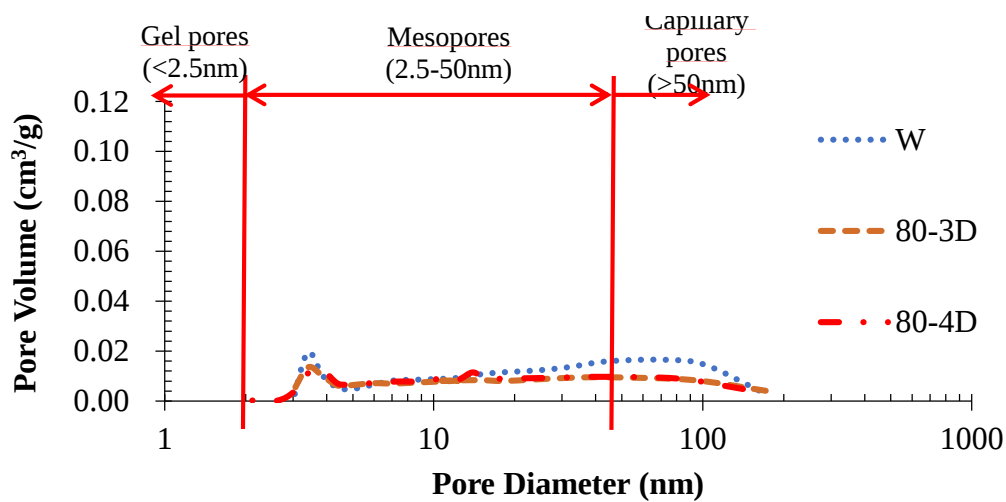


圖 8.14 M 配比 1085 天齡期孔隙體積分布圖

由圖 8.1 到圖 8.14 看出試體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，經過熱水養護的試體其孔隙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。

