

## 添加爐石對經熱處理 0-3 型水泥壓電複合材料之性質影響

# Influence of Slag on Piezoelectric Properties of Heat-Treated 0-3 Type Cement Piezoelectric Composites

許杰儒<sup>1</sup> 潘煌鏗<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 國立高雄科技大學土木工程系 大學生 C108141206@nkust.edu.tw

<sup>2</sup> 國立高雄科技大學土木工程系 教授 pam@nkust.edu.tw

### 摘要

本研究探討含爐石的 0-3 型水泥壓電複合材料經過熱處理的壓電與介電特性影響。壓電陶瓷 PZT 在水泥壓電複合材料中為介質，體積含量固定 50%，其餘 50% 為爐石和水泥作為基材，其中基材的爐石各別取代水泥 10%、20%、30% 的體積含量。0-3 型水泥壓電複合材料以 80 MPa 的應力壓製試體，熱處理方式是在試體製作電極的前後經過 140°C 熱處理，再進行電場極化 40 分鐘。實驗結果顯示，在試體中添加爐石時會增加相對介電常數，可提高材料的儲電能力及降低電阻率，使試體更容易極化。在爐石 20% 的試體，在極化後的壓電應變常數  $d_{33}$  與相對介電常數  $\epsilon_r$  均有最佳值 ( $d_{33} = 100.9$  pC/N,  $\epsilon_r = 429$ )。此外，添加爐石的水泥壓電複合材料(壓電水泥)之阻抗頻譜和齡期關係具有規律性，在極化後 56 天的阻抗頻譜穩定，表示添加爐石的壓電水泥可製成壓電感測器用於結構健康監測。

**關鍵字:** 爐石，熱處理製程，水泥壓電複合材料，結構健康監測

### 一、前言

以往水泥在建築工程中被視為混凝土強度的來源，但近來環保意識的提升使得除了安全性外，耐久度和對於生態環境造成的影響也備受重視。卜作嵐材料除了可以使安全性與耐久性上升外，亦可減少水泥使用量使二氧化碳排放量降低，減少對環境造成的污染。目前國內常用來取代水泥的卜作嵐材料有飛灰、爐石粉、矽灰等[1,2]。

台灣位處歐亞板塊與菲律賓海板塊之交界處，地震頻繁使得結構體有時會因為地震巨大的破壞力而毀損，以至於對安全性產生威脅。為了解決此問題，建築物逐漸朝智慧型結構物發展。在智慧型結構物內會添加智慧型材料，這些材料主要用來製成致動器(actuator)和感測器(sensor)，可以用來對結構物進行即時監測(real-time monitoring) [3]。

壓電材料可以將電能與機械能互相轉換，具有較高的能量轉換率 and 不受電磁干擾等特性，有壓電陶瓷(piezoelectric ceramics)、壓電聚合物(piezoelectric polymers)與壓電複合材料(piezoelectric composites)三類，可以用來當作監測使用的智慧型材料。壓電陶瓷有密度高和聲阻抗大的優勢，但是其韌性比較差而容易脆性破壞的缺點，使它的應用受

到了部分限制；而壓電聚合物能夠製成壓電薄膜，但有不容易極化、壓電係數和機電耦合係數低的缺點。當壓電陶瓷和壓電聚合物做為感測器進行混凝土結構健康監測和檢測時，因其性質與混凝土間有聲阻抗(acoustic impedance)、體積相容性(compatibility)差異性大的問題，感測器時有發生監測錯誤或誤判的情形。壓電複合材料乃是為了解決前面兩種壓電材料之壓電感測器的缺點而研發出的壓電材料，適當的壓電複合材料具有高壓電常數及韌性佳的優點，而為了讓壓電材料和混凝土間有良好的相容性，發展了 0-3 型水泥壓電複合材料[4,5]。

0-3 型水泥壓電複合材料有可塑性佳且成本低等優點，在監測上有很大的未來性。目前已知壓電陶瓷的粒徑及含量、製程技術與摻料添加都會影響 0-3 型水泥壓電複合材料的壓電特性。為了探討添加卜作嵐材料對壓電性質的影響，本研究分兩組進行：第一組為在相同製程下加入不同含量的爐石，探討極化後的 0-3 型水泥壓電材料的壓電性質，並與無添加爐石的 0-3 型水泥壓電材料進行比較；第二組為試體養護 24 小時(經熱處理)與養護 168 小時(未經熱處理[6])的結果比較，探討極化前經過熱處理對電性質的影響。

