

## 以鋯鈦酸鉛感測器監測三維列印混凝土列印性質

薛健龍<sup>1</sup> 潘煌鏗<sup>2</sup> 鄭祐紳<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立高雄科技大學 土木工程系 研究生, F112141115@nkust.edu.tw

<sup>2</sup> 國立高雄科技大學 教授, [pam@nkust.edu.tw](mailto:pam@nkust.edu.tw)

<sup>3</sup> 國立高雄科技大學 土木工程系 研究生

### 摘要

本研究是使用鋯鈦酸鉛(lead zirconia titania, PZT)製成的壓電感測器(piezoelectric sensor)來監測三維列印混凝土的列印性質，三維列印混凝土的列印性質需滿足可建造性(buildability)、可擠出性(extrudability)和開放時間(open time)，將 PZT 壓電感測器埋設在三維列印混凝土漿體內，感測器的阻抗與電導頻譜會隨漿體的水化作用產生改變，可找出適合三維列印的監測有效頻率段。試驗結果顯示，三維列印混凝土可建造性的傾斜角度變化在 0.8–4.5°，可擠出性的時間為材料加水後 60–120 min，此時漿體的流動度值為 177–255 mm，靜態降伏應力(static yield stress)為 2.448–6.821 kPa。利用漿體隨時間增加，因水化作用的水分逐漸消耗，導致三維列印混凝土的電導逐漸下降或阻抗逐漸增加的特性，可找出 PZT 感測器的有效監測頻率範圍約在 150–200 kHz 的較低頻率段及 1150–1200 kHz 的高頻率段。有效頻率內的阻抗與電導均以均方根偏差(root-mean square deviation, RMSD)計算後，與流動度值及靜態降伏應力比較，顯示採用阻抗及電導 RMSD 能夠反映三維列印混凝土的列印性質，印證壓電感測器可用於監測三維列印混凝土列印性質。

**關鍵字:** 三維列印混凝土、壓電感測器、監測頻率、即時監測

### 一、前言

三維列印混凝土(3-D print concrete)技術，其原理是混凝土(砂漿材料)藉由列印機器的噴嘴依事前所繪製的圖形(構造型式)逐層列印堆疊。由於混凝土漿體在列印堆疊過程沒有側向模板支撐，所列印構造物之抵抗變形能力只能由漿體本身特性去承受。因此，三維列印混凝土的配比要求有其特殊性<sup>[1, 2]</sup>，必須確保於機器列印過程中能順利擠出以及不造成堵塞，同時在逐漸堆疊過程中需能承受上層列印漿體之自重，以免造成列印漿體有過大變形。

在三維混凝土列印過程中，為即時確保漿體性質具可工作性，本研究針對三維列印混凝土之列印性質進行非破壞監測研究，以鋯鈦酸鉛(PZT)製成壓電感測器，並埋設於三維列印混凝土漿體來量測其阻抗及電導頻譜圖，同時進行混凝土新拌性質試驗並與三維列印混凝土的電導頻譜進行對照，可找出具可靠性能用於監測列印性質的有效頻率範圍，利用該頻率範圍可用來發展三維列印混凝土列印性質之即時監測技術<sup>[3]</sup>。

### 二、試驗規劃

#### 2.1 感測器製作

本研究使用未極化之鋯鈦酸鉛陶瓷材料，經以 1.5 kV 電場極化後可製成具壓電性質

之 PZT 壓電元件(element)。為使感測元件不受外部環境干擾，需先對感測元件進行封裝處理。封裝時使用銅膠帶作為導線，以常溫銀膠與感測元件進行連接，並使用環氧樹脂與熱縮套進行封裝處理，經過封裝之壓電元件成為壓電感測器。

