

科技部補助專題研究計畫  
成果報告書

MOST 104-2221-E-157-010 號

纖維與混凝土界面氯離子  
傳輸行為之研究（二）

甲方：科技部

乙方：中華學校財團法人中華科技大學 建築系

計畫主持人：卓世偉

# 科技部補助專題研究計畫成果報告

(期中進度報告/期末報告)

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：MOST 104-2211-E-157-010

執行期間：104年8月01日至105年9月30日

執行機構及系所：中華學校財團法人中華科技大學建築系

計畫主持人：卓世偉

共同主持人：

計畫參與人員：潘柏呈、林煜傑

本計畫除繳交成果報告外，另含下列出國報告，共 1 份：

執行國際合作與移地研究心得報告

出席國際學術會議心得報告

期末報告處理方式：

1. 公開方式：

非列管計畫亦不具下列情形，立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權，一年二年後可公開查詢

2. 「本研究」是否已有嚴重損及公共利益之發現：否 是

3. 「本報告」是否建議提供政府單位施政參考 否 是，\_\_\_\_\_ (請列舉提供之單位；本部不經審議，依勾選逕予轉送)

中 華 民 國 105 年 10 月 25 日

## 目次

目次 .....	I
表次 .....	II
圖次 .....	III
摘要 .....	IV
ABSTRACT .....	V
第一章 研究緣起與背景 .....	1
第二章 文獻探討 .....	11
第三章 研究內容 .....	16
第四章 結果與討論 .....	31
第五章 結論與建議 .....	35
參考書目 .....	36

## 表次

表 1 常用纖維材料性質 [1] ..... 錯誤! 尚未定義書籤。

表 2 本計畫纖維水泥砂漿配比變數 . 錯誤! 尚未定義書籤。

## 圖次

圖 1 鋼纖維混凝土界面過渡區示意圖	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 2 貯鹽試驗照片 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3 氯離子含量與侵入深度關係示意圖 ..	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 4 AUTOPORE 9500 壓汞孔隙儀	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5 纖維水泥複合材料示意圖 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 6 鋼纖維光學顯微鏡微觀照片 .....	32
圖 7 聚丙烯纖維光學顯微鏡微觀照片 .....	32
圖 8 AR玻璃纖維光學顯微鏡微觀照片 .....	32
圖 9 碳纖維光學顯微鏡微觀照片 .....	32
圖 10 聚丙烯纖維砂漿 91 天基本力學性質 (水灰比 0.35) .....	34
圖 11 聚丙烯纖維砂漿 91 天基本力學性質 (水灰比 0.35) .....	34

## 摘要

關鍵詞：纖維、混凝土、界面過渡區、氯離子傳輸行為

本計畫為第二年計畫。本計畫為延續上一年度計畫，今年度主要探討纖維於混凝土界面過渡區的傳輸行為對整體複合材料的影響，以及是否與粗骨材的界面過渡區對混凝土整體氯離子傳輸行為產生共同影響。纖維混凝土利用纖維均勻分佈於混凝土漿體內之複合材料，由於混凝土屬於脆性材料的一種，對承受抗拉力的行為相當弱，因此可藉由混凝土添加纖維，促使遇拉力時，裂縫端成長路徑可被纖維截斷，增加其破壞應變。運用於混凝土為近20年才開始發展，但相關氯離子傳輸性質之耐久性文獻研究較少。本研究擬已試驗搭配理論模式分析纖維加入混凝土中對氯離子傳輸行為的影響，藉以通盤了解纖維混凝土耐久性。試驗變數設計以纖維用量、碳纖維種類、骨材體積量、與水灰比為主。相關試驗除氯離子傳輸特性探討外，亦進行抗壓強度試驗與抗彎試驗。氯離子傳輸特性以貯鹽試驗進行評估。微觀量測亦進行SEM電子顯微鏡觀察，藉以完整架構纖維與水泥質材料界面之關係。

## ABSTRACT

Keywords: Fiber, Concrete, Interface Transition Zone, Chloride Ion Transport Behavior

The plan for this year focuses on the effect of fiber on the chloride ion transport behavior of interface transition zone (ITZ) on the overall composite. And combined the effect produces by coarse aggregates. Because concrete is a kind of brittle materials. Therefore add fiber concrete, when in the tension condition, crack path can be cut off by fibers, and increase its failure strain. Fiber used in concrete for nearly 20 years began to develop, but the relevant literature for the chloride ion transport properties of few studies. In this study, experiments with theoretical models for analyzing effect of chloride ion transport behavior of fiber concrete. Test variables included the amount of fiber, fiber type, coarse aggregate volume, and water-cement ratio. Mechanical tests include compressive strength test and bending test. Chloride ion transport properties of concrete will be assessing by using the salt ponding test. The SEM will be using to study microscope of interface transition zone. And complete the study of fiber concrete interface transition zone..

## 第一章 研究緣起與背景

### 第一節 研究緣起

纖維混凝土(Fiber Reinforced Concrete, 簡稱FRC)是一種利用纖維均勻分佈於混凝土漿體內所構成的複合材料，由於混凝土屬於脆性材料的一種，對承受抗拉力的行為相當弱，因此可藉由混凝土添加纖維，促使遇拉力時，裂縫端成長路徑被纖維截斷，並將拉力破壞能量由混凝土轉移至纖維與混凝土之間的剪應力與纖維本身的拉應力上，直至纖維受到拉脫破壞為止，所以其破壞應變會明顯變高 [1]。由於纖維混凝土具有較一般混凝土較好之韌性、耐衝擊性、撓曲強度以及抗裂能力，因此未來土木及建築工程上之相關應用勢必更加廣泛，如大量運用薄殼結構設計的建築上。

目前常用於加入混凝土的纖維有4種。其中鋼纖維(Steel Fiber)與玻璃纖維(Glass Fiber)屬於人造礦物纖維。聚丙烯纖維(Polypropylene Fiber)與碳纖維(Carbon Fiber)屬於合成纖維。其相關材料性質如表1所示。用於混凝土之鋼纖維直徑約5至500  $\mu\text{m}$  (最常用為200至500  $\mu\text{m}$ )。鋼纖維因

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

每立方米混凝土通常加入40至160公斤鋼纖維，且其比重大及材質堅硬，容易磨損灌漿機具設備，而且鋼纖維混凝土不容易往上輸送，常被限制用於地板鋪面灌漿作業上[2]。玻璃纖維直徑約在9至15  $\mu\text{m}$ ，屬於微細纖維（直徑小於 $<25\mu\text{m}$ ），比重約與混凝土用骨材相當，但彈性模數只有鋼纖維的1/3。其主要缺點為耐鹼性，但近年來有改良型的AR玻璃纖維（含有16%至20% $\text{ZrO}_2$ ）可以抵抗高鹼性環境。聚丙烯纖維是一種由丙烯瓦斯通過哪塔觸媒 (Natta's Catalyser) 聚合而成的聚合物，其生產費用是四種纖維中最低，單絲直徑通常為20至50  $\mu\text{m}$ ，比重比水輕，彈性模數也小於鋼纖維。對於混凝土於高氣溫、高風速以及低濕度下易產生的收縮現象，具有甚大的抑制效果，因此在防止混凝土塑性收縮、乾縮上可發揮甚大的效益。碳纖維其本身抗拉強度（2.5~4GPa）可高於鋼纖維（2GPa）；拉力破壞應變（0.5~2.4%）亦與鋼纖維相當（0.5~3.5%）；且單位重（1.6~2.2）遠輕於鋼纖維（7.8）。一般加入於混凝土的碳纖維直徑約6~20  $\mu\text{m}$ ，相較於常見的鋼纖維混凝土所使用的大尺寸鋼纖維（直徑約200至500  $\mu\text{m}$ ），更可使纖維間距縮小增加整體抗拉強度，且並不會有生鏽現象。過去因為碳纖維的費用太高（高於3000元/公斤），因此碳纖維大多以二維貼片形式（將碳纖維浸於接著樹脂硬

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

化製成)，包覆在受損的混凝土結構上，即在可接受高成本的維修補強場合上。近20年來碳纖維生產技術迅速進步，由過去以螺縈纖維素 (Rayon Cellulose) 為原料的製程，到現在90%產能以石化產品聚丙烯睛 (PAN) 和瀝青 (Pitch) 為原料製成，生產成本已大幅降低至800元/公斤以下。因此近年來有較多碳纖維加入於混凝土的相關力學性質相關研究。

表1 常用纖維材料性質 [1]

