

「2022 中華民國營建工程學會第二十屆營建產業永續發展研討會」

不同矽質摻料對單劑型爐石基無機聚合物性質之影響

*施正元(Jeng-Ywan Shih) 蕭承宇(Cheng-Yu Xiao) 張大鵬(Ta-Peng Chang)
明志科技大學化學工程系 國立台灣科技大學營建工程系 國立台灣科技大學營建工程系

摘要

本研究探討使用碳酸鈉作為緩凝劑體積取代由偏矽酸鈉作為鹼激發劑之單劑型爐石基無機聚合物，以解決偏矽酸鈉所造成凝結時間過短之問題。由於使用碳酸鈉作為激發劑有降低抗壓強度之現象，故本試驗規劃使用不同矽質材料(稻殼灰、矽灰、玻璃粉)體積取代爐石粉以改善抗壓強度。試驗變數為鹼激發劑比例(10%、12%、14%、16%)、碳酸鈉取代率(0%、25%、50%、75%、100%)及不同矽質材料取代率(0%、5%、10%、15%、20%)；性能指標包含新拌性質(凝結時間、坍流度、水化熱)及硬固性質(抗壓強度、長度變化率、熱傳導係數)。試驗結果顯示：(1)使用稻殼灰取代部分爐石將增加漿體凝結時間，稻殼灰之取代有助於提升早期與晚期強度，其中以稻殼灰取代量 10%之組別較為明顯；隨著稻殼灰取代率增加，漿體長度變化率下降，具有改善漿體體積穩定性之效果。(2)使用矽灰取代爐石粉具有延長漿體凝結時間之效果；抗壓強度方面，僅在取代率 5%時有助於提高早期強度，其餘取代量及齡期皆無發現提升之現象；漿體體積穩定性則是各比例皆能減少長度變化率，其中取代率 5%時最佳，隨著矽灰取代率增加，漿體長度變化率再次增加，建議取代率為 5%。(3)玻璃粉取代爐石之漿體初凝時間除取代率 20%外，其餘取代率之凝結時間皆與 0%時相近；28 天抗壓強度僅在玻璃粉取代率為 10%時具有增強之效果；玻璃粉對於長度變化率之改善效果較不明顯。

關鍵字：稻殼灰、矽灰、玻璃粉、單劑型無機聚合物

Effects of Various Siliceous Admixtures on Properties of One-Part Slag based Geopolymer

Abstract

This study explores the effects of using sodium carbonate as a retarder to replace sodium silicate as an alkali activator in one-part ground granulated blast-furnace slag (GGBFS) based geopolymer to alleviate the issue of its quick setting caused by using sodium silicate. Because sodium carbonate being an activator may reduce the compressive strength of paste, this study using siliceous materials (rice husk ash, silica fume, glass powder) to partly replace GGBFS to increase compressive strength. The

main variables are alkali activator ratio (10%, 12%, 14%, 16%), sodium silicate replacement percentage (0%, 25%, 50%, 75%, 100%), and various siliceous material replacement percentage (0%, 5%, 10%, 15%, 20%); performance property including fresh properties (setting time, flowability, hydration heat) and harden (compressive strength, shrinkage, thermal conductivity). The experiment results show: (1) Using rice husk ash to replace some slag can increase setting time but decrease flowability, and it can increase the early and later strength of paste. 10% replacement has an obvious effect. For volume stability, using rice husk ash can decrease the shrinkage. (2) For silica fume's replacement, silica fume can increase the setting but decrease the flowability, just 5% replacement can increase the early strength, but there is no positive effect for other replacement and other ages. Silica fume also can decrease the shrinkage, and 5% is the best replacement, because over 5% will cause the shrinkage increase again. (3) Except 20% replacement of glass powder, the initial setting time of glass powder's replacement is like 0% replacement. Glass powder cannot increase the early strength of paste, but 10% has a little bit positive effect for age 28 days. There is no observed improvement for shrinkage by using glass powder.

