

水灰比對 0-3 型水泥壓電複合材料壓電性質的影響

Water/Cement Ratio Effect for Piezoelectric Properties of Cement-Based Piezoelectric Composites

黃以仁¹ 潘煌鏗² 林棟宏³ 楊瑞豪⁴

¹ 高雄應用科技大學土木工程系研究生 (E-mail: h0916269827@gmail.com)

² 高雄應用科技大學土木工程系教授

³ 高雄應用科技大學土木工程系博士候選人

⁴ 高雄應用科技大學土木工程系研究生

國科會計畫編號: NSC 102-2221-E-151-047

摘要

以體積50%之PZT壓電陶瓷為介質，膠結材有水泥和矽質材料，探討製程含水對水泥壓電複合材料壓電性質的影響，水灰比有0.1~0.35。製程採用加水拌製，以80MPa壓製成直徑15mm厚度2mm的試體，並在90°C的恆濕環境養護1天。材料極化條件為溫度150°C、極化電場1.5kV/mm與極化時間40分鐘，來製造具有壓電性質的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} 都會隨著齡期增加而成長，約在極化後28~50天之增加量趨於平緩，水灰比越高的成長速率越慢；壓電電壓常數 g_{33} 則在極化後21天後逐漸趨近穩定，而機電耦合係數 κ_t 則與齡期無關。水泥壓電複合材料添加矽質材料能夠提升 ϵ_r 、 d_{33} 與 κ_t ，其中 d_{33} 和 ϵ_r 由96.7 pC/N和434分別提升至108pC/N與527，並可以降低極化的阻抗頻譜。雖然水灰比對試體的共振頻率影響不大，但是隨著水灰比的增加， ϵ_r 和 d_{33} 則有下降的趨勢，而 κ_t 與 g_{33} 則是隨著水灰比的提高而增加。

關鍵字:含水量、壓電性質、PZT、水泥壓電複合材料、阻抗頻譜

Abstract

Piezoelectric properties of cement-based piezoelectric composites affected by water-to-cement ratio (w/c) were investigated, in which the inclusion is piezoelectric ceramics (lead zirconate titanate, PZT) and the binder contains cement and silica-based materials. Specimens were made with 0.1~0.35 water-to-cement ratios and 80MPa compression, after that, 1.5kV/mm was applied to the specimen for 40 min. at 150°C to obtain piezoelectric properties. Experimental results indicated that relative dielectric constant (ϵ_r) and piezoelectric strain constant (d_{33}) grow with the material age, and will become steady after 28~50 days depending on w/c. The values of piezoelectric voltage constant (g_{33}) also show stably after the age of 21 days, and no age effect for electromechanical coupling coefficient (κ_t). Adding silica-based materials to cement-based piezoelectric composites can rise ϵ_r and d_{33} from 96.7 pC/N and 434 to 108 pC/N and 527, respectively, and decrease the measured values of impedance in impedance spectra. Although the frequency at minimum impedance and at maximum impedance has less affected by w/c, higher w/c will lower ϵ_r and d_{33} and slightly increase κ_t and g_{33} .

Keywords: Water content, Piezoelectric properties, Lead Zirconate Titanate, Cement, Impedance spectra

一、前言

壓電材料因有較高的介電常數(dielectric constant)，且具有出力大、位移小、能量轉換率高及不受電磁干擾的優點，常被用來製作成感測器(sensors)及致動器(actuators)。當高分子或陶瓷壓電感測器與致動器應用在混凝土結構物的監測與控制時，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，或因混凝土本身熱脹冷縮、乾縮、潛變等因素干擾而造成監測誤判，常導致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，因此從2002年開始有0-3型水泥壓電複合材料(0-3 type cement-based piezoelectric composites)的發展[1]。

0-3型水泥壓電複合材料是以水泥做為壓電複合材料的基材(matrix)，壓電材料為介質(inclusions)並以三維空間形式均勻分佈在水泥中，壓電介質常選用鋇鈦酸鉛(PZT, lead zirconate titanate)壓電陶瓷。為獲得壓電性質，試體製程是將水泥與未經極化(polarization)之PZT粉末預先混合，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，再經過電場極化使具有方向性之壓電性質。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]。因水泥壓電複合材料具有壓電材料與水泥之間達到良好的諧合性(compatibility)，能確實反應混凝土結構物的監測狀況，可有效的預防災難發生，在土木工程領域的應用有很大前景。

