

## 鈹酸鉛陶瓷感測器應用於鹼激發砂漿強度監測

蔣欣宸<sup>1</sup> 鄭祐紳<sup>2</sup> 潘煌錕<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立高雄科技大學土木工程學系 碩士生, [F113141115@nkust.edu.tw](mailto:F113141115@nkust.edu.tw)

<sup>2</sup> 國立高雄科技大學土木工程學系 博士生, [I113141102@nkust.edu.tw](mailto:I113141102@nkust.edu.tw)

<sup>3</sup> 國立高雄科技大學土木工程學系 教授, [pam@nkust.edu.tw](mailto:pam@nkust.edu.tw)

### 摘要

隨著全球對環境永續發展的日益重視，傳統水泥產業因其高碳排的特性，面臨轉型的需求迫切。為了有效降低碳足跡並資源循環再利用，積極開發替代水泥材料已成為當前的重點課題。在眾多解決方案中，鹼激發材料（alkali-activated Materials, AAMs）因其卓越的環保效益和早期強度等優異性質，近年來技術發展突飛猛進，展現出優異的前景。本研究利用鈹酸鉛(lead Zirconate Titanate, PZT)壓電陶瓷作為感測器，配合機電阻抗法(electromechanical impedance, EMI)來評估鹼激發砂漿抗壓強度，以飛灰及爐石取代水泥，鹼激發砂漿的爐石與飛灰的重量比為 75:25，鹼當量為 7%，鹼液為氫氧化鈉水溶液。依齡期量測鹼激發砂漿的阻抗頻譜並於第 1、3、7、14、28 天進行抗壓試驗，找出鹼激發砂漿強度監測的電導波峰值以及有效頻率段後，計算電導均方根偏差(root mean-square deviation, RMSD)再與抗壓強度進行分析。結果顯示，PZT 感測器的電導曲線具有明顯的波峰、波谷，而適合監測鹼激發材料的共同適用頻率位在第二、三、四波峰，且在有效頻率段內的電導值隨齡期增加而降低，抗壓強度越高電導的 RMSD 值越大，強度隨齡期變化的趨勢一致。發現使用電導峰值監測鹼激發砂漿強度的  $R^2$  會較使用 RMSD 值的方法低，會造成使用電導峰值進行監測時，產生的誤差較大。提出電導 RMSD 與鹼激發砂漿強度的迴歸方程式，可用於鹼激發砂漿強度監測。

**關鍵字：**結構健康監測，鹼激發砂漿強度，機電阻抗法，PZT

### 一、前言

全球氣候變遷與環境永續已成為建築材料發展的重要議題。傳統波特蘭水泥（Portland cement）在製造過程中會釋放大量二氧化碳，其碳排放量約佔全球總排放的 7 - 8% [1]。因此，尋求低碳替代材料以取代部分水泥的使用，對達成永續建築目標具有關鍵意義。鹼激發材料（alkali-activated materials, AAMs）利用飛灰(fly ash, FA)、爐石(ground granulated blast-furnace slag, GGBFS)等工業副產物，透過鹼性活化反應形成鈉矽酸鹽凝膠（N-A-S-H 或 C-A-S-H），不僅可有效降低碳排，亦能展現良好的力學性能與耐久性 [2-5]。

AAMs 的硬化過程受活化劑濃度、固液比與養護條件影響，其強度發展行為複雜且難以透過傳統破壞性試驗即時掌握。近年來，壓電感測技術結合機電阻抗法(electromechanical impedance, EMI)被廣泛應用於混凝土與水泥基材料之健康監測中，具有即時、非破壞及高靈敏度的優勢 [6-8]。因此，將 EMI 技術應用於 AAMs 強度監測，可望為綠色膠結材料的品質評估提供新途徑。

本研究使用鈹酸鉛(lead zirconate titanate, PZT)壓電陶瓷製成感測器埋入鹼激發砂漿試體中，並利用均方根偏差(root mean-square deviation, RMSD)比較電導與抗壓強度關係找出適用的觀測頻率以進行強度監測。

## 二、試驗配比與方法

本研究以 GGBFS 與 FA 作為膠結材，爐灰比為 75:25。鹼激發劑選用氫氧化鈉（NaOH）水溶液，鹼當量為 7%，膠砂比為 0.5。拌合後之砂漿試體尺寸為  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ，置於溫度  $21 \pm 1^\circ\text{C}$ ；相對濕度  $60 \pm 5\%$  的環境中養護至指定齡期。

PZT 感測器封裝後埋設於砂漿中心，使用阻抗分析儀量測 20 - 2000 kHz 範圍內之機電電導頻譜。於齡期第 1、3、7、14、28 天量測電導頻譜，並同步進行抗壓強度試驗。以 RMSD 分析各齡期電導曲線差異，探討電導變化與抗壓強度之關聯性。RMSD 計算公式如下：

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_i - G_i^1)^2}{\sum_{i=1}^n (G_i^1)^2}} \quad (1)$$

其中  $G_i$  = 不同齡期所量測之鹼激發砂漿試體有效頻率段電導值， $G_i^1$  = 鹼激發砂漿試體齡期為 12 小時的有效頻率段電導值， $n$  = 有效頻率段。

