

## 機電阻抗法應用於水泥砂漿強度預測

### Piezoelectric Cement Transducers in Conjunction with Impedance Analysis to Evaluate the Strength of Cement Mortar

陳郁雯<sup>1</sup>、張育雯<sup>2</sup>、劉妍廷<sup>2</sup>、蔡欣妤<sup>2</sup> 潘煌鏗<sup>3</sup>

<sup>1</sup>高雄科技大學土木工程系 大學生 E-mail: [yuwen060777@gmail.com](mailto:yuwen060777@gmail.com), 聯絡電話: 0987667000

<sup>2</sup>高雄科技大學 土木工程系 大學生

<sup>3</sup>高雄科技大學 土木工程系 教授

科技部計畫編號：MOST 107-2813-C-992-041-E

#### 摘要

本研究利用自製的壓電水泥感測器配合機電阻抗法來評估水泥砂漿抗壓強度，其中水泥砂漿的水泥與砂有重量比 1:2、1:2.5 和 1:3 三種，水灰比固定為 0.485。壓電水泥感測器由體積各占 50%的銦鈦酸鉛(PZT 陶瓷)和水泥乾拌混合以 80MPa 壓力製成的試體，經過電場極化製成具有壓電性質的元件。將壓電水泥感測器以嵌入式埋入水泥砂漿試體內，隨齡期量測水泥砂漿的阻抗及進行水泥砂漿抗壓試驗，先以齡期-阻抗關係找出適用的觀測頻率，利用適用頻率之阻抗的 RMSD 曲線進行迴歸分析來評估水泥砂漿的抗壓強度。研究結果顯示，適合監測三種砂漿之壓電水泥感測器的頻率範圍為 50~582 kHz，此觀測頻率範圍之壓電水泥感測器的阻抗值會隨著水泥砂漿齡期降低，阻抗與齡期具有關聯性。由阻抗 RMSD-齡期-抗壓強度曲線發現，當阻抗 RMSD 值越高的水泥砂漿強度越高，可用來評估水泥砂漿的抗壓強度。另外，獲得三種配比之水泥砂漿抗壓強度-阻抗 RMSD 的迴歸方程式，可做為評估強度參考，具有非破壞檢測功能。

**關鍵字：** 結構健康監測、水泥感測器、砂漿強度、阻抗、PZT

#### 一、前言

台灣位於環太平洋地震帶上，地震發生次數相當頻繁，依據中央氣象局觀測資料顯示，地震發生次數年平均約 2 萬 6 千次地震，其中有感地震超過 1000 次以上，結構物有時會因地震力導致嚴重受損或倒塌；另外，結構物也常因人為因素而有損傷，例如重機械所產生震動、建設開發時預防措施不足及不當結構設計修改，進而對結構物產生安全性疑慮。為了使結構物更加安全，採用預警偵測、主被動震動控制及建築物檢測技術，發展出智慧型結構(smart structure)。

壓電感測器(piezoelectric sensor)或促動器(actuator)利用機械能與電能之間轉換具有敏感的特性應用於結構物監測與檢測已行之有年，尤其以 PZT 壓電陶瓷片和壓電薄膜製成的感測器較多[1-3]。近來使用 PZT 壓電感測器配合機電阻抗法(electro mechanical impedance, EMI) [4-5]對結

構物進行檢測，因 PZT 陶瓷對於非破壞性檢測之機電阻抗法具有不受邊界影響、高頻率範圍、對結構物初期損傷非常敏感、量測方法簡單且適合自動連續性監測等優勢，為結構健康檢測的新技術。例如，Tawie (2010) [6]利用 PZT 感測器的共振頻率之阻抗偏移來預測混凝土的相對強度，並介統計指標的定量方法，如 RMSD (均方根偏差)，MAPD (絕對百分率偏差)和 CCD。Wang (2011) [5]以嵌入式 PZT 感測器的 EMI 技術監測早期混凝土強度提升，並結合 RMSD 和 MAPD 指標，找出混凝土強度提升的相關性。

但傳統的壓電感測器材料與混凝土材料因性質差異太大，導致壓電感測器與混凝土結構材料界面有變形協調性(compatibility)問題，無法擷取真正的混凝土構件內部應力、損傷或誤判，因此有 0-3 型水泥壓電複合材料(0-3 type cement-based piezoelectric composites)的發展[7-9]。

