

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
Mix design development and quality evaluation of high integrity
concrete disposal container

計畫編號：109A002

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 109 年 1 月至 109 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：2020 年 11 月 23 日

目錄

目錄.....	I
圖目錄.....	IV
表目錄.....	VIII
摘要.....	IX
Abstract.....	X
壹、計畫緣起與目的.....	1
一、研究背景.....	1
二、研究目的.....	1
三、研究內容.....	2
貳、文獻回顧.....	4
一、高完整性容器用混凝土.....	4
(一) 法國.....	4
(二) 斯洛伐克.....	5
二、活性粉混凝土.....	7
(一) 基本設計原理.....	7
(二) 添加卜作嵐摻料之影響.....	9
三、混凝土力學與耐久性評估.....	10
(一) 高溫養護與混凝土品質.....	10
(二) 添加鋼纖維對混凝土劈裂強度的影響.....	13
(三) 添加鋼纖維對電阻率影響.....	13
(四) 表面電阻率與其他相關之相關性試驗.....	14
(五) 不同飽和方法對混凝土孔隙率量測.....	16

(六) 混凝土收縮機制.....	17
四、 電子顯微鏡(SEM)試驗.....	19
五、 X光繞射分析(XRD)試驗.....	25
六、 先前研究之參數及配比.....	29
參、 研究方法與過程.....	31
一、 實驗材料.....	31
二、 實驗流程.....	35
三、 實驗變數.....	39
四、 實驗方法.....	41
肆、 主要發現與結論.....	47
一、 鋼纖維添加比例.....	48
二、 減水劑比例.....	53
三、 搗實方式.....	59
四、 養護方式及天數.....	62
五、 抗壓強度試驗.....	63
六、 孔隙率試驗.....	64
七、 劈裂試驗.....	66
八、 直接拉力試驗 (Tensile strength test).....	67
九、 體積穩定性試驗.....	70
十、 與高完整性容器混凝土規範的比較.....	72
十一、 表面電阻率試驗.....	72
十二、 電子顯微鏡觀察.....	75
十三、 X光繞射分析試驗.....	77

十四、	結論.....	79
伍、	先前研究配比之結果比較.....	83
一、	抗壓強度試驗.....	83
二、	孔隙率試驗.....	84
三、	表面電阻率試驗.....	85
陸、	參考文獻.....	87

圖目錄

圖 2.1 纖維混凝土容器尺寸(Hudoba, 2007)	6
圖 2.2 纖維混凝土容器運送之狀況(Hudoba, 2007)	6
圖 2.3 活性粉混凝土材料堆積示意圖(Mostofinejad et al., 2016).....	10
圖 2.4 不同養護方式對活性粉混凝土強度影響(Hiremath and Yaragal, 2017).....	11
圖 2.5 養護溫度對活性粉混凝土強度之影響(莊美玲, 2014).....	12
圖 2.6 養護溫度對活性粉混凝土強度影響(Lee and Chisholm, 2005)	12
圖 2.7 鋼纖維含量與劈裂強度之關係(Gesoğlu et al., 2016).....	13
圖 2.8 表面電阻率與快速氯離子滲透試驗相關性(Ramezani pour et al., 2011).....	15
圖 2.9 表面電阻率與快速氯離子滲透試驗相關性(Jussara et al., 2012)	15
圖 2.10 不同飽和方式之孔隙率(Safiuddin et al., 2005)	17
圖 2.11 不同鋼纖維添加量之混凝土自體收縮圖(Bandelj et al., 2011)	18
圖 2.12 不同水膠比之混凝土乾縮量圖(Tam et al., 2012).....	18
圖 2.13 活性粉混凝土水中養護之 SEM 照片(Hiremath et al., 2017)	19
圖 2.14 活性粉混凝土熱水養護之 SEM 照片(Hiremath et al., 2017)	20
圖 2.15 活性粉混凝土在 60°C 養護時之 SEM 照片(Xun et al., 2020)	21
圖 2.16 活性粉混凝土在 80°C 養護時之 SEM 照片(Xun et al., 2020)	

.....	21
圖 2.17 活性粉混凝土在 90°C 養護時之 SEM 照片(Xun et al., 2020)	22
.....	22
圖 2.18 漿體與粒料黏結狀況(Shen et al., 2018)	23
圖 2.19 漿體與鋼纖維黏結狀況(Shen et al., 2018)	23
圖 2.20 7 天齡期之高溫養護漿體之內部結構(莊美玲, 2014)	24
圖 2.21 28 天齡期之高溫養護漿體之內部結構(莊美玲, 2014)	25
圖 2.22 不同養護齡期之 X 光繞射分析結果(Shen et al., 2018)	26
圖 2.23 不同養護溫度下之 X 光繞射分析結果(Xun et al., 2020)	27
圖 2.24 X 光繞射分析結果(莊美玲, 2014)	28
圖 2.25 不同齡期下 C-S-H 膠體 X 光繞射分析結果(Maddalena et al., 2019)	29
圖 3.1 石英粉粒徑分佈曲線圖	33
圖 3.2 粒徑分佈曲線圖	34
圖 3.3 鍍銅微鋼纖維	35
圖 3.4 參數試驗流程圖	37
圖 3.5 試驗規劃流程圖	38
圖 3.6 直接拉力試驗試體尺寸	43
圖 3.7 孔隙率試驗抽真空設備	44
圖 3.8 混凝土試體電阻係數量測示意圖	45
圖 3.9 混凝土乾縮試體	46
圖 4.1 不同鋼纖維添加量混凝土試體孔隙率比較	50
圖 4.2 鋼纖維添加量 1.0%之混凝土試體剖面照片(石英砂比例 2.0)	

.....	51
圖 4.3 鋼纖維添加量 2.0%之混凝土試體剖面照片(石英砂比例 1.2)	51
.....	52
圖 4.4 鋼纖維添加量 1.5%之混凝土試體剖面照片(石英砂比例 1.2)	52
.....	52
圖 4.5 鋼纖維添加量 1.0%之混凝土試體剖面照片(石英砂比例 1.2)	52
.....	53
圖 4.6 不同鋼纖維含量之 7 天劈裂強度.....	53
圖 4.7 不同減水劑用量混凝土試體之孔隙率.....	56
圖 4.8 減水劑用量 1.3%之混凝土剖面(石英砂比例 1.2)	56
圖 4.9 減水劑用量 0.4%之混凝土剖面(石英砂比例 1.2)	57
圖 4.10 減水劑用量 1.2%之混凝土剖面(石英砂比例 2.0)	57
圖 4.11 流度試驗結果.....	58
圖 4.12 不同搗實方式製作試體之孔隙率.....	60
圖 4.13 搗棒搗實之試體剖面狀況.....	61
圖 4.14 震動 30 秒之試體側面狀況.....	61
圖 4.15 不同養護方式及天數之 7 天抗壓強度.....	63
圖 4.16 各齡期不同水膠比之抗壓強度比較圖.....	64
圖 4.17 各齡期不同水膠比之混凝土孔隙率比較圖.....	66
圖 4.18 各齡期不同水膠比之劈裂強度.....	67
圖 4.19 直接拉力試驗應力應變圖.....	68
圖 4.20 抗拉試驗試體破壞情形.....	70
圖 4.21 不同水膠比混凝土試體之體積隨齡期變化圖	71

圖 4.22 不同水膠比混凝土表面電阻率之齡期發展趨勢	74
圖 4.23 混凝土孔隙率與表面電阻率之相關性.....	74
圖 4.24 水化漿體齡期 7 天之 SEM 照片	76
圖 4.25 水化漿體齡期 28 天之 SEM 照片	76
圖 4.26 鋼纖維與漿體結合狀況之 SEM 照片	77
圖 4.27 不同水膠比混凝土齡期 7 天 X 光繞射分析圖譜.....	79
圖 4.28 不同水膠比混凝土齡期 28 天 X 光繞射分析圖譜.....	79
圖 5.1 不同配比之抗壓強度比較圖.....	84
圖 5.2 不同配比之孔隙率比較圖.....	85
圖 5.3 不同配比之表面電阻率比較圖.....	86

表目錄

表 2.1 法國纖維混凝土 28 天之機械及物理性能(Pech, 1992).....	4
表 2.2 高性能纖維混凝土之機械性能(Hudoba, 2007)	5
表 2.3 活性粉混凝土配比(Richard et al., 1995)	7
表 2.4 活性粉混凝土材料運用參數.....	8
表 2.5 添加鋼纖維對表面電阻率之影響.....	14
表 2.6 配比 M 養護方式參數.....	29
表 2.7 混凝土配比 M (單位：kg/m ³).....	30
表 3.1 水泥化學成分.....	32
表 3.2 矽灰與石英粉化學成分.....	33
表 3.3 本研究採用之配比代號及水膠比.....	40
表 3.4 混凝土配比(單位：kg/m ³).....	41
表 4.1 不同鋼纖維添加含量之混凝土配比表.....	50
表 4.2 減水劑添加比例之配比表.....	55
表 4.3 不同水膠比之活性粉混凝土最佳減水劑用量.....	58
表 4.4 不同水膠比混凝土直接拉力試驗結果.....	70
表 4.5 活性粉混凝土測試配比機械性質與容器混凝土標準比較	72

摘要

關鍵詞：活性粉混凝土、高完整性盛裝容器、熱養護、矽灰、鋼纖維

本研究採用活性粉混凝土技術，發展製作低放射性廢棄物高完整性容器之混凝土配比。主要分為兩個部分，第一部分為活性粉混凝土的配比參數選擇，以流度值 15.5 cm 為控制標準，進行不同配比之流度控制，選定減水劑及鋼纖維的添加量，並達到所需之工作性，再以振動方式製作試體；同時，為提升盛裝容器混凝土之品質，利用 90°C 熱水養護一天，加速活性粉混凝土之水化反應，以改善內部微結構。第二部分為降低水膠比 ($W/B = 0.22$ 、 0.20 及 0.18)，針對活性粉混凝土的力學特性及耐久性能製作多種配比之試體，一方面提出優化之活性粉混凝土配比，另一方面評估活性粉混凝土應用於盛裝容器上的潛力。

三種不同水膠比之活性粉混凝土配比透過 90°C 熱水養護方法製作試體，進行抗壓強度、劈裂、直接拉力、孔隙率、體積穩定性、表面電阻率試驗。試驗結果顯示，在硬固性質方面，以水膠比 0.18 配比試體表現較為優異，顯示降低水膠比確實能提高強度以抵抗外部荷載；在耐久性質方面，因採用低水膠比及高溫熱水養護加速卜作嵐反應，三種水膠比混凝土配比性質差異並不顯著，其中在表面電阻率試驗結果方面，各配比試體表面電阻率隨孔隙率增加而降低的趨勢很穩定，顯示以非破壞性的表面電阻率檢測方法，可適用於活性粉混凝土的快速品質檢測。

本研究與先前研究團隊所使用之配比 M 進行比較，發現活性粉混凝土配比在抗壓強度及孔隙率方面具有較好的表現，顯示活性粉混凝土具備用於製作高完整性盛裝容器之潛力。

Abstract

Keywords : Reactive Powder Concrete, Highly Integrated Container, Heat Curing, Silica Fume, Steel Fiber

In this study, the reactive powder concrete was adopted to develop a concrete mix for highly-integrated container. The first part of the study was to determine the proportioning parameters of reactive powder concrete for the intended application. For various amounts of steel fiber content, the flow of the trial mixes was kept at 15.5 cm by adding superplasticizer for consistent workability. The vibrating table was used and a vibration of 60 seconds helped in removing air bubbles in the mold. In order to improve the quality of the reactive powder concrete mixes, the specimens were cured in hot water at an elevated temperature of 90°C for 1 day. The second part of the study was to prepare concrete specimens with varying water-to-binder ratios (w/b) of 0.22, 0.20, and 0.18, and then assessed the mechanical and durability properties of these concrete mixes such that potential mixes for highly integrated container can be identified.

Concrete specimens made at 3 different w/b ratios were tested for compressive strength, splitting tensile, porosity, volume stability, and surface resistivity. Test results show that concrete mix with a w/b ratio of 0.18 exhibits the highest mechanical properties. This indicates that decreases in w/b ratio improve the stress-bearing capacity of the concrete mix effectively. On the other hand, due to the dense microstructure produced from accelerated pozzolanic reaction upon high-temperature curing, variations in the durability properties of concrete mixes were found to be insignificant in the range of w/b ratios investigated. In addition, the surface resistivity of specimens was found to be correlated well with the porosity for reactive powder concrete. This indicates that the non-

destructive surface resistivity test shows a potential to be used as a technique for quality control of reactive powder concrete.

The mechanical and durability properties of reactive powder concrete in this study are compared with those obtained from previous studies on mixture M. The reactive powder concrete is considered to show better performance than mixture M, in terms of the compressive strength, porosity, and volume stability. Thus, it is concluded that reactive powder concrete has a potential to be used in making highly-integrated containers.

壹、計畫緣起與目的

一、研究背景

「核廢料」是指具有放射性的廢棄物及用過核子燃料，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。近年來綠色能源逐漸崛起，核能電廠 1 廠也因運轉年限已到而需準備研擬除役計畫，且日常生活中醫療機構、工業機構等所產生之低放射性廢棄物也須妥善處理，故其貯存與處置日益重要。

低放射性廢棄物最終處置的設計，世界各國皆採「多重障壁」的概念，利用多層防護措施，隔絕放射性廢棄物於人類生活環境之外，處置設施障壁主體由混凝土所組成；由於低放射性廢棄物所含放射性核種為大量鈷-60 及少量銫-137，其半衰期分別為 5.2 年及 30.2 年，因此考量到放射性廢棄物輻射強度對人類生活環境影響，最終處置設施需提供 300 年以上長期圍阻功能，才能使廢棄物放射性強度降至環境背景值。

二、研究目的

低放射性廢棄物高完整性容器主要由混凝土所構成，但不同於一般結構物之混凝土用途常以 50 年至 100 年為設計年限，必須考慮廢棄物之放射性衰變至不影響人類生活及環境，因此處置設施需要維持障壁功能至少 300 年。

我國最終處置設施候選場址可能建造於濱海區域，此環境易使混凝土劣化而降低耐久性，故為了研發更高品質的混凝土盛裝容器及減少容器製作的困難，將活性粉混凝土運用於製作盛裝容器，活性粉混凝土去除了粗粒料以增加漿體均勻性並改善微結構，對於盛裝容器壁厚的縮減具有良好的效益，減少漿體分布不均勻的疑慮，

且適當的使用熱養護也能改善混凝土的微結構，增加其緻密性。

本研究針對活性粉混凝土變化水膠比探討其各項性質，並嘗試利用高溫養護方式加速混凝土水化作用及改善混凝土微結構，以提升混凝土耐久性，針對不同配比之混凝土進行一系列力學、耐久性及非破壞性成效比較，評估活性粉混凝土應用於高完整性盛裝容器之潛力。

三、 研究內容

- (一) 探討在活性粉混凝土中矽灰、石英砂、石英粉及鋼纖維使用比例對盛裝容器用混凝土品質的影響，透過孔隙率試驗來選擇最適合之比例及添加量，依據活性粉混凝土之工作性及流動性來決定最佳減水劑添加比例，最後決定混凝土試體製作方式及高溫養護溫度，以確定所需使用混凝土配比及建立標準試體製作程序，以利後續工程性質相關試驗進行。
- (二) 本研究採用之混凝土配比，係參考文獻中所提出的活性粉混凝土配比設計原則，並且降低水膠比，製作試體進行混凝土基本物理性質特性與新拌特性的分析，且為了增加混凝土之抗張能力，在配比中加入鋼纖維，增強混凝土之抗張能力，以期有效降低混凝土容器之厚度。
- (三) 活性粉混凝土試體試驗項目包括硬固性質的抗壓強度、劈裂及直接拉力試驗與耐久性質的體積穩定性、孔隙率及電阻率試驗。
- (四) 為加速混凝土材料品質之提升，將養護技術運用在混凝土材料上，提高養護溫度至 90°C，同時也將高溫養護後的試體進

行微觀試驗，以探討提高養護溫度對混凝土的品質與耐久性改善的正面效益。

(五) 依據 ASTM C 496 方法對混凝土試體進行劈裂試驗，了解活性粉混凝土配比變化與其劈裂強度的關係，以驗證混凝土抵抗張力荷載的能力。

(六) 以非破壞檢測之電阻率試驗快速取得活性粉混凝土量測值之方法，可用於推估混凝土內部結構是否緻密，並據以判斷混凝土品質。

貳、 文獻回顧

一、 高完整性容器用混凝土

(一)法國

法國纖維混凝土製造商(Sogefibre)於 1988 及 1989 年取得兩項專利後，所製作的纖維混凝土可符合法國放射性廢物管理機構(ANDRA)的各項規範。

Sogefibre 公司所生產的容器尺寸主要有三種，依據廢棄物尺寸及用途來劃分，如下所示：

1. CBF1-C1:外觀為圓柱體，內徑為 690 mm，高度為 1200 mm，有效容積為 330L，壁厚為 74 mm。
2. CBF1-C2:外觀為圓柱體，內徑為 850 mm，高度為 1500 mm，有效容積為 700L，壁厚為 74 mm。
3. CBF1-K:外觀為正方體，長度、寬度及高度皆為 1700 mm，有效容積為 3000L，壁厚為 100 mm。

所製造的盛裝容器是使用纖維混凝土，具有強化混凝土基質、提升破裂強度、及減少微裂縫等優點，有效達成長期圍阻廢棄物的功能。Sogefibre 使用的是一種鉻合金片狀纖維(Fibraflex)所製成混凝土，其機械性質與 Andra 規範的比較如表 2.1 所示。

表 2.1 法國纖維混凝土 28 天之機械及物理性能(Pech, 1992)

	INDUSTRIAL RESULTS (after one year operation)	ANDRA CRITERIA
- Specific gravity	2.4	
- Compressive strength	60 to 70 MPa	> 50 MPa
- Tensile strength	4.5 to 5.5 MPa	> 4.5 MPa
- Shrinkage	about 290 $\mu\text{m}/\text{m}$	< 300 $\mu\text{m}/\text{m}$
- Weight loss	0.7 %	

(二) 斯洛伐克

依據法國處置容器製造廠商(Sogefibre)的經驗並取得許可後，利用高性能纖維混凝土(HPFRC)的配比為基礎，對材料進行了部分修改，並且添加金屬片狀纖維(Fibraflex)用以增加抗拉強度，由於這款金屬纖維經過高溫淬鍊後改變其晶態，故纖維具有良好的韌性和極好的機械性能，使用這些材料的目的是為了製造耐 300 年之容器，其基本性質如表 2.2 所示。

斯洛伐克所使用纖維混凝土容器為箱型，由圖 2.1 及圖 2.2 所示可知尺寸為 1.7 m×1.7 m×1.7 m，其實際容量約 2.9 m³，將放射性廢棄物置入容器內後，利用水泥漿體將其固化並運送至處置場存放。

表 2.2 高性能纖維混凝土之機械性能(Hudoba, 2007)

Age [days]	7	28	90
Compressive strength f_c [MPa]	47.80	71.10	87.80
Tensile strength $f_{ct,spl.}$ [MPa]	4.05	4.59	5.28
Tensile strength $f_{ct,bend.}$ [MPa]	6.74	7.73	8.52
Modulus of elasticity M [GPa]	32.68	39.63	40.99

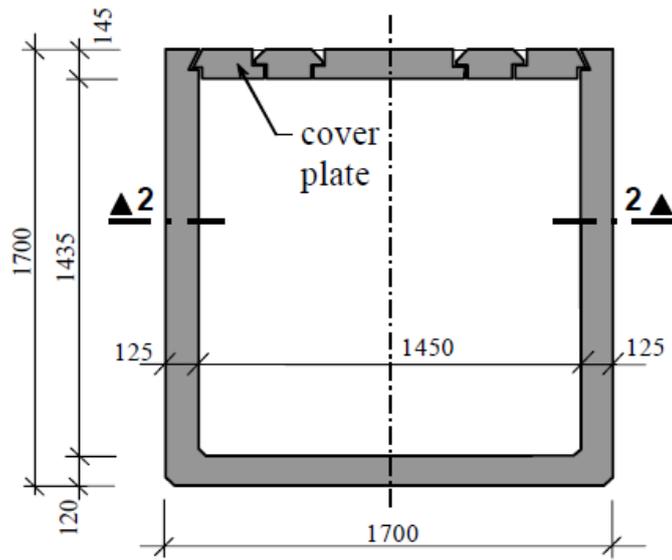


圖 2.1 纖維混凝土容器尺寸(Hudoba, 2007)

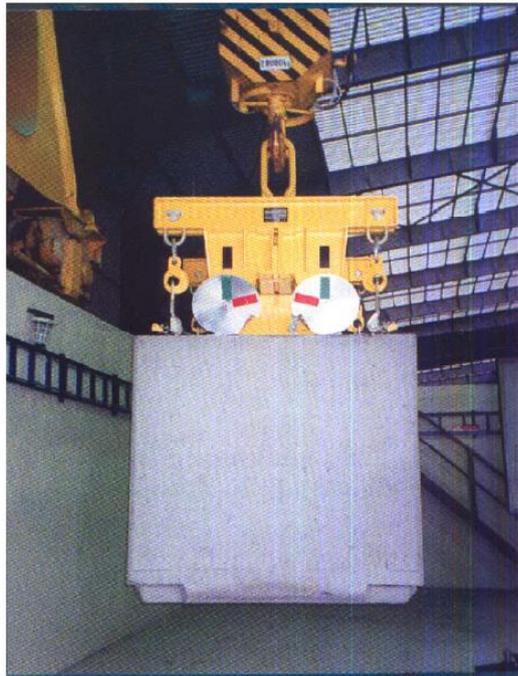


圖 2.2 纖維混凝土容器運送之狀況(Hudoba, 2007)

二、 活性粉混凝土

(一)基本設計原理

關於活性粉混凝土的發展，起初是由法國 Bouygues 公司所研發，此種材料一直是法國軍方的機密，僅用於軍事工程，而 Bouygues 公司人員 Richard and Cheyrezy (1994)在舊金山的美國混凝土協會春季國際會議上首次公開其研究成果，使得活性粉混凝土逐漸被外界所認識。

Richard et al. (1995)主要使用的配比为 RPC-200 與 RPC-800，其力學性質試驗結果顯示，活性粉混凝土經過熱養護後其值可以達到 200 MPa，若經過高壓高溫養護後更可達到 800 MPa。另外，抗彎強度也相當高，約為 30 到 60 MPa，經高壓高溫後更可達到 140 MPa，顯示活性粉混凝土力學性質相較於傳統混凝土都來的優異，其所使用的配比如表 2.3 所示。

表 2.3 活性粉混凝土配比(Richard et al., 1995)

	RPC 200				RPC 800	
	Non fibered		Fibered		Silica aggregates	Steel aggregates
Portland Cement	1	1	1	1	1	1
Silica fume	0.25	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23
Sand 150 - 600 μm	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	-
Crushed quartz $d_{50}=10\mu\text{m}$	-	0.39	-	0.39	0.39	0.39
Superplasticizer (Polyacrylate)	0.016	0.019	0.016	0.019	0.019	0.019
Steel fiber L=12 mm	-	-	0.175	0.175	-	-
Steel fiber L=3 mm	-	-	-	-	0.63	0.63
Steel aggregates <800 μm	-	-	-	-	-	1.49
Water	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19
Compacting pressure	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
Heat treatment temperature	20°C	90°C	20°C	90°C	250-400°C	250-400°C

從活性粉混凝土的相關文獻中可以了解水泥、矽灰、石英粉與石英砂為所使用的材料，且採用重量法做為設計配比的依據，如表 2.4 所示，舉例出 4 篇活性粉混凝土的文獻探討各種材料的使用比例，綜合各篇文獻的結果可知，以水泥用量定為 1.0，矽灰的用量範圍為 0.23 到 0.32，石英粉的用量範圍為 0.3 到 0.39，石英砂的用量範圍為 0.7 到 1.4；養護方式包括常溫水中養護、高溫養護及高溫高壓養護。

表 2.4 活性粉混凝土材料運用參數

	水泥	矽灰	石英粉	石英砂	養護方式
					(1) 20-90°C
Richard et al. (1995)	1	0.23、0.25	0.39	1.1	(2) 50 MPa
					250°C-400°C
Shen et al. (2018)	1	0.3	0.3	0.7-1.1	90°C steam for 48hr
Shafieifar (2017)	1	0.32	0.3	1.4	Water curing
Tam (2012)	1	0.32	0.3	1.4	Water curing

從國內外活性粉混凝土文獻研究發現其基本原理無非是要改善混凝土的性能及減少材料內部的缺陷以達到提高強度和耐久性，設計原理基於以下原則：

1. 去除粗粒料以增加均勻性。
2. 以粒料緻密堆積的方式設計配比，並在凝結時施予壓力。
3. 高溫養護的方式改善材料微結構，提升相關性能。
4. 添加鋼纖維提高延展性。

Tam et al. (2012)提到活性粉混凝土相較於一般混凝土有較多的優勢:

1. 具有較高的抗壓強度，約為傳統混凝土強度四倍。活性粉混凝土結構物的重量只有一般混凝土的三分之二或二分之一，有利於降低總體成本並增加可使用的空間。
2. 優異的延展性提高了結構安全性，即使在遭遇地震的情況下也可以吸收更多能量。
3. 具有優異的耐用性，可延長使用壽命並減少維護成本。活性粉混凝土不受碳酸鹽、氯化物和硫酸鹽的侵蝕，可在惡劣的氣候條件下提供建築物或結構物的保護。
4. 取代鋼筋的使用，減少成本，使得建築師在構件的設計上有更大的自由。
5. 含有大量未水化的水泥，故在開裂的情況下具有自我修復的能力。

(二)添加卜作嵐摻料之影響

活性粉混凝土之抗壓強度與延展性皆超過普通混凝土，其原因為添加卜作嵐材料增加其緻密性。

矽灰形成過程中，因相變過程中受表面張力之作用，形成非結晶相圓球狀顆粒，其表面光滑並具有較大表面積，與飛灰及水泥尺寸比較，矽灰尺寸只有飛灰及水泥粒子之 10^{-2} 。矽灰與水泥水化生成之氫氧化鈣($\text{Ca}(\text{OH})_2$)進行卜作嵐反應，產生穩定矽酸鈣水化物(C-S-H 膠體)，利用粒徑極小之特性，填充不同粒徑顆粒間孔隙增加密實性，亦提高混凝土強度及增加耐久性。

