

基於快速氯離子滲透試驗之硬固混凝土游離性氯離子含量評估

鄭祐紳¹ 潘煌鏗² 薛健龍³ 蔣欣宸³

¹ 國立高雄科技大學 土木工程系 研究生 sh1020610@gmail.com

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 研究生

摘 要

氯離子進入鋼筋混凝土(RC)結構物中會逐漸吸附於鋼筋表面，與鋼筋鈍化膜發生反應，致使鈍化膜損傷，並進一步加速鋼筋腐蝕，會影響鋼筋混凝土結構物的耐久年限。在研究因氯離子滲透造成 RC 結構物腐蝕時，試驗之硬固混凝土受到氯離子滲透乃係一項耗時的工作，如何能有效且穩定的使氯離子快速滲透入混凝土中，便是一道課題。因此本研究是透過 ASTM C1202 之快速氯離子滲透試驗(RCPT)，使氯離子能夠快速地滲透入硬固混凝土中，以達到於短時間讓硬固混凝土中的氯離子含量產生變化。試驗結果顯示，總通過電荷量、滲透深度會與滲透時間成線性關係；混凝土內部游離性氯離子含量會在 RCPT 試驗開始時大幅增加，氯離子滲透速率會隨著滲透時間增加而降低，且當氯離子完全滲透試體後，內部的游離性氯離子含量會開始減少。這是因為氯離子在滲透開始後，RCPT 的氯化鈉試驗槽中氯離子濃度隨 RCPT 通過電荷量增加而下降，表示氯離子會往試體內部累積，並在試體完全被氯離子滲透後，試體內部氯離子會往氫氧化鈉試驗槽中析出，氫氧化鈉試驗槽的氯離子濃度隨著 RCPT 通過電荷量增加而增加，導致試體內氯離子含量下降。

關鍵字：快速氯離子滲透試驗、硬固混凝土、氯離子含量、通過電荷量

Evaluation of Free Chloride Ion Content in Hardened Concrete**Based on Rapid Chloride Ion Penetration Test**

You-Shen Cheng Huang Hsing Pan Jian-Long Syue Hsin-Chen Chiang

*Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Kaohsiung, Taiwan***ABSTRACT**

The chloride ions gradually adsorb onto the surface of the rebars when they enter reinforced concrete (RC) structures, reacting with the passivation layer of the rebars, leading to damage to the passivation layer and further accelerate the corrosion of the rebars, which can affect the durability of the RC structures. When studying the corrosion of RC structures due to chloride ion penetration, testing hardened concrete specimens for chloride ion penetration is a long-term task. Thus, the effective and stable penetration of chloride ions into concrete quickly is a challenge. Therefore, this study utilizes the rapid chloride penetration test (RCPT) specified by ASTM C1202 to allow chloride ions to penetrate rapidly into hardened concrete, inducing changes in chloride ion content within a short period. The results show that the total charge passed, penetration depth and the penetration time are linearly related. The content of free chloride ions inside the concrete increases significantly at the beginning of the RCPT test, and the chloride ion penetration rate decreases with increasing penetration time. When the chloride ions completely penetrate the specimen, the content of free chloride ions inside the specimen starts to decrease. This is because after the start of penetration, the chloride ion concentration in the sodium chloride (NaCl) solution of the RCPT decreases with the increase in the charge passed, indicating the accumulation of chloride ions into the specimen. After complete penetration of the specimen by chloride ions, the chloride ions inside the specimen precipitate into the sodium hydroxide (NaOH) solution, and the chloride ion concentration in the sodium hydroxide solution increases with the increase in the charge passed in the RCPT, leading to a decrease in chloride ion content inside the specimen.

Keywords: *Rapid chloride ion penetration test, Hardened concrete, Chloride ion content, Passed coulomb*

