

資源化再利用

鹼活化鋼碴混凝土量產技術 之開發與研究

呂東璇^{*}、陳崇智^{**}、吳明富^{***}、黃雅蘭^{***}

摘 要

應用健性穩定以及抗硫酸鹽能力佳的鹼活化還原碴膠結材料，搭配電弧爐氧化碴粗、細粒料，開發鹼活化鋼碴混凝土量產技術，可有效解決還原碴健性問題，更可提高混凝土材料的工程特性。提供鋼鐵業及混凝土製品業，兼具永續發展與節能減碳的創新技術與產品。本研究經小型拌合、實廠拌合試驗及預鑄混凝土構件鑽心抗壓試驗，依新拌混凝土及硬固混凝土行為，確認鹼活化鋼碴混凝土配比設計成效，結果證實鹼活化鋼碴混凝土具量產可行性。研究發現，鹼活化鋼碴混凝土具有優越的工程特性：(1)高單位重(單位重 2650 kgf/cm^3)；(2)早強功能：3~7 天齡期即可達個別設計強度(140 kgf/cm^2 、 175 kgf/cm^2 及 210 kgf/cm^2)；(3)體積穩定性：由乾縮試驗量測其體積變化率，可知鹼活化鋼碴混凝土其體積變化幅度小，不致因乾縮而產生混凝土結構危害。另，由快速砂漿棒法試驗、鹼質與粒料反應試驗可知鹼活化鋼碴混凝土具體積長期穩定性；(4)耐候性佳；(5)抗硫酸鹽侵蝕(耐久性佳)等功能。

【關鍵字】電弧爐爐碴、鹼活化還原碴、氧化碴粒料、鋼碴混凝土

^{*}立順興資源科技股份有限公司 經理

^{**}立順興資源科技股份有限公司 副理

^{***}立順興資源科技股份有限公司 研發工程師

一、前言

根據環保署事業廢棄物申報統計，102 年出產之電弧爐爐渣約 164 萬公噸，其中氧化渣約 126 萬公噸、還原渣約 37.8 萬公噸^[1]。由於電弧爐還原渣本身含有較高含量的 free-CaO 與 free-MgO，若直接使用電弧爐還原渣運用於混凝土中，會發生健性膨脹而導致混凝土結構開裂問題，影響電弧爐爐渣在土木工程上的實務應用可行性^[2]。

1.1 還原渣健性不穩定

比較健性穩定及健性不穩定之還原渣樣本進行 X 光繞射(XRD)晶相分析發現(如圖 1)，顯示健性不良之還原渣 XRD 圖譜中，出現 Ca(OH)_2 及 MgO 晶相之峰值(peaks)，證實健性膨脹問題確實因有些還原渣試樣中含有較高量的 free-CaO 與 free-MgO，導致還原渣出現健性不良之情形^[2]。

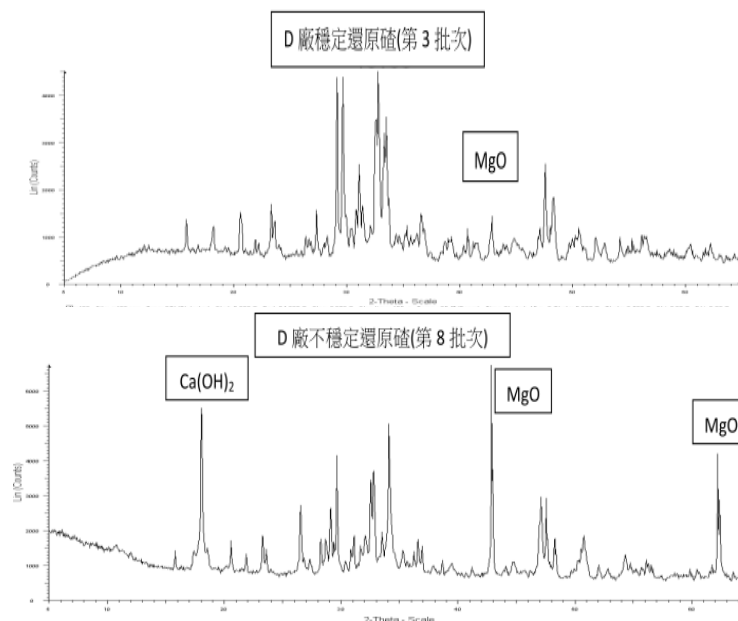


圖 1 健性穩定及健性不穩定還原渣粉體材料 XRD 晶相分析比較^[3]

1.2 健性穩定的還原碓不具耐久性

硫酸鹽侵蝕試驗是影響混凝土耐久性的一個重要因素，而硫酸鹽侵蝕試驗的目的在於檢測膠結材料暴露於含有硫酸鹽環境下，對硫酸鹽侵蝕的抵抗能力。當環境中之硫酸根離子，透過毛細管孔隙侵入混凝土內部，並與水化產物發生一連串化學反應，會在混凝土之微孔隙中形成晶型穩定的鈣礬石。當結晶隨時間逐漸累積，其結晶壓力易導致混凝土產生膨脹或混凝土剝落的現象，造成混凝土結構劣化及耐久性降低^[4]。

