

壓電陶瓷含量對水泥壓電複合材料壓電與力電性質的影響

Volume Fraction of Piezoelectric Inclusions on Piezoelectric and Electromechanical Properties of Cement Piezoelectric Composites

蘇逸軒¹ 潘煌鏗² 康家瑋³

¹ 高雄應用科技大學土木工程系 碩士生, 1103312128@gm.kuas.edu.tw

² 高雄應用科技大學土木工程系 教授

³ 高雄應用科技大學土木工程系 大學生

摘要

壓電水泥是一種新型的感測器可作為 RC 結構物的健康檢測與診斷之用，壓電水泥的壓電常數與其力電性質有密切關係，具較高壓電常數的壓電水泥經施加载重後會有較高的輸出電壓產生。為了解壓電水泥的輸出電壓與壓電介質、載重關係，本研究的 PZT 壓電介質體積有 30%、40%、50%、60%、70% 五種，試體經過加熱處理及 1.5kV/mm 的電場極化後製成壓電水泥，並量測壓電水泥的壓電應變常數、和機電耦合係數。在到達壓電性質穩定的齡期(約 60 天)後製成壓電感測器，以 100N、200N、300N 載重及 1Hz、2Hz、4Hz 頻率加载，量測壓電水泥的輸出電壓。結果顯示，壓電水泥因壓電介質含量越多的壓電應變常數越高，所得的輸出電壓也越大。壓電介質含量對輸出電壓的影響比載重頻率還大。

關鍵字： 壓電陶瓷、水泥感測器、力電性質、輸出電壓、結構健康檢測

Abstract

Piezoelectric cement (cement piezoelectric composites) is a new type of sensor can be used as health detection and diagnosis of RC structures using piezoelectric cement piezoelectric constant force their electrical properties are closely related, with higher piezoelectric constant load is applied after the piezoelectric cement have a higher output voltage is generated. In order to extract the electric cement output voltage of the piezoelectric medium load relationship, PZT piezoelectric media volume of this study are 30%, 40%, 50%, 60%, 70% five kinds of test specimen after heat treatment and 1.5kV / mm made of piezoelectric polarization electric field of cement, and the amount of electrical load of cement piezoelectric strain constant, dielectric constant and electromechanical coupling coefficient. After reaching the age of the piezoelectric stable (about 60 days) is made of a piezoelectric sensor, to 100N, 200N, 300N load and 1Hz, 2Hz, 4Hz frequency of loading, the amount of electrical load output voltage of the cement. The results show that the piezoelectric cement due to more inclusion content piezoelectric piezoelectric strain constant is higher, the greater the resulting output voltage, output voltage and the piezoelectric cement truck and the phase difference is very small; in addition, the

piezoelectric inclusion content effect on the output voltage is greater than the frequency of the load.

Keywords: Piezoelectric ceramic、Cement sensors、Electromechanical properties、Output voltage、Structural health monitoring

一、前言

結構健康檢測常使用電阻式應變片(strain gauge)、光纖(optical fibers)、壓電陶瓷或壓電高分子(傳統壓電材料)感測器來監測和診斷結構桿件或材料的損傷和受載重的力學行為，其中傳統壓電材料與混凝土結構材料介面的變形協調性問題，採用傳統壓電材料製作感測器(sensors)來監測結構構件的變位與應力時，不容易擷取真正的混凝土構件內部的應力和損傷[1-2]。為使傳統壓電材料與混凝土之間的力學、位移、熱膨脹達到良好協調性，土木工程使用這些傳統壓電材料做為感測器時，最好選與混凝土結構之聲阻抗(acoustic impedance)、介面導性(conductivity)和變形協調性(compatibility)接近的壓電感測器，因此促成 0-3 型水泥壓電複合材料(0-3 type cement-based piezoelectric composites)的發展[3]。對現有之 0-3 型水泥壓電複合材料製成的水泥壓電感測器進行力電反應試驗，得知水泥壓電感測器與 PZT 陶瓷壓電感測器類似，在載重瞬間有響應電壓輸出，表示有良好的載重靈敏度，且具有載重增加伴隨響應電壓增加的趨勢[4]。