## 二、實驗計畫

### 2.1 材料與配比

0-3 型水泥壓電複合材料(壓電水泥)是以卜特蘭第 I 型水泥當作基材，PZT 壓電陶瓷為介質所組成，體積各佔 50%。本次研究中所使用的水泥為東南水泥股份有限公司生產的第 I 型卜特蘭水泥，符合 CNS 61 規範要求，細度為 349 m<sup>2</sup>/kg，比重為 3.16；爐石為中聯資源股份有限公司之水淬爐石粉，符合 ATSM C989 規範，細度為 572349 m<sup>2</sup>/kg，比重為 2.88。

本次實驗的對照組為未添加爐石的感測器(PP)，實驗組依照爐石取代水泥體積量 10%、20%、30%做為試體(編號 SL10、SL20、SL30)，有關體積取代量與重量的關係，如表 1。

表 1 爐石取代水泥體積與重量關係

體積 %	10	20	30
重量 %	9.92	18.56	28.09

### 2.2 試體製作

將定量的水泥、爐石和 PZT(如圖 1)使用行星式球磨機將材料乾拌混和，混和後分量放入直徑 15mm 的試體模，再使用萬能材料試驗機(MTS)施加 80 MPa 的壓製應力將試體壓製成錠狀(圖 2)，若試體壓製不完全，試體容易在取出時碎裂失敗(如圖 3)。壓製完成後的試體放入溫度 90°C、相對濕度 100%的養護水槽養護 24 小時，養護完成後，以拋光研

磨機研磨試體至設計厚度 2 mm(如圖 4)。在試體製作電極之前，將試體放入溫度 140°C 的高溫爐內 40 分鐘進行第一次熱處理；完成熱處理後，試體塗上一層導電銀膠(高溫銀膠)做為試體的電極，再放入 150°C 的高溫爐內 30 分鐘使銀膠熟化完成電極製作；靜置一段時間後，繼續對試體進行溫度 140°C 時間 40 分鐘的第二次熱處理。完成第二次熱處理後，在試體冷卻時測量其基本電性(電容 C、介電損失 D、電阻 R)。

進行試體極化，是將試體放入溫度 150°C 的矽油槽內，以 1.5 kV/mm 的極化電場對試體進行 40 分鐘的極化。完成極化後，測量試體的基本電性與壓電性質(壓電應變常數  $d_{33}$ 、阻抗頻譜 Z)，量測環境設定為室溫  $23\pm 1^\circ\text{C}$  與室內相對濕度  $50\pm 2\%$ 。因壓電試體的部分性質會隨極化後的齡期變化，故性質的量測時間持續至 56 天。