圖 2 所示為健性穩定之還原碓分別取代水泥之砂漿試體受硫酸鹽侵蝕之膨脹曲線，研究結果顯示還原碓取代比例愈高者，其抗硫酸鹽侵蝕能力愈差。因此即使健性穩定的還原碓作為卜作嵐材料使用，其對砂漿試體抵抗硫酸鹽侵蝕之能力具不利影響，造成水泥砂漿抗硫酸鹽侵蝕之能力的降低^[4]。

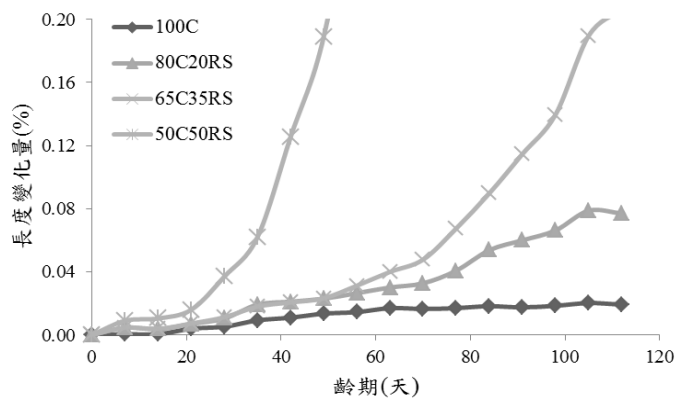


圖 2 卜作嵐還原碓取代水泥之砂漿試體受硫酸鹽侵蝕之試驗結果^[4]

1.3 應用鹼活化技術可以克服還原碓健性問題

藉由鹼活化技術之反應機理(如圖 3)結果顯示，鹼活化將還原碓之 free-CaO/MgO 轉換成水化產物，可有效改善因還原碓之 free-CaO/MgO 過多而導致健性不穩定的問題，使其熱壓膨脹率皆位於規範值要求之 0.8% 以內(如圖 4 所示)，成為體積穩定之混凝土膠結材料。另外，由鹼活化還原碓膠結材料研究結果顯示，

72 鹼活化鋼渣混凝土量產技術之開發與研究

除使混凝土抗壓強度提升外，同時其耐久性亦佳，抗硫酸鹽侵蝕能力優於普通水泥混凝土 [4、5]。

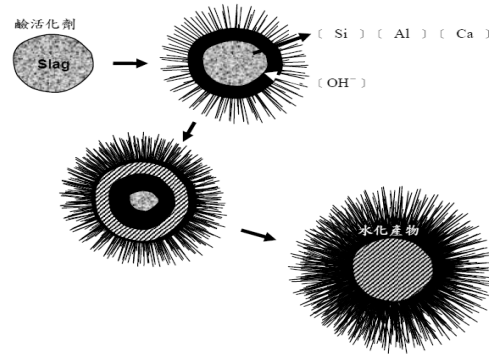


圖 3 鹼活化漿體之反應機理^[4]

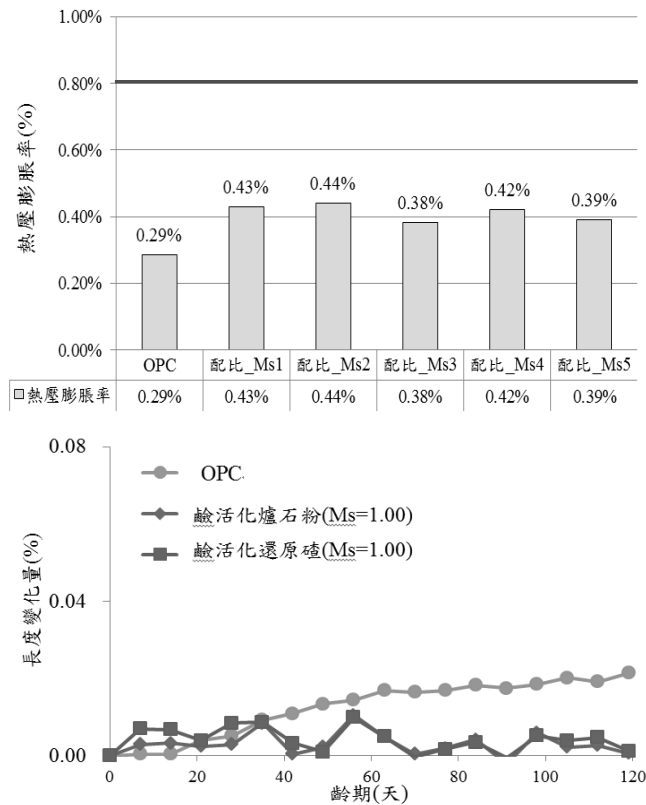


圖 4 鹼活化還原渣漿體熱壓膨脹試驗、砂漿棒受硫酸鹽侵蝕之長度變化量^[4]

本研究目的應用健性穩定及抗硫酸鹽能力佳之鹼活化還原渣膠體^[4]，搭配電弧爐氧化渣粗、細粒料^[6]，開發產製鹼活化鋼渣混凝土(Alkali Activated Slag Concrete，簡稱 AASC)技術，以解決電弧爐還原渣應用於混凝土材料健性不穩定的問題，同時提昇電弧爐渣整體資源化價值^[2、4、5]。