0-3 型水泥壓電複合材料是以水泥為基材，壓電材顆粒介質(inclusion)以三維方向均勻分佈在水泥，目前常見的壓電介質為銦鈦酸鉛(PZT)壓電陶瓷。PZT 含量 50% 的 0-3 型水泥壓電複合材料之壓電應變常數 d_{33} (piezoelectric strain constant) 的聲阻抗與混凝土接近，故製成壓電感測器可使用在混凝土結構的即時監控和檢測。0-3 型水泥壓電複合材料試體的製程是將水泥與未極化(polarization)的 PZT 乾拌混和，利用萬能材料試驗機(material test system, MTS)壓錠成型。文獻指出，目前含量 50% PZT 的水泥壓電複合材料 d_{33} 值約小於 55pC/N，最高值只有 100% PZT 壓電陶瓷的 1/10 左右，距離壓電感測器輸出電壓不需使用訊號放大器(amplifier)的 70pC/N 還有一段距離[5-7]，所以如何提高 0-3 型水泥壓電複合材料的壓電性質是目前最重要的課題。

已知影響水泥壓電複合材料的壓電性質因素有壓電陶瓷種類、含量與粒徑大小、試體的製程技術、極化條件與摻料等實驗變數[8-10]。本研究考慮 PZT 壓電陶瓷含量，以含量 30%、40%、50%、60%、70% 的 PZT 為介質製成水泥壓電複合材料，在壓電性質穩定後進行力電實驗，藉由分析載重頻率、輸出電壓、壓電應變常數關係，探討壓電陶瓷介質對壓電應變常數與水泥壓電感測器輸出電壓的影響。

二、試驗計畫

2.1 壓電感測器製作

2.1.1 材料與配比

水泥壓電複合材料為雙相複合材料，由 I 型卜特蘭水泥結合 PZT 陶瓷製成，PZT 壓電介質含量有體積百分比 30%、40%、50%、60%、70%，其餘為水泥基材，共有五種水泥壓電複合材

料。PZT 陶瓷介質經研磨為細顆粒狀，採用粒徑 75 μm ~150 μm 顆粒。

2.1.2 感測器極化與壓電性質

試體經過兩種溫度 (23 $^{\circ}\text{C}$ 、140 $^{\circ}\text{C}$) 處理後，進行極化，極化環境為油槽溫度 150 $^{\circ}\text{C}$ 、極化電場 1.5kV/mm、極化時間 40 分鐘。每個試體達到極化電場(1.5kV/mm)所需的時間(又稱激發時間)詳如表 1，顯示陶瓷含量的增加極化激發時間隨之減少，以 PZT 含量 50% 為基準增加 20% 陶瓷含量激發時間減少 60%。

表 1. 各陶瓷含量激發時間表

PZT 含量	30%	40%	50%	60%	70%
極化激發時間	300秒	180秒	150秒	90秒	60秒

水泥壓電感測器極化成功後會產生壓電性，在進行力電載重試驗前，量測水泥壓電感測器的壓電性質，詳如表 2 為材料在穩定齡期(約 60 天)的壓電性質，是在溫度 23 $^{\circ}\text{C}$ 和溼度 50% 環境的結果。隨著 PZT 含量增加，壓電應變常數 d_{33} 數值和電容值 C 也隨之增加，但是其電阻率則會隨 PZT 含量增加而降低。

表 2. 水泥壓電複合材料電性和壓電性質

陶瓷含量	電容 C	電阻率 ρ	壓電應變常數 d_{33}	機電耦合常數 κ_t
30%	74.406 pF	62.94 k Ω -m	22.1 pC/N	9.03
40%	178.563 pF	46.57 k Ω -m	59.6 pC/N	9.39
50%	249.360 pF	34.62 k Ω -m	81.0 pC/N	12.98
60%	289.464 pF	27.69 k Ω -m	100.3 pC/N	13.78
70%	380.467 pF	15.10 k Ω -m	121.5 pC/N	17.78

2.1.3 力電實驗

將水泥壓電感測器接線，表面塗佈熱熔膠，確保感測器放入承載鋼模有絕緣效果；另外，在承載鋼模、施力載台、橋式整流器等介面接觸點做絕緣處理，避免電壓輸出時有不必要的雜訊干擾。在進行力電試驗時，將含感測器的承載鋼模放置施力載台上，且感測器連接線經過橋式整流器轉換。輸入之載重及頻率詳如表 3，故有 9 種載重與頻率模式，力電實驗的儀器配置如圖 1。

