

壓電水泥感測器應用於 RC 結構物鋼筋腐蝕監測

Using piezoelectric cement sensors to monitor rebar corrosion in reinforced concrete

柯孟辰¹ 潘煌鏗² 蘇名浥³

¹ 國立高雄科技大學土木工程系 研究生, f107141122@nkust.edu.tw

² 國立高雄科技大學土木工程系 教授

³ 國立高雄科技大學土木工程系 大專生

科技部計畫編號：MOST-108-2221-E-992-008-MY3

摘要

本研究使用壓電水泥感測器來監測混凝土內的鋼筋腐蝕變化，並以 PZT 感測器作為對照組。壓電水泥是體積比 50% 的銦鈦酸鉛(PZT)與 50% 的水泥混合而成的 0-3 型水泥壓電複合材料，經過電場極化和封裝製成壓電感測器(PEC 感測器)。將#4 鋼筋置入於直徑為 100mm、高度為 200mm 的混凝土圓柱試體，透過 NaCl 水溶液與直流電將試體進行加速腐蝕試驗，由重量損失法得知鋼筋的腐蝕程度；另外，試體埋入壓電水泥感測器，運用機電阻抗(EMI)技術進行鋼筋的腐蝕監測，找出感測器適合觀測鋼筋腐蝕程度的頻率。試驗結果指出，壓電水泥感測器的適用頻率在 1200 ~ 2000 kHz，比 PZT 感測器介於 300 ~ 400 kHz 和 500 ~ 570 kHz 範圍的頻率更為寬廣。利用適用頻率範圍內的電導均方根差(RMSD)和鋼筋腐蝕程度比較，發現 PEC 和 PZT 感測器的電導 RMSD 值都會隨著腐蝕增加而增加，增加比例約與鋼筋重量損失率相符。最後，將感測器電導 RMSD 與腐蝕重量損失率進行迴歸，結果發現壓電水泥感測器用於監測混凝土內鋼筋腐蝕的能力優於 PZT 感測器。

關鍵字：壓電感測器、鋼筋混凝土、腐蝕、機電阻抗法、結構健康監測

一、前言

土木工程中，鋼筋腐蝕為影響結構物耐久性的主要因素之一，鋼筋混凝土結構物會因為氯離子、二氧化碳及水分的入侵造成鋼筋腐蝕，膨脹的鏽蝕氧化生成物會對結構物造成破壞，折減結構物之使用年限並造成結構安全的疑慮，因此 RC 結構物對於鋼筋腐蝕的測定及評估極為重要。在鋼筋腐蝕量測中準確度較高的檢測法為破壞性的檢測法—重量損失法，但因其直接量測鋼筋腐蝕所損失的重量，量測過程會對結構物造成一定的損傷，因此有必要尋找可行的非破壞檢測方法。

非破壞檢測的方法有很多，包括放射線檢測法、超音波檢測法、紅外線檢測法、電磁波檢測法等，是一種不會影響結構物的使用功能及運作狀態的監測技術。隨著壓電材料(piezoelectric materials)的發展，利用電壓(voltage)、電阻(resistance)、介電常數(dielectric constant)、波動傳播(wave propagation)、機電阻抗(electro-mechanical impedance, EMI) [1] 技術都是有效的非破壞性監測方法；而銦鈦酸鉛(lead zirconate titanate, PZT)壓電陶瓷能靈敏偵測極其微弱的機械振動，並

將其轉換成訊號，且陶瓷具有抗腐蝕性、耐熱性、抗壓强度高且量測簡單等優點，常用於做為結構健康監測(structural health monitoring, SHM)之感測器(sensor)使用。例如 Demi Ai [2]等人，利用 PZT 感測器埋入或是表面貼合的方式對混凝土梁進行損傷檢測，觀察裂縫損傷對電導的影響，發現感測器距離損傷越靠近靈敏度越高，埋入的感測器相比於表面貼合的感測器靈敏度更好。Weijie Li [3]等人將 PZT 感測器黏貼在鋼片上進行腐蝕監測，發現隨著腐蝕的進行，感測器的電導峰值頻率呈線性減小，可以與鋼片的厚度損失進行定量分析。Visalakshi Talakokula [4]等人將 PZT 感測器黏貼於鋼筋表面埋入混凝土試體內監測鋼筋腐蝕變化，透過電導的變化建立數學模型進行腐蝕的評估。

