

鹼活化爐石混凝土應用於營建材料之研究

內政部建築研究所

協同研究報告

(99年度)

鹼活化爐石混凝土應用於營建材料之研究

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 99 年 12 月

鹼活化爐石混凝土應用於營建材料之研究

研究主持人：陳瑞鈴 代理所長

協同主持人：黃 然 教授

研 究 員：張建智 教授

研究助理：蔡嘉榮、官志恆

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 99 年 12 月

目次

目次.....	I
表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	IX
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 研究目的與範圍.....	2
第三節 研究方法.....	3
第二章 文獻回顧.....	5
第一節 鹼活化爐石粉混凝土之發展.....	5
第二節 爐石粉性質與鹼活化之機理.....	6
第三節 影響鹼活化爐石粉漿體性質之因素.....	9
第四節 鹼活化爐石粉漿體緩凝之研究.....	11
第三章 試驗計畫.....	13
第一節 前言.....	13
第二節 試驗變數、配比與材料.....	13
第三節 試驗方法.....	23

第四節 試驗設備及儀器	31
第四章結果與討論	37
第一節 前言	37
第二節 新拌性質試驗結果與討論	37
第三節 力學試驗結果與討論	42
第四節 耐久性試驗結果與討論	48
第五節 耐火試驗結果與討論	55
第五章結論與建議	61
第一節 前言	61
第二節 結論	61
第三節 建議	61
附錄一 期初審查會議建議與回應	65
附錄二 期中審查會議建議與回應	67
附錄三 期末審查會議建議與回應	69
參考書目	71

表次

表 2-1	鹼活化膠結材發展歷程 ^[2]	5
表 2-2	高爐石粉化學組成 ^[4]	7
表 2-3	IUPAC 孔徑尺寸分類表	10
表 2-4	鹼活化爐石粉漿體與卜特蘭水泥漿體孔徑比較表	10
表 3-1	普通混凝土與鹼活化爐石粉混凝土配比(kg/m ³).....	15
表 3-2	卜特蘭水泥化學成分	16
表 3.3	水淬高爐石粉化學成分	17
表 3-4	水淬高爐石粉物理性質	18
表 3-5	粗粒料篩分析結果	18
表 3-6	細粒料篩分析結果	18
表 3-7	NaOH 化學成分	19
表 3-8	Na ₂ SiO ₃ 化學成分	20
表 3-9	H ₃ PO ₄ 化學成分	20
表 3-10	電荷通過量評估氯離子穿透性	28

表 4-1	添加 H_3PO_4 凝結時間試驗結果.....	38
表 4-2	添加 H_3PO_4 坍度試驗結果	39
表 4-3	試體長度變化試驗結果(%).....	40
表 4-4	試體抗壓強度試驗結果(MPa).....	43
表 4-5	試體劈裂強度試驗結果(KPa)	46
表 4-6	混凝土抗氯離子穿透試驗結果與對照表.....	49
表 4-7	透水試驗結果	50
表 4-8	健性試驗結果	51
表 4-9	壓汞試驗試體齡期 7 天試驗結果	52
表 4-10	壓汞試驗試體齡期 28 天試驗結果	52

圖次

圖 1-1	研究流程	4
圖 2-1	水泥及卜特蘭材料在 C-S-A 系統三元相圖 ^[3]	1
圖 2-2	鹼活化爐石粉漿體水化歷程 ^[8, 10]	1
圖 2-3	添加 H ₃ PO ₄ 的鹼活化爐石粉漿體之凝結時間 ^[20]	12
圖 3-1	水淬高爐石粉外觀	21
圖 3-2	NaOH 外觀	21
圖 3-3	Na ₂ SiO ₃ 外觀	22
圖 3-4	H ₃ PO ₄ 外觀	22
圖 3-5	加速氯離子試驗裝置	27
圖 3-6	萬能材料試驗機	32
圖 3-7	混凝土凝結時間貫入儀	32
圖 3-8	X 光繞射分析儀(XRD)	33
圖 3-9	掃描式電子顯微鏡(SEM)	34
圖 3-10	混凝土透水試驗裝置	34

圖 3-11 氯離子快速穿透試驗裝置.....	35
圖 3-12 壓汞孔隙儀	36
圖 4-1 H_3PO_4 用量與 Na_2O 用量關係圖	38
圖 4-2 不同 Na_2O 用量試體長度變化比較圖	41
圖 4-3 不同養護條件試體長度變化比較圖	41
圖 4-4 添加與未添加 H_3PO_4 試體長度變化比較圖	42
圖 4-5 不同 Na_2O 用量試體抗壓強度比較圖	44
圖 4-6 不同養護條件下試體抗壓強度比較圖	44
圖 4-7 添加與未添加 H_3PO_4 試體抗壓強度比較圖	45
圖 4-8 不同 Na_2O 用量試體劈裂強度比較圖	46
圖 4-9 不同養護條件下試體劈裂強度比較圖	47
圖 4-10 添加與未添加 H_3PO_4 試體劈裂強度比較圖	47
圖 4-11 養護環境與通過試體電荷量關係圖	49
圖 4-12 不同試體在 7 天齡期試驗結果	53
圖 4-13 不同試體在 28 天齡期試驗結果	53
圖 4-14 齡期 7 天與 28 天試驗比較圖	54

圖 4-15 試體微觀圖(A6T0,1000X)	54
圖 4-16 試體微觀圖(A6TR,1000X)	55
圖 4-17 暴露溫度與試體抗壓強度關係圖	56
圖 4-18 不同溫度下試體顏色之差異	58
圖 4-19 混凝土 XRD 分析結果.....	58
圖 4-20 鹼活化爐石粉混凝土 XRD 分析結果.....	59

摘要

關鍵字：鹼活化、爐石粉、緩凝劑

一、研究緣起

混凝土是使用量最大的營建材料之一，而傳統混凝土是以卜特蘭水泥做為主要的膠結材料，卜特蘭水泥製造需要經過二磨一燒的過程，每生產一噸的卜特蘭水泥大約要產出一噸的二氧化碳，對倡導永續發展、節能減碳的 21 世紀，大量卜特蘭水泥的使用，是不符合現代世界潮流，然而經濟的發展須進行土木工程，所以混凝土仍然不可或缺，所以尋找大量替代卜特蘭水泥的膠結材料，拌製新型混凝土，為近年來營建材料研發者努力的方向，本計畫採以爐石粉大量取代卜特蘭水泥做為膠結材料，利用鹼激發的機理，探討其力學、物理與耐久性，以符合台灣推動永續發展的策略目標。

二、研究方法及過程

主要概分成三部分，(1)首先找出最佳之鹼活化液配比，以使鹼活化爐石粉混凝土達到理想之強度 (2)為改善早期速凝與長度變化之現象，參考相關文獻選用適當緩凝劑，並調製適當的添加量，同時制訂改善長度變化之方案 (3)製作試體進行力學、物理、耐火性試驗，以評估鹼活化爐石粉混凝土的特性。(4)擬定鹼活化爐石粉混凝土的配比與製作流程。

三、重大發現

鹼活化劑中 Na_2O 含量愈高混凝土強度愈高，若加入適量 H_3PO_4 可以大幅的延長初凝時間與改善工作性。熱重分析試驗結果發現鹼活化爐石粉混凝土強度會隨著溫度增加而遞減，而普通卜特蘭水泥混凝土則在溫度大於 400°C 時會產生爆裂。健度與加速氯離子試驗結果顯示，鹼活化爐石粉混凝土的耐久性及緻密性優於普通混凝土。鹼活化爐石粉混凝土置蒸氣(相對溼度 80 %、溫度 60°C)環境中養護，其抗壓強度、劈裂強度，防水性，氯離子穿透總電荷量皆優於 OPC，其中以 Na_2O 添加 6 %當量之鹼活化爐石混凝土最明顯，抗壓強度增加約 4.6 倍、劈裂強度約增加 28 %、滲水量約減少 1 %~23 %、氯離子穿透總電荷量約降低 50 %。

四、主要建議事項

根據本研究針對「鹼活化爐石混凝土應用於營建材料之研究」，提出下列具體建議。以下分別從立即可行的建議及長期性建議加以列舉。

立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：國立台灣海洋大學

蒸氣環境中養護 28 天齡期發現，當養護齡期增加鹼活化劑中 Na_2O 含量 6% 之鹼活化爐石粉混凝土及 OPC，基本上總孔隙率亦無明顯差異，而鹼活化劑中 Na_2O 含量 4% ~ 5% 之鹼活化爐石粉混凝土，則總孔隙率出現遞增之現象，如圖 4-13、圖 4-14 所示。該現象就未來鹼活化爐石粉混凝土推廣應用，一項值得深入探討研究及改善的，因此建議未來有關機關或學者，能夠針對鹼活化爐石粉混凝土結構之緻密性，進行更深入之研究，以利鹼活化爐石粉混凝土推廣應用之可行性。

長期性建議

主辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署、經濟部標準檢驗局

協辦機關：行政院各部會相關主管機關

目前國內鹼活化爐石粉混凝土的工程應用尚未普及，建議未來可規劃鹼活化爐石粉混凝土工程應用推廣講習，並利用試辦公共工程，確認鹼活化爐石粉混凝土於營建工程上應用的可行性與效益性，以達到減少卜特蘭水泥用量，達到改善環境污染與促進永續發展之目標。

Abstract

Keywords : alkali-activated, ggbs, set-retarding admixture

Concrete is one of the common-used construction materials in the modern world. Traditional concrete is a composite, which is made of aggregate, Portland cement and water. Production of Portland cement consumes large amount of energy and releases lots of carbon dioxide. Based on the sustainable society requirements, energy preservation and environmental protection, it is urgent and important to search for new cementitious materials to replace Portland cement in the construction sector. In this study, ground granulated blast-furnace slag (ggbs) was selected as 100% replacement for Portland cement in concrete. Alkali solutions such as silicate and sodium hydroxide were mixed with water to activating the hydration of ggbs in concrete. The contents of Na_2O in the silicate solution and sodium hydroxide solution were kept at 4wt%, 5wt% and 6wt% of ggbs. The water/cement ratio was kept at a constant of 0.5 for all mixes.

Higher Na_2O content in the alkali solutions would obtain higher strength for alkali-activated slag concrete and addition of phosphate would delay initial setting and improve workability. Thermal gravity analysis indicates concrete strength decreases with an increasing temperature, which is more prominent in Portland cement concrete than in alkali-activated slag concrete. When temperature is raised up to 400°C , normal concrete spalls. Results from soundness test and rapid chloride penetration test illustrate alkali-activated slag concrete has better durability than Portland cement concrete. According to the findings of this study, initiation of promotion program for application of alkali-activated slag concrete and starting of a pilot construction project

鹼活化爐石混凝土應用於營建材料之研究

to verify the applicability and effectiveness of alkali-activated slag concrete are suggested.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

壹、研究緣起

在今日的營建土木業上卜特蘭水泥依舊是主要的混凝土膠結材料，也是這世界上最常使用的建築材料，而每年約使用約 50 億立方的混凝土，相較等於是每人年生產二噸的混凝土，混凝土被大量的廣泛使用，主要原因是它堅固、耐用、防水又有一定的可塑性，使其成為目前是地球上使用最大量的材料之一，製成卜特蘭水泥需要經過高溫的鍛燒，將碳酸鈣分解成氧化鈣在與黏土的氧化矽與氧化鋁產生反應生成矽酸三鈣、矽酸二鈣之類的化合物，而在這個製造過程中，會生成出大量的二氧化碳，製造出一噸的卜特蘭水泥需約排放出一噸的二氧化碳，現今世界為了地球溫室效應大家都在提倡節能減碳，營建土木業了解製造水泥需要很大的環境成本，所以正在努力的尋找能代替卜特蘭水泥的類似材料，如果這個目標如果達到就能為地球盡一分心力。

Talling^[1]和 Roy^[2]等人發現爐石粉經由鹼活化液激發後，所得到的膠結性材料比普通的卜特蘭水泥更有良好的性能，這可是一個重大的發現，因為爐石粉本身是廢棄物，它是由煉鋼中所產生出來的附屬品，如果能將此廢棄物加以利用可以達到回收之目的，又可以減少許的多資源浪費以及環境保護上面的問題，由鹼活化液與爐石粉調配出來的此稱為鹼活化爐石粉漿體 (Alkali-Activated Slag Paste, AASP) 國內已有許多爐石粉使用的例子，如高爐水泥就有添加爐石粉，可是用量相當的少，近幾年爐石粉又受到重視開始相關的試驗，目前目標就是利用鹼活化液去激發爐石粉使其在使用上希望能達成完全替代水泥，可是爐石粉利用鹼活化液做激發雖能達到比混凝土更高的強度，但鹼活化爐石粉混凝土有速凝的情形會產生，以及還有許多大大小小的問題等待克服，而這些問題就是本試驗希望能達成以及克服的目標。

貳、研究背景

混凝土擁有許多優點，因此被大量使用於各種建築及土木工程上，以往混凝土主要的膠結材料為卜特蘭水泥，而卜特蘭水泥的生產會排放出大量的二氧化碳，近幾年來地球溫室效應逐漸受到全世界的重視，各國家都在積極研擬減少排放二氧化碳的策略，混凝土工程近年來發現幾類可以替代部分卜特蘭水泥的材料，假如未來確定可以完全取代混凝土中的卜特蘭水泥，可降低地球溫室效應與節約化石能源。

台灣四面環海土地面積狹小，而水淬爐石粉是來自煉鐵過程中，高爐裡所遺留下來的工業副產物，如由高爐中取出立即以水急遽冷卻，即為水淬爐石粉。水淬爐石粉具有高含量的玻璃質成分，有較大的水化並能與卜特蘭水泥的水化產物氫氧化鈣產生卜作嵐反應，可以增加混凝土的緻密性與耐久性。近幾年來相關研究發現相同水灰比的鹼活化爐石粉混凝土比卜特蘭水泥混凝土具有更高之強度，同時具有較佳的抗化學侵蝕、抗凍融循環、抗中性化等特性。然而目前未建立出一套明確的鹼活化爐石粉混凝土配比準則或方法。一般而言，鹼活化爐石粉混凝土可能具有速凝及高收縮等缺點，改善前述缺點為目前鹼活化爐石粉混凝土主要研究方向，其中包括：探討調配適當的鹼活化液與緩凝劑，擬定配比流程及方法，及評估鹼活化爐石粉混凝土有效應用混凝土工程上的可行性及效益性。

第二節 研究目的與範圍

卜特蘭水泥混凝土以不同比例的原料拌和，其新拌性質均不同。獲致鹼活化爐石粉混凝土適當的新拌性質比一般卜特蘭水泥混凝土更加複雜。需要先進行鹼活化液之調配，速凝及高收縮負面效應，必須列入考慮。

本研究採用工業副產物的水淬高爐石粉，利用鹼活化液激發爐石粉中的潛在反映特性，以代替卜特蘭水泥作為混凝土的膠結材料。研究目的如下：

1. 探討鹼活化劑調製及緩凝劑之適當添加比例
2. 獲致抑制鹼活化爐石粉混凝土收縮問題的策略

- 3.擬定出鹼活化爐石粉混凝土配比設計的流程
- 4.評估鹼活化混凝土力學性
- 5.評估鹼活化混凝土防火性
- 6.評估鹼活化混凝土耐久性
- 7.減少使用卜特蘭水泥的使用量，並達到節能減碳目的

第三節 研究方法

本研究目的主要針對鹼活化爐石粉混凝土應用營建工程上可行性進行探討，在鹼活化爐石粉混凝土配比觀念中，影響爐石粉替代量與鹼活化液配比影響相當大，因此以完全取代進行試驗，同時在試驗過程中調製出鹼活化液之配方，並且找出適當的緩凝劑之使用量，其進行的方法如下，主要為收集國內外相關文獻、分析與彙整，針對速凝與乾縮等問題進行了解，在來對此問題進行基本性質試驗、電化學試驗、微觀觀察，彙整出試驗結果討論並提出相關的結論與建議、提送成果報告書，其研究流程如下圖 1-1 所示。

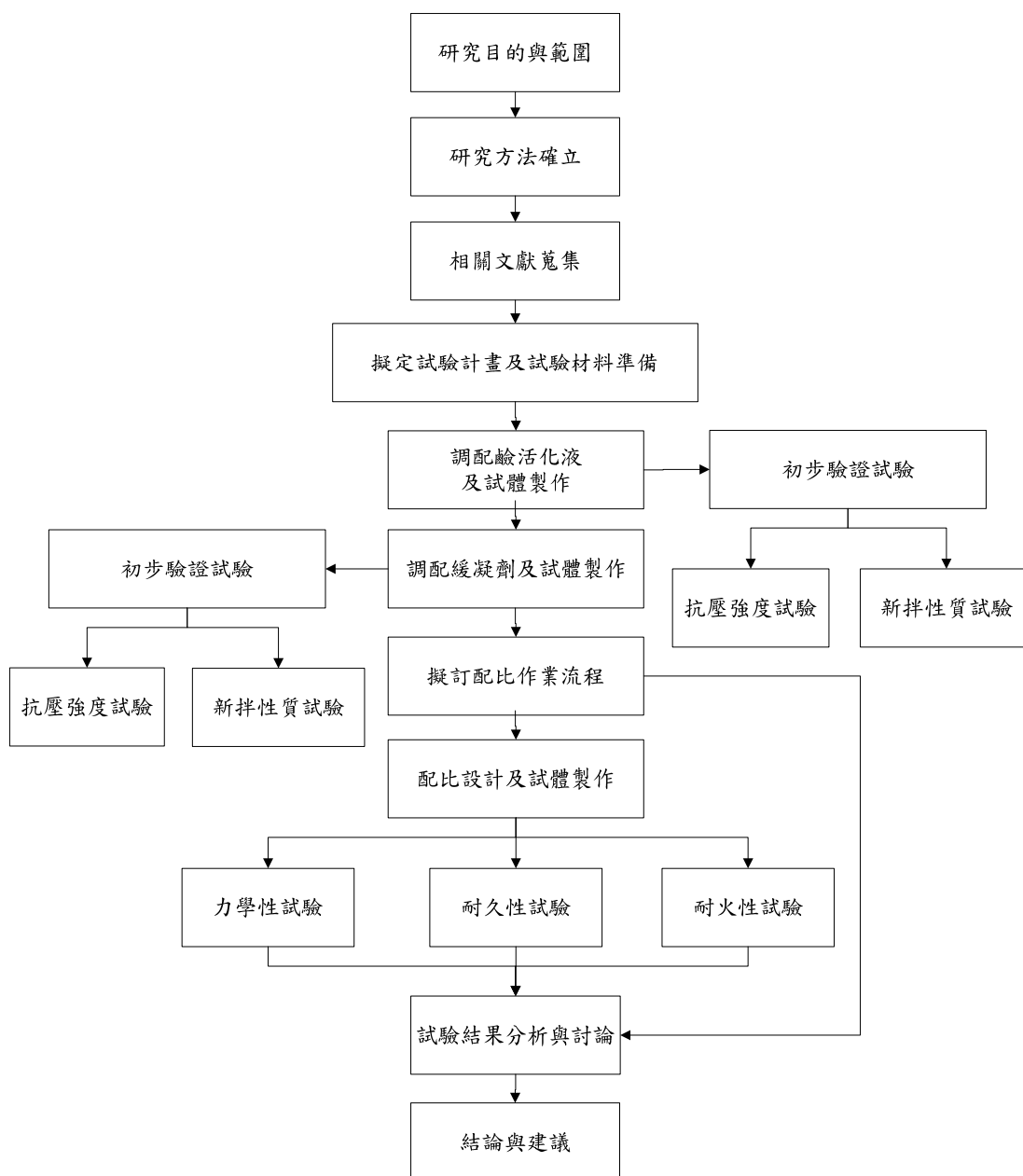


圖 1-1 研究流程

(資料來源：本研究整理)

