國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering
College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

基於目標使用年限之混凝土設計規範架構研究

Investigation on the Framework of Concrete Design Codes Based on Target Service Life

林康

Kang Lim

指導教授：廖文正 博士

Advisor：Wen-Cheng Liao, Ph.D.

中華民國 114 年 7 月

July, 2025

doi:10.6342/NTU202503522

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY
MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE

基於目標使用年限之混凝土設計規範架構研究

Investigation on the Framework of Concrete Design Codes Based on Target Service Life

本論文係 林康 (R12521250) 在國立臺灣大學土木工程學系結構工程組完成之碩士學位論文，於民國114年7月31日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of Civil Engineering Structural Engineering on 31 July,2025 have examined a Master's Thesis entitled above presented by Kang,Lim(R12521250) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

廖文正 廖文正
（指導教授 Advisor）

胡瑋秀 胡瑋秀

詹穎雯 詹穎雯

彭康瑜 彭康瑜

系主管Director： 葛宇甯 葛宇甯

誌謝

時光飛逝，即將告別碩士生涯，回首這段充實而充滿挑戰的日子，內心滿懷感激之情。首先，謹向我的指導教授廖文正老師致上最深的謝意。感謝老師在研究方向上的指引與在學術思考上的啟發，不僅提供我充分發揮的空間，更在我遇到瓶頸時耐心地引導與鼓勵，使我得以順利完成這本論文。學生我十分感謝碩士班這兩年能夠遇到您，您給予我的教誨我都將銘記於心。

同時，也誠摯感謝詹穎雯老師與胡瑋秀老師在每次大咪中所給予的寶貴建議與細心指導。您們的提問與回饋常使我有更深入的思考與反省，是我學術養成過程中不可或缺的一環。此外也十分感謝營建院陳育聖組長與羅永霖學長，在我研究過程遇到困難的時候，願意提供意見與幫助，沒有兩位的幫忙，我可能無法順利地完成論文。除此之外，特別感謝 Tylin 彭康瑜副總願意參加我的論文口試，並給予專業的指導意見，使我獲益良多，在此對您致以萬分的感謝。

感謝 812 研究群的大家一路相伴，感謝學長：威佑、峻帆、峻輔、濂淞、尚恩、瀚仁、庭安、奕霖給予我們修課上的建議，感謝研究室的夥伴們：昀庭（阿胖）、甫安（安哥）、淳瑋、恆育（妹子）、品宏（林博）、宥霖、宏彬（彬仔）在我學習過程中遇到困難時給予的幫助，我們一起吃飯，一起玩樂，一起胡鬧，真的十分快樂，感謝碩士班這兩年能夠遇到你們，也感謝研究室的學弟妹：峻誠、霆恩，文政、喬嶸、Luhfi、智輝、宇翔、詣承、佳穎、Wanda 的協助與支持，祝福你們未來的研究一帆風順。

最後我也十分感謝我的家人及俐璇，你們總是不遺餘力的支持著我的夢想，面對問題時，總能以過去的經歷開導我，沒有你們，我無法走到今天，我想說我愛你們。

doi:10.6342/NTU202503522

摘要

台灣混凝土設計規範目前的耐久性設計多屬於基於規範設計方法（Prescriptive Design），由於缺乏與材料實際耐久性能連結的驗證機制，導致結構物在使用年限內之耐久性及維護管理面臨挑戰。相較之下，性能設計方法（Performance-based Design）可針對結構物所處環境條件及目標使用年限，透過性能驗證程序評估實際耐久表現，因而逐漸成為國際主流。

因此，本研究以混凝土結構物為對象，回顧國外規範（如 Fib Model Code、Eurocode、JSCE、ACI 等）中以設計使用年限為目標的性能設計方法並針對台灣規範提出改進建議。本研究同時探討台灣規範未涵蓋的驗證方法，如部分係數法與全機率法等耐久性劣化模型之運作方式，並結合台灣本土環境與材料參數，進行使用年限之評估分析；進而提出一套以設計使用年限為導向的耐久性設計流程圖。

分析結果顯示，混凝土水膠比越高，使用年限越低；保護層厚度越小，使用年限亦越低。雖然台灣規範針對不同曝露環境訂有限制最大水膠比，但在相同水膠比條件下，混凝土配比的差異仍會顯著影響使用年限評估結果，顯示以水膠比作為設計控制指標仍有其局限性。因此，本研究依據此前所提出之耐久性設計流程圖中鹽害環境下的氯離子擴散係數進行補充，進一步使用多種擴散模型推估在不同條件下各配比的氯離子擴散係數容許值，彌補台灣現行規範未能提供評估依據之缺口。

本研究亦根據模型推估之氯離子擴散係數容許值，結合台灣本土實驗室之材料試驗數據，提出耐久性指數（Durability Index, DI），作為綜合評估指標。同時建立氯離子擴散係數與設計使用年限之關係圖，提供工程人員於設計初期即可根據目標使用年限選擇合適之混凝土配比與材料組成。

關鍵字：混凝土耐久性，台灣混凝土設計規範，性能設計法，耐久性劣化模型，設計使用年限，氯離子擴散係數

doi:10.6342/NTU202503522

Abstract

Durability design in Taiwan's current concrete design code primarily follows the prescriptive design approach, which lacks verification mechanisms linking actual material durability performance. This results in challenges for ensuring structural durability and maintenance throughout the design service life. In contrast, performance-based design has become a global trend, as it evaluates the actual durability performance of structures based on environmental conditions and target service life through rational verification procedures.

This study focuses on concrete structures and reviews international codes (e.g., Fib Model Code, Eurocode, JSCE, ACI) that adopt performance-based design principles centered on target service life. Recommendations for revising Taiwan's code are proposed. In addition, this study explores durability models not yet covered by local codes, such as the partial factor method and full probabilistic method, incorporating Taiwan's local environmental and material parameters to assess design service life. A durability design flowchart based on service life is developed accordingly.

Analysis results show that higher water–binder ratios lead to shorter service life, while smaller cover thicknesses similarly reduce durability. Although Taiwan's code sets limits on the maximum water–binder ratio for different exposure conditions, variations in mix proportions under the same ratio still significantly affect service life predictions. This suggests that using the water–binder ratio as a durability control parameter is insufficient.Accordingly, this study refers to the previously proposed service life-based durability design flowchart and identifies a key missing element in Taiwan's current code: the allowable chloride diffusion coefficient under salt exposure conditions. To address this gap, this study adopts multiple durability models to calculate the maximum allowable

doi:10.6342/NTU202503522

chloride diffusion coefficients under various mix conditions

A Durability Index (DI) is introduced based on model-derived allowable diffusion coefficients, and compared with local material data to validate applicability. Diagrams showing the relationship between service life and chloride diffusion coefficients are presented. These provide engineers with practical tools to select acceptable durability performance based on service life requirements, offering references for materials selection, mix proportioning, and specification control in durability-oriented design.

Keywords: Concrete durability,Taiwan concrete design code,Performance-based design,Durability deterioration models,Design service life,Chloride diffusion coefficient

doi:10.6342/NTU202503522

目次

誌謝 I

摘要 II

Abstract III

目次 V

圖次 IX

表次 XV

第一章、緒論 1

1.1 研究背景 1

1.2 研究目的與重要性 2

1.3 研究流程與方法 3

第二章、文獻回顧 4

2.1 設計使用年限定義與設定 4

2.2 曝露環境等級與分類 5

2.3 耐久性設計方法 6

2.4 國內耐久性規範 8

2.4.1 建築物混凝土設計規範 8

2.4.2 公路橋樑設計規範 12

2.5 國外有關設計使用年限之規範與文獻 14

doi:10.6342/NTU202503522

2.5.1 Model Code for Service Life Design 14

2.5.1.1 設計流程 14

2.5.1.2 劣化過程與機制探討 15

2.5.1.3 耐久性驗證方法 16

2.5.1.4 可靠性指數應用 17

2.5.2 Model Code 2020 18

2.5.2.1 設計流程 19

2.5.2.2 極限狀態分類與可靠性指數應用 20

2.5.2.3 耐久性規劃 20

2.5.2.4 耐久性驗證方法 22

2.5.3 AASHTO Guide Specification for Service Life Design of Highway Bridge (2020) 24

2.5.3.1 利用概率模型結果建立混凝土保護層建議值 25

2.5.4 Eurocode 27

2.5.4.1 基於規範設計法 27

2.5.4.2 性能設計法 29

2.6 Bridges for Service Life Beyond 100 Years: Service Limit State Design 31

第三章、量化工具討論 34

3.1 Level of approximation（LoA） 34

3.1.1 Level 1（LoA1） 34

doi:10.6342/NTU202503522

3.1.2 Level 2（LoA2）..... 36

3.1.3 Level 3（LoA3）之部分係數法..... 37

3.1.4 Level 4（LoA4）之可靠度分析..... 41

第四章、案例介紹..... 45

4.1 港珠澳大橋..... 45

4.2 淡江大橋..... 50

4.3 維吉尼亞州橋樑..... 55

第五章、混凝土耐久性模型之分析..... 59

5.1 應用部分係數法模型之使用年限分析結果..... 59

5.1.1 模型介紹..... 59

5.1.2 參數設定..... 62

5.1.3 分析結果與討論..... 64

5.1.3.1 不同模型使用年限分析結果..... 64

5.1.3.2 水膠比與使用年限之關係..... 72

5.1.3.3 保護層厚度與使用年限之關係..... 77

5.2 應用全機率法模型之使用年限分析結果..... 82

5.2.1 模型介紹及參數設定..... 82

5.2.2 分析結果與討論..... 84

第六章、針對台灣規範之建議..... 88

doi:10.6342/NTU202503522

6.1 目標使用年限應用於台灣規範之執行流程圖 88

6.2 不同模型下氯離子擴散係數容許值探討 89

6.2.1 應用於台灣規範之氯離子擴散係數容許建議值 93

6.2.2 不同條件下之配比適用性 105

6.2.3 氯離子擴散係數與使用年限關係 171

第七章、結論與建議 182

7.1 結論 182

7.2 建議 184

參考文獻 185

doi:10.6342/NTU202503522

圖次

圖 1-1 本研究流程圖 3
圖 2-1 設計使用年限之設計流程圖[2] 15
圖 2-2 鋼筋鏽蝕的劣化過程[2] 16
圖 2-3 基於性能的設計方法的簡化概述—要求與驗證 [3] 19
圖 2-4 整體生命週期階段與設計流程步驟 [3] 21
圖 2-5 設計過程中耐久性規劃[3] 21
圖 2-6 針對耐久性設計驗證方法架構 [3] 24
圖 2-7 可靠度分析之執行流程圖[20] 33
圖 4-1 保護層厚度與擴散係數的關係圖（左：齡期 28 天混凝土，右：齡期 56 天混凝土）[30] 48
圖 4-2 碳化抗性與保護層厚度關係[30] 49
圖 4-3 28 天齡期 RCM 試驗與 90 天齡期貯鹽試驗結果之關係圖[33] 52
圖 4-4 曝露環境區域分類[36] 57
圖 4-5 橋樑預測使用壽命直方圖[36] 58
圖 5-1 各模型之使用年限計算結果（年） 67
圖 5-2 新舊 JSCE 模型之擴散係數與使用年限關係圖 71
圖 5-3 不同水膠比下之使用年限結果 73
圖 5-4 不同水膠比下臨界氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果 74
圖 5-5 不同水膠比下臨界，初始氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果 75
圖 5-6 不同水膠比下臨界，初始及表面氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果 76
圖 5-7 不同保護層厚度下使用年限結果 78
圖 5-8 不同保護層厚度下臨界氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果 79
圖 5-9 不同保護層厚度下臨界與初始氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

doi:10.6342/NTU202503522

..... 80
圖 5-10 不同保護層厚度下臨界，初始及表面氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果 81
圖 5-11 全機率法分析結果 86
圖 5-12 Spearman 敏感性分析結果 87
圖 6-1 以使用年限為目標之耐久性設計流程圖 89
圖 6-2 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=10cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土) 109
圖 6-3 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=10cm,XS3)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 110
圖 6-4 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土) 112
圖 6-5 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS3)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 113
圖 6-6 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=10cm,XS2)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土) 115
圖 6-7 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=10cm,XS2)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 116
圖 6-8 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS2)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土) 118
圖 6-9 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS2)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 119
圖 6-10 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=10cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土) 121
圖 6-11 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=10cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 122

doi:10.6342/NTU202503522

圖 6-12 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)..... 124
圖 6-13 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)..... 125
圖 6-14 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=6cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)..... 127
圖 6-15 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=6cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)..... 128
圖 6-16 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=10cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)..... 130
圖 6-17 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=10cm,XS3)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)..... 131
圖 6-18 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)..... 133
圖 6-19 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS3)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 134
圖 6-20 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=10cm,XS2)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)..... 136
圖 6-21 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS2)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 137
圖 6-22 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS2)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)..... 139
圖 6-23 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS2)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 140
圖 6-24 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=10cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)..... 142

doi:10.6342/NTU202503522

圖 6-25 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=10cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 143
圖 6-26 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土) 145
圖 6-27 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 146
圖 6-28 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=6cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土) 148
圖 6-29 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=6cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 149
圖 6-30 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=10cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土) 151
圖 6-31 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=10cm,XS3)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 152
圖 6-32 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土) 154
圖 6-33 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=8cm,XS3)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 155
圖 6-34 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=10cm,XS2)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土) 157
圖 6-35 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=10cm,XS2)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 158
圖 6-36 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=8cm,XS2)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土) 160
圖 6-37 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=8cm,XS2)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 161

doi:10.6342/NTU202503522

圖 6-38 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)..... 163
圖 6-39 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=10cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)..... 164
圖 6-40 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=8cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)..... 166
圖 6-41 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=8cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 167
圖 6-42 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=6cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)..... 169
圖 6-43 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=6cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土) 170
圖 6-44 C 系列混凝土擴散係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）..... 172
圖 6-45 C 系列混凝土傳輸係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）..... 173
圖 6-46 S2 系列混凝土擴散係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）..... 174
圖 6-47 S2 系列混凝土傳輸係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）..... 175
圖 6-48 F2 系列混凝土擴散係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）..... 176
圖 6-49 F2 系列混凝土傳輸係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）..... 177
圖 6-50 S2F2 系列混凝土擴散係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）..... 178

doi:10.6342/NTU202503522

圖 6-51 S2F2 系列混凝土傳輸係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）..... 179
圖 6-52 S2F3 系列混凝土擴散係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）..... 180
圖 6-53 S1F4 系列混凝土擴散係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）..... 181

doi:10.6342/NTU202503522

表次

表 2-1 不同規範之曝露環境分類[3][17][12][15][16]..... 6
表 2-2 場鑄無預力混凝土構材之規定混凝土保護層厚度[12]..... 9
表 2-3 在腐蝕環境或暴露於其他極端條件之規定混凝土保護層厚度[12]..... 9
表 2-4 暴露環境類別與分級[12]..... 10
表 2-5 不同暴露分級之混凝土要求[12]..... 11
表 2-6 鹽害環境下作用等級[13]..... 12
表 2-7 混凝土最大水膠比及最低混凝土強度[13]..... 12
表 2-8 位於不同海洋腐蝕區域中鋼筋最小保護層厚度(cm[13]..... 13
表 2-9 可靠性指數與失敗概率之間的轉換[2]..... 17
表 2-10 在不同條件下β的設定值[2]..... 18
表 2-11 耐久性規劃中 Level of approximation (LoA)分類[3]..... 23
表 2-12 曝露環境為海岸環境所導致腐蝕行為之混凝土保護層建議值[6]..... 26
表 2-13 混凝土配比建議限制值[17]..... 27
表 2-14 一般鋼筋最小保護層建議值(mm)[4]..... 28
表 2-15 結構物等級建議分類表[4]..... 29
表 2-16 碳化反應下最小保護層建議值(mm)[4]..... 30
表 2-17 氯離子侵蝕下最小保護層建議值(mm)[4]..... 31
表 3-1 目前可用的使用年限設計法之評估方法[3]..... 34
表 3-2 不同使用年限下參數建議值..... 36
表 3-3 混凝土表面氯離子濃度 $C_0(kg/m^3)$[5]..... 40
表 3-4 不同曝露環境下的氯離子表面濃度[27]..... 44
表 3-5 不同混凝土之衰減係數[2]..... 44
表 4-1 曝露環境分類[31]..... 45
表 4-2 結構物各構件之曝露環境[30]..... 46

doi:10.6342/NTU202503522

表 4-3 設計年限 120 年耐久性建議指標[30] 50
表 4-4 各鹽害環境下的混凝土表面氯離子濃度[34] 51
表 4-5 原招標文件之建議值[33] 52
表 4-6 考量 10 mm 施工誤差下各構件之D_{RCM}建議值[33] 54
表 4-7 試驗衰減係數與規范建議值之比較[36] 57
表 4-8 表面氯離子濃度歷史資料與規範計算結果之比較[36] 58
表 5-1 混凝土配比表[39] 62
表 5-2 S2F2-3 之實驗結果[22][39] 62
表 5-3 各文件之參數設定建議值 63
表 5-4 新 JSCE 模型之使用年限計算結果（年） 67
表 5-5 新 JSCE 模型與台灣本土數據之比較(w/b=0.3) 68
表 5-6 新 JSCE 模型與台灣本土數據之比較(w/b=0.4) 68
表 5-7 新 JSCE 模型與台灣本土數據之比較(w/b=0.5) 69
表 5-8 新舊 JSCE 模型之擴散係數比較（$\mathrm{w/b}=0.3, t_{sl}$=100 年） 69
表 5-9 新舊 JSCE 模型之擴散係數比較（$\mathrm{w/b}=0.4, t_{sl}$=100 年） 70
表 5-10 新舊 JSCE 模型之擴散係數比較（$\mathrm{w/b}=0.5, t_{sl}$=100 年） 70
表 5-11 不同水膠比下之使用年限結果 73
表 5-12 不同水膠比下臨界氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果 74
表 5-13 不同水膠比下臨界，初始氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果 .. 75
表 5-14 不同水膠比下臨界，初始及表面氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果 76
表 5-15 不同保護層厚度下使用年限結果 78
表 5-16 不同保護層厚度下臨界氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果 79
表 5-17 不同保護層厚度下臨界與初始氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果 80
表 5-18 不同保護層厚度下臨界，初始及表面氯離子濃度替換為台灣數據之使用年

doi:10.6342/NTU202503522

限結果 81
表 5-19 全機率法模型之參數設定 83
表 5-20 部分係數法與全機率法變異係數之差異[2][26] 86
表 6-1 不同條件下之氯離子擴散係數建議值 90
表 6-2 氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：100 年，混凝土齡期：28 天) 95
表 6-3 氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：75 年，混凝土齡期：28 天) 96
表 6-4 氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：50 年，混凝土齡期：28 天) 97
表 6-5 氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：100 年，混凝土齡期：91 天) 98
表 6-6 氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：75 年，混凝土齡期：91 天) 99
表 6-7 氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：50 年，混凝土齡期：91 天) 100
表 6-8 氯離子傳輸係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：100 年，混凝土齡期：28 天) 101
表 6-9 氯離子傳輸係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：75 年，混凝土齡期：28 天) 102
表 6-10 氯離子傳輸係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：50 年，混凝土齡期：28 天) 103
表 6-11 JSCE 模型氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-9}m^2/s$，使用年限：100 年，曝露環境：XS3) 104
表 6-12 ACI 模型氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：100 年，曝露環境：XS3) 104