二、研究架構及方法

還原渣經鹼活化處理後，係用於取代傳統水泥混凝土中之水泥漿(即水泥與水之混合料)，因此其配合設計方法將不同於傳統混凝土。同時，再生粒料之特性亦與天然粒料不同^[6]，故須考量組成材料的特性，發展特有的配合設計方法，尤其經活化之還原渣具親水特性，拌製成混凝土後與傳統水泥混凝土之工作性與強度發展趨勢不同，需要詳細探討用水量對膠結效果的影響。

應用鹼活化還原渣與氧化渣再生粒料^[6]之配合設計方法，包括水膠比、粒料級配與用量、製作程序等，找出最佳化之配比設計方法以產製設計抗壓強度達 140 kgf/cm²、175 kgf/cm² 及 210 kgf/cm² 之預拌混凝土製品及抗壓強度達 140 kgf/cm²、175 kgf/cm² 及 210 kgf/cm² 之預鑄混凝土構件。研究架構如圖 6 所示。其混凝土配合設計(檢)試驗項目及所依據之標準試驗方法彙整如表 1 所示。

鹼活化還原渣混凝土配合設計，先進行小型拌合拌成效評估，依據小型拌合結果條找出最佳化配比，再進行實廠拌合試驗。依據鹼活化鋼渣混凝土新拌混凝土性質、硬固混凝土以及預鑄構件鑽心抗壓試驗結果，評估鹼活化鋼渣混凝土配比設計成效。