一、背景和動機

自永續工程與經濟性的觀點來說，欲將結構物價值發揮至最大，耐久性便是一個無法避免的議題。為確保結構物使用的安全性，發展出智慧結構健康監測來提前針對結構物的使用狀態做出預警，可即時做出判斷並補強，或是對構件的殘餘性能進行評估。針對位處於惡劣環境之結構物，更加需要結構進行健康監測或檢測，以掌控目前結構物的健康程度。例如氯離子濃度甚高環境的沿岸、離岸之結構物，常會有氯離子滲入混凝土內並破壞鋼筋的鈍化層，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。一般混凝土結構在含有氯離子之環境下所引致之結構損傷，被認為係由氯離子引發鋼筋的點蝕造成的。氯離子半徑較小，較難以被混凝土阻擋，因此容易擴散至混凝土中，並吸附於金屬(如鋼筋)表面，會與金屬表面的鈍化膜產生反應，造成結構物損傷，導致 RC 構件的使用年限降低。因此對於結構物的氯離子監測尤為重要，也發展出許多硬固混凝土中氯離子含量監測法，例如離子選擇性電極^[1-4]、薄膜感測器^[5]等。然而對 RC 進行氯離子滲透之研究係一項耗時長久的行為，研究(試驗)時間相對較冗長。為解決氯離子滲透之耗時問題，本研究參考 ASTM C1202 快速氯離子滲透試驗法(rapid chloride ion penetration test, RCPT)，採用電化學方法使氯離子能夠快速進入混凝土試體中，建立氯離子含量與 RCPT 之通過電荷量關係，可提供研究人員於進行混凝土氯離子含量監測研究之一項加速氯離子滲透方法。

二、文獻回顧

2-1 氯離子於混凝土之存在型態與檢測方法

Enevoldsen et al. (1994)^[6]對混凝土中氯離子存在型態所分類，分別為鍵結型氯離子(bound chloride)與游離性氯離子(free chloride ion)，而鍵結型氯離子又可細分為物理吸附型(physically absorbed)與化學鍵結型(chemically bound)：

1. 物理吸附型：由混凝土材料中所含之氯離子會物理吸附至水泥水化所產生之 C-S-H 膠體上或是被封閉於混凝土中毛細孔隙或是膠體孔隙中，不易產生游離現象。
2. 化學鍵結型：由混凝土材料中所含之氯離子與水泥成分中鋁酸三鈣(tricalcium aluminate, C₃A)反應，形成弗氏鹽(Frémy's salt)^[7]，其化學式為 $[Ca_2Al(OH)_6]Cl \cdot 2H_2O$ 或 $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ，此種鍵結反應程度取決於水泥細度、C₃A 含量以及石膏含量(C₃A 優先與硫酸鹽反應)，此鹽類係以穩定化合物存在於混凝土之中。
3. 游離性氯離子：經上述二種鍵結作用後，仍未被固結之氯離子，或是所有外在環境所汙染、侵入混凝土中之氯離子，能夠自由游離於混凝土中的孔隙溶液，被

認為是造成鋼筋混凝土中鋼筋鏽蝕的主要原因之一。

於硬固混凝土中氯離子含量的試驗法有 ASTM C1152 砂漿和混凝土酸性氯離子測試法以及 ASTM C1218 砂漿和混凝土水溶性氯離子測試法，檢測方法是將硬固混凝土鑽孔取樣或研磨成粉，將氯離子萃取，並透過電位滴定法量測其含量。其中，ASTM C1152(酸性氯離子含量試驗法)可以檢測總氯離子含量，而 ASTM C1218(水溶性氯離子含量試驗法)可以檢測游離性氯離子含量。在試驗過程中，兩者均包含取樣、萃取與滴定過程，其中在萃取過程差異最大。

2-2 氯離子監測所使用之氯離子滲透法

Montemor et al. (2006)^[1]使用 Ag/AgCl 感測器監測水泥砂漿中氯離子含量，其中試體氯離子的滲透方法是採用 0.5 M 之氯化鈉水溶液安裝於試體頂部，利用靜水壓力進行滲透。

Jin et al. (2016)^[2]使用 Ag/AgCl 感測器監測混凝土中氯離子含量，其中試體氯離子的滲透方法是將試體浸泡於氯離子濃度 0、0.01、0.05、0.1、0.5、1 M 之蒸餾水中半年，利用靜水壓力進行滲透。

Jin et al. (2017)^[3]使用氯離子選擇性電極感測器監測混凝土中氯離子含量，其中試體氯離子的滲透方法是將試體浸泡於 8% 之氯化鈉水溶液中 1、3、7、12 個月，利用靜水壓力進行滲透。

Du et al. (2022)^[4]使用 Ag/AgCl 工作電極和 Mn/MnO₂ 參考電極所組成之感測器監測水泥砂漿中氯離子含量，其中試體氯離子的滲透方法是透過先將試體乾燥後，浸入 5% 氯化鈉水溶液中，使試體毛細作用吸收水分。