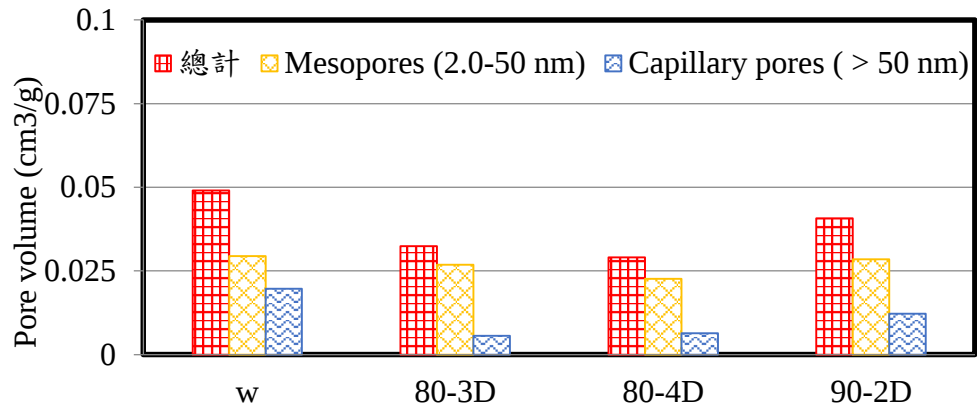


圖 8.15 C 配比 7 天齡期孔隙結構關係圖

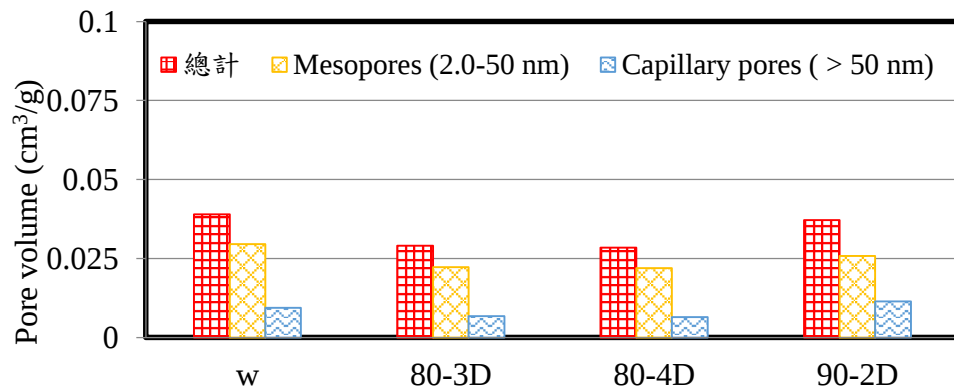


圖 8.16 C 配比 28 天齡期孔隙結構關係圖

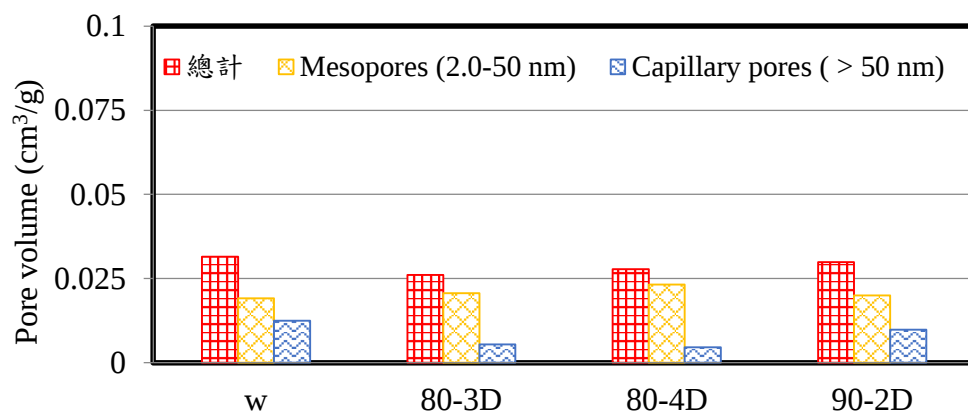


圖 8.17 C 配比 90 天齡期孔隙結構關係圖

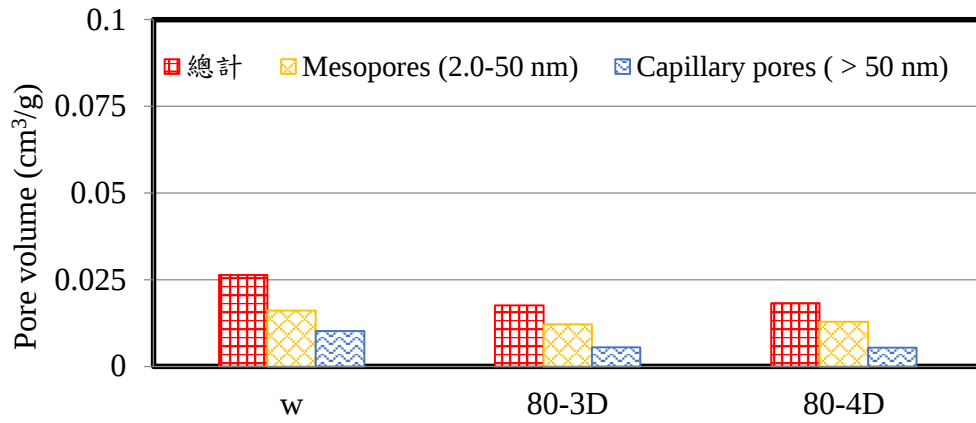


圖 8.18 C 配比 183 天齡期孔隙結構關係圖

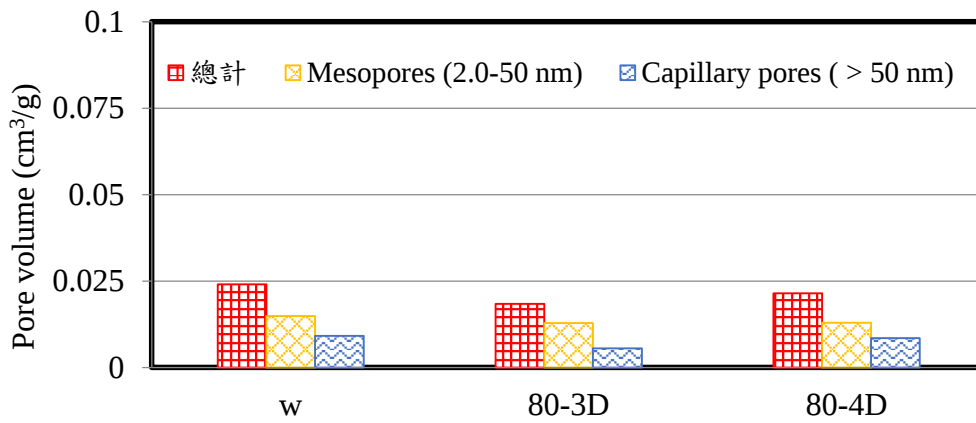


圖 8.19 C 配比 365 天齡期孔隙結構關係圖