石英粉為卜作嵐材料的一種，為高二氧化矽的材料，需於較

高溫度時才會與氫氧化鈣($\text{Ca}(\text{OH})_2$)進行卜作嵐反應，產生 C-S-H 膠體以填充混凝土漿體與粒料間的孔隙，改善微結構使混凝土內部更緻密，可藉由微觀試驗來觀察變化。

Mostofinejad et al. (2016)指出，矽灰常做為活性粉混凝土的膠結材料，因為矽灰的顆粒尺寸較小，可以填充漿體中的孔隙，有助於增加漿體的緻密性，透過圖 2.3 之示意圖，可知漿體中水泥、石英粉、矽灰因為顆粒尺寸大小不同的緣故，在減水劑發揮效能的情況下能互相堆積。

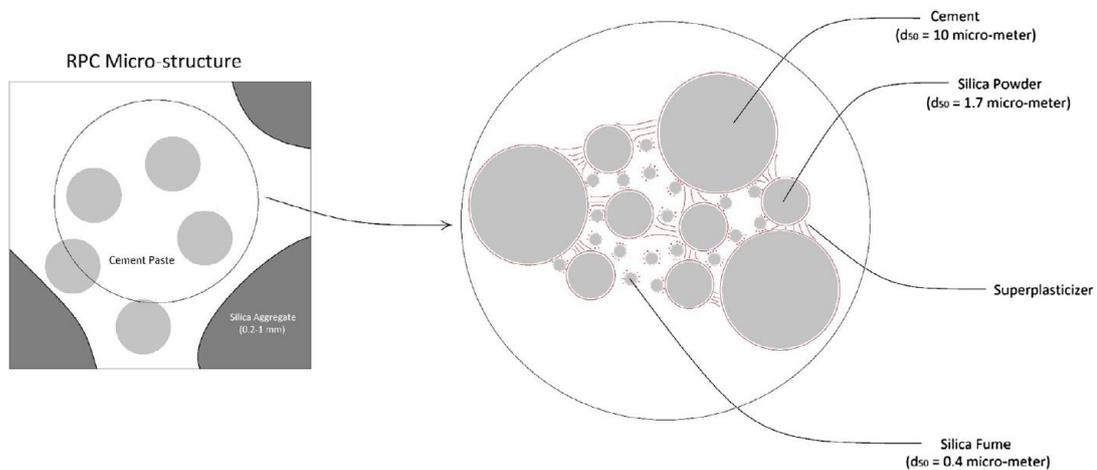


圖 2.3 活性粉混凝土材料堆積示意圖(Mostofinejad et al., 2016)

三、 混凝土力學與耐久性評估

(一) 高溫養護與混凝土品質

養護的目的在於使混凝土有足夠之水分及溫度進行水化作用，而為達到所需強度、耐久性等，則使用較高之溫度進行養護。依文獻資料顯示，若利用增加溫度進行養護處理可以使混凝土加速水化反應，亦於短時間內使混凝土中卜作嵐摻料與水泥進行卜作嵐反應(Pozzolanic reaction)，而本試驗之混凝土為低放射性廢棄物盛裝容器可能使用之配比，含有高量矽灰與石英粉等

高活性卜作嵐材料，因此進行熱養護加速卜作嵐反應，以利於提升混凝土之品質。

Hiremath and Yaragal (2017)使活性粉混凝土試體接受不同的養護方式(水中養護、空氣養護、加速養護、熱水養護及熱空氣養護)，由圖 2.4 結果可知，利用熱養護能確實提升試體抗壓強度，使試體能在早期即可達到 28 天的抗壓強度，而其中 C-S-H 膠體的產生則是提升強度發展的一大因素，故熱養護有利於強度的發展。

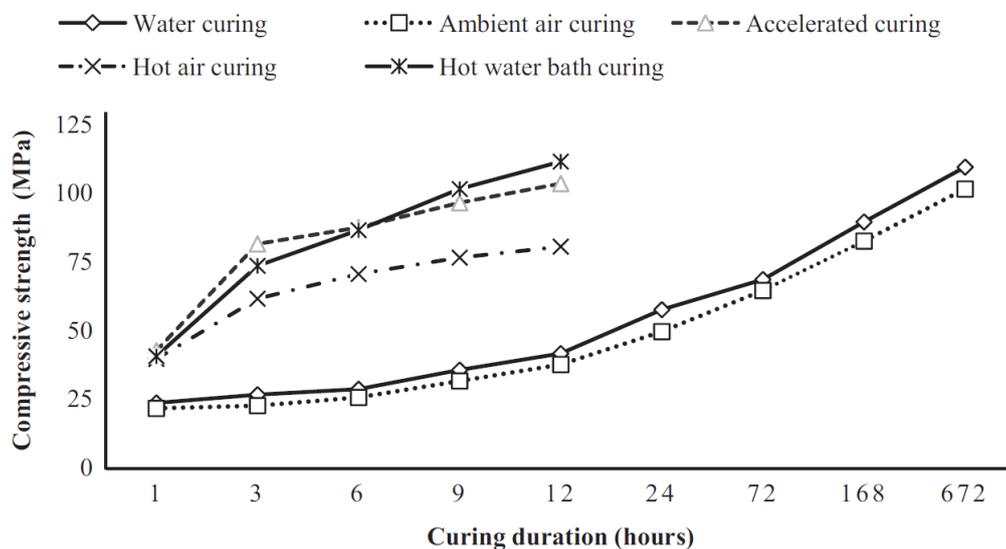


圖 2.4 不同養護方式對活性粉混凝土強度影響(Hiremath and Yaragal, 2017)

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 2.5 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。

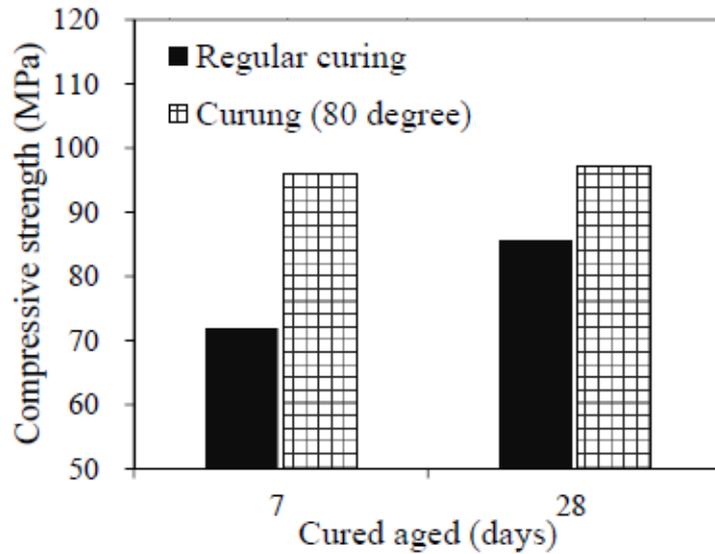


圖 2.5 養護溫度對活性粉混凝土強度之影響(莊美玲，2014)

Lee and Chisholm (2005)使用卜作嵐材料(矽灰、石英砂)添加製作混凝土利用養護溫度分別為 23°C、90°C與 160°C進行養護所得抗壓強度如圖 2.6 所示，發現養護溫度提升其抗壓強度有明顯增加之現象。

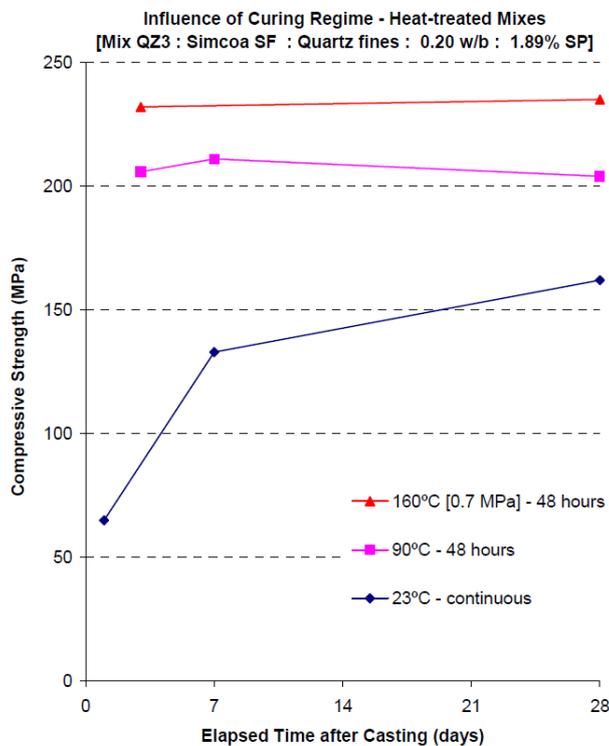


圖 2.6 養護溫度對活性粉混凝土強度影響(Lee and Chisholm, 2005)

(二) 添加鋼纖維對混凝土劈裂強度的影響

混凝土的抗拉強度是抵抗裂縫產生的關鍵，較弱的抗拉強度容易因外力或是內部因素影響而產生弱面，故添加鋼纖維以增加其抗張能力。Gesoglu et al. (2016) 藉由劈裂試驗間接取得混凝土抗拉強度，分別使用 0.25%，0.5%，0.75%，1%、1.5% 和 2% 的玻璃纖維(GF)、微鋼纖維(MSF)和鈎狀鋼纖維(HSF)，由圖 2.7 可知使用鋼纖維較前者的劈裂強度分別提高了 3.97% 到 16.79%，另一組分別為 5% 到 12.45%，顯示出鋼纖維可以有效增加抗拉強度，且其中以微鋼纖維的劈裂性能較為突出，原因可能是在相同的體積下鋼纖維的數量較鈎狀鋼纖維來的密集。

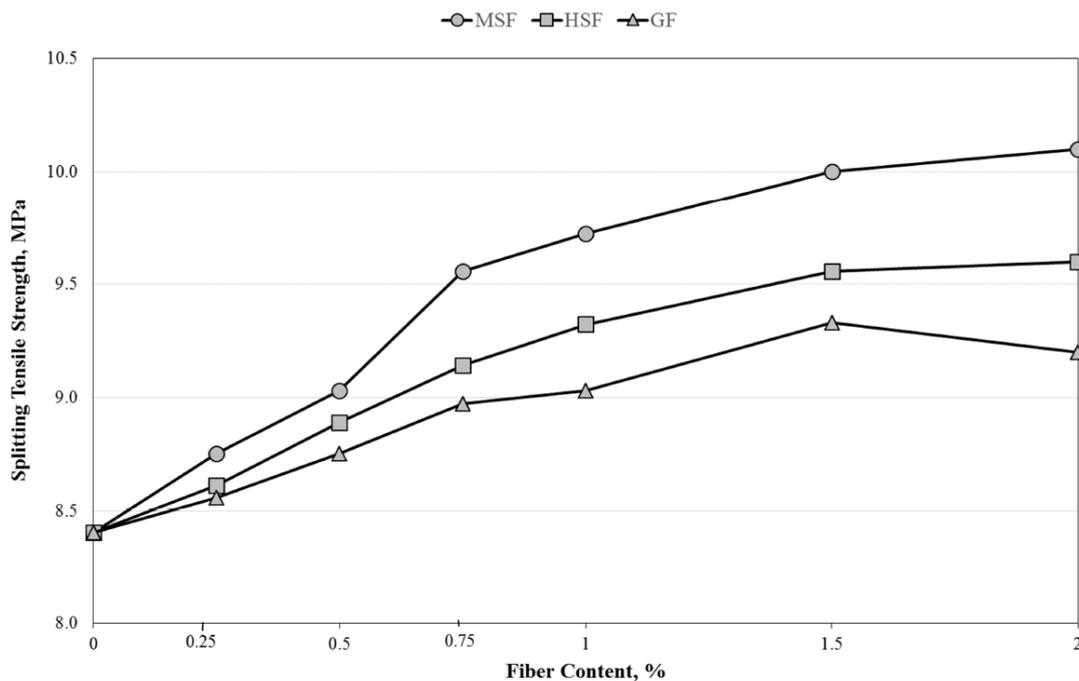


圖 2.7 鋼纖維含量與劈裂強度之關係(Gesoglu et al., 2016)

(三) 添加鋼纖維對電阻率影響

Frazao et al. (2015) 添加試體單位重之 2.5% 鋼纖維製成自充填混凝土與一般自充填混凝土進行電阻率量測，有添加鋼纖維

及未添加鋼纖維之表面電阻率結果如表 2.5 所示，可看到添加鋼纖維之配比(SFRSCC)較未添加鋼纖維之配比(SCC)電阻降低約 63%，由於鋼纖維有高電導率，使測得的表面電阻率明顯降低。並由表可以看到雖然鋼纖維會使電阻率降低，但其試體所量測之電阻率與未添加鋼纖維之電阻率發展趨勢相同，仍隨混凝土齡期增加而上升。

表 2.5 添加鋼纖維對表面電阻率之影響

配比	SCC			SFRSCC		
	7 天	28 天	90 天	7 天	28 天	90 天
表面電阻率 (kΩ-cm)	7.3	10.1	11.4	2.6	3.7	4.5

註：SCC 為自充填混凝土；SFRSCC 為鋼纖維自充填混凝土

(四)表面電阻率與其他相關之相關性試驗

Ramezani pour et al. (2011)將表面電阻率與快速氯離子滲透試驗結果進行分析，發現兩試驗間回歸分析的判定係數高達 0.898，結果如圖 2.8 所示，表示以表面電阻率推估混凝土受氯離子入侵之難易程度為可行。

Jussara et al. (2012)將兩試驗進行分析，以同一顆試體於量測表面電阻率後，將試體切割進行快速氯離子滲透試驗，再比較兩試驗結果間之相關性，如圖 2.9 所示，圖中以 ASTM C1202 及 AASHTO T358 實驗所得之數據繪製兩規範氯離子入侵混凝土可能性高低的區塊，可看到大部分之試驗數據皆落在區塊中，且

兩試驗回歸結果之相關性 R^2 為 0.92，這是因為表面電阻率與快速氣離子滲透試驗皆以混凝土內部孔隙進行傳遞，故兩試驗間有極高的相關性。

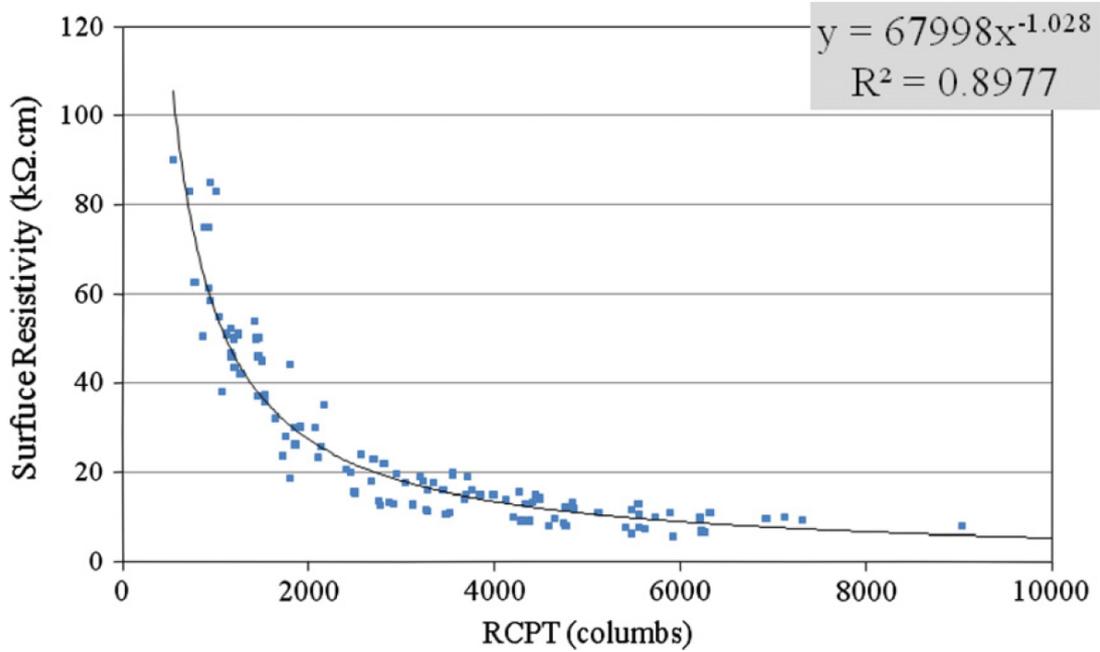


圖 2.8 表面電阻率與快速氣離子滲透試驗相關性(Ramezani pour et al., 2011)

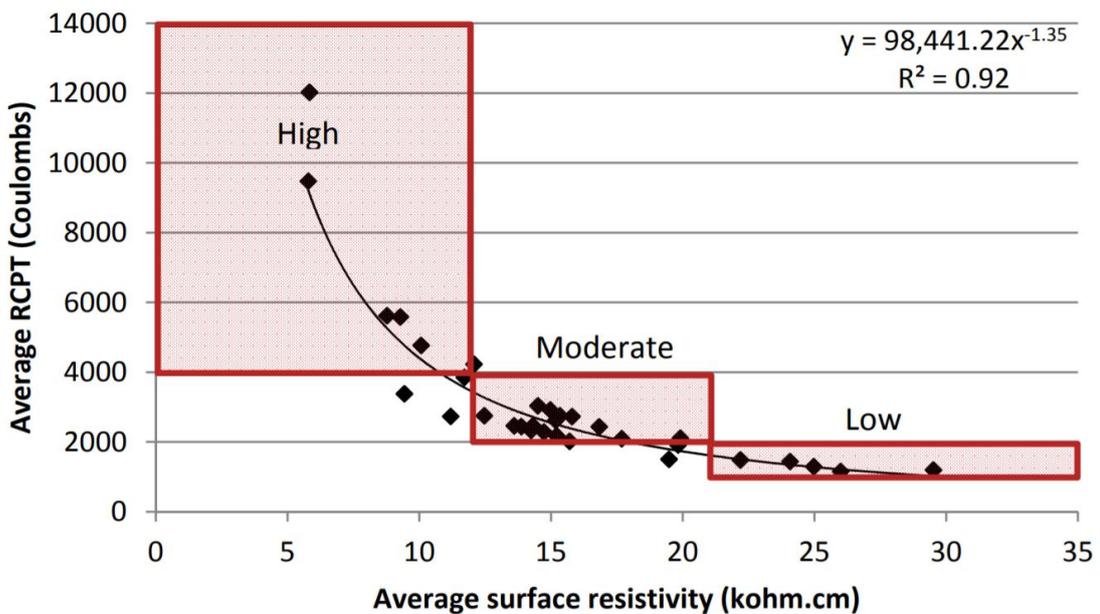


圖 2.9 表面電阻率與快速氣離子滲透試驗相關性(Jussara et al., 2012)

(五)不同飽和方法對混凝土孔隙率量測

Safiuddin et al. (2005)將試體切成 $\text{Ø}10 \times 5\text{cm}$ 利用三種實驗方式：

1. 冷水飽和(CWS)，採 ASTM C642 試驗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 試驗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 試驗法步驟，將試體放置真空容器中，抽真空至壓力達 1mmHg 以下，關閉真空幫浦並靜置於真空容器三小時後，加入蒸餾水再抽真空一小時，待試體浸泡於水中 18 ± 2 小時後進行量測。

試驗結果如圖 2.10 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。

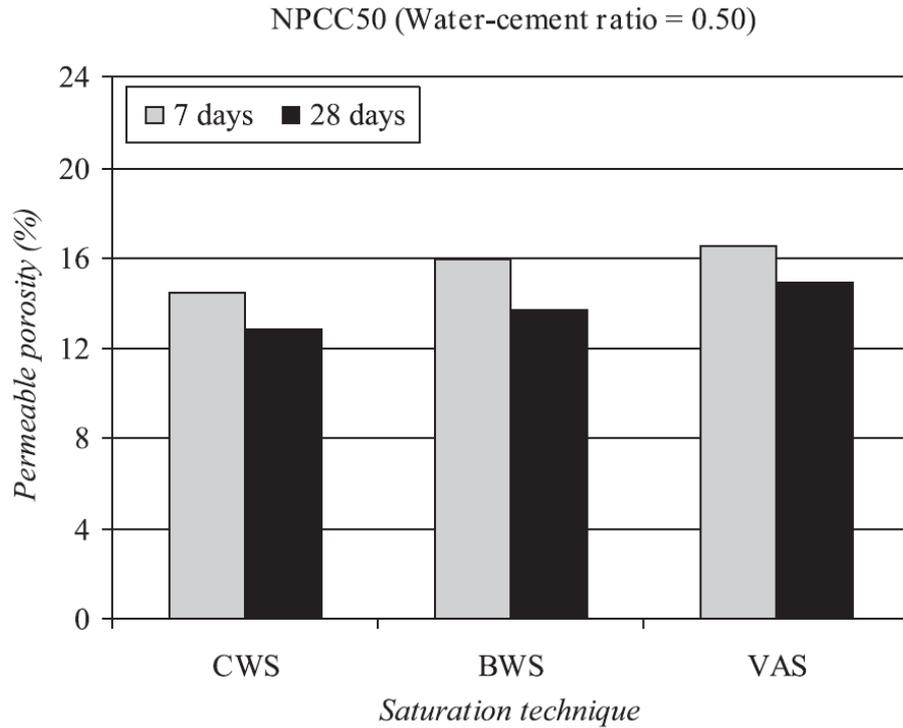


圖 2.10 不同飽和方式之孔隙率(Safiuddin et al., 2005)

(六)混凝土收縮機制

混凝土收縮是產生裂縫的主要原因，而混凝土的收縮是由於水分蒸發或水泥水化所引起的，通常發生在水泥漿體中。

Bandelj et al. (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自體收縮量，如圖 2.11 所示，隨鋼纖維添加量增加，混凝土收縮量減少，在 2%的鋼纖維含量顯示出最小的收縮量，並於齡期 14 天時，添加 2%鋼纖維之混凝土收縮率比未添加鋼纖維的混凝土低約 35%，表示添加鋼纖維可以有效降低混凝土收縮。

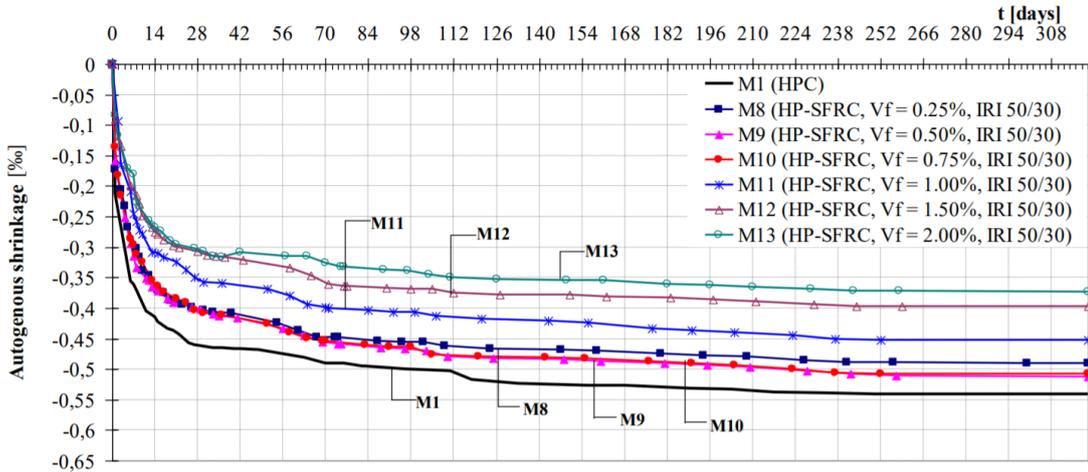


圖 2.11 不同鋼纖維添加量之混凝土自體收縮圖(Bandelj et al., 2011)

Tam et al. (2012)表示不同水膠比下的乾燥收縮量，水膠比分別為 0.40、0.23、0.20 及 0.17，如圖 2.12 所示，所有的水膠比在 14 天前收縮量較高，從第 14 天到第 100 天後逐漸穩定，而隨著水膠比的減少，其乾縮量呈現遞減的趨勢，其中水膠比 0.17 的乾縮量最少，顯示降低水膠比有助於減少乾縮量。

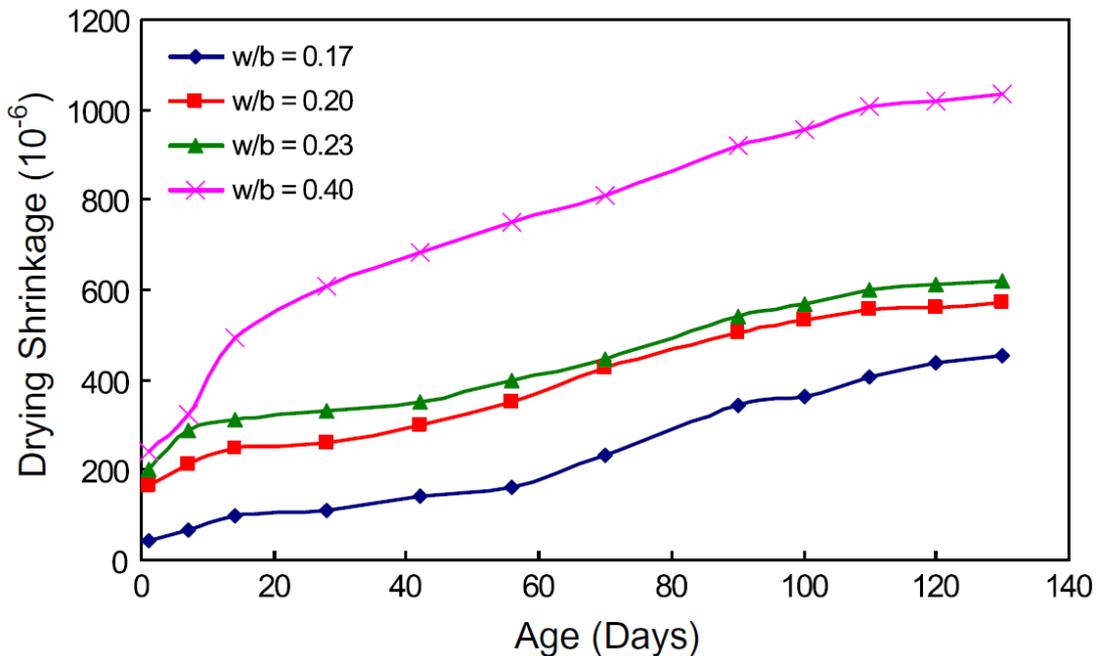


圖 2.12 不同水膠比之混凝土乾縮量圖(Tam et al., 2012)

