

玻璃粉對水泥基壓電複合材料壓電性質影響

潘煌鋳^{1*} 鄭祐紳² 楊瑞豪³

關鍵詞：玻璃粉、水泥基壓電複合材料、感測器、結構健康監測。

摘 要

水泥基壓電複合材料是由水泥基材和壓電介質組成，為降低水泥用量使用玻璃粉取代部分水泥製成玻璃粉／水泥壓電材料。估算材料的孔隙率，探討極化及玻璃粉對電性與壓電性質影響。結果顯示，玻璃粉壓電水泥的孔隙率在添加 2% 玻璃粉時最低；極化前之相對介電常數、介電損失與激發時間會隨著玻璃粉含量增加，添加玻璃粉會增加試體極化難度。極化後的相對介電常數及壓電應變常數在 2% 玻璃粉含量時有最佳壓電性質，適當添加玻璃粉的水泥基壓電複合材料可製成電容器或致動器。玻璃粉也能提升水泥基壓電複合材料的壓電電壓常數及機電耦合常數，能做為結構健康監測之感測器。

EFFECT OF GLASS POWDER ON THE PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF CEMENT-BASED PIEZOELECTRIC COMPOSITES

Huang Hsing Pan You-Shen Cheng

Department of Civil Engineering
National Kaohsiung University of Science and Technology
Kaohsiung, Taiwan 80778, R.O.C.

Rui-Hao Yang

True-Dreams Construction CO., LTD.
Taichung City, Taiwan 40357, R.O.C.

Key Words : glass powder, cement-based piezoelectric composites, sensor, structural health monitoring.

ABSTRACT

Cement-based piezoelectric composites consist of a cement matrix and piezoelectric inclusions. To reduce the amount of cement, glass powder is partially replaced, forming glass/cement piezoelectric materials. The porosity of the specimens is estimated, and the effects of polarization and glass powder content on the electrical and piezoelectric properties are analyzed. The results indicate that the porosity is lowest when 2% glass powder is added. The relative permittivity, dielectric loss, and excitation time before polarization increase with higher glass powder content, making polarization more difficult. After polarization, the relative permittivity and piezoelectric strain constant show better piezoelectric properties at 2% glass powder content. Cement-based piezoelectric composites with appropriate glass powder content can be used as capacitors or actuators. Additionally, glass powder can enhance the piezoelectric voltage constant and electromechanical coupling coefficient, making these composites suitable for use as sensors in structural health monitoring.

¹ *通訊作者，國立高雄科技大學土木工程系教授

² 國立高雄科技大學土木工程系博士

³ 晨禎營造股份有限公司工程師

一、前言

壓電材料做為感測器 (transducers) 使用在土木建築之結構健康監測及檢測已行之有年，其中最為常使用銻鉍酸鉛 (lead zirconate titanate, PZT) 陶瓷材料製成的壓電感測器或促動器 (piezoelectric sensors or actuators)。PZT 具有良好的壓電性能，已廣泛使用於各種監測 (monitoring) 及檢測 (detection) 應用，例如 PZT 感測器使用在混凝土強度發展 [1-4]、損傷及應變行為 [5,6]、鋼筋鏽蝕 [7,8]。然而，針對鋼筋混凝土 (RC) 結構物，PZT 感測器進行結構健康監測 (structural health monitoring) 時，PZT 壓電感測器的物理及電學性質與 RC 結構物的混凝土材料差異頗大，例如 PZT 的聲阻抗約是混凝土的 2.3 倍及密度是 RC 的 3.3 倍，有可能造成 PZT 感測器於監測時的訊號靈敏度受到限制；或是混凝土材料與 PZT 的相容性導致感測器的訊號誤判。為改善 PZT 感測器進行 RC 結構監測有材料界面傳導和變形協調性 (compatibility) 問題，水泥基壓電複合材料 (cement-based piezoelectric composite) 已被發展來取代 PZT 做為感測器元件的材料 [9-12]，該複合材料是由水泥和壓電材料 (例如 PZT) 混合製成的。

水泥基壓電複合材料在未經電場極化前，並不具有壓電性質；若經過適當的極化過程後具有壓電性質，此時可稱為壓電水泥 (piezoelectric cement, PEC)。含 PZT 之水泥基壓電複合材料的壓電性質例如壓電應變常數 (d_{33}) 和壓電電壓常數 (g_{33}) 在超過一定值以上，可做為感測器和促動器的感測材料 (元件)，其中壓電水泥感測器 (PEC sensor) 中通常包含了 40~50 vol.% 的水泥用量，並已成功應用於混凝土強度 [13] 和應力-應變行為 [14] 的監測。然而隨著工業發展及因應氣候變遷，對於生態環境保護的重視逐漸抬頭，因水泥的碳排放量約為全球碳排放量的 5%~8%，為達到 2050 年淨零碳排 (net zero) 的目標，因此也需要對於壓電水泥的水泥用量進行改善，最常見的方式是以添加摻料 (addition) 取代部分水泥。

為改善壓電水泥的壓電性質，在水泥基壓電複合材料中，添加摻料已經有使用卜作嵐材料 [15-17]、矽灰粉 [18]、高嶺土 [19]、碳黑 [20,21]、奈米碳管 [22]、石墨烯 [17,23] 等材料取代部分水泥，以製成水泥基壓電複合材料的研究，結果顯示其能夠在降低水泥用量 (減碳) 的情況下，適當添加量能增加水泥基壓電複合材料的電性和壓電性能。例如，利用卜作嵐材料取代部分水泥製成的水泥基壓電複合材料 [15]，是使用飛灰、水淬爐石粉及矽灰取代 0~10 vol.% 水泥，研究成果顯示飛灰取代水泥製成水泥基壓電複合材料的極化激發時間 (trigger time during polarization) 最短，其次是水淬爐石粉，而矽灰的激發時間最長，極化激發時間越久表示試體極化越困難 (極化效率較差)；但是含有矽灰的水泥基壓電複合材料具有較高的相對介電性質 (ϵ_r) 和更加緻密的結構，能有效提升壓電應變常數 d_{33} ，而水淬爐石粉同樣也能夠提升材料之壓電應變常數，但飛灰的效果較不顯著。另外，將多層石墨烯 (GNPs) 與氧化石墨烯 (GO) 添加於水泥基壓電複合材料中 [23]，成果顯示 GO 中的氧官

