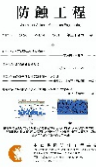




防蝕工程學會

防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>



10.6376/JCCE.202003_34(1).0003

液固比對鹼激發高流動性混凝土耐久性之影響 Effect of Durability of High Fluidity Alkali-Activated Slag Concrete (HFAASC) with different liquid-solid ratios

王和源*¹、陳柏存²、郭致維¹

Her-Yung Wang*¹, Bo-Tsun Chen², Chih-Wei Kou¹

中文摘要

本研究是利用水淬爐石粉作為鹼激發材料，以液固比(LS)0.45、0.5、0.55，不同鹼當量 (N)5%、6%、7%，製備成高流動性混凝土。進行新拌性質、硬固性質及耐久性質之探討。

結果顯示，鹼激發高流動性混凝土，擁有較佳工作性及較長的凝結時間，但工作性佳，坍流度可達 550mm~650mm。在低液固比及高鹼當量有較高抗壓強度。鹼激發高流動性混凝土各配比在初期呈現較佳的激發反應行為，養護齡期 28 天超音波波速均可達養護齡期 56 天 90%以上。透過快速氯離子滲透所累積的電荷量，觀察到液固比 0.55 鹼當量 5%於養護齡期 28 天，於試驗時間達 1.5 小時，達到混凝土氯離子滲透能力之最高滲透等級(4000 庫倫)，顯示出高液固比及低鹼當量配比設定，耐久性質呈現不佳；以液固比 0.45 鹼當量 5%優於其他配比呈現混凝土氯離子滲透能力之低滲透等級(1000~2000 庫倫)，擁有較佳的耐久性質。

關鍵詞：水淬爐石粉、鹼激發、高流動性混凝土、快速氯離子滲透。

Abstract

In this study, ground granulated blast furnace slag (GGBFS) was used to prepare the high- fluidity alkali-activated slag concrete (HFAASC) with different alkali equivalent (N=5, 6 and 7%) and different liquid-solid ratios (L/S=0.45, 0.50 and 0.55), to explore its fresh, mechanical and durability properties. The results show that HFAASC has high workability and longer setting time. Its slump flow obtained was between 550 to 650 mm.

收到日期：109 年 01 月 02 日

修訂日期：109 年 03 月 24 日

接受日期：109 年 03 月 31 日

¹ 國立高雄科技大學 土木工程系

¹ Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

² 高雄市政府工務局新建工程處

² Public Works Bureau, Construction Office, Kaohsiung City Government

*聯絡作者：wangho@nkust.edu.tw

Each mix proportion of HFAASC have better initial response behavior at the initial stage. The ultrasonic pulse wave velocity of HFAASC cured at 28 days can reach more than 90% of the one cured at 56 days. As HFAASC with L/S=0.55 and N=5%, the accumulated charge obtained by the rapid penetration of chloride ions can reach to the maximum permeation of chloride ion (4,000 coulombs) in the concrete at 1.5 hours. It also shows that the durability of HFAASC with high liquid-solid ratio and low alkali equivalent ratio is not good. As HFAASC with L/S=0.45 and N=5%, its durability is better than the others with low permeability level of concrete chloride ion permeability (1000 ~ 2000 Coulomb).

Keywords: ground granulated blast furnace slag (GGBFS); alkali-activated; high- fluidity concrete; chloride ion permeability.

1. 前言

資源再生工業在各個不同的工程領域中不斷的提升永續的觀念，但是土木領域製造水泥方面亦產生二氧化碳。而卜特蘭水泥是土木營建業最主要的膠結材料，傳統水泥製造必須經過二磨一燒，全球水泥製造業二氧化碳總排放量佔全世界溫室氣體排放量 5~7%，為了讓環境減少衝擊，必須要減少水泥用量^[1-2]。

飛灰、矽粉、爐石粉等工業副產品為民生經濟下所產生，每年所產出的數量高達數百萬噸，在土木營造業領域該如何消耗這類廢棄物，在先進的歐美日國家，視爐石為有用之資源物質，更視為綠色建材，大量使用於各種土木營建工程領域，已有百餘年歷史，鋼鐵工業為國家重要產業，爐石為煉鋼過程必然產生之副產物，尤其缺乏天然資源之台灣，適材適用採用爐石資源取代天然資源之開採，才是真正達到保護國土環境之手段，此亦國際爐石資源循環之潮流。

