

使用壓電水泥感測器監測水泥砂漿應力-應變關係

Using Piezoelectric Cement Sensor to Monitor the Stress-Strain Relation of Cement Mortar

管家慶¹ 潘煌鏗² 林棟宏³

¹高雄科技大學土木工程系 碩士生 E-mail:3655222a1@gmail.com, 0935877672

²高雄科技大學土木工程系 教授

³高雄科技大學土木工程系 助理教授

摘要

結構健康監測(Structural Health Monitoring)常以壓電感測器如 PZT 壓電陶瓷或壓電薄膜做為監測工具進行結構行為或材料性質觀測，是一種非破壞檢測方法。針對混凝土結構，與傳統採用 PZT 壓電感測器(智慧骨材)進行結構健康監測和檢測不同，本研究嘗試以壓電水泥感測器來監測水泥砂漿的應力-應變關係。壓電水泥感測器是由體積各占 50%的 PZT 陶瓷和水泥混合壓制與極化製成的元件，將壓電水泥感測器埋入水泥砂漿試體，於齡期 28 天時進行抗壓強度試驗量測水泥砂漿的應力-應變曲線及量測壓電水泥感測器的阻抗，利用電導的 RMSD 曲線來判斷水泥砂漿的應力-應變關係，而比較組是 PZT 壓電感測器。結果發現，PZT 感測器在頻率 340 kHz ~ 385 kHz 和 780 kHz ~ 810 kHz 範圍的電導，會隨著載重的增加而減少；壓電水泥感測器則是在頻率 700 kHz ~ 1000 kHz 範圍具有相同規律，在這些頻率範圍內的電導可應用做為監測應力-應變曲線。經由比較水泥砂漿的應力-應變曲線與應力-電導 RMSD 曲線後發現，兩種感測器的 RMSD 值都呈現隨著載重增加而上升，與應力-應變曲線有相同的成長趨勢，顯示壓電水泥感測器與 PZT 感測器都具有判斷水泥砂漿應力-應變關係的能力，且壓電水泥感測器比 PZT 感測器具有較大的觀測頻率，即更適合應用在監測水泥砂漿的應力-應變行為。

關鍵字：結構健康檢測、水泥砂漿、壓電水泥感測器、應力-應變曲線、非破壞性試驗

一、前言

混凝土和水泥砂漿是土木工程上應用很廣泛的施工材料，大多數建築和土木基礎設施都是使用鋼筋混凝土，如摩天大樓（101 大樓，杜拜塔），大壩（中國三峽大壩，美國胡佛水壩，瑞士大迪克桑斯壩），橋梁（倫敦塔橋，金門大橋）等。但混凝土和水泥砂漿都會因使用年限產生劣化或遭受外部荷載、地震、洪水影響而有損壞，使混凝土構造物的結構強度下降，產生變形，導致結構物可能毀壞甚至倒塌。因此，在結構物的使用期間評估(監測與檢測)其健康狀況能及時發現損壞現況，可評估結構物是否適合進一步使用。

目前最常用來檢測混凝土材料強度的方法就是進行抗壓試驗，屬於破壞試驗方法之一，但使用強度破壞試驗的結果可能無法真實代表實際結構物的強度，該破壞性測試可能反映的是所提供材料的品質而不是結構物構件本身的行為或性質，故使用非破壞檢測方法來監測或檢測結

構與材料性質是常見方法。近幾年公共工程利用壓電材料(piezoelectric materials)為感測器(sensors)與致動器(actuators)對結構物進行監測與檢測的應用方興未艾，其中最為常見的感測器是鈦酸鉛(PZT)壓電感測器或智慧骨材(smart aggregate)。

針對 PZT 感測器使用在結構健康檢測的分析，大部分研究是利用電壓變化，或電阻、介電常數的改變來判斷結構或材料的性質，例如蕭珮如(2014) [1]把 PZT 壓電感測器埋入混凝土試體中，觀察在不同階段地震強度下之壓電振幅訊號與構架試體損壞位置及裂縫之關係，在每一次振動台試驗後，量測試體內之感測器互相傳遞電壓，經數值分析得到損壞指標即可判讀各階段試驗損壞程度，結果顯示電壓振幅會隨著早期強度或者試體的損壞程度的增加而逐漸變小。Ai (2016) [2]則製作黏合式和埋入式 PZT 感測器放入混凝土試體，經不斷敲擊試體表面，結果發現表面黏合的 PZT 感測器因不斷的受到衝擊而損壞，驗證埋入式感測器更能有效的持續進行結構的損傷監測；且埋入式監測可增加監測系統的靈活性和穩健性，降低整個量測系統的體積和成本[3]。