能基會增加複合材料的電阻率和介電損失 (dielectric loss, D)，降低其極化效率，進而降低了其壓電性質 (不含 GO 的複合材料的 d_{33} 值為 98 pC/N，當 GO 含量增加至 0.5% 時， d_{33} 值下降至 24 pC/N)；但是，添加 GNPs 則會提高複合材料的壓電性質 ($d_{33} \approx 123$ pC/N, $g_{33} \approx 22.6$ mV-m/N, $\epsilon_r \approx 615$)，特別是機電耦合常數 (κ_t) 顯著提高至 20.2%，顯示出在工程應用 (感測器及能源捕獲) 上的潛力。

另外，含 PZT 之水泥基壓電複合材料的 PZT 介質，也有使用無鉛的銻鉍酸鋇 (barium zirconate titanate, BZT) 來取代 [16,24,25] 達成環境友善 (無鉛) 的目的，其在降低水泥用量之摻料有使用飛灰 [16] 和環氧樹脂 [25]，同樣也能夠達成具壓電性能之效果，如 $d_{33} \approx 46$ pC/N，相對介電常數 $\epsilon_r \approx 310$ ，機電耦合常數 $\kappa_t \approx 18.1\%$ 。因此透過適當材料取代水泥使用，不僅能降低水泥用量，亦可增加水泥基壓電複合材料在做為感測器上的靈敏度。本研究只針對 PZT 水泥壓電複合材料，這裡並不討論含 BZT 之水泥基壓電複合材料的壓電性質。

已知玻璃粉具有一定的卜作嵐活性，雖然有部分文獻將玻璃粉添加於水泥漿內研究其熱傳導 [26] 及添加於高鋁水泥漿量測其力學性質和電磁傳導 [27]，且顯示其具有改善水泥漿的導熱係數 (thermal conductivity)、降低介電常數 (dielectric constant, ϵ) 及介電損失 (D)，可用於取代部分水泥；但是尚無探討使用玻璃粉取代水泥來製成水泥基壓電複合材料的研究。因此，本研究以玻璃粉取代 PZT 水泥壓電複合材料中的部分水泥，探討其在極化前的相對介電常數與介電損失，並記錄其激發時間，以及探討極化後的電性與壓電性質。

二、實驗計畫

2.1 試體製作

水泥基壓電複合材的水泥基材 (matrix) 是採用比重 3.14 及細度 349 m²/kg 的新鮮 I 型卜作蘭水泥，介質 (inclusion) 是經研磨成粒徑 75~150 μ m 的 PZT 未極化燒結體，兩者的體積比各 50% 混合成為 PEC。其中 PZT 的比重為 7.9，壓電應變常數 d_{33} 為 470 pC/N，壓電電壓常數 (g_{33}) 為 24 mV-m/N，相對介電常數 ϵ_r 為 2,100，銻鉍酸鉛性質如表 1 所示。

表 1 銻鉍酸鉛 (PZT) 性質 (製民科技提供)

性質	
壓電電壓常數, g_{33} (mV-m/N)	24
壓電應變常數, d_{33} (pC/N)	470
厚度機電耦合常數, κ_t (%)	72
平面機電耦合常數, κ_p (%)	70
機械品質因子, Q_m (%)	65
相對介電常數, ϵ_r	2100
介電損失, D (%)	1.5
彈性模數, E ($\times 10^{10}$ N/m ²)	5.2
單位重, ρ ($\times 10^3$ kg/m ³)	7.9

將體積比各 50% 的 PZT 顆粒與水泥先透過行星式球磨機混合後，高能材料試驗機以 80 MPa 軸力壓製成直徑 15 mm 的錠狀試體，如圖 1 所示。為確保試體有強度足夠，恆溫箱加水以溫度 90°C 進行蒸氣養護 24 小時，如圖 2 左側之研磨前試體；在試體養護完成後，將試體研磨至設計厚度 2 ± 0.05 mm，如圖 2 右側之研磨後試體，並於風乾後利用光學顯微鏡 (optic microscope, OM) 放入 350 倍拍攝試體表面，以影像分析軟體 (PIA) 進行表面孔隙率計算。

添加摻料為玻璃粉，其粒徑為 75 μm 和比重 2.58，用以取代 PEC 的部分水泥體積，取代水泥體積的 1、2、4、6、8、10 vol.%，試體製作過程，稱為玻璃粉壓電水泥 (glass powder piezoelectric cement, G-PEC)。

2.2 試體熱處理

為提高 PEC 壓電水泥的壓電性質，已知試體經過熱處理的介電損失會大幅降低，有利於提升試體的極化效率，可將壓電應變常數 d_{33} 由 50 pC/N 提高至 100 pC/N [28]。因此，在試體研磨後對試體進行 150°C 及 40 分鐘恆溫的熱處理 (第一次熱處理)，於室溫冷卻後在試體兩面塗佈高溫銀膠 (型號 SYP-4570) 製作電極；在電極完成後，試體進行第二次的熱處理，熱處理條件與第一次熱處理相同。若試體省略熱處理步驟，試體製作過程皆在常溫下進行，稱為未熱處理試體。