現有文獻指出，壓電陶瓷的粒徑和含量對水泥壓電複合材料的壓電性質，如壓電應變常數 d_{33} (piezoelectric strain constant)或壓電應變常數 g_{33} (piezoelectric voltage constant)有很大的影響[6-10]，其中Chaipanich [8]以微米尺度的PZT和水泥結合，獲得PZT粒徑越大之 d_{33} 越高的結論，且Li [9]也有類似的結論，並觀察得到粒徑越大的PZT卻會降低介電常數 ϵ_r (relative dielectric constant)；Li [10]嘗試以體積含量35%~80%的PZT奈米顆粒做為壓電介質，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，試體在進行極化之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，若試體的極化時間過久時，會因極化反轉(domain switch)反而不利於提高 d_{33} [11]，但卻能夠提高機電耦合係數 κ_t (electromechanical coupling coefficient) [12]。極化時的極化溫度也會影響壓電性質，Dong [12]以20°C、90°C、130°C、160°C的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 κ_t 。有關極化電場的影響，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場能夠增加 d_{33} 。Wang [13]比較蒸氣養護和熱水養護對 d_{33} 的影響，得到採用熱水養護會有比較高的 d_{33} ，但是極化後齡期38天之蒸氣養護 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，也可使用特殊水泥、添加摻料或其他壓電介質等方式，來製作水泥壓電複合材料。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_r 。另外，也有在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%碳黑時的 d_{33} 最佳；Gong [18]添加奈米碳管(CNT, carbon nanotube)時，以添加體積含量0.3%奈米碳管之 d_{33} 和 g_{33} 效果最好。

而添加卜作嵐材料在水泥壓電複合材料來提高壓電性質，則有 Chaipanich [19]在 2007 年用矽灰取代 5%與 10%的水泥重量，比較試體極化後 1 天的性質，得到增加矽灰含量能夠提高介電常數 ϵ_r ，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、爐石與飛灰，分別取代水泥 20%體積，以乾拌製程添加在 50vol.%PZT 之水泥壓電複合材料內，觀察極化後 1~14 天壓電性質，得到添加矽灰之水泥壓電複合材料的 d_{33} 性質效果最好，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激發時間(trigger time)最久且極化成功率最低。

目前水泥壓電複合材料的研究成果大部分採用乾拌製程，鮮少有加水壓製之壓電性質，本研究針對加水壓製之 0-3 型水泥壓電複合材料，以水泥和矽質材料為基材，PZT 為介質，探討水灰比(w/c)與極化後的齡期對壓電性質的影響。水灰比分別為 0.10、0.20、0.25、0.30、0.35，試體經 90°C 高溫蒸氣養護 1 天後以 1.5kV/mm 電場進行極化 40 分鐘，極化成功後連續觀測 56 天的壓電性質，包括壓電應變常數 d_{33} 、壓電電壓常數 g_{33} 、介電常數 ϵ_r 、機電耦合常數 κ_t 、介電損失 D 和阻抗頻譜。

二、實驗內容

2.1 材料與配比

0-3 型水泥壓電複合材料的膠結材(基材)是水泥、矽灰、矽質粉，介質是鋁鈦酸鉛(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，形狀是圓球形，細度 20,000m²/kg，比重 2.2；矽質粉的 SiO₂ 含量為 99.59%，粒徑約為 5-20 μ m，比重為 2.65；強塑劑採用日本竹本(Takemoto)之 SSP104 強塑劑，符合 ASTM Type-G 等級；PZT 選用 Ka 型的燒結體， $d_{33}=470$ pC/N, $g_{33}=24$ mV-m/N, $\epsilon_r=2100$ ，比重 7.9，選取 75~150 μ m 粒徑作為介質；試體的電極是使用 SYP-4570 導電銀膠，熟化溫度為 150°C 維持 30 分鐘。

