

## 壓電水泥感測器監測水泥砂漿強度發展

王永德<sup>1</sup> 潘煌鏗<sup>2</sup>

<sup>1</sup>高雄應用科技大學土木工程研究生

<sup>2</sup>高雄應用科技大學土木工程學系教授

### 摘 要

利用壓電材料之機電組抗技術對結構物進行監測相較於傳統非破壞性檢測少了許多的限制是近幾年來的新方法，但 PZT 與混凝土性質相差甚遠，本文使用水泥壓電複合材料相較於 PZT 與混凝土有較好的變形一致性。研究利用水泥壓電複合材料作為感測器，放入水泥砂漿試體內，企圖找出試體強度與水泥壓電複合材料電阻抗之間的相關性。本研究使用 0-3 型水泥壓電複合材料，以 50%PZT 壓電陶瓷為介質，50%水泥為基材製成，控制銀膠及極化前溫度。選用通過#100 篩停留#200 篩之 PZT，製成水泥壓電複合材料，經過 90°C 恆溫水槽養護 24 小時，並在銀膠及極化前做溫度處理，為 140-140°C 再到 150°C 油槽內以 1.5kV/mm 電場極化 40 分鐘，依照 CNS 1010 製作水泥砂漿抗壓試體，並將感測器感測器放入試體內，待對照組砂漿是體達到 7、14、21、28 天齡期進行抗壓試驗，抗壓結果與同齡期試體所測得阻抗做比較。實驗結果顯示，隨著水泥砂漿試體齡期的增加，量測到電阻抗也會隨之降低。

關鍵字：PZT、強度增益、機電阻抗

## Monitoring the strength development of Mortar by Piezoelectric Cement Sensors

Yong-De Wang<sup>1</sup> Huang-Hsing Pan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Master Student, National Kaohsiung University of Applied Science, Kaohsiung, Taiwan

<sup>2</sup> Professor, National Kaohsiung University of Applied Science, Kaohsiung, Taiwan

### ABSTRACT

The use of piezoelectric materials, electromechanical group of anti-technology to monitor the structure compared to the traditional non-destructive testing of many of the restrictions is a new method in recent years, but PZT and concrete properties are very different, this paper uses cement piezoelectric composite Compared with PZT and concrete have better deformation consistent. The cement piezoelectric composite was used as the sensor to be put into the cement mortar sample to find out the correlation between the strength of the specimen and the electrical impedance of the cement piezoelectric composite. In this study, 0-3 type cement piezoelectric composite material, 50% PZT piezoelectric ceramic as the medium, 50% cement as the substrate, control silver and polarized pre-polar temperature. The PZT was sieved through # 100 sieve and made into a cement composite material. After curing at 90°C for 24 hours, the temperature was 140-140°C before the silver and polarized 150°C oil tank to 1.5kV / mm electric field polarization 40 minutes, according to CNS 1010 production of cement mortar compressive test specimen, and the sensor sensor into the test body, the control group mortar is the body to reach 7,14, 21,28 days of compressive test, compression results with the same age test body measured impedance comparison. The experimental results show that with the cement mortar test body age increases, the measurement of electrical impedance will be reduced.

Key words: PZT, strength gain, electromechanical impedance

## 一、摘要

混凝土結構物有著高抗壓強度、成本低廉、耐高溫等許多優點且可以配合模板造型塑造成品樣貌成為現在國內主流，但是混凝土的強度卻是需要時間慢慢成長，使用感測器對現地混凝土齡期進行監控分析強度發展試近年來新方法。

壓電材料 PZT 使用機電阻抗(Electro mechanical impedance)量測結構物已行之有年，例如 Wang and Zhu [1]使用壓電陶瓷 PZT 作為感測器放入混凝土試體內，檢測齡期強度與感測器阻抗實部與虛部發展，並使用 RMSD 及 MPAD 數值分析方法進行分析，指出阻抗實部是較能反映出混凝土強度發展。Shin and Oh[2] 使電樹脂將 PZT 感測器黏貼在混凝土試體表面量測。量測混凝土試體 3, 5, 7, 14, 和 28 天齡期抗壓強度測及 PZT 電導。結果觀察到隨著齡期的增加振峰逐漸向右偏移且逐漸降低。Tawie and Lee[3]將 PZT 黏貼在混凝土利方式體表面，監測強度發展與 PZT 阻抗之間相關性，混凝土試體有四種不同水灰比，取樣齡期為 3、7、14、28 天之平均抗壓強度。結果發現水灰比較低(强度高)之配比，振峰頻率偏移越大(和抗壓強度成正比)。Xu and Cheng 等人[4]使用貼片式及放入式的 PZT 感測器監測混凝土梁，使用砂輪機切割裂痕觀察裂痕發展與阻抗相關性，發現裂痕距離感測器越近越敏感，且放入式對裂痕產生的敏感度較貼片式好。但是傳統的壓電陶瓷與土木結構物常用的混凝土材料在變形相容性有明顯的差異，例如 PZT 壓電陶瓷與混凝土的比重與聲阻抗(acoustic impedance)有 2 倍以上