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-13 氯離子擴散係數試驗結果(混凝土齡期：28 天) [22]..... 107
表 6-14 氯離子擴散係數試驗結果(混凝土齡期：91 天) [22]..... 107
表 6-15 氯離子傳輸係數試驗結果(混凝土齡期：28 天) [22]..... 107
表 6-16 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS3，保護層厚度：10cm）
..... 108
表 6-17 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS3，保護層厚度：8cm）
.....111
表 6-18 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS2，保護層厚度：10cm）
.....114
表 6-19 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS2，保護層厚度：8cm）
.....117
表 6-20 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：10cm）
..... 120
表 6-21 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：8cm）
..... 123
表 6-22 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：6cm）
..... 126
表 6-23 各配比 DI 結果（使用年限：75 年，曝露環境：XS3，保護層厚度：10cm）
..... 129
表 6-24 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS3，保護層厚度：8cm）
..... 132
表 6-25 各配比 DI 結果（使用年限：75 年，曝露環境：XS2，保護層厚度：10cm）
..... 135
表 6-26 各配比 DI 結果（使用年限：75 年，曝露環境：XS2，保護層厚度：8cm）
..... 138
表 6-27 各配比 DI 結果（使用年限：75 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：10cm）

doi:10.6342/NTU202503522

..... 141
表 6-28 各配比 DI 結果（使用年限：75 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：8cm）
..... 144
表 6-29 各配比 DI 結果（使用年限：75 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：6cm）
..... 147
表 6-30 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS3，保護層厚度：10cm）
..... 150
表 6-31 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS3，保護層厚度：8cm）
..... 153
表 6-32 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS2，保護層厚度：10cm）
..... 156
表 6-33 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS2，保護層厚度：8cm）
..... 159
表 6-34 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：10cm）
..... 162
表 6-35 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：8cm）
..... 165
表 6-36 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：6cm）
..... 168

doi:10.6342/NTU202503522

第一章、緒論

1.1 研究背景

隨著現代工程技術的不斷進步，傳統的結構設計方法也就是基於規範的設計法（Prescriptive-Based Design），因其自身固有的限制，逐漸難以滿足當代工程中多樣化的需求。性能設計法 （Performance-Based Approach）因此成為結構設計領域的重要趨勢。性能設計法是一種以結構性能目標為核心的設計理念，需要在一開始就定出結構物的設計使用年限，這是因為需要根據實際環境條件和功能需求，指定的性能指標和分析工具，來驗證結構是否能滿足耐久性、安全性、舒適性和經濟性等多方面的要求。相比於傳統方法，性能設計法具有更大的靈活性和適應性，尤其適用於複雜的結構設計和惡劣的環境條件。

在國際上，性能設計法已被廣泛應用於高性能結構和基礎設施的設計與評估。例如，美國的 ACI 365.1R-17 規範對於混凝土結構的服務壽命預測，日本 JSCE 的基於性能的混凝土設計規範，以及國際結構混凝土聯合會 fib 推出的 Model Code 2020 對於性能設計法有明確的定義與執行步驟，均顯示出此方法在實踐中的可行性與有效性。在台灣，高濕度與地震頻繁的環境條件對結構性能的挑戰尤為嚴峻，且基礎設施多數面臨老化問題。傳統設計方法往往無法充分考量結構壽命週期內的劣化機制，導致維護成本增加及結構安全性降低。因此，推動性能設計法的本地化應用，並結合科學化的性能驗證工具，兼具學術研究和實務應用價值。

台灣鋼筋混凝土結構物因應環境、功能不同，按規範設計施工，惟較少針對使用年限與現行規範作實質連結；明確界定設計年限是讓工程品質等級有所差別的第一步，使用 35 年、50 年或 100 年，使用材料、成本及品質目標也不一樣。除了各個主管機關應儘速明確訂定各式結構物的目標使用年限外(交通部在民國 104 年頒布公路橋梁設計規範，明訂重要及必要之公路橋梁設計年限不小於 100 年，其他公路橋梁設計年限不小於 50)，更應將使用年限實際和現行設計規範作連結。

doi:10.6342/NTU202503522

1.2 研究目的與重要性

性能設計法是以結構的功能需求和環境條件為基礎，通過設定具體的性能目標（如耐久性、安全性和可維護性），確保結構在整個使用壽命週期內能滿足預期的要求。在性能設計法中，設計使用年限（Design Service Life）是一個關鍵的設計參數，須在設計初期明確設定，並根據結構的用途、環境條件與材料性能進行全面評估。與此相對，強度設計法的重點是確保結構在極限狀態（如最大承載能力或崩壞條件）下不會失效，但對於結構的長期耐久性（例如材料劣化、環境侵蝕）則考慮不足。因此，當結構暴露於高氯化物濃度、碳化作用、凍融循環或酸性環境等惡劣條件時，即使初始設計滿足規範要求，仍可能因材料劣化導致壽命縮短，無法達到鋼筋混凝土建築物預期的 50 年設計壽命。性能設計法的提出，正是為了解決傳統方法在長期性能和耐久性評估中的不足。它不僅關注結構的初始強度，還將設計使用年限內的材料性能、維護需求和環境影響納入考量，是未來結構設計的主要發展方向。

就台灣現行的建築物混凝土結構設計規範來觀察，這份規範屬於基於傳統的強度設計法，主要關注結構的承載能力與力學性能。其設計過程中，對結構的長期耐久性要求相對著墨較少，對於耐久性部分，只有根據不同環境下制定最高水灰比與最低混凝土強度的要求，並且沒有明確的性能驗證過程，設計過程中未充分利用數值模擬或耐久性模型（如氯離子滲透模型，碳化模型等等）。相比之下，國際間推行的性能設計法強調根據結構用途與環境條件來設定設計壽命（例如橋梁可能需要 100 年或更長）。除此之外，利用模型量化環境劣化的影響，並將其納入設計過程。過程中引入性能驗證機制，確保結構在全壽命週期內滿足設計目標。

本研究將以國外以性能設計法為主軸的規範作為參考，尤其是將國際上甫通過的 CEB-*fib* Model Code 2020、NCHRP Guide Specification for Service Life Design of Highway Bridges (2020)、ISO 16204 Service Life Design of Concrete Structures、日

doi:10.6342/NTU202503522

本 JSCE-Standard Specification for Concrete Structure 等規範，都已經將使用年限作為設計規範的性能目標，並有不同的量化（全機率法、部份參數法等）的工具，本研究計畫蒐集研析相關文獻，並具體提出將使用年限作為設計目標的規範架構調整建議，也會盤點國內現有的耐久性研究成果，評估各種量化工具實施的可行性，將台灣鋼筋混凝土結構物相關設計規範提升為實質反映目標使用年限之永續性能設計。

1.3 研究流程與方法

圖 1-1 為本研究流程圖，本研究計畫蒐集研析相關規範與文獻，並具體提出將使用年限作為設計目標的規範架構調整建議，也會盤點國內外現有的耐久性研究成果，並使用國外規範中的量化工具探討目前的台灣規範的耐久性設計是否有不足之處並提出改善建議，將台灣鋼筋混凝土結構物相關設計規範提升為實質反映目標使用年限之永續性能設計。

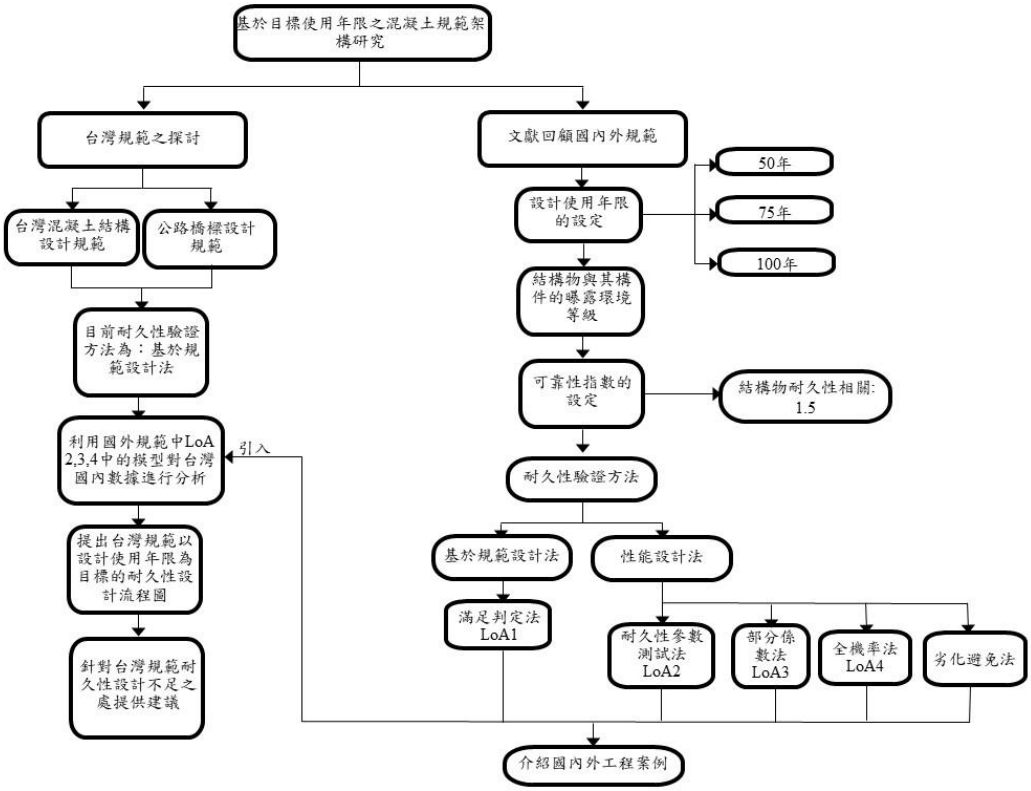


圖 1-1 本研究流程圖

doi:10.6342/NTU202503522

第二章、文獻回顧

2.1設計使用年限定義與設定

設計使用年限在各個規範中有不同的定義。根據 AASHTO 規範定義使用年限為橋梁預計運營的時間[1]；在 fib 文件中設計使用年限指構物於其壽命內，在預期維護且無需重大修復的情況下，得以達成其原定使用目的的預計時間[2]。Fib 推出的 Model code 2020 中亦指出設計使用年限為結構於其預設使用條件及預期保養條件下，能夠達到所要求性能的期間[3]；而歐洲規範中則定義為結構於預期條件下，無需重大修復即可滿足設計使用目的的期間[4]。日本規範同樣指出，設計使用年限係結構於其預期使用條件下，能維持設計功能與要求之期間，為設計所需考量的重要依據[5]。

綜上所述，設計使用年限可視為結構物在預期使用期間內不會出現需更換或維修主要構件的需求。

設計使用年限的設定依據不同規範而異。AASHTO 規範中使用年限設定為 75 年；歐洲規範中紀念性結構使用年限為 100 年，暫時性結構物為 10 年，農業用途結構物為 25 年，其餘結構物則為 50 年。AASHTO 規範指出結構設計使用年限依分類為一般型 75 年、增強型 100 年、極限型 150 年[6]。

日本規範則依耐久性驗證公式推導出可設計使用年限之上限值。Model code 2020 則提出設計使用年限應依據主要目的需求加以設定，建議可採 25、50、75、100 或 120 年，其中特別指出使用年限可依據不同評估方式設定：第一種為考慮初始階段（initiation period），第二種則為考慮初始階段與擴展階段（propagation period）之合併。

doi:10.6342/NTU202503522

2.2曝露環境等級與分類

在耐久性設計中，性能設計法強調以結構物達成預定使用功能與安全性能為目標，並透過評估實際環境與材料性能，確保結構於設計使用年限內不產生不可接受之劣化。其中，設計使用年限為設計之核心指標，其設定將直接影響耐久性需求、水膠比、保護層厚度等關鍵參數。然而，除使用年限外，對結構物所處曝露環境之充分理解亦極為關鍵。結構暴露於何種外在環境，將決定其主要劣化機制，如都市空氣中的碳化作用、海岸環境中的氯離子侵入、高緯度地區的凍融損傷，或工業區域中的酸性與硫酸鹽侵蝕等。不同之曝露環境條件對混凝土與鋼筋的劣化行為有明顯差異，設計者需根據結構物之功能、地理位置、使用條件與維護策略，適切判斷其所處環境類型與風險程度，並據此選用相應的材料與設計對策。許多國際規範如 EN 206，fib Model Code 2020 以及 ACI318-19 等規範均建立了系統性的曝露環境分類機制供工程師依據不同劣化因子進行分類與設計[3][17][12][15][16]。表 2-1 為各規範所建議的曝露環境分類方式。

doi:10.6342/NTU202503522

表 2-1 不同規範之曝露環境分類[3][17][12][15][16]

曝露環境分類	Model code 2020	EN 206	ACI318-19	CSA:2009	AS3600:2018
無害	X0	X0		N	-
碳化導致鋼筋腐蝕	XC1-5	XC1-4	-	-	-
氯離子導致鋼筋腐蝕（非海水）	XD1-3	XD1-3	C0-C2	C1-C4	-
氯離子導致鋼筋腐蝕（海水）	XS1-3	XS1-3			B1,B2,C1,C2
凍融	XF1-4	XF1-4	F0-F3	F1-F2	-
化學攻擊	XA1-3	XA1-3	S0-S3	S1-S3	-

2.3耐久性設計方法

當前，混凝土耐久性設計主要依賴於基於規範設計法（Prescriptive Design），該方法通常依據混凝土配比、最大水灰比、最少水泥含量等參數來進行設計，並假設這些條件能保證結構的耐久性。然而，這種方法的缺點在於，它忽略了許多影響耐久性的實際因素，如施工過程中的變數及混凝土材料的實際性能[6][8]。傳統的基於規範設計法常常將強度作為耐久性的代表，但實際上，強度與耐久性並非簡單的線性關係，無法真實反映結構中混凝土的耐久性。因此，許多現有的混凝土結構

doi:10.6342/NTU202503522

物在實際使用過程中會在設計使用年限前提早劣化，這為維護和修復帶來了高昂的成本[8]。

相比之下，性能設計法(Performance-based Design)能夠更精確地衡量混凝土的實際耐久性，並對結構的服務年限進行合理的預測。這種方法不僅考慮混凝土的材料性能，還涵蓋了施工過程、環境暴露以及混凝土材料的實際表現[6][8]。性能設計法可以通過測量混凝土的耐久性指標（如氯離子侵蝕、碳化等），並將這些數據輸入到耐久性模型中，從而預測混凝土結構物在特定環境下的實際表現[8]。這不僅有助於提高結構的耐久性，還能促進混凝土材料的創新，從而為不同的結構物需求提供更靈活的設計方法[9][10]。

然而，目前大多數國家和地區仍以規範性設計為主，這一方法的普遍使用在一定程度上限制了混凝土結構的創新和靈活性，尤其是在需要延長結構服務年限或在極端環境下使用時[6]。性能設計法雖然起步較晚，但已經應用於許多工程中，並證明能夠有效地預測混凝土結構的耐久性和服務年限[8][11]。因此，未來的設計方法必須逐步從傳統的基於規範設計法過渡到性能設計法，以便更好地滿足現代建築需求，並有效解決結構物耐久性問題。

doi:10.6342/NTU202503522

2.4國內耐久性規範

2.4.1建築物混凝土設計規範

根據台灣內政部國土署最新出版的的建築物混凝土結構物設計規範[12]，探討耐久性部分的章節為第十九章的混凝土：設計與耐久性要求及第二十章的混凝土保護層之規定。如表 2-2、表 2-3、表 2-4、表 2-5 所示，其中規範有提出根據不同的曝露環境及鋼筋種類，對水灰比，混凝土強度，膠結材的應用及保護層厚度有所規定，這種規定屬於基於規範設計法，缺點為沒有加入設計使用年限的概念，單純只是是依靠固定的參數進行設計，未進行性能驗證，無法確保設計是否能滿足具體結構和環境條件的耐久性需求滿足判定法也會造成設計結果過於保守，並出現設計過度的現象，從而導致結構造價上升，碳足跡增加，不利於結構物的長遠發展。

doi:10.6342/NTU202503522

表 2-2 場鑄無預力混凝土構材之規定混凝土保護層厚度[12]

混凝土暴露環境	構材	鋼筋	規定保護層厚度 (mm)
貼地澆置且永久接觸大地之混凝土	所有構材	所有鋼筋	75
暴露於大氣環境或接觸大地之混凝土	所有構材	D19 至 D57 鋼筋	50
		D16	40
不暴露於大氣環境且不接觸大地之混凝土	樓板、格柵小梁和牆	D43 及 D57 鋼筋	40
		D36 鋼筋及以下號數者	20
	梁、柱、柱墩和拉力桿	主筋、肋筋、箍筋、螺箍筋 及閉合箍筋	40
與海水或腐蝕性環境接觸者	所有構材	所有鋼筋	100

表 2-3 在腐蝕環境或暴露於其他極端條件之規定混凝土保護層厚度[12]

場鑄	牆及樓板	所有鋼筋	50
	其他所有構材	所有鋼筋	65
預鑄	牆及樓板	所有鋼筋	40
	其他所有構材	所有鋼筋	50

doi:10.6342/NTU202503522

表 2-4 暴露環境類別與分級[12]

類別	分級	混凝土之環境條件	
凍融 (F)	F0	非暴露於凍融循環	
	F1	暴露於偶而受潮之凍融循環	
	F2	暴露於經常受潮之凍融循環	
	F3	暴露於經常受潮及使用 除冰化學藥劑之凍融循環	
硫酸鹽 (S)		土壤中之水溶性硫酸鹽SO_4^{2-},質量%	水中溶解之硫酸鹽SO_4^{2-}，ppm
	S0	$SO_4^{2-} < 0.1$	$SO_4^{2-} < 150$
	S1	$0.1 \leq SO_4^{2-} < 0.2$	$150 \leq SO_4^{2-} < 1500$或海水
	S2	$0.2 \leq SO_4^{2-} \leq 2$	$1500 \leq SO_4^{2-} \leq 10000$
	S3	$SO_4^{2-} > 2$	$SO_4^{2-} > 10000$
與水接觸 (W)	W0	處於乾燥環境	
	W1	與水接觸，不需要求低滲透性	
	W2	與水接觸，需要求低滲透性	
鋼筋之腐蝕防護 (C)	C0	處於乾燥環境或有防潮處理	
	C1	暴露於潮濕但無外來氯鹽之環境	
	C2	暴露於潮濕且有外來氯鹽之環境，如除冰化學藥劑、鹽、 微鹹水、海水或其潑濺水	

doi:10.6342/NTU202503522

表 2-5 不同暴露分級之混凝土要求[12]

暴露分級		最大 w/cm	最小 fc’(kgf/cm^2)
F0		N/A	210
F1		0.55	245
F2		0.45	315
F3		0.4	350
S0		N/A	280
S1		0.5	210
S2		0.45	315
S3	選項一	0.45	315
	選項二	0.4	320
W0		N/A	210
W1		N/A	210
W2		0.5	280
C0		N/A	210
C1		N/A	210
C2		0.4	350

doi:10.6342/NTU202503522

2.4.2公路橋樑設計規範

根據台灣交通部頒布的公路橋樑設計規範[13]，探討耐久性設計的部分是第 12 章的海洋環境下防蝕設計，其中有根據不同的鹽害程度來進行曝露環境的等級分類，如表 2-6 所示，規範也提供了不同環境下混凝土橋樑的最大水膠比及最低混凝土強度限制，如表 2-7 所示。另外，規範也提供了不同使用年限下各橋樑構件所需要的最低保護層厚度，見表 2-8。

表 2-6 鹽害環境下作用等級[13]

環境作用等級	離海岸的距離
極嚴重鹽害區	海水中飛沫區
嚴重鹽害區	離海岸 300 公尺以內之區域
中度鹽害區	離海岸 300 公尺至 3 公里以內之區域

表 2-7 混凝土最大水膠比及最低混凝土強度[13]

	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
最大水膠比	0.4	0.4	0.45
最低混凝土強度 f'c(kgf/cm^2)	350	350	280

doi:10.6342/NTU202503522

表 2-8 位於不同海洋腐蝕區域中鋼筋最小保護層厚度(cm[13]

使用年限	50 年			100 年		
部位/環境作用等級	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區	極嚴重鹽害區	嚴重鹽害區	中度鹽害區
基礎，基樁	10	10	10	10	10	10
柱、牆	10	7.5	7.5	10	10	7.5
橋面版頂層筋	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
橋面版下層筋	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
箱梁底層筋	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
「I」「T」梁、箱梁腹版外露面	6.5	5.5	5	7.5	6.5	6
混凝土面未直接曝露於大氣、未與土壤或水接觸	4	4	4	4	4	4

doi:10.6342/NTU202503522

2.5國外有關設計使用年限之規範與文獻

2.5.1Model Code for Service Life Design

Model Code for Service Life Design[2]是由國際結構混凝土聯盟制定的一份重要技術文件，專門針對混凝土結構物的設計使用年限之設計(Service life design)。這份文件的主要目的為介紹耐久性模型並建立標準化的性能設計法的設計框架。

2.5.1.1設計流程

設計使用年限(Design Service Life)是混凝土結構設計中的關鍵概念，目的是確保結構在其預定使用年限內達到所需的功能和性能。設計流程從確定基本假設與定義開始，這包括設定設計的前提條件、明確相關術語以及確認管理性規範。在此基礎上，設計準則被確立，並以服務年限的原則為指導，進一步細化設計的要求。

接下來，選擇合適的設計方法至關重要。可以選擇全概率法(Full Probabilistic Design)、部分係數法(Partial Factor Design)或滿足判定法(Deemed to Satisfy Design)。在選定設計方法後，進行設計與驗證。這一階段重點在於對設計進行詳細計算，並確保所有設計條件和驗證結果符合耐久性要求。根據設計的需求，可能需要對曝露類別進行細分，並確保結構能夠有效應對環境影響，避免不必要的劣化。

