

## 奈米石英粉對 0-3 型水泥壓電複合材料壓電性質的影響

### Influence of Nano-Quartz Powders on Piezoelectric Properties of 0-3 Type Cement Piezoelectric Composites

林威任<sup>1</sup> 潘煌鏗<sup>2</sup> 賴丁賜<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 高雄應用科技大學土木工程系 碩士生, [1104312125@gm.kuas.edu.tw](mailto:1104312125@gm.kuas.edu.tw)

<sup>2</sup> 高雄應用科技大學土木工程系 教授, [pam@kuas.edu.tw](mailto:pam@kuas.edu.tw)

<sup>3</sup> 高雄應用科技大學土木工程系 碩士生, [1102102164@gm.kuas.edu.tw](mailto:1102102164@gm.kuas.edu.tw)

#### 摘要

為提高水泥壓電複合材料的壓電性質，添加具有高介電性的奈米石英粉做為摻料。本研究的壓電水泥是由 PZT 陶瓷介質和水泥基材的體積各占 50% 組成，其中 PZT 有單一級配(PP，對照組)與中級配(MG)；為找出奈米石英粉的最佳含量，奈米石英粉取代水泥體積含量有 1%~6%。在 150°C 與 1.5 kV/mm 電場進行極化來激發水泥壓電複合材料的壓電性質。實驗結果顯示，PZT 級配會影響未添加奈米石英粉之壓電水泥的壓電性質，但是當壓電水泥添加奈米石英粉後，PZT 級配對壓電性質的影響卻會降低。單一粒徑 PP 在 4% 奈米石英粉時有最佳壓電應變常數  $d_{33}=103.3$  pC/N，相對介電常數  $\epsilon_r=544.6$ ，比未添加奈米石英粉之壓電水泥性質增加 30% 以上；而中級配的壓電水泥在 2% 奈米石英粉時有最佳壓電性質， $d_{33}=103.8$  pC/N 及相對介電常數  $\epsilon_r=439.8$ 。單一粒徑 PP 的機電耦合常數  $\kappa_t$  在 4% 奈米石英粉時有最佳值為 17.07%，當奈米石英粉添加至 6%， $\kappa_t$  值反而下降為 12.11%；而中級配則在 2% 奈米石英粉時有最佳  $\kappa_t$  值為 16.58%，但經過溫度處理後奈米石英粉最佳含量為 5%， $\kappa_t$  值為 16.38%。

**關鍵字：**奈米石英粉，最佳含量，壓電水泥，PZT 級配，壓電性質，機電耦合常數

#### Abstract

In order to improve the piezoelectric properties of cement piezoelectric composite materials (piezoelectric cement), nano-quartz powders with high dielectric constant are added as the admixture. In order to find the best content of adding nano-quartz powders, nano-quartz powders to replace the cement volume content of 1% to 6%. In this study, the piezoelectric cement is composed of 50 vol.% of the PZT ceramic inclusion and cement substrates. Two grades of PZTs, a single-grading (PP) and medium-grading (MG), were chosen to manufacture piezoelectric cement. Cement piezoelectric composites subjected to 1.5kV / mm electric field at 150 °C to evoke their piezoelectric properties. Experimental results show that the PZT gradation affects the piezoelectric properties of piezoelectric cement without nano-quartz powders, but the effect of PZT grade paired piezoelectricity reduced when the

nano-quartz powders adding to the piezoelectric cement. Materials with single-grading PP and 4% nano-quartz powders have the best piezoelectric strain factor  $d_{33}=103.3$  pC/N, relative dielectric constant  $\epsilon_r=544.6$ , with 30% increasing than piezoelectric cement without nano-quartz powders. The medium-grading piezoelectric cement has the best piezoelectric properties by adding 2% nano-quartz powder, with  $d_{33}=103.8$  pC/N and the relative permittivity  $\epsilon_r=439.8$ . The electromechanical coupling coefficient  $\kappa_t$  of single-grading PP has a best value of 17.07% at 4% nano-quartz powders. When the nano-quartz powders are up to 6%, the  $\kappa_t$  value has a 12.11% decrease. The medium-grading PZT and at 2% nano-quartz powders own the best  $\kappa_t$  value of 16.58%, but the optimum content of nano-quartz powders is 5% and the value of  $\kappa_t$  is 16.38% if temperature treatment is applied.

**Keywords:** nano-quartz powder、optimum content、piezoelectric cement、PZT gradation、piezoelectric properties、electromechanical coupling coefficient.

## 一、前言

奈米石英粉( $\text{SiO}_2$ )是一種無味、無毒、無污染的無機非金屬材料。由於其具備高耐熱、高絕緣、高介電性、高填充量、導熱係數低、熱膨脹係數低、化學性能穩定、硬度大、耐腐蝕等優越性能而具有廣闊的發展前景[1,2]。

營建工程智慧型結構應用 0-3 型水泥壓電複合材料，製作致動器(Actuator)及感測器(sensor)於結構健康檢測行之有年，已克服混凝土與結構之結合問題，述及 0-3 型水泥壓電複合材料大部分文獻皆聚焦於壓電應變常數  $d_{33}$  (piezoelectric strain factor)和相對介電常數 $\epsilon_r$  (relative dielectric constant)的影響因素，包括壓電陶瓷的體積含量、顆粒大小、極化時間、極化溫度、極化電壓、養護時間等[3,4]。