0-3 型水泥壓電複合材料的配比如表 1 所示，其中 PZT 壓電陶瓷含量固定，為試體的 50% 體積；試體編號 PP 是對照組，基材為 I 型卜特蘭水泥，水泥含量佔試體體積 50%，為純水泥壓電複合材料；編號 R 表示以水泥和矽質材料為基材的水泥壓電複合材料，是對照組 PP 試體的 45%水泥被矽質材料取代，其中矽灰約取代水泥 22.8%體積，矽質粉取代水泥 22.2%；並添加水量，有 5 種水灰比，即 R10、R20、R25、R30 和 R35，例如 R10 表示水灰比為 0.10，其中水灰比的水是指水和強塑劑的重量總和。

表 1 水泥壓電複合材料配比 (kg/m³)

試體編號	水灰比	PZT	水泥	矽灰	矽質粉	水	強塑劑
PP	-	3950	1575	-	-	-	-
R0	-	3950	866	251	294	-	-
R10	0.10	3950	866	251	294	75	15
R20	0.20	3950	866	251	294	159	15
R25	0.25	3950	866	251	294	202	15
R30	0.30	3950	866	251	294	245	15

R35	0.35	3950	866	251	294	289	15
-----	------	------	-----	-----	-----	-----	----

表 1 的 0-3 型水泥壓電複合材料的配比有添加水量，添加水量越多材料之結塊現象越明顯。材料與水均勻混合後以 MTS 試驗機施加 80MPa 壓應力將試體壓製成直徑 15mm 的圓柱體。當試體壓製完成後，放進恆溫循環水槽進行 90°C 高溫養護 1 天。

2.2 試體極化

試體養護 1 天後從恆溫水槽取出，進行研磨拋光至厚度 2mm，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。接著製作試體的電極，在試體上下表面均勻塗佈導電銀膠，並放入 150°C 烘箱 30 分鐘，目的是使銀膠熟化附著於試體表面。當試體電極製作完成後，利用阻抗分析儀量測極化前的電性，此時試體尚未具有壓電性質。將試體放入矽油槽裡進行極化，油槽溫度為 150°C，極化電場為 1.5kV/mm，極化時間為 40 分鐘，當試體在極化環境成功完成極化，此時水泥壓電複合材料具有壓電性質。

2.3 壓電性質量測與計算

試體成功完成極化後，將試體均分成 8 個位置區域及加上中心點共有 9 點，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} ，取平均值，每種配比各有三個試體，目的在消除實驗的人為及儀器誤差；並使用阻抗分析儀量測 1.0kHz 下的電容值 C 、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]：

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

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

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

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

三、結果與討論

3.1 極化前壓電性質與激發時間

由於水泥膠結材料具有多孔隙特性，養護後水泥壓電複合材料難免有孔隙存在，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，使極化不能充分進行，容易導致試體極穿，使得水泥壓電複合材料極化失敗[4]。因此孔隙的多寡或分布，會影響水泥壓電複合材料的生產成本和壓電性質。

試體養護後尚未極化前，以阻抗分析儀量測電容 C 、介電損失 D 和電阻 R 。圖 1 是極化前介電損失 D 與水灰比的關係，可以看出水灰比越高的介電損失越高，這是因為水在水化過程中

會留下孔隙，造成隨著添加水量越多的孔隙越多，這也導致試體要到達極化電壓所需要的激發時間也越久如圖 2，相對的試體會越難極化。Gong [17]提到在外加電場時有大部分的電流會因為介電損失過高而漏電消耗電能，以致降低壓電陶瓷的極化效果，使壓電複合材料的壓電應變常數 d_{33} 值降低。另外，觀察未加水製造之試體(PP、R0)進行極化時，如果電壓過高會使電源供應器的警告燈會亮起，表示這時候的試體沒有辦法接受這麼高的電壓，介於極化以及擊穿之間，試體還不會立即被電流擊穿，可以放慢極化速度繼續進行極化；對添加水的試體(R10~R35)則相反，水灰比越高的試體在低電壓增幅時是沒有問題，但是在電壓增幅達到約 1kV/mm 後，電源供應器的警告燈馬上亮起，接著就會在一瞬間擊穿，因此進行極化時，水灰比越高的試體之極化比未加水的試體還要困難與不易極化成功。