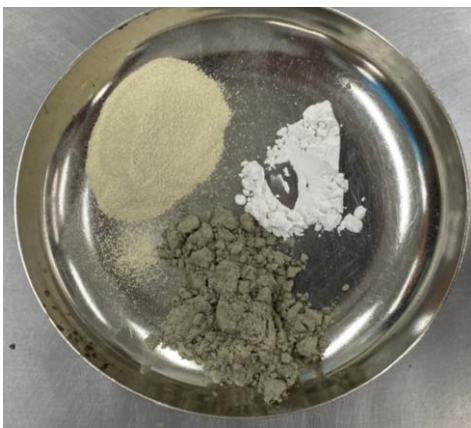


圖 1 水泥、爐石以及 PZT 粉末

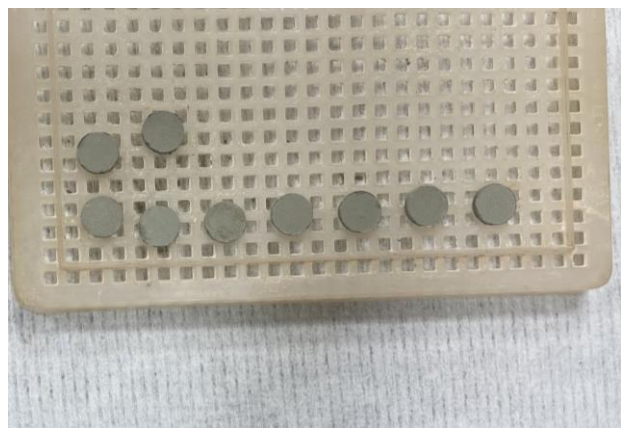


圖 2 壓製試體成錠狀



圖 3 壓製過程中碎裂試體



圖 4 研磨至設計厚度

### 三、結果與討論

#### 3.1 極化前性質

##### 3.1.1 相對介電常數 $\epsilon_r$

試體的相對介電常數與儲電能力有關，若極化前之試體的相對介電常數越高，代表儲電能力越好，反之若相對介電常數越低則代表試體在極化過程中的電流容易穿過試體，造成極化過程比較有電流極穿現象。圖 5 為極化前之爐石水泥壓電試體經過高溫熱處理(實線)及常溫處理(虛線)的相對介電常數，發現試體的相對介電常數均會隨著爐石含量的增加而上升，尤其以未經熱處理試體的變化較為明顯，且經過高溫處理的試體之相對介電常數會較常溫處理的試體的數值低。熱處理後的試體在爐石 0% 的相對介電常數為 53，添加 30% 爐石後的相對介電常數上升至 61，上升約 16%，顯示添加爐石有助於提高試體之儲電能力。

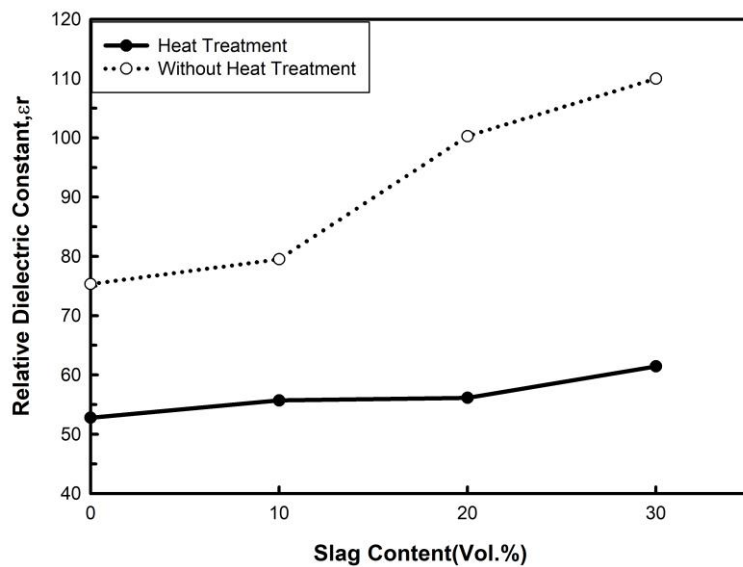


圖 5 壓電水泥試體極化前的相對介電常數  $\epsilon_r$

### 3.1.2 電阻率 $\rho$

電阻率為材料抵抗電流的能力，在極化前測量電阻的目的是探討試體是否會因電阻率大小影響試體極化過程通過的電流。通常電阻率越高，導電性就會越差，因此試體的電場極化效率也比較差，導致試體不容易極化。圖 6 為試體經過熱處理與常溫處理的電阻率比較，發現試體的電阻率均會隨著爐石含量的增加而下降，但熱處理後之試體在爐石含量 20% 以前的變化無常溫處理之試體明顯，且熱處理後的試體電阻率會較常溫處理試體高。有熱處理的試體在爐石 0% 時電阻率為 74.6  $k\Omega\cdot m$ ，添加 30% 爐石後的電阻率降低至 53.6  $k\Omega\cdot m$ ，下降了約 28.2%。結果顯示試體在極化前經過熱處理會使試體電阻率上升導致不容易極化，並且兩組試體在添加 30% 爐石時均有較低的電阻率，表示試體在添加 30% 爐石時會有較佳的極化效果。

