

# 使用爐渣(石)對於混凝土力學與 耐久性能之研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 101 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)



# 使用爐渣(石)對於混凝土力學與 耐久性能之研究

受委託者：國立臺灣海洋大學

研究主持人：黃 然

協同主持人：紀茂傑

研 究 員：陳君弢

研究助理：蔡嘉榮

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國 101 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)



## 目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	XI
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.....	3
第三節 研究方法.....	4
第二章 蒐集資料、文獻分析 .....	7
第一節 鐵、鋼製程與爐渣.....	7
第二節 鐵、鋼渣之應用性與相關研究.....	17
第三節 使用爐渣之相關規定.....	27
第三章 試驗計畫 .....	37
第一節 試驗計畫流程.....	37
第二節 試驗變數、配比及材料.....	38
第三節 試驗方法、儀器或設備.....	50

第四章 試驗結果與討論 .....	59
第一節 鐵、鋼渣水泥砂漿試驗結果.....	59
第二節 鐵、鋼渣混凝土試驗結果.....	95
第三節 混合鋼鐵渣水泥砂漿試驗結果.....	100
第四節 節能減碳效益分析.....	102
第五章 結論與建議 .....	105
第一節 結論.....	105
第二節 建議.....	106
附錄一 期初審查意見及回應 .....	109
附錄二 期中審查意見及回應 .....	113
附錄三 期末審查意見及回應 .....	117
參考書目.....	121

## 表次

表 2-1 世界鋼產量(2000 至 2009 年) .....	11
表 2-2 世界鐵產量(2000 至 2009 年) .....	15
表 2-3 鋼鐵爐渣資源化近況 <sup>[29]</sup> .....	21
表 2-4 經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式 <sup>[40]</sup> .....	27
表 2-5 混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐攪和物化學成分標準規定(CNS 3036)	31
表 2-6 混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐攪和物物理性質標準規定(CNS 3036)	31
表 2-7 水淬高爐爐渣化學成分標準規定(CNS 12223) .....	32
表 2-8 水淬高爐爐渣物理性質標準規定(CNS 12223) .....	33
表 2-9 混凝土及水泥砂漿用水淬高爐爐渣粉化學成分標準規定(CNS 12549)	33
表 2-10 混凝土及水泥砂漿用水淬高爐爐渣粉物理性質標準規定(CNS 12549) ..	34
表 2-11 道路用高爐爐渣之粒徑標準規定 .....	35
表 2-12 道路用高爐爐渣之物理性質標準規定(CNS 11824) .....	35
表 2-13 道路用高爐爐渣之化學成分標準規定(CNS 11824) .....	35
表 3-1 鐵、鋼渣水泥砂漿試驗配比 .....	39
表 3-2 鐵、鋼渣混凝土試驗配比 .....	40
表 3-3 混合鋼、鐵渣水泥砂漿配比 .....	40
表 3-4 水泥化學成分 .....	42
表 3-5 鐵渣化學成分 .....	42

表 3-6 鋼渣化學成分 .....	43
表 3-7 細粒料篩分析 .....	43
表 3-8 粗粒料篩分析 .....	44
表 3-9 累積通過電量對氯離子穿透指標評估表 .....	55
表 4-1 混凝土組成材料碳排放量 <sup>[53]</sup> .....	102

## 圖次

圖 1-1 研究流程圖 .....	5
圖 2-1 鐵渣產出及再利用示意圖 .....	8
圖 2-2 鋼渣產出流程圖 .....	10
圖 2-3 鐵、鋼爐渣產出量及處理示意圖 <sup>[6]</sup> .....	17
圖 2-4 全球水泥產量(含預估值) <sup>[25-26]</sup> .....	18
圖 2-5 大氣中二氧化碳、氧化碳及甲烷濃度成長趨勢圖(~2005 年) <sup>[27]</sup> .....	19
圖 2-6 卜特蘭水泥與爐渣三相圖 <sup>[6,20,28]</sup> .....	20
圖 2-7 普通水泥砂漿與鋼渣混合水泥砂漿成分分析 <sup>[21]</sup> .....	22
圖 2-8 普通水泥砂漿與鋼渣混合水泥砂漿 SEM 圖(X2500) <sup>[21]</sup> .....	23
圖 2-9 南星計畫區域示意圖 <sup>[34]</sup> .....	24
圖 2-10 國道六號南投段示意圖 <sup>[35]</sup> .....	25
圖 2-11 關西國際機場 <sup>[36]</sup> .....	26
圖 2-12 明石海峽大橋 <sup>[37]</sup> .....	27
圖 3-1 試驗流程圖 .....	38
圖 3-2 鋼渣粒徑分佈圖(細度 4000 cm <sup>2</sup> /g) .....	44
圖 3-3 鋼渣粒徑分佈圖(細度 6000 cm <sup>2</sup> /g) .....	45
圖 3-4 鋼渣粒徑分佈圖(細度 10000 cm <sup>2</sup> /g) .....	45
圖 3-5 水淬高爐渣外觀 .....	46

圖 3-6 轉爐爐渣外觀 .....	46
圖 3-7 研磨後之轉爐爐渣外觀 .....	47
圖 3-8 電弧爐爐渣外觀 .....	47
圖 3-9 研磨後之電弧爐爐渣外觀 .....	48
圖 3-10 天然粒料外觀 .....	48
圖 3-11 篩後之電弧爐鋼渣外觀 .....	49
圖 3-12 篩後之氣冷高爐鐵渣外觀 .....	49
圖 3-13 混凝土透水試驗裝置 .....	50
圖 3-14 圍塘試驗裝置 .....	51
圖 3-15 圍塘試驗試體處理 .....	52
圖 3-16 加速碳化箱 .....	53
圖 3-17 加速氯離子滲透試驗裝置 RCPT .....	55
圖 3-18 掃描式電子顯微鏡(SEM S-4800) .....	56
圖 3-19 X 光繞射分析儀(XRD) .....	57
圖 3-20 流度台 .....	57
圖 4-1 轉爐鋼渣水泥砂漿流度 .....	60
圖 4-2 轉爐鋼渣水泥砂漿流度照片(10000 cm <sup>2</sup> /g) .....	60
圖 4-3 普通水泥砂漿流度照片 .....	61
圖 4-4 電弧爐鋼渣水泥砂漿流度 .....	62
圖 4-5 電弧爐鋼渣用量與水泥砂漿流度關係圖 .....	62

圖 4-6 水淬高爐鐵渣水泥砂漿流度 .....	63
圖 4-7 轉爐鋼渣水泥砂漿凝結時間 .....	64
圖 4-8 不同取代量之轉爐鋼渣水泥砂漿初終凝時間 .....	65
圖 4-9 不同細度之轉爐鋼渣對水泥砂漿初終凝之影響 .....	66
圖 4-10 電弧爐鋼渣水泥砂漿初終凝時間 .....	67
圖 4-11 不同細度電弧爐鋼渣水泥砂漿初終凝時間 .....	68
圖 4-12 水淬高爐鐵渣水泥砂漿初終凝時間 .....	69
圖 4-13 不同取代量之水淬高爐鐵渣水泥砂漿初終凝時間 .....	70
圖 4-14 鐵、鋼渣粉水泥砂漿初終凝時間 .....	71
圖 4-15 轉爐鋼渣水泥砂漿抗壓強度 .....	72
圖 4-16 轉爐鋼渣水泥砂漿試體膨脹及龜裂(細度 4000 $\text{cm}^2/\text{g}$ ).....	73
圖 4-17 轉爐鋼渣粉水泥砂漿試體膨脹及龜裂(細度 6000 $\text{cm}^2/\text{g}$ ).....	73
圖 4-18 轉爐鋼渣細度及添加量抗壓強度關係圖(91 天) .....	74
圖 4-19 轉爐鋼渣水泥砂漿不同養護齡期抗壓強度發展圖 .....	74
圖 4-20 電弧爐鋼渣水泥砂漿抗壓強度 .....	75
圖 4-21 電弧爐鋼渣細度及添加量抗壓強度關係圖 91 天 .....	76
圖 4-22 電弧爐鋼渣水泥砂漿不同養護齡期抗壓強度關係圖 .....	76
圖 4-23 水淬高爐鐵渣砂漿抗壓強度 .....	77
圖 4-24 各細度之水淬高爐鐵渣砂漿抗壓強度關係圖(91 天) .....	78
圖 4-25 水淬高爐鐵渣水泥砂漿不同齡期抗壓強度關係圖 .....	78

圖 4-26 氯離子含量與滲透深度曲線.....	79
圖 4-27 氯離子擴散速率 .....	80
圖 4-28 普通水泥漿試體 SEM 圖(X 3000).....	81
圖 4-29 轉爐鋼渣取代量 10 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000).....	81
圖 4-30 轉爐鋼渣取代量 30 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000).....	82
圖 4-31 轉爐鋼渣取代量 50 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000).....	82
圖 4-32 轉爐鋼渣取代量 70 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000).....	83
圖 4-33 轉爐鋼渣漿試體 SEM 圖(X 3000).....	83
圖 4-34 轉爐鋼渣漿試體 SEM 圖(X 20000).....	84
圖 4-35 轉爐鋼渣水泥砂漿表面外觀(取代水泥 50 %).....	85
圖 4-36 轉爐鋼渣水泥砂漿試體(取代水泥 50 %)剖面圖 .....	85
圖 4-37 轉爐鋼渣水泥砂漿之白色顆粒 SEM 圖(X100).....	86
圖 4-38 轉爐鋼渣水泥漿不同養護齡期之水化產物 SEM 圖 <sup>[19]</sup> .....	86
圖 4-39 電弧爐鋼渣取代量 10 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000).....	87
圖 4-40 電弧爐鋼渣取代量 30 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000).....	88
圖 4-41 電弧爐鋼渣取代量 50 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000).....	88
圖 4-42 電弧爐鋼渣取代量 70 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000).....	89
圖 4-43 電弧爐鋼渣 SEM 圖(X 3000).....	89
圖 4-44 電弧爐鋼渣漿試體 SEM 圖(X 3000).....	90
圖 4-45 水淬高爐鐵渣取代量 10 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000).....	91

圖 4-46 水淬高爐鐵渣取代量 70 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000).....	91
圖 4-47 轉爐鋼渣不同取代量之水泥漿 X 光繞射分析 .....	92
圖 4-48 電弧爐鋼渣不同取代量之水泥漿 X 光繞射分析 .....	93
圖 4-49 水淬高爐鐵渣不同取代量之水泥漿 X 光繞射分析 .....	94
圖 4-50 鐵、鋼渣混凝土抗壓強度 .....	95
圖 4-51 鐵、鋼渣混凝土劈裂強度 .....	96
圖 4-52 鐵、鋼渣混凝土 RCPT 結果 .....	97
圖 4-53 鐵、鋼渣混凝土加速碳化試驗結果 .....	98
圖 4-54 鐵、鋼渣混凝土抗硫酸鹽試驗結果 .....	99
圖 4-55 鐵、鋼渣混凝土透水試驗結果 .....	100
圖 4-56 鐵、鋼渣水泥砂漿抗壓強度(取代量 30 %) .....	101
圖 4-57 鐵渣、鋼渣混合之水泥砂漿抗壓強度(電弧爐鋼渣) .....	101
圖 4-58 鐵渣、鋼渣混合之水泥砂漿抗壓強度(轉爐鋼渣) .....	102
圖 4-59 不同取代量之飛灰及爐石混凝土碳排放量 <sup>[53]</sup> .....	103



## 摘要

**關鍵詞：鐵渣、鋼渣、耐久性、節能減碳**

### 一、研究緣起

煉鐵過程中會產生高爐石(渣)(又稱鐵渣)，依其冷卻方式可分為水淬與氣冷高爐石(渣)兩類；煉鋼過程中會產生鋼渣，依使用的煉鋼爐可分為轉爐鋼渣與電弧爐鋼渣等。水淬高爐石為非結晶結構具有活性，主要化學成分為  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{CaO}$  等，研磨至一定細度的水淬高爐石粉，可代替部分卜特蘭水泥做為混凝土的膠結料，應用方式可分為(1)於水泥廠製作爐石混合水泥，(2)於預拌廠拌製混凝土時加入混合及(3)利用鹼液激發水淬高爐石粉製作爐石混凝土。在節能減碳永續的需求下，大量減用卜特蘭水泥是目前混凝土科技研發的主要課題，適量的使用爐石除可減用水泥或天然粒料外，亦能增進混凝土性能如耐久性等，符合永續混凝土或生態混凝土的需求。

### 二、研究方法與過程

本研究主要探討水淬高爐石做為混凝土膠結料的技術內涵，包括使用量、使用條件與限制條件等。另外探討兩渣(鐵渣與鋼渣)混合應用的可行性與效益性。利用適當的試驗計畫，訂定試體進行試驗。試驗變數包括水淬高爐、鋼渣(電弧爐鋼渣、轉爐鋼渣)細度、使用方式、鐵渣與鋼渣的用量(代替水泥或粒料的比例)，再利用相關力學試驗(如抗壓試驗、劈裂試驗等)、物理或耐久試驗及微觀觀察(如 SEM、X 光繞射分析等)，綜合評估爐渣(石)對於混凝土力學與耐久性的影響(RCPT、加速碳化試驗、圍塘試驗等)。

### 三、重要發現

水淬高爐石(鐵渣)、轉爐鋼渣及電弧爐鋼渣，均可依一定的比例代替部分水泥做為輔助性膠結料，其中鐵渣可以 70 wt % 替代水泥，而鋼渣僅能以 10 wt % 替代水泥；鋼鐵渣混合以 30 wt % (20 % 轉爐鋼渣+10 % 鐵渣，10 % 轉爐鋼渣+20 % 鐵渣) 替代水泥，28 天試體抗壓強度較控制組高，鐵渣及鋼渣細度對於試體 91 天抗壓強度無明顯影響。

#### 四、主要建議事項

##### 建議一

立即可行之建議 — 鐵渣或鋼渣做為混凝土的輔助膠結料或填充料之延續研究

主辦機關：社團法人中華民國建築技術學會、社團法人台灣混凝土學會

協辦機關：國立台灣海洋大學河海工程學系、國立台灣科技大學營建系、

國立交通大學土木系

依本研究試驗結果發現，鐵渣及鋼渣均可做為混凝土的輔助膠凝料，鐵渣可依 70 wt % 替代水泥，而鋼渣以 10 wt % 替代水泥，對水泥砂漿抗壓強度折減約 0.19 %~ 6.75 % 影響甚微，建議日後可進行相關延續性研究，以達開發資源再利用之效益。

##### 建議二

立即可行之建議 — 鋼渣做為混凝土粒料之延續研究

主辦機關：社團法人中華民國建築技術學會、社團法人台灣混凝土學會

協辦機關：國立台灣海洋大學河海工程學系、國立台灣科技大學營建系、

國立交通大學土木系

依本研究試驗結果發現，鐵渣或鋼渣可以做為混凝土的填充料，其中以電弧爐鋼渣表現最佳，或可依 100 vol % 替代天然粗粒料，且較不影響混凝土之抗壓強度，建議日後可進行相關延續性研究，以達開發資源再利用之效益。

##### 建議三

長期性建議 — 創新水泥質複合材料研發

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：社團法人台灣混凝土學會，社團法人台灣區水泥製品同業公會、國立台灣海洋  
大學河海工程學系、國立台灣科技大學營建系、國立交通大學土木系

研究發現，鋼鐵渣混合以 30 wt % 替代水泥，其 28 天抗壓強度皆較控制組高(20 % 轉爐鋼渣+10 % 鐵渣強度增加 5.7 %，10 % 轉爐鋼渣+20 % 鐵渣強度增加 12.03 %)，值得應用推廣，建議可針對混合水泥製程、鋼鐵渣混凝土耐久性或鹼活化爐石粉混凝土特性進行更進一步探討。



## ABSTRACT

**Key Words : steel slag 、 iron slag 、 durability 、 energy saving and emission reduction**

### 1. Background

The slag is the by-product during the iron or steel manufacture. It is either cooled by air or quenched by water. Based on the furnace types used in the process, the steel slag is further classified as the Blast Oxygen Furnace Slag and the Electric Arc Furnace Slag. In general, the water-quenched slag with compositions of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and  $\text{CaO}$  is active and can be used by grinding to replace portions of the Portland cement as the binders in concrete. The applications of the steel slag include: (1) production of the slag cement in the cement industry;(2) production of the ready-mixed concrete with slag addition ; (3) production of the alkali-activated water-quenched slag powders. With the increasing demand for low carbon and sustainability in construction, the ways to reduce the cement use are now important issues in concrete technology. With proper uses of the slag, not only the performance of concrete, such as durability, can be improved but also the consumptions of the cements and natural aggregates in concrete can be reduced so as to meet the requirements for making sustainable or ecological concrete.

### 2. Research Content

The purpose of this study is to explore the applications of the water-quenched steel slag in concrete and focus on the issues of the dosages, ways of addition, and limitation of use. The application of the mixture containing both the steel and iron slag is also studied. The experimental parameters in this study include the fineness, ways of addition, and dosages (proportions to replace the cement or the aggregates) of the slag. The mechanical properties and durability of the concrete with those slag addition are evaluated by the results of mechanical tests (ex. compressive and splitting strength tests), physical properties, durability, and microstructural analyses (ex. SEM, RCPT, and etc.).

### 3. The results of this study are summarized as follows:

- (1) Replacement percentage for Portland cement is around 10 wt. % for steel slag and 70 wt. % for ggbs based on the mortar compressive strength, respectively.

- (2) Flowability of mortar is affected by the fineness of steel slag but not by ggbs.
- (3) Mechanical properties and durability of the concrete with slag replacement for coarse aggregate in concrete are suitable for practical application.
- (4) Design procedure and mix design of slag concrete are proposed.
- (5) Carbon reductions and energy-saving are verified by using slag in concrete.
- (6) Graduate students obtain practical training on research and development on sustainable concrete.

# 第一章 緒論

## 第一節 研究緣起與背景

十八世紀工業革命後，鋼鐵工業奠定堅強基礎。過去二次大戰期間鋼鐵的用途大多用於鐵路工程、武器製造及少部分的民間建設。而今，隨著經濟大幅成長，人類生活水平提升及物資需求增加，許多國家開始進行大規模的科技發展、基礎建設及提高都市化程度，在產業蓬勃發展及國家政策引導下，鋼鐵業在產業發展所占的地位也日益重要。這幾年鋼鐵產量大幅增加，伴隨而來的除了生活水平提升、經濟發展外，人類同時面臨鋼鐵生產所帶來的大量工業廢棄產物，如鐵渣、鋼渣等。根據世界鋼鐵協會所公佈的數據，1996 年全球粗鋼產量約 7.5 億 ton，2009 年粗鋼產量約 12.2 億 ton，13 年間約增加了 1.6 倍，而亞洲是目前世界的鋼鐵中心，其中中國的鋼鐵產量最多，2009 年產量 5.7 億 ton，佔全世界鋼鐵產量的 47%，列居全球第 1，臺灣同年產量 0.16 億 ton 世界排名第 15<sup>[1, 2]</sup>。因此對於工業廢棄物驚人的成長趨勢，有必要找出的利用方案，促使資源有效使用。

爐渣係指各種金屬在萃取及提煉過程所產出的副產品，而各類爐渣是以提煉的方法命名。一般的煉鐵冶煉法都是採用高爐法(blast furnace process)，但有時在冶煉少量生鐵時也可能使用電爐法治煉，因此煉鐵所產出的鐵渣又可稱為「高爐爐渣(blast furnace slag, BFS)」。至於煉鋼的方法大致有轉爐法 (converter process)、電爐法 (electric furnace process)、平爐法 (open hearth process)、及坩堝法 (crucible process) 四種<sup>[3-5]</sup>。其中比較常使用的有轉爐法及電爐法，而採用這兩種方法所產出的鋼渣又稱轉爐爐渣 (blast oxygen furnace slag, BOFS)及電弧爐渣(electric arc furnace slag, EAFS)。高爐爐渣是來自鐵礦、焦炭、石灰石在高爐中煉製鐵水的過程所產出的副產品，平均每生產 1 ton 的鐵水約產出 300 kg 的爐渣；轉爐爐渣則由鐵水、鐵礦、焦炭、石灰石在轉爐中提煉鋼胚所產出的副產品，每生產 1 ton 鋼胚約產出 150 kg 爐渣；至於電弧爐渣是來自於回收的廢棄鋼鐵、生石灰及合金鐵在電弧爐中提煉鋼胚所產出的副產品，每生產 1 ton 鋼胚約產出至少 100~200 kg 的爐渣<sup>[6]</sup>。由於各國在每個製程所使用的原料種類及用量皆有所不同，因此這三種爐渣最大的差異在於成分種類及組成比例，但其主要成分還是以 SiO<sub>2</sub>、CaO 及 MgO 為主<sup>[3, 4, 10]</sup>，另外，提煉鋼或鐵的溫度至少皆在 1400 °C 左右，

冷卻在高溫下所產出的爐渣是無可避免的一項步驟，然而爐渣的冷卻方式與速率對爐渣的性質有相當地影響，爐渣冷卻方式大致可分為氣冷及水淬(水冷)法兩種，氣冷係指爐渣在一般自然環境下冷卻，緩慢的冷卻方式會使爐渣中  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  及  $\text{MgO}$  形成結晶態的 C-M-S 或  $\text{C}_3\text{-M-S}_2$ ，不利水化反應，在營建材料應用上較適合做為級配粒料或填充料，而水冷係指利用噴灑水的方式使爐渣快速冷卻，急速冷卻方式會使  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  及  $\text{MgO}$  來不及反應生成結晶態，進而轉生成為玻璃質，具較高的水化活性，一般在營建材料應用上較適合做為取代水泥的膠結料及填充料<sup>[11]</sup>。

混凝土是目前營建工程材料中使用最多的其中一種，而混凝土的製作需要使用到大量的天然粒料及卜特蘭水泥。如前述，許多國家正積極推動基礎建設、提高都市化程度，因而也導致許多原料過度開挖，可用的資源正逐漸在減少<sup>[12]</sup>，又近幾年全球暖化與氣候變遷的現象已經越來越明顯，如何減少溫室氣體排放，減緩環境持續惡化的問題已受到世界的關注。其中，二氧化碳是造成「溫室效應」的主要原因之一，而水泥在生產的過程中會排放大量的二氧化碳，約佔全球 5%，在美國更是列入三大碳排放來源之一。水泥生產除了二氧化碳排放的問題外，另外還會產出約數百萬 ton 的水泥窯燒粉塵(cement kiln dust, CKD)，嚴重危害到環境及人體健康<sup>[13]</sup>。根據文獻，將鐵渣、鋼渣研磨成粉，可做為取代卜特蘭水泥的輔助膠凝材料(supplementary cementitious materials, SCMs)<sup>[14-18]</sup>，因此如能使用大量的鐵渣及鋼渣來取代混凝土中的膠結料卜特蘭水泥及填充料天然粒料，將有機會同時解決三個問題。

鐵、鋼渣的種類、成分的比值、研磨細度及添加量或取代量，皆有可能影響到混凝土力學性、耐久性等性質<sup>[19-23]</sup>。學者 Tongsheng 將高爐爐渣和轉爐爐渣研磨成平均尺寸 60.24、30.79、15.17、5.74、1.43 $\mu\text{m}$  等 5 種不同粒徑的爐石粉與水泥混合製作水泥漿體，並由試驗結果發現爐石粉的平均粒徑小於 15.17  $\mu\text{m}$  時，會增加水泥漿體早期養護 3 天的抗壓強度成長指數，而後期養護 91 天的抗壓強度成長指數則會下降，整體而言以平均粒徑 15.17  $\mu\text{m}$  表現最佳，最後再分別以水泥重量 30%、50%、60% 取代水泥用量製作水泥漿體，並由抗壓強度試驗結果發現爐石粉以水泥重量 30%、50%、60% 取代水泥時皆有不錯表現，其中以 30% 取代量的表現最佳<sup>[19]</sup>。學者 Luckman 將電弧爐渣研磨成可通過# 200 (平均粒徑約 75  $\mu\text{m}$ )之爐石粉以取代水泥製作混凝土，並由抗壓強度的結果發現其表現可媲美普通混凝土<sup>[20]</sup>。關於取代量的部分，研磨過後的鐵渣依 ASTM C 989 規定，取代量最高可達 70%(水泥重量比)，但 Escalant 曾在研究報告中

表示，工業副產物添加量或取代水泥量的比例過高時，反而會降低混凝土的某些力學性質與耐久性，同時在文中也提到使用 30 %、50 %及 70 %的爐石取代水泥時，結果顯示抗壓強度隨水淬高爐石粉取代水泥量的增加而降低<sup>[24]</sup>。至於鋼渣的添加量方面，有學者建議可添加 10 % ~15 % (水泥重量比)<sup>[25]</sup>。因此本計畫預計將鐵渣及鋼渣研磨成平均粒徑 75、45、15 $\mu\text{m}$  的爐石粉再進行相關之試驗，而在水泥取代量部分預計將研磨後的鐵渣及鋼渣，以水泥重量比 10 %、30 %、50 %及 70%的用量，來取代普通混凝土的水泥。另外在混凝土粒料方面，擬選擇適當的鐵渣及鋼渣粒徑，以天然粒料體積 50 %和 100 %的用量，來取代普通混凝土的天然粒料，最後在控制組則採用水灰比 0.5 之普通混凝土製作混凝土試體。試驗方面除了包括力學和多項的耐久性試驗外，另外也加入許多微觀性質試驗及分析，如 SEM 的微觀觀察和 SEM 附屬的 EDS 元素分析，還有 XRD 的成分分析。本計畫規劃完整系列的各類試驗及分析項目，對於使用爐渣(石)在混凝土力學與耐久性能方面進行深入探討，希望以抽絲剝繭的方式，找出鐵渣及鋼渣應用於混凝土的最佳使用方式，以利營建產業的技術發展，最後期望能夠達到工業廢棄物鐵渣及爐渣轉資源化以達資源再生利用及節能減碳之目的，滿足永續發展的最終目標。

## 第二節 研究目的與範圍

本研究目的與範圍概括為以下四點：

1. 探討以三種不同的爐渣來替代混凝土中水泥或天然粒料的方式及比例。
2. 評估比較三種不同的爐渣(石)混凝土的力學與耐久性。
3. 建立三種不同爐渣(石)混凝土的配比設計及使用準則。
4. 評估比較三種不同爐渣(石)混凝土的節能減碳效益。

### 第三節 研究方法

本計畫初步先蒐集國內外鐵渣、鋼渣其應用於混凝土的相關文獻，透過文獻分析擬定試驗計畫，並依照試驗計畫內容準備試驗材料，進行組合材料相關性質試驗，並依配比設計製作水泥漿、砂漿及混凝土試體，並進行各種試體的後續的力學性質及耐久性並 SEM 微觀觀察與 X 光繞射分析等相關試驗。最後綜合前述之結果進行討論並提出結論與建議，研究流程如圖 1-1 所示。

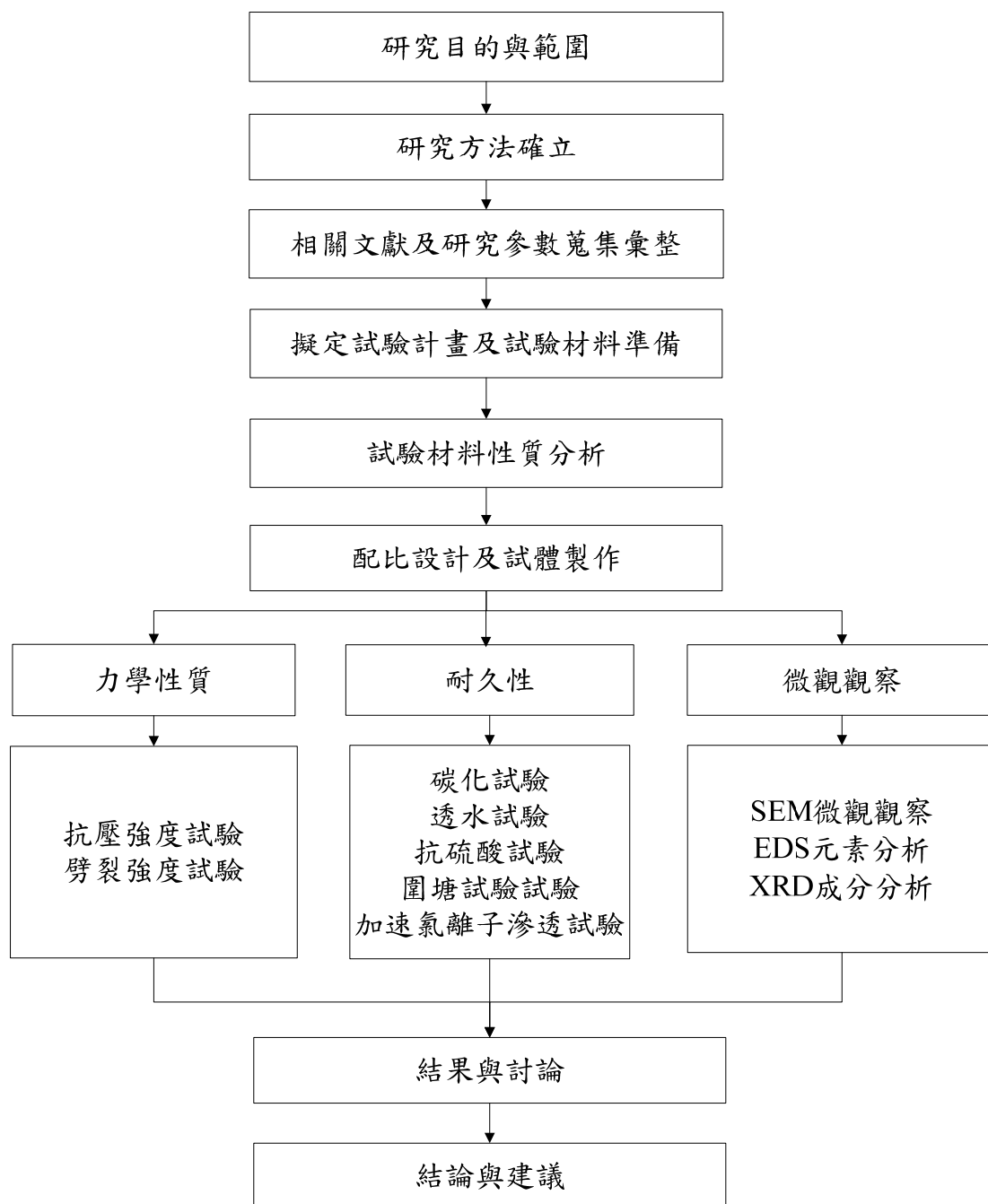


圖 1-1 研究流程圖

(資料來源：本研究繪製)



## 第二章 蒐集資料、文獻分析

### 第一節 鐵、鋼製程與爐渣

#### 2-1-1 鐵、鋼製程與產出

目前將鐵礦石還原成生鐵主要是透過高爐或電弧爐冶煉，而一般較常見的是利用高爐冶煉，冶煉鐵的主要原料除了有鐵礦外，還必須添加適量的焦炭做為還原劑並提供煉製過程中部分熱量，另外也會添加適量的石灰石(或矽石、螢石)做為熔劑將二氧化矽等雜質轉化為爐渣，平均冶煉 1 ton 生鐵需要 1.5~2.0 ton 鐵礦石、0.4~0.6 ton 焦炭、0.2~0.4 ton 助熔劑。由於熔化的鐵液和鐵爐渣比重不同故會分層積存在爐缸中，在各自由不同出口排出，分別得到鐵液及鐵渣。鐵渣依冷卻方法大致又分為氣冷高爐爐渣 (blast furnace slag, BFS)及水淬高爐爐渣 (granulated blast furnace slag, GBFS)兩種，氣冷法是將爐渣堆積於一般自然環境中冷卻，而水冷法則是利用噴灑水的方式加速爐渣的冷卻。

鐵渣的成分主要有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  及  $\text{MgO}$ ，另外還有少量的  $\text{Mn}$ 、 $\text{Fe}$ 、 $\text{S}$  等化合物<sup>[48]</sup>，而氣冷及水冷間的最大差異則是鐵渣中的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  及  $\text{MgO}$  在自然冷卻下會形成的結晶態  $\text{C-M-S}$  或  $\text{C}_3\text{-M-S}_2$ ，其不利水化反應，在營建材料應用上較適合做為級配粒料或填充料。相反的， $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  及  $\text{MgO}$  在急速的冷卻下，來不及反應生成結晶態，進而轉生成為玻璃質，具較高的水化活性，一般在營建材料應用上較適合做為取代水泥的膠結料及填充料<sup>[11]</sup>。

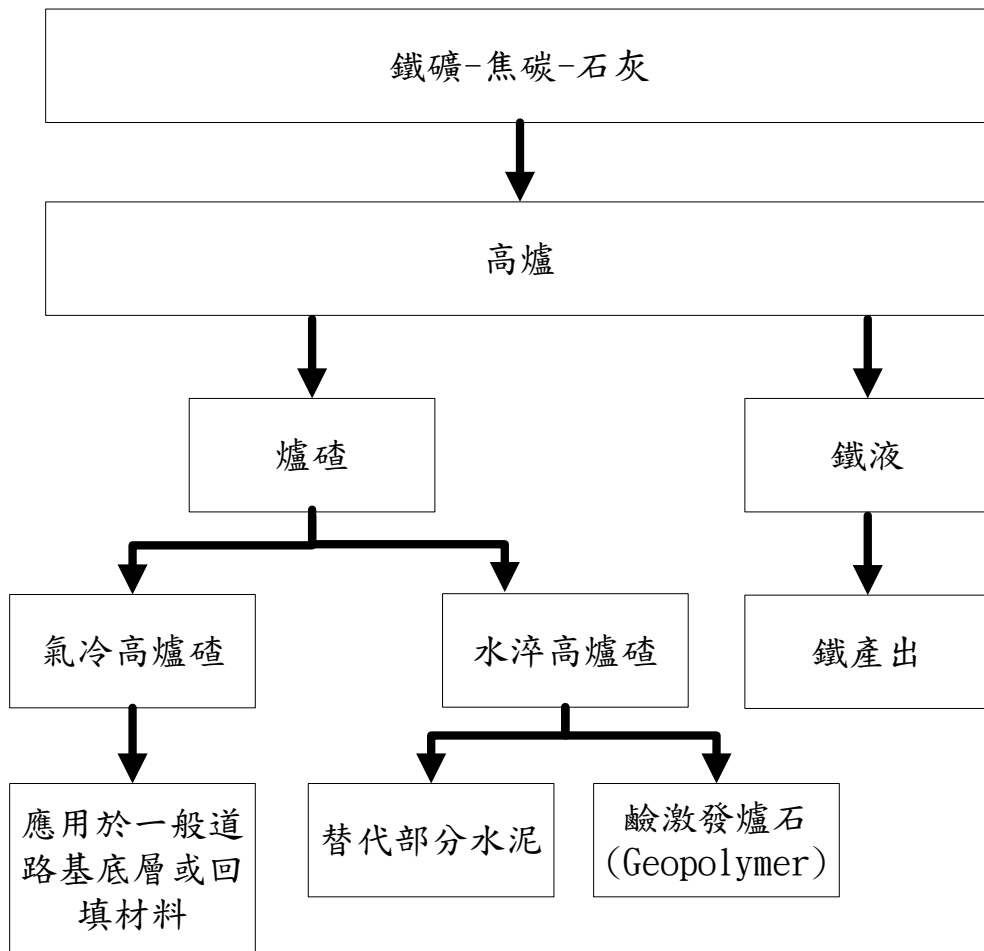


圖 2-1 鐵渣產出及再利用示意圖

(資料來源：本研究繪製)

鋼渣的來源相較於鐵渣較為複雜，圖 2-2 顯示煉鋼的主要原料除了高爐冶煉的生鐵以外，也能來是廢鐵或廢鋼，另外在通氧的過程可能產生大量的氧化渣，又可能若因顧慮鋼含氧量過高，煉鋼時加入生石灰或焦炭等，使氧化物還原產出還原渣，另外也可能因為冶煉的方法不同，需要添加不同的材料(如矽、錳鐵、焦炭、生石灰)來調整鋼胚的成分，因此所排出的鋼渣成分種類或含量會有所不同。

煉鋼的方法大致分為轉爐法 (converter process)、電爐法 (electric arc furnace process)、平爐法 (open hearth process)、及坩堝法 (crucible process) 四種<sup>[3-5]</sup>。比較常見的煉鋼方法有轉爐法及電爐法，而採用這兩種方法所產出的鋼渣又稱轉爐渣及電弧爐渣。以下介紹前述的四種煉鋼方法。

### 坩鍋法

坩鍋法一種最古老的煉鋼法，約於 1740 年左右由英國人杭茲曼所發明。一般較常看到的坩鍋是以石墨或黏土製成，生產不多而且成本高，但可冶煉出較高品質的鋼，所以大部分都用來冶煉合金鋼，比較適合小型工廠來使用。

### 轉爐法

轉爐煉鋼的方法很多，在各類的轉爐煉鋼法中，主要以貝塞麥轉爐法最具代表性，貝塞麥轉爐法是英國人貝塞麥在 1856 年所發明的。冶煉方法是將鐵液、廢鐵和石灰石放入轉爐內，用一根管子從坩鍋口插入熔鐵中，吹入高壓氧氣來煉鋼，使鐵液的溫度急速上升。此時，鐵水中的碳會和氧化結合成一氧化碳氣泡溢出，其他的雜質則會和石灰石化合成爐渣浮在表面上，而原來的鐵水便成了鋼的熔液。貝塞麥法是一種量產的煉鋼法，平均只要 20 分鐘就能達到過去採用攪拌煉鋼爐 24 小時的鋼鐵產量。貝塞麥法雖然是煉鋼爐中最有效率的一種，但其缺點是不易去除硫、磷等雜質。

### 平爐法

平爐法是法國人馬丁於 1864 年，利用德國人西門子的方法再進一步改良而開發，所以又稱為西門子—馬丁法。當平爐在進行煉鋼時，下層蓄熱室預熱的空氣和煤氣被送入上層熔池，在鐵液表面吹拂與燃燒，可去除鐵液中大部份碳和其他雜質，得到品質較佳的鋼。雖然平爐冶煉的時間比較長(約 24 小時)，但也因為其熔池有足夠的容量，一爐約可以煉製百 ton 鋼胚，原料沒特別限制，大致上也可採用廢鋼、鐵屑、熟鐵或鐵礦石等材料來進行冶煉，且冶煉出來的鋼質量穩定均勻，因此一直沿用至今。

