

## 水泥壓電感測器的力電性質

### Electromechanical Properties of Piezoelectric Cement Sensors

吳勝筆<sup>1</sup> 潘煌鏗<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 高雄應用科技大學 碩士生, [a7497581@gmail.com.tw](mailto:a7497581@gmail.com.tw)

<sup>2</sup> 高雄應用科技大學 教授, [pam@kuas.edu.tw](mailto:pam@kuas.edu.tw)

#### 摘要

本研究探討水泥壓電感測器的載重與響應電壓關係，提供埋入式感測器應用在混凝土結構物受力時的力電關係依據。水泥壓電感測器是以鋇鈦酸鉛(PZT)壓電陶瓷和水泥各 50% 體積混合，經過 1.5kV/mm 電場極化製成並具有壓電性質。以 100N、200N 和 300N 載重及 1Hz、2Hz 和 4Hz 頻率進行載重試驗並擷取響應的輸出電壓，對照組為 PZT 壓電陶瓷感測器。實驗結果顯示，水泥壓電感測器與 PZT 壓電陶瓷感測器的電壓皆有隨著載重增加而上升的趨勢，但在不同頻率下，水泥壓電感測器的輸出電壓並沒有明顯成長趨勢。雖然水泥壓電感測器的輸出電壓小於 PZT 壓電陶瓷感測器，但仍可不必經由訊號放大器直接擷取電壓；且水泥壓電感測器在載重 200N 到 300N 下的輸出電壓與載重關係接近線性關係，故在較大載重時的輸出電壓會優於陶瓷壓電感測器；但在頻率增加時，水泥壓電感測器的響應電壓成長趨勢較小，顯示水泥壓電感測器適用於低頻振動的 RC 結構物。

**關鍵字：**壓電效應，水泥壓電感測器，結構監測、混凝土

#### Abstract

Electromechanical properties of piezoelectric cement sensors were explored to provide load –voltage relation that can apply to RC structural health monitoring. Cement sensors is composites of lead zirconate titanate (PZT) as the inclusion and cement as the matrix with equal volume fraction, and that was polarized by 1.5kV/mm electric field to induce piezoelectric properties. Three loads, 100N, 200N and 300N, corresponding to its frequency 1Hz, 2Hz and 4Hz in turn, are applied to cement sensors. The experimental data were compared with the counterpart of PZT ceramic sensor. Experimental results show that output voltage of cement sensor and PZT ceramic sensor increase with increasing loads. However, output voltage of cement sensor does not significantly grow trend as frequencies change. Voltage response for cement sensor is lower than that for PZT sensor at the same loading, but no amplifier is needed as cement sensor was applied to concrete structures. Voltage response of cement sensor is near linear in the range of 200N and 300N, and this leads to suitable for concrete structures in use, compared with PZT sensors. Due to low growth trend of voltage

response as frequencies increase, cement sensor displays superior properties for using RC structures with low frequency vibration.

**Keywords:** piezoelectric properties, cement sensor, structural monitoring, concrete

## 一、前言

台灣位處於地震活躍區，菲律賓海板塊與歐亞板塊交界上，菲律賓海板塊以每年平均 82mm 朝西北碰撞歐亞板塊，因此地震頻繁。地震強大的破壞能力，造成結構物的毀壞，進而影響到人類的財產以及生命危險。因此目前在許多結構物中常會裝設不同的感測器以達到危險預警的作用，目前結構物常見感測系統比如有光纖感測預警系統、下水道淹水預警系統、邊坡安全監測系統等等，應用許多不同現代化科技做為結構物受外力時的監測系統，而壓電原理的應用也是努力發展的重要一環。