2.3 試體極化

在進行極化前，會通過阻抗分析儀 (型號 Model 6520)

量測試體的電容 C 及介電損失 D ，並透過公式(1)計算試體的相對介電常 ϵ_r ：

$$\epsilon_r = \frac{C \times t}{A \times \epsilon_0} \quad (1)$$

其中 t 為試體厚度 (m)， A 為試體面積 (m^2)， ϵ_0 為真空中的介電常數 (8.85×10^{-12} F/m)，相對介電常 ϵ_r 單位為無因次。

極化時，試體置於矽油槽內，試體的極化溫度 150°C，極化電壓 1.5 kV/mm，於施加電壓達到極化電壓後持續極化 40 分鐘 (極化時間)，如圖 3。在極化時，未熱處理的試體有時會有電流擊穿現象 (圖 4)，表示極化失敗。激發時間是指材料從開始施加電壓至達到極化電壓的時間，若激發時間越長，表示材料越不容易極化。

試體完成極化後，壓電水泥的內部會有殘留電荷尚未完全穩定且也會受水化作用影響，其壓電性質仍會變化。因此試體極化後的電性和壓電性質會隨時間變化，需要持續量測其壓電性質直到其性質穩定為止。量測試體相對介電常數 ϵ_r 與壓電性質 (壓電應變常數 d_{33} 、壓電電壓常數 g_{33} 與機電耦合常數 κ_t)，其中電性是使用阻抗分析儀以電壓 1 V，頻率為 1 kHz 所量測；壓電應變常數 d_{33} 是使用壓電應變常數測定儀 (型號 Model P/N 90-2030)，以 110 Hz 的振動頻率所量測；量測環境為室溫 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 與相對濕度 $50 \pm 2\%$ ，實驗結果以三個樣本的平均值表示。相關壓電性質的計算公式在式(2)及式(3)：

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_r \times \epsilon_0} \quad (2)$$

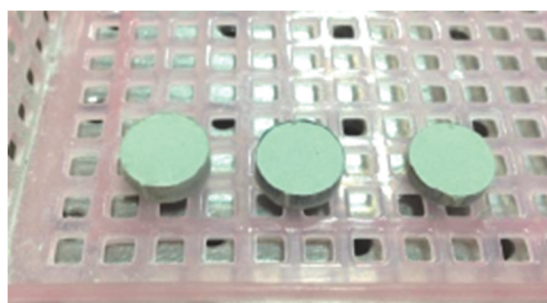


圖 1 壓製完成的試體



圖 2 試體研磨前後比較

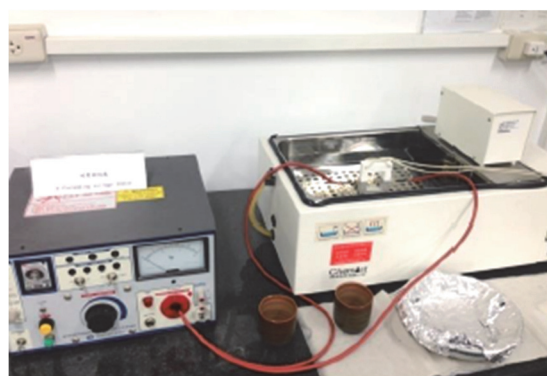


圖 3 試體極化

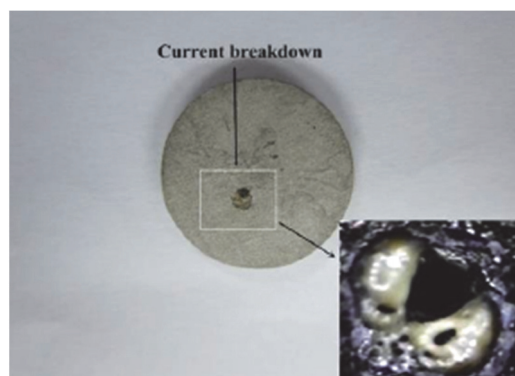


圖 4 試體被電流擊穿

$$\kappa_t = \sqrt{\frac{\pi f_m \tan\left(\frac{\pi f_n - f_m}{2 f_n}\right)}{2 f_n}} \quad (3)$$

其中壓電常數 g_{33} 單位為 $\times 10^{-3} \text{ V}\cdot\text{m}/\text{N}$; f_m 為阻抗頻譜之共振頻率段中具有最小阻抗值之頻率 (Hz), f_n 為在共振頻率段中具有最大阻抗值之頻率 (Hz), 機電耦合常數 κ_t 單位為無因次。

三、結果與討論

3.1 表面孔隙率

若材料的孔隙率過高, 試體極化時的抵抗電流能力降低, 這是由於多孔隙材料在極化時電流容易由孔隙方向通過, 導致試體被電流擊穿。試體養護後, 將試體研磨至設計厚度, 以 OM 拍攝試體表面; 為分辨出試體的孔隙, 在 OM 中的黑白影像, 透過像素閾值標準 (pixel threshold criteria) 的選擇, 在照片的影像上採用分割值 90, 並以紅色顯示孔隙。試體孔隙經過影像辨識的結果如圖 5 至圖 7 所示, OM 圖像主要具有三部分: PZT 顆粒 (較大顆的顆粒狀)、水泥膠結體 (PZT 顆粒之間不規則狀部分) 以及孔隙 (經軟體分析, 紅色的部分)。透過影像分析軟體計算紅色的部分的比例得