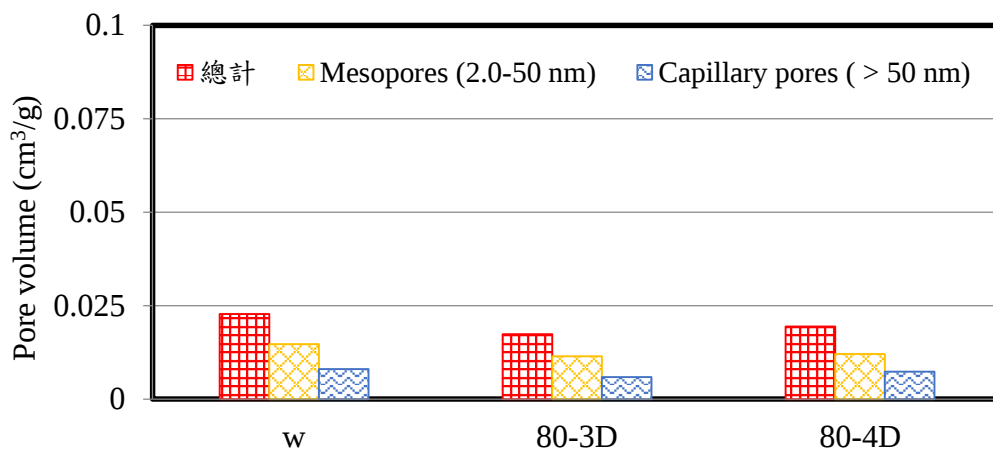


圖 8.20 C 配比 730 天齡期孔隙結構關係圖

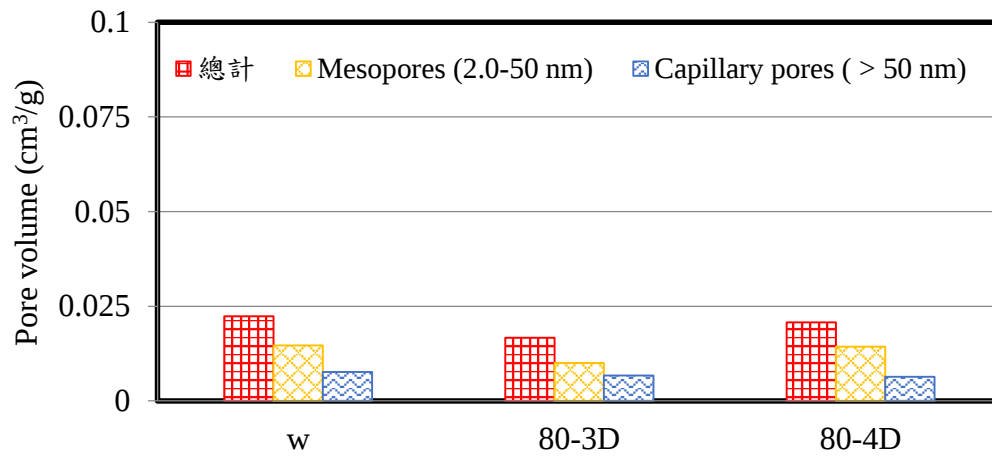


圖 8.21 C 配比 1085 天齡期孔隙結構關係圖

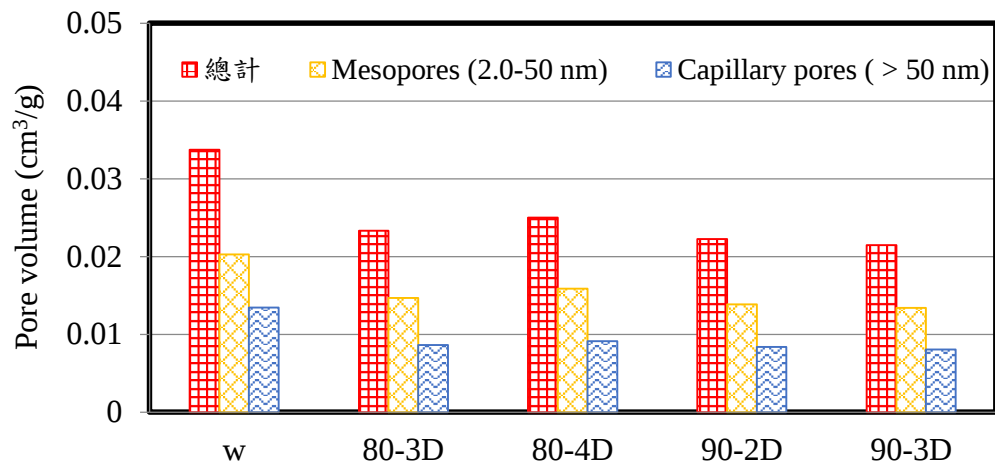


圖 8.22 M 配比 7 天齡期孔隙結構關係圖

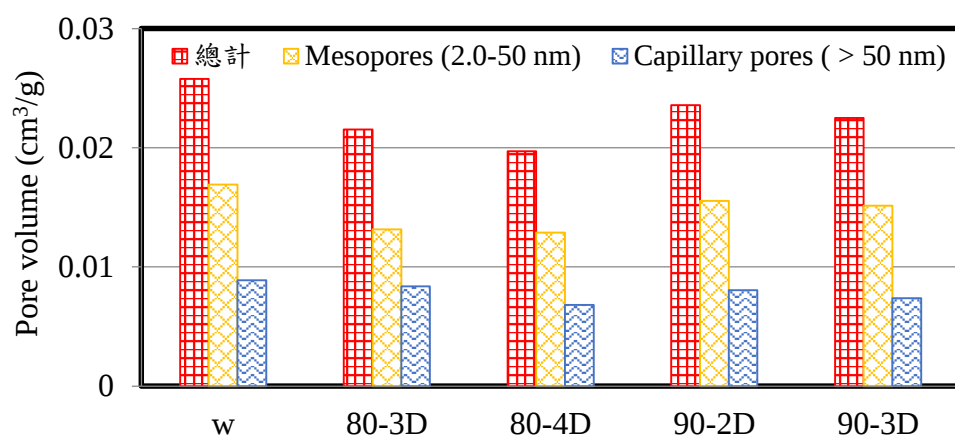


圖 8.23 M 配比 28 天齡期孔隙結構關係圖

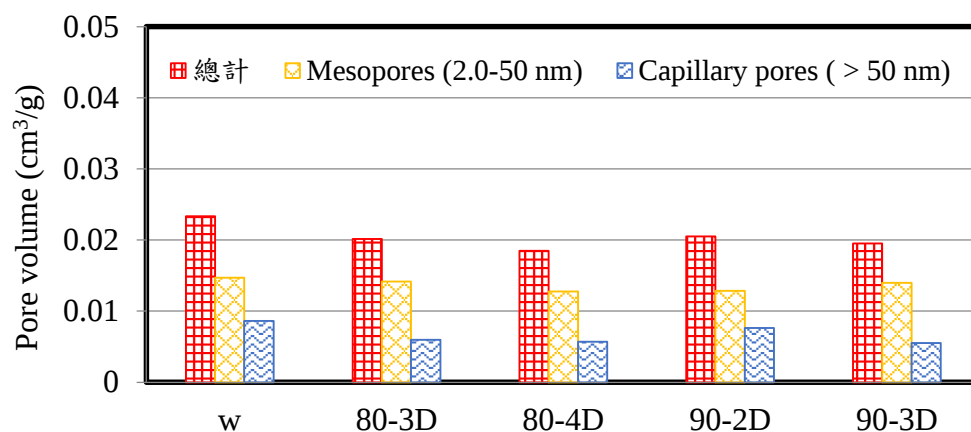


圖 8.24 M 配比 90 天齡期孔隙結構關係圖

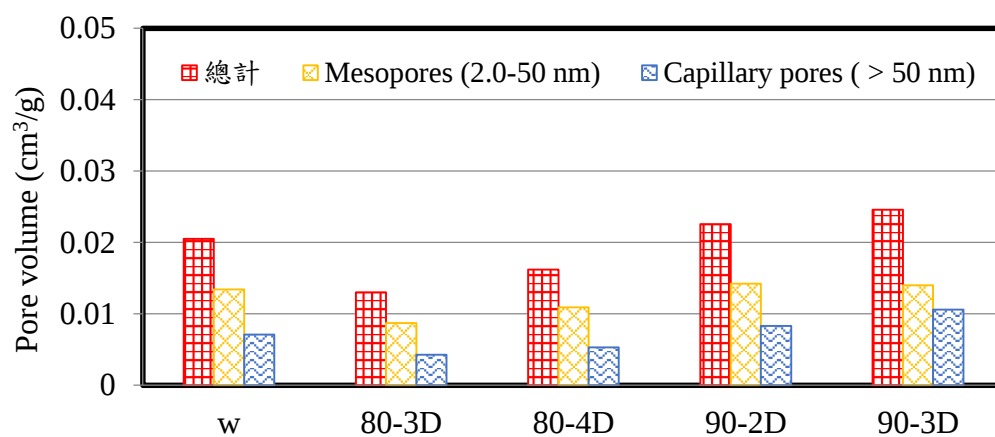