壓電陶瓷是一種可以使電能與機械能互相轉換的特殊陶瓷材料，應用於土木結構物中，可以做為感測器(sensor)以及致動器(actuator)，已用於結構物監測及控制，Divsholi and Yang[1]以一般壓電陶瓷做為感測器及致動器原料，利用壓電阻抗法去監測結構物損傷，並建立一套結構物的損傷指標，Xu *et al* [2]也利用相同方式將一般壓電陶瓷感應器裝設於混凝土梁內進行裂縫監測，在臺灣有陳星宇[3]和林建輝[4]利用 PZT 壓電陶瓷做為感測器裝設於不同結構桿件內進行監測。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]，將壓電材料以三維(3D)方式均勻加入水泥的 0-3 型水泥壓電複合材料可以解決壓電陶瓷與混凝土材料相容性問題。

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。目前傳統壓電陶瓷應用於結構物內部作為監測與健康診斷已有相當多的試驗成果，但是 0-3 型水泥壓電複合材料應用於混凝土結構物監測與診斷研究仍持續進行中，本研究目的針對應用在混凝土結構的水泥壓電感測器，提供感測器的載重與輸出電壓關係，作為使用水泥壓電感測器時的參考。

## 二、實驗過程

### 2.1 材料準備與試體製作

由 0-3 型水泥壓電複合材料製成的水泥壓電感測器，是以水泥為基材與 PZT 壓電陶瓷為介質組成，兩者的體積各占 50%。水泥使用 I 型卜特蘭水泥，比重為 3.19；壓電介質為 PZT 燒結體，經研磨取粒徑 75~150 $\mu\text{m}$  粉末，比重為 7.9，PZT 的基本性質參見表 1。將水泥與 PZT 進行乾拌混合，利用 MTS 以 80 MPa 的壓應力壓製成試片，放入恆溫水槽以 90 $^{\circ}\text{C}$  水氣養護一天，完成水泥壓電感測器，簡稱 PP。

本研究的感測器(試片)有 PZT 與 PP 兩種，PZT(壓電陶瓷)的直徑 12mm 厚度 1.8mm，PP(水泥壓電複合材料)的直徑 15mm 厚度 2.0mm。

表 1 鋁鈦酸鉛基本性質(KA 型)

特性	代號	數值
壓電應變常數	$d_{33}(\times 10^{-12}\text{m/V})$	500
楊氏彈性係數	$E_{33}(\times 10^{-10}\text{N/m}^2)$	5.4
介電常數	$\epsilon_r (= \epsilon_{33}^T/\epsilon_0)$	2100
介電損失	$\tan\delta (\%)$	2.0

## 2.2 感測器製作

試片極化前先在 150°C 烘箱恆溫 30 分鐘，極化過程是在 150°C 環境以 1.5kV/mm 極化電場進行極化 40 分鐘。將極化完成的試片進行導線焊接，圖 1 和圖 2 分別是 PZT 感測器與 PP 感測器。載重試驗前，量測的感測器性質如表 2，其中 PZT 感測器的壓電應變常數  $d_{33}=418 \text{ pC/N}$ ，PP 感測器的  $d_{33}=83 \text{ pC/N}$ ；在 1kHz 時，PZT 與 PP 的相對介電常數  $\epsilon_r$  分別為 1902 和 366。

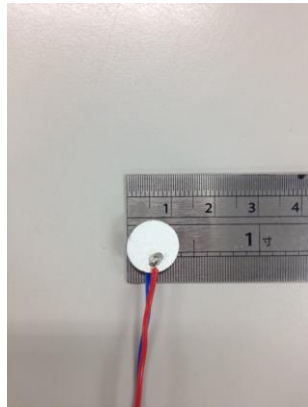


圖 1 PZT 感測器



圖 2 PP 感測器

表 2 感測器基本性質

感測器	電容C	電阻率 $\rho$	壓電應變常數 $d_{33}$	介電常數 $\epsilon_r$
PZT	1.06 nF	0.21 k $\Omega$ -m	418 pC/N	1902
PP	286.54 pF	39.56 k $\Omega$ -m	83 pC/N	366

