

壓電水泥監測三維列印水泥砂漿的列印性質和有效監測頻率

薛健龍¹ 潘煌鏗² 林政憲³ 鄭祐紳³ 張凱宸³ 鍾雋³ 楊鑫權³

摘要

為監測三維列印混凝土(3DCP)的列印性質，本研究使用與混凝土性質相近的壓電水泥感測器(piezoelectric cement sensor, PEC sensor)進行三維列印混凝土的機電阻抗(electromechanical impedance)量測，以尋出適用於在三維列印混凝土之有效觀測頻率段。壓電感測器的感測元件(sensing element)是由體積各 50%的鋇鈦酸鉛(PZT)和水泥混合的水泥基壓電複合材料製成，在三維列印水泥砂漿的列印過程，於第一層與第二層間埋設感測器，並於列印至第五層後，每隔 20 分鐘進行機電阻抗頻譜掃描，以觀測有效頻率範圍段，以便監測混凝土列印之開放時間(open time)和可建造性(buildability)。試驗結果顯示，三維列印混凝土配比的開放時間(open time)為流度值介於 240 mm 至 170mm，約為拌合加入水後的 120 分鐘內；可建造性(buildability)的印列高度變化率為 85 %至 90 %，若增加層間的列印時間，可提高印列高度變化率。有效的監測頻率在無纖維的列印砂漿是 580 - 1000 kHz，而 0.3%纖維的列印砂漿為 500 - 1000 kHz，表示在這個頻率範圍可以用來監測三維水泥砂漿。

關鍵詞：三維列印混凝土、壓電水泥、感測器、監測頻率、非破壞檢測

一、前言

三維列印(3D Print)近年來蓬勃發展，以電腦繪製物構造，再利用機器層層堆疊而成之技術。近年土木相關行業亦開始投入該技術，所使用之漿體須具備良好的流動性，足夠列印之可工作時間，不易變形之形狀保持能力。應用於結構物和材料之非破壞監測(Nondestructive testing, NDT)方法有許多，隨著壓電材料發展，利用機電阻抗(electromechanical impedance, EMI)進行非破壞監測方法亦被廣泛使用，可運用於三維列印中[1]。

本研究使用鋇鈦酸鉛(PZT)與水泥製成的壓電水泥來監測三維列印混凝土，這裡的三維列印混凝土是用水泥砂漿。壓電水泥是使用體積各 50%的

鋇鈦酸鉛和水泥混合的水泥基壓電複合材料。為尋找合適監測頻率，以便將來使用與混凝土性質相近的壓電水泥感測器進行機電阻抗量測，達非破壞監測之目的。

二、列印設備

本試驗使用台灣 Everplast 公司製造的三維水泥列印機(如圖 1)，列印範圍為 500×500×500 mm。進行列印前須確保機器濕潤，並於列印前使漿體順料，以確保列印過程中漿體之一置性，本試驗列印使用直徑 15 毫米之圓型噴嘴，擠出倍率 30

¹ 國立高雄科技大學 土木工程系 大學生 C108141215@nkust.edu.tw

² 國立高雄科技大學 土木工程系 教授 pam@nkust.edu.tw

³ 國立高雄科技大學 土木工程系 大學生

rpm，擠出速度為 8 cm/sec。



圖 1. 列印設備

三、配比設計

為製造符合三維列印要求之水泥砂漿，參考 Yu 等人[2]所使用之配比，並經過試拌後，配比添加飛灰以及強塑劑，以提高漿體流動性，並使用黏度改性劑以及纖維，加強形狀保持能力，配比如表 1 所示，而所有配比均添加不同體積比(0.5%；0.3%，0%)之纖維。

表 1. 配比設計表

單位 (kgf/m ³) ¹	Cement ²	SAG ³	FA ⁴	F _{agg} ⁵	VMA ⁶	SP ⁷	Water ⁸
M1 ¹	576 ²	45 ³	531 ⁴	460 ⁵	1.16 ⁶	5.81 ⁷	322 ⁸
M2 ¹	576 ²	45 ³	531 ⁴	460 ⁵	1.16 ⁶	8.72 ⁷	322 ⁸
M3 ¹	576 ²	45 ³	531 ⁴	460 ⁵	0 ⁶	5.81 ⁷	322 ⁸
M4 ¹	576 ²	45 ³	531 ⁴	460 ⁵	0 ⁶	8.72 ⁷	322 ⁸