表 3. 載重頻率設定

施力載重	100N	200N	300N
載重頻率	1Hz	2Hz	4Hz

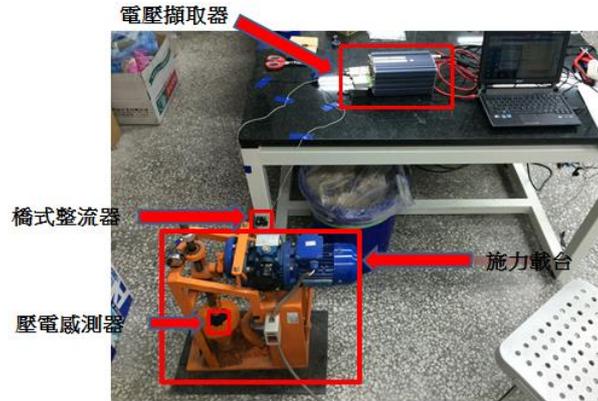


圖 1. 力電實驗設置

三、結果與討論

3.1 壓電性質

在極化成功後的水泥壓電複合材料具有壓電性質，圖 2 是極化後齡期與壓電應變常數 d_{33} 關係，PZT 壓電介質含量越多的壓電應變常數越高，增加陶瓷含量之壓電性質明顯提升。

在前 14 天齡期，壓電介質體積含量大於水泥體積含量之試體的 d_{33} 之壓電性質成長較快速，陶瓷含量 70% 壓電水泥壓電性質增長最快速，含量 60% 次之，兩者經過後溫度處理的壓電性質均有提升，但增加效果相較於含量 50% 與含量 40% 較不顯著。

含量 60% 與含量 70% 兩者的壓電應變常數 d_{33} 於 14 天齡期最佳均已達 100pC/N，而在 15 天至 30 天齡期壓電性質趨於平緩但仍有浮動，直至 30~60 天齡期壓電性質浮動幅度不足 10pC/N，此時為壓電性質的穩定期，故做為後續力電試驗的依據。因陶瓷含量 50% 壓電水泥及陶瓷含量 40% 壓電性質增長趨勢相似，由圖 2 可得知陶瓷含量 50% 及陶瓷含量 40% 之試體經過後溫度處理 140°C 與未經過溫度處理 23°C 之試體具有差異性，提高後溫度處理使得含量 50% 及含量 40% 壓電性質增長明顯，故選用經後溫度處理 140°C 的試體作為壓電性質的比較基礎。陶瓷含量 30% 經過後溫度處理 140°C 壓電性質仍有提升，但效果甚微，即經後溫度處理之 PZT 含量 30%、60%、70% 壓電性質提升效果不彰。

圖 3 是水泥壓電複合材料的機電耦合常數，機電耦合常數不受極化後的齡期影響，但 PZT 含量確能增加機電耦合常數的值，故增加 PZT 含量可有效的提高機電耦合常數增加。