## 2.3 施力載台設定

將完成接線的感測器表面塗佈熱熔膠，並裝入載具鋼模內以完成絕緣。載具鋼模置放於施力載台後，調整施力載台的出力載重及頻率，其中載重有 100N、200N 和 300N，載重頻率則有 1Hz、2Hz 與 3Hz 三種。進行力-電試驗時，因壓電感測器的輸出電壓為交流電，而擷取電壓的儀器只能擷取直流電，故壓電感測器必須接上橋式整流器以便於轉換成直流電，再連接上電壓

擷取器，施力載台與擷取器的整體裝置如圖 3。

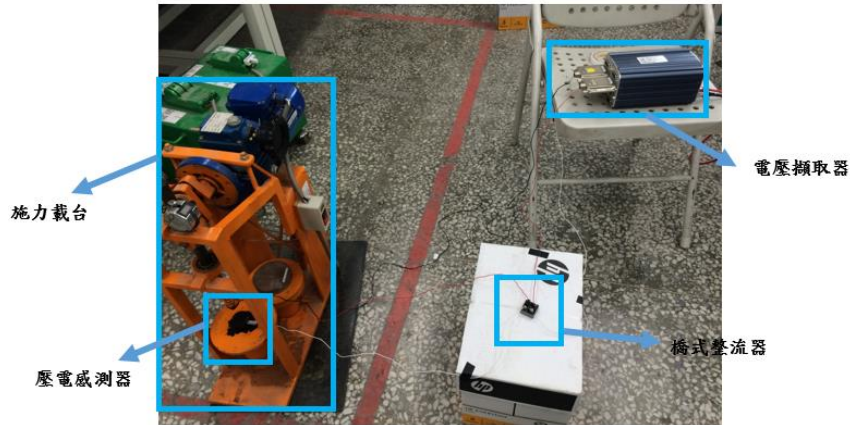


圖 3 施力載台與擷取器設置

### 三、結果與討論

#### 3.1 載重與電壓

在施力載台進行力-電關係試驗時，圖 4 是以 1Hz 施力 300N 的載重頻率關係，明顯看出載重為脈衝型式。PZT 與 PP 感測器承受 1Hz 載重 100N 產生的響應電壓分別記錄在圖 5 和圖 6，這兩種感測器受載重作用時的電壓輸出都是即時的，即得知當感測器受力時電壓也瞬間隨之輸出，這代表兩種感測器對於施力時的靈敏度都是相當良好的。以 1Hz 作用 100N 在感測器時，PZT 的平均輸出電壓是 0.683V，而 PP 是 0.155V，雖然 PP 感測器的輸出電壓只有 PZT 感測器的 23%，但是仍然直接可以用一般的擷取器量測出。