0-3 型水泥壓電複合材料係以水泥作為基材(matrix)，顆粒粉末型式的銦鈦酸鉛(PZT)壓電陶瓷為介質(inclusion)，並均勻地分布於水泥中，常以容易塑型及控制變因的乾拌方法壓製成型[5-8]。Li (2002) [7]發現不同粒徑 PZT 壓電陶瓷粉末(平均粒徑  $6.45\mu\text{m}$ 、 $148.8\mu\text{m}$ )，會影響 0-3 型水泥壓電複合材料壓電性質，其粉末越大則壓電應變常數  $d_{33}$  越大; Chiapanich (2007) [8]以 PZT 壓電陶瓷粉末(平均粒徑  $3.8\mu\text{m}$ 、 $148.8\mu\text{m}$ 、 $620\mu\text{m}$ )壓製成 0-3 型水泥壓電複合材料，其壓電應變常數  $d_{33}$  和相對介電常數 $\epsilon_r$ ，有隨著陶瓷粉末粒徑增大而增加之趨勢;龔紅宇(2011) [9]以 PZT 壓電陶瓷粉末(平均粒徑  $3\mu\text{m}$ 、 $29\mu\text{m}$ 、 $43\mu\text{m}$ 、 $71\mu\text{m}$ 、 $137\mu\text{m}$ 、 $218\mu\text{m}$ )壓製成 0-3 型水泥壓電複合材料，雖也發現其壓電應變常數  $d_{33}$ ，有隨著陶瓷粉末粒徑增加而增加之趨勢，但也注意到粉末粒徑越大，陶瓷粉末顆粒與水泥之間的空隙加大，造成極化後的壓電應變常數  $d_{33}$  呈現不穩定現象。

上述文獻大多利用平均粒徑的理念篩選壓電陶瓷粉末，粉末粒徑幾乎集中在某個篩號，或者是顆粒幾乎大小一致，而採用理想級配理論篩選大小顆粒均勻混合的方式則較為少見，因此林棟宏(2016) [10]以級配理論研發壓電陶瓷 PZT 之配比，並製成 PZT(粗、中、細)級配壓電水泥，其中以 PZT 中級配(MG)壓電水泥的性質為最佳。

本研究在 0-3 型水泥壓電複合材料中添加奈米石英粉取代部分水泥，並結合 PZT 中

級配配比設計，製成新的一種壓電水泥，在製作電極前後進行溫度處理，量測其壓電性質與傳統配比(單一粒徑)作為比較，及探討奈米石英粉對兩種級配的影響與最佳含量。

## 二、實驗計畫

### 2.1 材料與配比

本研究使用的奈米石英粉為新興的奈米材料，其粒徑 0.075~0.225  $\mu\text{m}$  僅一般矽灰 (0.10~0.26  $\mu\text{m}$ ) 的 1/10，且具有高介電性，能提升 0-3 型壓電水泥的壓電性質，表 1 為奈米石英粉的物理性質，其中比重參考 CNS 11272 「水硬性水泥密度試驗法」求得，其餘性質由大維石業股份公司提供，奈米石英粉粉體如圖 1 所示。

0-3 型壓電水泥是使用 I 型卜特蘭水泥做為膠結材，PZT 壓電陶瓷為介質組成，兩者體積各占 50%。本研究的 0-3 型壓電水泥，分為單一級配(PP)和中級配(GM)，並添加奈米石英粉取代水泥體積比，分別為 0%(對照組)、1%、2%、3%、4%、5%、6%。單一級配(PP)的 PZT 介質使用研磨後粒徑 75~150 $\mu\text{m}$  (通過#100 篩停留於#200 篩)粉末，級配 PZT 介質使用研磨後粒徑 75~600 $\mu\text{m}$ ，表 2 為中級配(GM)的配比設計。

表 1 奈米石英粉物理性質

比重	2.33
鬆散容重	280 kg/m <sup>3</sup>
球型結構	0.075~0.225 $\mu\text{m}$
比表面積	22200~31000 m <sup>2</sup> /kg
活性指數	28day強度比 $\leq$ 90~120
燒失量	極低
SiO <sub>2</sub> $\leq$ 80.0~92.0	矽鉻、矽鐵合金灰
SiO <sub>2</sub> $\leq$ 93.0~98.0	工業矽、金屬矽、矽鋁、合金灰

表 2.2 中級配(GM)配比設計

篩號	留篩重(g)	停留%	累積停留%	通過率(%)
#30	0	0	0	100
#50	21.6	40	40	60
#100	13.5	25	65	35
#200	18.9	35	100	0
底盤	--	--	--	--



圖1.奈米石英粉粉體

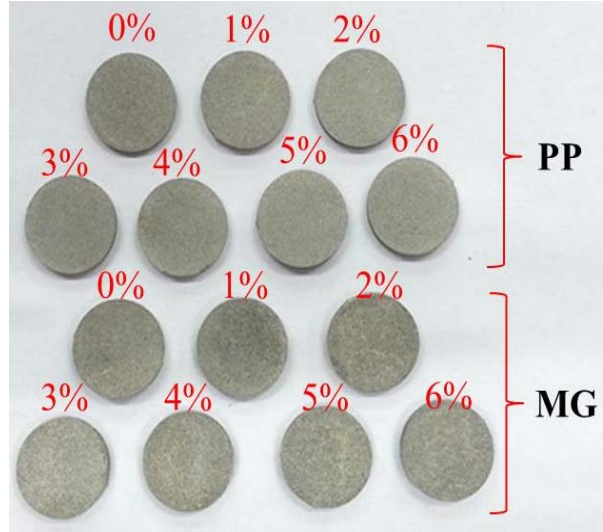


圖2. PP及MG壓電水泥試體

## 2.2 試體製作

將水泥、PZT 與奈米石英粉按照配比放入行星式球磨機混合均勻，混合均勻後，使用 MTS 萬能試驗機施加 80MPa 壓應力壓製成壓電水泥試片，放入恆溫水槽以 90°C 水氣養護 24 小時。養護完成後，對試體進行研磨至厚度 2mm±0.5mm。