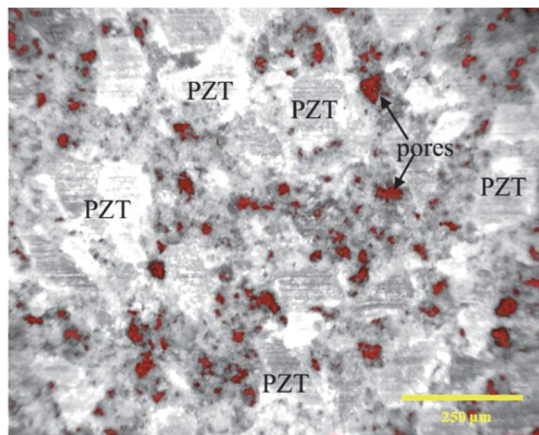


圖 5 PEC OM 圖 (350x)

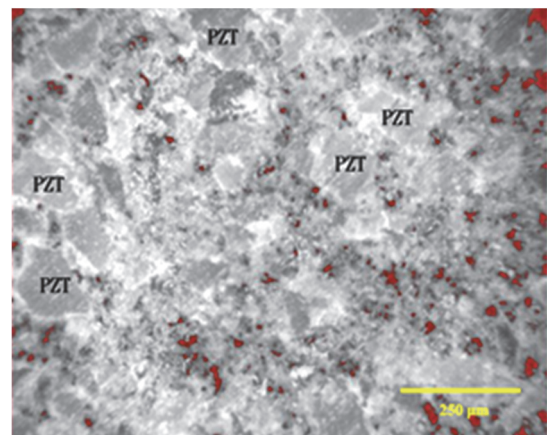


圖 6 G-PEC (2 vol.%) OM 圖 (350x)

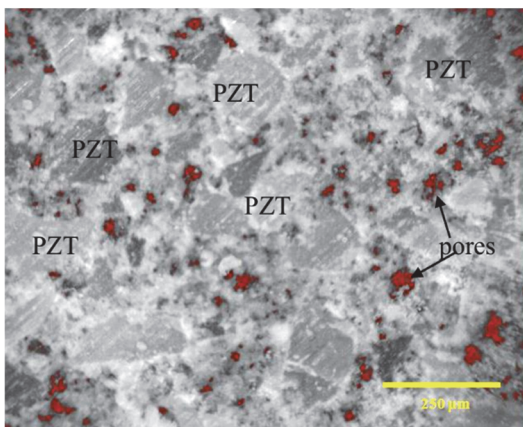


圖 7 G-PEC (10 vol.%) OM 圖 (350x)

知孔隙率, 其結果如圖 8 所示, 可以發現在玻璃粉添加 0% ~ 2% 時, 孔隙率隨著玻璃粉的取代量增加而降低, 在添加 2% 玻璃粉之 G-PEC 孔隙率 (2.053%) 最低, 而大於 2% 後, 孔隙率會反向逐漸開始增加, 在含 10% 玻璃粉 G-PEC 孔隙率 (2.320%) 會接近 PEC 孔隙率 (2.326%)。這顯示添加 2% 以內的玻璃粉能夠使材料更加緻密, 但不得大於 2%, 否則孔隙率反而會隨之增加。

3.2 極化前的相對介電常數

在極化前, 試體的相對介電常數 ϵ_r 越高, 代表試體能夠儲存電能的能力越好。量測試體電容後, 以公式 (1) 計算 ϵ_r 如圖 9 所示。對不經過熱處理的水泥基壓電複合材料, 其相對介電常數會隨著玻璃粉的取代量增加而提升, 這是由於玻璃屬於一高介電常數材料, 添加越多玻璃粉越能夠提升 G-PEC 的相對介電常數; 其中添加 0% ~ 2% 玻璃粉的 ϵ_r 增加不大是因為其孔隙率也同時變小 (見圖 8), 導致減弱玻璃粉對 ϵ_r 的影響, 但在 2% ~ 10% 玻璃粉的 ϵ_r , 則有明顯的提升。當水泥基壓電複合材料有經過 2 次熱處理, 雖然 G-PEC 的相對介電常數 ϵ_r 也會隨添加玻璃粉增加而提升, 但是其效果並不顯著。因此, 若要提高水泥的電容, 可以添加玻璃粉。

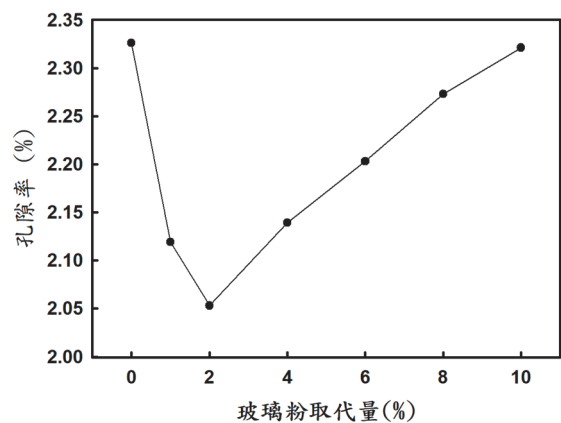


圖 8 表面孔隙率與玻璃粉取代量關係

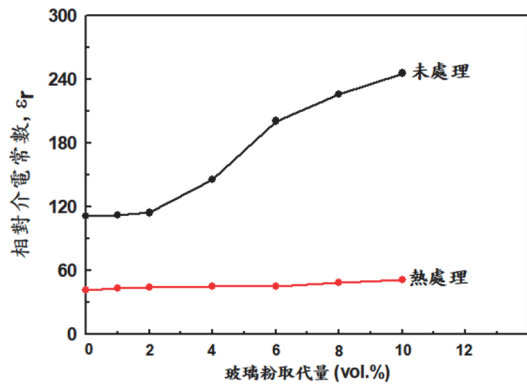


圖 9 極化前 G-PEC 相對介電常數

3.3 極化前的介電損失與激發時間

介電損失是指試體（載體）在外加電場中，電荷載體（charge carrier）產生導電電流會消耗部分電能（轉換為熱能）的能力，定義是在單位時間內所消耗的電能。介電損失可以用 D 或正切損耗角 ($\tan \delta$) 表示，是壓電材料極化難易度或是絕緣材料性質的指標之一。對壓電材料，若極化前的介電損失 D 值越小，在進行極化過程中的電能越能夠誘導材料在施加電壓方向產生更多的電荷排列，材料的壓電性質會比較好。圖是極化前之水泥基壓電複合材料的介電

