

## 壓電水泥感測器製作與力電性質

### Manufacturing and Force-Voltage Relations of Piezoelectric Cement Sensors

王琦貴<sup>1</sup> 康家瑋<sup>2</sup> 潘煌鏗<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 高雄應用科技大學土木工程系 學士, [yunjaetvxq07@gmail.com](mailto:yunjaetvxq07@gmail.com)

<sup>2</sup> 高雄應用科技大學土木工程系 碩士生, [adghklj77250@gmail.com](mailto:adghklj77250@gmail.com)

<sup>3</sup> 高雄應用科技大學土木工程系 教授, [pam@kuas.edu.tw](mailto:pam@kuas.edu.tw)

#### 摘要

本研究將鈦酸鉛(PZT)及水泥混合製成水泥壓電複合材料，經過極化的試體具有壓電特性，可製作成壓電水泥感測器，並量測施力與輸出電壓關係。壓電水泥試體以PZT為介質和水泥為基材，體積含量各為50%，以壓力壓製成試體；經電場極化，待壓電水泥之壓電性質穩定後(極化後齡期90天)，以導電銀膠作為串接壓電水泥與銅膠帶之黏著劑與導電介質；選用瀝青作為防水材料，再以水灰比為0.36的水泥漿將感測器封裝成2.5cm的正立方體。壓電水泥感測器包含1個(無串聯)、多個串聯壓電水泥以製成5種壓電水泥感測器，經施加300N與400N脈衝載重得到施力與輸出電壓之力電關係。實驗結果顯示，壓電水泥感測器在相同頻率下皆有荷載增加會提高輸出電壓的趨勢；感測器中的串聯個數會影響輸出電壓，串聯的試體個數越多，則輸出電壓會越大。在載重頻率1Hz增加到2Hz時，輸出電壓值增加不多；當頻率增為4Hz時，則電壓值明顯大幅增加，然而4Hz載重時，輸出電壓有干擾現象，顯示具高敏感性，可以使用較高頻率資料擷取器克服，顯示壓電水泥感測器適用於低頻且較大荷載的RC結構物。

**關鍵字：**壓電水泥，感測器，結構健康檢測，輸出電壓，封裝

#### 一、前言

目前結構健康檢測(structural health monitoring)的壓電感測器常使用 100%PZT 壓電陶瓷；也有將壓電陶瓷片(例如 PZT 壓電陶瓷薄片)以砂漿或水泥包裹的壓電單元體，屬於嵌入式壓電感測器(又稱智能骨材, smart aggregate, 如圖 1)。從 2010 年以來，以傳統壓電材料製成的感測器和致動器取代電阻式應變片(strain gauge)做為結構桿件健康監測、或是判斷材料力學行為及損傷的研究，已有許多文獻發表。這些研究成果，是將壓電感測器和致動器以表面黏貼或是埋入材料內部方式對感測器進行輸出電壓、導電率、阻抗或電阻分析，而這些壓電感測器和致動器是以傳統的壓電陶瓷或是壓電高分子材料為主要成分製成的。例如，Xu [1]在 2010 年根據 PZT 壓電陶瓷感測器的阻抗分析檢測結構損傷，將壓電感測器分別嵌入與黏貼於試體表面，並預先在試體上切割出不同深度的裂縫，利用阻抗譜辨別試體的損傷程度，並進行不同的頻率範圍的阻抗變化，得到試

體的破壞程度。

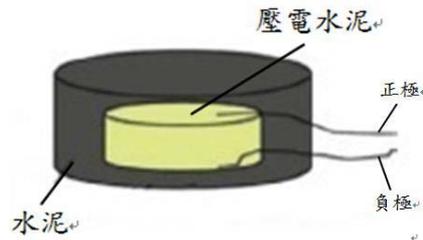


圖1 智能骨材

壓電感測器對於監測與檢測結構物有許多幫助，但是壓電感測器使用在鋼筋混凝土構造時，有時會因壓電材料與混凝土結構材料的界面變形有協調性問題，或所監測的結構因混凝土的熱漲冷縮等因素干擾而導致監測誤判，無法擷取或適當反應混凝土構件的內部應力或損傷[2,3]，使得感測器的敏感度或相容性不佳，為了使兩者達到良好的諧和性，逐漸發出 0-3 型水泥壓電複合材料製成的壓電水泥(piezoelectric cement)。壓電水泥做為 RC 結構物監控與智慧建築感測元件時，因已改善壓電陶瓷感測器的缺點，在嵌入混凝土構件時，可於受到反覆載重或變動載重時有電壓輸出，能獲得混凝土構件受外載重(或局部變位)作用的應力與應變反應，而具有監控優越性。