## 2.2 材料與配比

三維列印混凝土使用第一型卜特蘭水泥、飛灰以及爐石作為膠結材，並添加減水率 25 % 之羧酸系強塑劑以改善其流動性。為確保列印過程中能順利擠出，粒料使用最大粒徑 300  $\mu\text{m}$ 、平均粒徑 100  $\mu\text{m}$  的河砂；為強化可建造性，添加黏度 10,000 p 之羧甲基纖維素鈉作為黏度改性劑(viscosity modifying admixture, VMA)<sup>[4]</sup>，及細長比為 200 的聚丙烯纖維來增強結構穩定性。三維列印混凝土配比以重量法進行設計，水膠為 0.28，漿體(膠結材與水之重量)與砂之比例為 1.3，飛灰與爐石分別取代水泥之 20 wt.% 以及 10 wt.%，強塑劑添加量為水泥之 1.25 wt.%，黏度改性劑添加則為膠結材之 0.15 wt.%，纖維為額外添加體積之 0.5 %。

## 2.3 列印性質試驗

### 2.3.1 水泥砂漿流度試驗

為確保列印的漿體能順利擠出，依照 ASTM C1437 水泥砂漿流度試驗法量測其流度(擴散圓直徑)，將拌合好之三維列印混凝土將體置於上圓 70 mm，下圓 100 mm，高為 50 mm 之圓錐模具中，移除模具，經 25 下震動後量測其擴散圓直徑。以膠結材與水混合時間為  $t=0$ ，在  $t=60$  min 開始，每 15 分鐘進行流度試驗至  $t=150$  min 為止。

### 2.3.2 靜態降伏應力試驗

三維列印混凝土的擠出性以及可建造性與其材料的靜態降伏應力有關，於上圓 65 mm，底圓為 75 mm，深度為 40 mm 之圓錐形模具中，以直徑  $R$  為 10 mm 之維卡針記錄其 30 秒貫入深度  $h$ ，並計算漿體的靜態降伏應力  $\tau$ <sup>[5]</sup>，計算公式如下：

$$\tau = \frac{3}{2\pi Rh} \quad (1)$$

在  $t=60$  min 開始，每 15 分鐘量測貫入深度至  $t=150$  min 為止。

### 2.3.3 可建造性試驗

為確保三維列印混凝土具有可建造性，列印尺寸為 80×300×80 mm 之試體，在試體硬化後量測其頂層(第 8 層)長度  $B_8$ 、底層(第 1 層)長度  $B_1$  及高度  $h$ ，三維列印混凝土試體傾斜角  $\theta$  如下：

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{B_8 - B_1}{h}\right) \quad (2)$$

為比較不同列印時間之可建造性，在  $t=60$  min 開始，每 15 分鐘列印相同尺寸之試體至無法列印為止，計算試體的傾斜角  $\theta$ 。

### 2.3.4 連續擠出試驗

為保證列印品質，依照 Le *et al.* (2012) 提出之連續擠出性質試驗方法<sup>[6]</sup>，於  $t=60$  min 進行擠出試驗，以直徑 15 mm 噴嘴，每 15 分鐘擠出長度為 4,500 mm 之三維列印試體(長條狀)，直至無法擠出為止，以長條試體不斷裂、不阻塞和不造成拖移，來判斷開

放時間的標準。

### 2.4 監測指標

將 PZT 感測器置於流度試驗試體模具中，以  $t = 45 \text{ min}$  作為基準點， $t = 60 \text{ min}$  開始每隔  $15 \text{ min}$  量測阻抗及電導頻譜圖，直至  $150 \text{ min}$  止。將所量測阻抗及電導頻譜圖值進行 RMSD 計算，如下：

$$X_R = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_0)^2}{\sum X_0^2}} \quad (3)$$

其中  $X_R$  為阻抗或電導之 RMSD 值， $X_i$  不同時間阻抗或電導頻譜值， $X_0$  為  $t = 45 \text{ min}$  阻抗或電導頻譜值。

## 三、結果與討論

### 3.1 水泥砂漿流度

流度試驗結果如圖 1 所示，於  $t = 60 \text{ min}$  至  $t = 150 \text{ min}$  之擴散圓直徑為  $177 \text{ mm} - 225 \text{ mm}$ ，流度值介於  $77 - 125 \%$ 。三維列印混凝土因添加黏度改性劑，導致其流度下降幅度明顯，因此添加適量強塑劑增加漿體本身可列印性。