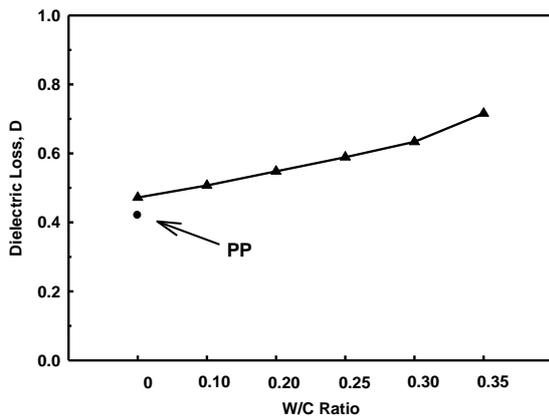


圖 1 極化前介電損失 D

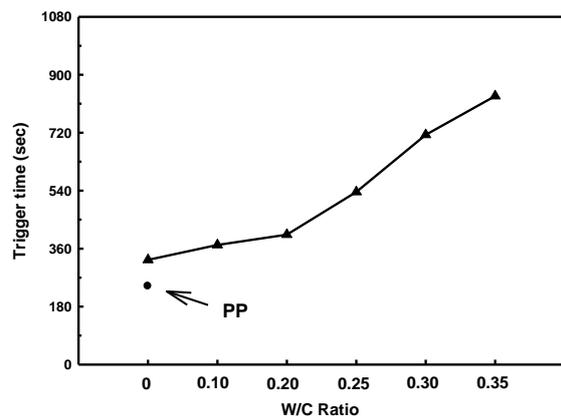


圖 2 極化所需激發時間

圖 3 是水灰比與電阻 R 的關係，由 50vol.%PZT 和 50vol.%水泥混合 PP 試體與 R0 試體比較，電阻會從 544k Ω 下降到 325k Ω ，這是因為添加砂灰的關係，且隨著添加水量的增加之電阻 R 會越來越小，這是因為孔隙增加導致電阻會越來越小。已知 PZT 壓電陶瓷的相對介電常數 $\epsilon_r = 2100$ ，由圖 4 所示，PP 試體(50vol.%PZT 和 50vol.%水泥)的 $\epsilon_r = 133$ ，添加砂灰的 R0 之 ϵ_r 則增加到 412，表示水泥壓電複合材料添加砂灰可以提高材料的介電常數，且隨著水灰比越高， ϵ_r 從 R10 之 502 增加到 R35 的 704，顯示 ϵ_r 會隨著添加水量增加而增加。

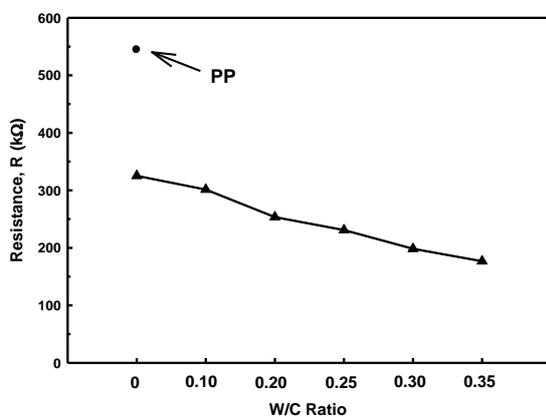


圖 3 極化前的電阻 R

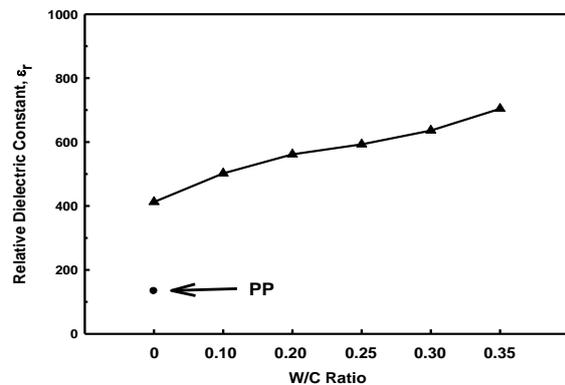


圖 4 極化前相對介電常數 ϵ_r

3.2 齡期影響

極化成功後的試體開始具有壓電性質，觀測水泥壓電複合材料極化後的壓電性質持續至 56 天，圖 5 是水泥壓電複合材料 d_{33} 與極化後齡期關係，不管是對照組(PP)或者是添加水的試體， d_{33} 會隨著材料的齡期增加，即 d_{33} 會隨著極化後的時間而增長，大部分的材料在前 7 天的 d_{33} 明顯增加，在 8 至 28 天之 d_{33} 的成長趨勢逐漸穩定，在 28 天後之 d_{33} 逐漸平穩並沒有太大改變，趨近穩定值；而水灰比較大之試體(R25~R35)的值成長比較慢，在 42 天後才會趨近穩定值。 d_{33} 成長行為的原因，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，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與含量的作用，促使 d_{33} 增長。

