

以爐石與飛灰為膠結材料之配比參數對鹼激發砂漿抗壓強度之影響

高子涵¹ 王柏鈞¹ 郭華諭¹ 蔣欣宸¹ 潘煌鏗²

¹國立高雄科技大學 土木工程系, kaotzuhan199@gmail.com

²國立高雄科技大學 土木工程系 教授, pam@nkust.edu.tw

摘要

本研究旨在探討鹼激發砂漿中爐石與飛灰比例及鹼當量對抗壓強度與新拌性質之影響，期望尋求低碳、環保之建材替代傳統水泥。試驗採用高爐石粉與 F 級飛灰為膠結材料，搭配不同種類與濃度的鹼激發劑，並調整鹼當量與爐石／飛灰比例進行性能分析。結果顯示，爐石比例越高，抗壓強度表現越佳；飛灰比例高則有助於改善新拌砂漿之工作性。鹼當量對強度亦具顯著影響，當鹼當量為 5% 時早期強度最佳，而提高至 7% 則可提升 28 天後期強度。當飛灰比例達 75% 時，鹼性物質反應不完全，導致表面結晶並降低強度。研究結果顯示，適當調整配比參數可有效提升砂漿性能，並有助於混凝土材料永續發展之應用。

關鍵字: 鹼激發砂漿，爐石粉，飛灰，鹼當量，抗壓強度

一、前言

隨著全球對永續發展與低碳建材的重視，傳統水泥因高碳排放逐漸面臨挑戰 [1,2]。在此背景下，鹼激發材料 (Alkali-activated Materials, AAMs) 因兼具低碳排放、高耐久性與良好力學性能，被視為具潛力的替代材料 [3]。AAMs 主要利用高爐石粉 (GGBS)、飛灰 (FA)、偏高嶺土等工業副產物，經氫氧化鈉、矽酸鈉等鹼激發劑作用，使矽酸鹽與鋁酸鹽溶解並縮合，形成 N-A-S-H 或 C-(A)-S-H 凝膠 [3, 4]。此類凝膠能賦予材料良好強度與耐久性，並降低約 40%–80% 的二氧化碳排放，展現抗硫酸鹽侵蝕、抗氯離子滲透與耐高溫特性，符合循環經濟需求 [5]。

文獻指出，高爐石基 AAMs 反應活性高，早期強度發展快，28 天強度甚至可超越普通水泥 [6]；飛灰基 AAMs 則早期強度不足，但可改善和易性並具長期性能潛力 [7]。此外，鹼當量對反應產物與強度表現影響顯著：適度提升可促進反應並增強性能，但過高可能造成鹼殘留與表面結晶，反而不利。由此可見，如何透過爐石與飛灰比例搭配合宜鹼當量，是兼顧早期強度與長期耐久的重要課題。本研究選用 120 級高爐石粉與 F 級飛灰混合，以探討不同比例及鹼當量對砂漿性能之影響，期望同時滿足力學表現、施工性與環境效益。

二、實驗步驟

本研究選用 120 級高爐石粉 (Ground Granulated Blastfurnace Slag, GGBS) 與 F 級飛灰 (Fly Ash, FA) 作為鹼激發膠結材料，並以 氫氧化鈉 (NaOH) 溶液 作為鹼激發劑。試驗配比設計中，水膠比 (w/b) 固定為 0.45，膠砂比 (B/S) 設定為 0.5。爐石與飛灰的取代比例設定為 100%、75%、50% 與 25%，並分別搭配不同 鹼當量 (N/B = 3%、5%、7%) 進行配比設計，如表 1 所示。

首先，將氫氧化鈉顆粒溶解於水中製備成鹼性水溶液，並於室溫下靜置 24 h 使溶液冷卻至穩定狀態。之後，依試驗配比將高爐石粉、飛灰與砂置入拌合機中，以低速乾拌 1 min 以確保粉體混合均勻。隨後分兩次加入鹼性水溶液：先將約 2/3 溶液倒入拌合機中，以低速攪拌 2 min，再將剩餘 1/3 溶液倒入並持續低速攪拌 6 min。拌合過程中，使用刮刀將附著於攪拌鍋壁的粉料刮下，以確保漿體均勻混合。拌合完成後，立即將漿體倒入尺寸為 5 × 5 × 5 cm³ 的立方體模具中，靜置 24 h 後進行脫模。脫模後的