### 3.2 靜態降伏應力

圖 2 顯示為以維卡針貫入深度計算三維列印混凝土靜態降伏應力之結果，應力值為  $2.448 - 6.821 \text{ kPa}$ ，受強塑劑影響  $t = 60 - 120 \text{ min}$  變化較小，隨時間漿體逐漸水化，並由於添加黏度改性劑提高漿體黏度，導致靜態降伏應力上升，於  $t = 135 \text{ min}$ ，增加至  $3.6 \text{ kPa}$ 。由於靜態降伏應力與漿體之可擠出性有關，推測  $t \geq 135 \text{ min}$  無法順利列印。

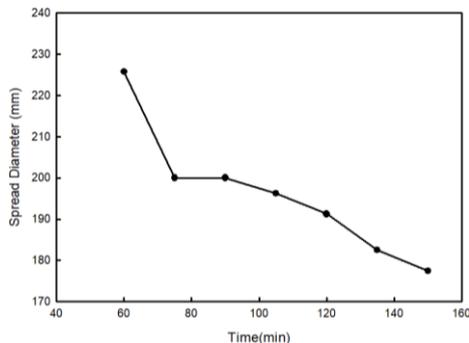


圖 1. 時間-擴散圓直徑

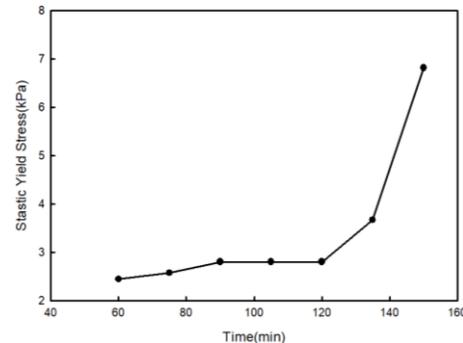


圖 2. 時間-靜態降伏應力

### 3.3 連續擠出性

漿體在  $t = 60 - 120 \text{ min}$  仍為可列印時間範圍，但在  $t = 135 \text{ min}$  列印情形因靜態降伏應力增加導致其無法順利擠出，列印之細長條產生列印斷裂，粗細不一致等情形(圖 3)，判斷  $t \geq 135 \text{ min}$  無法繼續列印，與靜態降伏應力推測結果相同。

### 3.4 可建造性

圖 4 為列印時間  $t$  與試體傾斜角  $\theta$  關係，在  $t = 60 \text{ min}$  之  $\theta$  值為  $4.5^\circ$ ，在  $t = 120 \text{ min}$ ， $\theta$  值為  $0.7^\circ$ ，這是因為靜態降伏應力隨著時間增加，導致  $\theta$  值逐漸降低。



圖 3.  $t = 135 \text{ min}$  連續擠出列印外觀

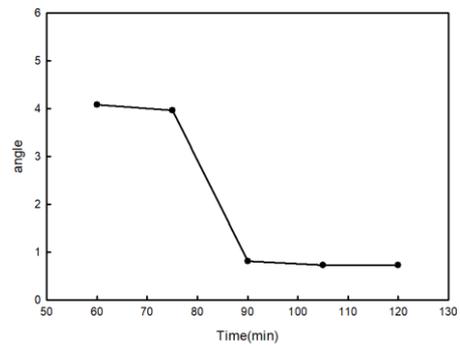


圖 4. 不同時間傾斜角  $\theta$  值

### 3.5 適用頻率

圖 5-圖 8 為感測器(PZT-01 和 PZT-02)埋設於三維列印混凝土漿體所量測的阻抗及電導頻譜圖，隨水泥水化作用增加，於特定頻率段(有效頻率)的電阻逐漸增加，阻抗值跟著上升，而由於電導與電阻互為倒數關係，於是電導值逐漸下降，各感測器具符合上述規律的有效頻率段(適用頻率)如表 1 所示。

表 1. 監測三維列印混凝土的適用頻率

感測器編號	阻抗頻譜	電導頻譜
PZT-01	168 - 173 kHz	168 - 174 kHz
	1160 - 1180 kHz	1110 - 1120 kHz
PZT-02	34 - 398 kHz	169 - 231 kHz
	1160 - 1190 kHz	1170 - 1190 kHz