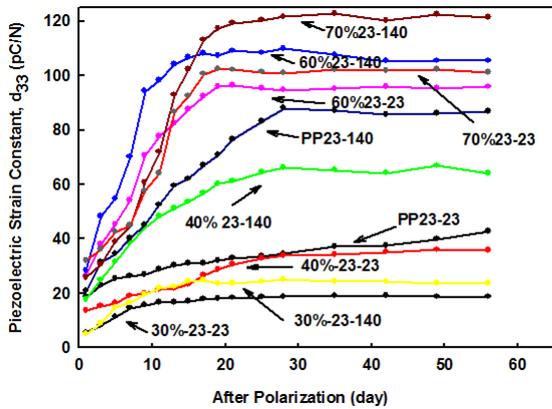


圖 2. 壓電應變常數齡期變化圖

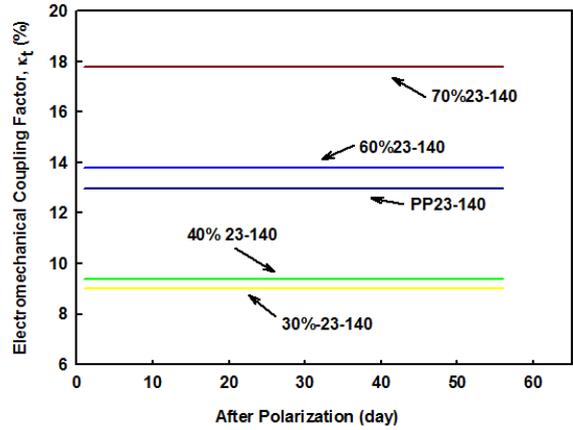


圖 3. 機電耦合常數齡期變化圖

3.2 壓電介質含量與輸出電壓

進行施力載台上進行力電實驗時，在敲擊點位置安裝力量擷取器，以確保每下敲擊時力量的穩定，由圖 4 可知施力載台的輸入載重為脈衝形式且頻率具有相當穩定性。圖 5 是 50%PZT 之水泥壓電感測器在載重 100N 頻率 1Hz 的輸出電壓，響應輸出電壓值穩定，約 0.1V，與吳勝筆[4] 指出水泥壓電複合材料於低頻載重下，響應電壓輸出情況穩定，不具有浮動現象相符。

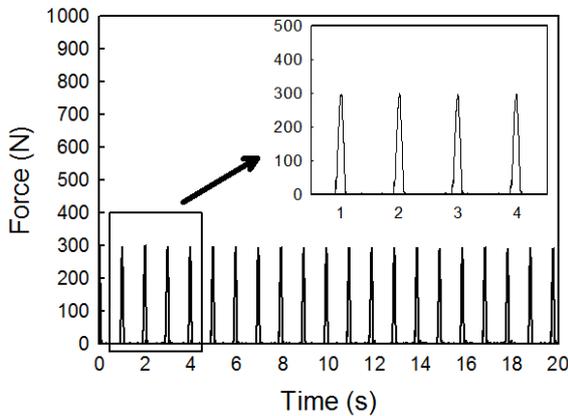


圖 4. 施力載台載重形式

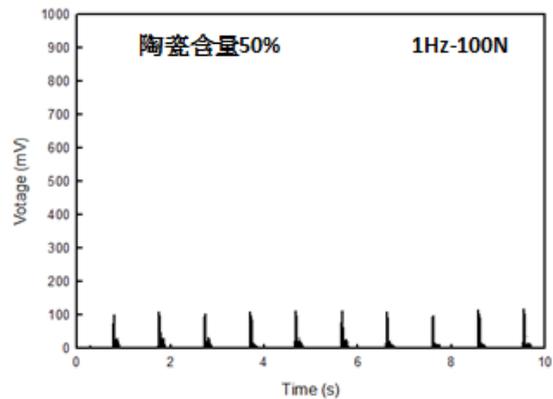


圖 5. 含量 50% 載重 100N 及 1Hz 的輸出電壓

對於陶瓷含量的提升以及輸出電壓是有相關性的，陶瓷含量 60% 與 陶瓷含量 70% 於相同頻率及載重下，敲擊響應電壓輸出分別為 0.298V、0.362V，相較於陶瓷含量 50% 所輸出電壓 0.100V 提升了 19.8% 及 26.2% 的增幅電壓，而陶瓷含量 50% 增加為陶瓷含量 60% 響應電壓增加 19.8%，陶瓷含量 60% 增加為陶瓷含量 70% 響應電壓增加 21.4%，但隨陶瓷含量的增加，經過載重敲擊後響應電壓隨之出現殘餘電壓，並隨含量增加情況趨於明顯，陶瓷含量 50% 則無殘餘電壓情況產生，陶瓷含量 60% 及陶瓷含量 70% 所產生殘餘電壓分別約為 0.100V 及