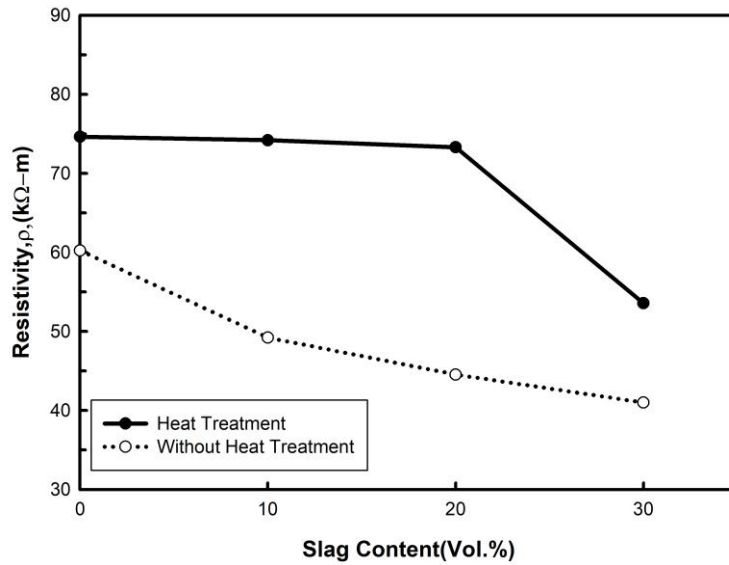


圖 6 極化前壓電水泥試體之電阻率  $\rho$

### 3.1.3 介電損失 D

介電損失可以在試體極化前用來判斷極化難易度的一個指標，數值愈高代表電流越容易穿過試體，使得試體的極化難度也會隨之提升。圖 7 為極化前之經熱處理試體(實線)與常溫處理試體(虛線)的介電損失比較，發現熱處理前之試體的介電損失會隨著爐石含量的增加而上升，但在熱處理後添加爐石對介電損失的影響並不明顯，且熱處理後試體的介電損失會比常溫處理之試體低。結果表示熱處理可降低試體極化的難度，且可以降低試體在添加爐石後對介電損失的影響，使試體更容易極化。

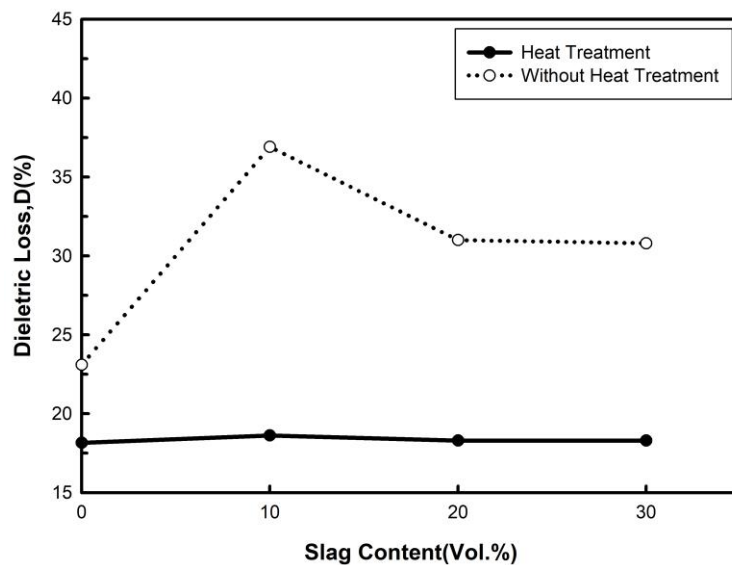


圖 7 極化前壓電水泥試體之介電常數 D

### 3.2 極化後性質

#### 3.2.1 壓電應變常數 $d_{33}$

壓電應變常數為試體在一外加電場下所產生的位移，此壓電性質為影響致動器與感測器性質的主要因素之一。圖 8 為試體極化後的壓電應變常數與齡期關係，壓電應變常數會隨著齡期而增加，到了 28 天之後  $d_{33}$  變的較無明顯變化。圖 9 為經熱處理添加不同含量爐石的壓電水泥在第 60 天時的壓電應變常數，與爐石 0% 比較，添加爐石均可使壓電水泥的壓電應變常數提升，且在添加 20% 爐石時會有最佳值。極化後的試體在爐石含量 0% 的壓電應變常數為 72.3 pC/N，在添加 20% 爐石時的壓電應變常數為 100.9 pC/N，上升了 39.59%，但在爐石含量為 30% 時數值會下降至 91.9 pC/N。表示試體添加爐石有助於提高感測器之靈敏度，其中以 20% 為最佳，過量則會導致  $d_{33}$  數值下降。