然而在使用 PZT 壓電感測器進行監測混凝土結構時，會因為 PZT 壓電陶瓷與混凝土的材料特性如力學行為、熱膨脹反應及聲阻抗(acoustic impedance)等具有不小的差異，可能會在監測時產生協調性(compatibility)的問題，導致監測準確性降低。例如進行阻抗分析時，PZT 壓電感測器所量測的頻譜曲線擁有多個明顯的波峰波谷，導致 PZT 壓電感測器可進行分析的頻率範圍會依照波峰位置被分成許多段落，可得使用於訊號分析的頻率範圍較少，且會因為量測環境變化產生頻譜曲線的頻率改變，因此會使感測器的準確度下降並容易產生誤差。因此在 2001 年，Li [5]提出以水泥為基材(matrix)，PZT 陶瓷為介質(inclusion)的 0-3 型水泥壓電複合材料來解決壓電感測器使用在混凝土的介面不相容問題。已知研究結果[6-8]指出，經過溫度處理和電場極化的 0-3 型水泥壓電複合材料具有壓電性質，可稱為壓電水泥(piezoelectric cement)，已可使用在混凝土的結構健康檢測上。本研究以壓電水泥做為感測器，進行鋼筋混凝土的鋼筋腐蝕監測，結果並與 PZT 感測器比較。

二、試驗計畫

2.1 壓電感測器

2.1.1 壓電感測器製程

壓電水泥感測器為採用 0-3 型之水泥壓電複合材料，由體積比各 50%的水泥及 PZT 陶瓷所組成，使用 I 型卜特蘭水泥作為膠結材，PZT 作為介質。將 PZT 陶瓷搗碎成粉狀，選用粒徑 75 μm ~150 μm 的 PZT 與水泥依照配比進行乾拌混合，再以行星式球磨機進行均勻混合。混合後，置入直徑 15mm 的試體模內，使用 MTS 萬能試驗機施加 80MPa 壓力將混合料壓製成錠粒(PEC 試體)。將壓製之試體於溫度 90 $^{\circ}\text{C}$ 的恆溫水槽進行 24 小時水氣養護。當試體硬固後從恆溫水槽取出，再將 PEC 試體研磨至厚度 2mm。PEC 試體以導電銀膠做為電極，在製作電極的前後以 140 $^{\circ}\text{C}$ 進行兩次溫度處理[8]，將試體放入 150 $^{\circ}\text{C}$ 的油槽內以 1.5kV/mm 極化電場進行 40 分鐘的極化，製成壓電水泥感測器(PEC 感測器)。

對照組 PZT 感測器為鉛鈦酸鉛陶瓷燒結體，直徑 12mm 厚 1.8mm。將 PZT 燒結體以導電銀膠製作電極，無須經過溫度處理，並以與壓電水泥相同條件進行極化，即溫度 150 $^{\circ}\text{C}$ 、電場 1.5kV/mm，極化時間 40 分鐘。極化完成的試體具有壓電性質，成為感測器(PZT 感測器)。圖 1 是極化後的 PEC 和 PZT 試體。

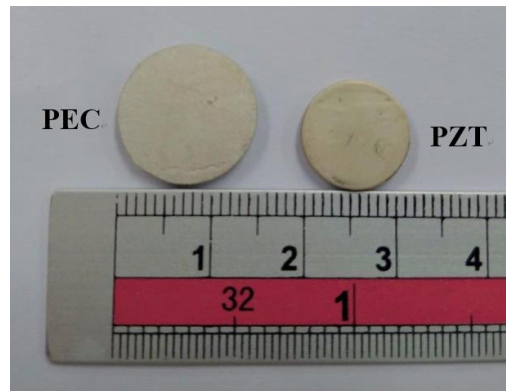


圖 1 感測器

2.1.2 壓電性質量測

PEC 壓電感測器和 PZT 壓電感測器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} ，取兩種壓電感測器各三顆劃出平均線。由圖 2 可以發現，PZT 壓電感測器的 d_{33} 在極化後固定約為 400pC/N，似乎不受齡期影響；PEC 壓電感測器的 d_{33} 則會隨著齡期而增加，在齡期 90 天左右趨於穩定於 100pC/N。因壓電水泥於極化後 90 天壓電性質較穩定，故本實驗採用齡期 90 天後的壓電水泥以環氧樹脂進行封裝，再埋入鋼筋混凝土試體內來進行腐蝕監測。