## 2.3 試體極化

試體研磨完成後，如圖 2 所示，進行 23°C 和 140°C 溫度處理，持續恆溫 40 分鐘之後，在試體表面塗上導電銀膠形成正負電極，放入高溫爐烘烤使銀膠熟化於試體表面，銀膠熟化條件為溫度 150°C，熟化時間 30 分鐘。完成電極之試體，進行 23°C 和 140°C 溫度處理，再放入極化油槽進行極化，極化環境 150°C、電場 1.5kV/mm，極化時間 40 分鐘，試體完成極化後 24 小時量測極化後的壓電性質。

## 2.4 壓電性質量測

本研究均以三顆試體的平均值作為試驗值，量測環境為室溫 23°C、溼度 50%，利用壓電應變常數量測儀量紀錄壓電應變常數  $d_{33}$ ；阻抗分析儀量測電容值  $C$  和阻抗頻譜圖，分別計算相對介電常數  $\epsilon_r$  與  $\kappa_t$  值，公式如下：

$$\epsilon_r = \frac{Ct}{A\epsilon_0} \quad (1)$$

式中  $\epsilon_r$  為相對介電常數； $C$  為 1.0kHz 下的電容值； $t$  為試體厚度； $A$  為試體面積； $\epsilon_0$  為真空中的介電常數，值為  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m。

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

式中  $\kappa_i$  為機電耦合常數； $f_m$  為最小阻抗時之頻率； $f_n$  為最大阻抗時之頻率。

### 三、結果與討論

本研究的 0-3 型壓電水泥之 PZT(介質)組成有單一級配、中級配兩種，代號分別為 PP、MG 再分別添加奈米石英粉取代水泥體積比 1%、2%、3%、4%、5%、6%。在製作電極前後進行 23°C 和 140°C 溫度處理，代號分別為 A、B，因此 0-3 型壓電水泥有 AA、BB 兩組溫度處理。

#### 3.1 奈米石英粉對壓電水泥 $d_{33}$ 的影響

圖 3 為添加 1~6% 奈米石英粉的 PP 壓電水泥進行製作電極前 23°C、極化前(製作電極後) 23°C 溫度處理 AA 之壓電應變常數  $d_{33}$ ，含量 0%(對照組)的  $d_{33}$  為 56.29 pC/N，1% 為 60.86 pC/N，2% 為 62.62 pC/N，3% 為 67.0 pC/N，4% 為 68.4 pC/N，5% 為 73.4 pC/N，6% 為 83.40 pC/N。其中 6% 最高，0% 最低，顯示出 PP 壓電水泥在 AA 條件下，奈米石英粉取代水泥量 6% 可獲得最高  $d_{33}$  值，且隨著含量增加  $d_{33}$  值也隨之增加，6% 比 0% 高約 48%。齡期 10 天以內以含量 6% 增幅最大，5% 次之，齡期 10~60 天各含量  $d_{33}$  值隨齡期增加，在齡期 60~90 天時，各含量  $d_{33}$  值逐漸趨於穩定。

圖 4 為添加 1~6% 奈米石英粉的 PP 壓電水泥進行製作電極前 140°C、極化前(製作電極後) 140°C 溫度處理 BB 之壓電應變常數  $d_{33}$ ，含量 0% 的  $d_{33}$  為 80.53 pC/N，1% 為 84.02 pC/N，2% 為 85.82 pC/N，3% 為 89.21 pC/N，4% 為 103.37 pC/N，5% 為 95.31 pC/N，6% 為 102.02 pC/N。其中 4% 最高，0% 最低，顯示出 PP 壓電水泥在 BB 條件下，奈米石英粉取代水泥量 4% 可獲得最高  $d_{33}$  值，4% 比 0% 高約 28%。隨著含量增加至 4% 時， $d_{33}$  值隨之增加，但增加至 5% 則會下降，至 6% 時反而又上升，推測為改變製作電極前後的溫度能激發奈米石英粉的活性，使其含量至 4% 時便有最高  $d_{33}$  值，含量過多反而會使  $d_{33}$  值降低且沒規律，各含量在齡期 60~90 天時， $d_{33}$  值也逐漸穩定。

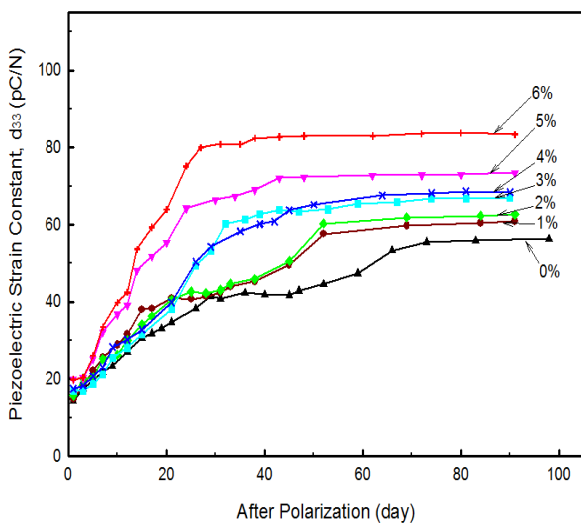


圖 3. 含量對 PP 壓電水泥  $d_{33}$  的影響(AA)

