

使用壓電水泥與機電阻抗技術監測砂漿和混凝土強度

潘煌鋳^{1*} 王永德² 蘇育民³

關鍵詞：混凝土、壓電水泥感測器、機電阻抗、結構健康監測。

摘 要

為改善傳統壓電感測器在混凝土結構監測的界面傳導性和變形協調性問題，有別於 PZT 感測器和智能骨材，本研究以自製的壓電水泥（具壓電性之 0-3 型水泥壓電複合材料）配合機電阻抗技術來監測水泥砂漿和混凝土的強度成長，感測器是埋設於水泥砂漿和混凝土內部，試驗的比較組為 PZT 感測器。試驗結果顯示，壓電水泥能夠做為感測器來監測水泥砂漿和混凝土的強度，有效的觀測頻率約 400~650 kHz，有效頻寬較 PZT 感測器大，且其電導的均方根差更能夠反映砂漿和混凝土的強度-齡期行為；針對混凝土結構監測，使用 50% PZT 含量的壓電水泥有提高混凝土強度監測準確性的效果。

MONITORING OF THE STRENGTH OF MORTAR AND CONCRETE USING PIEZOELECTRIC CEMENT SENSORS VIA ELECTROMECHANICAL IMPEDANCE TECHNIQUE

Huang-Hsing Pan Yung-Te Wang Yu-Min Su

Department of Civil Engineering
National Kaohsiung University of Science and Technology
Kaohsiung, Taiwan 80778, R.O.C.

Key Words : concrete, cement sensor, EMI, structural health monitoring.

ABSTRACT

For improving the incompatibility of acoustic impedance and deformation between conventional piezoelectric sensors and concrete structures, piezoelectric cement (0-3 type cement-based piezoelectric composites) has been fabricated as a new piezoelectric sensor that applies to concrete structures, instead of PZT sensors and smart aggregates. Piezoelectric cement (PP sensors) embedded in mortar and concrete was conducted to monitor the strength development by measuring the change of electromechanical impedance (EMI). PZT sensors is the counterpart of the experiments. Results indicate that the piezoelectric cement is feasible to monitor the strength-age relation of concrete materials. The range of 400 ~ 650 kHz is effective to monitor the strength of concrete if the piezoelectric cement sensors were used. The span of frequency for PP sensors is greater than that for PZT sensors can benefit concrete structural health monitoring. The root-mean square deviation (RMSD) of conductivity by using PP sensors can reflect the strength development of concrete suitably. Piezoelectric cement containing 50 vol.% PZT is able to promote the accuracy for monitoring the strength of concrete materials, comparing with PZR sensors.

¹ *通訊作者，國立高雄科技大學土木工程系教授

² 國立高雄科技大學土木工程系碩士

³ 國立高雄科技大學土木工程系助理教授

一、前言

為了確保結構物的使用安全，需要對結構進行健康檢測，而在進行結構健康監測 (structural health monitoring, SHM) 使用的非破壞檢測法，除了 X 光、超音波脈衝法 (ultrasonic pulse velocity method, UPV)、聲射法 (acoustic emission, AE) 和敲擊回音法外，常使用的感測器 (sensors) 有電阻式應變片 (strain gauge)、光纖、壓電陶瓷 (piezoelectric ceramics) 或壓電高分子 (piezoelectric polymers)，有時也會在混凝土內添加鋼纖維或碳微絲 (carbon filaments) 材料做為感測體，這些俗稱的感測器以貼附或埋設方式安裝在受測物體的表面或內部，經由感測器輸出的訊號與連結物體的應力或應變資料能夠反映結構的振動控制、交通監測、負載變動與災害預防 (hazard mitigation)。其中，壓電感測器的量測技術是經由特定感測器的特性例如電阻 ρ [1,2]、電壓 V [3] 或介電常數 ϵ (dielectric constant) [4] 來判斷結構物的損傷或應力分佈，壓電感測器是由具壓電性的材料所組成的元件，而壓電材料具有重量輕、耐用、能量轉換率高、電磁干擾少及可製成任意形狀的優點，已廣泛應用在結構動態分析、醫學與微機電系統 (microelectromechanical systems, MEMS)。

近 20 年來，公共設施的結構健康監測與檢測較常使用鋅鈦酸鉛 (PZT) 陶瓷和智能骨材 (smart aggregate) 做為壓電感測器與致動器 (actuators)，例如在混凝土襯砌、鋼索與 RC 橋梁、剛性路面、邊坡與混凝土結構監測 [5-12]。除了鋼構結構外，PZT 壓電感測器應在混凝土結構物或水泥基材料 (混凝土) 的監測與損傷檢測已累積許多有用的知識與經驗，例如 Tawie and Lee [13] 利用 PZT 壓電陶瓷的阻抗 (impedance) 差異來監測鋼筋與混凝土界面的水泥水化程度，作為握裹力的指標；Xu *et al.* [14] 使用 PZT 感測器以埋入 (嵌入) 和表面貼片方式進行混凝土梁的裂縫損傷診斷；Jabir & Gupta [15] 將壓電陶瓷片黏貼在混凝土桿件的表面來評估混凝土強度；Divsholi and Yang [16] 利用 PZT 感測器的機電阻抗 (electromechanical impedance, EMI) 與波動傳播 (wave propagation) 技術來評估鋼筋混凝土梁的損傷程度；Karthick *et al.* [17] 是將 PZT 感測器埋設和以表面黏貼於 RC 桿件進行鋼筋腐蝕的長期觀測；Lim *et al.* [18] 則用嵌入式 PZT 壓電片來評估混凝土強度，這些非破壞檢測技術都是採用 PZT 壓電感測器。

另外，智能骨材是一種將已極化的 PZT 壓電片以水泥、高分子材料或水泥砂漿包裹的壓電單元體 [19]，可放入混凝土構件內進行力學行為監測，有改善壓電片在埋入混凝土時容易受到不確定因素干擾的問題，例如 Cahill *et al.* [20] 以智能骨材進行 RC 梁的健康診斷；Dumoulin *et al.* [21] 將嵌入智能骨材的 RC 梁，以三點抗彎試驗進行裂縫損傷評估；Xu *et al.* [22] 指出，利用智能骨材的阻抗和電導 (conductance) 頻譜能夠反映砂漿受載重與溫度作用的影響；Khante and Gedam [23] 使用智能骨材結合阻抗法進行 RC 構件的健康檢測。

台灣 2009 年有以 PZT 感測器監測橋梁、基礎沖刷和結構損傷的實例與研究 [24-26]，也有利用智能骨材的輸出電壓進行混凝土損傷評估 [27-29]。針對 PZT 感測器在結構物體的健康檢測，有些研究是利用安裝在結構物的感測器電

壓、電阻或介電常數來判斷結構行為或檢測材料損傷，例如蕭珮如 [29] 利用埋入混凝土試體的 PZT 感測器來觀察在不同振動強度的電壓振幅訊號進行試體損壞位置及裂縫關係的評估，結果顯示電壓振幅會隨著試體早期強度或損壞程度的增加而逐漸變小。

然而，採用輸出電壓進行訊號分析有其複雜性，為簡化壓電感測器輸出訊號分析，以機電阻抗法 [13-18,22,23] 進行結構健康監測因具有計算和分析較為簡單已漸為大家使用，這個方法有別於利用壓電感測器的輸出電壓特性 [27-30] 來評估結構損傷與診斷，藉由感測器的機電阻抗特性所量測的阻抗實部 (電阻) 和虛部 (電抗) 能夠有效反映結構健康現況 [31]，具有訊號容易判讀的優點。