另外，近年研究發展出的機電阻抗法(Electro-mechanical impedance, EMI)來進行結構健康監測，因計算分析較為簡單[4]已漸為大家使用，例如 Negi (2018) [5]在混凝土的載重方向埋入 0° 、 45° 和 90° 的 PZT 貼片，並以 EMI 技術來量測混凝土強度，結果觀察到 PZT 貼片至少以傾斜方向 (45°) 放置才能有效獲取混凝土中強度的變化，而置於水平位置 (0°) 時，則有最佳結果。Wang (2011) [6]將瀝青包覆的 PZT 貼片埋入混凝土中，透過所監測的 PZT 導納(阻抗的倒數)和所測量的混凝土抗壓強度，並結合均方根偏差(RMSD)法來了解混凝土強度成長的相關性，結果在混凝土齡期 3、7、14、21、25、28 天時量測 PZT 電導(電阻的倒數)，觀察到混凝土的齡期越高，則 PZT 在共振頻率範圍的電導會逐漸向右偏移和電導值有降低的趨勢，判斷因混凝土的強度上升而壓抑了 PZT 震動，影響 PZT 結構的共振頻率，故能夠利用這個特性來監測和診斷結構健康狀況。

雖然 PZT 材料做為壓電感測器形成一個良好的結構健康監測系統，但是 PZT 壓電材料(陶瓷材料)本身的溫度係數、聲阻抗、材料損耗及材料潛變等影響材料行為的因素會和土木建築構件(RC 構件)有很大不同，所以為了使感測器的材料性質與水泥砂漿或混凝土接近，文獻[7-8]分析水泥基壓電機敏複合材料的製程、極化和相容性等問題，實驗結果顯示採用 PZT 介質和水泥基材料作為壓電複合材料，可以有效緩和壓電材料與混凝土本身結構材料之間的相容性問題且還可降低成本，而促成了水泥壓電複合材料的發展。

目前水泥基壓電材料已有 1-3 型、2-2 型、0-3 型，Dong (2005) [9]把 PZT 陶瓷搗成粉末後與卜特蘭第一型水泥拌合，並經極化過程製作出有壓電性質的 0-3 型水泥壓電複合材料，其好處是可製成任意形狀且比 1-3 型和 2-2 型更符合混凝土的材料性質。台灣在 2011 年已有能力製造 0-3 型水泥壓電複合材料[10]，發現以(加水)拌製及(乾粉)壓製製造的 0-3 型水泥壓電複合材料(壓電水泥)，試體的壓電應變常數 d_{33} 、機電耦合常數 K_t 、相對介電常數 ϵ 和電容 C 都會隨著 PZT 含量增加而增加。吳勝筆(2016) [11]把壓電水泥感測器(PP 感測器)及壓電陶瓷感測器(PZT 感測器)進行施加脈衝荷載試驗，得到兩者的輸出電壓會隨著受力增加而上升，顯示壓電水泥感測器(或致動器)和 PZT 感測器在結構健康監測應用都具有發展潛力。

為探討壓電水泥感測器在結構健康監測的應用潛力，本研究製作具有壓電性質的壓電水泥

感測器，將壓電水泥感測器埋入水泥砂漿內，利用機電阻抗法(EMI 技術)量測感測器的阻抗-頻譜關係，找出最佳的監測頻率，在最佳監測頻率範圍內計算電導 RMSD 曲線，並與水泥砂漿的應力-應變曲線比較，以達到能利用壓電水泥感測器監測混凝土材料應力-應變關係之目的。其中，PZT 感測器為對照組，水泥砂漿的齡期是 28 天，水泥砂漿每間隔 $0.1f_c'$ 應力量測感測器的阻抗-頻譜。

二、試驗計畫

2.1 壓電感測器製作

壓電水泥(代號 PP)組成是體積各 50%的鉛鈦酸鉛(PZT)介質與卜特蘭第 I 型水泥基材，製作程序是先將 PZT 搗碎採用通過 #100 篩停留於#200 篩(粒徑 $75\mu\text{m}\sim 150\mu\text{m}$)，按照配比將水泥和 PZT 粉末乾拌混合，再以行星式球磨機分散材料達到混合均勻，分散均勻的材料放入直徑 15 mm 的鐵製試體模內，利用 MTS 材料試驗機施加 80 MPa (14.13KN)壓應力來壓製試體。為讓試體不容易碎裂，將試體放入恆溫水槽以 90°C 蒸氣養護一天，因水泥的水化反應使試體固化具有適當強度；養護完成後，用研磨拋光機把試體研磨至 $2\text{ mm}\pm 0.5\text{ mm}$ 厚度，完成壓電水泥試體。為使 PP 試體具有壓電性質，對試體進行 140°C (溫度代號為 B)時間 30 分鐘的溫度處理，溫度處理完成後以導電銀膠塗滿試體表面完成電極製作，繼續再施以 140°C 的溫度處理(B 溫度)。進行二次溫度的 PP 試體(代號 PPBB)便可以施加電場進行極化，試體的極化條件是極化溫度 150°C ，極化電場 1.5 kV/mm ，極化時間 40 分鐘，完成極化程序的 PPBB 試體具有壓電性質($d_{33} > 100\text{ pC/N}$)，即完成壓電水泥感測器製作。