纖維種類	比重	彈性模數 GPa	柏松比	抗拉強度 GPa	破壞應變 (%)
鋼纖維	7.8	210	0.28	0.5~2.0	0.5~3.5
AR 玻璃纖	2.6	70~80	0.22	2.0~4.0	2.0~3.5
聚丙烯纖維	0.9	5~77	0.29	0.5~0.75	8.0
碳纖維	1.9	230	0.35	2.6	1.0

纖維加入混凝土中雖然有許多研究說明對力學性質的改善，過去申請人卓世偉亦曾對水工混凝土添加碳纖維進行耐衝擊研究，發現碳纖維雖然對耐衝擊具有正面的效益，但當進行ASTM C1543貯鹽試驗後發現混凝土整體氯離子擴散係數隨碳纖維量增加而上升，表示碳纖維對混凝土耐久性並無助益[3]，如下圖1所示。探討其影響因素發現可能受到纖

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

纖維與混凝土之間的界面影響，但纖維與混凝土之間界面研究，尤其是傳輸行為所衍生的整體耐久性影響卻鮮少文獻提及。在界面傳輸行為研究上過去大多探討骨材與水泥漿體所形成的界面過渡區 (Interface Transition Zone, 簡稱ITZ) 對整體耐久性與力學影響。並認為ITZ區域過多除了造成混凝土力學行為負面影響外，也是降低混凝土耐久性的主要因素。

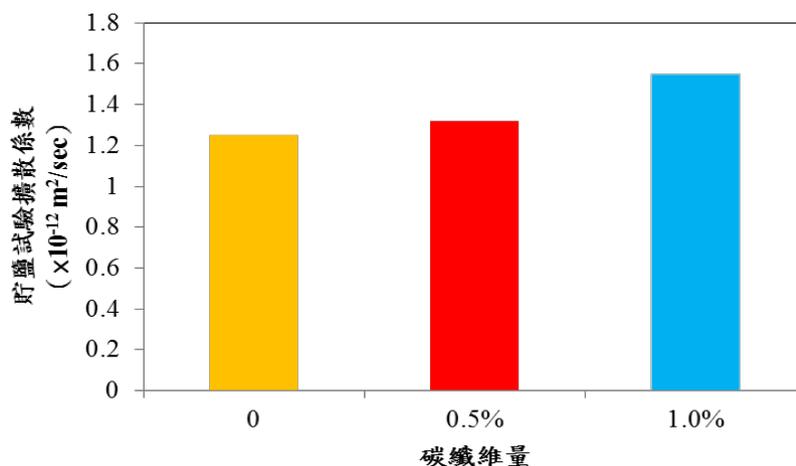


圖1 碳纖維混凝土貯鹽試驗結果 [3]

纖維主要功能是抑制裂縫端成長，因此需具一定長度使其產生纖維橋接 (Fiber Bridge) 作用，當纖維方向與混凝土方向受力一致時，纖維的增強效率最佳，而當纖維方向與混凝土受力方向垂直時，增強效率最差，但纖維加入混凝土屬

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

於隨機加入，因此當纖維分布密度較均勻時，對混凝土的增強效果較好。為使纖維可均勻分布，於混凝土拌合中不會集結成球，通常使用纖維的長度是直徑50至150倍 [4]。而纖維長度與混凝土耐久性之間的關係，相關文獻僅有Toutanji等人 [5]於1988年由聚丙烯纖維含量探討對ASTM C1202-RCPT試驗結果的影響，發現聚丙烯纖維含量越高，混凝土總通過電量越高，表示抗氯離子傳輸特性越差。但Toutanji等人認為這項試驗結果是因為聚丙烯纖維在水泥漿體沒有完全分散，有團聚情形，導致漿體內存在較多空隙所造成，並建議減少聚丙烯纖維長度至12.5 mm與添加矽灰改善，但Toutanji等人並未探討是否為纖維與混凝土界面的影響。

而對纖維混凝土界面過渡區的描述，Mindess等於「Concrete」書中以鋼纖維混凝土為例進行說明，當鋼纖維混凝土水化時，部分拌合水會受到纖維阻擋，導致纖維周圍會有泌水現象，並從纖維表面10  $\mu\text{m}$ 至50  $\mu\text{m}$ 內發現鬆散水泥顆粒堆積，最後發展為存在CH水化物的多孔性區域 [4]，如下圖2所示。國內蔡明昌與李國榮 [6]對碳纖維與水泥漿界面進行SEM微觀觀察也發現，碳纖維水泥複合材料界面區內，其水泥膠體結構排列較為鬆散，界面區30  $\mu\text{m}$ 內，所分布水

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

泥膠體大多為CH膠體，而此現象與骨材界面過渡區的發展趨勢相同。但對纖維所產生的界面過渡區於離子傳輸行為及整體耐久性的影響並無相關論述。

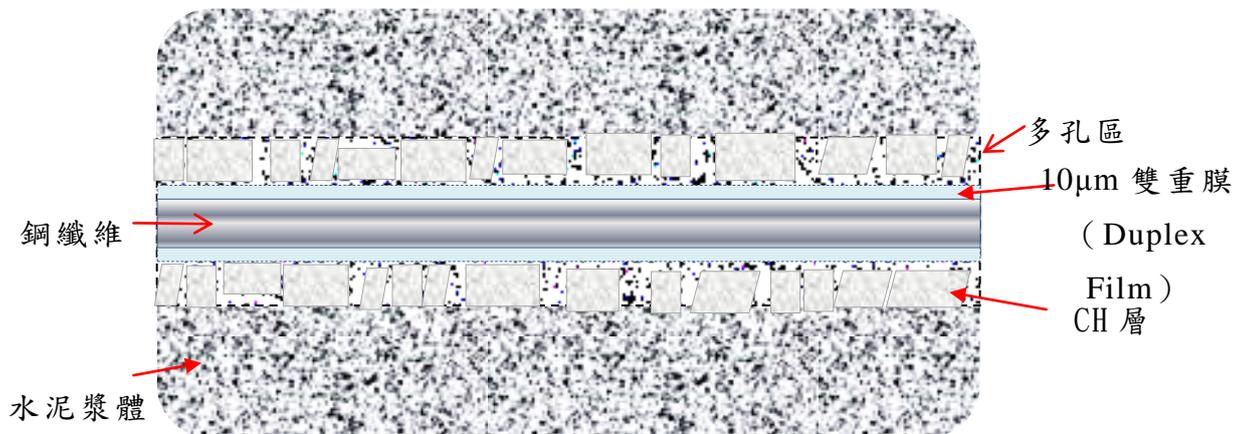


圖2 鋼纖維混凝土界面過渡區示意圖 [4]

界面過渡區對混凝土材料而言，界面過渡區可視為小型的裂縫帶。當氯離子於混凝土漿體內毛細孔隙或已存在的微裂縫傳遞時，纖維可形成阻隔效應使氯離子傳輸路徑被阻擋。但另一方面，長條狀纖維與水泥漿體界面產生弱面，當氯離子流徑受到纖維阻隔後，界面過渡區便提供了轉向的傳輸路徑，加速離子傳輸。而界面過渡區的寬度與緻密性便是影響傳輸行為的主要因素，寬度與緻密性又與漿體與纖維間的化學鍵結效果有關。而細長的纖維加入混凝土中，所產

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

生的界面過渡區可能是連續性的影響，這方面的影響研究便是本計畫擬探討的主要方向。

另一方面纖維除了在混凝土承受應力時抑制裂縫端成長，助長混凝土抗拉行為外，改善混凝土於火害下的爆裂現象也是其主要功能。火害所產生的高溫會導致混凝土產生許多微裂縫，同樣如果混凝土長期處於日曬環境亦會因為熱的蓄積產生微裂縫，導致整體耐久性變差，如過去文獻針對RC建築物外牆與樓板進行溫度量測，當大氣溫度由早晨的28.2°C升高至中午37.8°C時，外牆水泥砂漿表面可由28.9°C升高至54.0°C。樓板表面水泥砂漿溫度則由29.0°C升高至78.2°C。相關的溫度變化所引起的張力應變可能會造成內部微裂縫成長。FitzGibbon曾對混凝土內部的影響進行研究，認為當混凝土內外溫度相差20°C時，張力應變會超過 $200 \times 10^{-6}$ ，並開始裂縫端成長[7]。國內楊仲家教授亦有研究指出當水泥砂漿進行每天12小時50°C烘箱劣化時，經28天劣化後，抗壓強度僅衰減約2.1%，但氯離子擴散係數卻增加了201% [8]。因此當混凝土受蓄熱導致裂縫端成長時，纖維會加以抑制，此種效應對混凝土整體耐久性可能是正面效益，但纖維與混凝土內部界面的負面效益影響是否增大卻無相關研究說明。因此本計畫亦針對纖維混凝土承受應力與蓄熱環境下界