### 電爐法

電爐法是利用電力產生的熱能來熔解金屬，是現代化煉鋼方式。電爐煉鋼速率快，而且品質容易控制。電爐煉鋼生產的鋼純度高，因此許多的的煉鋼工廠都採用此法進行冶煉特殊合金鋼。

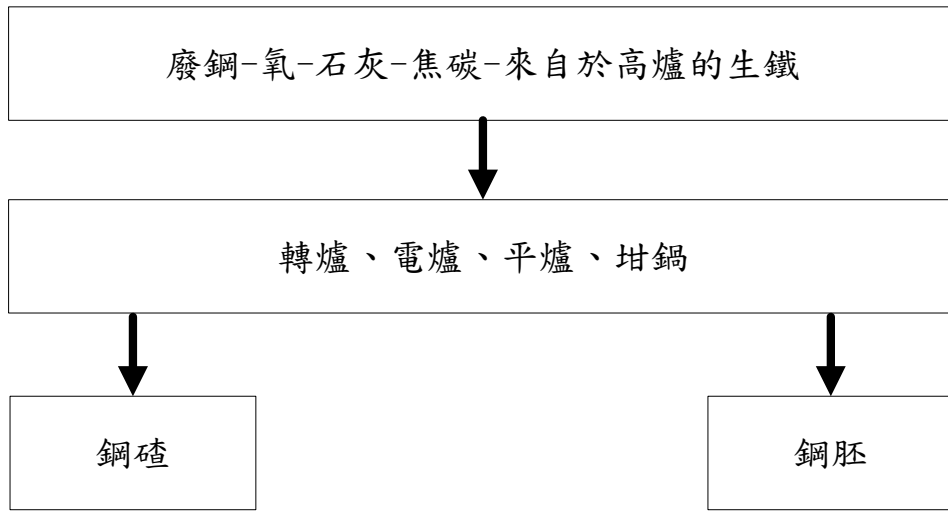


圖 2-2 鋼渣產出流程圖

(資料來源：本研究繪製)

### 2-1-2 鐵、鋼渣產量

根據世界鋼協會(World Steel Association)西元 2000 至 2009 年的統計資料，顯示全球自 2000 起 2007 年止，其產量持續增加，直到 2008 年才開始出現逐漸下降(表 2-1 所示)，然而 2009 年鋼的產量仍有 12.4 億 ton 之多，鐵的產量約 9.4 億 ton。另外根據全球鋼鐵產量分年統計資料顯示，2010 年鋼產量約 14.1 億 ton，2011 年鋼產量約 14.9 億 ton，2010 年高爐產鐵量約 10.4 億 ton，2011 年高爐產鐵量約 10.8 億 ton<sup>[2]</sup>。圖 2-3 顯示，高爐每生產鐵 1 ton 約產生 300 kg 的鐵渣，每生產 1 ton 鋼約產生 100 ~ 200 kg 的鋼渣<sup>[6]</sup>，推估單就 2011 年鋼產量推估約產出 2.2 億 ton 的鋼渣，2011 年鐵產量推估約產出 3.2 億 ton 的鐵渣，全世界鐵鋼渣產量甚大，如仍然採用填埋拋棄置處理方式，除對人類生活環境造成重大環境負面衝擊外，更因未能再利用工業副產品，無法符合節能減碳永續發展的目標。

表 2-1 世界鋼產量(2000 至 2009 年)

Countries	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Albania	5	80	140	140	143	180	206	263	250	221
Algeria	842	947	1,091	1,051	1,014	1,007	1,158	1,278	646	543
Angola	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Argentina	4,474	4,107	4,356	5,044	5,133	5,380	5,533	5,387	5,541	4,013
Australia	7,129	7,033	7,527	7,544	7,414	7,757	7,881	7,939	7,625	5,249
Austria	5,707	5,869	6,189	6,261	6,530	7,031	7,129	7,578	7,594	5,662
Azerbaijan	-	80	125	250	250	330	300	150	150	120
Bangladesh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Belarus	1,502	1,486	1,484	1,591	1,792	2,027	2,324	2,410	2,589	2,417
Belgium	11,636	10,762	11,343	11,114	11,698	10,420	11,631	10,692	10,673	5,635
Bosnia-Herzegovina	77	84	74	95	75	289	490	533	608	519
Brazil	27,865	26,717	29,604	31,147	32,909	31,610	30,901	33,782	33,716	26,506
Bulgaria	2,022	1,972	1,860	2,317	2,106	1,949	2,102	1,909	1,330	726
Canada	16,595	15,276	16,002	15,929	16,305	15,327	15,493	15,572	14,845	9,286
Chile	1,352	1,247	1,279	1,377	1,579	1,537	1,627	1,679	1,523	1,308
China	128,500	151,634	182,249	222,336	272,798	355,790	421,024	489,712	512,339	577,070
Colombia	660	638	664	668	730	842	1,220	1,245	1,053	1,053
Congo (Zaire)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Costa Rica	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Croatia	71	58	34	41	86	73	81	75	89	43
Cuba	336	270	268	210	192	245	257	268	279	267
Czech Republic	6,216	6,316	6,512	6,783	7,033	6,189	6,862	7,059	6,387	4,594
Czechoslovakia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Denmark	801	751	392	-	-	-	-	-	-	-
Dominican Republic	39	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ecuador	58	60	69	80	72	84	85	87	128	259
Egypt	2,838	3,799	4,316	4,398	4,810	5,603	6,045	6,224	6,198	5,541
El Salvador	41	39	49	57	59	48	72	73	71	56
Estonia	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-
F.R. Yugoslavia	696	595	591	711	1,175	1,292	1,823	1,652	-	-

使用爐渣(石)對於混凝土力學與耐久性能之研究

Finland	4,096	3,938	4,003	4,766	4,832	4,739	5,054	4,431	4,417	3,066
France	20,954	19,343	20,258	19,758	20,770	19,481	19,852	19,250	17,879	12,840
Georgia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Germany	46,376	44,803	45,015	44,809	46,374	44,524	47,224	48,550	45,833	32,670
Germany (East)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ghana	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Greece	1,088	1,281	1,835	1,701	1,967	2,266	2,416	2,554	2,477	2,000
Guatemala	167	202	216	226	232	207	292	349	250	224
Honduras	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hong Kong	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hungary	1,871	1,956	2,053	1,989	1,952	1,958	2,084	2,227	2,097	1,403
Iceland	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
India	26,924	27,291	28,814	31,779	32,626	45,780	49,450	53,468	57,791	63,527
Indonesia	2,848	2,781	2,462	2,042	3,682	3,675	3,759	4,160	3,915	3,501
Iran	6,600	6,916	7,321	7,869	8,682	9,404	9,789	10,051	9,964	10,908
Iraq	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ireland	360	150	-	-	-	-	-	-	-	-
Israel	280	280	280	280	280	300	300	300	300	300
Italy	26,759	26,545	26,066	27,058	28,604	29,350	31,624	31,553	30,590	19,848
Japan	106,444	102,866	107,745	110,511	112,718	112,471	116,226	120,203	118,739	87,534
Jordan	30	30	134	135	140	150	150	150	150	150
Kazakhstan	4,769	4,655	4,814	4,898	5,385	4,451	4,269	4,782	4,250	4,146
Kenya	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Latvia	498	515	520	520	662	688	690	696	635	692
Libya	1,055	846	886	1,007	1,026	1,255	1,151	1,250	1,137	914
Lithuania	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Luxembourg	2,571	2,725	2,719	2,675	2,684	2,194	2,802	2,858	2,582	2,141
Macedonia	161	260	260	291	309	310	354	359	253	270
Malaysia	3,650	4,100	4,722	3,960	5,698	5,296	5,834	6,895	6,423	5,354
Mauritania	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Mexico	15,631	13,300	14,010	15,159	16,737	16,195	16,447	17,573	17,209	14,132
Moldova	908	967	514	850	1,012	1,016	675	965	885	380
Montenegro	-	-	-	-	-	-	-	-	170	130
Morocco	5	5	5	5	5	205	314	512	478	479
Myanmar	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Myanmar	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Netherlands	5,666	6,037	6,117	6,571	6,848	6,919	6,372	7,368	6,853	5,194
New Zealand	702	826	765	853	885	889	810	845	799	765

## 第二章 蒐集之資料、文獻分析

Nigeria	-	-	-	-	40	100	100	100	100	100
North Korea	300	300	300	300	300	300	300	300	300	250
Norway	679	640	698	703	725	705	684	708	560	595
Pakistan	950	953	970	1,000	1,145	825	1,040	1,090	1,000	800
Panama	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Paraguay	77	71	80	91	107	101	115	95	83	54
Peru	751	690	611	669	726	790	896	881	1,001	718
Philippines	426	500	550	500	400	470	558	718	711	824
Poland	10,498	8,809	8,368	9,107	10,593	8,336	10,008	10,632	9,728	7,128
Portugal	1,088	728	920	1,000	1,250	1,338	1,338	1,847	1,630	1,587
Qatar	729	891	1,027	1,055	1,089	1,057	1,003	1,147	1,406	1,448
Romania	4,672	4,935	5,491	5,691	6,042	6,280	6,266	6,261	5,035	2,761
Russia	59,136	58,970	59,777	61,450	65,583	66,146	70,830	72,387	68,510	60,011
Saudi Arabia	2,981	3,413	3,570	3,944	3,902	4,186	3,974	4,644	4,667	4,690
Serbia	-	-	-	-	-	-	-	-	1,662	1,061
Singapore	603	456	460	561	610	572	607	640	764	664
Slovak Republic	3,733	3,989	4,275	4,588	4,454	4,485	5,093	5,089	4,489	3,747
Slovenia	519	462	481	541	566	583	628	638	642	430
South Africa	8,481	8,821	9,095	9,481	9,500	9,494	9,718	9,098	8,246	7,484
South Korea	43,107	43,852	45,390	46,310	47,521	47,820	48,455	51,517	53,625	48,572
Spain	15,874	16,504	16,408	16,286	17,621	17,826	18,391	18,999	18,640	14,358
Sri Lanka	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Sweden	5,227	5,518	5,754	5,707	5,978	5,723	5,466	5,673	5,164	2,804
Switzerland	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,158	1,252	1,264	1,312	934
Syria	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Taiwan	16,896	17,261	18,230	18,832	19,599	18,942	20,000	20,903	19,882	15,873
Thailand	2,100	2,127	2,538	3,551	4,533	5,161	4,914	5,565	5,211	3,646
Trinidad and Tobago	741	668	817	903	815	712	673	682	489	417
Tunisia	229	239	200	86	66	70	75	80	82	155
Turkey	14,325	14,981	16,467	18,298	20,478	20,965	23,315	25,754	26,806	25,304
Uganda	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Ukraine	31,767	33,108	34,050	36,932	38,738	38,641	40,891	42,830	37,279	29,855
United Arab Emirates	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
United Kingdom	15,155	13,543	11,667	13,268	13,766	13,239	13,871	14,317	13,521	10,079

使用爐渣(石)對於混凝土力學與耐久性能之研究

United States	101,803	90,104	91,587	93,677	99,681	94,897	98,557	98,102	91,350	58,196
Uruguay	38	31	34	40	58	64	57	71	86	57
Uzbekistan	407	433	450	499	602	595	617	645	682	716
Venezuela	3,835	3,813	4,164	3,930	4,561	4,910	4,864	5,005	4,225	3,808
Vietnam	306	319	409	544	689	890	1,869	2,024	2,250	2,700
Zimbabwe	258	149	105	152	135	107	24	23	-	-
World	848,936	851,077	904,056	969,913	1,061,247	1,146,581	1,248,991	1,347,005	1,341,208	1,235,842

(資料來源：World Steel Association, 2012)

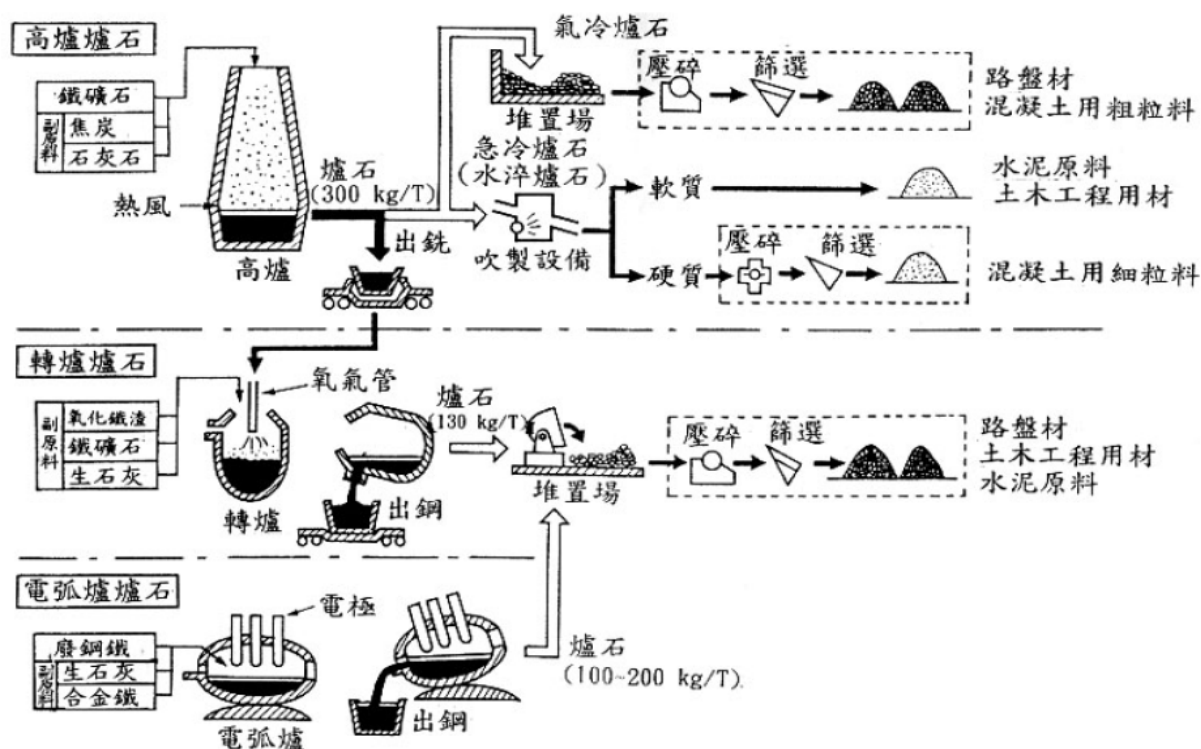
表 2-2 世界鐵產量(2000 至 2009 年)

Countries	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Algeria	767	800	960	965	994	952	1,093	1,193	690	680
Argentina	2,186	1,917	2,180	2,402	2,392	2,646	2,481	2,593	2,581	2,042
Australia	7,049	6,017	6,106	6,116	5,735	6,203	6,433	6,369	6,057	4,370
Austria	4,318	4,375	4,669	4,677	4,847	5,444	5,547	5,908	5,795	4,353
Belgium	8,471	7,732	7,988	7,813	8,224	7,254	7,516	6,577	6,977	3,087
Bosnia-Herzegovina	-	-	-	-	-	-	-	-	243	483
Brazil	27,723	27,391	29,694	32,038	34,558	33,884	32,452	35,571	34,925	25,135
Bulgaria	1,216	1,211	1,072	1,386	1,158	1,115	1,147	1,069	441	-
Canada	8,904	8,302	8,670	8,554	8,828	8,274	8,305	8,579	8,770	5,273
Chile	1,024	897	964	988	1,137	1,074	1,115	1,147	1,109	923
China	131,015	155,543	170,792	213,667	251,851	344,732	413,641	476,604	483,226	568,634
Colombia	285	319	311	283	312	325	360	341	308	342
Czech Republic	4,621	4,671	4,840	5,207	5,384	4,627	5,192	5,287	4,737	3,483
Czechoslovakia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Egypt	990	1,160	1,100	1,080	1,000	1,100	1,100	1,000	900	800
F.R. Yugoslavia	598	456	485	635	1,003	1,208	1,762	1,485	1,582	1,006
Finland	2,983	2,852	2,828	3,092	3,037	3,056	3,158	2,915	2,943	2,042
France	13,916	12,298	13,510	12,972	13,198	12,705	13,013	12,426	11,372	8,104
Germany	30,845	29,184	29,427	29,481	30,018	28,854	30,360	31,150	29,111	20,104
Germany (East)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hungary	1,340	1,226	1,335	1,333	1,351	1,338	1,340	1,393	1,289	1,050
India	21,321	21,875	24,315	26,550	25,117	27,125	28,256	36,488	37,313	38,233
Iran	2,202	2,183	2,182	2,231	2,096	2,305	2,041	2,118	2,176	2,433
Italy	11,220	11,220	9,775	10,148	10,604	11,423	11,497	11,110	10,377	5,692
Japan	81,071	78,836	80,979	82,091	82,974	83,058	84,270	86,771	86,171	66,943
Kazakhstan	4,010	3,906	4,008	4,123	4,312	3,624	3,393	3,240	2,761	2,409
Luxembourg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Malaysia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mexico	4,856	4,373	3,996	4,183	4,278	4,047	3,790	4,078	4,450	3,919
Morocco	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Netherlands	4,970	5,305	5,367	5,846	6,011	6,031	5,417	6,412	5,998	4,601
New Zealand	603	646	617	700	719	652	664	679	622	608
North Korea	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250

使用爐渣(石)對於混凝土力學與耐久性能之研究

Norway	70	70	108	110	100	100	100	100	100	100
Pakistan	1,000	1,067	1,000	1,000	1,000	1,000	850	900	900	750
Paraguay	82	72	87	98	119	123	128	110	94	71
Peru	327	316	240	226	272	263	306	351	412	-
Poland	6,492	5,440	5,294	5,632	6,400	4,477	5,333	5,804	4,934	2,984
Portugal	379	82	-	-	-	-	-	-	-	-
Romania	2,985	3,085	3,976	4,101	4,244	4,098	3,946	3,923	2,958	1,575
Russia	44,536	44,947	46,251	48,325	50,321	48,410	51,742	51,043	48,295	43,945
Romania	2,985	3,085	3,976	4,101	4,244	4,098	3,946	3,923	2,958	1,575
Russia	44,536	44,947	46,251	48,325	50,321	48,410	51,742	51,043	48,295	43,945
Serbia	-	-	-	-	-	-	-	-	1,582	1,008
Slovak Republic	3,166	3,255	3,533	3,892	3,765	3,681	4,145	4,012	3,529	3,019
South Africa	6,292	5,820	5,823	6,234	6,011	6,130	6,159	5,358	5,138	4,444
South Korea	24,937	25,898	26,570	27,314	27,556	27,309	27,559	29,437	31,043	27,284
Spain	4,059	4,219	4,021	3,645	4,036	4,160	3,432	3,976	3,784	2,920
Sweden	3,145	3,614	3,703	3,710	3,871	3,730	3,577	3,816	3,583	1,966
Switzerland	80	80	80	80	80	80	80	80	-	-
Taiwan	9,618	10,001	10,169	10,260	10,354	9,447	10,407	10,518	9,823	7,939
Tunisia	195	191	152	45	-	-	-	-	-	-
Turkey	5,333	5,289	5,003	5,706	5,836	5,970	5,952	6,235	6,704	7,004
Ukraine	25,697	26,364	27,634	29,528	31,056	30,782	32,950	35,647	30,981	25,676
United Kingdom	10,890	9,870	8,561	10,228	10,180	10,189	10,696	10,960	10,137	7,671
United States	47,878	42,107	40,225	40,644	42,291	37,222	37,903	36,337	33,729	19,018
Venezuela	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vietnam	47	48	146	200	187	202	211	170	255	275
Zimbabwe	277	156	122	182	125	129	38	38	1	-
World	576,253	586,950	611,134	669,986	719,204	800,821	881,123	961,582	951,171	934,663

(資料來源：World Steel Association, 2012)

圖 2-3 鐵、鋼爐渣產出量及處理示意圖<sup>[6]</sup>

(資料來源：蘇茂豐，2005)

## 第二節 鐵、鋼渣之應用性與相關研究

### 2-2-1 鐵、鋼渣之應用性

人類使用水泥約已有兩千年的歷史。雖然水泥應用於混凝土已具有非常悠久的歷史，但水泥工業化實際量產是由 19 世紀中葉開始，最初的生產設備是水平窯，而後來又逐漸被改良後的迴轉窯取而代之，而今全球水泥生產量每年約 25.4 億 ton，預估於 2015、2030 及 2050 年可能介於 33.5 ~34.8、33.4~38.6、36.8~43.8 億 ton，如圖 2-4 所示<sup>[25-26]</sup>。

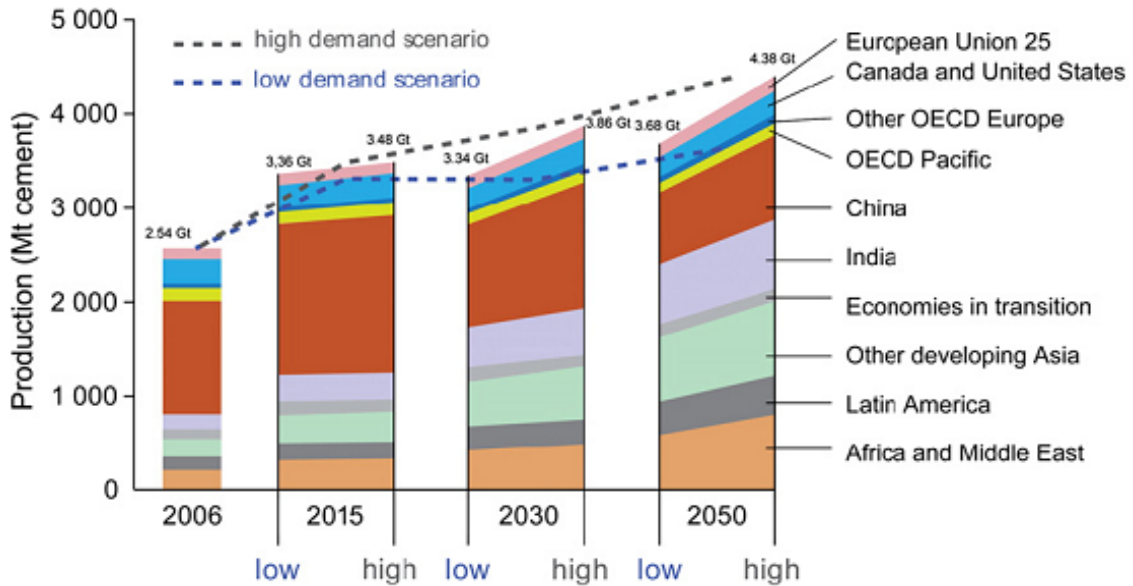


圖 2-4 全球水泥產量(含預估值)<sup>[25-26]</sup>

(資料來源：Schneider, 2010)

水泥生產過程中會排放大量的二氧化碳，而二氧化碳是造成當前全球暖化與氣候變遷的一項主要原因，圖 2-5 顯示地球自 1800 年開始至 2005 年止，大氣中二氧化碳的濃度由最初的 280 ppm 逐年升到 380 ppm 並且還持續增加<sup>[27]</sup>。根據統計，目前水泥生產過程中所排放的二氧化碳約佔全球總二氧化碳排放量的 5%，所以必須盡早找出適當的方案來降低水泥的產量，否則預估 2050 年水泥可能成長到 4.38 億 ton 的上限<sup>[25]</sup>。

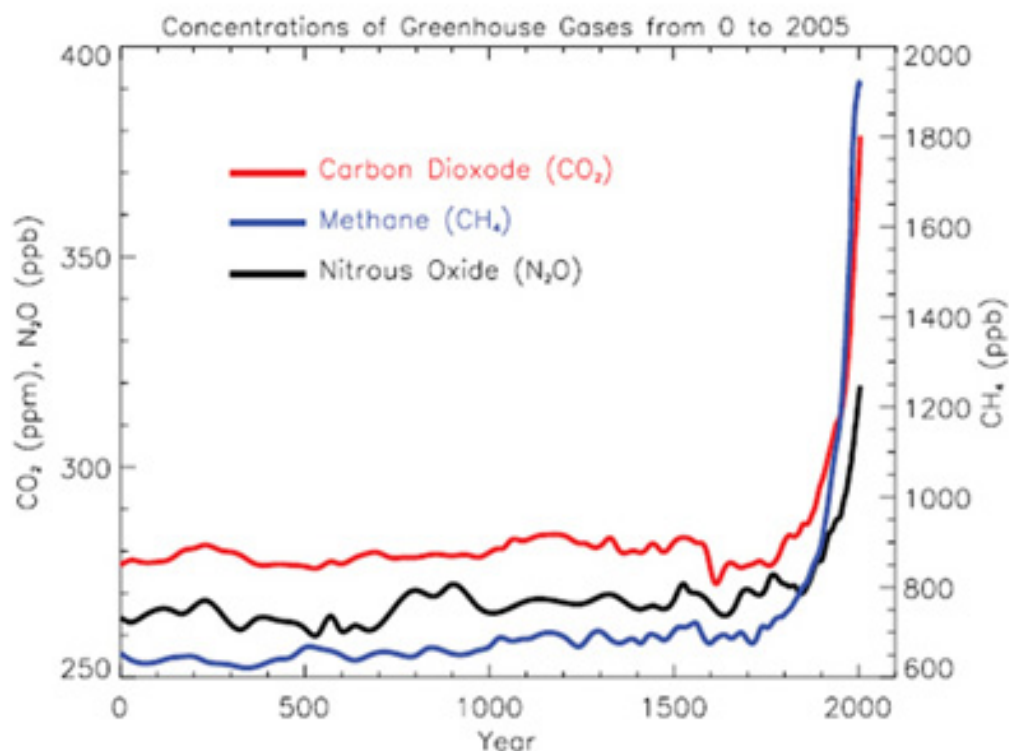


圖 2-5 大氣中二氧化碳、氧化碳及甲烷濃度成長趨勢圖(~2005 年)<sup>[27]</sup>

(資料來源：Global Greenhouse Warming, 2010)

圖 2-6 為鐵、鋼渣與水泥的三相圖，由圖中可發現鐵渣、鋼渣與水泥的成分相當接近，因此若能適當地使用或可取代水泥做為混凝土膠結料使用，將有助於降低水泥生產量、減少二氧化碳排放及能源使用的問題<sup>[6, 20, 28]</sup>。另外，混凝土中的粒料約 70 % 以上，由於鋼渣、鐵渣具有一定的硬度(天然粒料硬度約 6~7，爐渣粒料約 7~8<sup>[6]</sup>)，如能取代混凝土中天然粒料，將有機會消耗大量的爐渣，同時可降低天然粒料的資源開採。

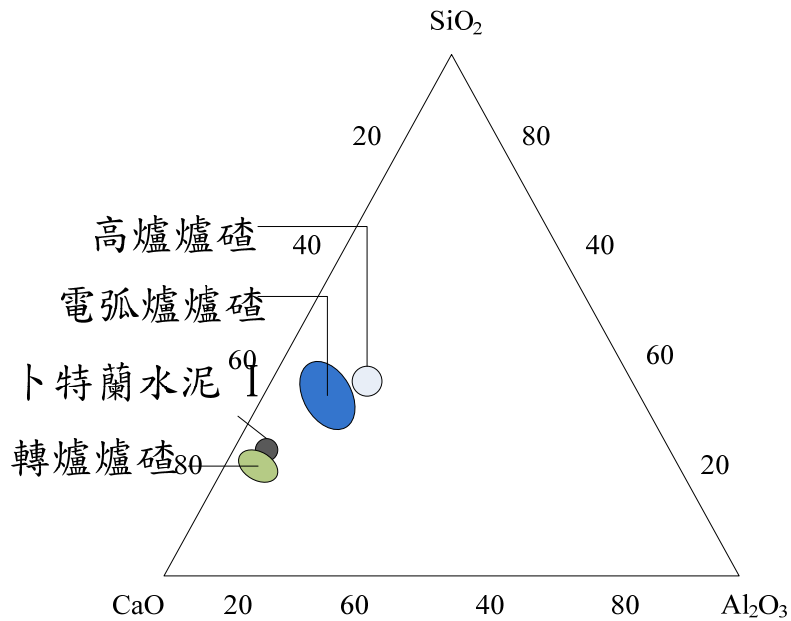


圖 2-6 卜特蘭水泥與爐渣三相圖<sup>[6,20,28]</sup>

(資料來源：Monshi, 1999. Muhmood, 2009. 蘇茂豐，2005)

### 2-2-2 鐵、鋼渣之應用與相關研究

表 2-3 顯示近幾年在歐盟、日本、美國、德國、澳洲及紐西蘭等先進的工業國家中，鐵渣及鋼渣的資源轉化大致應用於煉鋼廠的回收再利用及各項的工程材料，如：道路級配料、瀝青混凝土粒料、地基改良等，另外少部分是當做農業的肥料或水泥加工原料<sup>[29]</sup>。鋼渣在混凝土相關應用研究如 2007 學者 Kourounis 在研究報告中提到，冶金爐渣中的鐵渣(水淬高爐石粉)、鋼渣、磷渣、銅渣、鉛渣等的化學成，很接近水泥和火山灰，因此很適合做為替代水泥的礦物摻料。但是，目前絕大部分的冶金爐渣當做混凝土的粒料，僅有少部分水淬高爐石粉是用來當做水泥的替代原料。文章作者利用球磨機將粒徑 0~5 mm 的鋼渣研磨到比表面積 3000 cm<sup>2</sup>/g，再以水泥重量比 15%、30%、45% 的用量，跟水泥混合製作成混凝土砂漿，並由試驗結果發現當鋼渣取代量達到 30% 及 45% 時會降低混凝土砂漿的水化作用，接著透過 XRD 成分分析發現可能是因為 FeO 含量過高所致，如圖 2-7 所示。另外從 SEM 觀察養護齡期 28 天的混凝土砂漿，證實取代量為 15%(水泥重量比)時，仍會產生 C-S-H 膠體，如圖 2-8 所示<sup>[21]</sup>。

鐵渣在過去的研究中多是當做水泥的輔助膠凝材料使用，主要是水淬後的高爐石

(渣)具有良好的潛在活性。過去研究報告也證實以其取代部分混凝土膠結料的水泥，對混凝土的力學性質、耐久性與其他多種特性具有正面的影響<sup>[33]</sup>。如 2000 年 Dongxu 的研究報告提出，混凝土中添加飛灰及爐石，不僅可以加速複合水泥的水化反應，同時也能改善其抗壓強度與孔隙結構<sup>[17]</sup>；2008 年 Yazıcı 學者利用飛灰、矽灰及爐石等輔助膠結料取代部份水泥。結果顯示，矽灰取代部份水泥在抗壓強度和混凝土阻抗的表現較佳，而同時使用爐石、飛灰及矽灰之試體抵抗氯離子侵蝕的能力最好<sup>[18]</sup>。

表 2-3 鋼鐵爐渣資源化近況<sup>[29]</sup>

資源化項目及用途		鐵渣、鋼渣資源化比例(%)						
		歐盟 (2007)	日本(2008)		德國 (2006)	美國 (2007)	澳洲及紐西 蘭(2008)	
			電爐渣	轉爐渣				
廠內回收(包或渣、殘鐵及殘鋼)		4	2.3	15.2	13.4	-	-	
工程材料	道路級配料	45	35.4	19.8	43.9	51.3	48	
	瀝青混凝土粒料					14.4		
	鐵道渣		-	-		2.3		
	地基改良		4.3	5.5	4.4	13.3		
	土木工程		34.5	47.4	18.8	-		12
	混凝土粒料		1.6	3.5				
港灣/堤岸工程		2	-	-	3.7	-	-	
製造原料	水泥原料	37	0.9	5.6	-	6.7	20	
	加工用原料		9.8	0.2	-	-		
肥料/土壤改良		2	2.7	1.1	4.8	-	-	
其他(下游販售包或渣、殘鐵及殘鋼等)		-			-	-	-	
掩埋/棄置		7	8.4	0.6	10.2	-	-	
堆存		3	0.1	0.1	0.8	12	20	
合計		100	100	100	100	100	100	

(資料來源：蘇茂豐，2010)

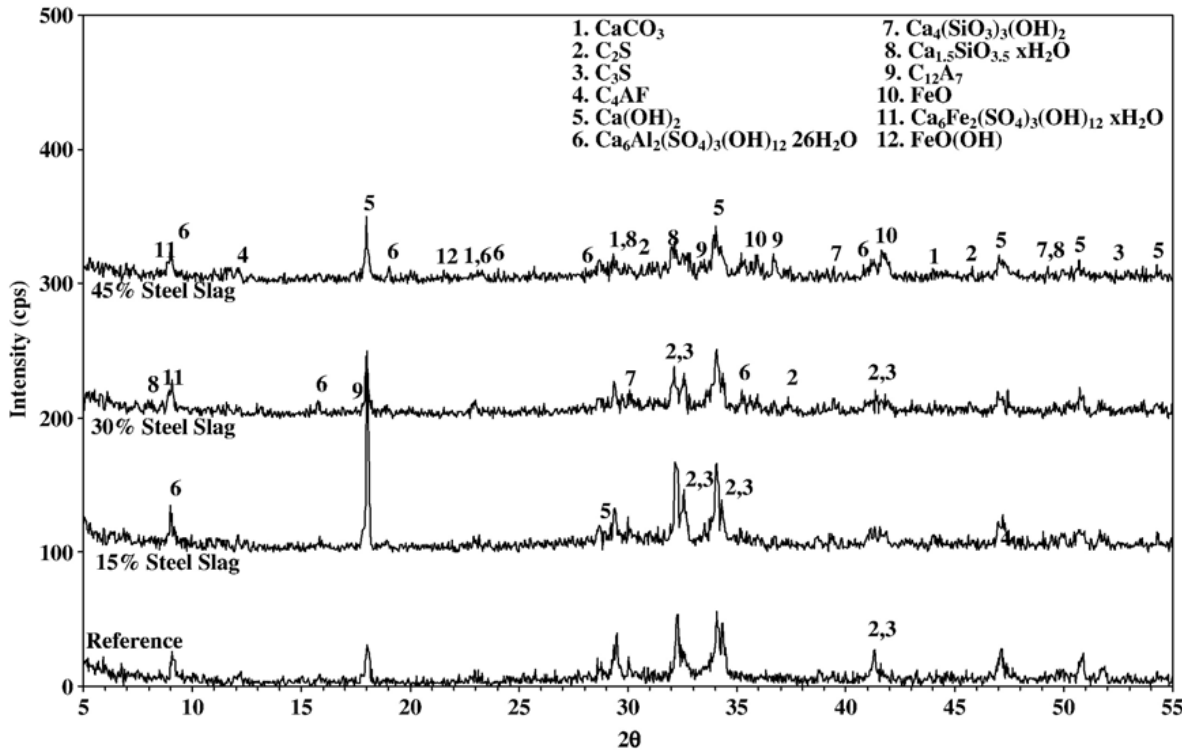


圖 2-7 普通水泥砂漿與鋼渣混合水泥砂漿成分分析<sup>[21]</sup>

(資料來源：Kourounis, 2007)

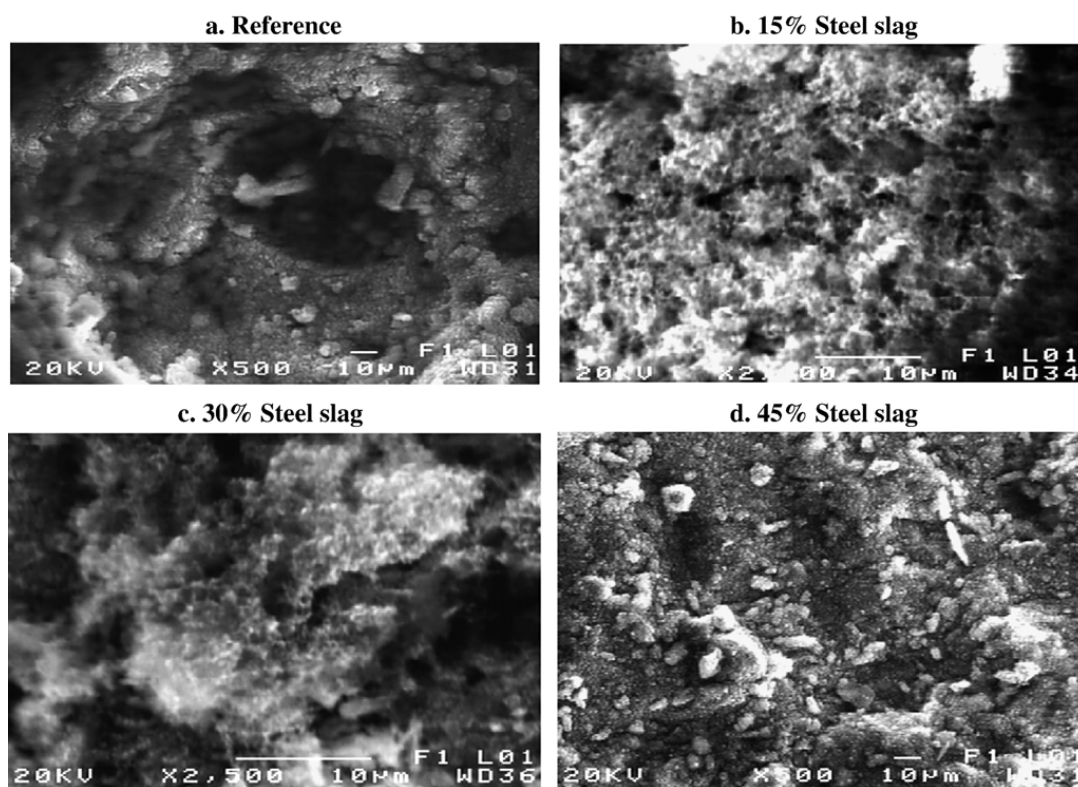


圖 2-8 普通水泥砂漿與鋼渣混合水泥砂漿 SEM 圖(X2500)<sup>[21]</sup>

(資料來源：Kourounis, 2007)

### 2-2-3 爐渣應用實例

#### 南星計畫

南星計畫是位於台灣高雄市小港區大林蒲海岸的一個填海造陸計畫，起初的目的係為了妥善處理爐石等工業廢棄物而設置，整體計畫共分為三期，其中第一期工程已經在 1991 年完成；第二期工程暫緩實施；第三期工程稱為中程計畫，又細分成兩個區，如圖 2-9 所示，第一區已在 2000 年填滿<sup>[34]</sup>。