對照組的 PZT 感測器是體積 100%的鉛鈦酸鉛陶瓷(PZT)燒結體，試體直徑 12mm 厚度 2mm，不需要溫度處理，直接以導電銀膠製作電極。極化條件與壓電水泥相同，即極化環境為 150°C 、電場 1.5 kV/mm ，極化時間 40 分鐘。極化完成的試體具有壓電性質，可做為感測器(PZT 感測器)，圖 1 是完成極化之 PPBB 和 PZT 試體成品。

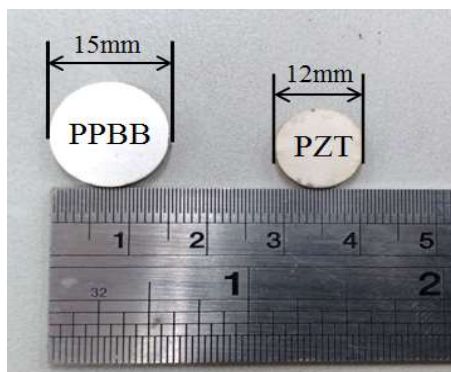


圖 1 極化後之 PPBB 和 PZT 試體

2.2 壓電性質量測

壓電感測器(PPBB 及 PZT)完成極化後隨齡期開始量測其壓電性質，量測時的環境條件是溫

度 25°C 和相對溼度 50%，圖 2 是兩種壓電感測器的壓電應變常數 d_{33} 。很明顯發現 PZT 壓電感測器的壓電應變常數幾乎固定(d_{33} 約 400 pC/N)，似乎不受齡期影響；PPBB 壓電感測器的壓電應變常數則會隨著齡期而增加，齡期在 70~90 天趨於穩定，穩定後的 d_{33} 約 100 pC/N。因壓電水泥於極化後 90 天壓電性質較穩定，故這裡採用齡期 90 天後的壓電水泥做為感測器(PPBB)，才能埋入水泥砂漿內來量測其阻抗-頻譜圖。

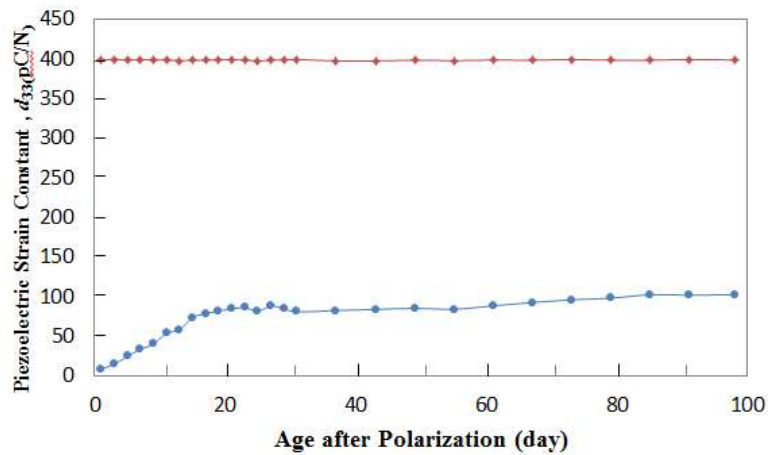


圖 2 PP 及 PZT 的齡期與壓電應變常數

2.3 感測器封裝

本研究是將壓電感測器直接埋入水泥砂漿內，為避免壓電感測器受到空氣和水的影響，這裡使用瀝青來封裝壓電感測器以便隔絕水氣。防水處理前，先將 PPBB 和 PZT 試體表面擦拭乾淨，以常溫導電銀膠連結試體電極與銅膠帶(做為導線)如圖 3，再以瀝青覆蓋感測器，最後用熱縮套管包覆整個銅膠帶以保護銅膠帶如圖 4。

