

## 使用壓電水泥感測器監測不同水灰比水泥砂漿強度

# Using Piezoelectric Cement Sensors to Monitor the Compressive strength of Cement Mortar

黃銘旺<sup>1</sup> 潘煌鏗<sup>2</sup> 林棟宏<sup>3</sup>

<sup>1</sup>高雄科技大學 土木工程系 研究生 E-mail: poopoopoopoopoo258@gmail.com, 聯絡電話: 0933316939

<sup>2</sup>高雄科技大學 土木工程系 教授 E-mail: pam@nkust.edu.tw

<sup>3</sup>高雄科技大學土木工程系 助理教授

### 摘要

本研究利用壓電水泥感測器來監測不同水灰比之水泥砂漿強度，對照組是 PZT 壓電感測器，其中水泥砂漿的水灰比有 0.5 和 0.6 兩種，壓電水泥感測器使用各 50% 體積的 PZT 陶瓷粉末及水泥混合再經電壓極化製成。壓電感測器採用埋入方式設置於水泥砂漿試體內，隨齡期進行水泥砂漿抗壓試驗，並隨齡期量測水泥砂漿的阻抗，比較齡期之阻抗-抗壓強度關係，利用壓電感測器之電導 RMSD 曲線進行迴歸分析來預測水泥砂漿抗壓強度。試驗結果顯示，壓電感測器的電導頻譜曲線會隨著水泥砂漿的齡期減少，具有非破壞監測水泥砂漿強度的功能。壓電水泥感測器適用監測水泥砂漿強度的頻率介於 200 ~ 1000 kHz 範圍，比 PZT 感測器的監測頻率在 250 ~ 380 kHz 和 470 ~ 560 kHz 範圍較為寬廣。以電導 RMSD 值評估抗壓強度發現，壓電水泥感測器的強度預測值較不受水灰比影響，但是 PZT 感測器的強度預測值與水灰比有關。提供水泥砂漿強度-電導 RMSD 的迴歸方程式，可做為強度監測參考。

關鍵字：機電阻抗、水泥感測器、健康監測、混凝土、非破壞檢測

### 一、前言

混凝土是目前使用最廣泛的建築材料，因此混凝土的強度十分重要，近年來隨著壓電材料的發展，使用銦鈦酸鉛(PZT)陶瓷材料製成的壓電感測器(PZT 感測器)及機電阻抗技術(electro-mechanical impedance, EMI) [1]進行結構健康監測(structural health monitoring)已行之有年，機電阻抗技術為有效監測或檢測結構物性質或行為的新方法之一。例如蔡金標等人[2]使用 PZT 感測器以埋置混凝土試體內部及表面黏貼兩種方式來監測混凝土強度，經由量測試體 3、7、14、28 天齡期的電導頻譜，並引入  $\delta$  指標以建立電導頻譜與混凝土抗壓強度的定量關係。何明星等人[3]於不同位置埋置 PZT 感測器來監測鋼管混凝土柱的強度發展，得到了感測器接收電壓信號值與混凝土的彈性模量趨勢相反的結論，且電壓信號值衰減的速度在初始的 1 周衰減速度較快，1 周後衰減速度減慢，而混凝土強度增長速度則在初始的 1 周增長速度較快，1 周後速度減慢，兩者之間有相同趨勢。Sabet 等人[4]比較嵌入式及表面黏貼的 PZT 感測器兩種方法來監測混凝土梁，發現嵌入式 PZT 可以監測結構中的不連續性及能監控大面積的結構健康狀況，表

面黏貼之 PZT 感測器則對局部損傷較為敏感，因此可用於監測結構物的重要構件或結構的局部損傷，將兩種方法相組合能夠成為監測大型結構物的有效方法。

另外，Xu 等人[5]施加载重於嵌入式 PZT 的不同方向，發現當施加的載重垂直於 PZT 感測器的平面方向時，PZT 感測器對外部的初始載重較為敏感，當施加的載重平行於 PZT 感測器的平面方向時，PZT 感測器則對結構損傷變化較為敏感。Wang 等人[6] 使用嵌入式 PZT 感測器及 EMI 技術監測混凝土立方體的強度，並採用 MAPD 及 RMSD 方法來評估混凝土抗壓強度與嵌入式 PZT 感測器之電導相關性，由 MAPD 和 RMSD 結果得知要反映混凝土抗壓強度以採用實數導納(電導)會優於虛數導納(電納)，更有利於分析。Xu 等人[7]使用嵌入式及表面黏貼的 PZT 感測器檢測混凝土梁，並觀察裂痕對阻抗的影響，結果得到損傷裂痕距離感測器越近，感測器對裂痕的敏感性越好，且嵌入式相較表面黏貼敏感性也越好。