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

面傳輸行為的改變進行探討。最後由上述試驗結果與理論模式模擬建立纖維種類、纖維長度、纖維量與混凝土界面傳輸行為之關係以供後續纖維混凝土配比設計與工程運用之參考。

### 2.計畫之目的

### 3.計畫之重要性

## 第二節 研究目的

由上述的研究背景可以發現纖維具有抑制裂縫端成長的功能，而纖維與混凝土界面亦可能對整體耐久性產生影響。因此本計畫研究主要目的希望由纖維與混凝土界面對氯離子傳輸行為影響的了解，並交叉比對其正負面效益，建立纖維混凝土整體耐久性評估方式。相關研究以目前常用的鋼纖維、玻璃纖維、聚丙烯纖維、與碳纖維為研究對象。第一年利用水泥砂漿探討各種纖維變數與水泥漿體界面過渡區的關係，並由複合材料理論模式推估纖維水泥質複合材料界面過渡區的傳輸行為，目前上一年度計畫已由科技部核准補助

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

進行，執行至今為第 5 個月，目前進度良好。本年度將纖維加入混凝土中，利用過去文獻探討骨材影響混凝土傳輸行為的四個效應與探討各種纖維變數與混凝土界面過渡區的影響行為說明纖維對混凝土整體傳輸性質行為與影響。相關研究項目如下：

1. 不同纖維種類對混凝土氯離子傳輸行為影響關聯性建立。
2. 不同纖維用量對混凝土氯離子傳輸行為影響關聯性建立。
3. 藉由 SEM 掃描式電子顯微鏡觀察，探討纖維與水泥之間界面區域微觀性質。
4. 藉由 MIP 壓汞儀孔隙量測，探討纖維用量對與水泥之間界面區域孔隙率關聯性的影響。
5. 探討不同水灰比對纖維整體性質、纖維與水泥漿體之間界面區域的影響。
6. 由複合材料理論模式建立纖維水泥質複合材料界面過渡區的影響。
7. 混凝土骨材界面過渡區和纖維與混凝土界面過渡區傳輸性質比較。
8. 纖維與混凝土界面過渡區對整體傳輸行為影響探

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

討。

9. 纖維混凝土整體傳輸性質行為評估模式建立。

## 第二章 文獻探討

本計畫主要探討纖維與混凝土界面對氯離子傳輸行為的影響。由於纖維與骨材均屬於混凝土中的置入物，並不會像漿體基材具有黏結性，因此纖維如同骨材一樣並不會與漿體產生完美的鍵結 (Perfect Bond)。目前由骨材界面過渡區傳輸行為的相關研究，可以發現界面過渡區是影響混凝土整體傳輸行為的主要因素之一。如申請人卓世偉過去2003年的研究，發現當骨材界面過渡區厚度為 $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $40\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 、與 $100\mu\text{m}$ 。基於上述假設的界面過渡區厚度，則界面過渡區傳輸性質分別為漿體的3.681倍、2.311倍、1.627倍、1.400倍、1.288倍、與1.220倍 [9]。而於2005年以3公分高度不同直徑的圓柱型石材探討當界面過渡區連續時，界面過渡區傳輸性質相當於漿體的35.5至40.6倍 [10]。而由上述的研究經驗可以發現骨材界面過渡區對整體混凝土氯離子傳輸行為造成的影響。纖維使用於混凝土的長度通常為其直徑的50至150倍，因此其中所產生的界面過渡區也屬於連續性的界面過渡區，由骨材界面過渡區的經驗，其傳輸行為影響混凝土整體耐久性所占比例可能相當高。因此在纖維混凝土運用面越來越多的趨勢，對纖維混凝土傳輸行為的影響與

建立評估模式有其重要性。

#### 4. 國內外有關本計畫之研究情況

近年來國內外有關纖維混凝土的相關研究仍以改善混凝土力學行為的相關行為，如韌性與拉力行為。因此大多為超高強混凝土配比設計方面研究或利用纖維抑制裂縫特性，或探討使用再生材料混凝土的韌性加強研究。如鋼纖維混凝土最新研究方面，Carneiro 等再生骨材混凝土加入 0.75% 體積量的鋼纖維，發現可有效改善再生骨材混凝土的脆性缺點 [11]。Ma 等探討鋼纖維於輕質骨材混凝土的力學行為，發現鋼纖維體積量由 0% 增加至 2% 時，其力學性能可高於 78% 傳統骨材混凝土 [12]。Altun 與 Aktaş 也有類似的研究 [13]。玻璃纖維方面，有 Yu 與 Kodur 探討玻璃纖維水泥質材料的火害後行為，發現玻璃纖維水泥質材料在 400°C 環境下仍可維持一定性能 [14]。Barluenga 與 Hernández-Olivares 也有對 AR 玻璃纖維在自充填混凝土早期乾縮裂縫控制的影響相關研究成果 [15]。聚丙烯纖維方面，最新的運用有 Behfarnia 與 Behravan 運用於混凝土水管製作上 [16]。Çavdar 則認為聚丙烯纖維混凝土對凍融現象有正面改善的影響 [17]。碳纖維方面，由於碳纖維成本降低後，因此有關混凝土加入碳纖維對力學性質影響研究有增加之趨勢，如 Deng

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

於 2005 年的研究，探討混凝土添加碳纖維（長度 25 mm）0.1% 至 0.3% 時的力學性質，試驗包含坍度、抗壓強度、與三點抗彎疲勞破壞試驗。試驗主要結果發現添加 0.3% 碳纖維可較未添加混凝土增加 2.8 倍疲勞壽命（fatigue life） [18]。2006 年 Wang 等也有類似的研究，並於結論提出除了疲勞壽命增加外，碳纖維確實有抵抗裂縫尖端延展與增加韌性效能，此外亦利用碳纖維電阻特性，預測碳纖維混凝土破壞現象 [19]。Bontea 等也利用用碳纖維電阻特性預測碳纖維混凝土承受應力時破壞現象的論文 [20]。最近的研究為 Giner 等利用同樣長度（35 mm）與添加量碳纖維及鋼纖維加入混凝土中，分析兩種混凝土材料的動態特性與阻泥能力（damping ability），由試驗結果發現在相同動態載重下，碳纖維混凝土較鋼纖維混凝土因阻尼比增加，可有效減低振動，展現較高動彈性性質，但同樣的亦發現兩種混凝土材料抗壓強度均較未添加有微幅下降之情形 [21]。國內方面有嘉義大學劉玉雯教授團隊針對纖維混凝土運用於水工結構物上使用研究，並發現當混凝土中摻加碳纖維、抗鹼玻璃纖維與鋼纖維（直徑約 2 mm）等三種纖維時，以鋼纖維混凝土在抗衝擊與摩擦磨耗性質方面之表現最好，但在抗撞擊性能上，則不如碳纖維與玻璃纖維者；而玻璃纖維混凝土在抗撞擊性能上之表

現最佳 [22]。

然而對纖維混凝土氯離子傳輸特性或界面性質，目前相關文獻與研究較少。國外有 Mindess 等 [4]對鋼纖維與混凝土界面過渡區現象的描述；國內蔡明昌與李國榮 [6]對碳纖維與水泥漿界面進行 SEM 微觀觀察說明界面過渡區的寬度範圍。但對此細長型界面過渡區對傳輸行為的影響則無文獻研究提及。

在水泥質材料界面微觀行為研究方面，過去國內外研究均有相當豐碩之研究，但均屬於骨材與漿體之間的界面行為研究。國外美國標準局 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 及先進水泥質材料研究中心 (Center for Advanced Cement-Based Materials, ACBM) 共同執行計畫，研發出 Hard Core/Soft Shell 軟體以模擬水泥質複合材料的微觀結構，由此 Snyder 等人藉由此軟體說明界面過渡區於水泥質材料中之特性 [23]。Bentz 等則利用此軟體說明骨材尺寸效應與界面過渡區的關係[24]。而最重要參考文獻則以 1999 年 Shah 等 [19]提出四個描述骨材對水泥基複合材料滲透率的影響效應觀點為出發點。Shah 將骨材對水泥基複合材料滲透率的影響分別為阻隔效應 (dilution)、迂迴效應 (tortuosity)、界面過渡區 (interfacial transition zone)、與

浸透效應 (percolation) [25]，由此理論申請人與國內楊仲家教授研究團隊合作計算出骨材與水泥漿體界面過渡區，會是水泥漿體的 2.83~1.55 倍 [9]，並探討浸透效應的影響。計畫申請人亦於 2003 年執行國科會計畫，發現當界面過渡區連續時，界面過渡區傳輸性質高達漿體的 35.5 至 40.6 倍，並發表相關文章 [10]。計畫申請人亦於 2012 年發表文章利用 MIP 試驗配合 Shah 提出的理論觀點，探討骨材與水泥漿體界面性質 [26]。