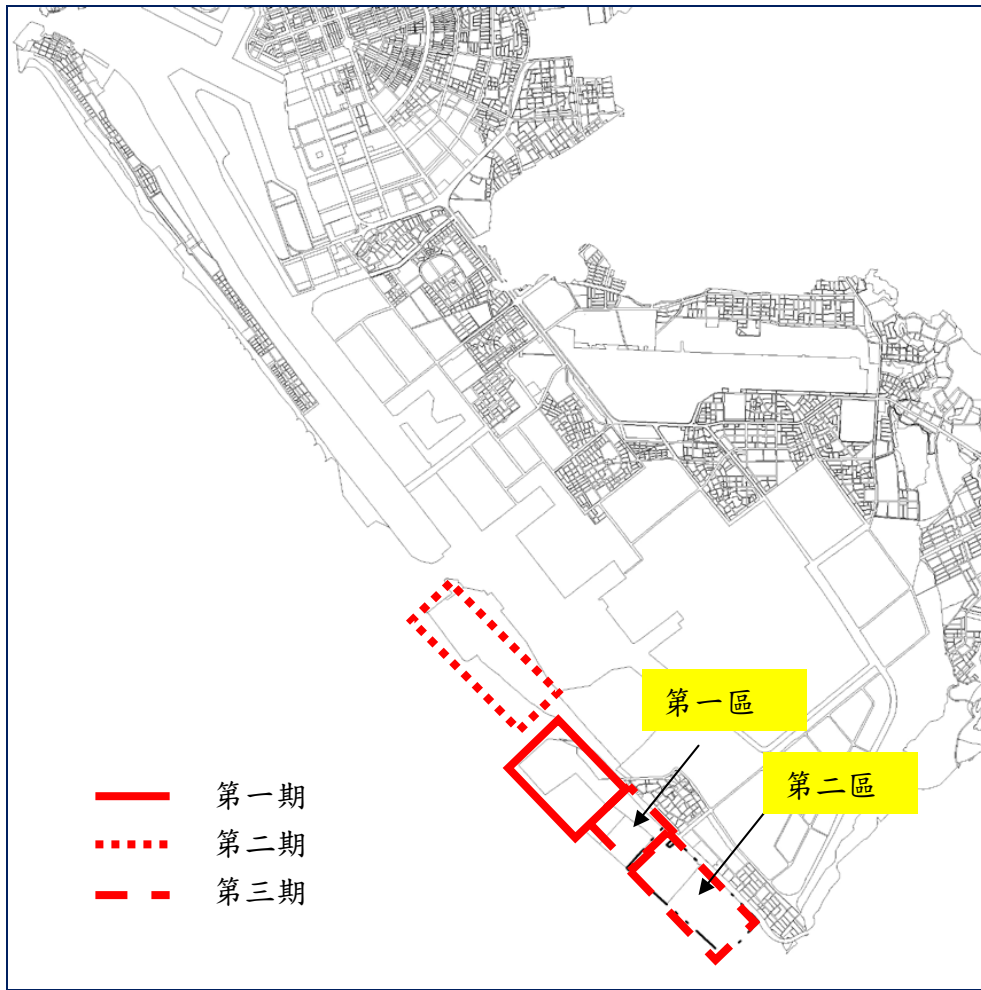


圖 2-9 南星計畫區域示意圖<sup>[34]</sup>

(資料來源：孫志鵬, 2011)

### 國道六號南投段

為原中橫快速公路之西段，1999 年 9 月 921 大地震造成南投縣建設及經濟產業重創，2003 年 7 月行政院為加速災區重建，促進南投地區產業發展，將國道六號南投段工程計畫納入「挑戰 2008：國家發展重點計畫」，並核定正式訂名為「國道六號南投段」。自台中縣霧峰鄉國道三號中橫系統交流道起，往東沿烏溪、南港溪、眉溪河谷及山區而行，途經草屯鎮、國姓鄉、至埔里盆地東緣止，全長約 37.6 公里，如圖 2-10 所示，當中所使用之混凝土皆添加爐渣<sup>[35]</sup>。



圖 2-10 國道六號南投段示意圖<sup>[35]</sup>

(資料來源：永續公共工程, 2012)

### 關西國際機場

關西國際機場位於日本大阪府泉佐野市近海離岸 5 km 的人工島上，為京阪神都會區和關西地方的主要聯外機場。1963 年「大阪國際機場擴張整備與第二國際機場建設」計畫獲得日本內閣會議通過，並通過 5 年的填海工程，用了 1.8 億  $m^3$  的土方(包含爐渣)，在原先水深達 17 至 18 m 的大海裡填出了 5.11  $km^2$  的機場用地<sup>[36]</sup>，如圖 2-11 所示。



圖 2-11 關西國際機場<sup>[36]</sup>

(資料來源：大阪府政府, 2007)

### 明石海峽大橋

明石海峽大橋位於日本本州與四國之間，跨越明石海峽，連接神戶及淡路島。橋身呈淡藍色，總長 3,911 m，中央橋塔高 1,991 m，主塔高度 297 m<sup>[37]</sup>。明石海峽大橋之主體結構、自充填混凝土(礦物摻料為水淬爐石粉及飛灰)使用量為 20 萬 m<sup>3</sup>，施工工期為 22 個月，平均每天澆置 500 m<sup>3</sup> 的混凝土<sup>[38,39]</sup>。明石海峽大橋外觀，如圖 2-12 所示。

圖 2-12 明石海峽大橋<sup>[37]</sup>

(資料來源：科學與藝術數字博物館, 2004)

### 第三節 使用爐渣之相關規定

#### 2-3-1 鐵、鋼渣用途及使用規定

表 2-4 為經濟部 100 年 6 月公告修訂「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」的一部分內容，主要列出感應電爐爐渣（石）、化鐵爐爐渣（石）及電弧爐煉鋼爐渣（石）等鐵、鋼渣，其用途及再利用應符合之規定<sup>[40]</sup>。

表 2-4 經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式<sup>[40]</sup>

電弧爐煉鋼爐渣（石）	<p>一、事業廢棄物來源：基本金屬製造業在電弧爐煉鋼製程所產生之氧化渣（石）或還原渣（石）。但氧化渣（石）與還原渣（石）無法分離或依相關法規認定為有害事業廢棄物者，不適用之。</p> <p>二、再利用用途：水泥原料、水泥製品原料、瀝青混凝土粒料原料、非結構性混凝土粒料原料或鋪面工程（機場、道路、人行道、貨櫃場或停車場）之基層或底層級配粒料原料（但鋪面工程之路基為土壤者，需先以其他工程材料隔離），不得有直接接觸土壤致生與其混合改變土壤性質之再利用用途。但不銹鋼製程產生之還原渣（石）僅限於水泥原料及水泥製品原料。</p> <p>三、再利用機構應具備下列資格：依法辦理工廠登記或符合免辦理登記規定之工廠，其產品至少為下列之一項：水泥、水泥製品、鋪面工程之基層或底層級配粒料、瀝青混凝土粒料、非結構性</p>
------------	---

混凝土粒料或砂石。

四、運作管理：

(一)再利用機構之設置應符合下列規定：

- 1、廠房之建築應堅固，地面應採用水泥混凝土或其他易清理之材料。
- 2、工廠廠區周圍應設置二·四公尺高結構體圍牆或其他適當阻隔之設施，廠內及廠外連接主要交通之道路應鋪設瀝青混凝土或水泥混凝土路面。
- 3、廠內各作業場所應明確區隔，製造作業區與行政作業區應明確劃分。
- 4、原料、物料、半製品及成品之儲存場所，應適當隔離。
- 5、工廠內部應有充分採光、照明與通風設備。

(二)再利用應符合下列規定：

- 1、氧化渣(石)：再利用於水泥製品原料、鋪面工程之基層或底層級配粒料原料、瀝青混凝土粒料原料或非結構性混凝土粒料原料用途者，應先經破碎、磁選及篩分等處理。
- 2、還原渣(石)：再利用用途除再利用於水泥原料用途外，應經安定化處理措施。前述安定化係指為穩定爐渣之膨脹性，將冷卻硬固之爐渣破碎後，使其與空氣及水接觸反應之行為。

(三)貯存地點應符合下列規定：

- 1、氧化渣(石)及還原渣(石)不得混合貯存。
- 2、氧化渣(石)：得採用露天貯存方式，但貯存場所應設排水收集設施。
- 3、還原渣(石)：不得採用露天貯存方式。
- 4、電弧爐煉鋼爐渣(石)及再利用用途產品之貯存場所毗鄰農業用地者，應設置截流溝渠，但貯存於廠房內者，不在此限。

(四)再利用用途之產品屬鋪面工程之基層或底層級配粒料者，其使用地點應符合下列規定：

- 1、與飲用水源及依水利法規定取得水權之水井距離需在二十公尺以上。
- 2、不得使用於農業用地、耕地、環境敏感地及屬公告之水庫集水區、國家重要濕地與自來水水質水量保護區。

(五)電弧爐煉鋼產生之氧化渣(石)與還原渣(石)，產源事業不得將集塵灰及地面、廠房及屋頂清潔收集之塵灰混入再利用，於出廠前，應至少每年檢測一次重金屬及戴奧辛項目，另至少每月檢測一次氫離子濃度(pH 值)，連續三個月之 pH 檢測值未大於 12.5 者，得每年至少檢測一次。產源事業應於採樣前十日通知當地環保主管機關，並於每年三月前將上年度檢測報告提報環保主管機關及中央目的事業主管機關。

(六)電弧爐煉鋼爐渣(石)經再利用程序之產出物，於出廠前應至少每年依國際間、國家標準或中央主管機關公告之環

	<p>境相容性檢測方法檢測一次，再利用機構應於採樣前十日通知當地環保主管機關，但再利用用途產品為水泥者，不在此限。經檢測符合標準者，始得作為再利用用途之產品使用。</p> <p>(七)前二款採樣應通知採樣時間與地點、採樣單位及環保主管機關核發許可證之檢驗測定機構。變更採樣時間及地點未於十天前通知者，其檢驗結果不予採信。檢測報告應由檢驗測定機構依環保主管機關所訂格式辦理，並由再利用機構將檢測報告提報環保主管機關及中央目的事業主管機關。</p> <p>(八)再利用機構於堆置、輸送或以車輛運輸逸散性粒狀污染物質及從事易致粒狀污染逸散之製程、操作或裝卸作業時，應依固定污染源逸散性粒狀污染空氣污染防治設施管理辦法相關規定辦理。</p> <p>(九)再利用後之剩餘廢棄物應依廢棄物清理法相關規定辦理。</p> <p>(十)再利用用途產品貯存量超過該再利用用途產品前六個月之累積銷售量時，應停止收受廢棄物進廠再利用。</p> <p>(十一)再利用用途之產品應符合國家標準、國際標準或該產品之相關使用規定。</p>
感應電爐爐渣(石)	<p>一、事業廢棄物來源：金屬基本工業在感應電爐熔煉鋼鐵製程所產生之爐渣(石)。但依相關法規認定為有害事業廢棄物者，不適用之。</p> <p>二、再利用用途：水泥原料、水泥製品原料、爐渣(石)粒料原料、砂石原料、混凝土粒料、道路工程粒料或非農業用地之工程填地材料。</p> <p>三、再利用機構應具備下列資格：</p> <p>(一)領有工廠登記證或符合免辦理登記規定之製造業，其產品至少為下列之一項：水泥、水泥製品、爐渣(石)粒料、砂石、預拌混凝土或其他相關產品。但直接再利用於非農業用地之工程填地材料用途者，其資格及產品不在此限。</p> <p>(二)直接再利用於非農業用地之工程填地材料用途者需符合下列資格：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1、公共工程：由該工程之設計單位在該工程圖樣及說明書中載明使用再生材料之種類及數量，向工程招標單位申請工程核准使用感應電爐爐渣文件，始得向感應電爐爐渣產生者取用。</li> <li>2、非公共工程：由該工程之設計單位在該工程圖樣及說明書中載明使用再生材料之種類及數量，並依建築法規定取得建造或雜項執照後，始得向感應電爐爐渣產生者取用。</li> </ol> <p>四、運作管理：</p> <p>(一)再利用於水泥製品原料、爐渣(石)粒料原料、砂石原料、混凝土粒料、道路工程粒料及非農業用地之工程填地材料用途者，應先經破碎、磁選及篩分等處理。</p> <p>(二)得採用露天貯存方式，但貯存場所應設有排水收集設施。</p>

	<p>(三)再利用後之剩餘廢棄物應依廢棄物清理法相關規定辦理。                  (四)再利用用途之產品應符合國家標準、國際標準或該產品之相關使用規定。</p>
<p>化鐵爐渣(石)</p>	<p>一、工業廢棄物來源：金屬基本工業在化鐵爐熔煉鋼鐵製程所產生之爐渣(石)。但依相關法規認定為有害事業廢棄物者，不適用之。</p> <p>二、再利用用途：水泥原料、水泥製品原料、爐渣(石)粒料原料、砂石原料、混凝土粒料、道路工程粒料或非農業用地之工程填地材料。</p> <p>三、再利用機構應具備下列資格：                  (一)領有工廠登記證或符合免辦理登記規定之製造業，其產品至少為下列之一項：水泥、水泥製品、爐渣(石)粒料、砂石、預拌混凝土或其他相關產品。但直接再利用於非農業用地之工程填地材料用途者，其資格及產品不在此限。                  (二)直接再利用於非農業用地之工程填地材料用途者需符合下列資格：                  1、公共工程：由該工程之設計單位在該工程圖樣及說明書中載明使用再生材料之種類及數量，向工程招標單位申請工程核准使用化鐵爐渣文件，始得向化鐵爐渣產生者取用。                  2、非公共工程：由該工程之設計單位在該工程圖樣及說明書中載明使用再生材料之種類及數量，並依建築法規定取得建造或雜項執照後，始得向化鐵爐渣產生者取用。</p> <p>四、運作管理：                  (一)再利用於水泥製品原料、爐渣(石)粒料原料、砂石原料、混凝土粒料、道路工程粒料及非農業用地之工程填地材料用途者，應先經破碎、磁選及篩分等處理。                  (二)得採用露天貯存方式，但貯存場所應設有排水收集設施。                  (三)再利用後之剩餘廢棄物應依廢棄物清理法相關規定辦理。                  (四)再利用用途之產品應符合國家標準、國際標準或該產品之相關使用規定。</p>

(資料來源：經濟部，2011)

### 2-3-2 鐵、鋼渣做為混凝土摻料的物理性及化學性之相關規定與要求

CNS 3036 針對燃煤飛灰及天然或煨燒卜作嵐材料，為可供混凝土達到所需之「膠結性」或產生「卜作嵐效應」或符合前述兩者特性，以及其它礦物摻和物經研磨成細粒狀而可發展出相同特性之材料，提出以下物理與化學性之要求，該規範之 N、F、C 分類標準較傾向飛灰的等級分類<sup>[41]</sup>，因此規定之物理性及化學性之標準值，可作為日後鐵、鋼渣相關試驗或手冊擬定之參考，如表 2-5 及表 2-6 所示。

表 2-5 混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐攪和物化學成分標準規定(CNS 3036)

試驗項目	礦物性攪和物類別		
	N 類	F 類	C 類
二氧化矽、氧化鋁與氧化鐵之總量，%(最小值)	70.0	70.0	50.0
三氧化硫，%(最大值)	4.0	5.0	5.0
含水量，%(最大值)	3.0	3.0	3.0
燒失量，%(最大值)	10.0	5.0	6.0

(資料來源：CNS 3036，2009)

表 2-6 混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐攪和物物理性質標準規定(CNS 3036)

試驗項目	礦物性攪和物類別		
	N 類	F 類	C 類
細度：試驗篩 0.045 mm，CNS 386〔試驗篩〕 篩餘量〔濕篩法〕，%(最大值)	34	34	34
強度活性指數： 與卜特蘭水泥攪和 7 天，控制百分率，%(最小值)	75	75	75
與卜特蘭水泥攪和 28 天，控制百分率，%(最小值)	75	75	75
需水量，控制百分率，%(最大值)	115	105	105
健度 高壓蒸煮膨脹或收縮率，%(最大值)	0.8	0.8	0.8
均質性規定： 各別式樣之密度及細度值與其前 10 個試樣(如前式樣總數不足 10 個時，則採全部試樣)： 密度，與平均值最大變異，%(最大值)	5	5	5

停留於試驗篩 0.045 mm CNS 386 篩餘量百分比， 與平均值之最大變異	5	5	5
--	---	---	---

(資料來源：CNS 3036，2009)

CNS 12223 主要針對水淬高爐渣，提出以下表 2-7、表 2-8 之物理與化學性要求，並表示其化學成分除應符合表之規定外，還必須符合下式 2-1 之規定<sup>[42]</sup>。另外，CNS 12549 針對混凝土及水泥砂漿用之水淬高爐渣粉的物理與化學性提出要求。化學性方面，主要說明硫化物(S)的最大值必須 > 2.5%，硫酸鹽(以 SO<sub>3</sub> 表示)的最大值必須 > 40%。而在物理性方面，主要將水淬高爐渣活性指數分為 80、100、120 等三級，詳，如表 2-9、表 2-10 所示<sup>[43]</sup>。

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} > 1.4 \quad (2-1)$$

表 2-7 水淬高爐渣化學成分標準規定(CNS 12223)

項目	含量百分率，%
二氧化矽(SiO <sub>2</sub> )	38.0 以下
氧化鈣(CaO)	37.0 以下
氧化鋁(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	16.0 以下
氧化鎂(MgO)	10.0 以下
氧化鐵(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.0 以下
氯離子(Cl <sup>-</sup> )	0.1 以下
硫化物硫(S)	2.0 以下
硫酸鹽硫(以 SO <sub>3</sub> 表示)	3.0 以下
總鹼量(Na <sub>2</sub> O + 0.658K <sub>2</sub> O)	0.6 以下
不溶殘渣	1.5 以下
燒失量	3.0 以下

(資料來源：CNS 12223，1988)

表 2-8 水淬高爐爐渣物理性質標準規定(CNS 12223)

項目	含量百分率，%
粒度：	
試驗篩 4.75 mm CNS 386 篩餘量	5 以下
試驗篩 37.5 mm CNS 386 篩餘量	無
玻璃質	95 以下
表面水分	12 以下

(資料來源：CNS 12223，1988)

表 2-9 混凝土及水泥砂漿用水淬高爐爐渣粉化學成分標準規定(CNS 12549)

項目	要求(%)
硫化物(S) 最大值	2.5
硫酸鹽(以 SO <sub>3</sub> 表示) 最大值	4.0

(資料來源：CNS 12549，2009)

表 2-10 混凝土及水泥砂漿用水淬高爐爐渣粉物理性質標準規定(CNS 12549)

項目			要求(%)	
細度	試驗篩 0.045 mm, CNS 386 (試驗篩)濕篩後殘留最大值		20	
	比表面積		雖在此並無要求，為仍應依 CNS 2924(卜特蘭水泥細度檢驗法(氣透儀法))加以測定以並報告之	
水淬高爐砂漿之空氣含量最大值			12	
水 淬 高 爐 爐 石 活 性 指 數	天別	級別	連續五個試樣 平均值	任一各別試樣
	7 天指數最小值	80	-	-
		100	75	70
		120	90	90
	28 天指數最小值	80	75	70
		100	90	90
		120	115	110

(資料來源：CNS 12549，2009)

CNS 11827 道路用高爐爐渣主要說明高爐渣冷卻後壓碎的爐渣粒料其級配必須達到之要求<sup>[44]</sup>。CNS 11824 高爐爐渣級配應用於混凝土時，除必須符合物理及化性要求外<sup>[45]</sup>，另外粒徑大小須依照規定分為 4005、4020、2505、2005、1505 等 5 類。在化學成分，則規定氧化鈣須 > 45%，硫須 < 20%，三氧化硫須 < 0.5%、氧化鐵須 < 3%。而在鋼渣部分可參考 CNS 15310、CNS 15305，CNS 15310 其內容主要介紹瀝青鋪面混合料用鋼爐渣粒料應符合之標準<sup>[46]</sup>；其中 CNS 15305 規範主要說明，鋼渣做為級配粒料基層、底層及面層用材料之物理及化學性之要求<sup>[47]</sup>。

表 2-11 道路用高爐爐渣之粒徑標準規定

種類	粒徑範圍 mm
高爐爐渣粗粒料 4005	37.5 ~ 4.75
高爐爐渣粗粒料 4020	37.5 ~ 19
高爐爐渣粗粒料 2505	25 ~ 4.75
高爐爐渣粗粒料 2005	19 ~ 4.75
高爐爐渣粗粒料 1505	16 ~ 4.75

(資料來源：CNS 11824，1987)

表 2-12 道路用高爐爐渣之物理性質標準規定(CNS 11824)

分類	容積比重	吸水率%	粒料單位質量 kg/m <sup>3</sup> (壓實)
A	2.2 以上	6 以下	1250 以上
B	2.4 以上	4 以下	1350 以上

(資料來源：CNS 11824，1987)

表 2-13 道路用高爐爐渣之化學成分標準規定(CNS 11824)

項目		規格要求
化學成分 (%)	氧化鈣(以 CaO 表示)	45.0 以上
	硫(以 S 表示)	20 以下
	三氧化硫(以 SO <sub>3</sub> 表示)	0.5 以下
	鐵(以 FeO 表示)	3.0 以下
水中浸漬試驗		不得有龜裂、分解、泥狀化、粉化等現象
紫外線 (360.0 nm)照射試驗		不發光或同樣之紫色

(資料來源：CNS 11824，1987)

## 2-3-3 國內外鐵、鋼渣的相關應用技術與手冊

目前國內鐵、鋼渣相關之使用手冊及規範大致上有級配粒料基層、級配粒料低層、電弧爐煉鋼爐渣混凝土、高壓混凝土透水地磚、混凝土用回收粒料、混凝土用電弧爐氧化渣粒料等施工規範及相關草案，另外使用手冊部分有電弧爐煉鋼還原渣資源化使用手冊，公共工程高爐石混凝土使用手冊、爐石利用推廣手冊等相關使用手冊。國外也有相當多的相關技術及使用手冊，以日本來說大致上有高爐爐渣鋪面設計指南、水淬高爐爐渣使用技術資訊、鋪面用高爐渣管理綱要，鋼渣鋪面設計指南、鐵、鋼渣的

使用爐渣(石)對於混凝土力學與耐久性能之研究

應用於混凝土粒料等。以上所列之相關應用技術及手冊，內容詳細說明鐵、鋼渣使用時的各項注意事項與可應用範圍及條件，未來在擬定鐵、鋼渣有關手冊或規範時，具相當參考價值。

## 第三章 試驗計畫

### 第一節 試驗計畫流程

本試驗計畫，如圖 3-1 所示，分兩階段進行：

**第一階段** 主要針對鐵、鋼碴的研磨及材料基本性質進行加工與分析，再依試驗結果設計砂漿的配比及製作試體，並透過砂漿之新拌性質試驗、力學性質試驗、微觀觀察與成分分析進行結果討論。

**第二階段** 主要選擇適當種類的爐碴，過篩後做為混凝土粗粒料(#4 篩)，並透過各項力學性、耐久性試驗進行結果討論。

**第三階段** 此為最後一階段的試驗，主要是將三種爐碴混合一起應用於水泥砂漿，由於此部分非於本次規畫之研究範圍，因此僅以抗壓試驗值做為日後相關研究之參考依據。

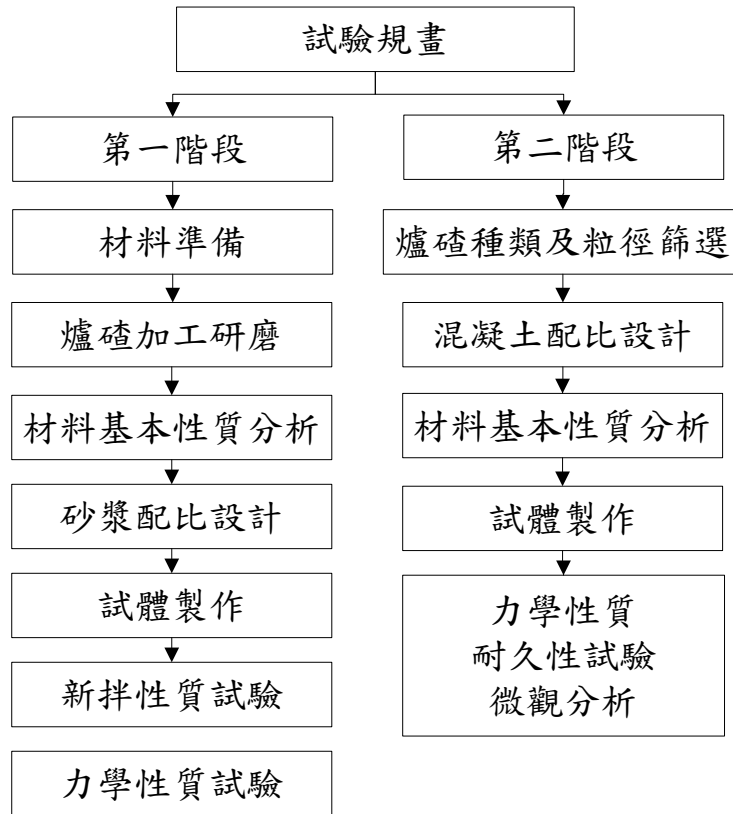


圖 3-1 試驗流程圖

(資料來源：本研究規劃)

## 第二節 試驗變數、配比及材料

### 3-2-1 試驗變數

第一階段的試驗變數可分為 3 類：

1. 選擇高爐爐渣、轉爐爐渣、電弧爐渣等 3 種鐵、鋼渣。
2. 研磨後鋼渣粒徑： $< 45 \mu\text{m}$ 、 $< 35 \mu\text{m}$ 、 $< 15 \mu\text{m}$ ，鐵渣則採用市面販售的水淬高爐渣粒徑約  $< 45 \mu\text{m}$  及  $< 35 \mu\text{m}$ 。
3. 爐渣取代水泥重量比 10 %、30 %、50 % 及 70 %。

第二階段的試驗變數可分為 2 類：

1. 同樣選擇高爐爐渣、轉爐爐渣、電弧爐渣等 3 種鐵、鋼渣。
2. 爐渣取代天然粗粒料體積比 50 % 及 70 %。

第三階段的試驗變數主要著重於鐵、鋼爐渣混合使用，依本次研究之爐渣種類混合使用可分為 2 類：

1. 水淬高爐鐵渣混合轉爐鋼渣取代水泥 30 % (wt %)。
2. 水淬高爐鐵渣混合電弧爐鋼渣取代水泥 30 % (wt %)。

### 3-2-2 試驗配比及編號說明

第一階段試驗中，砂漿之水膠比為 0.5，膠結料/細粒料為 1/2.75，濕養護 3、7、14、28 及 91 天，試驗配比如表 3-1 所示。編號 OPM 表示純水泥砂漿，編號 B、E、G 分別表示轉爐鋼渣、電弧爐鋼渣、水淬高爐鐵渣；字母後編號 1、3、5、7 分別表示爐渣取代水泥重量比 10 %、30 %、50 % 及 70 %。

表 3-1 鐵、鋼渣水泥砂漿試驗配比 (kg/m<sup>3</sup>)

編號	水	水泥	爐渣	粒料
OPM	258	516	-	1421
B1	259	466	52	1422
B3	260	364	156	1428
B5	261	261	261	1435
B7	262	157	367	1441
E1	259	466	52	1424
E3	260	364	156	1430
E5	262	262	262	1440
E7	264	157	370	1447
G1	258	464	52	1417
G3	257	360	154	1414
G5	257	257	257	1412
G7	256	154	358	1407

(資料來源：本研究規劃)

第二階段試驗中，混凝土之水灰比為 0.5，濕養護 91 天，試驗配比，如表 3-2 所示。編號 OPC 表示普通混凝土，編號 BA、EA、AA 分別表示轉爐鋼渣、電弧爐鋼渣、氣冷高爐鐵渣；字母後編號 50、100 分別表示鋼鐵渣取代天然粒料體積比 50 % 及 100 %。

表 3-2 鐵、鋼渣混凝土試驗配比 (kg/m<sup>3</sup>)

編號	水	水泥	鐵、鋼渣	細粒料	粗粒料
OPC	210	420	-	680	978
EA50	210	420	701	680	489
EA100	210	420	1402	680	-
BA50	210	420	664	680	489
BA00	210	420	1328	680	-
AA50	210	420	551	680	489
AA00	210	420	1103	680	-

(資料來源：本研究規劃)

表 3-3 為混合鐵、鋼渣水泥砂漿配比，水膠比為 0.5，濕養護 3、7、14 及 28 天。編號 OPM 表示純水泥砂漿，編號 B、E、G 分別表示轉爐鋼渣、電弧爐鋼渣、氣冷高爐鐵渣；字母後編號 1、2 分別表示鐵、鋼渣取代水泥之重量比 10% 及 20%。

表 3-3 混合鐵、鋼渣水泥砂漿配比 (kg/m<sup>3</sup>)

編號	水	水泥	鋼渣	鐵渣	粗粒料
B1G2	258	361	52	103	1418
B2G1	259	363	103	52	1424
E1G2	258	361	52	103	1421
E2G1	259	363	103	52	1427

(資料來源：本研究規劃)

### 3-2-3 試驗材料

拌合水：採自來水，符合 CNS1237 拌合水之要求。

水泥：卜特蘭 Type I 水泥，比重 3.15，其性質符合 CNS61 第一型卜特蘭水泥之要求，其化學性質，如表 3-4 所示。

水淬高爐爐渣：採 S4000 及 S6000 型水淬高爐渣，S4000 代表水淬高爐渣比表面積為 4000 cm<sup>2</sup>/g，依此類推 S6000 則為 6000 cm<sup>2</sup>/g，最大粒徑分別約為 < 45 μm 及 < 35μm，比重 2.89。卜作嵐活性指數 7 天及 28 天分別為 84% 及 99% (S4000)，水淬高爐爐渣化學成分，如表 3-5 所示。爐渣外觀，

如圖 3-5 所示。

轉爐爐渣：轉爐爐渣比表面積，分別為 4000、6000、10000  $\text{cm}^2/\text{g}^2$ ，最大粒徑，分別約  $< 45\mu\text{m}$ 、 $< 35\mu\text{m}$ 、 $< 15\mu\text{m}$ ，如圖 3-2、圖 3-3、圖 3-4 所示。比重 3.59。卜作嵐活性指數 7 天及 28 天分別為 62 %及 74 %，轉爐爐渣化學成分，如表 3-6 所示。轉爐爐渣外觀，如圖 3-6、圖 3-7 所示。

電弧爐爐渣：電弧爐渣比表面積，分別為 4000、6000、10000  $\text{cm}^2/\text{g}^2$ ，最大粒徑，分別約  $< 45$ 、 $< 35$ 、 $< 15\mu\text{m}$ ，如圖 3-2、圖 3-3、圖 3-4 所示。比重 3.79，電弧爐爐渣化學成分，如表 3-6 所示。電弧爐爐渣外觀，如圖 3-8、圖 3-9 所示。

天然細粒料：細度模數(F.M.)為 2，比重 2.55，吸水率 2 %，符合 ASTM C136，篩分析結果，如表 3-7 所示。

天然粗粒料：比重 2.64，粒徑約 0.5~2.5 cm，篩分析結果，如表 3-8。外觀如圖 3-10 所示。

電弧爐爐渣粗粒料：比重 3.79，經安定化處理後篩選 0.5~2.5 cm 粒徑，外觀如圖 3-11 所示。

氣冷高爐爐渣粗粒料：比重 2.98，粒徑約 0.5~2.5 cm，外觀如圖 3-12 所示。

轉爐爐渣粗粒料：比重 3.59，經安定化處理後篩選 0.5~2.5 cm 粒徑，外觀如圖 3-6 所示。

表 3-4 水泥化學成分

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

(資料來源：臺灣水泥股份有限公司)

表 3-5 鐵渣化學成分

項目 (%)	水淬高爐渣	氣冷高爐渣
二氧化矽 (SiO <sub>2</sub> )	33.42	31.2
氧化鋁 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	13.35	11.1
氧化鐵 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.21	1.39
氧化鈣 (CaO)	41.16	46.7
氧化鎂 (MgO)	7.76	6.2
錳 (Mn)	-	0.36
二氧化鈦 (TiO <sub>2</sub> )	-	0.70

(資料來源：本研究試驗分析)

表 3-6 鋼渣化學成分

項目 (%)	轉爐爐渣	電弧爐爐渣
二氧化矽 (SiO <sub>2</sub> )	12.2	21
氧化鋁 (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.76	12.2
氧化鐵 (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	32.2	28
氧化鈣 (CaO)	38.9	25.3
氧化鎂 (MgO)	6.26	5.67
三氧化硫 (SO <sub>3</sub> )	0.18	0.25
五氧化二磷 (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	-	0.45
二氧化鈦 (TiO <sub>2</sub> )	-	0.93
錳 (Mn)	2.39	4.48
釩 (V)	0.09	0.1
鈷 (Co)	0.05	0.04
鋇 (Ba)		0.09
氧化鈉 (Na <sub>2</sub> O)	-	-
氧化鉀 (K <sub>2</sub> O)	0.04	-

(資料來源：本研究試驗分析)

表 3-7 細粒料篩分析

篩號	各篩停留量(g)	停留百分率(%)	累積停留百分率(%)	通過百分率
3/8"	-	-	-	100
NO.4	-	-	-	100
NO.8	4	0.8	0.8	99.2
NO.16	32.8	6.6	7.4	92.64
NO.30	109.5	21.9	29.3	70.74
NO.50	224.3	44.9	74.1	25.88
NO.100	89.8	18.0	92.1	7.92
底盤	39.6	7.9	100	-
	F.M.		2.0	

(資料來源：本研究試驗分析)

表 3-8 粗粒料篩分析

篩號	各篩停留量(g)	停留百分率(%)	累積停留百分率(%)	通過百分率
1"	-	-	-	100
3/4"	4.9	0.2	0.2	99.8
1/2"	682.9	22.8	22.9	77.1
3/8"	1063	35.4	58.4	41.6
NO.4	1032	34.4	92.8	7.2
NO.8	129.9	4.3	97.1	2.9
底盤	87.3	2.9	100	-

(資料來源：本研究試驗分析)

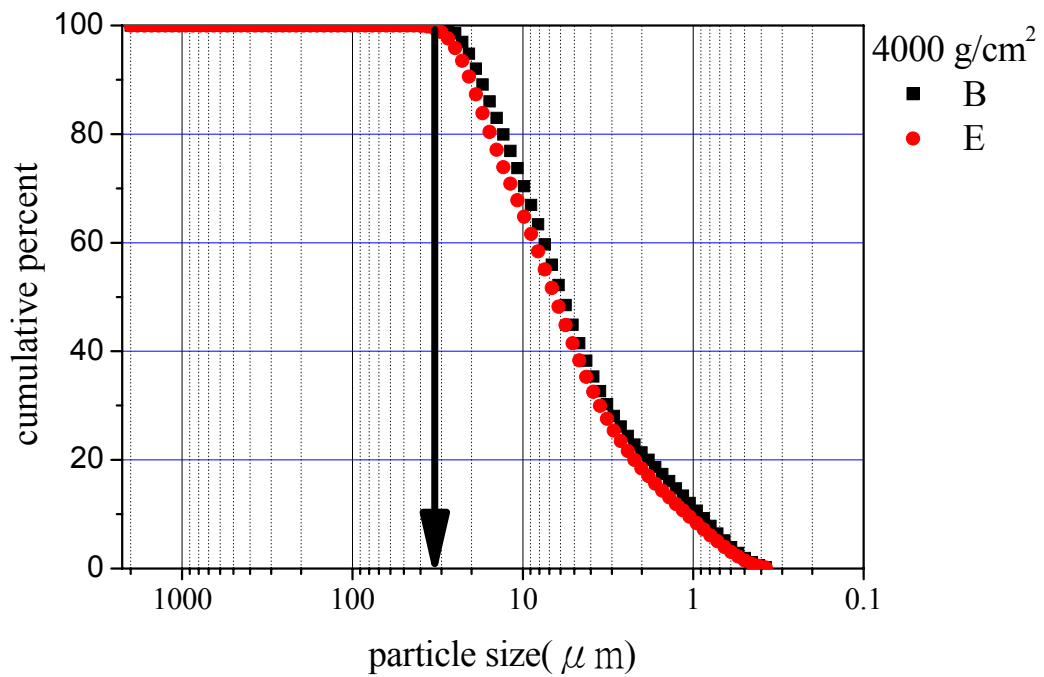


圖 3-2 鋼渣粒徑分佈圖(細度 4000 cm<sup>2</sup>/g)

(資料來源：本研究繪製)

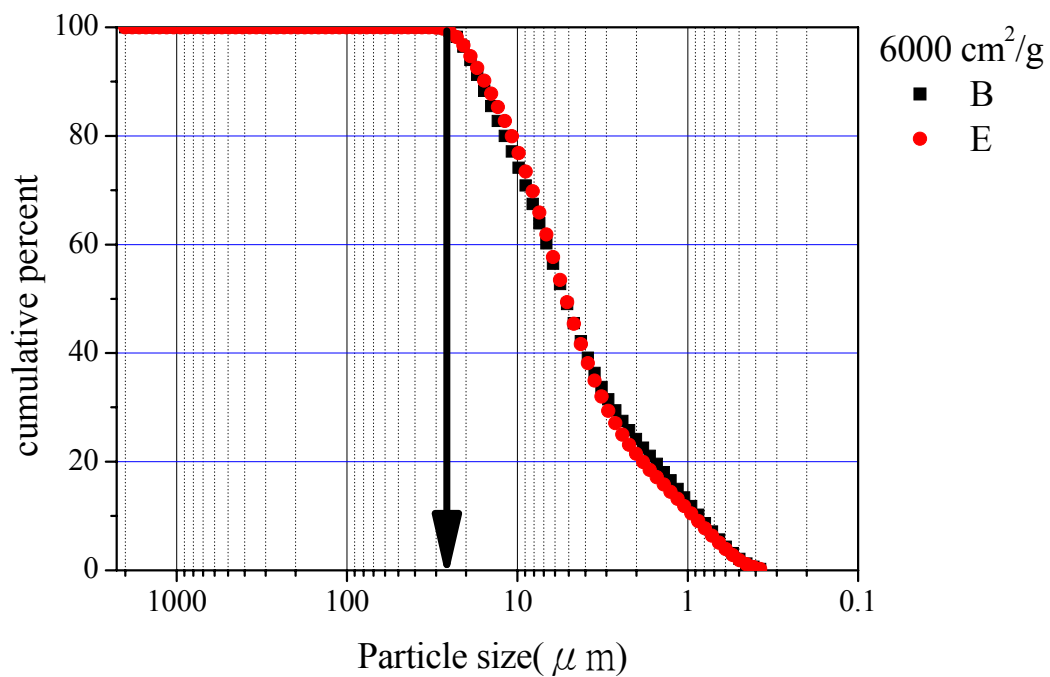


圖 3-3 鋼渣粒徑分佈圖(細度  $6000\text{ cm}^2/\text{g}$ )