故為了探討 0-3 型水泥壓電複合材料(壓電水泥)製成的感測器是否能夠做為結構健康監測之用，本研究以壓電水泥感測器結合機電阻抗技術進行水泥砂漿強度預測。試驗用的壓電水泥由體積各 50%的 PZT 陶瓷介質和水泥基材所組成(簡稱 PP 配比)，經過極化過程後獲得壓電性質，稱為 PP 感測器(壓電水泥感測器)；水泥砂漿採用固定水灰比  $w/c = 0.485$ ，有三種水泥/骨材配比，水泥砂漿強度的齡期有 1~56 天；壓電水泥以嵌入式埋入水泥砂漿試體內，隨齡期進行水泥砂漿抗壓試驗及量測水泥砂漿的阻抗，在有效監測頻率範圍內計算阻抗的 RMSD，比較各配比之齡期、阻抗 RMSD 值與抗壓強度的關係，進行迴歸分析來評估水泥砂漿抗壓強度。

## 二、試驗計畫

### 2.1 材料與配比

水泥砂漿使用標準砂及 I 型卜特蘭水泥以固定 0.485 的水灰比製成，水泥與砂的配比(重量比)有 1:2、1:2.5 和 1:3 三種，水泥的比重 3.15 且細度  $349 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。壓電水泥由各 50%體積之水泥及 PZT 陶瓷介質所組成(配比 PP)，其中 PZT 粒徑通過 ASTM #100 篩與停留在#200 篩之間，PZT 的比重 7.9，以 SYP-4570 銀膠做為壓電水泥的電極材料。

### 2.2 壓電感測器的製作

壓電水泥感測器的製程是將未極化的 PZT 陶瓷片搗碎，粒徑介於  $75 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ ；水泥及 PZT 介質各取 50%體積採用行星式球磨機進行乾粉混合。將混合完成的材料稱重並分 3 層倒入直徑 15 mm 的鐵模內，使用橡膠槌對試體模進行敲擊使材料中的空氣跑出，完成後以萬能材料試驗機(MTS)施加 80MPa 應力來壓製試體，試體加載歷程是設定載重於 3 分鐘內到達，並持壓 5 分鐘後拆模取出壓製成型的試體。壓製完成的試體放置於  $90^\circ\text{C}$  溫度與相對溼度 100%的環境中進行養護 24 小時，增加水泥的水化反應來固化試體。養護後的試體利用研磨拋光機進行研磨成厚度 2 mm 的壓電水泥感測器(PP)試體，如圖 1。

研磨完成之壓電水泥試體先進行  $140^\circ\text{C}$  持溫 40 分鐘的溫度處理(第一次溫度處理)，並以銀膠塗抹於試體表面完成電極的製作，本研究自製的壓電水泥試體於極化前需要進行第二次溫度處理( $140^\circ\text{C}$  及 40 分鐘)。極化時需先將試體固定於夾具中，將試體和夾具放入  $150^\circ\text{C}$  (極化溫度)的油槽內，以  $1.5 \text{ kV}/\text{mm}$  電場(極化電壓)對試體進行 40 分鐘極化(極化時間)，最後量測阻抗頻

譜圖以確認試體是否極化成功，具有壓電性質的壓電水泥試體稱為 PP 感測器。



圖 1 壓電水泥試體厚度 2 mm

極化完成後，壓電性質的量測環境設定在溫度  $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$  與濕度  $50\%\pm 1\%$ 。因 PP 感測器的部分壓電性質會隨時間成長，故必須量測極化後 1 至 100 天的性質，以確認其是否已達到穩定齡期，所量測的性質包括電阻  $R$ 、阻抗  $Z$ 、相對介電常數  $\epsilon_r$  和壓電應變常數  $d_{33}$ 。

### 2.3 水泥砂漿試體製作

依照 ASTM C109 (CNS1010) 水硬性水泥壘料抗壓強度檢驗法製作水泥砂漿，尺寸為 50 mm 立方體，水灰比固定 0.485，有三種水泥砂漿配比。試體灌製 24 小時後拆模，隨即進行水中養護，並對未安裝感測器的試體在 1、3、7、14、28 和 56 天齡期進行抗壓試驗。