雖然，壓電水泥已能夠直接使用在混凝土構件表面或埋入結構體內部做為結構健康監測和診斷之用(圖 2)，但是壓電水泥感測器(PP)的輸出電壓約為 PZT 壓電陶瓷感測器的 1/4~1/2(圖 3)，約 300 mV~2.4 V，仍有改善空間。如何提高壓電水泥受載重時電壓的輸出是目前研究壓電水泥感測器重要的課題。



圖2 壓電水泥嵌入混凝土構件

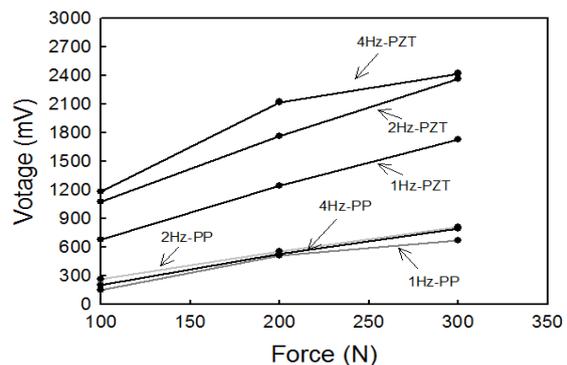


圖3 感測器輸出電壓與載重關係[4]

為了能夠提高壓電水泥的輸出電壓，本研究以水泥及鋇鈦酸鉛(PZT)壓電陶瓷混合製成的壓電水泥(一種薄圓狀的感測器，PP 感測器)串聯，應用串聯能讓電壓增加的原理，克服輸出電壓較小的問題。感測器的製程以體積含量 50%的水泥及 PZT 介質混合壓製成形，經 24 小時的養護與溫度處理後，進行極化，使試體具有壓電；以銅膠帶黏結單一感測器及串聯數個試片(串聯 2、3、4、5 個試片)，將單一感測器和串聯的 4 種感測器放在施力載台上施加荷載得到壓電水泥感測器的力電行為，比較串聯前後與串聯各

數造成的差異(力電性質)。

## 二、實驗計畫

### 2-1 試體材料與製作

壓電水泥以第 I 型卜特蘭水泥作為膠結材，鉛鈦酸鉛(PZT)為介質，PZT 經過搗碎研磨變成粉狀顆粒，用標準篩控制 PZT 顆粒大小，將停留在  $75\mu\text{m}\sim 150\mu\text{m}$  的 PZT 顆粒作為介質。PZT 介質與水泥膠結材的介質的體積含量為 50%，混合壓製而成，在  $90^\circ\text{C}$  的恆溫循環水槽(如圖 4)進行養護 24 小時，使試體固化。再以研磨拋光機(如圖 5)對試體進行研磨，經過研磨拋光成 2mm 厚度的薄片。



圖4 試體於恆溫循環水槽養護



圖5 研磨拋光機

### 2-2 溫度處理與電極製作

養護研磨後，以高溫爐進行  $140^\circ\text{C}$  的前溫度處理，持續恆溫 40 分鐘。再以導電銀膠 SYP-4570 均勻塗在試體表面作為極化電極，並放入  $150^\circ\text{C}$  烘箱烘烤 30 分鐘，使銀膠熟化能附著於試體表面，即完成電極的試體，繼續再進行  $140^\circ\text{C}$  的後處理溫度。