四、 電子顯微鏡(SEM)試驗

由圖 2.13 及圖 2.14 可以發現，水中養護之活性粉混凝土其內部水化反應尚未完全，水化結構物較不完整，且有少量的鈣礬石產生；而經過熱水養護後之活性粉混凝土其內部因為有充分的水分與卜作嵐材料可以消耗矽酸鹽，進而形成大量的水化物，對強度的發展有較佳的效益(Hiremath and Yaragal., 2017)。

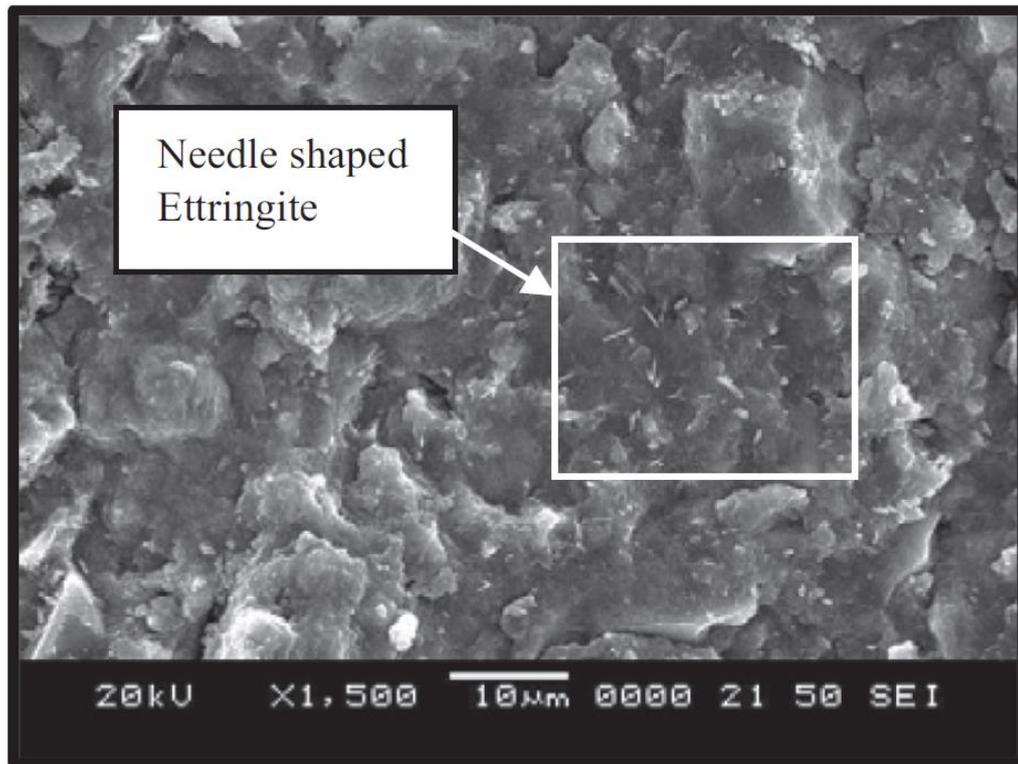


圖 2.13 活性粉混凝土水中養護之 SEM 照片(Hiremath et al., 2017)

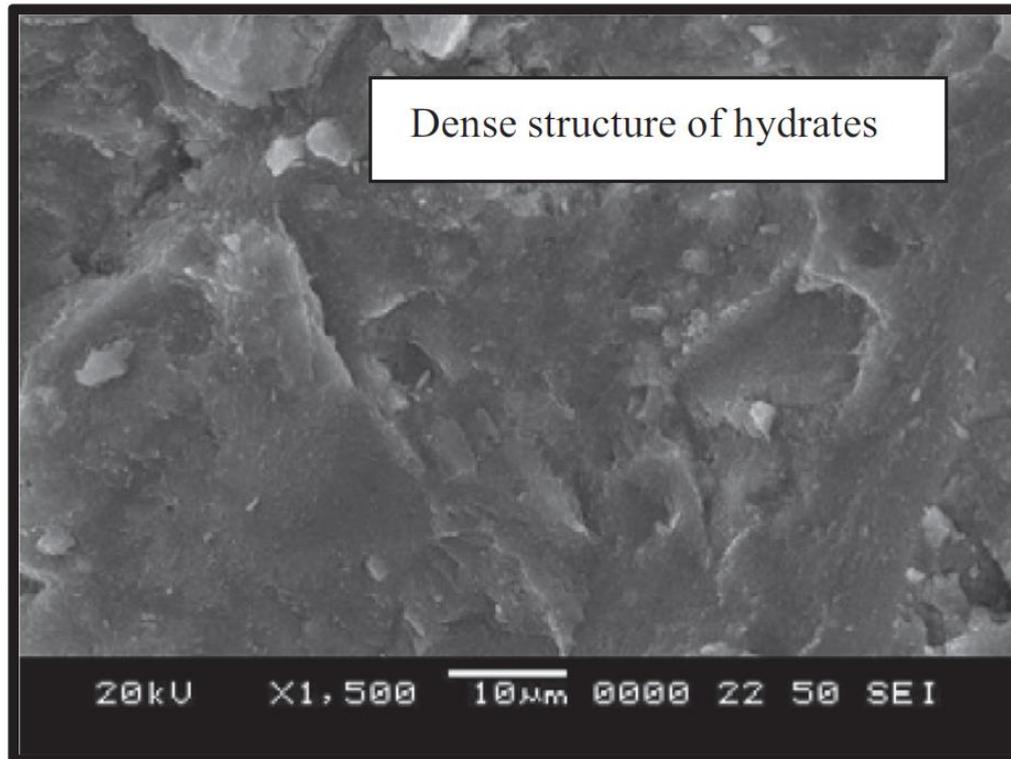


圖 2.14 活性粉混凝土熱水養護之 SEM 照片(Hiremath et al., 2017)

Xun et al. (2020)由圖 2.15、圖 2.16 及圖 2.17 中漿體的緻密程度可以了解到提高養護溫度對內部結構具有正面效益，將試體進行 60°C、80°C 及 90°C 的高溫養護後可以發現經過 3 種養護溫度後的試體其內部皆有很高的緻密性，唯有水化程度的差別，在 90°C 養護溫度的試體可以觀察到內部水化程度較完整。

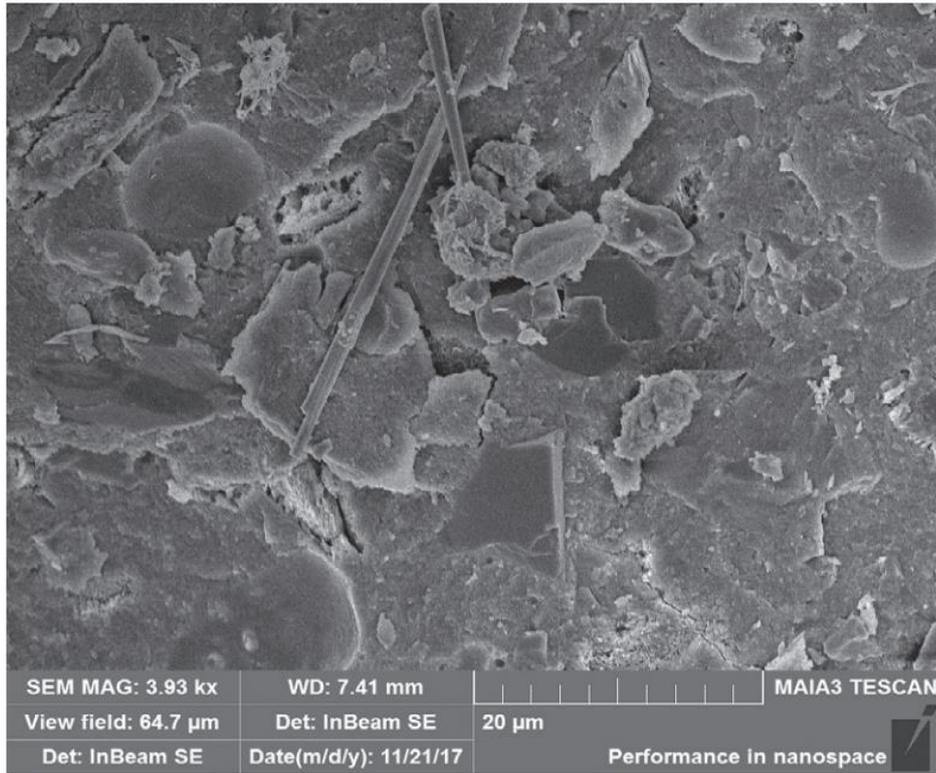


圖 2.15 活性粉混凝土在 60°C 養護時之 SEM 照片 (Xun et al., 2020)

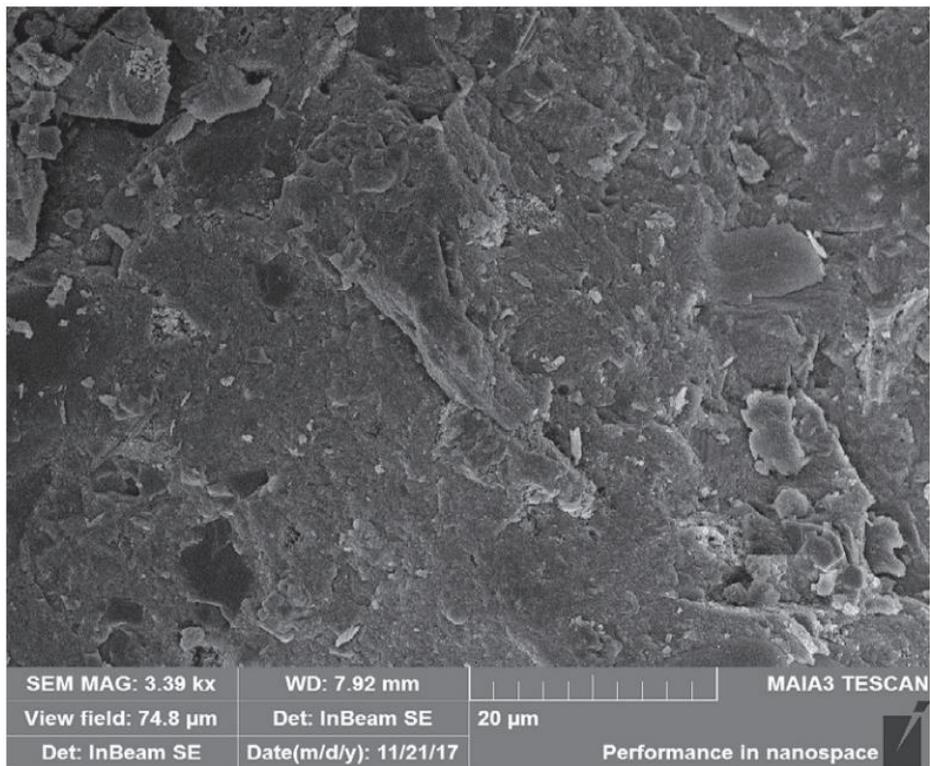


圖 2.16 活性粉混凝土在 80°C 養護時之 SEM 照片 (Xun et al., 2020)

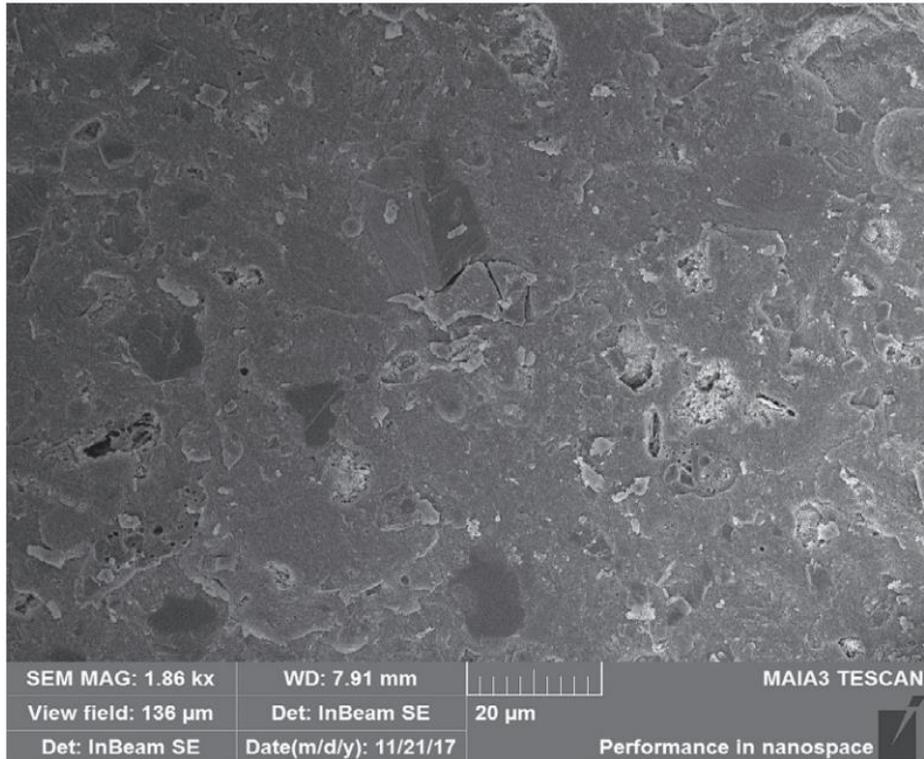


圖 2.17 活性粉混凝土在 90°C 養護時之 SEM 照片(Xun et al., 2020)

Shen et al. (2018)藉由添加矽灰、降低水膠比及熱養護來提升超高性能混凝土的品質，經觀察後粒料與漿體間的空隙隨著齡期的增加逐漸被填補，且幾乎沒有微裂縫的生成，這可歸因於纖維的添加其可有效地限制裂縫的產生，由鋼纖維與漿體間緊密的結合也可以看出其緻密性，如圖 2.18 及圖 2.19 所示。

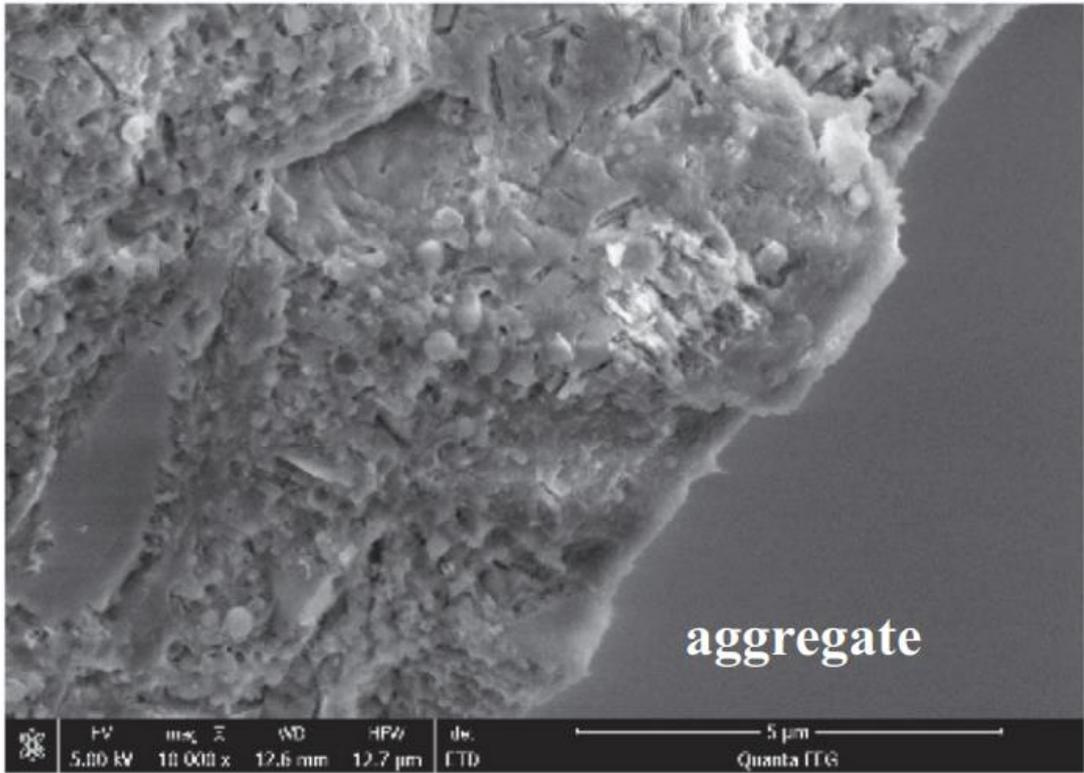


圖 2.18 漿體與粒料黏結狀況(Shen et al., 2018)

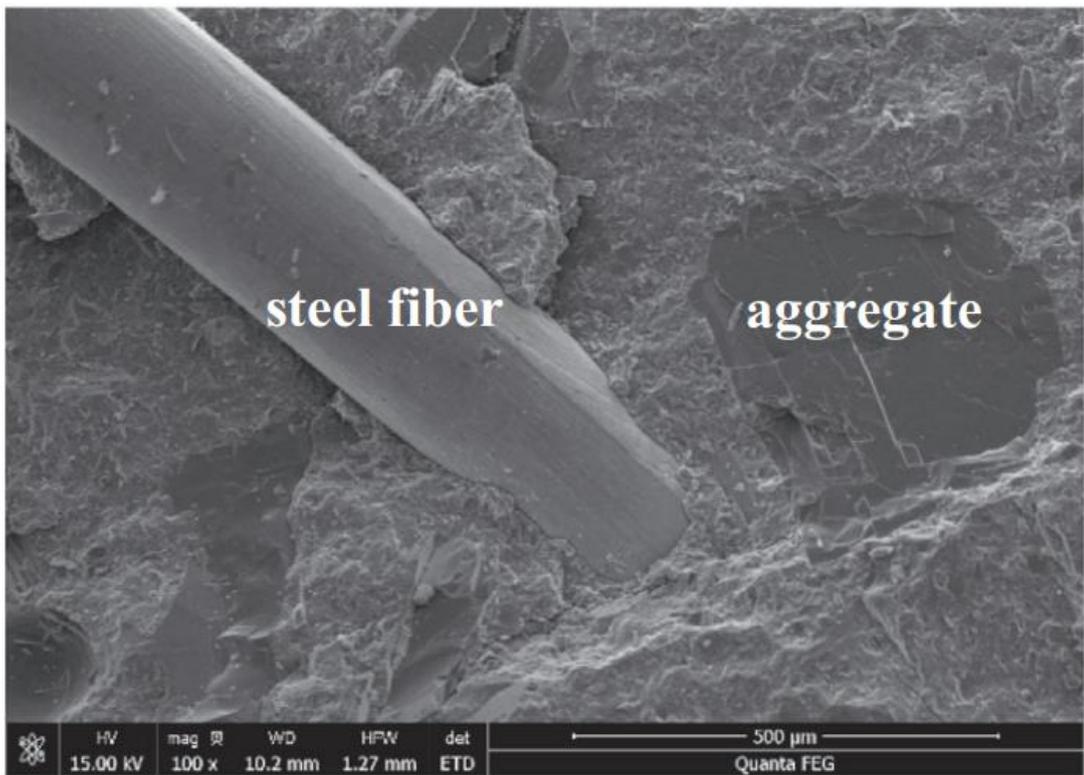


圖 2.19 漿體與鋼纖維黏結狀況(Shen et al., 2018)

莊美玲(2014)漿體的水化作用影響了混凝土的強度發展與耐久性，使用高溫養護將會使得試體內部加速卜作嵐反應，進而生成 C-S-H 膠體填補孔隙，提高混凝土內部的緻密程度，利用 SEM 可以觀察混凝土內部的變化情形，圖 2.20 及圖 2.21 結果也顯示經過高溫養護過後的漿體表面的水化程度明顯，水化生成的膠體緊密的結合，並隨著齡期的增加表面逐漸呈現光滑。

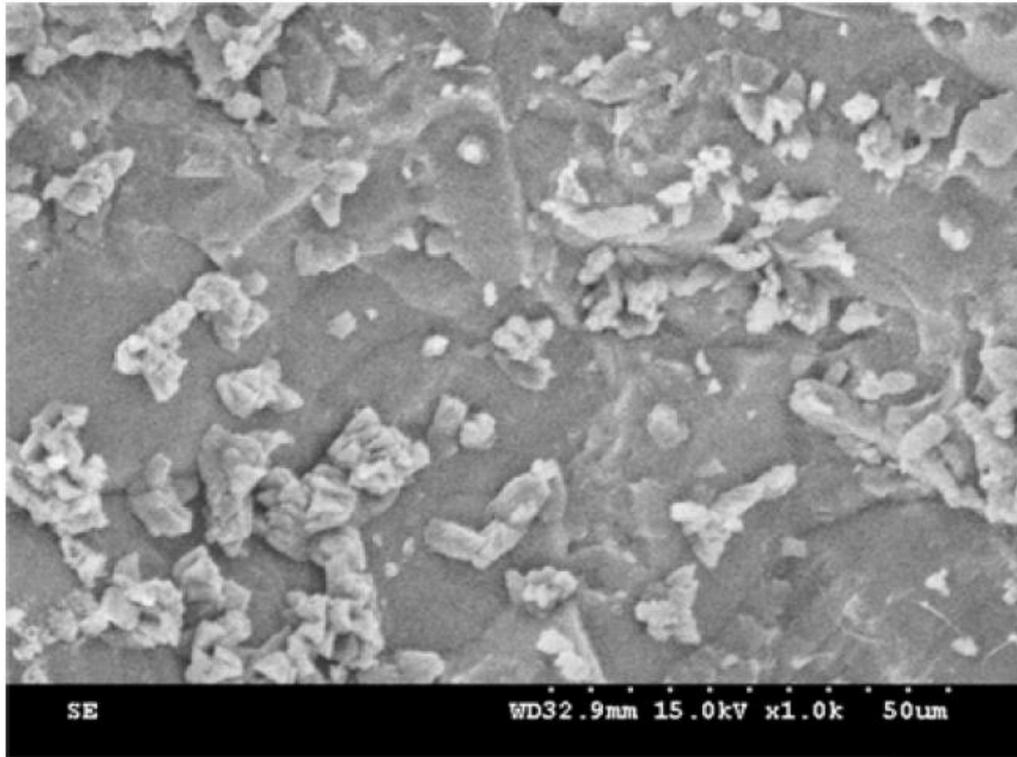


圖 2.20 7 天齡期之高溫養護漿體之內部結構(莊美玲, 2014)

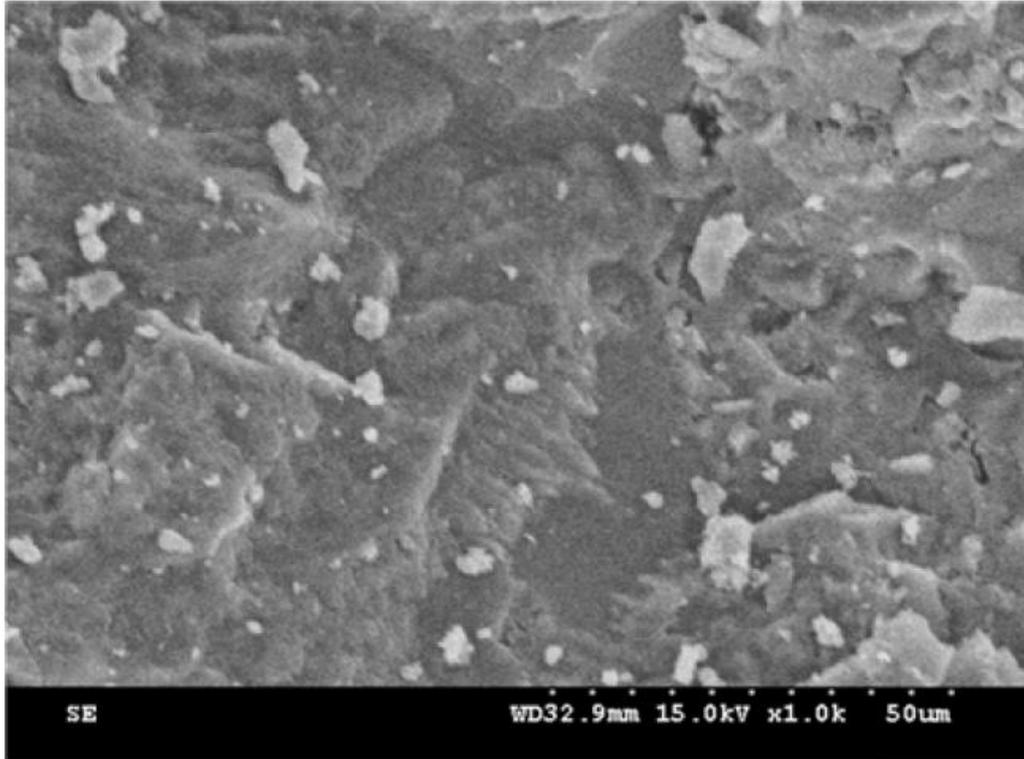


圖 2.21 28 天齡期之高溫養護漿體之內部結構(莊美玲, 2014)

五、 X 光繞射分析(XRD)試驗

Shen et al. (2018)針對不同齡期試體之 X 光繞射分析結果可知，活性粉混凝土主要的水化產物為 C-S-H 膠體及 Ca(OH)_2 (氫氧化鈣)，由圖 2.22 可發現，C-S-H 膠體被發現主要出現在 $2\theta = 28^\circ - 33^\circ$ ，而 Ca(OH)_2 主要的峰值為 $2\theta = 17.9^\circ$ ，發生卜作嵐反應時將會消耗 Ca(OH)_2 ，故可以藉由 Ca(OH)_2 的峰值高低來判斷混凝土的水化程度，隨著養護時間的增加，在 3 天、7 天、28 天及 60 天時已幾乎不見 Ca(OH)_2 的峰值。