此外，設計流程還包含專案計劃與維護策略的制定。這包括選擇適當的建材和施工方法，並為結構制定維護計劃，確保結構在服役期間能夠持續運行。定期檢查與監控也是不可或缺的部分，通過監控結構狀況及時發現並修復問題，確保結構安全、可靠。最後，施工過程中的質量計劃和監控工作，以及服務年限內的維護與狀況控制，都是保障結構耐久性的重要措施。這些步驟共同確保結構在設計使用年限內能夠有效運行，減少維護成本並延長結構使用壽命。

doi:10.6342/NTU202503522

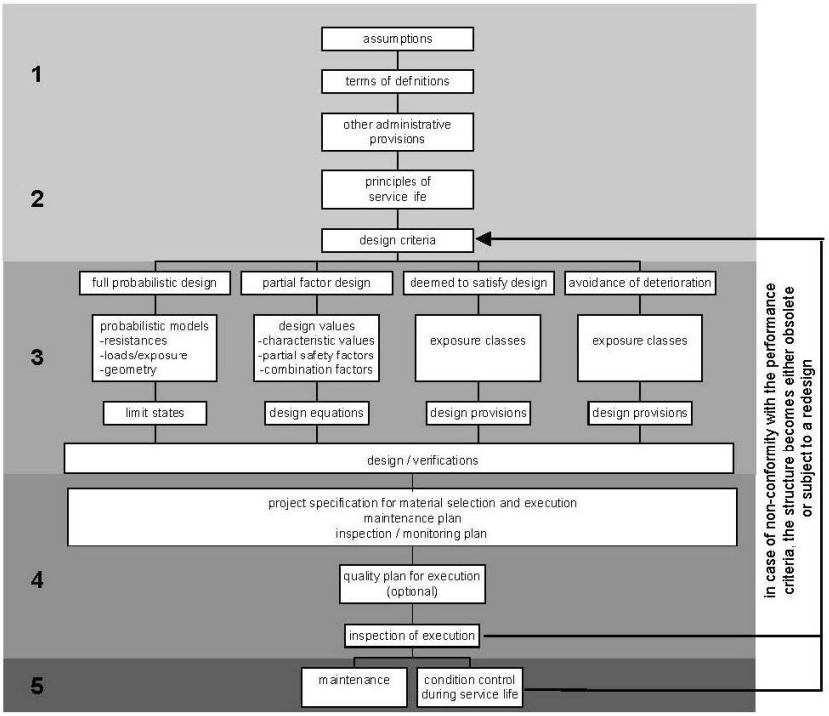


圖 2-1 設計使用年限之設計流程圖[2]

2.5.1.2劣化過程與機制探討

這份文件探討了鋼筋混凝土不同的劣化機制，分別是碳化反應與氯離子滲透所導致鋼筋的去鈍化行為及有無添加除冰鹽下的凍融破壞反應。從圖 2-2 可以觀察到鋼筋鏽蝕過程分為兩個部分，第一部分為初始階段(initiation period)，此時的鋼筋並未鏽蝕，當鋼筋開始發生去鈍化的時候被認為是初始階段的結束，接著進入擴展階段(propagation period)，此時鋼筋開始鏽蝕，進而膨脹導致混凝土剝落從而最終影響結構安全，值得注意的是文件中有提到目前全機率法中的預測模型對於初始階段有較好的準確率。

doi:10.6342/NTU202503522

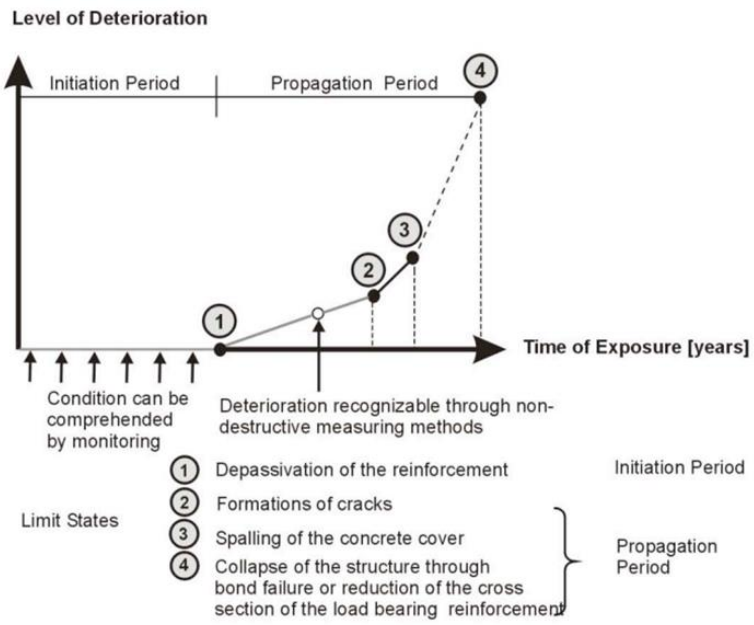


圖 2-2 鋼筋鏽蝕的劣化過程[2]

2.5.1.3耐久性驗證方法

設計使用年限之驗證方法主要有四種，它們分別是全機率法(Full Probabilistic Design), 部分係數法(Partial Factor Design), 滿足判定法(Deemed to Satisfy design)與劣化避免法(Avoidance of Deterioration Method)。這些方法都被用來驗證是否滿足性能設計法一開始定下的性能需求。此處以初始階段的碳化反應劣化機制作為例子來說明各個驗證方法的運作方式。

全機率法：特點為基於概率理論來建立概率模型以評估結構在不同條件下的可靠性，分析方式通常運用 Monte Carlo 或 Form Analysis 來進行可靠度分析以評估結構物在使用年限中的失敗概率。針對碳化反應公式為式 2-1，描述的是保護層減去某個使用年限中的碳化深度小於 0 的概率必須小於使用性極限狀態的失敗概率。

$$\mathrm{p}\{\quad\} = p_{dep} = p\{a - x_c(t_{sl}) < 0\} < p_0 \qquad \text{式 2-1}$$

部分係數法：相對於全機率法簡化設計流程，而是以安全係數來調整載重與材料強度，碳化反應公式為式 2-2，描述的是折減後的保護層的厚度減去安全係數放

doi:10.6342/NTU202503522

大後的碳化深度必須要大於 0。

$$(a_k - \Delta a) - (x_{c,c}(t_{sl}) * \gamma_f) \geq 0 \qquad \text{式 2-2}$$

滿足判定法：通過遵循既定的設計規範，就可被認為自動滿足其性能要求，此方法為大部分規範採用，由於是基於歷史數據所建立的規範，設計者不需要進行額外的驗證，常見參數為最高混凝土水灰比，最低混凝土強度與最低保護層厚度。

劣化避免法：通過設計來避免可能發生的劣化機制，常見方式為將結構構件與環境隔絕開來，常用的方法有使用鍍鋅鋼筋或添加防水層以避免鋼筋鏽蝕。

2.5.1.4可靠性指數應用

性能設計法與基於規範設計法的不同之處在於它引入了可靠性指數(reliability index)這項參數加入到極限狀態方程式(limit state function)中進行分析，極限狀態方程式描述載重與強度關係的方程式，$g(x) =$ 強度 $-$ 載重，載重(load)方面性能設計法相較於基於規範設計法則是多考慮了結構物所處的曝露環境所造成的影響。可靠性指數屬於性能設計法中十分重要的概念，被用於量化結構物在給定條件下滿足性能需求的安全程度，通常以β來表示，$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$, Φ^{-1}是標準常態分佈的反累積分佈函數，P_f 是結構失效的概率, β越高，失效概率越低，如表 2-9 所示。在表 2-10 中顯示β無論在什麼曝露環境下，針對使用性極限狀態（serviceability limit state）的情況下β都設定在 1.3 左右，換算後也就是有 10%鋼筋發生去鈍化的概率，針對結構安全的終極極限狀態(ultimate limit state)的情況下，β根據嚴重程度分別在 3.7～4.4 之間。

表 2-9 可靠性指數與失敗概率之間的轉換[2]

P_f	10^-1	10^-2	10^-3	10^-4	10^-6
β	1.28	2.32	3.09	3.72	4.75

doi:10.6342/NTU202503522

表 2-10 在不同條件下β的設定值[2]

根據歐洲規範曝露環境分類	嚴重等級	使用性極限狀態：鋼筋去鈍化	終極性極限狀態：結構倒塌
中性化相關	1	1.3	3.7
	2	1.3	4.2
	3	1.3	4.4
凍融環境下添加除冰鹽	1	1.3	3.7
	2	1.3	4.2
	3	1.3	4.4
海水中氯離子相關	1	1.3	3.7
	2	1.3	4.2
	3	1.3	4.4

2.5.2Model Code 2020

Model Code 2020[3]是由 fib 制定的最新版本混凝土結構設計規範，也是本研究最主要的參考文獻，規範目的為工程師與研究人員提供最新的混凝土結構設計指南，與前述 Model Code for Service Life Design 比較，這份規範針對性能設計法提出了更完善的設計框架與步驟。以下為規範重點。

doi:10.6342/NTU202503522

2.5.2.1設計流程

根據圖 2-3，為了滿足社會可持續性的性能要求，這些需求可以被分為社會性，環境性與經濟性，被統稱為 High-Level Performance Requirements。設計使用年限需要在一開始就被定義，被歸類在社會性的性能要求，由於這一些性能需求太過於龐大與複雜，必須進行分解成更具體的層級需求，這就產生不同的層級(tier)，tier 2 為設計者的技術方案與規範，tier 3 為承包商的施工方案與規範，tier 4 為材料與製造商的方案與規範，所有的層級都需要進行性能驗證。Model code 2020 引入了可靠性指數這項參數加入到極限狀態方程式中進性能驗證，以驗證設計結果是否能達到設計使用年限。Model code 2020 也為結構物投入使用後的生命週期管理提出完整的框架與建議。

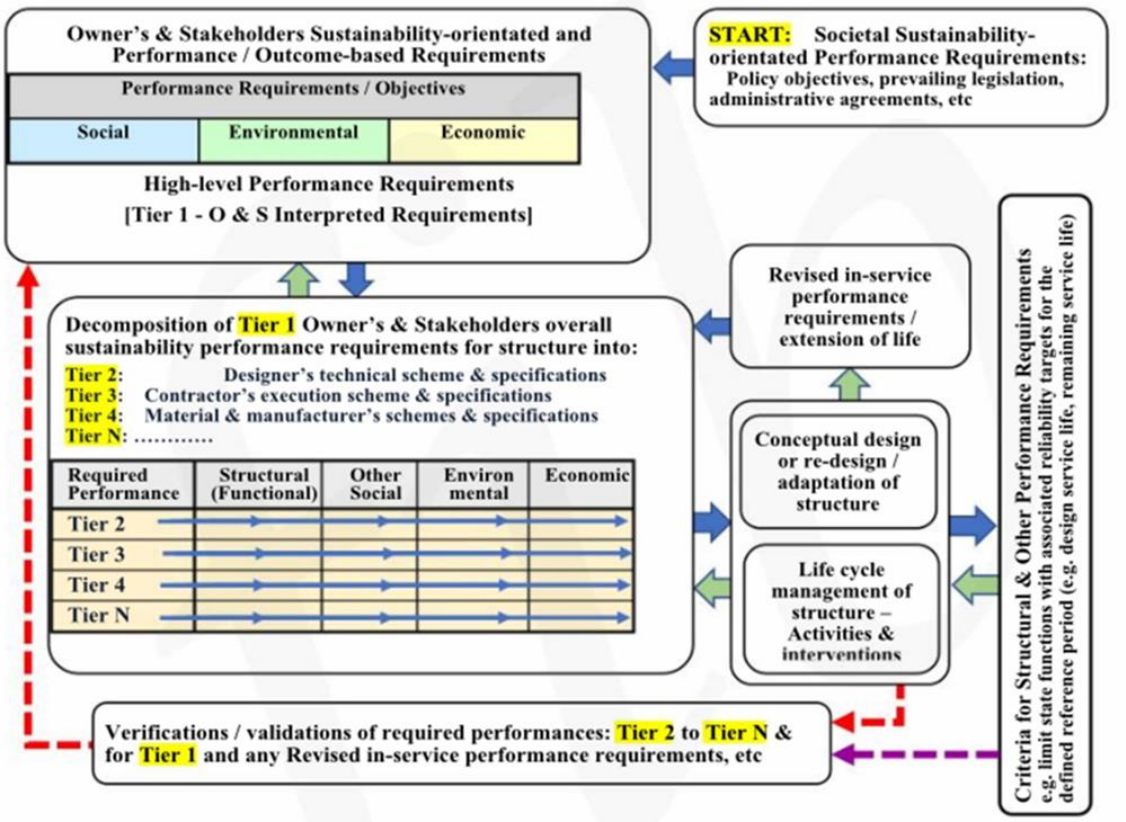


圖 2-3 基於性能的設計方法的簡化概述—要求與驗證 [3]

doi:10.6342/NTU202503522

2.5.2.2極限狀態分類與可靠性指數應用

Model code 2020 為極限狀態提供更詳細的分類，它們分別為 ultimate limit state (ULS)，serviceability limit state (SLS)與 durability limit state (DLS)，設計過程都必須確保極限狀態的性能需求被滿足。可靠性指數根據極限狀態的不同會有不一樣的數值，與結構安全相關的 ULS，可靠性指數會因環境嚴重程度的不同而變化，範圍通常落在 3.3 至 4.3 之間。與使用性相關的(SLS)可靠性指數也會因環境嚴重程度的不同而變化，範圍通常落在 1.3 至 2.3 之間，與耐久性(DLS)相關的可靠性指數為 1.5 相較，也就是有 10%發生鋼筋去鈍化的失敗概率。

2.5.2.3耐久性規劃

圖 2-4 說明的是整體生命週期階段與設計流程步驟，為了滿足一開始定下的性能需求，並以此進行設計與分析，設計流程為概念性設計，初始設計，詳細設計與施工規劃與生命週期管理計劃的準備。規範提出需要進行妥善的耐久性規劃以滿足設計前定下的設計使用年限，如圖 2-5 所示

概念設計階段需要對結構物所處的曝露環境有清晰的認知，並確認該環境會對結構物本身產生那一些劣化機制，接著挑選適合的劣化模型以作為後續的耐久性分析。此外選定適合規範以作為參考也是十分重要的部分，如果沒有適合的規範，可進行客制化耐久性設計(Bespoke durability design)或使用劣化避免法(avoidance of deterioration)以避免劣化的產生，以上內容的整理與分析，必須編訂成 Durability Assessment Report: Conceptual Design (DAR:CD)這份文件為後續相關工作的開展提供參考依據。

詳細設計階段階段須利用概念設計階段中選定的劣化模型進行耐久性分析，已確認是否滿足性能需求，另外必須建立結構物投入使用後的監測與維護計劃，以便在結構物在使用年限中不滿足性能需求時能快速的介入處理，已達到先前定下設計使用年限，以上內容的整理與分析，必須編訂成 Durability Assessment Report:

doi:10.6342/NTU202503522

Detailed Design (DAR:DD)這份文件為後續相關工作的開展提供參考依據。

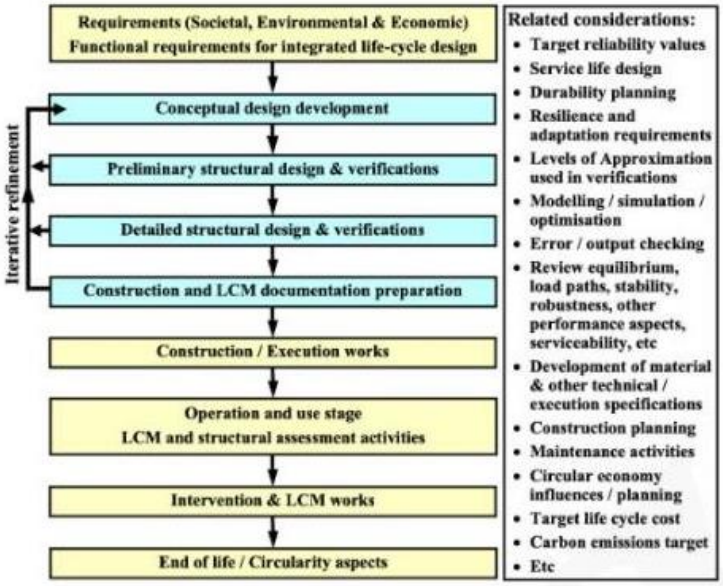


圖 2-4 整體生命週期階段與設計流程步驟 [3]

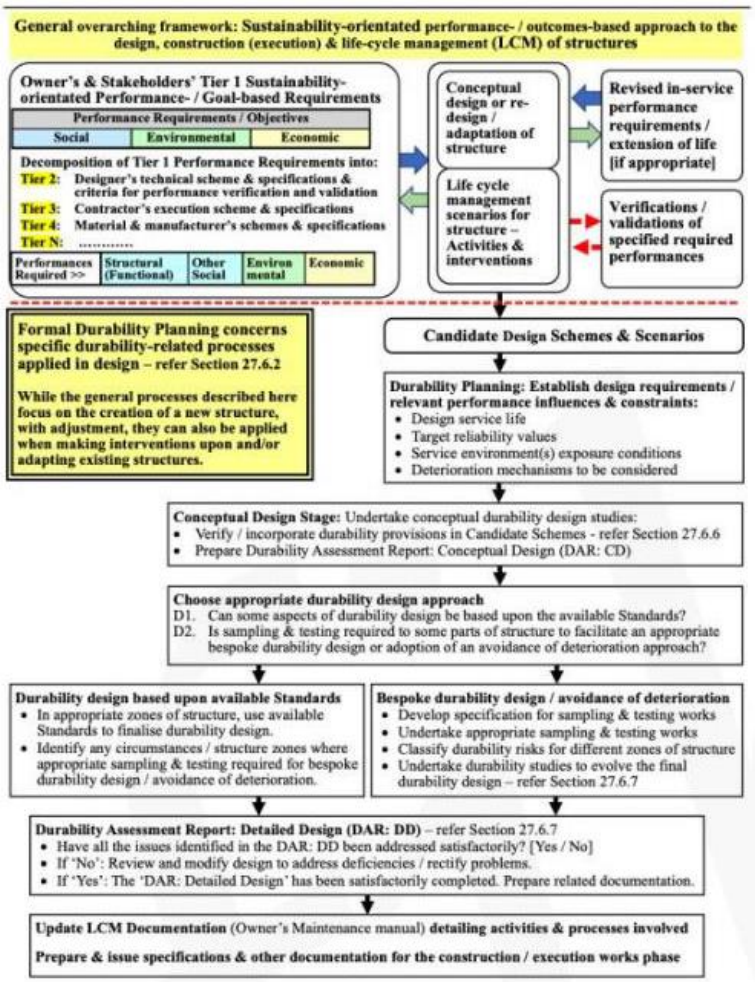


圖 2-5 設計過程中耐久性規劃[3]

doi:10.6342/NTU202503522

2.5.2.4耐久性驗證方法

這份規範提出了兩種主要的驗證方法，它們分別為可靠度分析 (reliability-based format)和部分係數法 (partial factor method)。可靠度分析考慮了各種參數的不確定性，參數通常都遵循分佈形式，這方法通常被用來分析現有結構物在使用年限中是否滿足性能需求與檢查其失敗概率。分析結果通常以可靠性指數與使用年限之間的關係進行描述。可靠性指數會隨著使用年限的增加而降低。以耐久性極限狀態作為例子，當設計使用年限被定為 100 年，但分析結果顯示可靠性指數在 80 年的時候為 1.5 以下時，可被認為此設計不滿足耐久性需求，需要在第 80 年的時候有一套完善的維護措施，以達到 100 年的使用年限。第二個方法為 partial factor method(部分係數法)，設計方法為以放大係數折減材料強度端及放大載重端。這邊以 ULS 狀況下的材料放大係數作為例子，見式 2-3，其中 V 為變異性係數，u 為偏差，α 為敏感性係數，β 為可靠性指數，可以觀察許多參數在部分係數法都不是既定值，而是遵循分佈。除此之外，這份規範也針對混凝土耐久性引入了 Level of Approximation (LoA)，見表 2-11。可以簡單理解為 level 越高，需要花費的分析時間越長，但分析結果越精確。從圖 2-6 可以觀察針對混凝土耐久性的驗證方法有許多種，從最基礎的調整最佳配比 (LoA 1)與參數驗證 (LoA 2)到利用概率模型與會隨著時間劣化的特性(LoA 3, LoA 4)，較高等級的 LoA3 與 LoA4 代表性的驗證方法分別是部分係數法與全機率法。驗證方法中模型如何使用會在第三章量化工具討論中詳細說明。LoA 有利於工程師在設計過程中能根據曝露環境的嚴重程度來選擇不同的 level 中的方法進行性能驗證。

$$\gamma_m = R_k/R_d \approx \frac{\left[exp(-1.645V_f\right]}{\left[u_{\vartheta R} * u_a * u_n * exp\left(-\alpha_R * \beta_t\sqrt{V_{\vartheta R}^2 + V_a^2 + V_n^2 + V_f^2}\right)\right]} \quad \text{式 2-3}$$

doi:10.6342/NTU202503522

表 2-11 耐久性規劃中 Level of approximation (LoA)分類[3]