圖 6 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，例如水灰比 0.2 以下之試體，在前 10 天的 ϵ_r 增加快速，8 至 28 天的成長逐漸穩定，並在 28 天後 ϵ_r 值趨近穩定值，且當水灰比大於 0.2 以上的試體之 ϵ_r 成長會越慢。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，使 C 和 ϵ_r 會隨著極化後的齡期增加。

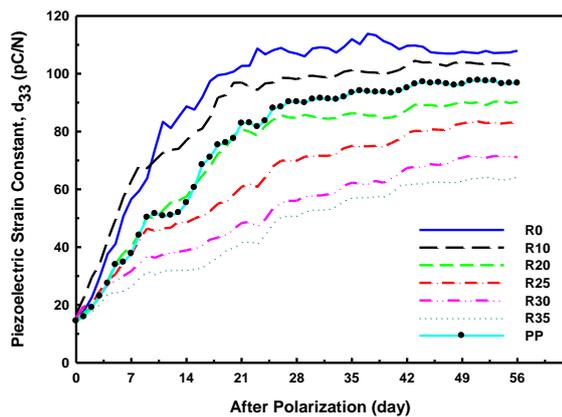


圖 5 齡期與壓電應變常數 d_{33}

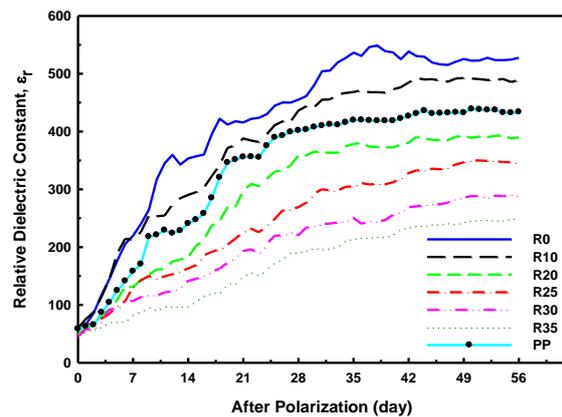


圖 6 齡期與相對介電常數 ϵ_r

若知道水泥壓電複合材料的 d_{33} (圖 5) 和相對介電常數 ϵ_r (圖 6)，則壓電電壓常數 g_{33} 可由式(2)計算，如圖 7 所示，前 20 天之 g_{33} 有很大的起伏，但超過 21 天後的 g_{33} 逐漸趨近穩定，顯示 g_{33} 受極化後對長齡期影響較小。圖 8 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 9 是極化後的介電損失 D 與齡期的關係，實驗結果發現介電損失 D 在極化後會隨著齡期的增加緩慢上升，圖中顯示極化後 28 天前波動較大，這代表介電損失 D 會受到極化時留下的殘餘電荷影響，但隨著極化後齡期的延長，波動有逐漸減小的趨勢；實驗結果發現添加矽質材料能使極化後的介電損失明顯的降低，其值從 PP 的 1.06 降低至 R0 的 0.61，隨著水灰比的增加介電損失 D 也隨之降低，其值從 R0 的 0.61 下降至 R35 的 0.37。

Li [7] 的研究結果指出，極化後的試體會因極化時所留下的殘餘電荷(residual charge)而使試體內部的電性產生變化，但此情況會隨著極化後的齡期增加而慢慢緩和下來，故選擇討論極化

後 56 天的阻抗頻譜關係。圖 10 為極化後齡期 56 天之阻抗頻譜圖，共振頻率與反共振頻率產生的位置與範圍卻是固定不變。PP 試體與矽質材料的試體(R)相互比較下，矽質材料試體的共振頻率位置坐落在 84.591 kHz ~ 129.380 kHz 的頻段上，PP 試體的共振頻率位置坐落在 190.458 kHz ~ 204.579 kHz 的頻段上，由此可以得知，添加矽質材料可使共振頻率產生在更低頻的位置，另外也發現隨著水灰比的增加試體的共振頻率坐落頻段差異性並不大。