Park et al. (2014)^[5]使用網版印刷(screen printing)之薄膜感測器監測水泥砂漿中氯離子含量，其中試體中的氯化物來源是透過直接於配比中添加水泥重量之 0、0.6、1、3% 之氯化鈉，來達成不同氯離子含量之目的。

Kim (2015)^[8]使用奈米碳管(carbon nanotube, CNTs)水泥基複合材料作為感測器監測鋼筋混凝土中氯離子含量，其中試體氯離子的滲透方法是將試體浸泡於氯化鈉水溶液中 28 日，利用靜水壓力進行滲透。

Gandía-Romero et al. (2016)^[9]使用 Ag/AgCl 厚膜(thick-film)感測器監測混凝土中氯離子含量，其中混凝土中的氯離子是於拌合水中添加不同量之氯離子，來達成不同氯離子含量之目的。

Jin et al. (2017)^[10]使用石墨烯水泥基複合材料作為感測器監測水泥砂漿中氯離子含量，其中試體氯離子的滲透方法是將試體浸泡於 5% 之氯化鈉水溶液中 4、8、12、20、28、36 周，進行滲透。

Jeong et al. (2024)^[11]製作 6-甲氧基喹啉固定化尼龍感測器，並應用至水泥砂漿中氯離子含量監測，其中試體氯離子的滲透方法是將水和砂漿試體放入 500ml 燒杯中，將氯離子濃度調整為 0、200、1000、5000 mM，浸泡 48

小時，利用靜水壓力進行滲透。

透過上述文獻可發現，研究過程對於氯離子含量變化之方法，大部分皆是使用浸泡^[1-4, 8, 10-11]、額外添加^[5, 9]等方法進行氯離子滲透，在滲透過程時常消耗大量時間，因此需要發展其它加速氯離子滲透法來節省滲透時間。

2-3 氯離子滲透試驗

離子於混凝土中傳輸，必須透過水來做為媒介，藉由水穿梭於內部連通孔隙。Whiting (1970)^[12]提出一利用電化學原理快速評估混凝土抗氯離子滲透能力之試驗法(rapid chloride ion penetration test, RCPT)，傳輸機制主要係外加電場，藉由外加電場產生電解反應，使離子能在陰陽極之間游離，具有耗時短、量測簡易等優點。

現今 RCPT 被廣用於評估硬固混凝土之抗氯離子滲透能力(耐久性能力)，試驗步驟於 ASTM C1202 是將 $\phi 100 \times 50 \text{ mm}$ 之試體，先透過真空去氣飽和後，將試體兩側分別安裝上 0.3 N 氫氧化鈉水溶液與 3 % 氯化鈉水溶液試驗槽，並通以 60 V 電壓，並記錄通過電流，持續 6 小時，最後以 6 小時總通過電荷量 Q 評估試體抗氯離子滲透能力。

由於 RCPT 是利用類似電解電池(electrolytic cell)方式，由外加電場提供陰極電子，形成還原反應；在陽極吸收電子，造成氧化反應。而大部分混凝土被認為具有多孔隙的性質，能夠使 RCPT 之兩試驗槽中所解離的離子相互游離。因在試驗過程中，混凝土試體內部的離子能夠傳遞部分電流，由通過電流量來判斷試體抵抗氯離子的能力，導致有時容易會有誤判產生，例如混凝土中孔隙水以氫氧根 OH^- 為最主要，氯離子之離子移動率僅為氫氧根之 40 %^[13]。

三、試驗方法

3-1 試驗材料與設備

1. 氫氧化鈉(sodium hydroxide)
呈白色顆粒狀，無味，呈強鹼性，用於快速氯離子滲透試驗之水溶液。
2. 氯化鈉(sodium chloride)
用於快速氯離子滲透試驗之水溶液，呈白色顆粒狀，無味，呈中性。
3. 去離子水(de-ion water)
用於氯離子含量檢測使用，以確保無其他干擾因素存在。
4. 硝酸(nitric acid)
用於硬固混凝土中氯離子萃取與滴定試樣酸化所用，外觀為淡黃色帶透明之液體，具有辛辣味。在調配 1 : 1 硝酸時，係使用 68 % 硝酸與去離子水，以體積比 1 : 1 調配而成。
5. 過氧化氫(hydrogen peroxide)
用於硬固混凝土中氯離子萃取所用，將硫化物氧化，