(資料來源：本研究繪製)

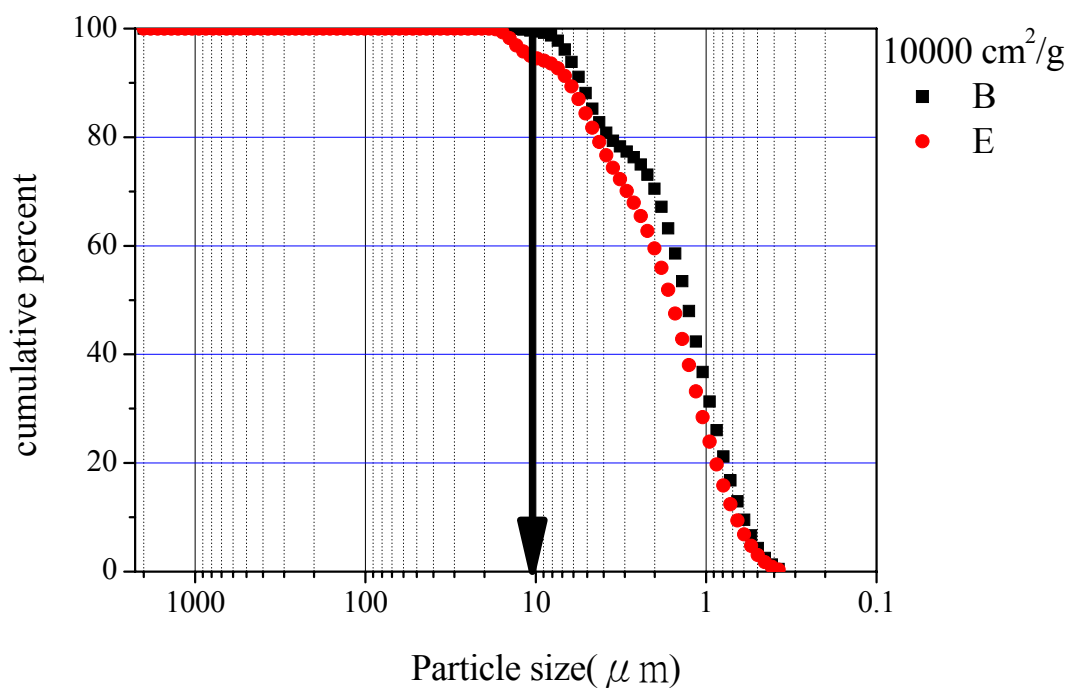


圖 3-4 鋼渣粒徑分佈圖(細度  $10000\text{ cm}^2/\text{g}$ )

(資料來源：本研究繪製)



圖 3-5 水淬高爐渣外觀

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3-6 轉爐爐渣外觀

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3-7 研磨後之轉爐爐渣外觀

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3-8 電弧爐爐渣外觀

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3-9 研磨後之電弧爐爐渣外觀

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3-10 天然粒料外觀

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3-11 篩後之電弧爐鋼渣外觀

(資料來源：本研究拍攝)



圖 3-12 篩後之氣冷高爐鐵渣外觀

(資料來源：本研究拍攝)

### 第三節 試驗方法、儀器或設備

#### 抗壓強度試驗

本試驗依據 ASTM C39 混凝土抗壓強度試驗和 ASTM C109 砂漿抗壓強度試驗規定進行抗壓試驗，將漿體灌入  $\psi 10 \times 20 \text{ cm}$  或  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$  模具內，待凝固後拆模置入養護槽內，養護至各齡期後將試體取出並以抹布拭乾及石膏蓋平置於材料試驗機上，以每秒  $1.4 \sim 3.4 \text{ kgf/cm}^2$  的加壓速率做單軸載重試驗。

#### 透水試驗

係參照 CNS 3763 標準進行，將試體上下面中央處置放一塊中央直徑為  $5 \text{ cm}$  透水圓孔，厚度  $1 \text{ cm}$  以上之橡皮襯墊並緊塞後，由試體上方施加水壓  $1$  小時，如為水泥砂漿用應加水壓  $9.8 \text{ kPa}$ ，如係混凝土用則採水壓  $294.0 \text{ kPa}$ ，試驗裝置如圖 3-13 所示，其結果以下式 3-1 表示之：

$$\text{透水量(g)} = m_2 - m_1 \quad (3-1)$$

$m_1$  = 試體乾燥後，於室溫下存放至少  $1$  小時後試體質量。

$m_2$  = 施以  $294.0 \text{ kPa}$  之水壓  $24$  小時後試體重。



圖 3-13 混凝土透水試驗裝置

(資料來源：本研究拍攝)

圍塘試驗(Ponding test)

圍塘試驗是利用氯離子溶液濃度梯度差的傳輸方式，在混凝土中進行自然擴散。根據 AASHTO T259 鹽池試驗的試驗說明，係採方形 300 cm<sup>2</sup> (A) × 7.5 cm (H) 之水泥質材料試體，並於頂部加約 2 cm 高之防水圍束，其餘暴露的表面以環氧樹脂塗封，以避免溶液由其它位置滲出。此試驗設計目的是為了使溶液以單一垂直水平方向擴散，試驗溶液為 3 % NaCl，溶液注入圍束內高度建議約 1 至 1.5 cm，待靜置 90 天後，鑽心取樣可利用 NT BUILD 492 比色法分析深度或參考 AASHTO T260 酸溶法分析各深度之氯離子含量。本研究之鹽池試驗主要是參照 AASHTO T259 鹽池試驗方法，由於分析深度與濃度只需要針對試體少部分區域取樣便可，因此在不影響試驗結果的條件下，將試體改成 φ10 cm (D) × 10 cm (H) 的圓柱試體，試驗裝置如圖 3-14 所示。

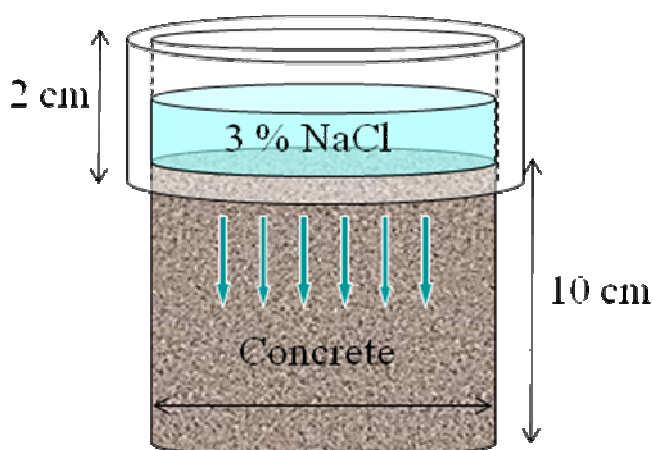


圖 3-14 圍塘試驗裝置

(資料來源：本研究繪製)

試驗試體經處理後如圖 3-15 所示，利用酸溶法分析各深度氯離子濃度，可再透過 Fick's second law 求得擴散係數  $D_{cl}$ 。

$$\text{Fick's second law : } \frac{\partial C_i}{\partial t} = D_{cl} \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} \quad (2)$$

由式(3)求得當距離為  $x$ ，時間  $t$  時，每單位試體氯離子含量：

$$C_{(x,t)} = C_0 \left[ 1 - \text{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4D_{cl}t}} \right) \right] \quad (3)$$

其中： $C(x,t)$ 為距離  $x$  時，試體的氯離子含量；

$C_0$  (% concrete mass)為試體表面暴露濃度；

$x$  (cm)為滲透深度；

$D_{cl}$  ( $m^2/s$ )為氯離子擴散係數；

$t$  (s)靜置時間；

erf 為 error function。

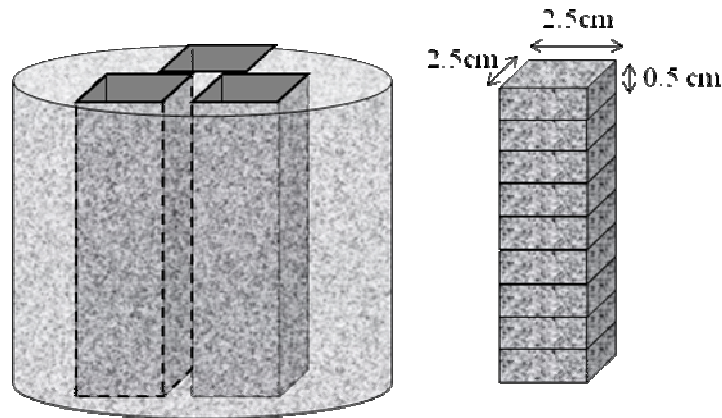


圖 3-15 圍塘試驗試體處理

(資料來源：本研究繪製)

### 中性化試驗(碳化試驗)

將混凝土置放在碳化箱內，以加壓(15 atm)的方式進行碳化。然後參考 RILEM CPC-18 所提議之方法，在 70 % 的乙醇溶液中加入 1 % 的酚酞，噴灑於試體橫斷面上。由於酚酞是一種酸鹼指示劑，在 pH 值大於 9.2 以上時，會由無色轉為紅色，因此試體未中性化時將呈紅色，據此可以瞭解中性化深度、碳化速率等。最近的研究顯示，RILEM CPC-18 的方法可能低估了中性化的程度，所以採用由國外進口的最新混凝土用 pH 值指示劑，此指示劑可以將是否中性化的範圍定義為 pH 值是低於或是高於 11。鹼活化爐石混凝土不同於混凝土，它的水化生成物並無氫氧化鈣，所以當它受到二氧化碳侵入時，二氧化碳並不是與氫氧化鈣中和形成碳酸鈣，但是水溶性的二氧化碳形成碳酸根離子，可能仍會中和孔隙水中的強鹼性(這強鹼性是由未反應的鹼活化液所提供)，造成所謂的中性化。試驗儀器外觀，如圖 3-16 所示。



圖 3-16 加速碳化箱

(資料來源：本研究拍攝)

#### 吸水率、孔隙率(顯孔隙率)試驗

本試驗依 ASTM C373 進行，取烘乾一天後的試體，待溫度降至室溫測量試體重量  $D$ ，然後放入燒杯中加水至試體完全浸沒，加熱至沸騰排除試體氣孔中的空氣，並保持微沸狀態 5 小時，然後在水中冷卻至 24 小時以上，待溫度降至室溫量測並記錄浸沒在水中試體的浮重  $S$ ，接著從水中取出試體用毛巾擦去表面多餘的水分秤重，即得空氣中的飽和試體重量  $W$ 。

$$\text{吸水率(\%)} = \frac{W - D}{D} \quad \text{孔隙率(\%)} = \frac{W - D}{V} \quad (4)$$

其中  $D$ ：試體乾燥後重量

$W$ ：飽和試體在空氣中重

$S$ ：飽和試體在水中重

$V$ ：試體體積  $V=W-S$

#### 抗硫酸鹽健性試驗

本試驗參考 ASTM C88 進行，試驗步驟為將試體浸於飽和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ( $\text{pH}=8.7$ ) 溶液中 24 小時後，取出試體置於溫度為  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  烘箱中烘乾 24 小時，此稱為 1 次循環，

共經 5 次循環後，進行抗壓強度試驗。

### 加速氯離子滲透試驗(RCPT)

本試驗參考 ASTM C1202 規定之方法進行試驗，圓柱試體在水中分別養護至適當齡期取出後再以混凝土切割機切割，取試體中央部分橫向尺寸(D)為 10 cm 及縱向尺寸(H) 5 cm 之兩試片進行氯離子快速滲透試驗，切割完成後將試片烘乾並靜置 24 小時，接著使用防水材料將試片四周塗封並置入真空室中，利用真空幫浦抽氣使得真空度達到 1 mmHg 大氣壓並保持真空度 3 小時。之後，打開止水閥讓已沸騰過的蒸餾水(須冷卻後)流入真空室直到蒸餾水蓋過試片，再打開真空幫浦進行續抽(須至少 1 小時)。結束後，打開真空室使空氣流入，並取出試片浸置水中 18±2 小時。試驗配置，須將試片安裝於電滲槽中，並於陰極槽放入 3%之氯化鈉溶液，陽極槽放入 0.3N 之氫氧化鈉溶液，確認試片與電滲槽之間不漏水後即完成整個電路的配置，電滲試驗之配置，如圖 3-17 所示。

試驗時外加 60V 的定直流電壓，通電後便可得到第 0 小時的電流值，之後每半個小時記錄一次，直到 6 小時後試驗完成，將所記錄每半小時的電流值代入以下公式便可計算出總通過電量：

$$Q = 900(I_{00} + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (5)$$

式中

Q : 總通過電量(coulombs)

I<sub>0</sub> : 外加電壓後初始的電流值(amperes)

I<sub>t</sub> : 外加電壓後第 t 分鐘的電流值(amperes)

若試體的直徑非 9.5 cm，則依據 ASTM C1202 規範必須修正總通過電量公式：

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{9.5}{X}\right)^2 \quad (6)$$

式中

Q<sub>s</sub> : 試體直徑為 9.5cm 之總通過電量(coulombs)

$Q_x$  : 試體直徑為 X cm 之總通過電量(coulombs)

X : 試體直徑(cm)

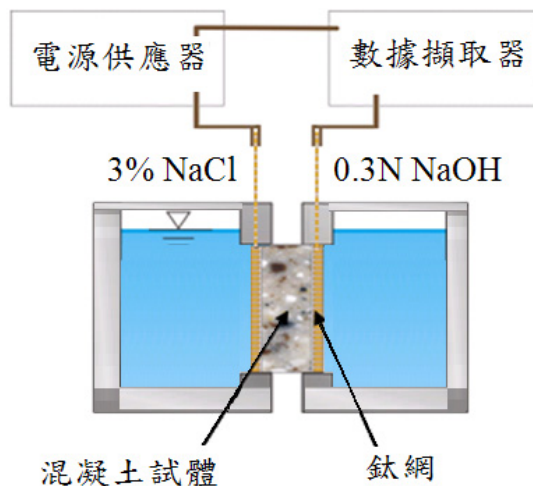


圖 3-17 加速氯離子滲透試驗裝置 RCPT

(資料來源：本研究繪製)

### 耐久性評估

AASHTO T277 利用累積總電量來評估混凝土的氯離子穿透能力，共分成高、中等、低、非常低或微量等五級，可據此來解釋混凝土的緻密性與耐久性，評估表，如表 3-9 所示。

表 3-9 累積通過電量對氯離子穿透指標評估表

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：AASHTO T277)

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

本研究使用 HITACHI 公司生產之 S-4800 型掃描式電子顯微鏡觀察微觀結構。其主要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，再藉由螢光幕呈現試體微觀晶相。能量分散光譜儀 (energy dispersive spectroscopy, EDS) 附屬於 SEM 設備中，採用逆偏壓的矽 (鋰) 偵測器。由於每一入射的高能 X 光會放出大部分能量而形成電子-電洞對，外加電壓可使得電子及電洞移動產生脈動，多頻道分析器紀錄此電壓脈動並產生尖峰值，再由尖峰值比對材料之元素，儀器外觀如圖 3-18 所示。



圖 3-18 掃描式電子顯微鏡(SEM S-4800)

(資料來源：本研究拍攝)

### X 光繞射分析(X-ray Diffraction, XRD)

本研究使用 PANalytical 所生產的 X 光繞射分析儀(型號：X'Pert Pro)，該儀器所使用的靶材為銅靶。X 光繞射分析係利用 X 光照射在試體，繞射後的 X 光會沿著與入射角成  $2\theta$  夾角之圓錐面射出，藉由紀錄不同角度時的繞射強度可繪製  $2\theta$ -強度圖。由 Bragg's law 可知，當  $\lambda=2d\sin\theta$  時會產生建設性干涉，因而會有繞射峰產生。不同的化合物均有不同的繞射結果產生，所以可利用比對高峯值發生的位置，判別試體內化合物組成結構，儀器外觀如圖 3-19 所示。

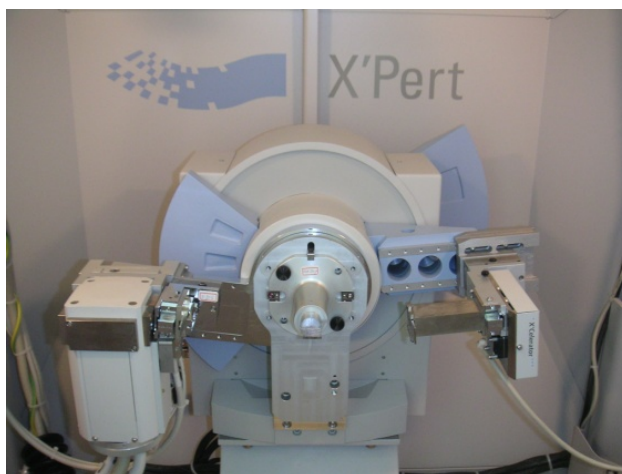


圖 3-19 X 光繞射分析儀(XRD)

(資料來源：本研究拍攝)

### 流度試驗

本研究之流度試驗，係依 ASTM C230-08 水硬性水泥流度試驗規範進行，依照規範內容將各比例之漿體，灌入指定規格之流度台上，振動速率為 100 r/min，完成後記錄漿體四邊之坍流直徑。



圖 3-20 流度台

(資料來源：本研究拍攝)

凝結時間試驗

本研究之流度試驗，係依 ASTM C191-08 水硬性水泥凝結時間試驗(費開氏針法)法進行，試驗時需要照規範將漿體灌入指定規格之模具，並平均每 15 min 記錄一次針入度，直到針入度達 25 mm 左右表示開始初凝，最後當針頭只停留於表面並持續約 5 min 表示終凝。

## 第四章 試驗結果與討論

### 第一節 鐵、鋼渣水泥砂漿試驗結果

#### 1. 流度試驗結果

##### 轉爐鋼渣對水泥砂漿流度之影響

圖 4-1 中 X 軸表示普通水泥砂漿及不同細度之轉爐鋼渣分別添加於水泥砂漿之比例；Y 軸則表示漿體流度(cm)。圖中顯示，細度 4000 與 6000  $\text{cm}^2/\text{g}$  之轉爐鋼渣，添加量無論是 10 % 或 70 %，在流度方面大致上與控制組相近，介於 16 cm 至 17 cm 之間，而細度 10000  $\text{cm}^2/\text{g}$  之轉爐鋼渣對水泥砂漿流度的影響明顯較其他兩組不同細度之轉爐鋼渣不同，不論取代量水泥的量多或量少，皆可能使漿體流度降低或喪失其流動性，其中以轉爐渣用量 70 % 對流度影響最明顯，最大坍流直徑僅維持於 10 cm，如圖 4-2 及圖 4-3 所示。

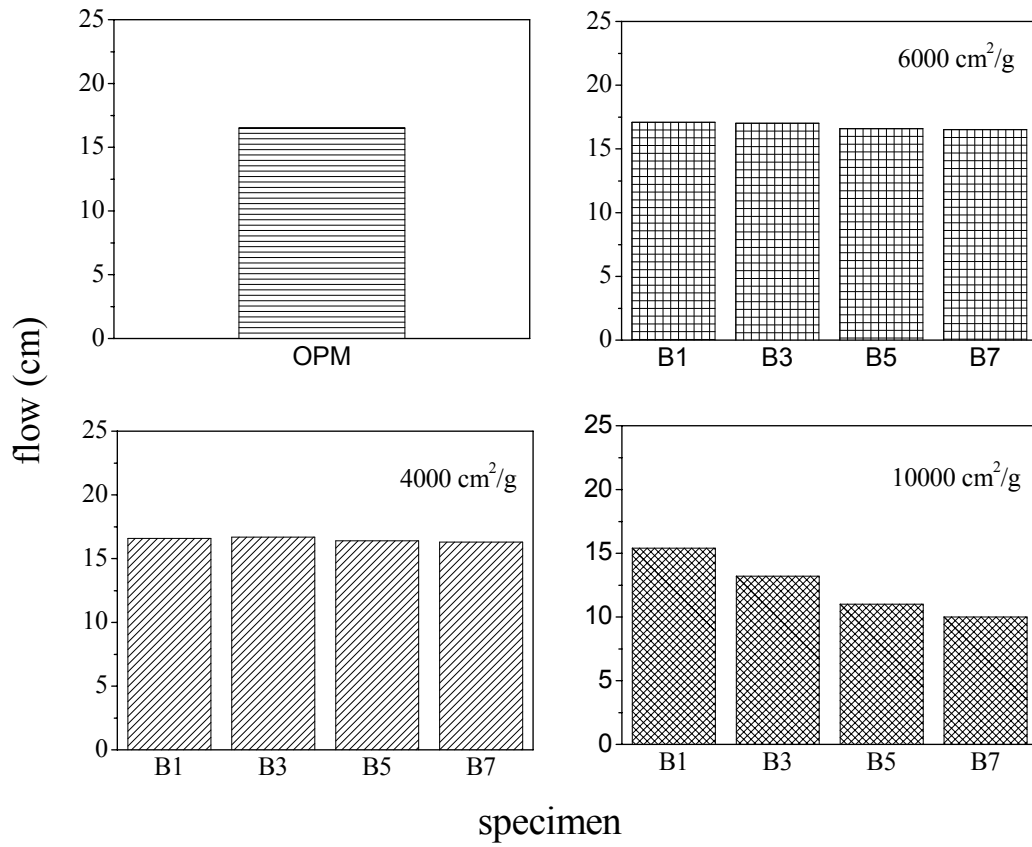


圖 4-1 轉爐鋼渣水泥砂漿流度

(資料來源：本研究繪製)

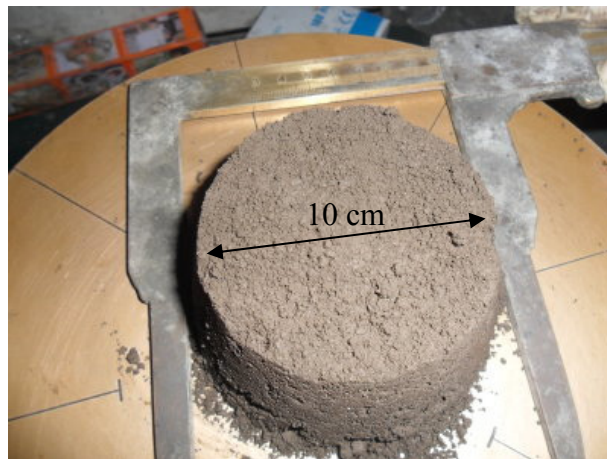


圖 4-2 轉爐鋼渣水泥砂漿流度照片(10000 cm<sup>2</sup>/g)

(資料來源：本研究拍攝)

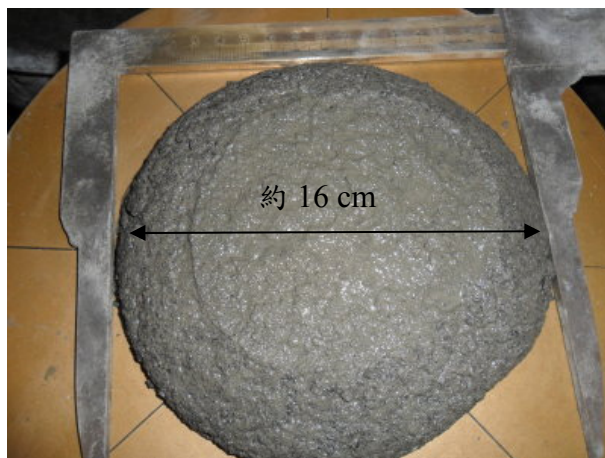


圖 4-3 普通水泥砂漿流度照片

(資料來源：本研究拍攝)

#### 添加電弧爐鋼渣對水泥砂漿流度之影響

圖 4-4 為不同細度之電弧爐鋼渣取代水泥(wt%)砂漿流度的試驗結果。圖中顯示，不同細度之電弧爐鋼渣取代水泥時，可以增加電弧爐鋼渣水泥砂漿之流動性，而且電弧爐鋼渣的比表面積越大，砂漿的流度越佳。另外由圖 4-5 可發現，電弧爐鋼渣取代水泥的量越多，流度越好，其中取代量 70% 之電弧爐鋼渣水泥砂漿效果最明顯，相較於普通水泥砂可增加流度 12%，而取代量 50% 及 30% 之電弧爐鋼渣粉水泥砂漿，則分別增加流度 8%、4%。

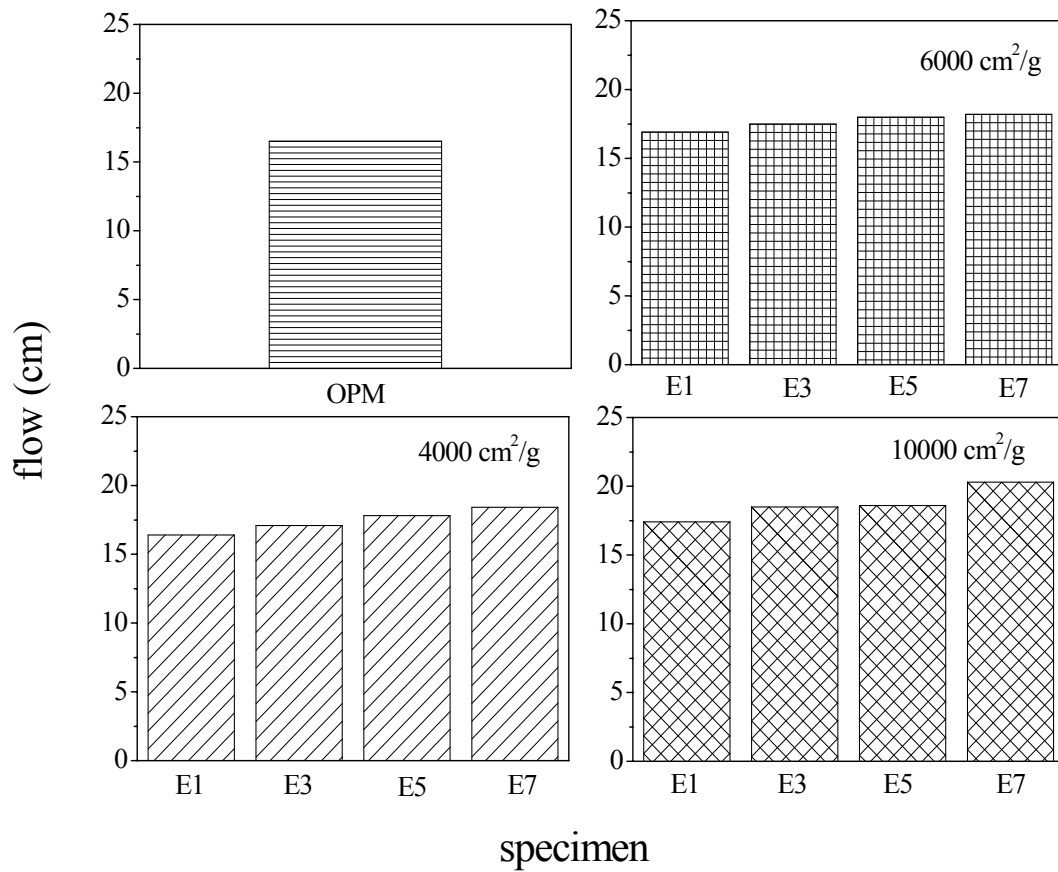


圖 4-4 電弧爐鋼渣水泥砂漿流度

(資料來源：本研究繪製)

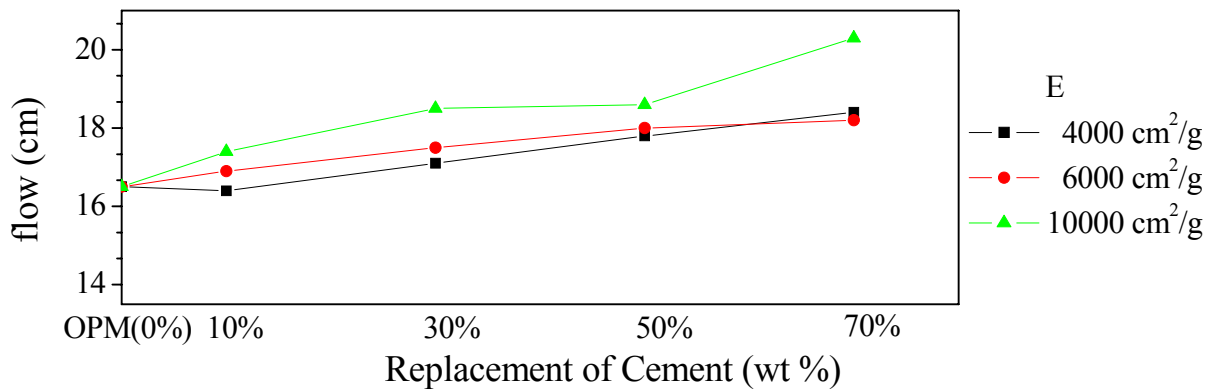


圖 4-5 電弧爐鋼渣用量與水泥砂漿流度關係圖

(資料來源：本研究繪製)

### 添加水淬高爐鐵渣對水泥砂漿流度之影響

圖 4-6 為水淬高爐鐵渣水泥砂漿之流度試驗結果。圖中發現，添加水淬高爐渣可增加水泥砂漿之流度，可是取代水泥量的比例與流度之間並無一定的成長趨勢，圖中顯示添加水淬高爐鐵渣粉，大致水泥砂漿之流動性提升 2%~11%。

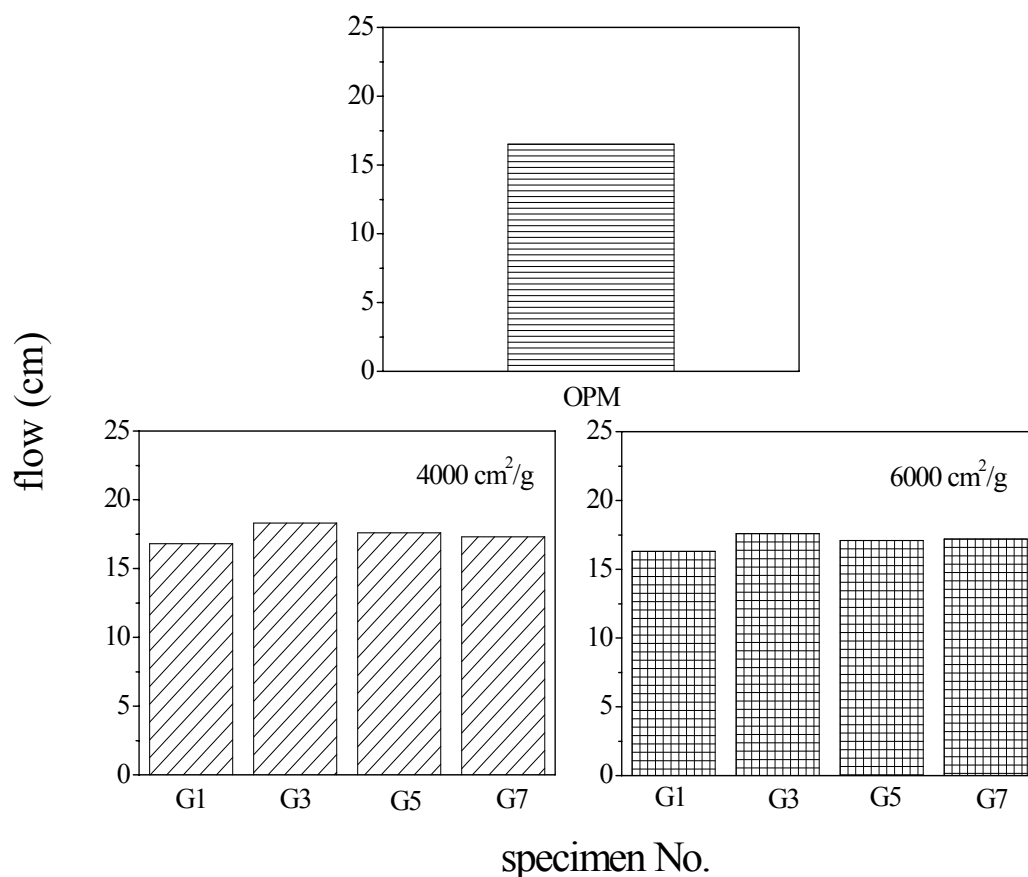


圖 4-6 水淬高爐鐵渣水泥砂漿流度

(資料來源：本研究繪製)

## 2. 初終凝試驗結果

### 轉爐鋼渣對水泥砂漿初終凝時間之影響

本研究之初終凝試驗是根據 CNS 786 水硬性水泥凝結時間檢驗法（費開氏針法）進行。圖 4-7 為轉爐鋼渣水泥砂漿凝結時間試驗的結果，圖中 X 軸表示凝結時間；Y 軸則表示針入度。由圖 4-8 可發現，不同取代量之轉爐鋼渣會增加砂漿的凝結速度。當

轉爐鋼渣之取代量增加時，初終凝結速度就越快，其中以轉爐鋼渣取代量為 70 % 之砂漿最明顯，大約 45 min 就已達到終凝，相較於普通水泥砂漿之 195 min 終凝時間，足足減少 150 min，其次依序為取代量 50 %、30 %、10 % 之轉爐鋼渣水泥砂漿，終凝時間比普通水泥砂漿分別減少。

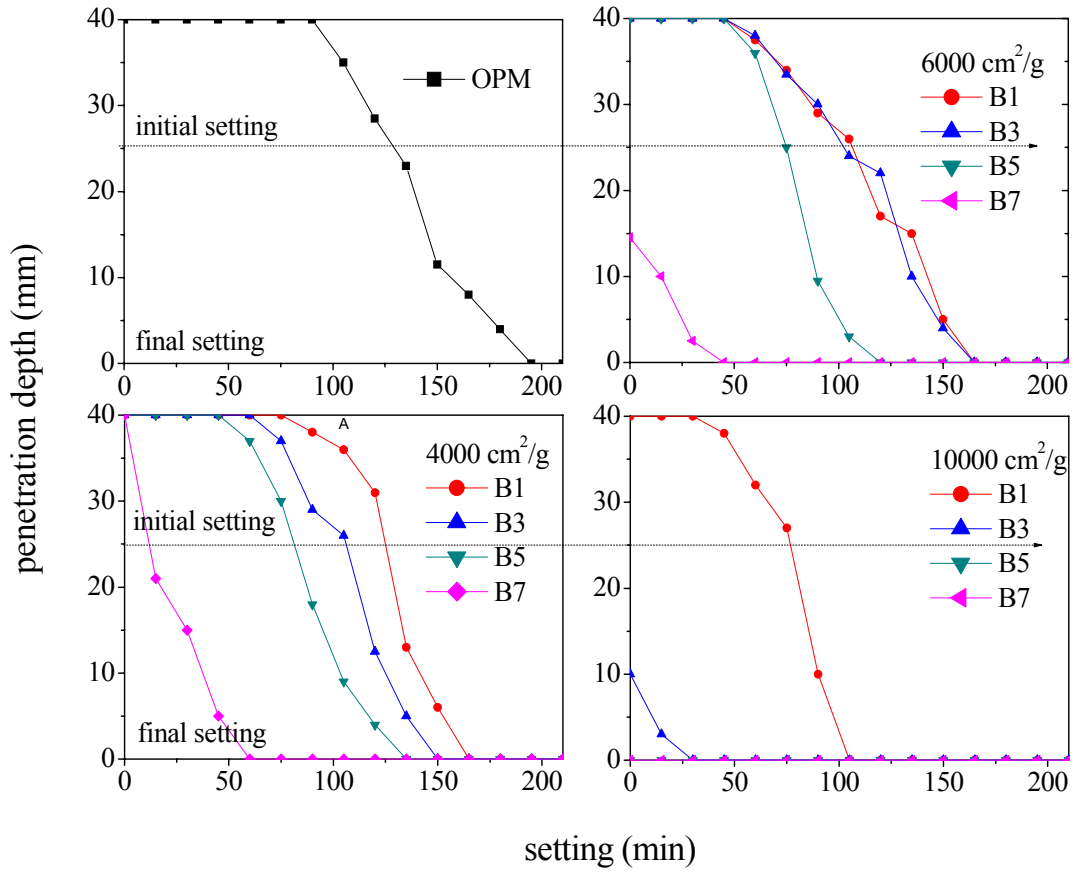


圖 4-7 轉爐鋼渣水泥砂漿凝結時間

(資料來源：本研究繪製)

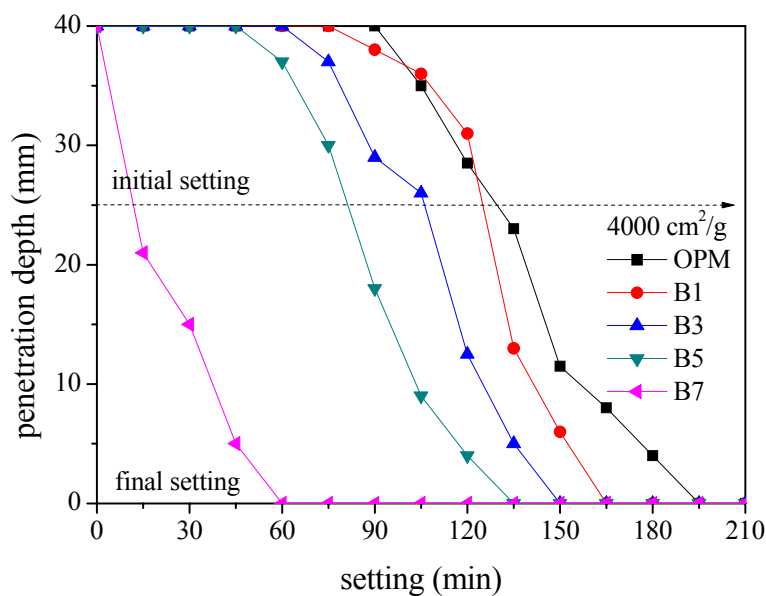


圖 4-8 不同取代量之轉爐鋼渣水泥砂漿初終凝時間

(資料來源：本研究繪製)