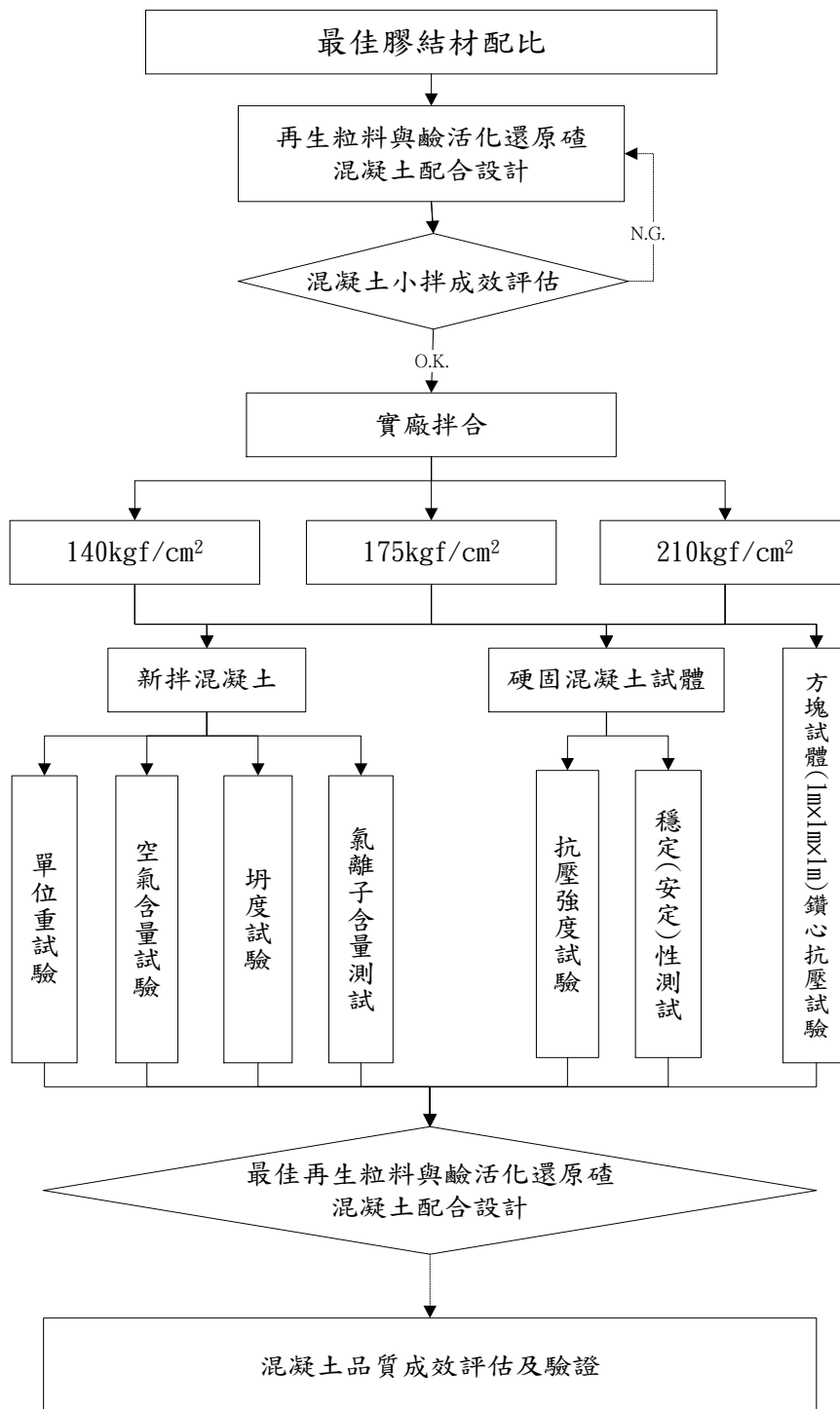


圖 6 鹼活化還原渣與氧化渣粒料混凝土配比設計試驗流程

表 1 混凝土配比設計(檢)試驗項目

材料	階段	檢(試)驗項目	規範標準	試驗數量	備註
混凝土小型拌合試驗	新拌 混凝土試驗	坍度試驗	-	1 個	CNS 1176
		單位重及空氣含量試驗	-	1 組	CNS 9661
		氯離子含量檢測	< 0.3	1 組	CNS 13465
	硬固 混凝土試驗	抗壓強度試驗	齡期：7 天	3 顆	CNS 1232
			齡期：28 天	3 顆	
		體積穩定性測試	體積變化率< 0.8%	1 個	ASTM C1260
混凝土實廠拌合試驗	新拌 混凝土試驗	坍度試驗	-	1 個	CNS 1176
		單位重及空氣含量試驗	-	1 組	CNS 9661
		氯離子含量檢測	< 0.3%	1 組	CNS 13465
	硬固 混凝土試驗	抗壓強度試驗	齡期：7 天	3 顆	CNS 1232
			齡期：28 天	3 顆	
		體積穩定性測試	體積變化率< 0.8%	1 個	ASTM C1260
		預鑄構件鑽心試體	齡期：28 天	3 顆	CNS 1238

三、結果與討論

3.1 小型拌合試驗結果

3.1.1 新拌混凝土性質

本研究檢測新拌性質的項目包括坍度、單位重、空氣含量及氯離子含量，檢測目的在於評估使用鹼活化還原碴及氧化碴粒料對混凝土工程特性之影響。由實驗結果可知，使用鹼活化鋼碴混凝土(140_AASC、175_AASC、210_AASC)坍度為20.3-20.7cm，而使用一般水泥混凝土(140_OPC、175_OPC、210_OPC)坍度為16.6-17.5cm；顯示於相同之水膠比的情況下，其鹼活化鋼碴混凝土具有較佳之流動

76 鹼活化鋼渣混凝土量產技術之開發與研究

性。空氣含量會影響其新拌混凝土之流動性，並由表 2 試驗結果得知，鹼活化鋼渣混凝土具有較高之空氣含量(2.16%-2.27%)比之一般水泥混凝土(1.49%-1.61%)，因此鹼活化鋼渣混凝土具有較佳之流動性及工作性。

表 2 小型拌合-新拌混凝土試驗

新拌混凝土試驗(小型拌合)						
配比代號	140_OPC	140_AASC	175_OPC	175_AASC	210_OPC	210_AASC
坍度(cm)	16.6	20.3	16.8	20.5	17.5	20.7
單位重(kg/m ³)	2,343.0	2,713.5	2,414.3	2,689.8	2,366.7	2,587.0
空氣含量(%)	1.49	2.27	1.53	2.16	1.61	2.21
氯離子含量(kg/m ³)	0.086	0.074	0.088	0.085	0.085	0.082

3.1.2 硬固混凝土性質-小型拌合抗壓強度

混凝土抗壓強度結果如圖 7 所示，由圖 7 可得知，兩種類型之混凝土抗壓強度皆可達到設計標準。若依工程施作角度觀察，鹼活化鋼渣混凝土於 3 天抗壓強度已超過設計強度的 70%，然而一般水泥混凝土的 3 天強度則僅於設計強度的 40%，雖 28 天強度皆可達設計強度要求，但由實驗結果可示，鹼活化鋼渣混凝土具有早期強度的發展優勢。對照兩組配比強度亦可得知，使用鹼活化鋼渣混凝土的配比於 3 天抗壓強度約為使用一般水泥混凝土配比的 149%、7 天約為 117%、28 天約為 104%。