四、試驗方法

4.1 流度試驗

為確保列印時水泥砂漿於機器中能夠順利輸送不造成阻塞，依 CNS 15992 水泥砂漿流度試驗法進行量測其流度值，將拌合後的漿體置於上圓和下圓之直徑分別為 70 mm 和 100 mm，高度為 50 mm 的錐體，分兩次搗實，再經 25 下震動後移除錐體，量測其擴散圓

直徑(流度值)。以材料於開始加水時間 T = 0，在 T = 20 分鐘開始，每 20 分鐘進行流度台試驗至 T = 100 分鐘為止。

4.2 形狀保持試驗

為確保於三維列印過程中，水泥砂漿堆疊時不易造成坍塌變形，故進行形狀保持試驗。漿體於拌合完成後分兩次搗實，置於水泥砂漿流度試驗之錐形內，錐體脫模後並在漿體上方放置 800 公克(gf)的重物，靜置 24 小時後量測其高度變化。試驗時間是於 T = 20 分鐘開始，每 20 分鐘進行形狀保持試驗，直至 T = 100 分鐘為止。

4.3 擠出試驗

欲確定三維列印水泥砂漿的可工作時間，參考 Le 等人[3]方法，於材料拌合加水後，T = 20 分鐘開始進行擠出試驗，每 20 分鐘使用口徑 15 mm 噴嘴擠出長度 4500 mm 的漿體，連續擠出細條至無法擠出為止，以不斷裂，不阻塞和不造成拖移，來判斷是否成功的標準。

4.4 有效觀測頻率

在三維列印水泥砂漿的列印過程，於第一層與第二層間埋設 PEC 感測器，並於列印至第五層後，每隔 20 分鐘進行機電阻抗頻譜掃描，至 180 分鐘，總有 5 個頻譜圖，觀測有效頻率範圍段。

五、實驗結果

5.1 水泥砂漿流度

配比 M1 是有添加黏度改性劑及 1% 強塑劑的漿體，流度值結果(如圖 2)所示。依漿體的試驗時間(20、40、60、80 及 100 分鐘)，未添加纖維的擴散直徑依序是(250 mm、240 mm、235 mm、220 mm 及 205

mm)，其流度介於為 150% - 105% 同理，含 0.3% 纖維的漿體之流度 146% - 75%，含 0.5% 纖維的漿體之流度為 125% - 70%，顯示添加纖維會降低漿體流動性，且時間增加流度值也會降低。

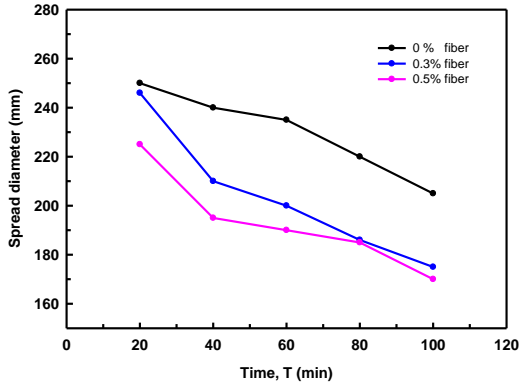


圖 2. 配比 M1 擴散圓直徑與時間關係圖

配比 M2 是有添加黏度改性劑及 1.5% 強塑劑的漿體，其結果(如圖 3)。未添加纖維的擴散直徑隨試驗時間增加依序是 255 mm、250 mm、235 mm、220 mm 及 210 mm，流度介於為 155% - 110%，與圖 7 的 M1 配比相比，M2 配比的流度有增加的趨向，且有添加 0.3% 和 0.5% 纖維的配比也有類似趨向。可以得知強塑劑的添加量有助於提高漿體流動性。

