

0-3 型矽灰水泥壓電複合材料壓電性質

Piezoelectric Properties of Silica Fume Cement Piezoelectric Composites

楊瑞豪¹ 潘煌鏗² 林棟宏³ 吳岱芸⁴

¹ 高雄應用科技大學土木工程系研究生, a8850358@gmail.com

² 高雄應用科技大學土木工程系教授, pam@kuas.edu.tw

³ 高雄應用科技大學土木工程系研究生, momoma@kuas.edu.tw

⁴ 高雄應用科技大學土木工程系學士生, yunsall7@gmail.com

摘要

矽灰/水泥壓電複合材料以體積 50%之 PZT 壓電陶瓷為介質，水泥和矽灰組成膠結材，其中矽灰取代水泥體積 10%、20%、30%和 40%。材料乾拌混合後以 80MPa 壓力壓製成直徑 15mm 厚度 2mm 的試體，在 90°C 的潮濕環境養護 1 天，極化條件為環境溫度 150°C、極化電場 1.5kV/mm 與極化時間 30 分鐘，製造具有壓電性質之 0-3 型水泥壓電複合材料。實驗結果顯示，試體極化後的相對介電常數 ϵ_r 和壓電應變常數 d_{33} ，會隨著齡期繼續發展，性質約在極化後 25 天趨於穩定。壓電電壓常數 g_{33} 會在 3 天後達到穩定，但是機電耦合係數 κ_t 則與齡期無關。光學顯微鏡(OM)顯示，添加矽灰可以改善水泥壓電複合材料的緻密性，進而提升電容 C 、 ϵ_r 、 d_{33} 、 g_{33} 與 κ_t ，其中以 20vol.%矽灰取代量的效益最好，而取代量到水泥 40vol.%的 κ_t 值仍持續增加。20vol.%矽灰之 SF20 的 d_{33} 達到 49.9 pC/N 比 PP 材料(0%矽灰)增加 75.1%，且矽灰/水泥壓電複合材料的 g_{33} 比純壓電陶瓷 PZT 的 g_{33} 高。

關鍵字:矽灰、壓電性質、PZT、水泥壓電複合材料

Abstract

Silica fume/cement piezoelectric composites consists of 50vol.% PZT as the inclusion, and, cement and silica fume as the binder, where cement is replaced by silica fume from 10% to 40% by volume. Composites were pressed into disk with 15 mm diameter and 2 mm thickness by a compressive stress of 80MPa, cured in 90°C water for 1 day. After that, specimens were polarized by 1.5kV/mm in 150°C silicon oil bath for 30 minutes to obtain piezoelectric properties. Experiments show that piezoelectric strain constant d_{33} and relative dielectric constant ϵ_r increase rapidly at first 10 days after the polarization, and then approach to constant values after the 25th days. In addition, the values of piezoelectric voltage constant g_{33} reach constants after the polarization of 3 days. However, electromechanical coupling coefficient κ_t is independent of material ages. From the observation of optical microscope (OM), increasing silica fume continues to reduce the pores between PZT and cement. This

leads to raise piezoelectric properties such as capacitance C , ϵ_r , d_{33} , g_{33} and κ_t , in which 20vol.% silica fume provide the most effective for C , ϵ_r , d_{33} and g_{33} , and more silica fume keeps increasing κ_t . SF20 with $d_{33}= 49.9$ pC/N is about 75.1% increment of PP material. Piezoelectric voltage constant g_{33} for all silica fume/cement piezoelectric composites is always greater than that of piezoelectric ceramic PZT.

Keywords: Silica fume, Piezoelectric properties, Lead Zirconate Titanate(PZT), Cement piezoelectric composites, Optical microscope

一、前言

混凝土是土木建築結構最常使用的材料，除了要考慮結構本身的安全性，還要考量耐久性與生態環境。由於工業製造所產生的副產物，如矽灰(silica fume)、飛灰(fly ash)與水淬爐石(slag)具有卜作嵐反應，添加在混凝土後可提高結構物的安全性與耐久性，還能降低水泥用量進而減少水泥產生時的二氧化碳排放，可減緩對生態環境的衝擊，具有取代部分水泥，降低水泥用量功能，為目前最普遍使用的卜作嵐材料。

另外，隨著時代進步，壓電材料(piezoelectric materials)早在 18 世紀已被發現，有關壓電材料的應用及發明已不計其數，如應用於電子構件、光學儀器、力學量測儀與醫療儀器等。而常應用在土木建築結構領域的感測器(sensors)與致動器(actuators)，大部分是壓電材料製成，可用於結構物的監測與控制。但是，當壓電感測器與致動器應用在混凝土結構物時，因混凝土與壓電材料的性質如聲阻抗(acoustic impedance)與體積穩定性(volume stability)差異性太大，造成感測器與致動器的敏感度或相容性不佳。為改善壓電材料與混凝土的相容性問題，從 2002 年開始發展 0-3 型水泥壓電複合材料(0-3 type cement-based piezoelectric composites) [1]，是以水泥做為壓電複合材料的基材。