特性	代號	數值
壓電應變常數	$d_{33}(\text{pC/N})$	470
楊式彈性係數	$E_{33}(\times 10^{10}\text{N/m}^2)$	5.2
介電常數	$\epsilon_r(=\epsilon_{33}^T/\epsilon_0)$	2100
介電損失	$\tan\delta(\%)$	1.5

表 2、鋁鈦酸鉛基本性質(KA 型)

差異，所以促成了 0-3 型水泥壓電複合材料(0-3 type cement-based piezoelectric materials)的發展[5]。

0-3 型水泥壓電複合材料是壓電介質與水泥做結合，優點是容易塑造成任何形狀，且成本較低[6]和適合用於混凝土材料作為感測性質使用。使用壓電陶瓷進行結構健康檢測或是即時監測已有相當多的成果，

表 3、感測器基本性質

感測器	電容	電阻率	壓電應變常數	介電常數
PZT	1.06nf	0.21km-m	418pC/N	1902
PP	284.405pf	42.109 km-m	92.98pC/N	363.62



圖 1、瀝青封裝感測器



圖 2、感測器放入砂漿試體



圖 3、阻抗分析儀

但 0-3 型水泥壓電複合材料應用於結構物健康監測仍在進行中。本研究使用 0-3 型水泥壓電複合材料放入水泥砂漿中希望找出適合檢測水泥砂漿齡期強度發展的頻率。

## 二、實驗過程

### 2.1 感測器製作

本研究所使用 0-3 型水泥壓電感測器 PP，使用比重為 3.19 之 I 型水泥與 PZT 壓電陶瓷(基本性質如表 2)燒結體經研磨後粒徑為 75~150  $\mu\text{m}$  粉末，比重 7.9，兩者體積各占 50%。將水泥與 PZT 混和，利用 MTS 以 80MPa 的壓力壓製成片狀後放入 90°C 恆溫水槽養護一天，塗抹銀膠及極化前將試體加熱至 140°C，最後放入 150°C 環境中以 1.5Kv/mm 極化電場進行極化 40 分鐘製成 PP 水泥壓電感測器壓及 PZT 基本性質如表 3，其中 PZT 的壓電應變常數為 418pC/N，PP 為 92.98pC/N 且電容則是在 1kHz 下所量測到的數值 PZT 為 1.06nf，PP 為 284.405pf。

本文使用瀝青塗抹於感測器表面作為防水處理材料如圖 1，之後使用束帶將感測器固定在試體中心灌入砂漿試體中待至指定齡期量測感測器阻抗如圖 2。

### 2.2 砂漿試體製作

砂漿試體依照 ASTM C109(CNS 1010)水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法，使用標準砂，水泥為 I 型水泥水灰比為 0.485，砂:水泥為 1:2.75 配比如表 4 所示，沒有放置感測器的試體在 1、3、7、14、21、28、56 天進行抗壓強度試驗。感測器放置在沙漿試體中間感測器中心距離砂漿試體上、下、左、右均為 25mm，灌漿時將感測器固定於模具中間確保其位置沒有偏離即可並使用 Wayne Kerr 公司生產阻抗分析儀，與抗壓試驗同一天進行阻抗的量測如圖 3。

表 4、水泥砂漿配比

試體數(個)	6
水泥(g)	500
標準砂(g)	1375
水(g)	240

## 三、結果分析

### 3.1 水泥砂漿抗壓強度

水泥砂漿 1、3、7、21、28、56 天抗壓強度如圖 4，可以發現抗壓強度隨著齡期有著明顯增長的趨勢，其中 1~14 天強度成長至 298  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  成長的得最為劇烈，14~56 天則趨於頻緩沒有太大的增幅