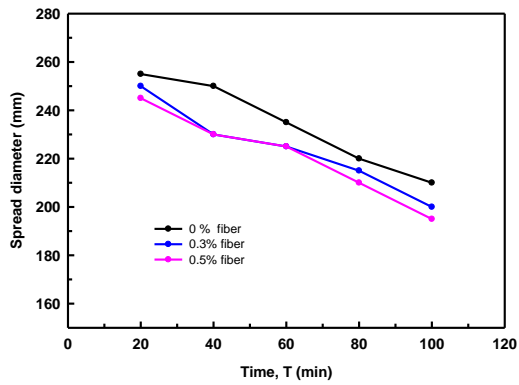


圖 3. 配比 M2 擴散圓直徑與時間關係圖

未添加黏度改性劑的 M3 配比和 M4 配比是分別添加 1% 和 1.5% 強塑劑，其流度試驗結果(如圖 4 和圖 5)。可以看出流度相較於 M1 以及 M2 高，因此添加黏度改性劑，會提高漿體黏度，將低其流動性。

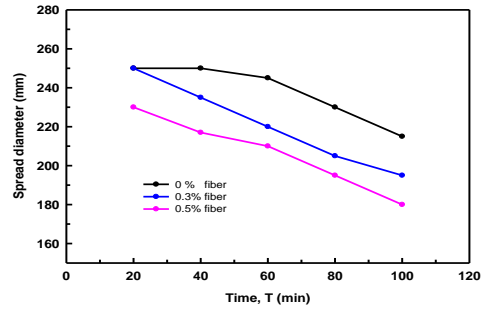


圖 4. 配比 M3 擴散圓直徑與時間關係圖

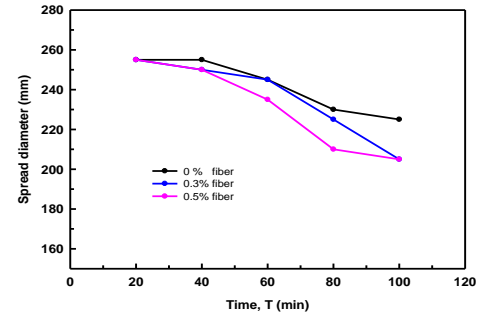


圖 5. 配比 M4 擴散圓直徑與時間關係圖

5.2 形狀保持試驗

比較相同強塑劑添加量之配比之高度損失率，(M1；M3)以及(M2；M4)以觀察黏度改性劑對於形狀保持能力的影響。由(圖 6 及圖 7)可看出未添加黏度改性劑之漿體，形狀保持能力相對較低。故不納入參考。

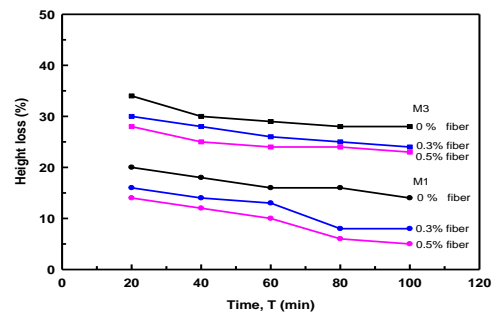


圖 6. 配比 M1 和 M3 的高度損失率

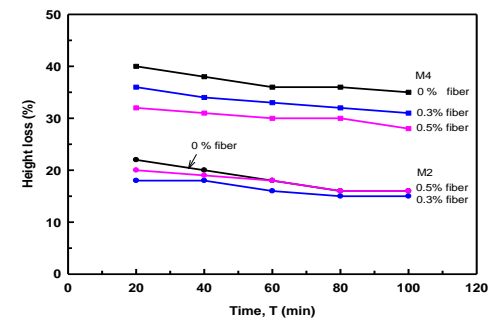


圖 7. 配比 M2 和 M4 的高度損失率

5.3 擠出試驗

由於配比 M2; M3, M4 流度過高, 黏度太低, 無法成形, 故選擇 M1 進行試驗。添加 0.5% 纖維之漿體造成機器阻塞, 故失敗。無添加纖維之漿體, 至 140 分鐘無法擠出, 可工作時間為 $T = 20 - 140$ 分鐘。添加 0.3% 纖維之漿體, 至 120 分鐘無法擠出, 可工作時間為 $T = 20 - 120$ 分鐘。