圖 8.25 M 配比 183 天齡期孔隙結構關係圖

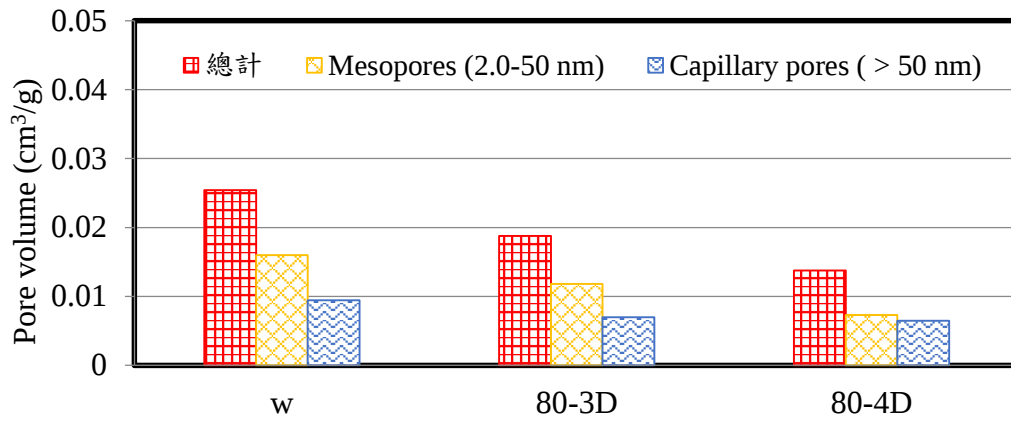


圖 8.26 M 配比 365 天齡期孔隙結構關係圖

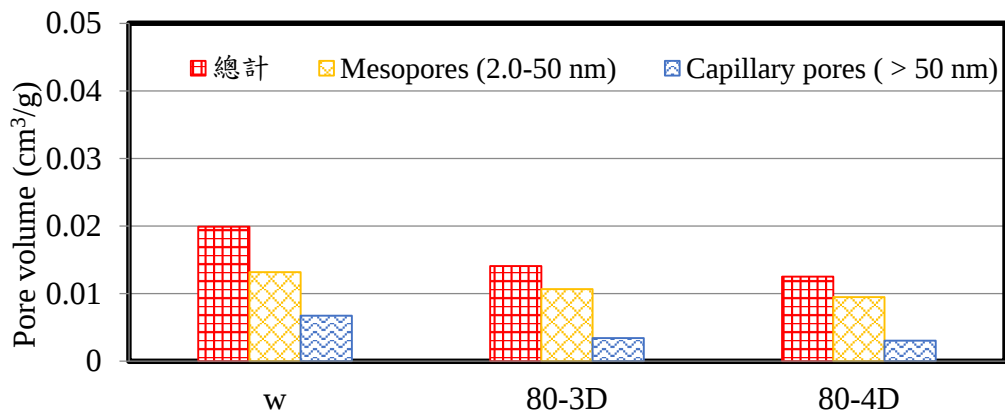


圖 8.27 M 配比 730 天齡期孔隙結構關係圖

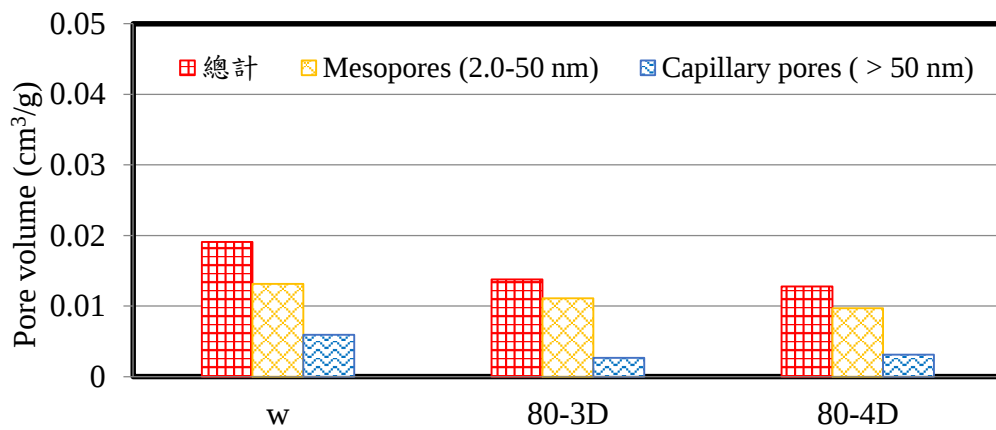


圖 8.28 M 配比 1085 天齡期孔隙結構關係圖

九、表面電阻率試驗

表面電阻率試驗為非破壞性試驗，可快速量測得實驗數據且容易操作。混凝土表面電阻越大，表示混凝土內部結構越密實、連通孔隙越少，需要傳遞電流的路徑越長，則有害物質從外界要入侵混凝土內部就越加困難，故可做為混凝土耐久性的一項指標。