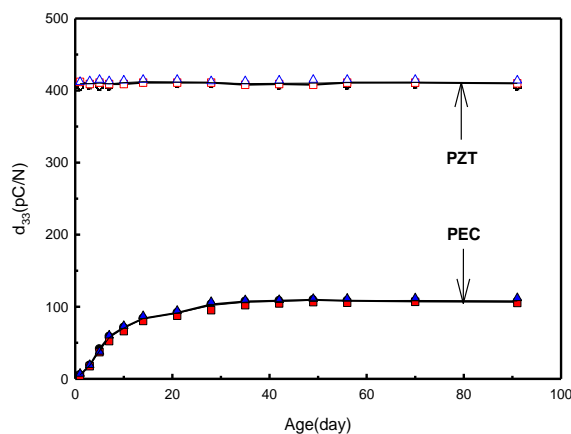


圖 2 感測器壓電應變常數-齡期

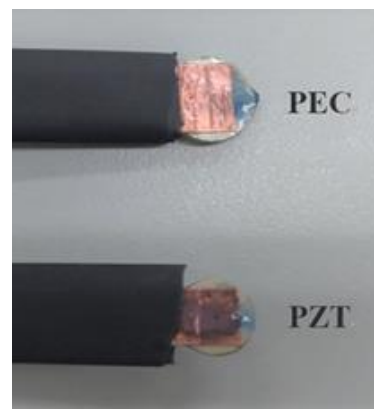


圖 3 感測器封裝

2.1.3 感測器封裝

為避免壓電感測器受到空氣和水的影響，本研究使用環氧樹脂來封裝壓電感測器以便隔絕水氣。防水處理前，先將 PEC 和 PZT 感測器表面擦拭乾淨，以銅膠帶做為導線，利用常溫導電銀膠黏結試體電極與銅膠帶如圖 3，再以環氧樹脂覆蓋感測器，最後以熱縮套管包覆銅膠帶加以保護如圖 3 所示。

2.2 鋼筋混凝土試體與腐蝕試驗

2.2.1 試驗材料與配比設計

本研究所使用之水泥為 I 型卜特蘭水泥，細粒料來自里港天然砂，比重為 2.64，吸水率 2.1%，細度 2.59，粗粒料來自里港天然石，比重為 2.66，吸水率 0.8%，細度 6.14。鋼筋則使用東和鋼鐵公司所生產之 #4 竹節鋼筋。混凝土配比如表 1 所示。

表 1 混凝土配比(kg/m³)

水	水泥	細粒料	粗粒料
196.9	312.7	760.4	1057.3

2.2.2 試體設計

將長 200mm 的 #4 竹節鋼筋，鑲入 160mm 至直徑 100mm，長 200mm 的混凝土圓柱試體如圖 4 所示。將鋼筋混凝土試體分為安裝感測器與未安裝感測器兩種試體，若試體有安裝感測器則分別將 PZT 與 PEC 感測器各一埋入混凝土圓柱試體中，埋入試體深度 100mm，距離鋼筋 10mm 處。

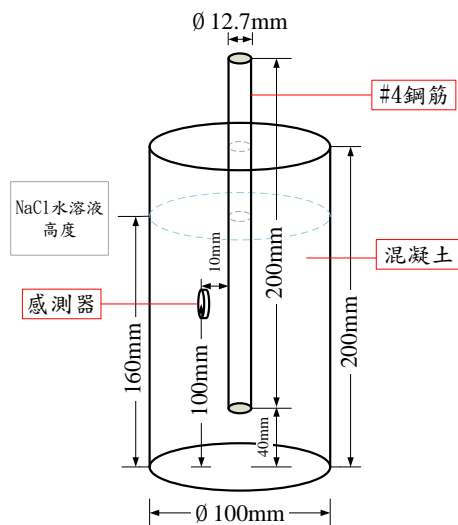


圖 4 試體設計圖

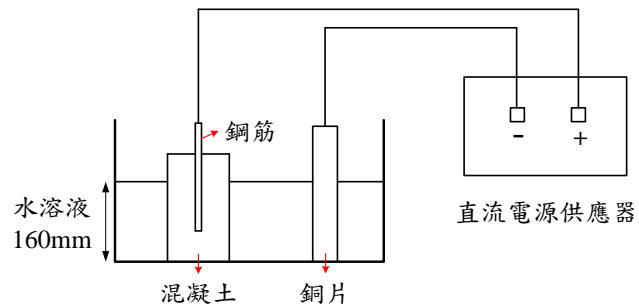


圖 5 加速腐蝕試驗

2.2.3 試驗方法

將澆置完成的鋼筋混凝土試體以飽和石灰水養護 7 天後，如圖 6 所示將試體浸入 3.5% 之 NaCl 水溶液中 160mm，以串連的方式連接直流電源供應器，施加電壓 15V 加速鋼筋腐蝕(圖 7)。加速鋼筋腐蝕之齡期分別為 1、2、3、5、7 和 9 天，到達齡期時將有安裝感測器的鋼筋混凝土試體，以阻抗分析儀量測埋入壓電感測器的電導頻譜(圖 8)；而未安裝壓電感測器的鋼筋混凝土試體，取出試體內的鋼筋並利用重量損失法求得鋼筋的腐蝕率，到達一定的通電天數，

