



無機聚合物材料 配比設計方法 推演與應用

蔡志達 / 國立成功大學永續環境實驗所 副研究員

無機聚合物材料 (Geopolymer) 不似水泥系複合材料擁有悠久的發展歷史與豐富的研究成果，故其配比設計方法大多採用比例法，或是取代法（於水泥系複合材料配比中，利用無機聚合漿體取代水泥漿體），因此本文期望以緻密配比邏輯 (Densified mixture design algorithm, DMDA) 為基礎，推演一符合無機聚合物材料使用之配比設計方法，並介紹此配比設計方法在無機聚合砂漿與無機聚合混凝土，於實驗室與實場之應用。惟無機聚合物材料組成原料相當多元，使用者可以根據所採用的組成材料，依據本文所提出之配比設計邏輯進行推演並計算，再經體積驗算與試拌確認後使用之。

緣起

無機聚合物材料 (Geopolymer) 係由法國科學家 Davidovits 於 1979 年所提出，為一種三維架狀的鋁矽酸鹽物質，其結構為矽氧四面體與鋁氧四面體共用氧原子之鍵結型態^[1,2]。無機聚合物材料主要為非晶質 (Amorphous) 或半晶質 (Semi-crystalline) 之物質，此材料在合成的過程中，通常使用鋁矽酸鹽原料（變高嶺土、燃煤飛灰或水淬高爐爐石粉）藉由鹼金屬氫氧化物水溶液或鹼金屬矽酸鹽水溶液使顆粒表面之矽、鋁離子溶出，形成鋁矽酸鹽聚合膠體，最後再與未反應之固體顆粒進行縮聚作用後，固化形成無機聚合物材料。其與水泥系複合材料最大不同乃水泥硬固的機理為水化鍵結，而無機聚合物材料則是化學鍵結（共價鍵）。由於無機聚合物材料組成原料取得容易，製程與設備簡單，在常溫環境下即可製得^[3]，並具備優良的性能，故相當有潛力發展成為新一代綠色工程材料。近年來國內外均積極投入無機聚合物材料之相關研究，惟無機聚合物材料不似水泥系複合材料擁有悠久的發展歷史與豐富的研究成果，故其配比設計方法大多採用比例法，或是取代法（於水泥系複合材料配比中，利

用無機聚合漿體取代水泥漿體），這樣的方式在實驗室內少量操作尚屬可行，若應用到實廠廠拌或量產時，配比的表示方式建議應採用 kg/m^3 較為準確與適用。因此本文旨在以緻密配比邏輯 (Densified mixture design algorithm, DMDA) 為基礎，推演一符合無機聚合物材料使用之配比設計方法，並介紹其相關應用。

無機聚合物材料配比設計方法推演

緻密配比邏輯^[4]係一根據顆粒堆積與材料科學原理，並融入「耐久性、安全性、工作性、經濟性及生態性」考量的水泥系複合材料配比設計方法，於 1994 年推導與建立完成，並演繹出「漿量控制」、「用水量控制」，及「潤滑漿量厚度控制」等模式，與「代數解」、「矩陣解」，「幾何解（即體積變化係數解）」等計算方法^[5]。至今已成功應用於不同性能需求之指標工程上：高雄 85 T & C Tower、屏東海洋生物博物館、台北公車專用道、南投埔里中台禪寺、彰濱工業區車測中心、鶯歌陶瓷博物館－「禧門」、台中國家歌劇院等。由於緻密配比邏輯係以水泥系複合材料為基礎所發展。因此本文以爐石 / 飛灰基無機聚合物材料組成原料

將緻密配比邏輯，再演繹以適合無機聚合材料配比設計使用，再演繹推導過程說明如下。爐石 / 飛灰基無機聚合材料組成原料：粗骨材、細骨材、F 類燃煤飛灰、水淬高爐石粉、鹼液、抗裂粉體，及緩凝劑；而一般常見之水泥系複合材料組成原料：粗骨材、細骨材、水泥、F 類燃煤飛灰、水淬高爐石粉、纖維、水及強塑劑 (Superplasticizer, SP)，就緻密配比邏輯而言，爐石 / 飛灰基無機聚合材料與水泥系複合材料組成原料之差異如表 1 所示。