### 2-3 極化與壓電性質

將試體放入  $150^\circ\text{C}$  的矽油槽內，以  $1.5\text{ kV/mm}$  極化電場極化 40 分鐘，極化過程要遵守極化的 SOP 流程，避免電流擊穿試體造成試體極化失敗而無法獲得壓電效應。試體極化成功後取出，置於室溫冷卻，在溫度  $23^\circ\text{C}$  和溼度 50% 的環境以壓電應變常數量測儀(圖 6)和阻抗分析儀(圖 7)進行壓電性質量測，壓電性質包括相對介電常數  $\epsilon_r$ 、壓電應變常數  $d_{33}$  與機電耦合係數  $K_t$ 。

### 2-4 串接與封裝

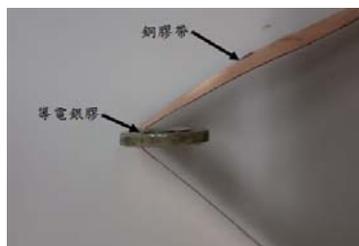
壓電水泥於極化後 90 天壓電性質穩定，此時可用來製做壓電水泥感測器。以導電銀膠 SYP-70A 作為串接壓電水泥與銅膠帶之黏著劑與導電介質(如圖 8)，確定黏著穩固後於通風處放置 1 天(銀膠熟化)。以瀝青做為防水材，包覆感測器前端(圖 9)，以利封裝時防水。



圖6 壓電應變常數量測儀



圖7 阻抗分析儀



(a) 單片無串聯



(b) 多片串聯

圖8 導電銀膠串接

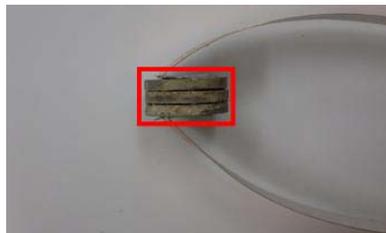


圖9 紅框為瀝青包覆處

將已有防水的壓電水泥感測器包覆水泥漿以封裝，使用水灰比 0.36 的水泥漿[5]，將水泥漿分兩層灌入專用鋼模，以微型震動器震動水泥漿，使之均勻緻密，而後用橡皮槌敲打，將空氣敲出，將表面以鏟刀刮平，置於室溫 24 小時後拆模，即完成感測器的封裝(圖 10)，壓電水泥感測器是邊長 2.5cm 正立方體。



圖 10 壓電水泥感測器成品

## 2-5 力電行為

當壓電水泥的壓電性質到達穩定期，將壓電水泥感測器分別置於自製之可調式施力載台(圖 11)，對感應器施加頻率 1Hz、2Hz 和 4Hz 的動態荷重(300N、400N)，並以資料擷取裝置紀錄加載時間  $t$  和輸出電壓  $V$ ，分析電壓與荷重關係。