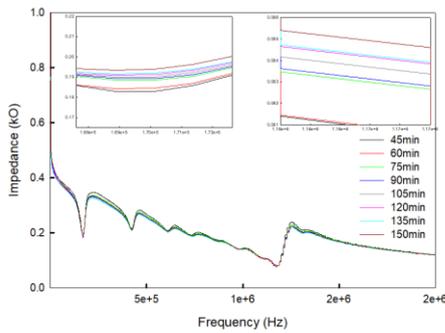


圖 5. PZT-01 阻抗頻譜圖

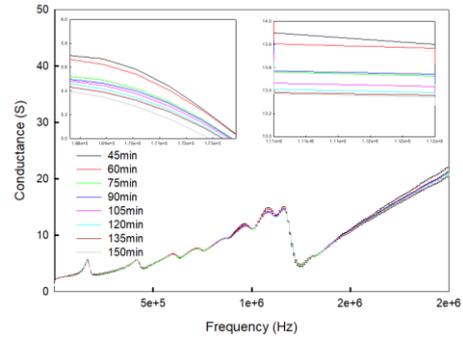


圖 6. PZT-01 電導頻譜圖

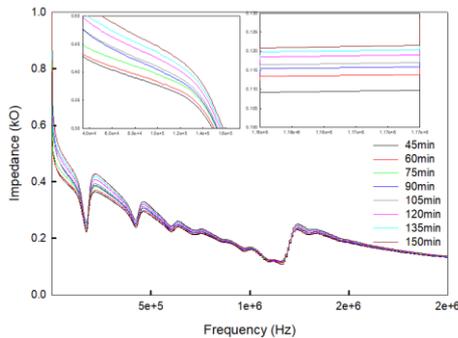


圖 7. PZT-02 阻抗頻譜圖

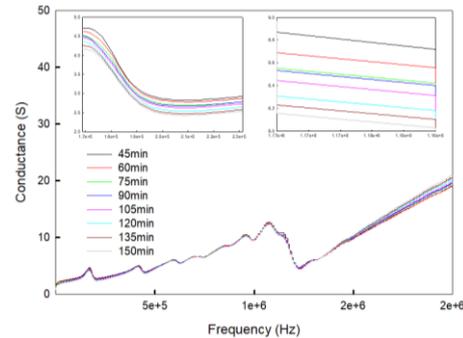


圖 8. PZT-02 電導頻譜圖

由表 1 得知，使用 PZT 感測器監測三維列印混凝土的適用頻率位於較低及較高頻率區間，故可歸納 PZT 感測器的有效頻率範圍約在 150–200 kHz；1150–1200 kHz。

利用公式(3)，選用阻抗頻譜和電導頻譜的較低頻與高頻適用頻率計算其 RMSD，將阻抗 RMSD ( $Z_R$ )和電導 RMSD ( $G_R$ )分別與擴散圓直徑及靜態降伏應力( $\tau_s$ )進行比較，如圖 9–圖 16，可看出阻抗和電導的 RMSD 曲線與三維列印混凝土的靜態降伏應力發展趨勢相似，且也與擴散圓直徑減少趨勢相似，這表示利用阻抗頻譜和電導頻譜的適用頻率之 RMSD 可用於監測三維列印混凝土的新拌性質。