表 1 緻密配比邏輯中爐石 / 飛灰基無機聚合材料與水泥系複合材料組成原料

	爐石 / 飛灰基無機聚合材料	水泥系複合材料
骨材系統	粗骨材、細骨材、 抗裂粉體	粗骨材、細骨材、 F 類燃煤飛灰、纖維
漿體系統	F 類燃煤飛灰、 水淬高爐石粉、鹼液、 緩凝劑、粗、細骨材含水量	水泥、F 類燃煤飛灰、 水淬高爐石粉、水與粗、 細骨材含水量、強塑劑

爐石 / 飛灰基無機聚合材料緻密配比邏輯之設計流程如下：

步驟一：選擇材料

蒐集組成原料之物化性資料，以作為配比計算之參據。並求出最小空隙率 (最大單位重)，依最小空隙的原理，即探討顆粒材料最大堆積密度即最佳級配條件下的空隙。

步驟二：決定強度與坍度

依據施工規範及施工條件之要求，選定爐石 / 飛灰基無機聚合材料強度與工作性。

步驟三：求骨材最大單位重

根據骨材最大單位重求出骨材系統之最小空隙 (V_v)。

1. 假設細骨材填塞粗骨材之最大單位重比例為 α 。

$$\alpha = \frac{W_{cs}}{W_{cs} + W_{ca}} \quad (1)$$

若僅使用細骨材，則 $W_{ca} = 0$ ； $\alpha = 1$ 。

2. 骨材系統之空隙體積 (V_v) 為：

$$V_v = 1 - \left(\frac{W_{cs}}{\gamma_{cs}} + \frac{W_{ca}}{\gamma_{ca}} + \eta \right) \quad (2)$$

式中 W_{ca} , γ_{ca} ：分別表粗骨材重，及粗骨材密度；
 W_{cs} , γ_{cs} ：分別表細骨材重，及細骨材密度；
 η 表抗裂粉體或纖維體積。

步驟四：計算用漿量及骨材系統體積

1. 計算骨材系統各材料之用量

無機聚合漿體 (V_p) 假設等於 (nV_v)，如圖 1 [5] 所示。

$$V_p = nV_v \quad (3)$$

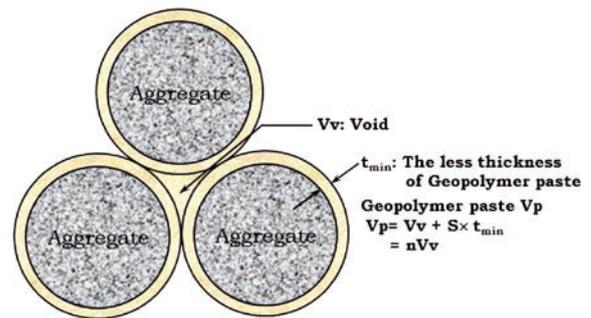


圖 1 無機聚合漿體於緻密配比邏輯中所扮演之角色示意圖 [5]

則骨材系統體積 (V_{agg}) 可以依下式求出，

$$V_{agg} = 1 - V_p = \left(\frac{W_{ca}}{\gamma_{ca}} + \frac{W_{cs}}{\gamma_{cs}} + \eta \right) \quad (4)$$

由於細骨材、粗骨材之混合比率為最緻密點，屬於固定重量比率，而抗裂粉體體積為已知，故將公式 (1) 及公式 (2) 重新代入公式 (4) 中，則可求出細骨材、粗骨材用量，再將 η 乘以抗裂粉體密度則可求出抗裂粉體用量。

2. 計算燃煤飛灰、水淬高爐石粉、鹼液、緩凝劑用量

$$V_p = \frac{W_{AL}}{\gamma_{AL}} + \frac{W_{fy}}{\gamma_{fy}} + \frac{W_{st}}{\gamma_{st}} + \frac{W_{rd}}{\gamma_{rd}} \quad (5)$$