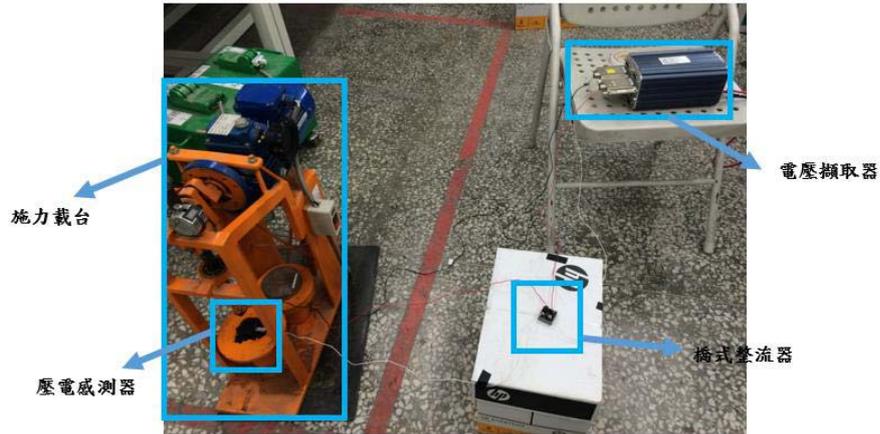


圖 11 施力載台與擷取器設置

## 三、結果與討論

### 3-1 壓電性質

進行感測器力電性質試驗前，需先確定壓電水泥感測器的壓電性質是否已達到穩定齡期，所以在各項試驗前必須確保 0-3 型壓電水泥感測器壓電性質是否已達到穩定。本研究的壓電性質有電容值  $C$ 、介電損失  $D$ 、電阻率  $\rho$ 、相對介電常數  $\epsilon_r$ 、壓電應變常數  $d_{33}$  與機電耦合係數  $K_t$ ，量測環境控制於溫度  $23^\circ\text{C}$  和溼度 50%。表 1 為壓電水泥感測器 (PP) 於力電性質試驗前的基本電性與壓電性質(極化後齡期 90 天)。

表 1 PP 基本電性與壓電性質

試體	電容 $C$ (pF)	介電損失 $D$	電阻率 $\rho$ ( $\text{k}\Omega \cdot \text{m}$ )	壓電應變常數 $d_{33}$ (pC/N)	介電常數 $\epsilon_r$	機電耦合係數 $K_t$ (%)
PP	483	0.83	30.60	107	521	13.19

### 3-2 力電性質

本實驗有 5 種壓電水泥感測器(無串聯、串聯 2、3、4、5 個 PP)、2 種荷載(300N、400N) 及 3 種載重頻率(1Hz、2 Hz、4 Hz)，其代號規則為：

- (1) PP(壓電水泥試體)串聯個數：PP-個數。
- (2) 載重頻率：-頻率 Hz。

(3) 荷載：-荷載N。

例如實驗條件為無串聯(PP 個數為 1)、荷載 300N 與載重頻率 1Hz，則代號為 PP1 1Hz-300N。

本實驗之資料擷取為一秒 5 萬點。PP1 感測器受到 300N 的荷載與載重頻率 1Hz 時，如圖 12，觀察 0 秒~10 秒的電壓反應，感測器受到荷載(紅色實線)作用時，電壓(藍色實線)也隨之輸出，表示感測器對施加荷載的靈敏度是相當高的。將每個 PP1 感測器的電壓峰值平均(圖 13)，可得 PP1 感測器的平均輸出電壓為 60mV，雖然輸出的電壓不大，但已可不必經由訊號放大器擷取訊號[6]。

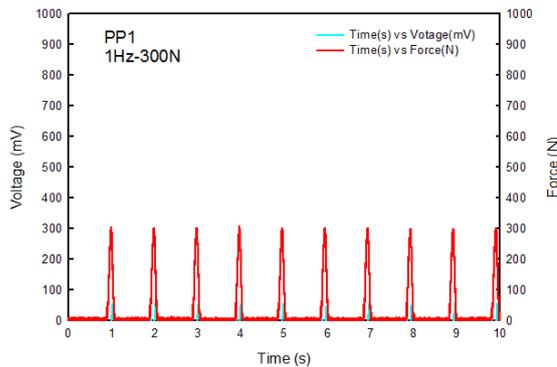


圖12 PP1感測器電壓與力量關係

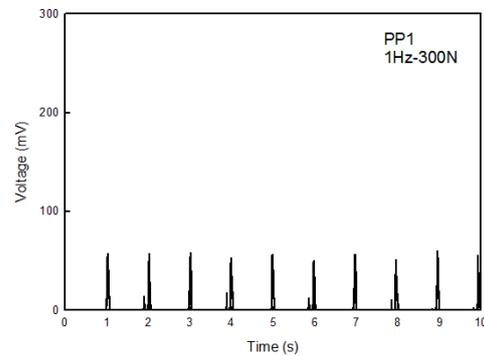


圖13 PP1感測器於1Hz與300N之電壓輸出

以固定頻率 1Hz 探討荷載影響，由表 2 得知，5 種 PP 感測器在相同頻率下皆有荷載增加輸出電壓也隨之增加的趨勢，且可知 2Hz 和 4Hz 也有相同情形。圖 14 除了呈現在相同頻率(1Hz)時，荷載越大輸出電壓也會增加之外，也可看出在相同頻率與荷載的情況下，感測器中 PP 試體的串聯個數會影響輸出電壓，串聯的試體個數越多，則會輸出越大的電壓，這表示串聯帶來更大的電壓輸出效應，效果良好。PP1 感測器與 PP2 感測器比較，雖然電壓增加，但幅度不大，直到 PP3、PP4、PP5 電壓才明顯的大幅度上升，由此可知，串聯 3 個以上的 PP 試體做成的感測器效果較顯著，適合應用於混凝土構件表面或埋入結構體內部做為結構健康監測和診斷。