等級	模型	測試方式	設計參數
1	無模型，僅依混凝土組成之規定性規則	依照設計規範，通常僅驗證強度	強度等級與混凝土組成要求（如水泥種類與最小用量、水膠比最大值等）
2	無模型，依混凝土性能之規定性規則	性能測試（耐久性指標）	測試內容包含：氯體與水分滲透性、氯離子擴散、氯離子遷移、電阻率、碳化速率、凍融循環、鹼-骨材反應、延遲膨脹、浸蝕、磨損等
3	具解析或數值解之物理模型（含部分安全係數格式）	性能測試（帶有特徵值與部分安全係數）	時間、保護層厚度、碳化速率、氯離子擴散係數、氯離子遷移係數、導電率、氯體滲透係數、以及其他劣化反應相關參數
4	具解析或數值解之物理模型（全機率式）	性能測試與參數的機率分佈統計	

doi:10.6342/NTU202503522

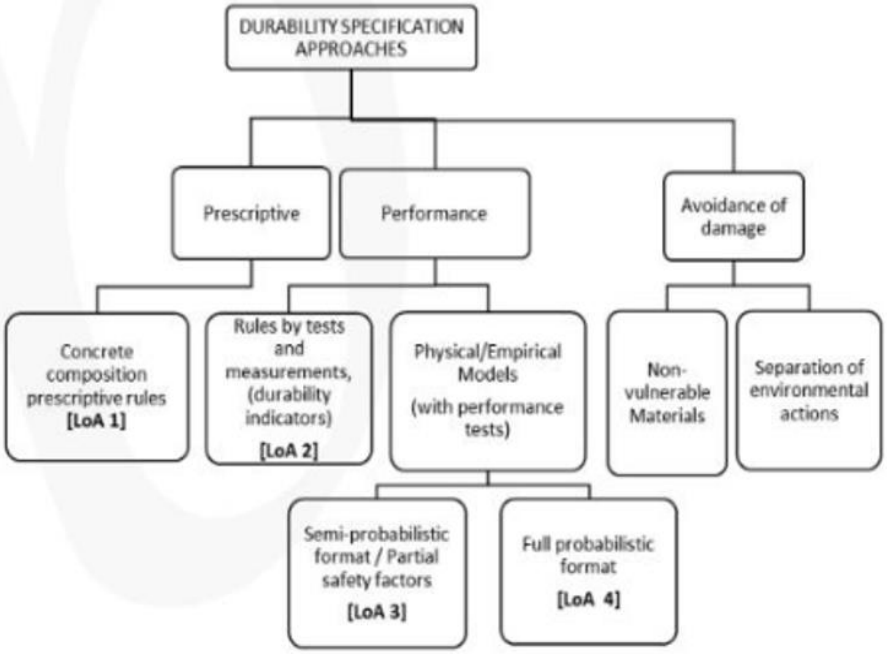


圖 2-6 針對耐久性設計驗證方法架構 [3]

2.5.3AASHTO Guide Specification for Service Life Design of Highway Bridge (2020)

Guide Specification for Service Life Design of Highway Bridge[6]旨在為高速公路橋梁的設計提供具體的設計流程，特別關注於如何根據結構的使用壽命需求，進行耐久性和性能設計，以確保橋梁在整個使用壽命週期內能夠保持功能性和安全性。規範重點如下：

1. 對結構物使用年限進行詳細的分類與定義，一般結構物使用年限定為 75 年
2. 對結構物所處於的曝露環境進行分類
3. 介紹橋樑各構件所遭受的劣化行為
4. 針對各劣化行為提出耐久性設計
5. 提出不同條件下各構件保護層厚度建議值

doi:10.6342/NTU202503522

2.5.3.1利用概率模型結果建立混凝土保護層建議值

規範利用 fib 文件中氯離子滲透模型(式 2-4)進行分析，其中式 2-4 中的參數都遵循概率分佈，因此根據不同因素所造成鋼筋腐蝕的曝露環境，混凝土種類，鋼筋類型制定出不同使用年限下的保護層厚度建議值。

其中混凝土種類包含 OPC,OPCFA,OPCFA+SF,GGBS,GGBS+SF，鋼筋跟據其抗氯離子能力分為 A,B,C,D 四個等級，最終結果如表 2-12 所述。

$$C_{crit} = C(x = a, t) = C_0 + \left(C_{s,\Delta z} - C_0\right) * \left[1 - erf\left(\frac{a - \Delta x}{2\sqrt{D_{app,c} * t}}\right)\right] \qquad \text{式 2-4}$$

doi:10.6342/NTU202503522

表 2-12 曝露環境為海岸環境所導致腐蝕行為之混凝土保護層建議值[6]

Exposure Class				Concrete Type[2]	Reinforcement Class[3]	Service Life Category		
						Normal	Enhanced	Maximum
Class	Condition	Description	Examples			Cover (in)[1,4]		
C-M1	Marine - Atmospheric	Surfaces exposed to airborne chlorides	Superstructure	Any	D	1.0	1.0	1.0
				Any	C	1.0	1.0	1.0
				OPCFA+SF, OPCFA, GGBS+SF, GGBS	B	1.0	1.0	1.0
				OPC	B	1.5	1.5	1.5
				OPCFA+SF, GGBS	A	1.5	2.0	2.0
				OPCFA	A	2.0	2.5	2.5
				GGBS+SF	A	1.5	1.5	1.5
				OPC	A	2.5	2.5	3.0
C-M2	Marine - Submerged	Surfaces permanently submerged with salt water present	Substructures between mudline and tidal zone	Any	D	1.0	1.0	1.0
				OPCFA+SF, OPCFA, GGBS+SF	C	1.0	1.0	1.0
				GGBS	C	1.0	1.5	1.5
				OPC	C	2.0	2.5	2.5
				OPCFA+SF	B	1.5	1.5	1.5
				OPCFA	B	1.5	2.0	2.0
				GGBS+SF	B	2.0	2.0	2.0
				GGBS	B	2.5	2.5	3.0
				OPCFA+SF	A	2.5	2.5	2.5
				OPCFA, GGBS+SF	A	3.0	3.0	3.5
				GGBS	A	4.0		
C-M3	Marine - Tidal or Splash/Spray Zone	Surfaces in contact with salt water either in the tidal zone or splash/spray zone	Substructures within tidal zone or splash/spray	Any	D	1.0	1.0	1.0
				OPCFA+SF	C	1.5	1.5	1.5
				OPCFA	C	1.5	1.5	2.0
				GGBS+SF	C	1.5	2.0	2.0
				GGBS	C	2.0	2.0	2.5
				OPC	C	3.5	4.0	
				OPCFA+SF	B	2.0	2.0	2.5
				OPCFA, GGBS+SF	B	2.5	2.5	3.0
				GGBS	B	3.5	3.5	4.0
				OPCFA+SF	A	3.0	3.0	3.5
				OPCFA	A	3.5	4.0	4.0
				GGBS+SF	A	3.5	4.0	
C-B	Buried	Buried elements below finished grade or below mudline (in the case of submergence)	Deep and shallow foundations, retaining structures, etc.	Any	D	1.0	1.0	1.0
				Any	C	1.0	1.0	1.0
				Any	B	1.0	1.0	1.0
				OPCFA+SF, OPCFA	A	1.0	1.0	1.0
				GGBS+SF	A	1.0	1.0	1.5
				GGBS	A	1.5	1.5	1.5
				OPC	A	2.5	3.0	3.5

doi:10.6342/NTU202503522

2.5.4Eurocode

Eurocode 是由歐洲標準化委員會（CEN）制定的設計規範。目的是為了建立統一的設計方法與安全標準，這份規範允許各國加入國家附件以調整參數，規範制定了結構物的終極極限狀態與使用性極限狀態，規定結構物在使用年限內不能出現極限狀態函數<0 的情況，其中主要的設計方法為極限狀態設計法與部分係數法，本小節將聚焦於 Eurocode 2 — Design of concrete structures[4]， Concrete — Specification, performance, production and conformity[17]， Eurocode — Basis of structural and geotechnical design[18]，探討這些規範中有關達成設計使用年限之方法與設計準則。

2.5.4.1基於規範設計法

歐洲規範的耐久性驗證方法分為基於規範設計法與性能設計法。規範中對於基於規範設計法主要是針對不同的曝露環境限制混凝土的最大水灰比，最低強度及最低水泥用量等等[17]，如表 2-13 所示。

表 2-13 混凝土配比建議限制值[17]

	曝露環境																	
	無危害	中性化反應(XC)				氯離子侵蝕						凍融反應(XF)				化學攻擊(XA)		
						來源：海水(XS)			來源：除冰鹽(XD)									
		1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3
最大 w/c		0.65	0.6	0.55	0.5	0.5	0.45	0.45	0.55	0.55	0.45	0.55	0.55	0.55	0.45	0.55	0.5	0.45
最低強度	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/40	C35/40	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
最低水泥用量 (kg/m^3	--	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
最低空氣含量 (%)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	4	4	4	--	--	--

doi:10.6342/NTU202503522

EN1992 附錄 P 中根據結構的重要性分為 6 個等級[4]，每一級再根據不同嚴重程度的曝露環境有不同的最低保護層建議值，如表 2-14 所示。規範認為如果要達到 50 年的設計使用年限的話建議使用 S4 等級，如果結構物需要達到 100 年的設計使用年限的話，需要滿足表 2-15 中的要求，比如說結構物重要等級要增加兩個等級，例如結構物處於 XC4 的曝露環境，原本 50 年的設計使用年限最低保護層厚度為 30 公分，但如果要滿足 100 年的設計使用年限的話，保護層需要增加到 40 公分，但規範也有說明一旦強度增加或是混凝土生產有做到品質控制，可以各降一個等級，用較低的保護層滿足設計使用年限。

表 2-14 一般鋼筋最小保護層建議值(mm)[4]

結構等級	曝露環境(根據表 2.6)						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

doi:10.6342/NTU202503522

表 2-15 結構物等級建議分類表[4]

不同情況	曝露環境(根據表 2.6)						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
使用年限為 100 年	增加 2 級	增加 2 級	增加 2 級	增加 2 級	增加 2 級	增加 2 級	增加 2 級
強度等級	$\geq C30/37$ 減少 1 級	$\geq C30/37$ 減少 1 級	$\geq C35/45$ 減少 1 級	$\geq C40/45$ 減少 1 級	$\geq C30/37$ 減少 1 級	$\geq C30/37$ 減少 1 級	$\geq C30/37$ 減少 1 級
構件有版	減少 1 級	減少 1 級	減少 1 級	減少 1 級	減少 1 級	減少 1 級	減少 1 級
混凝土生產有品質管理	減少 1 級	減少 1 級	減少 1 級	減少 1 級	減少 1 級	減少 1 級	減少 1 級

2.5.4.2性能設計法

性能設計法如前面章節所訴，與基於規範設計法相比此方法好處在於真正地探討了結構物在該曝露環境下的性能表現，從而根據其性能選擇材料進行施工，減少發生過度設計的現象。因此規範提出了曝露環境抵抗等級（Exposure Resistance Classes）[4]。此概念根據混凝土抵抗劣化行為進行分類，以便設計者在設計過程中，能根據不同使用年限與曝露環境來選擇混凝土及其保護層厚度。設計使用年限分為 50 年與 100 年，環境則分為碳化反應相關，海水造成的氯離子侵蝕相關及非海水造成的氯離子侵蝕相關曝露環境，如表 2-16 及表 2-17 所示。規範建議混凝土試體在固定實驗條件下進行劣化侵蝕試驗，利用試驗結果中來定出合理的保護層厚度。以碳化反應中的曝露環境抵抗等級來解釋如何進行分類，等級從 XRC0.5

doi:10.6342/NTU202503522

至 7 分為七個等級，XRC 後面的數字為碳化速率(mm/√years)，是根據建議的試驗時間後得到的碳化速率反推使用年限後的碳化深度，從而定出最小保護層厚度。歐洲學者也有利用不同配比的混凝土進行碳化侵蝕試驗，將水灰比及其碳化速率進行連接，進行曝露環境抵抗等級的分類，實驗結果顯示混凝土水灰比及其碳化速率呈正比關係[19]。氯離子相關之曝露環境的等級從 XRDS0.5 至 10 分為 10 個等級，XRDS 後面數字為氯離子滲透速率($10^{-13}m^2/s$)。

表 2-16 碳化反應下最小保護層建議值(mm)[4]

ERC	中性化相關之曝露環境							
	XC1		XC2		XC3		XC4	
	設計使用年限(年)							
	50	100	50	100	50	100	50	100
XRC0.5	10	10	10	10	10	10	10	10
XRC1	10	10	10	10	10	15	10	15
XRC2	10	15	10	15	15	25	15	25
XRC3	10	15	15	20	20	30	20	30
XRC4	10	20	15	25	25	35	25	40
XRC5	15	25	20	30	25	45	30	45
XRC6	15	25	25	35	35	55	40	55
XRC7	15	30	25	40	40	60	45	60

doi:10.6342/NTU202503522

表 2-17 氯離子侵蝕下最小保護層建議值(mm)[4]

ERC	氯離子相關之曝露環境											
	XS1		XS2		XS3		XD1		XD2		XD3	
	設計使用年限(年)											
	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
XRDS0.5	20	20	20	30	30	40	20	20	20	30	30	40
XRDS1	20	25	25	35	35	45	20	25	25	35	35	45
XRDS1.5	25	30	30	40	40	50	25	30	30	40	40	50
XRDS2	25	30	35	45	45	55	25	30	35	45	45	55
XRDS3	30	35	40	50	55	65	30	35	40	50	55	65
XRDS4	30	40	40	60	60	80	30	40	50	60	60	80
XRDS5	35	45	60	70	70	-	35	45	60	70	70	-
XRDS6	40	50	65	80	-	-	40	50	65	80	-	-
XRDS8	45	55	75	-	-	-	45	55	75	-	-	-
XRDS10	50	65	80	-	-	-	50	65	80	-	-	-

2.6Bridges for Service Life Beyond 100 Years: Service Limit State Design

此報告為美國第二期策略性公路研究計畫(SHRP2)下 R19B 課題的研究成果，由美國國家研究院(NRC)旗下的交通研究委員會(TRB)負責出版，目標在於推動橋梁結構設計 100 年的使用年限的方向邁進[20]。

其中第三章提供了可靠度分析之執行流程圖(圖 2-7)，整體分析流程可分為三個主要階段：建立分析模型、推導統計參數、以及執行可靠度分析與係數校準。首先，在建立分析模型階段，須明確設定極限狀態函數，亦即結構進入失效狀態的條件，接著選定具代表性的結構類型與設計案例，作為後續分析的基礎。進入第二階段時，需針對各設計案例蒐集相關資料，並分別針對載重段與材料強度段進行參數

doi:10.6342/NTU202503522

建模。載重段可透過荷載調查、實驗數據與現場收集獲取相關資訊，再建立各類載重組合的統計模型；材料強度則可透過實驗數據與工程判斷，對材料強度、幾何變異等參數進行建模。上述兩部分最終皆需推導出對應的統計參數，如均值、標準差、變異係數、分佈型態等。

進入第三階段後，便開始執行可靠度分析。首先建立分析流程，使用現行設計方法（如 AASHTO、ACI、fib 等）所對應的修正係數進行試算，推導其對應的可靠度指標β。接著依照風險容忍程度，設定目標可靠度指標β_t，並依據結果挑選合適的候選負載與抗力修正係數組合。這些係數再代入模型重新進行可靠度分析，並比較所得的β是否符合目標值 β_t。若計算結果達到或超過目標可靠度，則紀錄所得的修正係數並結束流程；反之，則需調整參數並重新分析，如此反覆，直到達成設計要求。

doi:10.6342/NTU202503522

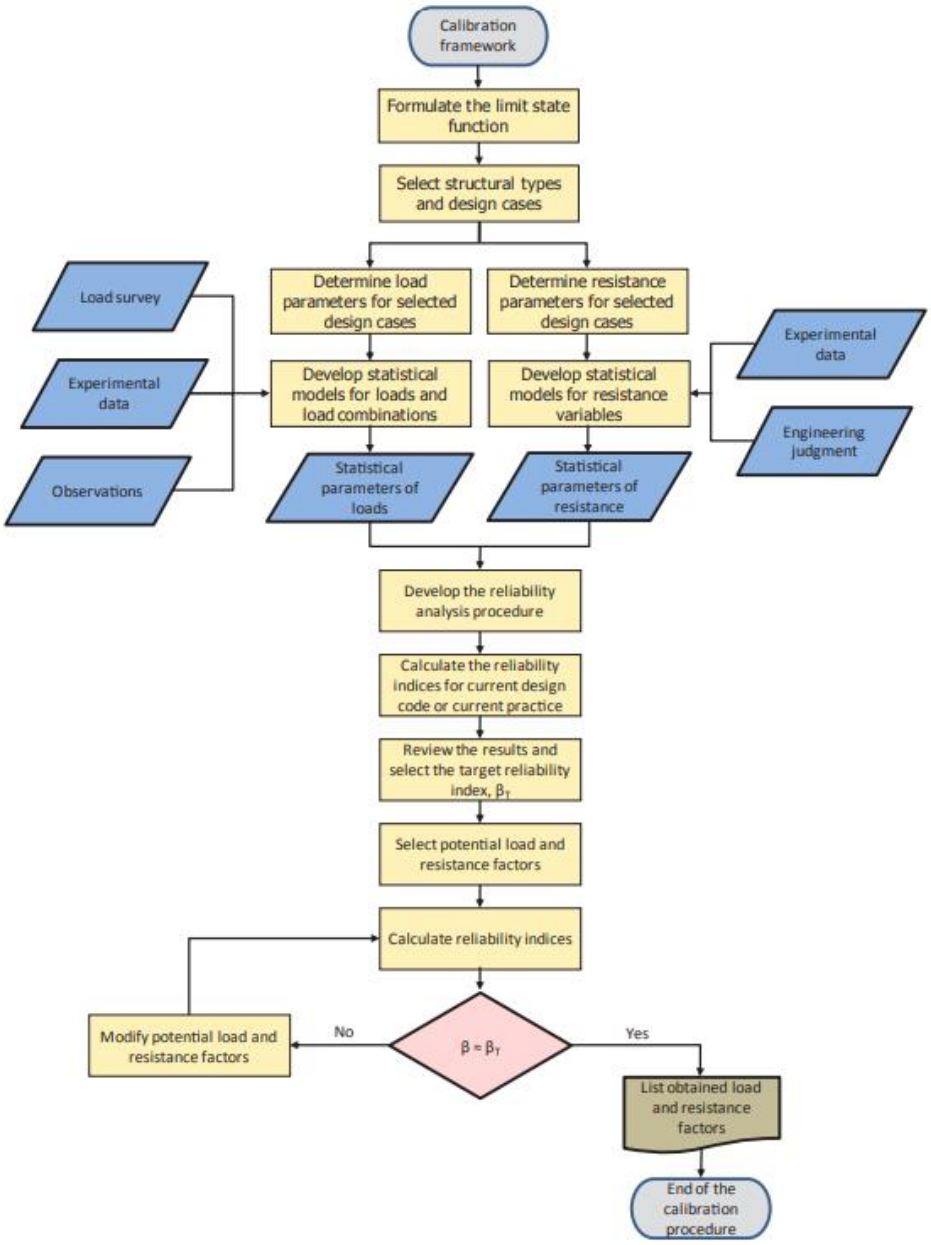


圖 2-7 可靠度分析之執行流程圖[20]

doi:10.6342/NTU202503522

第三章、量化工具討論

3.1Level of approximation（LoA）

目前不同劣化機制可用的 LoA 驗證方法如表 3-1 所示，LoA 分類方法請查閱表 2-11，可以觀察到每個劣化機制都有相關的劣化避免法進行約束，☑為有相關的模型與規範進行驗證，*為只有部分規範有相關驗證方式及-為沒有相關規定或是還在進行研究中。此章節將探討不同 LoA 下中性化反應與氯離子侵蝕的驗證方法之執行方式。