### 2.4 感測器封裝及嵌入

壓電性質達到穩定齡期之 PP 感測器在埋入水泥砂漿試體之前，使用瀝青膠泥做為防水材料對感測器進行封裝，其目的是使感測器與空氣隔絕，具有防水效果。做防水處理前需先將感測器表面使用酒精擦拭，清除微小的粉塵後焊接銅膠帶做為導線，繼續將已加溫至  $90^{\circ}\text{C}$  的瀝青膠泥塗抹於感測器表面，在感測器表面的瀝青膠泥冷卻後，就可埋入水泥砂漿試體內。感測器皆固定於試體中心位置（距試體表面 25mm 之位置）如圖 2，並量測 1~56 天內特定齡期（1、3、7、14、28 和 56 天）的阻抗頻譜。

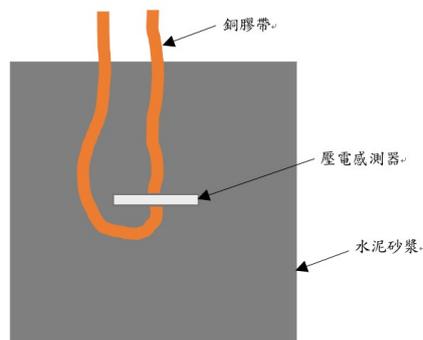


圖 2 水泥砂漿試體安裝感測器示意圖

## 2.5 阻抗值及迴歸分析

水泥砂漿試體內的感測器在齡期 1、3、7、14、28 和 56 天時以 0~1000 kHz 頻率量測阻抗，找出阻抗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阻抗的 RMSD 值，繪出阻抗的 RMSD 值-齡期-強度曲線，最後以迴歸分析找出水泥砂漿強度與阻抗 RMSD 關係，為評估水泥砂漿的強度。

## 三、結果與討論

水泥砂漿有三種配比，每種配比各有 6 個試體嵌入感測器，紀錄 1~56 天齡期的阻抗，特定齡期的阻抗值是 6 個量測值的平均。經由水泥砂漿的壓電感測器阻抗值，計算阻抗的 RMSD 後，與試體的抗壓強度做比較，找出阻抗與抗壓強度的關聯性。

### 3.1 水泥砂漿抗壓強度

每種配比在 1、3、7、14、28 和 56 天齡期各有 3 個未嵌入感測器的水泥砂漿試體，直接進行抗壓試驗。水泥砂漿的抗壓強度隨齡期增加而有明顯增長，水泥與砂比例為 1:2 的強度為最高( $f'_c=510 \text{ kgf/cm}^2$ )，其次是配比 1:2.5 ( $f'_c=410 \text{ kgf/cm}^2$ )和配比 1:3 ( $f'_c=296 \text{ kgf/cm}^2$ )，即隨著砂的添加量增加，水泥砂漿強度降低。水泥砂漿強度於 1~14 天成長幅度最大，配比 1:2 的水泥砂漿到第 14 天已達到 28 天齡期強度的 84%，配比 1:2.5 的水泥砂漿達到 83%，配比 1:3 的水泥砂漿則達到 75%，強度皆在 28 天左右成長趨於平緩。

### 3.2 適用觀測頻率

水泥砂漿的阻抗頻譜與齡期關係如圖 3，阻抗值會隨觀測頻率增加而減少且隨著水泥砂漿的齡期有下降的趨勢，約在 28 天時阻抗不再有明顯的變化，代表 28 天以後的試體阻抗已呈現穩定狀態，且三種配比之阻抗頻譜與齡期關係都有相同趨勢。

