

壓電水泥感測器監測硬固混凝土氯離子濃度技術

Piezoelectric cement sensors for monitoring chloride ion concentration of hardened concrete

陳鈺靖¹ 潘煌鏗²

1 國立高雄科技大學 土木系 研究生; E-mail: chram0922@gmail.com

2 國立高雄科技大學 土木系 教授; E-mail: pam@nkust.edu.tw

科技部計畫編號：MOST 108-2221-E-992 -008 -MY3

摘要

本研究是以壓電水泥感測器來評估硬固混凝土氯離子濃度的非破壞檢測技術，為開發硬固混凝土使用壓電水泥感測器監測氯離子濃度的先導研究。壓電水泥感測器的感測元件是由鋇鈦酸鉛(PZT)顆粒與水泥各體積 50% 混合製成，經電場極化使其具有壓電性質，並經封裝後製作成壓電感測器。混凝土試體利用快速氯離子滲透法(RCPT)的電流滲透方式，在滲透時間每隔 4、6、12 小時將混凝土試體取出，由試體表面往內部逐層取混凝土樣品，利用酸溶法(CNS 14702)萃取以量測氯離子的濃度；同時，在對應的氯離子滲透時間量測埋入於混凝土內之壓電水泥感測器的阻抗，電阻掃描頻率由 20 kHz 至 2000 kHz。經由試驗結果得知，試體透過電流快速滲透的影響，得到混凝土之阻抗和電阻的頻譜曲線會隨著氯離子滲透時間的增加而逐漸減小，顯示混凝土氯離子含量增加會導致壓電水泥感測器所量測的阻抗值具有規律性的下降，表示壓電水泥感測器具有監測混凝土氯離子濃度的能力。

關鍵字：壓電水泥、氯離子、混凝土、結構健康監測、

一、前言

台灣地理位置於環太平洋地震帶，且在兩版塊交界處，地震發生次數相當頻繁，因此發生了許多天然災害，尤其在住宅建築物方面，由地震所引起的損害極為嚴重；或因施工關係造成建築物有一定程度的損傷，如混凝土粒料分離、鋼筋腐蝕等問題。台灣最常見的建築結構物類型屬於鋼筋混凝土(RC)，此結構類型常會因許多外在因素而損傷，因此建築物的結構的健康檢測足見受到重視。在學界、業界發展許多建築結構物檢測及監測之方法，如超音波探測、透地雷達(檢測鋼筋深度)、紅外線掃描等的非破壞檢測方式。但非破壞檢測在檢測過程中，儀器屬於

高精密儀器且機動性不佳，容易造成攜帶性不便的困擾。

為解決問題，近年來發展許多方式來檢測結構物的損傷程度，如機電阻抗法(EMI) [1]，因此衍生智慧型建築物的概念來達到預警效果。智慧建築物使用致動器(actuators)與感測器(sensor)來控制和感應結構物損傷情形，感測最常用的材料為壓電材料(Piezoelectric-material)，其中又以鋇鈦酸鉛(PZT)使用最廣，因 PZT 具有良好的壓電性與焦電性且強度高，在土木與結構工程被廣泛運用。有氯離子含量監測，目前已有少量研究使用 PZT 感測器進行混凝土氯離子濃度監測，也有一些成效。

然而，PZT 感測器是由 PZT 壓電陶瓷元件製成，陶瓷材料與混凝土有介面(interface)及阻抗(impedance)匹配問題，容易造成監測時的訊號誤判或訊號特性不佳情形，因此在 2001 年 Li [2] 提出以水泥為基材(matrix)，PZT 壓電陶瓷為介質(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結構健康監測的介面不相容問題。

0-3 型水泥壓電複合材料施加電場進行極化後具有壓電性質(壓電水泥)，經過封裝的壓電水泥稱為壓電水泥感測器(piezoelectric cement sensor)。目前壓電水泥感測器的壓電應變常數 d_{33} 和相對介電常數 ϵ_r 在製程技術改良後可達 $d_{33} > 100\text{pC/N}$ 及 $\epsilon_r > 500$ [3,4]，已具有做為壓電感測器的能力。

氯化物的進入是鋼筋混凝土結構劣化的常見原因[5]，混凝土可能被海水暴露在氯化物中，氯化物會引發鋼筋腐蝕造成膨脹而破壞混凝土。對氯化物的進入進行建模是設計混凝土結構耐久性的重要基礎，有時認為外部氯離子進入混凝土僅取決於混凝土水泥漿部分的質量[6]。實際上，氯離子進入飽和混凝土的速率取決於混凝土水泥漿和骨料級分中的氯離子擴散係數以及骨料體積濃度，骨料也可能在影響氯化物進入混凝土中起重要作用。