0-3 型水泥壓電複合材料是以水泥為膠結材，壓電材料粉末為介質以三維空間型式均勻分佈在水泥中，壓電介質常選用銦鈦酸鉛(PZT, lead zirconate titanate)壓電陶瓷。試體製程是將水泥與未經極化(polarization)之 PZT 預先混合，再以乾粉形式壓製或以加水方式拌製成為水泥壓電複合材料。考慮水泥壓電複合材料製程的變異性，以乾拌混合壓製方式最為常見[2-4]，製程上容易塑造形狀，也較節省成本[5]，在土木工程領域的應用有很大前景。

水泥壓電複合材料的研究，以提高壓電性質例如壓電應變常數 d_{33} (piezoelectric strain constant)或壓電應變常數 g_{33} (piezoelectric voltage constant)等為目標，已知影響壓電性質的因素，如壓電陶瓷粒徑和含量[6-10]，Chaipanich [8]以微米尺度的 PZT 和水泥結合，提出 PZT 粒徑越大之 d_{33} 越高的結論，而 Li [9]也有類似結論，並觀察得到粒徑越大的 PZT 卻會降低介電常數 ϵ_{33} (dielectric constant)；Li [10]嘗試以體積含量 35%~80%的奈米 PZT 做為壓電介質，得到 PZT 含量越多的水泥壓電複合材料有較高的 d_{33} 值。另外，試體在極化電場內的極化時間也會影響壓電性質，適當的極化時間可以獲得較佳的壓電性質，但是極化時間過久時，反而不利於 d_{33} [11]的發展，但是卻能夠提高機電耦合係數 k_t (electromechanical coupling coefficient) [12]。極化時的溫度也會影響壓電性質，Dong [12] 以 20°C、90°C、130°C、160°C 極化溫度對試體進行極化，得到提高極化溫度可以適度的增加 k_t 。有關極化電壓的影響，Huang [2]和 Dong [12]分別以

2.0~5.0kV/mm 和 1.0~6.5kV/mm 的電壓對相同 PZT 含量的水泥壓電複合材料進行極化，發現施加較高的極化電壓能夠增加 d_{33} 。Wang [13]比較蒸汽養護和熱水養護對 d_{33} 的影響，得到試體蒸汽養護 1 天後再進行極化的 d_{33} 會小於採用熱水養護的 d_{33} ，但是養護時間 38 天之 d_{33} 則會大於熱水養護。

要提高水泥壓電複合材料的壓電性質，除了上述的壓電介質含量與粒徑、製程[4,14]、極化條件和養護方式外，也可嘗試特殊水泥或其他壓電介質，如 Cheng [15]使用鋁硫水泥 (sulphoaluminate cement) 與 PMN (lead magnesium niobate) 壓電陶瓷，Hunpratub [16]使用 BZT-BCT 壓電陶瓷取代 PZT 來提高 d_{33} 和介電常數 ϵ_{33} 。另外，也有在 PZT/水泥壓電複合材料添加碳黑(carbon black) [17]，發現添加體積含量 1.0%的碳黑時的 d_{33} 最佳；當添加奈米碳管(CNT, carbon nanotube)時，Gong [18]發現含 0.3vol.%奈米碳管之 d_{33} 和 g_{33} 效果最好。而利用卜作嵐材料添加在 PZT/水泥壓電複合材料來提高壓電性質，Chaipanich [19]在 2007 年用矽灰取代水泥的 5%與 10%重量，比較試體極化後 1 天的性質，做出增加矽灰含量能夠提高介電常數 ϵ_{33} ，但是對提高 d_{33} 效果不大的結論；Pan [20]以三種卜作嵐材料-矽灰、爐石和飛灰-分別取代水泥 20%體積，添加在 50vol.%PZT 之水泥壓電複合材料內，觀察極化後 1~14 天壓電性質，得到在水泥壓電複合材料添加卜作嵐材料的 d_{33} 性質以矽灰的效果最好，但是試體卻是最不容易極化，即含矽灰之水泥壓電複合材料的極化延時(trigger time)最久且極化成功率最低。

這裡探討矽灰水泥壓電複合材料壓電性質，考慮矽灰含量與極化後的齡期對壓電性質的影響，矽灰取代水泥的 0%、10%、20%、30%和 40%體積，試體經 90°C 高溫養護 1 天後以 1.5kV/mm 電場進行極化 30 分鐘，即化成功後連續觀測 1 天~30 天的壓電性質，包括 d_{33} 、 g_{33} 、 ϵ_r 、介電損失 D (dielectric loss)、電容 C (capacitance)、與機電耦合係數 κ_t 。