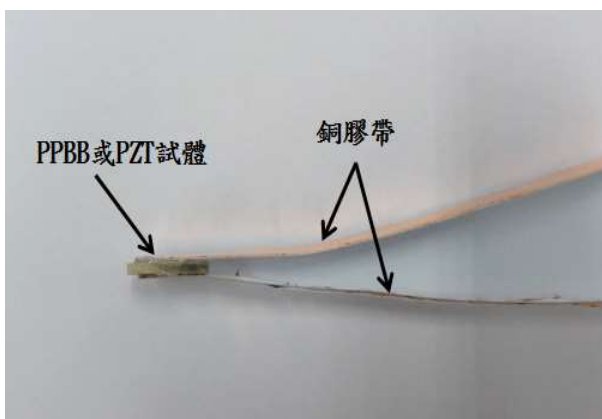


圖 3 瀝青封裝前之感測器

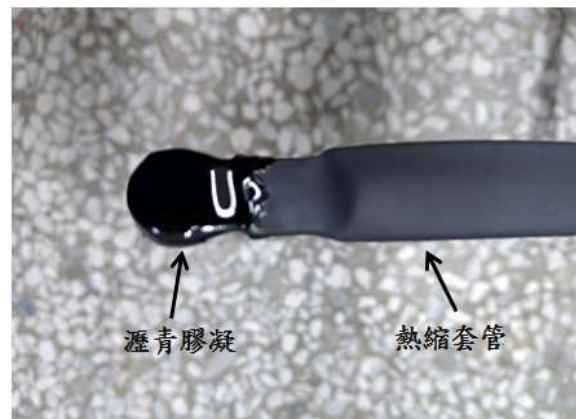


圖 4 瀝青封裝後之感測器

2.4 水泥砂漿試體製作

水泥砂漿試體是依照 ASTM C109 (CNS1010)水硬性水泥壘料抗壓強度檢驗法製作，使用卜

特蘭第 I 型水泥和標準砂(C109)製作試體，試體尺寸是 50mm 立方，水灰比為 0.475，水泥:砂為 1: 2.75，配比如表 1。水泥砂漿試體總共製作 3 組，每組 6 顆，第一組試體不埋入感測器直接進行抗壓強度試驗(獲得 f_c)，另外兩組試體則是分別埋入 PPBB 和 PZT 感測器。

2.5 感測器設置

本研究的 PPBB 感測器和 PZT 感測器設置在水泥砂漿中央，如圖 5 所示是位於水泥砂漿 25mm 的位置，圖 6 是感測器埋入試體的成品。

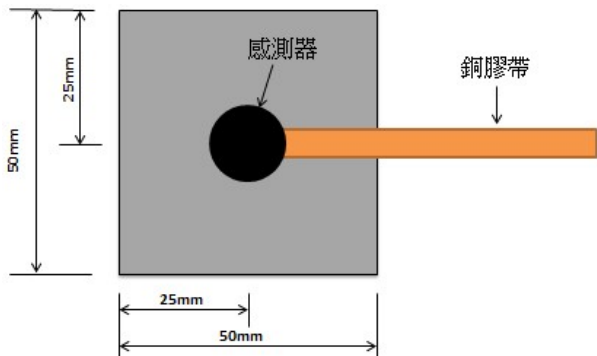


圖 5 水泥砂漿立方試體安裝感測器示意圖



圖 6 感測器埋入水泥砂漿試體成品

三、結果與討論

3.1 感測器封裝與阻抗

為了確認 PPBB 感測器和 PZT 感測器的性質是否穩定，觀測瀝青封裝前後的感測器之阻抗-頻譜圖。圖 7 為 PPBB 感測器在瀝青防水封裝前後的阻抗-頻譜圖，可以看出使用瀝青封裝會影響感測器的阻抗，封裝後的整體阻抗(紅線)會低於封裝前的阻抗(藍線)，且壓電水泥的共振頻率(位於 100 ~ 200 kHz)會在感測器封裝後隨之消失(沒有波峰)。圖 8 是 PZT 感測器使用瀝青封裝前後的阻抗-頻譜圖，可以發現和 PPBB 感測器有相同的情況，即封裝後的阻抗都會降低；且多個共振頻率的阻抗值也都降低許多，尤其在 200 kHz 附近的共振頻率之阻抗值下降幅度非常明顯，其中封裝前之共振頻率的阻抗約在 31 k Ω ，但在瀝青封裝後下降到約 4 k Ω 。

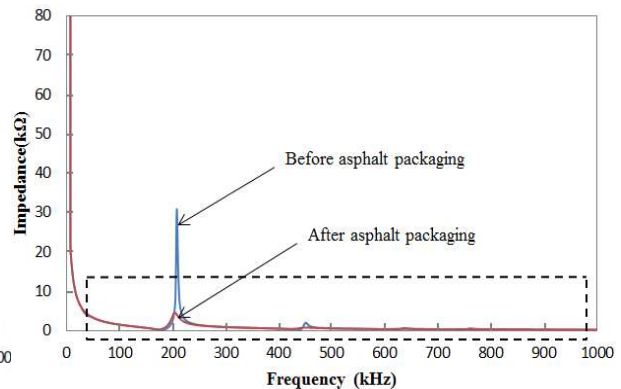
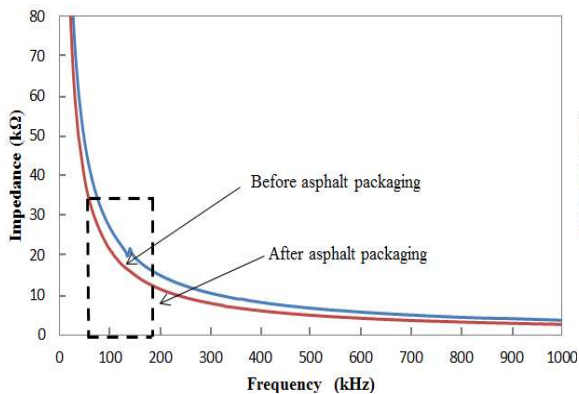


圖 7 封裝前後的 PPBB 感測器阻抗

圖 8 封裝前後的 PZT 感測器阻抗

3.2 水泥砂漿抗壓強度和載重

圖 9 是齡期為 28 天水泥砂漿的應力-應變圖，抗壓強度(f_c')為 37.3MPa，代號為 100%L。為獲得感測器埋入水泥砂漿之應力-阻抗，將加載階段分成 10 個，即分別為 0%L、10%L、20%L、30%L、40%L、50%L、60%L、70%L、80%L、90%L，每一個加載階段結束後進行持壓，並立即量測該加載階段之感測器的阻抗-頻譜，直到水泥砂漿試體破壞。