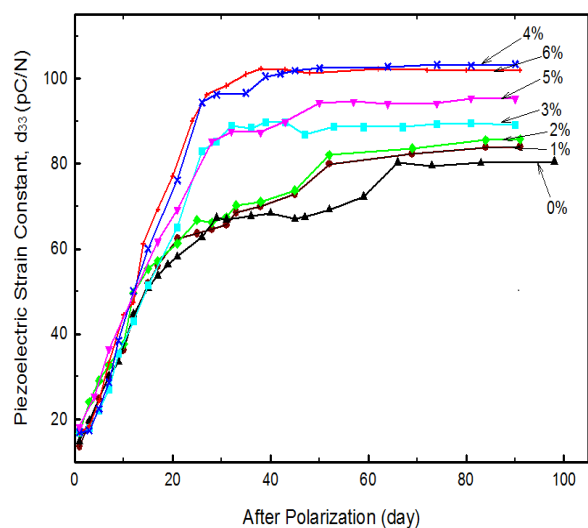


圖 4. 含量對 PP 壓電水泥  $d_{33}$  的影響(BB)



圖 5 為添加 1~6% 奈米石英粉的 MG 壓電水泥進行溫度處理 AA 之壓電應變常數  $d_{33}$ ，含量 0% 的  $d_{33}$  為 83.42 pC/N，1% 為 75.49 pC/N，2% 為 89.05 pC/N，3% 為 69.22 pC/N，4% 為 66.01 pC/N，5% 為 68.01 pC/N，6% 為 68.64 pC/N。其中 2% 最高，0% 次之，4% 最低，顯示出 MG 壓電水泥在 AA 條件下，奈米石英粉取代水泥量 2% 可獲得最高  $d_{33}$  值，其餘含量皆比 0% 的  $d_{33}$  值低。含量 2% 雖有最高  $d_{33}$  值，但卻只比 0% 的 MG 壓電水泥之  $d_{33}$  值高約 6%，可能原因為 PZT 級配已影響及提升壓電水泥的壓電性質，再添加奈米石英粉的提升效果便有限。齡期 30 天以前，各含量  $d_{33}$  值皆隨齡期增加而成長，30 天以後便開始成長緩慢，之後趨近穩定直至齡期 90 天。

圖 6 為添加 1~6% 奈米石英粉的 MG 壓電水泥進行溫度處理 BB 之壓電應變常數  $d_{33}$ ，含量 0% 的  $d_{33}$  為 99.54 pC/N，1% 為 89.58 pC/N，2% 為 103.86 pC/N，3% 為 93.25 pC/N，4% 為 86.76 pC/N，5% 為 80.02 pC/N，6% 為 85.43 pC/N。其中 2% 最高，0% 次之，5% 最低，顯示出 MG 壓電水泥在 BB 條件下，奈米石英粉取代水泥量 2% 可獲得最高  $d_{33}$  值，其餘含量皆比 0% 的  $d_{33}$  值低，趨勢與溫度處理 AA 結果類似，但 BB 條件下含量 3% 的  $d_{33}$  值比 1% 高，而含量增加至 4%、5% 時， $d_{33}$  值會下降，至含量 6% 又再度升高。造成此趨勢的原因，可能與奈米石英粉經高溫處理後被激發出活性有關，BB 條件下含量 2% 的  $d_{33}$  值相對於 AA 條件高約 16%，而含量 0% 的  $d_{33}$  值相對於 AA 條件高約 19%，顯示出 PZT 級配對壓電水泥之影響經溫度處理 BB 後，影響  $d_{33}$  值的增幅量略高於奈米石英粉的影響，因此證明在 PZT 級配壓電水泥中添加奈米石英粉的增益效果有限。

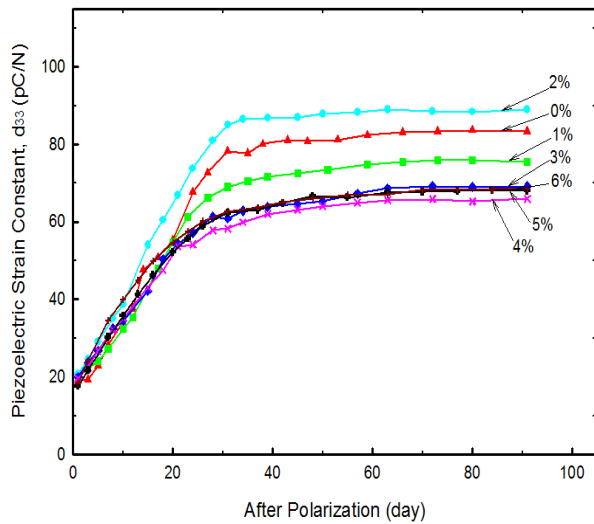


圖 5. 含量對 MG 壓電水泥  $d_{33}$  的影響(AA)

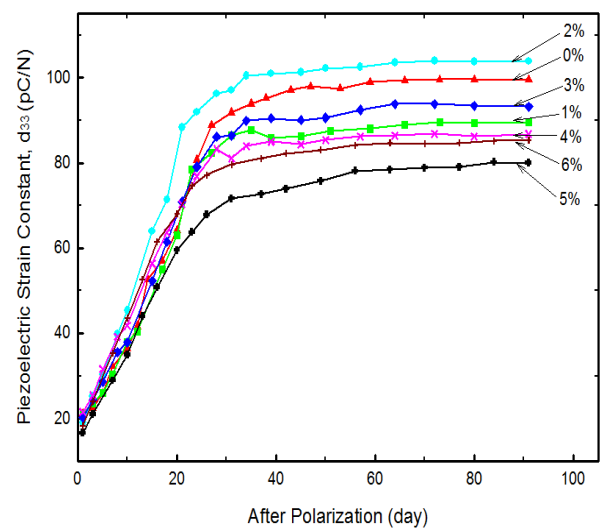


圖 6. 含量對 MG 壓電水泥  $d_{33}$  的影響(BB)