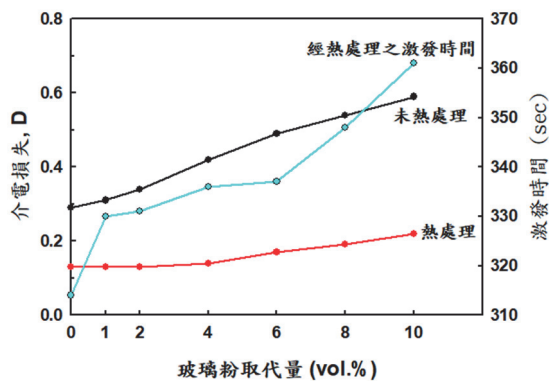


圖 10 極化前 G-PEC 介電損失、激發時間與玻璃粉取代量關係

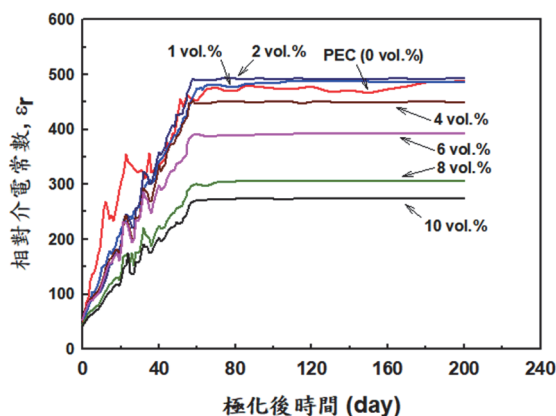


圖 11 G-PEC 相對介電常數與齡期關係

損失 D 值，經過熱處理的水泥基壓電複合材料之 D 值皆小於未經熱處理的 D 值，表示經過熱處理的試體比較容易進行極化；不管試體是否經過熱處理，隨著玻璃粉取代量的增加，介電損失值與激發時間也隨之增加，因此得知使用玻璃粉取代水泥會增加 G-PEC 於極化過程的難度。

3.4 極化後的相對介電常數

有熱處理之試體經過電場極化後量測其相對介電常數，圖 11 是壓電水泥相對介電常數與極化後的齡期關係，相對介電常數 ϵ_r 值會隨著齡期增加而變增加，約在 55 天時趨於穩定常數值。圖 12 是第 56 天相對介電常數與玻璃粉取代量關係，在添加 2% 玻璃粉時，能夠少量增加試體的相對介電常數，但當玻璃粉取代量持續增加時，試體的相對介電常數值 ϵ_r 反而會迅速降低。另外，比較圖 12 和圖 9 有熱處理試體的 ϵ_r ，極化後的 ϵ_r 值都比極化前的 ϵ_r 值（見圖 9）大，顯示試體經過電壓極化也可以增加 G-PEC 的相對介電常數，尤其以 2% 玻璃粉取代水泥的 ϵ_r 值增加最多，有助於提升 G-PEC 的儲電能力。

3.5 壓電應變常數

壓電應變常數 d_{33} 為材料在外加電場下，所產生的位移，是材料做為致動器的重要指標之一， d_{33} 越大的材料越能製作性能較佳的致動器。圖 13 顯示 G-PEC 的 d_{33} 隨著時間增加，大約在 60 天時穩定，性質發展與相對介電常數 ϵ_r 類似。圖 14 是第 90 天的 d_{33} 與玻璃粉添加量的關係，在 2% 時可以增加 G-PEC 的壓電應變常數 ($d_{33} = 113 \text{ pC/N}$)，但隨著玻璃粉取代量增加，其壓電應變常數更會隨之下降。

3.6 壓電電壓常數

壓電電壓常數 g_{33} 為材料在外加力場下，所產生的電壓與電流，是材料作為感測器的重要指標，高 g_{33} 的感測器的監測靈敏度越好。壓電電壓常數是由公式 (2) 計算得出，圖 15 顯示 G-PEC 在前期的壓電電壓常數尚未穩定，隨著極化後齡期增加，約在 60 天後才趨於穩定，這可能是由於水泥基材仍持續水化，導致 ϵ_r (圖 11) 和 d_{33} (圖 13) 仍持續變化，且極化後的殘餘電荷消散較慢所致。比較第 60 天 g_{33} 與玻