二、實驗內容

2.1 材料與配比

0-3 型矽灰水泥壓電複合材料的膠結材(基材)是水泥和矽灰，介質是 PZT 壓電陶瓷。水泥是東南水泥公司生產的 I 型卜特蘭水泥，比重 3.16，細度 349m²/kg；矽灰是佑聲企業公司代理，為非壓密顆粒，形狀是圓球形，細度 20,000m²/kg，比重 2.2，用途是填補水泥與 PZT 之間的空隙，增加水泥壓電複合材料的緻密性；壓電陶瓷選用 Ka 型的銦鈦酸鉛燒結體，比重 7.9，經研磨過篩後取 75 ~ 150 μm 粒徑，PZT 物理性質與壓電性質參見表 1。試體電極使用 SYP-4570 導電銀膠，熱化溫度為 150°C 保持 30 分鐘。

表 1 Ka 型 PZT 壓電陶瓷性質

性質	代號 (單位)	Ka型
壓電應變常數	d_{33} (pC/N)	470
壓電電壓常數	g_{33} (mV-m/N)	24
機電耦合係數	κ_t	0.72
機械品質因數	Q_m	65
相對介電常數	$\epsilon_r (= \epsilon_{33}/\epsilon_0)$	2100
介電損失	D (= tan δ) (%)	1.5
居禮溫度	T_c (°C)	325
密度	ρ (g/cm ³)	7.9

0-3 型矽灰水泥壓電複合材料的配比如表 2 所示，其中 PZT 壓電陶瓷含量固定，占試體的 50%體積；試體編號 PP 是對照組，沒有添加矽灰，水泥含量占試體 50%體積，為水泥壓電複合材料；矽灰/水泥壓電複合材料是對照組 PP 材料的部分水泥被矽灰取代，用編號 SF 表示，例如 SF10 表示矽灰取代 10 vol.%水泥，有 4 種矽灰/水泥壓電複合材料，即 SF10、SF20、SF30 和 SF40。

表 2 矽灰/水泥壓電複合材料配比 (kg/m³)

試體編號	矽灰取代水泥 (vol.%)	PZT	水泥	矽灰
PP	0	3950	1580	0
SF10	10	3950	1422	110
SF20	20	3950	1264	220
SF30	30	3950	1106	330
SF40	40	3950	948	440

表 2 的水泥壓電複合材料的配比不含水，製作試體時考慮材料的均勻問題，將各組成材料放入行星式球磨機內進行乾粉拌合，材料均勻混合後以 MTS 試驗機施加 80MPa 壓應力將試體壓製成直徑 15mm 的圓柱體，如圖 1。當試體製作完成後，利用恆溫循環水槽進行 90°C 高溫養護 1 天。

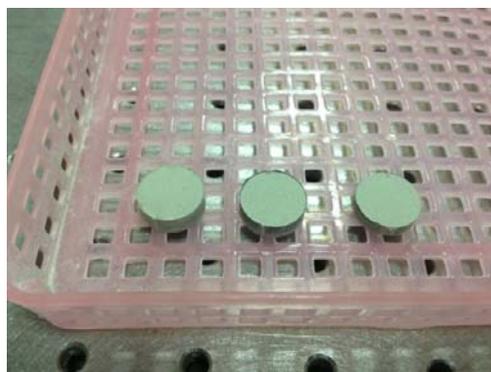


圖 1 乾粉壓製完成的試體

2.2 試體極化

試體養護 1 天後從恆溫水槽取出，進行拋光研磨至厚度 $2\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ (圖 2)，試體拋光研磨後放置室內氣乾約 1 小時，直到試體表面完全乾燥。為製作試體的電極，在試體上下表面均勻塗佈導電銀膠，並放入 150°C 烘箱內持溫 30 分鐘，使銀膠電極熟化能附著於材料表面。極化設備有電壓增伏器及矽油槽，如圖 3，試體在矽油槽裡進行極化，油槽溫度 150°C，極化電場為 1.5 kV/mm，極化時間 30 分鐘。當試體能夠在極化環境完成極化，此時水泥壓電複合材料具有壓電性質。



圖 2 試體設計厚度

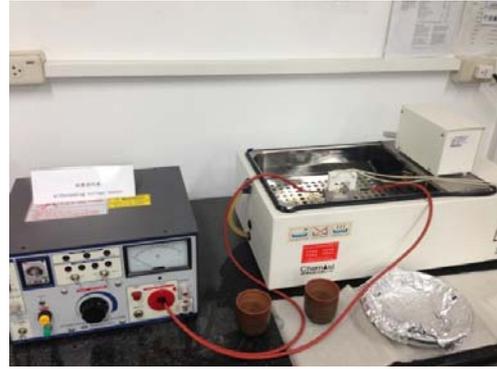


圖 3 極化設備

2.3 壓電性質測與計算

試體完成極化後，將試體分成 9 個位置區域，利用壓電應變量測儀量測 9 個位置點的壓電應變常數 d_{33} ，並取平均值，總共有三個試體；使用阻抗分析儀量測電容 C 、介電常數 ϵ_{33} 、介電損失 D 、最小阻抗時之頻率 f_m 和最大阻抗時之頻率 f_n 。其他壓電性質如壓電電壓常數 g_{33} 、相對介電常數 ϵ_r 和機電耦合係數 κ_t ，則利用下列公式計算[15]：