### 3.2 感測器阻抗變化

圖 5、6、7 所示 PZT 及 PP 在為使用瀝青封裝前、封裝後及放入試體後第一天阻抗變化。水泥壓電感測器 PP 使用瀝青封裝後同一頻率阻抗有著明顯的下降，且 130~140kHz 之間用來判斷極化是否成功的共振頻率也在瀝青封裝之後消失，隨後將感測器放入砂漿試體觀查到阻抗也是有著些微的下降。PZT 感測器經由瀝青封裝後 200kHz 的共振頻率有著大幅度的下降，

400、600、800kHz 之共振頻率也趨於頻緩，之後再將感測器放入水泥砂漿後觀察到共振頻率峰值有些微向右偏移下降的趨勢。

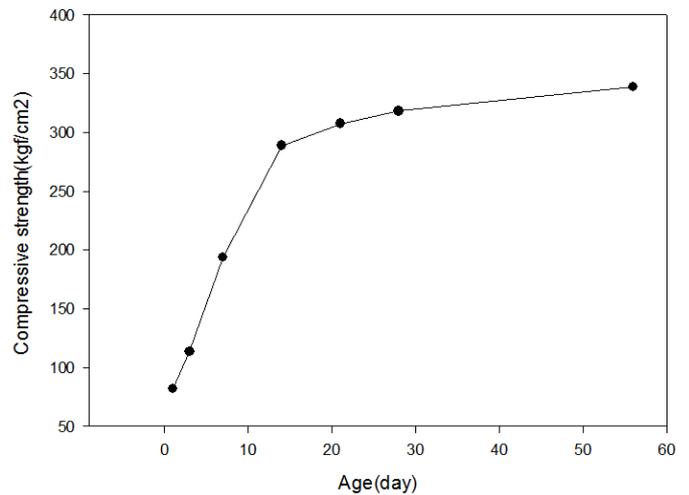


圖 4、水泥砂漿抗壓強度

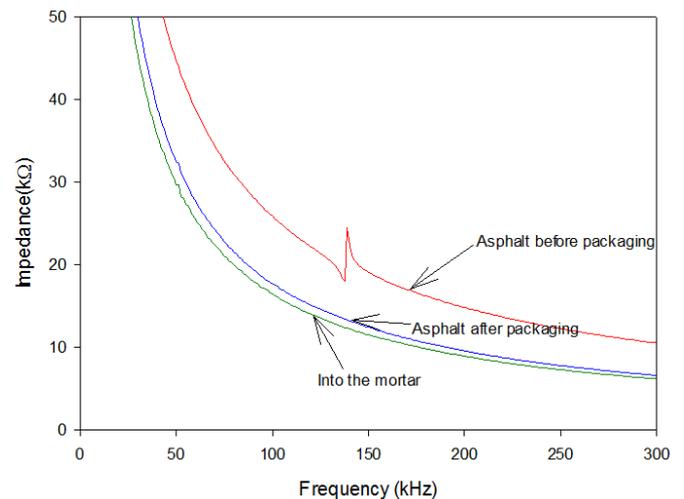


圖 5、PP 瀝青封裝前後及放入砂漿阻抗變化

### 3.3 水泥砂漿齡期與電導

電導(Conductance)為阻抗實部的倒數是目前被認為較能反映出結構物變化的數值，因此本研究砂漿齡期也是使用感測器所量測得到電導數值來進行分析與

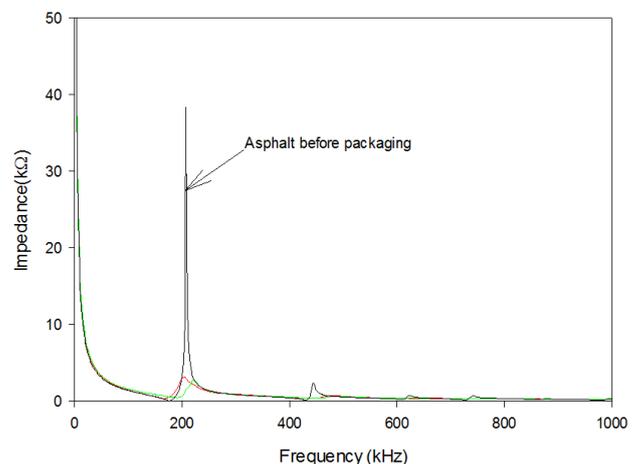


圖 6、PP 瀝青封裝前後及放入砂漿阻抗變化

探討。