表2 感測器在不同荷載及頻率的平均輸出電壓(單位：mV)

	PP1			PP2			PP3			PP4			PP5		
	1Hz	2 Hz	4 Hz												
300N	60	82	176	71	116	255	131	175	511	224	299	610	274	332	861
400N	70	100	279	77	141	411	166	215	565	235	318	760	309	344	1323

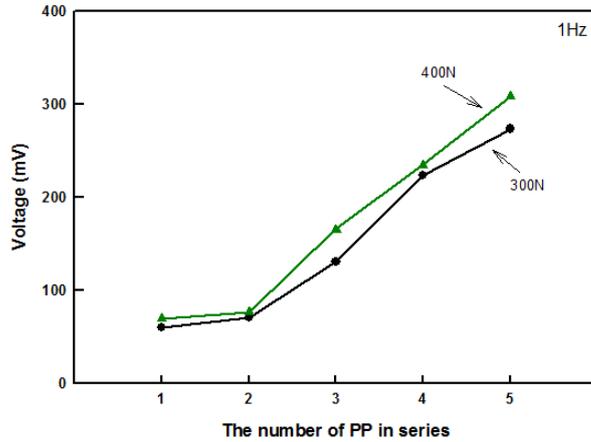


圖14 5種感測器於1Hz之荷載與輸出電壓關係

以固定荷載改變頻率探討，觀察圖13、圖15及圖16得知，PP1感測器於荷載300N時，當頻率由1Hz增加至2Hz與4Hz，感測器的電壓輸出有明顯波動，圖17、圖18和圖19為PP1感測器於荷載400N時，觀察可知也有相同情況，不只PP1感測器，對比其他4種感測器也有一樣的現象，所以頻率對輸出電壓的干擾影響很大，且於較高頻(4Hz)時，電壓受到更大影響，但在2Hz較為平緩，這顯示壓電水泥感測器具有高度敏感特性，能夠及時反應結構物行為。

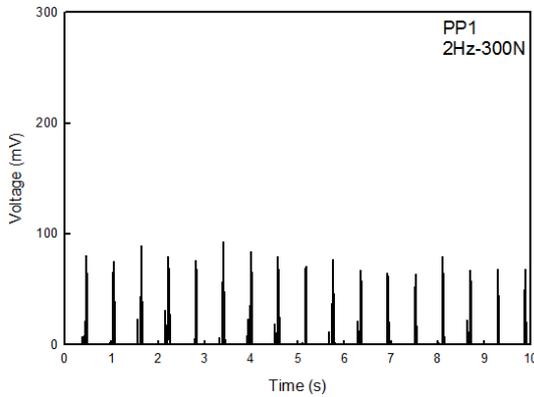


圖15 PP1感測器電壓輸出(2Hz與300N)

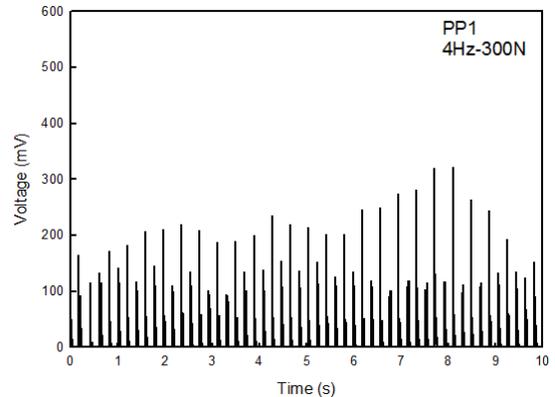


圖16 PP1感測器電壓輸出(4Hz與300N)