將試體破壞並取出鋼筋，最後將鋼筋除鏽及秤重以得到實際鋼筋的重量損失，各齡期取三個試體進行重量損失試驗。



圖6 試體照片



圖7 加速腐蝕試驗照片



圖8 阻抗分析儀

三、結果與討論

3.1 感測器封裝阻抗變化

為了追蹤感測器的性質是否穩定，會在感測器在黏貼銅膠帶前、環氧樹脂封裝前後和埋入混凝土試體後第一天量測感測器阻抗頻譜。如圖9所示，由於隨著封裝的進行，感測器會因為銅膠帶與環氧樹脂所拘束，邊界條件會由自由狀態轉變為受限狀態[9]，阻抗會呈現下降的趨勢。而如圖9所示 PEC 感測器的共振峰會因埋入混凝土試體而消失；如圖10所示 PZT 感測器的共振峰雖沒有如 PEC 感測器消失，但也會隨著封裝和埋入混凝土試體而逐漸變小。

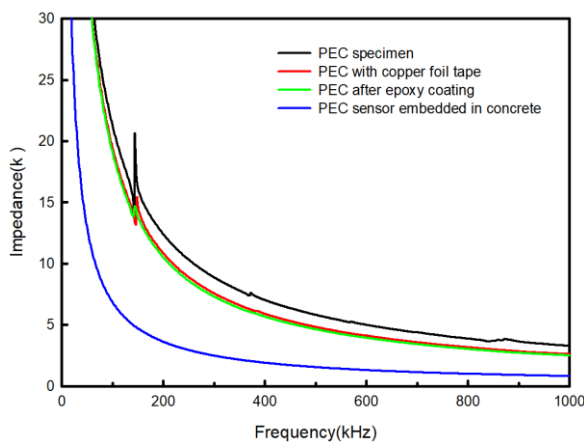


圖9 封裝前後的PEC感測器阻抗

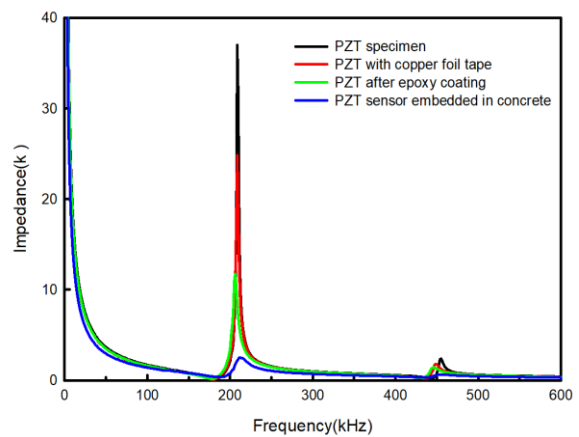


圖10 封裝前後的PZT感測器阻抗

3.2 加速腐蝕時間與鋼筋混凝土試體外觀變化

使用肉眼來觀察鋼筋腐蝕狀況，圖 11 是鋼筋混凝土試體隨著加速腐蝕時間(腐蝕齡期)所產生的外觀變化，從左至右是加速腐蝕前、腐蝕 1 天、2 天、3 天、5 天、7 天和 9 天。可以發現當加速腐蝕進行直到第 5 天時，試體外觀才出現明顯的鏽蝕生成物，難以發現鋼筋混凝土初期的腐蝕現象。



圖 11 試體在腐蝕前和加速腐蝕 1、2、3、5、7、9 天(由左至右)的變化圖

3.3 加速腐蝕時間與鋼筋腐蝕重量損失

鋼筋會隨著加速腐蝕試驗的進行而產生腐蝕，銹銹等氧化鐵的產生會導致鋼筋本體的重量損失。將鋼筋混凝土進行試體加速腐蝕後，到達腐蝕齡期 1、2、3、5、7 和 9 天時，取 3 顆試體進行重量損失試驗。根據試驗所得數據繪製成圖 12，橫軸為加速腐蝕的齡期，縱軸為鋼筋的重量損失率，圖中之點代表每個試體之鋼筋實際重量損失，每個齡期各 3 顆；實線為各齡期之平均重量損失率。如圖 12 所示，鋼筋之重量損失率(腐蝕程度)與加速腐蝕時間呈高度正相關。