5.4 有效觀測頻率

無纖維(圖 8)的列印水泥砂漿在 580 - 1000 kHz 的電導有隨量測時間增加而增加, 表示在這個頻率範圍可以用來監測三維水泥砂漿, 是有效監測頻率; 而 0.3% 纖維的列印水泥砂漿有效頻率在 500 - 1000 kHz, (圖 9)。

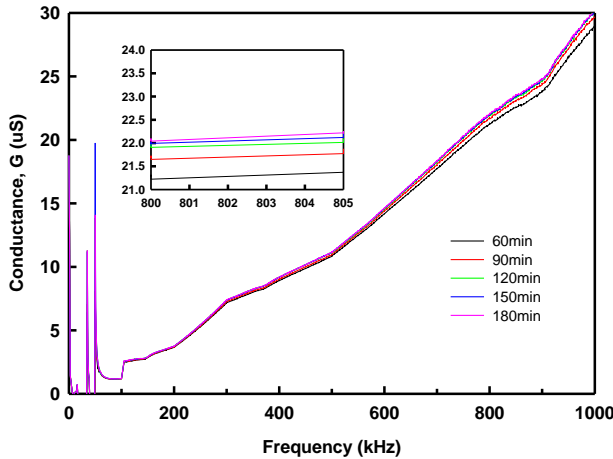


圖 8. 無纖維配比的電導頻譜

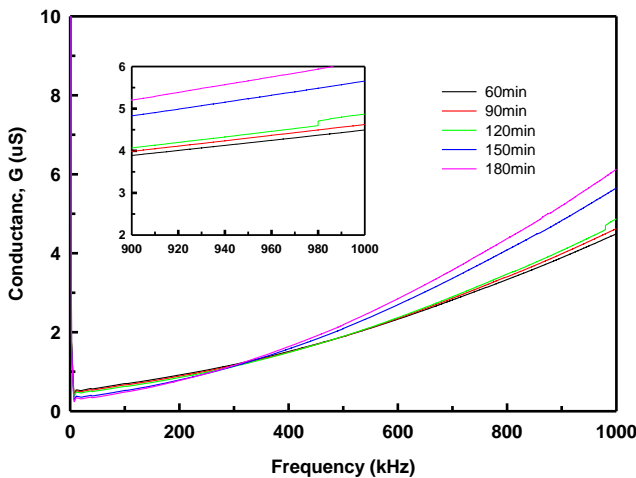


圖 9. 0.3% 纖維配比的電導頻譜

六、結論

1. 隨著強塑劑的添加量增加, 流度亦會有所提升, 而形狀保持能力卻有所下降。
2. 黏度改性劑的添加有助於提高形狀保持能力, 卻會降低漿體流度。
3. 纖維的添加量會影響漿體是否在列印過程中能夠順利擠出。
4. 無纖維的列印砂漿的有效監測頻率是 580 - 1000 kHz, 而 0.3% 纖維的列印砂漿為 500 - 1000 kHz。

致謝

本研究感謝中華民國科技部

MOST110-2221-E-992-016-MY3 支持。

參考文獻

1. G. Ma, Y. Li, L. Wang, J. Zhang, Z. J. Li, Real - time quantification of fresh and hardened mechanical property for 3D printing material by intellectualization with piezoelectric transducers, *Constr. Build. Mater.* 241 (2020) 117982.
2. K. Yu, W. McGee, T. Y. Ng, H. Zhu, V. C. Li, 3D - printable engineered cementitious composites (3DP - ECC): Fresh and hardened properties, *Cem. Concr. Res.* 143 (2021) 106388
3. T. T. Le, S. A. Austin, S. Lim, R. A. Buswell, A. G. F. Gibb, T. Thorpe, Mix design and fresh properties for high - performance printing concrete, *Mater. Struct.* 45 (2012) 1221-1232.