### 3.2 奈米石英粉對壓電水泥 $\epsilon_r$ 的影響

圖 7 為添加 1~6% 奈米石英粉的 PP 壓電水泥進行溫度處理 AA 之相對介電常數  $\epsilon_r$ ，含量 0% (對照組) 的  $\epsilon_r$  為 178.20，1% 為 203.42，2% 為 226.56，3% 為 240.81，4% 為 275.18，5% 為 295.71，6% 為 327.67。其中 6% 最高，0% 最低，顯示出 PP 壓電水泥在 AA 條件下，奈米石英粉取代水泥量 6% 有最高  $\epsilon_r$  值，且隨著含量增加  $\epsilon_r$  值也隨之增加，6% 比 0% 高約 83%。成長趨勢與其壓電應變常數  $d_{33}$  之趨勢相同，於齡期 60~90 天逐漸穩定。

圖 8 為添加 1~6% 奈米石英粉的 PP 壓電水泥進行溫度處理 BB 之相對介電常數  $\epsilon_r$ ，含量 0% 的  $\epsilon_r$  為 266.30，1% 為 314.25，2% 為 331.32，3% 為 382.75，4% 為 554.63，5% 為 412.56，6% 為 483.64。其中 4% 最高，0% 最低，顯示出 PP 壓電水泥在 BB 條件下，奈米石英粉取代水泥量 4% 有最高  $\epsilon_r$  值，4% 比 0% 高約 108%，比在 AA 條件下含量 6% 影響  $\epsilon_r$  值來得大，證實奈米石英粉經高溫處理過後，其活性會被激發，因其具高介電性，所以能有效提升 PP 壓電水泥的  $\epsilon_r$  值，但含量過多其增益效果隨之下降。

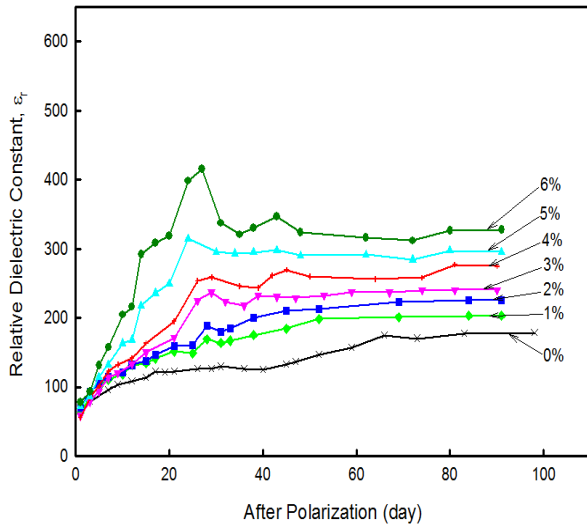


圖 7. 含量對 PP 壓電水泥  $\epsilon_r$  的影響(AA)

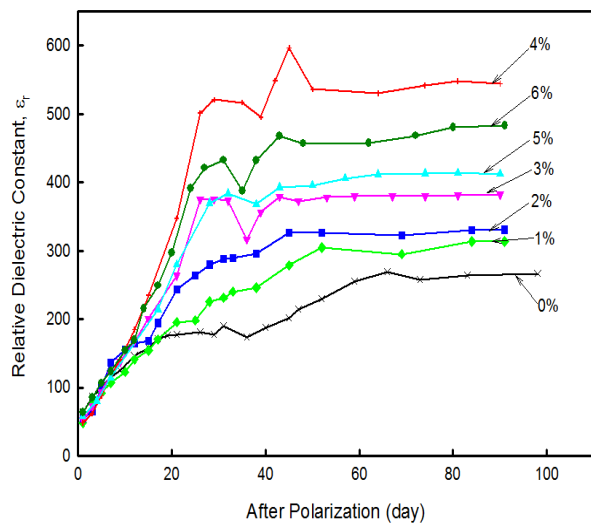


圖 8. 含量對 PP 壓電水泥  $\epsilon_r$  的影響(BB)

圖 9 為添加 1~6% 奈米石英粉的 MG 壓電水泥進行溫度處理 AA 之相對介電常數  $\epsilon_r$ ，含量 0% 的  $\epsilon_r$  為 269.83，1% 為 249.64，2% 為 299.84，3% 為 227.02，4% 為 190.02，5% 為 223.02，6% 為 224.21。其中 2% 最高，0% 次之，4% 最低，顯示出 MG 壓電水泥在 AA 條件下，奈米石英粉取代水泥量 2% 有最高  $\epsilon_r$  值，其餘含量皆比 0% 的  $\epsilon_r$  值低，成長趨勢亦與其壓電應變常數  $d_{33}$  之趨勢相同。雖含量 2% 的  $\epsilon_r$  值最高，但與 0% 的 MG 壓電水泥  $\epsilon_r$  值相比只高約 11%，此結果表明，奈米石英粉未經高溫處理(BB)，並不能激發其活性，亦即對 MG 壓電水泥無法有大量增益  $\epsilon_r$  值的效果。

圖 10 為添加 1~6% 奈米石英粉的 MG 壓電水泥進行溫度處理 BB 之相對介電常數  $\epsilon_r$ ，含量 0% 的  $\epsilon_r$  為 336.94，1% 為 294.33，2% 為 439.80，3% 為 312.09，4% 為 263.49，5% 為 244.66，6% 為 251.22。其中 2% 最高，0% 次之，5% 最低，顯示出 MG 壓電水泥在 BB 條件下，奈米石英粉取代水泥量 2% 有最高  $\epsilon_r$  值，其餘含量皆比 0% 的  $\epsilon_r$  值低，成長趨勢亦與其壓電應變常數  $d_{33}$  之趨勢相同。BB 條件下含量 2% 的  $\epsilon_r$  值比 0% 高約 30%，係因為奈米石英粉經高溫處理後被激發出活性，相較於 AA 條件含量 2% 的  $\epsilon_r$  值比 0% 只高出 11% 的增益效果來得好。另外 BB 條件下含量 2% 的  $\epsilon_r$  值相對於 AA 條件高約 46%，而含量 0% 的  $\epsilon_r$  值相對於 AA 條件高約 24%，此結果表明，奈米石英粉經溫度處理 BB 後，影響  $\epsilon_r$  值的增幅量高於 PZT 級配對壓電水泥的影響，因此證明在 PZT 級配壓電水泥中添加奈米石英粉，雖對其  $d_{33}$  的增益效果有限，但卻能有效提升其  $\epsilon_r$  值。