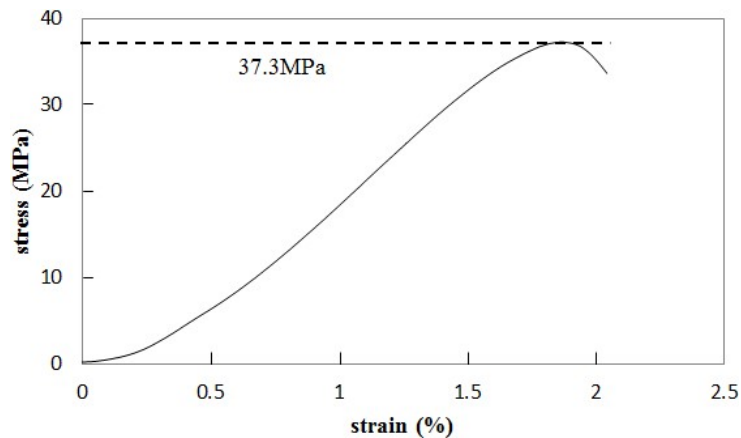


圖 9 水泥砂漿試體應力應變圖

3.3 水泥砂漿電導曲線

對水泥砂漿埋入壓電感測器的試體進行抗壓試驗時，由於加載到 90%L 應力時之感測器訊號有異常訊號，這可能是感測器受到水泥砂漿擠壓產生損壞，導致感測器訊號異常，故這裡只分析 0%L~80%L 加載階段的感測器阻抗。圖 10 為 PZT 感測器施加 0%L~80%L 載重時在頻率 0~1000 kHz 範圍的電導曲線，發現 PZT 感測器的電導曲線有數個明顯的波峰，為探討載重與電導關係，將頻率分成五個區段 A、B、C、D、E 進行討論，五個區段的頻率分別為區段 A: 0~200kHz、區段 B: 220~420 kHz、區段 C: 440~590 kHz、區段 D: 600~720 kHz、區段 E: 720~840 kHz，其餘頻率區段因電導有明顯不規則變化，故不分析。

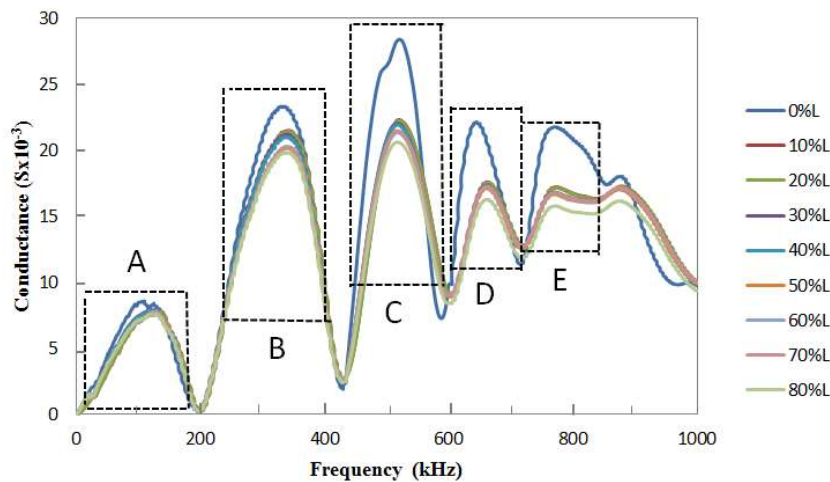


圖 10 PZT 感測器在水泥砂漿受 0%L ~ 80%L 載重時的電導曲線(0~1000 kHz)

圖 11 是圖 10 的區段 A(頻率 0 ~ 200k Hz)放大圖，發現此區在 130 kHz ~ 135 kHz 範圍的電導和載重有相關性，電導曲線會隨著載重的增加而逐漸降低，而其它頻率範圍的電導曲線可以看到彼此相互交錯沒有一定的規律，難以判斷其與載重關係規律，但是此區域(130 kHz ~ 135 kHz)僅有 5 kHz 的範圍有規律性，頻率範圍太窄，無法拿來在實際應用時使用，故此區段頻率不會進行電導監測分析。圖 12 是圖 10 之區段 B(頻率 220 ~ 420 kHz)的放大圖，經比較得到在 220 kHz ~ 340 kHz 和 385 kHz ~ 420 kHz 範圍內的載重-電導曲線有互相交錯現象，即電導曲線並不會因為載重增加而有規律性的變化，所以無法看出電導和載重的關聯性；然而，在 340 kHz ~ 385 kHz 範圍發現 PZT 感測器電導和載重大小的關聯性，在這段頻率的電導曲線會隨著載重增加而逐漸降低，在頻率 340 kHz 時的電導值會從 0%L 的 22.97×10^{-3} S 持續下降到 80%L 的 19.78×10^{-3} S，在頻率 385 kHz 時的電導值則從 0%L 的 15.84×10^{-3} 下降到 80%L 的 12.10×10^{-3} S，載重-電導曲線變化有規律性，故這區段的頻率可做為監測水泥砂漿應力的量測範圍。