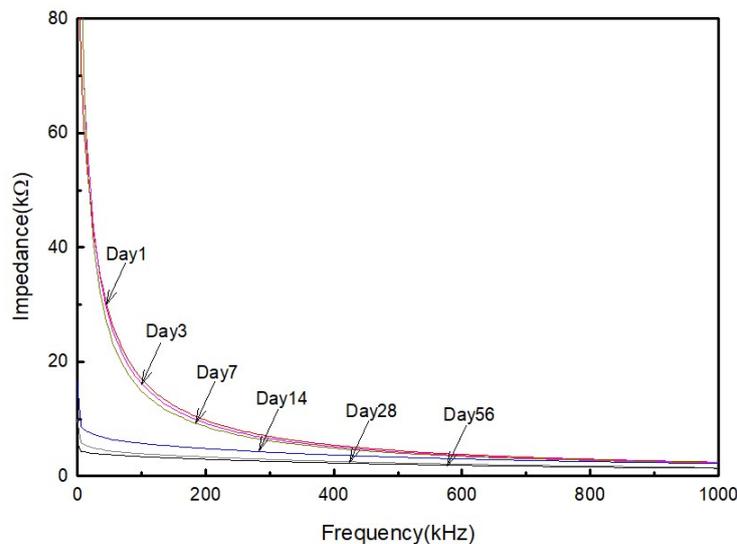


圖 3 水泥砂漿阻抗頻譜與齡期

然而，檢視 1~1000 kHz 範圍之阻抗與齡期時發現，在某些頻率範圍內之阻抗-齡期曲線順序有相互交叉現象，例如圖 4 在 600 Hz 附近的阻抗曲線有互相重疊交叉，表示阻抗減少趨勢與齡期相關性不大，在這段觀測頻率範圍的阻抗變化不宜與齡期進行連結。

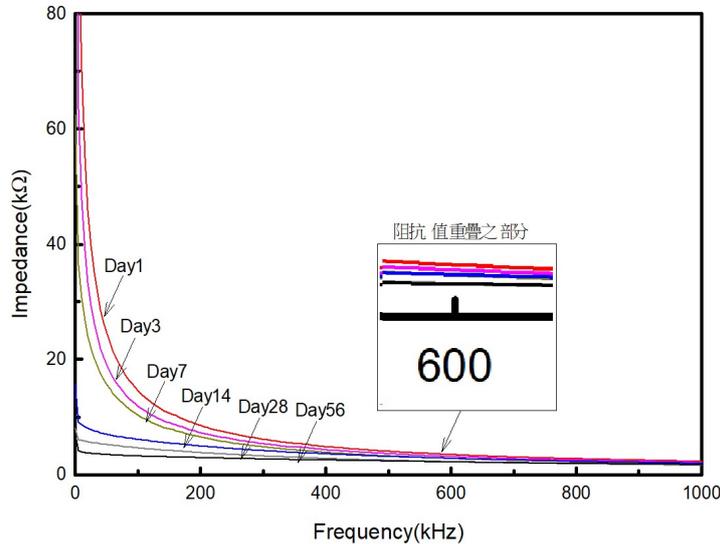


圖 4 水泥砂漿之阻抗-齡期曲線重疊交叉

由於阻抗值的重疊(圖 4)會使阻抗與齡期變化產生誤判，所以必須找出每個試體的有效頻率範圍，進而統整出適用在每個試體上的觀測頻率範圍，經檢視 18 個阻抗頻譜-齡期曲線圖(每種配比各有 6 個圖)後發現，配比 1:2 在頻率 30~640 kHz 範圍內的阻抗有隨齡期增加而減少的規律(或水泥砂漿的電阻隨齡期增加而依序增加)，顯示這個觀測頻率範圍的阻抗(或電阻)因其規律性可做為評估水泥砂漿抗壓強度的方法之一。另外由試驗結果得知，配比 1:2.5 和配比 1:3 的適用頻率分別為 50~600 kHz 與 10~582 kHz，故可歸納評估三個水泥砂漿強度的適用頻率為 50~582 kHz，這個適用頻率範圍內的阻抗將用來計算阻抗 RMSD 與齡期曲線。

### 3.3 阻抗 RMSD 與強度

因水泥砂漿會隨齡期增加導致阻抗減少，為了符合強度會隨齡期增加特性，本研究使用阻抗的均方根偏差(root-mean-square deviation, RMSD)來評估特定適用頻率之阻抗變化與水泥砂漿抗壓強度的相關性。RMSD 的計算公式:

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

其中  $G_i$  為水泥砂漿試體內之壓電感測器在各頻率的阻抗值、 $G_i^1$  為感測器埋入水泥砂漿前之各頻率的阻抗值、 $n$  表示頻率數量。圖 5~圖 7 分別是 PP 感測器在各個配比的水泥砂漿擷取適用頻率 (50~582 kHz) 的阻抗所計算的 RMSD 與強度關係，由圖 5~圖 7 得知當阻抗值的 RMSD 越高時強度也越大，且阻抗 RMSD-齡期曲線與抗壓強度成長類似。

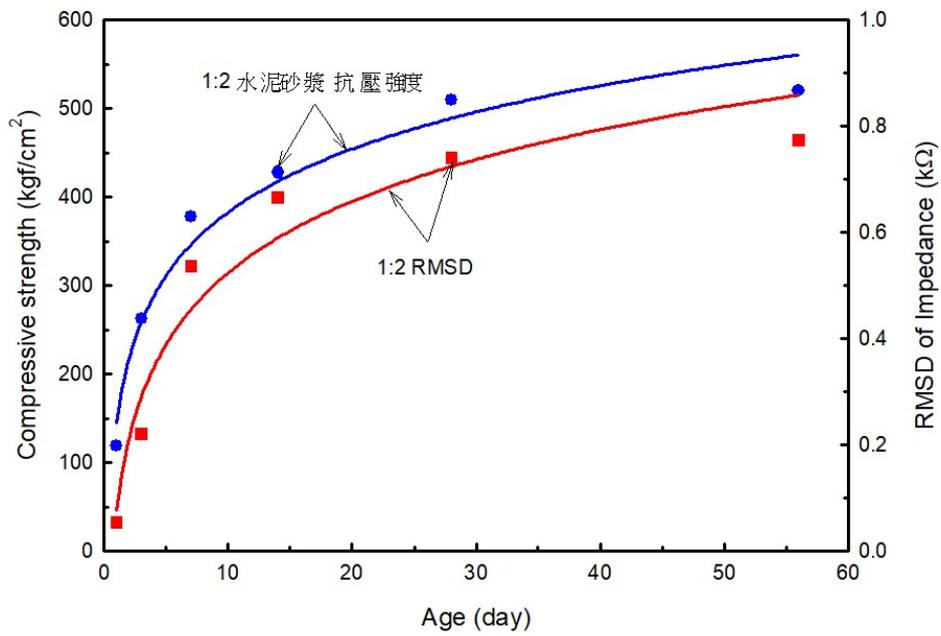


圖 5 配比 1:2 水泥砂漿齡期強度及阻抗 RMSD 關係

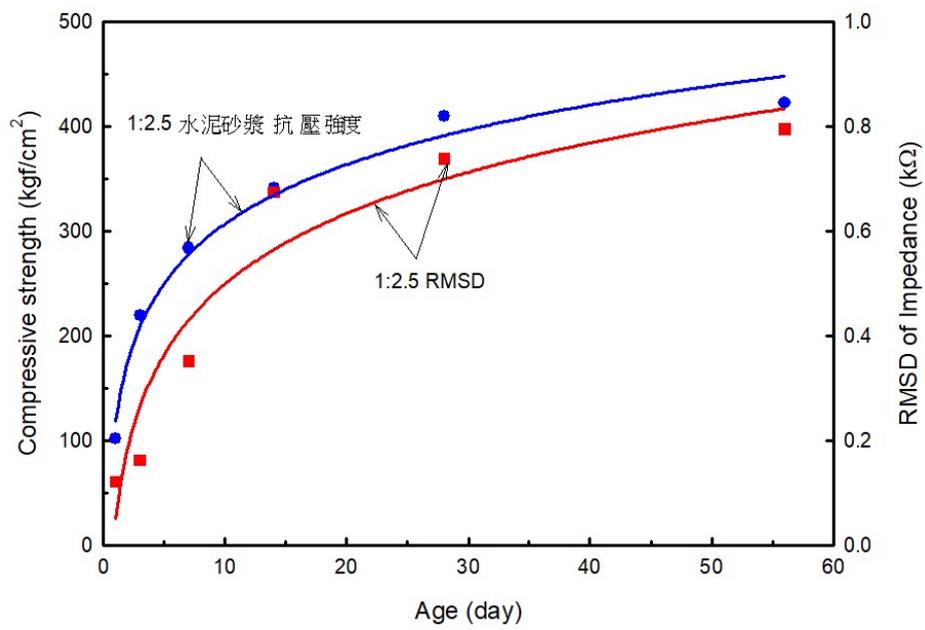


圖 6 配比 1:2.5 水泥砂漿齡期強度及阻抗 RMSD 關係