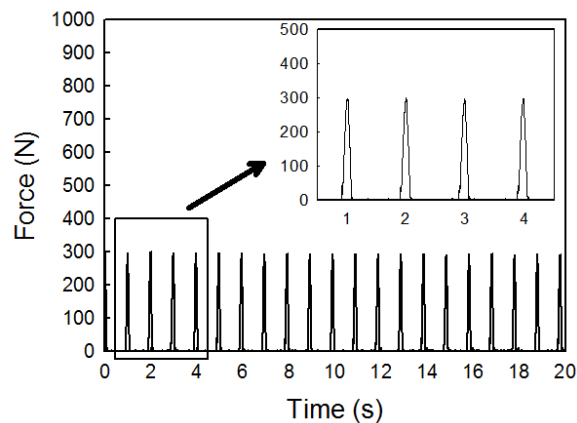


圖 4 感測器的載重與時間關係

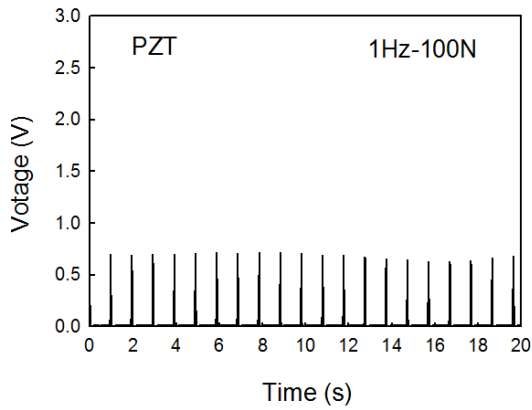


圖 5 PZT 感測器在 1Hz 及 100N 的電壓

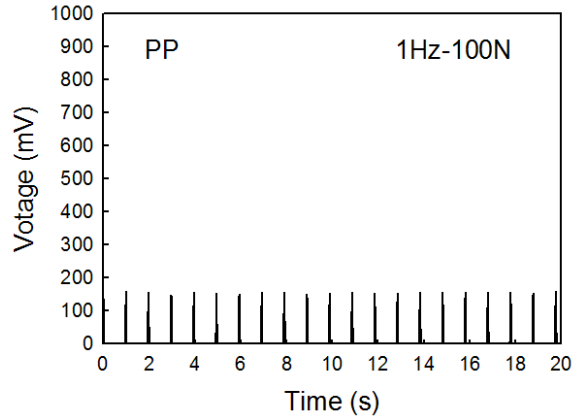


圖 6 PP 感測器電壓在 1Hz 及 100N 的電壓

當以 1Hz 的載重增加至 200N 和 300 時，PZT 感測器的輸出電壓如圖 7 和圖 8，平均的輸出電壓分別是 1.247V 與 1.729V，比較圖 5、圖 7 和圖 8，發現 PZT 感測器在 1Hz 作用的輸出電壓與載重關係約成線性關係。圖 9 和圖 10 是 PP 感測器在 1Hz 載重 200N 和 300N 的響應電壓，其值分別是 0.518V 和 0.672V，比較圖 6、圖 9 和圖 10，發現 PP 感測器在 1Hz 作用的輸出電壓與載重為非線性關係。這兩種壓電感測器皆有載重越大，其響應的電壓也隨之增加現象。