雖然以壓電 PZT 做為壓電感測器可形成一個良好的結構健康監測系統，但是壓電感測器是 100% PZT (陶瓷材料) 的壓電片、或是壓電高分子薄膜、智能骨材，這些壓電單元體的性質與混凝土性質差異頗大，例如 PZT 材料的聲阻抗 (acoustic impedance) 和密度分別為 $21.2 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 和 7.5 t/m^3 ，與混凝土的 $9.0 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 和 2.3 t/m^3 有很大差異，PZT 感測器使用在混凝土構造時有界面傳導性和變形相容性 (compatibility) 問題 [32]，在進行健康監測時可能會因混凝土材料的熱脹冷縮、乾縮、潛變或是外在因素干擾，無法適當反映所監測混凝土構件的真正行為或是損傷而導致監測結果誤判。

為了減少 PZT 感測器與混凝土的相容性問題，過去已發展 0-3 型水泥壓電複合材料來改善 PZT 材料與混凝土相容性問題 [32-36]，而 0-3 型水泥壓電複合材料屬於雙相複合材料 (two-phase composites)，PZT 為顆粒介質 (inclusion) 以“0”表示，水泥為基材 (matrix) 用“3”表示，這是一種將 PZT 顆粒與水泥混合的複合材料，經過電場極化的 0-3 型水泥壓電複合材料因具有壓電性可稱為壓電水泥 (piezoelectric cement) 或智能水泥 (smart cement)。當 0-3 型水泥壓電複合材料的 PZT 介質體積含量在 40% ~ 50% 時，聲阻抗約 $9 \sim 11 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ [32]，很接近混凝土的聲阻抗，理論上能夠改善混凝土結構與 PZT 感測器之間相容性的缺點，可作為壓電感測器來進行混凝土結構或材料的健康監測或診斷之用。

針對水泥壓電複合材料使用機電阻抗法進行混凝土監測和檢測，較常見的是壓電性質較高的智能骨材 (水泥材料包裹片狀 PZT 介質) [22,23,30,37-42]，或是仍不多見的 1-3 型水泥壓電複合材料 (其中“1”是 PZT 介質為單方向的柱狀，水泥基材沒有方向性以“3”表示)，例如 Xu *et al.* [43] 使用 2-2 型與 1-3 型水泥壓電複合材料做為壓電感測器並結合阻抗法以 1 kHz ~ 2 MHz 範圍進行混凝土損傷檢測，其中 2-2 型的 PZT 和水泥都是平面方向的片狀以“2”表示)。所以，目前以壓電水泥 (0-3 型) 配合機電阻抗法進行混凝土結構健康監測的研究非常少見。

本研究的壓電水泥是 0-3 型水泥壓電複合材料以體積 50% PZT 顆粒和 50% 水泥組成，採用自有製程和極化技術使 0-3 型水泥壓電複合材料具有壓電性，以埋設方式安裝在水泥砂漿和混凝土試體內，結合機電阻抗技術進行混凝土材料各材齡抗壓強度成長監測，監測齡期為 1 ~ 56 天，並與 PZT 感測器的結果比較。

二、實驗計畫與方法

2.1 壓電試體製程

為降低 PZT 感測器與混凝土結構的聲阻抗與變形相容問題，壓電水泥是體積含量各 50% 的 PZT 和 I 型卜特蘭水泥，其中 PZT 是商業用且未極化的 PZT 陶瓷片，廠商提供的性質 (Ka 型 PZT 材料) 是比重 7.9，壓電應變常數 $d_{33} = 470 \text{ pC/N}$ ，相對介電常數 $\epsilon_r = 2100$ ，介電損失 1.5×10^{-3} 。試驗試體的製程是將 PZT 陶瓷搗碎成粉狀，選用通過 #100 號篩和停留 #200 號篩的粒徑做為介質，PZT 介質與水泥依照配比進行乾拌混合，並以行星式球磨機用轉速 100 rpm 進行順時針和逆時針方向各 5 分鐘旋轉，使混合料均勻分散。將混合料分成三個等分放入直徑 15 mm 的鐵製試體模內，利用 MTS 試驗機施加 80 MPa 壓力將混合料壓制形成錠粒 (簡稱 PP 試體)。從鐵模取出試體後，立即置於 90°C 的恆溫水槽內進行 24 小時的水氣養護。試體養護後，利用研磨拋光機將 PP 試體研磨成 2 mm 厚度。

因經過溫度處理的 PP 試體介電損失會降低，有利於壓電水泥極化且增加壓電應變常數和介電常數 [44]，故 PP 試體表面以導電銀膠做為電極後，利用自行開發的製程技術在試體製作電極的前後以 140°C 進行溫度處理 [45]，即試體製作電極前與完成電極後都以 140°C 加溫。試體冷卻後，放入恆溫 150°C 的油槽內以 1.5 kV/mm 的電場進行 40 分鐘的極化，極化設備如圖 1，完成極化的試體具有壓電性質。另外，試驗對照組的 PZT 陶瓷片尺寸是厚度 1.8 mm 直徑 12 mm，極化條件和 PP 試體相同，如圖 2 所示。

試體極化後以溫度 25°C 及相對濕度 50% 的環境量測壓電性質，圖 3 是壓電 PP 和 PZT 試體的壓電應變常數 d_{33}

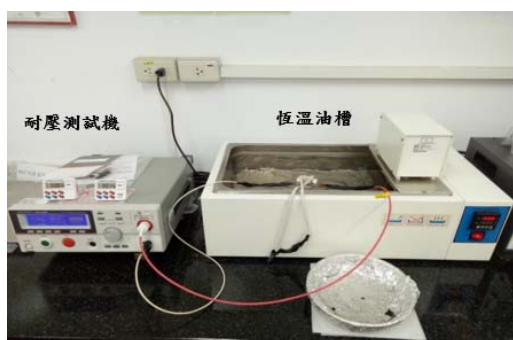


圖 1 極化設備

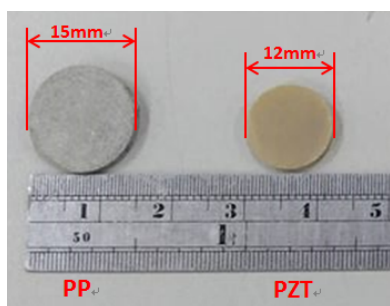


圖 2 壓電 PP 與 PZT 試體尺寸

和齡期關係，其中 PP 試體有經過二次溫度處理的 PPBB 和未經過溫度處理的 PPAA 兩種，結果顯示 PZT 的 d_{33} 不會隨著齡期增加而有明顯變動，即 PZT 的壓電應變常數與齡期無關， d_{33} 值約 399 pC/N；而壓電水泥 (PP 試體) 的 d_{33} 則會隨著齡期逐漸增加，約在極化後 70 天的 d_{33} 趨於穩定，PPBB 在 100 天時 $d_{33} = 101 \text{ pC/N}$ ，而 PPAA 只有 55 pC/N，表示有經過溫度處理的 PPBB 壓電水泥具有做為壓電感測器的潛力。

2.2 砂漿和混凝土試體

水泥砂漿試體依照 ASTM C109 (CNS 1010) 檢驗法製作，骨材使用標準砂 (ASTM C109，產地渥太華)，膠結材為 I 型水泥，水灰比 0.485，水泥與砂的比例為 1:2.75，灌製成 50 mm 立方體。混凝土的骨材為里港砂和碎石 (3 分石和 6 分石比例為 55%:45%)，砂和碎石比重分別為 2.57 和 2.60，膠結材除了 I 型水泥外，還有飛灰和爐石，採用水膠比 0.58，減水劑 (優積公司型號 UGM-600) 用量為膠結材重量的 1%，配比參見表 1，混凝土試體尺寸為直徑 $\varnothing 100 \text{ mm}$ 高度 200 mm 的圓柱體。