第二章 文獻回顧

第一節 鹼活化爐石粉混凝土之發展

目前土木營建業主要的材料為卜特蘭水泥，在生產卜特蘭水泥過程中會產生大量的二氧化碳，對全球環境造成嚴重污染，在 1940 年開始到至今，在鹼活化膠結材料的研究有相當大的突破性發展，如 1940 年代 Purdon 將強鹼溶液加入爐石粉中結合使用，發現此材料擁有與卜特蘭水泥一樣的水硬性質，直到 1980 年代歐洲才注意到這種新型的膠結材料，表 2-1 主要簡介在各階段發展的重要文獻資料^[2]

表 2-1 鹼活化膠結材發展歷程^[2]

Author(s)	Year	Significance
Feret	1939	slags used for cement
Purdon	1940	alkali-slag combinations
Glukhovsky	1959	Theoretical basis and development of alkaline cements
Glukhovsky	1965	first called "alkaline cements" because natural substances used as components
Davidovits	1979	"Geopolymer" term-emphasizes greater polymerization
Malinowski	1979	Ancient aqueducts characterized
Forss	1983	F-cement(slag-alkali-superplasticizer)
Langton and Roy	1984	Ancient building materials characterized (Roman,Greek,Cyprus)
Davidovits and Sawyer	1985	Patent leading to "pyrament"
Krivenko	1986	D.Sc. Thesis , $R_2O-RO-R_2O_3-H_2O$
Malolepsy and Petri	1986	Activation of syntheric melilite slags
Malek et al.	1986	Slag cement-low level radioactive waster forms
Davidovits	1987	Ancient and modern concretes compared
Author(s)	Year	Significance
Deja and Malolepsy	1989	Resistance to chlorides shown

Kaushal et al.	1989	Adiabatic cured nuclear waste forms form alkaline mixtures including zeolite formation
Roy and Langton	1989	Ancient concrete analogs
Majumdar et al.	1989	C ₁₂ A ₇ -slag activation
Talling and Brandstetr	1989	Alkali-activated slag
Wu et al.	1990	Activation of slag cement
Roy et al.	1991	Rapid setting alkali-activated cements
Roy and Silsbee	1992	Alkali-activated cement:overview
Palomo and Glasser	1992	CBC with metakaolin
Roy and Malek	1993	Slag cement
Glukhovsky	1994	Ancient,modern and future concretes
Krivenko	1994	Alkaline cements
Wand and Serivener	1995	Slag and alkali-activated slag microstructure

(資料來源：Roy，1999)

第二節 爐石粉性質與鹼活化之機理

2-2-1 爐石粉性質

高爐石粉主要是在煉鐵的過程中，在高爐裡所並同產出的工業副產品，稱為高爐爐渣，且在以二種不同的方式去處理，一為將高爐爐渣置於空氣中，使其自然冷卻稱為氣冷爐石粉，而另一方式則為將高爐爐渣從高爐取出後立即灑水，使其急速冷卻稱為水淬高爐石粉，水淬高爐石粉經過研磨篩分析後，即成為試驗所使用之代替卜特蘭水泥之水淬高爐石粉，水淬高爐石粉當中含有較高的玻璃質成分，可進行水化反應，而至於氣冷高爐石粉，其本身玻璃質含量偏低不具有反應性，通常都拿來作為粒料使用。

在圖 2-1 中 C-S-A 系統相位圖得知爐石粉與水泥成分非常接近，且同時皆具有膠結性及卜特蘭反應二種特性^[3]。由表 2-2 得知高爐石粉在不同產地，其主要成分僅有 SiO₂ 及 CaO 等成份含量相似，而 Al₂O₃、MgO 與 TiO₂ 等成份含量差異甚大^[4]。

表 2-2 高爐石粉化學組成^[4]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	S	TiO ₂	MnO	產地
35.04	13.91	0.29	39.43	6.13	0.34	0.39	0.44	0.42	0.43	澳大利亞
35.3	9.9	0.6	34.7	14.6	0.3	0.4	1	0.5	-	加拿大
36.23	9.76	1.99	39.4	10.5	-	-	-	0.7	-	中國
36	9	1.3	41	8	-	-	1.1	0.9	0.85	芬蘭
35.4	12.9	0.3	41.8	6.8	0.26	0.38	1	1.65	0.42	日本
35	13.5	2.3	36.5	7.5	-	-	0.6	2.0	1.25	挪威
35.3	9.4	1.1	39.7	10.03	0.98	-	1.16	0.72	0.98	瑞典
34.9	7.12	1.02	42.87	10.3	0.24	0.5	1.16	0.39	-	美國
34.2	11.3	1.17	41.6	8.21	0.26	0.4	0.48	0.77	0.25	英國

(資料來源：鹼激發水泥和混凝土)

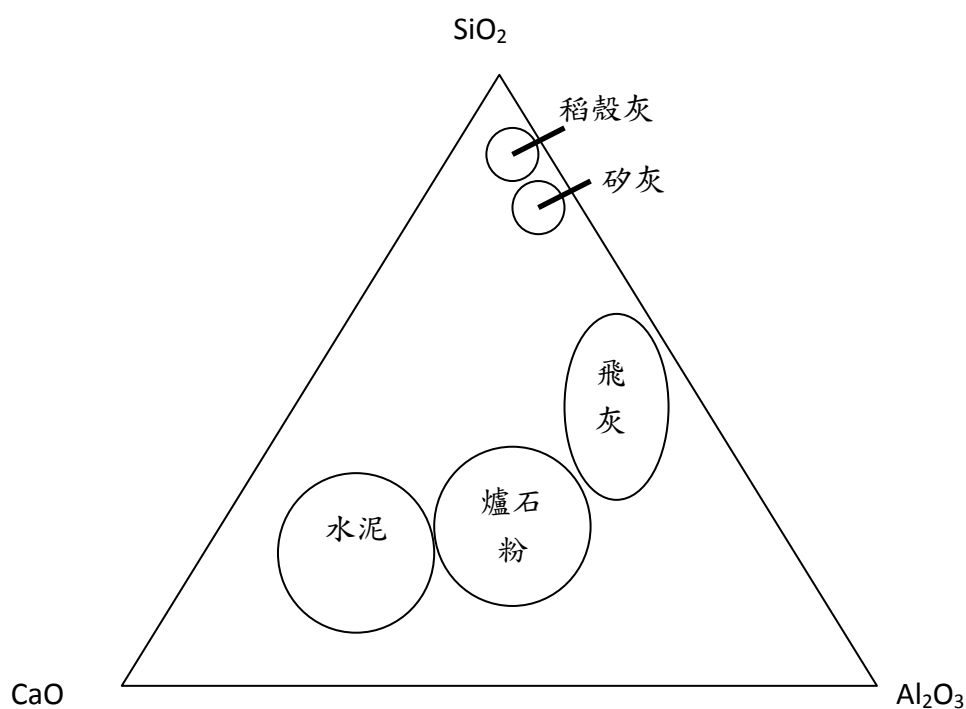


圖 2-1 水泥及卜特蘭材料在 C-S-A 系統三元相圖^[3]

(資料來源：J.Francis Young)

在激發爐石粉本身的膠結性，Palomo^[5]等學者指出，激發與取代的方式有二種，一種為部分取代卜特蘭水泥，與卜特蘭水泥混合著使用，利用卜特蘭水泥本身水化反應所產生水化產物

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 與水淬高爐石粉中的 SiO_2 生成 C-S-H 膠體，即為卜作蘭反應^[6]。

而另一種方式是直接使用水淬高爐石粉當作膠結材料，不添加任何的卜特蘭水泥情況下，以它當作主要為膠結材料，但由於水淬高爐石粉的晶體結構穩定，單以水之極性，不能夠完全打散水淬高爐石粉的化學鍵，必須施予更強的極性離子，才能有效催促爐石粉產生水化反應，目前最常使用的方法就是利用強鹼溶液，激發水淬高爐石粉的潛在活性，使其產生水化反應，至今許多研究報告指出此方式所製作的試體，在力學性質與物理性質上^[7]，均比前者來的良好許多。

2-2-2 鹼活化爐石粉水化歷程

根據 Zhou^[8, 10]、Gong^[9, 10]等學者對爐石粉的水化歷程與卜特蘭水泥水化歷程做了研究，詳如圖 2-2 所示。

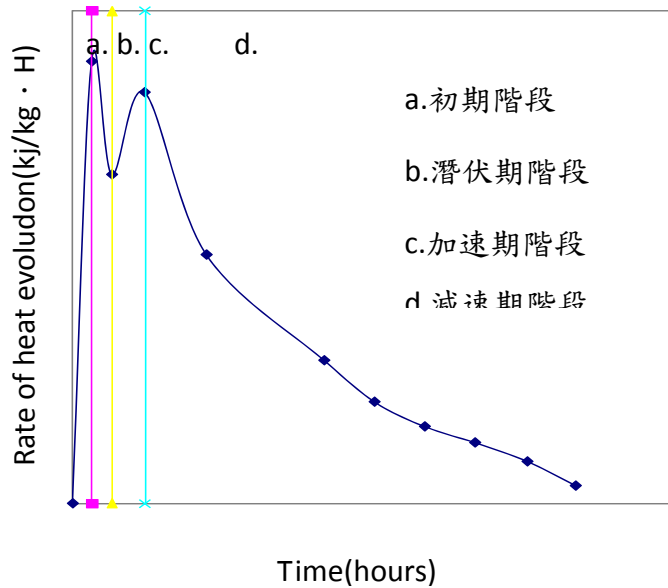


圖 2-2 鹼活化爐石粉漿體水化歷程^[8, 10]

(資料來源：Zhou 1993)

由圖 2-2 中可以看到出二個高點，這二個高點分別表示水化產物生成的時間，而第一個高點出現的時間是在鹼溶液加入爐石粉中的幾分鐘左右，此時稱為初期階段，該現象主要為鹼溶液中的 OH^- 根離子，破壞了爐石粉的化學結構，讓爐石粉中的 Ca^{2+} 與 SiO_4^{4-} 互相反應，重新組合生成大量的 C-S-H 膠體，當爐石粉被 C-S-H 膠體所包覆時，水化反應會被抑制，此時進入第

二階段-潛伏期。而第二個高點的產生時間，會依照鹼活化劑的用量多寡而有明顯之差異，就是說鹼活化劑用量少(pH 值降低)時，第二個高點會發生在數小時之後出現，換句話說當鹼活化劑用量增加時(pH 值增加)，第二個高點產生的時間會縮短，當與第一個高點接近時，此時則稱為加速期階段，這階段主要為金屬正離子(Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+})與爐石粉中的 SiO_4^- 進行反應，產生出第二種水化膠體，接著鈣離子與矽離子會從爐石粉中溶解，它們在溶液中的濃度極有可能會超過矽酸鈣水化物的濃度，使其進入減速階段，因為水化產物厚度越來越厚，自由水量也逐漸減少，進而造成反應速率持續減緩，邁進衰退階段。

第三節 影響鹼活化爐石粉漿體性質之因素

Fernandez^[11]與 Sum,等人^[12]指出鹼活化爐石粉其水化歷程、強度發展與水化產物受到的鹼活化劑種類、養護條件、鹼活化劑濃度、爐石粉比表面積等的影響。茲針對影響因素說明如下：

2-3-1 鹼活化劑種類

以往的研究指出，鹼活化劑是將將爐石粉激發，使其產生水化反應的重要因素，起初是在爐石粉中加入石灰粉或加入石膏等方式去激發出爐石粉的水化反應^[13]，但是水化反應效果都不佳。以現今來說，過去的研究目前常用的鹼活化劑分為以下三種： Na_2SiO_3 、 NaCO_3 以及 NaOH 。在如單獨只使用 NaOH 當作鹼活化劑時，鹼活化爐石粉漿體就類似於卜特蘭早強水泥漿體相似，具有早期強度較高，晚期強度偏低的性質，如果只使用 NaCO_3 為鹼活化劑時，鹼活化爐時漿體出來的則為早期強度較差，主要因為本身的 pH 值不高，而使水化反應速率降低強度成長較慢。與使用 NaOH 做為活化劑漿體比較的話，其晚期強度較高，主因為受到 CO_3^{2-} 離子影響，因為 CO_3^{2-} 離子會與爐石粉反應生成 $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 化合物，使試體強度提高。若將 NaOH 搭配 Na_2SiO_3 混合使用則可以產生出較佳的強度。

Shi^[14]等(1996)使用 NaOH 、 NaCO_3 、 Na_2SiO_3 做為鹼活化劑製作砂漿試體，利用壓汞試驗量測鹼活化爐石粉砂漿的孔隙結構，並與卜特蘭水泥沙漿比較，發現有添加 NaOH 的試體擁有較大的孔隙率且在孔徑的分佈上較為連續，則使用 Na_2SiO_3 溶液的試體不論孔隙體積或孔徑均

較小的，換句話說 Na_2SiO_3 的試體較為緻密。在國際理論與應用化學聯合會 (International Union of Pure and Applied Chemistry) 中依孔徑大小分類，分為微孔隙、中孔隙、大孔隙及微裂縫等四大類，如表 2-3 所示。

Collins, Sanjayan^[15] 將鹼活化爐石粉漿體孔隙結構的結果，依照著 IUPAC 將其分類，且與卜特蘭水泥砂漿試體孔隙結構作為比較如表 2-4 所示，發現鹼活化爐石粉漿體大孔隙體積的百分比低於卜特蘭水泥漿體，而中孔隙及微孔隙體積百分比卻高於普通卜特蘭水泥漿體

表 2-3 IUPAC 孔徑尺寸分類表

孔隙種類	孔徑 (nm)
微孔隙	<1.25
中孔隙	1.25~25
大孔隙	25~5000
微裂縫	5000~50000

(資料來源：IUPAC)

表 2-4 鹼活化爐石粉漿體與卜特蘭水泥漿體孔徑比較表

齡期(天)	大孔隙%		中孔隙%		小孔隙%	
	AASP	OPCP	AASP	OPCP	AASP	OPCP
3	16.6	56.7	74.0	36.4	9.4	6.9
7	14.9	59.6	76.0	35.2	9.1	5.2
28	10.4	62.2	82.0	32.7	7.6	5.1
56	12.5	69	81.3	24.7	6.1	6.3

註：AASP：鹼活化爐石粉漿體 OPCP：卜特蘭水泥漿體

(資料來源：Collins, Sanjayan 2000)

2-3-2 鹼活化劑濃度

文獻^[16]指出鹼活化劑濃度是影響高爐石粉水化反應與強度發展的重要因素之一，使用高濃

度的鹼活化劑，混凝土強度會明顯增加，使用低濃度的鹼活化劑，會降低水化速率及強度。

2-3-3 養護溫度

養護溫度是影響鹼活化爐石粉混凝土性質的因素之一，當鹼活化爐石粉混凝土進行水化反應時，高溫養護，可以增加自由能，加速水化反應，使試體的早期強度增加，但晚期強度反可能比養護在常溫下的試體低^[17]。一般卜特蘭混凝土提高養護溫度亦有同樣的結果^[18,19]。選用適當的鹼活化劑及養護溫度，對鹼活化爐石粉混凝土在體積穩定與減少收縮量有助益。

Jimenez^[11]指出提高養護溫度，未必對試體有正面的影響，如使用 NaOH 作為鹼活化劑，高溫養護對鹼活化爐石粉混凝土有負面的影響，可能會產生熱裂縫。然而，使用 NaCO₃ 作鹼活化劑時，提高養護溫度可提高早期強度，而以 SiO₃·Na₂O+NaOH 作為鹼活化劑，養護溫度提高，強度可隨之提高。

2-3-4 爐石粉比表面積

爐石粉比表面積是所有影響因子中，影響層面較低的，僅對初期強度有影響^[11,20]，一般而言，爐石粉比表面積增加會使初期反應速率加快，但在相同的流動性下，比表面積愈高，所需的鹼活化溶液用量也就愈高。據 Gjørsv^[19]指出使用 NaOH 和 Na₂CO₃ 作為鹼活化劑時，比表面積越高，在早期強度與較低的養護溫度情況下對力學性質有正面的影響，不過，使用 Na₂SiO₃·nNa₂O+NaOH 作為鹼活化劑時，則有反面的效果。