然而，水泥減量使用的同時，必須找尋相關可取代水泥的膠結材料。其中鹼膠凝材料為近年許多國內外學者積極投入研發之綠色水泥材料，實務上的應用也漸有成果，此種綠色水泥材料之出現，可有效減少水泥使用，達到兼顧降低排碳量與對於環境之衝擊。利用鹼活化劑活化技術以產生鹼活化的粘合劑，和粗細骨材混合並在適當的條件下固化以形成鹼激發混凝土也可以達到工業副產物的再利用之目的^[4-5]。

以爐石粉做為主要膠結材，因爐石的顆粒結構穩定，無法以單一水分子之極性不足破壞爐石之化學鍵結，故爐石並不能像水泥一樣只要單純的與水接觸即可進行水化，需依賴極強離子幫助爐石發生水化反應，所以利用強鹼溶液來激發爐石內部活性，產生聚合作用。當加入外來的鹼性物質，如水泥水化產物 CH 與鹼骨材中之 Na_2O 、 K_2O 等，對爐石中的玻璃體和礦物產生強烈的破壞作用使結構解體，形成矽酸鈣水化物 (C-S-H 膠體) 或鋁酸鈣水化物 (C-A-H 膠體)，使其膠結並填充混凝土之孔隙，使強度、水密性與耐久性增加。

在針對工程材料中，混凝土的品質是最容易在施工中遭受改變，莫過於在施工輸送混凝土時，被任意加水之問題，這將造成破壞混凝土廠設定的混凝土配比，導致強度降低，使品質上有落差。為了防止這樣的行為一再發生，因此透過調整混凝土的配比，達到較好的流動性。本研究即探討鹼激發高流動性混凝土之可行性以及耐久性質。期能研發出高流動性混凝土，其坍度範圍為 22 公分至 26 公分，坍流度範圍為 55 公分至 65 公分，在出廠設定上就能有好的工作性，免除了到了現地還需加水的問題，並能透過預拌廠方面就先做出高流動混凝土的品質水準。

2. 試驗計畫

研究配比方法採用緻密配法，係因在此配比設計中，利用骨材堆疊達到混凝土緻密的效果，不僅可以減少孔隙量，有助於提升混凝土整體的耐久性。

以國外鹼激發材料製成「混凝土」在進行加速耐久性試驗方面能符合基本混凝土的標準，足以媲美其他高強度混凝土，利用水淬爐石粉作為鹼激發材料，經由初步試拌結果，則再配比中加入 1.25%的強塑劑，能避免骨材與漿體產生析離與泌水的現象，較能符合鹼激發高流動性混凝土的性質。

透過回顧前人於鹼激發材料方面研究成果，設定本研究之配比，採用固定的鹼模數比(Ms)1，以不同液固比(LS)0.45、0.5、0.55，液固比(LS)是指砂漿中溶液質量與固體質量的比值；不同鹼當量(N)5%、6%、7%，鹼當量(N)代表活化劑之 Na_2O 含量與礦物粉末之重量。鹼激發高流動混凝土置於大氣中進行養護(平均溫度 25 度)，針對 7 天、28 天及 56 天的混凝土進行新拌性質、硬固性質及耐久性質之探討與分析。

2.1 試驗材料

1. 爐石粉:

使用的爐石粉為中聯爐石資源處理公司研磨成細粉狀水淬爐石粉，比重為 2.89，細度為 4000 cm^2/g 。水淬爐石的 SiO_2 、 Al_2O_3 及 CaO 合計達 80%以上經鹼活化後會形成類似水泥熟料之水化物 C-S-H 膠體，具有與卜特蘭水泥相同的水硬性與凝結性。

2. 矽酸鈉溶液:

矽酸鈉俗稱水玻璃或液態玻璃，本研究採用市售三號水玻璃，其為黏稠無色無味之液體。矽酸鈉是一種白色粉末，易溶於水、溶於水呈鹼性，更能促使鹼膠凝材料的聚合反應。

3. 氫氧化鈉溶液:

採市售純度 98%的片鹼與水進行調配成配比中所需的濃度之氫氧化鈉溶液，並封裝保存於乾淨耐酸鹼桶中，因反應過程中會放出大量的熱，需靜置 24hr 後才能使用，其鹼性激發溶液主要目的在於使活性較低材料能夠產生更多的矽凝膠體，進而讓鹼膠凝材料產生強度。

4. 飛灰:

飛灰來自台灣電力公司火力發電廠之 F 級飛灰，飛灰屬於圓球形顆粒，應用於鹼膠凝材料中可因軸承效應改善新拌流動性，對工作性之提升有明顯的助益。

5. 骨材:

粗細骨材均採用屏東里港地區符合混凝土粒料規定的天然砂石，經由篩分析試驗後得之粒徑分佈可符合 CNS1240 混凝土粒料之要求規定。

6. 強塑劑:

出產市售，為流動化混凝土用化學摻料第二型 (PCS1-H)，有助於水泥漿或砂漿之流動性。

2.2 試驗項目

新拌性質包括坍度依據 ASTM C143 規定及凝結時間依據 ASTM C4035 規定。

硬固性質包括抗壓強度依據 ASTM C39 規定、抗彎強度依據 CNS1234 規定及超音波波速依據 ASTM C597 規定。

耐久性質四極式電阻依據 ASTM C876 規定及氯離子滲透依據 ASTM C1202 規定。

2.3 試體配比設計

本研究採用緻密配設計先將飛灰與天然細骨材混拌，求出飛灰添加於細骨材中最大的混合單位重之比例(α)，再以最佳取代量(α)與三分石進行混拌，找出最大的混合單位重之比例(β)，作為緻密配比的基準。

在拌合投料順序方面:粗骨材、細骨材、飛灰以及所需拌合水進行拌合 3 分鐘,再將膠結材料部分爐石粉、氫氧化鈉溶液、矽酸鈉溶液及強塑劑依序放入進行拌合 3 分鐘,靜置 1 分鐘後再拌合 1 分鐘,下料於推車進行新拌性質試驗以及試體製作。

3. 結果與分析

3.1 新拌性質

3.1.1 坍度、坍流度

圖 1 及圖 2 顯示,工作性會隨著的液固比的增加而增加,係因在提高液固比的同時會增加整體的水量,增加混凝土材料間的水量,達到較好的潤滑性,可有效的提升整體流動性。以鹼激發高流動性混凝土以鹼當量 7%為例,當液固比由 0.45 提升至 0.55,坍度由 255mm 增加至 281mm,坍流度由 560mm 增加至 645mm。以液固比 0.55 為例,鹼當量 5%增加至 7%時,坍度由 268mm 增加至 281mm,坍流度由 634mm 增加至 645mm,兩者的增加幅度較小。

在經由比較液固比和鹼當量對於坍度及坍流度的影響層面,液固比的影響顯然大於鹼當量,係因在提升液固比的同時,會降低爐石粉的用量以及提升拌合水的用量,在兩者的變動下,流動性將有很大的變化。

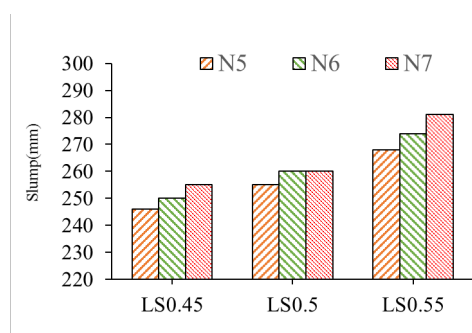


圖 1 鹼激發高流動性混凝土之坍度。
Figure 1 Slump of HFAASC.

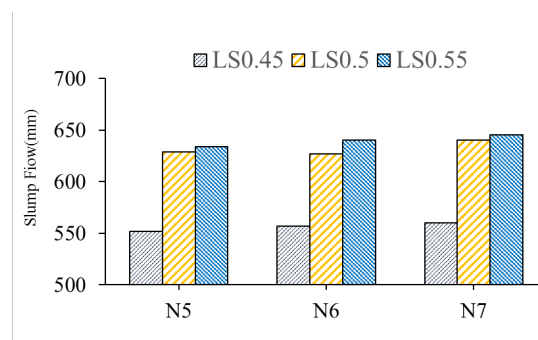


圖 2 鹼激發高流動性混凝土之坍流度。
Figure 2 Slump flow of HFAASC.

