

# Monitoring Chloride Ion Content in Concrete Using Piezoelectric Cement Sensors

## 壓電水泥感測器應用在混凝土結構之氯離子含量監測技術

鄭祐紳<sup>1</sup> 潘煌鋳<sup>2</sup> 周亞蓁<sup>3</sup> 劉庭好<sup>3</sup>

### 摘要

本研究使用壓電水泥(piezoelectric cement, PEC)製成感測器來監測硬固混凝土中氯離子含量變化。混凝土試體利用 CNS 14795 的混凝土抗氯離子穿透能力試驗法(rapid chloride ion permeability test, RCPT)進行氯離子滲透，並取距離 NaCl 試驗槽 2 公分之混凝土樣品，進行酸溶性氯離子含量試驗(CNS 14702)，計算出混凝土試體中氯離子含量；同時，在試體距 NaCl 試驗槽 1 公分處埋設感測器，配合滲透時間進行機電阻抗頻譜之掃描。結果顯示，氯離子含量會與通過電量 Q 及機電阻抗頻譜之電導的均方根偏差(root mean-square deviation, RMSD)值有正向關係，並建立電導 RMSD 和氯離子含量的關係式，顯示使用壓電水泥感測器可監測混凝土試體中氯離子含量的變化，表示壓電水泥感測器有結構健康監測的潛力。

關鍵詞：氯離子、混凝土、感測器、結構健康監測、機電阻抗

### 一、前言

鄰近海岸或海中之結構物，常會有氯離子滲入混凝土內並穿透鋼筋鈍化層，導致鋼筋產生腐蝕現象，造成結構物損傷和使用年限的減少。為了瞭解結構物損傷狀況，已發展出許多檢測與監測技術，但由於監測位置或監測儀器機動性不佳等問題，常常造成監測上的困擾。為了解決監測上困擾，因此發展出智慧型結構物(smart structures)，智慧型結構物常採用壓電陶瓷(lead zirconate titanate, PZT)來進行監測與檢測，但壓電陶瓷與混凝土間有體積協調性(compatibility)等問題，時常造成監測誤判等問題，因此發展出 0-3 型水泥基壓電複合材料(0-3 type cement-base piezoelectric materials)來做為壓電感測器的感測元件(sensing element)，其具有可塑性佳及成本較低廉等優點，且聲阻抗(acoustic impedance)較接近於混凝土。

壓電水泥感測器(PEC Sensors)應用於結構健康監測之研究較少。因此本研究使用壓電水泥(piezoelectric cement, PEC)製成感測器埋入混凝土中，並利用 RCPT 試驗法使氯離子可以快速進入混凝土內部，達到監測硬固混凝土中氯離子含量變化之目的，並建立電導 RMSD 和氯離子含量的關係式。

### 二、0-3 型水泥基壓電複合材料

將水泥及 PZT 進行初步混合，並使用行星式球磨機將材料混合均勻，混合後進行分量後放入直徑  $\phi=15$  mm 之試體模，再使用萬能材料試驗機(Material Test System, MTS)施加 80 MPa 之壓製應力來將材料壓製成錠狀。壓製完成後將試體置於溫度 90°C、相對

<sup>1</sup> 國立高雄科技大學土木工程系 大學生 C108141227@nkust.edu.tw

<sup>2</sup> 國立高雄科技大學土木工程系 教授 pam@nkust.edu.tw

<sup>3</sup> 國立高雄科技大學土木工程系 大學生

溼度 100% 的養護環境養護 24 小時。試體養護後，以拋光研磨機將試體研磨至設計厚度  $2.00 \pm 0.05$  mm。接著將試體進行第一次熱處理 ( $140^\circ\text{C}$  持溫 40 分鐘)，並在試體雙面塗抹導電銀膠並置入高溫爐以  $150^\circ\text{C}$  持溫 30 分鐘使導電銀膠熟化完成電極的製作；靜置一段時間後，再進行第二次熱處理 ( $140^\circ\text{C}$  持溫 40 分鐘)。

試體冷卻後，再對試體進行極化。極化時，將試體放入溫度  $150^\circ\text{C}$  的矽油槽內，施加  $1.5$  kV/mm 的極化電場對試體進行 40 分鐘的極化。極化完成後，開始量測基本電性以及壓電性質 (壓電應變常數  $d_{33}$ 、阻抗頻譜)，其量測環境設定為室溫  $23 \pm 1^\circ\text{C}$  與室內相對濕度  $50 \pm 2\%$ 。

### 三、材料與配比

本研究使用 50 Vol.% 水泥與 50 Vol.% PZT 混合成 0-3 型水泥基壓電複合材料 (如表 1)，混凝土使用設計強度為  $210\text{kgf/cm}^2$  之混凝土試體。混凝土配比如下：

表 1. 混凝土配比表 ( $\text{kg/m}^3$ )