第四節 鹼活化爐石粉漿體緩凝之研究

鹼活化爐石粉具有優良的水硬性，但是太快的水化反應會帶來混凝土凝結過快的缺點，此一缺點目前尚未獲得有效的解決方法，使鹼活化混凝土應用於營建工程上的主要影響因素。速凝^[13]主要是因為鹼活化劑裡的鹼成分快速的在爐石粉漿體中解離，生成強大離子力的 OH⁻離子，會破壞爐石粉中的玻璃質，使爐石粉迅速解體水化內形成大量的 C-S-H 膠體，導致漿體迅速凝結與快速硬化。

2.3 節中已知，鹼活化爐石粉的凝結速度主要取決於爐石粉的活性、鹼活化劑的種類與濃度。若使用酸性爐石粉(如含磷成分的爐石粉)其凝結時間上較慢且可激發的強度也較低，因此強度成長也較差；而以碳酸鈉作為鹼活化劑時，凝結時間較長；當用 Na_2SiO_3 與 NaOH 時，凝結時間卻很短，初凝時間一般只有 5~15 分鐘，而且初凝時間與終凝時間之間隔也極短，一般只有 2~7 分鐘，極難控制與調整。

對於此一問題，蘇聯學者在 70 年代開始就進行一連串的研究，並得出結論：常用的卜特蘭水泥緩凝劑對於鹼活化爐石粉的緩凝作用可說是甚微或完全無作用。蘇聯學者又採用有機矽表面活化劑作為緩凝劑，試圖在爐石粉粒子與鹼活化劑之間建立起有機矽物質薄膜，以阻止爐石粉粒子與鹼活化劑之間的反應，它們的摻入雖對凝結時間有所延緩，但始終未能大幅增加凝結時間。

在尚未找到有效的緩凝劑之前，人們又尋找其它方法以延緩鹼活化爐石粉的凝結時間，這些措施包括有：爐石粉的熱處理(將爐石粉在 $80\sim 100^\circ\text{C}$ 下加熱兩小時，初凝時間可以達到 45 分鐘以上)、延長攪拌時間和再次攪拌等，但這些措施不是無法達到預定效果，就是不經濟或太浪費時間，Shi^[12]認為，應用有效的效緩劑才是解決速凝問題的理想途徑。

Gong和Yang^[21]根據Talling、Brandstetr^[1]與Davidovits^[22]的想法，於鹼活化劑中加入 H_3PO_4 ，由圖2-3中可以發現只須添加少量的 H_3PO_4 即可大幅延長凝結時間。

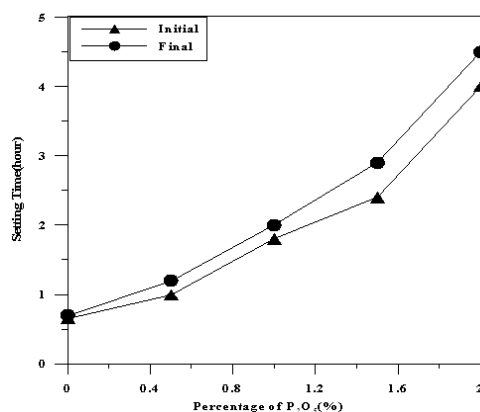


圖 2-3 添加 H_3PO_4 的鹼活化爐石粉漿體之凝結時間^[20]

(資料來源：Gong、Yang 2000)

第三章 試驗計畫

第一節 前言

本試驗為了探討鹼活化劑對鹼活化爐石粉混凝土之影響，同時為改善鹼活化爐石粉混凝土速凝及收縮等問題，因此改變鹼活化劑之 Na_2O 含量，並按凝結時間添加適當的 H_3PO_4 用量，試找出緩凝劑最佳之用量，另外選擇3種不同環境養護，針對鹼活化爐石粉混凝土收縮進行改良。最後透過試驗方法與試驗架構提出結果討論，研擬出一套鹼活化爐石粉混凝土製作之流程。

第二節 試驗變數、配比與材料

3-2-1 試驗變數

研究初步主要探討鹼活化劑調製之配方與添加比例。過去許多研究指出採 Na_2SiO_3 、 NaOH 做為鹼活化劑，對爐石粉具不錯之鹼活化效果，因此選用 Na_2SiO_3 、 NaOH 等兩種鹼液，以鹼模數比決定其添加比例調製鹼活化液。

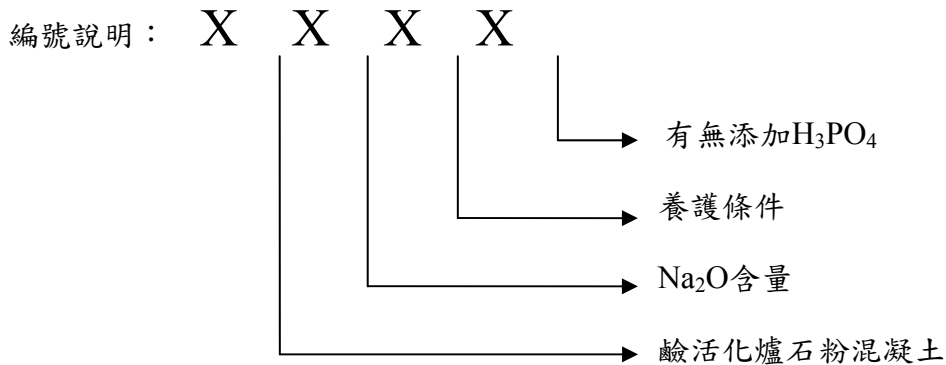
本試驗主要分二個階段進行：

第一階段以水灰比0.5拌製OPC試體做為控制組，對照組則採100 %爐石粉末取代卜特蘭水泥，配製鹼活化爐石粉混凝土，鹼液中的 Na_2O 為爐石粉重量的4 %、5 %、6 %，而 NaOH 與 Na_2SiO_3 鹼模數比定為0.75，分別放置大氣、飽和石灰水溶液(相對溼度100%)、蒸氣(相對溼度80%、溫度60 °C)等三種不同環境養護。

第二階段則以同樣配比添加適量 H_3PO_4 ，配合混凝土初終凝試驗，以初凝120 mins為基準調整 H_3PO_4 最佳用量，並進行前述系列養護方式，最後透過相關試驗，來探討其力學、防火及耐久特性。

3-2-2 配比

配比編號



第一碼：A表示鹼活化爐石粉混凝土

第二碼：表示鹼活化劑中 Na_2O 含量（數字4~6個別表示4%~6%）

第三碼：表示養護條件，其中A代表大氣養護、W代表飽和石灰水養護（相對溼度100%）、T代表蒸氣養護（相對溼度80%、溫度60度）

第四碼：有無添加緩凝劑(H_3PO_4)，其中(0代表無添加緩凝劑、R代表添加緩凝劑)

試驗配比

鹼活化爐石粉混凝土與一般混凝土試驗配比如表3-1所示。

表 3-1 普通混凝土與鹼活化爐石粉混凝土配比(kg/m³)

編號	水	水泥	爐石粉	粗粒料	細粒料	Na ₂ SiO ₃	NaOH	H ₃ PO ₄
OPC	212	424	0	1078.4	575.2	-	-	-
A6A0								
A6W0	212	-	424	1078.4	575.2	64.90	20.43	-
A6T0								
A5A0								
A5W0	212	0	424	1078.4	575.2	54.08	17.03	-
A5T0								
A4A0								
A4W0	212	0	424	1078.4	575.2	43.26	13.62	-
A4T0								
A6AR								
A6WR	212	0	424	1078.4	575.2	64.90	20.43	2.18
A6TR								
A5AR								
A5WR	212	0	424	1078.4	575.2	54.08	17.03	1.87
A5TR								
A4AR								
A4WR	212	0	424	1078.4	575.2	43.26	13.62	1.56
A4TR								

(資料來源：本研究整理)

3-2-3 材料

拌合水：採自來水，符合 CNS 拌合水之要求。

水泥：卜特蘭 Type I 水泥，其性質符合 CNS61 第一型卜特蘭水泥之要求，其物理性質及化學性質，如表 3-2 所示。

鹼活化爐石混凝土應用於營建材料之研究

爐石粉：採 S4000 型水淬高爐石粉，S4000 代表水淬高爐石粉比表面積為 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上，爐石粉鹽基度為 1.78 符合 CNS 12223 規範鹽基度大於 1.4 之規定，爐石粉化學成份與物理性質，如表 3-3、表 3-4 所示。爐石粉外觀，如圖 3-1 所示。

粗粒料：採用粗粒料最大粒徑為 19mm，乾搗單位重 1617 kg/m^3 ，比重 2.62，吸水率 1.36%，符合 ASTM C136，篩分析試驗結果，如表 3-5 所示。

細粒料：細度模數(F.M)2.54，比重 2.78，吸水率 2%，符合 ASTM C136，篩分析結果，如表 3-6 所示。

NaOH：採用 NaOH 約 5 mm 大小之顆粒，會直接與空氣中水分反應液化如圖 3-2 所示。化學成分，詳如表 3-7 所示。

Na_2SiO_3 ：採 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_3$ 矽酸鈉，常數 n 等於 1.97，比重為 1.54，液固比為 1.27，化學成分，如表 3-8 所試， Na_2SiO_3 外觀如圖 3-3 所示。

緩凝劑：採 H_3PO_4 ，比重 1.69，其化學成分，如表 3-9 所示。外觀，如圖 3-4 所示。

表 3-2 卜特蘭水泥化學成分

項目	Type I 水泥
二氧化矽 (SiO ₂) %	21.04
氧化鋁 (Al ₂ O ₃) %	5.46
氧化鐵 (Fe ₂ O ₃) %	2.98
氧化鈣 (CaO) %	63.56
氧化鎂 (MgO) %	2.52
三氧化硫 (SO ₃) %	-
三氧化硫 C ₃ A ≤ 8%	-
(SO ₃) % C ₃ A ≥ 8%	2.01
燒失量(L.O.I) %	1.38
不容殘渣%	0.1
有效鹼類	0.78
(Na ₂ +0.65K ₂ O) %	
氧化鈉 (Na ₂ O) %	0.32
氧化鉀 (K ₂ O) %	0.7
游離氧化鈣 (Free CaO) %	0.76
矽酸三鈣 (C ₃ S) %	49.08
矽酸二鈣 (C ₂ S) %	23.3
鋁酸三鈣 (C ₃ S) %	9.43
鋁鐵酸四鈣 (C ₄ AF) %	9.07

(資料來源：台灣水泥股份有限公司)

表 3-3 水淬高爐石粉化學成分

成分	水淬高爐石粉	CNS 12223 國家標準
二氧化矽 SiO ₂ %	34.58	38.0 以下
三氧化二鋁 Al ₂ O ₃ %	13.69	16.0 以下
三氧化二鐵 Fe ₂ O ₃ %	0.44	1.0 以下
氧化鈣 CaO %	40.67	37.0 以上
氧化鎂 MgO%	7.05	10.0 以下
三氧化硫 SO ₃ %	0.56	3.0 以下
不溶物	0.13	1.5 以下
燒失量	1.13	3.0 以下

(資料來源：中聯爐石粉)

表 3-4 水淬高爐石粉物理性質

檢驗項目	水淬高爐石粉	國家標準
細度	比表面積(cm ² /kg)	4350
	通過#325 篩(%)	2.0
活性指數	七天(%)	≥75.0
	二十八天(%)	≥95.0
比重	2.88	≥2.80

(資料來源：中聯爐石粉)

表 3-5 粗粒料篩分析結果

篩號	粗粒料各篩號 殘留量(g)	細粒料各篩號 殘留量(g)	各篩號 之殘留 g	各篩號 遺留累積%	累積通過 百分比
1"	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3/4"	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1/2"	2670.0	0.0	2670.0	24.3	24.3
3/8"	2850.0	0.0	2850.0	25.9	50.2
#4	3935.0	22.8	3957.8	36.0	86.2
#8	520.0	28.4	548.4	5.0	91.1
#16	0.0	58.2	58.2	0.5	91.7
#30	0.0	403.0	403.0	3.7	95.3
#50	0.0	395.7	395.7	3.6	98.9
#100	0.0	78.5	78.5	0.7	99.7
底盤	0.0	13.3	13.3	0.1	99.8
					737.1
F.M=細度係數/100					7.37

(資料來源：本研究整理)

表 3-6 細粒料篩分析結果

細粒料 1000 克重			
篩號與尺寸	各篩號殘留量(克)	各篩號殘留之%	累積通過百分比
#4	17	1.7	1.7
#8	24.7	2.5	4.2
#16	55.6	5.6	9.7
#30	403.2	40.3	50.1
#50	400.2	40.0	90.1
#100	84	8.4	98.5
底盤	15	1.5	-
			254.19
F.M=細度係數/100			2.54

(資料來源：本研究整理)

表 3-7 NaOH 化學成分

化學成份	含量
Chloride(Cl)	Max. 0.005 %
Sulfate(SO ₄)	Max. 0.003 %
Silicate(SiO ₂)	Max. 0.01 %
Phosphate(PO ₄)	Max. 0.001%
Heavy metal (as.Pb)	Max. 0.001%
Iron(Fe)	Max. 0.0007%
Aluminum(Al)	Max. 0.003%
Calcium (Ca)	Max. 0.001%
Magnesium(Mg)	Max. 0.0005%
Potassium(K)	Max. 0.1%
Total Nitrogen(N)	Max. 0.001%
Arsenic(As)	Max. 0.0002%
Sodium Carbonate(Na ₂ CO ₃)	Max.2.0
Assay (NaOH)	Max. 95.0

(資料來源：德行化工)

表 3-8 Na₂SiO₃ 化學成分

化學成份	含量
Assay(Na ₂ O)	14.8%
Silicic acid(SiO ₂)	29.2%
H ₂ O	56.8%

(資料來源：德行化工)

表 3-9 H₃PO₄ 化學成分

化學成份	含量
Chloride(Cl)	Max. 0.001 %
Nitrate (NO ₃)	To pass test
Sulfate (SO ₄)	Max. 0.006 %
Alkali and other phosphates (sulfate)	To pass test
Substances Reducing KMnO ₄	To pass test
Heavy Metals (as Pb)	Max. 0.001%
Iron (Fe)	Max. 0.005%
Arsenic (As)	Max. 0.0003%
Specific Gravity	1.700-1.710
Assay	Max. 85.0%

(資料來源：德信化工)



圖 3-1 水淬高爐石粉外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 3-2 NaOH 外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 3-3 Na_2SiO_3 外觀

(資料來源：本研究整理)



圖 3-4 H_3PO_4 外觀

(資料來源：本研究整理)

第三節 試驗方法

3-3-1 新拌性質試驗

凝結時間試驗

參考規範：CNS 14220

將拌合好的混凝土以試驗 #4 篩(ϕ 4.75 mm)依溼篩法將混凝土之砂漿分離，置於吸水平板上，並將漿體攪拌均勻至於容器內以搗棒搗實，使其內部空氣排出，最後在將表面抹平，或是直接置於震動台上震動，將試樣存放於溫度 20~25 °C 範圍內，或以工地條件放置大氣條件下。

將貫入阻抗儀裝入一適合尺寸之貫入針，使其針面與試體表面接觸，緩緩的施加一垂直向下力於儀器上，直到標示 25 ± 1.5 mm 止，應在 10 ± 2 sec 完成貫入步驟，並紀錄貫入時間，時間則為水與水泥接觸為初始點至貫入之時間，且貫入針痕跡之間淨距，應至少為針面直徑 2 倍以上且不得小於 13 mm，與容器邊緣淨距不的少於 25mm，且試驗每 30 分鐘實施一次，直到阻抗超過 4000 psi 為止。

貫入阻抗與時間關係繪製凝結速率曲線圖，此圖可用來判斷混凝土之初終凝時間。

坍度試驗

參考規範：CNS 1176

將坍度模表面以抹布溼潤，置於鍍鋅鐵板上，以足踏緊，以防底部發生滲水現象。並將拌好之混凝土分三層填入坍度模，每一層約為全體積之 1/3，亦即各層面距底板面約 6 cm、15 cm、30 cm，每一層並以搗棒搗實，搗實深度為棒端達至下層之頂面即可，至填滿為止。

搗棒將模頂刮平或滾平，並立即將坍度模向上穩定垂直舉起，其速度約為 5 ± 2 秒內完成，並以尺測量取混凝土坍下之高度，坍度即為坍下後之高度與原有高度之差。讀值以 0.5 cm 為單

位，當遇試體坍塌不平時，可取其平均。試驗應於 2.5 分鐘內完成。反覆試驗二次，取其平均值。

長度變化試驗

參考規範 CNS A3383

本試驗依據 CNS A3383 之試驗步驟，進行長度變化試驗，主要目的了解爐石粉完全取代卜特蘭水泥後，以及之後添加 H₃PO₄ 後，對於整個鹼活化爐石粉混凝土長度變化之影響，製作試體尺寸為 285×75×75 mm³ 將鹼活化爐石粉混凝土灌入模具中於試體齡期 24 ±0.5 hours 後脫模，脫模時如果遇到試體強度不足時，則脫模時間改為 48 ±0.5 hours 後脫模，放置大氣、飽和石灰水溶液(相對溼度 100%)、蒸氣(相對溼度 80%、溫度 60 °C)三種環境進行養護，在試體齡期 72 ±0.5 hours 時，將養護的試體取出量測其試驗值，在此量測到的數值為試體長度之初始值，之後將試體在進行養護，並且在 7、14、21、28 天量測試體的試驗值，計算試體長度變化公式如下：

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \quad (3-1)$$

其中：

L：試體齡期 n 天時間的長度變化(%)

L_x：是試體 x 時間之試驗值 (mm)

L_i：初始試驗值 (mm)

G：試體標距

3-3-2 力學試驗

抗壓強度試驗

參考規範：CNS 1232

每組至少製作三個試體，拌合完成後施以試驗所寫方式養護，抗壓前將凹凸不平表面磨平，以每秒 2 kgf/cm^2 之加壓速率置於抗壓機作單軸載重試驗，紀錄試體的最大荷重，在以最大荷重除以受力面積，即為所需之抗壓強度值，抗壓強度試驗完成後，取樣置於 105°C 烘箱中約 24 hours，並提供 SEM 及 EDS 分析使用。