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

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

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

其中 ϵ_0 是真空時的介電率等於 $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ， C 是 1.0kHz 下的電容值， t 為試體厚度， A 為試體面積。

三、結果與討論

3.1 極化前微觀分析與介電常數

由於水泥膠結材料具有多孔隙特性，養護後之水泥壓電複合材料難免有孔隙存在，但這些孔隙會影響材料的極化與壓電性質。若材料間的孔隙過多，極化時試體抵抗電流的能力降低，容易造成電流往孔隙的方向流過，導致試體極穿，使得水泥壓電複合材料極化失敗[4]；另一方面也會造成材料有退極化(depolarization)現象[2]。因此孔隙的多寡或分布，會影響水泥壓電複合材料的生產和壓電性質。

試體養護後尚未極化前，以光學顯微鏡(OM)觀測試體的孔隙分布(均勻性)，如圖 4~圖 9 是以 250 倍率觀測五種水泥壓電複合材料(矽灰取代量 0%、10%、20%、30%、40%)的試體表面。圖 4 是 PP 試體，可以看出有一些比較大的孔隙存在，其中箭頭指示孔隙位置；SF10 是以矽灰取代水泥 10vol.%的試體，OM 觀測如圖 5，孔隙的大小比 PP(圖 4)小，且在 PZT 顆粒的孔隙變少，這是添加矽灰有填塞孔隙的效果；SF20 試體 OM 觀測如圖 6，因矽灰含量為水泥的 20vol.%，孔隙的分布量與 PZT 附近的孔隙都比 SF10 更少，且分布均勻；當矽灰達到水泥的 30vol.%時如

圖 7 之 SF30，孔隙更小但是分布不均勻，孔隙逐漸群聚；圖 8 的矽灰占基材 40vol.%，矽灰填滿大部分的孔隙，造成 PZT 與 PZT 之間大都被基材(水泥和矽灰)連結，但是逐漸群聚的孔隙(如 SF30)會形成獨立孔隙，反而使獨立的孔隙會比 SF30 大。因此不添加矽灰的試體孔隙的數量較多，而添加矽灰可有效降低試體孔隙率，但是當水泥的取代量超過 20vol.%，孔隙會逐漸團聚，造成孔隙的均勻性不佳或孔隙變大。