3.1.2 凝結時間

圖 3 及圖 4 顯示,當固定鹼當量 7%的條件下,液固比由 0.45 提升至 0.5 時,其初凝時間與終凝時間分別增加 9.1 小時與 10.24 小時;而當液固比由 0.5 提升至 0.55,則初凝時間及終凝時間分別增加 17.4 小時與 8.5 小時。由實驗結果得知,凝結時間隨著液固比的增加而延長,係因增加液固比,會使爐石粉及矽酸鈉溶液的使用量降低,且氫氧化鈉溶液之濃度也下降,使得漿體在凝結速度方面較緩慢。

鹼激發高流動性混凝土凝結時間不同鹼當量比較以液固比 0.45 為例,鹼當量由 5%增加至 6%時,初凝時間會由 31.20 小時縮短至 21.9 小時;而終凝時間會由 45.1 小時縮短至 34.15 小時。當鹼當量由 6%增加至 7%,初凝時間會由 21.9 小時縮短至 12 小時,而終凝時間會由 34.15 小時縮短至 21.98 小時,因此當鹼當量為 7%之初凝時間與終凝時間分別較鹼當量 5%縮短的 19.2 小時及 23.12 小時,結果顯示當鹼當量的提升可以促使凝結時間有縮短的趨勢,係因鹼當量提升使鹼溶液濃度提高,使 Si^{4+} 、 Al^{3+} 及 Ca^{2+} 的溶出量增加,加快產生硬固之膠體,使凝結時間有縮短現象。

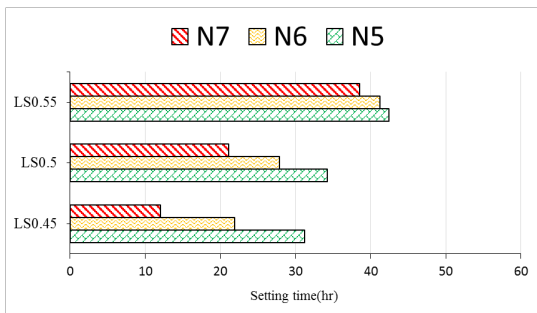


圖 3 鹼激發高流動性混凝土之初凝時間。
Figure 3 Initial setting time of HFAASC.

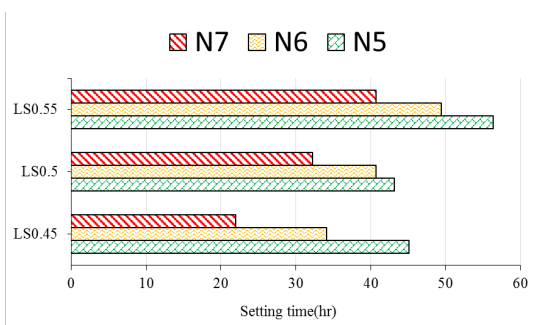


圖 4 鹼激發高流動性混凝土之終凝結間。
Figure 4 Final setting time of HFAASC.

3.2 硬固性質

3.2.1 抗壓強度

圖 5 顯示，養護齡期 28 天，鹼當量 5%，各液固比的抗壓強度均在 16~17MPa 範圍內。鹼當量為 6%液固比 0.45 提升至 0.5 及 0.55，則抗壓強度分別降低 16%及 43%。鹼當量固定為 7%液固比 0.45~0.55，則抗壓強度降低了 10%及 39%。由圖 6 顯示養護齡期 56 天，鹼當量 5%，液固比提升抗壓強度範圍為 17.23~18.03MPa。

由上述的強度分布趨勢，在提升液固比之後，強度則會被降低至 43%。反之，降低液固比可使抗壓強度增加，其原因主要為鹼性溶液在激發爐石時，經由破壞表面的玻璃質，而進行化學反應，在降低了液固比的同時，鹼性溶液之濃度也隨之提高，故能使化學反應矽、鋁離子大量釋出，讓聚合行為更加完整。反觀若過度提高液固比，將使化學反應效益減少，進而降低抗壓強度。

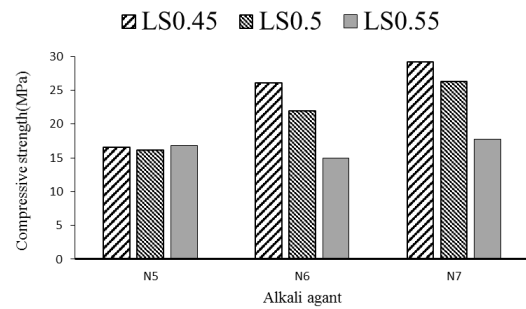


圖 5 鹼激發高流動性混凝土之 28 天之抗壓強度。
Figure 5 Compression strength of HFAASC at 28 days.

