



無機聚合混凝土在國內應用的實例

鄭大偉／國立臺北科技大學資源工程研究所 特聘教授

蔡志達／國立成功大學永續環境實驗所 副研究員

李韋皞／偕鼎科技股份有限公司 總經理

吳佳正／中聯資源股份有限公司 專業工程師

無機聚合混凝土 (Geopolymer Concrete) 是一種新興的材料，完全不使用波特蘭水泥，亦無需高溫製程，於常溫環境下即可硬固。其經常使用的原料為工業副產品的水淬高爐石粉、燃煤飛灰及配方的鹼性溶液混拌，並添加粗、細粒料即可製作無機聚合混凝土。除了不使用傳統波特蘭水泥為膠結材料外，其拌合的程序與設備均與傳統混凝土相似。縱使無機聚合混凝土擁有優異的特性，但現有無機聚合混凝土的標準及規範不足，也造成其發展緩慢的因素之一。目前所能蒐集到的規範或使用手冊僅有澳洲 Concrete Institute of Australia 所出版的「Geopolymer Recommended Practice Handbook (CIA Z16-2011)」^[1]；中國大陸軍方的「軍用機場無機聚合物混凝土道面施工及驗收規範 (GJB 8231-2014)」、「工程搶建搶修無機聚合物膠凝材料技術要求 (GJB 8236-2014)」^[2]；及本團隊協助經濟部礦務局所制定的「無機聚合綠色水泥及混凝土使用手冊」^[3]。再者，國內有關無機聚合混凝土的實際案例報導並不多，使得各界對此一新興材料之認知有限。援此，本文提出本團隊曾執行的大型實廠拌合試驗成果，與各界分享，期望能推廣此一綠色環保材料新知。

宜蘭冬山鄉共築幸福社區無機聚合混凝土實廠澆置試驗

本團隊於 106 年 10 月 6 日在宜蘭縣蘇澳鎮賓志預拌混凝土廠，進行爐石 / 飛灰基之無機聚合混凝土實廠生產。相關的配比如表 1 所示。在此次正式量產前，已於北科大實驗室與台北力泰建設企業股份有限公司 (汐止廠) 進行約 50 次試拌，並在賓志預拌混凝土廠進行六次廠拌試驗，每次拌含量 1.0 ~ 1.5 立方公尺的無機聚合混凝土，亦同時進行工作性 (初始與 45 分鐘後的坍度與坍流度) 與抗壓強度試驗，以期求得實際生產時必要之參數與產品特性。106 年 10 月 6 日共計量產 3 立方公尺的無機聚合混凝土。無機聚合混凝土拌合完成後以預拌混凝土車運送至 6 公里外新建中的「共築幸福社區」進行澆置。此社區係由九典聯合

建築師事務所宜蘭分所所長 - 陳尚鋒建築師所設計監造，同時陳建築師也是業主。現場實地澆置二座混凝土立柱及半面牆體，該牆體上半部則由傳統波特蘭水泥混凝土澆置而成，可同時測試無機聚合混凝土與其之相容性。試驗結果效果相當良好，各項工作性質與抗壓強度如表 2 所示。現場澆置的相片及近年相片如圖 1 至圖 6。

爐石 / 飛灰基無機聚合轉爐石砂漿實廠預鑄試驗

轉爐石具有硬度高、強度高及磨損率低等優秀之工程性質，作為天然骨材替代品相當具有潛力。轉爐石再利用上最大的問題在於含有轉爐煉鋼時添加之游離氧化鈣，遇水氣則會導致體積膨脹，造成應用上的

表 1 民國 106 年 10 月 6 日賓志預拌混凝土廠廠拌無機聚合混凝土配比表

體積 m ³	液灰比	爐石 / 飛灰基無機聚合混凝土組成材料用量 (kg)								總計 (kg)
		鹼液	爐石粉	燃煤飛灰	粗粒料		細粒料 (河砂)	抗裂粉體	緩凝劑	
					6分	3分				
3.0	0.48	550	570	570	405	2,310	2,670	60	192	7,327