λ 為液灰比，可以寫成下式：

$$\lambda = \frac{W_{AL}}{W_{fy} + W_{st}} \quad (6)$$

ρ 為緩凝劑添加比例，可以寫成下式：

$$\rho = \frac{W_{rd}}{W_{AL} + W_{fy} + W_{st}} \quad (7)$$

θ 為 F 類燃煤飛灰與水淬高爐石粉之使用比例，可以寫成下式：

$$\theta = \frac{W_{fy}}{W_{fy} + W_{st}} \quad (8)$$

將公式 (6)、(7)，及 (8) 重新代入公式 (5)，可得：

$$W_{st} = \frac{V_p}{\left[\frac{\left(\frac{\lambda}{1-\theta}\right)}{\gamma_{AL}} + \frac{\left(\frac{\theta}{1-\theta}\right)}{\gamma_{fy}} + \frac{1}{\gamma_{st}} + \frac{(\lambda\rho + \rho)}{\gamma_{Rd}} \right]} \quad (9)$$

由公式 (9) 求得之 W_{st} ，再代入公式 (6)、(7)，及 (8)，即可計算出 W_{fy} 、 W_{AL} ，及 W_{Rd} 。

上式中

W_{AL} ：鹼液重； γ_{AL} ：鹼液之密度；

W_{st} ：水淬高爐石粉重； γ_{st} ：水淬高爐石粉之密度；

W_{fy} ：F 類燃煤飛灰重； γ_{fy} ：F 類燃煤飛灰之密度；

W_{Rd} ：緩凝劑重； γ_{Rd} ：緩凝劑之密度；若未使用緩凝劑，則 $\rho = 0$ ； $W_{Rd} = 0$ 。

步驟五：配比修正與試拌

1. 根據粗、細骨材含水率調整鹼液用量

一般而言，實廠使用之粗、細骨材均含有水分（含水率大於 0%），就水泥系複合材料配比而言，可直接採取「加石減水」與「加砂減水」的動作來進行配比修正，惟無機聚合物材料配比中並無「拌合用水量」，故針對粗、細骨材的含水率，則需透過「加石減鹼液」與「加砂減鹼液」來進行配比修正，但由於鹼液與水的比重不同，建議應採體積法進行配比修正。

2. 試拌

任何一種配比設計方法，最後皆必須藉由試拌確認所設計配比的性質（工作性、強度等）是否滿足需求，無機聚合物材料當然也無例外，當試拌結果無法滿足設計需求時，可經由漿量（n 值）、液灰比（ λ ），及 F 類燃煤飛灰與水淬高爐石粉之使用比例（ θ ）來進行配比調整，配比調整後再經由試拌確認相關性質。

爐石 / 飛灰基無機聚合轉爐石砂漿於高壓地磚之應用

體積穩定性一直是轉爐石資源化作為水泥系複合材料最大的問題，經相關研究發現無機聚合技術係一兼具安定化與資源化轉爐石的新技術^[6]。本應用期望透過冷壓技術^[7]資源化無機聚合轉爐石砂漿作為高壓地磚，其配比係採用上述推演後的緻密配比邏輯所設計，選用參數為：水淬高爐石粉：F 類燃煤飛灰 = 5：5；鹼液濃度 4 M、6 M、8 M、12 M、（ $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1.28$ ； $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 50$ ）、液灰比（L/S）= 0.45、0.50、0.55、0.60、0.65，進行配比設計，如表 2 所示。其中轉爐石細粒料使用率可達 75% 以上；若依據綠建材評定基準中高壓混凝土地磚之規定，則冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚組成原料中：轉爐石細粒料、水淬高爐石粉、F 類燃煤飛灰等資源再生材料使用率達 99% 以上，不僅可有效資源化轉爐石細粒料，亦可增加資源再生材料之使用率，有效增加轉爐石細粒料資源化之多樣性，並提供戶外空間使用再生綠建材之選擇性，亦可提高轉爐石細粒料經濟價值，符合再生綠建材的精神。