劈裂強度試驗

參考規範：CNS 3801、ASTM C469

本試驗係依據 ASTM C469 之規定方法進行劈裂強度試驗。試驗前先繪出試體的直徑及側面的高度，並記錄其試體三個方向的直徑與高度，試體的上下需墊厚度約 3.2 mm 之木條。若球座的的承載面長度小於試體的長度，則必須在試體的上下加入承載塊。以每分鐘 $7 \sim 14 \text{ kgf/cm}^2$ 的承載速度進行劈裂試驗，直至試體破壞，然後由以下公式求得劈裂強度值。

$$T = \frac{2P}{\pi Ld} \quad (3-2)$$

T：劈裂強度(kPa)

P：最大加載荷重(kN)

L：試體長度(m)

d：試體直徑(m)

3-3-3 耐久性質試驗

加速氯離子滲透試驗

參考規範：CNS 14795

本試驗依據 CNS 14795 之規定方法進行加速氯離子滲透試驗。鹼活化爐石粉圓柱試體在飽和石灰水中養護至第 28 天取出，以混凝土切割機切割成尺寸為直徑 100 mm、厚 50 mm 分之三試片，切割完成後，試體表面最少需氣乾 1 小時，準備防水材料塗刷在試體側面上，之後將試片置入真空室中試體，上下二面必須完全暴露，利用真空幫浦抽至真空度達到 1mmHg 大氣壓，即停止幫浦運轉，並維持真空狀態三個小時。

打開止水閥讓已煮沸過的蒸餾水(須冷卻至試溫)流入真空室，直到蒸餾水滿過試片，並打開真空幫浦開始運轉再續抽一個小時。關掉真空幫浦，打開真空室使空氣進入真空室，並取出試片浸置水中 18 ± 2 小時。從水中移出試體並擦拭多於的水，且要維持相對溼度在 95 % 以上，將試片安裝於電滲槽中，陰極槽放入 3% 之氯化鈉溶液，陽極槽放入 0.3 N 之 NaOH 溶液，試體外露部分使用橡膠栓包覆，並測試試片與電滲槽之間是否漏水，並完成整個電路的配置，試驗過程中環境溫度需維持在 $20 \sim 25$ °C，試驗裝置，如圖 3-5 所示。

外加 $60 \pm 0.1V$ 的直流電壓，並且紀錄初始電流讀數，之後每 5 mins 記錄一次電流值，直到 6 小時試驗完成。將記錄之電流值代入以下公式便可計算求總通過電量。

$$Q = 900(I_{00} + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3-3)$$

其中：

Q：總通過電量(庫倫)

I_0 ：外加電壓後初始的電流值(安培)

I_t ：外加電壓後第 t 分鐘的電流值(安培)

若試體的直徑非 95 mm，則依據 CNS 14795 規範對總通過電量作以下公式的修正。

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{95}{x}\right)^2 \quad (3-4)$$

其中：

Q_s ：試體直徑為 95 mm 之總通過電量(庫倫)

Q_x ：試體直徑為 x cm 之總通過電量(庫倫)

x ：非標準試體直徑(mm)

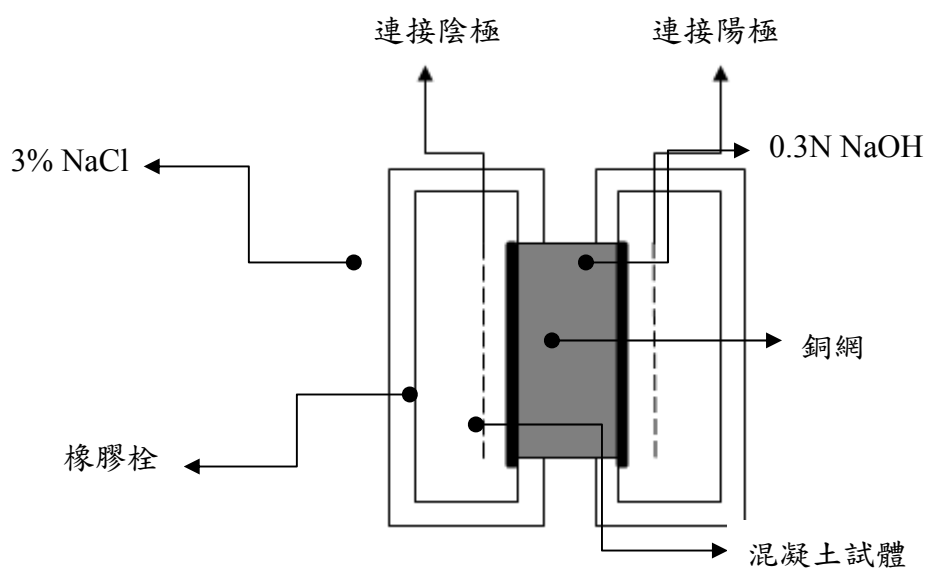


圖 3-5 加速氯離子試驗裝置

(資料來源：本研究整理)

試驗所得之電荷通過量，可經由 CNS 14795 所建議，如表 3-10 所示，對氯離子之滲透性進行評估。

表 3-10 電荷通過量評估氯離子穿透性

總電荷通過量(庫倫)	氯離子滲透性
>4000	高
2000-4000	中
1000-2000	低
100-1000	甚低
<100	可忽略

(資料來源：CNS 14795)

健性試驗

參考規範：CNS 1167

將試體置於硫酸鹽溶液中 16~18 hours 後取出，放入烘箱內烘乾 24 hours，本研究將作乾溼循環共 5 次，量測試體重量損失及抗壓強度的折減，以觀察混凝土抗硫酸根離子的能力，其計算方式如下：

$$\text{混凝土重量損失率(\%)} = \left[\frac{W_0 - W_1}{W_0} \right] \times 100\% \quad (3-5)$$

W_0 ：試驗前試體烘乾重(g)

W_1 ：試驗後試體烘乾重(g)

$$\text{抗壓強度損失率(\%)} = \left[\frac{C_0 - C_1}{C_0} \right] \times 100\% \quad (3-6)$$

C_0 ：試驗前試體抗壓強度(MPa)

C_1 ：試驗後試體抗壓強度(MPa)

透水試驗

參考規範：CNS A2047

本試驗先將試體利用切割器，切成直徑 10 cm 厚度 5 cm 之試體，並在試體外圍塗一層環氧樹脂，只要目的試驗時水從孔隙滲出，再將試體量秤重量，試驗配置是將試體上下二面各放置一塊橡皮襯墊，將試體固定鎖緊後在上方施加水壓(約 1 MPa)一天，後秤重並計算其滲水量，透水試驗公式如下：

$$\text{滲水量(g)}=M_1-M_2 \quad (3-7)$$

M_1 = 試體施做前量測的重量

M_2 = 試體施加 1 Mpa 水壓後量測的重量

壓汞式孔隙量測試驗

參考規範：ASTM D4404

壓汞試驗，係依照 ASTM D4404-84 規範，其原理是利用加壓之壓力使汞佈滿乾燥試體周圍，然後在施加高壓(油壓)將汞強制灌入試體內，同時測量加壓的壓力與灌入之汞量，進入試體內之汞量，即是試驗所需要的試體孔隙體積，再由電腦換算可得孔隙體積、尺寸、分佈情形及孔隙率等資料。

3-3-4 耐火試驗

耐火(高溫)試驗

本試驗是將試體養護 28 天後放進高溫爐，試驗步驟為先將 28 天試體上下二面進行研磨到整平之後，放入高溫爐 (升溫速率約 6 ~ 7 °C/ mins) 升溫至 800、600、400、200°C，定溫燒 1 hours，於大氣中冷卻至常溫後在進行抗壓試驗，探討鹼激發爐石粉混凝土於不同溫度下對力學性質之差異。

3-3-5 微觀分析

SEM 微觀觀察

本研究微觀結構分析之 SEM 觀察，參照下列步驟進行:

- (1)裁切取樣試片，試片尺寸約為 10×10×3 mm 大小範圍。
- (2)將試片置入 80°C 恆溫箱內，烘烤 24 小時，進行乾燥去除水氣程序。
- (3)將試片乾燥處理並預抽真空，並濺鍍金鉑以便導電。
- (4)置入試體於電子顯微鏡內進行抽真空程序。
- (5)場發射電子束掃描試片表面，顯像觀察並且照相。
- (6)分析 SEM 之微觀結構：水泥砂漿試體中 SEM 微觀分析倍率以 500 倍 100000 倍為觀察範圍，觀察並比較其微觀結構之變化。

X 光繞射分析

本研究 X 光繞射分析，參照下列步驟進行

- (1) 均勻選取具代表性之試片粉末約 1 公克。
- (2) 將試樣置入 $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 恆溫箱，進行乾燥去除水氣程序 24 小時以上。
- (3) 試樣黏置於玻璃片上並定位於 XRD 分析儀器中，採銅鉀進行放射以及設定繞射角度為 $10^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ，掃描速率設定為 $3 \text{ sec./}0.05^{\circ}$ 。
- (4) 將分析後之 X 光繞射強度圖(intensity diagram)與電腦軟體所有化合物資料庫進行該試驗之化合物尖峰值(peak)比對。

第四節 試驗設備及儀器

萬能材料試驗機

本研究所採用的是日本 SHIMADZU 公司所出品的 UH-100A 型萬能材料試驗機。本機以油壓系統控制，可進行混凝土材料等工程材料抗壓、抗彎以及鋼筋抗拉等試驗。最大荷重可達 100 噸，荷重範圍可設定 2、5、10、20、50 及 100 噸等 6 段不同荷重範圍切換，最小讀值為 1 kg 重，屬於一閉迴路控制系統 (close loop system) 之試驗機。試驗時，除可由旋轉式油壓控制閥調整加載速率外，亦可由面板設定加載速率，並可連接電腦自動控制加載與記錄試驗數據。其外觀如圖 3-6 所示。

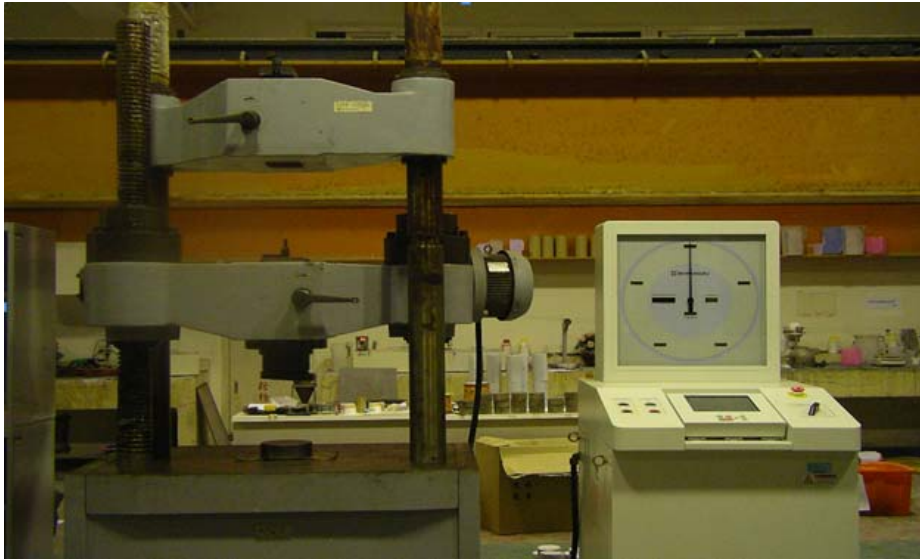


圖 3-6 萬能材料試驗機

(資料來源：本研究整理)

凝結時間貫入儀

本研究所使用之貫入試驗儀係德國製，符合 CNS 14220 量測由混凝土篩出水泥砂漿之貫入阻抗，以測定混凝土凝結時間，如圖 3-7 所示。



圖 3-7 混凝土凝結時間貫入儀

(資料來源：本研究整理)

X 光繞射分析儀(X-ray diffraction, XRD)

本研究利用 Siemens 公司生產之 D5000 X 光繞射分析儀進行化合物分析，本儀器應用於分析結晶材料化合物化學成分。儀器外觀，如圖 3-8 所示。



圖 3-8 X 光繞射分析儀(XRD)

(資料來源：本研究整理)

掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)

本研究中微觀組織觀察是日本 HITACHI 公司生產之 S-4100 型掃描式電子顯微鏡，放大倍率 10 萬倍。本設備利用電場發射電子束撞擊試片激發出訊號，經由訊號放大器再送至陰極映像管中，可以由螢光幕呈現試體微觀晶相，亦可用內附之照相機做攝影；而能量分散光譜儀(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)附屬於 SEM 設備中。儀器外觀，如圖 3-9 所示。



圖 3-9 掃描式電子顯微鏡(SEM)

(資料來源：本研究整理)

透水試驗裝置

透水試驗參照日本 JIS-A 6101 規範進行，本試驗藉由量測試體在定水壓下從試體側表穿透至中心之透水量，試驗裝置，如圖 3-10 所示。



圖 3-10 混凝土透水試驗裝置

(資料來源：本研究整理)

加速氯離子穿透試驗裝置

本研究進行加速氯離子穿透試驗所使用的設備參照 ASTM C1202 設計，包含抽真空設備與供電及電流量測設備，抽真空裝置有真空幫浦、真空槽與真空計及試驗槽，供電及電流量測設備包括直流電源供應器、數位式電流計及溫度計。抽真空裝置，如圖 3-11 所示。



圖 3-11 氯離子快速穿透試驗裝置

(資料來源：本研究整理)

壓汞孔隙儀

壓汞孔隙儀型號為 AutoPore IV9520，試驗原理係利用水銀高表面張力及對大部分物質不受潮特性，它的接觸角和曲率可以用來計算特定壓力下它侵入的孔隙直徑。壓汞孔隙儀主要分為低壓及高壓試驗兩部分，低壓的量測範圍為 0~345kPa(50psi)，解析度 69Pa(0.01psi)，孔隙直徑量測範圍為 360~3.6 μm ；高壓量測範圍一大氣壓~414 MPa (60000psi)，解析度 2070Pa (0.3psi)，孔隙直徑量測範圍為 6~0.003 μm 。壓汞孔隙儀外觀，如圖 3-12 所示。



圖 3-12 壓汞孔隙儀

(資料來源：本研究整理)

第四章結果與討論

第一節 前言

由於水泥在製作過程中產生的 CO_2 是破壞大氣層造成溫室效應的原因之一，過去許多文獻得知鹼活化爐石粉混凝土，其性質與傳統水泥極為相近，且硬固在結構物的力學性質方面具有不錯的表現，因此採用爐石粉大量取代水泥用量，透過鹼活化劑 Na_2SiO_3 與 NaOH 不同含量下去激發爐石粉的潛在活性，將整理鹼活化混凝土的最佳配比用量，並透過各項防火試驗與耐久性試驗方法，鹼活化爐石粉混凝土的防火及耐久等特性。

本研究的主要採用爐石粉完全取代水泥，採 Na_2SiO_3 、 NaOH 等兩種目前較常使用之鹼活化材料，並使用 H_3PO_4 當緩凝劑，一起調製鹼活化劑，拌製鹼活化爐石粉混凝土得到以下結果，並提出結論與改善方案，做為後續研究之基礎。

第二節 新拌性質試驗結果與討論

4-2-1 凝結時間試驗

本試驗主要是了解 H_3PO_4 的添加對於鹼活化爐石粉混凝土速凝問題之影響，進而探討 4%、5%、6% 不同含量之 Na_2O 的鹼活化劑，配合緩凝劑的最佳用量，試驗結果，如表 4-1 所示。

本試驗依據 CNS 14220 將初凝時間控制約 120 mins，並由試驗結果表 4-1 發現，當鹼活化劑中 Na_2O 分別為 4%、5%、6% 時， H_3PO_4 用量各別需添加每立方公尺 1.56、1.87、2.18 kg，便能得相近的初凝時間，同時於試驗中發現當緩凝劑超過前述用量，即能達到緩凝效果。

圖 4-1 顯示，緩凝劑(H_3PO_4)用量與鹼活化劑中 Na_2O 含量 4%、5%、6%，對出鹼活化混凝土緩凝效果為一直線關係，當 Na_2O 增加 1% 含量時，緩凝劑(H_3PO_4)需增加 20%，才能得近似 120 mins 的初凝時間。

表 4-1 添加 H₃PO₄ 凝結時間試驗結果

編號	初凝時間 mins	終凝時間 mins	H ₃ PO ₄ 添加量 kg/m ³
A6AR			
A6WR	128	960	2.18
A6TR			
A 5AR			
A5WR	139	1107	1.87
A5TR			
A4AR			
A4WR	137	1249	1.56
A4TR			

(資料來源：本研究整理)

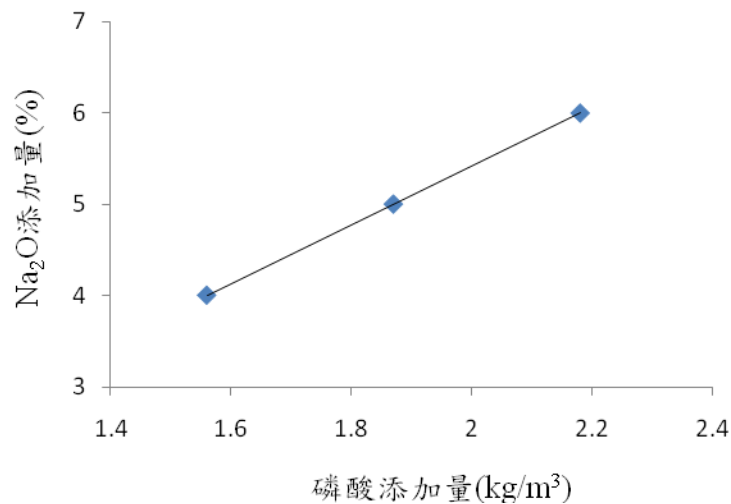


圖 4-1 H₃PO₄ 用量與 Na₂O 用量關係圖

(資料來源：本研究整理)