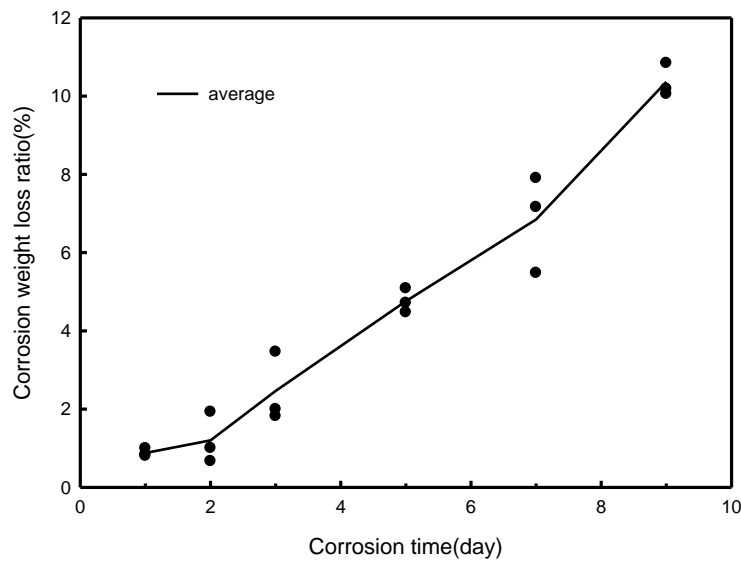


圖 12 腐蝕時間與鋼筋重量損失率

3.4 加速腐蝕時間與感測器電導頻譜

將感測器埋入鋼筋混凝土後並進行試體加速腐蝕後，量測腐蝕齡期 1、2、3、5、7 和 9 天電導頻譜。首先是 PZT 感測器的電導頻譜與鋼筋混凝土腐蝕齡期的關係，圖 13 是 PZT 感測器在 20~1000kHz 頻率範圍的頻譜曲線，從圖 13 可以發現由於感測器與混凝土的性質差異，PZT 感測器的電導曲線受到影響導致不同量測頻率的電導值產生激烈變動，不同齡期的電導曲線重疊位置多，能顯示齡期影響的電導曲線皆位於波峰附近。圖 13 可以發現五個明顯的波峰，從波峰的最大峰值可以觀察出隨著腐蝕齡期電導值有下降的趨勢，而峰谷則沒有相對應的變化。腐蝕齡期的電導峰值下降趨勢與鋼筋腐蝕重量損失率的增加有相似的趨勢，故在波峰出現的頻率範圍量測的 PZT 感測器電導做為評估腐蝕程度的依據具有可靠性。本研究選擇第二波峰中 300 ~ 400 kHz 和第三波峰中 500 ~ 570 kHz 這兩段齡期-電導曲線有規律性關係之頻率範圍(適用頻率)進行計算電導均方根誤差值(RMSD)，以探討鋼筋混凝土的電導-腐蝕齡期-腐蝕程度關係。

PEC 感測器的電導頻譜與鋼筋混凝土腐蝕齡期的關係結果在圖 14，頻率在 20~2000kHz 之間，從圖 14 中可以發現，PEC 感測器的電導頻譜曲線較為平緩且沒有太大的起伏(波峰)，量測頻率越高所測得的電導越大。從圖 14 中可得知，隨著腐蝕齡期的增加，PEC 感測器的電導有明顯下將的趨勢，1200kHz 後的電導下降排序與腐蝕齡期順序一致，因此本研究選擇用 1200~2000 kHz 這段齡期-電導曲線有規律性關係之頻率範圍(適用頻率)進行電導 RMSD 計算，以探討鋼筋混凝土的電導-腐蝕齡期-腐蝕程度關係。