快速氯離子滲透性試驗 (RCPT, ASTM C1202) [7]或 ASSHTO T277 是在 6 小時的測試期間通過樣品的電荷對混凝土的氯化物滲透性，來判斷混凝土受氯離子影響的程度。在過去十年中，因缺乏科學依據和苛刻的測試條件而受到全世界許多科學家和研究人員的批評。這裡，嘗試發展壓電水泥感測器監測混凝土氯離子濃度的技術，壓電水泥感測器的感測元件是由體積含量各 50% 的水泥和 PZT 顆粒製成。將壓電水泥感測器埋入混凝土試體內，利用 RCPT 試驗的滲透時間差異使混凝土的氯離子濃度不同，使用阻抗分析儀紀錄壓電水泥感測器在不同滲透時間的阻抗和電阻，比較氯離子濃度和混凝土的阻抗和電阻規律性，建立壓電水泥感測器監測氯離子濃度的技術，為可行性研究的先導試驗。

二、試驗計畫

2.1 感測器的製作

壓電水泥感測器是 0-3 型水泥壓電複合材料，由水泥及 PZT 陶瓷各 50% 體積所組成(配比 PP)，製程是將 PZT 陶瓷搗碎成粉狀，選用通過#100 號篩並停留於#200 號篩的粒徑做為介質，將 PZT 介質與水泥依照配比 PP 進行混合，使用行星式球磨機將水泥及 PZT 均勻的混合。

將混合完成的材料分別秤重分 3 層倒入模具內，並使用橡膠槌對模具進行敲即使材料中的空氣跑出，完成後以萬能材料試驗機(MTS)施加 80 MPa 應力來壓製試體。由於模具內的材料仍存有少許空氣，因此在試體加載歷程設定壓力於 3 分鐘內到達 14.13 kN，並持壓 5 分鐘使模具內的氣體排出，持壓完成後，拆模取出壓製完成的乾拌試體。

壓製完成的乾拌試體放置於恆溫循環水槽中，在高溫蒸氣 90°C、相對溼度 100%的環境中進行養護 24 小時，使水泥產生水化反應，讓試體強度增加不易碎裂。養護完成後使用研磨拋光機對試體進行研磨，經過研磨拋光成直徑為 15 mm、厚度為 2 mm 的壓電水泥感測器試體，如圖 1。



圖 1 研磨後厚度為 2mm 之試體

研磨完成之試體先進行第 1 次溫度處理，以 140°C 的溫度處理 40 分鐘，完成後即可將銀膠塗抹於試體表面，並放入高溫爐中等待銀膠熟化即可完成電極的製作。試體極化前需進行第二次溫度處理，溫度處理完成後先使用阻抗分析儀量測極化前試體的電性值，包括電容 C、介電損失 D 和電阻 R，以事先判斷試體的製作是否達到可進行極化的條件。極化時需先將試體固定於夾具中，再將夾具放入 150°C 的循環油槽內，以 1.5 kV/mm 的極化電場極化 40 分鐘，並記錄到達極化電場所需時間（即激發時間）。

極化完成後，此時試體具有壓電性質。將試體放置於溫度條件 23°C ± 1°C、濕度條件 50% 的環境中，並量測極化後 1 至 100 天的試體壓電性質，包括電阻 R、阻抗 Z、相對介電常數 ϵ_r 和壓電應變常數 d_{33} 。

2.2 感測器的封裝及埋入

使用瀝青作為防水材料對感測器進行封裝，其目的在於使感測器與空氣隔絕，讓性質穩定與具有防水效果。將壓電水泥感測器埋入混凝土試體內，感測器皆固定於試體中心位置（距試體表面 25 mm 之位置）如圖 2。

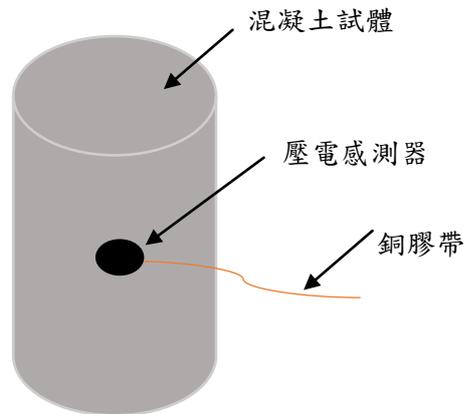


圖 2 安裝感測器之試體

2.3 RCPT 試體

在混凝土 7 天齡期時，將混凝土試體依照 RCPT 試驗標準進行前處理，在試體泡過 18 小時後的取出，使用橡膠墊圈(圖 3)，外徑為 100mm 內徑 75 mm 厚 6mm 的橡膠圈(圖 4)，將試體嵌入並密接容器(圖 5)。裝置完成後的一側加入 3.0% 氯化鈉(NaCl)溶液，另一側加入 0.3 氫氧化鈉(NaOH)溶液，在進行 RCPT 試驗(圖 6)。