Keywords: *rice husk ash, silica fume, glass powder, one-part geopolymer*

一、前言

單劑型鹼激發材料為一種新興的無機聚合物製作方式，與傳統兩劑型之製作方式相比，單劑型較為安全且方便[1]，在於傳統製作方式為使用鹼性溶液(NaOH溶液、水玻璃溶液等)與基材混合反應，而鹼性溶液大部分為強鹼性，對於未來運用於工程之運輸及施工可能具有一定的危險性；然而，單劑型為使用固體之鹼性激發劑(氧化鈣、片鹼、偏矽酸鈉等)先與基材乾拌後再加水混合製成膠結材，與兩劑型相比，減少了處理大量鹼性溶液相關的職業健康危害和安全疑慮[2]，此成為近年來相繼研究的主題。稻米作為亞洲之主要糧食作物，稻米經由加工自水稻取出後，所留下之稻殼質量輕、體積大，且不易處理；然而，燃燒後所殘留之稻殼灰為天然作物中二氧化矽含量最高之副產品，已有部分運用於土壤改質及園藝等方面；近年來也有許多研究人員將稻殼灰運用於高性能混凝土及無機聚合物等建築材料，由於稻殼灰具有產生膠結材料之能力，故其相較於水泥具有減少二氧化碳排放及廢棄物再利用等優勢[3]。矽灰為電弧爐生產矽元素或鐵-矽合金之工業副產品，其顆粒細小，由無定形多晶形式的二氧化矽組成，其二氧化矽含量高於一般水泥，為典型且廣泛運用之卜作嵐材料[4]，由於矽灰之價格較貴，故大多只用於作為礦物摻料，部分取代水泥以提高性能。另全世界每年產生數百萬噸的玻璃廢料，部分細磨成粉運用於無機聚合物之製成[5, 6]，顯示玻璃粉可提高無機聚合物之早期抗壓強度。本研究之目的為比較稻殼灰、矽灰、玻璃粉不同矽質摻料對爐石基無機聚合物材料性質之影響，以期擴展農業和工業副產物質於營建產業資源化之成效，並減少廢棄物對環境之衝擊。

二、材料與方法

2.1 材料

爐石粉為中聯資源股份有限公司所提供之細度為 $4700 \text{ m}^2/\text{kg}$ 之水淬高爐爐石粉，比重為 2.87。偏矽酸鈉為帝一化工原料股份有限公司所提供，比重為 2.61。碳酸鈉亦為帝一化工原料股份有限公司提供，其比重為 1.55。稻殼灰為巨暉股份有限公司取得的碳化稻殼，比重為 2.13。矽灰為西卡股份有限公司提供，比重為 2.15。玻璃粉為東光玻璃儀器企業社提供，比重為 2.22。

2.2 方法

(1)凝結時間：依照 CNS 786 規範。(2)抗壓強度：依照 CNS 1010 規範。(3)長度變化率：依照 CNS 14603 規範。

三、結果與討論

3.1 凝結時間

圖1為三種不同矽質摻料及取代率初凝時間比較圖，相同取代量情況下(5%、10%、15%)，矽灰之凝結時間最長，稻殼灰次之，玻璃粉最短，推測其原因為矽灰之吸水率較大，拌合初期吸收部分水量後導致鹼激發劑溶解下降，導致激發程度不足，進而使初凝時間延長；玻璃粉則是由於吸水率低，鹼激發劑具有充足之水量溶解並激發爐石；然而，在取代率20%時卻出現玻璃粉取代組別之初凝時間最長，推估其原因為玻璃粉取代率到達一定程度後，由於爐石粉之量較少，而玻璃粉難以快速被激發，從而導致其初凝時間大幅延長。圖2為三種不同矽質摻料及取代率終凝時間比較圖，稻殼灰及矽灰之趨勢大致與初凝階段相同，但玻璃粉而各取代量之終凝時間皆大於其餘兩者，其原因為由於玻璃粉之粒徑較大，故需要更多之激發時間。