4-2-2 坍度試驗

由表 4-2 顯示，鹼活化爐石粉混凝土一旦添加適量的 H₃PO₄，其對鹼活化劑中 Na₂O 含量 4%、5%、6%之鹼活化爐石粉混凝土，坍度皆有不錯的結果，則對未添加 H₃PO₄ 而言，並無法得到相對之有效坍度。

表 4-2 添加 H_3PO_4 坍度試驗結果

編號	坍度(cm)
A6AR	9.5
A 5AR	11
A4AR	13
A6A0	-
A 5A0	-
A4A0	-

(資料來源：本研究整理)

4-2-3 長度變化試驗

自體長度收縮量大對於鹼活化爐石粉混凝土的應用，是一項急須克服及改善的課題之一，1990 年，學者 Taylor 與 Kjellsen，提到高養護溫度以及溼度對於高收縮量的鹼活化爐石粉混凝土，能有效減少鹼活化爐石粉混凝土長度變化量^[17,18]。因此本試驗特別針對養護環境，設置大氣、飽和石灰水與蒸氣等 3 種養護環境，來改善其長度變化之現象，同時探討鹼活化爐石粉混凝土於不同養護環境中長度變化之差異。

表 4-3 為長度變化試驗結果，其中編號前兩碼表示鹼活化劑中 Na_2O 含量 4 %、5 %、6 %，後兩碼則個別表示鹼活化混凝土，置大氣(A)、飽和石灰水溶液(溼度 100 %) (W)與蒸氣(相對溼度 80%、溫度 60 °C) (T)及添加(0)與未添加(R)緩凝劑(H_3PO_4)。

圖 4-2 表示，不同配比之鹼活化爐石粉混凝土與 OPC 在蒸氣環境中試體長度變化率，圖中顯示鹼活化爐石粉混凝土與控制組 OPC 養護 7、14、28 天齡期相互比較，鹼活化爐石粉混凝土明顯比 OPC 高出 3 倍之長度變化現象，其中兩者混凝土長度變化差異最明顯，由養護第 7 天齡期開始，按養護天數比例成長為一直線，此現象表示，長度變化現象會隨著養護齡期增加而增加。

圖 4-3 顯示，鹼活化爐石粉混凝土各別置於大氣、飽和石灰水溶液(相對溼度 100 %)、蒸氣(相對溼度 80 %、溫度 60 °C)等三種環境中養護，由圖發現，鹼活化爐石粉混凝土置於飽和石灰水溶液與蒸氣環境中養護，對於其長度變化現象皆有明顯之改善，其中以置於蒸氣環境中養護

改善 55 % 最為明顯，置於飽和石灰水溶液中改善 23 % 次之。

表 4-3 試體長度變化試驗結果(%)

編號	7 天	14 天	21 天	28 天
OPC	0.0132	0.0171	0.0234	0.0331
A6A0	0.0448	0.0506	0.0590	0.0732
A5A0	0.0514	0.0627	0.0668	0.0771
A4A0	0.0494	0.0661	0.0697	0.0764
A6W0	0.0312	0.0381	0.0471	0.0570
A5W0	0.0305	0.0403	0.0478	0.0529
A4W0	0.0257	0.0306	0.0430	0.0534
A6T0	0.0217	0.0298	0.0397	0.0487
A5T0	0.0187	0.0249	0.0394	0.0444
A4T0	0.0177	0.0227	0.0447	0.0517
A6AR	0.0411	0.0534	0.0611	0.0729
A5AR	0.0478	0.0537	0.0571	0.0761
A4AR	0.0469	0.0557	0.0634	0.0794
A6WR	0.0287	0.0359	0.0448	0.0594
A5WR	0.0331	0.0397	0.0491	0.0571
A4WR	0.0297	0.0345	0.0439	0.0589
A6TR	0.0197	0.0264	0.0335	0.0471
A5TR	0.0167	0.0274	0.0364	0.0417
A4TR	0.0211	0.0271	0.0378	0.0487

(資料來源：本研究整理)

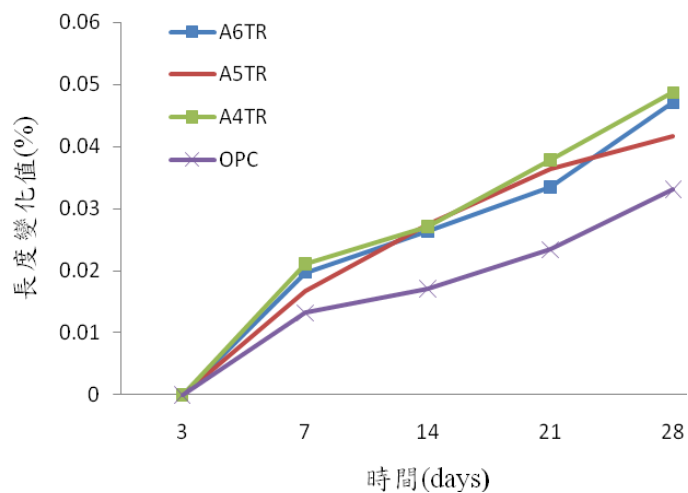


圖 4-2 不同 Na₂O 用量試體長度變化比較圖

(資料來源：本研究整理)

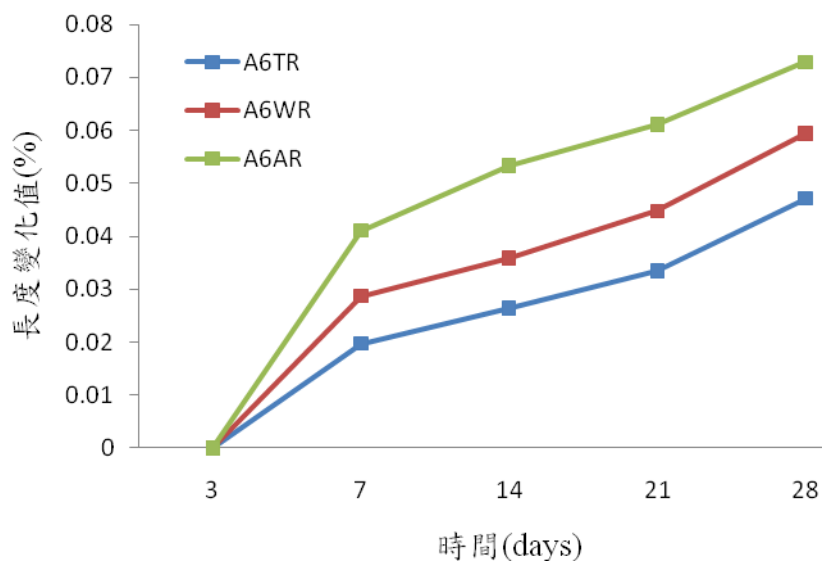


圖 4-3 不同養護條件試體長度變化比較圖

(資料來源：本研究整理)

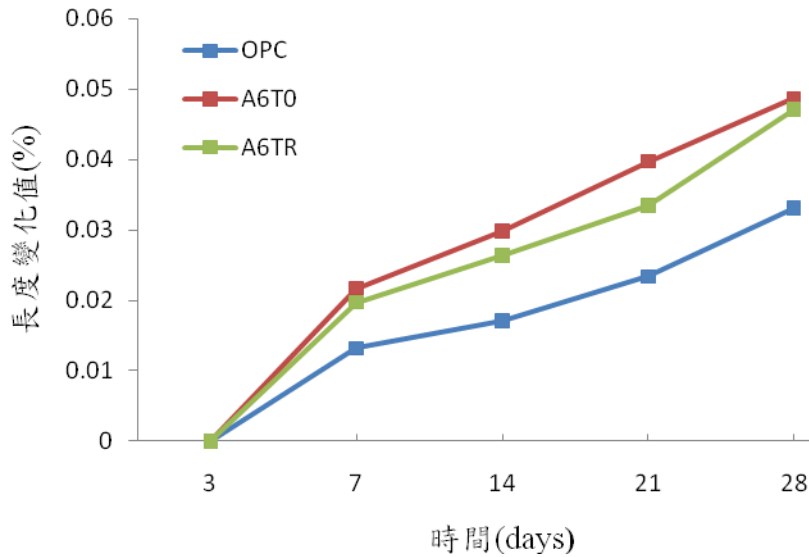


圖 4-4 添加與未添加 H_3PO_4 試體長度變化比較圖

(資料來源：本研究整理)

第三節 力學試驗結果與討論

4-3-1 抗壓強度試驗

表 4-4 為鹼活化爐石粉混凝土與 OPC 抗壓試驗結果，表中顯示當鹼活化劑中 Na_2O 含量 4 %、5 %、6 %之鹼活化混凝土，置於大氣、飽和石灰水溶液(相對溼度 100 %)、蒸氣(相對溼度 80 %、溫度 $60^{\circ}C$)等三種環境中養護，其抗壓強度皆明顯大於 OPC。舉之中效果最佳的添加比例及養護模式往下探討，由圖 4-5 顯示，以蒸氣養護 3 天齡期早期強度最顯著，相較 OPC 高出約 4.6 倍強度，非但如此由養護 3、7、28 天齡期發現，其強度會隨著時間增加而出現遞增的現象。並由圖 4-6 發現，鹼活化爐石粉混凝土置於大氣、飽和石灰水溶液(相對溼度 100 %)、蒸氣(相對溼度 80 %、溫度 $60^{\circ}C$)等三種環境中養護，會出現不同的強度效果，而之中效果最佳的為試體置於蒸氣養護，比置於一般大氣環境中養護之鹼活化爐石粉混凝土強度高約 34 %。在由圖 4-7 顯示，鹼活化混凝土中適量的添加緩凝劑(H_3PO_4)，對於鹼活化混凝土抗壓強度，亦無太大之影響與差異。

表 4-4 試體抗壓強度試驗結果(MPa)

編號	3 天	7 天	28 天
OPC	10.94	19.88	38.46
A6A0	37.79	40.54	51.12
A5A0	32.66	39.54	48.22
A4A0	29.66	32.87	41.98
A6W0	34.64	39.91	48.23
A5W0	33.05	38.55	45.97
A4W0	26.15	28.88	39.34
A6T0	50.85	56.45	62.70
A5T0	41.57	49.23	57.65
A4T0	33.46	40.72	50.25
A6AR	43.43	43.24	58.34
A5AR	41.64	45.10	50.53
A4AR	41.63	42.48	53.00
A6WR	40.36	52.78	57.03
A5WR	35.84	41.08	54.92
A4WR	41.67	45.55	52.62
A6TR	49.91	54.17	65.32
A5TR	44.13	48.91	59.33
A4TR	42.12	44.09	57.93

(資料來源：本研究整理)

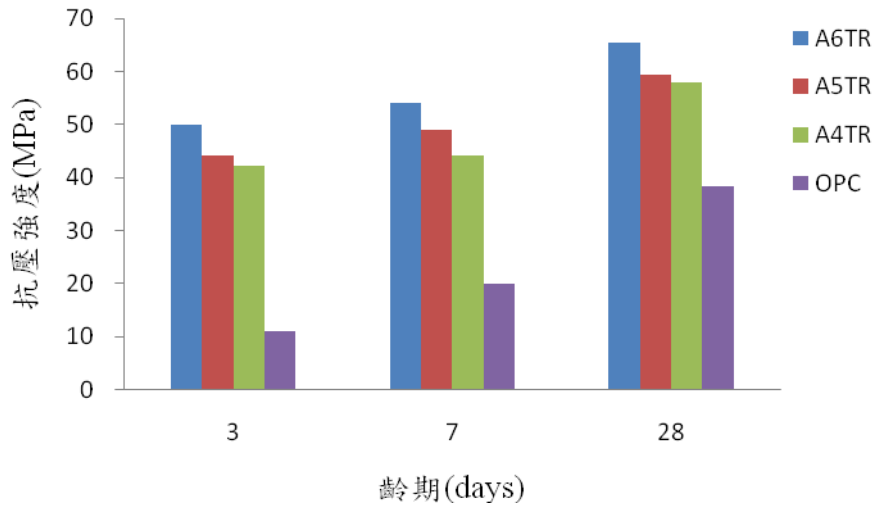


圖 4-5 不同 Na₂O 用量試體抗壓強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

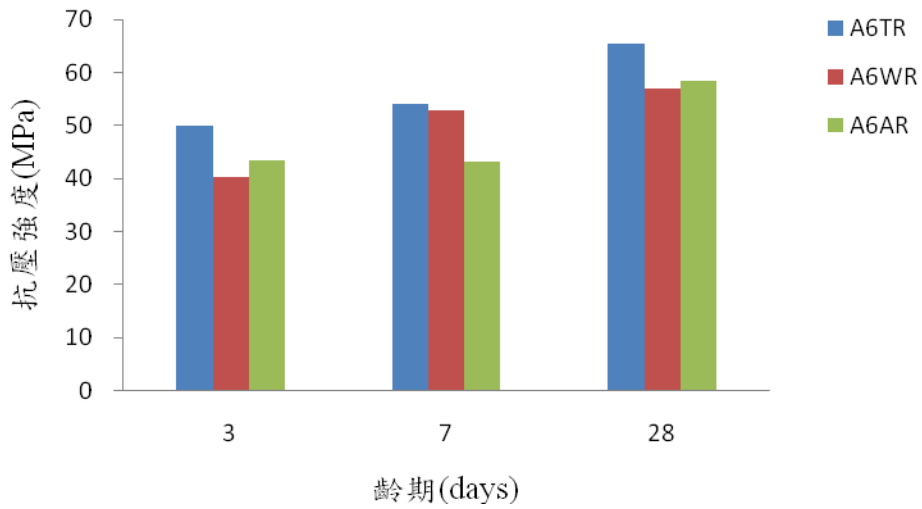


圖 4-6 不同養護條件下試體抗壓強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

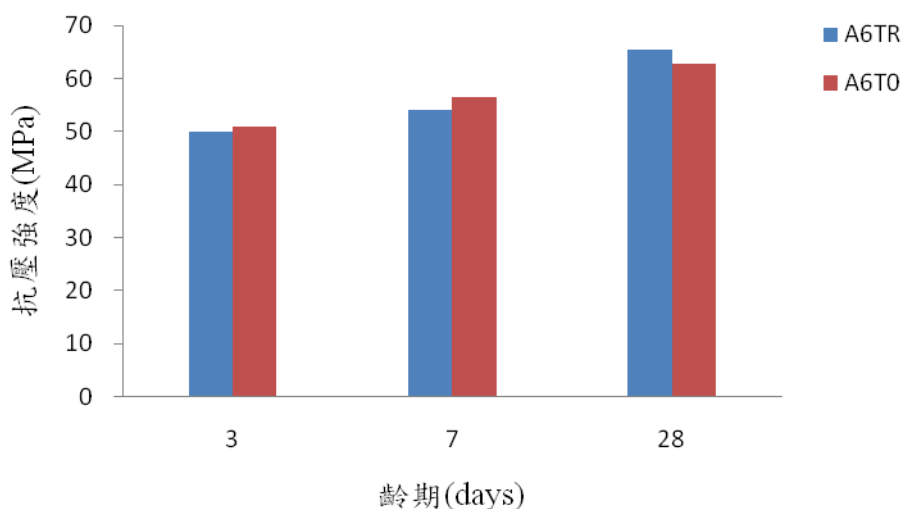


圖 4-7 添加與未添加 H_3PO_4 試體抗壓強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

4-3-2 劈裂強度試驗

表 4-5 為鹼活化爐石粉混凝土與 OPC 劈裂試驗結果，由圖 4-8 顯示鹼活化爐石粉混凝土之劈裂強度，相較於 OPC 的劈裂強度，皆呈現出較優的趨勢，其中以蒸氣養護 28 天最為明顯，分別按鹼活化劑中 4 %、5 %、6 % 的 Na_2O 添加量，而有不同之效果，當中以 Na_2O 添加 6 % 之鹼活化混凝土強度增加 28 % 最顯著，其於兩組試體強度則各別增加 21 ~ 24 % 左右。

圖 4-9 顯示，鹼活化爐石粉混凝土置於大氣、飽和石灰水溶液(相對溼度 100 %)、蒸氣(相對溼度 80 %、溫度 60 °C)等三種環境中，養護後之劈裂強度。由圖中發現，當鹼活化爐石粉混凝土置於蒸氣環境中，養護效果比置大氣環境中養護增加 8 % 較優，另外試體置於飽和石灰水溶液則與大氣中相比，其劈裂強度較無明顯之差異。

圖 4-10 顯示，鹼活化爐石粉混凝土有添加及未添加適量緩凝劑(H_3PO_4)與 OPC 劈裂強度之差異。由圖中發現，鹼活化爐石粉混凝土有無添加適量緩凝劑(H_3PO_4)，該劈裂強度皆優於 OPC，其中以有添加適量緩凝劑(H_3PO_4)增加 28 % 效果最好，未添加適量緩凝劑(H_3PO_4)增加約 14 % 次之。

表 4-5 試體劈裂強度試驗結果(KPa)

試體編號	3 天	7 天	28 天
OPC	3243.6	3701.9	4033.0
A6A0	3565.1	3791.1	4036.2
A5A0	3342.3	3612.8	3937.5
A4A0	2874.3	3342.3	3889.7
A6W0	3246.8	3724.2	3950.2
A5W0	3004.8	3224.5	3813.4
A4W0	2931.6	3164.0	3440.9
A6T0	3915.2	3986.8	4580.5
A5T0	3756.1	3803.8	4211.2
A4T0	3224.5	3568.3	4189.0
A6AR	4036.2	4036.2	4816.0
A5AR	3956.6	3956.6	4698.3
A4AR	3791.1	3791.1	4430.9
A6WR	4013.9	4013.9	4513.6
A5WR	3730.6	3730.6	4373.6
A4WR	3539.6	3539.6	4316.3
A6TR	4195.3	4195.3	5182.1
A5TR	4052.1	4052.1	5016.6
A4TR	4023.4	4023.4	4914.7

(資料來源：本研究整理)