表 3-1 目前可用的使用年限設計法之評估方法[3]

	LoA1	LoA2	LoA3	LoA4	劣化避免
中性化反應	☑	*	*	☑	☑
氯離子侵蝕	☑	*	*	☑	☑
凍融反應	☑	☑	-	-	☑
化學攻擊	☑	*	-	-	☑
鹼質與粒料反應	☑	☑	-	-	☑
延遲鈣矽酸鹽水化反應	☑	☑	-	-	☑

3.1.1Level 1（LoA1）

本小節將介紹 Level 1 的驗證方法，於設計規範中稱為基於規範設計法（Prescriptive Design）。其核心概念為：只要設計過程遵循規範所列之材料條件與幾何要求，即可視為符合耐久性需求。此法無須直接驗證混凝土性能（如滲透深度、氯離子濃度、鋼筋鏽蝕時間等），而是透過固定參數條件來間接確保結構物於指定曝露環境下具備足夠的耐久性。

doi:10.6342/NTU202503522

常見的限制參數包括：

1. 最大水膠比

2. 最小膠結材用量

3. 允許使用之膠結材種類

4. 最低抗壓強度

5. 最小保護層厚度

基於上述原則，本研究建議建立如表 3-2 所示之建議參數表，針對不同設計使用年限，分別對中性化相關曝露環境，以及海水與除冰鹽等氯離子侵蝕環境，提出對應之材料與幾何參數建議值。

然而，滿足判定法主要根據歷史工程經驗與長期實務觀察所制定，其條件通常以可滿足 50 年設計使用年限為前提，並非透過全面的可靠度分析或機率模型驗證所得。此外，多數設計規範僅針對特定曝露條件提供標準設計值，較少針對不同設計使用年限提出差異化的參數建議。本研究所擬定之表格內容，主要參考 EN 1992、JSCE 2018 及 BS 8500 等文獻資料彙整與比對[4][5][21]。

doi:10.6342/NTU202503522

表 3-2 不同使用年限下參數建議值

曝露環境等級	最高水膠比限制 (w/cm)			最低混凝土強度 (kgf/cm^2)			最低保護層厚度 (cm)		
	設計使用年限(年)								
	50	75	100	50	75	100	50	75	100
XC1									
XC2									
XC3									
XC4									
XC5									
XD1									
XD2									
XD3									
XS1									
XS2									
XS3									

3.1.2Level 2（LoA2）

此小節針對的為 EN1992 提出的曝露環境抵抗等級(Exposure resistance classes,ERC)[4]。雖然 ERC 透過實驗性質的碳化速率測定，建構出設計使用年限與保護層厚度的對應表，然而其方法仍存在邏輯跳接：即實驗所得的材料性能屬於標準加速條件，並無明確機制可將其準確轉換為實際曝露等級（如 XC1~XC4）下的劣化速度。換言之，設計者雖可根據 ERC 表選定保護層厚度，但仍難保證該厚度在特定環境條件下實際可達預期的使用年限。另外，ERC 的分類方式的是否適用

doi:10.6342/NTU202503522

於台灣仍有待確認，XRDS(表 2-17)將混凝土依照氯離子的擴散速率$0.5-10*10^{-13}m^2$/s 進行分類,但根據台灣目前現有的研究成果來觀察，純水泥齡期 28 天混凝土的擴散速率介於$7.93-19.66*10^{-12}m^2$/s，爐石飛灰取代水泥量各 20%，齡期 28 天混凝土的擴散速率介於$1.93-3.93*10^{-12}m^2$/s[22]，擴散速率與表格建議值相差了 10 倍以上。另外一個問題為 XRDS 雖然其源自標準化的氯離子擴散試驗，卻未提供對應等級混凝土的實際配比參數與性能範圍，使得設計者難以驗證自身混凝土能否達到預期的耐久性表現。此種缺乏具體材料指標與分類依據的情況，限制了性能導向設計法的落實，也導致表格實際應用上仍需大量工程判斷與經驗介入。XRC(表 2-16)將混凝土依照碳化速率$0.5-7mm/$year進行分類，台灣目前的研究成果根據地區的不同有不一樣的值，大約落在$1.7-7.4mm/year$之間[23][24]，但問題與 XRDS 類似，規範並沒有明說碳化加速試驗中混凝土實際配比參數，這讓此表格內的數據是否適用有著很大的疑問。因此，本研究建議可從台灣現地結構物中收集碳化速率與氯離子擴散係數等相關數據，以解決前述表格中所列數值與本地實際情況不符的問題。透過試驗得到的劣化速率，可反推出在不同設計使用年限下所需的保護層厚度，進而建立類似於表 2-16 與表 2-17 的區域性設計參考表。此作法的優點在於能同時涵蓋不同嚴重程度的曝露環境與多種混凝土配比，提供更具實用性與在地性的設計依據。

3.1.3Level 3（LoA3）之部分係數法

此小節將分成兩個部分，第一部分為參考 fib bulletin 112 中探討碳化與氯離子侵蝕的相關公式[26]。碳化公式如式 3-1 所示，c_d為保護層厚度設計值，單位為 mm，γ_f為碳化深度放大係數，取 1.3，$x_{c,k}$為碳化深度特徵值，單位為 mm，k_k為碳化速率特徵值，單位為mm/$\sqrt{\text{year}}$。

$$c_d \geq \gamma_f * x_{c,k}(t) = \gamma_f * k_k * \sqrt{t} \qquad \text{式 3-1}$$

氯離子侵蝕公式如式 3-2 所示，C_{crit}、$C_{0,k}$、$C_{s,\Delta x,k}$分別為臨界,初始,表面氯離

doi:10.6342/NTU202503522

子濃度,單位皆為 wt.-/b，規範提出保護層厚度c_{min}普遍上遵循常態分佈，均值為標稱值，標準差由於變異性的關係從 6 至 10mm 不等。t_{SL}為結構物使用年限，γ_α為衰減係數安全係數，取 1.2，γ_D為傳輸係數安全係數，取 1.6，γ_c為表面氯離子濃度安全係數，取 1.9，以上安全係數的設定都是建立在可靠性指數為 1.5 所設定的[25]。

$$
\begin{aligned}
C_{\text{crit}} = C(c_{min}, t) \\
&= C_{0,k} \\
&+ \left(C_{s,\Delta x,k} * \gamma_C \right. \\
&\left. - C_{0,k}\right) erfc \frac{c_{min} - \Delta x}{2\sqrt{k_{e,k} * D_{RCM,k}(t_0) * \gamma_D * \left(\frac{t_0}{t_{SL}}\right)^{\frac{\alpha_k}{\gamma_\alpha}} * t_{SL}}}
\end{aligned}
\qquad \text{式 3-2}
$$

第二部分將參考日本 JSCE 規範設計編：標準第二章為耐久性設計，其中說明了碳化反應，氯離子侵蝕，凍融破壞及化學攻擊的耐久性驗證公式[5]，此小節將以台灣較為關注的碳化反應及氯離子侵蝕的公式進行介紹，碳化反應公式如式 3-3 所示，γ_i介於 1 至1.1之間。

$$
\begin{aligned}
&\gamma_i * \frac{y_d}{y_{lim}} \leq 1 \\
&y_{lim} = \mathrm{c_d} - \mathrm{c}_k \\
&\mathrm{c_d} = \mathrm{c} - \Delta c_e \\
&y_d = \gamma_{cb} * \alpha_d \sqrt{t} \\
&\alpha_d = \alpha_k * \beta_e * \gamma_c \\
&\alpha_k = -3.57 * 9\mathrm{W/B} \\
&W/B = W/(C_p + \mathrm{k} * A_d)
\end{aligned}
\qquad \text{式 3-3}
$$

鋼筋腐蝕極限深度y_{lim}為鋼筋腐蝕臨界值，單位為 mm，,c_d為保護層厚度設計值，c_k為未碳化的保護層厚度，一般為 10mm，如環境中氯離子侵蝕可能性很低，可取 10 至 25mm，Δc_e為施工誤差，柱為 15mm，梁為 10mm，版為 5mm。碳化深度y_d單位為 mm，γ_{cb}為考慮碳化不確定性所定出的安全係數，取 1.15，α_d為碳化係數設計值，α_k為碳化係數特徵值，兩者單位皆為mm/$\sqrt{year}$, β_e為環境放大係數，取 1.6，γ_c為材料放大係數，一般取 1.0，但如果構件位於上層部分，取 1.3，t 為使

doi:10.6342/NTU202503522

用年限，100 年是其上限值。碳化係數特徵值α_k為普通波特蘭水泥或中熱波特蘭水泥 17 種實驗數據求出的迴歸公式，W/B 為有效水膠比，W 為單位體積的水重，B 為單位體積的有效膠結材重，C_p為單位體積的波特蘭水泥重，A_d為單位體積的參料重，k 為不同參料所指定的常數，如果是飛灰，k=0，爐石的話 k 為 0.7。

氯離子侵蝕公式如式 3-4 所示。臨界氯離子濃度C_{lim}，單位為 kg/m^3,不同種類的水泥會有不同的計算方式，僅適用於水膠比 0.3-0.55 的混凝土。鋼筋處氯離子濃度C_d單位為 kg/m^3，γ_{cl}為安全係數，取 1.3，如果使用高流動性混凝土，取 1.1，t 為使用年限，上限為 100 年，c_d為保護層厚度設計值，Δc_e為施工誤差，柱為 15mm，梁為 10mm，版為 5mm，C_i為初始氯離子濃度，規範建議值為 0.3kg/m^3,C_0為表面氯離子濃度，單位為 kg/m^3，可根據飛來鹽量估算，如果無資料可參照，可參考表 3-3。

$$\gamma_i * \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1$$

$$C_{lim} = -3 * \mathrm{w/c} + 3.4 \text{(純水泥)}$$

$$C_{lim} = -2.6 * w/c + 3.1 \text{(爐石或飛灰取代水泥)}$$

$$C_{lim} = -2.2 * w/c + 2.6 \text{(早強水泥或低熱水泥)} \qquad \text{式 3-4}$$

$$C_{lim} = -1.2 \text{(矽灰取代部分水泥)}$$

$$C_d = \gamma_{cl} * C_0\left(1 - erf\left(\frac{0.1 * c_d}{2\sqrt{D_d * t}}\right)\right) + C_i$$

$$\mathrm{C_0} = -0.016 * \mathrm{C_{ab}^2} + \mathrm{C_{ab}} + 1.7$$

$\mathrm{C_{ab}}$:飛來鹽含量(mdd,mg/dm^2/day)

doi:10.6342/NTU202503522

表 3-3 混凝土表面氯離子濃度 $C_0(kg/m^3)$[5]

區域		飛沫帶	離海岸距離(km)				
			海岸線附近	0.1	0.25	0.5	1
飛來鹽分多的地域	北海道、東北、北陸、沖繩	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛來鹽分少的地域	關東、東海、近畿、中國、四國、九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

氯離子擴散係數設計值D_d：如式 3-5 所示，單位為$cm^2/year$,γ_c為材料放大係數，一般取 1.0，但如果構件屬於上層部分，取 1.3，D_k為擴散係數特徵值，單位為$cm^2/year$，有兩種方法可以得到此係數,規範有提供日本國內的回歸公式或參考 JSCE-G571-2003 進行氯離子傳輸係數試驗,這兩個方法僅適用於水膠比 0.3-0.55 的混凝土,λ為考慮裂縫對擴散係數影響之安全係數，取 1.5，D_0為混凝土中氯離子之移動對造成裂縫影響的常數，取 $400\frac{cm^2}{year}$,w/l為裂縫寬度與裂縫間隔比,σ_{se}及σ_{pe}分別為鋼筋及預力鋼鍵應力之增加量，E_s及E_p分別為鋼筋及預力鋼鍵之楊氏係數，ε'_{csd}為考量混凝土乾縮及潛變之裂縫寬度增加值, β_{cl}為考慮裂縫對擴散係數影響之安全係數，取 1.5。

doi:10.6342/NTU202503522

$$D_d = \gamma_c * D_k + \lambda * (\mathrm{w/l}) * D_0$$
$$w/l = (\frac{\sigma_{\mathrm{se}}}{\mathrm{E_s}}(\mathrm{or}\frac{\sigma_{\mathrm{pe}}}{\mathrm{E_p}}) + \varepsilon'_{\mathrm{csd}})$$
$$D_d = \gamma_c * D_k * \beta_{cl}$$

方法一:

$\log_{10}D_k = 3 * \mathrm{w/c} - 1.8$(純水泥)

$\log_{10}D_k = 3.5 * \mathrm{w/c} - 1.8$(低熱水泥)

$\log_{10}D_k = 3.2 * \mathrm{w/c} - 2.4$(爐石或矽灰取代部分水泥) 式 3-5

$\log_{10}D_k = 3 * \mathrm{w/c} - 1.9$(飛灰取代部分水泥)

方法二：

$D_{ae} = k_1 * k_2 * D_e$

D_e: 參考 JSCE-G571-2003 所得到的傳輸係數(cm^2/year)

$k_1 * k_2 = 0.21\exp\{1.8\mathrm{w/c}\}$(純水泥)

$k_1 * k_2 = 0.15\exp\{3.1\mathrm{w}/c\}$(低熱水泥)

$k_1 * k_2 = 0.14\exp\{1.6\mathrm{w/c}\}$(爐石取代部分水泥)

$k_1 * k_2 = 0.37\exp\{1.1\mathrm{w/c}\}$(飛灰取代部分水泥)

3.1.4Level 4（LoA4）之可靠度分析

Level 4 中的常見的驗證方法為可靠度分析，在其他文獻中也稱為全機率法。目前只有碳化反應與氯離子導致鋼筋去鈍化行為有相對應的模型進行分析[2][3][26][27]。執行方式為在設計過程中使用 First Order Reliability Method（FORM）或 Monte Carlo 等分析工具，檢視使用年限內可靠性指數與失敗概率值是否有滿足規範的安全值。接下來要介紹碳化反應及氯離子侵蝕導致鋼筋去鈍化的模型，也會對模型內的參數進行說明。

由 Fib-Model Code for Service Life Design 提出的碳化反應導致鋼筋去鈍化極限狀態函數如式 3-6 所示，描述的是保護層厚度a與碳化深度x_c(t)之間的關係，為體現施工誤差與函數的變異性。函數內的參數都遵循分佈。概率公式如式 2-1 所示,描述的是鋼筋去鈍化的概率需要小於規範的建議值,也就是 10%的概率，可靠性指數為 1.5。保護層厚度a如 3.1.3 所訴。

doi:10.6342/NTU202503522

$$g(a, x_c(t)) = a - x_c(t)$$

$$x_c(t) = \sqrt{2 \times k_e \times k_c \times \left(k_t \times R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t\right) \times C_s \times t \times W(t)}$$

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{RH_{real}}{100}^{f_e}\right)^{g_e}}{\left(1 - \frac{RH_{ref}}{100}^{f_e}\right)^{g_e}}$$

式 3-6

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7}\right)^{b_c}$$

$$R_{ACC,0}^{-1} = \left(\frac{x_c}{\tau}\right)^2$$

$$W = \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\frac{(p_{SR} * ToW)^{b_w}}{2}} = \left(\frac{t_0}{t}\right)^{w}$$

接下來將對碳化深度內的參數進行介紹，環境係數k_e與環境中相對濕度有關，f_e為 5, g_e為 2.5，皆為常數。養護係數k_c與養護時間t_c有關，b_c為常態分佈，均值為-0.567，標準差為 0.024。加速碳化速率$R_{ACC,0}^{-1}$為實驗室條件下得到的碳化速率[28]，試體高寬長數據為 100/100/50mm，放置在 20 攝氏度的水進行 7 天養護後，再進行空氣養護，環境條件為 20 攝氏度及 65%的相對濕度，經過 21 天的空氣養護後試體將放入碳化室進行 28 天的碳化侵蝕實驗，實驗室中二氧化碳濃度為 2.0vol.-%，試驗結束後將試體劈開，噴上酚酞，得到碳化深度後計算加速碳化速率，τ為時間常數，為 $420(\mathrm{s/kg/m^3})^{0.5}$，規範提出加速碳化速率遵循常態分佈,均值為實驗值,標準差為 $0.69 * 均值^{0.78}$, $\mathrm{k_t}$為回歸係數,均值為1.25,標準差為0.35, ε_t為誤差係數,均值為315.5,標準差為48,單位為$\frac{mm^2/years}{kg/m^3}$。大氣二氧化碳濃度$\mathrm{C_s}$均值為0.00082,標準差為0.0001,單位為$\mathrm{kg/m^3}$。氣候方程式$W(t)$為考慮混凝土表面的濕潤狀況,,ToW為每年的平均下雨天數, p_{SR}指雨滴在風的作用下以一定角度撞擊牆面或結構表面導致水分進入裂縫進而增加混凝土表面濕潤時間, t_0為0.0767年, b_w均值為0.446,標準差為0.163。

doi:10.6342/NTU202503522

氯離子侵蝕導致鋼筋去鈍化極限狀態函數與概率公式如式 3-7 所示，描述的是臨界氯離子濃度C_{crit}與鋼筋處氯離子濃度$C(a,t_{sl})$之間的關係。

$$g(C_{crit},C(a,t_{sl}))=C_{crit}-(C_0+(C_{s,\Delta x}-C_0)*\left[1-erf\frac{a-\Delta x}{2\sqrt{D_{app,c}*t}}\right])$$
$$p\{\quad\}=p_{dep}=p\{C_{crit}-C(a,t_{sl}))<0\}<p_0$$
$$D_{app,c}=k_eD_{RCM,0}A(t)$$
$$k_e=exp\left(b_e\left(\frac{1}{T_{ref}}-\frac{1}{T_{real}}\right)\right)$$
$$A(t)=(\frac{t_0}{t})^{\alpha}$$

式 3-7

臨界氯離子濃度C_{crit}為導致鋼筋開始去鈍化及鐵離子開始解離的濃度，單位為 wt.%/binder,規範建議遵循 beta 分佈，均值為 0.6，標準差為 0.15，上下值為 2 與 0.2。初始氯離子濃度C_0為混凝土澆置完成後，尚未曝露於外部氯離子時，混凝土內部就已存在的氯離子含量。Fib Bulletin 76 建議取 0.05wt.%/binder[27]。表面氯離子濃度$C_{s,\Delta x}$與曝露環境的嚴重等級有關，Δx為距離混凝土表面一定深度下的距離，$C_{s,\Delta x}$為一定深度下的氯離子濃度，由於混凝土表面經歷濕潤與乾燥兩個階段，導致Δx這段距離中的氯離子移動方式並非擴散主控，如果用 Fick's 2nd law 來描述混凝土中氯離子的移動方式，規範建議利用$C_{s,\Delta x}$作為氯離子表面濃度。如果結構構件是浸泡在海水或潮汐區的話，Δx取 0，如果構件處於海水潑濺區，Δx均值為 8.9mm，標準差為 5.6mm。表面氯離子濃度根據不同的曝露環境下的建議值如表 3-4 所示，XD 為除冰鹽所造成的氯離子侵蝕行為，XS 為海水中氯鹽所導致的氯離子侵蝕行為,字母後的數字尾號為嚴重等級, u及 CoV 分別為均值與共異變數。

doi:10.6342/NTU202503522

表 3-4 不同曝露環境下的氯離子表面濃度[27]

曝露環境	表面氯離子濃度$C_{s,0}/C_{s,\Delta x}(wt.-/b)$	
XD1	0.5≤ u ≤ 1.5	CoV=0.75
XD2	2≤ u ≤ 4	CoV=0.75
XD3	2 ≤ u ≤ 4	CoV=0.75
XS1	1 ≤ u ≤ 2	CoV=0.45
XS2	2 ≤ u ≤ 4	CoV=0.25
XS3	2 ≤ u ≤ 4	CoV=0.45

氯離子擴散係數$D_{app,c}$:如式 3-7 所示,k_t為常數1。環境係數k_e中b_e為回歸係數，單位為 K，均值為 4800，標準差為 700。溫度T_{ref}為常數 293K，T_{real}為從氣象局獲得的溫度資料。氯離子傳輸係數$D_{RCM,0}$參照 NT Build 492[29]，均值為實驗結果，標準差為 0.2*均值 。衰減係數函數A(t)中 t_0為混凝土齡期，規範建議值為 28 天，t為結構物使用年限，α為衰減係數，規範建議為 beta 分佈，如表 3-5 所示。

表 3-5 不同混凝土之衰減係數[2]