製作砂漿與混凝土時，有埋設和未埋設壓電感測器兩種，埋入的壓電感測器以阻抗分析儀記錄其阻抗頻譜；而未安裝壓電感測器的試體則用 MTS 試驗機以 1 mm/min 速率 (ASTM C39) 直接進行抗壓試驗，試體齡期有 1~56 天。

2.3 壓電感測器設置

這裡選用 PPBB 壓電水泥做為 PP 感測器，將壓電 PP 和 PZT 試體分別以導線連接後，使用瀝青膏作為防水材料進行封裝如圖 4，目的是防水以免壓電感測器受到水氣影響產生性質不穩定。在試體灌注時，將 PP 和 PZT 感測器埋設於試體的中心位置 (圖 5 和圖 6)，即水泥砂漿立方體的感測器埋設於高度 25 mm 位置，圓柱試體的感測器在高度 100 mm 位置。

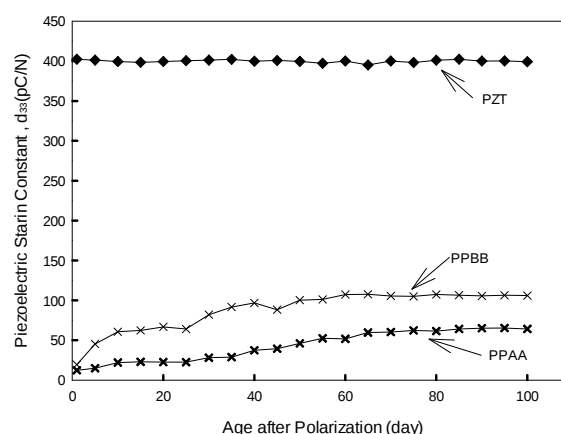


圖 3 試體極化後的 PZT 及 PP 壓電應變常數

表 1 混凝土配比(kg/m³)

水泥	爐石	飛灰	水	細骨材	粗骨材
277	55	14	201	860	952

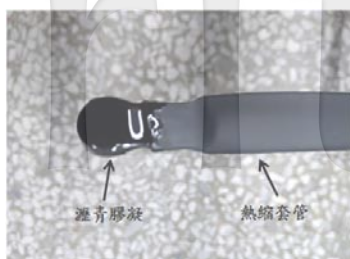


圖 4 瀝青封裝後的壓電感測器



圖 5 水泥砂漿試體埋設壓電感測器



圖 6 混凝土試體埋設壓電感測器

2.4 機電阻抗技術

Liang *et al.* 在 1994 年 [46] 以 PZT 壓電陶瓷做為感測器與致動器，首先提出以阻抗量測來實施結構健康監測，機電阻抗技術是將壓電元件黏貼於結構表面或埋設於結構內部以做為感測器和致動器（兼具有感測器和致動器功能），利用壓電元件的正、逆壓電特性，結合波動理論，應用動態阻抗資料對結構的健康檢測提供評估依據。已知結構特性有變化時也會引起其機械阻抗 (mechanical impedance) 產生變化，故可利用動態頻率作用範圍的阻抗變化來判斷結構損傷或材料性質現況。

以 PZT 感測器為例，機電阻抗法 (EMI) 的原理是以 1V 的驅動電壓激發已黏貼或埋設於受測物母體 (host structure) 的 PZT 感測器，所量測感測器的導納 (admittance, $\bar{Y}$ = 阻抗的倒數) 有下列關係 [47]：

$$\bar{Y} = G + iB = 4\omega i \left[\frac{l^2}{h} \left(\frac{\bar{\epsilon}_{33}^T}{\epsilon_{33}^T} - \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu)} + \frac{2d_{31}^2 \bar{Y}^E}{(1-\nu)} \left(\frac{Z_{a,eff}}{Z_{s,eff} + Z_{a,eff}} \right) \bar{T} \right) \right] \quad (1)$$

其中 $G = \text{Re}(\bar{Y})$ 為電導 (電阻的倒數)， $B = \text{Im}(\bar{Y})$ 為電納 (電抗的倒數)， i 等於 $\sqrt{-1}$ ， ω 為角頻率， l 和 h 為 PZT 長

度與厚度， $\bar{\epsilon}_{33}^T$ 為 PZT 的有效介電常數 (effective dielectric constant)， d_{31} 是壓電應變常數， $\bar{Y}^E$ 為 PZT 固定電場的有效楊氏模數， ν 為柏松比， $Z_{a,eff}$ 和 $Z_{s,eff}$ 分別是 PZT 感測器和結構 (受測物) 的阻抗， $\bar{T}$ 是複數正切比 (complex tangent ratio) 等於 $\tan(\kappa l) / \kappa l$ 值且 κ 是波數。式(1)可以看出，若結構物的性質或機械 (力學) 性能變化會引起其機械阻抗 ($Z_{s,eff}$) 的變化，導致結構中的 PZT 感測器量測導納 $\bar{Y}$ (或阻抗) 受到影響，故以頻率激發 PZT 感測器所獲得的阻抗能夠反映結構性能或材料性質。過去的研究 [48] 指出，因介電常數 ϵ_{33}^T 容易受溫度影響，進而影響阻抗的虛部 (電抗)，故使用 EMI 技術最好採用阻抗訊號的實部 (電阻) 來進行結構監測，以避免電抗訊號引起的假警報 (false alarm) 造成結構誤判。

三、結果與討論

3.1 壓電材料阻抗與齡期

壓電 PZT 的性質與齡期無關，但是壓電水泥 (PP) 的壓電性質卻和齡期有關，故使用壓電水泥的機電阻抗做為監測依據時，必須先檢視壓電水泥極化後的阻抗，以確定其性質穩定性。圖 7 是壓電水泥極化後 1~100 天在 20~2,000 kHz 的阻抗頻譜，在虛線 (A 區) 範圍有共振波峰存在，阻抗的量測齡期為 1、30、60、80、100 天，其中符號 D1 表示齡期 1 天，顯示量測頻率越高的阻抗越低，且壓電水泥在極化後 30 天 ~100 天 (D30~D100) 的阻抗變化逐漸縮小，這可能是受水泥膠結材變化影響所致；圖 8 是壓電水泥在

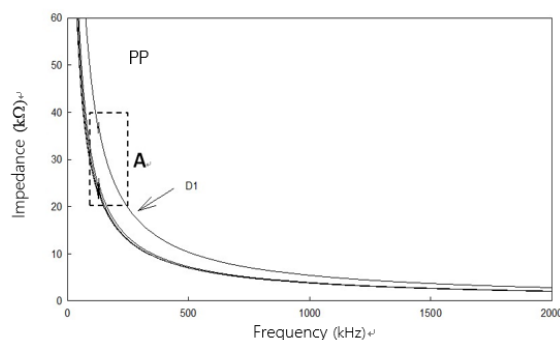


圖 7 壓電水泥 (PP) 在 20~2000 kHz 的阻抗頻譜與齡期

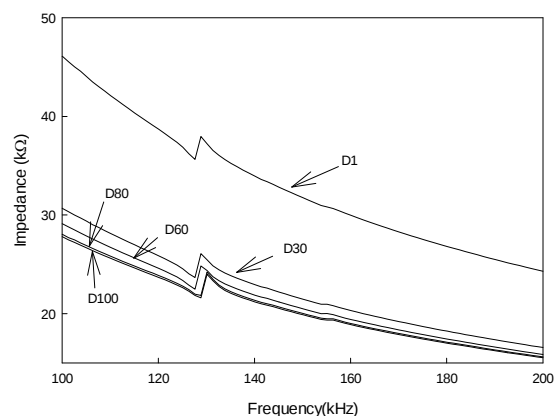


圖 8 壓電水泥 (PP) 在 100~200 kHz 的阻抗頻譜與齡期

100~200 kHz 的阻抗頻譜 (即圖 7 的虛線 A 範圍的放大圖), 壓電水泥的阻抗有隨齡期增加而減少趨勢 (備註: 阻抗是由電阻和電抗組成, 電阻仍具有隨著齡期增加而增加現象), 約在 80 天 ~ 100 天之阻抗變化很小, 表示壓電水泥的阻抗穩定期約在 90 天以後, 且所有齡期的共振頻率 (波峰) 有向右偏移現象。