圖 4-9 為不同細度之轉爐鋼渣水泥砂漿初終凝時間試驗結果，圖中 X 軸表示凝結時間，Y 軸則表示針入度。從圖中得知，轉爐鋼渣細度會影響水泥砂漿之凝結時間，其中以細度  $10000 \text{ cm}^2/\text{g}$  的凝結時間最快，幾乎是 0 min 或僅有幾 sec，其次為細度  $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$  及  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$  之轉爐鋼渣水泥砂漿，其終凝時間分別為 45 min 及 60 min。

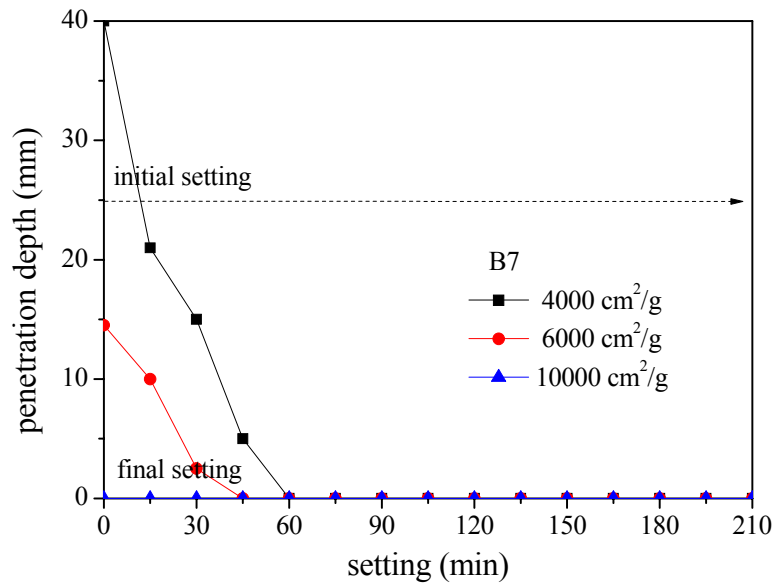


圖 4-9 不同細度之轉爐鋼渣對水泥砂漿初終凝之影響

(資料來源：本研究繪製)

#### 電弧爐鋼渣對水泥砂漿初終凝時間之影響

圖 4-10 試驗結果發現，添加電弧爐鋼渣之水泥砂漿，其凝結時間稍微低於水泥砂漿。電弧爐鋼渣取代水泥量越多，初終凝結時間越快，此外，在相同取代水泥量下，電弧爐鋼渣粉細度越小，其凝結時間越快。但整體來說，主要還是以電弧爐鋼渣粉細度大小影響較明顯。在電弧爐鋼渣粉的添加量部分，取代水泥量 70% 之砂漿凝結速度最快。圖 4-11 為添加量 70% 之不同細度電弧爐鋼渣粉水泥砂漿與凝結時間之關係圖。結果顯示電弧爐鋼渣粉比表面積越大，凝結時間越快；細度 10000 cm<sup>2</sup>/g 之電弧爐鋼渣水泥砂漿初凝時間為 60 min，終凝時間為 105 ~ 120 min，細度 6000 cm<sup>2</sup>/g 之電弧爐鋼渣水泥砂漿初凝時間為 94 min，終凝時間為 135 min，而細度 4000 cm<sup>2</sup>/g 之電弧爐鋼渣水泥砂漿初凝時間為 115 min，終凝時間為 150 min。

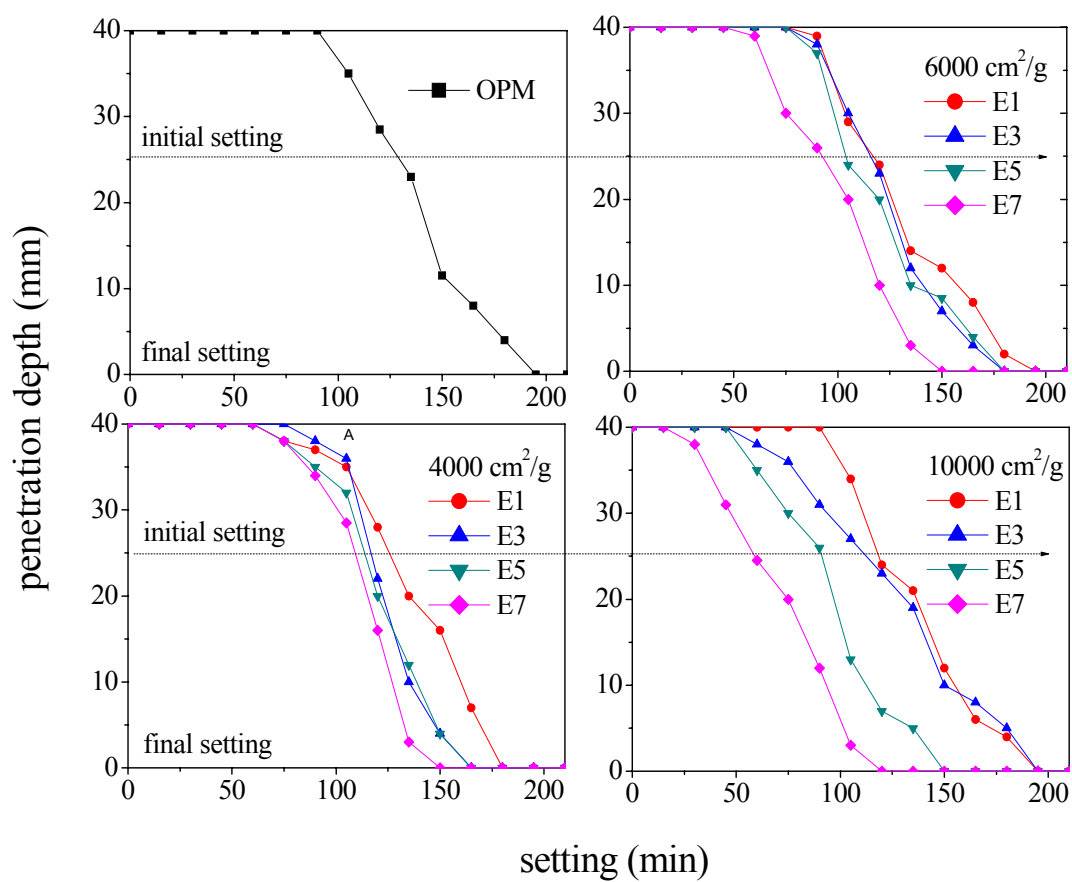


圖 4-10 電弧爐鋼渣水泥砂漿初終凝時間

(資料來源：本研究繪製)

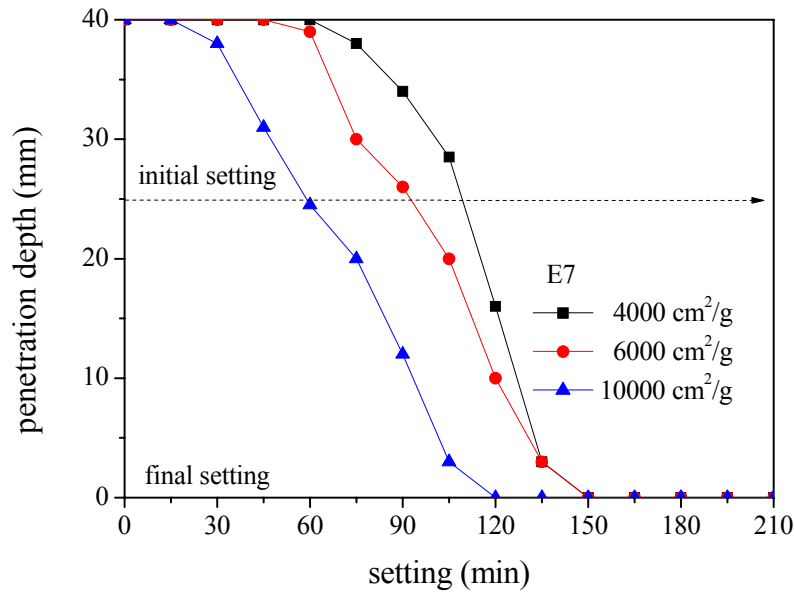


圖 4-11 不同細度電弧爐鋼渣水泥砂漿初終凝時間

(資料來源：本研究繪製)

#### 水淬高爐鐵渣對水泥砂漿初終凝時間之影響

圖 4-12 為水淬高爐鐵渣粉水泥砂漿凝結時間試驗結果，添加水淬高爐鐵渣粉之水泥砂漿與轉爐鋼渣粉及電弧爐鋼渣粉一樣，會減少砂漿之凝結時間，而且添加量越多，水泥砂漿初終凝的時間越短。再透過圖 4-13 得知，水淬高爐鐵渣粉比表面積越大，初終凝速度就越快，其中細度 6000 cm<sup>2</sup>/g 水淬高爐鐵渣粉之砂漿初凝時間約 60 min，終凝時間 105~120 min，細度 4000 cm<sup>2</sup>/g 水淬高爐鐵渣粉之砂漿初凝時間約 76 min，終凝時間 120~135 min。

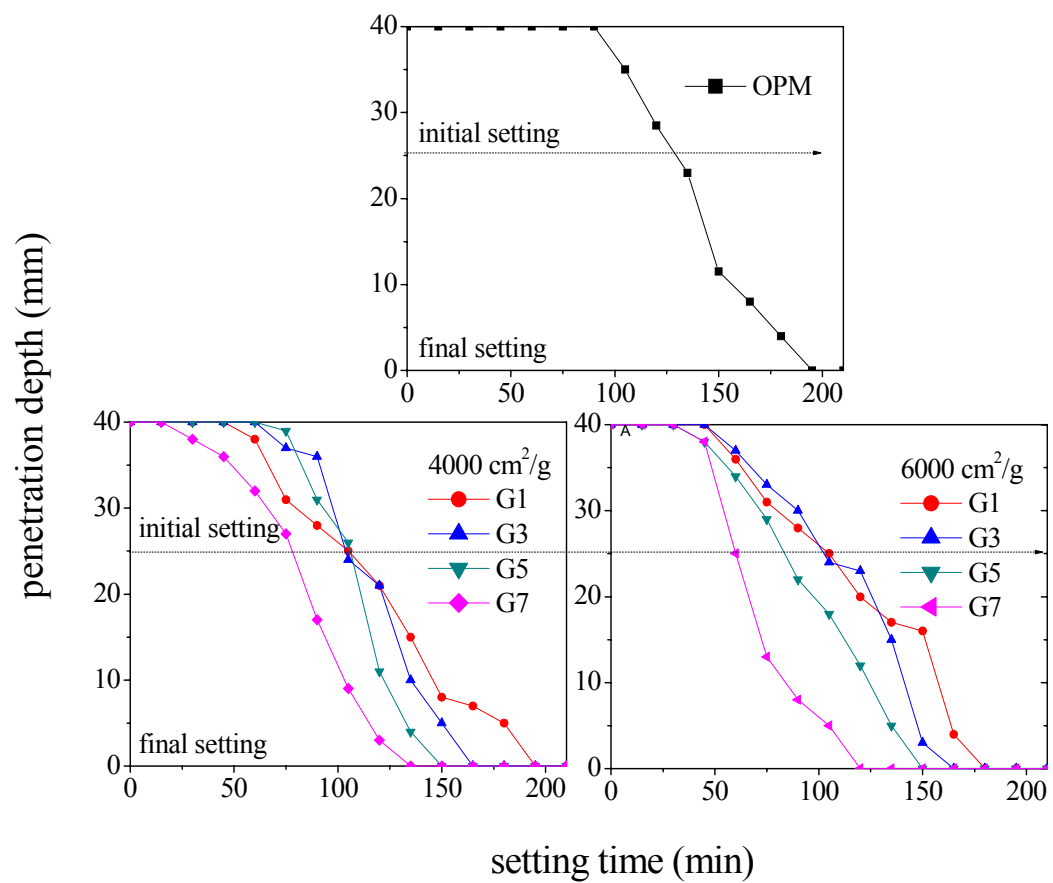


圖 4-12 水淬高爐鐵渣水泥砂漿初終凝時間

(資料來源：本研究繪製)

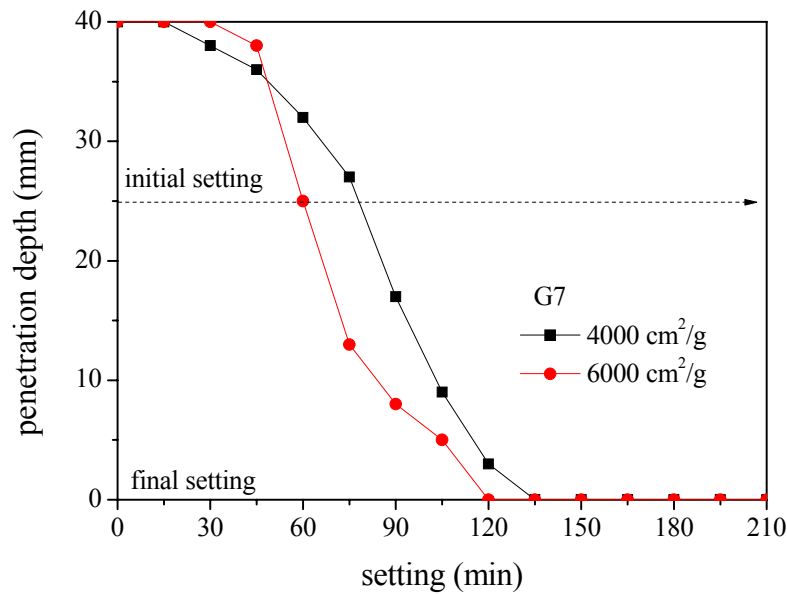


圖 4-13 不同取代量之水淬高爐鐵渣水泥砂漿初終凝時間

(資料來源：本研究繪製)

#### 鐵、鋼渣對水泥砂漿初終凝時間之影響

圖 4-14 為添加鐵渣粉及鋼渣粉之砂漿初終凝時間試驗結果。圖中點線表示添加轉爐鋼渣粉水泥砂漿；虛線表示添加電弧爐鋼渣粉水泥砂漿；實線則表示水淬高爐鐵渣粉水泥砂漿，鐵、鋼渣粉用量則選擇初終凝現象較明顯的 70 % 進行比較。由圖中發現，電弧爐鋼渣粉細度 4000 cm<sup>2</sup>/g 及 6000 cm<sup>2</sup>/g 之水泥砂漿，其初終凝時間最慢，然後依序是水淬高爐鐵渣粉細度 4000 cm<sup>2</sup>/g、6000 cm<sup>2</sup>/g 及電弧爐鋼渣粉細度 10000 cm<sup>2</sup>/g 之砂漿，而添加轉爐鋼渣粉之砂漿初終凝時間最快。

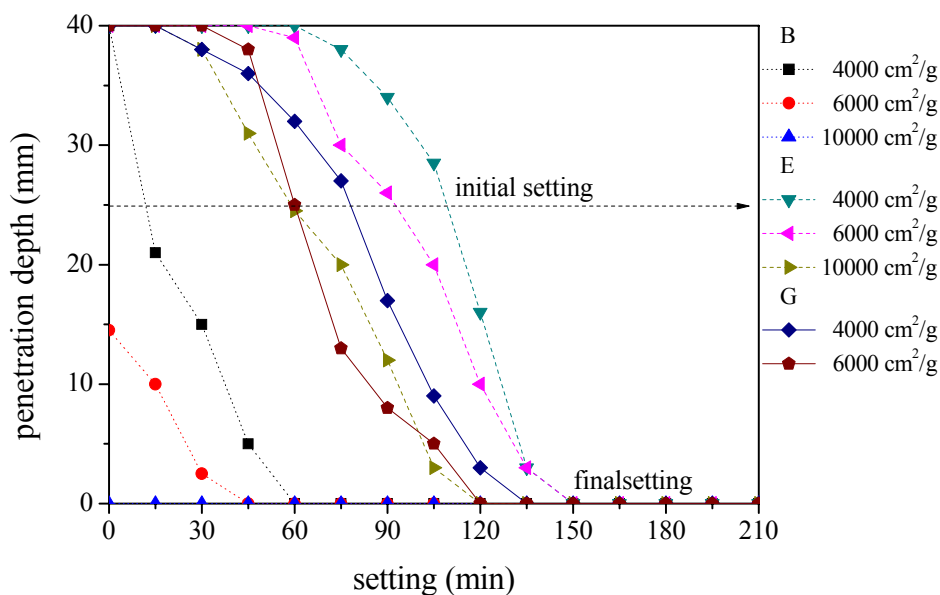


圖 4-14 鐵、鋼渣粉水泥砂漿初終凝時間

(資料來源：本研究繪製)

### 3. 力學性質試驗

#### 轉爐鋼渣對水泥砂漿抗壓強度之影響

圖 4-15 為轉爐鋼渣水泥砂漿之抗壓強度試驗結果。圖中僅列出取代水泥 10 % 及 30 % (wt %) 的砂漿抗壓試驗結果，主要原因是因為當轉爐鋼渣取代水泥 50 % 及 70 % 時，於水中養護的過程中，試體會出現膨脹及龜裂之問題，進而可能影響試體之抗壓強度，如圖 4-16 所示。而且由圖 4-17 發現，轉爐鋼渣比表面積越大，所產生的膨脹及龜裂問題就越明顯。

圖 4-18 顯示轉爐鋼渣粉水泥砂漿各細度及添加量於 91 天齡期的抗壓強度，圖 4-19 為細度  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，取代水泥量 0 %、10 % 及 30 % 於各齡期之抗壓強度發展圖。由圖中得知，轉爐鋼渣粉取代水泥會降低砂漿的抗壓強度，而且添加量越多，對於抗壓強度的損失程度就越大。透過圖 4-18 發現，在相同取代水泥量下，不同細度之轉爐鋼渣粉，對於轉爐鋼渣粉水泥砂漿的抗壓強度影響並不明顯；但是不同的水泥取代量對轉爐鋼渣粉抗壓強度之影響卻非常顯著。當水泥取代量 10 %、30 %、50 % 及 70 % 時，皆會降低水泥砂漿之抗壓強度，其中以取代量 10 % 影響最小，折減率約 4.48 % 到 8.22 %，

接續為取代量 30 % 之轉爐鋼渣水泥砂漿，折減率 21.09 % 至 25.91 %，至於取代量 50 % 及 70 % 之轉爐鋼渣水泥砂漿，因為受到試體開裂的影響，導致試驗無法順利進行，而試體開裂問題，也許是因前述體積膨脹現象而產生。

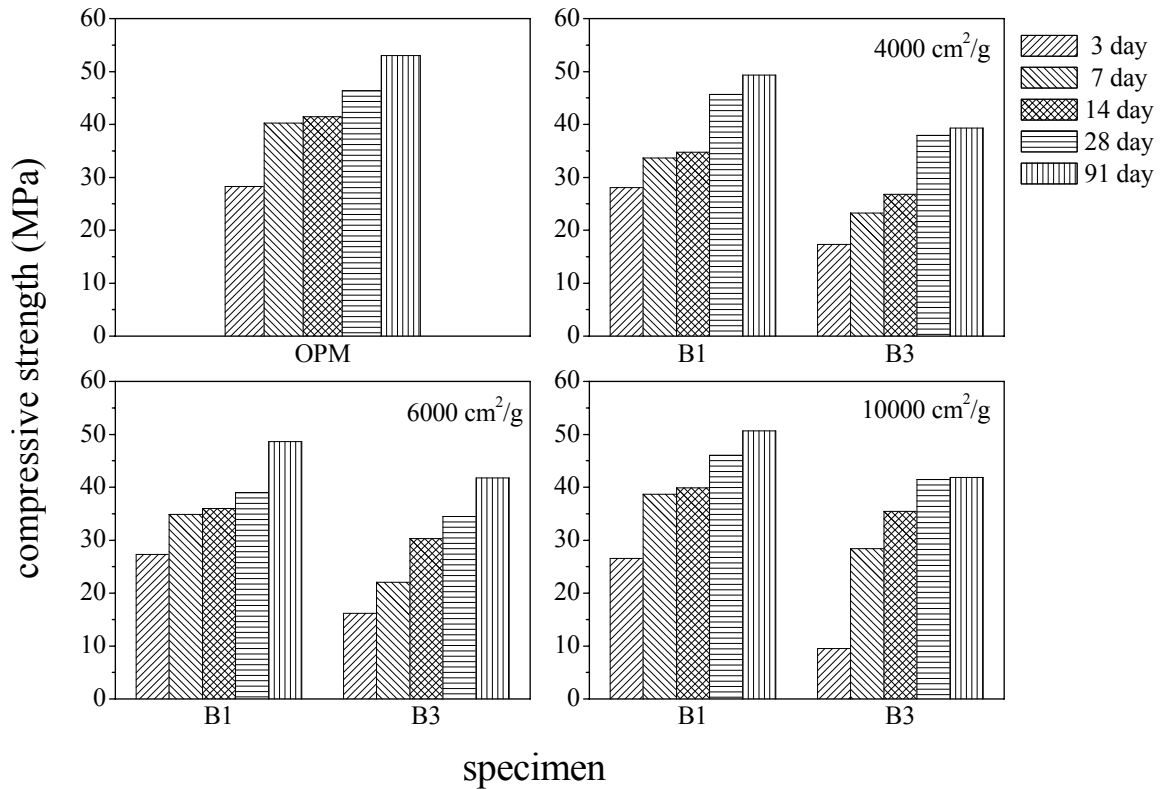


圖 4-15 轉爐鋼渣水泥砂漿抗壓強度

(資料來源：本研究繪製)

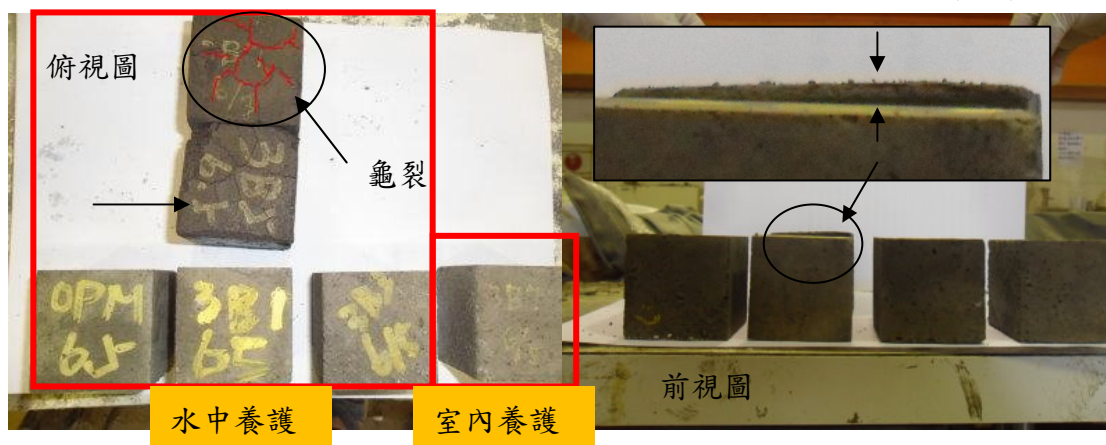


圖 4-16 轉爐鋼渣水泥砂漿試體膨脹及龜裂(細度 4000  $\text{cm}^2/\text{g}$ )

(資料來源：本研究拍攝)



圖 4-17 轉爐鋼渣粉水泥砂漿試體膨脹及龜裂(細度 6000  $\text{cm}^2/\text{g}$ )

(資料來源：本研究拍攝)

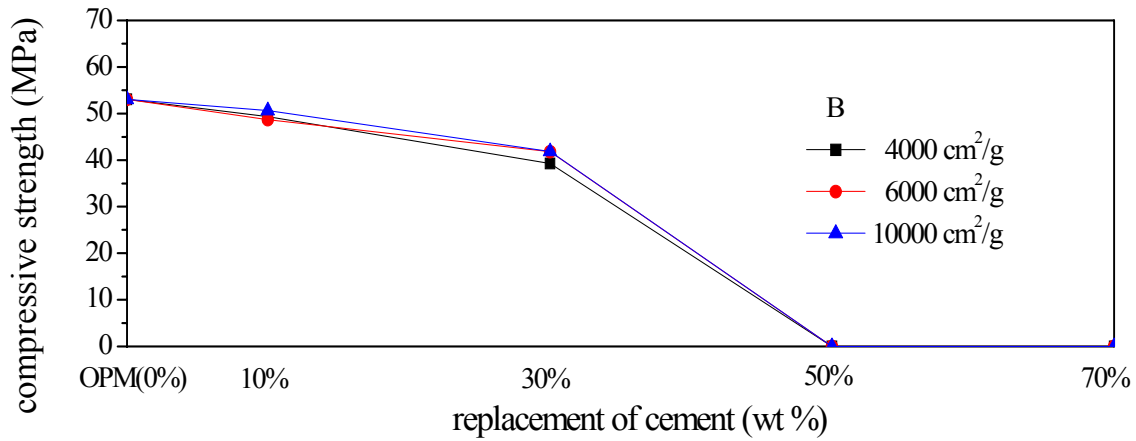


圖 4-18 轉爐鋼渣細度及添加量抗壓強度關係圖(91 天)

(資料來源：本研究繪製)

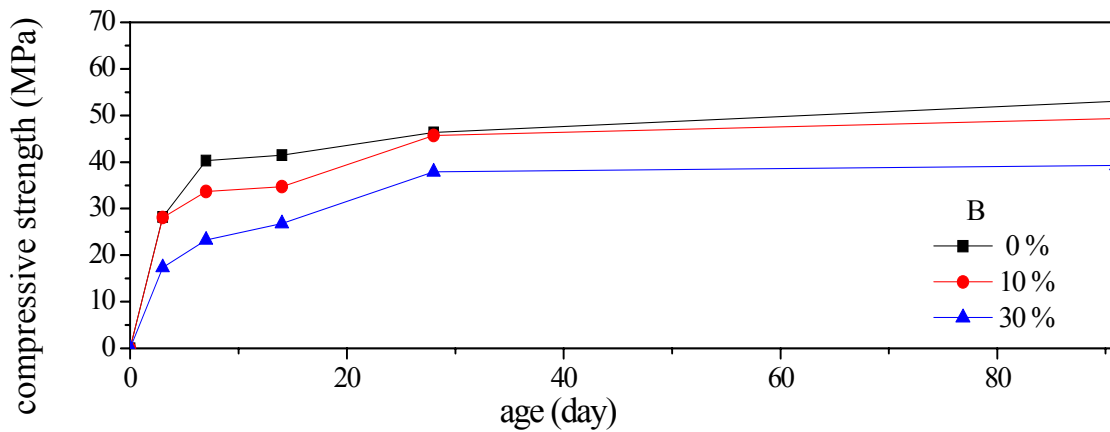


圖 4-19 轉爐鋼渣水泥砂漿不同養護齡期抗壓強度發展圖

(資料來源：本研究繪製)

#### 電弧爐鋼渣對水泥砂漿抗壓強度之影響

圖 4-20 為電弧爐鋼渣水泥砂漿之抗壓強度試驗結果。透過圖 4-21 及圖 4-22 得知，電弧爐鋼渣取代水泥量多寡會影響水泥砂漿之抗壓強度。圖 4-21 顯示，基本上各細度之電弧爐鋼渣水泥砂漿在抗壓強度的表現方面似乎無太大差異性，因此說明電弧爐鋼渣之比表面積，也許不是影響電弧爐鋼渣水泥砂漿抗壓強度的主要因素。由圖 4-22 可以發現，抗壓強度會隨著電弧爐鋼渣之取代量增加而逐漸遞減，就整體而言，主要以

取代量 10 % 之砂漿試體，相較於普通水泥砂漿折減率約為 0.19 ~ 6.75 %，對抗壓強度影響最小，接著依序則為取代量 30 %、50 % 及 70 % 之電弧鋼渣水泥砂漿，其個別之折減率 21.46 ~ 31.50 %、50.43 ~ 56.39 % 及 70.92 ~ 76.91 %。

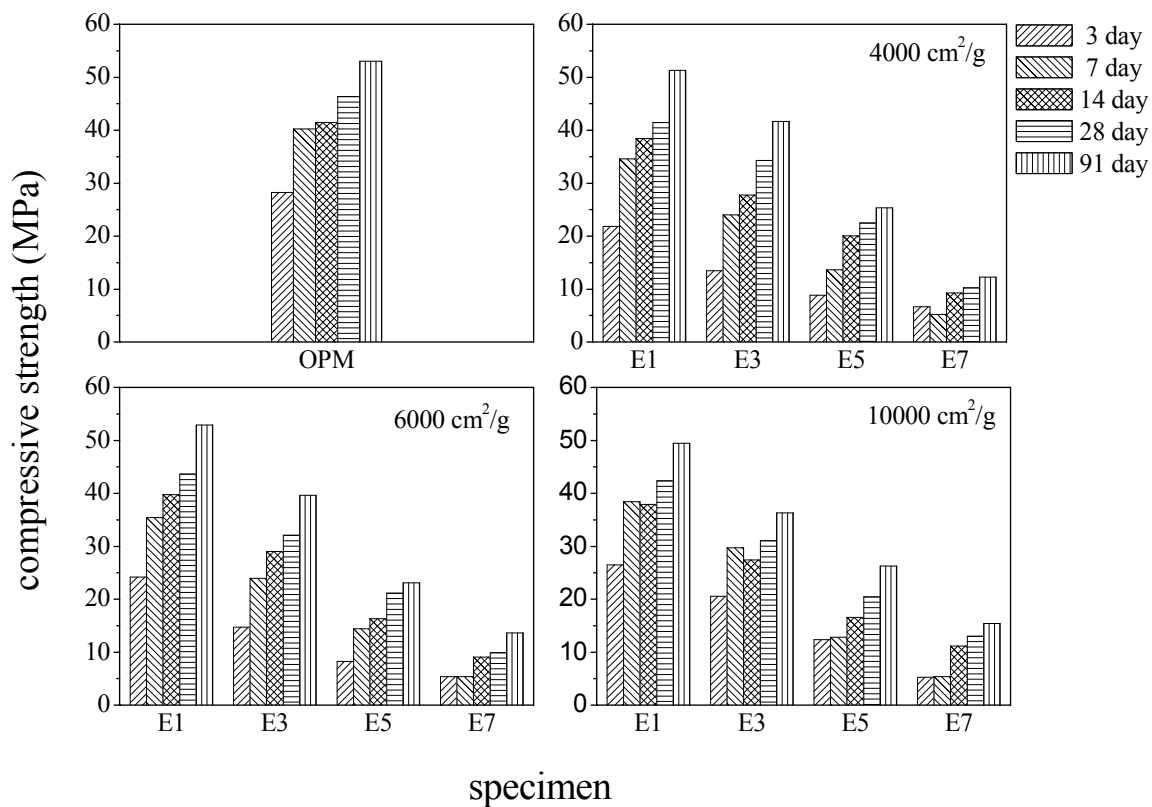


圖 4-20 電弧爐鋼渣水泥砂漿抗壓強度

(資料來源：本研究繪製)

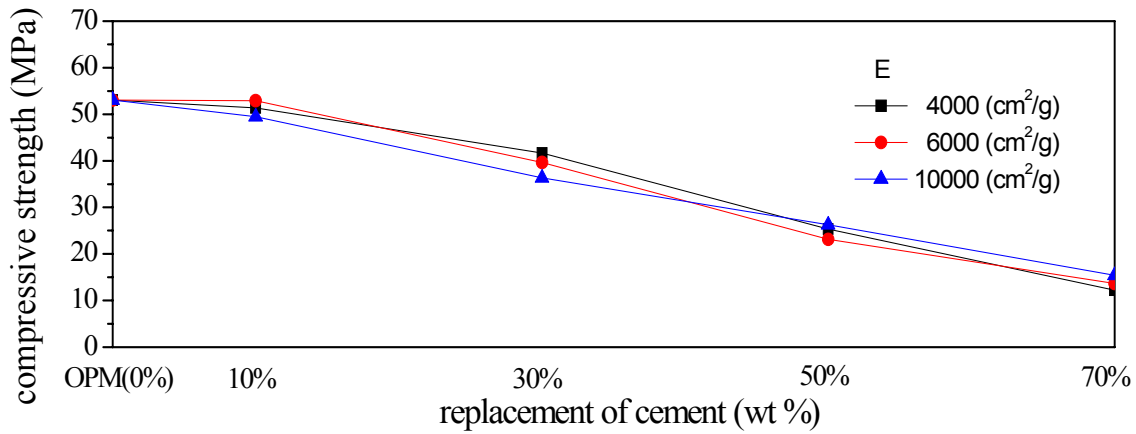


圖 4-21 電弧爐鋼渣細度及添加量抗壓強度關係圖 91 天

(資料來源：本研究繪製)

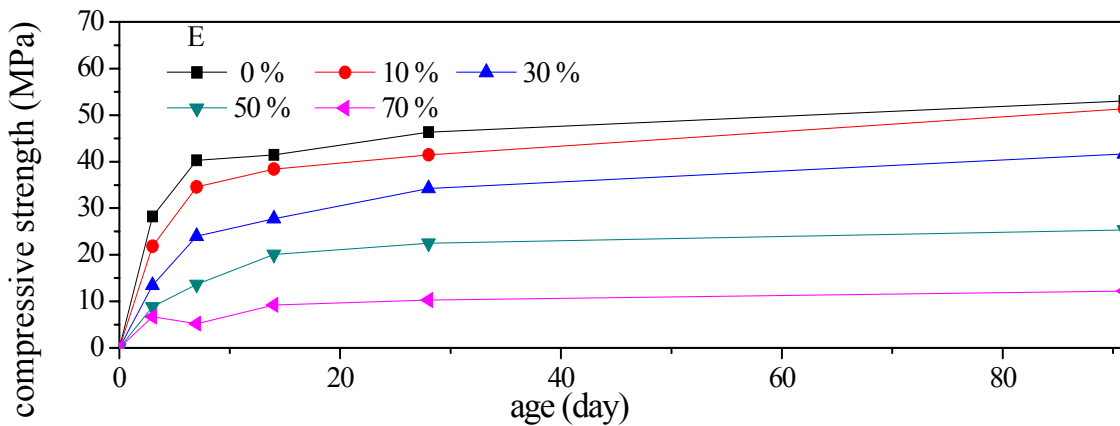


圖 4-22 電弧爐鋼渣水泥砂漿不同養護齡期抗壓強度關係圖

(資料來源：本研究繪製)

#### 水淬高爐鐵渣對水泥砂漿抗壓強度之影響

圖 4-23 為水淬高爐鐵渣水泥砂漿的抗壓強度試驗結果。透過圖 4-24 及圖 4-25 得知，無論細度 4000 cm<sup>2</sup>/g 或 6000 cm<sup>2</sup>/g 在各取代量 10 %、30 %、50 % 及 70 % 皆有比普通水泥砂漿較好的抗壓強度。由圖 4-24 可以發現，水淬高爐鐵渣與前兩種爐渣(轉爐鋼渣及電弧爐鋼渣)一樣，主要影響強度的原因不在於爐渣細度大小。再由圖 4-25 得知，主要影響水泥砂漿抗壓強度之原因，還是來自於水淬高爐鐵渣粉的取代量，圖中顯示，水淬高爐鐵粉水泥砂漿之抗壓強度會隨著水淬高爐鐵粉取代量增加而增加，一

直到取代量 50 % 後才開始遞減，但整體而言無論取代量 10 %、30 %、50 % 及 70 %，在抗壓強度方面皆優於普通水泥砂漿，其中以取代量 50 % 的水淬高爐鐵渣粉水泥砂漿抗壓強度相較於普通水泥砂漿表現最佳，增加 15.84 %~ 19.72 %，取代量 30 % 之水淬高爐鐵渣粉水泥砂漿抗壓強度表現次之，增加 12.50 %~ 13.39 %，而取代量 70 % 及 10 % 之水淬高爐鐵渣水泥砂漿抗壓強度也分別增加約 5.70 %~ 5.77 % 及 0.49 %~ 9.02 %。

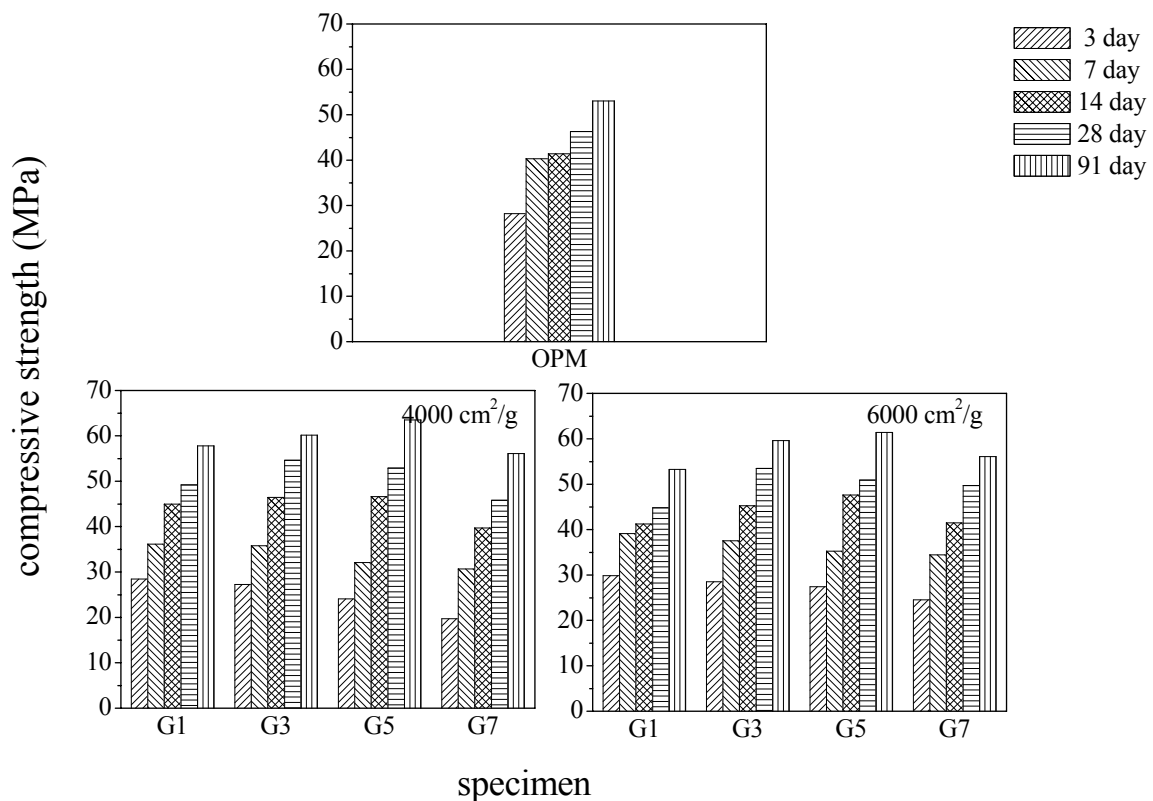


圖 4-23 水淬高爐鐵渣砂漿抗壓強度

(資料來源：本研究繪製)

