

養護濕度對水泥基壓電複合材料性質影響

蔡至穎¹ 鄭祐紳² 潘煌錕³

¹ 國立高雄科技大學土木工程學系 碩士生, F113141114@nkust.edu.tw

² 國立高雄科技大學土木工程學系 博士生, I113141102@nkust.edu.tw

³ 國立高雄科技大學土木工程學系 教授, pam@nkust.edu.tw

摘要

本研究探討水泥基壓電複合材料壓電在不同養護濕度下基本電性與壓電性能的影響，找出有助於提升 PEC 性能的養護條件。水泥基材料具有齡期效應 (aging effect)，且為多孔隙材料，這些孔隙會吸收外部水分影響水化反應，因此養護濕度對齡期效應有顯著影響，亦會影響水泥基壓電複合材料壓電性能。研究結果顯示，在基本電性方面，在高濕度養護下的 PEC 機械品質因子會減少，相對介電常數(ϵ_r)隨之上升，電阻率(ρ)會隨養護濕度上升，但若濕度過高會在一定齡期後下降。在壓電性質方面，隨著濕度增加，壓電應變常數(d_{33})呈現提升趨勢，機電耦合常數(κ_t)則與養護濕度並無明顯相關。極化後的 PEC 在高濕度養護環境能獲得較佳的壓電性能，可提供強化水泥基壓電複合材料壓電性質的重要參考。

關鍵字:濕度、壓電水泥、壓電應變常數、介電常數、感測器

一、前言

0-3 型水泥基壓電複合材料是將壓電介質與水泥結合，具有容易塑形且成本低廉的優點[1]，適合用於混凝土材料中。影響水泥基壓電複合材料壓電性能的因素有很多，例如：製程技術、壓電介質的粒徑與含量、摻料、極化條件等[2-4]，但多數文獻並無對養護條件提出具體需求。水泥基材料具有齡期效應，當水泥接觸到水會產生水化反應，根據水灰比、養護溫度、養護濕度等環境條件會影響水化反應產生 C-S-H (calcium silicate hydrate) 膠體填充水泥顆粒間的縫隙的速度，使整體結構更緻密有利於應力傳遞至壓電介質顆粒的效率，從而影響水泥基壓電複合材料的性能。Chaipanich [5]與 Cheng [6]發現 0-3 型水泥基壓電複合材料性能會在極化完後根據齡期變化，他們認為該變化是因極化後材料從空氣中吸收水分以支持內部水泥的水化反應導致。而 Rao[7]針對 0-3 型水泥基壓電複合材料極化前 6 小時與極化後 3 至 72 小時，在不同溫度與濕度下進行養護，以探討極化時與極化後的性能差異。

為探討養護濕度對水泥基壓電複合材料壓電性質影響，本研究以體積含量 50 % 的鋯鈦酸鉛(lead zirconate titanate, PZT)與水泥混合，採取壓製方式製造，以 90°C 水氣養護 24 小時後進行極化。在極化過後將試體分為三組，分別置於相對濕度 50 %、65±5 %、90±5 % 的環境濕度下，量測其 90 日內壓電應變常數(piezoelectric strain factor, d_{33})，電容(capacitance, C)、機械品質因子(mechanical quality factor, Q)、電阻(resistance, R)、最大與最小阻抗頻率 f_n 和 f_m ，並計算相對介電常數(relative dielectric constant, ϵ_r)、機電耦合常數(electromechanical coupling coefficient, κ_t) 及電阻率(Resistivity, ρ)，觀察其性質的變化。

二、實驗計畫

2.1 材料

水泥基壓電複合材料，以 I 型卜特蘭水泥為基材，PZT 壓電陶瓷為介質構成。兩者的體積各佔 50%。I 型卜特蘭水泥，比重是 3.14，細度為 $349 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。PZT 壓電陶瓷，取用經研磨後 $75\text{--}150 \mu\text{m}$ 粉末，比重為 7.9。

2.2 試體製作

將材料放入行星式球磨機，使其均勻混合，將混合後的材料用萬能材料試驗機 (material test system, MTS)施加 80 MPa 壓應力，壓製成直徑 15 mm 之試片，後置於恆溫水槽內，以 90°C 水氣養護 24 小時。

2.3 試體極化

將養護 24 小時的試體從恆溫水槽內取出，對試體進行拋光研磨處理至 $2.00\pm0.05 \text{ mm}$ 厚度。將拋光研磨完成的試體進行 140°C 高溫處理持續 40 分鐘，隨後在表面塗抹導電銀膠並置入高溫爐以 150°C 持續 30 分鐘使導電銀膠熟化，完成電極製作。並將試體置入高溫爐以 140°C 持續 40 分鐘，在浸入 150°C 砂油中以 1.5 kV/mm 電場進行 40 分鐘極化。