0.200V，但對於下一次敲擊載重並無明顯影響，陶瓷含量提升對於壓電水泥仍有相當良好的靈敏性。詳如圖 6。

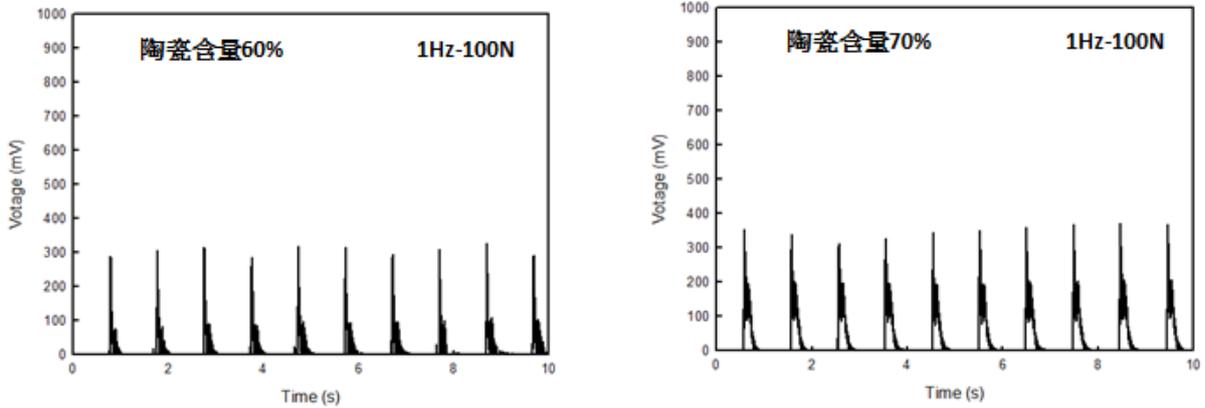


圖 6. 陶瓷含量 60% 及陶瓷含量 70% 1Hz 載重 100N 電壓輸出圖

3.3 頻率與電壓

在力電實驗中將載重固定為 100N，由圖 5 與下列圖 7 得知，隨載重頻率加快電壓波動幅度增加，所產生響應電壓輸出不穩定，並隨頻率加快發生些許殘餘電壓。當載重頻率由 2Hz 增加到 4Hz 時，平均輸出電壓受輸出電壓與殘餘電壓干擾進而削弱或是增幅。

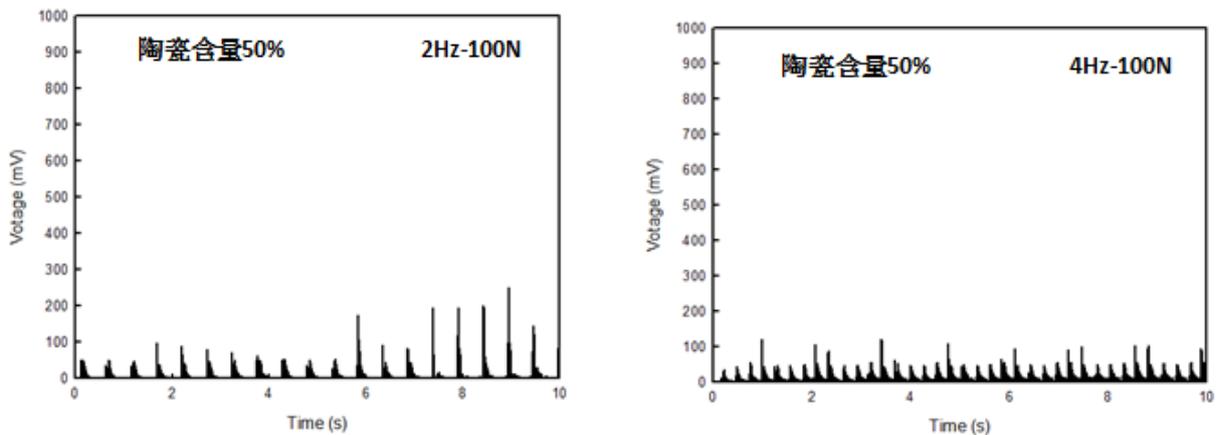


圖 7. 陶瓷含量 50% 固定載重 100N 頻率 2Hz 與 4Hz 電壓輸出圖

將陶瓷含量提升至 60%，頻率 2Hz 載重 100N 在每下敲擊後的殘餘電壓較低頻載重更加明顯，但仍不影響下次敲擊時所產生響應電壓，整體平均電壓幅度仍是有些許浮動，整體平均電壓約為 0.280V，所產生殘餘電壓約 0.060V。敲擊頻率增加為 4Hz 時由圖 8 電壓輸出圖可知，敲擊頻率加快使其電壓波動越趨明顯，整體電壓受殘餘電壓的干擾使電壓輸出增加或是減少，呈現不規則波浪狀，相較於含量 50% 更加明顯。