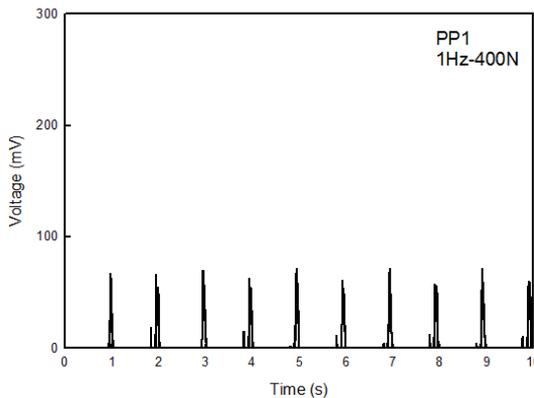


圖17 PP1感測器電壓輸出(1Hz與400N)

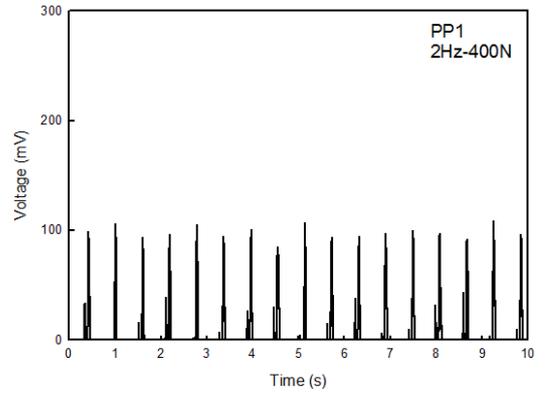


圖18 PP1感測器電壓輸出(2Hz與400N)

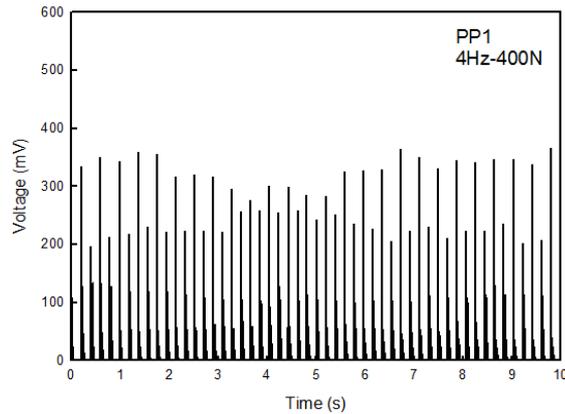


圖19 PP1感測器電壓輸出(4Hz與400N)

圖 20 與表 2 可看出，感測器在頻率 1Hz 增加到 2Hz 時輸出的電壓，相較頻率 2Hz 增加到 4Hz 時的電壓明顯增加不多，例如 PP1 感測器在荷載 300N (PP1-300N)時，頻率 1Hz 的輸出電壓為 60mV，2Hz 的輸出電壓為 82mV，4Hz 的輸出電壓為 176mV，1Hz 至 2Hz 的輸出電壓增加 36.7%，而 2Hz 至 4Hz 的輸出電壓增加 114.6%，此現象顯示本研究之 PP 感測器以串聯能夠提高輸出電壓。

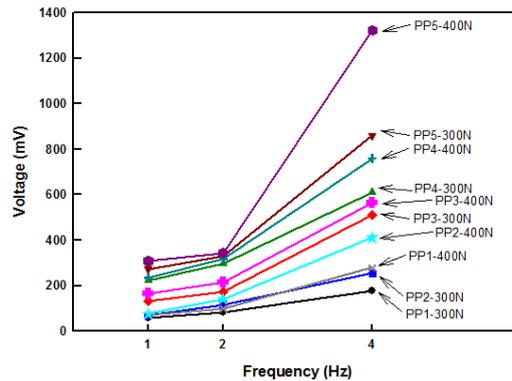


圖20 感測器在不同頻率之電壓輸出

圖 21 與表 3 中，頻率 2Hz 增至 4Hz 時，每種感測器的電壓輸出皆超過 1 倍，其中又以 PP5 感測器在荷載 400N 時增加最多，從 344mV 增至 1323mV，增加接近 3 倍。圖 21 顯示，每種感測器輸出電壓由大至小的條件依序為：4Hz-400N、4Hz-300N、2Hz-400N、2Hz-300N、1Hz-400N、1Hz-300N，綜合以上結果，若想達到高電壓輸出的效果，必須有感測器串聯的 PP 個數多、高頻(4Hz)與荷載大的條件。