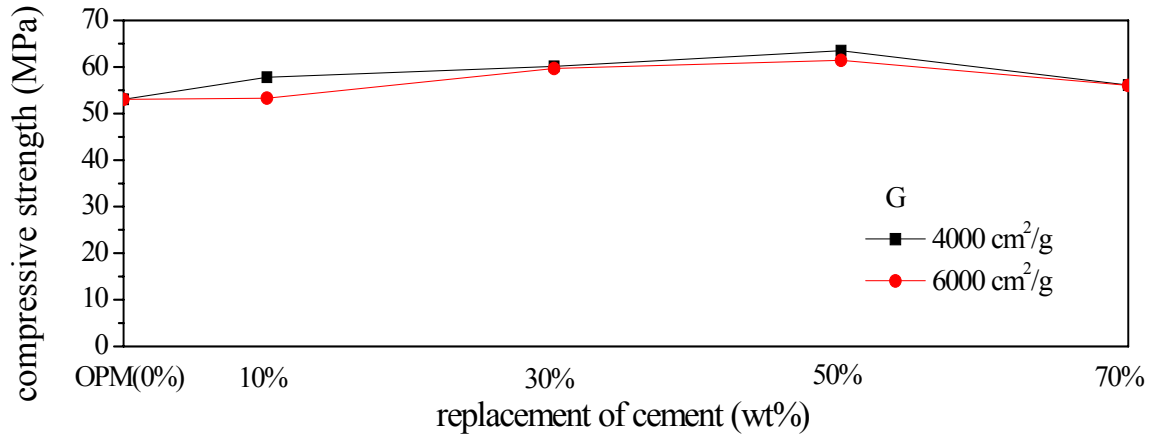


圖 4-24 各細度之水淬高爐鐵渣砂漿抗壓強度關係圖(91 天)

(資料來源：本研究繪製)

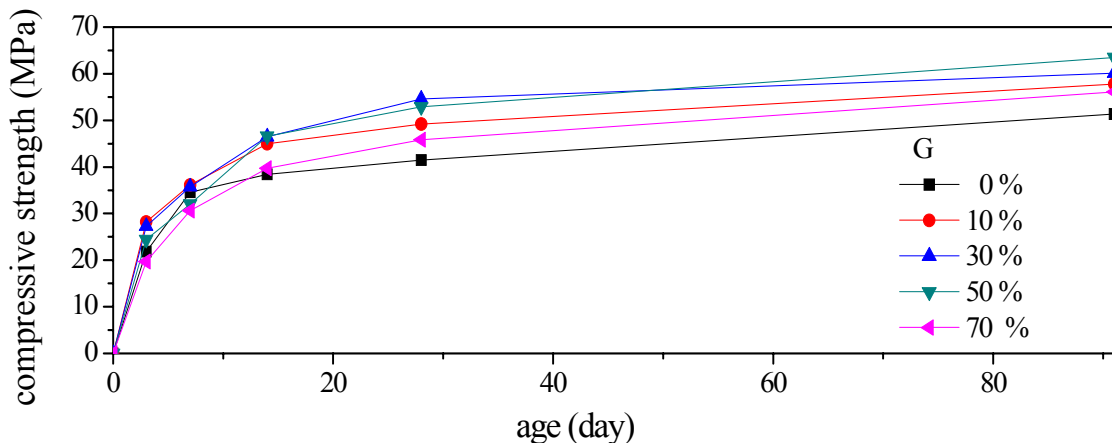


圖 4-25 水淬高爐鐵渣水泥砂漿不同齡期抗壓強度關係圖

(資料來源：本研究繪製)

#### 4. 圍塘試驗

圖 4-26 為鐵、鋼渣粉取代水泥 10 %之砂漿試體的氯離子含量與滲透深度之關係曲線，根據兩者之間的關係再透過 Fick's second law 可求得氯離子的擴散速率。由圖 4-27 可以發現，水淬高爐鐵渣粉水泥砂漿、轉爐鋼渣粉水泥砂漿及電弧爐鋼渣粉水泥砂漿三種爐渣粉水泥砂漿試體，相較於控制組水泥砂漿試體，以轉爐鋼渣粉水泥砂漿試體之氯離子的擴散速率最大，其次為電弧爐鋼渣粉水泥砂漿試體，其中表現最好的為水淬高爐石粉水泥砂漿試體，其擴散速率與控制組水泥砂漿試體最接近。

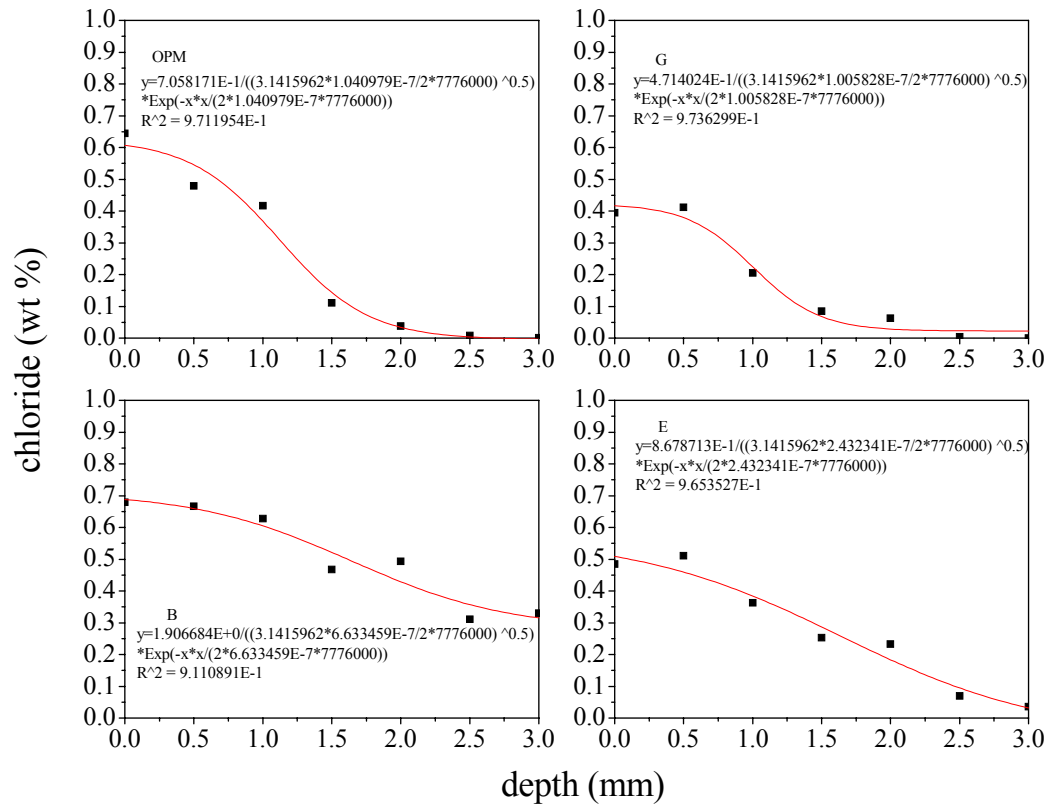


圖 4-26 氯離子含量與滲透深度曲線

(資料來源：本研究繪製)

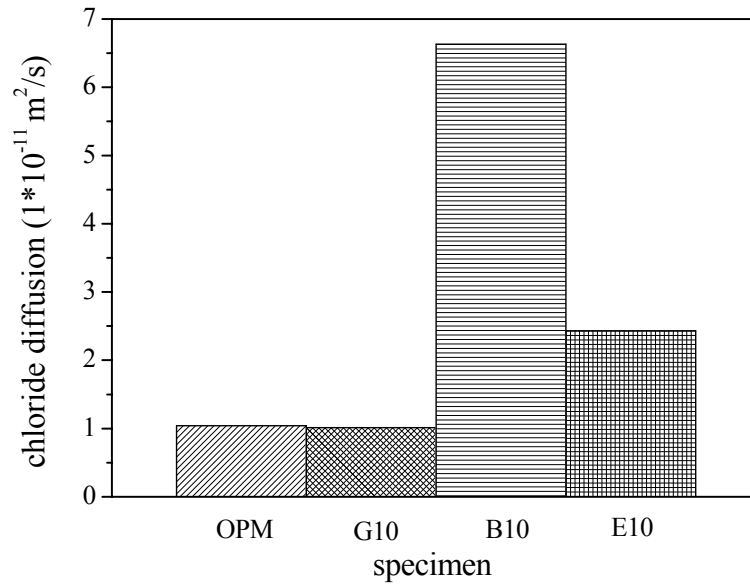


圖 4-27 氯離子擴散速率

(資料來源：本研究繪製)

## 5. SEM 微結構分析

### 轉爐鋼渣水泥漿之微結構

圖4-28到圖4-33分別表示不同取代量0%、10%、30%、50%、70%及100%的轉爐鋼渣水泥漿，放大3000倍與20000倍後之表面結構。透過圖4-28可以發現，普通水泥漿試體的微觀表面產物，主要以C-S-H膠體及少量的CaCO<sub>3</sub>為主，再透過圖4-29及圖4-31得知，當轉爐鋼渣取代量增加時，硬固漿體的表面C-S-H膠體分佈範圍會出現減少的趨勢，而相對的CaCO<sub>3</sub>及Ca(OH)<sub>2</sub>的分佈範圍會逐漸擴散。另外由圖4-31得知，轉爐鋼渣取代量達50%時，轉爐鋼渣水泥漿試體的表面微結構形貌會開始轉變，除了C-S-H分佈範圍減少外，還會出現許多顆粒形貌的產物，而且由圖4-32到圖4-33得知，取代量70%及100%之漿體此現象會越來越明顯。透過EDS得知其主要元素為Ca、Mg、Fe、Mn及O等，根據前人研究報告指出，轉爐鋼渣水泥漿的表面結構會以CaO-FeO-MnO-MgO固溶物形態存在<sup>[19,21,51,52]</sup>，圖4-34為該產物放大20000倍之表面結構形貌。

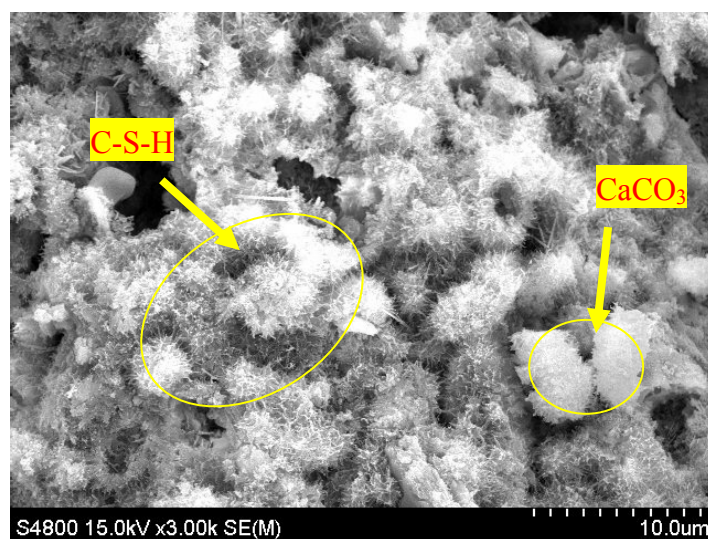


圖 4-28 普通水泥漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

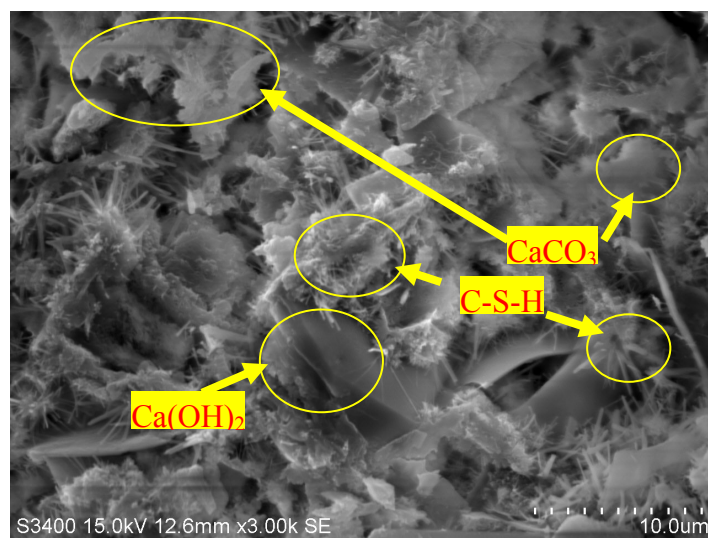


圖 4-29 轉爐鋼渣取代量 10 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

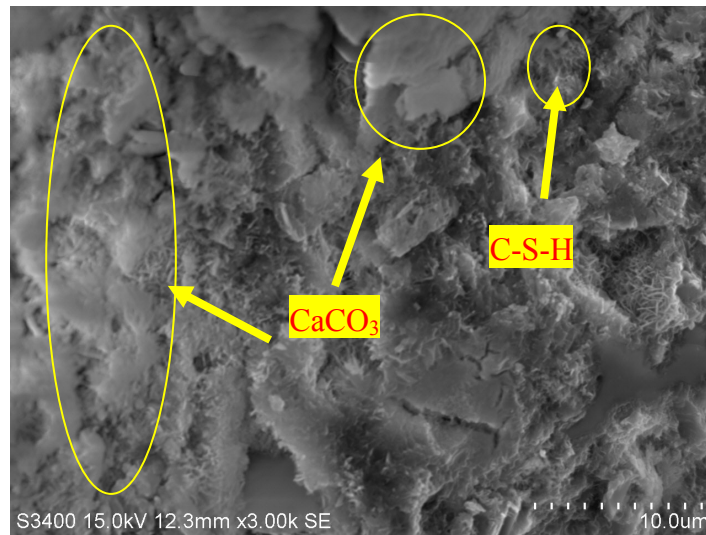


圖 4-30 轉爐鋼渣取代量 30 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

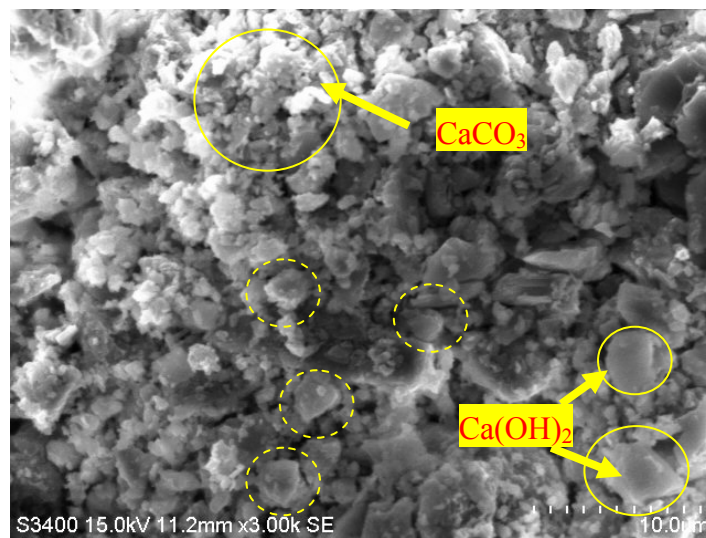


圖 4-31 轉爐鋼渣取代量 50 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

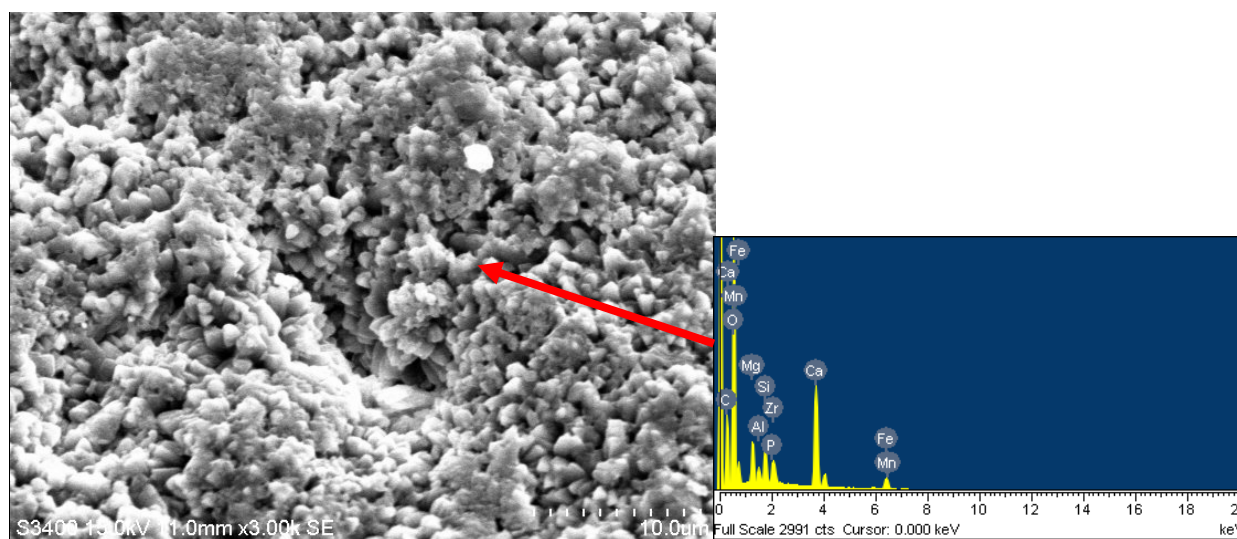


圖 4-32 轉爐鋼渣取代量 70 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

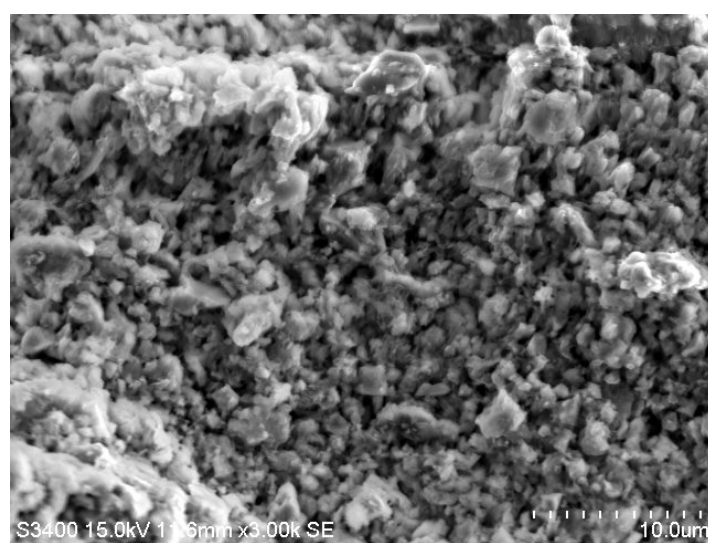


圖 4-33 轉爐鋼渣漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

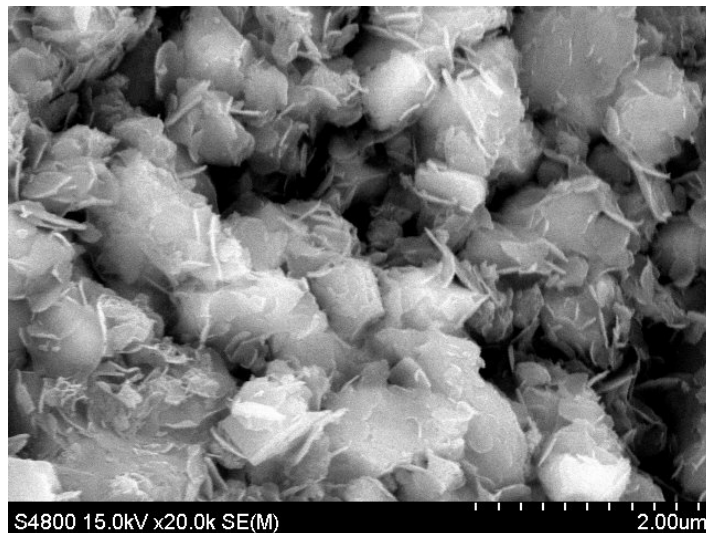


圖 4-34 轉爐鋼渣漿試體 SEM 圖(X 20000)

(資料來源：本研究拍攝)

#### 轉爐鋼渣水泥砂漿體積膨脹之原因

圖 4-35 及圖 4-36 為轉爐鋼渣水泥砂漿試體(取代水泥 50%)的照片，從圖中可以發現試體的裂縫上，會出現許多白色小顆粒，粒徑約 100  $\mu\text{m}$  到 1000  $\mu\text{m}$ ，散佈於試體各部位。圖 4-37 是白色小顆粒之 SEM 影像，經由 EDS 分析後得知，得知其主要成分為  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。再根據文獻得知，轉爐鐵渣在吸水後，f-CaO 會生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，體積將可能會膨脹 100 %~ 300 %，MgO 會生成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，體積膨脹約 77 %<sup>[49]</sup>，Tongsheng 等學者的試驗結果也發現，轉爐鋼渣水泥砂漿在養護過程中，同樣會產出  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  結晶顆粒<sup>[19]</sup>，如圖 4-38 所示。因此推估轉爐鋼渣成分中析出的 f-CaO 與水反應產生之  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  顆粒，可能造成轉爐鋼渣水泥砂漿試體內部發生膨脹，進而衍生試體出現膨脹及開裂等現象。

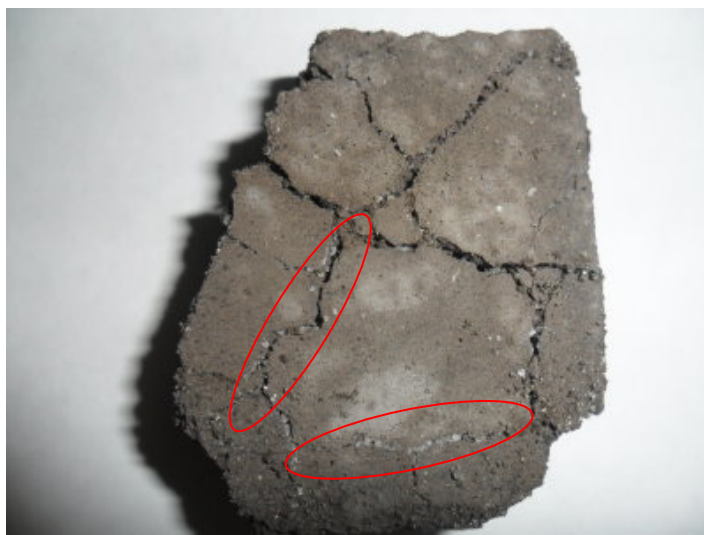


圖 4-35 轉爐鋼渣水泥砂漿表面外觀(取代水泥 50 %)

(資料來源：本研究拍攝)

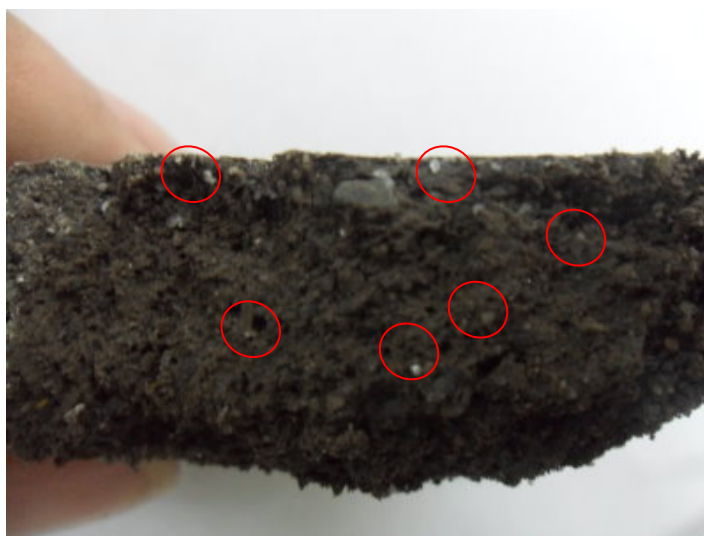


圖 4-36 轉爐鋼渣水泥砂漿試體(取代水泥 50 %)剖面圖

(資料來源：本研究拍攝)

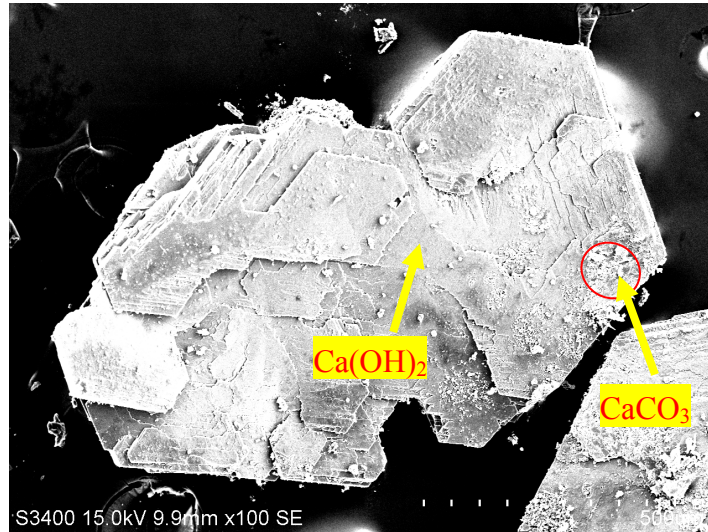


圖 4-37 轉爐鋼渣水泥砂漿之白色顆粒 SEM 圖(X100)

(資料來源：本研究拍攝)

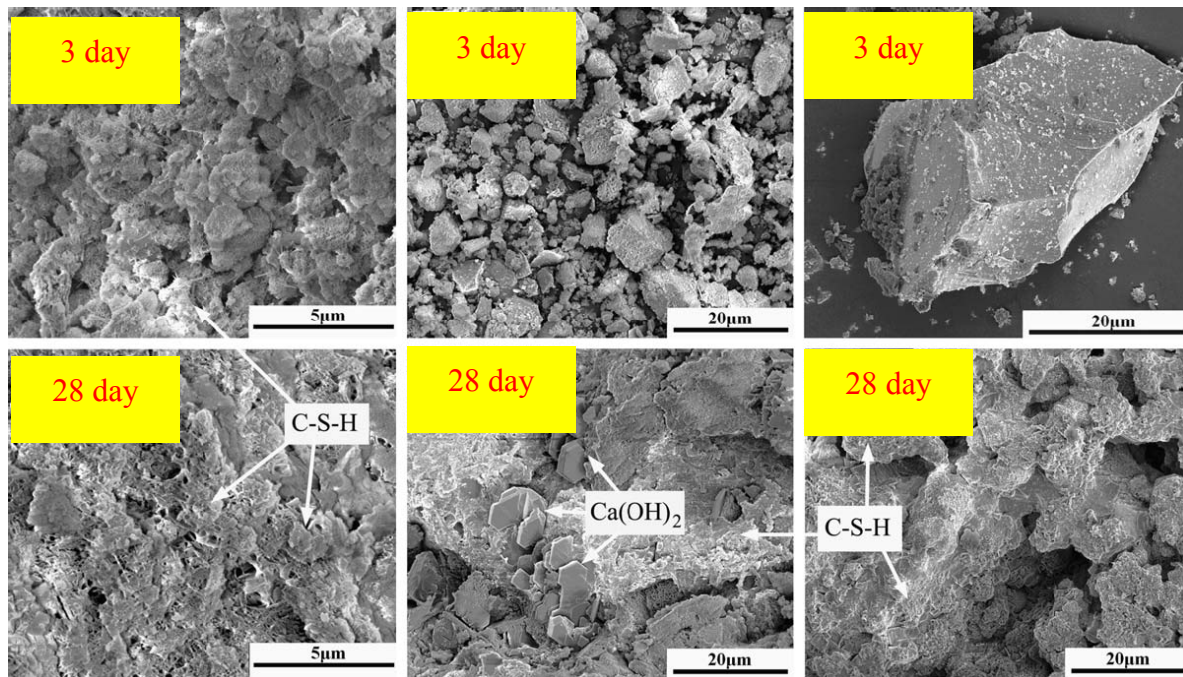


圖 4-38 轉爐鋼渣水泥漿不同養護齡期之水化產物 SEM 圖<sup>[19]</sup>

(資料來源：Tongsheng Zhang, 2011)

電弧爐鋼渣水泥漿試體之表面微結構

圖 4-39 到圖 4-43 為各取代量 10 % 到 70 % 之電弧爐鋼渣水泥漿體表面微結構。大致上由圖中可以看見，電弧爐鋼渣無論取代量多少表面皆會有 C-S-H 膠體存在。但仔細由圖 4-40 及 4-42 可以發現，在圖中所標註範圍內的微結構形貌，似乎與常見之 C-S-H 膠體結構形貌有些許不同。再透過圖 4-43 及圖 4-44 得知，電弧爐鋼渣粉加水後，其表面微結構改變形成類似毛球狀並與 C-S-H 表面形貌極為接近，本研究透過 EDS 得知，其主要元素為 Ca、Mg、Fe、Mn、Al、Ti、Na、Zr 及 O 等。

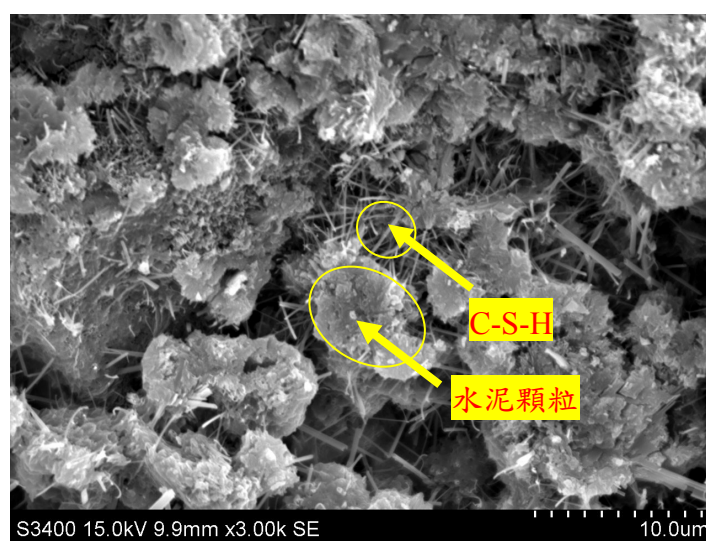


圖 4-39 電弧爐鋼渣取代量 10 % 之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

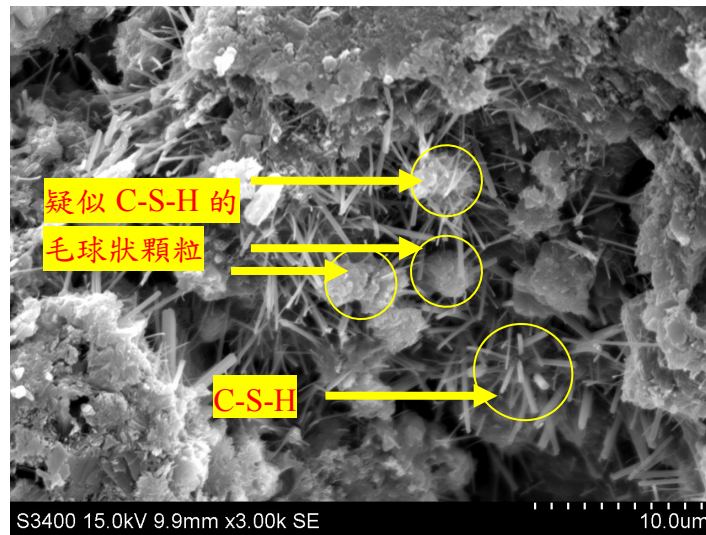


圖 4-40 電弧爐鋼渣取代量 30 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

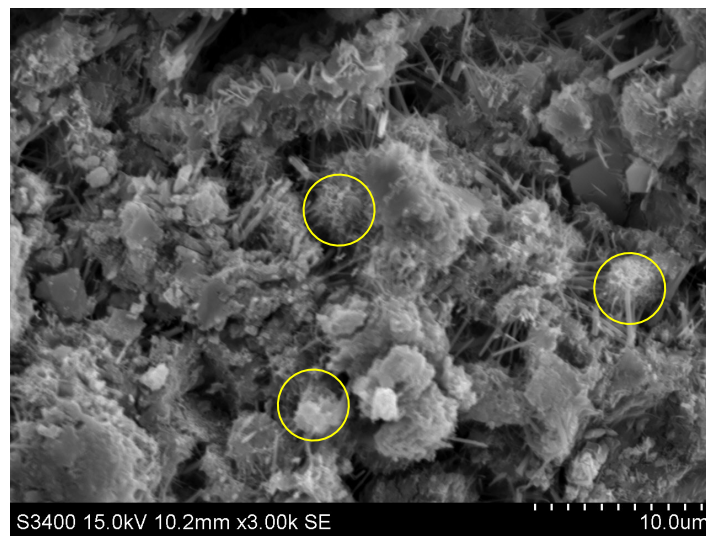


圖 4-41 電弧爐鋼渣取代量 50 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

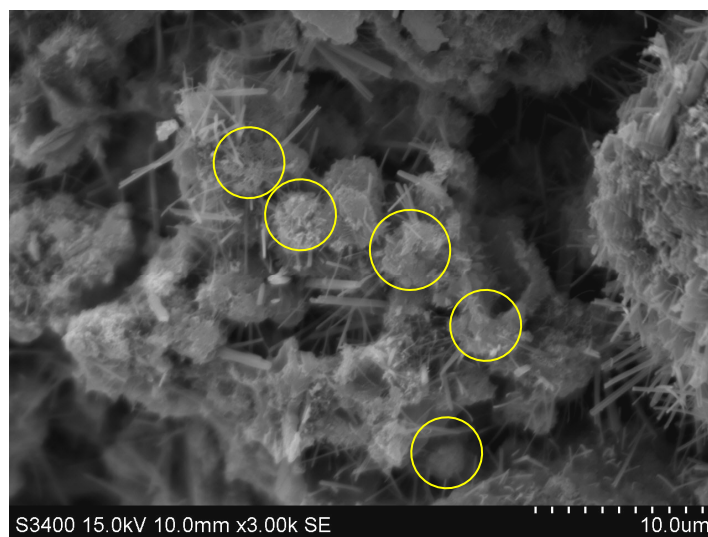


圖 4-42 電弧爐鋼渣取代量 70 %之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

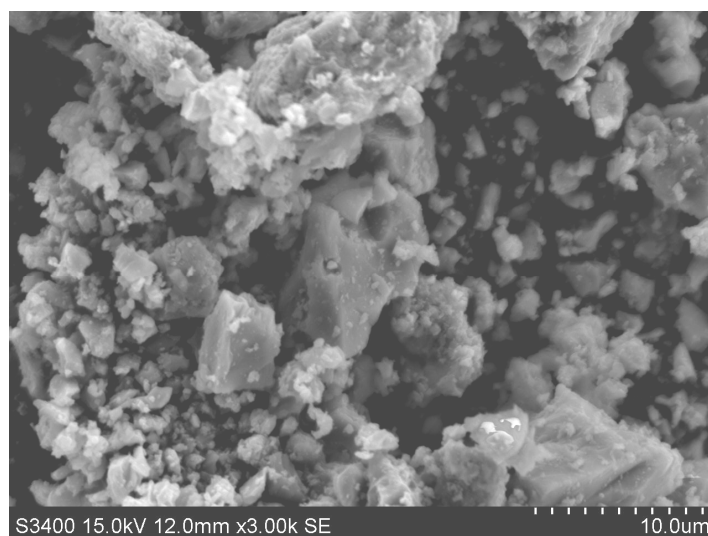


圖 4-43 電弧爐鋼渣 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

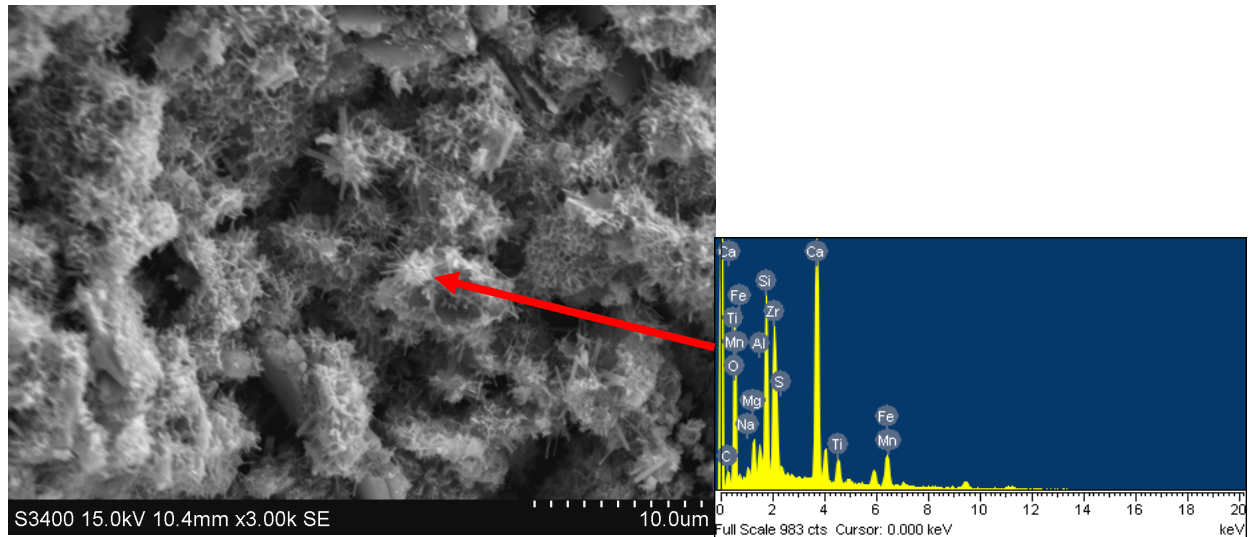


圖 4-44 電弧爐鋼渣漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

#### 水淬高爐鐵渣水泥漿試體之表面微結構

圖 4-45 及圖 4-46 為水淬高爐鐵渣水泥砂漿之微觀影像。圖 4-45 為水淬高爐鐵渣漿體取代量 10 % 之水泥漿體放大 3000 倍的微結構，由圖中可以看到，其於表面會出現 C-A-S-H 及 C-S-H 兩種膠體。另外，由圖 4-46 可發現取代量 70 % 仍會顯示相同的產物，也就是說水淬高爐鐵渣，不管取代量多少皆會產生 C-A-S-H 及 C-S-H 膠體。