試體置於室溫環境中養護，待達到規定齡期後，進行抗壓強度等破壞性試驗。

本研究之抗壓強度試驗係依據 ASTM C109/C109M 標準試驗方法進行。試體為尺寸 $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ 之立方體試件，於脫模後置於室溫養護，並於 1、3、7、14 與 28 天齡期時進行抗壓強度測試。試驗使用壓力試驗機 (Universal Testing Machine, UTM)，加載速率控制於 $0.9 \pm 0.2 \text{ kN/s}$ ，直至試體破壞為止，並記錄其最大荷重。

三、結果與討論

3.1 鹼當量對抗壓強度之影響

圖 1 顯示不同鹼當量 (3%、5%、7%) 對各配比膠結材試體抗壓強度的影響。由圖 (a) 可知，在鹼當量 3% 時，僅含 100% 爐石的 AN3 試體具備明顯的強度發展，28 天齡期可達約 20 MPa；然而隨著飛灰取代率增加 (BN3、CN3、DN3)，其強度逐漸降低，尤其 DN3 幾乎無強度生成，顯示低鹼當量不足以有效活化高比例飛灰。進一步觀察圖 (b)，當鹼當量提升至 5% 時，所有試體的抗壓強度均顯著提高，其中 AN5 於 28 天可達 33 MPa，BN5 亦可達 25 MPa，而 CN5 與 DN5 則分別約為 18 MPa 與 12 MPa。圖 (c) 則顯示在鹼當量 7% 下，抗壓強度提升最為明顯，AN7 於 28 天齡期可接近 38 MPa，BN7 約 30 MPa，CN7 及 DN7 亦分別達到 22 MPa 及 15 MPa。提高鹼當量有助於提升膠結材反應程度，促進早齡期強度發展，且爐石含量越高者，其強度表現越佳 [1]。