增加試驗準確性，外觀為透明無色液體，有輕微刺激性氣味。

6. 硝酸銀(silver nitrate)水溶液
用於氯離子含量滴定使用，當量濃度 0.05 N，無色無味。
7. 甲基橙(methyl orange)指示液
每公升 95 % 乙醇含有 2 g 之甲基橙之比例調，作為氯離子含量滴定时酸度檢查所使用，以確保硝酸銀能與氯離子在酸性足夠下之環境反應，確保分析結果正確。
8. 自動電位滴定儀
型號為 ECO Titrator，用於氯離子選擇滴定，搭配之電極係採用銀電極。



圖 1. 甲基橙粉末與指示液

3-2 混凝土配比設計、拌合與抗壓強度

混凝土配比(表 1)是參考 ACI 混凝土配比設計法，粒料最大粒徑為 9.5 mm(三分石)，水灰比 0.64，含砂率 48 %。拌合程序為利用雙軸拌合機，以先加入水泥與砂乾拌 5 分鐘後，加入拌合水約 80 %，持續拌合 3 分鐘，並加入粗粒料與剩餘拌合水，持續拌合 5 分鐘。抗壓強度依照 ASTM C39 執行，於齡期 24 小時、7、28 天時，進行抗壓強度試驗，各齡期使用 5 個面乾內飽和狀態(SSD 狀態)之 $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ 圓柱試體，加載速率為 0.2942 MPa/sec，紀錄極限負載後，以式(1)計算強度，其中 f_{cm} 為抗壓強度(MPa)， P_{max} 為試體極限荷重(kN)， D 為試體平均直徑(mm)。

表 1. 混凝土配比表 (unit : kg/m^3)

W/C	Water	Cement	Fine Agg.	Coarse Agg.
0.64	228	359	856	936

$$f_{cm} = \frac{4000P_{max}}{\pi D^2} \quad (1)$$

3-3 快速氯離子滲透試驗

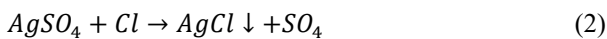
快速氯離子滲透試驗(RCPT)是參考 ASTM C1202 (混凝土抗氯離子滲透能力的電氣指示標準試驗法, 表 2 是判斷試體抗氯離子滲透能力的依據)所進行, 試體使用齡期 28 天之圓柱體切片, 在試體側面塗抹上環氧樹脂, 將試體抽至真空狀態 3 小時, 加入蒸餾水連續抽氣 1 小時, 最後放置 18 小時。將試體纏上防水膠布, 並將試體兩端分別浸入 3.0% NaCl 試驗槽及 0.3 N NaOH 試驗槽。在本研究中, 試驗的停止條件不是依 ASTM C1202 規定的 6 小時, 而是改採用依特定之總電荷通過量時停止 RCPT 試驗。

表 2. 以 6 小時通過電荷量判斷試體抗氯離子滲透能力

Charge Passed (coulombs)	Chloride Ion Penetrability
>4,000	High
2,000–4,000	Moderate
1,000–2,000	Low
100–1,000	Very Low
<100	Negligible

3-4 氯離子滲透深度

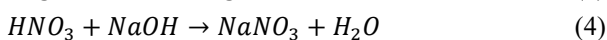
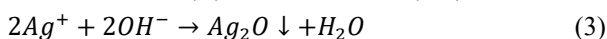
經 RCPT 滲透後之試體從中央位置縱向切割, 因切面的氯離子會受水影響, 用砂輪機磨除試體切面之受水影響範圍, 再於切割面表面噴上 0.1 N 之硝酸銀水溶液, 試體的氯離子會與硝酸銀形成氯化銀, 化學式如式(2), 經紫外線曝曬後, 有氯化銀之部分會呈現紫色, 量測其最深之滲透深度。



3-5 試驗槽氯離子含量

RCPT 試驗在不同通過電荷量時, 對氫氧化鈉(NaOH)與氯化鈉之試驗槽中取樣(氯化鈉使用 1 mL; 氫氧化鈉使用 7 mL), 以自動電位滴定儀(圖 2)搭配 0.05 N 硝酸銀溶液, 進行氯離子含量滴定。其中氫氧化鈉試樣, 在試驗前, 由於銀離子會與氫氧根反應成為氧化銀如式(3)所示, 為避免有此情況影響試驗結果, 需以硝酸進行前處理, 如式(4)所示產生硝酸鈉($NaNO_3$)。