3.2 抗壓強度

圖3為稻殼灰取代率 0%、5%、10%、15%、20%於各齡期之抗壓強度試驗結果，取代率 0%、5%、10%、15%、20%之 3 天抗壓強度分別為 51.75 MPa、54.79 MPa、55.22 MPa、53.59 MPa、63.67 MPa，由結果可知個稻殼灰比例取代皆能提升抗壓強度，且強度之提升幅度隨著稻殼灰取代率增加而增加，此結果與文獻相符，稻殼灰取代爐石粉時可提升膠體之早期強度。取代率 0%、5%、10%、15%、20%之 7 天抗壓強度分別為 55.80 MPa、60.34 MPa、60.54 MPa、54.59 MPa、61.72 MPa，結果顯示除了稻殼灰取代率 15%時強度些微下降外，其餘皆有助於強度之小幅度提升。取代率 0%、5%、10%、15%、20%之 28 天抗壓強度分別為 68.94 MPa、64.22 MPa、69.96 MPa、62.49 MPa、62.35 MPa，結果顯示除了稻殼灰取代率 10%時有助於提升些許部分強度外，其餘取代率皆降低抗壓強度。取代率 0%、5%、10%、15%、20%之 56 天抗壓強度分別為 69.39 MPa、70.97 MPa、72.32 MPa、74.69 MPa、69.30 MPa，根據結果，除了取代率 20%時強度與 0%時相近，其餘取代率皆能提升 56 天抗壓強度，其中以取代率 5%、10%、15%提升之幅度分別為 2.28%、

4.23%、7.63%，此結果也與文獻提出之稻殼灰取代後有助於晚期強度。使用稻殼灰取代時，由於其具有大量之活性矽，可增加膠體內部之矽含量並促使鈣含量下降，較低之鈣矽比可使鍵結較為穩定。圖 4 為矽灰取代率 0%、5%、10%、15%、20% 於各齡期之抗壓強度試驗結果，取代率 0%、5%、10%、15%、20% 之 3 天抗壓強度分別為 51.75 MPa、56.22 MPa、49.64 MPa、46.29 MPa、50.14 MPa，結果顯示矽灰取代率 5% 有助於提升早期抗壓強度，但其餘取代率卻不利於早期強度。取代率 0%、5%、10%、15%、20% 之 7 天抗壓強度分別為 55.80 MPa、60.17 MPa、60.67 MPa、56.45 MPa、58.02 MPa，該結果顯示矽灰之取代有助於 7 天之抗壓強度，原因可能為矽灰中之矽逐漸鍵結出較高強度之產物。取代率 0%、5%、10%、15%、20% 之 28 天抗壓強度分別為 68.94 MPa、68.24 MPa、65.63 MPa、64.51 MPa、61.15 MPa，該結果顯示各矽灰取代率皆無法提升漿體之 28 天抗壓強度，但其中以取代率 5% 時抗壓強度最大，且與 0% 取代率時抗壓強度相近。取代率 0%、5%、10%、15%、20% 之 56 天抗壓強度分別為 69.39 MPa、62.35 MPa、63.55 MPa、67.77 MPa、63.67 MPa，結果顯示矽灰之取代並不利於漿體 56 天抗壓強度。因此建議矽灰之使用量應低於 10%，因為高含量矽灰會降低抗壓強度。圖 5 為玻璃粉取代率 0%、5%、10%、15%、20% 之 3 天抗壓強度分別為 51.75 MPa、52.12 MPa、49.05 MPa、43.53 MPa、48.74 MPa，結果顯示玻璃粉取代率 5% 時有助於早期強度，其餘取代率皆無法提升抗壓強度。取代率 0%、5%、10%、15%、20% 之 7 天抗壓強度分別為 55.80 MPa、50.83 MPa、48.22 MPa、48.40 MPa、52.50 MPa，結果顯示玻璃粉之取代對於 7 天之抗壓強度並無提升之效果。取代率 0%、5%、10%、15%、20% 之 28 天抗壓強度分別為 68.94 MPa、59.80 MPa、71.60 MPa、59.69 MPa、62.85 MPa，結果顯示玻璃粉取代率 10% 時對於 28 天抗壓強度有提升的效果，其餘取代率對於抗壓強度並無提升效果。取代率 0%、5%、10%、15%、20% 之 56 天抗壓強度分別為 69.39 MPa、52.84 MPa、57.67 MPa、54.79 MPa、52.54 MPa，結果顯示玻璃粉對於 56 天抗壓強度並無提升效果。