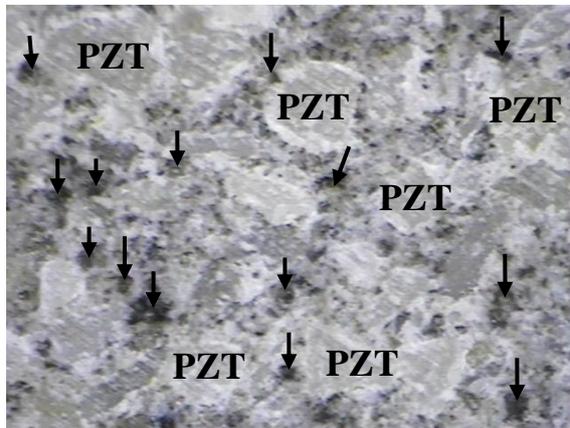


圖 4 PP 試體 OM 觀測

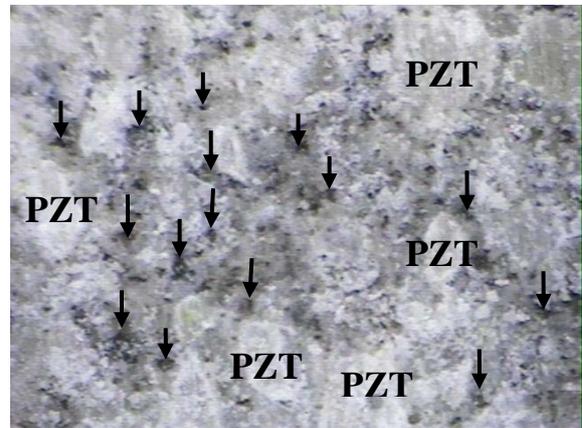


圖 5 SF10 試體 OM 觀測

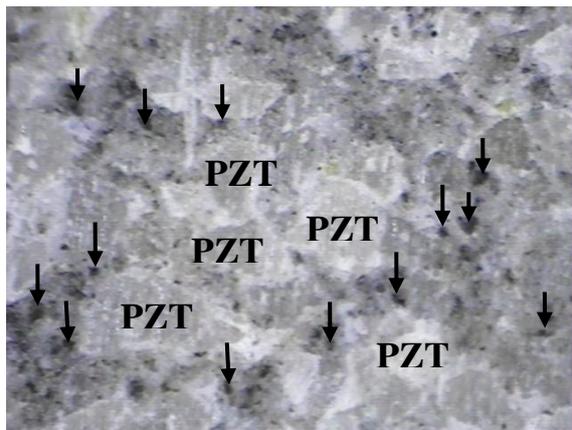


圖 6 SF20 試體 OM 觀測

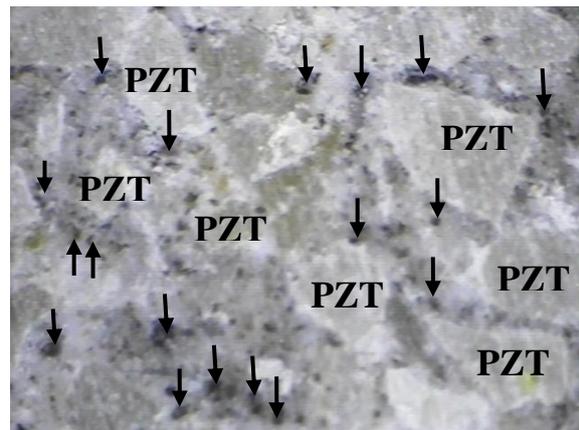


圖 7 SF30 試體 OM 觀測

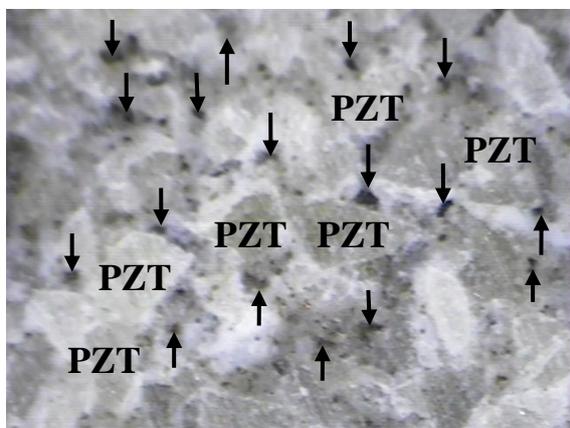


圖 8 SF40 試體 OM 觀測

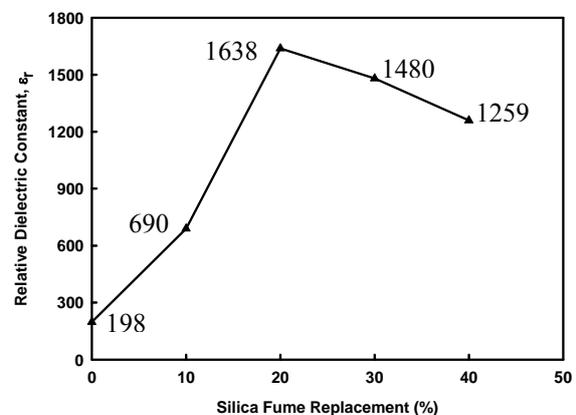


圖 9 極化前相對介電常數 ϵ_r

由表 1 得知，PZT 的相對介電常數 $\epsilon_r=2100$ ，另由圖 9 所示，經過 50vol.%PZT 和 50vol.% 水泥混合後(PP 試體)的 $\epsilon_r=198$ ，顯示孔隙會使水泥壓電複合材料的 ϵ_r 急速降低。當取代水泥的矽灰添加到 PP 試體後，SF10 的 ϵ_r 則快速增加到 690，在 SF20 的 $\epsilon_r=1638$ 達到最大，若矽灰取代量超過 20%時，SF30 和 SF40 則分別為 1480 與 1259，即 ϵ_r 反而逐漸下降。因此，在水泥壓電複合材料添加矽灰可以提高材料的介電常數，使用 50vol.%PZT 之水泥壓電複合材料以添加量在 20vol.%水泥含量時為最佳。

3.2 齡期影響

觀測極化後的水泥壓電複合材料壓電性質持續至 30 天，圖 10 是水泥壓電複合材料極化後 d_{33} 與齡期關係，其中用”三角形”標示的點是 Chaipanich [19]用養護 3 天之矽灰取代水泥 10wt.% 試體在 130°C 溫度及 2kV/mm 極化 45 分鐘，經量測極化後 24h 的 $d_{33}=18\text{pC/N}$ ，其結果接近 SF10 的 d_{33} 。由圖 10 得知，不管是對照組(PP)或者是添加矽灰的試體， d_{33} 隨著水泥水化齡期增加，即 d_{33} 會隨著極化後時間而增長，大部分的材料在前 10 天的 d_{33} 明顯增加，在 10 至 25 天之 d_{33} 的成長趨勢逐漸穩定，在 25 天後之 d_{33} 只有 SF20 還有持續上升的趨勢，其餘則趨近穩定值。這個結果是水泥水化初期的試體內部存在有比較大及數量多的孔隙，使得 PZT 與水泥間無法完整的結合，進而影響外應力施加時之減緩局部應力傳輸的功能，降低複合材料的壓電性質；而隨著時間的增加，水化反應和卜作嵐反應逐漸發揮降低孔隙尺寸的作用，造成 d_{33} 的成長。