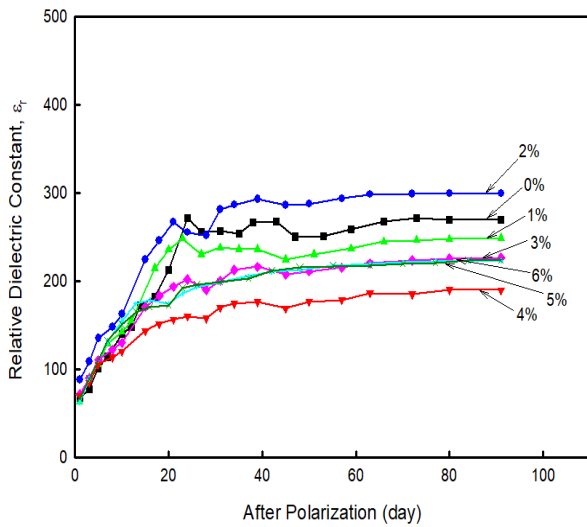


圖9.含量對MG壓電水泥  $\epsilon_r$  的影響(AA)

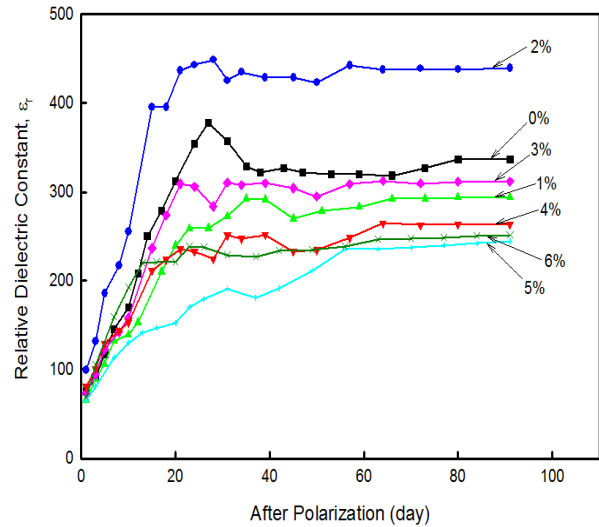


圖10.含量對MG壓電水泥  $\epsilon_r$  的影響(BB)

### 3.3 奈米石英粉對壓電水泥 $\kappa_i$ 的影響

圖 11 為添加 1~6% 奈米石英粉的 PP 壓電水泥進行溫度處理 AA 之機電耦合常數  $\kappa_i$ ，含量 0% 的  $\kappa_i$  為 14.64%，1% 為 13.63%，2% 為 16.00%，3% 為 16.62%，4% 為 17.07%，5% 為 13.47%，6% 為 12.11%。其中 4% 最高，6% 最低，顯示出 PP 壓電水泥在 AA 條件下，奈米石英粉取代水泥量 4% 有最高  $\kappa_i$  值。當 PP 壓電水泥添加奈米石英粉 1% 時， $\kappa_i$  值會稍微降低，之後  $\kappa_i$  值隨含量增加而增加，直至 4% 時有最高值，而含量過多則會造成  $\kappa_i$  值降低。

圖 12 為添加 1~6% 奈米石英粉的 PP 壓電水泥進行溫度處理 BB 之機電耦合常數  $\kappa_i$ ，含量 0% 的  $\kappa_i$  為 13.75%，1% 為 13.62%，2% 為 14.62%，3% 為 16.48%，4% 為 16.71%，5% 為 13.41%，6% 為 14.46%。其中 4% 最高，5% 最低，顯示出 PP 壓電水泥在 BB 條件下，奈米石英粉取代水泥量 4% 有最高  $\kappa_i$  值。趨勢與 AA 條件類似，但經高溫處理後，各含量的  $\kappa_i$  值略低於 AA 條件，唯有 6% 增加了 2.35%，推測為奈米石英粉的含量增加，反應活性增加，因此造成  $\kappa_i$  值增加，但其值仍未比 4% 的值高，此結果證實奈米石英粉含量 4% 為 PP 壓電水泥提升  $\kappa_i$  值的最佳含量。

圖 13 為添加 1~6% 奈米石英粉的 MG 壓電水泥進行溫度處理 AA 之機電耦合常數  $\kappa_i$ ，含量 0% 的  $\kappa_i$  為 16.50%，1% 為 16.30%，2% 為 16.58%，3% 為 15.40%，4% 為 13.42%，5% 為 14.42%，6% 為 14.43%。其中 2% 最高，0% 次之，4% 最低，顯示出 MG 壓電水泥在 AA 條件下，奈米石英粉取代水泥量 2% 有最高  $\kappa_i$  值。當 MG 壓電水泥添加奈米石英粉 1% 含量時， $\kappa_i$  值會稍為降低，2% 為最高值，之後隨含量增加而下降，至 5% 時反而上升，達 6% 時已無明顯提升效果。且 2% 的  $\kappa_i$  值僅比 0% 高 0.08%，而 AA 條件下，MG0% 的  $\kappa_i$  值比 PP0% 高 1.86%，此結果表明，PZT 級配已對壓電水泥造成增益效果，因此添加奈米石英粉的效果有限，2% 為 AA 條件下 MG 壓電水泥提升  $\kappa_i$  值的最佳含量。