另一重要之參考文獻為 Mori Tanaka 以複合材料彈性模數性質所推導的置入物理論 [27,28]，此理論有別於傳統 Voight model 利用母材與置入物於受力時產生相同的變形之假設；Reuss model 利用母材與置入物承受相同應力假設來計算複合材料彈性模數。可精準描述與推估置入物隨機置入母體內，個別置入物對整體複合材料的行為，由此可由過去一維方向的理論描述運用於三維空間中。過去 Yang 等利用置入物理論與混凝土彈性模數成功探討界面過渡區微觀力學行為 [29]。本研究亦將以 Mori-Tanaka 理論配合 Shah 提出的理論觀點探討纖維於混凝土中界面過渡區之傳輸性質影響。

### 第三章 研究內容

本計畫以試驗研究與理論模式分析為研究方法。相關研究以目前常用的鋼纖維、玻璃纖維、聚丙烯纖維、與碳纖維為研究對象。利用上一年度水泥砂漿探討各種纖維變數與水泥漿體界面過渡區的關係，並由 Mori Tanaka 複合材料理論模式推估纖維水泥質複合材料界面過渡區的傳輸行為；本年度將纖維加入混凝土中，利用過去文獻探討骨材影響混凝土傳輸行為的四個效應與上一年度各種纖維變數與混凝土界面過渡區的成果說明纖維對會混凝土整體傳輸性質行為與影響。相關研究方法、進行步驟及執行進度如下所述。由於研究主要探討纖維於混凝土界面過渡區的傳輸行為對整體複合材料的影響，以及是否與粗骨材的界面過渡區對混凝土整體氯離子傳輸行為產生共同影響。因此試驗變數上除纖維種類、纖維加入混凝土的體積量、與水灰比外，考量粗骨材於配比設計中的體積量。進行試驗研究以 ASTM C1543 貯鹽試驗為主。圖 3 為本計畫擬進行流程圖。相關試驗配比規劃、試驗方法、分析方式、與執行進度如下所述。

### A. 試驗配比

在纖維混凝土試驗配比變數設計上，分別為纖維種類、纖維加入混凝土的體積量、水灰比、與骨材體積量。纖維種類同樣以目前常用的鋼纖維、玻璃纖維、聚丙烯纖維、與碳纖維為研究對象，為配合研究觀察與理論分析以單絲纖維與長直形圓截面為主，試驗長度固定為 10 mm，使其展弦比 (Aspect Ratio) 均控制在 50 至 150 之間，纖維加入複合材料體積量設計修改為 0%、1%、3%。混凝土母體亦為 20% 細骨材體積量之水泥砂漿。水灰比設計調整為 0.25 與 0.45 兩種，可了解高低水灰比過渡區範圍的變化。粗骨材體積變數為 20%、30%、40%、50%。為避免材齡影響，均不添加礦物摻料 (飛灰或爐石)。本年度研究變數共製作 66 組配比，表 2 為計畫配比設計變數彙整表。

表 2 配比變數設計

配比變數	變數範圍
碳纖維總類	鋼纖維、AR 玻璃纖維、聚丙烯纖維、 與碳纖維
碳纖維用量	0%、1%、3%
水灰比	0.25、0.45

纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

粗骨材體積量	0%、20%、30%、40%、50%
--------	--------------------

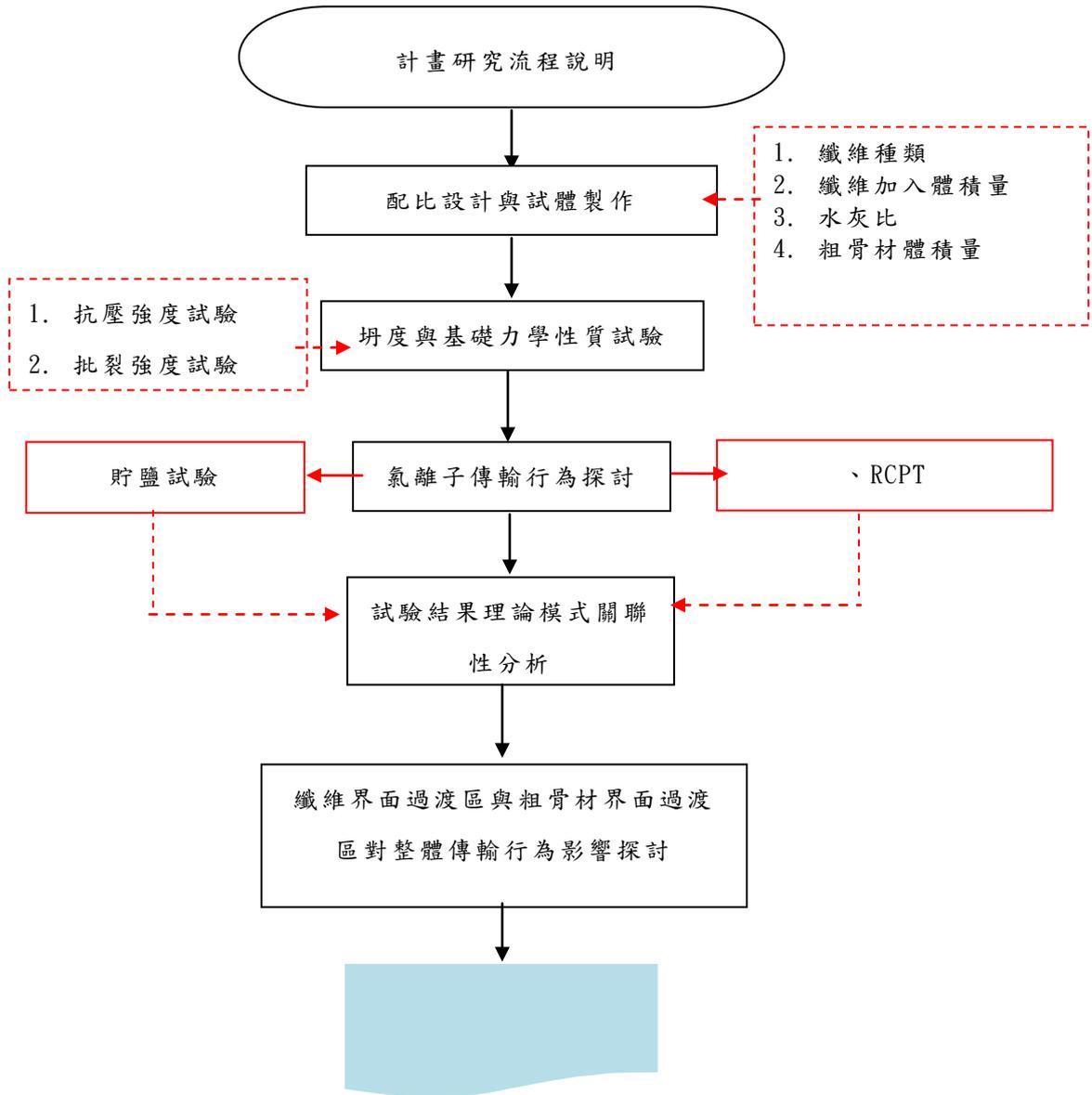


圖 3 計畫研究流程圖

## B. 試驗方法

相關試體均水中養護 91 天後進行試驗。試驗於基本力學性質試驗方面擬依 ASTM C39 進行抗壓強度試驗與劈裂強度試驗。除此之外亦由上年度研究發現纖維量會影響流度，因此將固定強塑劑使用比例，並依 ASTM C143 進行坍度試驗以說明工作度的影響。在氯離子傳輸特性的研究方面，依 ASTM C1543 進行貯鹽試驗。另由上一年度的試驗經驗，CNS 14795 標準 RCPT 法有快速評估氯離子傳輸行為的優點，因此建議可一併進行，以初步了解纖維對混凝土傳輸行為的影響，亦可評估 RCPT 這類快速試驗法用於纖維水泥質材料的可行性。微觀試驗方面以 SEM 電子顯微鏡觀察。貯鹽試驗方法與氯離子擴散係數計算方式與第一年研究相同。

### (1) 氯離子傳輸特性評估試驗-Ponding Test

ASTM C1543 貯鹽試驗，係將達齡期之直徑 10 cm 圓柱試體側邊使用環氧樹脂塗封（頂部與底部除外），頂部上方並以壓克力環形成圍堰，於圍堰中加入 3% 氯化鈉溶液，為使液面不受蒸發影響，以 PE 膜將圍堰開口密封，如圖 4 所示。並每個月將氯化鈉溶液更換。