圖 11 是極化後的相對介電常數 ϵ_r ，與 d_{33} 的成長趨勢相似， ϵ_r 會隨時間逐漸增加，在前 10 天的 ϵ_r 增加快速，10 至 25 天的成長逐漸穩定，並在 25 天後 ϵ_r 值趨近穩定值；比較 Chaipanich [19] 量測的 ϵ_r 值並標示在圖 11，其中 SF5 的 $\epsilon_r=125$ (三角形點)和 SF10 的 $\epsilon_r=178$ (圓形點)都比本研究的早齡期矽灰/水泥壓電複合材料的 ϵ_r 大，這是因為兩者的養護條件和極化條件不同。同時，由式(1)得知電容值 C 與相對介電常數 ϵ_r 的行為趨勢相同，只是數值不同而已，而導致電容或介電常數變化的原因是試體內部孔隙改變或膠結材反應不完全而影響電荷儲存，造成 C 和 ϵ_r 會隨著極化後的齡期增加；另外，試體極化後會有極化時留下的殘餘電荷，應用時應留意其衰退現象。

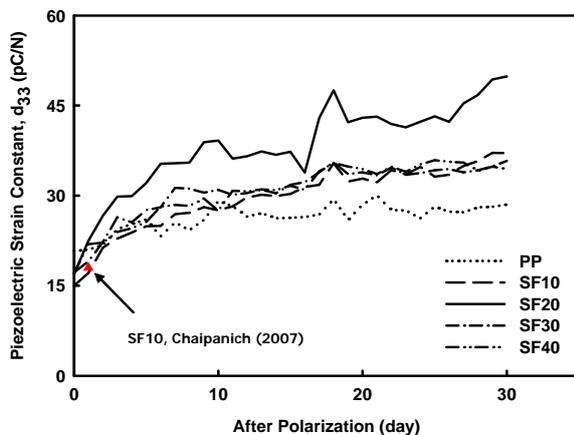


圖 10 極化後齡期與壓電應變常數 d_{33}

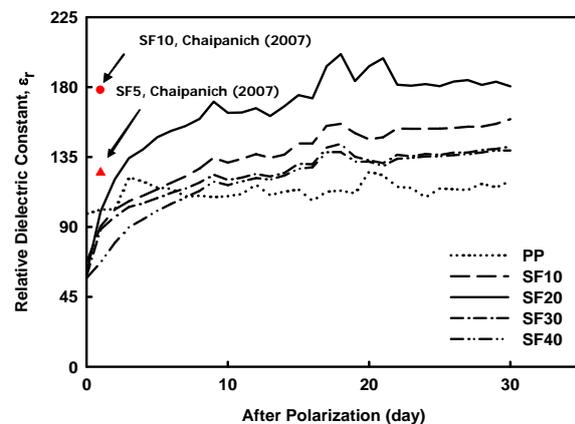


圖 11 極化後齡期與相對介電常數 ϵ_r

若知道水泥壓電複合材料的 d_{33} (圖 10)和相對介電常數 ϵ_r (圖 11)，則壓電電壓常數 g_{33} 可由式

(2)計算，如圖 12 所示，前 3 天之 g_{33} 有很大的起伏，但超過 3 天後的 g_{33} 逐漸趨近一穩定值，顯示 g_{33} 受極化後之齡期影響較小。圖 13 表示機械耦合常數 κ_t 與齡期關係，顯示 κ_t 與齡期發展無關，只與組成材料有關。