然而，由於壓電 PZT 陶瓷材料與混凝土的材料特性如內部力學行為、熱膨脹反應及聲阻抗等有不小的差異，造成使用 PZT 感測器進行混凝土結構物監測檢測時有諧和性問題，容易導致感測器準確性下降或誤判問題，為因應此問題才有 0-3 型水泥壓電複合材料的開發[8]。

0-3 型水泥壓電複合材料是以水泥為基材及壓電材料為介質組成，經過極化程序可獲得壓電性質，具有壓電性質的 0-3 型水泥壓電複合材料可稱為壓電水泥(piezoelectric cement)，應用對象是混凝土材料或結構桿件的健康監測或診斷。目前雖然以 PZT 感測器結合機電阻抗法進行混凝土及水泥砂漿強度的監測已經有相當的成果，但是尚未見有以壓電水泥感測器及機電阻抗法進行混凝土材料的強度研究。因此，本研究是將自製的壓電水泥感測器，以嵌入方式埋入水泥砂漿試體內，採用 EMI 技術找出適合監測水泥砂漿強度的適用頻率，在適用頻率範圍內計算感測器的電導 RMSD (均方根偏差)，探討水泥砂漿抗壓強度與感測器電導關係，目的是探討壓電水泥感測器做為混凝土結構健康監測的功能。水泥砂漿的水灰比有 0.5 和 0.6 兩種，水泥砂漿強度有 1~28 天齡期，對照組是 PZT 感測器。

## 二、試驗計畫

### 2.1 感測器製作

壓電水泥是採用 0-3 型水泥壓電複合材料，由水泥及 PZT 陶瓷各 50%體積所組成(配比 PP)，水泥為 I 型卜特蘭水泥，做為膠結材(基材)。製程是將 PZT 陶瓷搗碎成粉狀，選用通過#100 號篩並停留於#200 號篩的粒徑做為介質，將 PZT 介質與水泥依照配比 PP 進行混合，再以行星式球磨機以轉速為 100 rpm，順時針及逆時針各 5 分鐘旋轉，讓 PZT 和水泥能夠形成均勻分布的混合物。分散後之混合物分成三等分置入直徑 15mm 的試體模內，並以橡皮槌敲打試體模周圍以排出混合物內部的空氣，使用 MTS 萬能試驗機施加 80 MPa 壓力將混合物壓製成錠粒(PP 試體)，並放置於恆溫水槽內進行 24 小時的水氣養護，養護溫度為 90°C。養護 24 小時的試體凝固後，將試體從恆溫水槽取出，利用研磨拋光機進行試體研磨，厚度為  $2\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ 。

PP 試體以銀膠做為電極，在製作電極的前後以 140°C 進行兩次溫度處理[9]，將試體放入 150°C 的油槽內以 1.5 kV/mm 極化電場進行 40 分鐘的極化，製成壓電水泥(PP 感測器)。另外，PZT 感測器製作的極化條件(極化溫度 150°C、極化電壓 1.5 kV/mm、極化時間 40 分鐘)與 PP 感測器相同。

製作完成之壓電感測器(PP 感測器和 PZT 感測器)以兩條各 500 mm 的銅膠帶與常溫銀膠黏結於感測器電極上，放置一天後等銀膠乾燥，將瀝青做為感測器的防水材料塗抹於感測器表面，再將銅膠帶部分套入熱縮套管進行防水如圖 1。在壓電感測器製作完成時及其進行瀝青封裝的前、後都以阻抗分析儀(圖 2)量測壓電感測器的阻抗頻譜，以確認壓電感測器性質。