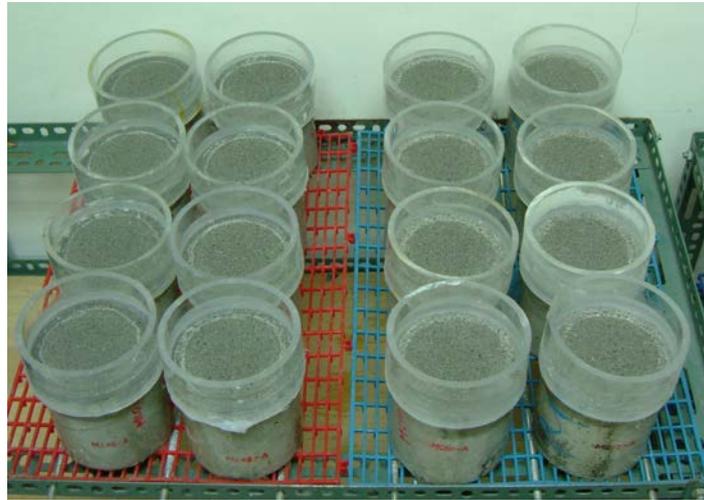


圖 4 貯鹽試驗照片

貯鹽試驗分析過程方面，在貯鹽 90 天後，將試體上方的圍堰與貯鹽溶液移除，並刮除試體頂部鹽結晶物。以沖孔機在其垂直面鑽出直徑 2 cm 的圓柱體。再使用鑽石鋸片以乾切方式將 2 cm 直徑的圓柱體由浸漬面至底部每隔 0.5 cm 厚度切成薄片，最後利用研磨鉢將薄片磨碎，使其通過 50 號篩得到 3g 之試體粉末樣本。並參照 AASHTO T260 規範量測樣本中酸溶性氯離子含量。由氯離子含量與各薄片的相對位置，可以了解 90 天貯鹽試驗後混凝土內部氯離子含量變化情形，如圖 5 所示。

由於貯鹽試驗為典型非穩態擴散機制的氯離子擴散試驗，主要利用氯離子濃度梯度差，使氯離子侵入混凝土內

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

部。因此試驗後混凝土內部所量測到的各深度氯離子含量變化，可藉由 Fick 第二定律計算氯離子於混凝土內的擴散係數 (diffusion coefficient)。Fick 第二定律對單一方向的擴散行為可由下列方程式表示：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中  $D_p$  ( $\text{m}^2/\text{sec}$ ) 為貯鹽試驗計算擴散係數， $C$  為氯離子濃度， $x$  為擴散所到達距離 ( $\text{m}$ )， $t$  為擴散所使用時間 ( $\text{sec}$ )。若假定擴散方程式是單一方向的擴散趨動方式，利用一個半無限積分，並設定  $m$  為總體氯離子擴散量；擴散過程中沒有任何物質來提供擴散之來源，在由邊界條件： $C_{(x=0, t>0)} = C_o$ ；初始條件： $C_{(x>0, t=0)} = 0$ ；無窮遠處條件： $C_{(x=\infty, t=0)} = 0$  條件。與式(1)可求得下列方程式。

$$C = \frac{m}{\sqrt{\pi D_p T}} \exp\left(\frac{-x^2}{4D_p t}\right) \quad (2)$$

式中  $m$  為總體氯離子擴散量，以下式 (3) 計算

$$m = \int_0^{\infty} C dx ; t \geq 0 \quad (3)$$

相關傳統貯鹽試驗所得結果將與加速氯離子傳輸試驗結果進行關聯性分析，可使加速試驗之傳輸係數轉換成擴散係數。

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

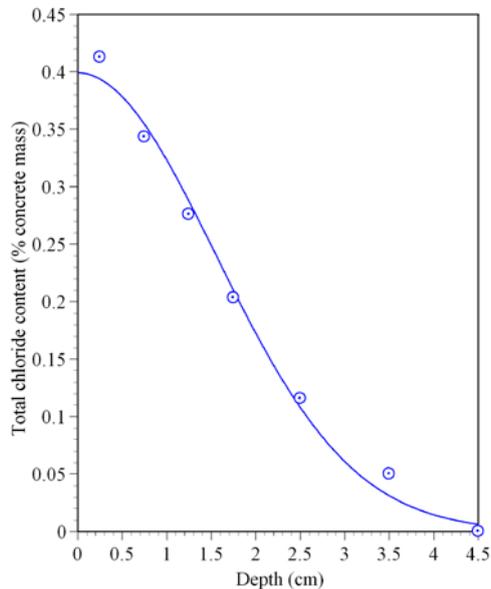


圖 5 氯離子含量與侵入深度關係示意圖

### (2) 氯離子傳輸特性評估試驗-RCPT

用 CNS 14795 (ASTM C1202) RCPT 試驗。試驗方法分為試體前處理與試驗過程兩部分。在試體前處理部分係使用水冷式鑽石鋸將混凝土試體由中心部份切取  $\phi 10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  試樣。將該試樣放置空氣中至少 1 h，待表面乾燥後以環氧樹脂塗封其側面。為使各試樣孔隙中的含水達飽和狀態，將試體放入真空系統設備的真空容器內進行真空飽和處理。RCPT 試驗過程則將前處理後之試體置於 2 個約 250ml 的 PVC 槽之間，如圖 5 所示。並於每槽內置一片 20 號銅網作

## 纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

為電極。其中一槽內放入 3% 濃度氯化鈉溶液並與電源供應器陰極相接，另一槽內放入 0.3N 濃度氫氧化鈉溶液並與電源供應器陽極相接。並在兩電極間通上 60Volts 直流電，以數據擷取器記錄 6 小時內電流之變化。試驗過程量測時間與電流變化關係曲線圖，曲線下之面積即為 6 小時試驗期間所通過之總電荷量 (Total charged passed)，其單位為庫倫 (coulombs, 安培-秒)；或每隔 30 分鐘記錄 1 次電流值，直到 6 小時為止，再將所記錄的電流值代入下式(4)，可獲得累積之總電荷量。

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + \cdots + I_{360}) \quad (4)$$

$Q$ ：總電荷量(庫倫)； $I_0$ ：初始電流(安培)； $I_t$ ：在時間  $t$  (分)的電流(安培)RCPT之結果以電荷量依據表 4-6 評估混凝土抵抗氯離子之能力。

纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

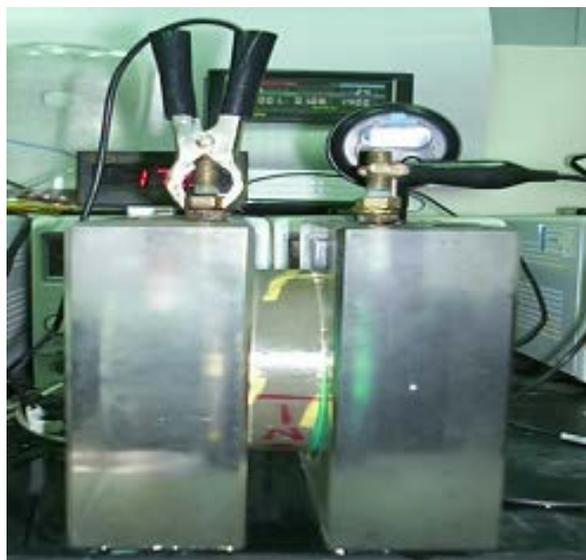


圖 5 RCPT 相片圖

表 3 氯離子穿透性與RCPT總累積電量關係

RCPT 總累積電量(coulombs)	氯離子穿透性
>4000	高
2000~4000	中
1000~2000	低
100~1000	極低
<100	可視為無

### C.分析方式

相關分析方式方面，探討界面過渡區模式首先以 Mori Tanaka 等效置入物理論進行。等效置入物理論以計算複合材料彈性模數開始發展。一般影響氯離子傳輸的因素有孔隙結構與孔隙內部含水情形，所以目前會以 Fick's law 解釋氯離子傳輸行為，如上式 (1)，若將擴散係數  $D_p$  視同為等效置入物中的 E 值， $\frac{\partial C}{\partial x}$  為等效置入物中的應變量，則可嘗試將 Mori Tanaka 運用於彈性力學的理论用於評估傳輸行為。

若假設纖維隨機分散置入無窮域之水泥砂漿內，假設拌合時均勻各單絲纖維之間不重疊結球，則如圖 6 所示。將其中 1 個含有單絲纖維的區域放大來看，此區域含有纖維與界面過渡區與部分母體的區域視為單一置入物，此單一置入物整體等效氯離子傳輸係數依如 Mori Tanaka 等效置入物理論可表示如下式 (5)：[28]

$$M_e = M_m [I + (S - I)B] (I + SB)^{-1} \quad (5)$$

其中  $S$  為圓管型  $S_{IIII}$  之 Eshelby tensor, 如下式 (6)

$$S_{IIII} = \frac{2}{2(1-\nu)} \left\{ \frac{a_2^2 + 2a_1a_2}{(a_1 + a_2)^2} + (1-2\nu) \frac{a_2}{a_1 + a_2} \right\} \quad (6)$$

纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

式中因為圓管所以  $a_1 = a_2$ ，式 (5)  $B$  定義為如下式(7):

$$B = \frac{V_e}{(B_a - S)} + \frac{(1 - V_e)}{(B_{itz} - S)} \quad (7)$$

式中  $V_e$  如下式(8)

$$V_e = \frac{\left(\frac{r}{2}\right)^3}{\left(\frac{r}{2} + h\right)^3} \quad (8)$$

式中， $r$  = 圓管之半徑； $h$  = 界面過渡區之厚度； $V_e$  = 圓管與整體圓管(即纖維與界面過渡區全部體積)之體積比， $B_a$  因纖維相對於水泥砂漿母材可視為無法穿透之材料，因此等於 1。

而  $B_{itz}$  定義為如下式(9):

$$B_{itz} = M_m (M_m - M_{itz})^{-1} \quad (9)$$

纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

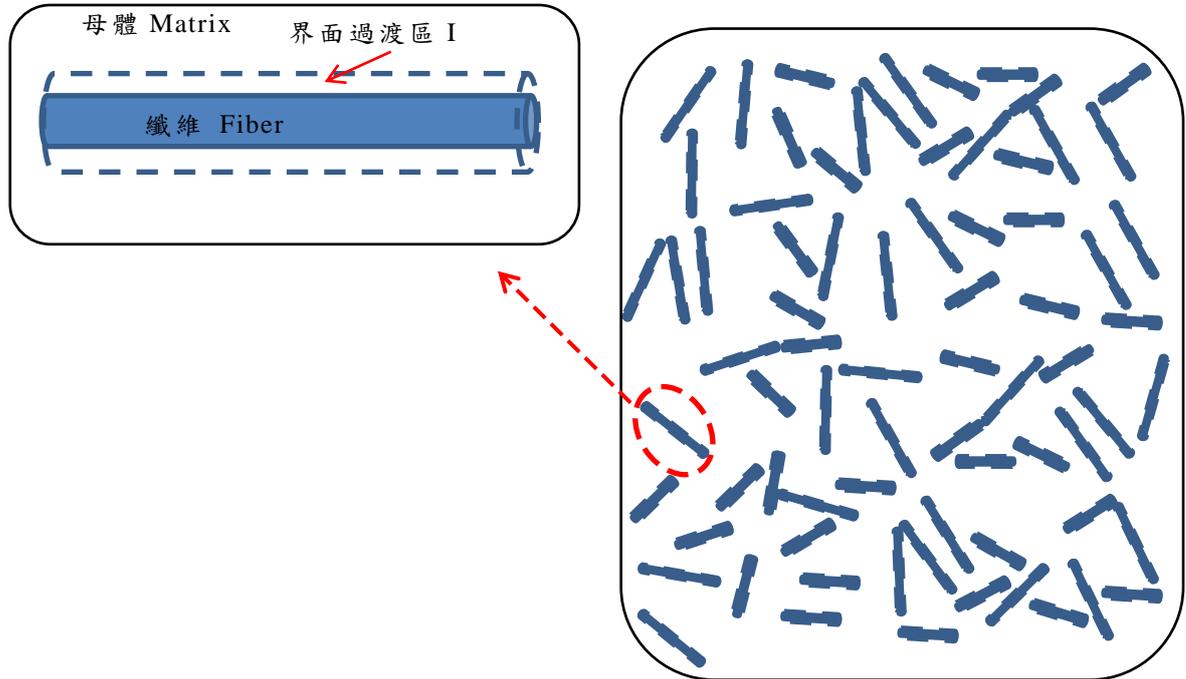


圖 6 纖維水泥複合材料示意圖

將式 (5) 所得到的單一置入物整體等效氯離子傳輸係數藉由 Mori Tanaka 理論可以得到整體水泥質材料之氯離子傳輸係數，如下式(10)

$$M_c = \{M_m^{-1} + V_{fe} [((1 - V_{fe})(M_e - M_m)S - V_{fe}(M_m - M_e) + M_m)^{-1}](M_m - M_e)M_m^{-1}\}^{-1} \quad (10)$$

式中  $M_m$  為控制組水泥砂漿母體之氯離子傳輸係數，試體內纖維界面過度區之含量為  $V_{fe}$ ，纖維及界面過度區整體等效氯離子傳輸係數為  $M_e$ 。

依據 Shah [25] 對四種效應的說明則在阻隔效應，可由串

聯的組成律將阻隔效應以下式描述於下：

$$K_{cl} = K_p(1-V_f) + K_a V_f \quad (11)$$

式中  $K_{cl}$  為陽極槽氯離子擴散係數， $K_p$  為母體（未加碳纖維水泥砂漿配比）之氯離子擴散係數， $K_a$  為碳纖維之氯離子擴散係數， $V_f$  則為碳纖維置入體積比。其中由於碳纖維之氯離子移動速率遠小於母體之氯離子移動速率，因此可將碳纖維氯離子移動速率視為 0。因此可在將式 (11) 改寫成下式：

$$K_{cl} = K_p(1-V_f) \quad (12)$$

迂迴效應 (tortuosity) 相關文獻在研究上均會參考 Burggeman 對複合材料介電常數描述的效應，並認為迂迴效應與碳纖維表面積有關，因此當氯離子移動受阻隔及迂迴效應同時影響時，其與組成材料氯離子擴散係數及體積比之關係如下：

$$K_{cl} = K_p(1-V_f)^{1.5} \quad (13)$$

由上述若和第一年研究所使用的 Mori Tanaka 等效置入物理論結合，將公式的表現方式統一後取代式 (13) Burggeman 迂迴效應的影響，則為雙置入物理論。即將纖維與水泥砂漿所組成的界面過渡區視為 1 種置入物，粗骨材與水泥砂漿所組成的界面過渡區視為另 1 種置入物如圖 8 所

纖維與混凝土界面氣離子傳輸行為之研究 (二)

示，套入式 (10) 之後改寫如下式 (14)

$$M_c = (M_m^{-1} + V_{f1} \times \alpha + V_{f2} \times \beta)^{-1} \quad (14)$$

其中， $M'$ 、 $N'$ 、 $A'$ 、 $B'$ 、 $\alpha$  及  $\beta$  分別定義如下，

$$M' = (M_{e1} - M_m)(S - I)$$

$$N' = (M_{e2} - M_m)(S - I)$$

$$A' = [(1 - V_{f1})M_m + V_{f1}M_{e1}](S - I) - M_{e1}S$$

$$B' = [(1 - V_{f2})M_m + V_{f2}M_{e2}](S - I) - M_{e2}S$$

$$\alpha = -\frac{[V_{f2}M'B^{-1}(M_{e2} \times M_m - I) - (M_{e1} \times M_m - I)]}{A(I - V_{f1}V_{f2}A^{-1}B^{-1}M'N')}$$

$$\beta = B'^{-1} \left\{ \frac{V_{f1}N[V_{f2}MB'^{-1}(M_{e2} \times M_m - I) - (M_{e1} \times M_m - I)]}{A'(I - V_{f1}V_{f2}A'^{-1}B'^{-1}MN)} + (M_{e2} \times M_m - I) \right\}$$

纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

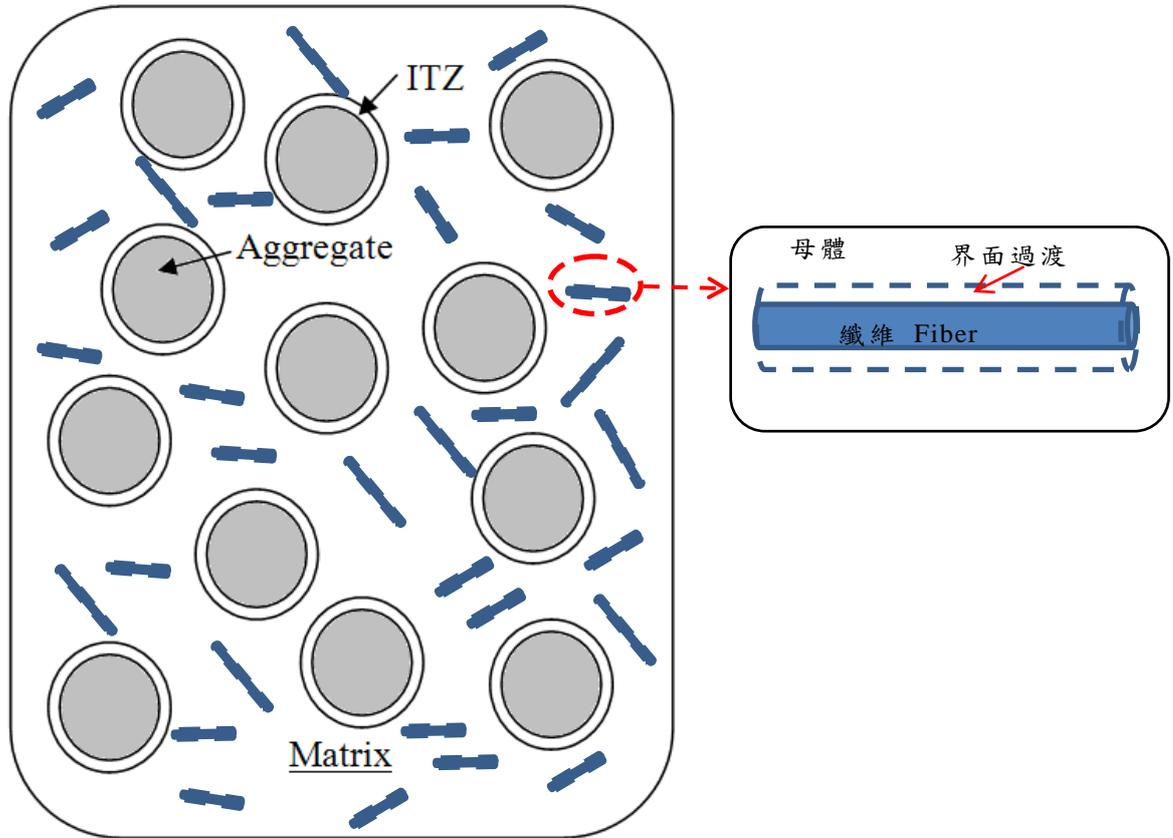


圖 8 纖維混凝土示意圖

其中， $M_{e1}$ 與 $M_{e2}$ 為纖維與粗骨材所產生界面過渡區之整體等效氯離子傳輸係數，水泥砂漿母體之氯離子傳輸係數為 $M_m$ ， $V_{f1}$ 與 $V_{f2}$ 分別為纖維與粗骨材之體積含量。

由本計畫之不同之比例添加 20%、30%、40%、50%粗骨材體積含量，與不同體積量的纖維進行試驗可以得知整體混凝土複合材料的氯離子傳輸係數，再由已知的水泥砂漿母體傳輸係數和第一年研究成果配合，可探討粗骨材界面過渡

區氯離子傳輸係數理論值，以及對整體氯離子傳輸係數的影響。由此可獲知氯離子於兩種界面過渡區的傳輸行為，以及是否會因為兩種界面過渡區的連接導致整體傳輸行為加速等構想。

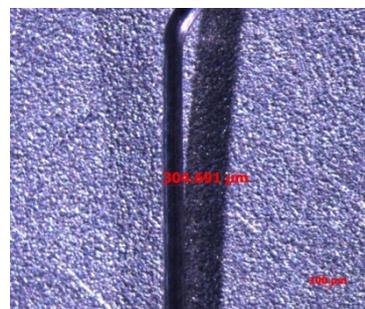
## 第四章 結果與討論

### 纖維微觀觀察

下圖 6 至圖 9 為本研究所使用纖維經由光學顯微鏡觀察後的微觀照片。其中鋼纖維斷面略呈現不等邊六邊形，斷面最大處約 0.5 mm。聚丙烯與 AR 玻璃纖維斷面均為圓形，且呈現透明狀，斷面最大約為 0.03 mm。碳纖維斷面亦為圓形，但其斷面尺寸是所有纖維中最小，最大約只有 0.01 mm。所有纖維長度約為 10 mm。後續將以 SEM 微觀觀察發現纖維與水泥質材料界面過渡區樣貌。



60 倍



160 倍

圖 6 鋼纖維光學顯微鏡微觀照片

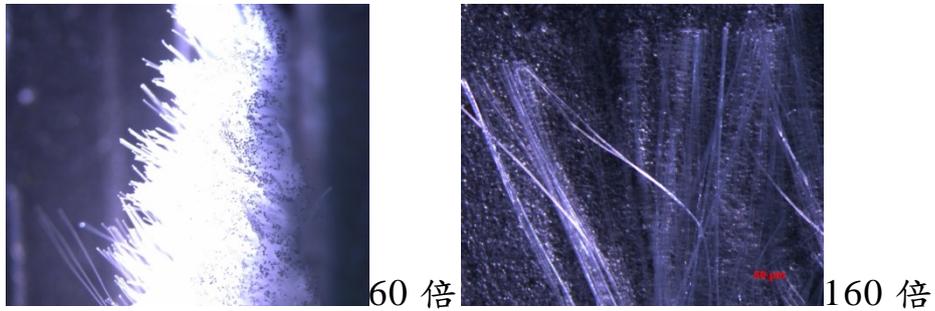


圖 7 聚丙烯纖維光學顯微鏡微觀照片

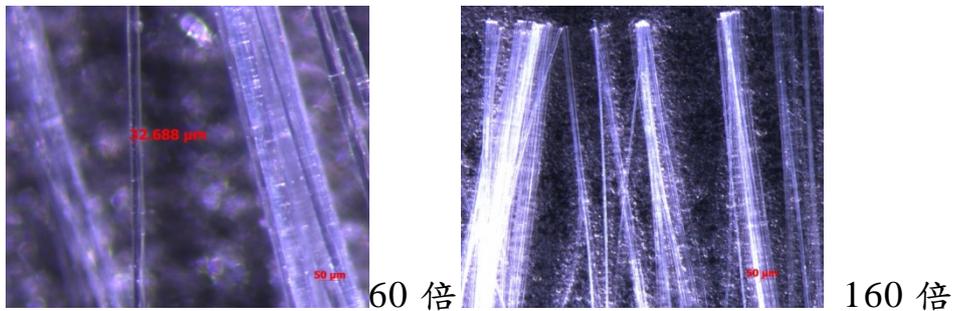


圖 8 AR 玻璃纖維光學顯微鏡微觀照片

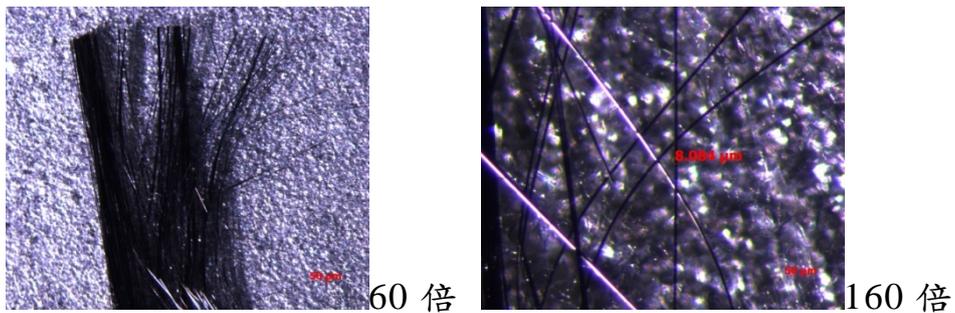


圖 9 碳纖維光學顯微鏡微觀照片

### 聚丙烯纖維砂漿 91 天基本力學性質

目前已達到 91 天材齡部分為水灰比 0.35 的聚丙烯纖維

配比。圖 10 為依據 ASTM C109 進行抗壓強度試驗、ASTM C307 抗拉強度試驗、與 ASTM C348 進行抗彎強度試驗結果，由圖中可以發現抗壓強度在不同聚丙烯纖維用量下差異並不大，最大值為聚丙烯纖維用量 2%，與控制組相比差距僅為 6.6%。但抗拉強度與抗彎強度均隨著聚丙烯纖維用量增加而上升，最大值為聚丙烯纖維用量 5%之狀況，相對於控制組抗拉強度增加 58.8%，抗彎強度增加 55.8%。