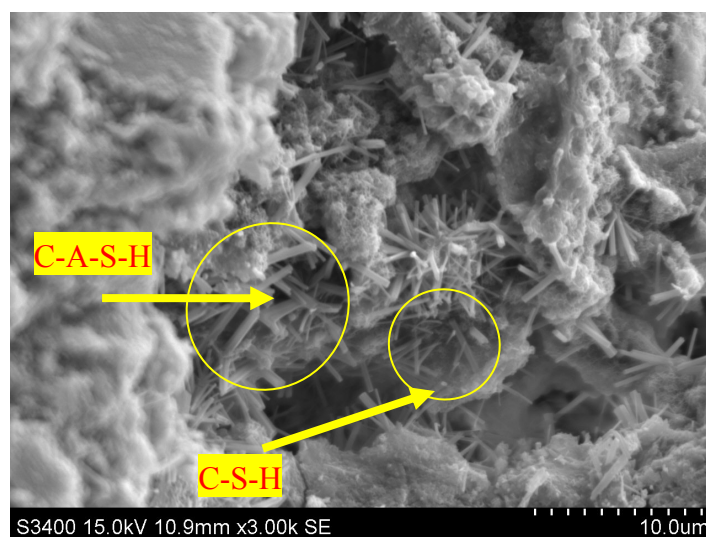


圖 4-45 水淬高爐鐵渣取代量 10 % 之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

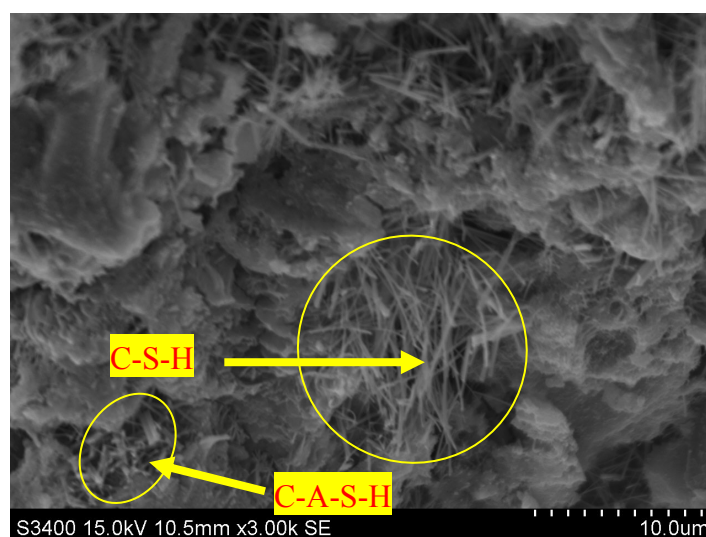


圖 4-46 水淬高爐鐵渣取代量 70 % 之水泥漿試體 SEM 圖(X 3000)

(資料來源：本研究拍攝)

## 7. XRD 成分分析

### 轉爐鋼渣水泥漿 X 光繞射分析

圖 4-47 為轉爐鋼渣不同取代量之水泥漿 XRD 圖譜，圖中 original 表示研磨後之轉爐鋼渣，100 % 表示研磨後之轉爐鋼渣加水，70 % 為研磨後之轉爐鋼渣取代水泥重量比

70%，以此類推 50%、30% 及 10%，分別表示取代量 50%、30% 及 10%。實線框內主要說明，研磨後之轉爐鋼渣加水後會產生水化反應，生成  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Ca}_8\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{12}\text{CO}_3(\text{OH})_2$   $[(\text{C}_3\text{H}_5\text{Al}_{0.02}\text{Fe}_{0.98}\text{O}_3)]_x$  等成分，另外在箭頭標示的位置可以發現，有些成分的訊號強度會隨著轉爐鐵渣取代量而改變。實線部分主要顯示，當轉爐鋼渣取代量增加時，該位置之訊號強度會跟著增強；虛線部分則顯示，該訊號強度會隨著取代量的增加而遞減。這結果也說明，水泥漿體與轉爐鋼渣各自皆會產生水化反應，而且成分之間也可能會相互影響。

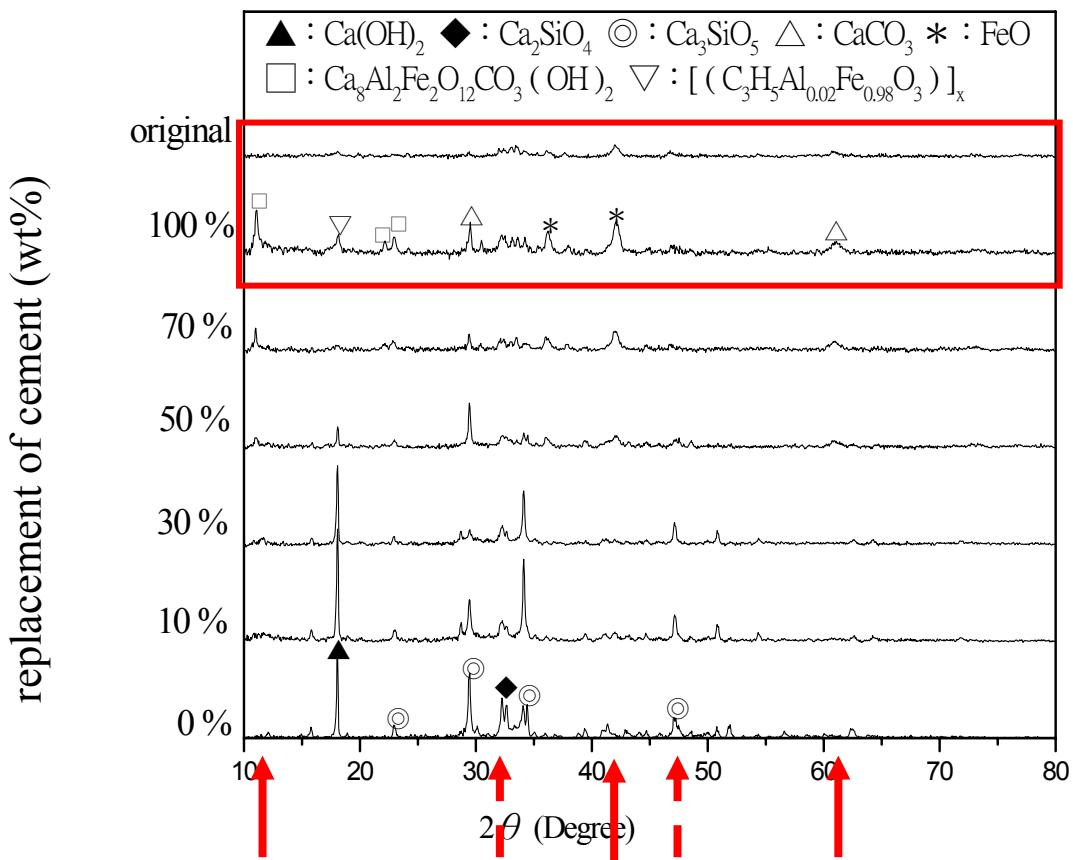


圖 4-47 轉爐鋼渣不同取代量之水泥漿 X 光繞射分析

(資料來源：本研究繪製)

## 電弧爐鋼渣水泥漿成分 X 光繞射分析

圖 4-48 為不同取代量之電弧爐鋼渣水泥漿 X 光繞射分析結果。首先從框內可以發現，研磨後之電弧爐鋼渣加水，有少部分的成分會與水發生反應，但就整體來看加水與未加水兩者之結構基本上是一樣的。接著由電弧爐鋼渣取代水泥之用量來看，在圖中實線指的位置得知，該訊號會隨著電弧爐鋼渣粉取代量的增加而逐漸遞減；而虛線部分則顯示該訊號隨著電弧爐鋼渣取代量增加而增加，就整體而言，電弧爐鋼渣與水泥漿體之間相結構，似乎只是隨著電弧爐鋼渣及水泥之用量多寡在產生變化，彼此間並不會相互影響。

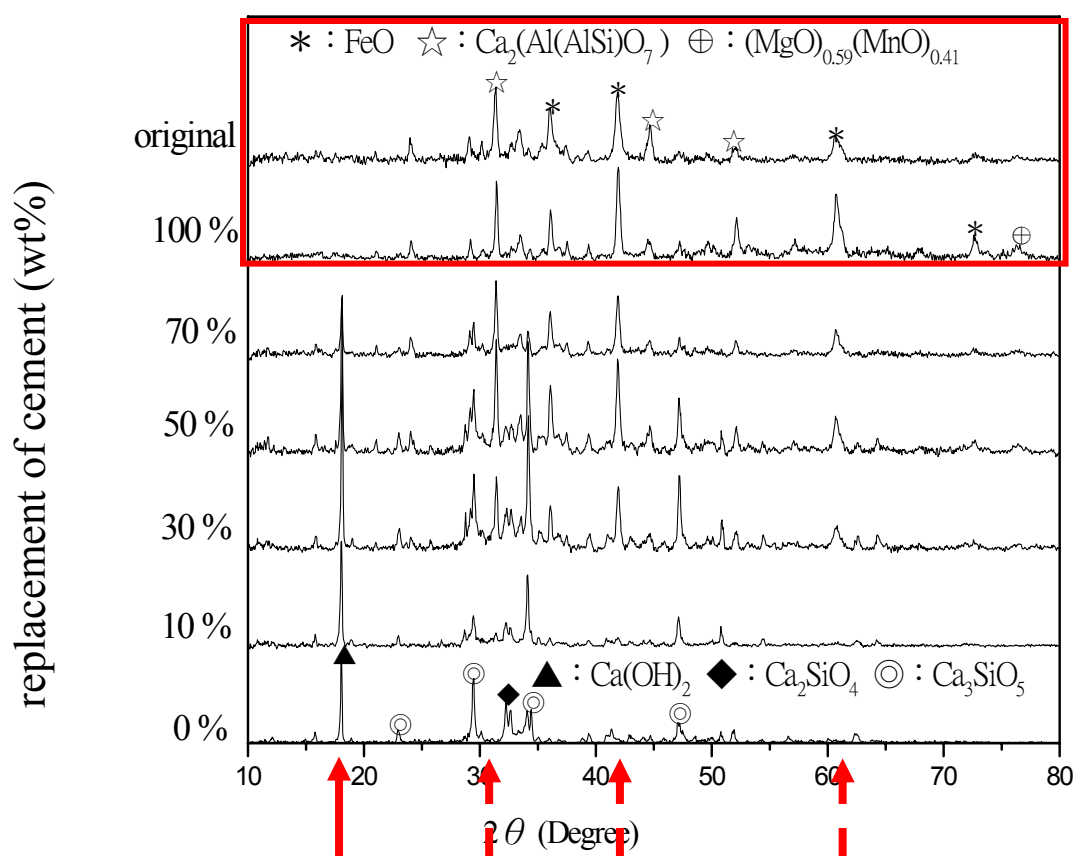


圖 4-48 電弧爐鋼渣不同取代量之水泥漿 X 光繞射分析

(資料來源：本研究繪製)

水淬高爐鐵渣水泥漿試體 X 光繞射分析

圖 4-49 為不同取代量之水淬高爐鐵渣水泥漿試體 X 光繞射分析結果。從圖中得知，水淬高爐鐵渣成分主要的結構是由  $C_3S$  及  $C_2S$  成分，在訊號位置約  $25^\circ$  到  $35^\circ$  組成的非晶質結構(amorphous structure)。由實線框可以看到，水淬高爐鐵渣取代部分水泥時，該結構會由原先之非晶態而轉變為結晶態。另外在虛線框內可以發現，當水淬高爐鐵渣取代量增加時，原先水泥漿體中的  $Ca(OH)_2$  結構，會隨著水淬高爐鐵渣的取代量增加而逐漸減少。

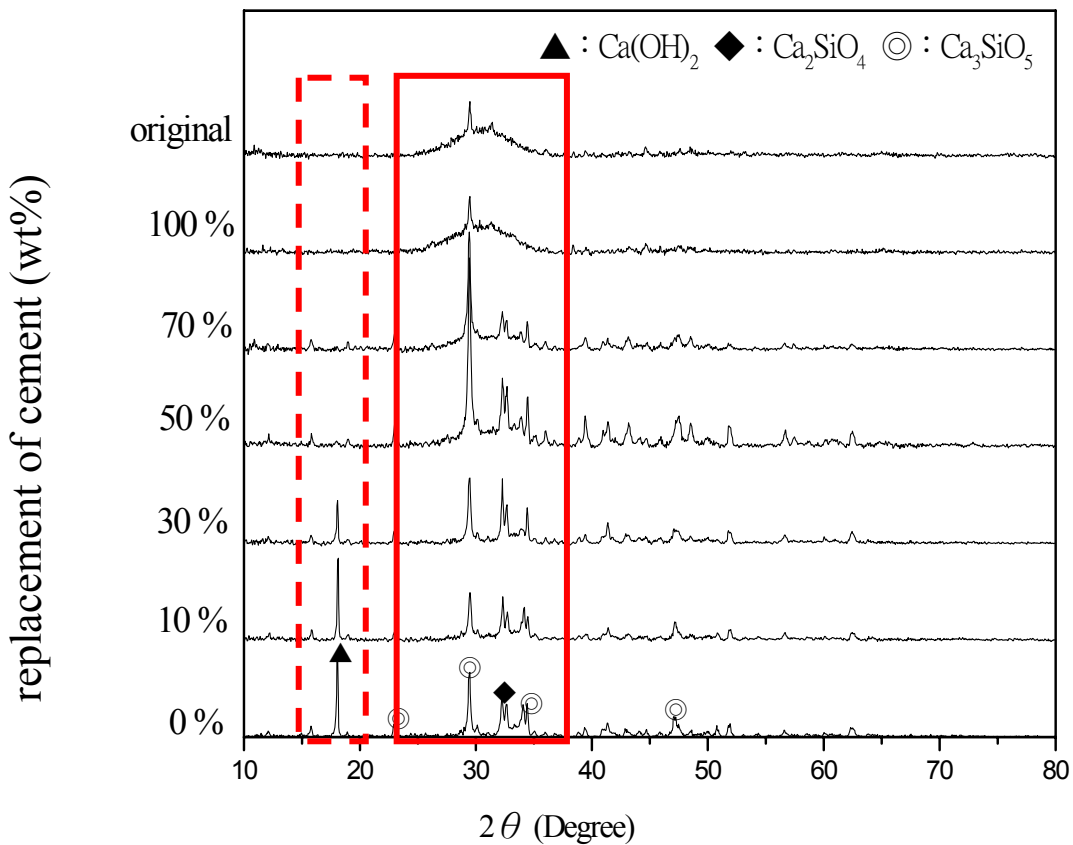


圖 4-49 水淬高爐鐵渣不同取代量之水泥漿 X 光繞射分析

(資料來源：本研究繪製)

## 第二節 鐵、鋼渣混凝土試驗結果

### 1. 抗壓強度

圖 4-50 顯示，鐵、鋼渣混凝土抗壓強度試驗的結果。圖中 OPC 表示控制組普通混凝土、轉爐鋼渣以 BA 表示、EA 為電弧爐鋼渣、AA 表示氣冷高爐鐵渣，而數字 100 及 50 則分別表示該爐渣取代天然粗粒料之百分率(體積比)。大致上透過整體圖可以發現，三種爐渣對抗壓強度之影響，僅有電弧爐鋼渣混凝土的部分，比較接近普通混凝土之抗壓強度，而且取代量越多強度越強，

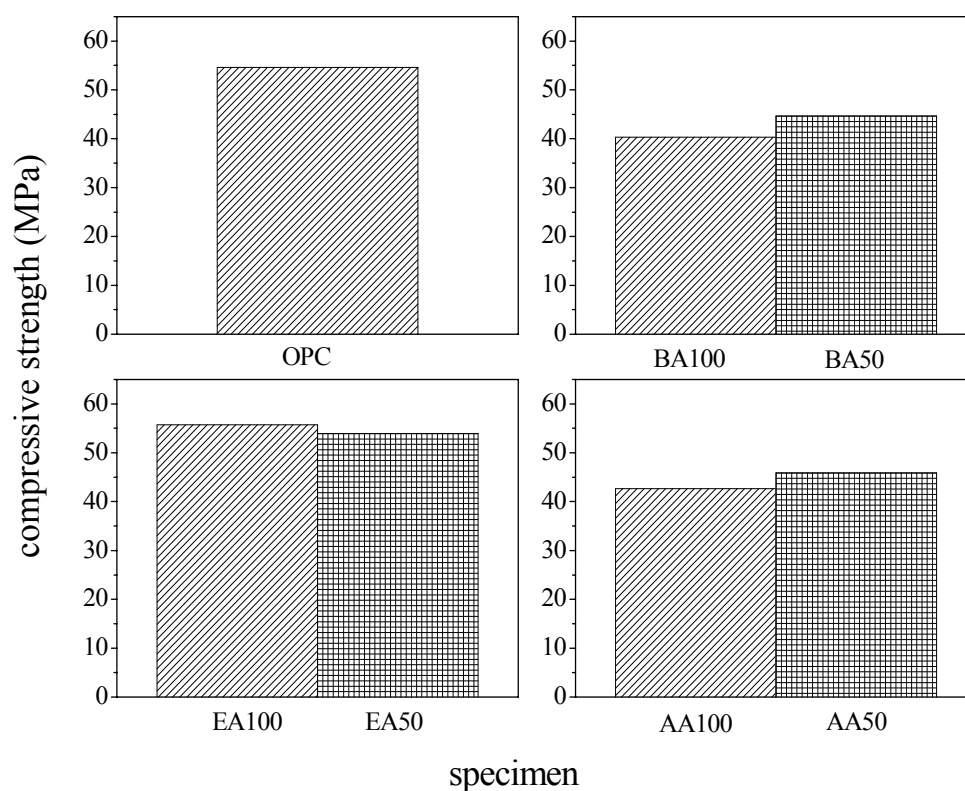


圖 4-50 鐵、鋼渣混凝土抗壓強度

(資料來源：本研究繪製)

### 2. 劈裂強度

圖 4-51 為轉爐鋼渣混凝土(BA)、電弧爐鋼渣混凝土(EA)及氣冷高爐鐵渣混凝土

(AA)養護 91 天後之劈裂強度試驗結果。圖中可以發現，以轉爐鋼渣、電弧爐鋼渣及氣冷高爐鐵渣取代天然粗粒料時，無論取代量 50 %或 100 %，其劈裂強度相較於普通混凝土僅降低 2.2 %~6.57 %，就整體而言也許影響不大。

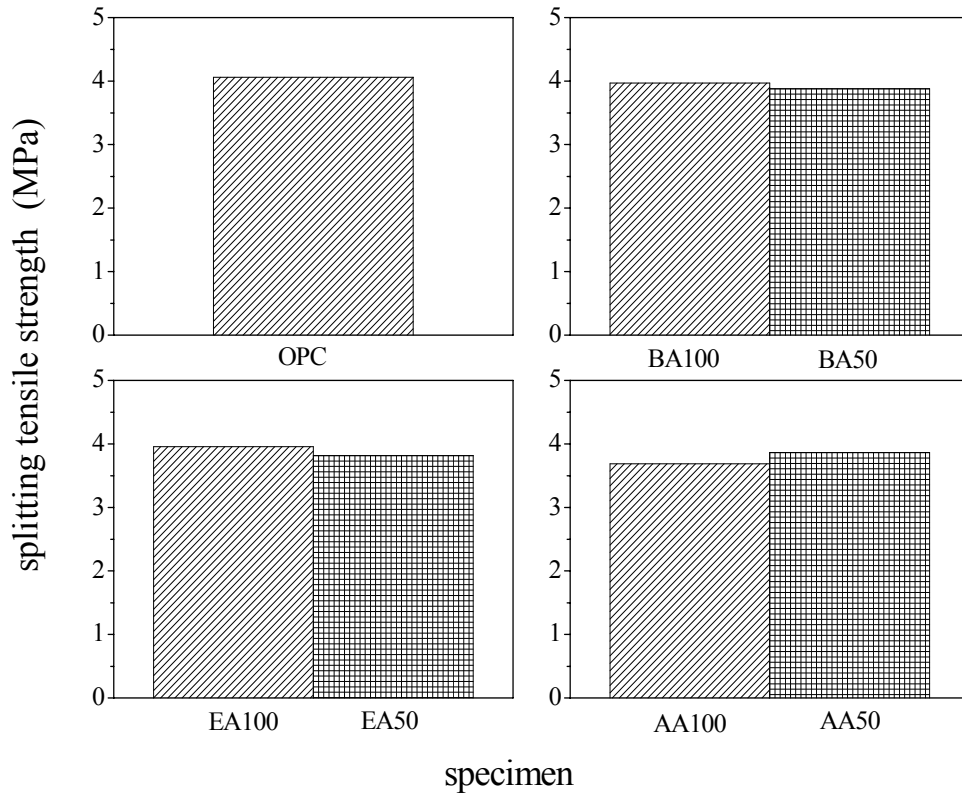


圖 4-51 鐵、鋼渣混凝土劈裂強度

(資料來源：本研究繪製)

### 3. 加速氯離子滲透試驗(RCPT)

圖 4-52 為普通混凝土與鐵、鋼渣混凝土之 6 小時累積通過電量。圖中顯示，轉爐鋼渣混凝土、電弧爐鋼渣混凝土及氣冷高爐鐵渣混凝土(取代天然粒料 100 %及 50 %)的 6 小時累積通過電量值皆會高於普通混凝土，其中以電弧爐鋼渣混凝土(取代天然粒料 100 %及 50 %)，6 小時累積通過電量值比普通混凝土高約 3.5 及 2.6 倍影響最大，其次分別為轉爐鋼渣混凝土(取代天然粒料 100 %及 50 %)，和氣冷高爐鐵渣粗粒料混凝土(取代天然粒料 100 %及 50 %)，分別增加 2.3、2.0、1.8 及 1.6 倍。

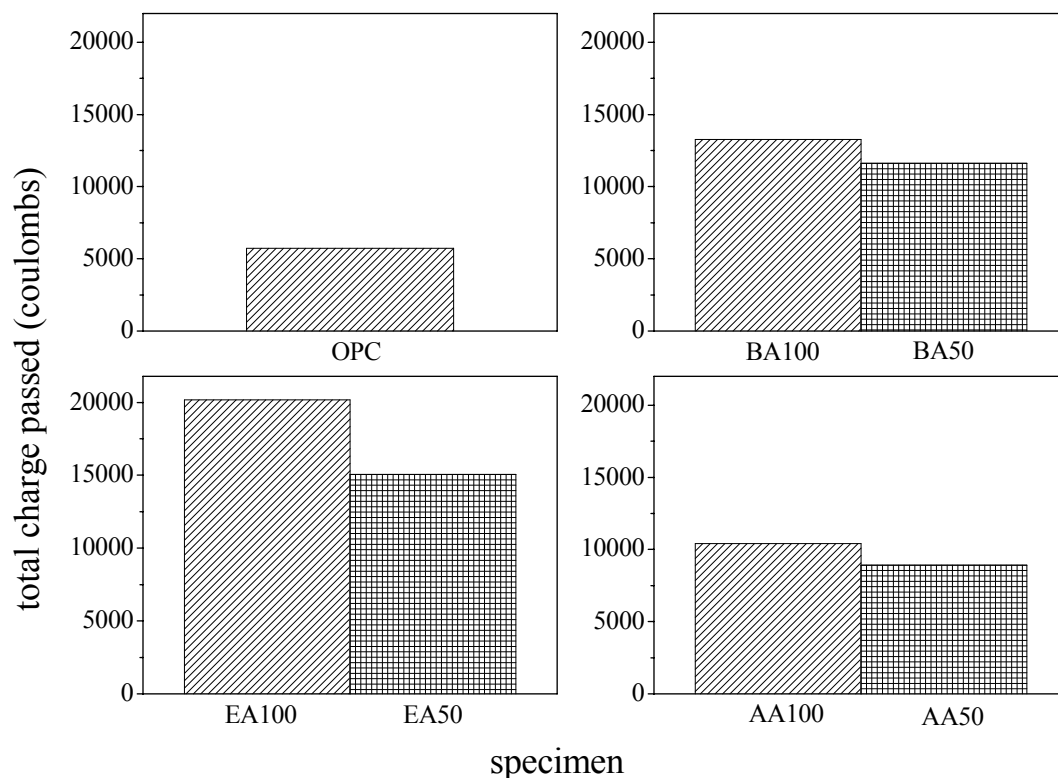


圖 4-52 鐵、鋼渣混凝土 RCPT 結果

(資料來源：本研究繪製)

#### 4. 碳化試驗

圖 4-53 顯示，轉爐鋼渣、電弧爐鋼渣及氣冷高爐鐵渣等，三種鋼及鐵渣以不同比例 100 % 及 50 % 取代天然粒料之混凝土碳化試驗結果。透過該圖可以發現，三者之碳化深度皆大於普通混凝土，其中以轉爐鋼渣混凝土的部分影響最大，其次為電弧爐鋼渣混凝土及氣冷鐵渣混凝土。三者相較於普通混凝土，取代天然粒料 100 % 的部分，依序約增加約 1.8、1.5、1.4 倍，取代天然粒料 50 % 的部分則依序增加 1.3、1.4 及 1.1 倍。

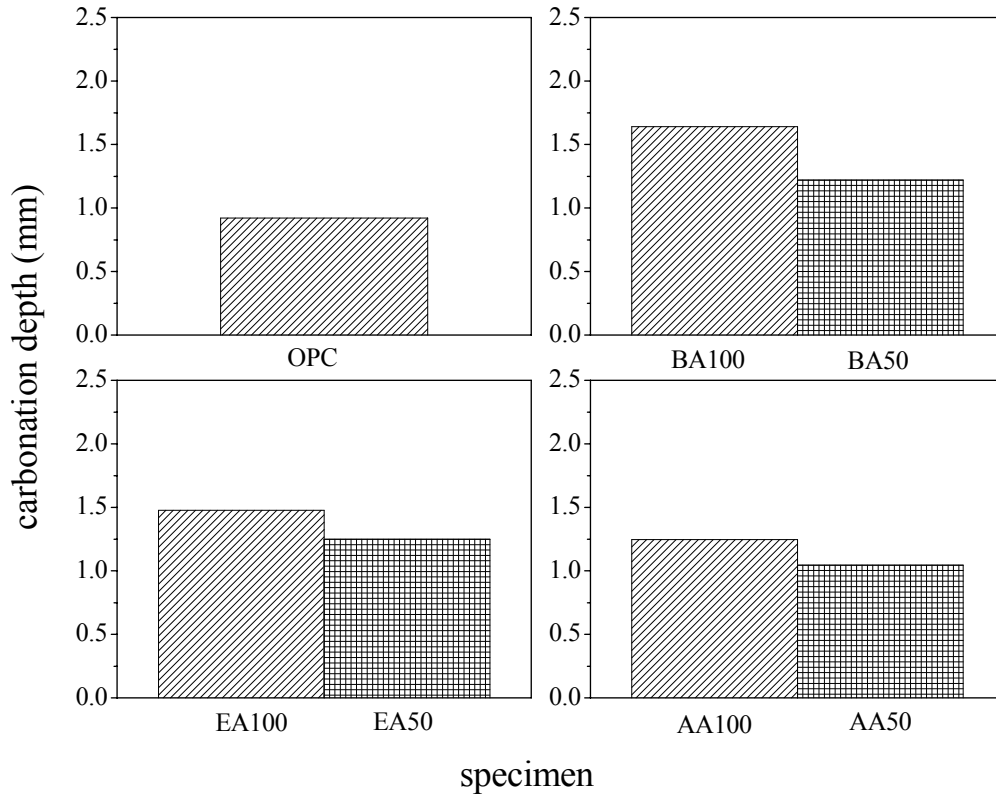


圖 4-53 鐵、鋼渣混凝土加速碳化試驗結果

(資料來源：本研究繪製)

### 5. 抗硫酸鹽試驗

圖 4-54 為鐵、鋼渣混凝土抗硫酸鹽試驗結果。圖中顯示，三種爐渣中以電弧爐鋼渣取代天然粒料 100% 之混凝土相較於普通混凝土具較好的抗硫酸鹽侵蝕能力。以抗壓強度試驗結果來看，其不管取代天然粒料是 100% 或 50%，相較於普通混凝土強度，其折減率僅降低 1.76% 到 5.67%。而當中表現最差的為轉爐鋼渣粗粒料，無論取代量 100% 或 50%，皆會嚴重降低混凝土 58.74% 及 24.28% 之強度。其次為氣冷高爐鐵渣混凝土的部分，其分別對抗壓強度的折減率分別為 21.17% 及 17.26%。

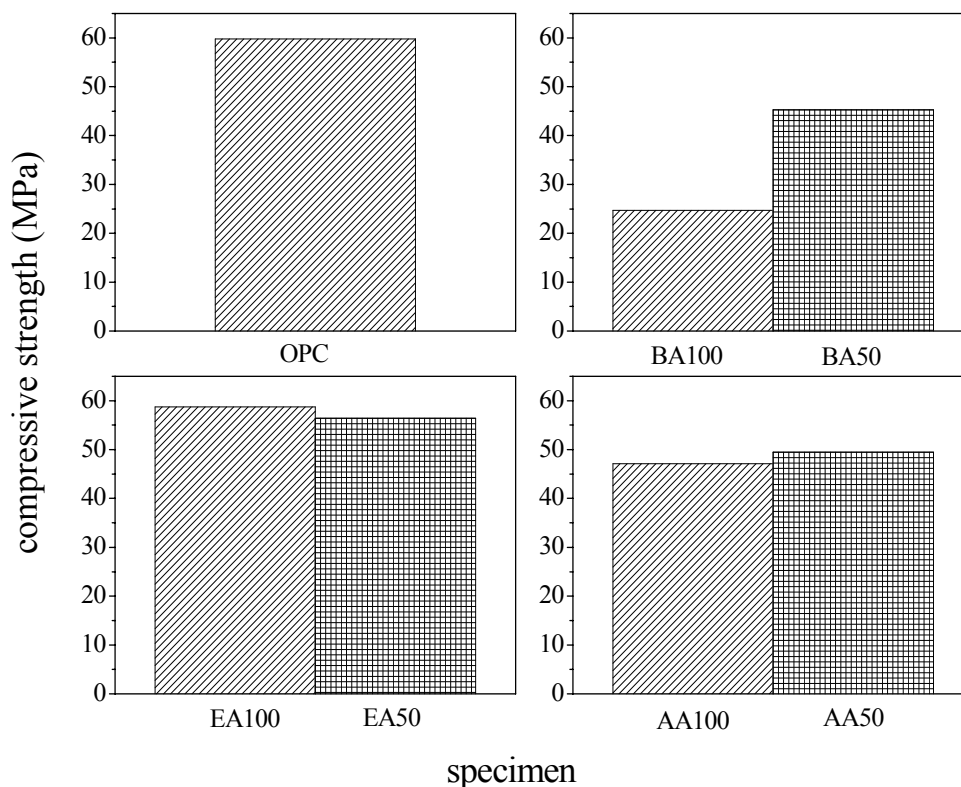


圖 4-54 鐵、鋼渣混凝土抗硫酸鹽試驗結果

(資料來源：本研究繪製)

## 6. 透水試驗結果

圖 4-55 為鐵、鋼渣混凝土透水試驗結果。由圖中得知，三種爐渣混凝土(取代天然粒料 100% 及 50%)之滲透率與普通混凝土相比，電弧爐鋼渣混凝土滲透率比較接近普通混凝土表現最佳。其次為氣冷爐渣混凝土(取代天然粒料 100% 及 50%)，滲透率依氣冷高爐鐵渣之取代比例，分別比普通混凝土快約 1.77 及 1.67 倍，表現最差的主要為轉爐渣混凝土，滲透率依轉爐渣之取代比例，分別比普通混凝土快約 2.17 及 1.55 倍。

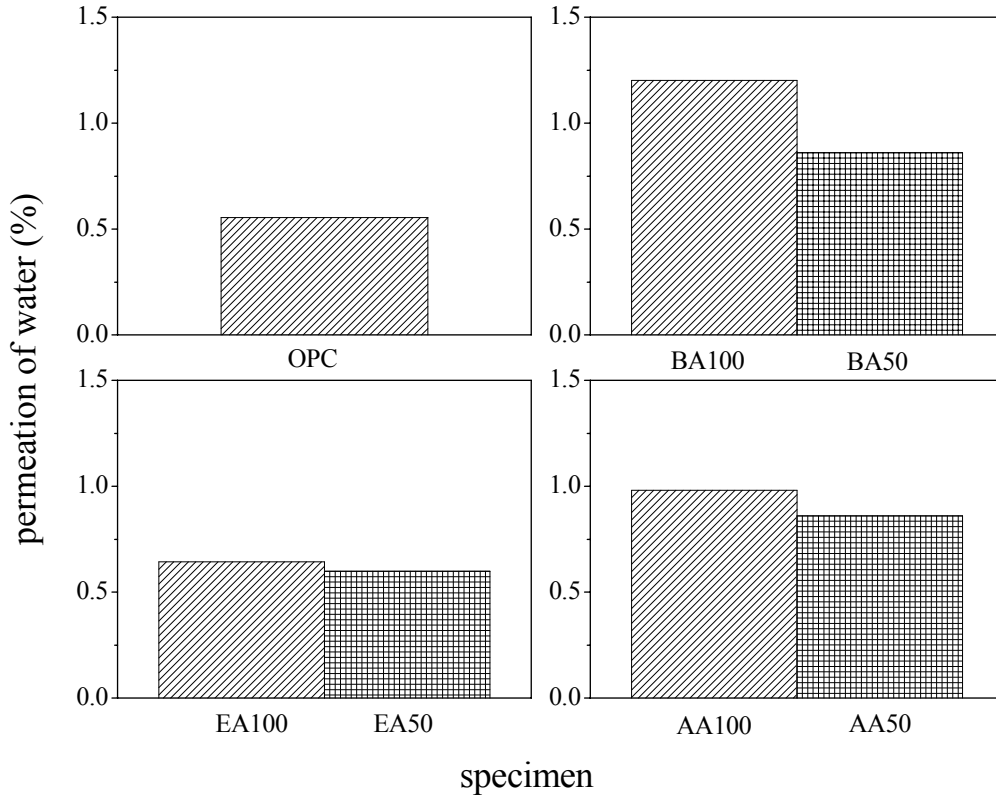


圖 4-55 鐵、鋼渣混凝土透水試驗結果

(資料來源：本研究繪製)

### 第三節 混合鋼鐵渣水泥砂漿試驗結果

#### 兩渣混合做為添加料對水泥砂漿抗壓強度之影響

圖 4-56 是鐵、鋼渣各別取代水泥 30% (wt%) 之水泥砂漿抗壓強度試驗結果。從圖中得知，水淬高爐鐵渣會增加水泥砂漿之抗壓強度，而電弧爐鋼渣及轉爐鋼渣則會降低混凝土之抗壓強度。

但是透過圖 4-57 及圖 4-58 發現，兩種鋼渣各別與鐵渣粉相互混合的情況下，會出現兩種現象。首先由圖 4-57 中可以看出來，電弧爐鋼渣與水淬高爐鐵渣混合，可能會降低水淬高爐鐵渣水泥砂漿之抗壓強度，而且取代量越多對強度影響越大。在圖 4-58 則出現一個完全相反的結果，轉爐鋼渣與水淬高爐鐵渣比例為 1:2 (wt%) 時，相較於水淬高爐鐵渣水泥砂漿 28 天抗壓強度會增加 5.7%，而轉爐鋼渣與水淬高爐鐵渣比例

為 2 : 1 (wt %)時，相較於水淬高爐鐵渣水泥砂漿 28 天抗壓強度會增加到 12.03 %。

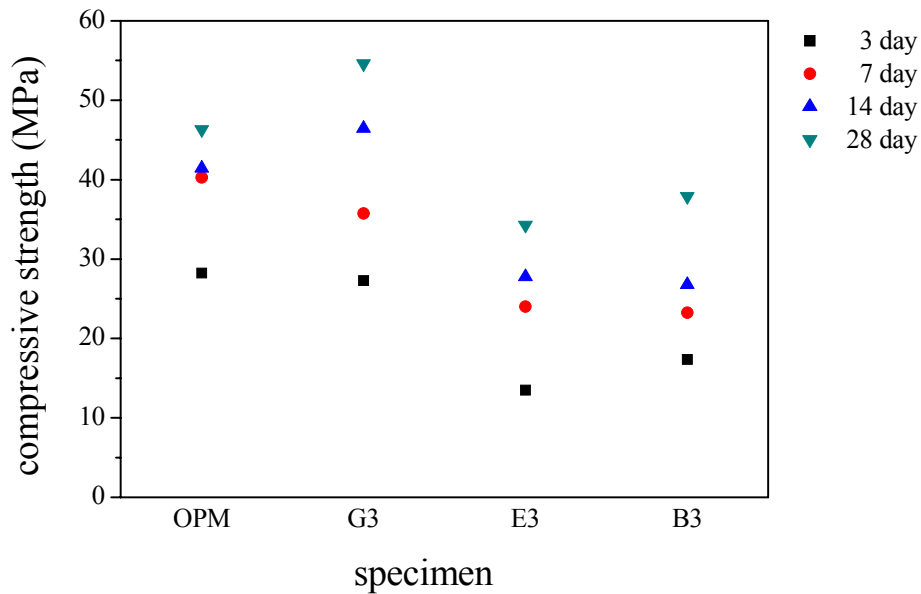


圖 4-56 鐵、鋼渣水泥砂漿抗壓強度(取代量 30 %)

(資料來源：本研究繪製)