圖 1 感測器瀝青封裝及套入熱縮套管



圖 2 阻抗分析儀

## 2.2 水泥砂漿製作及抗壓強度

水泥砂漿是以水泥:砂=1:2.75 比例組成，砂使用標準砂，水泥使用 I 型卜特蘭水泥，水灰比有 0.5、0.6 兩種，試體尺寸是 50 mm 立方體。水泥砂漿試體有放置感測器及沒有放置感測器兩種，有放置感測器的水泥砂漿試體，其感測器(PP 及 PZT)位於試體內部的正中央。

將沒有放置感測器的水泥砂漿試體於特定齡期進行抗壓試驗，試驗齡期有 1、3、7、14、21、28 天；而有放置感測器的水泥砂漿試體(圖 6)則於特定齡期量測感測器的阻抗頻譜。

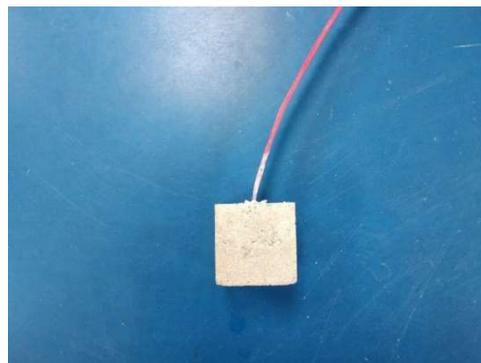


圖 3 感測器埋入水泥砂漿試體

## 2.3 阻抗量測與迴歸分析

在特定齡期時，使用阻抗分析儀量測有埋入感測器的水泥砂漿的阻抗頻譜，其中阻抗的實部為電阻，其虛部為電抗，而電導是電阻的倒數，電納是電抗的倒數。經比較電導和電納後發現，電導較能反映出結構數值變化[1]，這是因為介電常數容易受到溫度影響，而電納則受介電常數影響，導致電納性質不易反映結構健康監測結果。

本研究使用電導進行數值探討及分析，而不使用電阻的原因是電導和抗壓強度的增長趨勢較為相似；感測器的量測頻率為 0~1 MHz，於特定齡期的阻抗頻譜找出電導與齡期成長有規律性之頻率範圍(適用頻率)後，在適用頻率範圍內計算電導的 RMSD，最後進行水泥砂漿強度與電導 RMSD 的迴歸分析。

### 三、結果與討論

#### 3.1 水泥砂漿齡期與抗壓強度

水泥砂漿的抗壓強度如圖 4 所示，抗壓強度隨齡期增加有明顯增長，其中水灰比 0.5 的水泥砂漿抗壓強度高於水灰比 0.6；兩種水灰比的水泥砂漿強度於 1~7 天成長幅度最大，水灰比 0.5 的水泥砂漿到第 7 天已達到 28 天齡期強度的 83%，水灰比 0.6 的水泥砂漿則達到 79%，兩者的 7~28 天強度成長趨於平緩。

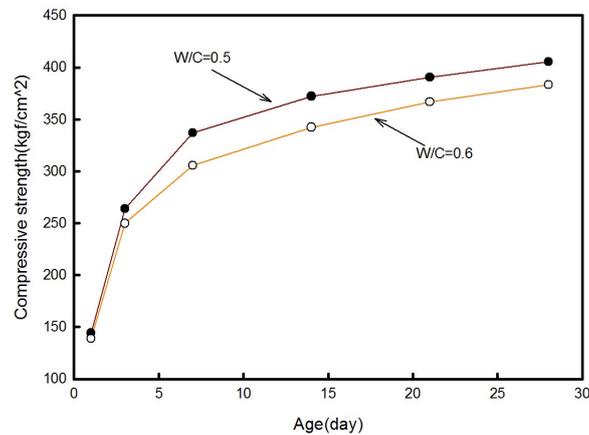


圖 4 水泥砂漿抗壓強度

#### 3.2 感測器封裝阻抗變化

PP 感測器在黏貼銅膠帶前、瀝青封裝前、瀝青封裝後、放入水泥砂漿試體後第一天的阻抗變化如圖 5 所示，每個步驟的阻抗皆有顯著下降，這是因為感測器邊界條件會由自由狀態轉變為受限制狀態[10]，不只阻抗會下降，判斷 PP 感測器極化是否成功的共振峰也隨之消失。