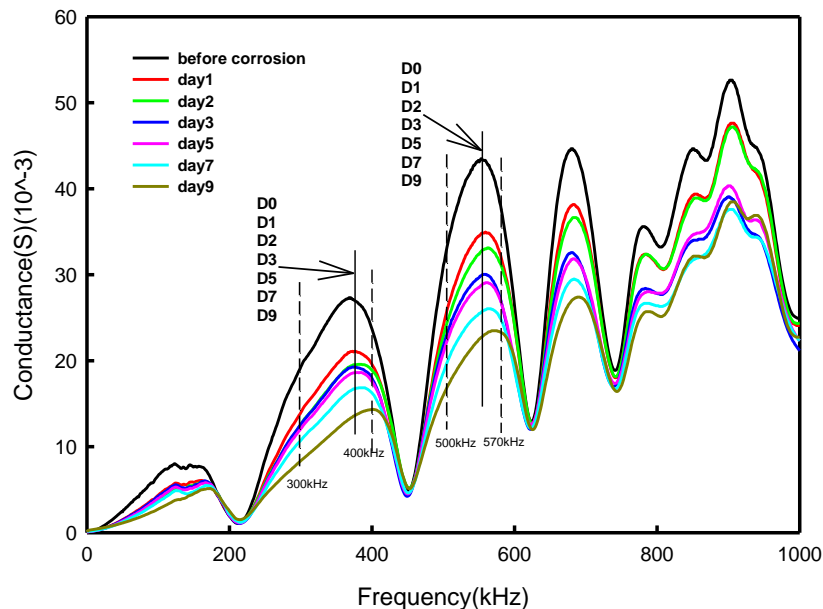


圖 13 腐蝕齡期-PZT 電導曲線

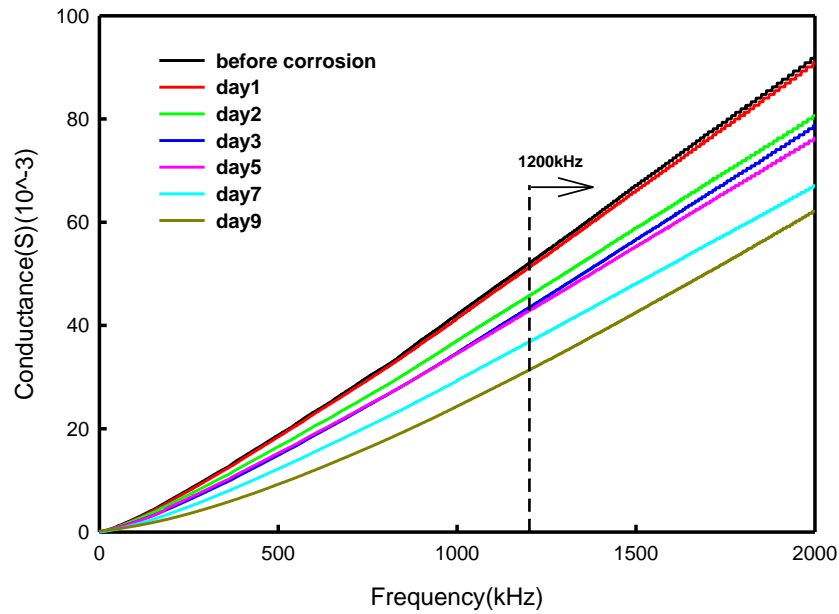


圖 14 腐蝕齡期-PEC 電導曲線

3.5 以電導 RMSD 評估腐蝕程度

為了瞭解電導曲線與鋼筋混凝土腐蝕程度的關係，使用均方根誤差(RMSD)來評估特定的適用頻率之電導曲線變化與鋼筋腐蝕重量損失的相關性，RMSD 的計算公式：

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

其中：

- G_i^1 : 感測器在加速腐蝕前所測到的電導
- G_i : 感測器在特定腐蝕齡期所測到的電導
- n : 量測頻率數量

PZT 感測器選擇 300 ~ 400 kHz 和第 500 ~ 570 kHz 這兩段頻率範圍進行計算電導 RMSD 值。圖 15 是 PZT 感測器電導 RMSD 與腐蝕重量損失率對應腐蝕齡期的關係圖，從圖 15 中可以發現隨著加速腐蝕試驗的進行，鋼筋的重量損失率呈現規律性上升，將其線性回歸後可發現相關係數 R^2 (Rsqr) 高達 0.9916，可信度高。PZT 感測器電導 RMSD 值隨著加速腐蝕試驗的進行也呈上升趨勢，頻率 300 ~ 400 kHz 的電導經線性回歸後 R^2 為 0.9658，頻率 500 ~ 570 kHz 的電導經線性回歸後 R^2 為 0.9890。圖 15 顯示這兩個頻率段感測器的 RMSD 數值都有隨著腐蝕齡期上升的趨勢，即電導 RMSD 腐蝕齡期的趨勢和腐蝕重量損失率的趨勢雷同，這表示 PZT 感測器具有監測腐蝕重量損失率的能力。

PEC 感測器選擇 1200 ~ 2000 kHz 頻率範圍進行計算電導 RMSD 值。圖 16 是 PEC 感測器電導 RMSD 與腐蝕重量損失率對應腐蝕齡期的關係圖，PEC 感測器電導 RMSD 值隨著加速腐