混凝土	衰減係數
純水泥$0.4 \le w/c \le 0.6$。	均值：0.3 標準差：0.12 下限 a 與上限 b：0，1
添加飛灰(22%取代量)$0.4 \le w/c_{eqv} \le 0.6$	均值：0.6 標準差：0.15 下限 a 與上限 b：0，1
添加爐石$0.4 \le w/c \le 0.6$。	均值：0.45 標準差：0.2 下限 a 與上限 b：0，1

doi:10.6342/NTU202503522

第四章、案例介紹

4.1港珠澳大橋

港珠澳大橋是連接香港大嶼山、澳門和廣東珠海的大型跨海通道，於 2009 年動工，2018 年完工後通車，其橋樑全長 36 公里，其中跨海段 28.8 公里，具有兩座人工島與一個全長 6.8 公里的海底隧道。橋樑的設計使用年限是 120 年[30]，其耐久性設計從構件所處於的曝露環境開始，表 4-1 為 CNS 年提出的曝露環境分類方式[31]，分別有中性化相關，氯離子侵蝕相關，凍融相關與化學攻擊相關，表 4-2 為橋樑各構件所處的曝露環境，這樣的好處可以在驗證過程中選擇相對應的驗證方法來確保使用年限內不會發生鋼筋鏽蝕的問題。其次為選擇材料，混凝土水膠比為 0.35，並使用飛灰及爐石取代部分水泥，為了應對$S0_4^{2-}$及Mg^{2+}造成的化學物質腐蝕行為，膠結材中SO_3含量要求控制在 4%以下，水泥中C_3A含量要求介於 6%至 8%，混凝土鹼含量不能超過 $3kg/m^3$, 不得具有潛在鹼骨料反應活性[32]。

表 4-1 曝露環境分類[31]

分類	環境	嚴重等級	鋼筋混凝土構件之劣化行為
I	大氣	A,B,C	中性化
II	凍融	C,D,E	凍融破壞
III	海洋	C,D,E,F	氯離子侵蝕
IV	除冰鹽	C,D,E	氯離子侵蝕
V	化學	C,D,E	化學攻擊

doi:10.6342/NTU202503522

表 4-2 結構物各構件之曝露環境[30]

結構	分類	腐蝕因子	嚴重程度	曝露環境	構件（RC/PC）
橋樑	I	$C0_2$	I-B	室內	箱型梁（內部）
			III-C	浸泡於海水中	樁，部分承台
	III	氯離子	III-D	鹽霧，海平面以上15公尺處	橋面、橋塔（部分）、橋墩（部分）
			III-F	潑濺區，潮汐區	承台（部分）、橋墩（部分）、箱型梁
	V	$S0_4^{2-}Mg^{2+}$及海水中$C0_2$	V-D	$S0_4^{2-}$：1000 − 4000mg/L Mg^{2+}：1000 − 3000mg/L $C0_2$：30 − 60mg/L	承台(水下部分
隧道	I	$C0_2$	I-B	室內	隧道（內部）
	III	氯離子	III-D	鹽霧	隧道（內部）
			III-E	海水，空氣	隧道（外部）
			III-F	潑濺區，潮汐區	抗震橋墩
	V	$S0_4^{2-}Mg^{2+}$及海水中$C0_2$	V-D	$S0_4^{2-}$：1000 − 4000mg/L Mg^{2+}：1000 − 3000mg/L $C0_2$：30 − 60mg/L	隧道（外部）

doi:10.6342/NTU202503522

人工島	III	氯離子	III-C	潑濺區，潮汐區	擋土牆
	V	$S0_4^{2-}Mg^{2+}$ 及海水中 $C0_2$	V-D	$S0_4^{2-}$：1000 − 4000mg/L Mg^{2+}：1000 − 3000mg/L $C0_2$：30 − 60mg/L	擋土牆

由於橋樑屬於跨海大橋，其中有部分構件是浸泡在海水或暴露在乾濕循環的環境中，中性化反應與氯離子侵蝕為兩大鋼筋腐蝕之原因。氯離子侵蝕之驗證方法參考 Fib-Model code for Service Life Design 提出的基於 Fick's second law 的氯離子滲透模型[2]，如式 4-1 所示，利用全機率法進行分析，此工程提出 120 年的使用年限內鋼筋劣化行為不能進入擴展階段，全機率法可靠性指數定在 1.3。在進行全機率法分析之前，需要了解模型內參數的均值，標準差及所遵循的分佈形式，因此工程人員先收集湛江市中結構物的表面氯離子濃度C_s及臨界氯離子濃度C_{crit}的數據，擴散係數與衰減係數則是從曝露長達 15 年的試體中進行收集。中性化之驗證方法為參考 Fib-Model Code For Service Life 提出相關模型，如式 4-2 所示，相關參數的詳細介紹可參考 3.1.4。

$$G_1 = \frac{C_{cr}}{\gamma_c} - \gamma_s C_s * \left[1 - erf\frac{x_d^{nom} - \Delta x_d}{2\sqrt{\gamma_D D_{cl}^0 * \gamma_n n * t_{sl}}}\right] \geq 0 \qquad \text{式 4-1}$$

$$\begin{aligned} G_2 &= x_d - x_c(t_{sl}) \\ &= x_d - W(t)\sqrt{2k_e\frac{h}{\gamma_{RH}}k_c\left(k_t \times R_{ACC,0}^{-1}\gamma_R + \varepsilon_t\right) * C_{CO2} * t_{sl}} \qquad \text{式 4-2} \\ &\geq 0 \end{aligned}$$

doi:10.6342/NTU202503522

氯離子分析結果如圖 4-1 所示，左圖為不同曝露環境下齡期為 28 天的混凝土擴散係數與保護層厚度之關係圖，右圖為不同曝露環境下齡期為 56 天的混凝土擴散係數與保護層厚度之關係圖。可以發現隨著擴散係數的增加，所需的保護層厚度也需要增加，當潑濺區構件保護層為 75-85mm，齡期為 28 天的擴散係數要求控制在 $2.5-3.3*10^{-12}m^2/s$，齡期為 56 天的擴散係數要求控制在 $1.8-2.4*10^{-12}m^2/s$。處於潑濺區的結構構件所需要的保護層厚度在所有的曝露環境中為最大的，由於潑濺區的海水會反復噴濺在構件上，讓構件表面頻繁經歷乾濕交替，這樣會讓氯離子更輕易侵入混凝土，破壞鋼筋表面的鈍化膜。中性化分析結果如圖 4-2 所示，可以發現隨著碳化抗性的增加，結構構件所需的保護層越大，圖中的兩條紅色虛線分別為純水泥(OPC)及使用爐石及飛灰取代部分水泥(OPC-FA)之混凝土之碳化抗性預測值[2],數值分別為 $977.6mm^2/year/kg/m^3$及 $315.4mm^2/year/kg/m^3$，當使用年限為 120 年及處於高濃度二氧化碳的曝露環境的時候，構件所需的保護層為 40mm，僅為氯離子侵蝕狀況下的一半厚度，因此此工程的保護層厚度為氯離子控制。

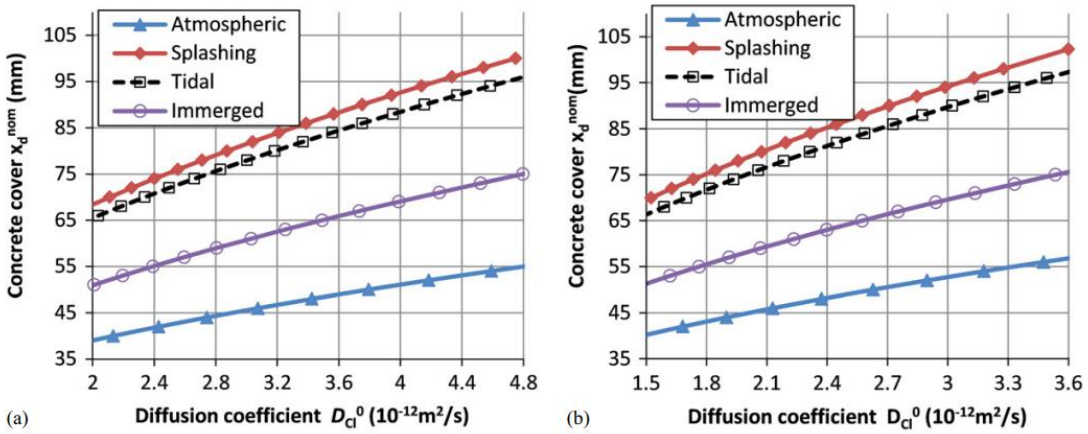


圖 4-1 保護層厚度與擴散係數的關係圖（左：齡期 28 天混凝土，右：齡期 56 天混凝土）[30]

doi:10.6342/NTU202503522

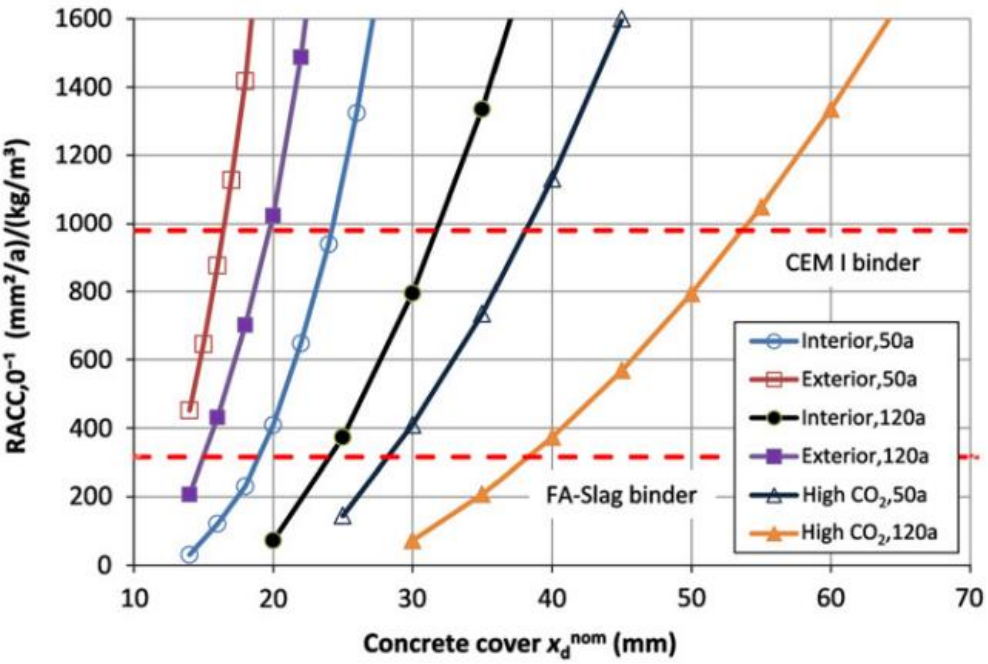


圖 4-2 碳化抗性與保護層厚度關係[30]

最終設計結果如表 4-3 所示，要注意的是D_{cl}(non-steady state diffusion coefficient)為利用現地數據所得到的擴散係數，在此工程中也進行了快速氯離子傳輸試驗(rapid chloride migration test, RCM)，得到氯離子傳輸係數(non-steady state diffusion coefficient),在此工程中，RCM 為品質管控工具，為快速可行的方法以檢查混凝土是否達標，工程人員透過對照現地曝露與實驗室 RCM 的結果，保守地取傳輸係數為兩倍擴散係數的結果。

doi:10.6342/NTU202503522

表 4-3 設計年限 120 年耐久性建議指標[30]

構件	曝露環境	設計值D_{NSSD} $(10^{-12}m^2/s)$		控制值D_{NSSM} $(10^{-12}m^2/s)$	
箱型梁（外側）	鹽霧	3	2	6	4
	潑濺區	3	2	6	4
箱型梁（內側）	鹽霧	3	2	6	4
橋塔橋墩（外側）	鹽霧	3.5	2.2	7	4.5
	潑濺區	3.5	2.2	7	4.5
橋墩（內側）	鹽霧	3.5	2.2	7	4.5
承台	潑濺區	3.5	2.2	7	4.5
	浸泡區	3.5	2.2	7	4.5
鑽孔樁	浸泡區	3.5	2.2	7	4.5
RC 設施（人工島）	潑濺區	3.5	2.2	7	4.5
隧道管（外側）	潑濺區	3.5	2.2	7	4.5
隧道管（內側）	鹽霧	3.5	2.2	7	4.5

4.2淡江大橋

淡江大橋位於淡水河口，緊臨台灣海峽，為一座長跨距且臨出海口之斜張橋，其設計使用年限為 120 年[33]，由於橋樑屬於跨海大橋，容易遭受氯離子腐蝕，因此橋樑之耐久性設計能否滿足設計使用年限成為了一個需要被驗證的問題。各鹽害環境下的混凝土表面氯離子濃度如表 4-4 所示。耐久性公式為參考 Fick's second law 之擴散理論，如式 4-3

式 4-3 所示，C_t為臨界氯離子濃度，C_i為氯離子初始濃度，C_0為結構物表面氯離子濃度，氯離子濃度單位皆為 kg/m^3, t_s為混凝土氯離子擴散係數不再遞減之時間，取 25 年，t_{ref}為D_{ref}所對應之參考時間，β_{cl}為考量混凝土瑕疵及裂縫影響的係數，取 1.5，x 為保護層厚度，m 為混凝土衰減係數，與參料添加量有關，參考 life365 所建議公式[35]，D_{ref}為氯離子擴散係數，t 為氯離子侵入時間，也可視為結構物使用年限。表 4-5 為原招標文件所列之各構件所處曝露環境下保護層厚

doi:10.6342/NTU202503522

度之最小建議值及最大 RCM 容許值，考量此工程混凝土中礦物材料取代水泥用量可達 50%，因此混凝土採用以爐石粉取代水泥用量 40%及爐石粉取代 35%加飛灰取代 15%之配比條件，利用式 4-3

式 4-3 進行分析，可得到不同鹽害嚴重環境下的D_{ref}，藉由回歸公式（圖 4-3），可建立 10mm 施工誤差下各橋樑構件位於不同嚴重程度鹽害環境的D_{RCM}之建議值，最終結果如表 4-6 所示。

表 4-4 各鹽害環境下的混凝土表面氯離子濃度[34]

	混凝土表面氯離子濃度	
	kg/m^3	%
極嚴重鹽害區	20-30	0.87-1.304
嚴重鹽害區	10-20	0.435-0.87
中度鹽害區	4-10	0.174-0.435

$$C_t \geq C_i + (C_o + C_i) * \left(1 - erf \frac{x}{2\sqrt{\beta_{cl} D_{ref} \left[\frac{t_{ref} t_s^{1-m}}{1-m} + \left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^m (t - t_s)\right]}}\right) \quad \text{式 4-3}$$

$$m = 0.2 + 0.4(FA\%/50 + SG\%/70)$$

doi:10.6342/NTU202503522

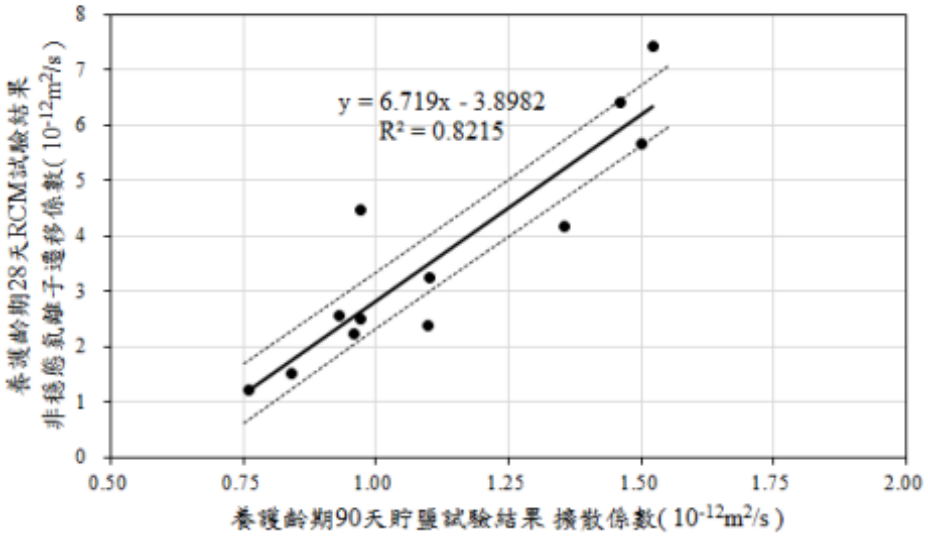


圖 4-3 28 天齡期 RCM 試驗與 90 天齡期貯鹽試驗結果之關係圖[33]

表 4-5 原招標文件之建議值[33]

類型		部位		保護層 (cm)	設計強度 (kgf/cm^2)	水膠比	混凝土種類	D_{RCM} 最大值 28 天	D_{RCM} 最大值 56 天
主橋	下部結構	橋墩(塔)	大氣區	7.5	560	0.35	II 型低鹼	6.5	4.5
			水下區+浪濺區	10	560	0.35	II 型低鹼	6.5	4.5
		橋墩(塔)基礎		10	350	0.4	自充填/巨積	7.0	5.0
		場鑄基樁		19	350	0.4	水中	7.0	5.0

doi:10.6342/NTU202503522

其他橋梁	上部結構	預力箱型梁	橋面板頂面	7.5	420	0.4	I 型	7.5	5.5
			箱型梁外測	7.5	420	0.4	I 型	6.0	4.0
			箱型梁內側及隔梁	4	420	0.4	I 型	6.0	4.0
	下部結構、擋土牆	河道內橋墩	大氣區	7.5	560	0.35	II 型低鹼	6.5	4.5
			水下區+浪濺區	10	560	0.35	II 型低鹼	6.5	4.5
		河道外橋墩		7.5	420	0.4	II 型低鹼	7.0	5.0
		橋臺、翼牆及擋土牆		10	350	0.4	I 型	7.5	5.5
		橋墩、橋臺、翼牆 及擋土牆等之基礎		10	350	0.4	自充填	7.0	5.0
		場鑄基樁		10	350	0.4	I 型	7.0	5.0
	橋護(隔)欄(設計年限 50 年)			5.5		0.4	I 型	7.5	5.5

doi:10.6342/NTU202503522

表 4-6 考量 10 mm 施工誤差下各構件之D_{RCM}建議值[33]

類型		部位		極嚴重鹽害區			嚴重鹽害區			D_{RCM}最大值	
				D_{ref}	試驗結果推估 D_{RCM}		D_{ref}	試驗結果推估 D_{RCM}			
					28 天	56 天		28 天	56 天	28 天	56 天
主橋	下部結構	橋墩(塔)	大氣區	-	-	-	1.42	5.6	3.7	5.0	3.0
			水下區+浪濺區	2.05	9.9	6.1	-	-	-	5.0	3.0
		橋墩(塔)基礎		1.9	9.5	5.9				7.0	5.0
		場鑄基樁		1.9	9.5	5.9				7.0	5.0
其他橋梁	上部結構	預力箱型梁	橋面板頂面	-	-	-	1.36	5.3	3.4	5.0	3.0
			箱型梁外測	-	-	-	1.36	5.3	3.4	5.0	3.0
			箱型梁內側及隔梁	-	-	-	-	-	-	5.0	3.0
	下部結構、擋土牆	河道內橋墩	大氣區	-	-	-	1.42	5.6	3.7	5.0	3.0
			水下區+浪濺區	2.09	9.9	6.1				5.0	3.0
		河道外橋墩					1.36	5.3	3.4	5.0	3.0

doi:10.6342/NTU202503522

		橋臺、翼牆及擋土牆				2.52	13.0	8.0	7.0	5.0
		橋墩、橋臺、翼牆 及擋土牆等之基礎				2.52	13.0	8.0	7.0	5.0
		場鑄基樁				2.52	13.0	8.0	7.0	5.0
	橋護(隔)欄(設計年限 50 年)					1.26	4.6	3.0	5.0	3.0

4.3維吉尼亞州橋樑

此小節將參考 Virginia Transportation Research Council 推出的 Bridge Service Life Design[36]，此報告主要針對美國維吉尼亞州橋面板的服務年限設計提出應用 fib Bulletin 34[2]的可行性與執行策略，並評估在地區氣候條件與材料特性下實施的可行性。研究目的在於建構一套基於機率論的設計流程，以預測因去冰鹽導致鋼筋腐蝕的時間點，並進一步協助工程單位確保新建橋梁達到預期的 100 年設計使用年限。