表 2 冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚配比

鹼液濃度	漿量 n	液灰比 L/S	灰砂比	配 比 (kg/m ³)			
				Slag	Fly ash	BOF 細粒料	抗裂粉體
12 M	1.00	0.45	1：4.215	238.41 (9.53)	238.41 (9.53)	2010.00 (80.37)	14.00 (0.56)
12 M	1.00	0.55	1：4.628	217.13 (8.83)	217.13 (8.83)	2010.00 (81.76)	14.00 (0.57)
12 M	1.00	0.65	1：5.042	199.34 (8.23)	199.34 (8.23)	2010.00 (82.97)	14.00 (0.58)
12 M	1.05	0.50	1：4.094	238.64 (9.76)	238.64 (9.76)	1954.14 (79.91)	14.00 (0.57)
12 M	1.05	0.60	1：4.477	218.25 (9.08)	218.25 (9.08)	1954.14 (81.27)	14.00 (0.58)
12 M	1.10	0.50	1：3.797	250.00 (10.36)	250.00 (10.36)	1898.28 (78.69)	14.00 (0.58)
12 M	1.10	0.60	1：4.151	228.65 (9.65)	228.65 (9.65)	1898.28 (80.11)	14.00 (0.59)
12 M	1.20	0.50	1：3.275	272.73 (11.63)	272.73 (11.63)	1786.56 (76.15)	14.00 (0.60)
12 M	1.20	0.60	1：3.581	249.43 (10.85)	249.43 (10.85)	1786.56 (77.70)	14.00 (0.61)
4 M	1.20	0.50	1：3.447	259.17 (11.18)	259.17 (11.18)	1786.56 (77.04)	14.00 (0.60)
6 M	1.20	0.50	1：3.394	263.20 (11.31)	263.20 (11.31)	1786.56 (76.78)	14.00 (0.60)
8 M	1.20	0.50	1：3.356	266.14 (11.41)	266.14 (11.41)	1786.56 (76.58)	14.00 (0.60)

由於無機聚合材料中，並未直接使用水，而是使用漿量（n 值）與液灰比來控制工作性，因此先選用水淬高爐石粉：F 類燃煤飛灰 = 5：5；鹼液濃度 12 M、液灰比（L/S）= 0.45、0.50、0.55、0.60、0.65 等 9 組配比（詳表 2 中鹼液濃度 12 M 之配比），進行冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚試壓，另由於轉爐石細粒料中仍含有粒徑較大的顆粒（No.4、No.8、No.16 號篩），故採用 35 MPa 的成型應力。試驗結果顯示，9 組配比均可成功製作冷壓型高壓地磚，如圖 2 所示。

其中漿量 1.00 n，液灰比 0.45 的配比較乾，組成材料間黏結力較不足，導致高壓地磚退模時容易缺角（見圖 3 (a)）；而漿量 1.20 n，液灰比 0.60 的配比較濕，於加壓成型過程容易產生壓密排水現象，且高壓地磚表面的細顆粒材料，容易因壓密排水現象而沾黏在模具上，導致高壓地磚表面平整性不佳（見圖 3 (b)）。

根據冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚試壓結果，並於齡期 6 天時，進行配比漿量 1.10 n，液灰比 0.5 高壓磚抗壓強度試驗，試驗結果高達 88.1 MPa，遠大於 CNS 13295 — 「高壓混凝土地磚」中 A 級抗壓強度之要求（抗壓強度平均值應在 65 MPa 以上，且不得有任一試樣測試值低於 59 MPa）。決定調降鹼液濃度，再考量轉爐石細粒料體積穩定性，故選定配比參數為：漿量 n = 1.20；水淬高爐石粉：F 類燃煤飛灰 = 5：5；鹼液濃度 4 M、6 M、8 M；液灰比（L/S）= 0.50（詳表 2），進行冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚製作（見圖 4），並進行相關性能測試。