### 聚丙烯纖維砂漿 91 天氯離子傳輸性質

由於計畫對氯離子傳輸行為主要進行 ASTM C1543 貯鹽試驗。但此試驗須於試體養護後進行 90 天貯鹽過程，所以目前配合養護齡期進行中。但為探討快速氯離子傳輸行為試驗法用於纖維水泥質材料的可行性。新增進行 CNS 14795 的快速氯離子穿透試驗 RCPT 進行評估，以做為後續貯鹽試驗對照分析參考。因此圖 6 為已達材齡的配比進行 RCPT 試驗結果，由圖中可以發現，聚丙烯纖維砂漿的 RCPT 總電量值隨著纖維量增加而增加，圖 11 中亦將抗拉與抗彎強度試驗結果以折現標示出，發現其趨勢均相似。最大值為聚丙烯纖維用量 5%之狀況，相對於控制組抗拉強度增加 18.5%。RCPT 總電量越大表示試驗過程中通過試體的氯離子量更多，對耐久性是負面的情形。由於水灰比與細骨材用量均相同，纖維用量越多，可能增加砂漿與纖維的界面區域，導致 RCPT 總電量值隨著纖維量增加而增加。未來將持續以貯鹽試驗結果

纖維與混凝土界面氯離子傳輸行為之研究 (二)

加以驗證，並由理論推估界面區域影響範圍與機制。而 MIP 與 SEM 微觀觀察亦會配合作為輔助佐證之工具。

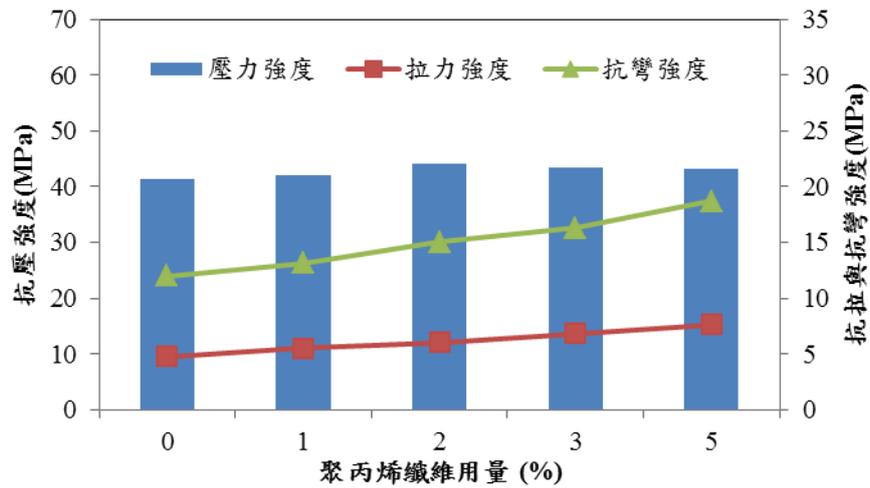


圖 10 聚丙烯纖維砂漿 91 天基本力學性質 (水灰比 0.35)

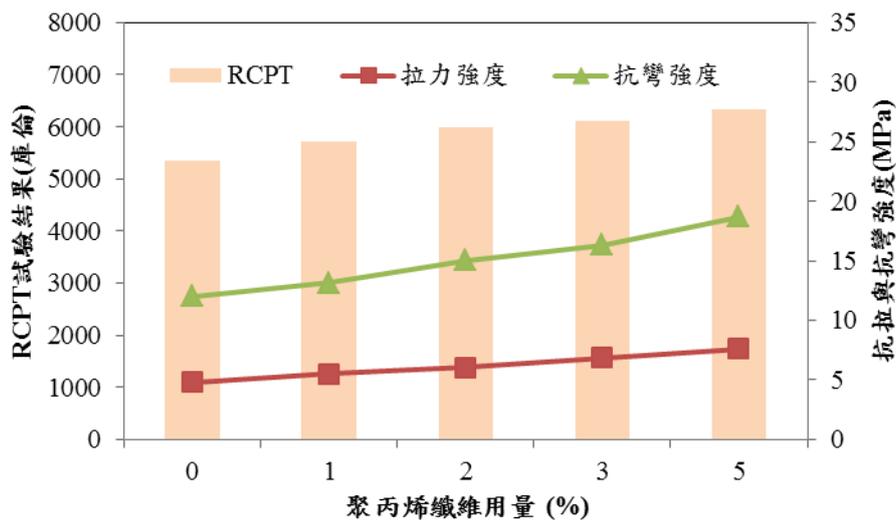


圖 11 聚丙烯纖維砂漿 91 天基本力學性質 (水灰比 0.35)

0.35)

## 第五章 結論與建議

由上述纖維砂漿試驗結果，初步可獲得下列成果：

1. 聚丙烯纖維對砂漿抗壓強度的影響較小，但對抗拉和抗彎強度有極大正面助益。
2. 由 RCPT 初步成果發現聚丙烯纖維用量對砂漿氯離子傳輸行為有負面影響，可能與計畫推估纖維會導致界面過渡區域增加有關。由此可對後續貯鹽試驗或其他配比之研究進行的理論假設有初步驗證。可較不用改變實驗設計。
3. 以貯鹽試驗描述水泥質材料氯離子傳輸行為時較準確（因實驗機制關係），但過程所耗時間較長。因此建議後續第二年研究仍進行 RCPT，可初步了解氯離子傳輸行為的趨勢，並可以了解評估 RCPT 這類快速試驗法用於纖維混凝土的可行性。後續第二年延續性計畫將會將主觀試驗進行完畢。
4. 本次研究所使用纖維均為長條形情形，雖然本計畫已強塑劑添加去避免工作性問題產生。但由砂漿試體製作過程可以發現，纖維量明顯影響砂漿的流度。後續第二年

進行混凝土製作研究時，因可考量探討纖維量數對新拌工作性的影響。

## 參考書目

- [1] Li, Z. J., *Advanced Concrete Technology*, 1th ed., Wiley, USA, pp. 253-254 (2011).
- [2] 鄭富書，林銘郎，鋼纖維混凝土應用於隧道工程之發展、現況與展望，纖維混凝土在工程上的應用與發展研討會，台灣營建研究院 (1998)。
- [3] 劉玉雯、潘煌鏗、林裕淵、卓世偉，2012，”水閘門應用混凝土系材料之可行性研究”，經濟部水利署第五河川局成果報告 (2012)。
- [4] Mindess, S., Young, J. F., and Darwin, D., *Concrete*, 2nd ed., Pearson, USA, pp. 604-605 (2002).
- [5] Toutanji, H., McNeil S., and Bayasi, Z., “Chloride permeability and impact resistance of polypropylene fiber reinforced silica fume concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, pp. 961-968 (1998).

- [6] 蔡明昌，”纖維強化水泥複合材料界面顯微組織及性質研究”，義守大學材料科學與工程學研究所碩士論文，指導教授李國榮 (2002).
- [7] FitzGibbon, M. E. “Large Pours for Reinforced Concrete Structures, Concrete”, 10, No.3, pp.41 (1976).
- [8] 楊仲家、卓世偉、翁在龍，“塗裝材料對水泥質基材耐候性能改善之試驗研究”，內政部建築研究所協辦研究案報告 (2009)。
- [9] Carneiro, J. A., Lima, P. R. L., Leite, M.B.,and Filho, R. D. T., “Compressive stress–strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete”, Cement and Concrete Composites, Vol. 46, pp. 65-72 (2014).
- [10] Ma, H. L., Li, X., and Hu, S. L., “Study on mechanical properties of steel fiber reinforced autoclaved lightweight shell-aggregate concrete”, Materials & Design, Vol. 52, pp. 565-571 (2013).
- [11] Altun, F., Aktaş, B., “Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete”, Construction and Building Materials, Vol. 38, pp. 575-581 (2013).

- [12] Yu, B., Kodur, V.K.R., "Effect of high temperature on bond strength of near-surface mounted FRP reinforcement", *Composite Structures*, Vol. 110, pp. 88-97 (2014).
- [13] Barluenga G., Hernández-Olivares, F., "Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, pp. 1624-1638 (2007).
- [14] Behravan, A., Behfarnia, K., "Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels", *Materials & Design*, Vol.5, pp. 274-279 (2014).
- [15] Çavdar, A., "Investigation of freeze–thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 58, pp. 463-472 (2014).
- [16] Deng, Z., "The fracture and fatigue performance in flexure of carbon fiber reinforced concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 131-140 (2005).

- [17] Wang, W., Wu, S., Dia, H., “Fatigue behavior and life prediction of carbon fiber reinforced concrete under cyclic flexural loading”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 434, pp. 347-351 (2006).
- [18] Bontea, D., Chung, D. D. L., Lee, G. C., “Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by electrical resistance measurement”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 651-659 (2000).
- [19] Giner, V.T., Baeza, F. J., Ivorra, S., Zornoza, E., and Galao, Ó., “Effect of steel and carbon fiber additions on the dynamic properties of concrete containing silica fume”, *Materials and Design*, Vol.34, pp. 332-339 (2012).
- [20] 顏聰, 劉玉雯等,耐撞擊磨耗之水工構造物表層材料研發,台灣電力公司研究計畫成果報告 (2003)。