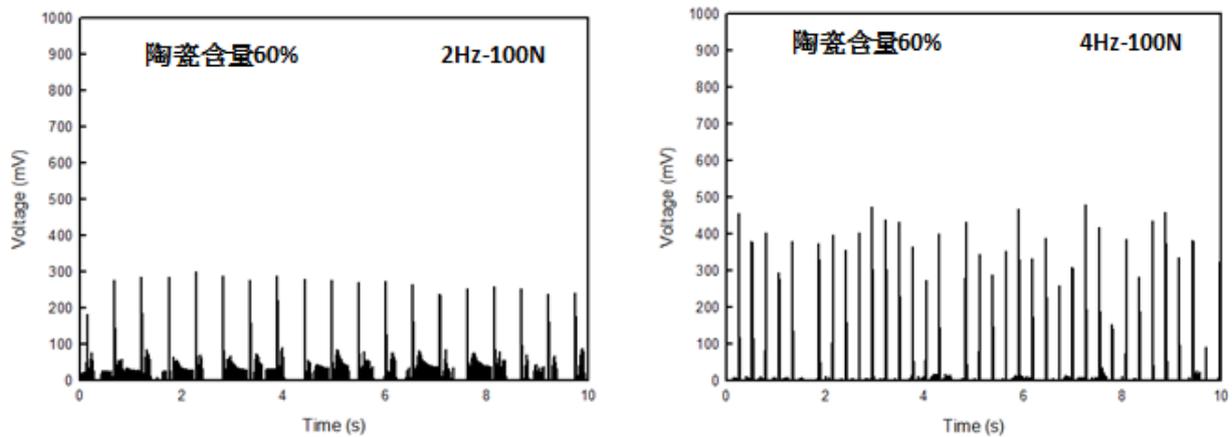


圖 8. 陶瓷含量 60% 固定載重 100N 2Hz 與 4Hz 電壓輸出圖

當陶瓷含量達 70%，加快其敲擊頻率至 2Hz 於相同載重下其電壓峰值產生浮動，但其殘餘電壓所產生情況與陶瓷含量 60% 相較一致性，並較少瑣碎殘餘電壓的產生，當敲擊頻率達 4Hz 敲擊所產生響應電壓峰值受殘餘電壓干擾情形劇烈，並整體電壓皆有大幅增長或是減少之傾向，其電壓浮動狀況也呈現不規則模樣。

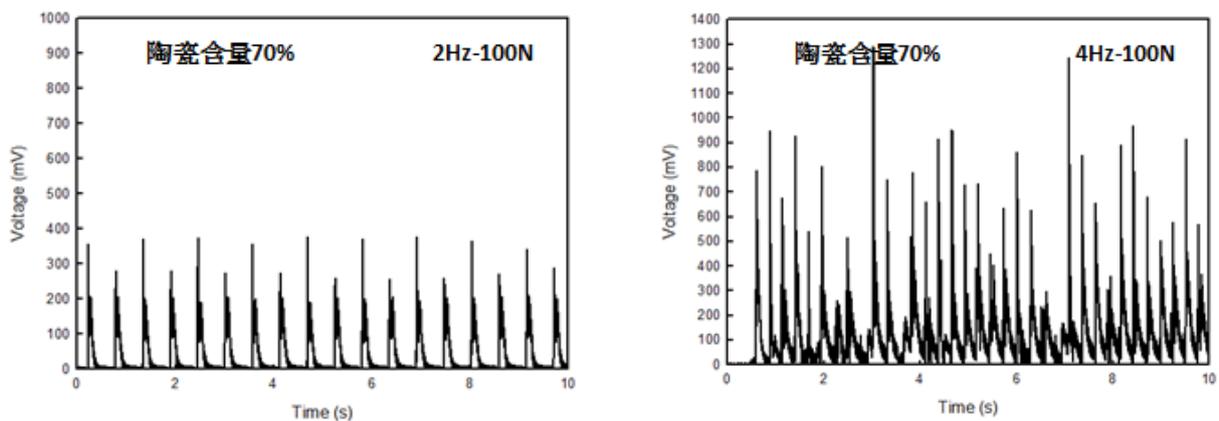


圖 9. 陶瓷含量 70% 固定載重 100N 2Hz 與 4Hz 電壓輸出圖

由圖 7~圖 9 可知相同敲擊頻率下，提升陶瓷含量對於敲擊所產生的響應電壓增長具有密切關係，在相同陶瓷含量下，加快敲擊頻率對於敲擊所產生的響應電壓產生不穩定浮動情形相關。