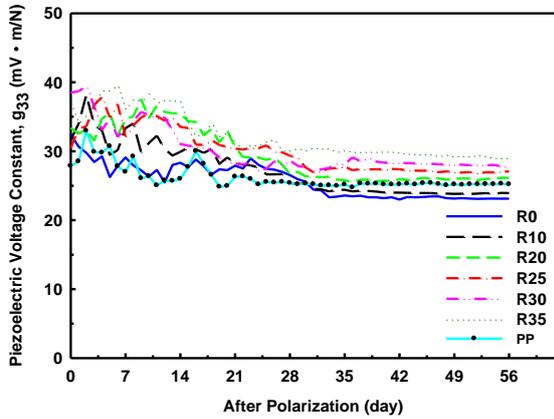


圖 7 齡期與壓電電壓常數 g_{33}

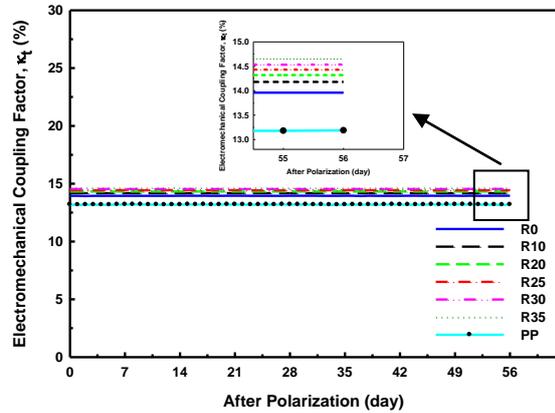


圖 8 齡期與機械耦合常數 κ_t

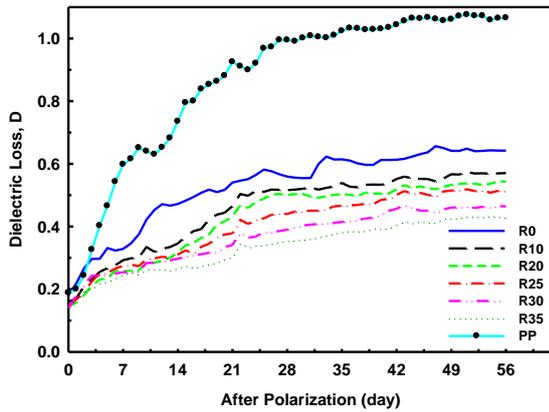


圖 9 齡期與介電損失 D

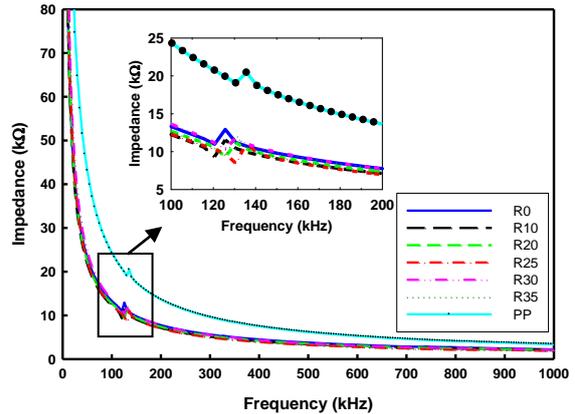


圖 10 極化後 56 天阻抗頻譜圖

3.3 水灰比的影響

除了機電耦合常數 κ_t 與齡期無關外，水泥壓電複合材料的壓電性質與極化後的齡期有關。為說明水灰比對水泥壓電複合材料與齡期對壓電性質影響，這裡選擇穩定之第 56 天壓電性質進行比較，結果顯示在表 2，其中 PP 與 R0 是對照組，是未添加水之矽質/水泥壓電複合材料。實驗結果發現，添加矽灰之 R0 材料的壓電性質 $d_{33}=107.9$ pC/N 和 $\epsilon_r=527.4$ 會比未添加之 PP 材料好；然而，當添加矽灰/水泥壓電複合材料加入水量製作試體時， d_{33} 和 ϵ_r 壓電性質會隨著水灰比增加而降低，例如 R0~R35 的 d_{33} 分別為 107.9、103.5、90.2、82.8、71.1 與 64.5pC/N， ϵ_r 則為 527.4、489.1、389.6、345.3、288.8 和 250.7，這是因為隨著添加水量的增加會在所製作的試體內產生更多的孔隙，而孔隙的存在影響外應力施加時之減緩局部應力傳輸的功能，造成壓電性