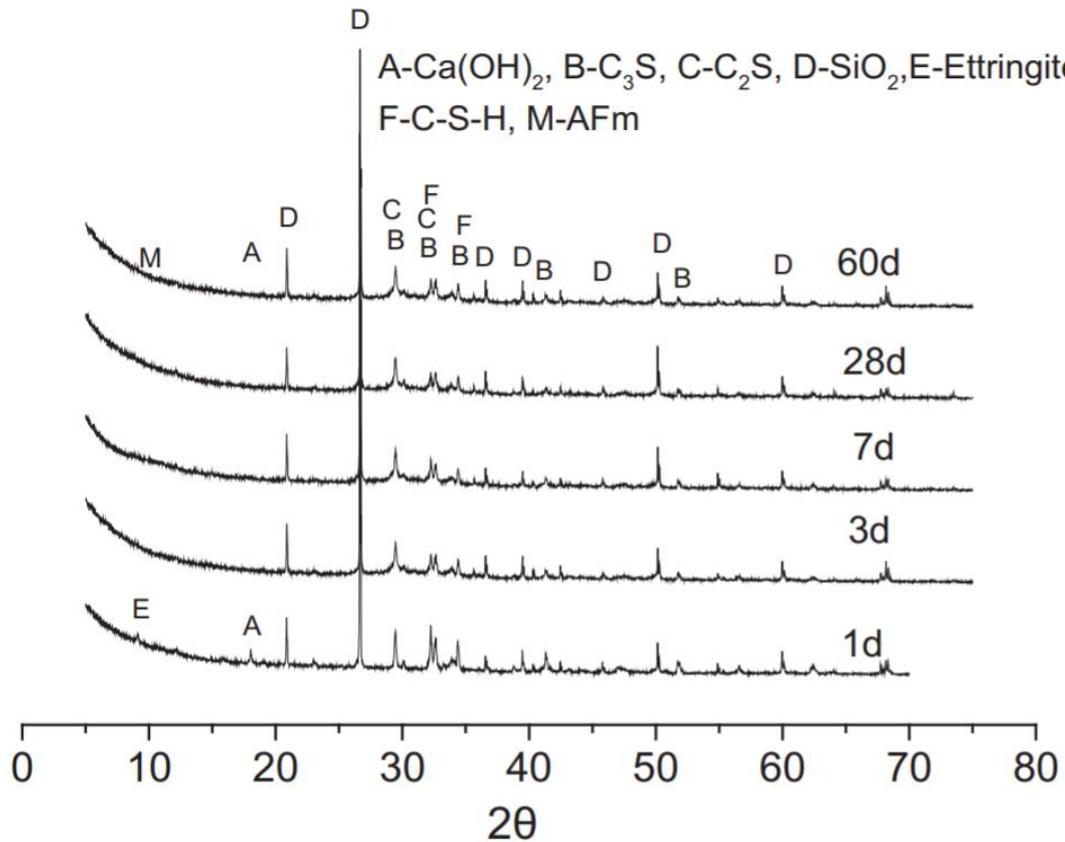


圖 2.22 不同養護齡期之 X 光繞射分析結果(Shen et al., 2018)

Xun et al. (2020)由圖 2.23 之 X 光繞射分析結果可得知裡面具
有未水化完全的 C₃S、C₂S、SiO₂ 及生成物 CaCO₃，漿體間並不會
因為養護溫度的提升使得波峰產生差異，但是值得注意的是 C₃S 及
C₂S 的波峰卻因為溫度的提升使得水泥的水化程度更趨於完整而
被消耗導致強度下降。

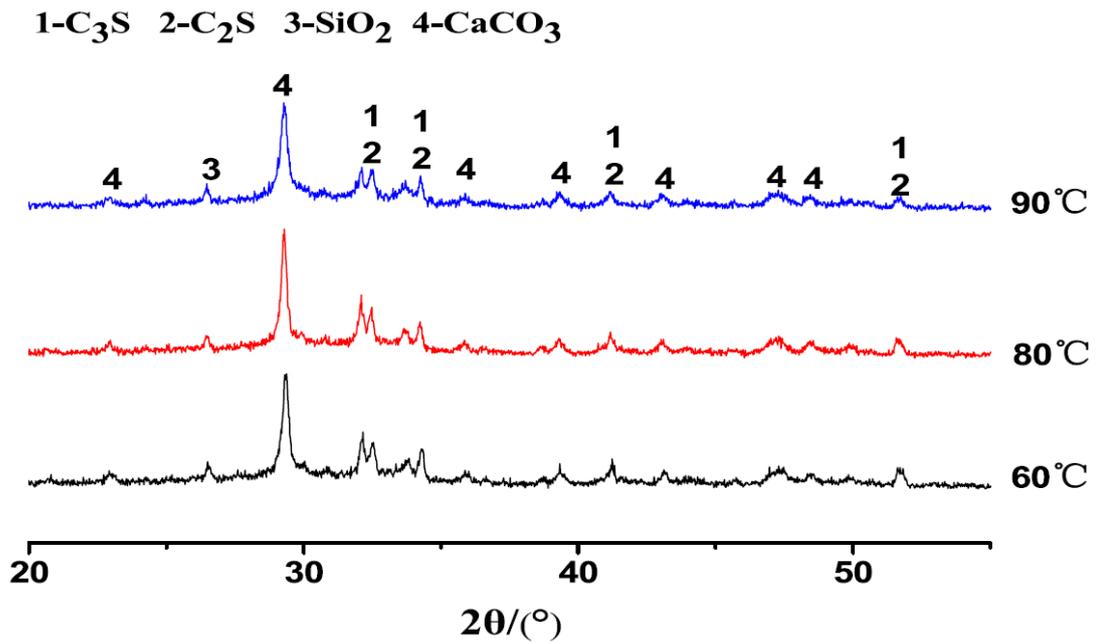


圖 2.23 不同養護溫度下之 X 光繞射分析結果(Xun et al., 2020)

莊美玲(2014)活性粉混凝土含有高矽氧化物並具有膠結功能，圖 2.24 發現 SiO₂ 為主要化學成分，於高溫養護時能產生卜作嵐反應，而開始進行卜作嵐反應時會消耗大量的氫氧化鈣，因此可以利用 X 光繞射分析儀對水化矽酸鈣(C-S-H)與氫氧化鈣(Ca(OH)₂)的波峰值強度變化進行分析，以了解內部消耗情況。

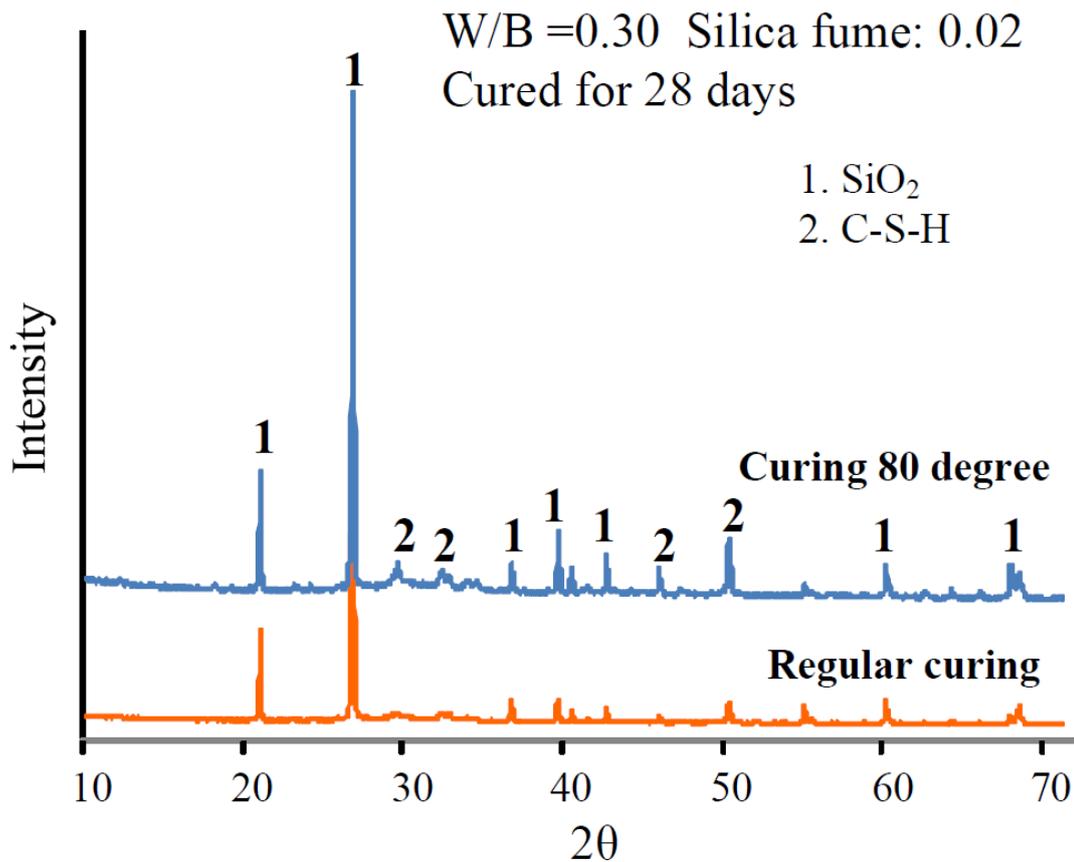


圖 2.24 X 光繞射分析結果(莊美玲，2014)

Maddalena et al. (2019)之研究利用氧化鈣及二氧化鈣與二氧化矽進行合成 C-S-H 膠體，利用固定鈣矽比(C/S)之試體進行各齡期的 X 光繞射分析試驗，由圖 2.25 可知 C-S-H 膠體隨著齡期的增加其峰值強度也會有增加的趨勢，顯示 C-S-H 膠體確實會隨時間逐漸的產生，而較顯著的峰值位於 29°及 33°間。

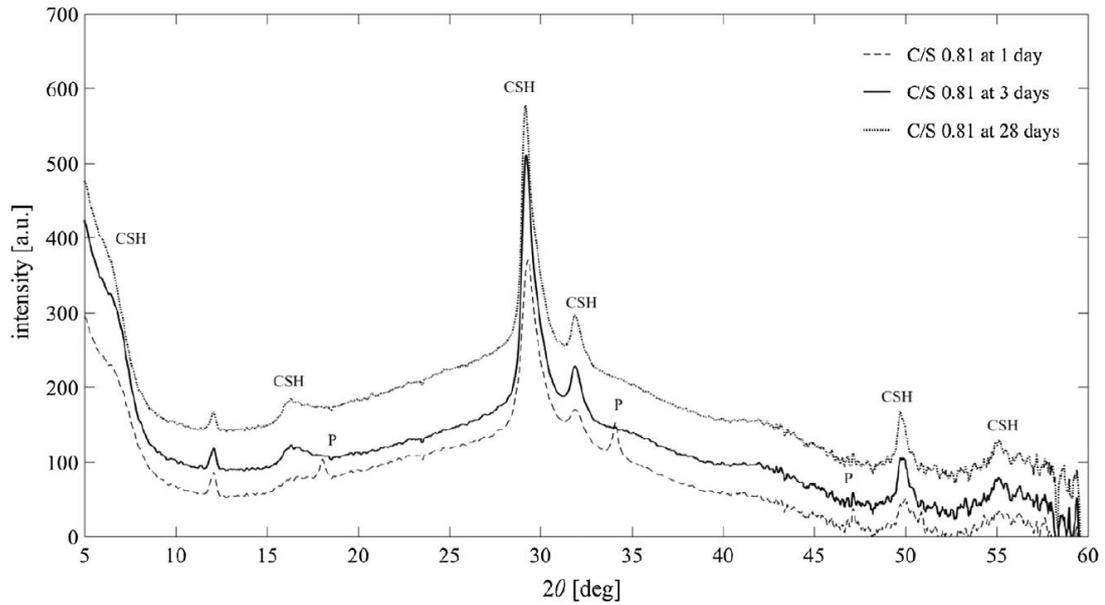


圖 2.25 不同齡期下 C-S-H 膠體 X 光繞射分析結果(Maddalena et al., 2019)

六、 先前研究之參數及配比

先前研究的試驗條件設定，主要針對混凝土材料於常溫養護與高溫養護之品質差異，以及各養護齡期對基本性質與耐久性的發展趨勢，試驗配比分別添加不同比例礦物摻料的混凝土，下述為針對試驗材料配比不同養護條件及拌合程序的詳細說明。

(一) 試驗參數

此研究使用高溫熱水養護，養護參數如表 2.6 所示。

表 2.6 配比 M 養護方式參數

配比代號	養護溫度	養護天數
90-2D	90°C	2 天
90-3D	90°C	3 天

(二) 試驗配比

此研究使用核能研究所研發使用於製作低放射性廢棄物之封蓋填縫材料的配比 M，如表 2.7 所示，水膠比採用 0.26，進行試體的製作與養護。

拌合步驟如下所述：

1. 首先將水和藥劑攪拌均勻，添加水泥及卜作嵐材料(預先混合均勻)，使藥劑發揮作用，拌合至出漿，拌合時間約一分半鐘。
2. 添加細粒料，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 2.7 混凝土配比 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
M	0.26	603.4	-	200.8	155.2	-	1094.3	-	253.0	10.9

*配比 M 藥劑用量為總粉料重量之 0.8%

*拌合水量為配比中 water+water(SSD)-藥劑重量

參、 研究方法與過程

本研究將活性粉混凝土運用在製作低放射性廢棄物盛裝容器，且為了加速混凝土水化作用，混凝土使用高溫養護(90°C)的方式，然後進行力學及耐久性質試驗，包括孔隙率、表面電阻、體積穩定性、抗壓強度及劈裂強度試驗等，以尋求盛裝容器最佳配比，同時評估高溫養護提升混凝土品質及耐久性的成效，最後以微觀試驗探討混凝土內部微結構的變化，觀察經高溫養護後的漿體水化狀況及其與鋼纖維黏結狀況。

一、 實驗材料

(一) 卜特蘭水泥

本研究使用之水泥為 I 型卜特蘭水泥，由台灣水泥公司生產，以水硬性矽酸鈣為主要成分之熟料研磨而得。水泥於拌合前購入，密封包覆避免受潮風化影響其性質，並由台灣水泥公司提供化學成分分析，如表 3.1 所示。

表 3.1 水泥化學成分

化學成分	試驗結果(%)
二氧化矽(SiO ₂)	20.42
氧化鋁(Al ₂ O ₃)	4.95
三氧化二鐵(Fe ₂ O ₃)	3.09
氧化鈣(CaO)	61.96
三氧化硫(SO ₃)	2.40
氧化鎂(MgO)	3.29
矽酸三鈣(C ₃ S)	49.00
矽酸二鈣(C ₂ S)	21.00
鋁酸三鈣(C ₃ A)	7.90
鋁鐵酸四鈣(C ₄ AF)	9.40
燒失量	1.75
鈣矽比	2.92

資料來源：台灣水泥股份有限公司

(二) 矽灰

試驗所使用的矽灰由 Elkem 所生產，型號為 940U，台灣西卡實業有限公司進口。

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，可填補水泥與粒料界面的過渡區，並由台灣工藝研究發展中心進行成分分析得知化學成分如表 3.2 所示。

表 3.2 矽灰與石英粉化學成分

化學成分(%)	主要試驗材料	
	矽灰	石英粉
二氧化矽(SiO ₂)	95.43	92.41
氧化鋁(Al ₂ O ₃)	0.11	-
三氧化二鐵(Fe ₂ O ₃)	0.07	0.09
氧化鈣(CaO)	0.50	0.11
氧化鎂(MgO)	0.62	0.82
氧化鉀(K ₂ O)	1.38	0.02

資料來源：國立台灣工藝研究發展中心

(三) 石英粉

本研究使用志純實業有限公司所生產之石英粉，外觀呈現白色粉末狀，由台灣工藝研究發展中心進行雷射粒徑分析，得知石英粉粒徑中位數 d(0.5) 為 26.5 μm，最後從成分分析儀得知化學成分，如圖 3.1 與表 3.2 所示。

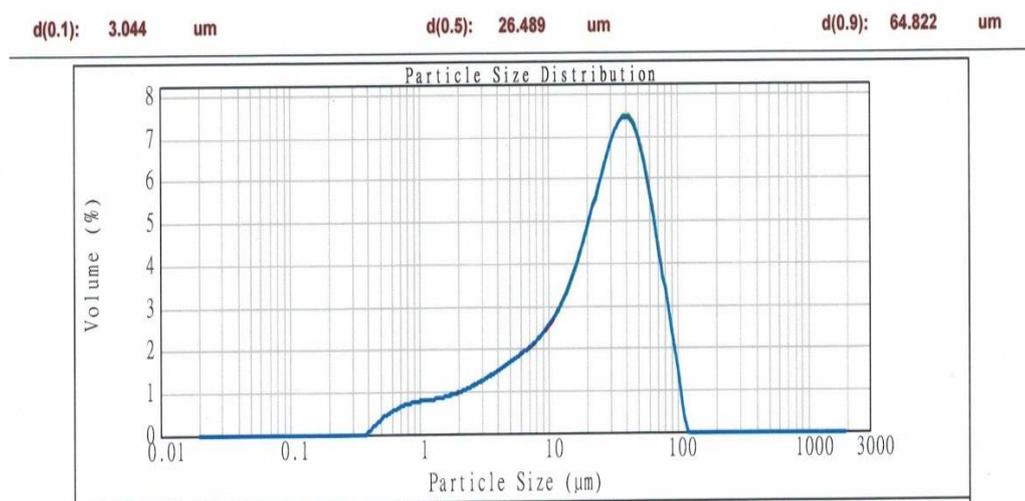


圖 3.1 石英粉粒徑分佈曲線圖

(四) 石英砂

本研究使用志純實業有限公司所生產之矽砂，外觀呈現黃色顆粒狀，型號為 3 號，粒徑範圍為 150 μm 到 600 μm ，比重為 2.65，吸水率為 0.7%，如圖 3.2 所示。

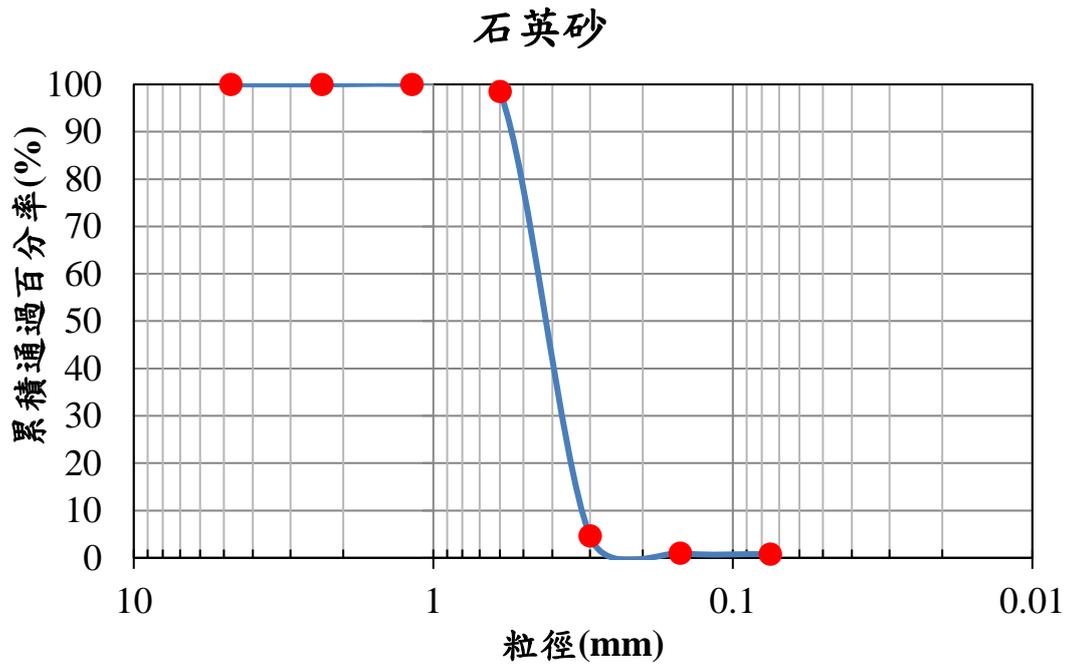


圖 3.2 粒徑分佈曲線圖

(五) 鋼纖維

使用固利麗實業有限公司生產之鋼纖維，如圖 3.3 所示，表面經鍍銅處理並且光滑無彎曲，顏色為黃銅色，其比重為 7.8，纖維長度為 13 mm，直徑為 0.2 mm。



圖 3.3 鍍銅微鋼纖維

(六) 高性能減水劑

利用其離子吸附於漿體顆粒表面，使顆粒間因帶電荷而分離，水分在顆粒間能自由的流動並提供潤滑效果，使漿體用水量可以減少而保持良好的工作性。

配比所添加的減水劑為符合 ASTM C 494 之 G 型高性能減水劑，由台灣漢鴻公司所提供，由羧酸聚合物及表面活性物質組成，固形物含量約佔 40%，水分約佔 60%，其減水效能約在 15%以上，適用於高品質及高強度之混凝土，作為本研究配比所使用之化學摻料。

二、 實驗流程

在材料配合設計方面，本研究使用的混凝土配比分別為可能使用於製作低放射性廢棄物盛裝容器之混凝土配比，主要添加卜作嵐材料包含砂灰、石英粉，並加入石英砂以取代粗粒料，及特別添加鋼纖維增加混凝土抗張、抗衝擊能力。

首先將活性粉混凝土運用在高完整性盛裝容器的研發上，參考

國內外文獻後以矽灰、石英砂、石英粉及鋼纖維進行配比設計，依據文獻中所使用的配比選擇出各種材料所要使用之比例，在確定矽灰、石英粉及石英砂的使用比例後，接著也需要選擇其他參數，如：鋼纖維添加量、減水劑使用量等，而驗證的方式以耐久性質為優先考量，故以孔隙率試驗結果為材料使用比例選擇依據。

關於初步參數選擇，首先必須先確定所要使用之石英砂粒徑，故利用多種石英砂粒徑組合及比例製作混凝土試體以孔隙率試驗驗證並取得最佳粒徑。鋼纖維比例的多寡及減水劑的添加量將會影響試體製作時的工作性及流動性，兩種參數的選擇將會影響混凝土試體的品質優劣，儘管鋼纖維的添加可以增加混凝土抗張性能，但過量的添加將會降低混凝土的性能，在較多減水劑的添加情況下雖然可以增加流動性以達到自行填充的目的，但由於在這種情況下鋼纖維的添加將會有沉陷的疑慮，故本研究擬定不同鋼纖維的添加比例及不同減水劑的添加量以了解鋼纖維及減水劑在不同添加量下試體的狀況，以作為後續實驗選擇的依據。

在確定各項材料參數後，試體的製作方式也將會影響混凝土品質，審慎的選擇出適合的試體製作方式是必須的，故分別使用搗棒搗實、振動台震動所製作出來的混凝土試體來進行評估及選擇。最後藉由 90°C 高溫養護以提升混凝土水化程度，利用 7 天齡期之抗壓強度數據來驗證不同天數高溫養護方法對混凝土硬固性能提升之效益，綜合上述結果選擇最佳參數以利後續相關實驗進行，流程如圖 3.4。

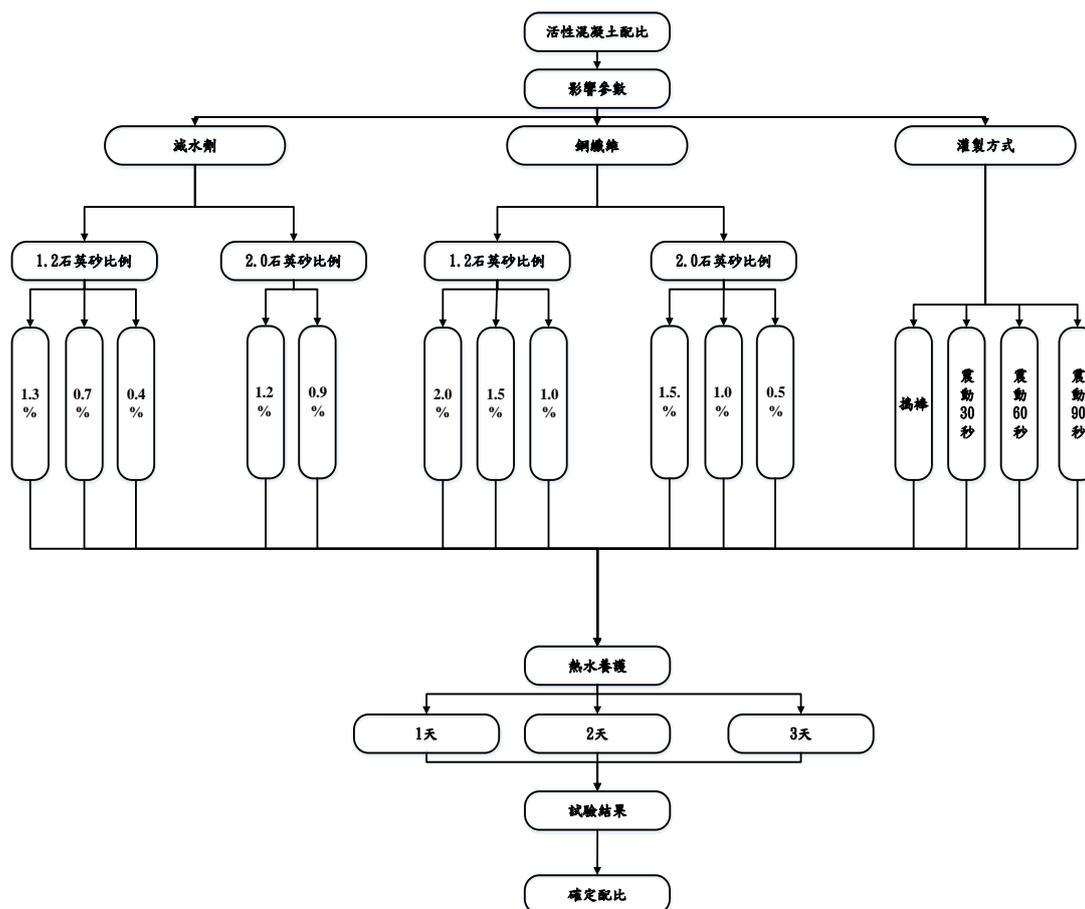


圖 3.4 參數試驗流程圖

根據參數試驗結果決定試體製作的方法及高溫養治的時間後，第二階段試驗設計方面，於混凝土 24 小時硬固後拆模，並將各配比的試體採用高溫 90°C 熱水養護 1 天，探討高溫養護對混凝土硬固性質之影響。將混凝土試體放入熱水養護完成後，待試體冷卻再放入飽和石灰水養護，待到達預定齡期後，將試體取出進行硬固性質(抗壓強度、劈裂強度)及耐久性試驗(表面電阻率、乾縮試驗、孔隙率)，最後分別探討高溫養護對於混凝土新拌性質、硬固性質及耐久性之影響，並針對處置容器混凝土之檢測提出方法，依其處置功能需求，探討使用混凝土電阻率的非破壞性試驗，發展品質評估的方法與程序，並累積檢測數據，據以建立活性粉混凝土所需之品