## 三、結果與討論

使用阻抗分析儀量測試體不同時間的電導頻譜，發現電導頻譜有明顯峰值如圖 1，在特定頻率段有逐漸下降且無交錯、重疊等現象的趨勢，將感測器在此頻率段稱為有效頻率段。同時將第二、三、四波峰的電導最大值找出，並與鹼激發砂漿強度進行比較，透過線性迴歸找出其關係式，結果如表 1. 以及圖 2. 所示，其中  $f'c$  為抗壓強度強度， $G_p$  為電導峰值。

將有效頻率段中的電導值通過 RMSD 計算，得到電導 RMSD 值後與鹼激發砂漿強度進行迴歸分析，結果如表 2. 以及圖 3. 所示，其中  $G_R$  為電導 RMSD 值。可以發現使用電導 RMSD 值進行鹼激發砂漿強度監測的  $R^2$  值較使用波峰值進行監測大，代表了後續使用波峰值進行監測會有較大的相關性。

表 1. 電導波峰值與鹼激發砂漿強度之迴歸方程式

| 波峰位置            | 迴歸方程式                       | $R^2$  |
|-----------------|-----------------------------|--------|
| 2 <sup>nd</sup> | $f'c = 6.7588 + 1.2004G_p$  | 0.4757 |
| 3 <sup>rd</sup> | $f'c = 5.7079 + 1.0186G_p$  | 0.5056 |
| 4 <sup>th</sup> | $f'c = -8.3432 + 2.0847G_p$ | 0.6905 |

表 2. 電導 RMSD 值與鹼激發砂漿強度之迴歸方程式

| 波峰位置            | 迴歸方程式                        | $R^2$  |
|-----------------|------------------------------|--------|
| 2 <sup>nd</sup> | $f'c = 10.9109 + 11.6976G_R$ | 0.9249 |
| 3 <sup>rd</sup> | $f'c = 12.2439 + 12.0069G_R$ | 0.8307 |
| 4 <sup>th</sup> | $f'c = 10.6937 + 31.2696G_R$ | 0.8699 |