將感測器放入到砂漿試體內並量測電導與齡期變化的相關性其 PZT 所量測到的結果如圖 8，由觀察發現 0~2000kHz 間電導有高低起伏的變化最能反映出抗壓強度與電導相關性的頻率為 380~420kHz 的波峰如圖 9，由圖 9 放大 400kHz 電導可以看出隨著砂漿齡期的增加電導峰值也有不斷地下降的趨勢，將其峰值變化與水泥砂漿抗壓強度做成圖 10 發現水泥強度的增加電導峰值也逐漸下降。圖 11 為 PPBB 放入砂漿試體後量測得到的曲線 0~2000kHz，可以發現相較於 PZT 電導曲線水泥壓電感測器所測得電導曲線較為平滑，沒有明顯的起伏但還是可以由特定頻率看出水泥砂漿齡期與電導的變化。圖 12 頻率 400~700kHz 可以發現水泥砂漿齡期的增加電導曲線有下降的趨勢且 28 天齡期曲線在約 400kHz 時與 56 天的電導曲線有重疊且在 650kHz 在 28 天電導曲線有著上升的趨勢且與 21 天重疊，所以最符合水泥砂漿強度成長的電導頻率為 400~650kHz。

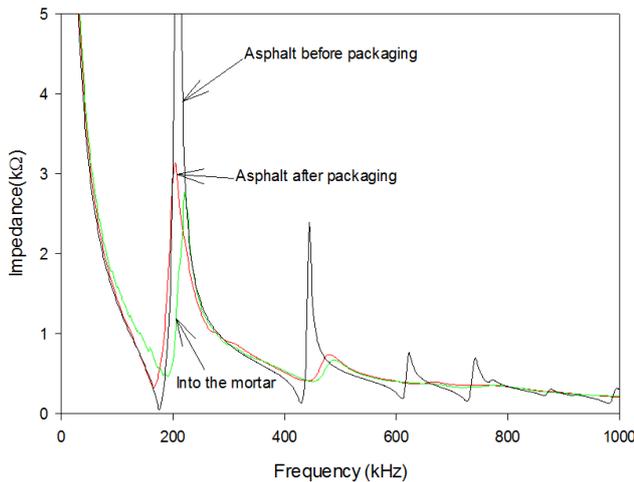


圖 7、PP 瀝青封裝前後及放入砂漿阻抗變化

圖 10、PZT 電導 400kHz 峰值與砂漿抗壓強度

圖 13 為電導 500kHz 與砂漿抗壓強度得比較圖，可以看出 PP 感測器電導的變化幅度相較於 PZT 小，但還是可以觀察到 PP 電導的變化是與砂漿抗壓強度有良好的關聯性。