質標準。

此外，因活性粉混凝土含有矽質氧化物及大量的卜作嵐材料，在經過熱養護後加速水化反應並生成 C-S-H 膠體填塞混凝土內部孔隙，故透過微觀試驗進行探討，藉 X 光繞射分析(XRD)及電子顯微鏡(SEM)了解內部氫氧化鈣的消耗情況和及 C-S-H 膠體生成內部結構的緻密程度，其研究流程，如圖 3.5 所示。

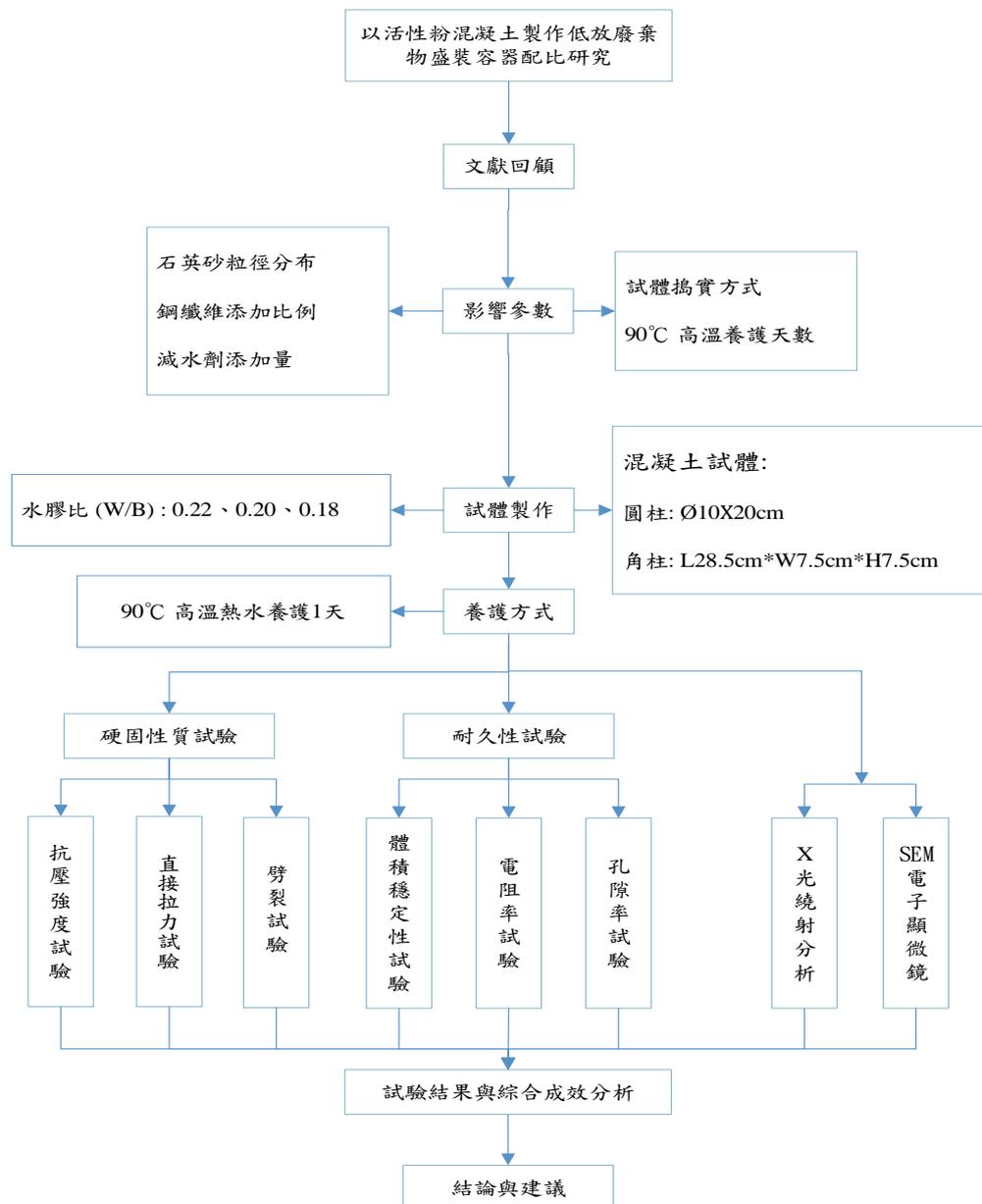


圖 3.5 試驗規劃流程圖

三、 實驗變數

本研究的試驗條件設定，主要針對活性粉混凝土材料不同配比之性質差異，以及各養護齡期下硬固性質與耐久性的發展趨勢。

各組合材料參數比例以水泥重量定為 1，矽灰為水泥重量之 0.25，石英粉為水泥重量之 0.3，為了確定所要使用之石英砂類型，擬定多種組合以選擇石英砂最佳粒徑分布，而石英砂比例設定為水泥重量之 1.2 及 2.0，為呈現不同鋼纖維及減水劑添加量下漿體及混凝土試體的狀態，在鋼纖維的參數中設定添加量為整體體積的 0.5%、1.0%、1.5% 及 2.0%，在減水劑的參數中分別設定為整體體積的 0.5%、1.0%、1.5% 及 2.0%，經過孔隙率試驗驗證過後即可選擇出最佳參數，並依據減水劑添加比例最良好及最佳工作性的情況下，以所需要流度來控制其他水膠比之減水劑用量。

為維持一貫作業，試體製作的程序需要建立標準程序來確保混凝土試體生產時的品質，故設計 4 種灌製混凝土試體的方式來選擇最佳製作試體的方式，分別為：搗棒搗實、振動台震動 30 秒、振動台震動 60 秒及振動台震動 90 秒。最後以 90°C 高溫養護方式來提升活性粉混凝土之品質，其原理為加速內部水化程度，以不同高溫養護天數來驗證增加養護天數是否會對混凝土品質提升具有良好的效益，設計天數分別為 1 天、2 天及 3 天。

混凝土配比設計水膠比(W/B)分別為 0.22、0.20 及 0.18，試體製作成直徑 $\text{Ø}10 \times 20$ cm 之混凝土圓柱及 $7.5 \times 7.5 \times 28.5$ cm 之混凝土角柱，圓柱試體用以進行力學性質及耐久性質試驗，而混凝土角柱則進行體積變化的量測，下述為針對試驗材料之不同水膠比配比及拌合程序的詳細說明。

1. 試驗參數

本研究使用高溫熱水養護，水膠比參數如表 3.3 所示。

表 3.3 本研究採用之配比代號及水膠比

配比代號	水膠比
RPC22	0.22
RPC20	0.20
RPC18	0.18

2. 試驗配比

本研究將卜作嵐材料(矽灰、石英粉)及石英砂用於製作低放射廢棄物盛裝容器，如表 3.4 所示，水膠比分別採用 0.22、0.20 及 0.18 進行製作試體與養護。

拌合步驟如下所述：

- 首先將石英砂和鋼纖維攪拌均勻，使鋼纖維能均勻分布，拌合時間約一分鐘。
- 添加水泥、矽灰及石英粉攪拌均勻，待其外觀顏色呈現一致，拌合時間約一分鐘。
- 添加拌合用水及藥劑(需預先混合)，拌合時間約五分鐘。
- 靜置時間約一分鐘。

表 3.4 混凝土配比(單位：kg/m³)

配比 名稱	W/B	I型 水泥	砂灰	石英粉	細粒料	鋼纖維	實際用水	藥劑	拌合用水
RPC22	0.22	778.3	194.6	233.5	934.0	78.0	209.0	8.4	214.04
RPC20	0.20	793.8	198.5	238.1	952.6	78.0	191.8	11.1	198.46
RPC18	0.18	810.1	202.5	243.0	972.1	78.0	169.5	21.3	182.27

*配比 0.22、0.20、0.18 藥劑用量分別為為總粉料重量之 0.7%、0.9%
及 1.7%

*藥劑固形物含量約佔 40%，水分約佔 60%

*消泡劑用量為藥劑的 2%

四、 實驗方法

(一) 新拌性質

根據規範 CNS1010 及 CNS1012 方法進行流動性之測定，將新拌混凝土填入流度模內，一層搗實 20 次，並分兩層搗實，溢出模頂的漿體需刮平。將流度模提起後流度台需在 15 秒內跌落 25 次，並以直尺量測混凝土經跌落後的直徑，以供配比做流度控制。

(二) 硬固性質試驗

1. 抗壓強度試驗

根據 ASTM C39 與 CNS1232 之規定，製作 Ø10×20 cm 之混凝土圓柱試體，經熱水養護(90°C)及飽和石灰水養護，以抗壓試驗機進行試驗，將試體置中於抗壓機後設定加壓速率 275 kgf/sec，分別測定 7、28 及 91 天之抗壓強度數據。

2. 劈裂強度試驗

根據 ASTM C496 與 CNS3801 方法之規定，製作 Ø10×20 cm 之混凝土圓柱試體，經熱水養護(90°C)及飽和石灰水養護，在齡期 7 天、28 天及 91 天以抗壓試驗機施加 1.4 MPa/min 的速率直至試體劈裂破壞，試體劈裂抗張強度計算式如下：

$$T = \frac{2P}{\pi LD}$$

T = 劈裂抗張強度，MPa [kgf/cm²]

P = 試驗機顯示之最大載重，N[kgf]

L = 長度，cm

D = 直徑，cm

3. 直接拉力試驗

根據日本土木協會(JSCE)所發表的 Concrete Engineering Series 期刊中 “Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks(HPFRCC)” 所建議進行試驗。關於試體的製作其模具如圖 3.6 所示，模具的材料需由不吸水的金屬或塑料製成，在試體製作前需噴上礦物油以確保試體脫模順利。

在裝填混凝土的時候須注意以同一個方向進行充填且應避免間斷暫停，以減少空氣的進入。搗實的部分可視材料的性質選擇膠槌或是震動法，需注意的是不可搗實過久以免出現粒料析離的狀況，接著便進入高溫養護的程序，到達 24 小時後即可進行拆模以進行後續養護作業，在到達預定齡期後選擇適當的夾具固定試體，並施加每分鐘 0.5mm 的變形速率進行拉力破壞。

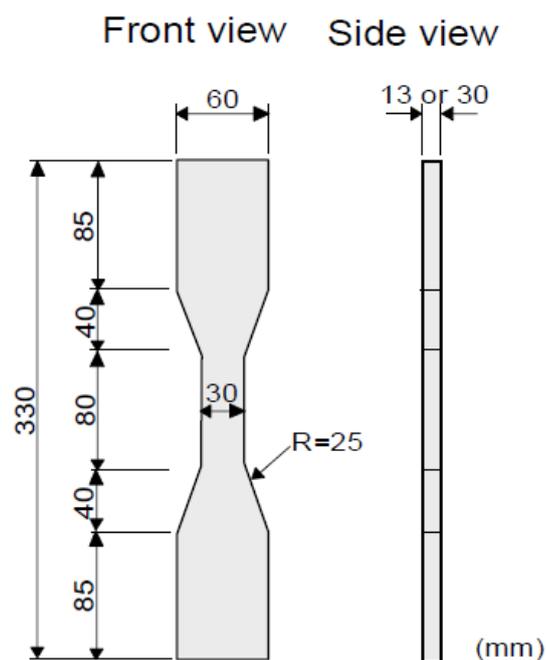


圖 3.6 直接拉力試驗試體尺寸

(三) 耐久性試驗

1. 孔隙率試驗(混凝土)

為求得更精確的數值，參考 ASTM C642-13 規範以進行改良，製作混凝土圓柱 $\text{Ø}10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 試體後，依據下述實驗步驟進行試驗：

- 試體到達齡期後放入溫度 $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 的烘箱 24 小時，冷卻並秤其重量，直至恆重小於 0.5%，得烘乾重。
- 參考原有規範於浸泡面乾內飽和 48 小時的步驟時加以抽真空方式(如圖 3.7)，施加壓力讓水分更能填滿內部孔隙，以達到飽和狀態。
- 試體煮沸 5 小時後待其冷卻並不小於 14 小時，得面乾內飽和重。

- d. 將試體取出及量測水中重，即得浸泡與煮沸的水中重。
- e. 分別量測 28、91 天之混凝土孔隙率數據，計算方式如下：

虛比重(dry)：[烘乾重/(面乾內飽和重-水中重)]

視比重：[烘乾重/(烘乾重-水中重)]

孔隙率(%)=[(視比重-虛比重)/視比重]×100%



圖 3.7 孔隙率試驗抽真空設備

2. 表面電阻率試驗

量測電阻率為掌握混凝土品質的方法之一，以電阻率高低作為混凝土耐久性之評估，電阻率越高代表試體內部路徑較複雜電流不易傳導，並可以間接得知混凝土內部的緻密程度，混凝土內部連通孔隙的多寡與孔隙溶液含量，都會影響數值的量測。

於試體製作並養護完成後，依據 AASHTO T358-15 試驗方法採用 Wenner 四極式電阻儀，以固定之探頭間距 38 mm 進行量測，須注意此時試體需保持面乾內飽和的狀態，並量測預定齡期之試體電阻率變化情形，試驗步驟如下：

- a. 待試體達預定齡期後，清潔試體表面使呈面乾內飽和狀態。
- b. 於試體面擇一點為起始點，以每 90 度取一量測點方式標記。
- c. 將儀器四個探針放在繪製線上，從起始點開始依序量測(如圖 3.8)，計算平均電阻率。

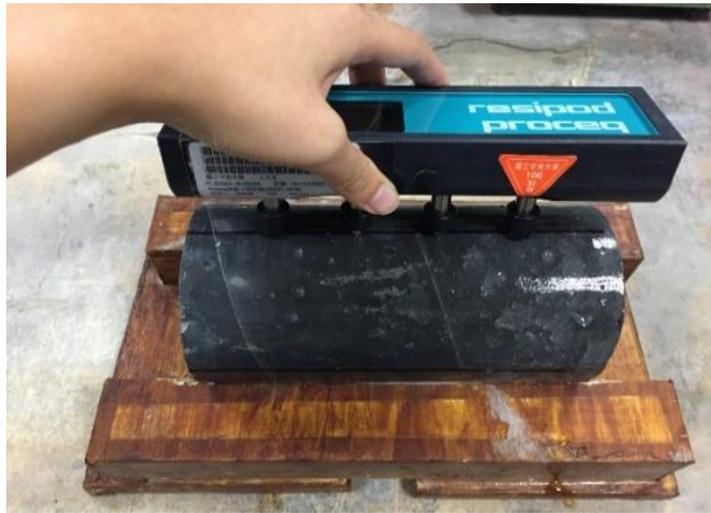


圖 3.8 混凝土試體電阻係數量測示意圖

3. 體積穩定性試驗

依據 CNS 14603 規範，製作混凝土角柱試體，尺寸為長 28.5cm×寬 7.5cm×高 7.5cm，藉由比長儀量測各齡期試體長度變化量，計算試體乾燥收縮率，試驗步驟為：

- a. 試體製作完成後，經熱水養護後靜置於溫度 $23^{\circ}\text{C}\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 飽和石灰水中 30 分鐘，取出並紀錄試體初始值。
- b. 讀值時，緩慢移動試體以記錄測微錶讀數之最小值，每次量測需將試體放置相同面進行量測以減少試驗誤差，如圖 3.9。
- c. 飽和石灰水養護 28 天後，將試體放置於溫度 $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 相對

溼度 $50\% \pm 4\%$ 之恆溫恆濕櫃裡，待預定齡期到達後量測該齡期之試體與不鏽鋼棒之長度，再依式(3.1)計算隨齡期增加之混凝土乾燥收縮率。

$$\Delta L_X = \frac{L_X - L_i}{G} \times 100 \quad (3.1)$$

其中 ΔL_X ：試體於第 X 齡期之長度變化(%)

L_X ：試體第 X 齡期之長度與參考桿差值

L_i ：試體初始長度與參考桿差值

G ：標稱之有效標距



圖 3.9 混凝土乾縮試體

肆、 主要發現與結論

本研究採用之混凝土配比，係參考文獻中所提出的活性粉混凝土配比設計原則以矽灰、石英粉及石英砂進行配比改良，製作試體進行混凝土新拌性質與硬固性質的分析，且為了增加混凝土抵抗裂縫產生的能力，在配比中加入鋼纖維，增強混凝土之抗張能力，以期有效降低混凝土容器之厚度。

石英砂在活性粉混凝土裡扮演重要的角色，原因為取代了粗粒料的使用，而其中理想級配的理念為大、小顆粒間能夠均勻分布，使粒料能完全填補其空隙，最大效益的減少孔隙，再加上水泥漿填充粒料間孔隙及提供足夠包裹粒料表面積之漿量。

鋼纖維添加於活性粉混凝土雖可改善工程特性，但缺點則會降低工作性及流動性，原因為鋼纖維在混凝土中具有較大的表面積，為了達到所需之工作性，則需較多用水量，而且鋼纖維容易產生結球現象，增加施工困難性。試體內部產生鋼纖維結球的原因可能是因為添加過多的鋼纖維或添加過快，添加過多的鋼纖維會導致拌合流動性不足，不利鋼纖維分散而導致結球，故活性粉混凝土工作性與纖維體積含量具有重要關係，通常纖維體積比越高其工作性越差，故欲得到高強度且工作性良好之活性粉混凝土，必須先對其影響因素作深入探討。由於添加鋼纖維，減水劑對工作度及流變性具有相當之影響，雖然減水劑減水的效應可以在流度不變及相同材料比例的條件下直接減低水膠比(W/B)，減少拌和水量而獲得設計之工作度，但鋼纖維的添加對於減水劑的使用需謹慎評估，鋼纖維體積含量越多則必須增加減水劑的添加量，添加過量的減水劑會導致鋼纖維的沉陷及混凝土內部的不均勻，可能會導致混凝土品質的下降及降低耐久性。

關於試體的製作方式也會間接影響混凝土的品質，依據材料的性質及所設定的工作性選擇適當的搗實方式對於混凝土中氣泡及空隙減少會有顯著的效益；對於活性粉混凝土的養護一般都採用高溫高壓的養護方式來提升混凝土的緻密性，然而受限於實驗室的設備能力，選擇以浸泡於 90°C 熱水中養護來進行混凝土養護，並且採用不同養護天數，取得試體抗壓強度數據以驗證增加養護天數是否會對混凝土性能有所提升。

耐久性為混凝土品質的其中一項指標，由於混凝土可能會隨著時間的增加及外界因素的影響導致劣化的情況發生，故掌握混凝土的耐久性為提升品質的首要工作，其中孔隙率試驗為檢驗混凝土耐久性的其中一項試驗，混凝土中的孔隙扮演著離子及水分的傳輸，過多的孔隙將會使有害離子從外界入侵進入混凝土內部造成劣化，了解混凝土的孔隙率將可對活性粉混凝土品質有效評估，故將會應用孔隙率試驗於鋼纖維與減水劑添加及試體搗實方式，用以驗證並選擇出活性粉混凝土配比試驗所使用的參數。

一、 鋼纖維添加比例

混凝土是一種脆性材料，其抗彎及抗張強度遠不如其抗壓強度，而纖維的添加有助於提高混凝土的韌性及抗拉強度，根據添加不同種類的纖維使混凝土受拉時應變硬化的階段呈現較佳的抗拉能力，而添加鋼纖維雖優點繁多，但在添加鋼纖維的同時也會降低混凝土的流動性及工作性，而在面對黏滯性較高的漿體時則容易糾結在一起，甚至發生結球的狀況，增加施工的困難。

本研究為取得品質較佳且工作性良好的活性粉混凝土，故先對

其影響進行探討，此時纖維含量對漿體的穩定性尤為重要，過多的纖維添加可能會造成試體的孔隙增加，甚至是內部孔洞的形成，故藉由添加整體體積 1%、1.5%及 2%的鋼纖維來了解纖維的含量對活性粉混凝土的影響，所採用之混凝土配比，如表 4.1 所示，製成試體後由外觀檢視及孔隙率試驗數據來選擇較合適的鋼纖維添加比例。

由圖 4.1 中可見石英砂比例 2.0 的混凝土配比孔隙率普遍都比石英砂比例 1.2 的孔隙率高，原因可能是石英砂用量過多，超過漿體所能完全包覆的範圍，導致石英砂互相堆積時所產生的空隙無法順利被漿體填滿，如圖 4.2 所示，再加上鋼纖維比例的增加，使得孔隙率些微的上升，故建議採用石英砂比例 1.2 作為後續試驗設計配比的用量。

由孔隙率可知，當石英砂比例為 1.2 時，添加 1%鋼纖維的混凝土試體相較於 2%及 1.5%，其孔隙率較低；而藉由試體外觀的探討可以了解添加 2%鋼纖維的試體在經過切片觀察後有發現因鋼纖維添加比例過多而產生結球的現象，進而導致漿體未確實充填進去，如圖 4.3 所示，由此可知添加過多的鋼纖維可能會有工作性不佳、影響混凝土均勻性等施工品質的問題；接下來探討添加 1.5%鋼纖維的試體其內部狀況，試體在經過切割後可以發現相較於添加 2%的鋼纖維，雖然還是有些微鋼纖維聚集的狀況，但其內部結球的問題明顯減少，顯示減少鋼纖維的添加能有效減少鋼纖維聚集的問題，如圖 4.4 所示；添加 1%鋼纖維的混凝土試體剖面則沒有發現鋼纖維聚集的現象，如圖 4.5 所示。由此可知藉由試體剖面的觀察及孔隙率試驗的數據可以判斷出 1%鋼纖維的添加比例為較適合的參數，

故選擇 1% 的添加量做為後續製作活性粉混凝土配比試驗的鋼纖維用量比例。

表 4.1 不同鋼纖維添加含量之混凝土配比表

W/B	I型水泥	矽灰	石英粉	細粒料	鋼纖維
					2.0%
				1.2	1.5%
0.22	1	0.25	0.3		1.0%
					1.5%
				2.0	1.0%
					0.5%

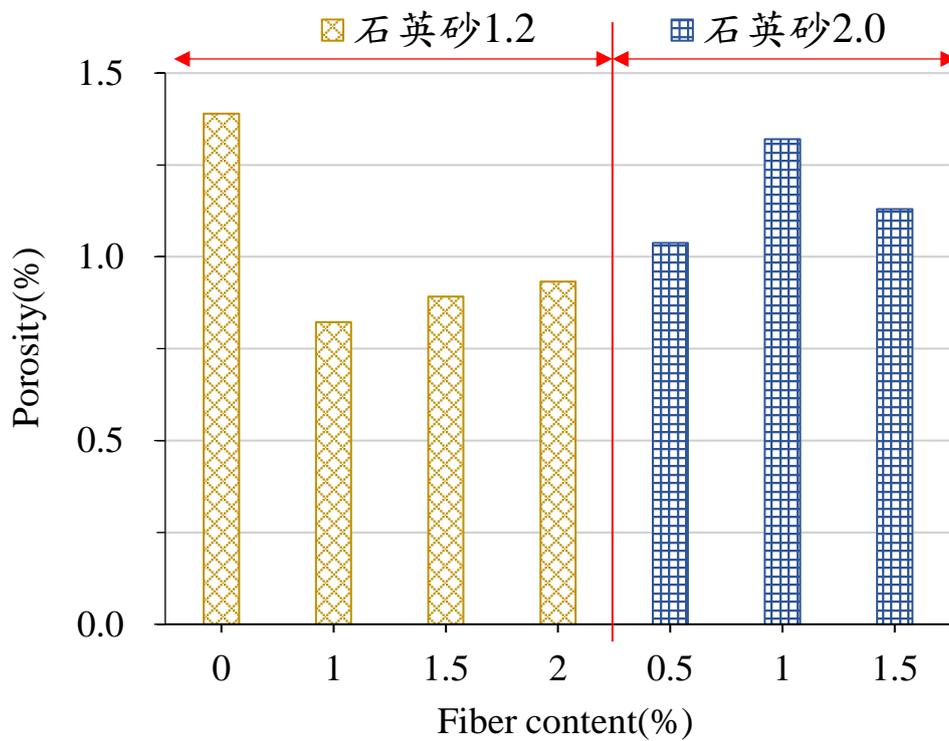


圖 4.1 不同鋼纖維添加量混凝土試體孔隙率比較



圖 4.2 鋼纖維添加量 1.0%之混凝土試體剖面照片(石英砂比例 2.0)



圖 4.3 鋼纖維添加量 2.0%之混凝土試體剖面照片(石英砂比例 1.2)



圖 4.4 鋼纖維添加量 1.5%之混凝土試體剖面照片(石英砂比例 1.2)



圖 4.5 鋼纖維添加量 1.0%之混凝土試體剖面照片(石英砂比例 1.2)

適度添加鋼纖維能增加試體的抗張能力，以水膠比 0.22 進行 0%、0.5%、1.0%的鋼纖維含量添加，並透過劈裂試驗來判斷不同鋼纖維含量下試體之劈裂強度，由圖 4.6 可知，不同鋼纖維含量在齡期 7 天的劈裂強度分別為 5.28 MPa、9.66 MPa、12.07 MPa。結果顯示隨著鋼纖維含量的增加，則劈裂強度也逐漸提升，因此鋼纖維的含量越高，越能有效抵抗張裂。藉由劈裂試驗的數據可以判斷出 1%鋼纖維的添加比例具有較高之強度，所以選擇 1%的添加量做為鋼纖維用量比例。