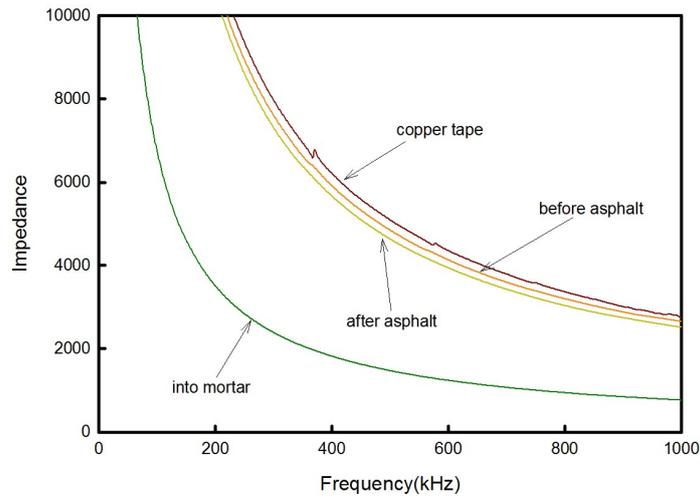


圖 5 PP 感測器封裝前後的阻抗

圖 6 為 PZT 感測器在黏貼銅膠帶前、瀝青封裝前、瀝青封裝後、放入水泥砂漿試體後第一天的阻抗變化，由於圖 6 的阻抗差異不易清楚辨識，於是將圖 6 的 A 部分放大為圖 7。由圖 7 可知，PZT 感測器的阻抗會依序每個封裝步驟逐漸減少，且 PZT 感測器的共振峰雖沒有如 PP 感測器(圖 5)消失但也逐漸變小。