2.4 壓電性質測量與計算

極化後的試體置於溫度 23°C 與濕度分別為 50 %、 65 ± 5 %、 90 ± 5 % 的環境下進行養護，量測環境設定為室溫 $23\pm1^\circ\text{C}$ 與室內相對濕度 50 ± 2 %，以壓電應變常數量測儀量測 110 Hz 下的壓電應變常數 d_{33} ，以阻抗分析儀量測 1.0 kHz、1 V 下電容 C 、機械品質因子 Q 、電阻 R 、最大與最小阻抗頻率 f_n 和 f_m ，相對介電常數 ϵ_r 、機電耦合常數 κ_t 及電阻率 ρ ，可用以下公式計算：

$$\epsilon_r = \frac{C \times t}{A \times \epsilon_0} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{R \times A}{t} \quad (2)$$

其中 ϵ_0 為真空時的介電率等於 $8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ， C 是 1.0 kHz 下電容值， t 為試體厚度， A 為試體面積， R 為 1 V 電壓下之電阻。

三、結果與討論

本研究有三種養護濕度，分別為 50 %、 65 ± 5 %、 90 ± 5 %，根據養護濕度標號為 50、65、90，以方便說明。

3.1 壓電應變常數

圖 1. 為試體經過極化後，在不同濕度環境養護下的壓電應變常數 d_{33} 與齡期關係。壓電應變常數 d_{33} 會隨著水泥極化後的齡期增加，而環境濕度越高，增長的越快。環境濕度高的 90，壓電應變常數 d_{33} 隨齡期增長最為迅速，高達 152.1 pC/N ，環境濕度次高的 65 以 46.3 pC/N 次之、環境濕度最低的 50 增長最慢，僅有 20.2 pC/N ，較高的環境濕度提供充分的水氣使水化反應更加迅速且充分，填充試體內部空隙，令應力能更高效的傳遞給壓電介質，從而提高壓電應變常數 d_{33} ，在同一齡期下隨著養護濕度增加，壓電應變常數 d_{33} 數值越大。可見環境濕度高，有利於壓電應變常數 d_{33} 的增長。

3.2 相對介電常數

圖 2.為不同養護濕度下相對介電常數與齡期關係。結果表明試體的相對介電常數受養護環境濕度影響，三組試體的相對介電常數都隨齡期增加，但在高濕度環境下增長幅度明顯較大，最高濕度環境的 90 相對介電常數為 696.5，次高濕度環境的 65 相對介電常數為 142.5，最低濕度環境的 50 相對介電常數為 84.2。相對介電常數主要受試體內部的成分分布、孔隙率與含水率影響[8]，空氣的相對介電常數比水泥與水都低，低濕度環境下孔隙內的水分容易蒸散被空氣取代，造成整體的相對介電常數下降。而高濕度環境下孔隙內能保持較多水分，能提供較高的相對介電常數，從而提高整體的相對介電常數，可見在高濕度環境下養護有利於提高試體的相對介電常數。