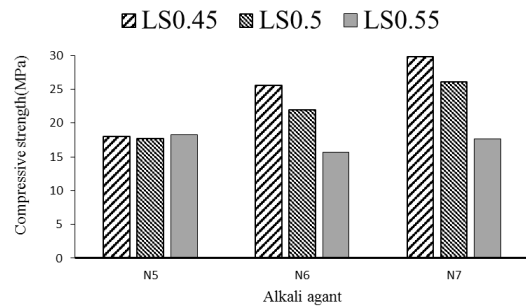


圖 6 鹼激發高流動性混凝土之 56 天之抗壓強度。
Figure 6 Compression strength of HFAASC at 56 days.

3.2.2 抗彎強度

圖 7 所示，在鹼當量 5%及 6%時，液固比 0.45 提升至 0.55，28 天養護齡期，抗彎強度有降低的趨勢，其中較特別的為鹼當量 6%液固比 0.45，抗彎強度為 2.96MPa，會有如此高的抗彎強度，有可能在低鹼當量 5%時，液固比的提升都無法擁有較好的激發聚合反應，而在高鹼當量 7%時，能有好的激發聚合反應，但可能在過度的激發過程，使內部的反應速率快速，膠體增加較快，產生裂縫，試體緻密性不足，使試體側向抵抗力較低。

3.2.3 超音波波速

對於超音波波速於不同齡期發展之影響，結果如圖 8 所示，所有配比於養護齡期 7 天超音波波速都可達養護齡期 28 天的 90%以上。液固比

0.55 在養護齡期 3~28 天的超音波波速成長趨勢，並無與其他配比有明顯落差，但到了養護齡期 56 天，則會比養護齡期 28 天平均降低 1% 左右，係因在液固比 0.55 的試體中，結構內部有較多的水分，在達到硬化階段時留下之孔隙增多，使超音波波速降低。

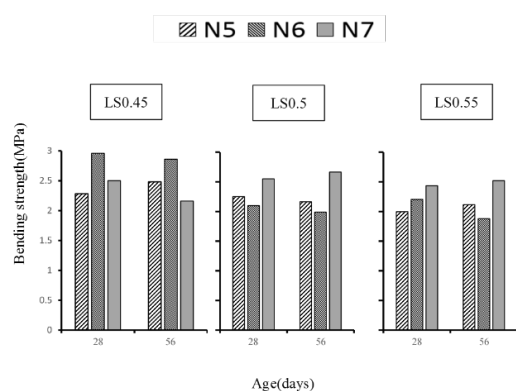


圖 7 鹼激發高流動性混凝土之抗彎強度。
Figure 7 Flexural strength of HFAASC.

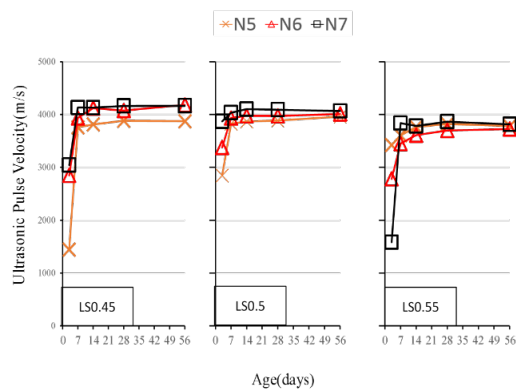


圖 8 鹼激發高流動性混凝土之超音波波速。
Figure 8 Ultrasonic pulse wave velocity of HFAASC.

3.3 耐久性質

3.3.1 表面電阻

圖 9 所示，以鹼當量 5% 做為固定條件，當液固比 0.45 提升至 0.55 時，齡期 3 天的電阻分別為 1.3kΩ-cm、1.8kΩ-cm、6.0kΩ-cm，其中 0.55 的電阻最高，係因在拌合水較多的情況下，齡期 3 天試體內部的的水分尚未脫離，使內部孔隙較少，表

面電阻就會較其他的配比佳。

而在齡期 28 天因試體的內部水分慢慢的脫水硬化，產生裂縫液固比 0.55 則為最低電阻 69.1 kΩ-cm，在後期則因膠體漸漸產生，使的內部結構較緻密所以電阻就與其他配比的趨勢相同。

在齡期 56 天的電阻各配比分別都已達到 89~99 kΩ-cm，原比養護齡期 28 天成長 11%~87%，證明鹼激發高流動性混凝土在齡期 28 天後依然能增加耐久性。

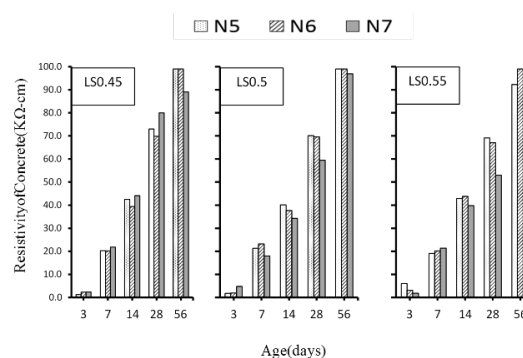


圖 9 鹼激發高流動性混凝土之表面電阻。
Figure 9 Surface resistance value of HFAASC.