氯離子含量的計算如式(5)所示, 其中 Cl 為游離性氯離子含量, 單位為百分比%, 35.45 為氯離子莫耳質量(g/mol), 0.1 為單位換算因子, V 為硝酸銀滴定當量(mL); N 為硝酸銀當量濃度(N); W 為樣品體積(mL)。



$$Cl (\%) = \frac{35.45 \times 0.1 \times V \times N}{W} \quad (5)$$

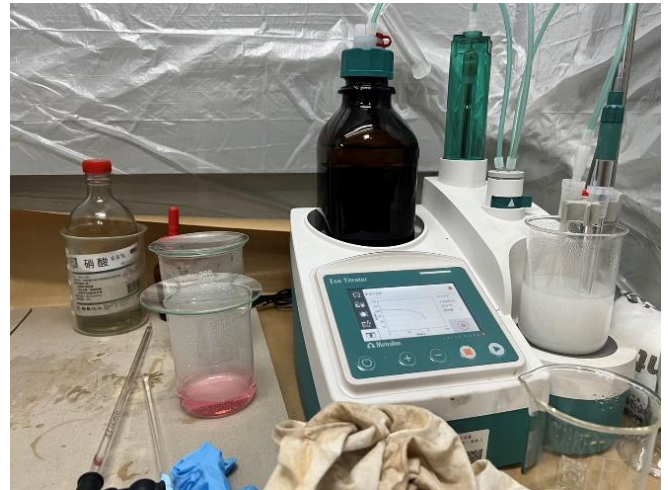


圖 2. 氯離子含量滴定過程

3-6 硬固混凝土中游離性氯離子含量

硬固混凝土中游離性氯離子含量試驗是依據 ASTM C1218 所進行, 經過氯離子滲透的試體, 取樣位置是在 NaCl 水溶液試驗槽側之試體面表面至深入 2 公分處的樣品。將取樣的試體敲碎, 研磨後通過 #20 篩, 取 10 ± 0.01 g 樣品進行試驗。將樣品放入 250 mL 燒杯中, 倒入 50 ± 1 mL 去離子水並加蓋後加熱, 於開始冒泡後計時 5 分鐘, 並移出熱源, 靜置 24 小時, 使用濾紙進行過濾。在濾液中加入 3 ± 0.1 mL 之 1:1 硝酸, 並加入 3 ± 0.1 mL 之過氧化氫, 加蓋靜置 1 分鐘, 並迅速煮沸, 煮沸後立刻移出熱源, 最後以自動電位滴定儀搭配 0.05 N 硝酸銀溶液進行游離性氯離子含量滴定。使用式(5)計算出游離性氯離子含量, 其中 W 為試樣重量(g), 並透過式(6)將游離性氯離子含量百分比轉換為相對於水泥之游離性氯離子含量。其中 Cl (% by cement) 為相對於水泥用量之氯離子含量; p 為已知之混凝土中水泥質量百分比。

$$Cl (\% \text{ by cement}) = Cl (\%) \times \frac{100}{p} \quad (6)$$

四、結果與討論

4-1 混凝土抗壓強度

依所使用之混凝土配比, 28 天之平均抗壓強度(f'_c)約為 33 ± 1 MPa, 1 天強度約為 28 天抗壓強度之 20%, 7 天強度約為 28 天抗壓強度之 82%, 如圖 3 所示。