由總體抗壓強度結果可知，使用鹼活化鋼渣混凝土配比強度高於一般水泥混凝土的配比，可判斷鹼活化還原渣及氧化渣的使用對混凝土強度具有較好的強度發展。

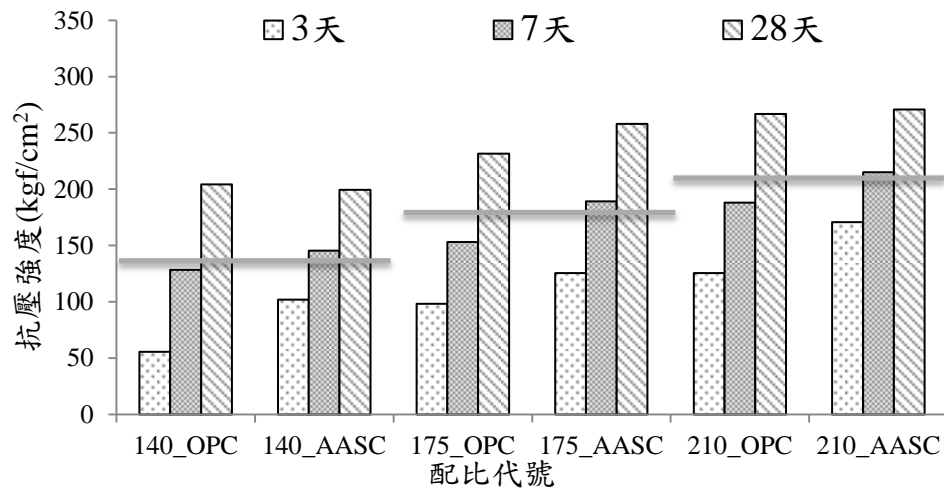


圖 7 小型拌合-混凝土抗壓強度試驗

3.2 實廠拌合試驗結果

3.2.1 新拌混凝土性質

在實廠拌合方面，經由混凝土配比修正後，使用鹼活化鋼渣混凝土坍度為 19.2-19.4cm，而使用一般水泥混凝土坍度為 18.1-18.6cm，顯示鹼活化鋼渣混凝土需經由配比修正而達到較適當的坍度。由表 3 試驗結果得知，鹼活化鋼渣混凝土於實廠拌合下亦具有較高之空氣含量 (2.13%-2.22%) 比之一般水泥混凝土 (1.66%-1.89%)，因此鹼活化鋼渣混凝土具有較佳之流動性及工作性。

表 3 實廠拌合-新拌混凝土性質

新拌混凝土試驗(實廠拌合)						
配比代號	140_OPC	140_AASC	175_OPC	175_AASC	210_OPC	210_AASC
坍度(cm)	18.1	19.4	18.6	19.4	18.1	19.2
單位重(kg/m ³)	2,361.9	2,676.4	2,426.3	2,657.5	2,378.0	2,646.3
空氣含量(%)	1.66	2.19	1.87	2.13	1.89	2.22
氯離子含量(kg/m ³)	0.082	0.075	0.075	0.073	0.074	0.080

3.2.2 硬固混凝土性質-實廠拌合抗壓強度

混凝土抗壓強度結果如圖 8 所示，由圖 8 可得知，鹼活化鋼渣混凝土於 3 天抗壓強度由小型拌合超過設計強度的 70% 提升至 90%，然而一般水泥混凝土的 3 天強度亦僅為設計強度的 40%，並由實廠拌合配方調整下，對照兩組配比強度亦可得知，使用鹼活化鋼渣混凝土的配比於 3 天抗壓強度約為使用一般水泥混凝土配比的 184%、7 天抗壓強度約為 127%、28 天強度活性指數約為 112%。由總體抗壓強度結果可知，鹼活化鋼渣混凝土於實廠拌合配方調整，其混凝土強度具有較好的強度發展。

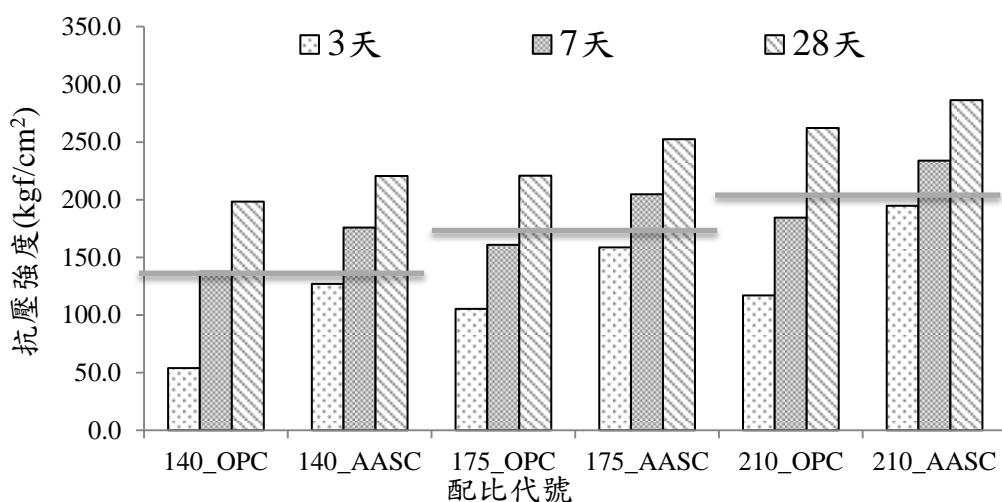


圖 8 實廠拌合-混凝土抗壓強度試驗

3.2.3 小型、實廠拌合與構件鑽心抗壓強度比較

圖 9-圖 11 為三種設計強度之小型拌合(AASC_T)、實廠拌合(AASC_F)與構件鑽心(AASC_Z)三個製作養護環境比較結果。由圖 9-圖 11 得知，鹼活化鋼渣混凝土相較於一般混凝土，鹼活化鋼渣混凝土實廠拌合之抗壓強度性能優於小型拌合試驗，有別於一般混凝土，小型拌合較易控制水量及配比，因此其抗壓強度通常優於實廠

拌合結果，顯示提高拌合能量，可提高鹼活化鋼渣混凝土抗壓強度性能。且由構件鑽心(AASC_Z)抗壓強度之結果可得知，其抗壓強度為濕養護試體之 93%-94%，較一般混凝土 85%~90%為高，顯示鹼活化鋼渣混凝土因具有早期強度發展迅速之特點，對其鹼活化鋼渣混凝土試體之養護環境影響較小，有助於混凝土之特性發展及使用。