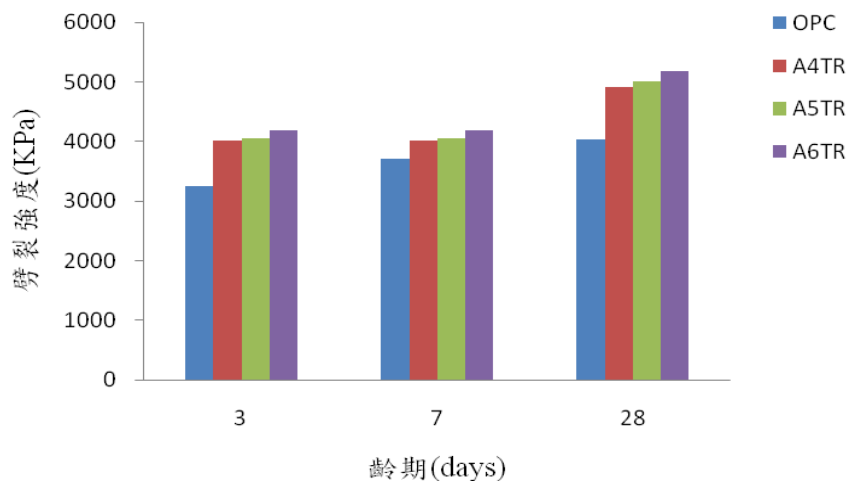


圖 4-8 不同 Na₂O 用量試體劈裂強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

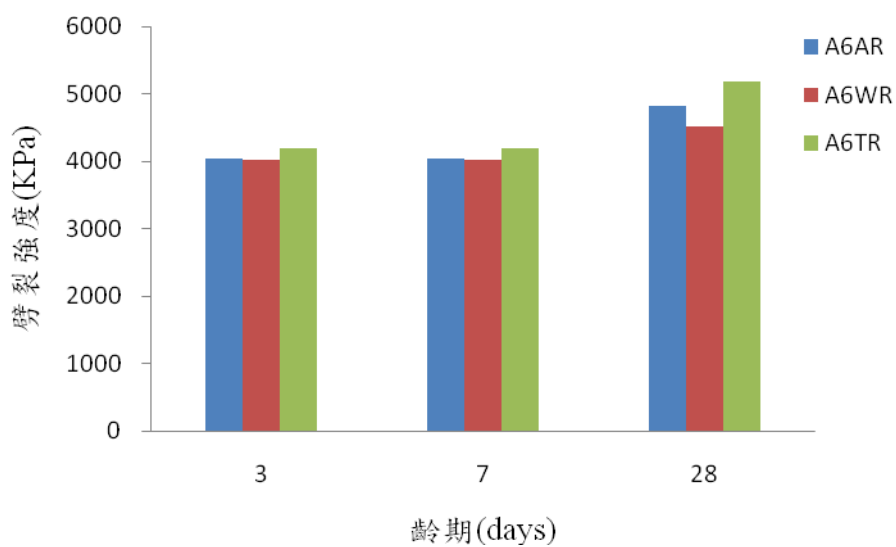


圖 4-9 不同養護條件下試體劈裂強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

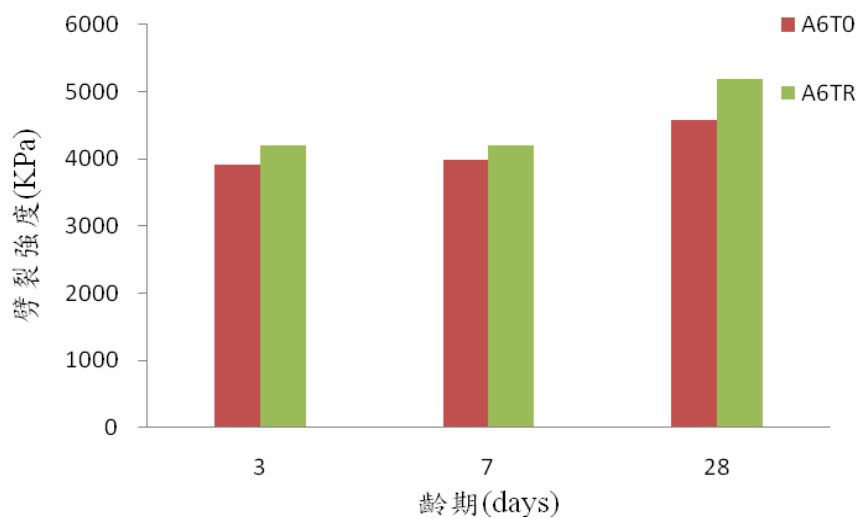


圖 4-10 添加與未添加 H₃PO₄ 試體劈裂強度比較圖

(資料來源：本研究整理)

第四節 耐久性試驗結果與討論

4-4-1 加速氯離子穿透試驗

表 4-6 為加速氯離子穿透試驗結果與對照表，從表中發現 W/C = 0.5 的 OPC 氯離子穿透之總電荷量，有偏高的現象，而相對鹼活化混凝土整體來說其氯離子穿透的總電荷量，則處於較適中之範圍。

透過圖 4-11 探討其緻密性，當鹼活化爐石粉混凝土置於大氣、飽和石灰水溶液(相對溼度 100%)、蒸氣(相對溼度 80%、溫度 60 °C)等三種環境中養護，該氯離子穿透總電荷量值皆低於 OPC，也就是說當鹼活化爐石粉混凝土之鹼活化劑中 Na₂O 的用量為 4%、5%、6%，且無論在大氣中、飽和石灰水溶液(相對溼度 100%)、蒸氣(相對溼度 80%、溫度 60 °C)等三種環境中養護，其緻密性是優於 OPC 的，而鹼活化爐石粉混凝土置於這三種養護環境中養護，表現最佳為置於蒸氣環境中養護，能降低約 50% 氯離子穿透總電荷量，其它置於大氣中與飽和石灰水中也均能降低約 21~25% 左右。

表 4-6 混凝土抗氯離子穿透試驗結果與對照表

	通過電荷量	氯離子穿透性
OPC	4942	高
A6AR	3921	中
A5AR	3841	中
A4AR	3321	中
A6WR	3714	中
A5WR	3505	中
A4WR	3969	中
A6TR	2714	中
A5TR	2686	中
A4TR	2505	中

CNS 14795		電荷通過量評估氯離子穿透性
通過電荷量(庫倫)		氯離子穿透性
> 4000		高
2000 ~ 4000		中
1000 ~ 2000		低
100 ~ 1000		甚低
< 100		可忽略

(資料來源：本研究整理)

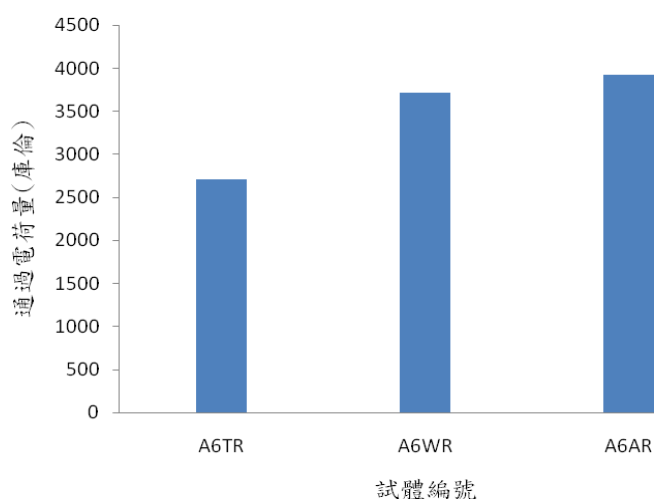


圖 4-11 養護環境與通過試體電荷量關係圖

(資料來源：本研究整理)

4-4-2 透水試驗

本試驗主要探討鹼活化爐石粉混凝土之防水性，依據 CNS 規定提到當混凝土於 24 hours 施以 1 MPa 水壓時試體底部無滲水現象，表示試體具有防水之效果，由透水試驗得知，無論是鹼活化爐石粉混凝土或是 OPC，試體在 24 hours 施以 1 MPa 其底部皆無滲水現象。另在透過試體量測試驗前後淨重，計算求得其滲水量發現，鹼活化爐石粉混凝土之滲水量與 OPC 相較有偏低約 1%~23% 之現象，因此推估鹼活化劑中 Na_2O 的用量為 4%、5%、6% 之鹼活化爐石粉混凝土，放置大氣中，飽和石灰水溶液(相對溼度 100%)、蒸氣(相對溼度 80%、溫度 60°C)等三種環境中養護，其防水效果較優於 OPC，詳如表 4-7 所示。

表 4-7 透水試驗結果

試體編號	滲水量(g)
OPC	10.4
A6AR	9.1
A5AR	8.0
A4AR	8.6
A6WR	10.3
A5WR	10.1
A4WR	8.4
A6TR	9.2
A5TR	8.0
A4TR	8.4

(資料來源：本研究整理)

4-4-4 健性試驗

此項試驗主要探討鹼活化混凝土抵抗硫酸鹽侵蝕之能力，主要將試體事先秤重並浸置於硫酸鈉溶氣中一天後，移置 105°C 烘箱烘乾一天，如此反覆循環連續五次，最後秤重判斷重量損失以及抗壓強度損失的程度，試驗結果如表 4-8 所示。

透過表 4-8 得知，鹼活化爐石粉混凝土之重量損失，整體而言是較低於 OPC 的，但就試體抗壓強度而言，其抗壓強度與抗壓強度折減係數試驗結果，起起浮浮似乎未有一個趨勢性。因

此本試驗在此部分僅能依前述結果能概估，鹼活化爐石粉混凝土之抗硫酸鹽滲透可能優於 OPC，詳細判斷建議未來學者，能針對此項議題進行更深入之研究與探討。

表 4-8 健性試驗結果

試體編號	重量損失率(%)	抗壓強度	抗壓強度損失率(%)
OPC	3.3	40.37	4.73
A6A0	1.1	53.10	3.73
A5A0	1.4	48.36	0.29
A4A0	2.2	42.64	1.55
A6W0	1.0	52.80	8.66
A5W0	1.3	51.48	10.70
A4W0	1.9	54.30	27.55
A6T0	0.9	60.60	-3.47
A5T0	0.8	54.40	-5.97
A4T0	1.0	45.41	-10.66
A6AR	2.1	60.51	3.59
A5AR	2.1	54.68	7.59
A4AR	2.1	55.21	4.00
A6WR	1.8	59.66	4.41
A5WR	1.1	51.65	-6.33
A4WR	1.0	50.79	-3.60
A6TR	1.2	64.60	-1.11
A5TR	0.8	52.90	-12.16
A4TR	0.7	53.58	-8.12

(資料來源：本研究整理)

4-4-3 MIP 壓汞試驗

表 4-9 與表 4-10 各別為鹼活化爐石粉混凝土與 OPC，7 天及 28 天壓汞試驗試驗結果。就整體而言鹼活化爐石粉混凝土試體之總孔隙率，相較於 OPC 試體的總孔隙率，具較緻密之結構。

由圖 4-12 顯示鹼活化混凝土置於蒸氣環境中養護 7 天齡期，其總孔隙率較低於 OPC，當中總孔隙率最低為，鹼活化劑中 Na₂O 含量 6% 之鹼活化爐石粉混凝土，該總孔隙率比 OPC 試體孔隙率低約 53%，而其它兩組鹼活化劑中 Na₂O 含量 4%~5% 之鹼活化爐石粉混凝土，其總孔隙率皆比 OPC 試體孔隙率低 46% 左右。

另外由蒸氣環境中養護 28 天齡期發現，當養護齡期增加鹼活化劑中 Na_2O 含量 6% 之鹼活化爐石粉混凝土及 OPC，基本上總孔隙率亦無明顯差異，而鹼活化劑中 Na_2O 含量 4%~5% 之鹼活化爐石粉混凝土，則總孔隙率出現遞增之現象，如圖 4-12、圖 4-13 所示。該現象就未來鹼活化爐石粉混凝土推廣應用，是一項值得深入探討研究及改善的，因此建議未來有關機關或學者，能夠針對鹼活化爐石粉混凝土結構之緻密性，進行更深入之研究，以利鹼活化爐石粉混凝土推廣應用之可行性。

表 4-9 壓汞試驗試體齡期 7 天試驗結果

配比編號	膠體孔隙	毛細孔隙	總孔隙
A4TR	0.0051	0.0371	0.0422
A5TR	0.0046	0.0357	0.0403
A6TR	0.0037	0.0336	0.0373
A6WR	0.0084	0.0426	0.0510
A6AR	0.0075	0.0481	0.0555
OPC	0.0028	0.0759	0.0787

(資料來源：本研究整理)

表 4-10 壓汞試驗試體齡期 28 天試驗結果

配比編號	膠體孔隙	毛細孔隙	總孔隙
A4TR	0.0030	0.0847	0.0877
A5TR	0.0028	0.0624	0.0652
A6TR	0.0022	0.0415	0.0437
A6WR	0.0161	0.0405	0.0566
A6AR	0.0146	0.0470	0.0616
OPC	0.0044	0.0831	0.0875

(資料來源：本研究整理)

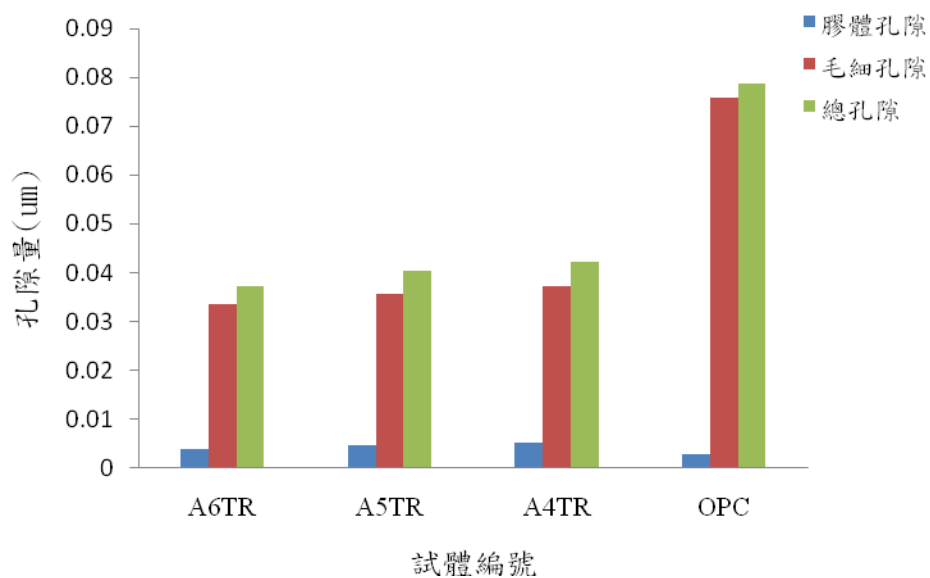


圖 4-12 不同試體在 7 天齡期試驗結果

(資料來源：本研究整理)

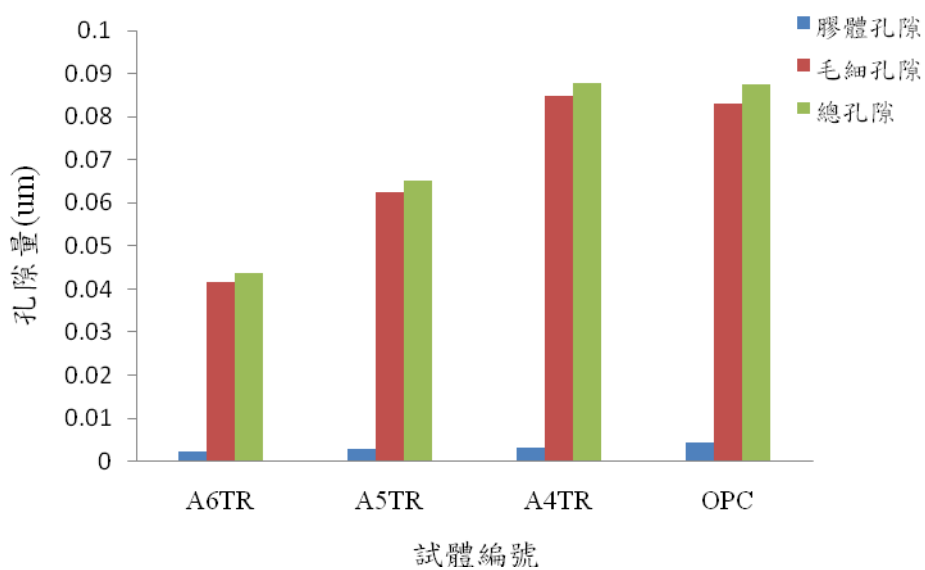


圖 4-13 不同試體在 28 天齡期試驗結果

(資料來源：本研究整理)

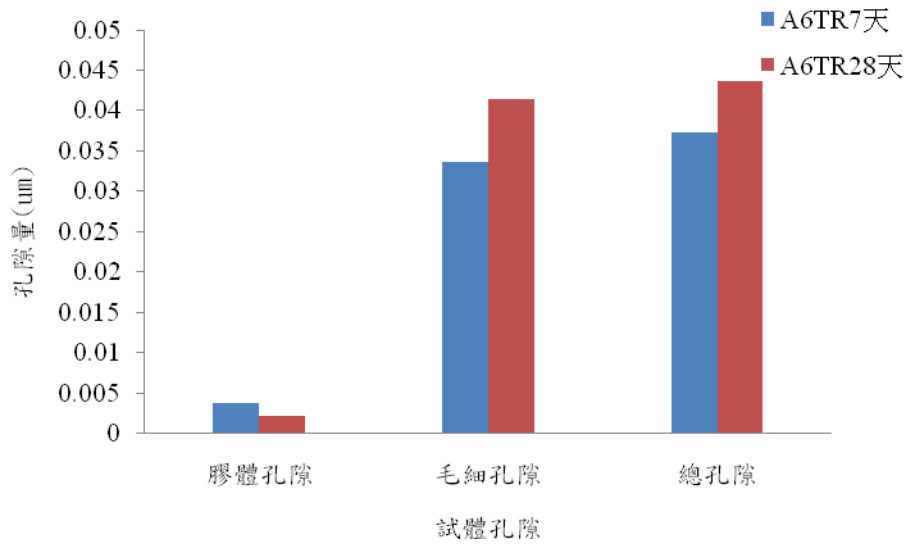


圖 4-14 齡期 7 天與 28 天試驗比較圖

(資料來源：本研究整理)