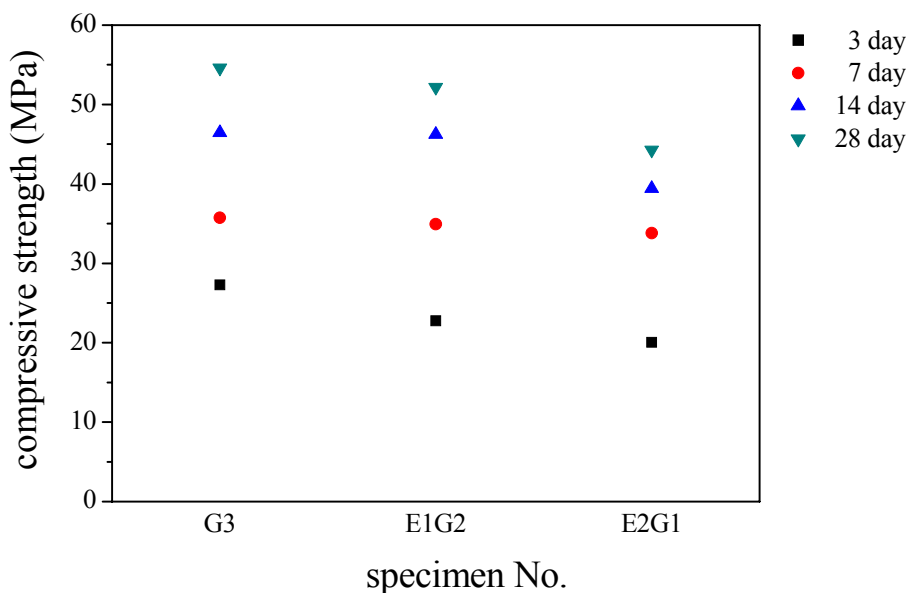


圖 4-57 鐵渣、鋼渣混合之水泥砂漿抗壓強度(電弧爐鋼渣)

(資料來源：本研究繪製)

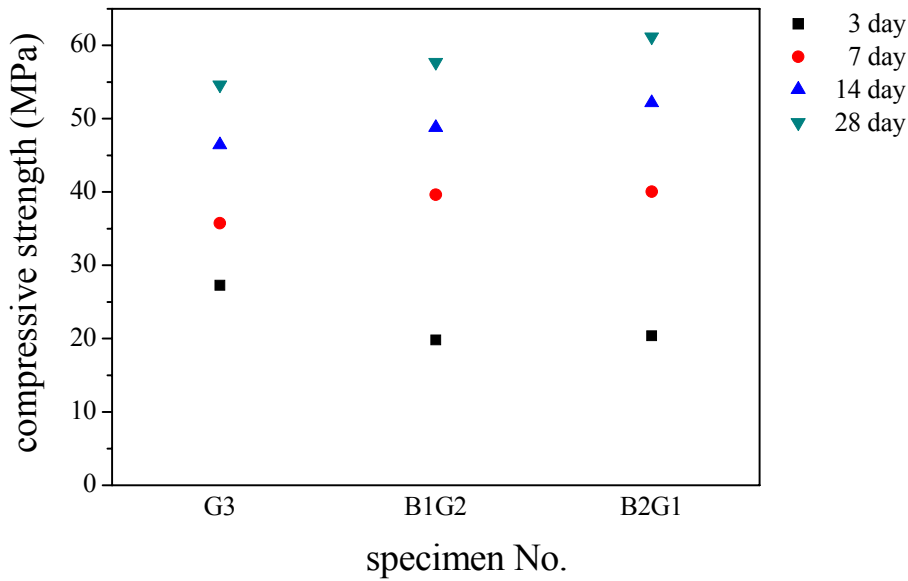


圖 4-58 鐵渣、鋼渣混合之水泥砂漿抗壓強度(轉爐鋼渣)

(資料來源：本研究繪製)

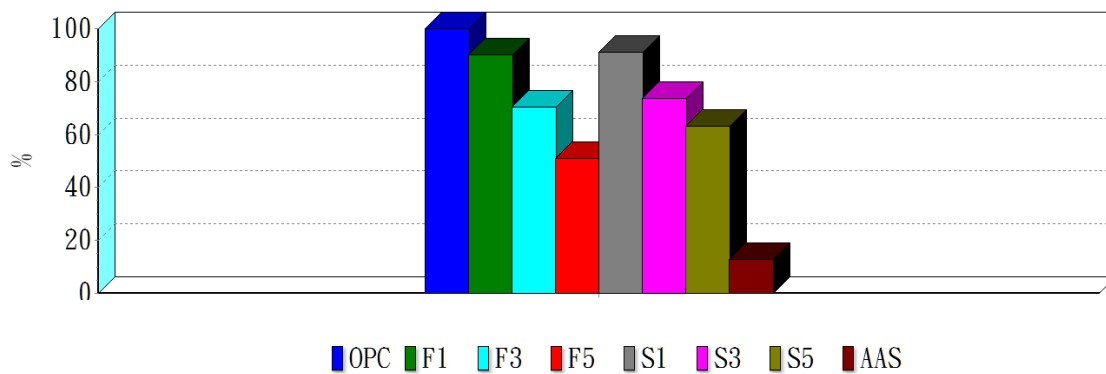
#### 第四節 節能減碳效益分析

根據前人研究表示，生產 1 ton 水泥約排放 715 kgCO<sub>2</sub>，研磨 1 ton 爐渣約排放 76.7 kgCO<sub>2</sub>，而平均每生產 1 m<sup>3</sup> 的混凝土(水膠比 0.5)約排放 312 kg 二氧化碳，如表 4-1 所示。每添加 10 % 的爐渣，可減少每 1 m<sup>3</sup> 混凝土 6 %~8 % kg 的二氧化碳排放量，如圖 4-59 所示<sup>[53]</sup>。假設鋼渣與鐵渣所產生的碳排放是一樣的，並經由圖 4-23 得知鐵渣可依高重量百分率 70 wt % 替代水泥，換算成碳排放為每 1 ton 為 268.19 kgCO<sub>2</sub>，可降低水泥 62.5 % 之碳排放，而圖 4-15 及圖 4-20 顯示鋼渣可依小重量百分率 10 wt % 替代水泥，碳排放為每 1 ton 為 651.8 kgCO<sub>2</sub>，可降低水泥 8.9 % 之碳排放。

表 4-1 混凝土組成材料碳排放量<sup>[53]</sup>

混凝土組成材料(ton)	水	水泥	爐石	粒料
kgCO <sub>2</sub> eq	0.1	715	76.7	4.01

(資料來源：內政部建築研究所, 2011)



符號說明：OPC(普通混凝土)、F(飛灰)、S(爐石)、AAS(鹼激發爐石)、數字(摻料用量)

圖 4-59 不同取代量之飛灰及爐石混凝土碳排放量<sup>[53]</sup>

(資料來源：內政部建築研究所, 2011)



## 第五章 結論與建議

### 第一節 結論

1. 依據砂漿試驗結果顯示，水淬高爐爐渣(鐵渣)、轉爐鋼渣及電弧爐鋼渣，均可依一定的比例代替部分的水泥做為輔助性膠結料，其中鐵渣可依高重量百分率 70 wt % 替代水泥，而鋼渣僅能以小重量百分率(10 wt %)替代水泥；鋼鐵渣混合以 30 wt % 替代水泥 28 天強度皆較控制組高(20 % 轉爐鋼渣+10 % 鐵渣，10 % 轉爐鋼渣+20 % 鐵渣)，鐵渣、鋼渣細度對於試體 91 天齡其抗壓強度無明顯之影響。
2. 流度試驗結果顯示，添加轉爐鋼渣會降低砂漿流度、添加電爐鋼渣會增加砂漿流度、添加鐵渣則沒有影響，轉爐鋼渣細度越大替代水泥量越多流度會越差，電爐鋼渣細度越大替代水泥量越多流度會越好。
3. 氯離子滲透試驗顯示，水淬高爐爐渣(鐵渣)、轉爐鋼渣及電弧爐鋼渣在相同替代水泥量(10 wt %)的情況下，鐵渣之氯離子擴散係數會與普通混凝土相近，而轉爐鋼渣及電弧爐鋼渣會使砂漿氯離子的擴散速率增加。
4. 試驗結果顯示，以轉爐鋼渣、電弧爐鋼渣及氣冷高爐鐵渣做為部分混凝土粗粒料(50 % 及 100 %)，添加電弧爐鋼渣在抗壓強度方面會比較接近普通混凝土，氣冷高爐鐵渣及轉爐鋼渣會降低混凝土抗壓強度；添加轉爐鋼渣、電弧爐鋼渣及氣冷高爐鐵渣不會混凝土影響劈裂強度。
5. 試驗結果顯示，6 小時累積通過電量皆會高於普通混凝土，而且替代天然粒料量越多混凝土 6 小時累積通過電量會越高。
6. 依據混凝土試驗結果顯示，碳化深度值皆比普通混凝土高，而且替代天然粒料量越多混凝土碳化深度會越高。
7. 依據混凝土試驗結果顯示，添加電弧爐鋼渣混凝土的抗硫酸鹽侵蝕效果會比較接近普通混凝土，添加轉爐鋼渣及氣冷高爐鐵渣會降低混凝土抗硫酸鹽侵蝕能力。
8. 依據混凝土試驗結果顯示，添加電弧爐鋼渣混凝土的抗水滲透能力會比較接近

普通混凝土，添加轉爐鋼渣及氣冷高爐鐵渣混凝土抗水滲透能力會下降。

9. 根據文獻指出，生產 1 ton 水泥約排放 715 kgCO<sub>2</sub>，研磨 1 ton 爐渣約排放 76.7 kgCO<sub>2</sub><sup>[53]</sup>。假設鋼渣與鐵渣所產生的碳排放是一樣的，根據試驗結果得知，鐵渣可依高重量百分率 70 wt % 替代水泥，換算成碳排放為每 1 ton 為 268.19 kgCO<sub>2</sub>，可降低水泥 62.5 % 之碳排放，鋼渣可依小重量百分率 10 wt % 替代水泥，碳排放為每 1 ton 為 651.8 kgCO<sub>2</sub>，可降低水泥 8.9 % 之碳排放。
10. 根據文獻指出，生產 1 ton 天然粒料約排放 4.01 kgCO<sub>2</sub><sup>[53]</sup>，由試驗結果得知，電弧爐鋼渣完全替代混凝土天然粗粒料。由於電弧爐鋼渣為工業副產品，所以假設其碳排放為~0 %，可降低天然粒料~100 % 碳排放。

## 第二節 建議

### 建議一

鐵渣或鋼渣做為混凝土的輔助膠結料或填充料之延續研究：立即可行建議

主辦機關：社團法人中華民國建築技術學會、社團法人台灣混凝土學會

協辦機關：國立台灣海洋大學河海工程學系、國立台灣科技大學營建系、

國立交通大學土木工程系

依本研究試驗結果發現，鐵渣及鋼渣均可做為混凝土的輔助膠凝料，鐵渣可依 70 wt % 替代水泥，而鋼渣以 10 wt % 替代水泥，對水泥砂漿抗壓強度折減約 0.19 %~ 6.75 % 影響甚微，建議日後可進行相關延續性研究，以達開發資源再利用之效益。

### 建議二

鋼渣做為混凝土粒料之延續研究：立即可行建議

主辦機關：社團法人中華民國建築技術學會、社團法人台灣混凝土學會

協辦機關：國立台灣海洋大學河海工程學系、國立台灣科技大學營建系、

國立交通大學土木系

依本研究試驗結果發現，鐵渣或鋼渣可以做為混凝土的填充料，其中以電弧爐鋼渣表現最佳，或可依 100 vol % 替代天然粗粒料，且較不影響混凝土之抗壓強度，建議日後可進行相關延續性研究，以達開發資源再利用之效益。

建議三

創新水泥質複合材料研發：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：社團法人台灣混凝土學會，社團法人台灣區水泥製品同業公會、國立台灣海洋大學河海工程學系、國立台灣科技大學營建系、國立交通大學土木系

研究發現，鋼鐵渣混合以 30 wt % 替代水泥，其 28 天抗壓強度皆較控制組高(20 % 轉爐鋼渣+10 % 鐵渣強度增加 5.7 %，10 % 轉爐鋼渣+20 % 鐵渣強度增加 12.03 %)，值得應用推廣，建議可針對混合水泥製程、鋼鐵渣混凝土耐久性或鹼活化爐石粉混凝土特性進行更進一步探討。



## 附錄一 期初審查意見及回應

### 委員發言重點與回應（依發言順序）：

委員	評選委員意見	廠商回應
張委員大鵬	1. 本案流程圖提及耐久性質試驗計有碳化試驗、透水試驗、吸水率試驗、抗硫酸試驗及圍塘試驗等，但在本案中未提及，請予釐清。	1. 本案流程圖所列試驗項目，皆會執行。
曾委員慶祥	1. 本案試驗變數，包括：爐渣研磨平均粒徑 3 種，水泥取代量 4 種，粒料取代量 2 種等，而本案預期成果，係探討 3 種不同應用方式，請說明此 3 種方式是何種組合。 2. 本案爐渣冷卻方式有氣冷和水冷兩種，氣冷會形成結晶態，不利水化反應；而水冷則不會形成結晶態，轉成為玻璃質，水化活性高，較適合做為取代水泥的膠結劑，本案向中鋼取得爐渣時，宜特別指定。	1. 本案組合方式為：爐渣粉細度、爐渣粉料與粒料比例、爐渣取代卜特蘭水泥量。 2. 本案將參採委員建議。
李委員釗	1. 本案相關研究人員學經歷與專長，符合研究主題所需。 2. 本案鐵渣與鋼渣因處理程序不同，會產生不同的爐渣，各自物性不同，宜以具水化活性的取代水泥，不具活性的做為粒料，但部分爐渣具膨脹性，本案研究時宜避免使用具膨脹性的爐渣。 3. ASTM C88 的試驗對象主要是探討粒料的抗風化能力，其作用除包括硫酸鹽侵蝕外，亦包括乾、濕、冷熱循	1. 本案將持續掌握參予研究人員之專長，能符合研究主題所需。 2. 本案研究時將儘量避免使用具膨脹性爐渣。 3. 有關 ASTM C88 及硫酸鹽侵蝕試驗之建議，納入後續研究之參採。 4. 本項建議將納入後續研究之參採。

	<p>環，並以重量損失為量測指標，建議另考量使用 ASTM 硫酸鹽侵蝕試驗，以膨脹量為指標的試驗，可單純化硫酸鹽侵蝕的行為。</p> <p>4. 本案各種種爐渣的水化活性可依 ASTM C311 強度指數作測試。</p>																	
<p>吳委員傳威</p>	<p>1. 本案文獻說明，宜包含國內目前在爐渣使用的狀況，以帶出本案之貢獻。</p> <p>2. 本案爐渣材料之穩定性，為研究成果有意義與否之關鍵，宜特別說明(證實)。</p> <p>3. Geopolymer 之應用已今非昔比，國內已有 know how。</p>	<p>1. 關於國內外爐渣相關使用情況，將於後續報告中增補。</p> <p>2. 爐渣穩定性為本案之調查範圍，相關結果將於後續報告中呈現。</p> <p>3. 國外雖有實例，國內應用於 RC 構造之應用目前尚在研發階段，國內如有具體的 know-how 及案立，會於後續報告中敘明。</p>																
<p>鄒委員本駒</p>	<p>1. 本案試體採用鐵渣、鋼渣，前者生產方式有水淬及氣冷；用途材料部份可用於替代粒料及水泥；試驗方法及內容有 4 種；試體製作種類有混凝土及水泥漿體共 4 種，內容太分散，建議做個總表較易。</p> <p>2. 本案第 7 頁研究目的之 1，替代混凝土中水泥「或」粒料，請改為「及」。</p> <p>3. 本案第 5 頁及第 12 頁分別為水灰比 0.5 及水膠比 0.5，請修正。</p> <p>4. 本案第 10 頁有文字誤繕請修正。</p>	<p>1. 已參採委員意見，總表如下。</p> <table border="1" data-bbox="903 965 1382 1361"> <thead> <tr> <th>試驗項目</th> <th>試體數量</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>抗壓強度試驗</td> <td>156 顆</td> </tr> <tr> <td>RCPT</td> <td>21 顆</td> </tr> <tr> <td>碳化試驗</td> <td>21 顆</td> </tr> <tr> <td>圍塘試驗</td> <td>21 顆</td> </tr> <tr> <td>吸水試驗</td> <td>21 顆</td> </tr> <tr> <td>硫酸鹽侵蝕試驗</td> <td>21 顆</td> </tr> <tr> <td>所有試體總計至少</td> <td>261 顆</td> </tr> </tbody> </table> <p>2. 已採委員意見修正。</p> <p>3. 已採委員意見修正。</p> <p>4. 後續將審慎相關文字之說明，以避免文字誤繕。</p>	試驗項目	試體數量	抗壓強度試驗	156 顆	RCPT	21 顆	碳化試驗	21 顆	圍塘試驗	21 顆	吸水試驗	21 顆	硫酸鹽侵蝕試驗	21 顆	所有試體總計至少	261 顆
試驗項目	試體數量																	
抗壓強度試驗	156 顆																	
RCPT	21 顆																	
碳化試驗	21 顆																	
圍塘試驗	21 顆																	
吸水試驗	21 顆																	
硫酸鹽侵蝕試驗	21 顆																	
所有試體總計至少	261 顆																	
<p>陶委員其駿</p>	<p>1. 國內鐵渣或鋼渣材料成分之穩定性，是否已有足夠之試驗中證實。</p> <p>2. 本案在鹼激發水淬高爐石粉之程序中，鹼活化劑常為強鹼類水溶液，因此存有相當程度的危險性，故僅適合於實驗室小量施作，未來應如</p>	<p>1. 本案鐵渣或鋼渣材料穩定性，會於組成材料試驗時確認。</p> <p>2. 本案鹼活化劑雖為鹼溶液，但過去研究案例顯示使用時對人體並無明顯影響，具體的量產技術與流程有待進一步探討。</p> <p>3. 將參採委員建議，納入後續研究。</p>																

	<p>何大量應用於工程實務。</p> <p>3. 本案混凝土試體抗拉強度之獲取，建議再審慎評估適當之實驗方法。</p> <p>4. 未來實驗研究之成果，將如何與建研所應用業務相結合。</p>	<p>4. 配合建研所內應用業務，本案可增加建築物使用永續混凝土之技術與效益。</p>
<p>林組長建宏</p>	<p>1. 爐碴種類甚多，宜先就其物性、來源、供應量等進行評估，建議納入。</p> <p>2. 工程運用情形如何？建議蒐集案例並評估之。</p> <p>3. 本案預期成果及效益第 3 點，建立 3 種不同應用方式的爐碴混凝土配比設計及使用舉例，在計畫書第 7 頁有條例，惟內容未著墨，請說明。</p>	<p>1. 將參採委員建議，納入後續研究。</p> <p>2. 將參採委員建議，納入後續研究。</p> <p>3. 本案第 7 頁內容主要為闡述本研究之主題，預定之研究方向，而詳細研究內容將敘明於後續報告中。</p>



## 附錄二 期中審查意見及回應

## 委員發言重點與回應（依發言順序）：

委員	評選委員意見	廠商回應
劉委員制軍	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 將鐵渣、鋼渣添加於混凝土中，應否檢測成品毒物溶出？其溶出標準為何？</li> <li>2. 添加爐渣之混凝土，是否會有膨脹、收縮等變形情況發生？</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本研究於第二章，第三節有列出使用爐渣石之檢測相關標準與方法。</li> <li>2. 體積穩定性之研究結果於期末報告中會加以說明。體積穩定性之研究結果於期末報告中會加以說明。</li> </ol>
顏委員聰	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本案使用水淬爐渣、轉爐渣及電弧爐渣，其化學成分是否具代表性？會否隨料源、煉製方法不同而有變化？依研究報告表 3-3，轉爐渣與電弧爐渣化學成分差異相當大，是否因其原料不同或其他因素，宜再瞭解。</li> <li>2. 砂漿耐久性部分，本案同時進行圍塘試驗(ponding test)及快速氣離子穿透試驗(RCPT)目的為何？</li> <li>3. 轉爐渣粒徑 <math>d &lt; 15 \mu\text{m}</math> 時，砂漿流動性變差，而其他種類爐渣則否，宜探討其原因。</li> <li>4. 轉爐渣取代水泥者，其 3 天、7 天強度與爐渣粒徑大小相關性並不規則，宜探討其機理與原因；又取代率 50 %、70 % 者，水中養護時有膨脹龜裂情形，建請探討原因。</li> <li>5. 以往已有不少水淬爐渣研究報告，建議將本案試驗結果與前人研究做一比較。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議。</li> <li>2. 由於爐渣中含有大量金屬成分，擔心會影響 RCPT 試驗結果之電流值，因此才會考慮加入 Ponding 試驗。</li> <li>3. 感謝委員建議。</li> <li>4. 以上之建議本團隊會根據試驗結果於期末報告中會加以說明。</li> <li>5. 感謝委員建議。</li> </ol>

<p>蘇委員南</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 添加爐渣比例方面，可蒐集參考行政院公共工程委員會之「爐石混凝土使用手冊」，及中國土木水利工程學會「混凝土施工規範」，加以評估；於配比設計方面，建議可參考前述「爐石混凝土使用手冊」，及 ACI Report 或規範。</li> <li>2. 依研究報告第 36 頁資料，轉爐渣之 SiO<sub>2</sub> 含量偏低，代表含金屬化合物成分較高。混凝土添加爐渣（尤其是轉爐渣粉）後，對於熱島效應影響，建議納入評估。</li> <li>3. 目前市售預拌混凝土，常見爐石粉與飛灰合併摻於其中，建議酌予納入探討。</li> <li>4. 中國大陸目前為全世界爐渣產量最多的地區，建議逐步蒐集相關資料。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議。</li> <li>2. 本項建議將納入後續研究之參採。</li> <li>3. 本項建議將納入後續研究之參採。</li> <li>4. 感謝委員建議。</li> </ol>
<p>高委員健章</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 探討高爐爐渣、轉爐爐渣及電弧爐渣添加於混凝土，如何影響其流動性及凝結時間，並獲具體初步成果，研究具應用價值。</li> <li>2. 研究報告表 3-3 為試驗採用材料化學成分，惟缺 3 種爐渣粉之玻璃化程度（活性指數）資料，因其與化性關聯性高，宜加補充。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員肯定。</li> <li>2. 感謝委員建議。</li> </ol>
<p>趙委員文成</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 利用不同爐渣取代水泥，對節能減碳、永續發展有極大貢獻。</li> <li>2. 由化學分析得知，不同爐渣之化性與水泥有若干相近之處，故以爐渣取代部分水泥作法應具可行性。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員意見。</li> <li>2. 感謝委員意見。</li> <li>3. 感謝委員意見。</li> <li>4. 感謝委員建議。</li> </ol>

	<p>3. 由於各種爐渣生產過程不同，故活性不同。如何激發其活性，以及不同爐渣對凝結時間影響因素為何，可再進一步探討。</p> <p>4. 由於爐渣使用前須增加研磨手續，建議可做經濟性分析。</p>	
<p>李委員釗</p>	<p>1. 研究計畫內容實驗工作量龐大，而執行期程有限，建議精簡。</p> <p>2. 建議對各種爐渣磨粉進行 ASTM C311 的強度活性指數試驗，以便在相同的基礎上，比較各種爐渣不同細度的活性。</p>	<p>1. 感謝委員建議。</p> <p>2. 感謝委員建議。</p>
<p>廖委員肇昌</p>	<p>1. 本案使用轉爐渣，因其遇水膨脹特性，造成南部台江大道路面起伏甚大，至今仍無法處理（該材料須經熟化反應）。本研究所進行的試驗皆未針對轉爐渣未來遇水膨脹特性加以探討或說明，宜加注意，必要時應進行膨脹試驗觀測。從研究報告第 60 頁 4-1-1 第 6 行「因此建議未來……造成混凝土膨脹及龜裂問題之影響原因……」亦可得到驗證，故進行轉爐渣的研究必須正視此一影響。</p> <p>2. 水淬高爐石粉非以渣料方式（顆粒級配方式）已廣泛使用在國內公私有建築物或構造物，行政院公共工程委員會亦有高爐石混凝土使用手冊，較無疑義。轉爐渣及電弧爐渣仍宜先對基本物性、化性及體積穩定性進行基礎</p>	<p>1. 感謝委員建議。</p> <p>2. 感謝委員建議。</p>

	<p>性探討(同步進行),再及至 混凝土物性、化性研究較為 適宜。</p>	
<p>林委員建宏</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 簡報資料(紙本)宜採雙面 印製,以節省紙張。</li> <li>2. 使用爐渣於混凝土,需特別 考量3項前提:使用效果如 何、成本高低(含加工)、供 給量是否能滿足市場需求。 又添加於混凝土之最大用量 為何,現行相關規範中是否 有規定,請於成果報告中呈 現或提出建議值。</li> <li>3. 添加爐渣之混凝土在其漫長 的生命週期中,其物性、化 性之變化,對構造物本身是 否造成影響?能否預測?或 可納入本案探討。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議。</li> <li>2. 感謝委員建議。</li> <li>3. 感謝委員建議。</li> </ol>

## 附錄三 期末審查意見及回應

## 委員發言重點與回應（依發言順序）：

委員	評選委員意見	廠商回應
趙委員文成	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 於混凝土生命週期中，會吸收 CO<sub>2</sub>，故建議可對此加以補充，彰顯其環保效益。</li> <li>2. 依據 CNS 15286 混合水泥-卜特蘭高爐水泥中之水淬爐石粉，所占質量百分率可達 95%，顯見爐渣（石）添加於混凝土之作法，確實可行。另有相關報告指出，水淬高爐爐渣之活性可達 120%，提供本案研究團隊參考。</li> <li>3. 使用轉爐、電弧爐凝結時間縮短之原因宜再說明。</li> <li>4. 有具體可行之建議值得肯定。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本項建議將納入後續研究之參採。</li> <li>2. 感謝委員意見。本研究之活性指數已接近 CNS 12549 混凝土及水泥砂漿用水淬高爐爐渣粉物理性質標準規定。</li> <li>3. 研究報告中 pp.92 及 pp.93 已有做簡單說明。</li> <li>4. 感謝委員建議。</li> </ol>
顏委員聰	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 表 3-6 應為鋼渣化學成分表，轉爐渣與電弧爐渣有之成分有何差別？實務上成份穩定性如何宜做評估。</li> <li>2. 轉爐鋼渣之流變試驗結果顯示，轉爐鋼渣之細度較大者 (10000 cm<sup>2</sup>/g) 其流動性較差，此結果與電弧爐鋼渣相反兩者宜討論其原因。</li> <li>3. 轉爐鋼渣取代量超過 50 % 後，其砂漿強度因脹裂而無法精準量測，則圖 4-18 之曲線建議只繪至 30 %。</li> <li>4. 爐渣混凝土之節能減碳效益，報告本文內未見結果，宜增闢乙節論述。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 其成分間主要差異在 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 CaO 的成分多寡。實務上可透過成分分析儀 (XRD) 及熱差分析儀 (DSC)，透過其成分反應後之變化或活性來做評估。</li> <li>2. 本項建議將納入後續研究之參採。</li> <li>3. 此建議會於成果報告中修正。</li> <li>4. 感謝委員建議，成果報告中會增加乙節討論。</li> </ol>

<p>蘇委員南</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 目前社會不甚景氣，希望本研究成果對混凝土營建產業發展有正面貢獻，建議參酌公共工程委員會之爐石使用手冊，對其做相關聯結，並與中國土木水利學會之”混凝土施工規範”中的配比要求做出建議與修改。</li> <li>2. 當爐石粉的細度達 10000 cm<sup>2</sup>/g 時，固有益於混凝土性質之改善，惟其在經濟性及研磨製程與成粉是否能為業界接受?</li> <li>3. 請就試體(鋼渣、鐵渣等)知是否符合耐久性(滲透率)規範做出評價或改善。</li> <li>4. 報告中 p.XII 之建議.....100 % VOL 取代天然粗粒料，其論述是否過於不保守，建議就前提等條件而論述。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 本項建議將納入後續研究之參採。</li> <li>2. 本項建議將納入後續研究之參採。</li> <li>3. 本項建議將納入後續研究之參採。</li> <li>4. 此建議會於文獻中加以補充說明。</li> </ol>
<p>王委員和源</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 文中英文名詞首字宜以大建議本研究再針對此 3 種不同爐渣(石)混凝土，進行節能減碳效益之試算分析；另研究報告所使用之英文名詞，首字宜以大寫呈現；第二章標題建議改為「文獻回顧」。</li> <li>2. 研究報告內容有部分缺漏或誤繕，宜做更正：(1)表 2-1 及表 2-2 漏繕數字之單位；(2)圖 2-5 過於模糊；(3)第 25 頁最後一行「圖 2-1」，改為「圖 2-11」；(4)表 3-3 請確認是否為混凝土配比，而非水泥砂漿配比；(5)表 3-4 請確認是否為水泥化學成分，而非水泥及鐵渣化學成分。</li> <li>3. 研究報告第 52 頁之公式(2)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員建議，成果報告中會增加乙節討論；本團隊在不影響原定格式情況下斟酌修正。</li> <li>2. 本項會於成果報告中修正。</li> <li>3. 本項會於成果報告中修正。</li> <li>4. 本項會於成果報告中修正。</li> </ol>

	<p>至(6),建議以 X 光能譜散佈分析(EDS),配合進行微觀分析。</p> <p>4. 研究報告參考資料所列文獻似有重覆(如第3項與第8項、第4項與第7項、第21項與第50項),宜再重新檢視。</p>	
<p>王委員榮吉</p>	<p>1. 本委託研究符合綠色永續混凝土及再利用,提高混凝土結構使用壽命,降低水泥使用量減碳排放的研究目的。</p> <p>2. 永續(綠色)混凝土的使用及技術人才的培育訓練,擬與相關混凝土產業,學會相互交流,以落實產學合作。</p>	<p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員肯定。</p>



## 參考書目

1. 郭炎土, “劇變中的台灣鋼鐵業及因應之道”, 科學發展, 第 457 期, 第 97-102 頁, 2011。
2. World Steel Association, website : <http://www.worldsteel.org/>
3. J. Gieseler, “Properties of iron and steel slags regarding their use”, In: Proceedings of the Sixth International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts, Stockholm, Sweden and Helsinki, Finland, 2000.
4. P. Miklos, “The utilization of electric arc furnace slags in Denmark”, Euroslag. Engineering of slags, A scientific and technological challenge, In: Proceedings of the 2nd European Slag Conference, Düsseldorf, Germany, 2000.
5. M. Tossavainen, F. Engstrom, Q. Yang, N. Menad, M. Lidstrom Larsson, and B. Bjorkman, “Characteristics of steel slag under different cooling conditions”, Waste Manage, Vol. 27, pp. 1335-1344, 2007.
6. 蘇茂豐、陳立, “電弧煉鋼爐渣之資源化現況及未來展望”, 工業污染防治, 第 93 期, 第 27~51 頁, 2005。
7. Mohamed El-Sayed Mohamed Mahgoub, Nico Peter van der Steen, Khaled Abu-Zeid and Kala Vairavamoorthy, “Towards sustainability in urban water: a life cycle analysis of the urban water system of Alexandria City, Egypt”, Journal of Cleaner Production Vol.18, No, 10-11, pp. 1100-1106, 2010.
8. Subramanian Senthilkannan Muthu, Y. Li, J.Y. Hu and P.Y. Mok, “Carbon footprint of shopping (grocery) bags in China, Hong Kong and India”, Atmospheric Environment, Vol. 45, No. 2, pp. 469-475, 2011.
9. D Bonenfant, L Kharoune, S Sauvé, and R Hausler, “Molecular analysis of carbon dioxide adsorption processes on steel slag oxides” international journal of greenhouse gas control, Vol. 3, No, 1. pp. 20-28, 2009.
10. D.M. Proctor, K.A. Fehling, E.C. Shay, J.L. Wittenborn, J.J. Green, C. Avent, R.D.

- Bigham, M. Connolly, B. Lee, T.O. Shepker, and M.A. Zak, "Physical and chemical characteristics of blast furnace, basic oxygen furnace, and electric arc furnace steel industry slags", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 34, 1576 -1582, 2000.
11. R. Kumar, S. Kumar, S.K. Jena and S.P. Mehrotra, "Hydration of mechanically activated granulated blast furnace slag", *Metallurgical and Materials Transactions*, B 6, pp. 473-484, 2005.
  12. T. Hansen and E.K. Lauritzen, "Concrete waste in a global perspective, recycling concrete and other materials for sustainable development", *American Concrete Institute*, pp. 35-45, 2004.
  13. D.N. Huntzinger, T.D. Eatmon, "A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17, No. 7, pp. 668-675, 2009.
  14. A. Altun and I. Yilmaz, "Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 8, pp. 1247-9, 2002.
  15. C.J. Shi and J.S. Qian, "High performance cementing materials from industrial slags - a review. Resources", *Conservation and Recycling*, Vol. 29, No. 3, pp. 195-207, 2000.
  16. G.J. Osborne, "Durability of Portland Blast-Furnace Slag Cement", *Cement and Concrete Composites*, Vol.21, No.1, pp.21-29, 1999.
  17. D. Li, J. Shen, Y. Chen, L. Cheng, and X. Wu, "Study of properties on fly ash±slag complex cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 9, pp. 1381-1387, 2000.
  18. H. Yazici, and H. Yigiter, AS Karabulut, B. Baradan, "Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete", *Fuel*, Vol. 87, No. 12, pp. 2401-2407, 2008.
  19. T Zhang, Q Yu, J Wei, J Li, and P Zhang, "Preparation of high performance blended cements and reclamation of iron concentrate from basic oxygen furnace steel slag", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 56, No. 1, pp. 48-55, 2011.

20. L. Muhmood, Satish Vitta, and D. Venkateswaran, “Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, No. 2, pp. 102-109, 2009.
21. S. Kourounis, S. Tsivilis a, P.E. Tsakiridis, G.D. Papadimitriou, and Z. Tsibouki, “Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No.6, pp. 815-822, 2007.
22. I.A. Altun and I. Yılmaz, “Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 8, pp. 1247-1249, 2002.
23. N.Y. Mostafa, S.A.S. El-Hemaly, E.I. Al-Wakeel, S.A. El-Korashy, and P.W. Brown, “Hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag at different temperatures” *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 3, pp. 475-484, 2001
24. J.I. Escalante-Garciaa, L.J. Espinoza-Pereza, A. Gorokhovskya, and L.Y. Gomez-Zamoranob, “Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement”, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 7, pp. 2511-2517, 2008.
25. M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, and H. Bolio, “Sustainable cement production - present and future”, *Cement and Concrete Research*. Vol. 41, No. 7, pp. 642–650, 2011.
26. International Energy Agency, [on-line], Cement roadmap targets, 2009.  
[http://www.iea.org/papers/2009/Cement\\_Roadmap\\_targets\\_viewing.pdf](http://www.iea.org/papers/2009/Cement_Roadmap_targets_viewing.pdf). (Accessed 18 March 2011)
27. Australia, “Global Greenhouse Warming”, 2010.  
<http://www.global-greenhouse-warming.com> (accessed July 14, 2010).
28. A. Monshi, and M.K. Asgarani, “Portland cement from iron and steel slags and limestone”, *Cement and Concrete Research*. Vol. 29, No. 9, pp. 1373–1377, 1999.
29. 蘇茂豐, “電弧爐渣資源化歷程”, 綠基金會通訊, 第 11-142 頁, 2010。
30. R.J. Collins, “Waste products as a potential replacement for aggregate”, In: *Proceedings*

- of the fourth international ash utilization symposium, March 24-25, St. Louis, MO; pp. 93-113, 1976.
31. Japanese Civil Engineering Society, "Handbook of civil engineering concrete". pp. 7, 1980.
  32. D.W. Lewis, "Resource conservation by use of iron and steel slag. ASTM Tech Pub", Vol. 774, No. 1, pp. 31-41, 1982.
  33. USGS. "Natural aggregates – foundation of America's future", 2010.  
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/aggregates/fs14497>.
  34. 孫志鵬、陳文超, "高雄市南星計畫遊艇產業園區開發規劃", 「城市發展」半年刊, 第12期, 第54-75頁, 2011。
  35. 永續公共工程, "國道六號: 南投路段節能減碳對策", 行政院公共工程委員會, 2012。  
<http://eem.pcc.gov.tw/>.
  36. 大阪府政府, "欣欣向榮的大阪", 第2期, 2007。
  37. 科學與藝術數字博物館, "世界第一懸索橋 - 日本明石海峽大橋", 2004。  
<http://www.e-museum.com.cn/dmsa/default.shtml>.
  38. 趙文成, "簡易化、自動化一般強度自充填混凝土之工程應用與產製技術" 土木水利, 第28卷, 第1期, 第74-83頁, 2001年。
  39. 「1997年國科會高性能混凝土研究成果推廣研討會」, 國立雲林科技大學, 1992年。
  40. 中華民國100年2月9日經濟部經工字第10004600760號修正公告「經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式」。
  41. CNS 3036-A2024 混凝土用飛灰及天然或煨燒卜作嵐攪和物, 2009年。
  42. CNS 12223-A2218 水淬高爐爐渣, 1998年。
  43. CNS 12549-A2233 混凝土及水泥砂漿用水淬高爐爐渣粉, 2009年。

44. CNS 11827 - A2203 道路用高爐渣，1988 年
45. CNS 11824 -A2202 混凝土用高爐渣粗粒料，1987 年
46. CNS 15310 -A2295 瀝青鋪面混合料用鋼爐渣粒料，2010 年
47. CNS 15310 -A2291 級配粒料基層、底層及面層用材料，2010 年
48. 松田博，“高炉水碎スラグ「土工用材料としての技術資料」”，鐵鋼渣スラグ，2009 年。
49. 張宜中、張建智，“添加轉爐石粉對於混凝土耐久性影響之研究”，國立台灣海洋大學河海工程學系九十五學年度碩士專班研究成果，2006 年。
50. A. Monaco and U. Di Matteo, “Life cycle analysis and cost of a molten carbonate fuel cell prototype”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 13, pp. 8103-8111, 2011
51. C. Shi, “Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production”, *Cem Concr Res*, Vol. 32, No. 3, pp. 459-62, 2002.
52. Q. Wang and P. Yan, “Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag”, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1134-1140, 2010.
53. 內政部建築研究所，“永續混凝土材料之實驗開發與應用研究”，內政部建築所委託研究報告，2011 年。



使用爐渣（石）對於混凝土力學與耐久性能之研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：黃然、紀茂傑、陳君弢、蔡嘉榮

出版年月：101年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-03-4427-1（平裝）