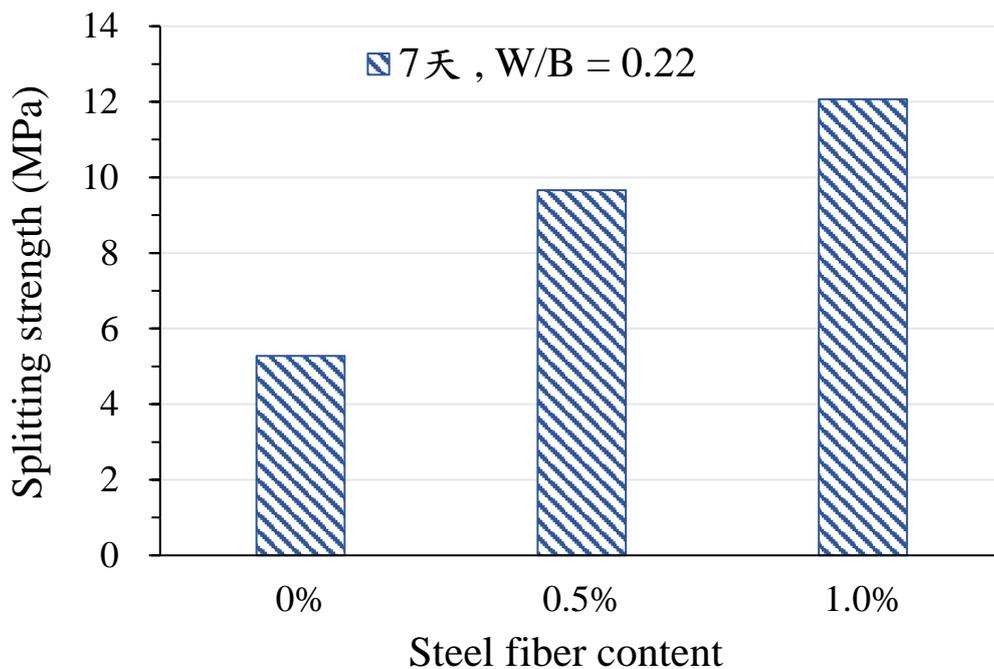


圖 4.6 不同鋼纖維含量之 7 天劈裂強度

二、 減水劑比例

對於混凝土來說，減水劑可以用來減少拌和用水量而產生固定坍度，或是在固定用水量時，能增加混凝土坍度的化學摻料，在一

固定配比將有利於用水量減少以提高抗壓強度並達到良好的工作性，其原理是利用離子吸附在水泥顆粒的表面以產生靜電斥力進而分散顆粒以達到減水效果。

減水劑具有減少拌合水量而達到所需工作性的優點，適用於低水膠比的配比以提升抗壓強度及增進耐久性能，儘管使用減水劑可以提升混凝土的性能，但相對的需要適量的添加，以免產生漿體粒料析離或是混凝土試體乾縮量增加的問題發生。

本研究為取得混凝土配比所適合的減水劑用量，以水膠比 0.22 之活性粉混凝土配比為基礎，調整減水劑的添加比例以確保新拌混凝土能順利澆置，且在硬固後具有有良好的硬固性質，使鋼纖維在混凝土漿體中能良好的發揮抗張性能，在到達預定齡期後將試體進行切割以目視觀察鋼纖維在試體內的分布狀況，判斷試體裡面是否有過多的孔洞亦或是鋼纖維結球的問題發生，並利用孔隙率試驗進一步驗證試體內部的孔隙多寡。

由於鋼纖維的添加，減水劑的使用量更需要拿捏得恰當，過多的減水劑用量會導致鋼纖維沉陷的問題發生，試體上層的鋼纖維含量會大幅減少，甚至沒有存在任何的鋼纖維，如圖 4.8 所示；減水劑用量不足則會使得工作性下降，拌合料黏滯性增加，鋼纖維間更容易聚集，使得漿體無法確實的充填模具內部而產生較大的孔洞，如圖 4.9 所示。為求得較精確的數值，參考 ASTM C642-13 規範，製作混凝土圓柱試體後進行孔隙率試驗。

本試驗所使用之減水劑添加量基準為粉料重量百分比，由圖 4.7 所示，0.4% 的減水劑用量所顯示孔隙率最大，可能的原因為工作性不佳，故雖然經過振動台震動後仍然有許多空氣無法排出，再

加上未被充填完整的局部地區形成孔洞，這些因素使得試體的孔隙率提升；而 0.7%的減水劑用量的試體孔隙率最小，顯示在用量範圍內較適合運用在活性粉混凝土的配比上，故選擇 0.7%做為後續拌合混凝土所採用的減水劑比例。

石英砂比例 2.0 的混凝土試體孔隙率普遍都比石英砂比例 1.2 的孔隙率高，原因可能是石英砂比例過多，超過漿體所能包覆的範圍，由於石英砂比例高，使得減水劑添加量的減少會導致工作性變得更差，試體內部的結構孔洞多，鋼纖維分布不均勻，孔隙率大幅的提升；隨著減水劑添加量的增加，雖然孔隙率有顯著的減少，但仍然大於石英砂比例 1.2，且在降低混凝土的水膠比後，往往需要增加減水劑的使用才可以使得漿體拌合成功且具有工作性，過多減水劑的使用有可能會影響混凝土品質的穩定性，甚至導致性能下降，如圖 4.10 所示。

表 4.2 減水劑添加比例之配比表

W/B	I型水泥	矽灰	石英粉	鋼纖維	石英砂	減水劑
					1.2	1.3%
						0.7%
0.22	1	0.25	0.3	1.0%		0.4%
					2.0	1.2%
						0.9%

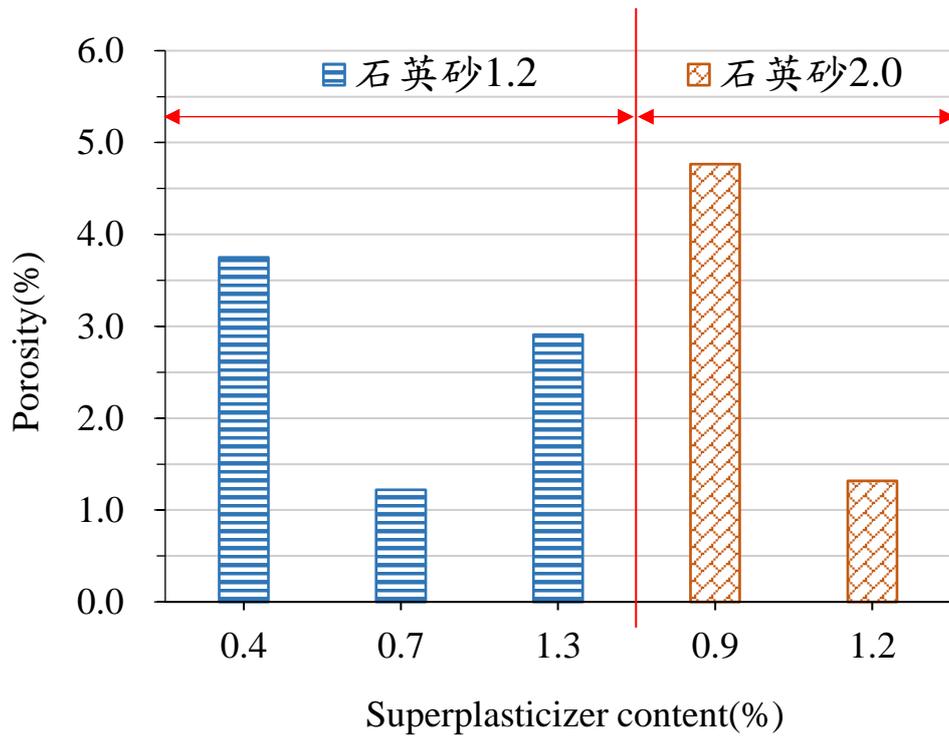


圖 4.7 不同減水劑用量混凝土試體之孔隙率



圖 4.8 減水劑用量 1.3%之混凝土剖面(石英砂比例 1.2)



圖 4.9 減水劑用量 0.4%之混凝土剖面(石英砂比例 1.2)

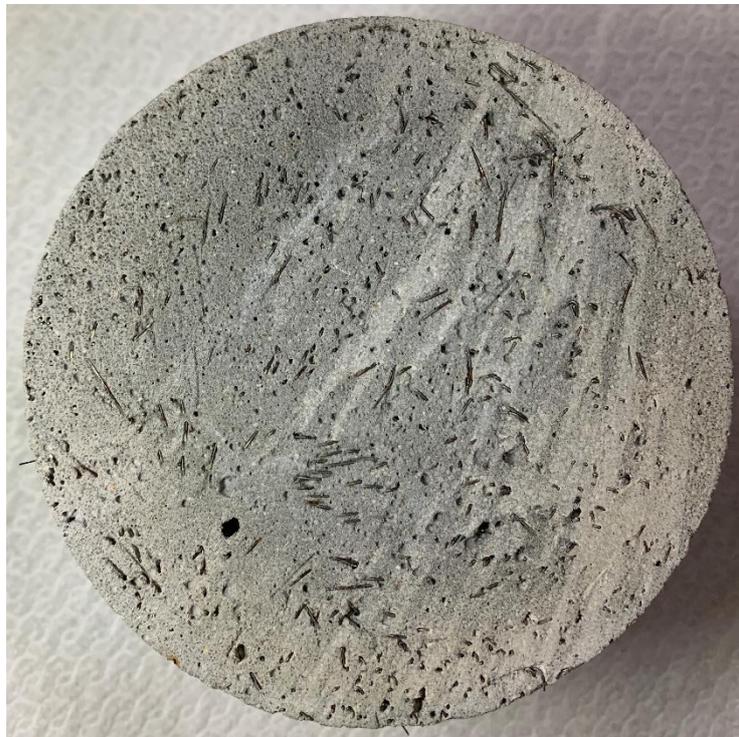


圖 4.10 減水劑用量 1.2%之混凝土剖面(石英砂比例 2.0)

藉著減水劑用量參數所選擇的比例 0.7%來進行流度試驗，以混凝土配比中的 0.22 水膠比進行試驗，於流度台跌落 25 次後，經過量測後可知流度值為 15.5 cm，並以此流度為控制標準，表示配比在此流度值時具有較理想的工作性，在振動的過程中能順利澆置試體，故以流度控制減水劑添加量，調整配比 0.20 及 0.18 水膠比中減水劑的用量以達到此流度值，而經過嘗試後得到配比 0.20 及 0.18 水膠比中減水劑的用量，如表 4.3 所示，隨著活性粉混凝土水膠比的降低，減水劑的用量需要增加才能維持新拌混凝土較佳的工作性。



圖 4.11 流度試驗結果

表 4.3 不同水膠比之活性粉混凝土最佳減水劑用量

W/B	減水劑比例
0.22	0.7%
0.20	0.9%
0.18	1.7%

三、 搗實方式

對於混凝土結構或試體，只要澆置程序不確實或是漿體材料性質影響，有可能會發生蜂窩、裂縫或是較大的孔洞產生，這些問題會對混凝土的強度及耐久性出現不良的影響

混凝土中各種材料添加的比例與漿體的流動性和工作性有關，材料的特性也關係搗實方式的選擇，傳統的混凝土試體常用符合規範的金屬搗棒來搗實試體，依據規範進行分層搗實，但對於低坍度的漿體或是對於工作性有特殊需求時就必須使用震動法來澆置試體，而利用震動法製作試體時則需要注意拌和料的狀況，振動時間過短則會有試體內部空間沒有足夠的水泥漿體充分填滿孔隙，進而導致大孔隙或是蜂窩的問題形成，內部氣泡也有可能因此而來不及散逸而聚集在一起；振動時間過久則會有漿體內粒料析離或是纖維沉陷的問題發生，這些因素將會導致試體的品質下降。

本研究為取得較佳的振動方式及適當振動時間，在澆置試體時以搗棒搗實及外部振動法兩種的不同搗實法進將拌和料裝填在模具內，經過 24 小時後拆模並且進行高溫養護，待到達預定齡期後觀察試體表面狀況及進行切割作業，以方便觀察鋼纖維分布狀況及孔洞生成之情形，最後以孔隙率試驗驗證其內部孔隙是否會因為搗實不同而產生差異。

由圖 4.13 所示，不同搗實方法製作的試體中，用搗棒搗實的孔隙率最高，且內部較易有因拌和料搗實不完全而產生的孔洞，試體的側面也因為活性粉混凝土拌和料的高黏滯性無法使空氣散逸出去，而形成小部分的蜂窩，考量到未來實際運用的可能性，故不採用這個方法。

外部振動法所製成的試體就其孔隙率而言，就屬震動 30 秒及 60 秒較佳，但值得注意的是可能由於震動時間不夠長，試體的側邊也易產生因氣泡聚集而產生的孔洞，如圖 4.14 所示，故也不採用震動 30 秒這個澆置試體的方式；而震動 90 秒之試體其孔隙率相對震動 60 秒較高的原因可能為試體中鋼纖維有些微沉陷，使得鋼纖維較多的部分會有孔隙的產生進而導致整體孔隙率的上升，最後決定以震動法 60 秒這個方式做為後續試體製作的依據。

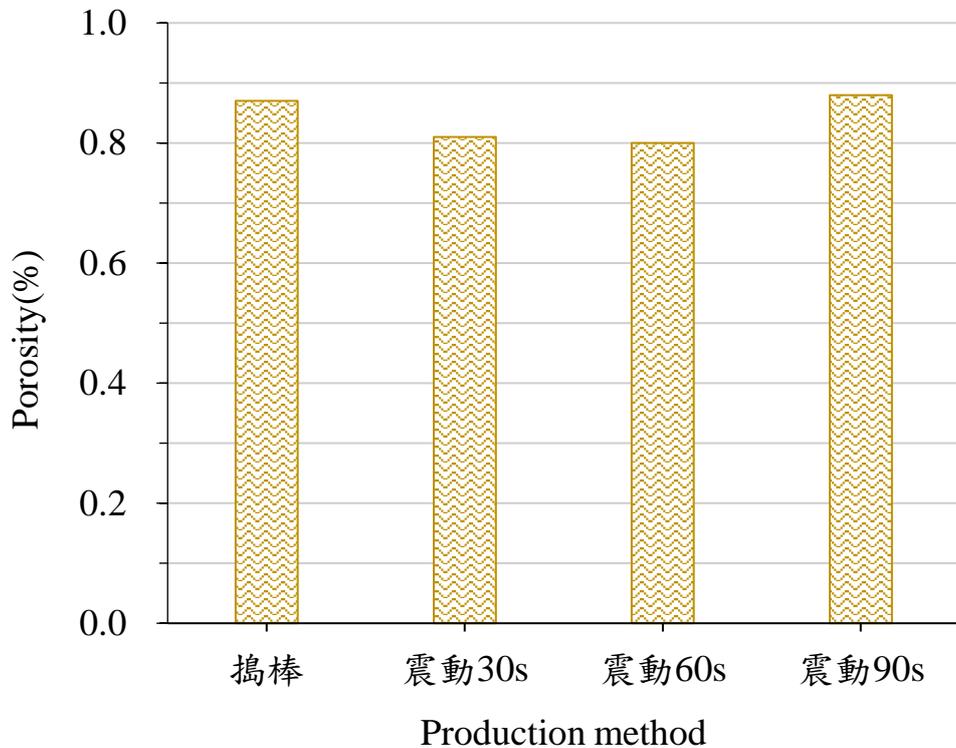


圖 4.12 不同搗實方式製作試體之孔隙率



圖 4.13 搗棒搗實之試體剖面狀況



圖 4.14 震動 30 秒之試體側面狀況

四、 養護方式及天數

根據相關文獻顯示，高溫養護常被運用在活性粉混凝土上，原因是熱養護對其強度的發展具有重要的影響，活性粉混凝土主要為高二氧化矽的材料所組成，在卜作嵐反應下能與 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 發生二次反應而產生 C-S-H 膠體以填補孔隙，而藉由消耗及降低氧化鈣、二氧化矽的比例與水及氧化鈣的比例則會改變水化產物的生成，如：Tobermorite(鈣鐵礦)則會在溫度 100 到 150°C 時生成；Secondary xonotlite particles(次生硬矽鈣石)則會在 150 到 200°C 生成。

本研究根據文獻使用之養護溫度(90°C)進行熱養護，為取得較合適之養護天數，利用混凝土配比製作試體並分別熱養護 1、2 及 3 天，在完成熱養護後即進入石灰水養護程序，待到達預定齡期後進行抗壓強度試驗以直接了解混凝土的硬固性能，藉由抗壓強度數值去做綜合性評估。

藉由抗壓強度數據可知，熱水養護 3 天的抗壓強度最高為 126 MPa，其次為 2 天及 1 天，而常溫養護則為 75 MPa，由圖 4.15 可以得知，透過 90°C 高溫養護能有效提升約 38% 之抗壓強度，然而在皆是熱養護的情況下，養護天數 1 至 3 天試體抗壓強度之間的差異在 5% 以內，考量到熱養護時間拉長會影響生產的效益及成本，因此選擇以熱養護 1 天為主要養護方式。

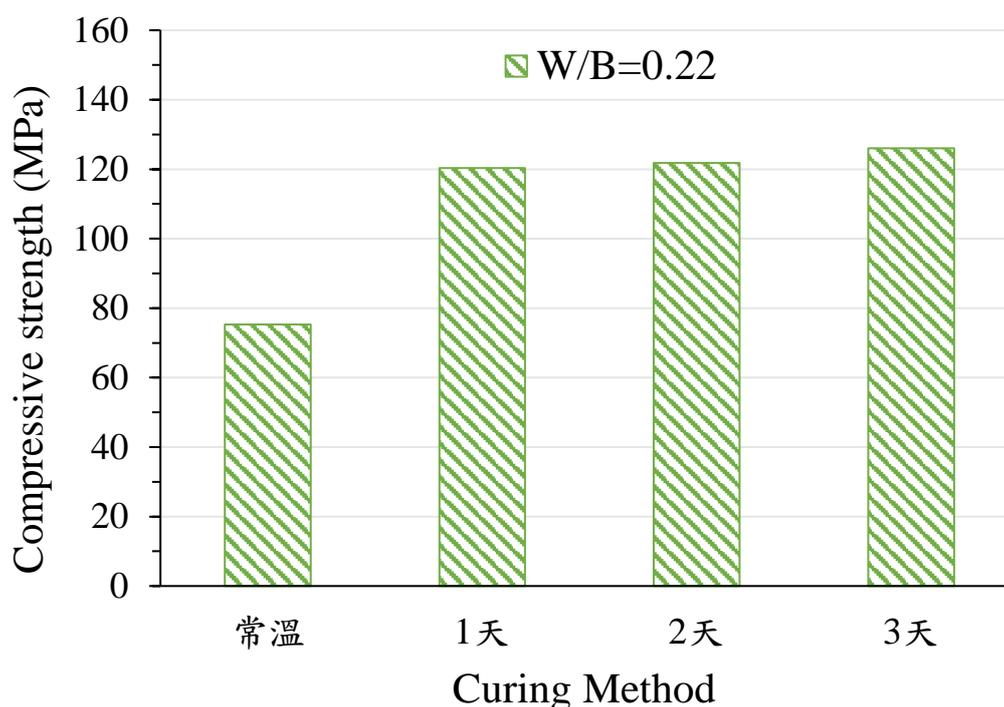


圖 4.15 不同養護方式及天數之 7 天抗壓強度

五、 抗壓強度試驗

評斷混凝土品質優劣的方法，抗壓強度試驗為所有試驗中最具代表性，且最直接的方法，故本研究利用抗壓強度來判斷不同水膠比活性粉混凝土經高溫養護(90°C)之試體不同齡期對其力學性質之影響。

藉由熱養護能加速混凝土的水化作用與卜作嵐反應進行，水化作用所形成的氫氧化鈣能填補漿體中的孔隙，以及加速 C-S-H 膠體快速生成，進而提高混凝土抗壓強度。

圖 4.16 為本研究不同水膠比活性粉混凝土之抗壓強度，可以發現隨著水膠比的降低，試體經熱養護後抗壓強度呈現增加的趨勢，顯示降低水膠比確實有利於強度的提升，各水膠比之配比於 7 天抗壓強度依序分別為 120.3 MPa、126.49 MPa 及 148.68 MPa，於 91

天抗壓強度依序分別為 128.09 MPa、129.97 MPa 及 150.51 MPa，其中以水膠比 0.18 之配比強度出現最大值，也顯示較低的水膠比對於強度的發展具有正面效益，而早期齡期 7 天與 28 天試體之抗壓強度差異並不顯著，在齡期 91 天時抗壓強度也不再明顯提升，顯示活性粉混凝土在早期即達到很高的抗壓強度，表示高溫養護使得混凝土早期強度快速增長，縮短混凝土強度發展所需的時間，降低養護期間可能遭遇的外在因素影響，避免混凝土澆置後早期的劣化或失敗。

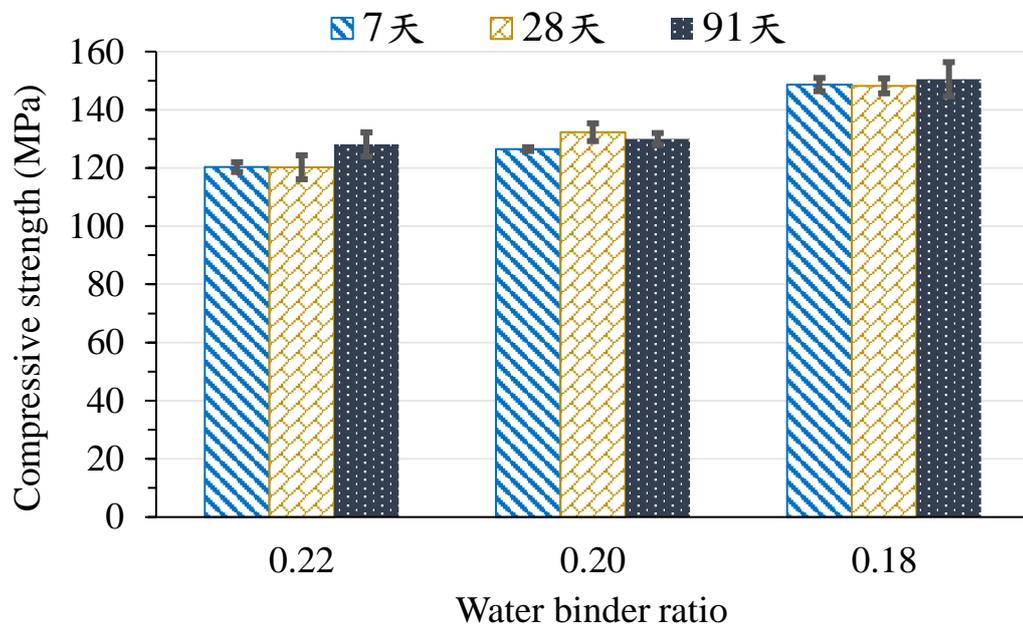


圖 4.16 各齡期不同水膠比之抗壓強度比較圖

六、 孔隙率試驗

混凝土內部孔隙率與有害離子的入侵有很大的關聯性，為了掌握試體的孔隙率，故依據 ASTM C642 規範對混凝土配比進行孔隙率試驗，目的在於了解試體內部孔隙的含量，當試體孔隙率越高，代表外界有害物質入侵試體內部就更容易，不利於混凝土的耐久性。

本試驗為參照 ASTM C642 方法進行改良，使用抽真空方式使試體達到飽和狀態，圖 4.17 為各齡期不同水膠比的熱養護試體之孔隙率，可了解三種水膠比混凝土之試驗結果，圖中顯示經過熱養護之試體孔隙率皆偏低，可見高溫養護可以有效加速卜作嵐反應，在齡期 28 天時以水膠比 0.18 配比之孔隙率最低為 1.00%，水膠比 0.20 孔隙率為 1.09%，水膠比 0.22 孔隙率為 1.64%，在齡期 91 天時以水膠比 0.18 配比之孔隙率最低為 0.96%，水膠比 0.20 孔隙率為 1.15%，水膠比 0.22 孔隙率為 1.61%。

由此結果可見，影響試體孔隙率的主要因素仍為水膠比，而隨著試體齡期增加孔隙率並沒有顯著降低的現象。低水膠比試體孔隙率較低的原因可能是因為配比中所使用的粉料較多，使得經養護過後的試體其內部結構最為緻密。由於這些粉體與水泥水化所產生的氫氧化鈣反應，形成密度較低的 C-S-H 膠體，因而可以填充孔隙，同時將混凝土內部較大的孔隙轉變為較小孔隙，甚至阻絕連通路徑成為不連續或封閉孔隙，使外界物質難以入侵試體內部，降低混凝土滲透性及提高水密性。

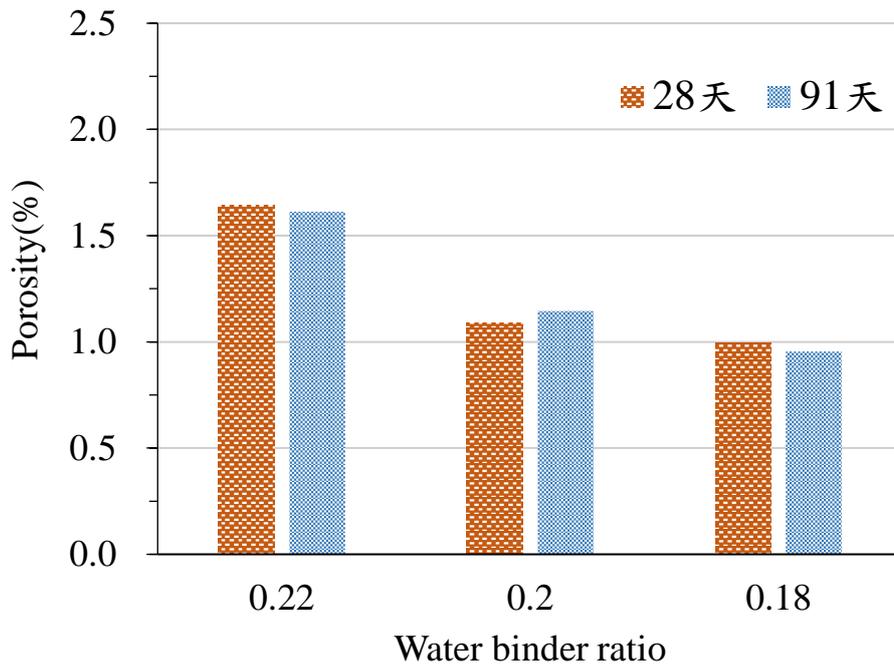


圖 4.17 各齡期不同水膠比之混凝土孔隙率比較圖

七、 劈裂試驗

劈裂強度大小與混凝土內部緻密程度及纖維含量有密切的關連性，試體水平放置於試驗台時，對試體上方施加壓力進而產生側向拉力，類似以拉力拉開混凝土，此狀態和混凝土的膠結狀況、拉力強度、水膠比等均有關係。

活性粉混凝土由高矽含量的材料組成，主要材料為矽灰、石英粉及石英砂組成，矽灰因為顆粒粒徑較小，可在產生卜作嵐反應的同時填補漿體間的孔隙，而石英粉在高溫下會凸顯其活性，故熱水養護會加速水化反應導致早期強度發展快，在添加適量的鋼纖維後，其齡期 7 天之劈裂強度幾乎已達高峰。