3.2 壓電感測器封裝與阻抗

壓電材料 (PP 和 PZT) 在焊接導線和使用瀝青封裝防水後可形成壓電單元體 (感測器), 其中導線和瀝青為外加的拘束材料, 此時的感測器阻抗會受拘束材料限制 (邊界條件改變) 與拘束材料性質影響。針對 PP 感測器, 這裡選用極化後 100 天的壓電水泥進行導線焊接與瀝青封裝, 圖 9 是壓電水泥在瀝青封裝前 (極化後 100 天)、瀝青封裝後 5 天及放入水泥砂漿試體 24 小時之頻率 20~300 kHz 的阻抗頻譜, 顯示使用瀝青封裝後和瀝青封裝前的阻抗有著明顯的下降, 且 140~150 kHz 間的共振頻率在瀝青封裝後也隨之消失; 比較瀝青封裝後與放入砂漿試體的阻抗, 阻抗有些微的下降, 而壓電水泥的阻抗減少是受水泥砂漿阻抗 $Z_{s,eff}$ 影響所致, 但下降的幅度並沒有使用瀝青封裝後來的多。

檢視壓電 PZT 的阻抗頻譜, 圖 10 是 PZT 在瀝青封裝前、後及放入砂漿後在 20~1000 kHz 的阻抗頻譜, 其中瀝

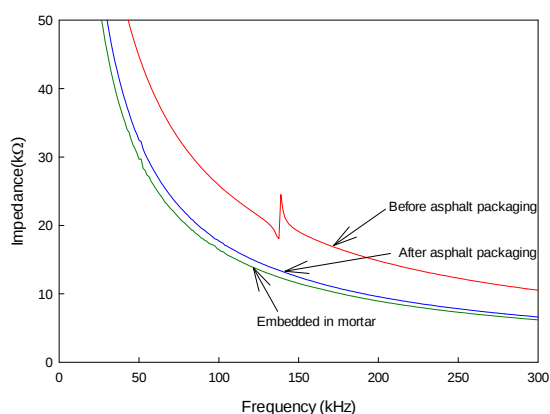


圖 9 壓電水泥 (PP) 感測器於瀝青封裝前、後及放入砂漿試體在 20~200 kHz 的阻抗頻譜

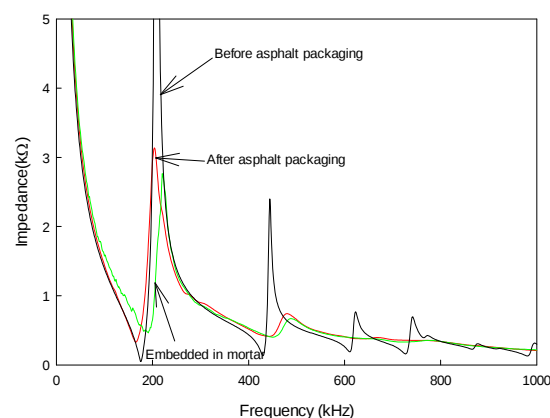


圖 10 PZT 感測器於瀝青封裝前、後及放入砂漿試體在 20~1000 kHz 的阻抗頻譜

青封裝前是表示極化後 1 天的阻抗頻譜, 封裝後是瀝青封裝的第 1 天阻抗; 檢視共振頻率 (波峰) 附近的阻抗, 例如約 200 kHz (主波峰) 的阻抗峰值在瀝青封裝前是 40 kΩ (超出圖 10 縱軸範圍), 在瀝青封裝後的阻抗峰值減少到約 3 kΩ, 降幅非常大, 而 PZT 感測器放入水泥砂漿試體的阻抗峰值只有些微的減少 (和瀝青封裝後比較), 這是因為壓電 PZT 的阻抗也會受到拘束材料影響造成的, 尤其在共振頻率 200 kHz 或 420 kHz (次波峰) 附近的峰值頻率有向右偏移現象, 這種峰值偏移特性是 PZT 感測器的機電阻抗技術能夠應用在結構健康監測的利器。然而, 其它非共振頻率區域的阻抗並沒有依封裝瀝青的前、後和放入砂漿的規律順序而減少, 顯示 PZT 感測器在這些非共振頻率範圍進行結構健康監測容易造成結果誤判, 不適合用來監測水泥砂漿材料。

3.3 水泥砂漿強度與阻抗

壓電感測器埋入水泥砂漿試體 (圖 5), 並量測 1、3、7、14、21、28、56 天齡期的阻抗頻譜, 這裡採用電導 (阻抗實部的倒數) 來評估砂漿強度。首先檢視 PZT 感測器的電導頻譜與水泥砂漿齡期關係, 圖 11 是 PZT 感測器在 20~1600 kHz 頻率範圍的電導頻譜曲線, 由於 PZT 感測器與水泥砂漿有性質差異之相容性問題, 故 PZT 感測器的電導曲線受砂漿的影響 (干擾) 產生不同量測頻率的電導值變動激烈; 其中有 4 個明顯 (虛線區) 的波峰, 分別約在頻率 20~200 kHz、300~450 kHz、480~600 kHz、700~900 kHz, 而在波峰 300~450 kHz 及 700~900 kHz 範圍的電導曲線有比較明顯的齡期辨識度; 經檢視這兩個波峰後發現在頻率 400 kHz 附近的電導有隨著水泥砂漿的齡期增加其電導值逐漸減少如圖 12, 例如由第一天 (D1) 的電導峰值為 $18.3 \times 10^{-3} \text{ S}$ 持續下降到 56 天 (D56) 的 $15 \times 10^{-3} \text{ S}$ 。圖 13 是 PZT 感測器在頻率 400 kHz 附近的電導峰值與水泥砂漿抗壓強度的比較, 砂漿在早齡期 (前 10 天) 的電導峰值下降趨勢與水泥砂漿強度成長類似, 這是因為水泥砂漿的水泥水化隨著齡期增加導致水泥石體積增加, 造成砂漿的電導下降, 故在頻率 400 kHz 範圍附近量測的 PZT 感測器電導做為水泥砂漿強度監測的依據具有可靠性。

壓電水泥感測器 (PP) 監測水泥砂漿 1~56 天齡期的電導頻譜觀測結果在圖 14, PP 感測器的電導頻譜曲線與 PZT 感測器 (圖 11) 不同, 即 PP 感測器的電導頻譜曲線較為平滑且沒有太大的起伏 (波峰) 且隨著監測頻率越高