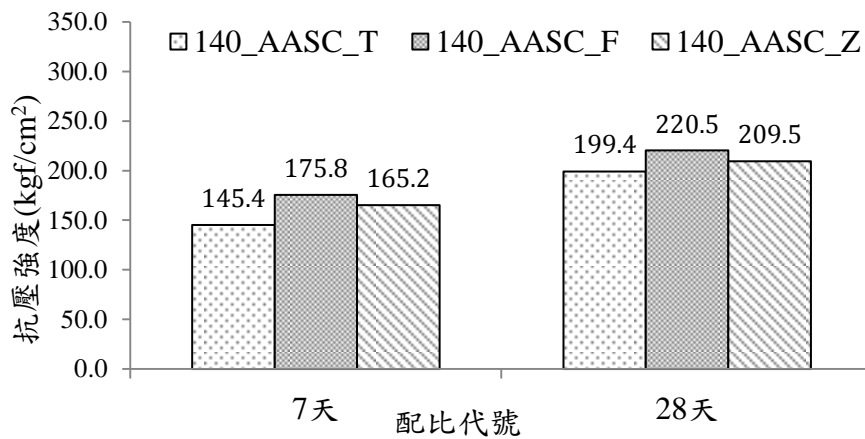


圖 9 小型、實廠拌合與構件鑽心抗壓強度比較(140 kgf/cm²)

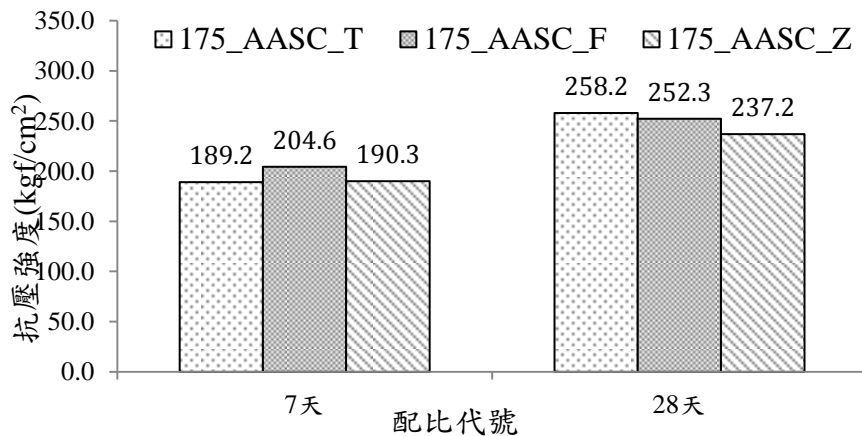


圖 10 小型、實廠拌合與構件鑽心抗壓強度比較(175 kgf/cm²)

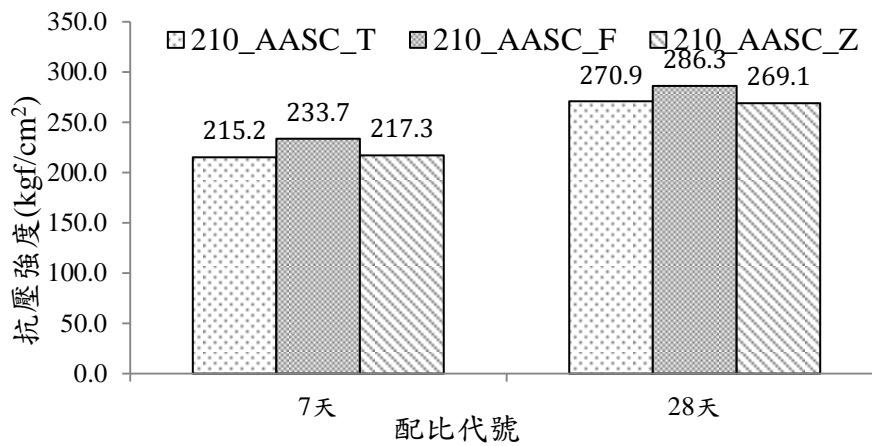


圖 11 小型、實廠拌合與構件鑽心抗壓強度比較(210 kgf/cm²)

3.3 鹼活化鋼渣混凝土體積穩定(耐久)性試驗

首先，將鹼活化鋼渣混凝土灌入 7.5cm x 7.5cm x 28.5cm 之標準混凝土角柱試體模具中，並將角柱試體進行：1.乾燥收縮試驗、2.鹼質與粒料反應試驗；探討鹼活化鋼渣混凝土之體積穩定(耐久)性試驗，並與一般水泥混凝土作比較。

3.3.1 鹼活化鋼渣混凝土乾燥收縮試驗

圖 12 為鹼活化鋼渣混凝土乾燥收縮情形，由結果得知鹼活化鋼渣混凝土角柱試體之乾縮量約為 0.09%，雖高於一般水泥混凝土之乾縮量 0.04%，但由試驗數據顯示，其體積變化幅度小而不致因乾縮產生混凝土結構危害。