由圖 4.18 可知，各水膠比齡期 7 天的劈裂強度分別為 12.5 MPa、14.09 MPa 及 15.05 MPa，齡期 28 天的劈裂強度分別為 12.45

MPa、13.96 MPa 及 15.83 MPa，齡期 91 天的劈裂強度分別為 12.85 MPa、13.81 MPa 及 15.72 MPa。由圖中可以看出水膠比仍然是影響試體劈裂強度的主要因素，水膠比愈低，劈裂強度愈高；而相同水膠比試體齡期 7 天、28 天至 91 天的劈裂強度成長並不明顯，可以顯示添加鋼纖維及高溫養護能提供混凝土具有足夠的緻密性能，在早期即能到達較高的劈裂強度。

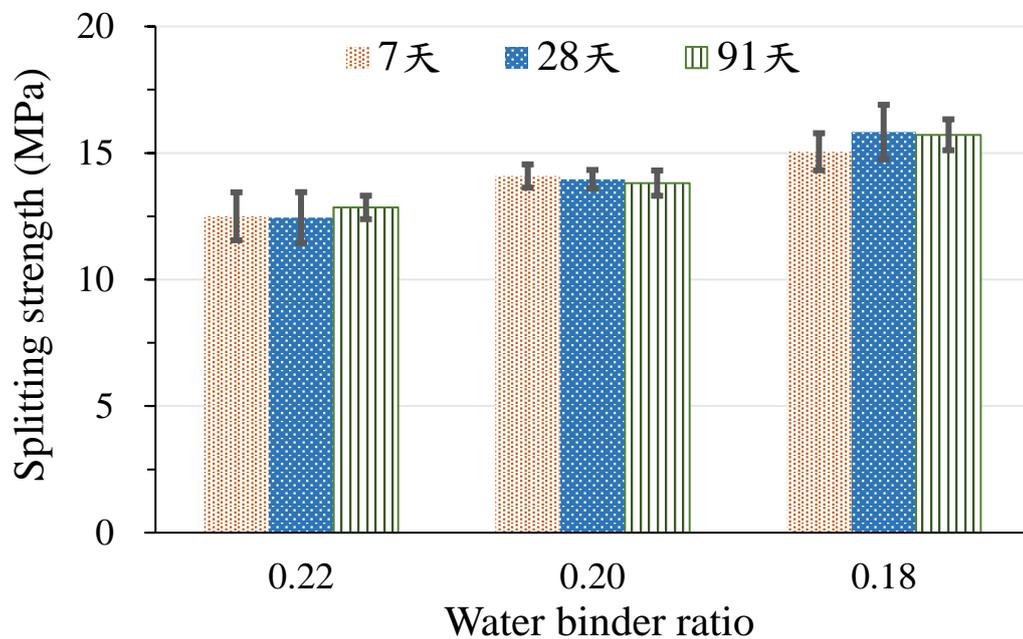


圖 4.18 各齡期不同水膠比之劈裂強度

八、直接拉力試驗 (Tensile strength test)

直接拉力試驗係將夾具置於抗拉試體中央處，並放置 LVDT 以記錄試驗時的位移量，利用混凝土與鋼纖維傳遞拉力並將破裂面控制於夾具範圍內，並以 0.5 mm/min 的加載速率進行直接拉力試驗。

利用直接拉力試驗可了解添加鋼纖維及降低水膠比之力學性質影響，隨著試體緻密性的提升及微孔隙的填充，在添加大量的卜

作嵐材料的情況下明顯改善混凝土的膠結能力。根據文獻提及，相較於未添加鋼纖維的混凝土，添加鋼纖維可確實提高混凝土直接拉力強度。各不同水膠比活性粉混凝土直接拉力試驗所得之應力-應變關係如圖 4.19 所示，各試體在達到極限強度後，隨著應變持續增加，仍維持相當高的殘餘應力，顯示鋼纖維混凝土高韌性的特性，換言之，添加鋼纖維的試體受拉破壞時因為鋼纖維的束制而不會如一般混凝土般出現脆性破壞而瞬間斷裂，而是在試體出現裂紋後仍相當程度維持其抗拉能力，至較大拉應變(>3%)才發生破壞，證實添加鋼纖維能有效增加抗拉強度及提高混凝土韌性。

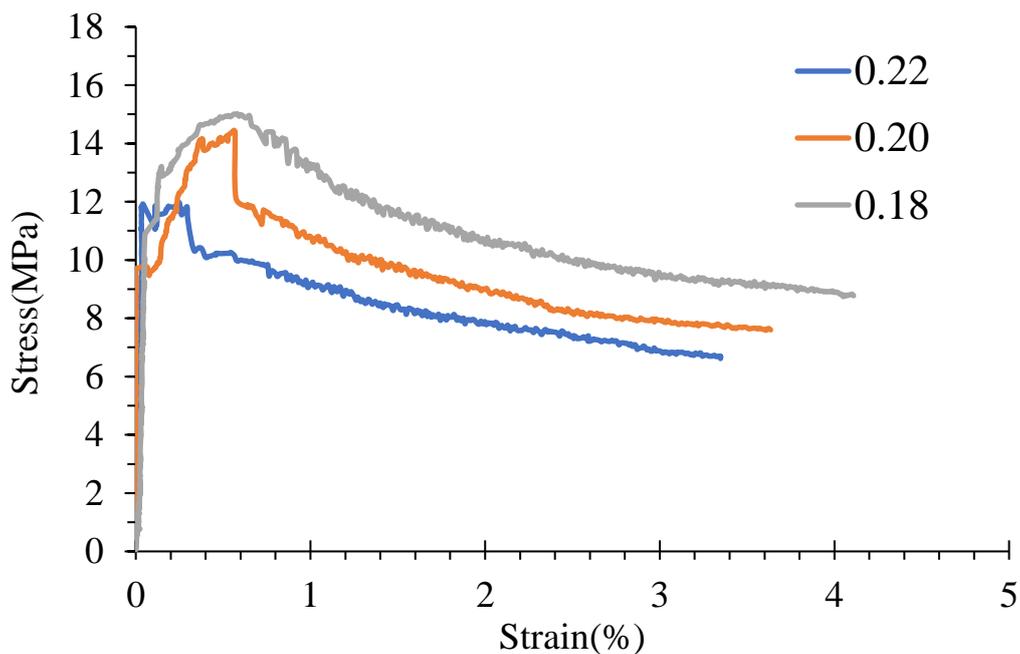


圖 4.19 直接拉力試驗應力應變圖

另一方面，圖 4.19 也顯示混凝土試體直接拉力強度隨著水膠比的降低而有增加的趨勢，且極限強度發生的應變也隨著水膠比的降低而增加，即使達到極限強度後，因為鋼纖維對於裂縫的束制作

用使得殘餘應力能延緩混凝土的破壞，由圖中可見，不同水膠比活性粉混凝土的殘餘強度皆可維持至3%以上的拉應變而尚未發生斷裂破壞。

將不同水膠比之活性粉混凝土拉力試驗所得力學參數加以整理，如表 4.4 所示，隨著水膠比的降低，混凝土的極限強度確實有顯著的提升，與各水膠比混凝土劈裂試驗結果之趨勢相符，其中配比 0.20 及 0.18 水膠比之混凝土試體在直接拉力試驗的過程中經過降伏點後抗拉強度有些微的提升，且應變硬化的過程明顯，極限強度對應之應變差異不大，惟配比 0.22 水膠比之混凝土試體降伏強度與極限強度相近，對於降伏點後抗拉強度並沒有明顯提升，其原因可能與混凝土試體的品質有關，灌製試體的過程中鋼纖維分布不均，加上由於抗拉試體較薄的緣故，使得在安裝夾具的過程中容易使混凝土受損進而影響試驗，但對於極限強度無太大影響，鋼纖維仍然可以發揮束制作用延緩混凝土的開裂，活性粉混凝土直接拉力試驗試體破壞情形如圖 4.20 所示。

韌性指的是承受應力時試體能吸收能量及抵抗變形而不破裂，而韌性可以由應力-應變曲線下之面積求得，所求得面積越大，表示抵抗開裂及破壞的能力越強。由表 4.4 可知，隨著水膠比降低，試體發生破壞的應變增加，直接拉力試驗應力-應變曲線下的面積也越大，表示降低活性粉混凝土的水膠比不僅有助於提高抗拉強度，也同時增加其韌性。

表 4.4 不同水膠比混凝土直接拉力試驗結果

W/B	降伏強度 (MPa)	極限強度 (MPa)	極限強度對應 之應變(%)	破壞應變 (%)	韌性
RPC 0.22	11.92	11.97	0.25	3.35	0.29
RPC 0.20	9.70	14.45	0.56	3.63	0.36
RPC 0.18	13.21	15.02	0.58	4.11	0.45

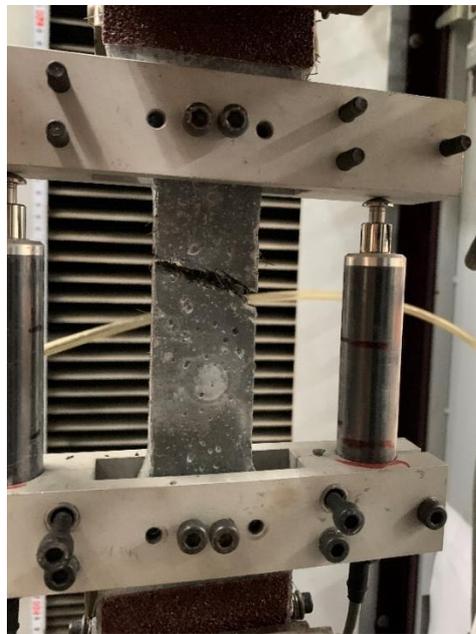


圖 4.20 抗拉試驗試體破壞情形

九、 體積穩定性試驗

體積穩定性試驗是參照 CNS 14603 混凝土長度變化法，量測試體在溫度 $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $50\%\pm 2\%$ 相對濕度下隨齡期增加之體積變化量，藉此評估混凝土的體積穩定性，過多的變化量則可能使混凝土過度膨脹或收縮導致微裂縫的生成，使得混凝土的品質下降，影響混凝土的耐久性。

圖 4.21 實驗結果可以發現，三種水膠比間的體積變化率在前期差異並不大，經過高溫養護後的試體約在 28 天前混凝土試體其體積變化率呈現正值並逐漸增加，有些微膨脹的趨勢但並無觀察到裂縫的生成，直到 28 天後才停止增加並逐漸趨緩至緩慢收縮，可能的原因為水泥、矽灰等粉料含量較多，即使經過熱水養護後內部水化已趨於完整，但依據規範要求齡期 28 天前需放置在溫度 $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 飽和石灰水中，使得試體在浸泡飽和石灰水時有吸水的現象而導致體積些微的增加。而在 28 天後試體體積逐漸收縮，其中水膠比 0.20 與 0.18 兩者差異並不大，水膠比 0.22 可能因為粉料較多，相對顯得收縮量較大，但各水膠比 182 天的乾縮量都相當小 ($< 0.01\%$)，不會造成不良的影響。

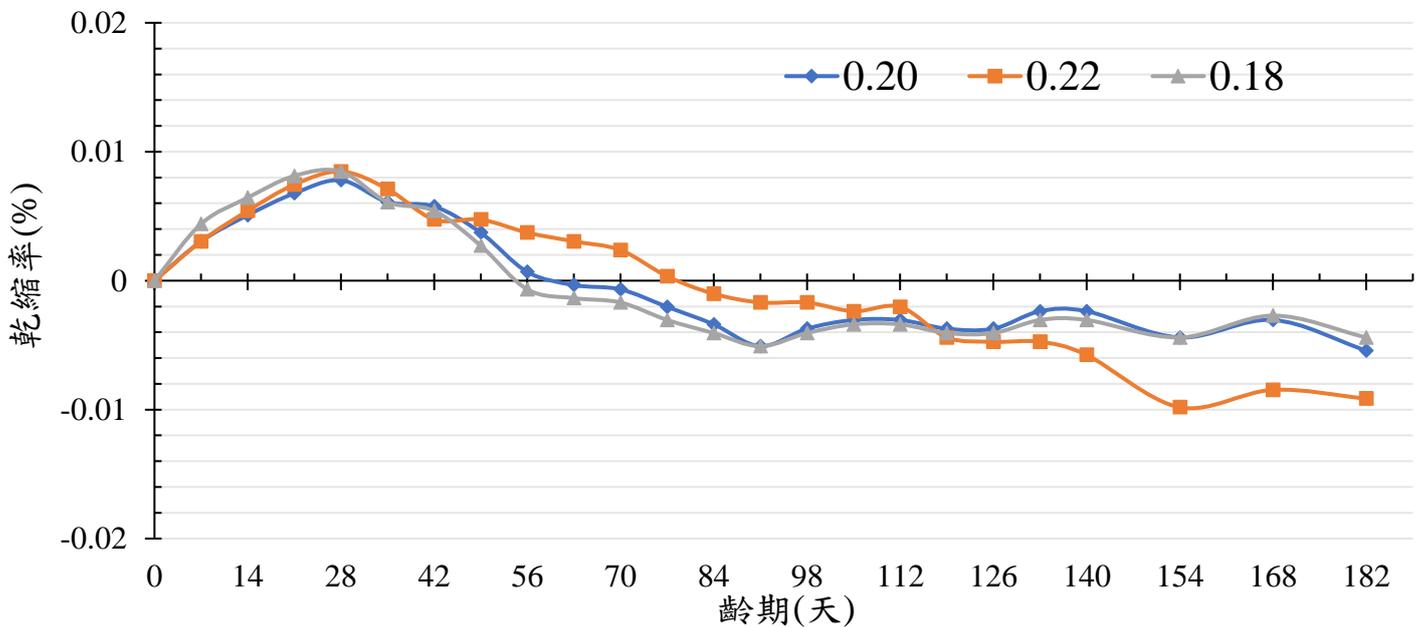


圖 4.21 不同水膠比混凝土試體之體積隨齡期變化圖

十、 與高完整性容器混凝土規範的比較

本研究所發展的活性粉混凝土配比，採用鋼纖維含量 1.0%，依表 3.4 所示之不同水膠比(0.22、0.20、0.18)活性粉混凝土配比，試體經 90°C 高溫養治 1 天，於齡期 28 天時測得知各項力學與物理性質，將其與法國 Andra 及斯洛伐克容器混凝土標準加以比較，如表 4.5 所示。由表中可見，本研究所發展的三種水膠比活性粉混凝土機械性質皆遠高於法國 Andra 容器混凝土的標準，顯示活性粉混凝土作為高完整性容器混凝土之潛力。

表 4.5 活性粉混凝土測試配比機械性質與容器混凝土標準比較

機械性質	本研究活性粉混凝土配比(28 天)			法國 Andra 容器混凝土標準
	w/b = 0.22	w/b = 0.20	w/b = 0.18	
抗壓強度(MPa)	120.3	132.1	148.6	> 50 MPa
拉力強度(MPa)	11.92	9.70	13.21	> 4.5 MPa
乾縮($\mu\text{m}/\text{m}$)	92	58	43	< 300 $\mu\text{m}/\text{m}$

十一、 表面電阻率試驗

表面電阻率試驗的原理係施加電流通於試體內部，藉由孔隙中的水分進行傳遞，其優點為非破壞性且快速量測、易於操作，可以用來評估混凝土的內部結構，而當混凝土內部結構越緻密則連通的孔隙就越少，導電通路就越長，故當水膠比愈大時，由於拌合用水量增加，漿體濃度較稀，易形成毛細孔隙，導致微結構密實性較差，有利於電流之傳導，量測得電阻率就越小，藉由量測結果可提供作為混凝土耐久性指標。

表面電阻值僅量測到混凝土表面的阻抗性，以侵入先後順序來看，外界劣化因子先經由表面滲透，經連通路徑滲入內部，所以表面電阻值也反映出外界劣化因子穿透表層進入內層的難易程度。

AASHTO T358-15 標準試驗方法可以用來評估混凝土電阻率，圖 4.22 所示為不同水膠比活性粉混凝土之表面電阻率量測結果，因為使用較低的水膠比及卜作嵐材料，大量的卜作嵐反應所生成之 C-S-H 膠體填充漿體結構，減少有害物質傳輸路徑，再加上熱水養護，所以水化程度較完整、內部結構緻密，故電阻值較穩定，由電阻率趨勢圖可以發現水膠比 0.22 的電阻值低於水膠比 0.20 及 0.18，可能的原因與其孔隙率略高有關，由孔隙率試驗可得知水膠比 0.22 的孔隙率高於水膠比 0.20 及 0.18，孔隙多寡會影響電流傳輸路徑是否順暢。

水膠比 0.20 及 0.18 混凝土試體之表面電阻率相近，兩者在各個齡期之電阻率幾乎一致，所呈現的趨勢與孔隙率量測結果相當一致。將齡期 28 天及 91 天之孔隙率試驗與表面電阻率試驗數據繪圖，如圖 4.23 所示，所得關係直線之回歸分析判定係數 R^2 為 0.94，兩者間相關性越高，這表示各齡期之孔隙率與表面電阻率數據兩者間具有高關聯性。此外，低水膠比試體(0.18 及 0.20)表面電阻率量測結果的變異情形，也低於高水膠比試體(0.22)。由於混凝土孔隙率與其耐久性有密切相關，因此以表面電阻率對活性粉混凝土進行檢測，具有做為混凝土品質指標的潛力。

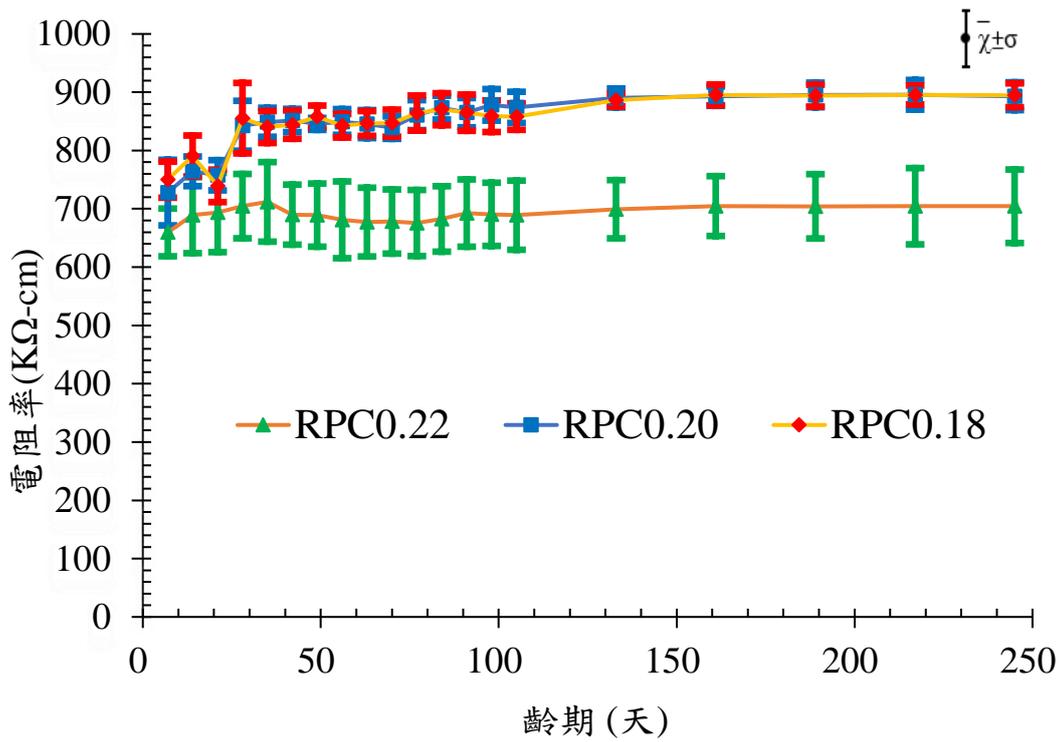


圖 4.22 不同水膠比混凝土表面電阻率之齡期發展趨勢

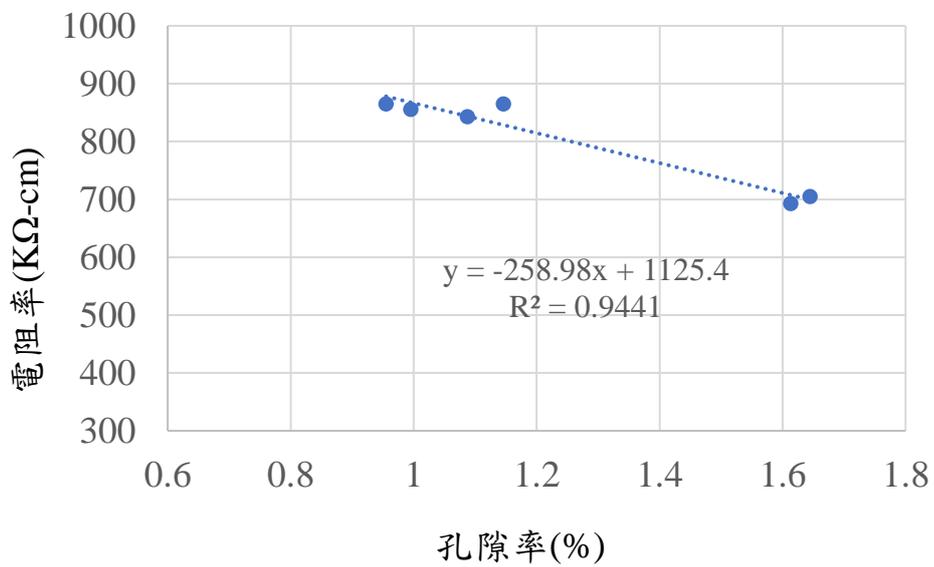


圖 4.23 混凝土孔隙率與表面電阻率之相關性

十二、電子顯微鏡觀察

水泥水化作用直接影響混凝土強度發展與耐久性，而當混凝土添加卜作嵐材料與水化產物氫氧化鈣起反應，C-S-H 膠體進而充填混凝土孔隙，因而提高混凝土內部結構緻密程度，而緻密程度對外來物質侵入有著主要關鍵，故用電子顯微鏡觀察養護齡期與水膠比對混凝土內部結構變化情狀。本研究使用之電子顯微鏡(SEM)由日本 HITACHI 公司所製造之 TM-1000 機型，並以倍率 300 及 1200 倍進行觀測。

本試驗在抗壓試驗完成後取樣，達預定齡期後置入乙醇中止水化並進行電子顯微鏡觀察，圖 4.24 及圖 4.25 分別為經高溫熱水養護 7 天及 28 天 SEM 微觀照片，發現經過高溫養護後的試體內部結構並無明顯差異，相較於常溫養護內部結構呈片狀堆疊，高溫養護使得水化反應產生之膠體將組成材料緊密結合，水化程度完整，呈現平滑緻密現象，顯示活性粉混凝土運用高溫熱水養護法有利於混凝土內部微結構的發展。圖 4.26 為經高溫熱水養護後之鋼纖維與漿體密切結合之剖面微觀圖，可以發現漿體與鋼纖維的握裹狀況良好，並無明顯空隙存在，在卜作嵐反應下矽灰與水泥中的氫氧化鈣形成緻密的 C-S-H 膠體，運用高溫熱水養護法則加速了反應的發生及增加水化的完整性，在鋼纖維與水泥漿體緊密的結合下對於混凝土的抗張性具有良好的效益。

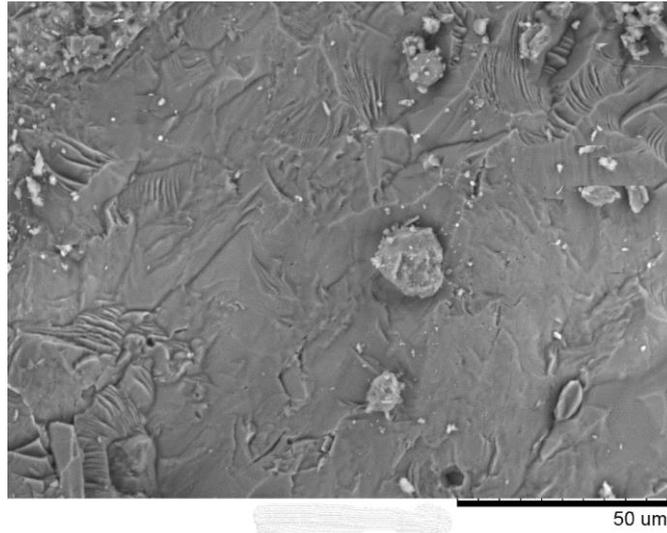


圖 4.24 水化漿體齡期 7 天之 SEM 照片

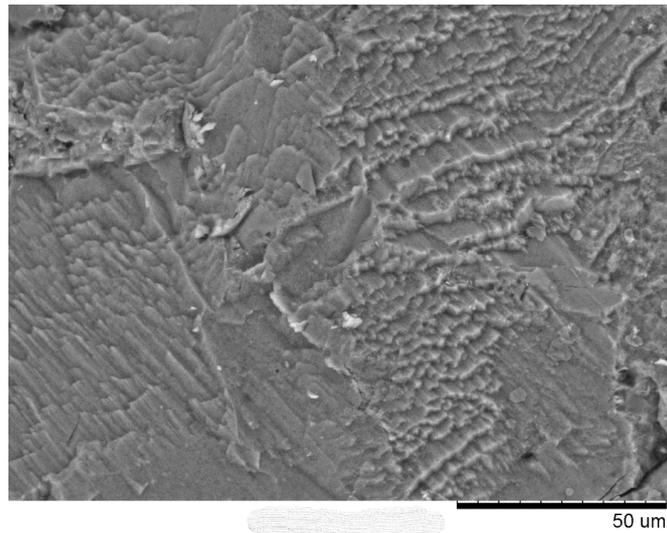


圖 4.25 水化漿體齡期 28 天之 SEM 照片

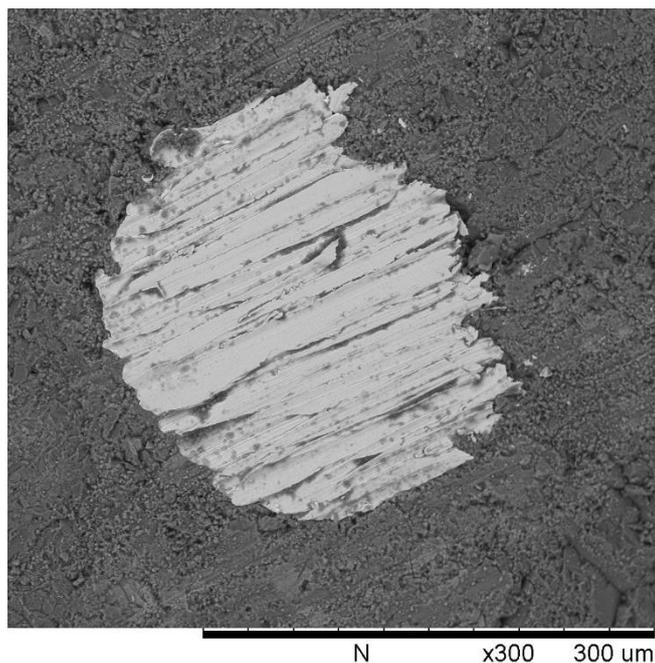


圖 4.26 鋼纖維與漿體結合狀況之 SEM 照片

十三、X 光繞射分析試驗

活性粉混凝土富含具有膠結功能的卜作嵐材料，可於養護過程中產生卜作嵐反應。卜作嵐反應主要是水泥中矽酸三鈣(C_3S)與矽酸二鈣(C_2S)產生水化反應產生水化矽酸鈣(C-S-H)與氫氧化鈣(CH)，其中氫氧化鈣與二氧化矽(SiO_2)再次發生反應，二次反應後形成水化矽酸鈣，產生填塞混凝土內部孔隙及增加粒料間過渡區強度的效果。卜作嵐反應的進行會消耗大量氫氧化鈣，同時產生 C-S-H 膠體，故 XRD 成份分析主要目的在觀察活性粉混凝土內水化生成物的化合物種類，利用 X 光繞射分析儀對氫氧化鈣與水化矽酸鈣波峰值強度變化進行分析，以了解活性混凝土養護方式及水膠比對氫氧化鈣消耗情形與水化矽酸鈣生長情形。