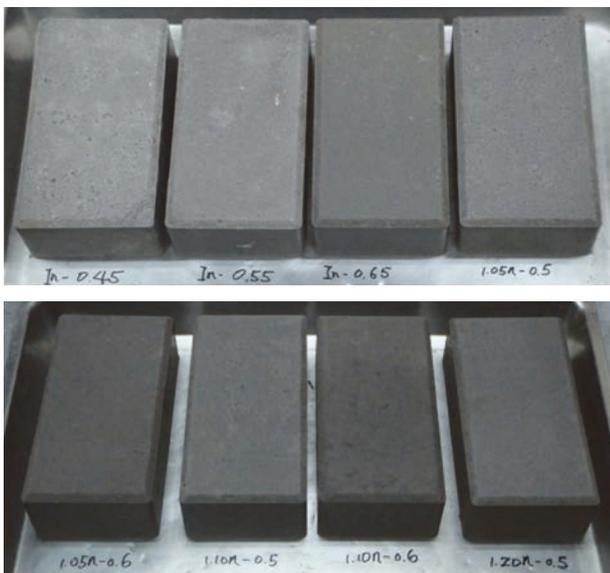


圖 2 冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚試壓結果-1

經相關性能測試結果顯示，採用鹼液濃度 6 M、8 M 的冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚，製作完成靜置 24 小時後的抗壓強度，即可符合 CNS 13295 — 「高壓混凝土地磚」中 B 級抗壓強度之要求，齡期 3 天時，即可達 A 級抗壓強度之要求；鹼液濃度 4 M 的冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚，齡期 1 天的抗壓強度，即可符合 C 級抗壓強度之要求，齡期 3 天時，可符合 B 級抗壓強度之要求，齡期 7 天時，亦可達 A 級抗壓強度之要求，如圖 5 所示。耐磨性亦均符合 CNS 13295 — 「高壓混凝土地磚」耐磨性之規定（見表 3），此結果亦印證無機聚合材料具備早強、高耐磨等特性。再



(a) 配比漿量 1.00 n，液灰比 0.45



(b) 配比漿量 1.20 n，液灰比 0.60



圖 3 冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚試壓結果-2



圖 4 不同鹼液濃度冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚成品

經超音波波速量測、熱壓膨脹試驗，及浸水體積穩定性觀測與長期觀測（截至目前已逾 2 年），均顯示冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚具有良好的體積穩定性；且冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚亦具備低熱傳導率與遠紅外線特性，未來可將其資源化成為更高值化的產品。

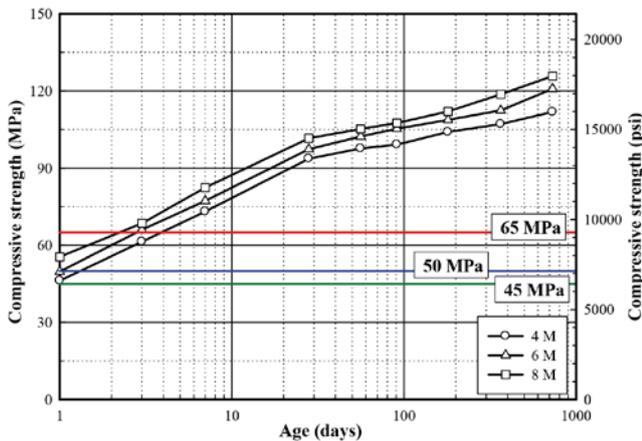


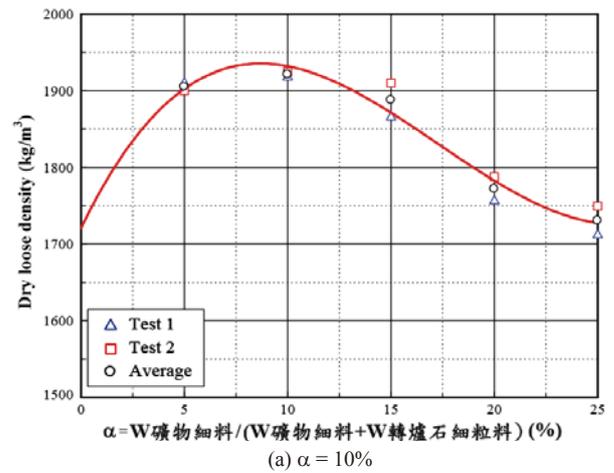
圖 5 冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚抗壓強度成長關係