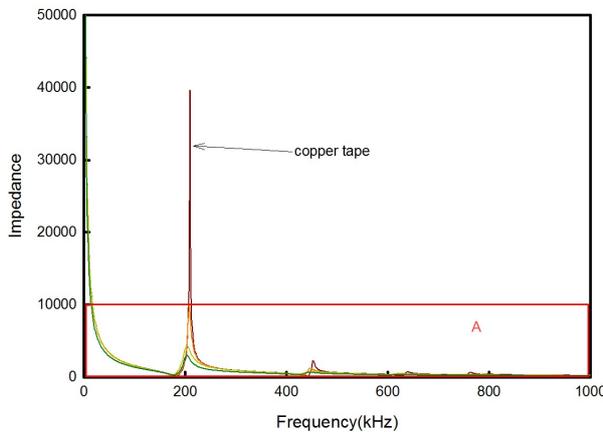


圖 6 PZT 感測器封裝前後的阻抗

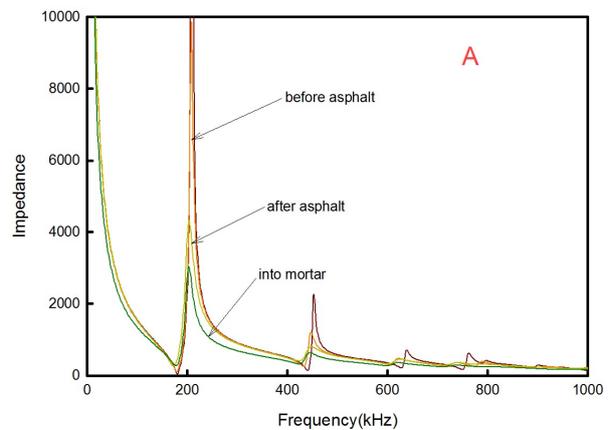


圖 7 PZT 感測器之 A 部分放大圖

### 3.3 水泥砂漿齡期與電導

PP 感測器放入水灰比 0.5 及 0.6 的水泥砂漿試體並於特定齡期(1~28 天)量測的齡期-電導曲線如圖 8 和圖 9 所示，量測頻率為 0~1000 kHz，可以發現 PP 感測器的電導曲線皆沒有明顯起伏，且隨水泥砂漿齡期增加其電導曲線皆有隨之下降的趨勢。檢視圖 8 之水灰比 0.5 的水泥砂漿電導曲線，在齡期第 14、21 天的電導曲線於頻率 180 kHz 有交叉重疊，導致在這個頻率範圍的電導曲線下降趨勢與齡期增加沒有規律性，若以這個頻率範圍的電導趨勢來預測水泥砂漿強度-齡期關係容易造成誤判，故不適合用來判斷抗壓強度的依據；而具有電導曲線下降趨勢與齡期增加之規律性的頻率範圍位於 200~1000 kHz。觀察圖 9 的水灰比 0.6 之第 14、21 天的水泥砂漿電導曲線在亦有交叉重疊現象，曲線交叉的頻率位於 80 kHz，故最適合做為監測水灰比 0.6

之水泥砂漿強度的頻率為 100 ~ 1000 kHz。

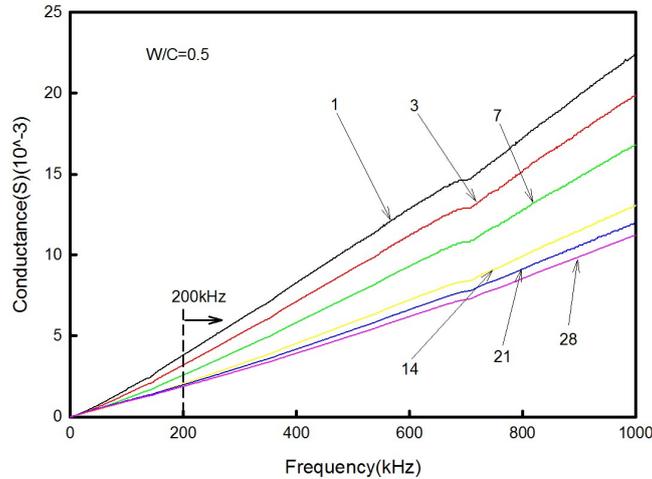


圖 8 水灰比 0.5 水泥砂漿之 PP 感測器的齡期-電導曲線

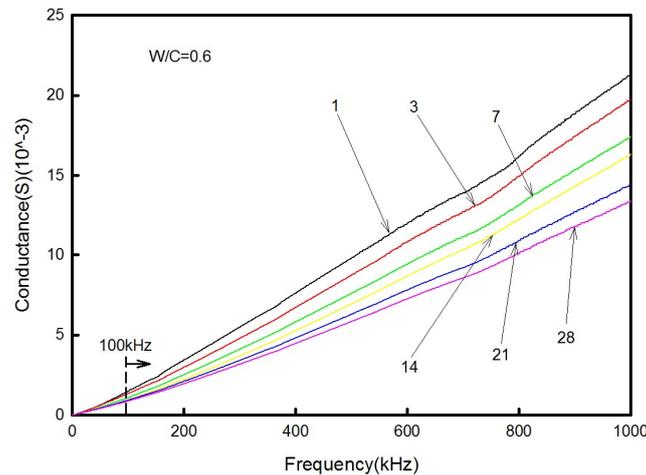


圖 9 水灰比 0.6 水泥砂漿之 PP 感測器的齡期-電導曲線

而對照組(PZT 感測器)於 1~28 天齡期監測水灰比 0.5 及 0.6 的水泥砂漿試體，所量測的電導-齡期曲線如圖 10 和圖 11，發現 PZT 感測器所記錄的電導曲線相較於 PP 感測器(圖 8 和圖 9)有幾個明顯的波峰，不同齡期的電導曲線重疊位置也較多，能顯示齡期影響的電導曲線皆於波峰附近。經過分析比較後得到，水灰比 0.5 的水泥砂漿(圖 10)在 250 ~ 360 kHz 範圍內的電導值會隨著齡期增加而減少，而水灰比 0.6 的水泥砂漿(圖 11)則在 250 ~ 380 kHz 和 470 ~ 560 kHz 兩段頻率範圍的電導曲線也有相同規律性。本研究選擇齡期-電導曲線有規律性關係之頻率範圍(適用頻率)進行計算電導 RMSD 值，以探討水泥砂漿的電導-齡期-強度關係。