質降低的主因。因此實驗結果顯示，未添加水量製造之水泥壓電複合材料的 d_{33} 和 ϵ_r 效果最好。

表 2 矽灰/水泥壓電複合材料壓電性質(第 56 天)

性質	PP	R0	R10	R20	R25	R30	R35
ϵ_r	433.6	527.4	489.1	389.6	345.3	288.8	250.7
d_{33} (pC/N)	96.7	107.9	103.5	90.2	82.8	71.1	64.5
g_{33} (mV-m/N)	25.1	23.1	23.9	26.1	27.0	27.7	29.1
κ_t (%)	13.4	13.9	14.0	14.2	14.3	14.5	14.7

極化前之相對介電常數 ϵ_r 如圖 4 顯示，介電常數 ϵ_r 隨著水灰比增加而增加，且值從 R10 的 502 增加到 R35 的 704。而極化後的 ϵ_r 在圖 6 或表 2 (56 天性質)，與極化前相比，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。以添加矽質材料的水泥壓電複合材料但未添加水之 R0 的 ϵ_r 最高(表 2)。

比較表 2 之壓電電壓常數 g_{33} ，製程未添加水量之水泥壓電複合材料(PP)經添加矽質材料後(R0)的 g_{33} 會降低，但是隨著水灰比的增加， g_{33} 會隨著增加，例如從 R0 的 23.1 增加到 R35 的 29.1mV-m/N，甚至會比表 1 之 PZT 壓電陶瓷的 $g_{33}=24$ mV-m/N 還要好，顯示水泥壓電複合材料在製程適度的加水量可以提高水泥壓電感應器的靈敏度。

雖然機電耦合常數 κ_t 與極化後的齡期無關(圖 8)，但隨著水灰比增加以及添加矽灰之 κ_t 也會增加，例如表 2 之未添加水與矽灰之 PP 試體 κ_t (%)=13.4，未添加水的 R0 試體 κ_t (%)=13.9，R10 試體 κ_t (%)=14，R35 的 κ_t (%)=14.7，發現材料製造過程中添加水與矽灰能夠增加水泥壓電複合材料的機電耦合常數。

四、結論

以水泥和矽基材料為基材及 PZT 為介質，經由添加水量並壓製成型製作 0-3 型水泥壓電複合材料，在 90°C 環境養護 1 天，極化電場 1.5kV/mm，極化時間為 40 分鐘，連續 56 天量測壓電性質，結果歸納如下：

1. 極化前隨著水灰比的增加，介電損失 D 也跟著提高，但極化後則相反隨著水灰比的增加而下降，另外試體極化之激發時間會隨著水灰比越大所需要的時間越長。
2. d_{33} 和 ϵ_r 會隨著齡期增加而增加，在 28 天後的性質會逐漸趨近穩定值，且隨著水灰比的增加趨近穩定值所花的時間也越長，約 50 天後的 d_{33} 和 ϵ_r 會趨於定值。
3. 實驗結果顯示，未添加水量製造之水泥壓電複合材料的 d_{33} 和 ϵ_r 效果最好，這是因為隨著水量的增加會在試體內產生更多的孔隙，而影響外應力之局部應力傳輸功能，造成壓電性質降低的主因。
4. g_{33} 在 21 天後會趨近穩定值，顯示 g_{33} 受齡期影響較小，而機械耦合常數 κ_t 顯示與齡期無關；製程添加水量能夠提高水泥壓電複合材料的 g_{33} 與 κ_t 值。
5. 添加矽質材料能使極化後的介電損失 D 明顯的降低(PP、R0 相比)，也發現隨著水灰比的增加介電損失 D 也隨之降低(R0~R35 相比)。
6. 水泥壓電複合材料添加矽質材料會增加 d_{33} 和 ϵ_r ， d_{33} 會由 PP 的 96.7pC/N 增加到 R0 的 107.9

pC/N，增加率約 11.6%。

致謝

本研究承蒙國科會計畫 NSC102-2221-E-151-047 經費贊助。

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 Chindaprasirt, 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).