表 3 冷壓型無機聚合轉爐石高壓地磚耐磨性試驗結果

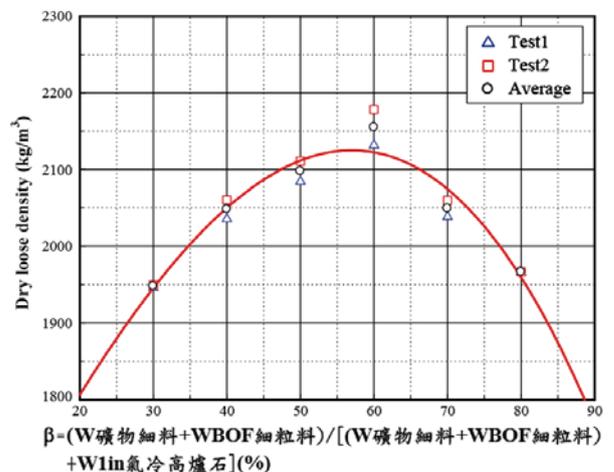
	4 M	6 M	8 M	CNS 13295 規範值
厚度磨耗平均值 (mm)	2.13	2.44	1.88	≤ 3.00
磨耗體積損失 Ac (cm ³ /50 cm ²)	10.67	12.22	9.40	≤ 15.00

爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土於人形砌塊之應用

爐石類副產物係指乾式製程的脫硫石礦物細料、轉爐石細粒料，及氣冷高爐石（粗粒料），首先根據爐石類副產物顆粒大小進行填塞堆積試驗，以求得骨材系統最大單位重，進而計算出骨材系統之最小空隙 (V_v)。其中先利用乾式製程的脫硫石礦物細料填塞轉爐石細粒料，求得最大單位重之填塞比例 (α) = 10%，脫硫石礦物細料與轉爐石細粒料再以此混合比例填塞氣冷高爐石，求得最大單位重之填塞比例 (β) = 60%，如圖 6 所示。採用上述推演後的緻密配比邏輯設計爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土配比，選用參數為：水淬高爐石粉：F 類燃煤飛灰 = 4：6；鹼液濃度 10M ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 1.28$; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 50$)、乾式製程的脫硫石礦物細料含水率 = 25.0 %、轉爐石細粒料含水率 = 7.50、8.75、10.00 %、未經含水率調整前液灰比 (L/S) = 0.575，爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土配比，如表 4 所示。



(a) $\alpha = 10\%$



(b) $\beta = 60\%$

圖 6 爐石類副產物填塞堆積試驗結果

表 4 爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土配比

配比編號	配比 (kg/m ³)					
	液灰比 L/S	Slag + Fly ash	1in 氣冷高爐石 (OD)	礦物細料 (OD)	BOF 細粒料 (OD)	BOF 細粒料 含水率
ASB_7.50	0.556	374.68	784.40	65.01	1,058.93	7.50 %
ASB_8.75	0.544	374.68	784.40	65.01	1,058.93	8.75 %
ASB_10.00	0.527	374.68	784.40	65.01	1,058.93	10.00 %

本應用旨在透過自走式造塊機，將爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土資源化作為可滿足現地使用性能需求的人形砌塊，因此配比設計完成後，先於實驗室根據自走式造塊機製程，採用模擬造塊機的自製模具，配合震動台製程進行試拌與試壓，試驗結果如圖 7 所示。

配比經試拌與試壓確認後，製作所有相關性質試驗所需試體，並進行相關性能測試。結果顯示，爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土抗壓強度均隨齡期持

續成長，且可滿足設計需求，如圖 8 所示。再經超音波波速量測、乾縮性質量測、熱壓膨脹試驗（見圖 9），及浸水體積穩定性觀測，均顯示爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土具有良好的體積穩定性。

爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土於實驗室進行試拌與試壓，及相關性能測試完成後，於 109 年 2 月 13 日經相關性能評估與成本考量，選用表 4 中 ASB_8.75 配比，進行實廠廠拌與採用自走式造塊機壓製爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土人形砌塊試驗，試驗結果如圖 10 所示。圖中顯示採用上述推演後的緻密配比邏輯所設計之爐石 / 飛灰基無機聚合

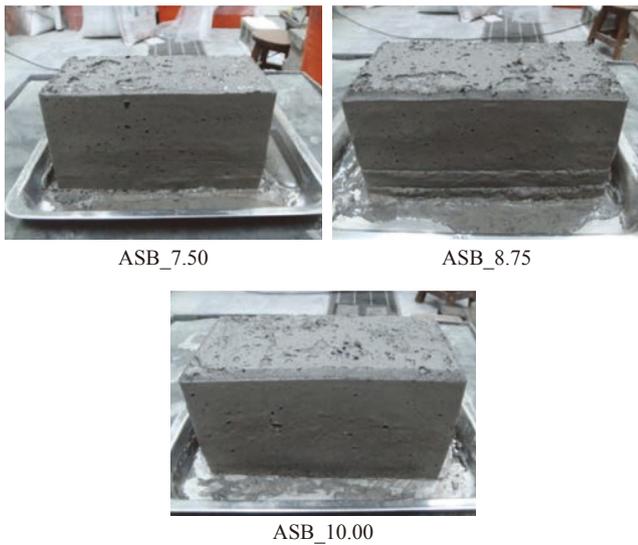


圖 7 爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土實驗室試壓結果

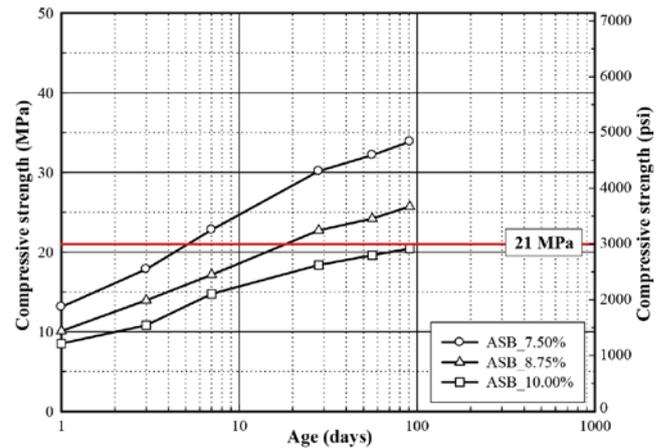


圖 8 爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土抗壓強度成長關係

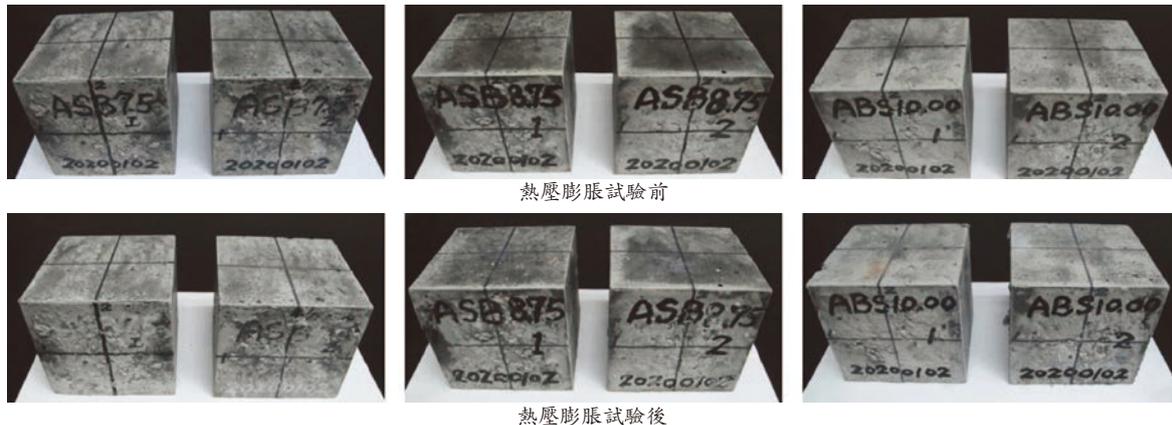


圖 9 爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土熱壓膨脹試驗結果



圖 10 實廠壓製之爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土人形砌塊

爐石類副產物混凝土，可透過自走式造塊機成功壓製人形砌塊。並製作試體，於齡期 28 天時進行熱壓膨脹試驗，試驗結果顯示爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土具備良好的體積穩定性（見圖 11）。