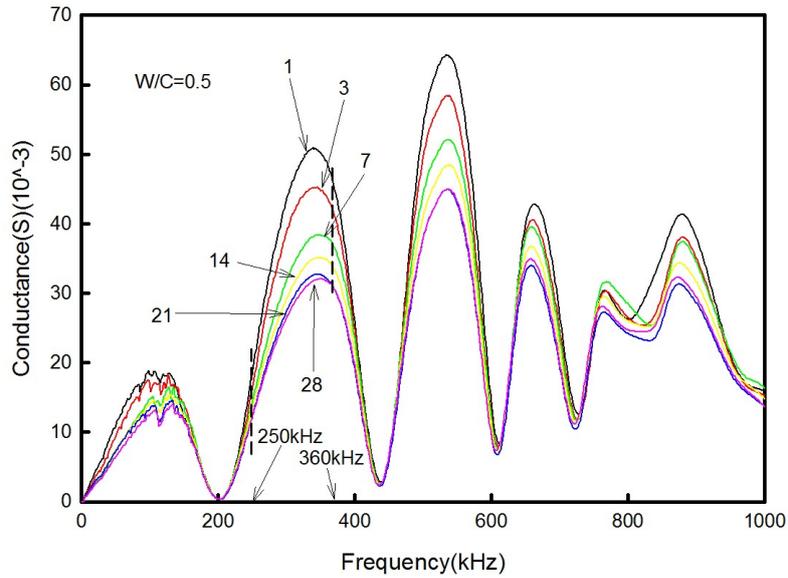


圖 10 水灰比 0.5 水泥砂漿之 PZT 感測器的齡期-電導曲線

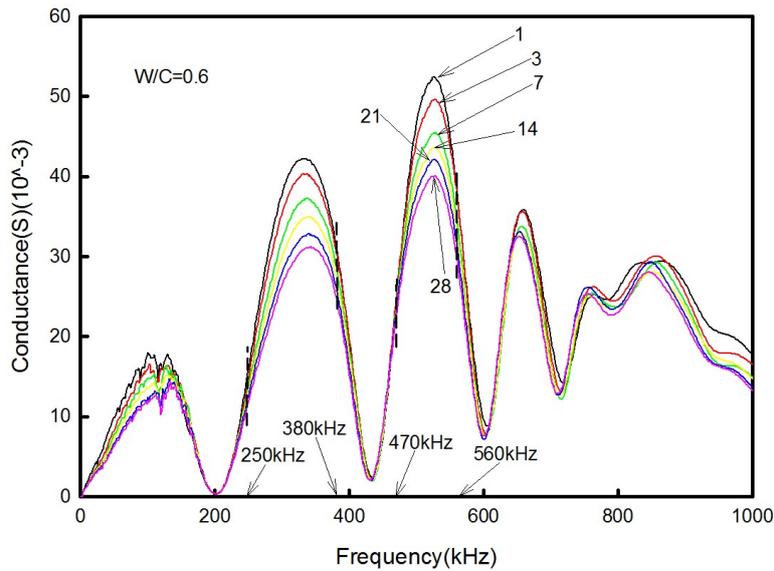


圖 11 水灰比 0.6 水泥砂漿之 PZT 感測器的齡期-電導曲線

### 3.4 RMSD 及迴歸

為了瞭解電導曲線與水泥砂漿抗壓強度的關係，使用均方根誤差(RMSD)來評估特定的適用頻率之電導曲線變化與水泥砂漿抗壓強度的相關性，RMSD 的計算公式：

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_i - G_i^1)^2}{\sum_{i=1}^n (G_i^1)^2}} \quad (1)$$

其中  $G_i$  = 感測器置入水泥砂漿試體各頻率的電導值， $G_i^1$  = 為感測器置入水泥砂漿試體前各頻率的

電導值， $n$ =頻率數量。

圖 12 和圖 13 分別是 PZT 感測器與 PP 感測器在水灰比 0.5 和 0.6 水泥砂漿擷取各自之適用頻率範圍的電導所計算的 RMSD 與強度關係，其中圖 12 的正方符號與三角符號分別是水灰比 0.6 在適用頻率 250~380 kHz (part 1)和 470~560 kHz (part 2)所計算的點位，圓形符號是水灰比 0.5 在 250~360 kHz 範圍計算的點位；圖 13 的正方符號表示水灰比 0.6 在 100~1000 kHz 範圍的計算點位，圓形符號是水灰比 0.5 在 200~1000 kHz 範圍的點位。由圖 12 和圖 13 可以看出抗壓強度越高的電導 RMSD 值也越大，趨勢與齡期-強度關係相符。