3.4 載重與電壓

將陶瓷含量 50% 試體固定頻率為 1Hz 提高載重力量，進行力電實驗所輸出電壓如圖 10，增加施力載重對於平均響應電壓有所提升，但使其電壓輸出曲線並不平穩，而增加至 300N 時，出現明顯殘留電壓，導致其響應電壓極值產生波動，並在越大載重越加明顯。

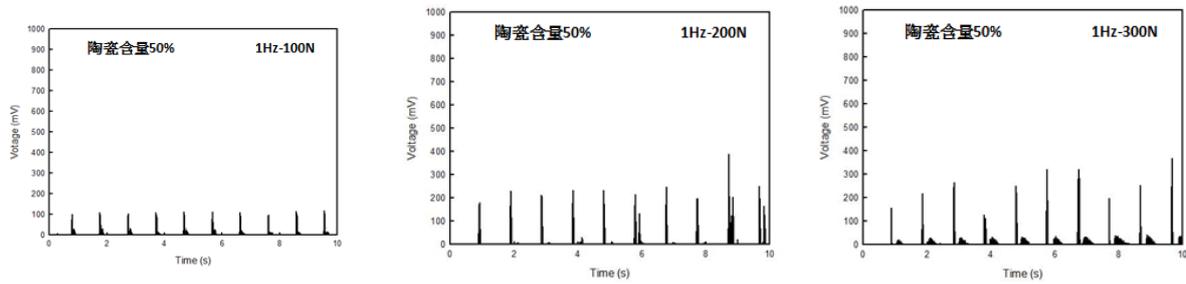


圖 10. 陶瓷含量 50% 固定頻率 1Hz 100N、200N、300N 電壓輸出圖

將陶瓷含量 60% 試體固定頻率為 1Hz 提高載重力量，圖 11 顯示陶瓷含量 60% 之試體相同頻率下，由 100N 增加施力載重至 200N 其電壓增幅超出兩倍，其電壓波動幅度增加，由 200N 增加載重至 300N，出現明顯殘留電壓，可知提高陶瓷含量時，增加施力載重所產生殘留電壓情形劇烈。

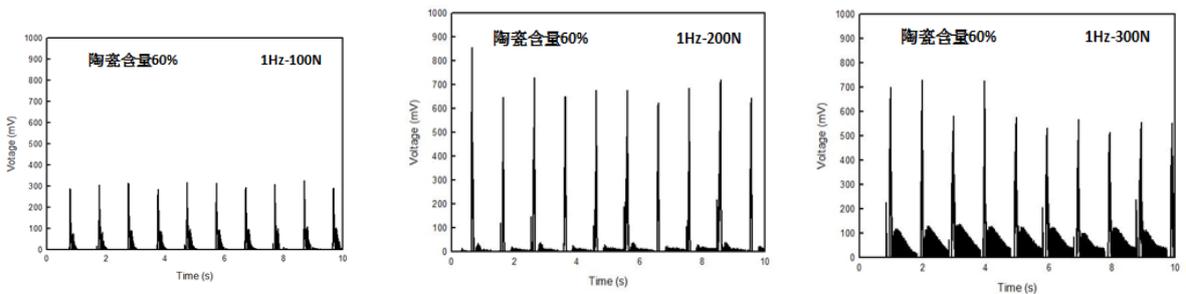


圖 11. 陶瓷含量 60% 固定頻率 1Hz 100N、200N、300N 電壓輸出圖

頻率為 1Hz 陶瓷含量 70% 試體的力電實驗，由圖 12 顯示隨陶瓷含量增加至 70%，增加施力載重所出現殘留電壓越趨明顯，並在圖 9 中顯示由載重 100N 增加至載重 200N 其平均電壓並無增幅至兩倍，而出現更多殘留電壓，直至載重增加至 300N，整體輸出電壓明顯提升，而伴隨殘留電壓而產生明顯波動。