圖 3 厚 6mm 的橡膠圈



圖 4 外徑為 100mm、內徑 75 mm 壓克力



圖 5 組裝後試體

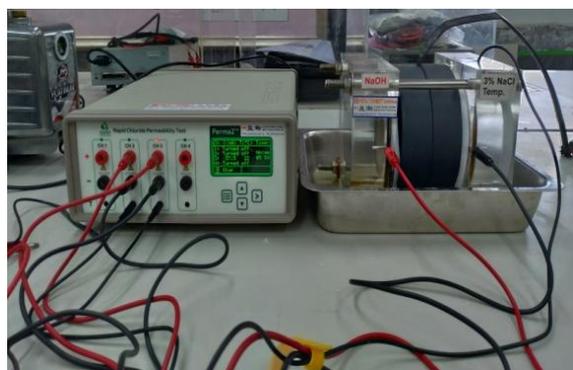


圖 6 RCPT 試驗

2.4 RCPT 與酸溶法實驗

試體以 RCPT 試驗分別進行 4、6 和 12 小時的滲透，試體在對應的滲透時間後進行分層取樣。採用酸溶法進行氯離子濃度測定(圖 7)，取得 10 g 的樣品(圖 8)進行破碎與研磨，樣品的粉末要通過孔徑 850 μm (20 號篩)。將粉末秤重後放入 250 mL 的燒杯中，加入 75 mL 的去離子水使之分離，並加入 25 mL 稀硝酸溶液(1:1)攪拌並沸騰，於冷卻後以 9 cm 粗質濾紙過濾(圖 9)，以氯離子測定儀(圖 10)測定氯離子含量，結果列在如表 1

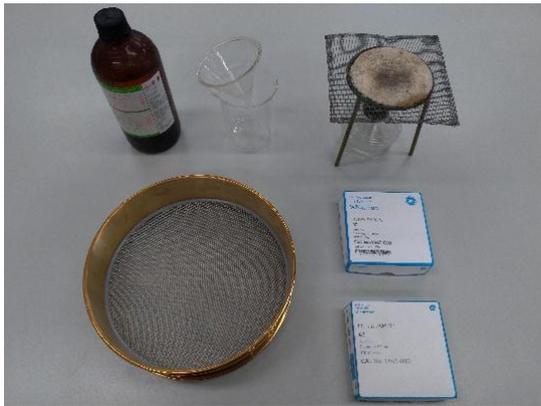


圖 7 酸溶法材料



圖 8 試體取中間 10g

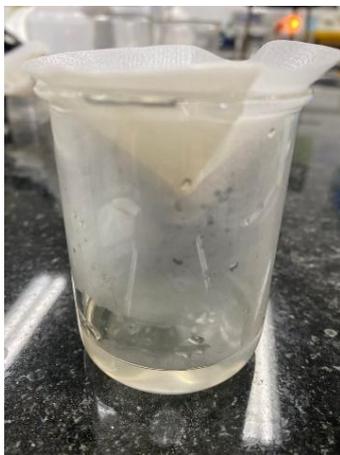


圖 9 過濾溶液



圖 10 氯離子量測

表 1 氯離子含量

滲透時間(小時)	4	6	12
氯離子含量	0.0101%	0.0103%	0.0106%

2.5 混凝土阻抗和電阻

使用阻抗分析儀紀錄滲透時間 0 (original)、4、6、12 小時的壓電水泥感測器所量測的混凝土阻抗和電阻的頻譜圖，結果在圖 11 和圖 12，縱軸單位為 $k\Omega$ ，橫軸為觀測頻率(kHz)。不管是阻抗或電阻的頻譜圖都顯示，隨著 RCPT 滲透時間的增加，阻抗和電阻都會逐漸減少，且頻譜曲線圖會隨觀測頻率增加而降低。由表 1 顯示，氯離子濃度隨著滲透時間增加而增加，表示混凝土的阻抗或電阻會因氯離子濃度提高而降低，這個結果符合材料的物理特性。混凝土的阻抗和電阻會隨氯離子含量增加呈現有規律的下降，顯示使用壓電水泥感測器使用阻抗或電阻來監測混凝土的氯離子含量變化，具有發展潛力，是一種新的非破壞檢測利器。