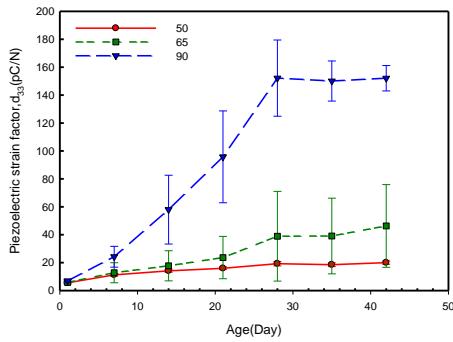


圖 1 不同養護濕度下壓電應變常數與齡期變化

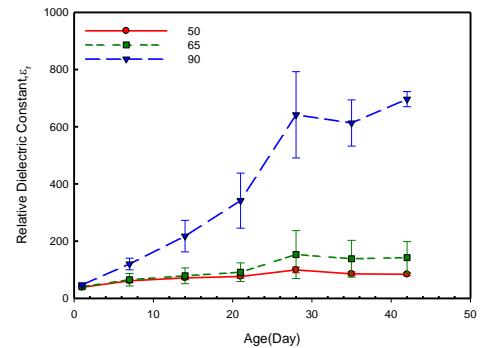


圖 2 不同養護濕度下相對介電常數與齡期變化

3.3 電阻率

圖 3.為不同養護濕度下電阻率齡期變化，結果顯示 65 的電阻率 $58.7 \text{ k}\Omega\text{-m}$ 高於 50 的 $48.4 \text{ k}\Omega\text{-m}$ ，隨著水化作用的進行，0-3 型水泥基壓電複合材料消耗了內部的自由水，且空隙被水化產物填充，使材料內部變得更加緻密，從而提高電阻率。而 90 電阻率會先上升隨後下降，在第二天到達最高 $54.2 \text{ k}\Omega\text{-m}$ ，隨後逐漸系降至 $25.5 \text{ k}\Omega\text{-m}$ ，高濕度環境下水分子積極參與水化反應使內部結構緻密導致電阻率上升，隨後內部孔隙能保持充足的水分使試體內部水溶性鹽類水解，增加試體中導電通道的形成，導致電阻率下降[9]。表示養護濕度適當可提升電阻率，但過高的養護濕度反而會導致電阻值在一定齡期後降低電阻率。

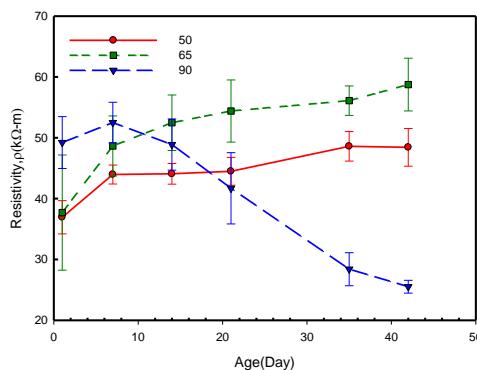


圖 3. 不同養護濕度下電阻率與齡期變化

四、結論與建議

以壓製技術製作 0-3 型水泥基壓電複合材料，經不同養護濕度，探討試體的壓電性能，研究結果歸納如下：

1. 壓電應變常數 d_{33} 隨齡期增加，相同齡期下隨著養護濕度增加，壓電應變常數 d_{33} 數值越大。可見環境濕度高，有利於壓電應變常數 d_{33} 的增長。
2. 相對介電常數受養護環境濕度影響，三組試體的相對介電常數都隨齡期增加，在高濕度環境下增長幅度明顯較大，可見在高濕度環境下養護有利於提高試體的相對介電常數。
3. 電阻率會隨齡養護濕度上升而增加，但若濕度過高，則會在一定齡期後隨齡期而下降。

參考文獻

- [1] Dong,B., and Li,Z. "Cement-based Piezoelectric Ceramic Smart Composites," Composites Science and Technology, Volume 65 , Pages 1363-1371, 2005.
- [2] Li, Z., and Gonga, H., "Effects of Particle Size on the Piezoelectric Properties of 0-3 PZT-CementComposites," AIP Conference Proceedings, Vol. 973, pp. 538-543, 2008.
- [3] Li, Z., Gong, H., and Zhang, Y., "Fabrication and Piezoelectric of 0-3 Cement Based Composite with Nano-PZT Powder," Current Applied Physics, Vol. 9, pp. 588-591, 2009.
- [4] Pan,H,H., Lai,T,Z., Chaipanich,A., Wittinanon,T., "Effect of graphene on the piezoelectric properties of cement-based piezoelectric composites" Sensors and Actuators A: Physical, Volume 346, 2022.
- [5] Chaipanich, A., Rianyoi, R., Potong, R. and Jaitanong, N., "Aging of 0-3 Piezoelectric PZT Ceramic-Portland Cement Composites,"Ceramic Int., Vol. 40, pp. 13579–13584, 2014.
- [6] Cheng,H., Huang,S., Chang,J., Xu,R., Liu,F., Lu,L., "Piezoelectric and dielectric properties of piezoelectric ceramic–sulphoaluminate cement composites" Journal of the European Ceramic Society, Volume 25, Pages 3223-3228, 2005.
- [7] Rao,Y, ,Liu,Z., Zhu,X., Wang,J. "Early Performance Evolution Tracking and Monitoring for Cement-based Piezoelectric Composites under Multiple Curing Conditions" KSCE Journal of Civil Engineering, Volume 27, Pages 2930-2939, 2023.
- [8] Chen,C., Shen,P., Shui,Z., "Determination of water content in fresh concrete mix based on relative dielectric constant measurement" Construction and Building Materials, Volume 34, Pages 306-312,2012
- [9] Rajabipour, F., Weiss, J. "Electrical conductivity of drying cement paste". Mater Struct 40, 1143–1160,2007.