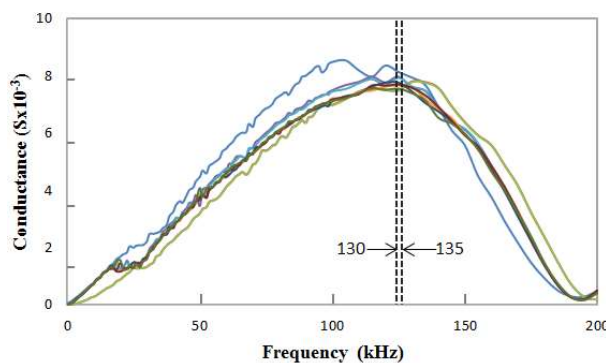


圖 11 為圖 10 之區段 A 的電導曲線放大圖

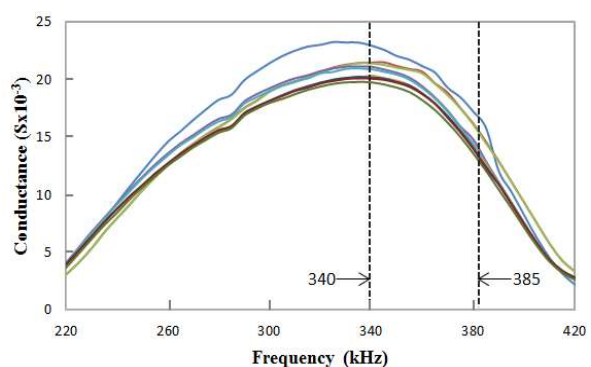


圖 12 為圖 10 之區段 B 的電導曲線放大圖

依序將圖 10 之區段 C、D、E 頻率範圍放大進行載重-電導曲線關係比較，發現只有區段 E 在 780 kHz ~ 810 kHz 之間的 PZT 感測器電導和載重有關聯性，具有電導曲線會隨著載重增加而逐漸降低，例如在頻率 780kHz 時的電導值從 0%L 的 21.74×10^{-3} S 依序下降到 80%L 的 15.75×10^{-3} S，在頻率 810 kHz 時的電導值則從 0%L 的 20.26×10^{-3} S 降到 80%L 的 15.25×10^{-3} S，即載重-電

導曲線有規律的變化，所以可以把這段頻率作為監測應力的量測範圍。

圖 13 是壓電水泥感測器(PPBB)在頻率 0~1000 kHz 範圍之加載 0%L~80%L 的電導曲線，可以發現 PPBB 感測器不像 PZT 感測器會有起伏較大的電導峰值，整段頻率範圍都呈現較為平緩的曲線，且 0%L~80%L 的電導值都會隨著頻率上升而增加。將整段頻率範圍分成四個區段 A、B、C、D 進行討論，四個區段的頻率分別為 A: 0~200 kHz、B: 200~500 kHz、C: 500~700 kHz、D: 700~1000 kHz。

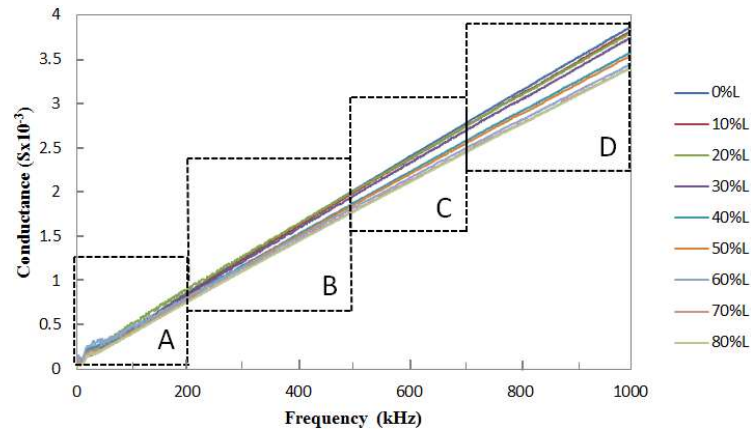


圖 13 壓電水泥感測器在水泥砂漿受 0%L~80%L 載重時的電導曲線(0~1000 kHz)

經比較圖 13 之 PPBB 感測器的四個區段頻率後，發現只有區段 D (頻率範圍 700~1000 kHz) 的電導曲線的排列順序和施加载重的順序完全一致，即在此區段的電導曲線會隨著載重增加逐漸降低，載重-電導曲線具有規律性，所以可以把這段頻率作為監測水泥砂漿應力的量測範圍。