4-4-4 微觀觀察

圖 4-15 為未添加緩凝劑之鹼活化爐石粉混凝土微觀圖(編號 A6T0)，圖 4-16 為添加緩凝劑鹼活化爐石粉混凝土之微觀圖(編號 A6TR)，從兩張圖顯示 A6TR 微觀結構較為緻密。

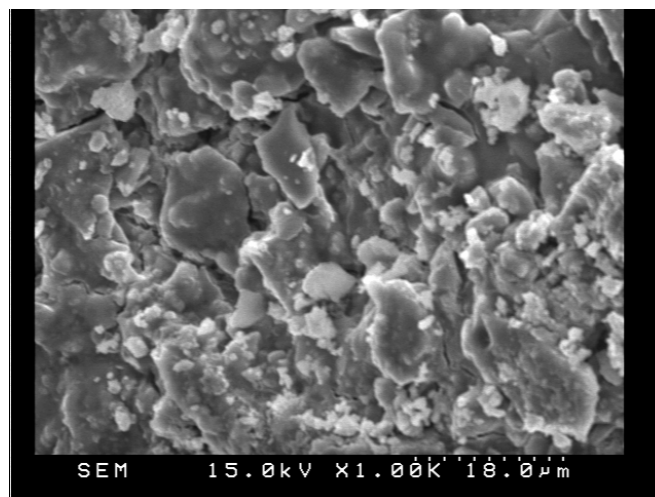


圖 4-15 試體微觀圖(A6T0,1000X)

(資料來源：本研究整理)

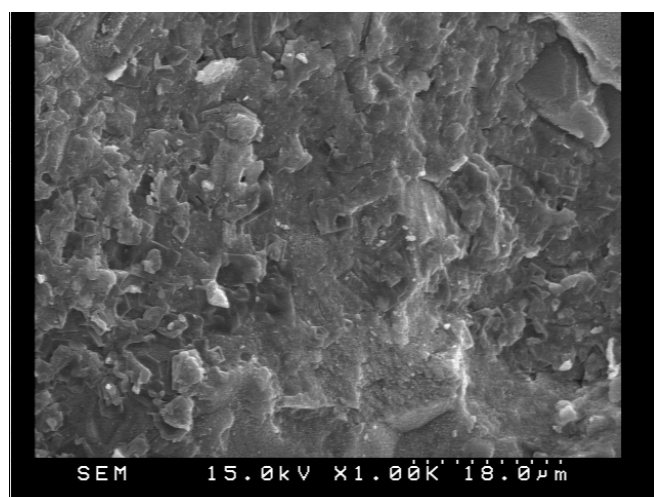


圖 4-16 試體微觀圖(A6TR,1000X)

(資料來源：本研究整理)

第五節 耐火試驗結果與討論

4-5-1 耐火試驗

將齡期 28 天試體移入高溫爐內，以約 $6 \sim 7^\circ\text{C}/\text{min}$ 升溫速率加溫至試驗所需的溫度 800、600、400、200 $^\circ\text{C}$ ，到達該溫度後定溫燒 1 hour，最後取出於室內降到常溫後，進行抗壓試驗，試驗結果，如表 4-11 所示。

圖 4-17 是取置蒸氣環境中養護，鹼活化劑中 Na_2O 的用量為 4%、5%、6% 之鹼活化爐石粉混凝土，經過 800、600、400、200 $^\circ\text{C}$ 燒 1 hours 後之抗壓強度繪製而成的，由圖中發現，鹼活化爐石粉混凝土之抗壓強度無論其配比為何，皆會因為溫度增加而使得強度遞減。

另外由表 4-11 可以發現一個有趣的現象，當溫度在 200 $^\circ\text{C}$ ~ 400 $^\circ\text{C}$ (升溫速率約 $6 \sim 7^\circ\text{C}/\text{mins}$) 時，試體於定溫燒 1 hours，OPC 抗壓強度於會有增加之現象，而當溫度在 600 $^\circ\text{C}$ ~ 800 $^\circ\text{C}$ 此時試體會產生爆裂現象。此現象攸關混凝土構造物之耐火性及安全性非常值得重視及深入探討，因此建議未來能夠有學者或相關研究機關針對此項問題進行探討與研究。

表 4-11 暴露於不同溫度試體抗壓強度試驗結果(MPa)

試體編號	28°C	200°C	400°C	600°C	800°C
A6A0	51.1	30.9	30.4	24.9	3.7
A5A0	48.2	38.2	33.0	24.9	3.5
A4A0	42.0	42.2	35.6	25.1	3.5
A6W0	48.2	31.1	28.6	22.4	3.2
A5W0	46.0	32.5	29.7	21.4	3.1
A4W0	39.3	32.7	30.5	25.1	3.0
A6T0	62.7	41.7	36.8	23.0	3.2
A5T0	57.7	44.3	38.2	27.8	2.9
A4T0	50.3	46.5	38.3	25.2	3.3
A6TR	65.3	44.5	32.0	21.6	3.1
A5TR	59.3	44.2	38.0	23.8	2.9
A4TR	57.9	37.5	36.5	25.7	3.9
OPC	38.5	43.1	40.7	-	-

(資料來源：本研究整理)

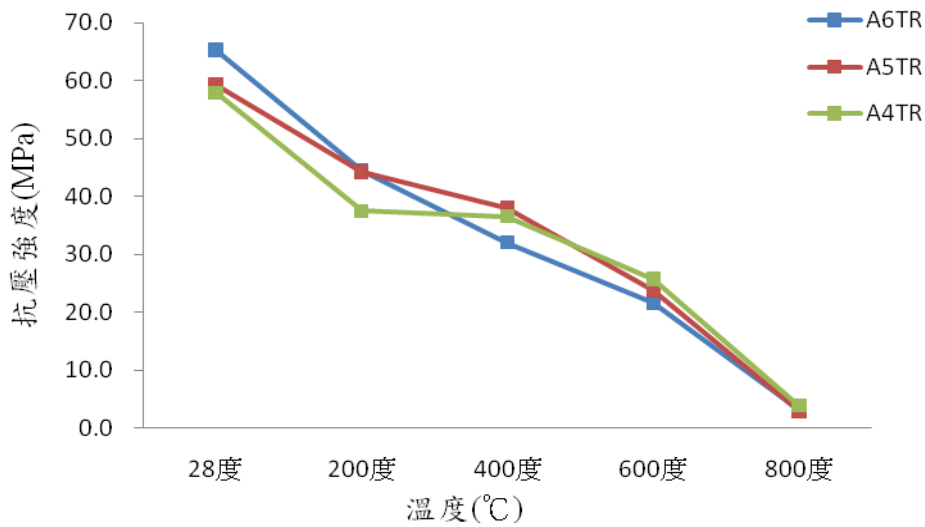


圖 4-17 暴露溫度與試體抗壓強度關係圖

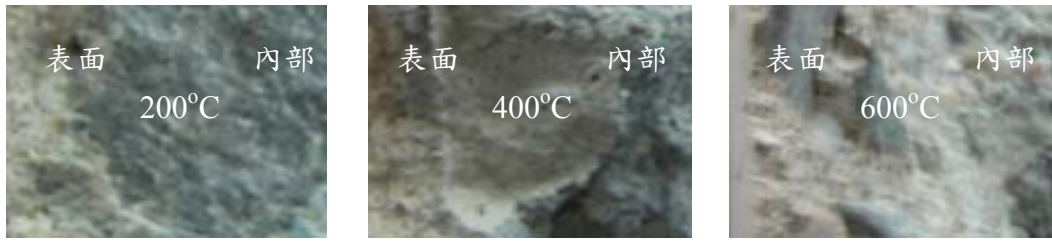
(資料來源：本研究整理)

4-5-2 XRD 分析

圖 4-19 為 OPC 在常溫、200°C、400°C 處理後的成分分析結果，由圖得知 OPC 在常溫下大致成分有化合物 $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ 、 SiO_2 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等成分，在 200°C 燒 1 hours 後，基本組合沒變但增加了純元素 Ca，而在 400°C 燒 1 hours 後發現，當中 $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ 消失了，因此推測當溫度在 200°C 及 400°C 時，OPC 中 $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ ，成分中的 C 被燒失分解，還原成單元素 Ca。

圖 4-20 為鹼活化爐石粉混凝土在常溫、200°C、400°C、600°C、800°C 處理後的成分分析結果，由圖得知鹼活化爐石粉混凝土在常溫下大致成分有化合物 SiO_2 、 CaSO_3 、C-S-H、 $\text{MgAl}(\text{OH})_{14-x}\text{H}_2\text{O}$ 、 SiS_2 、 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_3_4\text{H}_2\text{O}$ 、 AlO_2 、 $\text{AlH}(\text{SO})_4$ 等多種組成分，在 200°C 燒 1 hours 後部分成分，會在圖譜上訊號強度減弱或消失，同時亦出現純元素 Ca 與疑似成分產生變化之 C-S-H，在 400°C 燒 1 hours 後，疑成分產生改變之 C-S-H 也從圖譜上消失了，因此推估當試體在溫度 200°C 及 400°C 定溫燒 1 hours 時，鹼活化混凝土成分中，部分化合物中水、硫、碳等元素，可能會被燒失而產生分解現象。

另外發現試體試體以 200°C 燒 1 hour 後，表面會呈現明顯粉紅現象，內部則呈現偏綠現象，當溫度於 400°C 至 800 °C 時，偏紅現象會逐漸往內拓展加深，且 XRD 圖譜在 600°C 位置，亦出現 $\text{Fe}_2\text{O}_4\text{Si}$ 等化合物的峰，而溫度在 800 °C 時， $\text{Fe}_2\text{O}_4\text{Si}$ 等化合物的峰數量有增加的趨勢，所以推測顏色變化現象，可能是試體受到溫到影響生成 $\text{Fe}_2\text{O}_4\text{Si}$ 成分所致，詳如圖 4-18、圖 4-20 所示。此說明鹼活化爐石粉混凝土是否遭受火害影響，除了可以由成分損失及前述以力學性質抗壓強度判定，同時在初步分析階段亦能採肉眼判定。



鹼活化爐石粉混凝土截面示意

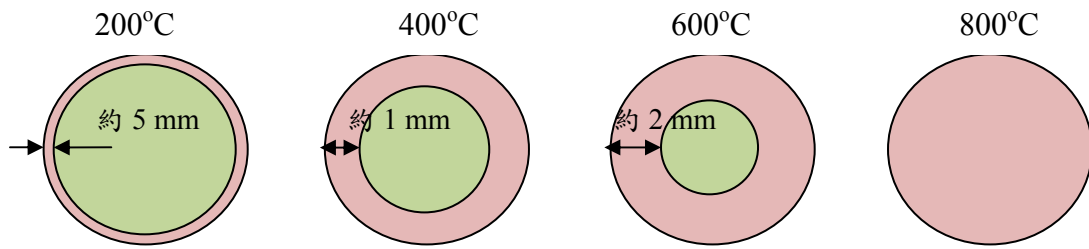


圖 4-18 不同溫度下試體顏色之差異

(資料來源：本研究整理)

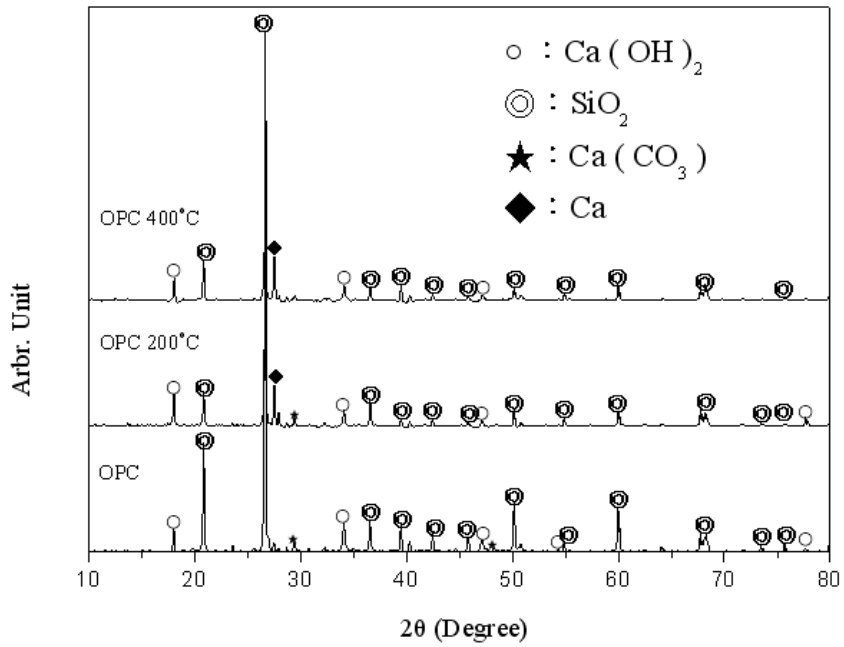


圖 4-19 混凝土 XRD 分析結果

(資料來源：本研究整理)

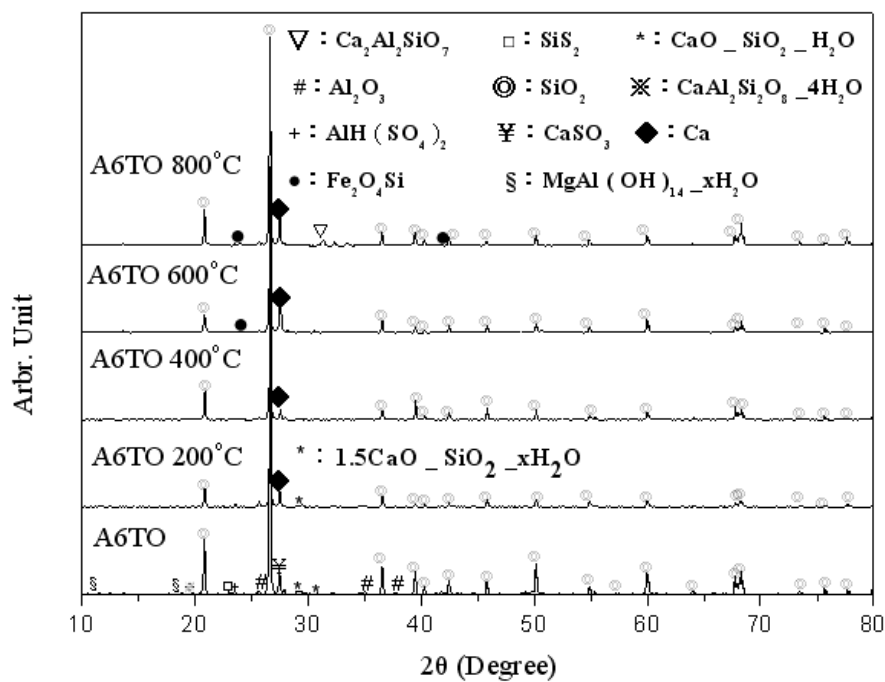


圖 4-20 鹼活化爐石粉混凝土 XRD 分析結果

(資料來源：本研究整理)

第五章結論與建議

第一節 前言

水淬高爐石粉的鹼活化反應，取決鹼液的應用及調製，而鹼活化混凝土在反應過程中，亦會產生速凝及長度變化等問題。本計畫針對以上問題透過文獻，選擇 NaOH 與 Na_2SiO_3 採用等兩種鹼液設定鹼模數比定為 0.75，並依照爐石粉重量 4 %、5 %、6 % 決定鹼活化劑中 Na_2O 含量，來調製鹼活化劑，皆得到激發不錯的效果。同時採用 H_3PO_4 調製緩凝劑用量，並於試驗結果提出最佳使用比例。再將試體放置大氣、飽和石灰水溶液(相對溼度 100%)、蒸氣(相對溼度 80%、溫度 60 °C)等三種不同環境養護，提出適當之抗試體長度變化改善方案。經過系列調製與設計流程，完成鹼活化混凝土配比設計，最後透過抗壓、劈裂、加速氯離子滲透、MIP、透水、耐火、X 光繞射分析及 SEM 微觀觀察等多項試驗，針對鹼活化爐石粉混凝土之力學特性、耐火特性、耐久特性提出結論與建議。

第二節 結論

1. 鹼活化爐石粉混凝土於飽和石灰水溶液與蒸氣環境中養護，相較於大氣中養護能減少分別約 55 % 及 23 % 的長度變化。而鹼活化爐石粉混凝土相較於 OPC 長度變化約高 3 倍。
2. 緩凝劑(H_3PO_4)用量與鹼活化劑中 Na_2O 含量 4%、5%、6% 當量有關，約略成一直線，當 Na_2O 增加 1 % 含量時，緩凝劑(H_3PO_4)需增加 20 %，才能得近似 120 分鐘的初凝時間。
3. 鹼活化爐石粉混凝土置蒸氣(相對溼度 80 %、溫度 60 °C)環境中養護，其抗壓強度、劈裂強度，防水性，氯離子穿透總電荷量皆優於 OPC，其中以 Na_2O 添加 6 % 當量之鹼活化爐石粉混凝土最明顯，抗壓強度增加約 4.6 倍、劈裂強度約增加 28 %、滲水量約減少 1 %~23 %、氯離子穿透總電荷量約降低 50 %。