表 2 無機聚合混凝土的工作性與抗壓強度

45 分鐘後工作性		抗壓強度 (kgf/cm ²)		
坍度 (mm)	坍流度 (mm)	7 天	28 天	56 天
270	550 × 570	130	220	320



圖 1 無機聚合混凝土 45 分鐘後的工作性 (攝於 2017/10/6)



圖 4 無機聚合混凝土牆體拆模後情形 (攝於 2017/10/28)



圖 2 無機聚合混凝土由預拌車卸至挖土機挖斗預備澆置 (攝於 2017/10/6)



圖 5 無機聚合混凝土牆體 (攝於 2019/5/7)



圖 3 無機聚合混凝土澆置完成的牆體 (攝於 2017/10/6)



圖 6 無機聚合混凝土牆體 (攝於 2020/2/12)

限制。經本團隊實驗室等級測試發現，無機聚合材料可安定化轉爐石，探究其原因，為無機聚合材料富含游離矽膠，可與轉爐石中游離 CaO 或 MgO 反應，而形成穩定的矽酸鈣（鎂）化合物，因此可有效的抑制轉爐石的膨脹行為^[4]。為了驗證技術可跨出實驗室而實施於實際量產上，在科技部與中聯資源股份有限公司的支持下，於 2017 年至 2019 年間進行數次大型廠拌試驗。試驗主要以未安定化處理過的轉爐石細粒料（小於 4 號篩）、水淬高爐石粉、燃煤飛灰及鹼性溶液拌合成爐石 / 飛灰基無機聚合轉爐石砂漿，再進行預鑄製品生產，每次廠拌試驗拌合量約 1.0 ~ 1.5 立方公尺，而使用之預鑄模具為一立方公尺擋料塊及紐澤西護欄。每一次廠拌試驗除製作圓柱抗壓試體進行強度追蹤，並在特定齡期直接對所澆置的一立方公尺擋料塊及紐澤西護欄進行鑽心強度量測，以觀察其抗壓強度變化。此外最重要的，試體採用 CNS 1258（卜特蘭水泥熱壓膨脹試驗法）標準方法，在高壓釜中以 215°C、

2.0 MPa 壓力條件蒸煮 3 小時，並觀察試體的體積穩定性及是否有爆裂的現象。試驗結果顯示，蒸煮過的試體均完整無缺，體積變化率均在 0.5% 之內，而實驗室測試中，傳統卜特蘭水泥轉爐石砂漿試體經蒸煮後試體完全粉化崩解，此可證實無機聚合技術確實有安定化轉爐石的效果。

107 年 7 月 23 日實廠廠拌試驗的配比如表 3 所示。燃煤飛灰與爐石粉比例為 5 : 5，灰砂石比為 1 : 2.936。實驗結果顯示，實廠拌製 1.5 立方公尺的爐石 / 飛灰基無機聚合轉爐石砂漿，其坍度達 260 mm，坍流度達 380 × 390 mm，顯示新拌性質工作性尚佳，如圖 7 所示。其 1 天的抗壓強度即可達 209 kgf/cm²，28 天的抗壓強度可達 416 kgf/cm²。經 CNS 1258 標準高壓蒸煮後，其抗壓強度可上升至 454 kgf/cm²，且試體外觀良好，試體的體收縮率 0.41%。實廠廠拌試驗之抗壓強度及熱壓膨脹試驗結果如表 4 所示。實廠廠拌並製成擋料塊及紐澤西護欄的結果如圖 8 所示。

表 3 民國 107 年 7 月 23 日實廠廠拌試驗配比（爐石粉：燃煤飛灰 = 5 : 5）

體積	L/S	灰砂比	無機聚合轉爐石砂漿組成材料用量 (kg)					總計 (kg)	
			鹼液	爐石粉	燃煤飛灰	轉爐石細料	轉爐石含水率 %		水
1.5 m ³	0.5	1 : 2.9	374	375	375	2,400	9	20	3,544

表 4 民國 107 年 7 月 30 日實廠廠拌試驗之抗壓強度及熱壓膨脹試驗結果

測試項目 / 日期	抗壓強度 (kgf/cm ²)					熱壓膨脹試驗	膨脹率 %
	1 天	3 天	7 天	28 天	28 天熱壓後	28 天	28 天
無機聚合轉爐石砂漿 / 107-7-30	209	334	375	416	454	良好	-0.41