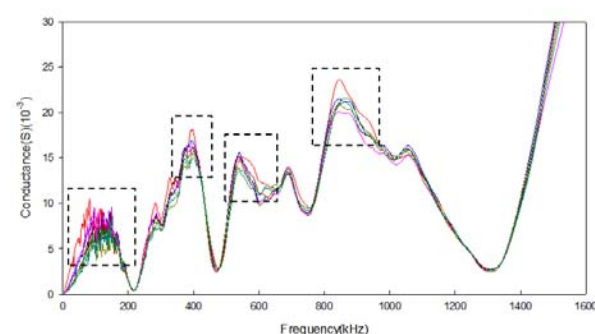


圖 11 PZT 感測器埋入水泥砂漿的 1~56 天電導曲線 (20~1600 kHz)

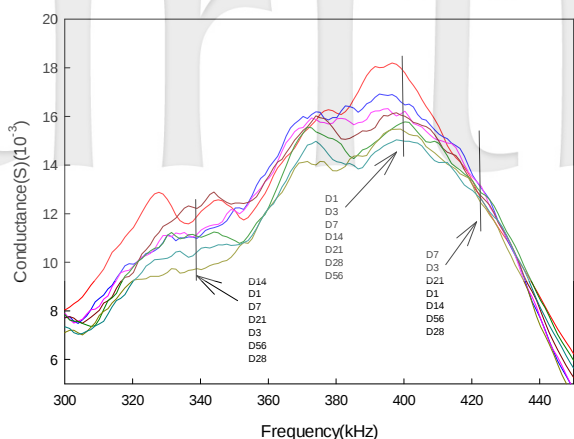


圖 12 PZT 感測器埋入水泥砂漿在 300 ~ 450 kHz 的電導曲線

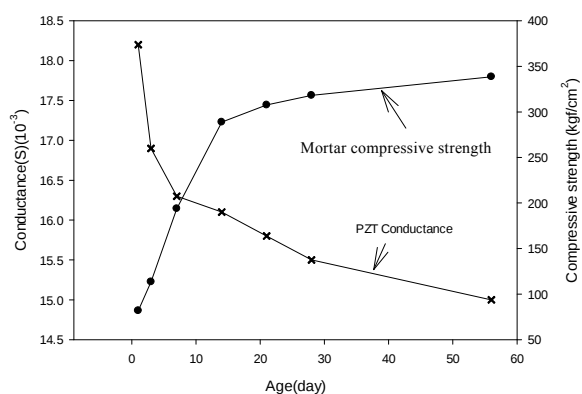


圖 13 PZT 感測器在 400 kHz 附近的電導峰值與水泥砂漿抗壓強度關係

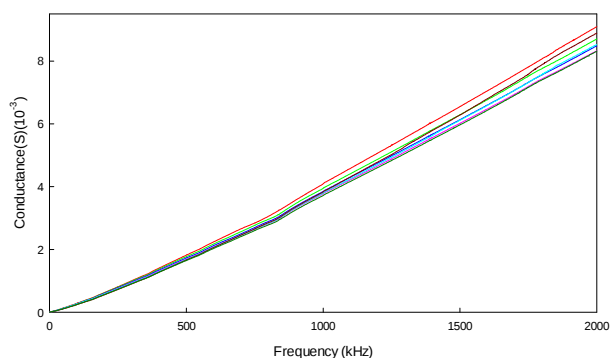


圖 14 PP 感測器埋入水泥砂漿的 1 ~ 56 天電導曲線 (20 ~ 2000 kHz)

所測得的電導越大，推測原因是 PP 感測器和水泥砂漿的聲阻抗與材料性質比較接近，材料相容性會比使用 PZT 感測器較佳。檢視圖 14 各頻率的電導與齡期關係，得到符合水泥砂漿強度-齡期成長的電導頻率範圍為 400 ~ 650 kHz (圖 15)，即在這個頻率範圍內具有隨著齡期增加之電導減少的特性。圖 16 是 PP 感測器在頻率 500 kHz 的電導-齡期曲線與抗壓強度關係，電導與強度關係和 PZT 感測器 (圖 13) 類似，PP 感測器的電導會隨齡期增加而減少，顯示壓電水泥感測器和 PZT 感測器都具有監測水砂漿強度-齡期成長的功能。

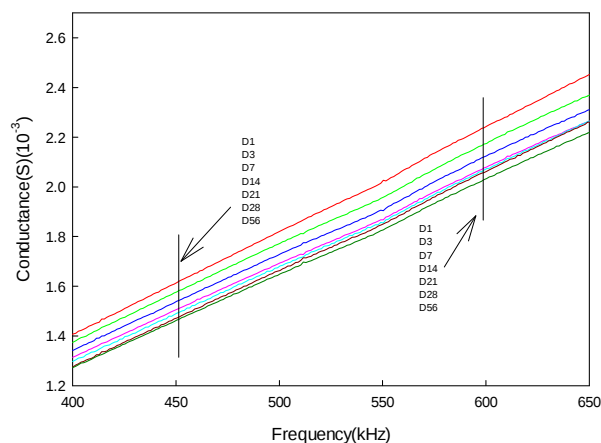


圖 15 PP 感測器埋入水泥砂漿在 400 ~ 650 kHz 的電導曲線

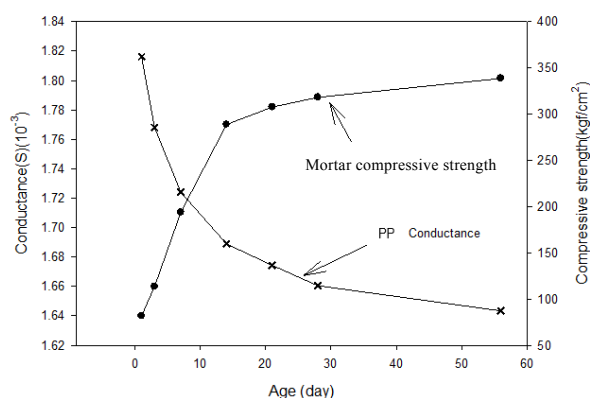


圖 16 PP 感測器在 500 kHz 的電導與水泥砂漿抗壓強度關係

3.4 混凝土強度與阻抗

在混凝土試體埋設壓電感測器 (圖 6) 進行強度監測，經檢視 PZT 感測器的電導頻譜後，找到頻率 340 kHz 附近的電導峰值具有隨混凝土齡期增加而減少的規律 (圖 17)，有規律變化的電導頻率約 320 ~ 380 kHz；試驗結果顯示在 20 ~ 2000 kHz 範圍的大部分頻段都沒有電導-齡期的規律性，例如在 400 kHz 的電導減少依序是齡期 1、14、28、21、56、7、3 天，電導和齡期之間沒有規律性，顯示 400 kHz 頻率不適合實施混凝土強度監測，取 PZT 感測器在 340 kHz 附近的電導峰值和混凝土抗壓強度比較如圖 18，顯示在這個頻率的 PZT 感測器之電導峰值有隨齡期增加而減少的規律，且電導曲線與強度曲線的變動趨勢有相關性，能夠反映混凝土圓柱試體強度-齡期的成長。另外，已知 Shin and Oh [49] 在混凝土圓柱試體表面黏貼 PZT 感測器及 Wang and Zhu [50] 在混凝土立方體埋入 PZT 感測器的試驗指出，在 200 kHz 範圍附近的電導峰值是進行監測混凝土抗壓強度的有效頻率，這與本研究的 PZT 感測器在頻率 340 kHz 範圍附近 (320 ~ 380 kHz) 的電導峰值來判斷混凝土強度不同，原因可能是使用的 PZT 材料型號、感測器的拘束材料和安裝方式、PZT 極化製程差異、或是檢測材料 (混凝土) 組成不同所導致。