研究首先先收集八座橋梁的混凝土配比，接著依據 NT Build 492 對混凝土進行加速氯離子滲透試驗(RCM)[29]，得到氯離子傳輸係數後以此計算衰減係數，結果如表 4-7 所示。結果發現各橋梁混凝土在 28 天齡期下的 RCM 值差異顯著，說明地區性材料或供應商對性能有明顯影響。此外，雖然 fib 有提供預設的衰減係數但與試驗值結果擬合度不高，R^2普遍偏低，因此建議仍以 fib 建議值為主。氣候與暴露環境的劃分亦是關鍵步驟之一。報告將維吉尼亞州依氣象特性劃分為六個區域，如圖 4-4 所示。針對各區收集 30 年氣溫資料與除冰鹽施灑紀錄，以估算表面氯離子濃度。然而，使用 fib 預測表面氯離子濃度之結果與歷史實測值有明顯偏

doi:10.6342/NTU202503522

差(表 4-8)，主因可能包含：歷史資料中水膠比與膠材含量未明確記錄、不同年份除冰作業策略變化、降雪與降雨數據年份樣本不足等。因此建議若可取得歷史資料，仍以實測值為準。

在數值解法方面，報告比較了 fib 建議之誤差函數解析解(式 2-4)與自行建立之有限差分解（稱為 fib-Numerical)，後者可模擬如延遲去冰鹽施灑時間或表氯濃度緩慢上升的情況。實驗結果指出在臨界氯離子濃度為 0.6% mass binder 情況下，fib-Numerical 模型預測之腐蝕機率普遍高於解析解(圖 4-5)，為了解各參數對結果的影響程度，報告亦透過 FORM 方法進行敏感度分析，最具影響力之參數為衰減係數、臨界氯離子濃度及表面氯離子濃度。其中衰減係數不僅具高度影響性，其推估方式仍存在重大不確定性，應視為優先進行後續地區性研究之對象。

綜合而言，報告指出 fib 模型在現階段具備足夠資料支持其應用，惟衰減係數與表面氯離子濃度之不確定性應引起重視。建議若尚無法全面實施機率設計法，則可先建立地區性設計指引作為過渡方案；而現行使用低裂縫混凝土與耐蝕鋼筋之策略已具備實質耐久性效益

doi:10.6342/NTU202503522

表 4-7 試驗衰減係數與規范建議值之比較[36]

橋樑	配比	$D_{RCM,t_0=28}(\frac{mm^2}{year})$	衰減係數	R^2	衰減係數 (fib 建議值)
編號 1	CEM II+40%爐石	139	0.446	0.54	0.45
編號 2	CEM II+25%飛灰	620	0.240	0.56	0.6
編號 3	CEM II+24%飛灰	479	0.870	0.85	0.6
編號 4	CEM I/II+19.6%飛灰	703	0.510	0.97	0.6
編號 5	CEM I/II+20%飛灰	567	0.318	0.51	0.6
編號 15	CEM II+40%爐石	285	0.662	0.37	0.45
編號 16	CEM II+40%爐石	197	0.766	0.34	0.45

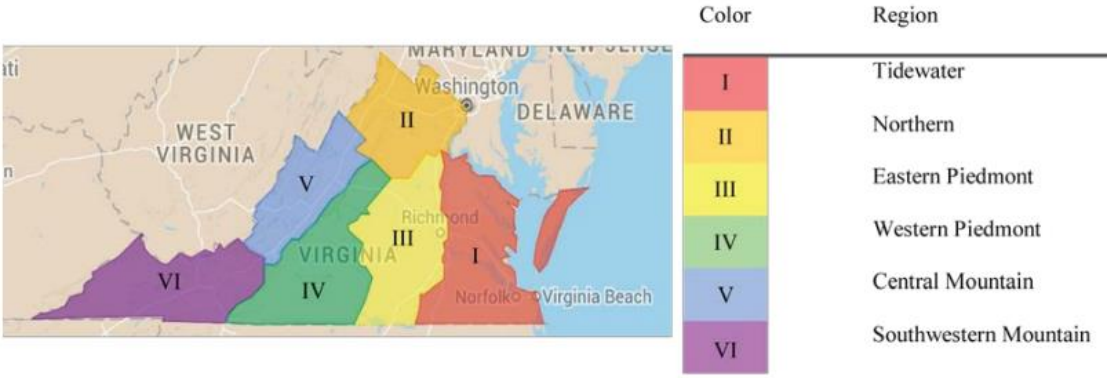


圖 4-4 曝露環境區域分類[36]

doi:10.6342/NTU202503522

表 4-8 表面氯離子濃度歷史資料與規範計算結果之比較[36]

區域	均值（歷史資料）（% mass binder）	均值（fib 方法）（% mass binder	均值相對差異
Tidewater	0.42	0.25	41%
Northern	0.99	0.8	20%
Eastern Piedmont	0.78	0.4	49%
Western Piedmount	1.33	0.25	81%
Central Mountain	0.72	0.35	69%
Southwestern Mountain	1.57	0.3	79%

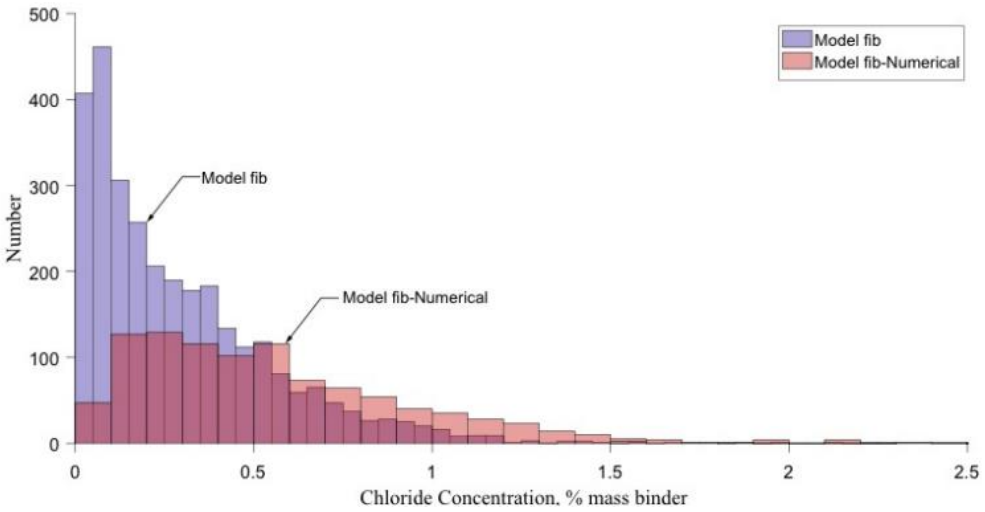


圖 4-5 橋樑預測使用壽命直方圖[36]

doi:10.6342/NTU202503522

第五章、混凝土耐久性模型之分析

5.1應用部分係數法模型之使用年限分析結果

本小節旨在探討國外規範中所提出之部分係數法耐久性模型在台灣環境條件下的適用性。研究初期，除日本模型外及 ACI 模型之外，其餘各國模型皆先行將氯離子擴散係數替換為台灣地區本土試驗或文獻建議數值，其他參數則維持原規範設定，以進行初步之使用年限分析。接續進行水膠比與使用年限關係、以及保護層厚度與使用年限關係之探討時，則開始逐一將模型中其餘關鍵參數（如表面氯離子濃度、臨界濃度等）轉換為台灣在地條件，以全面模擬不同設計情境下各模型之預測行為與敏感性。藉由橫向比較不同模型在相同台灣條件下的預測差異，本研究得以評估其本地化潛力，並為耐久性設計參數的調整提供依據。

5.1.1模型介紹

台灣營建院模型[33]：如式 4-3

式 4-3 所示，模型內參數細節可參考 4.2

日本舊 JSCE 模型[5]：如式 3-4 所示，模型內參數細節可參考 3.1.3。

日本新 JSCE 模型[37]：如式 5-1 所示，與舊 JSCE 模型不同之處在於將方法一的$\mathrm{D_k}$從單一定值改成$\mathrm{D_p}$，擴散係數會隨著使用年限的增加而減少，γ_k與γ_p皆為安全係數，取 2.1 與 1，公式僅適用於水膠比 0.3-0.55 的混凝土。

$$
\begin{aligned}
&D_k = \gamma_k * \gamma_\mathrm{p} * D_\mathrm{p} \\
&D_\mathrm{p} = D_\mathrm{r} * \mathrm{t}^{-\mathrm{k_d}} \\
&\log_{10} D_r = 3.4 * \mathrm{w/c} - 1.3 \quad \mathrm{k_d} = 0.52(\text{純水泥}) \\
&\log_{10} D_\mathrm{r} = 3.4 * \mathrm{w/c} - 1.7 \quad \mathrm{k_d} = 0.64(\text{爐石取代部分水泥}) \\
&\log_{10} D_\mathrm{r} = 3.4 * \mathrm{w/c} - 1.5 \quad \mathrm{k_d} = 0.73(\text{飛灰取代部分水泥})
\end{aligned}
\qquad \text{式 5-1}
$$

doi:10.6342/NTU202503522

Fib bulletin 112 模型[26]：如式 3-2 所示，模型內參數細節可參考 3.1.3。

美國 ACI365.1R-17 模型[38]:如式 5-2 所示, C_0為混凝土表面濃度，單位為混凝土單位重，x 為保護層厚度，單位為 m，D_t為氯離子擴散係數，單位為 m^2/s，t 為結構物使用年限，m 為衰減係數，與參料添加量有關。

$$C_{crit} \geq C(x,t) = C_0\left(1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_t t}}\right)\right)$$

$$D_t = D_{28}\left(\frac{28}{t}\right)^m + D_{ult}(1 - (\frac{28}{t})^m)$$

式 5-2

$$D_{28} = 2.17 * 10^{-12} e^{\frac{-w/cm}{-0.279}}$$

$$D_{ult} = (D_{28})\left(\frac{28}{36500}\right)^m$$

m=0.26+0.4(FA%/50+SG%/70)

doi:10.6342/NTU202503522

接下來將以表格的形式來說明各模型以使用年限為主項的結果。

模型	公式
Fib	$t_{SL} = \left(\frac{\left(\frac{c_{min} - \Delta x}{2 * erfc^{-1}((C_{crit} - C_{0,k})/(C_{s,\Delta x,k} * \gamma_C - C_{0,k}))} \right)^2}{k_{e,k} * D_{RCM,k}(t_0) * \gamma_D * t_0^{\frac{\alpha_k}{\gamma_\alpha}}} \right)^{\frac{1}{1-\frac{\alpha_k}{\gamma_\alpha}}}$
舊 JSCE	$t_{SL} = \frac{\left(\frac{0.1 * c_d}{2erf^{-1}\left(1 - \frac{(C_{limit} - C_i)}{\gamma_i * \gamma_{cl} * C_0}\right)} \right)^2}{\gamma_c * \beta_{cl} * D_k}$
新 JSCE	$t_{SL} = \left(\frac{\left(\frac{0.1 * c_d}{2erf^{-1}\left(1 - \frac{(C_{limit} - C_i)}{\gamma_i * \gamma_{cl} * C_0}\right)} \right)^2}{\gamma_c * \beta_{cl} * \gamma_k * \gamma_p * D_r} \right)^{\frac{1}{1-k_D}}$
營建院	$t_{SL} = \frac{\frac{\left(\frac{x}{2erf^{-1}\left(1 - \frac{C_t - C_i}{(C_o - C_i)}\right)} \right)^2}{\beta_{cl} D_{ref}} - \frac{{t_{ref}}^m t_s^{1-m}}{1-m}}{\left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^m} + t_s$
ACI	$t_{SL} = \frac{\left(\frac{x}{2erf^{-1}\left(1 - \frac{C_{crit}}{C_0}\right)} \right)^2}{\left((\frac{28}{t_{SL}})^m + \left(\frac{28}{36500}\right)^m (1 - (\frac{28}{t_{SL}})^m) \right) D_{28}}$ *ACI 需要用數值迭代法才能得到使用年限

doi:10.6342/NTU202503522

5.1.2參數設定

分析所使用的混凝土配比為參考國立台灣海洋大學楊仲家老師研究團隊的配比[39]，如表 5-1 所示，使用的配比為 S2F2-3，水膠比為 0.3，爐石與飛灰取代水泥量各 20%。

表 5-1 混凝土配比表[39]

配比	單位：kg/m^3							
	Water	Cement	Fly ash	Slag	C.A.	F.A.	SP	Total
S2F2-3	159	322	107	107	928	792	2	2402

接下來將進行臨界氯離子濃度，表面氯離子濃度，初始氯離子濃度，擴散係數，衰減係數的設定，ACI 模型的參數設定將參考 ACI365.1R-17 中第七章例子 10 的數據[38]，fib 數據將參考 Fib-bulletin 112 中的建議值[26]，舊 JSCE 數據將參考規範建議值[5]，新 JSCE 數據將參考規範建議值[37]，營建院數據將參考文件建議值[33]，所有模型的保護層厚度設定在 10cm，曝露環境假設在基隆沿海，除了日本模型之外，氯離子擴散或傳輸係數數據參考楊老師團隊的實驗結果[22][39]，表 5-2 中的 RCM 28 和 RCM 91 分別為為 28 天齡期及 91 天齡期的混凝土進行 RCM 實驗後利用比色法得到的傳輸係數[29]， Ponding 28 和 Ponding 91 分別為 28 天齡期及 91 天齡期的混凝土進行貯鹽實驗後得到的擴散係數[40]，各文件之參數設定建議值如表 5-3 所示。

表 5-2 S2F2-3 之實驗結果[22][39]

實驗結果	$RCM_{t0=28}(m^2/s)$	$RCM_{t0=91}(m^2/s)$	$Ponding_{t0=28}(m^2/s)$	$Ponding_{t0=91}(m^2/s)$
S2F2-3	$4.81*10^{-12}$	$2.47*10^{-12}$	$1.93*10^{-12}$	$1.32*10^{-12}$

doi:10.6342/NTU202503522

表 5-3 各文件之參數設定建議值

參數	各文件建議數據	公式/來源	設定結果	單位
臨界氯離子濃度	Fib 數據	0.4wt.-/b	3.22	kg/m^3
	舊 JSCE 數據	參考式 3-4 爐石取代水泥	2.32	kg/m^3
	新 JSCE 數據	參考式 3-4-爐石取代水泥	2.32	kg/m^3
	台灣營建院數據	參考式 3-4-爐石取代水泥	2.32	kg/m^3
	ACI 數據	0.4% mass by binder	2.14	kg/m^3
初始氯離子濃度	Fib 數據	0.05 wt.-/b	0.268	kg/m^3
	舊 JSCE 數據	0.3kg/m^3	0.3	kg/m^3
	新 JSCE 數據	0.3kg/m^3	0.3	kg/m^3
	台灣營建院數據	0.15kg/m^3	0.15	kg/m^3
	ACI 數據	-	0	kg/m^3
表面氯離子濃度	Fib 數據	參考表 3-4	21.44	kg/m^3
	舊 JSCE 數據	參考表 3-3	13	kg/m^3
	新 JSCE 數據	參考表 3-3	13	kg/m^3
	台灣營建院數據	參考表 4-4	30	kg/m^3
	ACI 數據	0.8% mass by concrete	19.34	kg/m^3
傳輸/擴散	Fib 數據	實驗數據(RCM 28)	4.81*10^-12	m^2/s

doi:10.6342/NTU202503522

係數	舊 JSCE 數據	參考式 3-5-爐石或矽灰取代部分水泥	1.15*10^-13	m^2/s
		參考式 3-5-飛灰取代部分水泥	3.17*10^-13	m^2/s
	新 JSCE 數據	參考式 5-1爐石取代部分水泥	6.62*10^-13	m^2/s
		參考式 5-1－飛灰取代部分水泥	1.05*10^-12	m^2/s
	台灣營建院數據	實驗數據(ponding 91)	1.32*10^-12	m^2/s
	ACI 數據	參考式 5-2, D_{28}	1.3*10^-11	m^2/s
衰減係數	Fib 數據	參考表 3-5-爐石	0.6	-
	舊 JSCE 數據	-	-	-
	新 JSCE 數據	參考式 5-1爐石取代部分水泥	0.64	-
		參考式 5-1－飛灰取代部分水泥	0.72	
	台灣營建院數據	參考式 4-3	0.474	-
	ACI 數據	參考式 5-1	0.53	-

5.1.3分析結果與討論

5.1.3.1不同模型使用年限分析結果

為探究國外規範中耐久性模型應用於台灣之可行性，本小節利用了五組耐久性模型，分別為 Fib 模型，台灣營建院模型，舊 JSCE 模型，新 JSCE 模型，ACI 模型針對各家規範之耐久性參數建議值來計算使用年限，混凝土配比為 S2F2-3，

doi:10.6342/NTU202503522

分析結果如圖 5-1 所示。Y 軸為使用年限，X 軸為不同規範，由於本研究使用的是爐石飛灰取代量水泥量各 20%的混凝土，舊 JSCE 模型與新 JSCE 模型中爐石與飛灰擴散係數計算方式都有所不同，因此舊 JSCE 模型與新 JSCE 模型各自會再拆分成兩組模型進行計算。

新 JSCE 模型爐石組與飛灰組計算後得到的使用年限明顯不合理，如表 5-4 所示。這是由於新 JSCE 所建議的衰減係數太大，造成氯離子擴散係數衰減速度過快，以 life 365 建議的衰減係數計算公式來說明，$m = 0.2 + 0.4(FA\%/50 + SG\%/70)$，新 JSCE 爐石取代水泥之衰減係數建議值為 0.64，飛灰取代水泥之建議值為 0.72，兩者的衰減係數相比起來 JSCE 的建議值高出太多，另外新 JSCE 規範也沒提及這兩組衰減係數數據的混凝土礦物添加量為多少。此外，本研究也利用式 5-3 中新 JSCE 擴散係數計算公式，設定曝露時間為 90 天並與楊老師團隊試驗結果進行比較[22]，結果如表 5-5、表 5-6、表 5-7 所示。隨著水膠比的增加，新 JSCE/台灣本土數據呈現上升趨勢，以水膠比 0.3 為例子，當混凝土為純水泥與爐石取代水泥量 20%時，新 JSCE 的計算結果大概為台灣本土實驗數據的 1.2 倍，但混凝土為飛灰取代水泥量 20%時，新 JSCE 的計算結果為台灣本土實驗數據的 3.3 倍。

本研究也進行了舊 JSCE 模型與新 JSCE 模型擴散係數的比較，結果如表 5-8 至表 5-10 及圖 5-2 所示，隨著水膠比的增加，新 JSCE/舊 JSCE 呈現上升趨勢，以水膠比 0.3 為例子，當使用年限為 100 年時，混凝土為純水泥與爐石取代水泥量 20%情況下的新 JSCE 模型結果為舊 JSCE 模型的 0.79 與 0.63 倍，混凝土為飛灰取代水泥量 20%情況下的新 JSCE 模型結果僅為舊 JSCE 模型的 0.24 倍，上訴原因導致了新 JSCE 模型除了純水泥之外，爐石或飛灰組所計算的使用年限遠遠超過其他的模型的結果。綜上所訴，本研究認為新 JSCE 模型目前並不適用於計算使用年限。另一方面，雖然舊 JSCE 模型結果較為保守，但從圖 5-1 中可見舊 JSCE 飛灰組所計算之使用年限約為其他模型的三分之一，遠低於其他模型結果。具體來說，舊 JSCE 飛灰組的擴散係數約為爐石組的三倍，導致預測結果偏低，也說明舊 JSCE

doi:10.6342/NTU202503522

模型中使用年限與擴散係數呈現近似線性關係。因此，本研究判斷舊 JSCE–飛灰模型的推估結果偏離其他模型太多，不具實用性與代表性，後續分析中不再納入討論。

本研究亦對 fib 模型與營建院模型之使用年限結果進行比較與探討。從圖 5-1 可發現 fib 模型在各組資料中所計算之使用年限普遍低於營建院模型，推測此差異與兩者所採用的氯離子擴散係數測試方法有關。fib 模型中所使用之擴散參數，來自快速氯離子遷移試驗（RCM）所獲得的傳輸係數，此試驗在短時間內施加電場驅動氯離子進入混凝土中，反映的是混凝土對氯離子遷移的加速傳輸能力。相比之下，營建院模型所採用的擴散係數來自於貯鹽試驗結果，此為模擬實際環境下氯離子自然擴散行為的長期試驗，所得結果反映的是材料在無外力條件下的自然擴散能力。由於 RCM 試驗中氯離子遷移速度遠高於自然擴散過程，因此其測得的傳輸係數數值通常會顯著低於貯鹽試驗中的擴散係數。若將二者所得的係數分別代入使用年限模型進行計算，則採用傳輸係數之 fib 模型會預測出較快的氯離子達臨界濃度時間，進而導致較短的使用年限。綜上所述，fib 模型與營建院模型在使用年限預測上的差異，並非源自模型本身的不合理性，而是來自於擴散係數試驗方法之差異。