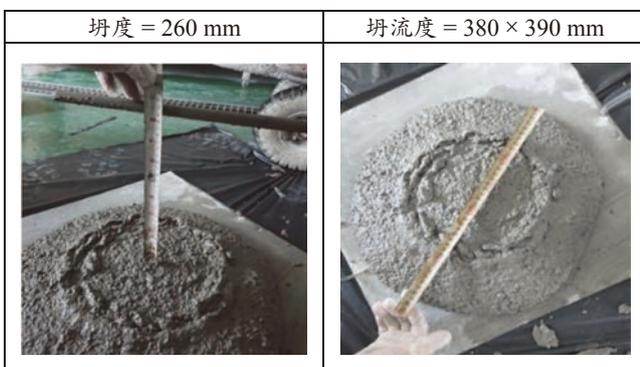


圖 7 燃煤飛灰與爐石粉比例為 5 : 5 廠拌試驗之新拌性質



圖 8 預拌廠實廠廠拌並製成擋料塊及紐澤西護欄的情形

107年9月27日進行第二次實廠廠拌試驗的配比如表5所示。此次試驗改變爐石粉與燃煤飛灰比例為4:6，同時降低鹼液使用量。實驗結果顯示，實廠拌製1.5立方公尺的爐石/飛灰基無機聚合轉爐石砂漿，其坍度達235 mm，坍流度達360×370 mm，顯示新拌性質工作性佳，如圖9所示。其7天的抗壓強度即可達190 kgf/cm²，28天的抗壓強度可達306 kgf/cm²，56天的抗壓強度可達441 kgf/cm²，以齡期28天的試體經CNS 1258標準高壓蒸煮後，其抗壓強度可上升至350 kgf/cm²，且試體外觀良好。此次實廠廠拌試驗之抗壓強度及熱壓膨脹試驗結果如表6所示。

無機聚合砂漿實廠廠拌及北科大設計館屋頂防水工程

108年10月5日在力泰建設企業股份有限公司（汐止廠）協助下，進行爐石/飛灰基無機聚合砂漿量產，

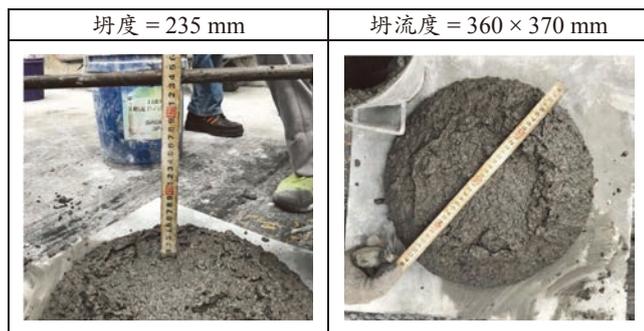


圖9 爐石粉與燃煤飛灰比例為4:6廠拌試驗之新拌性質

共計生產12立方公尺。每立方公尺爐石/飛灰基無機聚合砂漿的配比表如表7所示。拌合完成的無機聚合砂漿，分別由二台預拌混凝土車由汐止運送至約18公里外的臺北市大安區臺北科技大學，運輸時間約為30分鐘，再由泵送車泵送至設計館九樓屋頂進行防水層鋪設工程，如圖10、圖11所示。無機聚合砂漿運送至臺北科技大學後所測試無機聚合砂漿之工作性質如圖12所示。其坍度達260 mm，坍流度達430×410 mm，顯示工作性質良好。其3天的抗壓強度95 kgf/cm²，7天的抗壓強度356 kgf/cm²，28天的抗壓強度達399 kgf/cm²。不同齡期的抗壓強度如表8所示。北科大現地澆置工程完工相片如圖13。



圖10 無機聚合砂漿在力泰預拌廠拌合情形

表5 民國107年9月27日實廠廠拌試驗配比
(爐石粉:燃煤飛灰=4:6)(鹼液使用量降低)