4. 當鹼活化爐石粉混凝土置高溫 200~800°C 燒 1 小時，皆會因為溫度增加而使得強度遞減。
5. 試體以 200°C 燒 1 小時後，表面會呈現明顯偏紅現象，內部則呈現偏綠現象，當溫度於 400°C 至 800 °C 時，偏紅現象會逐漸往內拓展加深，且 XRD 圖譜在 600°C 位置，亦出現 $\text{Fe}_2\text{O}_4\text{Si}$ 等化合物的峰，而溫度在 800 °C 時， $\text{Fe}_2\text{O}_4\text{Si}$ 等化合物的峰數量有增加的趨勢，所以推測顏色變化現象，可能是試體受到溫到影響生成 $\text{Fe}_2\text{O}_4\text{Si}$ 成分所致。
6. 由試驗結果推估當溫度上升至 200°C 及 400°C，試體於定溫燒 1 hours 時，鹼活化混凝土成分中，部分化合物中水、硫、碳等元素，可能會被燒失而產生分解現象。

第三節 建議

立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：國立台灣海洋大學

蒸氣環境中養護 28 天齡期發現，當養護齡期增加鹼活化劑中 Na_2O 含量 6 % 之鹼活化爐石粉混凝土及 OPC，基本上總孔隙率亦無明顯差異，而鹼活化劑中 Na_2O 含量 4 % ~ 5 % 之鹼活化爐石粉混凝土，則總孔隙率出現遞增之現象，如圖 4-13、圖 4-14 所示。該現象就未來鹼活化爐石粉混凝土推廣應用，一項值得深入探討研究及改善的，因此建議未來有關機關或學者，能夠針對鹼活化爐石粉混凝土結構之緻密性，進行更深入之研究，以利鹼活化爐石粉混凝土推廣應用之可行性。

立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：國立台灣海洋大學

當溫度在 200°C ~ 400°C (升溫速率約 6 ~ 7 °C/ mins) 時，試體於定溫燒 1 hours，OPC 抗壓強

度於會有增加之現象，而當溫度在 $600^{\circ}\text{C} \sim 800^{\circ}\text{C}$ 此時試體會產生爆裂現象。此現象攸關混凝土構造物之耐火性及安全性非常值得重視及深入探討，因此建議未來能夠有學者或相關研究機關針對此項問題進行探討與研究。

立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：國立台灣海洋大學

鹼活化爐石粉混凝土之重量損失，整體而言是較低於 OPC 的，但就試體抗壓強度而言，其抗壓強度與抗壓強度折減係數試驗結果，起起浮浮似乎未有一個趨勢性。因此本試驗在此部分僅能依前述概估，鹼活化爐石粉混凝土之抗硫酸鹽滲透可能優於 OPC，詳細判斷建議未來學者，能針對此項議題進行更深入之研究與探討。

長期性建議

主辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署、經濟部標準檢驗局

協辦機關：行政院各部會相關主管機關

目前國內鹼活化爐石粉混凝土的工程應用尚未普及，建議未來可規劃鹼活化爐石粉混凝土工程應用推廣講習，並利用試辦公共工程，確認鹼活化爐石粉混凝土於營建工程上應用的可行性與效益性，以達到減少卜特蘭水泥用量，達到改善環境污染與促進永續發展之目標。

附錄一 期初審查會議建議與回應

蘇教授南	
1. 本研究係用矽酸鈉、碳酸鈉及氫氧化鈉來作鹼活化劑，對未來施工人員及設備是否有安全或損耗之虞。	調製鹼溶液時應特別留意，混入混凝土中與一般卜特蘭混凝土影響性差異不大。
2. 請問目前國際上實際應用鹼活化劑加到混凝土中的工程案例多寡？其具體成果。	1950年代烏克蘭曾使用鹼活化爐石粉混凝土做為房屋建築材料。
張教授大鵬	
鹼活化爐石粉混凝土的鹼活化劑不同(NaOH、NaCO ₃ 、NaSiO ₂)所造成的價格及成本探討。	材料成本分析將納入研究範圍，並將考量節能減碳之長期效益。
邱顧問昌平	
1. 以強鹼激化水淬爐石粉之膠結性以之製作鹼活化爐石粉混凝土。本研究之重點在探討鹼活化劑之配方以及緩凝、減少收縮之方法。此兩項已需不少試驗工作，配比設計及力學性等應為重點，防火及耐火可不作。	本計畫擬遵照委員建議，著重於緩凝及減少收縮方法。
2. 5.煉鋼之原礦砂產地不同，產生之水淬爐石粉成分也就有所不同，故充分了解其成分對上述之配方等試驗即成為重要因素？	水淬高爐石粉影響鹼活化爐石粉混凝土特性的主要成分及相關機理將為本計畫的主要研究項目。
石建築師正義	
1. 可否加入鹼活化爐石粉混凝土坍度的研究，以瞭解其施工性。	坍度需求為本研究必要之項目。
2. 建議研究計畫中明示係以配比試驗訂出不同力學性，或以不同力學性訂出其配比，並明示進行力學性或配比試驗的範圍。	本研究擬訂之目標強度為 6000psi，依此進行配比設計及相關性能探討。

附錄二 期中審查會議建議與回應

邱顧問昌平	
1. 爐石粉經鹼活化後之膠結性大為提高，本研究之重點在試驗研究鹼活化劑之最佳配比，故值得研究。	感謝委員意見。
2. 鹼活化劑之配比試驗係採定量之 Na_2SiO_3 (如 32.6 kg/m^3)，而改變 NaOH 之用量 (25.1 kg/m^3 、 18.6 kg/m^3 、 14.5 kg/m^3 及 11.2 kg/m^3) 4 種，文中請不吝述“定量 Na_2SiO_3 ”，以便讀者得以知道重點，故 p.15 中之拌合液(S)並非只有 NaOH 而已。另外，p.16 之及表 3-2 中之拌合液(S)為何不同？亦請說明之。	本研究採之矽酸鈉其液固比為 1.27。根據矽酸鈉液固比之關係調整拌合水用量，因此在配比設計過程，矽酸鈉用量改變，拌合水用量也會跟著改變。
3. 第四章中 4-2-2 節鹼模數 ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) 之定義及物理意義等，請先說明之。	矽酸鈉溶液加入氫氧化鈉和水，得到模數與 SiO_2 濃度相近的溶液，以 Na_2O 關係幾乎是相同的。當 Na_2O 濃度增加，表示矽酸根離子聚合度會變小。
4. 專業文字及名詞請由文中先行交代，而非由表、圖中尋之。	以遵照辦理。
5. 表 4-1 之試驗結果，在第三章未見試驗計劃。為何 Modulus 由 2.05 至 0.49；又 SiO_2 及 Na_2O 是混合在一起或個別分開？故在圖 4-4 至圖 4-9 中 X 軸座標有表示混合也有表示分開，請說明之。	Modulus 主要以試誤法下去施作，而 SiO_2 及 Na_2O 是以混合方式下去調配，而圖中 X 軸座標皆為混合。
林教授文山	
1. 本研究主要探討，利用水淬高爐石粉取代水泥所製成之混凝土工程性質。試驗項目繁多，工作量不少，目前已完成抗壓強度及初、終凝之試驗成果。	本研究以獲致鹼活化液與緩凝劑配比，以及降低長度收縮之方法，也制定出施作流程並評估力學、防火、耐久性。
2. 抗壓試驗已完成 3、7、14 天之強度試驗，各齡期之強度由幾個試體平均值試驗結果，報告中應說明之。	本計畫各項試驗均至少，使用 3 顆以上之試體取平均值。
3. 試驗計畫中，混凝土抗氯離子穿透能力試驗以 CNS14795 方法規劃，而試驗設備為 RCPT，其差異性為何？使用何者？	CNS 14795 快速氯離子滲透試驗，其英文為 (Rapid Chloride Permeability Test, RCPT) 故此二者為相同試驗方法。
4. 研究內容是否有包含防火性質，若有請於	本研究以完成防火性試驗，且在報告內容中以添

<p>第三章試驗計畫與方法加入防火試驗，若無，請於第一章研究目的及第五章後續工作中刪除防火試驗。</p>	<p>加防火試驗計畫與方法。</p>
<p>5. 本案符合預期成果需求。</p>	<p>感謝委員意見。</p>
<p>中華民國結構工程技師公會全聯會 陳技師正平</p>	
<p>1. 目前工程實務上採用飛灰、爐石粉及水泥各 1/3 之配比，常發生爐石粉上浮的現象，是否鹼活化劑不足的現象。</p>	<p>1/3 卜特蘭水泥所產生 OH⁻的濃度不足，無法完全激發高爐石粉，而導致爐石上浮現象發生。</p>
<p>2. 水淬高爐水泥對鋼筋保護鈍態膜之效果與卜特蘭 I 型水泥是否相同，尤其加入緩凝劑磷酸之影響如何？</p>	<p>本計畫未探討混凝土中鋼筋鈍態膜之問題，因此希望未來相關單位能針對該問題列入研究考量。</p>
<p>3. 水淬高爐水泥之耐火性是否符合現行規範？</p>	<p>目前水淬高爐水泥尚未有耐火性之相關規範，研究發現混凝土 600°C 以上產生爆裂，而鹼活化爐石混凝土到 800°C 時強度可達 3MPa。</p>
<p>台灣省建築材料商業同業公會聯合會 王總幹事榮吉</p>	
<p>1. 本研究針對鹼活化爐石粉混凝土調製之配方流程，建置策略程序及方法是一項正確的研究方向。</p>	<p>本研究方法分為三階段，第一階段調製鹼活化液配比，第二階段為找出緩凝劑較佳的添加量，第三階段綜合以上結果製作鹼活化爐石混凝土。</p>
<p>2. 於營建材料之研究應考量節能減碳及永續發展，並減少使用卜特蘭水泥之使用量，且將相關聯之營建材料的耐久性、配比組成等分析，請一併納入研究。</p>	<p>本研究使用高爐石粉 100% 代替卜特蘭水泥達到節能減碳之目的，且鹼活化爐石混凝土相關力學、防火、耐久性試驗以於本研究中初步完成。</p>

附錄三 期末審查會議建議與回應

委員意見	回應與辦理情形
高教授健章	
1. 添加鹼活化劑、緩凝劑以及環境條件之改變(溫度、濕度)，則所需費用約多少？對此請針對經濟性略加補述，以供參考。	依據試驗室小量採購，每立方公尺鹼活化爐石混凝土使用的鹼液及緩凝劑，所需費用約 500 元。未來若大量生產採購，費用應可降低。
2. 長度變化大於 OPC 者，此對工程應用有何正負面影響，宜略加討論之。	若構件受束制，長度變化大時，可能會產生內張力而使混凝土開裂，所以，使用鹼活化爐石混凝土時，應特別注意收縮問題，利用試驗數據，推估內應力並採行適當措施，以避免裂縫發生，影響構件外觀及耐久性。
3. 本年度預期成果已大致完成。	感謝委員意見。
王技師亭復	
1. CNS15286 水硬混合水泥標準中，已規定高爐爐渣或卜作嵐材料或以上兩者之 70%以上含量，與卜特蘭水泥混合，或以高爐爐渣與石灰等製成水泥。本計畫與上述該標準之水泥，其優劣點為何？請說明之。	鹼活化爐石粉混凝土係利用水淬高爐石粉完全取代卜特蘭水泥作為膠結材料的混凝土，如其性能符合工程需求，為再生材料得充分利用，可達到節能減碳之效益。
2. 本計畫為何不先以高爐爐渣水泥壘料(水泥漿或水泥砂漿)試驗其物理性質，例如：熱膨脹、乾縮、水合熱、抗硫酸鹽侵蝕(膨脹量)、空氣含量及凝結時間等與卜特蘭水泥及水硬性混合水泥作比較。	鹼活化爐石粉砂漿之研究，已有相關研究成果，本研究係延續前人試驗結果，進行水淬高爐石粉混凝土研究。
3. 高爐爐渣若再水淬過程添加鹼活化劑(Na_2SiO_3 、 NaOH 或 Na_2CO_3)及緩凝劑 H_3PO_4 ，則其成本及穩定性是否會高出水硬性混合水泥，宜予評估。	1.感謝委員意見。 2.該問題答覆如前。
4. 本計畫若獲得成果，則 CNS3090 預拌混凝土標準“材料一節”之「水泥」部份將予修訂。	感謝委員意見。本計畫為鹼活化爐石粉混凝土特性的初步研究，將來若有更完整之試驗數據，應可做為日後修訂 CNS 之參考資料。

石建築師正義	
1. 有無檢討過，像桃園自來水管工程回填爐渣之環保性問題。	本計畫使用之水淬高爐石粉，為煉鐵後之副產物，與桃園自來水管工程回填爐渣不同，無環保的問題。同時本研究還採用 MS、XRD 進行元素與成分分析，確保其品質。
2. P.42 試體長度變化量與混凝土的乾燥收縮率(0.0006~0.0008)相當，另外，請注意體積大小的乾燥率與時間關係。以 15cm 厚混凝土為例，到 882 天候內部濕度還達到約 80%，45cm 厚混凝土體 882 天後約為 85%。此等現象將來都會影響到結構體龜裂程度的大小。因此建議加強將來對於鹼活化爐石與混凝土乾燥收縮的研究。	感謝委員意見。未來將持續進行此方面之研究
3. 用於結構體上時，因為有鋼筋拘束的關係，其乾燥收縮行為將會與單純鹼活化爐石混凝土不同。建議將來在實驗時，將此種因素列入考慮。	感謝委員意見。
4. 本研究符合預期成果需求。	感謝委員意見。
台灣省建材材料商業同業公會聯合會 王總幹事榮吉	
1. 本協同研究案，其研究方法、過程、結論及所提建議項目，大致均已符合本計畫的研究目的。	感謝委員意見。
2. 目前國內鹼活化爐石混凝土尚未實際普遍適用於國內公共工程之應用，未來能研究加強實際應用之可行性、執行之效益評估及改善環境污染，減少卜特蘭水泥用量的研究與比較。	感謝委員意見。

參考書目

- [1] Talling, B., Brandstetr, J., “Present State and Future of Alkali-Activated Slag Concret es” , Proc. 3rd Int. Conf. on Fly Ash,Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Tron dheim, Norway,ACI SP-114 2, American Concrete Institute, pp. 1519-1546, 1989.
- [2] Roy, D.M., “Alkali-activated Cements: Opportunities and Cha-llenges” ,Cement and C oncrete Research, Vol. 29,No.2,pp. 249-254,1999.
- [3] J.Francis Young, “Concrete” , Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs,N.J., 1981.
- [4] 史才軍, “鹼激發水泥和混凝土” , 化學工業出版社, 2008.
- [5] Palomo, A., Grutzeck, M.W., Blanco, M.T. “Alkali-ActivatedFly Ash a Cement for t he Future” ,Cement and Concrete Re-search, Vol. 29, pp.1323-1329,1999.
- [6] Mehta, P.K., “Concrete Structure, Properties and Materials” , Prentice-Hall Editor, Ne w Jersey, pp.25-36,1986.
- [7] 蒲心誠, 甘昌成, 何桂, 白光, 吳禮賢, 陳明珠, “鹼爐石粉混凝土耐久性研究” , 混凝土, pp.13~20.
- [8] Huanhai, Z., Xuequan,W. and Zhongzi,X., “Kinetic Study on Hydration of Alkali-Acti vated Slag” ,Cement and Concrete Re-search, Vol. 23 ,pp.1253-1258,1993.
- [9] 許桂銘, “混凝土配比設計” , 高立圖書有限公司, 1999.
- [10] 曾偉林, “鹼活化爐石粉基質材料製程與基本特性之探討” , 國立台灣海洋大學碩士 論文, 2001,
- [11] Fernandez-Jimenez, A., Palomob, J.G, Puertas, F., “Alkali-Activated Slag Mortars M echanical Strength Behaviour” , Cement and Concrete Research Vol.29 ,pp.1313-1321, 1999.
- [12] Sun Caijun, L.Day, Robert, “Some Factors Affecting Early Hydration of Alkali-Slag Cements” , Cement and Concrete Research ,Vol. 26, pp.439-417.
- [13] 蒲心誠, 楊長輝,“高強鹼爐渣(JK)流態混凝土研究”,混凝土, pp.18-30,1994.
- [14] Caijun, S., “Strength, Pore Structure and Permeability of Alkali-Activated Slag Morta rs” , Cement and Concrete Research, Vol.26, pp.1789-1799,1999.

- [15] Collins, F., Sanjayan, J.G., “Effect of Pore Size Distribution on Drying Shrinkage Properties of Alkali-Activated Slag Concrete” , Cement and Concrete Research, Vol.30,pp. 1401-1406,2000.
- [16] Wang, S.D., Scrivener, K.L., Pratt, P.L., “Factors Affecting the Strength of Alkali-Activated Slag” , Cement and Concrete Research ,Vol.24, pp.1033–1043,1994.
- [17] Bakhare, T. Sanjayan, J.G. ,Cheng, Y.-B., “ Effect of Elevated Temperature Curing on Properties of Alkali-Activated Slag Concrete” , Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp.1161-11625,1999.
- [18] Taylor, H.F.W. ,” Cement Chemistry”, Academic Press, London, 1990.
- [19] Kjellsen, K.O. ,Detwiler, R.J., Gjorv, O.E. , “Backscattered Electron Imaging of Cement Pastes Hydrated at Different Temperatures” , Cement and Concrete Research , Vol.20 ,pp. 308-311,1990.
- [20] Glukovski,V.D., “Alkali-Earth Binders and Concretes Produced with them” ,Visheka shkola, Kiev, USSR, in Russian ,1979.
- [21] Gong,C., Yang,N., “Effect of Phosphate on The Hydration of Alkali-Activated Red Mud-Slag Cementitious Material” , Cement and Concrete Research, Vol.30 ,pp.1013-1016, 2000.
- [22] Davidovits, J., “What Future for Portland Cement? Symposium on Cement and Concrete in Global Environment” , Chicago, Illinois, USA,pp. 10-11, Mar. 1993.
- [23] Collins,F., Sanjayan, J.G., “Effect of Pore Size Distribution on Drying Shrinkage of Alkali-Activated Slag Concrete” , Cement and Concrete Research Vol.30,pp. 1401-1406,2000.
- [24] 方銜尉,爐石粉細度與膠結材組合對混凝土性質影響之研究,2008
- [25] T. Bakhareva,* , J.G. Sanjayana, Y.-B. Chengb ”Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete”2000