3.4 以電導 RMSD 法監測水泥砂漿應力

為了探討壓電感測器的電導曲線與水泥砂漿在不同載重時的應力關聯，本研究採用均方根差 (RMSD) 來計算在監測頻率範圍的感測器電導，RMSD 的公式如下

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

其中 G_i 為感測器放入水泥砂漿試體之各個頻率的電導值、 G_i^1 為感測器放入水泥砂漿試體前之各個頻率的電導、 n 表示掃描頻率數量。將兩種壓電感測器(PZT 和 PPBB)出現電導與載重有規律性的頻率範圍之電導值做為計算電導的 RMSD，所量測的電導值代入 RMSD 公式後，來評估特定頻率區間之電導曲線和水泥砂漿承受載重的相關性。

圖 14 為 PZT 感測器在頻率 340 kHz~385kHz 時的 RMSD，可以發現隨著載重增加，電導的 RMSD 值也會跟著增加。圖 15 為 PZT 感測器在頻率 780kHz~810kHz 時的 RMSD，也可以發現隨著載重的增加，其 RMSD 值也會跟著上升，且可以注意到圖 15 在 0%L 和 80%L 時的 RMSD 值有較明顯的上升，其它載重的 RMSD 值則變化不大。由上述比較結果得知，若要使用 PZT 壓

電感測器來監測水泥砂漿的應力，可使用 340kHz~385 kHz 與 780 kHz~810 kHz 頻率範圍，尤其在 340kHz~385 kHz 監測頻率範圍內的電導 RMSD 與水泥砂漿的應力關係約略呈現線性關係，採用此頻率範圍來監測水泥砂漿應力較為適當。

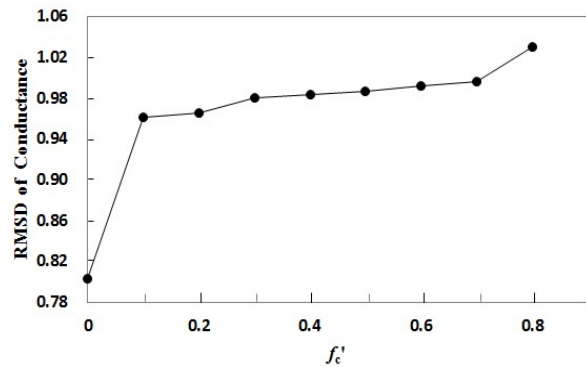
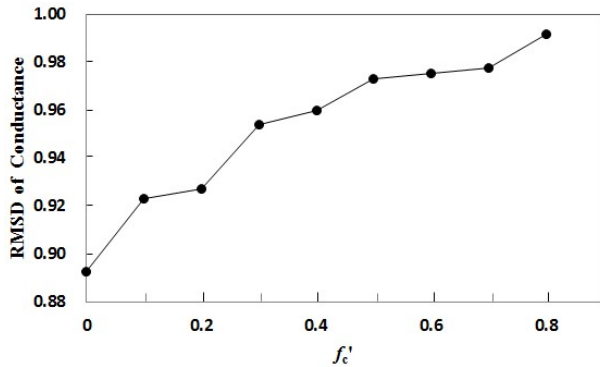


圖 14 PZT 感測器的 RMSD (340 kHz ~ 385kHz) 圖 15 PZT 感測器的 RMSD (780kHz~810kHz)

由圖 13 得知，壓電水泥感測器 (PPBB) 在頻率 700 kHz ~ 1000 kHz 的電導曲線和載重有規律性，為了確保此區域真的能夠準確用來監測水泥砂漿應力，將此區段頻率分成兩段區域，分別是 700 kHz ~ 850 kHz 和 850 kHz ~ 1000 kHz，用此兩段區域頻率範圍的電導值分別計算其 RMSD 來評估特定頻率區間電導曲線和水泥砂漿應力關聯性。圖 16 為 PPBB 感測器在頻率 700 kHz ~ 850 kHz 時的 RMSD，而圖 17 則是 PPBB 感測器在頻率 850 kHz ~ 1000 kHz 時的 RMSD，可以發現兩者區段頻率都有隨著載重增加之 RMSD 值也隨之增加趨勢，其中在 20%L 至 40%L 時的 RMSD 值有明顯增加，表示水泥砂漿承受 $0.2f_c' \sim 0.4f_c'$ 載重時的電導值有明顯的下降，這可能是在這個載重階段的水泥砂漿開始有大量微裂縫產生所導致，這個證據顯示使用壓電水泥感測器量測阻抗變化 (EMI 技術) 所計算的 RMSD 能夠有效的反應水泥砂漿在加載過程的電導曲線變化，可用來監測壓電水泥感測器的應力-應變關係。