Water	Cement	Aggregate	Sand	SP
190	359	936	856	4.31

水泥使用東南水泥股份有限公司生產的第一型卜特蘭，符合 CNS 61 規範要求，細度為  $349\text{m}^2/\text{kg}$ ，比重為 3.16；PZT 為宸辰科技股份有限公司製造的銻鈦酸鉛 (PZT) 壓電陶瓷燒結體，型號為 Ka 型，直徑為 12mm、厚度為 1.8mm，壓電應變常數為  $470\text{pC/N}$ 、比重為 7.9。

### 四、RCPT 試驗

快速氯離子穿透試驗 (RCPT) 是利用電化學原理發展出的一種快速評估混凝土抵抗氯離子滲透能力的試驗方式，方法為將試體進行真空飽和後，將試體兩端分別浸置在 3% NaCl 水溶液及 0.3N NaOH 水溶液中，並維持兩端直流電壓差為 60V，持續 6 小時。本研究在混凝土達到 28 天齡期時，將混凝土試體切割成厚度 51 mm 之 RCPT 試體，並進行真空抽氣放置後，將試體密接容器

後，在試體兩側分別加入 3% NaCl 溶液以及 0.3N NaOH 溶液，進行 2、4、6、8、10 小時的快速氯離子穿透試驗。

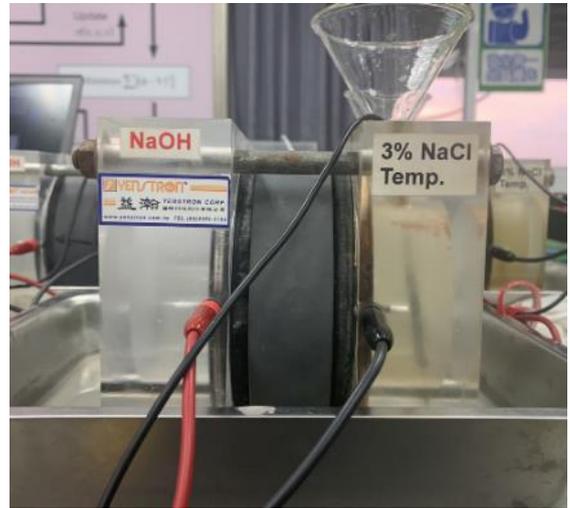


圖 1. RCPT 試驗

### 五、酸溶性氯離子含量試驗

經 0、2、4、6、8、10 小時 RCPT 試驗後，取試體距離 NaCl 試驗槽側 1 cm 深度處 10g 通過 #20 試驗篩之烘乾樣本，置於 250ml 燒杯中，加入 75 ml 去離子水，並加入 25ml 稀硝酸與 3ml 過氧化氫，靜置後，加熱至沸騰，待其冷卻後，以 9 cm 粗質濾紙進行過濾，最終將過濾後之溶液進行硝酸銀滴定試驗，以測得氯離子含量。

### 六、機電阻抗頻譜量測

感測器試體配合 RCPT 試驗，在 0、2、4、6、8、10 小時分別量測其電導頻譜，量測範圍為 20~2000 kHz。

為了分析感測器電導與氯離子含量的關係，將感測器所量測到的電導值中與氯離子含量中有相關規律的適用頻率範圍利用均方根誤差 (RMSD) 將電導因氯離子變化程度數值化。

RMSD 計算公式如下：

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

### 七、結果與討論

使用阻抗分析儀量測試體經不同滲透時間之電導頻譜，發現在頻率 1200 kHz 之後有逐漸向下的規律，因此可以判斷感測器在 1200 kHz 後有適用頻率(如圖 2.)，並將電導進行均方根誤差計算後，與通過電量進行初步判斷，結果顯示雖有點偏差，但感測器所量測之結果仍與實際通過電量有相似的趨勢(如圖 3.、圖 4.)。