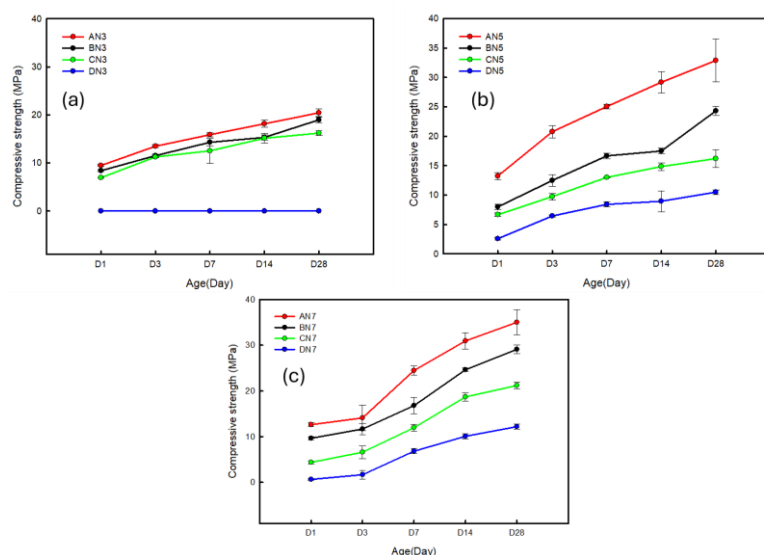


圖 1 鹼當量對抗壓強度的影響

3.2 爐石及飛灰含量對抗壓強度之影響

圖 2 顯示不同膠結材比例在各鹼當量條件下的抗壓強度變化。由圖 2(a) 可知，AN 組 (100% 爐石) 於不同鹼當量下皆有良好的強度發展，特別是在 7% 鹼當量下，28 天齡期強度可達約 37 MPa，顯示爐石在鹼激發下反應活性極高。圖 2(b) 為 BN 組 (爐石 75%、飛灰 25%)，其強度略低於 AN 組，但隨鹼當量增加仍有顯著提升，28 天可達約 28 MPa。圖 2(c) 為 CN 組 (爐石 50%、飛灰 50%)，其強度顯著低於 AN 及 BN，儘管在 7% 鹼當量下仍可提升至約 18 MPa，但相較前者差距明顯。圖 2(d) 為 DN 組 (爐石 25%、飛灰 75%)，其強度普遍偏低，特別是 3% 鹼當量時幾乎無強度發展；即便在 7% 鹼當量下，28 天齡期強度亦僅約 11 MPa。爐石含量愈高者，在相同鹼當量條件下其抗壓強度發展愈佳，顯示飛灰在早齡期反應性有限，需較高鹼當量或長齡期養護方能有效發揮活性。[1]

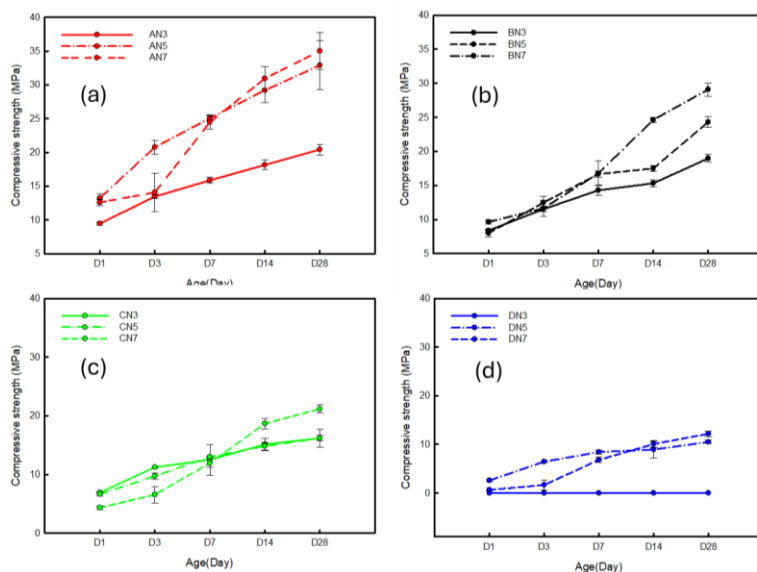


圖 2 爐石及飛灰含量對鹼激發砂漿抗壓強度的影響

3.3 試體表面結晶

圖 3 顯示爐石含量 25%、飛灰含量 75% 試體於 3 天齡期的外觀變化。(a) 為鹼當量 3% 之 DN3 試體，可觀察到表面顆粒鬆散，缺乏明顯膠結，顯示其反應程度不足，與前述抗壓強度測試結果一致，即 DN3 於 28 天內均無強度發展。(b) 為鹼當量 5% 之 DN5 試體，表面略顯致密，局部區域可見不完全反應的顆粒，但整體結構已較 DN3 緊密，對應到其抗壓強度已開始逐漸發展。(c) 為鹼當量 7% 之 DN7 試體，外觀上較為均勻致密，表面孔隙明顯減少，顯示較高鹼當量能有效提升爐石及飛灰的反應程度，促進膠結結構形成。[2]