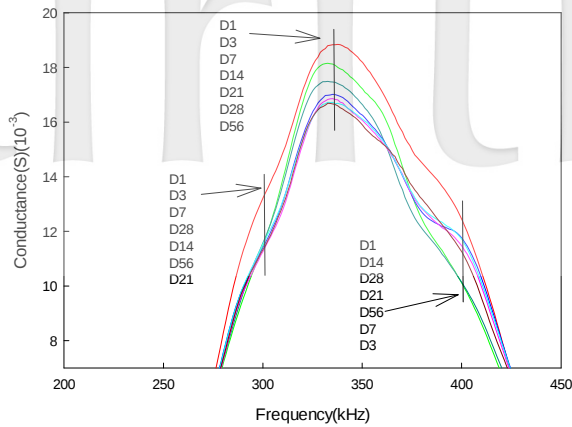


圖 17 PZT 感測器埋入混凝土圓柱試體的 1 ~ 56 天電導曲線 (200 ~ 450 kHz)

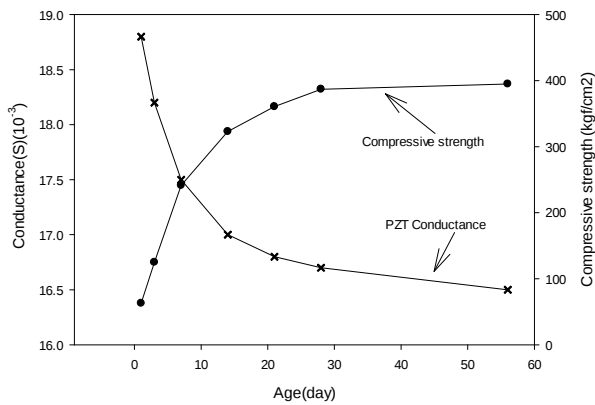


圖 18 PZT 感測器在 340 kHz 附近的電導峰值與混凝土抗壓強度關係

以壓電水泥感測器在 0 ~ 2,000 kHz 頻率監測混凝土圓柱試體的電導曲線，試驗結果得到混凝土的電導曲線和水泥砂漿 (圖 14) 類似，電導曲線沒有波峰存在且隨著觀測頻率增加的電導值也增加；另外，PP 感測器的量測電導隨著混凝土齡期增加而減少的頻率範圍介於 350 ~ 650 kHz，這個結果與 PP 感測器能夠反映水泥砂漿強度的 400 ~ 650 kHz 頻段 (圖 15) 相近。圖 19 是 PP 感測器在 500 kHz 的電導和混凝土抗壓強度的比較，結果顯示 PP 感測器的電導曲線行為和已知 PZT 感測器 (例如圖 18) 相同，都具有非破壞檢測的功能用於評估結構物之混凝土強度狀況。

3.5 強度監測評估

機電阻抗技術是利用公式(1)的結構物阻抗 ($Z_{s,eff}$) 變化來影響壓電感測器的導納，故感測器的導納(或電導)變動和所量測結構物或材料的性質改變有關，如何由感測器的輸出特性來評估或診斷結構物現況已有許多方法。已知結構健康監測常用的損傷指數有均方根差 (RMSD)、絕對平均百分差 (MAPD) 和相關係數差 (CCD) [51]，Tawie and Lee [52] 在混凝土立方試體表面以 PZT 壓電片進行抗壓強度監測，歸納提出用 RMSD 法監測強度的敏感性最好。故為了評估壓電水泥感測器的電導曲線和抗壓強度相關性，這裡採用均方根差進行電導變動分析，均方根差有如下關係：

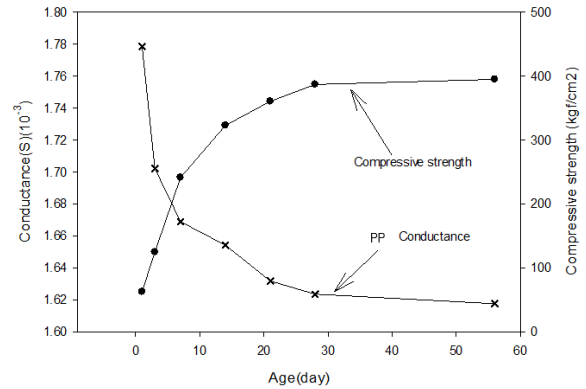


圖 19 PP 感測器在 500 kHz 的電導與混凝土抗壓強度關係

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

其中 G_i 為感測器埋入試體內部在特定齡期所測到的電導、 G_i^1 為感測器剛埋入試體所量測的電導、 n 表示掃描頻率數量。感測器的掃描頻率範圍必須能夠反映結構物的物理特性才有意義，即在特定頻率範圍的電導 RMSD 值表示抗壓強度的變化才是有效的指標。

要評估水泥砂漿強度-齡期關係，採用符合物理特性之強度增加而電導會減少的頻率做為 RMSD 值比較基礎，即 PZT 感測器與 PP 感測器分別以 350 ~ 420 kHz (圖 12) 和 400 ~ 650 kHz (圖 15) 頻段的電導值以式(2)計算 RMSD，結果在圖 20 和圖 21。檢視 PZT 與 PP 感測器的電導均方根差變動，顯示這兩種感測器的 RMSD 數值都有隨著齡期逐漸上升的趨勢，即電導 RMSD-齡期曲線的成長趨勢和水泥砂漿抗壓強度曲線雷同，這表示 PP 感測器和對照組 PZT 感測器相比，也是具有監測水泥砂漿抗壓強度的能力。另外，比較圖 20 和圖 21 的電導 RMSD 值發現，PP 感測器的電導 RMSD 值的變動範圍比 PZT 感測器還要大，這是因為 PP 感測器的有效頻率範圍 (400 ~ 650 kHz) 比 PZT 感測器的頻率範圍 (350 ~ 420 kHz) 大所導致的，而較大的電導 RMSD 值表示電導對抗壓強度變化的敏感性較佳，故使用 PP 感測器取代 PZT 感測器進行水泥砂漿抗壓強度監測有提高準確率的優點。

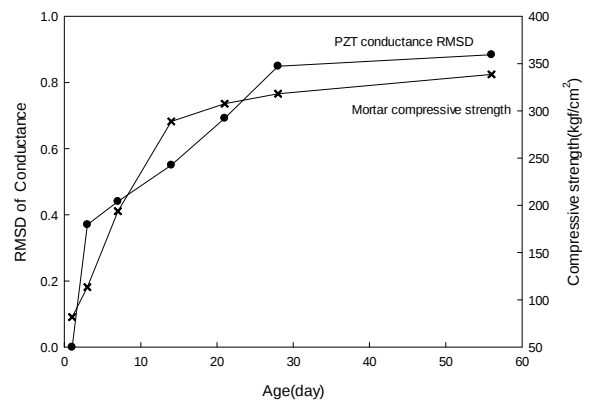


圖 20 PZT 感測器在 350 ~ 420 kHz 的電導 RMSD 與水泥砂漿抗壓強度關係

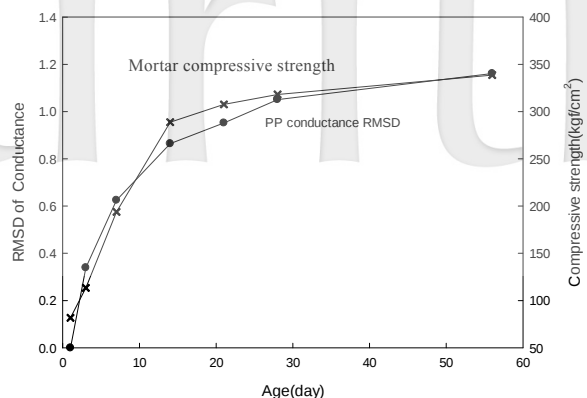


圖 21 PP 感測器在 400 ~ 650 kHz 的電導 RMSD 與水泥砂漿抗壓強度關係

在混凝土抗壓強度的監測評估，PZT 感測器選用 320 ~ 380 kHz 及 PP 感測器採用 350 ~ 650 kHz 頻段的電導值來計算 RMSD，圖 22 和圖 23 分別是 PZT 與 PP 感測器的電導 RMSD 與抗壓強度關係，兩者的電導 RMSD-齡期曲線都能夠反映混凝土強度的成長，顯示 PP 感測器也能夠監測混凝土強度；且 PP 感測器的有效頻寬 (350 ~ 650 kHz) 比 PZT 感測器有效頻寬更寬，表示混凝土材料使用 PP 感測器監測強度比 PZT 感測器 (320 ~ 380 kHz) 更具有應用上的優勢。