3.3 長度變化率

圖 6 為稻殼灰體積取代爐石之長度變化率，隨著稻殼灰取代率 0%、5%、10%、15%、20% 於齡期七天之長度變化率依序為 -0.11%、-0.096%、-0.087%、-0.083%、-0.078%，由結果可知稻殼灰取代可改善漿體於早期之體積穩定性。稻殼灰取代率 0%、5%、10%、15%、20% 於齡期 28 天之長度變化率依序為 -0.36%、-0.253%、-0.248%、-0.237%、-0.210%。稻殼灰添加有利於體積穩定性之原因推估為由於稻殼灰中並非全為無定形態，而是存在部分結晶態，該結晶態物質雖不參與反應但能充當為填充材，用於填補漿體內部之孔隙；然而雖然稻殼灰具有部分填充之效果，但如放置於乾燥之環境則可能出現反效果，亦為導致乾縮率增加。圖 7 為矽灰體積取代爐石之長度變化率，隨著矽灰取代率 0%、5%、10%、15%、20% 於齡期七天之長度變化率依序為 -0.11%、-0.086%、-0.087%、-0.090%、-0.094%，由圖中可看出矽灰取代對於體積穩定性具有改善之效果，其中以 5% 取代最佳，但隨著取代率增加，其長度變化量反而再次增加。矽灰取代率 0%、5%、10%、15%、

20%於齡期 28 天之長度變化率依序為-0.36%、-0.177%、-0.208%、-0.210%、-0.207%，該趨勢與齡期七天時相似。圖 8 為玻璃粉體積取代爐石之長度變化率，隨著玻璃粉取代率 0%、5%、10%、15%、20%於齡期七天之長度變化率依序為-0.11%、-0.109%、-0.107%、-0.096%、-0.095%，由試驗結果可看出隨著玻璃粉的取代有利於改善漿體之體積穩定性。玻璃粉取代率 0%、5%、10%、15%、20%於齡期 28 天之長度變化率依序為-0.36%、-0.247%、-0.310%、-0.325%、-0.342%，該趨勢與初期不太相同。

四、結論

- (1)不同矽質摻料皆能使凝結時間延長，由於矽質材料之取代降低了漿體內部之鈣矽比下降，鈣含量的下降有利於緩凝；三種矽質材料於取代率 5%、10%、15%時之初凝時間由長到短依序為矽灰、稻殼灰、玻璃粉；於 20%時則以玻璃粉之初凝時間最長。對於終凝而言，則以玻璃粉最長，係因玻璃粉粒徑較大。
- (2)不同矽質摻料取代爐石粉後，稻殼灰之取代對於早期強度具有提升效果，矽灰與玻璃粉則只有部分取代呈現提升效果。齡期 28 天時稻殼灰取代率 10%略加提升抗壓強度，玻璃粉 10%提升之效果最佳，而矽灰取代則些微降低抗壓強度。
- (3)不同矽質摻料之取代皆有利於減少長度變化率，代表其體積穩定性有所提高。稻灰取代率越高，長度變化率越低的趨勢。矽灰取代則以 5%時具有較佳之體積穩定性。使用玻璃粉取代之漿體於晚期之長度變化率與未取代前十分相近。