圖 9.1 所示為 C 配比試體以各種不同方法養護所得表面電阻率與試體齡期之關係，由於 C 配比添加鋼纖維有利於導電，因此其電阻率明顯較一般純混凝土為低。

由圖中可見高溫熱水養護對試體電阻率有非常顯著的影響，呈現大幅高於常溫養護的試體，顯示高溫養護試體結構緊密、內部孔隙連接較不易，故表面電阻率較常溫養護者高出許多。

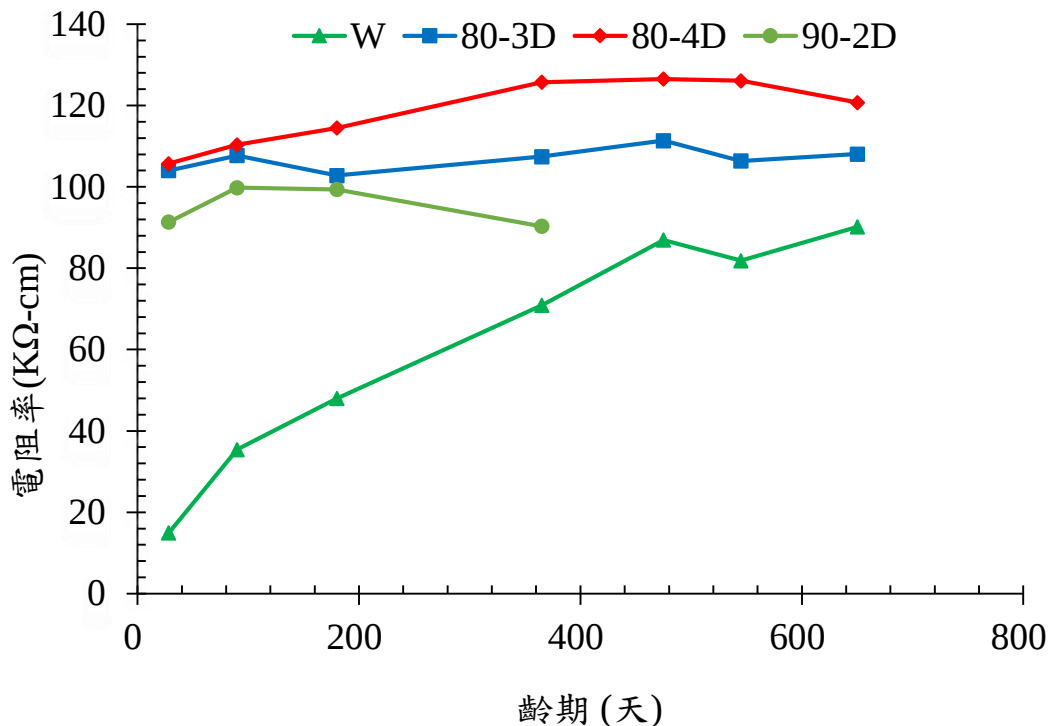


圖 9.1 C 配比齡期與電阻率關係圖

圖 9.2 為 M 配比以各種方法養護試體所測得表面電阻率與試體齡期之關係，大致所顯現的趨勢與 C 配比相近，即高溫熱水養護試體電阻率大幅高於常溫養護的試體，可見高溫養護對 M 配比產生的內部結構改善效應也與 C 配比一致。此外，M 配比因未使用鋼纖維，故試體電阻率高出 C 配比約 10 倍之多，但這並不表示 M 配比內部結構優於 C 配比，而是 C 配比中添加了鋼纖維，因而大幅提高其導電性。