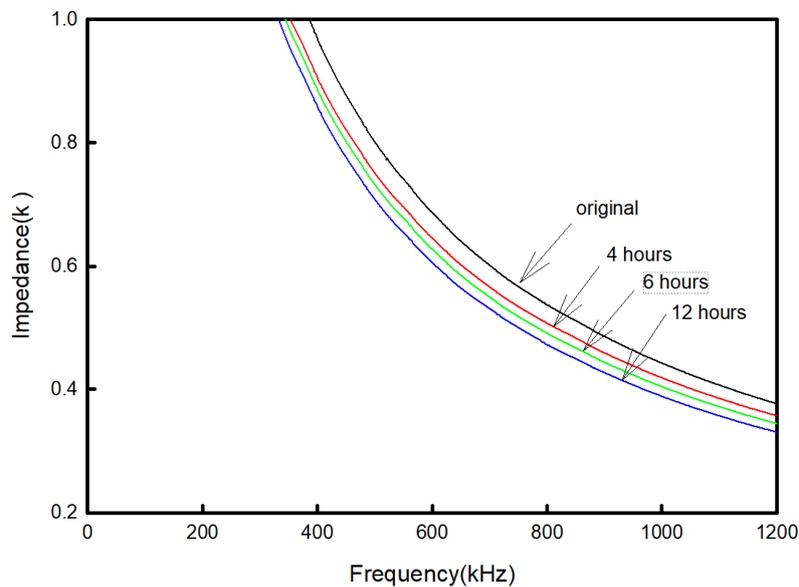


圖 11 氯離子跟阻抗值的關係

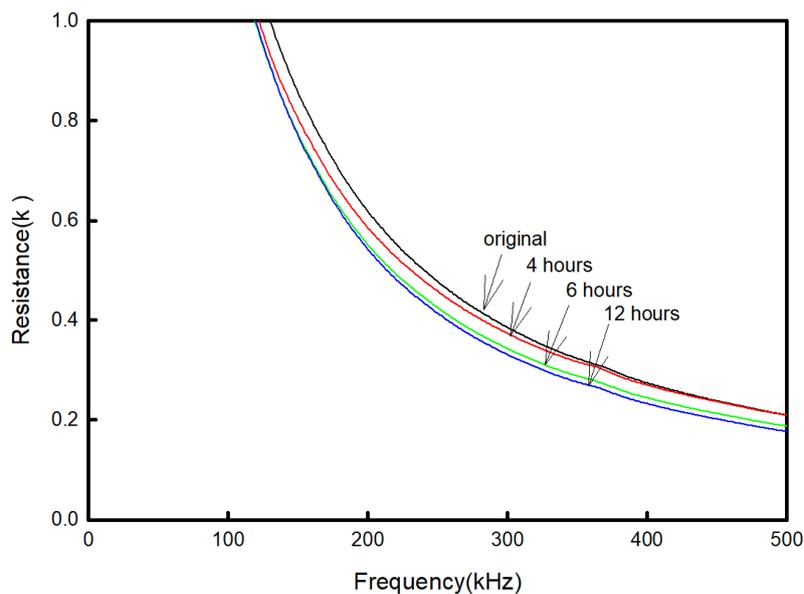


圖 12 氯離子跟電阻值的關係

三、結論

本研究以嵌入方式將壓電水泥感測器埋入混凝土試體內，在試體齡期 7 天時進行 RCPT 試驗，滲透時間由 0 至 12 小時，量測混凝土的阻抗及電阻頻譜圖，並用酸溶法獲得對應於滲透時間的氯離子含量，找出阻抗與氯離子含量的關聯性。結果如下：

1. 混凝土試體經由 RCPT 快速滲透試驗，試體的氯離子含量會隨滲透時間而逐漸增加。
2. 混凝土的阻抗和電阻的頻譜曲線會隨著 RCPT 滲透時間的增加而下降，顯示使用阻抗和電阻的頻譜曲線能夠反映混凝土內之氯離子的含量變化。
3. 使用壓電水泥感測器監測混凝土氯離子濃度，在觀測頻率 20 kHz 至 1200 kHz 範圍內的阻抗和電阻的頻譜曲線都呈現有規律的改變，顯示適合監測氯離子含量的頻寬很大，有利於壓電水泥感測器進行評估混凝土的氯離子含量，相關非破壞檢測技術有發展潛力。

參考文獻

1. R.Tawie and H.K.Lee, Monitoring the strength development in concrete by EMI sensing technique. Construction and Building Materials,1(24), 1746-1753, 2010.
2. Z.J.Li and K.Wu, Cement based smart material – Cement matrix piezoelectric composites. Concrete Science and Engineering, 3, 116-120, 2001.
3. 吳昱璇，壓電水泥感測器製作與在混凝土構件力電關係.國立高雄科技大學，碩士論文，2016。
4. 吳勝筆 壓電水泥感測器應用於 RC 梁柱接頭即時監測.國立高雄科技大學，碩士論文，2016。
5. O. Mejlhede Jensen, P. Freiesleben Hansen, A.M. Coats and F.P. Glasser, Chloride ingress in cement paste and mortar. Cement and Concrete Research, 29,1497-1504, 1999.
6. D.W. Hobbs, Aggregate influence on chloride ion diffusion into concrete Cement and Concrete Research,29,1995-1998, 1999.
7. C. Shi, Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. Cement and Concrete Research, 34,537-545, 2004.