圖 14 為添加 1~6% 奈米石英粉的 MG 壓電水泥進行溫度處理 BB 之機電耦合常數



$\kappa_t$ ，含量 0% 的  $\kappa_t$  為 16.37%，1% 為 16.24%，2% 為 16.36%，3% 為 14.78%，4% 為 14.72%，5% 為 16.38%，6% 為 13.49%。其中以 5% 最高，0% 次之，6% 最低，顯示出 MG 壓電水泥在 BB 條件下，奈米石英粉取代水泥量 5% 有最高  $\kappa_t$  值。經高溫處理後，0% MG 壓電水泥的  $\kappa_t$  值略為下降；添加奈米石英粉 1% 時， $\kappa_t$  值會稍微下降；而 2% 小幅上升，之後直至含量 4% 呈降低現象；5% 反而大幅上升，6% 則有最低值。此結果表明，經高溫處理後，奈米石英粉含量增加，反應活性增大，因此造成 BB 條件下的 4%  $\kappa_t$  值比 AA 條件高 1.30%；5% 高 1.96%，而對於 BB 條件下的 MG 壓電水泥而言，6% 可能為含量過多，所以對  $\kappa_t$  值的影響不升反降，且 5% 為提升  $\kappa_t$  值的最佳含量。

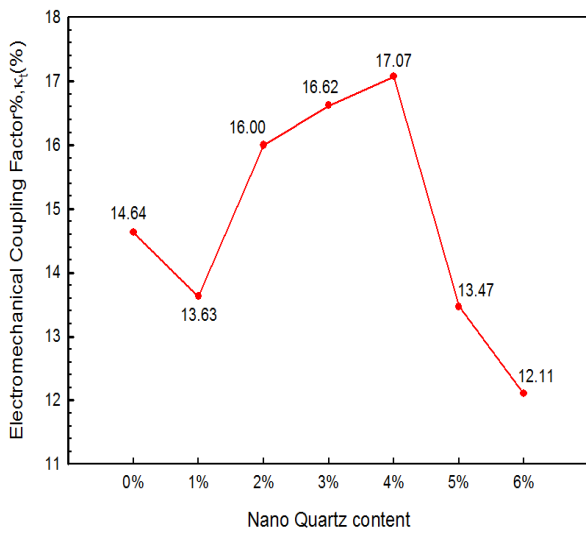


圖 11. 含量對 PP 壓電水泥  $\kappa_t$  的影響(AA)

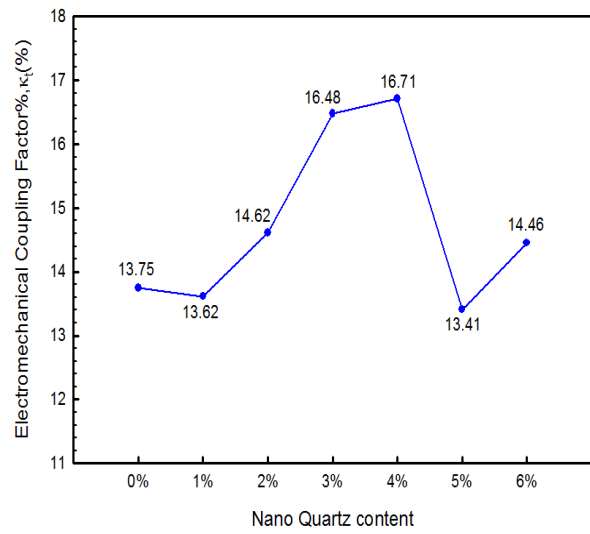


圖 12. 含量對 PP 壓電水泥  $\kappa_t$  的影響(BB)

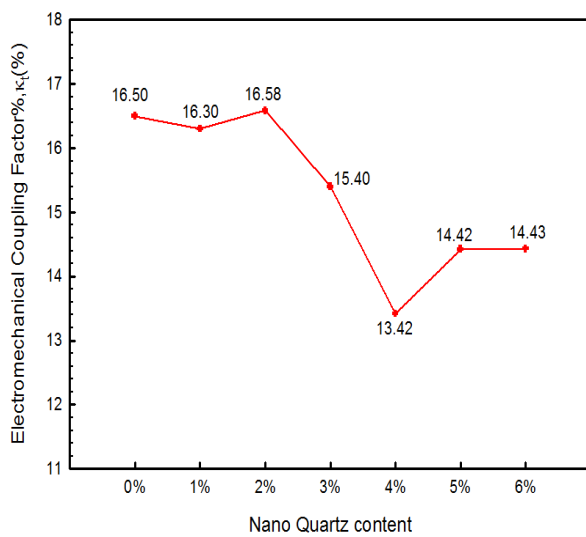


圖 13. 含量對 MG 壓電水泥  $\kappa_t$  的影響(AA)

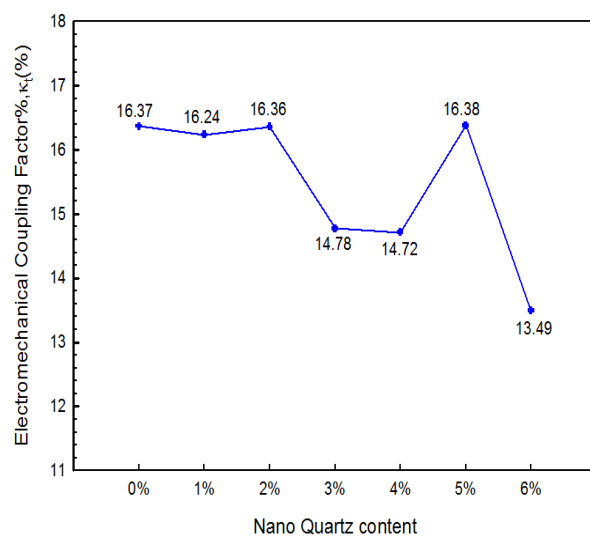


圖 14. 含量對 MG 壓電水泥  $\kappa_t$  的影響(BB)