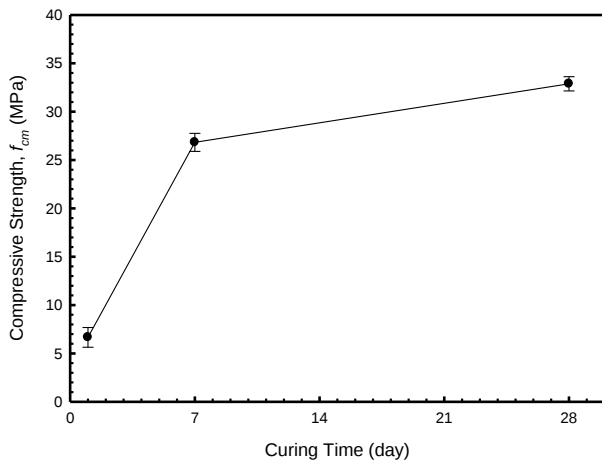


圖 3. 混凝土齡期-抗壓強度

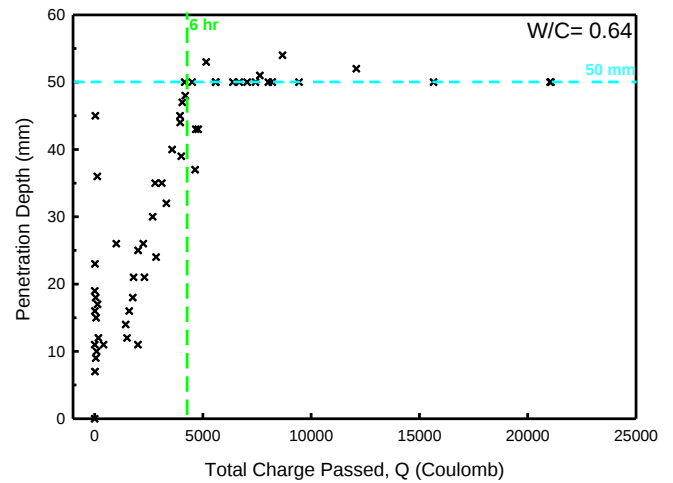


圖 5. 總通過電荷量與滲透深度關係

4-2 滲透時間與總通過電荷量

於特定總電荷通過量時停止快速氯離子滲透試驗，由圖 4 滲透時間與總通過電荷量關係得知，在經 6 小時(360 分鐘)滲透之試體，其通過電荷量平均約為 4400 C (庫倫)，透過表 2 可判斷出此配比之混凝土屬於『高氯離子滲透性』(high chloride ion penetrability)。圖 4 顯示，總通過電荷量與滲透時間具有一線性關係。因此，使用 RCPT 進行混凝土氯離子滲透時，能夠使用此線性關係特性來預估特定總通過電荷量之滲透時間。

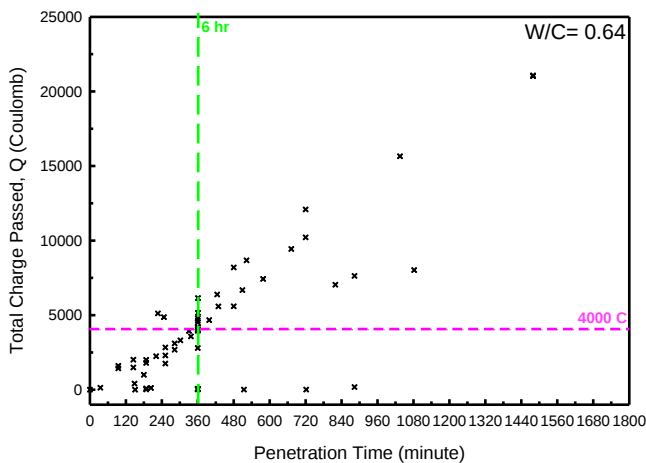


圖 4. 滲透時間與總通過電荷量關係

4-3 總通過電荷量與滲透深度

試體經過滲透後，噴塗上 0.1 N 硝酸銀水溶液，經紫外線曝曬後可觀測氯離子的滲透深度。由圖 5 得知，本研究使用之混凝土恰好在經過約 6 小時滲透(此時通過電荷量 4400 C)被氯離子完全穿透；其中，滲透深度有大於 50 mm 試體厚度之數值，係因試體切割時之誤差導致部分試體長度大於 50 mm。

4-4 試驗槽氯離子含量變化

為輔助證實氯離子在兩試驗槽間遷移之關係，在特定通過總電荷量時，自氫氧化鈉與氯化鈉之試驗槽中分別取樣以檢測氯離子含量。圖 6 試驗槽之氯離子含量變化結果可觀察到，在試體開始進行氯離子滲透之氯化鈉試驗槽中的氯離子濃度會開始下降；而氫氧化鈉試驗槽中的氯離子濃度，在試體被完全滲透(4400 C)後會逐漸開始提升，試體內部的氯離子開始遷移至氫氧化鈉試驗槽中。