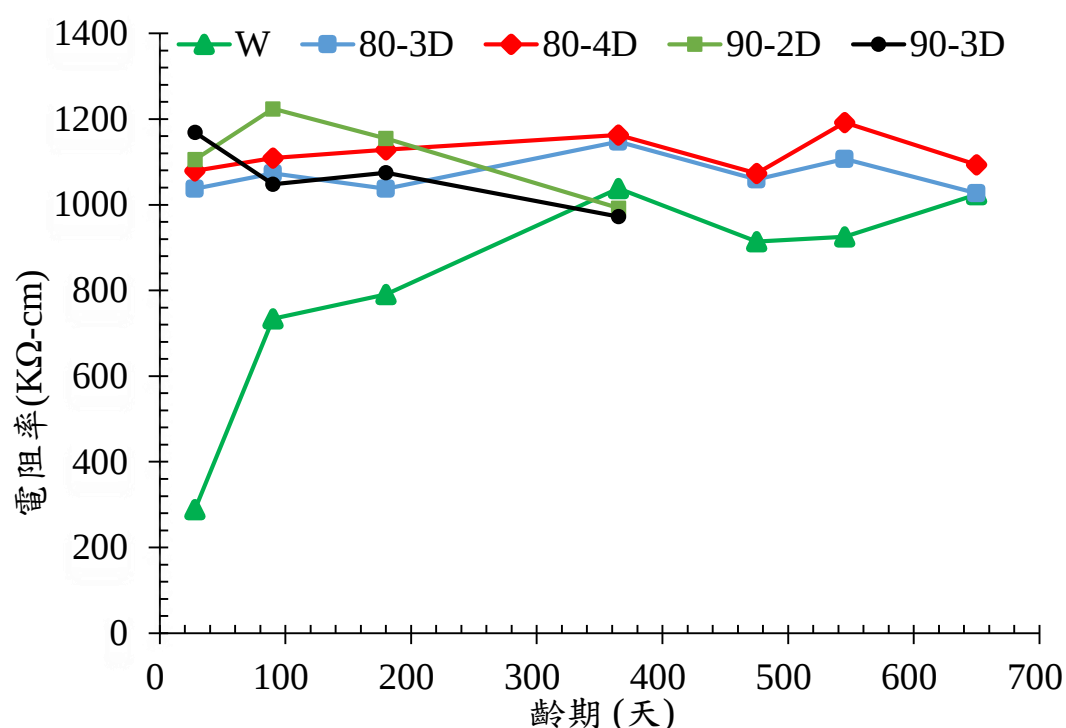


圖 9.2 M 配比齡期與電阻率關係圖

十、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 Ø10×20cm 圓柱試體，將其切割成 Ø10×5cm 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，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。

表 10.1 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	143.1704	2.015538	2.392814
組內	1420.667	20	71.03333		
總和	2709.2	29			

表 10.2 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	2	137.2	1.521439	3.354131
組內	2434.8	27	90.17778		
總和	2709.2	29			

十一、

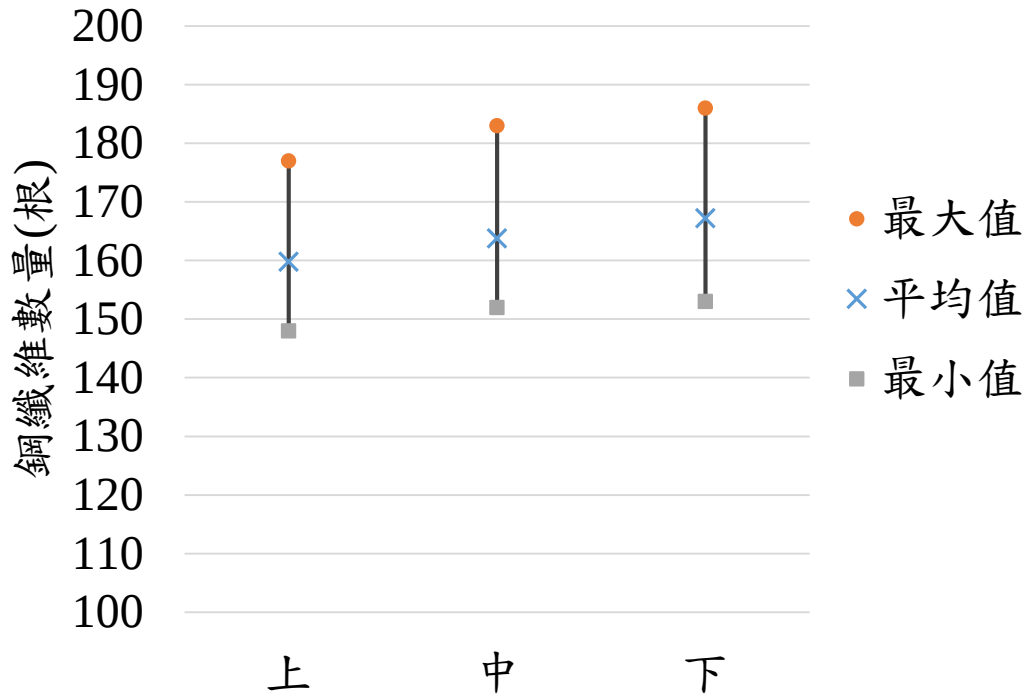


圖 10.3 圓柱試體上、中、下層之鋼纖維數量分析圖

十二、 水貫入深度試驗

水貫入深度試驗係利用壓力將水直接滲透進入試體內部，若試體內部孔隙越多連通程度越高，則施加壓力的水就更容易貫入試體中。由圖 11.1、11.2 可看到於齡期 28 天時，常溫養護試體較熱養護試體最大貫入深度多出約 7 mm，說明熱養護試體內部較密實，阻水性與水密性皆明顯較優；當齡期從 28 到 90 天，各組試體之最大貫入深度皆大幅下降，顯示各配比隨齡期增長水化程度增加，其水密性亦隨之改善，但熱養護試體之表現仍優於常溫養護者。

圖 11.2 之 M 配比熱水養護試體的試驗結果可以看到於齡期 90 天時，經 90°C 熱水養護試體的最大貫入深度已小於 1 mm，明顯低於常溫養護的 W 試體，顯示熱水養護的試體有足夠的緻密性能阻擋加壓水的滲入，亦表示配比相較於常溫養護試體，具有