體積	L/S	灰砂比	無機聚合轉爐石砂漿組成材料用量 (kg)						總計 (kg)
			鹼液	爐石粉	燃煤飛灰	轉爐石細料	轉爐石含水率 %	水	
1.5 m ³	0.37	1:3.4	228	270	400	2,370	5	264	3,532

表6 民國107年9月27日實廠廠拌試驗之抗壓強度及熱壓膨脹試驗結果

測試項目 / 日期	抗壓強度 (kgf/cm ²)				熱壓膨脹試驗	膨脹率 %
	7天	28天	28天熱壓後	56天	28天	28天
無機聚合轉爐石砂漿 /107-9-27	190	306	350	441	良好	未量測

表7 民國108年10月5日力泰預拌混凝土廠廠拌爐石/飛灰基

無機聚合砂漿每立方公尺配比表

體積 m ³	L/S	灰砂比	爐石/飛灰基無機聚合砂漿配比 (kg)						總計 (kg)	
			鹼液	爐石粉	燃煤飛灰	細粒料	細粒料含水率 %	抗裂粉體		水
1.0	0.43	1:2.75	200	230	230	1,403	7	14	149	2,226



圖 11 無機聚合砂漿在北科大現場泵送情形

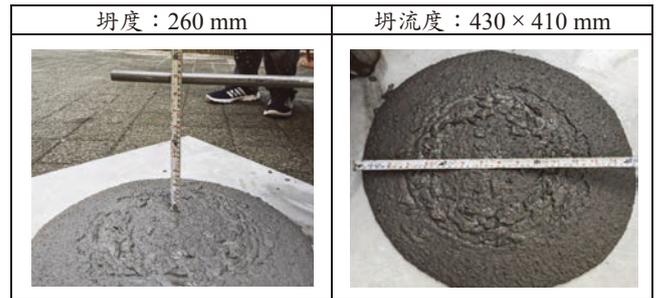


圖 12 爐石 / 飛灰基無機聚合砂漿之 45 分鐘後工作性質

表 8 爐石 / 飛灰基無機聚合砂漿的新拌性質與抗壓強度

測試項目	抗壓強度 (kgf/cm ²)		
	3 天	7 天	28 天
爐石 / 飛灰基無機聚合砂漿	95	356	399



圖 13 無機聚合砂漿在北科大設計館屋頂防水工程施工及完工情形

結語

近年來隨著極端氣候的頻繁出現，節能減碳已成為全世界關注的重要議題，傳統水泥的製造不僅耗能，亦產生大量的二氧化碳。無機聚合混凝土組成材料使用多種工業廢棄物或副產品，包括燃煤飛灰、水淬高爐石粉等，不需經過高耗能之高溫生產程序，常溫環境下即可產製，可運用於結構性或非結構性之建築構件上，其生產建立在資源回收與循環再利用的基礎上，符合循環經濟的精神與效益。傳統水泥具有悠久的歷史，其研究基礎及產業鏈結穩固。惟目前礦山的開發受環境保護議題的影響漸趨困難，若傳統水泥原料開採受限而致減產，勢必影響各項產業供需。無機聚合混凝土不僅可將廢棄物有效資源化，亦可填補傳統水泥需求之缺口。期待未來國內能有更多的相關研究投入，盡速達到產業化的目標。

致謝

本文的無機聚合混凝土各項實廠大型試驗，全因相關業界人力及設備的全力支持才得以完成。相關協助的工程前輩包括（以筆畫順序）：九典聯合建築師事務所宜蘭分所 陳尚鋒建築師、力泰建設企業股份有限公司、中聯資源股份有限公司、均利科技股份有限公司、欣得實業股份有限公司、賓志有限公司，在此特別致謝！

參考文獻

- Concrete Institute of Australia, 2011, Geopolymer Recommended Practice Handbook (CIA Z16-2011). <https://www.concreteinstitute.com.au/News/National/Release-of-Z16-Geopolymer-Recommended-Practice-H.aspx>
- 曹定國、李建舉、曹海林、蔡良才（2015），快凝早強無機聚合混凝土研究及應用，北京，科學出版社。
- 經濟部礦務局（2019），無機聚合綠色水泥及混凝土使用手冊。
- 鄭大偉、李韋曠、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，62 卷，第 4 期，第 55-69 頁。