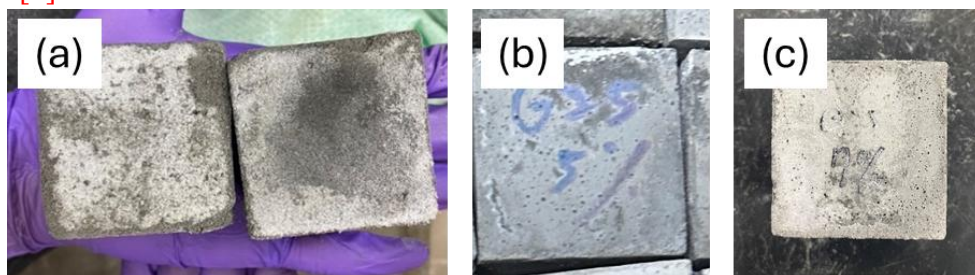


圖 3、爐石含量佔膠結材 25%、飛灰佔膠結材 75%，第 3 天試體外觀，(a) DN3, (b) DN5 及 (c) DN7

3.4 各配比試體外觀比較

圖 4 顯示不同膠結材配比 (A - D) 與不同鹼當量 (3%、5%、7%) 下試體的外觀。由觀察結果可發現，A 組 (100% 爐石) 於各鹼當量下皆形成均勻致密的表面，特別是在 7% 鹼當量時 (A-N7)，試體外觀最為完整平滑。B 組 (爐石 75%、飛灰 25%) 同樣具有良好膠結性，但相較 A 組表面略顯粗糙。C 組 (爐石 50%、飛灰 50%) 的試體則可見部分未完全反應的顆粒與表面斑駁現象，顯示反應程度不足。D 組 (爐石 25%、飛灰 75%) 外觀最差，尤其在 3% 鹼當量 (D-N3) 下，試體表面鬆散並伴隨明顯孔隙與破損；即便鹼當量提高至 7% (D-N7)，其外觀亦不如 A、B 組致密。綜合結果說明，爐石含量越高，試體外觀越完整致密；反之飛灰比例越高，外觀缺陷愈多，且需較高鹼當量才能改善其反應性。

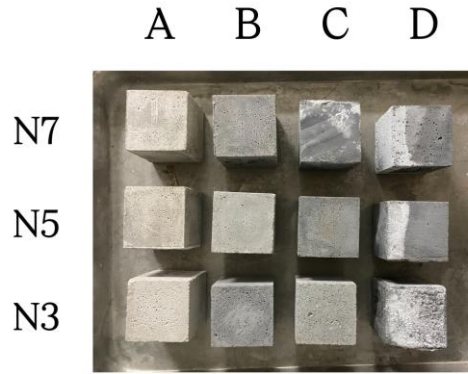


圖 4 各配比的試體外觀

四、結論

本研究探討不同爐石、飛灰取代比例及鹼當量對鹼激發砂漿性能之影響。結果顯示，抗壓強度均隨齡期上升，且鹼當量為關鍵因素。當鹼當量由 3% 增至 7% 時，強度明顯提升；其中 100% 爐石配比於 28 天可達約 38 MPa，表現最佳。相反地，高飛灰組在低鹼條件下幾乎無強度，且表面鬆散，但在 7% 鹼當量下強度可提升至約 15 MPa，表面亦較致密。整體而言，高爐石與高鹼組展現緻密平整的外觀與良好強度，而高飛灰需搭配較高鹼當量或其他活化方式，方能兼顧環境效益與力學性能。

五、致謝

本研究感謝中華民國國家科學及技術委員會「專題研究計畫」(NSTC 113-2221-E-992 -031) 支持。

參考文獻

- [1] Hu, X., Shi, C., Shi, Z., and Zhang, L., "Compressive strength, pore structure and chloride transport properties of alkali-activated slag/fly ash mortars," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 104, 103392, 2019.
- [2] 謝柏泓，「鹼活化材料之力學性能實驗研究」，碩士論文，國立陽明交通大學，2022。
- [3] 內政部建築研究所，「鹼活化爐石混凝土應用於營建材料之研究」，技術報告，台北，2016。
- [4] 公共工程委員會，「鹼活化混凝土相關規範研擬報告」，台北，2005。
- [5] 王國璽，「飛灰增進混凝土構造耐久性之研究」，*混凝土工程學刊*，Vol. 13, No. 2, pp. 1-15, 2001。
- [6] 林炳炎，「飛灰、矽灰、高爐爐石用在混凝土中」，研討會論文集，台北，1993。
- [7] Chen, K., Li, Z., Zhu, Z., Zhang, S., Li, S., and Xia, J., "An intelligent hybrid machine learning framework for compressive strength prediction of alkali-activated binders based on fly ash characteristics," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 154, 110971, 2025.
- [8] Ma, Y., Zhang, C., Lin, X., Ye, Y., Ye, X., and Ji, T., "Bond between alkali-activated steel slag/fly ash lightweight mortar and concrete substrates: Strength and microscopic interactions," *Construction and Building Materials*, Vol. 449, 138401, 2024.