熱壓膨脹試驗前 熱壓膨脹試驗後

圖 11 實廠壓製之爐石 / 飛灰基無機聚合爐石類副產物混凝土熱壓膨脹試驗結果

結語

緻密配比邏輯係根據水泥系複合材料所發展，根據組成材料再演繹後的緻密配比邏輯，亦可適用於無機聚合材料的配比設計，雖然本文所舉二個應用實例，均屬零坍度的無機聚合物材料（砂漿或混凝土），使用者可經由漿量（ n 值）、液灰比（ λ ），及 F 類燃煤飛灰與水淬高爐石粉之使用比例（ θ ）來進行配比調整，調整後之無機聚合砂漿或混凝土的工作性亦可達到高坍度（ 200 ± 25 mm），甚至自充填砂漿（SCM）或自充填混凝土（SCC）的標準^[8]。經實驗室試拌與實廠廠拌驗證後發現，採用再演繹後的緻密配比邏輯所設計之無機聚合物材料配比，經實驗室試拌確認後，若實廠廠拌或量產時，組成原料有變化，可根據體積法進行配比修正調整之。本文根據緻密配比邏輯，推演一適合

無機聚合物材料配比設計方法，惟無機聚合物組成原料相當多元，使用者可以根據所採用的組成材料，依據本文所提出之配比設計邏輯進行推演並計算，再經體積驗算與試拌確認後使用之。

致謝

本文有幸獲得科技部 - 「轉爐石安定化新技術及其高值化循環製程開發 (1/2)」MOST 106-3114-E-027-001，「轉爐石安定化新技術及其高值化循環製程開發 (2/2)」MOST 107-2218-E-027-006，及中聯資源股份有限公司經費支持，方使本研究得以順利完成，謹此致謝。

參考文獻

1. Xu, H., Van Deventer, J.S.J. (2000), "The geopolymerisation of aluminosilicate minerals." *International Journal Minerals Process*, Vol. 59, pp. 247-266.
2. Schmücker, M. and Mackenzie, K.J.D. (2005), "Microstructure of sodium polysialatesiloxo geopolymer." *Ceramics International*, Vol. 31, pp. 433-437.
3. Hajimohammadi, A., Provis, J.L., and Van Deventer, J.S.J. (2008), "One-Part geopolymer mixes from geothermal silica and sodium aluminate." *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 47, pp. 9396-9405.
4. 黃兆龍，「混凝土性質與行為」，詹氏書局，台北，2002。
5. 蔡志達（黃兆龍指導），「水泥系複合材料緻密配比邏輯再演繹及其應用之研究」，博士論文，國立台灣科技大學營建工程系，台北，2005。
6. 鄭大偉、李韋嶸、林冠宇、蔡志達、吳佳正、張祖恩、林凱隆、陳貞光（2018），「煉鋼轉爐石之無機聚合安定化技術開發」，*鑛冶*，第 62 卷，第 4 期，第 52-69 頁。
7. Tsai, C.T. (2012), "Sintering of Ceramics - New Emerging Techniques: Chapter 5 Cold-Bonding Technique - A New Approach to Recycle Innocuous Construction Residual Soil, Sludge, and Sediment as Coarse Aggregates." Editor: Arunachalam Lakshmanan by InTech, ISBN 978-953-51-0017-1, Rijeka, Croatia.
8. 鄭大偉（2017），「低碳排放之無機聚合綠色水泥及混凝土製備研究 (2/4)」期末報告，經濟部礦務局 106 年度委辦計畫，台北。