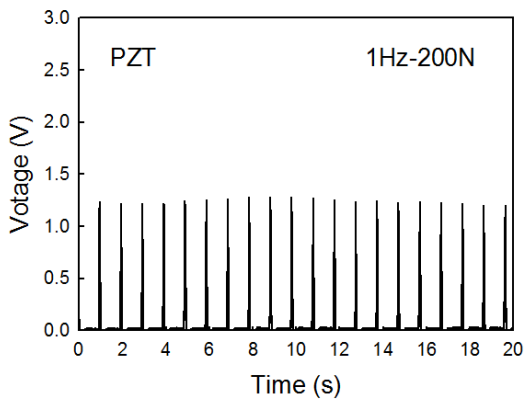


圖 7 PZT 感測器在 1Hz 及 200N 的電壓

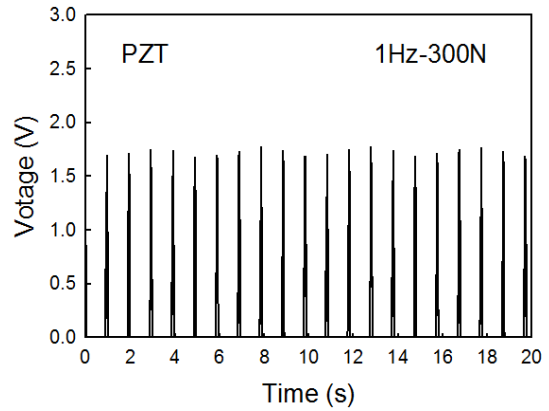


圖 8 PZT 感測器在 1Hz 及 300N 的電壓

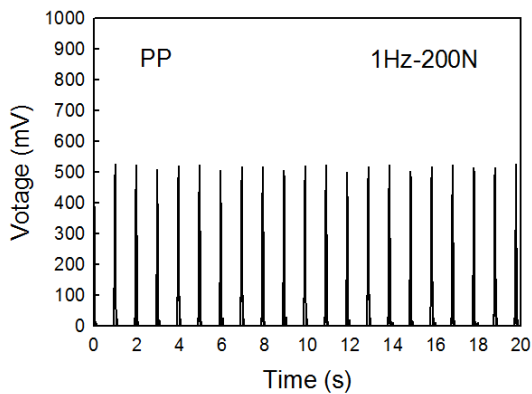


圖 9 PP 感測器在 1Hz 及 200N 的電壓

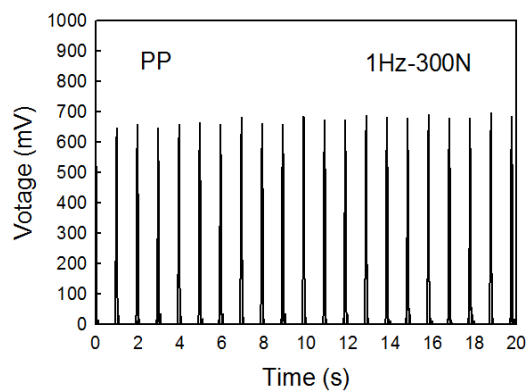


圖 10 PP 感測器在 1Hz 及 300N 的電壓

當載重頻率由 1Hz 增加到 2Hz 與 4Hz 時，載重與響應的輸出電壓峰值關係繪製在圖 11，可以看出在相同頻率時，施力增加時電壓有增加的趨勢。PZT 感測器在 1Hz 時，載重由 100N 增加一倍到 200N，其相對的電壓也是近乎增加 1 倍的電壓，幾乎呈線性關係；但當頻率為 2Hz 或 4Hz 時，電壓增長情形開始隨載重有逐漸呈現非線性增加而成長，可見 PZT 感測器對於頻率的靈敏度是相當高的，1Hz 的低頻率載重與較高頻率 2Hz 及 4Hz 的載重相比，低頻率載重的電壓成長趨勢相對穩定。

PP 感測器在頻率 1Hz 到 4Hz，載重由 100N 到 300N 所響應的電壓發現(圖 11)，在載重 200N 到 300N 的電壓成長趨勢約有線性增加關係，這是因為 PP 感測器相對於 PZT 感測器釋放電壓較小，較易受外來環境的影響，但是當外載重變大後的輸出電壓就會相對穩定，所以適用於土木結構物承受較大外力之情況，加上 PP 感測器有添加水泥會比 PZT 感測器對於土木結構物相容性來的好。

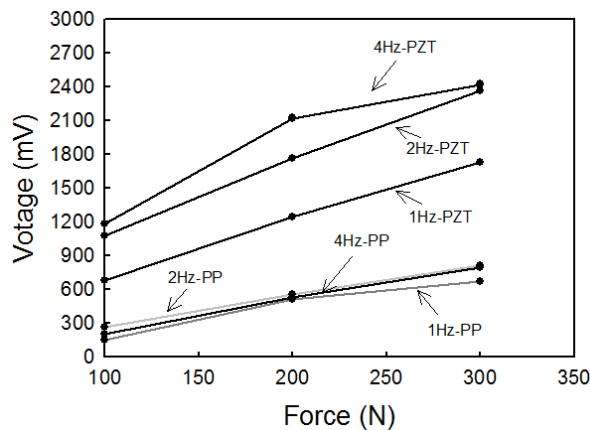


圖 11 感測器載重與輸出電壓關係

### 3.2 頻率與電壓

關於載重頻率對感測器響應輸出電壓，圖 12~圖 13 是 PZT 感測器受 100N 載重在 2Hz 及 4Hz 時的輸出電壓變化，觀察圖 5、圖 12 和圖 13 發現，當載重頻率逐漸增加時，感測器的響應電壓隨著載重時間有波動現象，輸出電壓不是定數，尤其在 4Hz 時整體輸出電壓的波動最為明顯，有可能是感測器變位產生的對應電壓在較大載重頻率時有干擾現象，造成輸出電壓有波動情況。在載重 100N 時，載重頻率 2Hz 與 4Hz 的平均輸出電壓分別為 1.074V 和 1.181V，平均輸出電壓的增量不大；繼續檢視圖 13 的輸出電壓，4Hz 的輸出電壓在 0.9V~1.46V 範圍波動，顯示輸出電壓彼此的干擾影響很大。