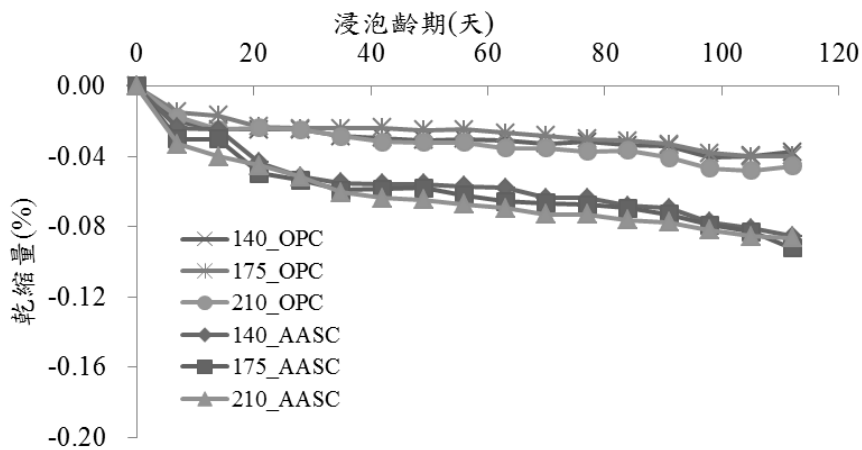


圖 12 鹼活化鋼渣混凝土角柱乾燥收縮試驗

3.3.2 鹼活化鋼渣混凝土鹼質與粒料反應試驗

本研究進行鹼活化鋼渣混凝土鹼質與粒料反應試驗，將混凝土角柱試體置於 $37.8 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 、相對溼度 100% 的環境中養治，試驗結果如圖 13，根據規定試體膨脹量在齡期 3 個月之膨脹量小於 0.05% 或 6 個月齡期之膨脹量小於 0.10% 時，則可視為無害，證明鹼活化鋼渣混凝土使用全爐渣材料作為混凝土骨材不會產生鹼質與粒料反應，即不產生混凝土膨脹情形。

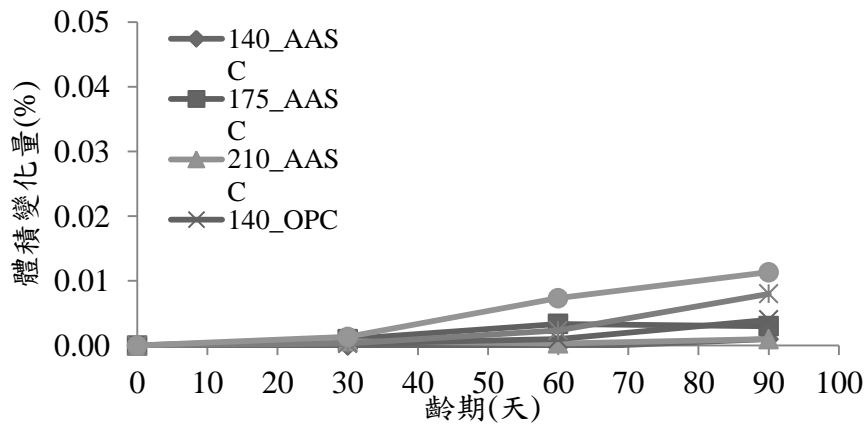


圖 13 鹼活化鋼渣混凝土角柱鹼質與粒料反應試驗

3.4 鹼活化鋼渣混凝土成效評估

3.4.1 新拌混凝土性質

- 1.流動性：由試驗結果得知在同一水膠比下使用鹼活化還原渣及氧化渣粒料將大幅提升其流動性，其因素初步判定為本試驗之拌合流程皆是以面乾內飽和之粒料進行拌合，由於氧化渣粒料之吸水率較高，外觀之長徑較為接近且形狀相似，因而增加其流動性；並且使用鹼活化劑及爐渣之因素，故此鹼活化鋼渣混凝土之流動性相較一般水泥混凝土流動性佳。
- 2.空氣含量：鹼活化鋼渣混凝土具有較高之空氣含量(2.16%-2.27%)比之一般水泥混凝土(1.49%-1.61%)，空氣含量相當於漿體之一部分，因含氣量越高，則漿體量比潤滑漿量大，故可提高混凝土之流動性質並減少析離，因此鹼活化鋼渣混凝土具有較佳之流動性及施工特性。
- 3.氯離子含量符合標準：氯離子含量皆符合 CNS 標準，小於規範值(0.3 kg/m³)內。
- 4.單位重：鹼活化鋼渣混凝土之單位重達 2,650-2,750 kg/m³，相較於一般水泥混凝土之 2,300-2,350 kg/m³，重量可提升 300-400 kg/m³，有利於發展重型混凝土構件，如水岸護坡設施及護床工等防災功能性產品。

3.4.2 硬固混凝土性質

- 1.鹼活化鋼渣混凝土，3 天即可達設計強度之 90% 以上，一般水泥混凝土 3 天強度僅約達設計強度 40%。因此鹼活化鋼渣混凝土可屬早強型混凝土材料，適合應用於緊急搶災及修護功能材料。而且，鹼活化鋼渣混凝土預鑄構件之鑽心試體(空養)抗壓強度結果發現其強度僅略低於圓柱試體抗壓強度(恆溫水養治)，其抗壓強度為濕養護試體之 93%-94%，較一般混凝土 85%~90% 為高，顯示鹼活化鋼渣混凝土除了具有早期強度發展迅速之特點，對其鹼活化鋼渣混凝土試體之養護環境影響較小，有助於混凝土之特性發展及不因環境條件限制所影響，顯示鹼活化鋼渣混凝土具良好的耐候性。
- 2.一般混凝土拌合通常因小型拌合水量及配比控制較精準，其抗壓強度結果優於實廠拌合，然而鹼活化鋼渣混凝土卻相反，實廠拌合之強度性能優於小型拌合試驗。顯示提高拌合能量，可提高鹼活化鋼渣混凝土強度性能。