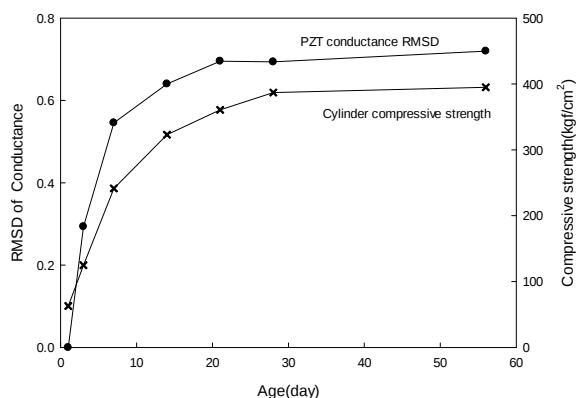


圖 22 PZT 感測器在 320 ~ 380 kHz 的電導 RMSD 與混凝土抗壓強度關係

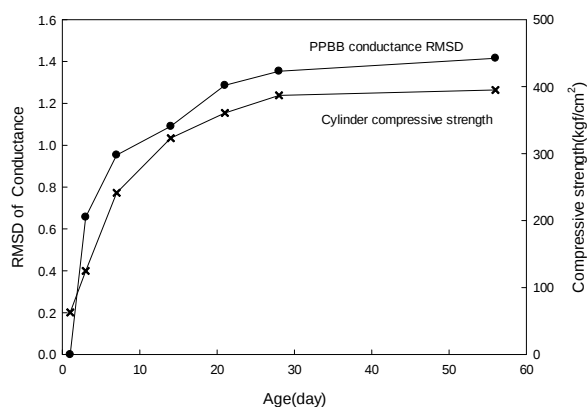


圖 23 PP 感測器在 350 ~ 650 kHz 的電導 RMSD 與混凝土抗壓強度關係

四、結 論

為減少壓電感測器與混凝土結構健康監測的聲阻抗與位移相容問題，這裡以自有製程和極化技術製造壓電水泥感測器，並埋入水泥砂漿和混凝土試體內，採用 EMI 技術來監測砂漿和混凝土的強度成長，試驗結果可歸納以下結論：

1. 壓電水泥的阻抗穩定期約在 90 天以後，且極化後的共振頻率隨齡期增加有向右偏移現象，這與壓電 PZT 的阻抗頻譜不受極化後齡期影響不同，故壓電水泥做為感測器或致動器的最佳齡期最好在極化後 90 天以上。
2. 壓電水泥感測器監測砂漿和混凝土的電導共振頻率會消失而成為平滑曲線，這是因為壓電水泥感測器與混凝土材料之間的相容性較好導致感測器振動產生的干擾較少，故在混凝土結構健康監測使用 PP 感測器取代 PZT 感測器有減少訊號誤判的優點。
3. 壓電水泥感測器監測混凝土材料抗壓強度，隨著量測頻率越高會有較大的電導值，且在特定頻率範圍的電導隨著齡期增加而減少，表示在這個頻率範圍的電導能夠反映混凝土強度-齡期關係。
4. 壓電水泥感測器監測水泥砂漿強度的有效頻率範圍為 400 ~ 650 kHz，混凝土則為 350 ~ 650 kHz；而 PZT 感測器對水泥砂漿和混凝土強度監測的有效頻率分別為 350 ~ 420 kHz 和 320 ~ 380 kHz，這顯示壓電水泥感測器具有較大的有效頻寬進行混凝土材料強度監測。
5. PP 感測器的電導 RMSD-齡期曲線能夠反映混凝土材料強度-齡期成長，顯示自製的壓電水泥具有監測混凝土強度的功能。
6. 與 PZT 感測器相比，PP 感測器監測強度的電導 RMSD 值較大，表示壓電水泥監測強度-齡期成長的敏感性較佳，顯示以 50% PZT 製作的壓電水泥有助於增加混凝土結構健康監測的準確性。

誌 謝

本研究承蒙科技部 MOST 106-2221-E-992-329 計畫贊助經費。

參考文獻

1. Chen, P. W. and Chung, D. D. L., "Concrete as a new strain/stress sensor," *Composites Part B*, Vol. 27B, pp. 11-23 (1996).
2. Wen, S., Wang, S., and Chung, D. D. L., "Piezoresistivity in continuous carbon fiber polymer-matrix and cement-matrix composites," *Journal of Materials Science*, Vol. 35, pp. 3669-3675 (2000).
3. Sun, M., Liu, Q., Li, Z., and Hu, Y., "A study of piezoelectric properties of carbon fiber reinforced concrete and plain cement paste during dynamic loading," *Cement Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1593-1595 (2000).