#### 四、結論

以 PZT 級配(MG)及單一級配(PP)分別製成 0-3 型壓電水泥，並在其中添加奈米石英粉，探討奈米石英粉經溫度處理(AA、BB)後，對壓電水泥壓電性質的影響，本研究的壓電性質包含壓電應變常數  $d_{33}$ 、相對介電常數  $\epsilon_r$ 、機電耦合常數  $\kappa_t$ ，研究結果歸納如下：

1. 奈米石英粉對壓電水泥  $d_{33}$  的影響，對於 PP 及 MG 壓電水泥，均在製作電極前後分別以 140°C 溫度處理(BB)，有較好的  $d_{33}$  值，PP 最佳含量為 4%， $d_{33}$  為 103.37 pC/N；MG 最佳含量為 2%， $d_{33}$  為 103.86 pC/N。而在製作電極前後分別以 23°C 溫度處理(AA)，PP 最佳含量為 6%， $d_{33}$  為 83.40 pC/N；MG 最佳含量為 2%， $d_{33}$  為 89.05 pC/N。
2. 奈米石英粉對壓電水泥  $\epsilon_r$  的影響，與  $d_{33}$  結果雷同，對於 PP 及 MG 壓電水泥，均在溫度處理(BB)，有較好的  $\epsilon_r$  值，PP 最佳含量為 4%， $\epsilon_r$  為 554.63；MG 最佳含量為 2%， $\epsilon_r$  為 439.80。而在溫度處理(AA)，PP 最佳含量為 6%， $\epsilon_r$  為 327.67；MG 最佳含量為 2%， $\epsilon_r$  為 299.84。
3. 奈米石英粉對壓電水泥  $\kappa_t$  的影響，對於 PP 及 MG 壓電水泥，均在溫度處理(AA)，有較好的  $\kappa_t$  值，PP 最佳含量為 4%， $\kappa_t$  為 17.07%；MG 最佳含量為 2%， $\kappa_t$  為 16.58%。而在溫度處理(BB)，PP 最佳含量為 4%， $\kappa_t$  為 16.71%；MG 最佳含量為 5%， $\kappa_t$  為 16.38%。
4. 對於 PP 及 MG 壓電水泥，壓電應變常數  $d_{33}$  與相對介電常數  $\epsilon_r$  成長趨勢和最佳含量皆相同，但機電耦合常數  $\kappa_t$  較佳的含量，其  $d_{33}$  與  $\epsilon_r$  值不一定為最佳值，因此若壓電水泥感測器需要較高  $\kappa_t$  值來進行能源捕捉，勢必得犧牲掉些許  $d_{33}$  與  $\epsilon_r$  值。
5. 在壓電水泥中添加適當含量的奈米石英粉，可提升其壓電性質，對於 PP 壓電水泥其增益效果大於 MG 壓電水泥，因 PZT 級配已對壓電水泥造成增益效果，因此再添加奈米石英粉的效果有限，而溫度處理(BB)能激發出奈米石英粉的活性，會提升壓電性質與影響最佳含量。

#### 參考文獻

- [1] 李建德、楊朝兵、王祥、高麗榮、周文梅、王麗華，球形硅微粉的微觀結構研究，廣東化工，第 43 卷，332 期，第 68-69 頁，2016。
- [2] 阮建軍，球形硅微粉的研究進展，科技視界，第 33 卷，第 415-417 頁，2013。
- [3] Huang, S., Chang, J., Lu, L., Liu, F., Ye Z. and Cheng, X., "Preparation and polarization of 0-3 cement based piezoelectric composites", Materials Research Bulletin, Vol.41, pp.291-297, 2006.
- [4] Huang, S., Ye, Z., Hu, Y., Chang, J., Lu, L., and Cheng, X., "Effect of Forming Pressures on Electric Properties of Piezoelectric Ceramic Sulphoaluminate Cement Composites", Composites Science and Technology, Vol. 67, pp. 135-139, 2007.

- [5] Dong, B., and Li, Z., “Cement-Based Piezoelectric Ceramic Smart Composites”, *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 1363-1371, 2005.
- [6] 潘煌鏗、陳彥年，0-3 型 PZT 水泥基壓電複合材料製程與極化技術，*中國土木水利工程學刊*，第 23 卷，第 1 期，第 1-10 頁，2011。
- [7] Li, Z., Dong, B. and Wu, K.R., “Cement-based 0-3 Piezoelectric composites”, *J. American Ceramics Society*, Vol.85, pp. 305-313, 2002.
- [8] Chaipanich, A., “Effect of PZT Particle Size on Dielectric and Piezoelectric Properties of PZT-Cement Composites”, *Current Applied Physics*, Vol.7, pp. 574-577, 2007.
- [9] 龔紅宇、張玉軍、車松蔚、趙玉軍，粒度對水泥基壓電複合材料的壓電性能和力學性能的影響，*人工晶體學報*，第 40 卷，第 1 期，第 213-217 頁，2011。
- [10] 林棟宏，0-3 型水泥壓電複合材料配比研發及混凝土構件壓電效應，*國立高雄應用科技大學博士論文*，2016。