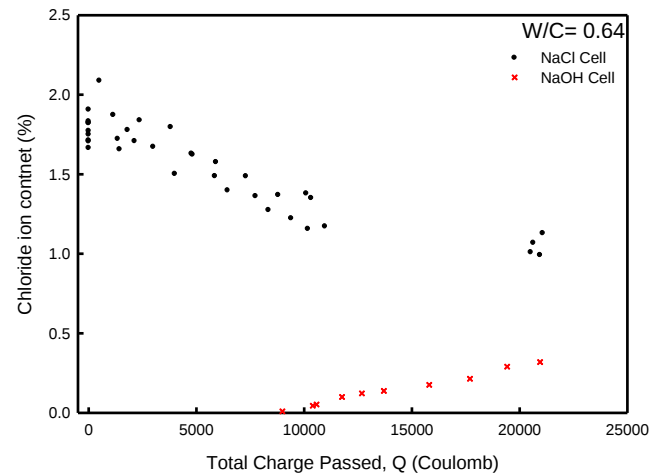


圖 6. 試驗槽中氯離子含量變化

圖 7 顯示試體之氯離子的滲透深度，4 組試體經紫外線曝曬後，透過相片變色處理，可觀察到氯離子不容易滲透到粒料中，而是沿著水泥漿體移動；且於氯離子完全滲透後，發現試體紫色深度逐漸均勻，表示試體內部的氯離子含量開始呈現平衡(如最右之試體)。



圖 7. 氯離子滲透深度(紫色)

4-5 總通過電荷量與游離性氯離子含量

游離性氯離子含量之試體取樣位置是位於氯化鈉試驗槽側之試體表面至深入 2 公分處，由圖 8 總通過電荷量與游離性氯離子含量關係得知，氯離子在開始滲透時，試體中的游離性氯離子會先急速增加，再逐漸緩慢增加並在約 5500 C 通過電荷量處的游離性氯離子含量會開始下降，這是因為試體被完全滲透(4400 C)後會導致試體內部的游離性氯離子逐漸被遷移至氫氧化鈉試驗槽中，因此可以明顯地看到游離性氯離子含量呈現下降趨勢。

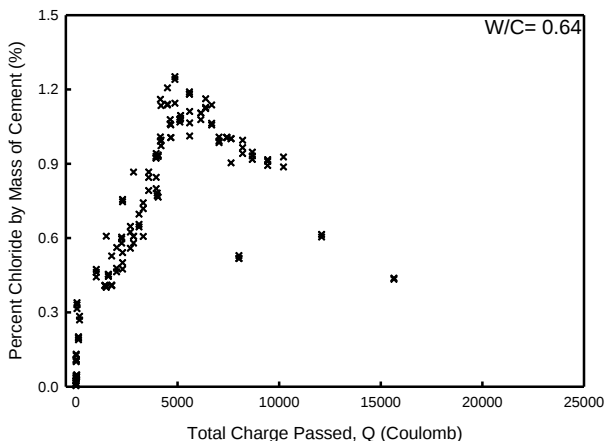


圖 8. 總通過電荷量與游離性氯離子含量

由於試體被氯離子完全滲透後之試體內部的氯離子會逐漸遷移至氫氧化鈉試驗槽中，導致試體內部的氯離子含量有降低趨勢，因此以 RCPT 做為研究混凝土氯離子含量之方法要留意此現象，即若以 RCPT 通過電荷量來決定試體氯離子含量之方法，不可用於在試體被氯離子完全滲透後之範圍(因為此時之氯離子含量會開始降低)。

繪製圖 8 之 0 - 5500 C 總通過電荷量之氯離子含量如圖 9 所示，此游離性氯離子含量資料庫可用於本研究之混凝土，只要知道混凝土 RCPT 的總通過電荷量，就可內插得到混凝土的氯離子含量。

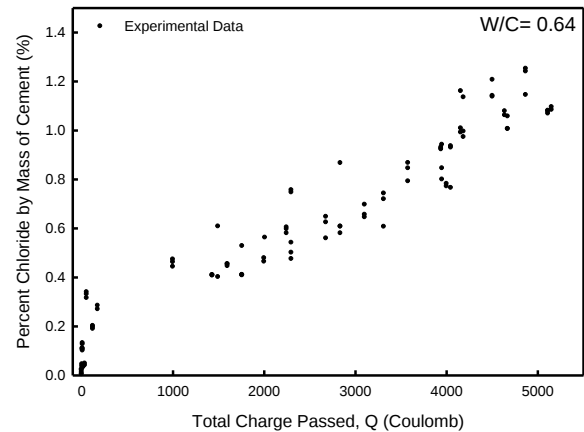


圖 9. RCPT 總通過電荷量與氯離子含量

五、結論

基於快速氯離子滲透試驗，本研究得到試驗結果如下：

1. 總通過電荷量與滲透時間具有線性關係，進行快速氯離子滲透時，能夠預估特定總通過電荷量之滲透時間。
2. 試體完全滲透後繼續進行 RCPT 試驗，其內部的游離性氯離子含量會開始減少。
3. 開始進行 RCPT 滲透試驗，氯化鈉試驗槽中的氯離子濃度會下降；在試體被氯離子完全滲透後，氫氧化鈉試驗槽中的氯離子濃度會逐漸增加。
4. 開始 RCPT 試驗時，試體中的游離性氯離子含量會先急速增加，氯離子滲透速率則會隨著滲透時間增加而降低；當試體被氯離子完全滲透後，內部的游離性氯離子含量會開始下降。
5. 針對試驗所使用之配比，本研究已獲得 RCPT 總通過電荷量與氯離子含量之資料庫適用範圍為 0 - 5500 C。