為了工程方便進行抗壓強度監測，利用方程式  $y = b + a \ln x$  型式進行迴歸，找出電導 RMSD 與強度方程式，其中  $x$  =電導 RMSD 值， $y$  =抗壓強度。迴歸結果如表 1 所示，其中  $R^2$ (Rsqr)為相關係數，越接近 1 可信度越高，表 1 所有的迴歸方程式的相關係數 R 皆大於 0.98，其中 PP 感測器更高達 0.99，代表迴歸分析結果可信度極佳，可用來監測結構物。

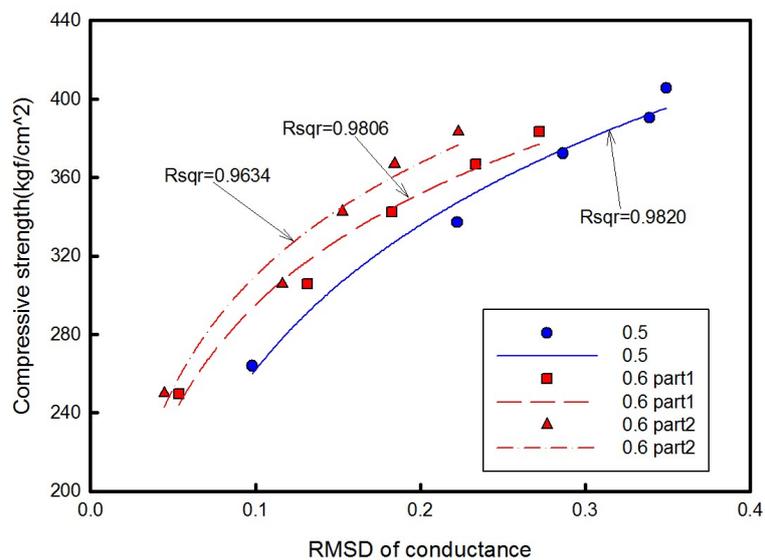


圖 12 PZT 感測器的電導 RMSD 與水泥砂漿強度

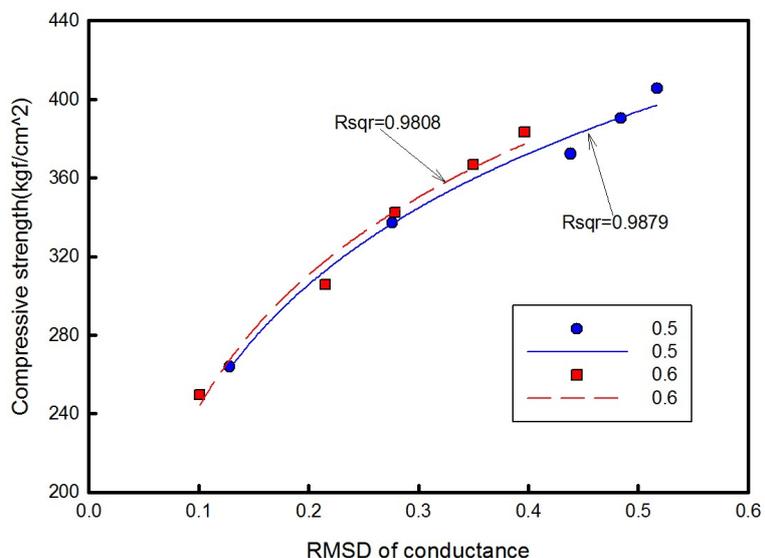


圖 13 PP 感測器的電導 RMSD 與水泥砂漿強度

表 1 電導 RMSD 與水泥砂漿強度迴歸結果

感測器種類	水灰比	迴歸方程式	$R^2$ (Rsqr)
PZT 感測器	0.5	$507.7963+106.8435 \ln x$	0.9820
	0.6 (part 1)	$483.8125+ 81.9949 \ln x$	0.9806
	0.6 (part 2)	$501.4001+83.1906 \ln x$	0.9634
PP 感測器	0.5	$460.5883+ 96.1887 \ln x$	0.9879
	0.6	$467.3449+ 97.2551 \ln x$	0.9808