五、參考文獻

- 1.Ma, Cong, Bin Zhao, Shenglai Guo, Guangcheng Long and Youjun Xie (2019). "Properties and characterization of green one-part geopolymer activated by composite activators." Journal of Cleaner Production **220**: 188-199.
- 2.Provis, John L. and Jannie S. J. van Deventer (2019). 16 - Geopolymers and Other Alkali-Activated Materials. Lea's Chemistry of Cement and Concrete (Fifth Edition). Hewlett, Peter C. and Martin Liska, Butterworth-Heinemann: 779-805.
- 3.Hossain, Sk S., P. K. Roy and Chang-Jun Bae (2021). "Utilization of waste rice husk ash for sustainable geopolymer: A review." Construction and Building Materials **310**: 125218.
- 4.Ma, Xiaodong, Tingshu He, Yongdong Xu, Renhe Yang and Yuhao Sun (2022). "Hydration reaction and compressive strength of small amount of silica fume on cement-fly ash matrix." Case Studies in Construction Materials **16**: e00989.
- 5.Xiao, Rui, Yuetan Ma, Xi Jiang, Miaomiao Zhang, Yiyuan Zhang, Yanhai Wang, Baoshan Huang and Qiang He (2020). "Strength, microstructure, efflorescence behavior and environmental impacts of waste glass geopolymers cured at ambient temperature." Journal of Cleaner Production **252**: 119610.
- 6.Xiao, Rui, Pawel Polaczyk, Miaomiao Zhang, Xi Jiang, Yiyuan Zhang, Baoshan Huang and Wei Hu (2020). "Evaluation of Glass Powder-Based Geopolymer

Stabilized Road Bases Containing Recycled Waste Glass Aggregate." Transportation Research Record 2674(1): 22-32.