由於活性粉混凝土主要由矽質材料組成，可發現二氧化矽(SiO_2)為主要化學成分，以銅靶進行 X 光繞射時，於繞射峰值 $2\theta =$

20.9°、26.7°、50.2°處具有主要繞射峰值，因活性粉混凝土為矽質材料所組成，添加之矽灰具有填充內部孔隙之特性，對於混凝土抗壓強度有增強作用，顯示透過高溫養護有助於混凝土中 SiO₂ 含量之提升，進而增強抗壓強度。

Shen et al.(2018)將活性粉混凝土進行 X 光繞射分析儀試驗，指出 C-S-H 膠體的繞射峰帶出現在 28 到 33°之範圍，而 Ca(OH)₂ 的主要繞射峰值為 17.9°，試體經過一段時間後因卜作嵐反應的消耗，其峰值幾乎已不出現。本研究之活性粉混凝土所添加之卜作嵐材料包括矽灰及石英粉，會與水泥水化生成之氫氧化鈣進行反應產生水化矽酸鈣水化物，不僅減少混凝土內部孔隙，同時亦提升混凝土強度及耐久性。由圖 4.27 與圖 4.28 所示不同水膠比混凝土 X 光繞射圖譜中，未發現氫氧化鈣之繞射峰值，顯示已被卜作嵐反應消耗殆盡，證實高溫養護可激發矽灰與石英粉活性，有助於混凝土卜作嵐反應及水化作用之進行，故於 7 天齡期時即已無氫氧化鈣之繞射峰值出現。

另外，由圖 4.27 及圖 4.28 可見混凝土試體中的主要成份分別是 SiO₂ 及 C-S-H 膠體，這兩種成分的繞射峰最為顯著，SiO₂ 是來自所使用的矽灰、石英粉，顯示的峰值強度最為明顯，而 C-S-H 膠體的繞射峰帶代表的是由水泥水化產物 Ca(OH)₂ 與卜作嵐材料反應所生成的產物，試體的熱養護及配比中大量矽灰，使反應速率加快，形成緻密的微結構，所形成的峰帶也相對較為明顯，可知活性粉混凝土中的主要水化產物確實以 C-S-H 為主。

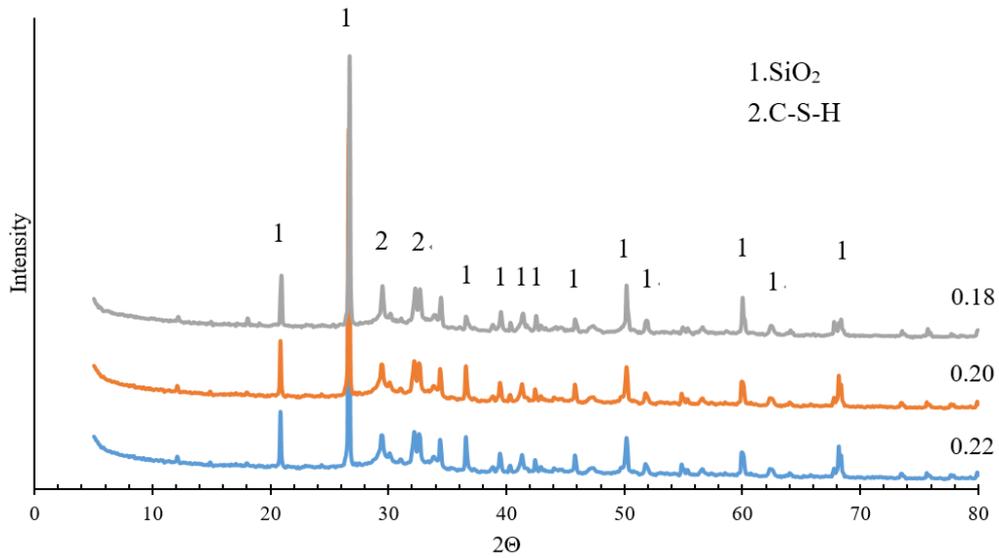


圖 4.27 不同水膠比混凝土齡期 7 天 X 光繞射分析圖譜

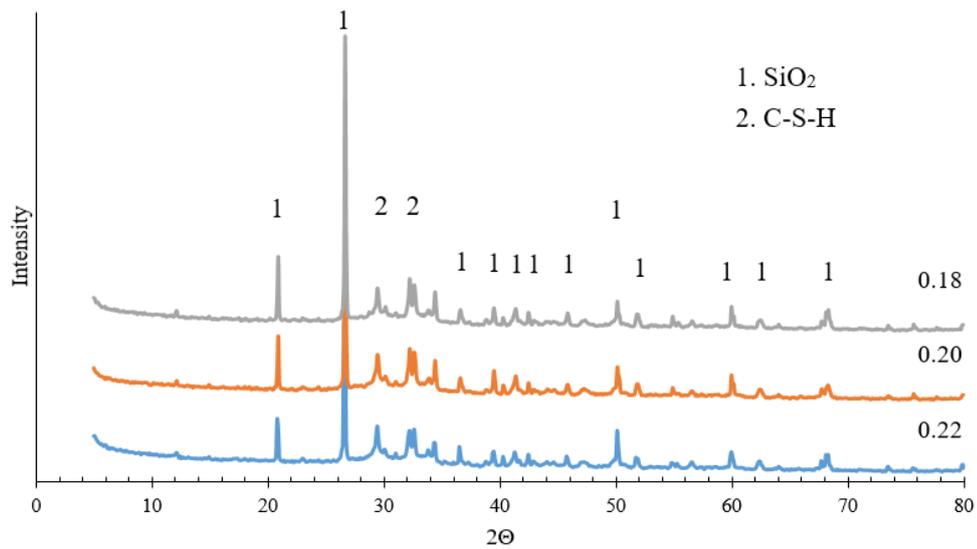


圖 4.28 不同水膠比混凝土齡期 28 天 X 光繞射分析圖譜

十四、結論

本研究針對擬運用於低放射性廢棄物盛裝容器之活性粉混凝土配比進行兩階段研究，首先以活性粉混凝土相關文獻為基礎設計所使用的配比，以選擇出鋼纖維含量、減水劑添加比例及適合的搗

實方式來確定材料參數及製作試體的程序，最後以高溫養護溫度方式來提升整體水化程度及品質。

其次，為掌握活性粉混凝土工程與力學特性，使用不同水膠比製作試體，以高溫進行養護後，與預定齡期進行抗壓強度、劈裂強度、直接拉力、孔隙率、體積穩定性、表面電阻率以及微觀試驗等，依據試驗結果，獲致以下結論：

- (一) 由試驗結果得知，使用 3 號石英砂及 1% 鋼纖維含量為適合製作活性粉混凝土試體之配比參數，配合振動台震動 60 秒來澆置混凝土，可製成品質穩定、分布均勻的試體，最後以 90°C 熱水養護一天之方式，以這些實驗參數來訂定製作活性粉試體之標準程序。
- (二) 依據硬固性質試驗結果，以添加大量卜作嵐摻料、低水膠比及經過熱水養護後之混凝土，因水化程度上升使得孔隙結構較不連續，緻密度較高，故在各項試驗中表現優異，其中水膠比 0.18 的配比在抗壓強度、劈裂強度及直接拉力強度試驗中具有較佳的表現，顯示降低水膠比對於品質的改善及強度的提升有顯著效果。
- (三) 採用高溫熱水養護確實能加速卜作嵐反應及縮短養護齡期，在提升電阻率、降低孔隙率及改善體積的穩定性有顯著的效果，因此高溫養護能幫助提升混凝土早期品質，以避免養護期間失敗的風險，而採用水膠比 0.20 及水膠比 0.18 其品質改善效果相當接近。
- (四) 綜合各項實驗結果，試體齡期的增加對於硬固性質及耐久性

能並沒有顯著的提升，由於添加大量的卜作嵐材料及採用高溫養護能有效加速混凝土卜作嵐反應，促進混凝土內部微結構的發展，幫助混凝土在早期迅速達到較高的品質，更能減少養護期間品質劣化的可能性。

- (五) 從電子顯微鏡試驗及 X 光繞射分析試驗中可發現，活性粉混凝土運用高溫熱水養護法有利於混凝土內部微結構的發展，所添加之卜作嵐材料會與水泥水化生成之氫氧化鈣進行反應產生水化矽酸鈣水化物，達到填補孔隙及提升混凝土性能的效果。
- (六) 表面電阻率試驗結果，水膠比 0.20 及 0.18 的混凝土試體表面電阻率相當接近，且高於水膠比 0.22 之試體，原因為電流係藉由混凝土孔隙中的水分進行傳遞，而當混凝土內部結構越緻密則連通的孔隙就越少，導電通路就越長，使電阻率提高，並能與混凝土孔隙率試驗結果相互驗證。
- (七) 根據不同鋼纖維添加量，透過劈裂試驗可得知，隨著鋼纖維含量增加，能提升混凝土的抗張能力，將其運用在盛裝容器能有效提升容器抵抗衝擊與抗裂能力。
- (八) 透過活性粉混凝土配比之物理與機械性質試驗結果，與國外高完整性容器混凝土標準進行比較，所測試各水膠比配比皆符合其容器混凝土之要求。使用添加鋼纖維之活性粉混凝土抗拉强度高且結構緻密，應用於製作高完整性容器混凝土，能有效降低盛裝容器之厚度並提升其耐久性。故本研究結果，經判斷耐久性應能超過 300 年，符合高完整性容器要求，若未來

於實際應用，仍需再進一步研究探討。

伍、 先前研究配比之結果比較

引用先前研究團隊葉佳煊(2019)以混凝土配比 M 進行抗壓強度、孔隙率及表面電阻率等試驗結果，與本研究之試驗成果加以比較，並探討其力學性質及耐久性質的優異，藉以評估活性粉混凝土運用於盛裝容器之可行性。

一、 抗壓強度試驗

評斷混凝土品質優劣的方法，抗壓強度試驗為所有試驗中最具代表性，且最直接的方法，故利用抗壓強度來判斷高溫養護(90°C)對不同配比材料其力學性質之差異。

由圖 5.1 可知，透過高溫養護方式，能使活性粉混凝土(RPC)及配比 M 在早期強度快速增長，縮短混凝土強度發展時間，且與後期抗壓強度差異並不顯著。而活性粉混凝土因添加高二氧化矽(SiO_2)含量之矽灰與石英粉，經過高溫養護後，能加速混凝土的水化作用與卜作嵐反應進行，水化作用所形成的氫氧化鈣能填補漿體中的孔隙，以及加速 C-S-H 膠體快速生成，進而提高混凝土抗壓強度。活性粉混凝土也因添加鋼纖維及去除粗粒料，前者使混凝土試體具有一定握裹力，造成試體有牽制之效應；後者使得混凝土本身更加緻密。以 7 天齡期為例，活性粉混凝土與配比 M 相比提升 24%至 38%之抗壓強度，顯示此材料能有效提升盛裝容器之品質。

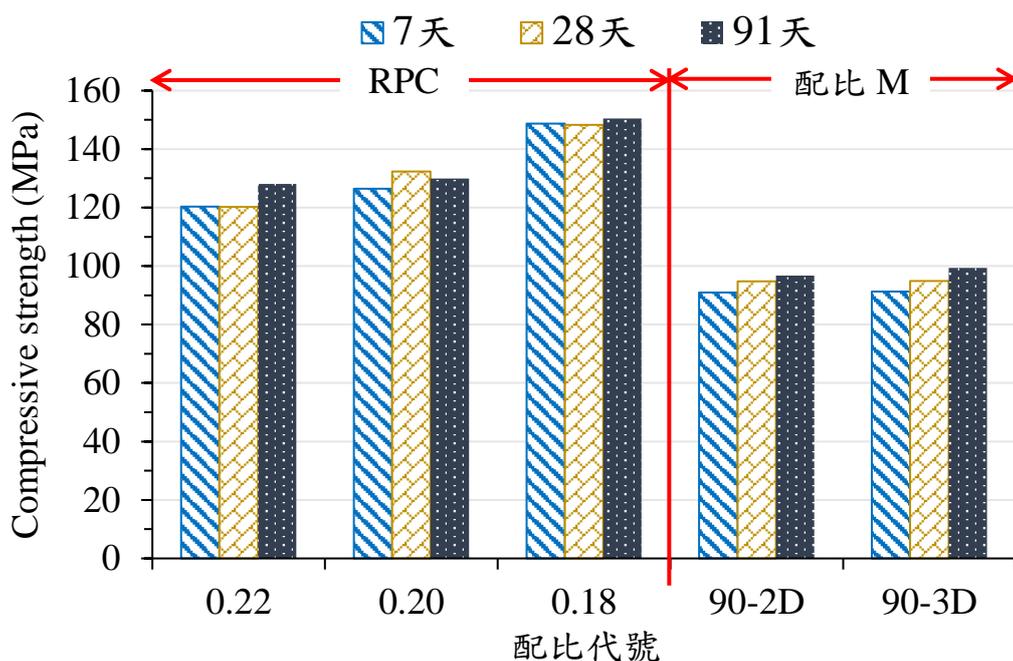


圖 5.1 不同配比之抗壓強度比較圖

二、 孔隙率試驗

引用先前研究團隊進行孔隙率試驗所得混凝土配比 M 之孔隙率結果，齡期 91 天混凝土試體之 90°C 熱水養護 2 天及 90°C 熱水養護 3 天數據分別為 2.05% 及 2.13%，皆顯著高於本研究活性粉混凝土的孔隙率。活性粉混凝土因去除粗粒料及利用高溫養護方式，使內部微結構較為緻密，能有效降低孔隙率，由圖 5.2 可知，本研究之活性粉混凝土配比孔隙率明顯較配比 M 為低，故預期將具有極佳的耐久性質。

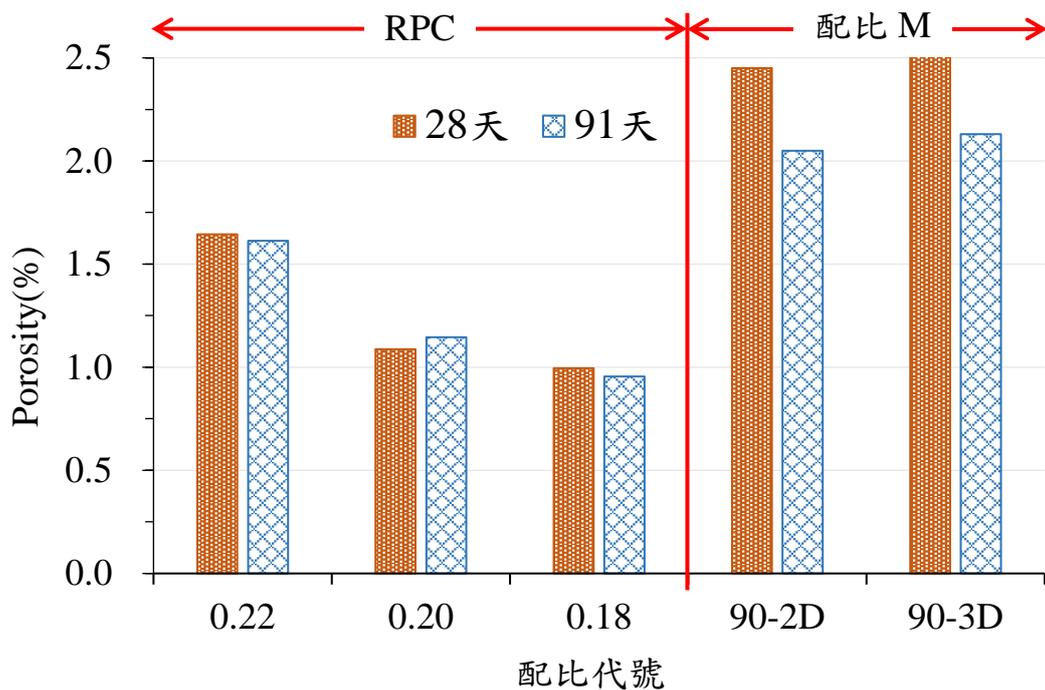


圖 5.2 不同配比之孔隙率比較圖

三、 表面電阻率試驗

表面電阻值僅量測到混凝土表面的阻抗性，以侵入先後順序來看，外界劣化因子先經由表面滲透，經連通路徑滲入內部，所以表面電阻值也反映出外界劣化因子穿透表層進入內層的難易程度。

由於配比 M 並未添加鋼纖維，而活性粉混凝土因添加鋼纖維，鋼纖維為良導電體，所以配比 M 之電阻率較高於活性粉混凝土，且因為添加鋼纖維的因素，造成標準差也較大，如圖 5.3 所示。

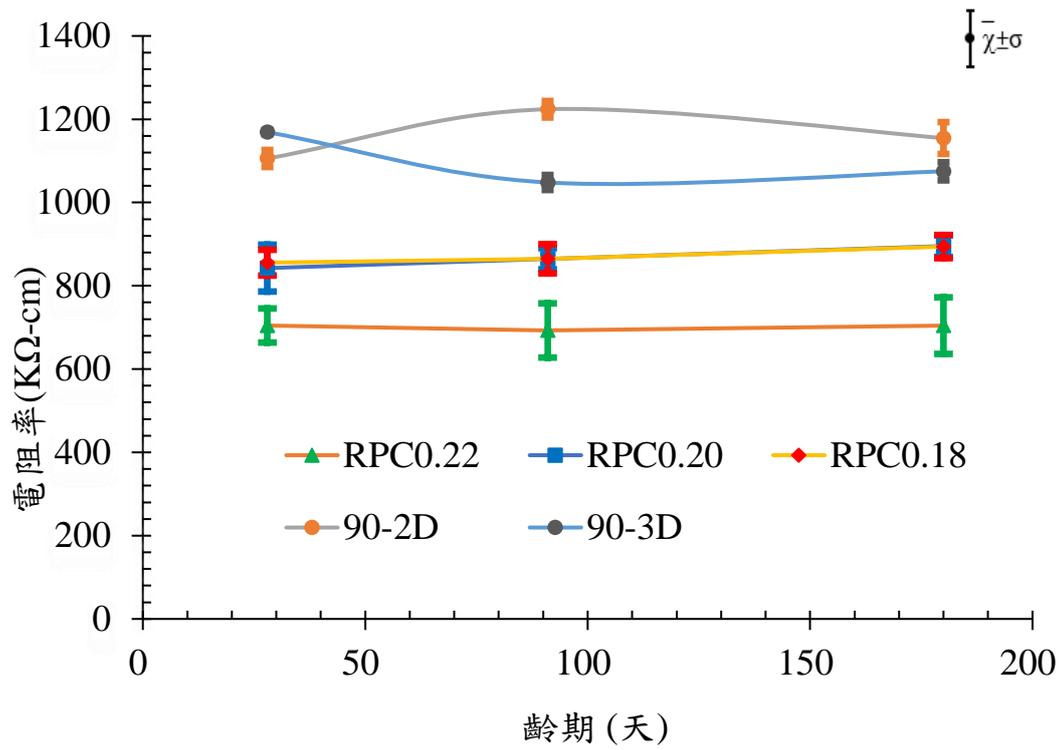


圖 5.3 不同配比之表面電阻率比較圖

陸、 參考文獻

1. 李金輝，2006，「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。
2. 王心荻，2009，「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。
3. 莊美玲，2014，「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。
4. 葉佳煊，2019，「熱養護混凝土應用於低放射性廢棄物盛裝容器之障壁功能試驗評估」，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所，中壢。
5. AASHTO T358-15 Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
6. ASTM C642-13 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
7. Ahmad, S., Zubair, A., and Maslehuddin, M. (2015). "Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete." *Construction and Building Materials*, Vol. 99, pp. 73-81.
8. Abo-El-Enein, S. A., El-kady, G., El-Sokkary, T. M., and Gharieb, M. (2015). "Physico-mechanical properties of composite cement pastes containing silica fume and fly ash." *Housing and Building National Research Center*, Vol. 11, pp. 7-15.
9. Bouziadi, F., Boulekbache, B., and Hamrat, M. (2016). "The effects of fibres on the shrinkage of high-strength concrete under various curing temperatures." *Construction and Building Materials*, Vol. 114, pp. 40-

48.

10. 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.
11. 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.
12. Cwirzen, C., Penttala, V., and Vornanen, C. (2008). "Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC." *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pp. 1217-1226.
13. 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.
14. Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Muhyaddin, G.F., Asaad, D. S., and Yılmaz, M. E. (2016). "Strain hardening ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites: Effect of fiber type and concentration." *Composites Part B*.
15. 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.
16. 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.
17. Helmi, M., Hall, M. R., Stevens, L. A., and Rigby, S. P. (2016). "Effects of high-pressure/temperature curing on reactive powder concrete microstructure formation." *Construction and Building*

- Materials*, Vol. 105, pp. 554-562.
18. Hiremath, P. N., and Yaragal, S. C. (2017). "Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete." *Construction and Building Materials*, Vol. 154, pp. 72-87.
 19. Hudoba, I. (2007). "Utilization of concrete as a construction material in the concept of Radioactive Waste Storage in Slovak Republic." *mimoriadne číslo*, Vol. 12, pp. 157-161.
 20. Jussara, T., Ardani, A. (2012). "Surface Resistivity Test Evaluation as an Indicator of the Chloride Permeability of Concrete." Federal Highway Administration.
 21. 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.
 22. Lee, N. P., and Chisholm, D. H. (2005). "Reactive powder concrete." Study Report SR 146, BRANZ Ltd, Judgeford, New Zealand.
 23. Mostofinejad, D., Nikoo, M. R., and Hosseini, S. A. (2016). "Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC)" *Construction and Building Materials*, Vol. 123, pp. 754-767.
 24. 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.
 25. Maddalena, R., Li, K., Chater, P. A., Michalik, S., and Hamilton, A. (2019). "Direct synthesis of a solid calcium-silicate-hydrate (C-S-H)." *Construction and Building Materials*, Vol. 223, pp. 554-565.

26. Naaman, A. E. (2003). "Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites." *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 3, pp. 241-252.
27. Pech, R. (1992). "Fiber concrete overpacks/physico chemical characteristics: cement and fiber characterization." *Cement and Concrete Research*, Vol. 22, pp. 351-358.
28. 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.
29. Richard, P., and Cheyrezy, M. (1994). "Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength." *ACI Spring convention*, San Francisco, April 1994.
30. Richard, P., and Cheyrezy, M. (1995). "Composition of reactive powder concretes." *Cement and concrete research*, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511.
31. Ramezani pour, 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.
32. Rokugo, K. (2008). "Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC)." *Concrete Engineering series*, Japan Society of Engineers, Vol. 82.
33. Sengul, O. (2014). "Use of electrical resistivity as an indicator for durability.", *Construction and Building Materials*, pp. 434-441.
34. 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.
35. Shen, P., Lu, L., He, Y., Rao, M., Fu, Z., and Wang, F. (2018). “Experimental investigation on the autogenous shrinkage of steam cured ultra-high performance concrete.” *Construction and Building Materials*, Vol. 162, pp.512-522.
36. Shaikh, F. U. A., Luhar, S., Arel, H. S., and Luhar, I. (2020). “Performance evaluation of Ultrahigh performance fibre reinforced concrete – A review.” *Construction and Building Materials*, Vol. 232, pp. 117-152.
37. Shafieifar, M., Farzad, M., and Azizinamini, A. (2017). “Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC).” *Construction and Building Materials*, Vol. 156, pp. 402-411.
38. 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.
39. Tam, C. M., Tam, Vivian W. Y., and Ng, K. M. (2012). “Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong.” *Construction and Building Materials*, Vol. 26, pp. 79-89.
40. Young, J.F., Mindess, S., and Darwin, D. (2002). *Concrete*, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, U.S.A.
41. Wu, Z., Shi, C., and Khayat, K.H. (2016). “Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC).” *Cement and concrete composites*, Vol. 71, pp. 97-109.
42. Xun, X., Ronghua, Z., and Yinghu, L. (2020). “Influence of curing

- regime on properties of reactive powder concrete containing waste steel fibers.” *Construction and Building Materials*, Vol. 232, pp. 117-129.
43. Yazici, H., Deniz, E., Baradan., and Baradan, B. (2013). “The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete.” *Construction and Building Materials*, Vol. 42, pp. 53-63.
44. Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın., S. and Karabulut, A. (2009). “Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes.” *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 1223-1231.
45. 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.
46. Zdeb, T., and Sliwinski, J. (2009). “The influence of steel fibre content and curing conditions on mechanical properties and deformability of reactive powder concrete at bending.” *Brittle Matrix Composites 9*.
47. Zdeb, T. (2019). “Effect of vacuum mixing and curing conditions on mechanical properties and porosity of reactive powder concretes.” *Construction and Building Materials*, Vol. 209, pp. 326-339.