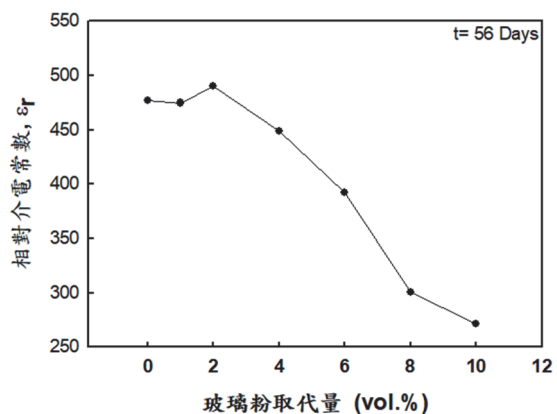


圖 12 相對介電常數與玻璃粉取代量關係

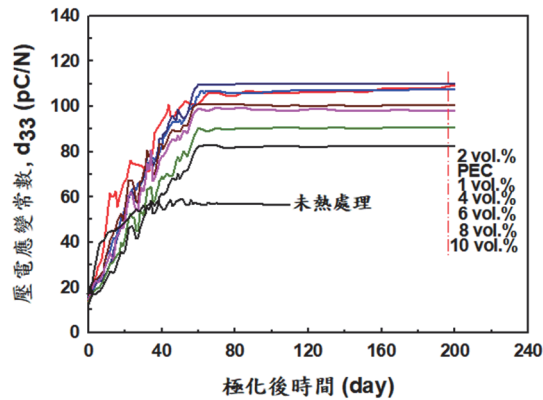


圖 13 G-PEC 壓電應變常數與齡期關係

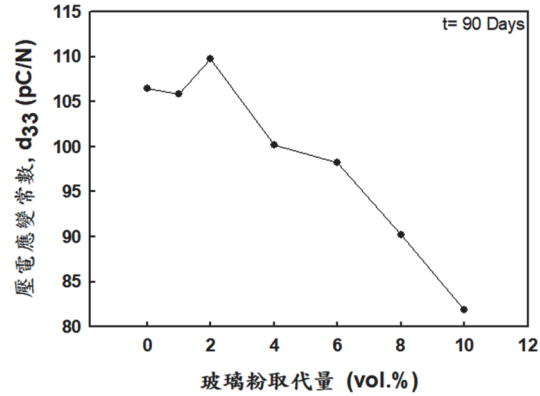


圖 14 壓電應變常數與玻璃粉取代量關係

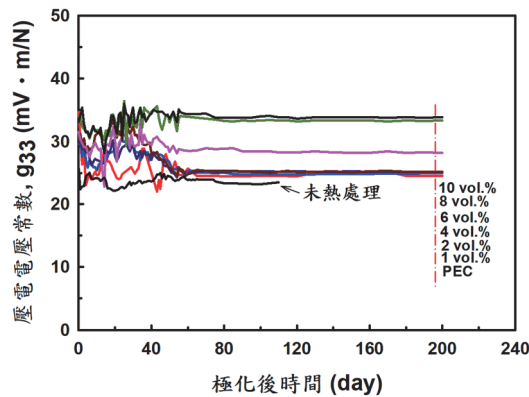


圖 15 G-PEC 壓電電壓常數與齡期關係

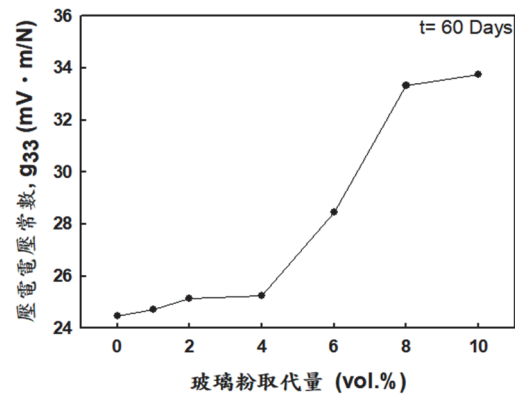


圖 16 壓電電壓常數與玻璃粉取代量關係

玻璃粉含量關係 (見圖 16)，觀察到使用玻璃粉取代水泥，可以有效提升 G-PEC 的壓電電壓常數，這是由於通過公式(2)計算壓電電壓常數時，由於玻璃粉的相對介電常數低於水泥，因此當玻璃粉含量增加時，會使分母的相對介電常數降低，因此能夠使 G-PEC 的壓電電壓常數提升。隨著添加量的增加， g_{33} 會成長至 $35 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m/N}$ ，即使用玻璃粉取代水泥的 G-PEC 靈敏度有所增加，具利於做為感測器使用。

3.7 厚度機電耦合常數

厚度機電耦合常數 (thickness electromechanical coupling coefficient, κ_t) 為材料在厚度方向振動的機電耦合常數，是材料機械能與電能相互轉換的能力指標。 κ_t 值可由 IEEE 壓電測量標準公式計算，如公式(4)，其中 f_p 與 f_s 為

率 f_p 與並聯共振頻率 f_s 難以取得，因此常使用與其相近的替代值表示，即採用公式(3)之共振頻率段中具有最小及最大阻抗值之頻率進行機電耦合常數的計算。圖 17 與圖 18 為無玻璃粉之 PEC 與含有 10 vol.% 之 G-PEC 隨齡期成長的阻抗頻譜，隨著極化後齡期增加，PEC 及 G-PEC 的阻抗頻譜會逐漸穩定；將含 0%~10% 玻璃粉 G-PEC 取其共振頻率段中具有最小及最大阻抗值之頻率 (f_m 及 f_n) 利用公式(3)計算 κ_t 值，結果在圖 19，添加玻璃粉可以增加 G-PEC 的機電耦合常數 κ_t ，表示添加玻璃粉有助於提升材料機械能與電能相互轉換的能力。

$$\kappa_t = \sqrt{\frac{\pi f_s}{2 f_p} \tan\left(\frac{\pi f_p - f_s}{2 f_p}\right)} \quad (4)$$