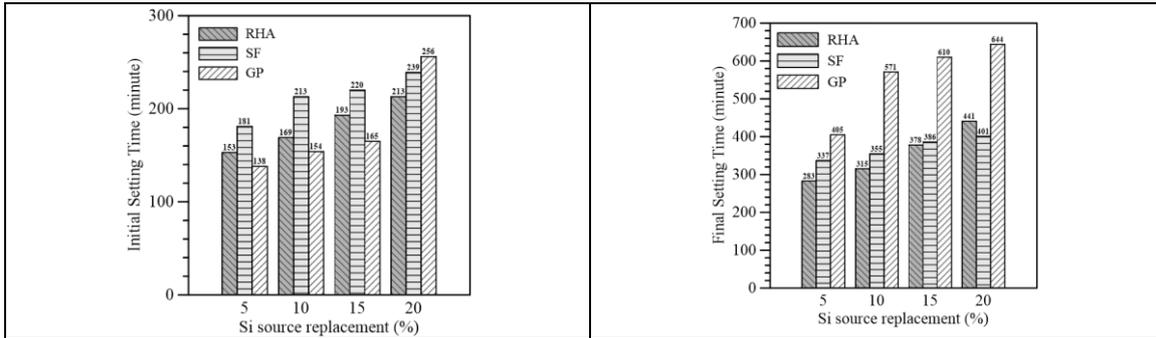


圖 1 不同矽質摻料之初凝時間

圖 2 不同矽質摻料之初凝時間

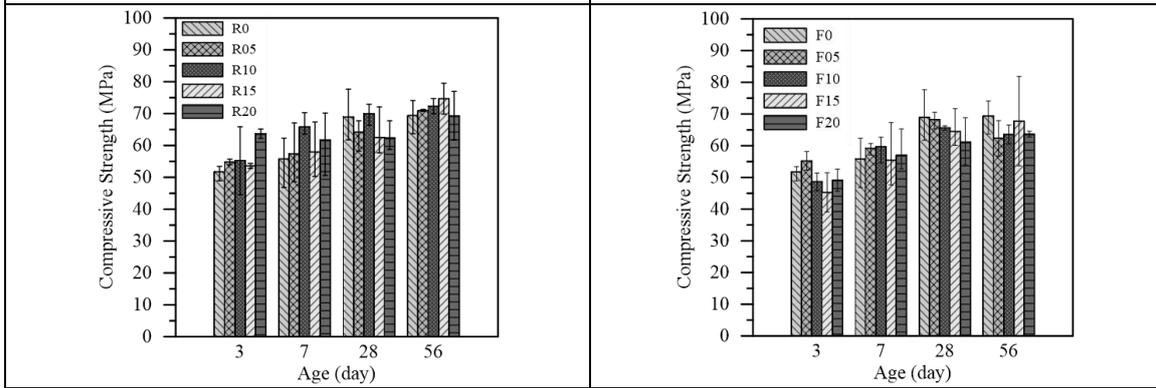


圖 3 稻殼灰取代之抗壓強度

圖 4 矽灰取代之抗壓強度

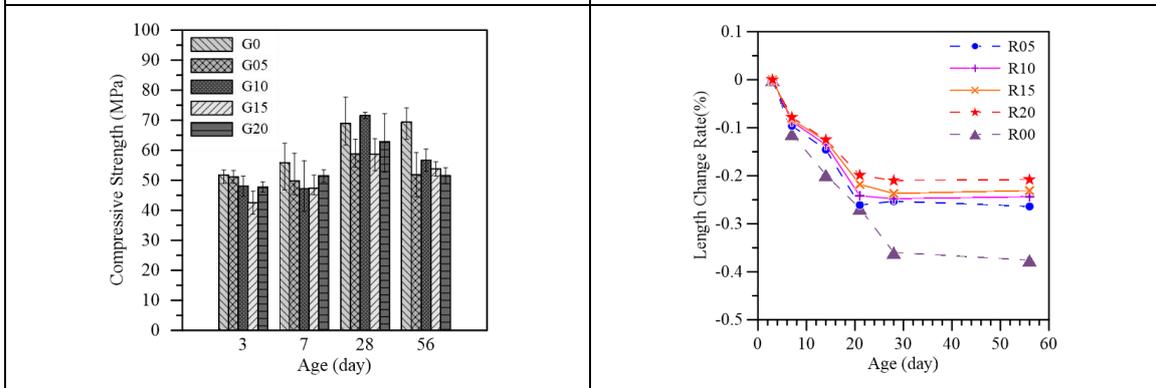


圖 5 玻璃粉取代之抗壓強度

圖 6 稻殼灰取代之長度變化率

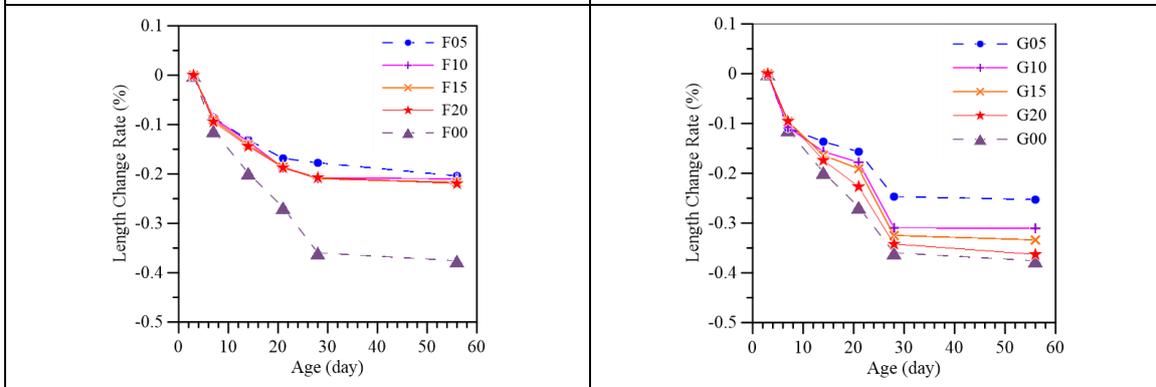


圖 7 矽灰取代之長度變化率

圖 8 玻璃粉取代之長度變化率