參考文獻

- [1] Montemor, M. F., Alves, J. H., Simoes, A. M., Fernandes, J. C. S., Lourenço, Z., Costa, A. J. S., & Ferreira, M. G. S. (2006). Multiprobe chloride sensor for in situ monitoring of reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 28(3), 233-236.
- [2] Jin, M., Jiang, L., Tao, D., & Bai, S. (2016). Characterization of Ag/AgCl electrode manufactured by immersion in sodium hypochloride acid for monitoring chloride content in concrete. *Construction and building materials*, 122, 310-319.
- [3] Jin, M., Jiang, L., & Zhu, Q. (2017). Monitoring chloride ion penetration in concrete with different mineral admixtures based on embedded chloride ion selective electrodes. *Construction and Building Materials*, 143, 1-15.
- [4] Du, Z., Tian, L., Wang, P., Chen, Z., Cui, D., Jin, Z., & Zhang, H. (2022). All-solid-state chloride sensor for in-situ monitoring of chloride penetration in concrete. *Construction and Building Materials*, 357, 129345.
- [5] Park, W. J., Lee, H. S., Joh, S. H., & Lee, H. S. (2014). Monitoring method for the chloride ion penetration in mortar by a thin-film sensor reacting to chloride ion. *Construction and Building Materials*, 53, 403-410.
- [6] Enevoldsen, J. N., Hansson, C. M., & Hope, B. B. (1994). Binding of chloride in mortar containing admixed or penetrated chlorides. *Cement and Concrete Research*, 24(8), 1525-1533.
- [7] Suryavanshi, A. K., Scantlebury, J. D., & Lyon, S. B. (1996). Mechanism of Friedel's salt formation in cements rich in tri-calcium aluminate. *Cement and Concrete Research*, 26(5), 717-727.
- [8] Kim, H. K. (2015). Chloride penetration monitoring in reinforced concrete structure using carbon nanotube/cement composite. *Construction and Building Materials*, 96, 29-36.
- [9] Gandía-Romero, J. M., Bataller, R., Monzón, P., Campos, I., García-Breijo, E., Valcuende, M., & Soto, J. (2016). Characterization of embeddable potentiometric thick-film sensors for monitoring chloride penetration in concrete. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 222, 407-418.
- [10] Jin, M., Jiang, L., Lu, M., & Bai, S. (2017). Monitoring chloride ion penetration in concrete structure based on the conductivity of graphene/cement composite. *Construction and Building Materials*, 136, 394-404.
- [11] Jeong, H., Jung, B. J., Kim, J. H., & Kim, K. S. (2024). 6-Methoxyquinoline immobilized nylon sensor for monitoring chloride concentration in reinforced concrete. *Measurement*, 114395.
- [12] Whiting, D. (1981). Rapid measurement of the chloride permeability of concrete. *Public Roads*, 45(3).
- [13] Page, C. L., & Vennesland, Ø. (1983). Pore solution composition and chloride binding capacity of silica-fume cement pastes. *Matériaux et construction*, 16, 19-25.
- [14] Cheng, Y. S., Pan, H. H., & Wu, C. H. (2023, April). Piezoelectric cement sensor-based electromechanical impedance technique for the chloride ion content monitoring of hardened concrete. In *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure, and Transportation XVII* (Vol. 12487, pp. 282-291). SPIE.

論文說明:

論文子題類別	☐ 結構與大地	☐ 環境工程	☒ 工程材料	☐ 防災及重建
	☐ 水資源工程	☐ 永續與生態工程	☐ 營建與交通	☐ AI 競賽
	☐ 工程與 AI	☐ 其他		
計畫案編號	MOST 108-2221-E-992 -008 -MY3			
聯絡作者	鄭祐紳			
聯絡地址	高雄市三民區建工路 415 號			
聯絡電話/傳真	電話: 0973 665 939			
E-mail	sh1020610@gmail.com			