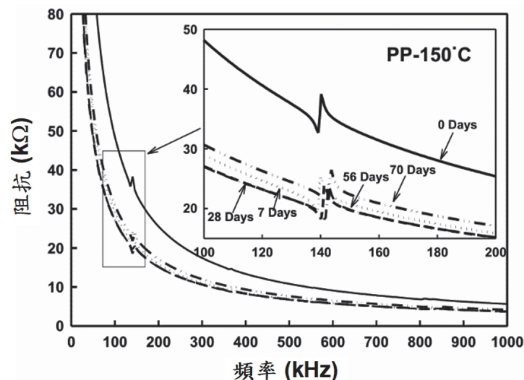


圖 17 PEC (0% 玻璃粉) 阻抗頻譜與齡期關係

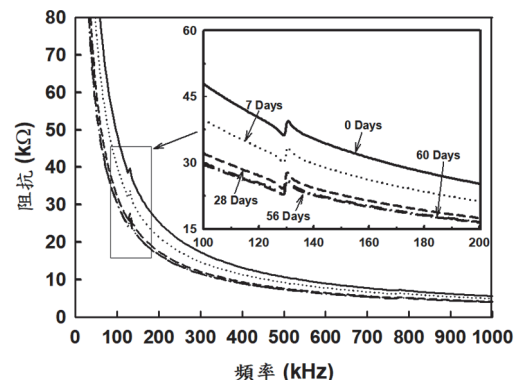


圖 18 G-PEC 含 10% 玻璃粉之阻抗頻譜與齡期關係

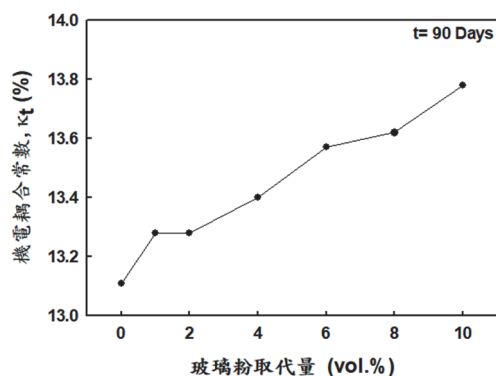


圖 19 機電耦合常數與玻璃粉取代量關係

四、結 論

本研究使用玻璃粉取代水泥使用，達到減碳之目的，並檢視其對水泥基壓電複合材料之電性與壓電性質影響，得出下列結論：

1. 在玻璃粉 0%~2% 時，G-PEC 的孔隙率隨著玻璃粉取代量增加而降低，這是因為添加少量的玻璃粉能夠使材料更加緻密；但當取代量大於 2% 時，孔隙率會隨之增加。
2. 在極化前，隨著玻璃粉的取代量增加，材料的相對介電常數 ϵ_r 也會增加，尤其在常溫下製作的 G-PEC 之 ϵ_r 增加的效果最顯著。
3. 增加玻璃粉的取代量，常溫製作的 G-PEC 之介電損失 D 值會變大，而 D 值越大的材料其極化之激發時間也會變長，表示含越多玻璃粉的水泥基壓電複合材料越不容易極化。當 G-PEC 製作過程有熱處理，介電損失 D 值會明顯變小，顯示熱處理有利於材料極化。
4. 極化後的壓電應變常數 d_{33} 和壓電壓電常數壓電 g_{33} 會隨齡期增加，其性質約在第 60 天後會趨於定值。
5. 極化後，添加 2% 玻璃粉的 G-PEC 壓電水泥，能得到最佳的相對介電常數，其值 $\epsilon_r \approx 500$ ，顯示以 2% 玻璃粉取代水泥有助於提升 G-PEC 的儲電能力。
6. G-PEC 壓電水泥在 2% 玻璃粉含量時，有最佳的壓電應變常數，其值 $d_{33} = 113 \text{ pC/N}$ ，但隨著玻璃粉取代量持續增加，其壓電應變常數便會隨之下降。
7. 使用玻璃粉取代水泥，能夠有效提升 G-PEC 的壓電壓電常數，從含量 0%~10% 之 g_{33} 值也從 24.2 mV-m/N 增加到 35 mV-m/N，使用玻璃粉有助於增加 G-PEC 感測器的靈敏度。
8. 添加玻璃粉可以增加 G-PEC 的機電耦合常數 k_t ，表示添加玻璃粉有助於提升材料機械能與電能相互轉換的能力。

參考文獻

1. Tawie, R. and Lee, H. K., "Piezoelectric-based non-destructive monitoring of hydration of reinforced concrete

as an indicator of bond development at the steel-concrete interface," *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 1697-1703 (2010).