蝕試驗的進行也呈上升趨勢，經線性回歸後 R^2 為 0.9617，與鋼筋的重量損失率也有相同的趨勢，因此判定 PEC 感測器也能夠評估鋼筋混凝土試體的腐蝕程度。

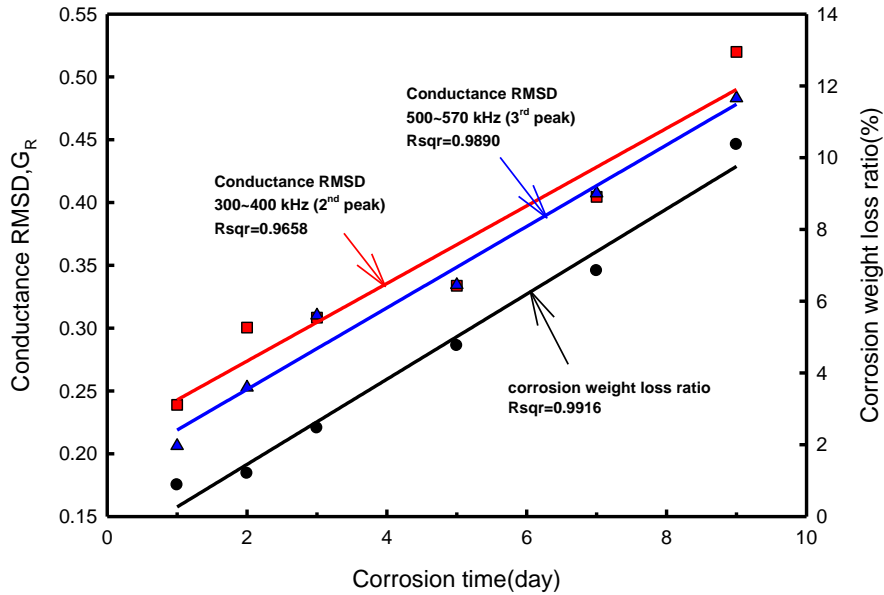


圖 15 PZT 感測器電導 RMSD 與腐蝕重量損失率對應腐蝕齡期之關係

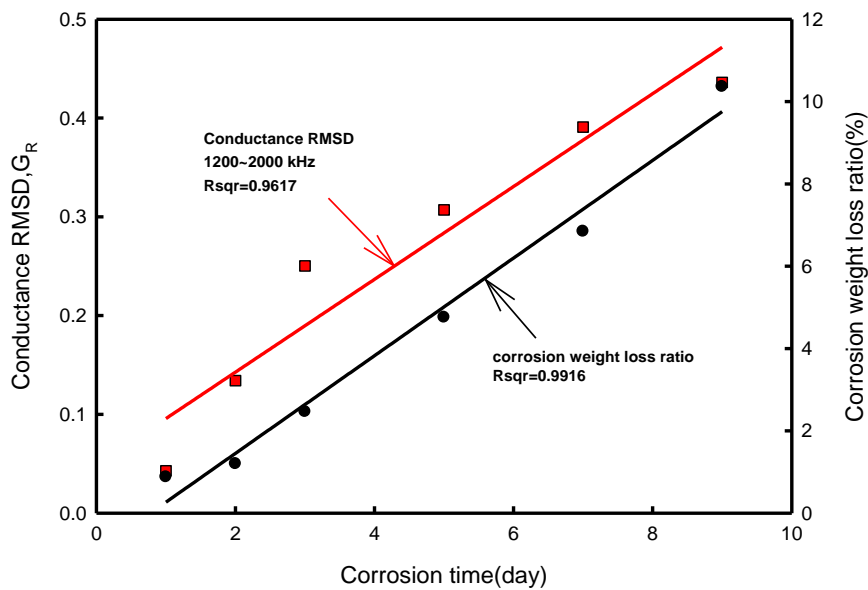


圖 16 PEC 感測器電導 RMSD 和腐蝕重量損失率對應腐蝕齡期之關係

為了方便進行腐蝕程度監測，利用方程式 $y = a e^{bx}$ 型式進行迴歸，找出電導 RMSD 與強度方程式，其中 x = 電導 RMSD 值， y = 腐蝕重量損失率。迴歸結果如表 2 所示，在圖 17 中 PEC 感測器 1200 ~ 2000 kHz 頻率範圍的方程式其 R^2 有較高的 0.9934，可信度較佳，可用來監測結構物腐蝕。PZT 感測器 300 ~ 400 kHz 和 500 ~ 570 kHz 頻率範圍的方程式其 R^2 分別為 0.9381 和 0.9769，相較於 PEC 感測器可信度較低。