比較圖 12 和圖 13，發現利用 PP 感測器(圖 13)監測水灰比 0.5 和 0.6 水泥砂漿的強度-電導 RMSD 曲線非常接近，而 PZT 感測器(圖 12)之水灰比 0.5 和 0.6 的強度-電導 RMSD 曲線有些差異，這表示以 PP 感測器監測之水泥砂漿強度的準確性會比 PZT 感測器較高。

#### 四、結論

本研究使用 50%PZT 及 50%水泥製成的壓電水泥(PP 感測器)置入水灰比 0.5、0.6 的水泥砂漿內，對照組使用 PZT 感測器，由量測其電導-齡期關係找出適合強度監測的頻率，計算適用頻率範圍的電導 RMSD，迴歸得到強度-電導 RMSD 曲線，得出結果如下：

1. PP 及 PZT 感測器經過瀝青封裝與放入水泥砂漿試體過程，感測器的阻抗皆有顯著明顯下降，且判斷極化是否成功的共振峰也隨之大幅減少甚至消失。
2. 壓電水泥感測器的電導曲線相較於 PZT 感測器更為平滑，齡期-電導曲線的重疊位置較少，能夠用來進行 RMSD 分析的適用頻率範圍也較大，即使用壓電水泥感測器監測水泥砂漿強度的適用頻率範圍比 PZT 感測器較寬廣，表示壓電水泥感測器因物理性質較接近水泥砂漿，其監測功能優於 PZT 感測器。
3. 兩種壓電感測器監測水泥砂漿的電導 RMSD 值都會隨著齡期增加，趨勢與齡期-強度關係相符，表示壓電感測器採用埋入式監測混凝土強度是可行的。
4. 比較不同水灰比的電導 RMSD 值與強度關係得知，壓電水泥感測器以 RMSD 值預測抗壓強度的準確性會優於 PZT 感測器。
5. 得到水泥砂漿強度-電導 RMSD 的迴歸方程式，可提供非破壞監測方法參考。

#### 參考文獻

1. Park, G., Sohn, H., Farrar, C. R., & Inman, D. J. (2003). Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, pp. 451-464.
2. 蔡金標，吳濤，陳勇，「基於壓電阻抗技術監測混凝土強度發展的實驗研究」，振動與衝擊，第 32 卷第 2 期，中國 (2013)。
3. 何明星，吳方紅，劉向東，管文強，杜國鋒，「基於壓電陶瓷的鋼管混凝土柱早期強度監測」，

壓電與聲光，第 38 卷第 6 期，中國 (2016)。

4. Sabet, D. B., & Yang, Y. (2014). Combined embedded and surface-bonded piezoelectric transducers for monitoring of concrete structures. *NDT and E International*, Vol. 65, pp. 28-34.
5. Xu, D., Banerjee, S., Wang, Y., Huang, S., & Cheng, X. (2015). Temperature and loading effects of embedded smart piezoelectric sensor for health monitoring of concrete structures. *Construction & Building Materials*, Vol. 76, pp. 187-193.
6. Wang, D., & Zhu, H. (2011). Monitoring of the strength gain of concrete using embedded PZT impedance transducer. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 3703-3708.
7. Xu, D., Cheng, X., Huang, S., & Jiang, M. (2010). Identifying technology for structural damage based on the impedance analysis of piezoelectric sensor. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 2522-2527.
8. Li, Z., Zhang, D., & Wu, K. (December 20, 2004). Cement-Based 0-3 Piezoelectric Composites. *J. of the American Ceramic Society*, Vol. 85, pp. 305-313.
9. Pan, H.H., Lin, D.H., & Yang, R.H. (2016). High Piezoelectric and dielectric properties of 0-3 PZT/cement composites by temperature treatment. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 72, pp. 1-8.
10. Shin, S. W., & Oh, T. K. (2009). Application of electro-mechanical impedance sensing technique for online monitoring of strength development in concrete using smart PZT patches. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 1185-1188.