更佳的能力抵抗外界有害離子的入侵。

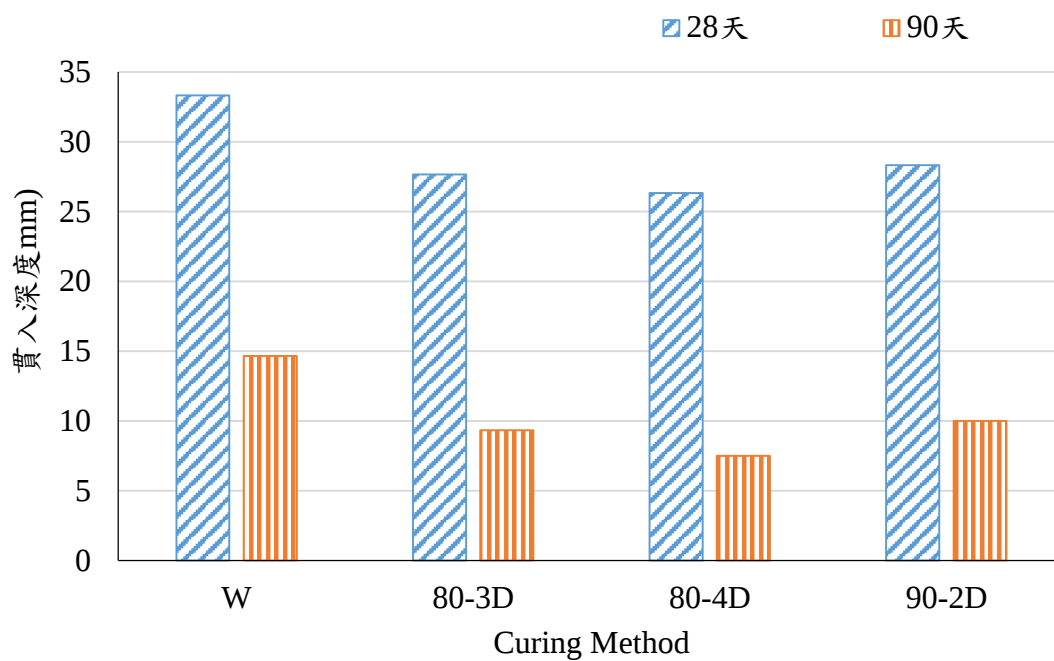


圖 11.1 配比 C 不同養護方式水貫入深度比較圖

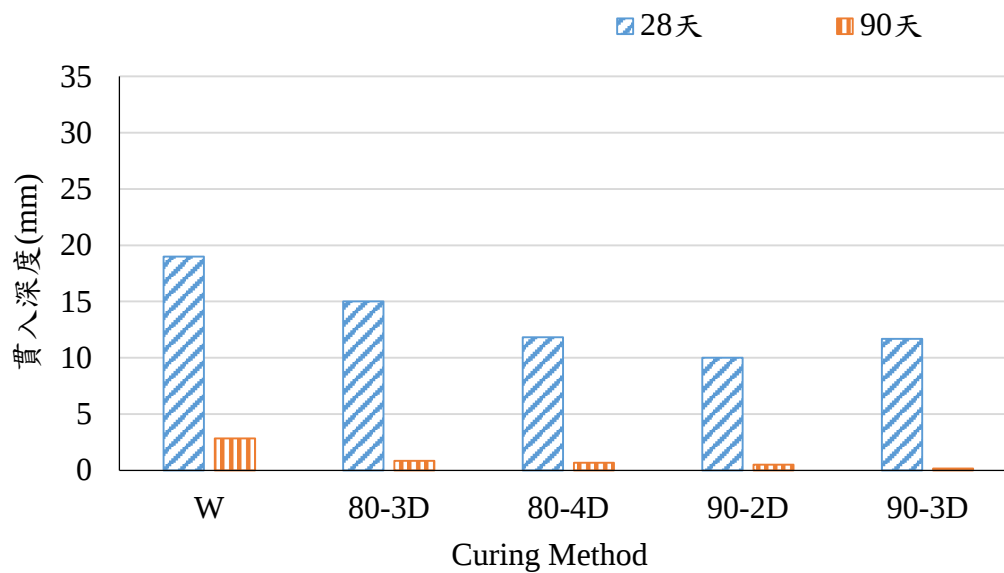


圖 11.2 配比 M 不同養護方式水貫入深度比較圖

伍、 結論

本研究針對可能使用於低放射性廢棄物盛裝容器之混凝土配比進行兩階段研究，首先以實驗室模擬處置場處於濱海環境下受氯離子入侵的擴散情形進行服務年限推估，採用 ASTM C1556 實驗數據，以信賴度觀念建立混凝土受氯離子入侵深度服務年限及腐蝕風險評估，確保所採用混凝土的障壁功能。

其次為提升混凝土品質及耐久性，使用不同溫度養護方式進行抗壓強度、孔隙率與孔隙結構、水貫入深度、氯離子浸泡、表面電阻率以及乾縮試驗與常溫養護結果進行比較，獲致以下結論：

- (一) 氯離子入侵試驗成果而言，以添加礦物摻料與低水膠比之混凝土，其孔隙結構較不連續，緻密度較高，擴散路徑更為蜿蜒曲折，導致氯離子在混凝土表層持續累積，造成曝露表層有較高的氯離子濃度且會因為養護齡期，水化程度上升，且擴散係數降低，使得氯離子入侵愈趨困難。
- (二) 以 ASTM C1556 試驗法將混凝土養護至齡期，浸泡固定時間之氯離子溶液，可測得混凝土隨養護齡期增加之瞬時擴散係數變化情形，與擴散理論較為符合。
- (三) 綜合實驗成果方面，採用高溫養護容器混凝土配比確實能有效加速卜作嵐反應縮短養護齡期，在抗壓強度及電阻率的提升、降低孔隙率、氯離子擴散係數及改善體積的穩定性的效果都較常溫養護佳，因此高溫養護能幫助提升混凝土早期品質，以防止養護期間失敗的風險，而採用高溫 80°C 養護 3 天、4 天及 90°C 養護 2 天、3 天，品質改善效果相當接近。

陸、 參考文獻

1. 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，(2014)。
2. 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)。
3. 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)。
4. 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，(2003)。
5. 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，(2009)。
6. 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，(2006)。
7. AASHTO T259-02 Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration.
8. AASHTO T260-97 Standard Method of Test for Sampling and Testing for Chloride Ion in Concrete and Concrete Raw Materials.
9. AASHTO T358-15 Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
10. Ann, K.Y., Ahn, J. H., and Ryou, J. S. (2009), "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, pp. 239- 245.
11. ASTM C1556-11 Standard Test Method for Determining the

Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion.