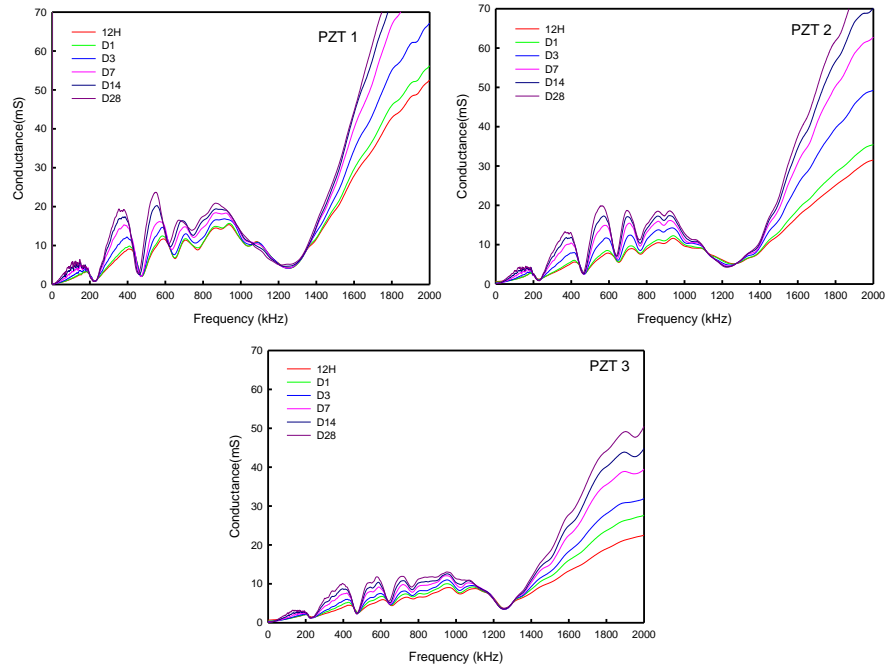


圖 1 不同齡期之機電電導頻譜

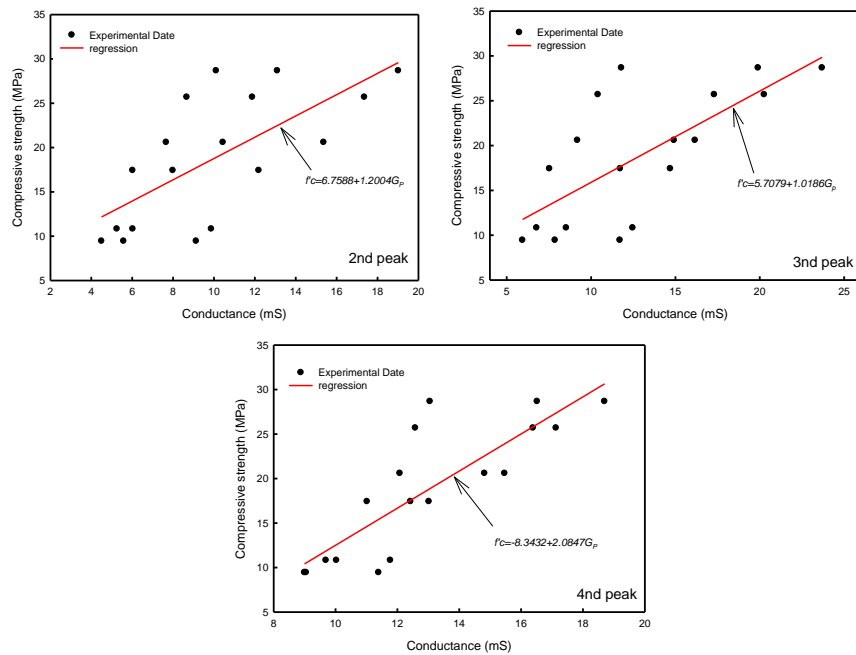
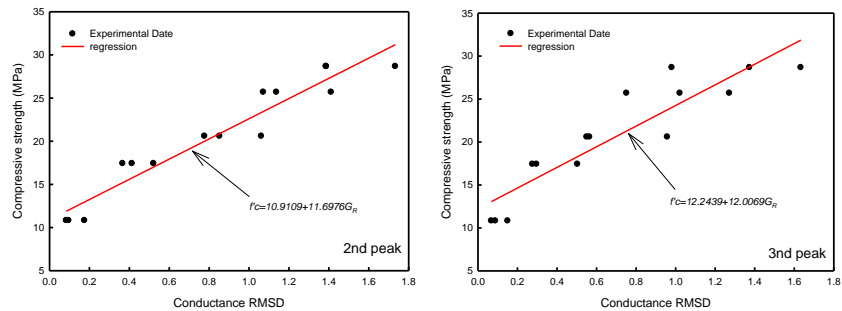


圖 2 電導峰值與抗壓強度關係



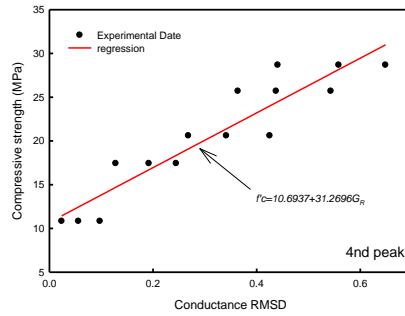


圖 3 電導 RMSD 與抗壓強度關係

### 三、結論與建議

本研究將鉛鈦酸鉛壓電感測器埋入鹼激發砂漿內，並在第 12 小時、1 天、3 天、7 天、14 天、28 天進行破壞試驗及電導頻量測，透過量測各齡期的電導變化，分析其電導與齡期之關係，以找出適合進行強度監測的頻率範圍。接著計算該頻率範圍內的電導 RMSD 值，並以迴歸分析建立強度與電導 RMSD 之對應關係曲線。本研究結果如下：

1. 使用電導 RMSD 值進行鹼激發砂漿強度監測的  $R^2$  值較使用波峰值進行監測小，後續使用電導 RMSD 進行監測會有較大的相關性。
2. 通過迴歸分析得出電導波峰值與強度之迴歸方程式為  $f'c = a + bG_p$ ，電導 RMSD 與抗壓強度之迴歸方程式為  $f'c = a + bG_R$ ，可作為計算鹼激發砂漿抗壓強度之依據。
3. 感測器監測鹼激發砂漿電導頻譜有明顯峰值，且適合監測鹼激發材料的共同適用頻率位在第二、三、四波峰。

### 參考文獻

- [1] Provis, J. L., van Deventer, and J. S. J. (2014). Alkali activated materials: State-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM. Springer.
- [2] Barbhuiya, S., Kanavaris, F., Das, B. B., and Idrees, M. (2024). Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges and pathways for sustainable development. *Journal of building engineering*, 86, 108861.
- [3] Deb, P. S., Nath, P., and Sarker, P. K. (2014). The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials & Design (1980-2015)*, 62, 32-39.
- [4] Tang, Z., Li, W., Hu, Y., Zhou, J. L., and Tam, V. W. (2019). Review on designs and properties of multifunctional alkali-activated materials (AAMs). *Construction and Building Materials*, 200, 474-489.
- [5] Sun, Z., Li, X., Gan, M., Ji, Z., Fan, X., Tang, Q., and Xing, J. (2025). Efficient and eco-friendly treatment of municipal solid waste incineration fly ash and municipal sludge for alkali activated material. *Cleaner Engineering and Technology*, 24, 100867.
- [6] Al Agha, W., Pal, S., and Dev, N. (2023). Challenges for structural health monitoring of concrete curing using piezoelectric sensor and electromechanical impedance (EMI) technique: A critical review. *Materials Today: Proceedings*.
- [7] Tawie, R., and Lee, H. K. (2010). Monitoring the strength development in concrete by EMI sensing technique. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1746-1753.
- [8] Su, Y. F., Han, G., Amran, A., Nantung, T., and Lu, N. (2019). Instantaneous monitoring the early age properties of cementitious materials using PZT-based electromechanical impedance (EMI) technique. *Construction and Building Materials*, 225, 340-347.