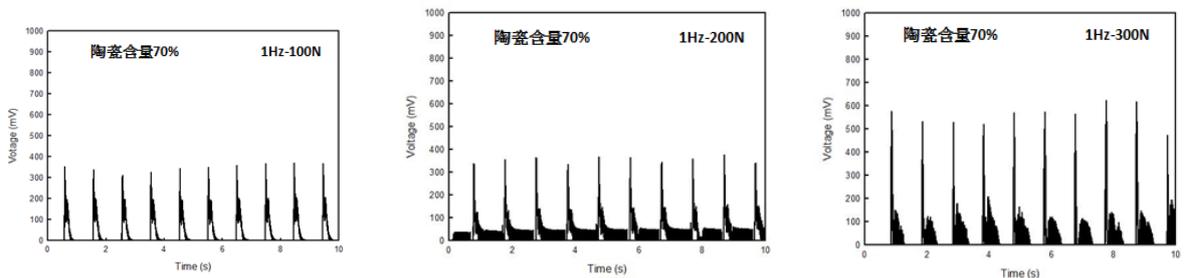


圖 12. 陶瓷含量 70% 固定頻率 1Hz 100N、200N、300N 電壓輸出圖

由圖 10、圖 11、圖 12 可知相同載重下，陶瓷含量多寡影響其力電性質所輸出電壓以陶瓷含量 50% 於載重 100N 所產生電壓 0.100V 為例，含量 70% 所產生電壓為 0.362V，電壓增長 26.2%，而在加壓至 300N，陶瓷含量 50% 所產生電壓平均為 0.214V，含量 70% 試體敲擊產生平均電壓為 0.557V，電壓增長 16%；陶瓷含量 50% 載重由 100N 加至 300N 電壓增長 21.4%，陶瓷含量 70% 試體電壓增長 5.4%。

四、結論

本研究結果顯示陶瓷含量多寡對於壓電性質的影響是顯著的，且陶瓷含量對於壓電輸出電壓有較好的影響效果，陶瓷含量 70% 經過溫度處理之試體擁有良好機電耦合常數、激發時間較短、對於載重有較佳的靈敏性。陶瓷含量低於 50% 之試體壓電性質未達感測器不接放大器之標準 $>70\text{pC/N}$ 。

1. 壓電水泥於低頻率震動擁有穩定的輸出電壓行為，殘留電壓對於輸出電壓影響較少。
2. 壓電水泥力電性質方面，陶瓷含量增加影響方面較增加頻率及載重效果優良。
3. 在相同載重作用下，陶瓷含量對輸出電壓的影響比載重頻率還大。
4. 提高加載頻率至 2Hz 陶瓷含量高試體電壓輸出明顯，提高至 4Hz 容易受殘留電壓之影響，使其敲擊響應電壓受干擾效應，呈現電壓輸出不穩定情形。

參考文獻

1. 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 67-72 頁，(2002)。
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制」，壓電與聲光，第 24 卷，第 3 期，第 77-381 頁，(2002)。
3. 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」，中國土木工程學刊，第 23 卷，第 1 期，第 1-10 頁，(2011)。
4. 吳勝筆、潘煌鏗，「水泥壓電感測器的力電性質」，TCI 2015 Conference on Concrete Engineering，台中，Paper No.D1，(2015)
5. Dong, B. and Li, Z., "Cement-Based Piezoelectric Ceramic Smart Composites", Composites Science and Technology, Vol. 65, pp. 1363-1371 (2005).
6. Li, Z., Dong, B. and Zhang, D., "Influence of Polarization on Properties of 0-3 Cement-Based PZT Composites", Cement and Concrete Composites, Vol. 27, pp. 27-32 (2005).
7. Chaipanich, A. and Jaitanong, N., "Effect of Poling Time on Piezoelectric Properties of 0-3 PZT-Portland Cement Composites", Taylor and Francis Group, Vol. 35, pp. 73-18 (2008).
8. Wang, F., Wang, H., Song, Y. and Sun, H., "High Piezoelectricity 0-3 Cement-Based Piezoelectric Composites", Materials Letters, Vol. 76, pp. 208-210 (2012).
9. 楊瑞豪、潘煌鏗，「矽基材料對 PZT 水泥複合材料壓電性質的影響」，國立高雄應用科技大學，碩士論文，(2014)。
10. 黃以仁、潘煌鏗、林棟宏、楊瑞豪，「水灰比對 0-3 型水泥壓電複合材料壓電性質的影響」，第十二屆結構工程研討會暨第二屆地震工程研討會，高雄，No.1003，(2014)