12. ASTM C1152-12 Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete¹.
13. ASTM C642-13 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
14. Bai, J., Wild, S., and Sabir, B. B. (2003). "Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater." *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 353-362.
15. BS EN 12390-8 Depth of penetration of water under pressure.
16. Bandelj, B., Saje, D., Šušteršič, J., Lopatič, J., and Saje, F. (2011). "Free Shrinkage of High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete." *Journal of Testing and Evaluation*, 39(2), 166-176.
17. Chalee, W., Jaturapitakkul, C., and Chindaprasirt, P. (2009). "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater." *Marine structures*, Vol. 22, No.1, pp. 341-353.
18. DataFit (URL) : <http://www.curvefitting.com/>.
19. Frazao, C., Camoes, A., Barros, J., and Goncalves, D.(2015). "Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete." *Construction and Building Materials*, Vol. 80, pp. 155-166.
20. Gettu, R., Gardner D.R., Saldivar H., and Barragfin B.E.(2005). "Study of the distribution :and orientation of fibers in SFRC specimens ", *Materials and Structures*, Vol. 38, pp. 31-37.
21. Gowers, K. R., and Millard, S. G. (1999). "Measurement of

- concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using wenner technique” ACI Materials Journal , Vol. 96, No. 5, pp.536-541.
22. Jussara, T., Ardani, A. (2012). “Surface Resistivity Test Evaluation as an Indicator of the Chloride Permeability of Concrete”, Federal Highway Administration.
 23. Kim, J., McCarter, W. J., Suryanto, B., Nanukuttan, S., Basheer, P. A. M., and Chrisp, T. M. (2016). “Chloride ingress into marine exposed concrete: A comparison of empirical- and physically-based models” Cement and Concrete Composites, Vol.72, pp. 133-145.
 24. Khan, K., and Amin, M. N. (2017) “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, Vol.154, pp. 514-528.
 25. Leng, F., Feng, N., and Lu, X. (2000). “An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete.” Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 989-992.
 26. Life-365 (URL) : <http://www.life-365.org/>.
 27. “Life_-365 Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides” (2013).
 28. Lee, N. P., and Chisholm, D. H. (2005). “Reactive powder

concrete” Study Report SR 146, BRANZ Ltd, Judgeford, New Zealand.

29. Peng, L., Zhiwu, Y., Zhaohui, L., Ying, C., and Xuaijie, L. (2016). “Predictive convection zone depth of chloride in concrete under chloride environment” *Cement and concrete composites*, Vol. 72, pp. 257-267.
30. Mangat, P.S., and Molloy, B.T. (1994). “Prediction of long term chloride concentration in concrete.” *Material and structures*, Vol. 27, pp. 338-346.
31. Morris, W., Moreno, E.I., and SagiiCs, A.A.(1996). “Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a wenner array probe.” *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 12, pp. 1779-1787.
32. Nokken, M., Boddy, A., Hooton, R.D., and Thomas, M.D.A. (2006). “Time dependent diffusion in concrete—three laboratory studies.” *Cement and concrete research*, Vol. 36, No. 1, pp. 200-207.
33. Polder, R.B. (2001). “Test methods for on site measurement of resistivity of concrete a RILEM TC-154 technical recommendation.” *Construction and Building Materials*, pp. 125-131.
34. Pack, S. W., Jung, M. S., Song, H. W., Kim, S. H., and Ann, K. Y. (2010). “Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment” *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 302-312.

35. Ramezaniapour, A.A., Pilvar, A., Mahdikhani, M., and Moodi, F. (2011). “ Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength”, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 2472–2479.
36. Sengul, O.(2014). “Use of electrical resistivity as an indicator for durability”, *Construction and Building Materials*, Pages 434–441.
37. Song, S., Jiang, L.,Jiang, S., Yan,X., and Xu, N. (2018). “The mechanical properties and electrochemical behavior of cement paste containing nano-MgO at different curing temperature” *Construction and Building Materials*, Vol. 164, pp. 663–671.
38. Safiuddin, Md., and Hearn, N.(2005). “Comparison of ASTM saturation techniques for measuring the permeable porosity of concrete” *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp1008-1013.
39. Sherman, R.M., David, M.B., and Pfeifer, D.W. (1996). “Durability aspects of precast prestressed Concrete-Part 1 and 2.” *Journal of PCI*, Vol. 41, No. 4, pp. 60-64.
40. Song, H.W., Lee, C.H., and Ann, K.Y. (2008). “Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments,” *Cement and concrete composites*, Vol. 30, pp. 113-121.
41. Stanish, K., Thomas, M. (2003). “The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficients.” *Cement and concrete research*, Vol. 33, pp. 55-62.
42. Young, J.F., Mindess, S., and Darwin, D. (2002). *Concrete*,

Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A..

43. Yimou, A., Chengbin, D., and Faliang. (2008). "Concrete crack measurement by electrical resistivity" Journal of Southeast University, Vol. 38, No.2, pp.289-292.
44. Zanni, H., Cheyrezy, M., Maret, V., Philippot, S., and Nieto, P. (1996). "Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using "Si NMR"." Cement and concrete research , Vol. 26, pp. 93-100.