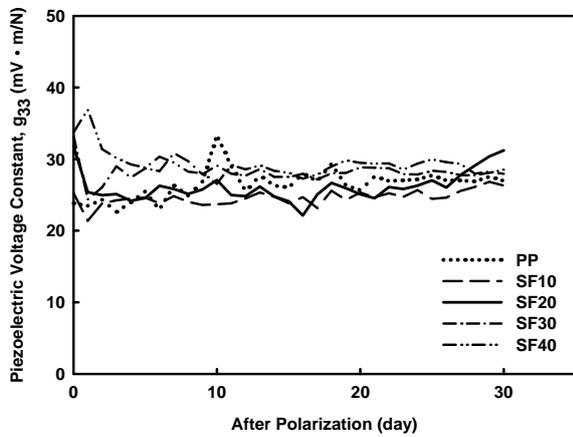


圖 12 極化後齡期與壓電電壓常數 g_{33}

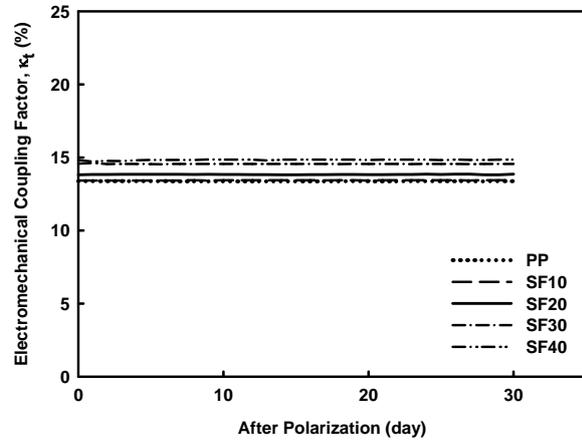


圖 13 極化後齡期與機械耦合常數 κ_t

3.3 矽灰影響

除了機電耦合常數 κ_t 外，水泥壓電複合材料的壓電性質與極化後的齡期有關，為了說明添加矽灰對水泥壓電複合材料壓電性質影響，這裡選擇極化後較為穩定之第 30 天壓電性質，結果顯示在表 3，其中 PP 材料是對照組，是未添加矽灰之水泥壓電複合材料。當矽灰逐漸取代部分水泥時，發現電容 C 、相對介電常數 ϵ_r 、 d_{33} 和 g_{33} 都是 20% 取代量最佳，例如當矽灰以 10vol.% 添加量由 0~40% 逐漸增加時， d_{33} 的增加率分別為 30.2%、75.1%、25.6% 和 20.7%，顯示矽灰取代 20vol.% 水泥的效果最好，即 d_{33} 由 PP 材料的 28.5pC/N 會增加到 SF20 的 $d_{33}=49.9$ pC/N。另外，由表 1 得知，PZT 的壓電電壓常數 $g_{33}=24 \times 10^{-3}$ V·m/N，而以 50vol.% PZT 為介質的 PP 材料的 $g_{33}=27 \times 10^{-3}$ V·m/N (表 3)，表示水泥壓電複合材料的 g_{33} 比 PZT 壓電陶瓷好。添加矽灰在 PP 材料後，以 SF20 的 $g_{33}=31.2 \times 10^{-3}$ V·m/N 效果最好，其餘含量則增加有限。

表 3 矽灰/水泥壓電複合材料壓電性質(第 30 天)

性質	PP	SF10	SF20	SF30	SF40
C (pF)	94	125	141	111	109
ϵ_r	120	159	181	142	139
d_{33} (pC/N)	28.5	37.1	49.9	35.8	34.4
g_{33} (mVm/N)	27.0	26.3	31.2	28.5	27.9
κ_t (%)	13.4	13.5	13.9	14.6	14.9
D	0.37	0.30	0.34	0.26	0.26

極化前之相對介電常數 ϵ_r 如圖 9，極化後的 ϵ_r 在圖 11 或表 3 之第 30 天的值，和極化前相比，經過極化之水泥壓電複合材料的 ϵ_r 會降低，但會著隨齡期逐漸增加。矽灰/水泥壓電複合材

料以添加 20% 矽灰之 SF20 的 ϵ_r 最高(表 3)，且添加矽灰能夠增加 ϵ_r 與 Chaipanich [19] 的結論相似。雖然機電耦合常數 κ_t 與極化後的齡期無關(圖 13)，但是隨著矽灰含量的增加 κ_t 也會增加，如表 3 之未添加矽灰的 PP 材料 $\kappa_t=0.134$ ，矽灰 40% 之 SF40 的 $\kappa_t=0.149$ ，得到添加矽灰能夠增加水泥壓電複合材料的機電耦合常數。但是，矽灰卻是會降低極化後之介電損失 D，由 PP 材料之 0.37 降至 SF30 的 0.26，超過 30% 取代量之矽灰的 D 則不再繼續減少。

四、結論

以 50% 固定含量 PZT 和水泥、矽灰經由壓製成型製作矽灰/水泥壓電複合材料，在 90°C 環境養護 1 天，施加 1.5kV/mm 電場持續 30 分鐘，進行微觀分析和量測壓電性質，結果歸納如下：