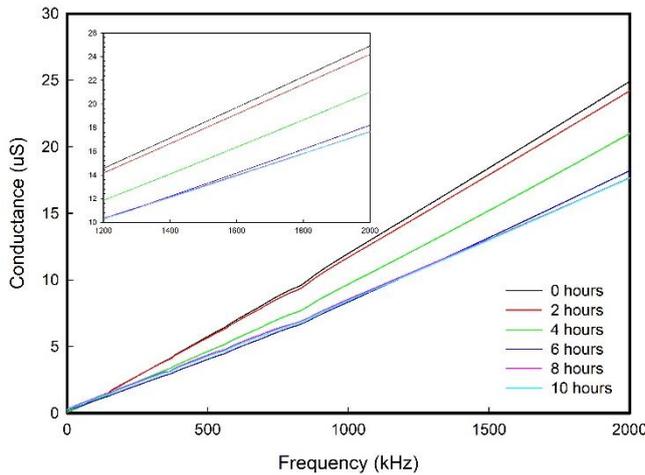


圖 2. 電導-滲透時間關係圖

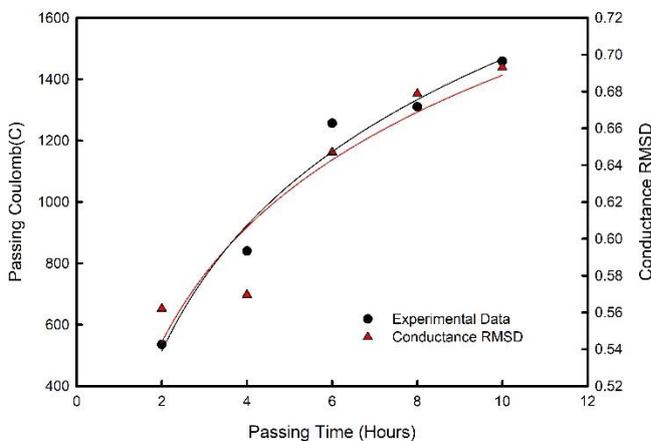


圖 3. 通過電量及電導 RMSD 迴歸關係圖

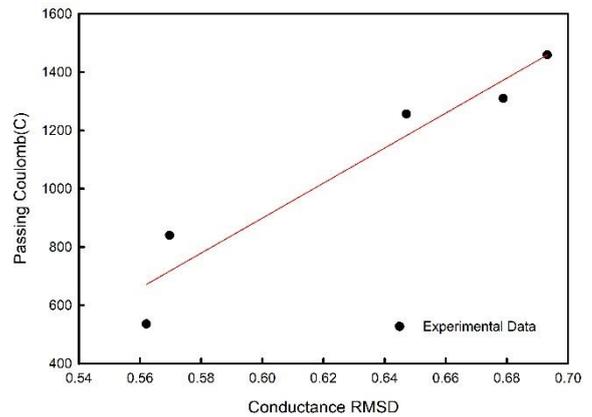


圖 4. 電導 RMSD-通過電量迴歸關係圖

### 八、結論

本研究將壓電水泥感測器埋入混凝土試體內，並在齡期 28 天時以 RCPT 試驗進行氯離子滲透，並同時量測其電導頻譜，滲透時間為 0、2、4、6、8、10 小時，最後利用酸溶性氯離子含量測訂法求出氯離子含量，找出電導與氯離子含量之關係。本研究結果如下：

1. 混凝土中氯離子含量會隨著 RCPT 滲透時間增加而增加。
2. 感測器量測的電導會隨著 RCPT 滲透時間增加而逐漸下降，並在 1200 kHz 後擁有適用頻率，顯示出壓電水泥感測器進行氯離子含量監測的發展潛力。
3. 通過電量與電導 RMSD 具有線性方程  $y = a + bx$  關係，其中  $y$  是通過電量與  $x$  是電導 RMSD，可做為壓電水泥感測器監測電量通過的計算依據。

### 致謝

本研究感謝中華民國科技部 MOST 108-2221-E-992-008-MY3 支持。

## 參考文獻

1. R. He, H. Ye, H. Ma, M. ASCE, C. Fu, X. Jin, Z. Li (2019), "Correlating the Chloride Diffusion Coefficient and Pore Structure of Cement-Based Materials Using Modified Noncontact Electrical Resistivity Measurement", J. Mater. in Civil Eng. Vol.31, 04019006.
2. J. Ahmadi, M.H. Feirahi, S. Farahmand-Tabar, A. H. K. Fard (2021), "A novel approach for non-destructive EMI-based corrosion monitoring of concrete-embedded reinforcements using multi-orientation piezoelectric sensors", Constr. Build. Mater. Vol.273, 121689.
3. L. Fan, Y. Bao (2021), "Review of fiber optic sensors for corrosion monitoring in reinforced concrete", Cem. Concr. Com. Vol.120, 104029.
4. 陶德彪, 蔣林華, 金鳴, 白舒雅, 姜少博 (2017), "銀/氯化銀電極用於監測混凝土中氯離子含量的研究", 材料導報, Vol.31, 101-106。
5. 內政部建築研究所(2014), 「快速氯離子穿透試驗於含飛灰爐石混凝土耐久性能評估之研究」, 內政部建築研究所協同研究報告。
6. 柯孟辰, (2022), 「壓電水泥感測器應用於RC結構物混凝土強度與鋼筋腐蝕監測」, 國立高雄科技大學碩士論文。
7. 黃銘旺, (2019), 「壓電水泥感測器預估混凝土和砂漿的強度成長」, 國立高雄科技大學碩士論文。
8. CNS 1078 水硬性水泥化學分析法。
9. CNS 14702 硬固水泥砂漿及混凝土中酸溶性氯離子含量試驗法。
10. CNS 14795 混凝土抗氯離子穿透能力試驗法—通過電荷量表示法。