圖 14 和圖 15 是 PP 感測器在 100N 載重的 2Hz 與 4Hz 的響應輸出電壓，當載重頻率增加時，在圖 15 的 4Hz 頻率的電壓波動情形也是與 PZT 感測器(圖 12~圖 13)一樣，有明顯的電壓輸出波動現象。因為 PP 感測器加入水泥的關係，受力產生的響應電壓相較於 PZT 感應器會來得低，載重 100N 之 2Hz 與 4Hz 頻率的平均輸出電壓分別為 0.264V 和 0.202V，4Hz 輸出電壓(圖 15)



彼此的干擾比 2Hz(圖 14)更嚴重，使用時需要留意。

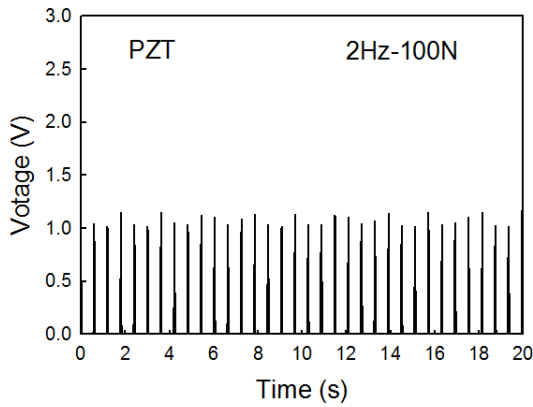


圖 12 PZT 感測器在 2Hz 及 100N 的電壓

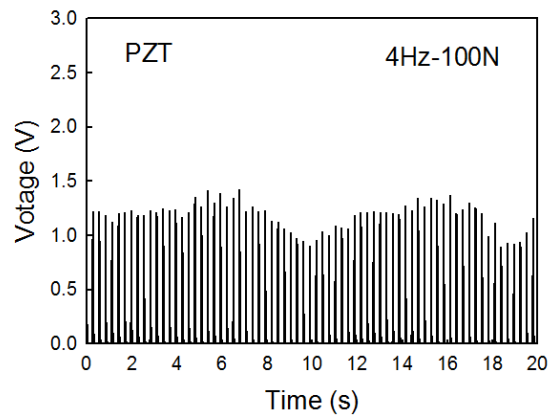


圖 13 PZT 感測器在 4Hz 及 100N 的電壓

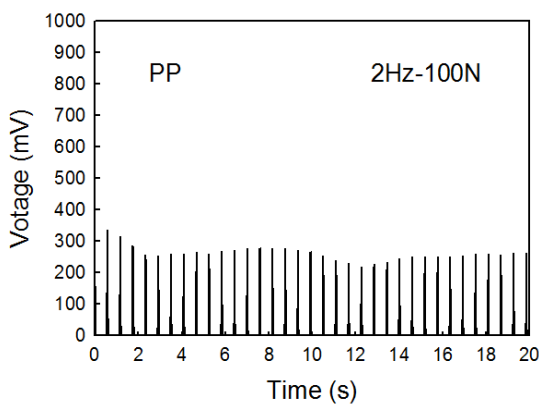


圖 14 PP 感測器在 2Hz 及 100N 的電壓

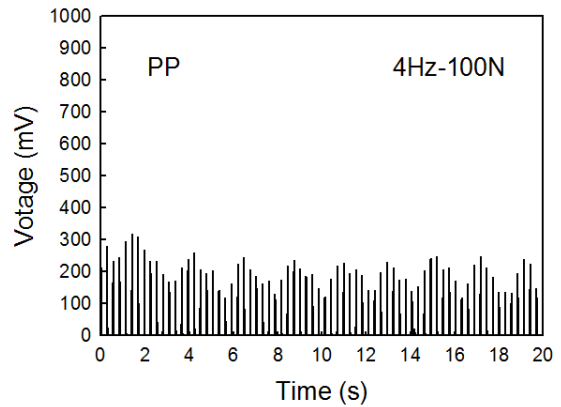


圖 15 PP 感測器在 4Hz 及 100N 的電壓

頻率與載重對平均輸出電壓的影響在圖 16，可以發現兩種感測器響應電壓增加倍數不等同於頻率增加倍數，但很明顯的 PZT 感測器受頻率的影響比 PP 感測器還大，即電壓的增加幅度較為明顯；同時，PZT 與 PP 感測器在 2Hz 到 4Hz 的電壓增加幅度明顯比 1Hz 到 2Hz 來的緩和。