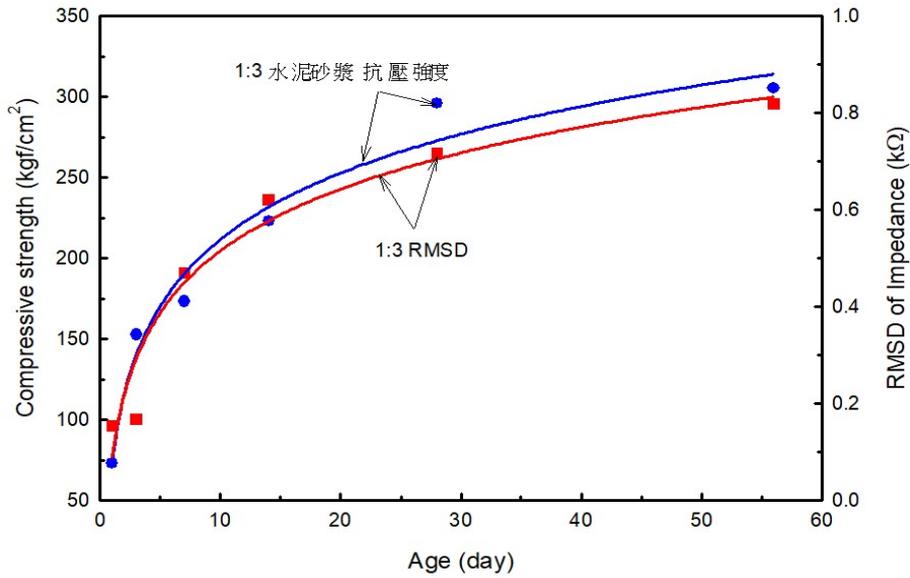


圖 7 配比 1:3 水泥砂漿齡期強度及阻抗 RMSD 關係

圖 8 是 PP 感測器在不同配比下擷取適用頻率範圍的阻抗所計算的 RMSD 與強度關係，其中圖 8 的圓形符號表示配比 1:2，三角形符號是配比 1:2.5，正方形符號是配比 1:3。由圖 8 可以看出阻抗 RMSD 值越高的水泥砂漿強度越高，趨勢與齡期-強度關係相符。為了方便監測抗壓強度，利用  $y = a + b \ln x$  型式的方程式進行迴歸，其中  $x =$  阻抗 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 表示可信度越高，表 1 所有的迴歸方程式的相關係數  $R^2$  皆大於 0.95，代表迴歸分析結果可信度極佳，可用來監測混凝土材料的強度。