4. Wen, S. and Chung, D. D. L., "Cement-based materials for stress sensing by dielectric measurement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1429-1433 (2002).
5. Aizawa, S., Kakizawa, T., and Higashino, M., "Case studies of smart materials for civil structures," *Smart Materials & Structures*, Vol. 7, pp. 617-626 (1998).
6. 邱俊煒、黃培榮、楊世銘，「應用智慧型結構於減振與定位控制」，第六屆振動與噪音工程學術研討會，桃園大溪，5月(1998)。
7. Wang, D., Liu, J., Zhou, D., and Huang, S. L., "Using PVDF piezoelectric film sensors for in situ measurement of stayed-cable tension of cable-stayed bridges," *Smart Materials & Structures*, Vol. 8, pp. 554-559 (1999).
8. Soh, C. K., Tseng, K. K. H., Bhalla, S., and Gupta, A., "Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a RC bridge," *Smart Materials & Structures*, Vol. 9, pp. 533-542 (2000).
9. 李宏男、李軍、宋鋼兵，「採用壓電智能材料的土木工程結構控制研究發展」，中國科技論文 (<http://www.paper.edu.cn>)，第 1-13 頁 (2003)。
10. Song, G., Gu, H., and Claudio, O., "Structural health monitoring of a reinforced concrete frame using piezoceramic based smart aggregates," pp. 190-195, *World Forum on Smart Materials and Smart Structures Technology*, Spencer et al. (eds), Taylor and Francis Group, London (2008).
11. Yang, X. M. and Li, Z. J., "Cement-based piezoelectric sensor for monitoring of highway traffic I: Basic properties," *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, Vol. 30 suppl., pp. 413-417 (2010).
12. Song, G., Gu, H., Mo, Y. L., Hsu, T. T. C., and Dhonde, H., "Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers," *Smart Materials & Structures*, Vol. 16, pp. 959-968 (2007).
13. Tawie, R. and Lee, H. K., "Piezoelectric-based non-destructive monitoring of hydration of reinforced concrete as an indicator of bond development at the steel-concrete interface," *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 1697-1703 (2010).
14. 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*, Vol. 24, pp. 2522-2527 (2010).
15. Jabir, S. A. A. and Gupta, N. K., "Condition monitoring of the strength and stability of civil structures using thick film ceramic sensors," *Measurement*, Vol. 46, pp. 2223-2231 (2013).
16. Divsholi, B. S. and Yang, Y., "Combined embedded and surface-bonded piezoelectric transducers for monitoring of concrete structures," *NDT & E International*, Vol. 65, pp. 28-34 (2014).
17. Karthick, S. P., Muralidharan, S., Saraswathy, V., and Thangavel, K., "Long-term relative performance of embedded sensor and surface mounted electrode for corrosion monitoring of steel in concrete structures," *Sensors and Actuators B*, Vol. 192, pp. 303-309 (2014).
18. Lim, Y. Y., Kwong, K. Z. W., Liew, Y. H., and Soh, C. K., "Non-destructive concrete strength evaluation using smart piezoelectric transducer — A comparative study," *Smart Materials & Structures*, Vol. 25, pp. 085021 (2016).
19. Song, G., Gu, H., and Mo, Y. L., "Smart aggregates: multi-functional sensors for concrete structures—a tutorial and a review," *Smart Materials & Structures*, Vol. 17, No.3, pp. 033001 (2008).
20. Cahill, P., O'Keeffe, R., Jackson, N., Mathewson, A., and Pakrashi, V., "Structural health monitoring of reinforced concrete beam using piezoelectric energy harvesting systems," *7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, pp. 190-196, July 8-11, La Cité, Nantes, France (2014).
21. Dumoulin, C., Karaikos, G., and Deraemaeker, A., "Monitoring of crack propagation in reinforced concrete beams using embedded piezoelectric transducers," *AE Related NDE Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete*, pp. 161-172, J. G. M. Van Mier, G. Ruiz, C. Andrade, R.C. Yu and X.X. Zhang, Eds. (2015).
22. Xu, D., Banerjee, S., Wang, Y., Huang, S., and Cheng, X., "Temperature and loading effects of embedded smart piezoelectric sensor for health monitoring of concrete structures," *Construction and Building Materials*, Vol. 76, pp. 187-193 (2015).
23. Khante, S. N. and Gedam, S. R., "PZT based smart aggregate for unified health monitoring of RC structures," *Open Journal of Civil Engineering*, Vol. 6, pp. 42-49 (2016).
24. 王仲宇，「橋梁的健康診斷」，科學發展，434 期，第 18-23 頁 (2009)。
25. 范文綱，「橋梁基礎局部冲刷監測與安全預警系統」，碩士論文，中央大學，土木工程研究所 (2009)。
26. 張為光、李維峰、梅興泰、陳正興，「結構健康監測與損傷診斷」，土木水利，38 期，第 17-25 頁 (2011)。
27. 陳星宇，「壓電智能骨材於結構損傷評估之應用」，碩士論文，台北科技大學，土木與防災研究所 (2009)。
28. 林建輝，「智能骨材於結構損傷檢測之應用」，碩士論文，台北科技大學，土木與防災研究所 (2009)。
29. 蕭珮如，「應用壓電感測器於混凝土結構早強評估及健康診斷」，碩士論文，台北科技大學，土木與防災研究所 (2014)。
30. Dumoulin, C., Karaikos, G., and Deraemaeker, A., "Monitoring of crack propagation in reinforced concrete beams using embedded piezoelectric transducers," *VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, FraMCoS-8, J.G.M. Van Mier, G. Ruiz, C. Andrade, R.C. Yu and X.X. Zhang (eds), 2010.
31. Park, G., Sohn, H., Farrar, C. R., and Inman, D. J., "Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward," *Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, pp. 451-463 (2003).
32. Li, Z. J., Zhang, D., and Wu, K. R., "Cement-based 0-3 Piezoelectric composites," *Journal of American Ceramics Society*, Vol. 85, pp. 305-313 (2002).
33. Li, Z. J., 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).
34. Cheng, X., Huang, S., Chang, J., Xu, R., Liu, F., and Lu, L., "Piezoelectric and dielectric properties of piezoelectric ceramic-sulphoaluminate cement composites," *Journal of European Ceramic Society*, Vol. 25, pp. 3223-3228 (2005).
35. Huang, S., Chang, J., Lu, L., Liu, F., Ye, Z., and Cheng, X., "Preparation and polarization of 0-3 cement based piezoelectric composites," *Materials Research Bulletin*, Vol. 41, pp. 291-297 (2006).
36. 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，23 卷 1 期，第 1-10 頁 (2011)。

37. Jothi, S. T., Balamonica, K., Bharathi, P. C., Gopalakrishnan, N., and Murthy, S. G. N., "Non-Destructive Piezo electric based monitoring of strength gain in concrete using smart aggregate," *International Symposium of Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, pp. 1-10, September 15 - 17, Berlin, Germany (2015).
38. Li, Z., Zhang, D., and Wu, K., "Cement matrix 2-2 piezoelectric composite - Part I Sensory effect," *Materials and Structures*, Vol. 34, pp. 506-512 (2001).
39. Zhang, D., Li, Z. J., and Wu, K. R., "2-2 Piezoelectric cement matrix composite: Part II Actuator effect," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 825-830 (2002).
40. Li, Z. X., Yang, X. M., and Li, Z., "Application of cement-based piezoelectric sensors for monitoring traffic flows," *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 132, pp. 565-573 (2006).
41. Shen, B., Yang, X., and Li, Z., "A cement-based piezoelectric sensor for civil engineering structure," *Materials and Structures*, Vol. 39, pp. 37-42 (2006).
42. Xu, D., Cheng, X., Huang, S., and Jiang, M., "Electromechanical properties of 2-2 cement based piezoelectric composite," *Current Applied Physics*, Vol. 9, pp. 816-819 (2009).
43. Xu, D., Huang, S., and Cheng, X., "Electromechanical impedance spectra investigation of impedance-based PZT and cement/polymer based piezoelectric composite sensors," *Construction and Building Materials*, Vol. 65, pp. 543-550 (2014).
44. Pan, H. H., Lin, D. H., and Yang, R. H., "High Piezoelectric and dielectric properties of 0-3 PZT/cement composites by temperature treatment," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 72, pp. 1-8 (2016).
45. Pan, H. H., Wang, C. K., and Cheng, Y. C., "Curing time and heating conditions for piezoelectric properties of cement-based composites containing PZT," *Construction and Building Materials*, Vol. 129, pp. 140-147 (2016).
46. Liang, C., Sun, F. P., and Rogers, C. A., "Coupled electromechanical analysis of adaptive material systems—determination of the actuator power consumption and system energy transfer," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, pp. 12-20 (1994).
47. Bhalla, S. and Soh, C., "Structural health monitoring by piezo-impedance transducers," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 17, pp. 154-165 (2004).
48. Na, W. S. and Baek, J., "A review of the piezoelectric electromechanical impedance based structural health monitoring technique for engineering structures," *Sensors*, Vol. 18, pp. 1307 (2018).
49. Shin, S. W. and Oh, T. K., "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).
50. Wang, D. and Zhu, H., "Monitoring of the strength gain of concrete using embedded PZT impedance transducer," *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 3703-3708 (2011).
51. Giurgiutiu, V., *Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors*, London: Elsevier Inc. (2008).
52. Tawie, R. and Lee, H. K., "Monitoring the strength development in concrete by EMI sensing technique," *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1746-1753 (2010).

108 年 1 月 14 日	收稿
108 年 2 月 27 日	修改
108 年 3 月 6 日	接受