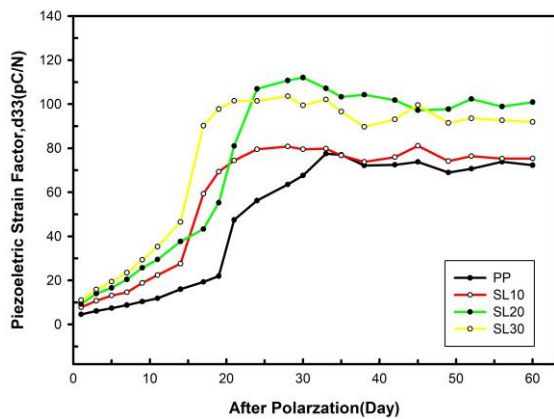


圖 8 壓電應變常數  $d_{33}$  齡期變化

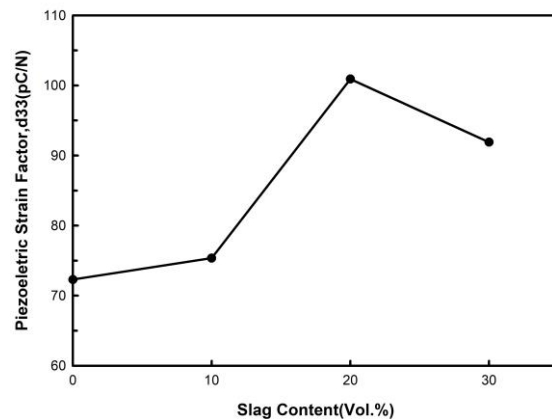


圖 9 爐石取代量與壓電應變常數  $d_{33}$

#### 3.2.2 相對介電常數 $\epsilon_r$

圖 10 為不同含量的爐石壓電水泥經過熱處理製程後，在第 60 天時的相對介電常數之比較，實驗發現，與爐石 0% 比較，添加爐石均可以使壓電水泥的相對介電常數上升，且在添加 20% 爐石時會有最佳值。爐石 0% 的相對介電常數為 284，添加 20% 爐石時的相對介電常數為 429 上升了 51.1%，但添加 30% 爐石時的相對介電常數會稍微下降到 407，表示試體添加爐石可以提高試體的儲電能力，在爐石 20% 時最佳，當爐石含量超過 20% 時， $\epsilon_r$  反而會降低，因此爐石添加不宜超過 20% 以上。

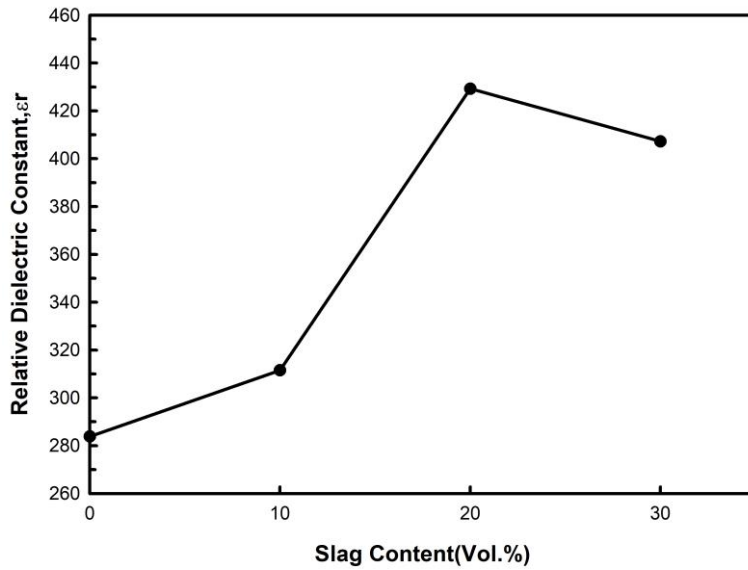


圖 10 爐石取代量與相對介電常數  $\epsilon_r$

### 3.2.3 壓電電壓常數 $g_{33}$

壓電電壓常數為試體在一外加力場下產生的電流與電壓，此壓電性質與壓電應變常數同為影響致動器與感測器的主要因素之一。圖 12 為經熱處理添加爐石的壓電試體在第 60 天時的壓電電壓常數，爐石含量 0% 至 20% 的壓電電壓常數值會降低，其減少量有限，但是在添加 30% 爐石時有快速的下降 ( $g_{33}=25.5$ )，與未添加爐石的試體 ( $g_{33}=28.8$ ) 相比下降了約 11.5%，顯示若在試體中添加過量的爐石會導致壓電電壓常數下降，進而影響感測器的靈敏度。