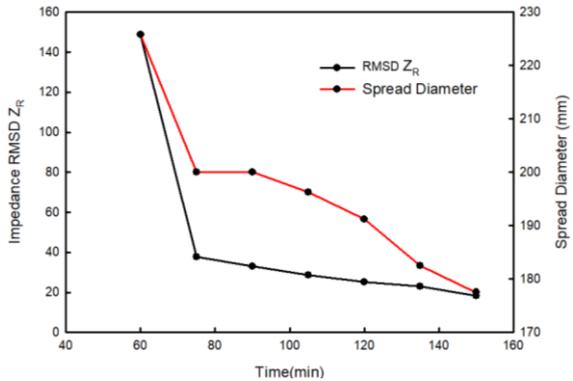


圖 9. PZT-01 較低頻之  $Z_R$  與擴散圓直徑

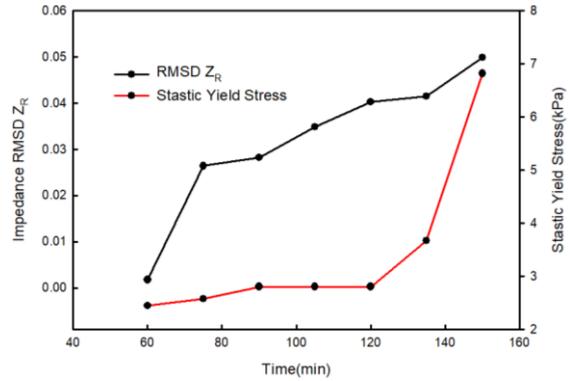


圖 10. PZT-01 高頻之  $Z_R$  與靜態降伏應力

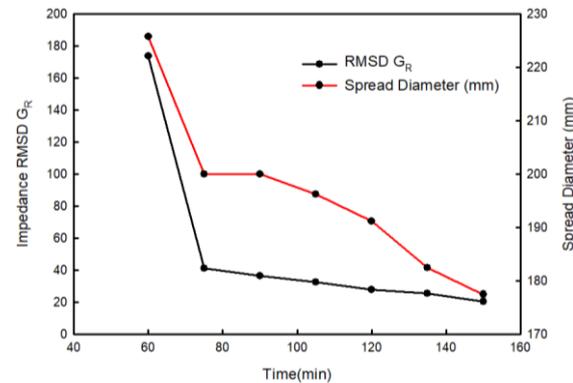


圖 11. PZT-01 較低頻之  $G_R$  與擴散圓直徑

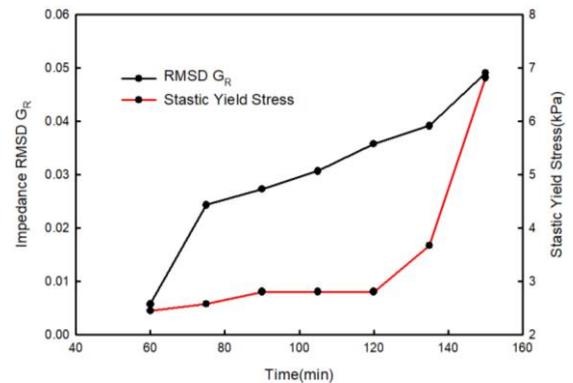


圖 12. PZT-01 高頻之  $G_R$  與靜態降伏應力

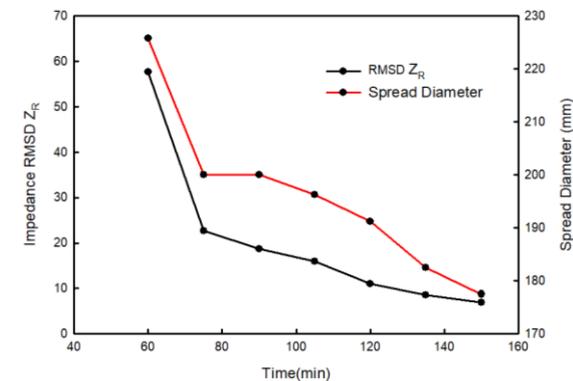


圖 13. PZT-02 較低頻之  $Z_R$  與擴散圓直徑

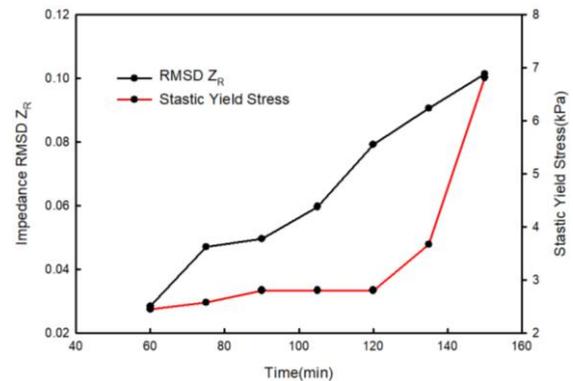


圖 14. PZT-02 高頻之  $Z_R$  與靜態降伏應力

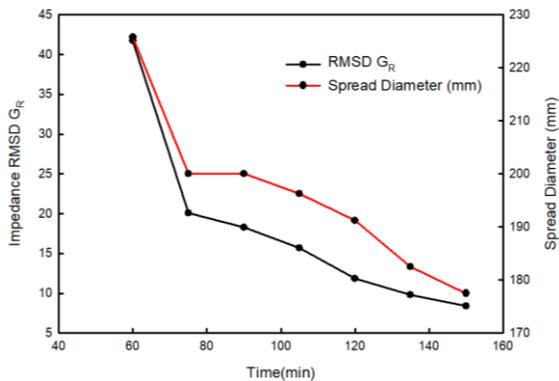


圖 15. PZT-02 較低頻之  $G_R$  與擴散圓直徑

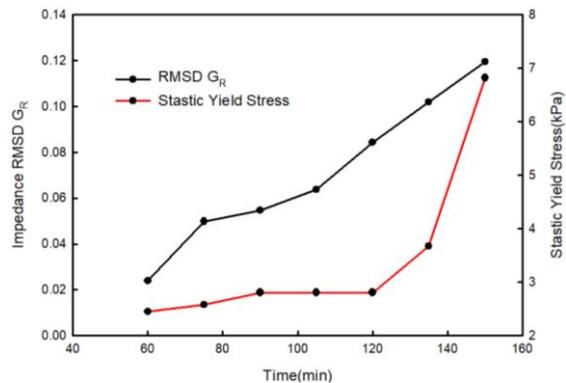


圖 16. PZT-02 高頻之  $G_R$  與靜態降伏應力

#### 四、結論

本研究藉由埋設於三維列印混凝土的 PZT 感測器來評估三維列印混凝土的列印性質，以發展出三維列印混凝土列印性質之監測方法，結果顯示：

1. 三維列印混凝土於  $t = 60 - 120$  min，為列印的可工作時間，此時的流度介於 90 % - 125 %，靜態降伏應力在 2.4 - 2.8 kPa。當  $t = 135$  min 時，靜態降伏應力達 3.6 kPa，此時三維列印混凝土已無法進行列印。
2. 使用 PZT 感測器監測三維列印混凝土列印性質的適用頻率位於兩個頻率區間，有較低頻率段 150 - 200 kHz 及高頻率段 1150 - 1200 kHz。
3. 由三維列印混凝土的靜態降伏應力及流度試驗得知，適用頻率內的阻抗和電導的 RMSD 都具有監測三維列印混凝土列印性質的能力。

#### 五、參考文獻

- [1] A.V. Rahul, Manu Santhanam, Hitesh Meena, Zimam Ghani, 3D printable concrete: Mixture design and test methods. *Cement and Concrete Composites* 97 (2019), 13–23.
- [2] Yiwei Weng, Mingyang Li, Ming Jen Tan, Shunzhi Qian, Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. *Construction and Building Materials* 163 (2018), 600–610.
- [3] Amarteja Kocherla, Tippabhotla A. Kamakshi, Kolluru V. L. Subramaniam, In situ embedded PZT sensor for monitoring 3D concrete printing: application in alkali-activated fly ash-slag geopolymers. *Smart Materials and Structures* 30 (2021), 125024.
- [4] Delphine Marchon, Shiho Kawashima, Hela Bessaies-Bey, Sara Mantellato, Serina Ng, Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. *Cement and Concrete Research* 112 (2018), 96–110.
- [5] Yujun Che, Huashan Yang, Hydration products, pore structure, and compressive strength of extrusion-based 3D printed cement pastes containing nano calcium carbonate. *Case Studies in Construction Materials* 17 (2022), e01590.
- [6] 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. *Materials and Structures* 45 (2012), 1221–1232.