在相同載重下時檢視 PZT 與 PP 感測器，當載重頻率由 2Hz 增加到 4Hz 時，平均輸出電壓因受輸出電壓的互相干擾而抵銷或強化，電壓輸出增量不大，甚至增量有負值，尤其 PP 感測器的影響更嚴重。PZT 與 PP 感測器的電壓抵銷或強化的干擾，與施加的載重型態有關，本研究的載重型式是脈衝型式且固定頻率(例如圖 4)，若外載重頻率為不規則型態或是持續增量載重，這些電壓振幅干擾的影響將會減少。雖然如此，水泥壓電複合材料(PP)與 PZT 材料相同，都有受力(或位移)產生電壓變化(感測器用途)或施加電壓產生微變位(促動器用途)功能，可使用做為結構物監測或檢測用途。

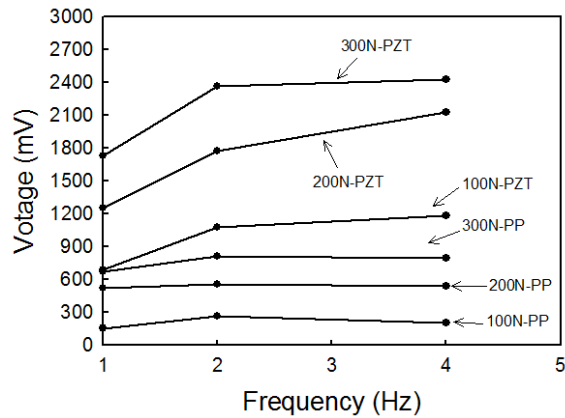


圖 16 感測器頻率與輸出電壓關係

#### 四、結論

PZT 感測器是 100%PZT 壓電陶瓷製成，而水泥壓電複合材料(PP 感測器)為各 50%體積的水泥和 PZT 壓電陶瓷組成的，這兩者感測器受 1Hz、2Hz、4Hz 頻率及 100N、200N、300N 脈衝載重作用，經擷取響應的輸出電壓，結果歸納如下：

1. PP 感測器與 PZT 壓電陶瓷類似，在施力瞬間的響應電壓也隨之輸出，表示有良好的載重靈敏度，且具有施力增加產生響應電壓增加的趨勢。
2. 在相同頻率下，PP 感測器會隨著載重的增加，輸出的電壓也呈線性方式增加。
3. 在相同載重下，隨著頻率增加，PP 感測器的電壓成長趨勢較不明顯，顯示 PP 感測器適用於低頻振動的 RC 結構物。
4. 在脈衝載重作用下，PP 感測器和 PZT 感測器的響應電壓會互相干擾，造成電壓的輸出值有波動情形，PP 感測器所受的影響更明顯。
5. PP 感測器在 200N 到 300N 的響應電壓與載重近乎成正比，所以在較大載重的 PP 感測器的電壓反應會比 PZT 感測器好。

#### 參考文獻

- [1] Behador Sabet Divsholi, and Yaowen Yang, "Combined Embedded and Surface-Bonded Piezoelectric Transducers for Monitoring of Concrete Structures," NDT&E International, Vol. 65, pp. 28-34 (2014).
- [2] 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).
- [3] 陳星宇，廖文義，「壓電智能骨材於結構損傷評估之應用」，國立台北科技大學，碩士論文 (2009)。
- [4] 林建輝，廖文義，「智能骨材於結構損傷檢測之應用」，國立台北科技大學，碩士論文 (2009)。



- [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).