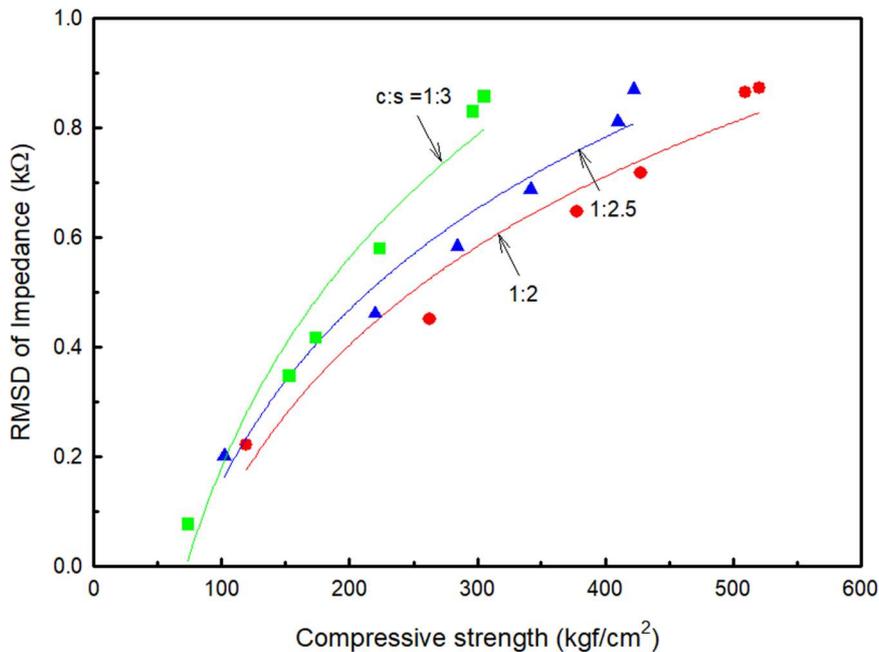


圖 8 阻抗 RMSD 與水泥砂漿強度的關係

表 1 阻抗 RMSD 與水泥砂漿強度迴歸結果

感測器種類	C : S (水泥:砂)	$y = a + b \ln x$	$R^2(\text{Rsqr})$
PP 感測器	1 : 2	$y = -1.8995 + 0.4425 \ln x$	0.9570
	1 : 2.5	$y = -1.9340 + 0.4536 \ln x$	0.9649
	1 : 3	$y = -2.3606 + 0.5520 \ln x$	0.9517

#### 四、結論

0-3 型水泥壓電複合材料採用自有技術製成壓電水泥感測器，以嵌入式埋入水泥砂漿，利用所計算的阻抗 RMSD 來評估水泥砂漿強度，研究結果歸納如下：

1. 水泥砂漿的阻抗-頻率曲線會隨著齡期增加而下降，即電阻會隨著齡期增加，約在 28 天的阻抗值趨於穩定，阻抗成長與抗壓強度類似，可適當使用來評估水泥砂漿的強度。
2. 阻抗的 RMSD 與水泥砂漿抗壓強度成長有關聯性，當阻抗的 RMSD 值越大的水泥砂漿強度越大，可用來評估水泥砂漿的抗壓強度。
3. 為避免阻抗與齡期有不規律變化關係，以阻抗 RMSD 評估水泥砂漿強度時，有效的觀測頻率在 50 ~ 582 kHz 範圍。
4. 抗壓強度與阻抗的 RMSD 有  $y = a + b \ln x$  關係，可用評估水泥砂漿抗壓強度。

#### 參考文獻

1. Ai, D., Zhu, H. and Luo, H., "Sensitivity of embedded active PZT sensor for concrete structural impact damage detection", Construction and Building Materials, Vol. 111, pp. 348-357, 2011.
2. Liu, P, Wang, W., Chen, Y., Feng, X. and Miao, L., "Concrete damage diagnosis using electromechanical impedance technique", Construction and Building Materials, Vol. 136, pp. 450-455, 2017.
3. Visalakshi, T., Bhalla, S. and Gupta, A., "Monitoring early hydration of reinforced concrete structures using structural parameters identified by piezo sensors via electromechanical impedance technique", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 99, pp. 129-141, 2018.
4. Negi, P., Chakraborty, T., Kaur, N. and Bhalla, S., "Investigations on Effectiveness of Embedded PZT Patches at Varying Orientations for Monitoring Concrete Hydration Using EMI Technique", Construction and Building Materials, Vol. 169, pp. 489-498, 2018 .
5. Wang, D. and Zhu, H., "Monitoring of The Strength Gain of Concrete Using Embedded PZT Impedance Transducer", Construction and Building Materials, Vol. 25 No. 9, pp. 3703-3708, 2011.
6. Tawie, R. and Lee, H. K., "Monitoring the strength development in concrete by EMI sensing technique", Construction and Building Materials, Vol. 24, pp.1746-1753, 2010.
7. 張東, 吳科如, 李宗津, "2-2 型水泥基電壓電機敏複合材料的研制", 壓電與聲光, 24 卷, 3 期, pp. 271-231, 2002.

8. 張東, 吳科如, 李宗津, “水泥基壓電機敏複合材料的可行性分析和研究”, 建築材料學報, 5 卷, 2 期, pp. 141-146, 2002.
9. Dong, B. and Li, Z., “Cement-based piezoelectric ceramic smart composites”, Composites Science and Technology, Vol. 65, pp. 1363-1371, 2005.