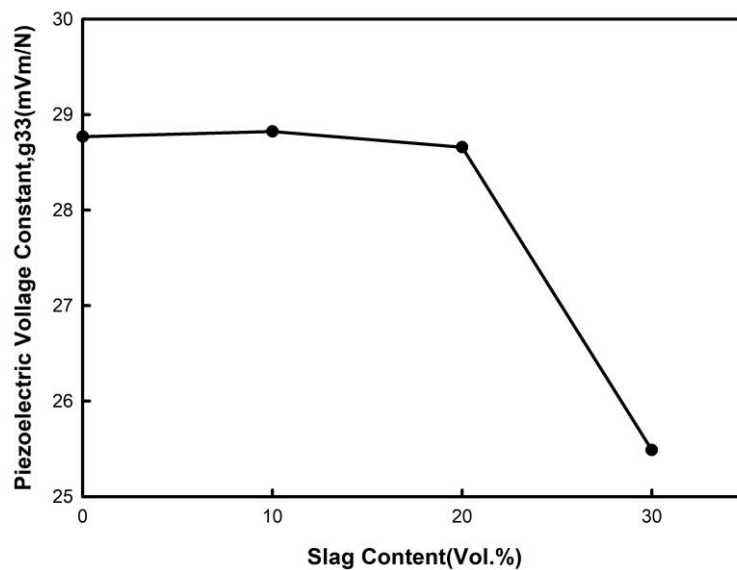


圖 12 爐石取代量與壓電電壓常數  $g_{33}$

### 3.2.4 阻抗頻譜

材料在不同頻率的電壓作用下產生的阻抗值，頻率與阻抗值的相對關係稱為阻抗頻譜，是由阻抗分析儀量測的。可以透過阻抗頻譜了解阻抗值、共振頻率與反共振頻率的位置、共振頻率的波峰強度來得知電性及極化程度。

圖 12~圖 15 是經熱處理後添加爐石的壓電水泥於極化成功後在頻率 0~1000 kHz 的阻抗值變化。發現阻抗值均會隨著齡期的增加而降低，在 0 天至第 7 天有較明顯的變化，7 天之後的阻抗變化逐漸趨緩。以齡期 56 天為例，在頻率 500kHz 時，爐石 0% 的阻抗值為 8.68kΩ、10% 為 7.08kΩ、20% 為 7.75kΩ、30% 為 6.19kΩ，發現阻抗值會隨爐石含量增加減少，但是在 20% 時的阻抗值會增加，顯示阻抗值變化與爐石含量的關聯性不大。此外，共振頻率與反共振頻率所產生的位置與範圍是固定不變的。