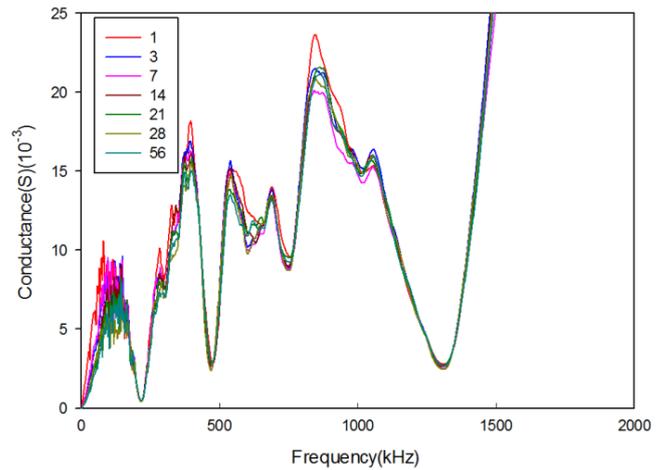


圖 8、PZT 放入砂漿 1~56 天電導變化 0~2000kHz

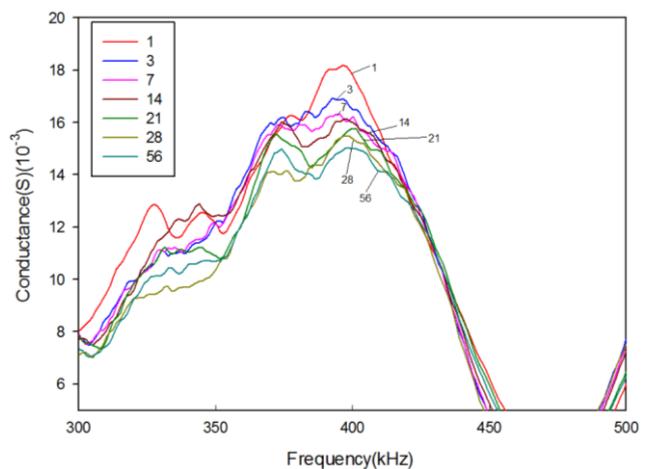


圖 9、PZT 放入砂漿 1~56 天電導 0~2000kHz

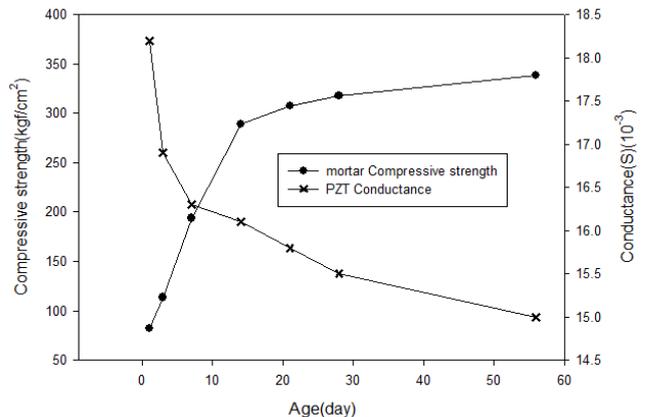


圖 10、PZT 電導 00kHz 與砂漿抗壓強度

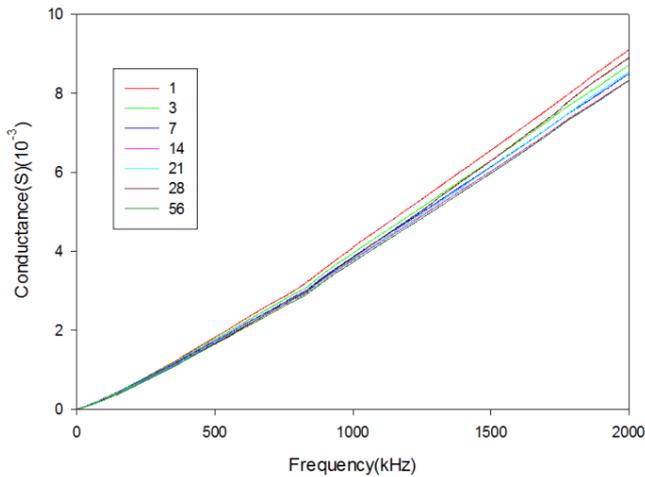


圖 11、PP 放入砂漿 1~56 天電導 0~2000kHz

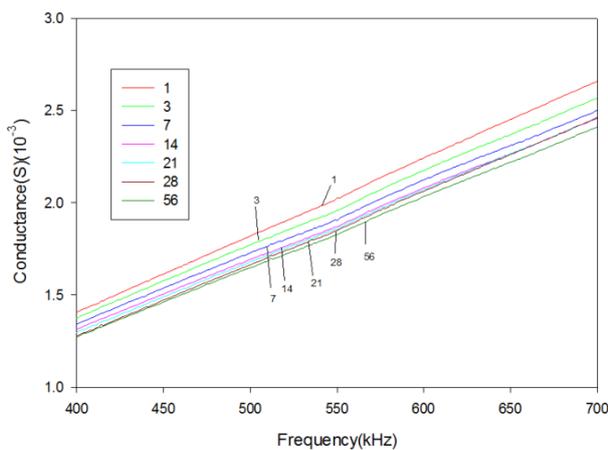


圖 12、PP 放入砂漿 1~56 天電導 400~700kHz

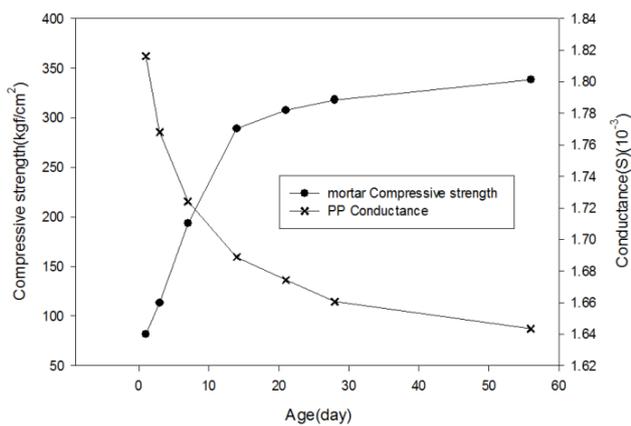


圖 13、PP 電導 500kHz 與砂漿抗壓強度

另外為了進一步的分析電導曲線與水泥砂漿抗壓強度的相關性採用了均方根差(RMSD)來進行分析,其公式如下

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

其中  $G_i$  為各個頻率的電導、 $n$  表示掃描頻率數量。

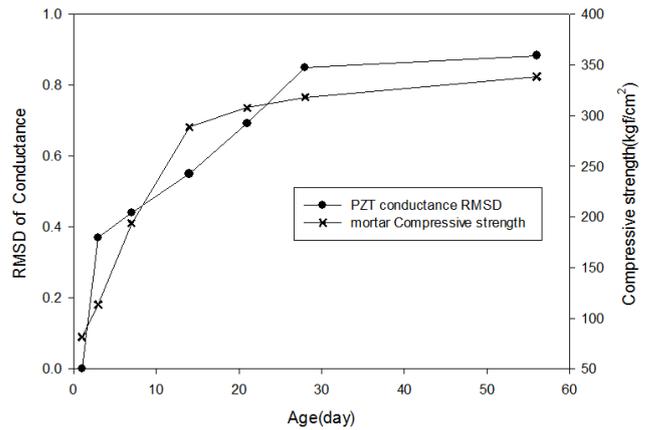


圖 14、PZT350-430kHzRMSD 與砂漿抗壓強度

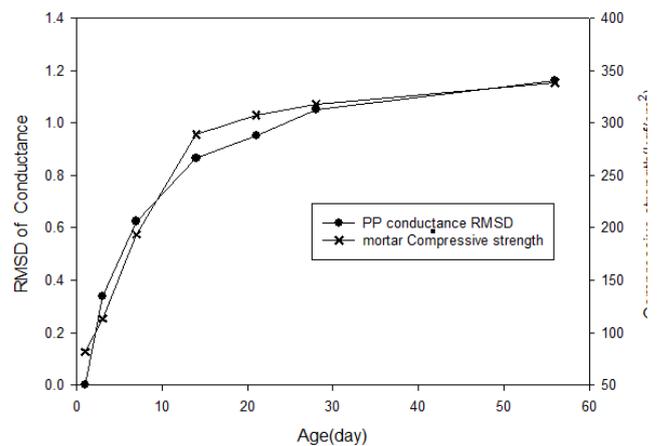


圖 15、PP400-650kHzRMSD 與砂漿抗壓強度

圖 14、15 分別顯示了 PZT 以及 PP RMSD 與砂漿抗壓強度關係,可以看出 PZT 與 PP 使用均方根差分析特定頻段後發現 RMSD 的數值有逐漸上升的趨勢,這代表隨著水泥砂漿齡期的增加感測器電導曲線偏移的幅度越大,PP 以及 PZT 在特定頻率均對水泥砂漿強度發展。

#### 四、結論

本文使用了 50%PZT 及水泥製成壓電水泥與純 PZT 放入砂漿試體中作為感測器量測感測器電導的變化,並尋找適用於檢測水泥砂漿強度發展的是用頻率範圍,得到的結果如下

1. 使用瀝青作為防水層 PZT 與 PP 阻抗共振頻率有相當大幅度的下降。
2. PP 放入砂漿試體後所量測電導曲線相較於 PZT 平滑,且隨著頻率增加電導越高。