- 3.由乾縮試驗結果顯示，鹼活化鋼渣混凝土其體積變化幅度小，不致因乾縮而產生混凝土結構危害。另外，由快速砂漿棒試驗、鹼質與粒料反應試驗可知鹼活化具長期穩定性佳，且由抗硫酸侵蝕試驗結果發現鹼活化鋼渣混凝土具耐久性。

四、結 論

- 1.鹼活化還原渣混凝土配比設計，經由小型拌合試驗、實廠拌合試驗及預鑄混凝土構件鑽心抗壓試驗，並依據新拌混凝土及硬固混凝土性質，確認鹼活化鋼渣混凝土配比設計成效，結果證實鹼活化鋼渣混凝土具量產可行性。
- 2.鹼活化鋼渣混凝土與一般混凝土比較，具(1)高單位重；(2)早強型混凝土材料；(3)耐候性佳；(4)長期體積穩定性；(5)抗硫酸鹽侵蝕(耐久性)等功能，有利於發展緊急搶修工程材料，以及護岸、護床等防災型混凝土構件。
- 3.結合鹼活化技術及電弧爐還原渣、氧化渣等材料，產製鹼活化鋼渣混凝土，除了可有效解決還原渣健性問題，更可提高混凝土材料的工程特性。提供鋼鐵業及混凝土製品業，兼具永續發展與節能減碳的創新技術與創新產品。

致 謝

本計承蒙經濟部技術處「小型企業創新研發計畫」(SBIR,計畫編號 1Z1021692)之經費補助，中央大學黃偉慶教授、聯合大學王偉哲教授及輔英科大施百鴻教授協助相關研究，使本計畫得以順利進行，謹此誌謝。

參考文獻

- 1.行政院環保署，事業廢棄物申報及管理資訊系統，2014。
- 2.混凝土科技，第八卷，第四期，2014。
- 3.吳明富、黃雅蘭、陳崇智、呂東璇，以電弧爐還原渣作為鹼活化膠結材之資源化應用，環保技術與工程實務研討會論文集，2014。

84 鹼活化鋼渣混凝土量產技術之開發與研究

- 4.吳明富，還原渣-高爐石作為混合膠結材料之應用，國立中央大學土木工程學系碩士論文，2013。
- 5.Shi, C., Krivenko, P. V., Roy, D. “ Alkali-activated cements and concretes.” Taylor & Francis, New York. , 2006.
- 6.陳崇智、吳明富、黃雅蘭、呂東璇，電弧爐氧化渣產製優質粒料之研究，環保技術與工程實務研討會論文集，2014。

本期專題：資源化技術

專題編輯委員

張添晉

學歷

國立中央大學土木工程博士

經歷

國立台北工專土木科副教授兼科主任

國立台北技術學院土木系副教授兼系主任

國立台北科技大學土木系/環境所副教授、教授

現任

國立臺北科技大學環境工程與管理研究所教授

兼工程學院院長

循環型環境研究中心主任

郭甦隆

學歷

國立台灣科技大學化學工程博士

經歷

中國人造纖維公司

中國技術服務社能源服務中心

中國技術服務社污染防治中心

中鼎工程公司環工部

現任

國立勤益科技大學化工與材料工程系所教授

專題介紹

臺灣地狹人稠，加上天然資源有限，如何將工業生產所產出的廢棄物回收成為資源化產物，為重要的策略與技術提昇方向。在工業生產過程中，廢棄物的處理經費占及大比例，若未妥善處理，其所造成環境損害將頗為嚴重。而在資源化技術不斷提升並納入物質流與生命週期的觀後念，廢棄物之處理從早期的搖籃到墳墓(Cradle to Grave)提升到搖籃到搖籃(Cradle to Cradle)的資源再生、循環利用方式，進而減少最終廢棄物的處理量，以期建構資源永續循環社會。

本期專題為「資源化技術」，邀請經濟部工業局顏鳳旗科長針對稀貴金屬回收現況與發展策略提供方向，並針對稀有金屬-銻物質流分析與回收技術提供分享；中原大學游勝傑教授團隊亦針對支撐式液膜回收廢液晶面板銻離子提供研究資料；宜蘭大學林凱隆教授分享 TFT-LCD 廢玻璃、集塵灰與黏土共混燒製環保紅磚之研究與現況資料；成功大學陳偉聖教授就廢光纖纜線鍍資源再生技術提供其研究資料；台北科技大學陳志恆教授分享薄膜分離技術於資源回收之應用提供國內外相關技術與應用案例。

本期專題透過邀請專家學者撰寫相關專文，藉以拋磚引玉，期能引起研究之風潮，提供國內資源化技術之參考。專題作者慨賜宏文，提供寶貴經驗，特此致謝。