表3 感測器在不同荷載及頻率的平均輸出電壓增加百分比

	PP1		PP2		PP3		PP4		PP5	
	1Hz→2Hz	2Hz→4Hz								
300N	36.7%	114.6%	63.4%	119.8%	33.6%	192.0%	33.5%	104.0%	21.2%	159.3%
400N	42.9%	179.0%	83.1%	191.5%	29.5%	162.8%	35.3%	139.0%	11.3%	284.6%

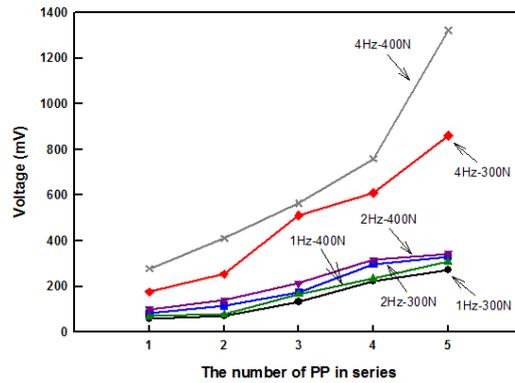


圖21 5種感測器於不同荷載與頻率之電壓輸出

#### 四、結論

以 1Hz、2Hz、4Hz 頻率與荷載 300N、400N 施加於無串聯(1 個 PP)和串聯 2~5 個 PP 之壓電水泥感測器(共 5 種)，探討荷載頻率及荷載大小對輸出電壓(力電性質)的影響，分析比較後，歸納出以下結果：

1. 已成功製作壓電水泥感測器，具有高敏感度及高輸出電壓，未來能夠做為鋼筋混凝土結構物的結構健康檢測和監測用。
2. 以一片壓電水泥製成的 PP1 感測器，雖然輸出的平均電壓不大，以一般電壓擷取器即可量測。
3. 在相同頻率下，5 種 PP 感測器皆有輸出電壓會隨荷載增加而增加的趨勢，且感測器中 PP 試體的串聯個數會影響輸出電壓，串聯的試體個數越多，則會輸出越大的電壓，顯示串聯帶來更大的電壓輸出效應，效果良好。
4. 壓電水泥感測器在頻率 1Hz 增加到 2Hz 時輸出的電壓，相較頻率 2Hz 增加到 4Hz 時的電壓明顯增加不多，顯示壓電水泥感測器對較高頻率改變的感測靈敏度良好。
5. 若想達到高電壓輸出的效果，必須串聯多數個壓電水泥試片，且高頻(4Hz)與較大的荷載條件也能夠增加輸出電壓。

#### 五、參考文獻

- [1] XU, D., Cheng, X., Huang, S. and Jiang, M., "Identifying Technology for Structural Damage Based on the Impedance Analysis of Piezoelectric Sensor," Construction and Building Materials 24, pp. 2522-2527, 2010.
- [2] 張東、吳科如、李宗津，2-2 型水泥基壓電機敏複合材料的研製，壓電與聲光，第 24 卷，第 3 期，第 217-231 頁，2002。

- [3] 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，第 5 卷，第 2 期，第 141-146 頁，2002。
- [4] 吳勝筆，潘煌鏗，水泥壓電感測器的力電性質，TCI 2015 年混凝土工程研討會，編號 D1, 12 月 3~4 日，2015。
- [5] 吳昱璇，壓電水泥感測器製作與在混凝土構件力電關係，高雄應用科技大學碩士論文，2016。
- [6] 吳勝筆，壓電水泥感測器應用於 RC 梁柱接頭即時監測，高雄應用科技大學碩士論文，2016。