3. 從 PZT 電導 400kHz 峰值可以明顯看出砂漿強度的變化,PP 則是 400~600kHz 的頻段可以反映砂漿抗壓強度的變化。
4. 由 RMSD 分析特定頻率 PZT 以及 PP 電導的變化發現與水泥砂漿抗壓強度有著良好的相關性。

## 五、參考文獻

1. Wang Dansheng ,and Zhu Hongping, “Monitoring of the strength gain of concrete using embedded PZT impedance transducer,” *Construction and Building Materials*, Vol.25, pp. 3703-3708,2011.
2. Sung Woo Shin, Tae Keun Oh, “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.1185–1188,2009.
3. R. Tawie, H.K. Lee, “Monitoring the strength development in concrete by EMI sensing technique,” *Construction and Building Materials* ,Vol.24, pp. 1746–1753,2010.
4. Xu Dongyu, Cheng Xin, Huang Shifeng, and Jiang Minhua, “Identifying Technology for Structural Damage Based on The Impedance Analysis of Piezoelectric Sensor,” *Construction and Building Materials*, Vol.24, pp. 2522-2527,2010.
5. Li, Z., Zhang, D., and Wu, K., “Cement-Based 0-3 Piezoelectric Composites,” *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 85, pp. 305-313,2002.
6. Dong, B., and Li, Z., “Cement-Based 0-3 Piezoelectric Composites,” *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp. 1363-1371, 2005.