1. OM 觀測養護 1 天之矽灰/水泥壓電複合材料得知，添加矽灰可有效降低試體孔隙率，但是當水泥的取代量超過 20vol.%，細小孔隙會逐漸團聚，造成孔隙的均勻性不；且極化前的介電常數也顯示添加 20% 矽灰的介電常數最高。
2. d_{33} 和 ϵ_r 隨著水泥水化齡期增加，在前 10 天的性質增加快速，在 25 天後之性質，除了 d_{33} 外，會趨近穩定值。
3. 極化後之 g_{33} 在 3 天後會趨近穩定值，顯示 g_{33} 受極化後的齡期影響較小；且機械耦合常數 κ_t 顯示與齡期無關。
4. 添加矽灰在水泥壓電複合材料會增加 d_{33} 、 g_{33} 、 ϵ_r 和電容 C，以 20vol.% 取代量的壓電性質最佳。 d_{33} 會由 PP 的 28.5pC/N 增加到 SF20 的 49.9 pC/N，增加率約 75.1%。
5. 水泥壓電複合材料的壓電電壓常數 g_{33} 比 PZT 壓電陶瓷 $g_{33}=24 \times 10^{-3} \text{V}\cdot\text{m}/\text{N}$ 高，添加部分矽灰的效果更好，以 SF20 的 $g_{33}=31.2 \times 10^{-3} \text{V}\cdot\text{m}/\text{N}$ 效果最好。
6. 矽灰取代量到水泥 40vol.% 時，仍能夠提高水泥壓電複合材料的 κ_t 值。

致謝

國科會計畫編號: NSC102-2221-E-151-047

參考文獻

- [1] Li, Z., Zhang, D., and Wu, K., "Cement-based 0-3 piezoelectric composites," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 85, pp. 305-313 (2002).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 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)。
- [5] Dong, B., and Li, Z., "Cement-Based Piezoelectric Ceramic Smart Composites," Composites Science and Technology, Vol.65, pp. 1363-1371 (2005).

- [6] Huang, S., Chang, J., Liu, F., Lu, L., Ye, Z., and Cheng, X., "Poling Process and Piezoelectric Properties of Lead Zirconate Titanate/Sulphoaluminate Cement Composites," *J. Materials Science*. Vol. 39, pp. 6975-6979 (2004).
- [7] Li, Z., Dong, B., and Zhang, D., "Influence of Polarization on Properties of 0-3 Cement-Based PZT Composites," *Cement Concrete and Composites*, Vol. 27, pp. 27-32 (2005).
- [8] Chaipanich, A., "Effect of PZT Particle Size on Dielectric and Piezoelectric Properties," *Current Applied Physics*, Vol. 7, pp. 574-577 (2007).
- [9] Li, Z., and Gong, H., "Effects of Particle Size on the Piezoelectric Properties of 0-3 PZT/Cement Composites," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 973, pp. 538-543 (2008).
- [10] Li, Z., Gong, H., and Zhang, Y., "Fabrication and Piezoelectric of 0-3 Cement Based Composite with Nano-PZT Powder," *Current Applied Physics*, Vol. 9, pp. 588-591 (2009).
- [11] Chaipanich, A., and Jaitanong, N., "Effect of Poling Time on Piezoelectric Properties of 0-3 PZT-Portland Cement Composites," *Ferroelectric Letters*, Vol. 35, pp. 73-78 (2008).
- [12] Dong, B., Xing, F., and Li, Z., "The Study of Poling Behavior and Modeling of Cement-Based Piezoelectric Ceramic Composites," *Materials Science and Engineering*, Vol. A 456, pp. 317-322 (2007).
- [13] Wang, F., Wang, H., Song, Y., and Sun, H., "High Piezoelectricity 0-3 Cement-Based Piezoelectric Composites," *Materials Letters*, Vol. 76, pp. 208-210 (2012).
- [14] Chaipanich, A., Jaitanong, N., and Tunkasiri, T., "Fabrication and Properties of PZT-Ordinary Portland Cement Composites," *Materials Letters*, Vol.61, pp. 5206-5208 (2007).
- [15] Cheng, X., Huang, S., Chang, J., Xu, R., Liu, F., and Lu, L., "Piezoelectric and Dielectric Properties of Piezoelectric Ceramic-Sulphoaluminate Cement Composites," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 25, pp. 3223-3228 (2005).
- [16] Hunpratub, S., Yamwong, T., Srilomsak, S., Maensiri, S., and Chindapasirt, P., "Effect of Particle Size on the Dielectric and Piezoelectric Properties of 0-3 BCTZO/Cement Composites," *Ceramics International*, Vol. (2013).
- [17] 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, pp. 2013-2019 (2009).
- [18] Gong, H., Zhang, Y., Quan, J., and Che, S., "Preparation and properties of cement based piezoelectric composites modified by CNTs," *Current Applied Physics*, Vol.11, pp.653-656 (2011).
- [19] Chaipanich, A., "Dielectric and Piezoelectric Properties of PZT-Silica Fume Cement Composites," *Current Applied Physics*, Vol. 7, pp. 532-536 (2007).
- [20] 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*, Eds. by Siamak Yazdani and Amarjit Singh, Research Publishing, Singapore, pp. 929-934 (2013).