3.3.2 快速氯離子滲透電量

圖 10 顯示液固比 0.55 鹼當量 5% 有最高的累積電荷，當鹼當量提升至 7% 則累積電荷量也隨之下降，係因在高液固比的情況下原本水所占的體積較多，在脫水固化後將產生較多的孔隙，且為低鹼當量的設定，激發量不足以填充所有的孔隙，故在試體內部讓氯離子的擴散效果快速，時間內所累積的電荷量也較多。

鹼激發高流動性混凝土養護齡期 28 天時，在未滿 6 小時的標準試驗流程，於 1.5 小時的累積電荷已超過低等級(1000~2000 庫倫)的滲透指標，其中有七組配比更是超過中等級(2000~4000 庫倫)，可推論鹼激發高流動性混凝土為多孔隙材料。

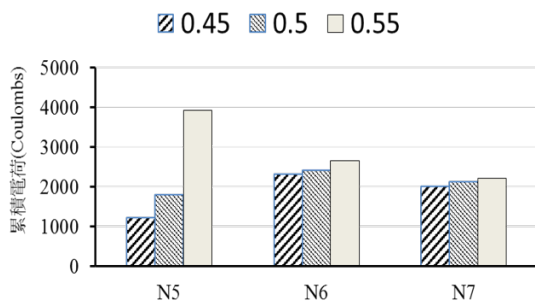


圖 10 鹼激發高流動性混凝土之快速氯離子滲透電量。

Figure 10 Chloride permeability of HFAASC.

4. 結論

- (1) 硬固性質在液固比與鹼當量的比例上，需要互補，低液固比高鹼當量或者高液固比低鹼當量都是無法擁有好的工程性質；例如液固比 0.45 鹼當量 7% 在初期超音波波速就可達 3000m/s 以上，而在抗壓強度方面三個齡期均可達 22MPa 以上。
- (2) 抗壓強度的部分，需要適當液固比與鹼當量的配比搭配，若無法擁有適當比例將無發使抗壓強度提升。
- (3) 透過抗彎強度方面養護齡期 28 天與 56 天趨勢相近與抗壓強度方面相互呼應，即抗壓強度降低則抗彎能力降低。
- (4) 鹼激發高流動性混凝土之耐久性取決於內部的裂縫多寡，在高液固比 0.55 前期因水分尚未離開試體內部，使的孔隙中佈滿水分，在前期量測之電阻值比較高，但因水分占有一定的體積，使水分散失後，造成內部孔隙多，加上高液固比的鹼劑濃度低，無法有良好的激發聚合行為產生，所以導致後期，試體內遺留孔隙，電阻值降低，耐久性變差。

- (5) 在快速氯離子滲透部分，液固比 0.55 鹼當量 5%，於試驗時間 1.5 小時，就已接近滲透指標的最高等級(4000 庫倫)，顯示出在高液固比低鹼當量，會促使裂縫增加，耐久性方面有降低的趨勢。

參考文獻

- [1] 周賢智，「鹼膠凝玻璃材料工程性質之研究」，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所碩士論文，2015。
- [2] "Study on the engineering properties and prediction models of an alkali-activated mortar material containing recycled waste glass", Chien-Chih Wang, Her Yung Wang, Bo Tsun Chen, Ya Chi Peng, Construction and Building Materials, vol.132(2017), pp.130-141.
- [3] "Study on engineering properties of alkali-activated ladle furnace slag geopolymers.", Wang, Wei-Chien, Her-Yung Wang, and Hsin-Chieh Tsai., Construction and Building Materials, vol.123 (2016), pp.800-805.
- [4] "Green binding material using alkali activated blast furnace slag with silica fume.", Sayed, Mohamad, and Sayeda R. Zeedan., HBRC Journal, vol.8.3 (2012), pp.177-184.
- [5] "Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review.", Ding, Yao, Jian-Guo Dai, and Cai-Jun Shi., Construction and Building Materials, vol.127 (2016), pp.68-79.