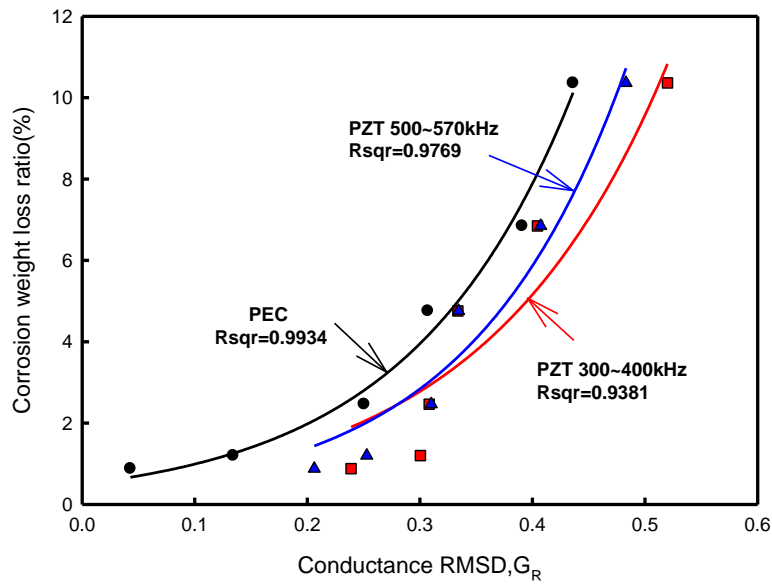


圖 17 感測器電導 RMSD-腐蝕重量損失率

表 2 電導 RMSD 與腐蝕重量損失率迴歸結果

感測器種類	頻率	迴歸方程式	R^2 (Rsq)
PZT 感測器	300 ~ 400 kHz	$y = 0.4333e^{6.1912x}$	0.9381
	500 ~ 570 kHz	$y = 0.3217e^{7.2584x}$	0.9769
PEC 感測器	1200 ~ 2000 kHz	$y = 0.4962e^{6.9155x}$	0.9934

四、結論

本研究使用自製的壓電水泥感測器 PEC 埋入鋼筋混凝土內，對照組使用 PZT 感測器，將鋼筋混凝土試體進行加速腐蝕試驗，由量測感測器電導-加速腐蝕時間(腐蝕齡期)關係找出適合腐蝕程度監測的頻率，計算適用頻率範圍的電導 RMSD，迴歸得到腐蝕程度-電導 RMSD 曲線，得出結果如下：

1. 壓電水泥感測器的電導曲線相較於 PZT 感測器更為平滑，腐蝕齡期-電導曲線的重疊位置較少，能夠用來進行 RMSD 分析的適用頻率範圍也較大，即使用壓電水泥感測器監測混凝土的適用頻率範圍比 PZT 感測器較寬廣，表示壓電水泥感測器因物理性質較接近混凝土，其監測功能優於 PZT 感測器。
2. 兩種壓電感測器監測鋼筋混凝土腐蝕的電導 RMSD 值都會隨著腐蝕齡期增加，趨勢與腐蝕齡期-重量損失率關係相符，表示壓電感測器採用埋入式監測鋼筋混凝土腐蝕是可行的。
3. 將感測器電導 RMSD 與腐蝕重量損失率進行迴歸，壓電水泥感測器的可信度要優於 PZT 感測器。
4. 鋼筋混凝土在腐蝕初期較難以用外觀發現，需要有效的監測方法，壓電感測器為一種可行的方案。

參考文獻

1. Park, G., Sohn, H., Farrar, C. R., & Inman, D. J., (2003), Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, pp. 451-464.
2. Demi Ai, Hongping Zhu & Hui Luo, (2016), Sensitivity of embedded active PZT sensor for concrete structural impact damage detection, *Construction and Building Materials* 111 348–357.
3. Weijie Li, Tiejun Liu, Dujian Zou, Jianjun Wang & Ting-Hua Yi, (2019), PZT based smart corrosion coupon using electromechanical impedance, *Mechanical Systems and Signal Processing* 129 (2019) 455–469.
4. V. Talakokula, S. Bhalla & A. Gupta, (2014), Corrosion assessment of reinforced concrete structures based on equivalent structural parameters using electro-mechanical impedance technique, *Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 25(4) 484–500.
5. Z. J. Li & K. Wu, (2001), Cement based smart material – Cement matrix piezoelectric composites, *Concrete Science and Engineering*, Vol.3, pp. 116-120.
6. 陳彥年, (2009), 0-3 型鋁鈦酸鉛水泥基壓電複合材料的製程與壓電性質, 國立高雄應用科技大學, 碩士論文
7. 葉仁豪, (2011), 卜作嵐材料與極化電場對 0-3 型水泥壓電複合材料的影響, 國立高雄應用科技大學, 碩士論文
8. 林棟宏, (2016), 0-3 型鋁鈦酸鉛水泥基壓電複合材料的製程與壓電性質, 國立高雄應用科技大學, 博士論文
9. Shin, S. W., & Oh, T. K. (2009), 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.