2. Ghafri, E., Yuan, Y., Wu, C., Nantung, T., and Lu, N., "Evaluation the compressive strength of the cement paste blended with supplementary cementitious materials using a piezoelectric-based sensor," *Construction and Building Materials*, Vol. 171, pp. 504-510 (2018).
3. Su, Y. F., Han, G., Amran, A., Nantung, T., and Lu, N., "Instantaneous monitoring the early age properties of cementitious materials using PZT-based electromechanical impedance (EMI) technique," *Construction and Building Materials*, Vol. 225, pp. 340-347 (2019).
4. Sun, W., Qiao, P., Yan, S., Qi, B., Du, J., and Lu, L., "Monitoring and estimate of concrete compressive strength in full curing period using smart piezoelectric modules," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 75, No. 7, pp. 339-352 (2023).
5. Wang, D., Zhang, J., and Zhu, H., "Embedded electromechanical impedance and strain sensors for health monitoring of a concrete bridge," *Shock and Vibration*, 821395 (2015).
6. Qin, F., Zhang, Z., Xie, B., and Sun, R., "Experimental study on damage detection in ECC-concrete composite beams using piezoelectric transducers," *Sensors*, Vol. 19, 2799 (2019).
7. Liu, P., Hu, Y., Chen, Y., Geng, B., and Xu, D., "Investigation of novel embedded piezoelectric ultrasonic transducers on crack and corrosion monitoring of steel bar," *Construction and Building Materials*, Vol. 235, 117495 (2020).
8. Ahmadi, J., Feirahi, M. H., Farahmand-Tabar, S., and Fard, A. H. K., "A novel approach for non-destructive EMI-based corrosion monitoring of concrete-embedded reinforcements using multi-orientation piezoelectric sensors," *Construction and Building Materials*, Vol. 273, 121689 (2021).
9. Li, Z., Zhang, D., and Wu, K. R., "Cement-based 0-3 Piezoelectric composites," *J. American Ceramics Society*, Vol. 85, pp. 305-313 (2002).
10. Shen, B., Yang, X., and Li, Z., "A cement-based piezoelectric sensor for civil engineering structure," *Materials and Structures*, Vol. 39, pp. 37-42 (2006).
11. Pan, H. H., Lin, D. H., and Yang, R. H., "High Piezoelectric and dielectric properties of 0-3 PZT/cement composites by temperature treatment," *Cem. Conc. Compos. Cement and Concrete Composites*, Vol. 72, pp. 1-8 (2016).
12. Wittinanon, T., Rianyo, R., Potong, R., Pan, H. H., and Chaipanich, A., "Effect of water to cement ratio on acoustic impedance, microstructure, and piezoelectric properties of 0-3 barium zirconate titanate-Portland cement composite with epoxy resin addition," *Materials Research Bulletin*, Vol. 158, 112078 (2023).
13. Pan, H. H. and Huang, M. W., "Piezoelectric cement sensor-based electromechanical impedance technique for the strength monitoring of cement mortar," *Construction and Building Materials*, Vol. 254, 119307 (2020).
14. Pan, H. H. and Guan, J. C., "Stress and strain behavior monitoring of concrete through electromechanical impedance using piezoelectric cement sensor and PZT sensor," *Construction and Building Materials*, Vol. 324, 126685 (2022).
15. Pan, H. H., Lin, D. H., and Yeh, R. H., "Influence of pozzolanic materials on 0-3 cement-based piezoelectric

- composites,” *New Developments in Structural Engineering and Construction*, Edited by Yazdani, S. and Singh, A., Research Publishing Services, pp. 929-934 (2013).
16. Chomyen, P., Potong, R., Rianyai, R., Ngamjarrojana, A., Chindaprasit, P., and Chaipanich, A., “Microstructure, dielectric and piezoelectric properties of 0–3 lead free barium zirconate titanate ceramic-Portland fly ash cement composites,” *Ceramics International*, Vol. 44, No. 1, pp. 76-82 (2018).
 17. Jaitanong, N., Narksitipan, S., Ngamjarrojana, A., and Chaipanich, A., “Influence of graphene nanoplatelets on morphological and electrical properties of silica fume blended cement–Piezoelectric ceramic composite,” *Ceramics International*, Vol. 44, S137–S140 (2018).
 18. Pan, H. H., Lin, W., and Huang, K., “Piezoelectric properties of cement piezoelectric composites containing nano-quartz powders,” *Proc. Inter. Struct. Eng. Constr.*, Vol. 7, No. 2, Emerging Technologies and Sustainability Principles, Edited by Askarinejad, H., Yazdani, S., and Singh, A., ISEC Press, SUS-02-1–SUS-02-6 (2020).
 19. Pan, H. H., Yang, R. H., and Cheng, Y. C., “High piezoelectric properties of cement piezoelectric composites containing kaolin,” *Proc. SPIE*, Vol. 9437, pp. 170-178 (2015).
 20. Gong, H., Li, Z., Zhang, Y., and Fan, R., “Piezoelectric and dielectric behavior of 0-3 cement-based composites mixed with carbon black,” *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 29, No. 10, pp. 2013-2019 (2009).
 21. Shi, Z., Hua, L., Lu, Y., Shen, D., and Huang, D., “Investigation of carbon black nanoparticle modified cementitious composites for sensing dynamic vibro-acousto signals,” *Measurement*, Vol. 237, 115231 (2024).
 22. Zhu, X. and Ling, Y., “Preparation of cement modified by multi-walled carbon nanotubes and investigation of its piezoelectric property,” *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 81, pp. 130-136 (2023).
 23. Pan, H. H., Lai, T. Z., Chaipanich, A., and Wittinanon, T., “Effect of graphene on the piezoelectric properties of cement-based piezoelectric composites,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 346, 113882 (2022).
 24. Shi, C., Lin, J., Ge, G., Hao, Y., Song, J., Wei, Y., and Yao, W., “Design and manufacture of lead-free eco-friendly cement-based piezoelectric composites achieving superior piezoelectric properties for concrete structure applications,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 259, 110750 (2023).
 25. Wittinanon, T., Rianyai, R., Potong, R., Pan, H. H., and Chaipanich, A., “Effect of epoxy resin and barium zirconate titanate contents on the piezoelectric properties of a 0–3 barium zirconate titanate-Portland cement composite with epoxy resin addition,” *Ceramics International*, Vol. 49, No. 11, pp. 18195-18202 (2023).
 26. Du, Y., Yang, W., Ge, Y., Wang, S., and Liu, P., “Thermal conductivity of cement paste containing waste glass powder, metakaolin and limestone filler as supplementary cementitious material,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 287, 125018 (2021).
 27. Yang, B., Li, Y., Liu, J., Shen, J., Lin, H., and Guo, Q., “Effect of glass powder on mechanical properties and electromagnetic transmission properties of high alumina cement paste,” *Journal of Building Engineering*, Vol. 88, 109156 (2024).
 28. Pan, H. H., Wang, C. K., and Cheng, Y. C., “Curing time and heating conditions for piezoelectric properties of cement-based composites containing PZT,” *Construction and Building Materials*, Vol. 129, pp. 140-147 (2016).

113 年 9 月 12 日	收稿
113 年 10 月 28 日	修改
113 年 10 月 31 日	接受