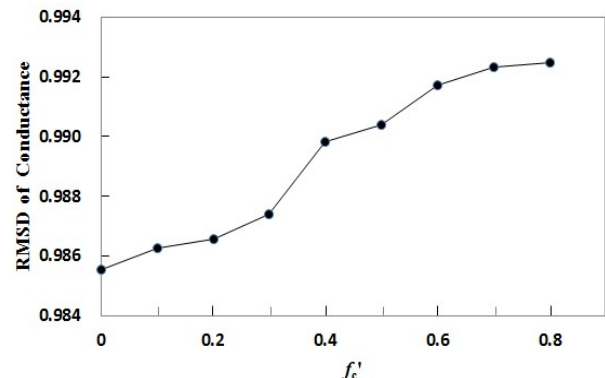
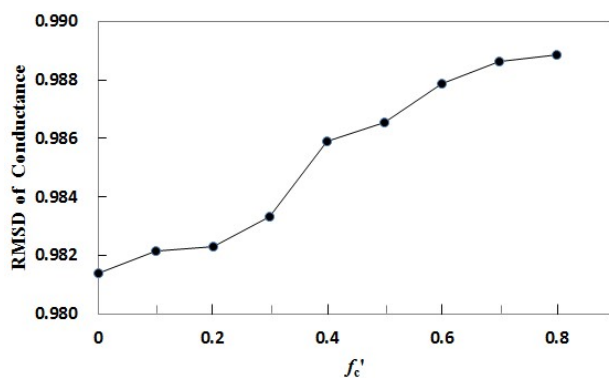


圖 16 PPBB 感測器的 RMSD (700kHz~850kHz) 圖 17 PPBB 感測器的 RMSD (850 kHz~1000 kHz)

四、結論

使用自行製作之壓電水泥感測器 (PPBB 感測器) 埋入水泥砂漿內部，比較組為 PZT 壓電感測器，量測水泥砂漿在不同載重時之感測器阻抗頻譜，計算感測器的電導 RMSD 並用來監測水泥

砂漿應力-應變歷程，研究結果歸納如下：

1. PPBB 感測器其壓電性質會在極化 90 天後達到穩定，而 PZT 感測器極化後壓電性質較不會隨著齡期而改變。
2. 使用 PZT 壓電感測器做為監測水泥砂漿應力-應變發展，可採用適用頻率在 340 kHz ~ 385 kHz 和 780 kHz ~ 810 kHz 範圍來計算電導的 RMSD，其中 340 kHz ~ 385 kHz 範圍的載重-電導 RMSD 曲線比較能夠反映水泥砂漿的應力。
3. 使用壓電水泥感測器來監測水泥砂漿應力-應變關係時，採用適用頻率 700 kHz ~ 1000 kHz 範圍的載重-電導 RMSD 曲線能夠反映水泥砂漿的應力-應變關係，尤其在 0.2 fc' ~ 0.4 fc' 載重時的電導 RMSD 值有明顯增加，這能夠反映這個載重階段的水泥砂漿因微裂縫產生的應力-應變行為。
4. 與 PZT 壓電感測器比較，壓電水泥感測器的電導曲線成長並沒有明顯的波峰，而是呈現較為平緩的曲線，比較容易有規律呈現電導與頻率關係；且相較於 PZT 壓電感測器有更大的適用頻率範圍能夠用來反映水泥砂漿應力-應變關係。
5. 使用兩種壓電感測器進行電導 RMSD 分析，發現在特定適用頻率範圍的電導 RMSD 值都會隨著載重增加而逐漸上升，但是 PZT 壓電感測器在適用頻率範圍不同的 RMSD 結果所呈現的載重-電導曲線趨勢並不一致，而壓電水泥感測器在不同適用頻率時的載重-電導 RMSD 曲線則呈現較為相同的行為，顯示使用壓電水泥感測器更能有效監測水泥砂漿的應力-應變。

參考文獻

1. 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，臺北科技大學，台北 (2014)。
2. Ai, D., Zhu, H. and Luo, H., "Sensitivity of Embedded Active PZT Sensor for Concrete Structural Impact Damage Detection", *Construction and Building Materials*, Vol. 111, pp. 348-357 (2016) .
3. Chen, J., Ren, Z., Li, P. and Song, G., "Piezo-Based Wireless Sensor Network for Early-Age Concrete Strength Monitoring", *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 127, pp. 2983-2987 (2016).
4. Talakokula, V., Bhalla, S. and Gupta, A., "Monitoring early hydration of reinforced concrete structures using structural parameters identified by piezo sensors via electromechanical impedance technique", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 99, pp. 129-141 (2018) .
5. Negi, P., Chakraborty, T., Kaur, N. and Bhalla, S., "Investigations on Effectiveness of Embedded PZT Patches at Varying Orientations for Monitoring Concrete Hydration Using EMI Technique" , *Construction and Building Materials*, Vol. 169, pp. 489-498 (2018) .
6. Wang, D. and Zhu, H., "Monitoring of The Strength Gain of Concrete Using Embedded PZT Impedance Transducer", *Construction and Building Materials*, Vol. 25 No. 9, pp. 536-544 (2011).
7. 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).

8. 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，Vol. 5，pp. 2-11 (2002)。
9. Dong, B. and Li, Z., “Cement-based piezoelectric ceramic smart composites”, Composites Science and Technology, Vol.65, pp.1363-1371 (2005).
10. 潘煌鏗、陳彥年，0-3 型 PZT 水泥基壓電複合材料製程與極化行為，中國土木水利工程學刊，Vol. 23, pp. 1-10 (2011)。
11. 吳勝筆，「壓電水泥感測器應用於 RC 梁柱接頭即時監測」。碩士論文，高雄應用科技大學，高雄 (2016)。