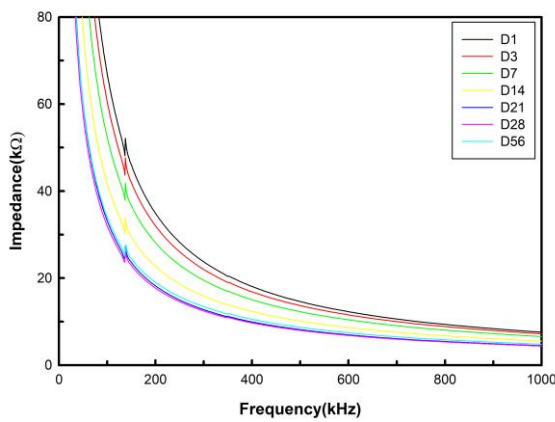


圖 12 壓電水泥(PP)之阻抗頻譜圖

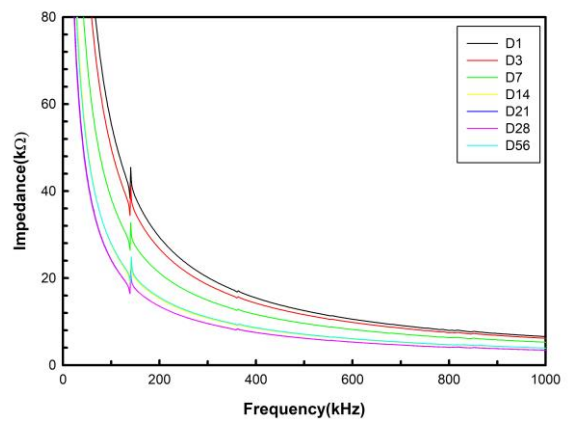


圖 13 壓電水泥(SL10)之阻抗頻譜圖

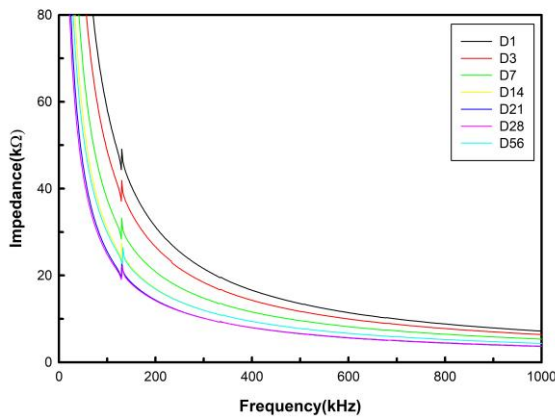


圖 14 壓電水泥(SL20)之阻抗頻譜圖

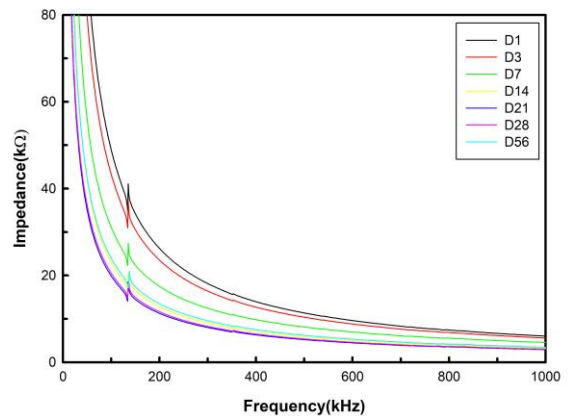


圖 15 壓電水泥(SL30)之阻抗頻譜圖

#### 四、結論

透過本研究探討熱處理對於以爐石取代水泥之壓電水泥在極化前、後性質，試驗結果歸納出以下結論：



1. 在極化前，熱處理可降低試體的介電損失，表示熱處理可以降低試體極化的難易度，達到更好的極化效率。
2. 在極化前，試體經過熱處理後的電阻率與相對介電常數的數值會較差，但添加爐石可降低試體的電阻率與提升試體的相對介電常數，其中以 30% 最為明顯，介電損失則無明顯變化。表示對熱處理後的試體而言，添加 30% 爐石可有利於試體的極化。
3. 在極化後，添加 20% 爐石的試體的壓電應變常數  $d_{33}$  與相對介電常數  $\epsilon_r$  均有最佳值，但在添加 30% 爐石時數值有下降的趨勢，表示於試體內添加適量的爐石有利於感測器的壓電性質，其中以 20% 為最佳。
4. 使用爐石取代水泥可以提升壓電水泥的性質，且在 0~1 MHz 的觀測頻率範圍內的阻抗值具有與齡期一致的規律性，表示以爐石取代水泥的壓電水泥作為壓電感測器具有相當的結構健康監測與檢測的潛力。

## 五、誌謝

感謝科技部 MOST 108-2221-E-992 -008 -MY3 贊助及中聯資源股份有限公司提供的水淬爐石粉，使本次實驗得以完成。

## 六、參考文獻

- [1] 陳郁雯 潘煌鏗 賴丁賜，添加氧化石墨烯對水泥壓電複合材料壓電性質的影響，台灣混凝土學會 2017 年混凝土工程研討會，Paper No.21，2017。
- [2] 葉仁豪，卜作嵐材料與極化電場對 0-3 型水泥壓電複合材料的影響，國立高雄應用科技大學碩士論文，2011。
- [3] 黃以仁，活性粉水泥壓電複合材料壓電性質，國立高雄應用科技大學碩士論文，2015。
- [4] 王琦貴 康家瑋 潘煌鏗，壓電水泥感測器製作與力電性質，台灣混凝土學會 2017 年混凝土工程研討會，Paper No.47，2017。
- [5] 林棟宏 潘煌鏗 林威任，PZT 級配對 0-3 型水泥壓電複合材料的性質影響，台灣混凝土學會 2017 年混凝土工程研討會，Paper No.59，2017。
- [6] 姜長庚，爐石與飛灰水泥壓電複合材料在不同養護天數與極化電場的壓電特性，國立高雄應用科技大學碩士論文，2013。
- [7] 葉仁豪 姜長庚 潘煌鏗 周建宏，添加爐石對 0-3 型水泥壓電複合材料壓電與介電性質的影響。台灣混凝土學會 2011 年混凝土工程研討會，Paper No. C-02
- [8] 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，2011。