本研究發現無論採用哪一種耐久性模型進行評估，只要代入台灣本土環境參數，所計算出的混凝土使用年限皆為四組數據中最低。此一現象可歸因於台灣所測得之表面氯離子濃度顯著偏高。從表中可見，台灣數據所採用之最嚴苛環境中的表面氯離子濃度為 30 kg/m³，高於 fib 數據（21.44 kg/m³）、ACI 數據（19.34 kg/m³），以及 JSCE 數據（13 kg/m³）。在氯離子擴散分析中，表面氯離子濃度為外部邊界條件，其數值愈高將導致氯離子進入混凝土內部速度加快，進而使臨界濃度達成時間縮短，造成使用年限明顯下降。由此可推斷，即使各模型本身計算方式與假設略有差異，台灣本土所觀察到的高鹽害環境條件仍為影響預測壽命的主因之一。實務上，台灣為典型海島型氣候，海鹽含量與濕熱條件皆顯著高於其他國家，加速了氯

doi:10.6342/NTU202503522

離子的累積與擴散，造成表面氯離子濃度普遍偏高，進而拉低了整體耐久性表現。因此，在評估國際規範適用性時，應特別考量當地環境參數對模型結果的主導性影響。

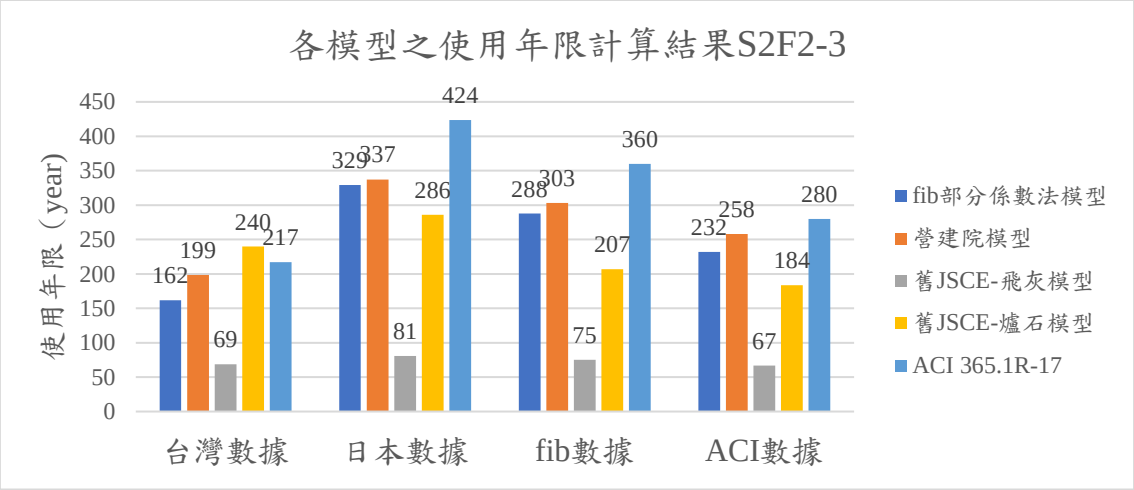


圖 5-1 各模型之使用年限計算結果（年）

表 5-4 新 JSCE 模型之使用年限計算結果（年）

各規範數據	使用年限(年)	
	新 JSCE-飛灰模型	新 JSCE-爐石模型
Fib 數據	17719	5519
台灣數據	5362	2252
日本數據	23211	6758

舊 JSCE,w/c=0.3

$$D_k(C) = 0.3992 * 10^{-12}$$
$$D_k(S) = 0.1151 * 10^{-12}$$
$$D_k(F) = 0.3171 * 10^{-12}$$

新 JSCE，w/c=0.3

$$D_k(C) = 3.4947 * 10^{-12} * t^{-0.52}$$
$$D_k(S) = 1.3913 * 10^{-12} * t^{-0.64}$$
$$D_k(F) = 2.2050 * 10^{-12} * t^{-0.73}$$

式 5-3

doi:10.6342/NTU202503522

表 5-5 新 JSCE 模型與台灣本土數據之比較(w/b=0.3)

混凝土配比 (w/b=0.3)	新 JSCE	台灣本土數據	新 JSCE / 台灣本土數據
	擴散係數(m^2/s)		
純水泥	$7.19 * 10^{-12}$	$5.9 * 10^{-12}$	1.22
爐石取代水泥量 20%	$3.38 * 10^{-12}$	$2.82 * 10^{-12}$	1.20
飛灰取代取代水泥量 20%	$6.08 * 10^{-12}$	$1.82 * 10^{-12}$	3.34

表 5-6 新 JSCE 模型與台灣本土數據之比較(w/b=0.4)

混凝土配比 (w/b=0.4)	新 JSCE	台灣本土數據	新 JSCE / 台灣本土數據
	擴散係數(m^2/s)		
純水泥	$1.57 * 10^{-11}$	$8.45 * 10^{-12}$	1.86
爐石取代水泥量 20%	$7.40 * 10^{-12}$	$4.42 * 10^{-12}$	1.68
飛灰取代取代水泥量 20%	$1.17 * 10^{-11}$	$2.87 * 10^{-12}$	4.09

doi:10.6342/NTU202503522

表 5-7 新 JSCE 模型與台灣本土數據之比較(w/b=0.5)

混凝土配比 (w/b=0.5)	新 JSCE	台灣本土數據	新 JSCE / 台灣本土數據
	擴散係數(m^2/s)		
純水泥	$3.44 * 10^{-11}$	$1.35 * 10^{-11}$	2.55
爐石取代水泥量 20%	$1.61 * 10^{-11}$	$7.09 * 10^{-12}$	2.29
飛灰取代取代水泥量 20%	$2.57 * 10^{-11}$	$4.66 * 10^{-12}$	5.51

表 5-8 新舊 JSCE 模型之擴散係數比較（$w/b = 0.3, t_{SL}$=100 年）

混凝土配比 (w/b=0.3)	舊 JSCE	新 JSCE	新 JSCE / 舊 JSCE
	擴散係數(m^2/s)		
純水泥	$3.99 * 10^{-13}$	$3.19 * 10^{-13}$	0.79
爐石取代水泥量 20%	$1.15 * 10^{-13}$	$7.30 * 10^{-14}$	0.63
飛灰取代取代水泥量 20%	$3.17 * 10^{-13}$	$7.65 * 10^{-14}$	0.24

doi:10.6342/NTU202503522

表 5-9 新舊 JSCE 模型之擴散係數比較（$w/b = 0.4, t_{SL}$=100 年）

混凝土配比 (w/b=0.4)	舊 JSCE	新 JSCE	$\frac{\text{新 JSCE}}{\text{舊 JSCE}}$
	擴散係數(m^2/s)		
純水泥	$7.97 * 10^{-13}$	$6.97 * 10^{-13}$	0.87
爐石取代水泥量 20%	$2.41 * 10^{-13}$	$1.6 * 10^{-13}$	0.66
飛灰取代取代水泥量 20%	$6.33 * 10^{-13}$	$1.67 * 10^{-13}$	0.264

表 5-10 新舊 JSCE 模型之擴散係數比較（$w/b = 0.5, t_{SL}$=100 年）

混凝土配比 (w/b=0.5)	舊 JSCE	新 JSCE	$\frac{\text{新 JSCE}}{\text{舊 JSCE}}$
	擴散係數(m^2/s)		
純水泥	$1.59 * 10^{-12}$	$1.53 * 10^{-12}$	0.96
爐石取代水泥量 20%	$5.03 * 10^{-13}$	$3.49 * 10^{-13}$	0.70
飛灰取代取代水泥量 20%	$1.26 * 10^{-12}$	$3.66 * 10^{-13}$	0.29

doi:10.6342/NTU202503522

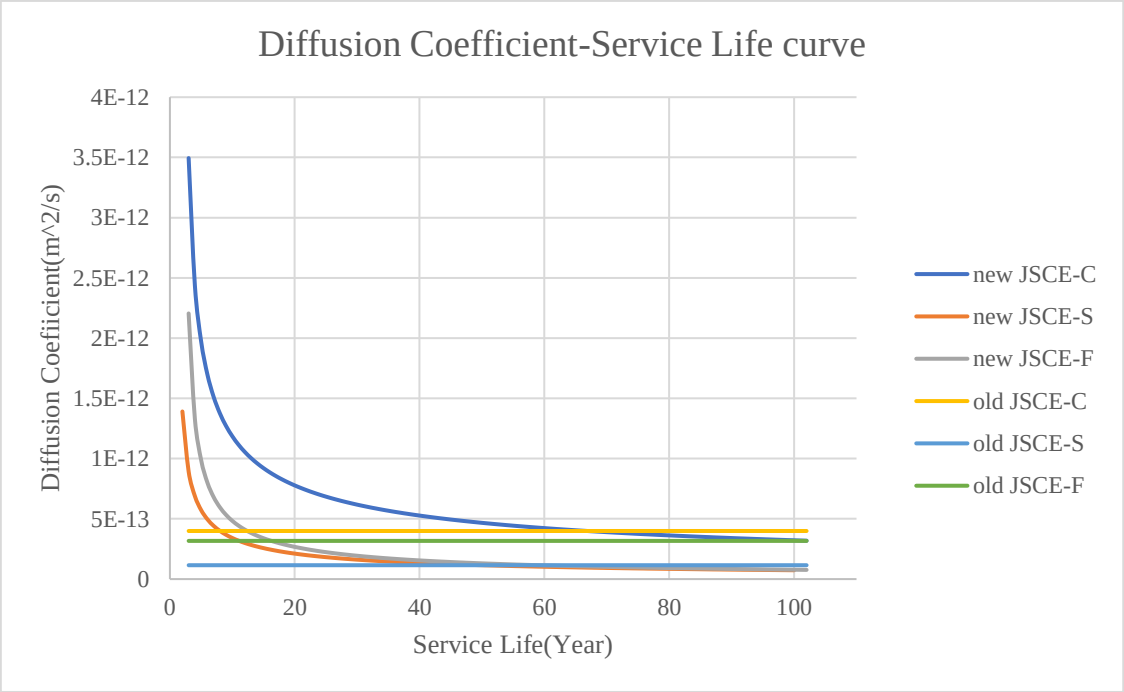


圖 5-2 新舊 JSCE 模型之擴散係數與使用年限關係圖

doi:10.6342/NTU202503522

5.1.3.2水膠比與使用年限之關係

為探討不同水膠比下混凝土使用年限之變化趨勢，本小節採用四組部分係數法模型進行分析。本研究認為影響使用年限之主要參數包括臨界氯離子濃度、初始氯離子濃度、表面氯離子濃度、氯離子擴散／傳輸係數及其衰減係數。各模型（fib、JSCE、ACI、營建院）對上述參數皆有不同建議值與設定依據。本研究統一以台灣實測資料進行計算，但為了觀察各參數對使用年限的影響程度，改採逐步替換的方式，每次僅將單一參數替換為台灣本土建議值，其餘參數仍使用各自模型原始建議值不變。此方式可排除參數間交互影響，有助於釐清各參數對使用年限之主導程度。此外，本章中各模型的擴散或傳輸係數皆依原始規範建議方式計算，fib 模型採用 RCM 試驗所得之傳輸係數，JSCE 與 ACI 模型以水膠比回歸公式計算擴散係數，營建院模型則使用貯鹽試驗所得之擴散係數。衰減係數之設定，則固定使用各模型之建議計算方式不做調整。參數替換順序依序為臨界氯離子濃度，初始氯離子濃度，表面氯離子濃度。

分析結果如表 5-11 至表 5-14 所示，可以觀察到隨著水膠比的上升，四組耐久性模型所得到的使用年限結果都呈現下降的趨勢。一開始四個模型的臨界氯離子濃度都換成台灣建議計算方式，水膠比 0.3 情況下 fib 模型從 3.22kg/m^{3}降低至 2.32kg/m^3，ACI 模型從 2.14 kg/m^{3}增加至 2.32 kg/m^3，這導致 fib 模型的使用年限下降而 ACI 模型的使用年限上升，JSCE 與營建院模型使用年限不變，下一步將所有模型臨界與初始氯離子濃度換成台灣數據，JSCE 模型與 fib 模型由於初始氯離子濃度的降低，使用年限都有些許上升，ACI 模型保持不變，最後，所有模型都換成台灣本土環境的臨界，初始及表面氯離子濃度，由於台灣表面氯離子濃度建議值為所有規範中最高的，因此所有模型的使用年限都大幅下降。

綜上所訴，隨著水膠比的增加，結構物的使用年限將會下降，參數部分臨界，表面，初始氯離子濃度，擴散係數與使用年限的關係為負相關。

doi:10.6342/NTU202503522

表 5-11 不同水膠比下之使用年限結果

使用年限（年）				
水膠比	舊 JSCE 爐石模型	營建院模型	Fib 模型	ACI 模型
0.3	222	199	288	278
0.4	106	100	93	178
0.5	43	46	60	111

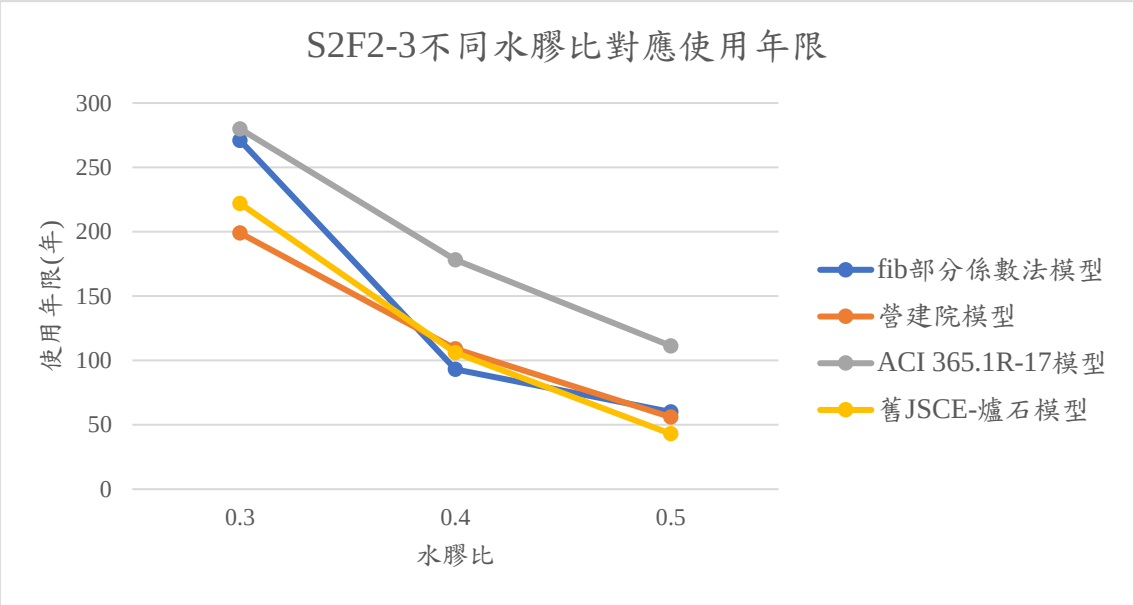


圖 5-3 不同水膠比下之使用年限結果

doi:10.6342/NTU202503522

表 5-12 不同水膠比下臨界氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

使用年限（年）				
水膠比	舊 JSCE 爐石模型	營建院模型	Fib 模型	ACI 模型
0.3	222	199	205	298
0.4	106	100	57	173
0.5	43	46	33	97

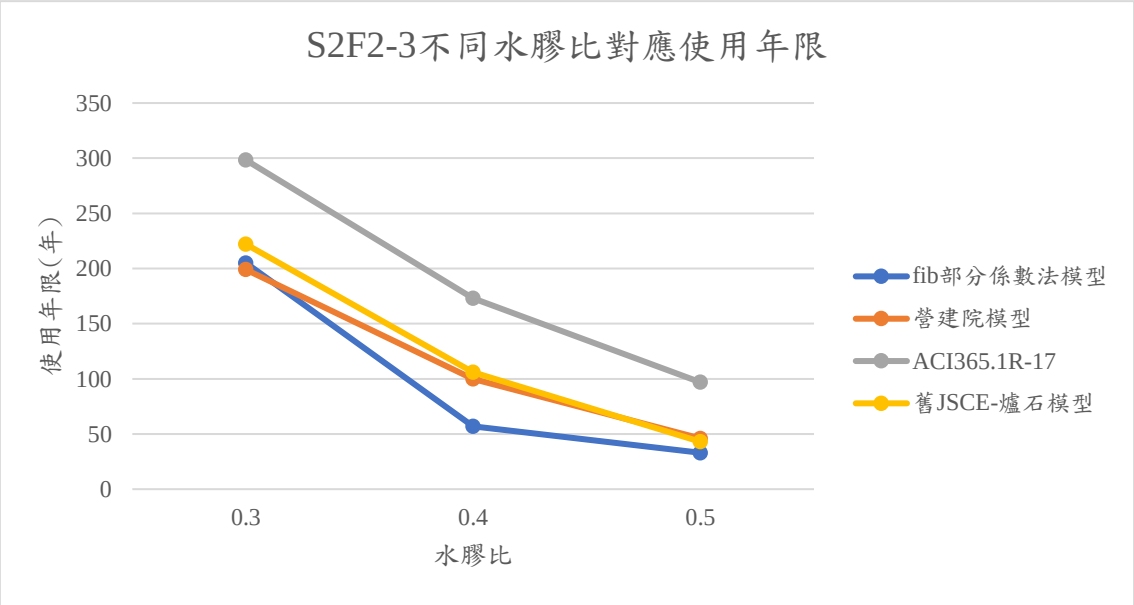


圖 5-4 不同水膠比下臨界氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

doi:10.6342/NTU202503522

表 5-13 不同水膠比下臨界，初始氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

使用年限（年）				
水膠比	舊 JSCE 爐石模型	營建院模型	Fib 模型	ACI 模型
0.3	232	199	215	298
0.4	103	100	62	173
0.5	45	46	35	97

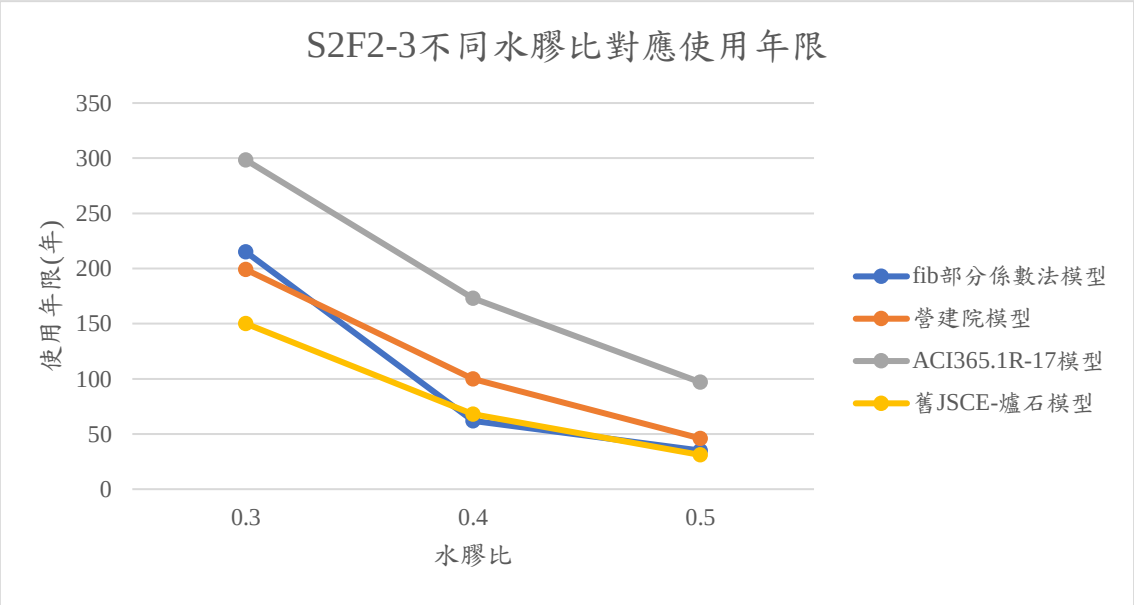


圖 5-5 不同水膠比下臨界，初始氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

doi:10.6342/NTU202503522

表 5-14 不同水膠比下臨界，初始及表面氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

使用年限（年）				
水膠比	舊 JSCE 爐石模型	營建院模型	Fib 模型	ACI 模型
0.3	150	199	162	217
0.4	68	100	47	126
0.5	31	46	27	71

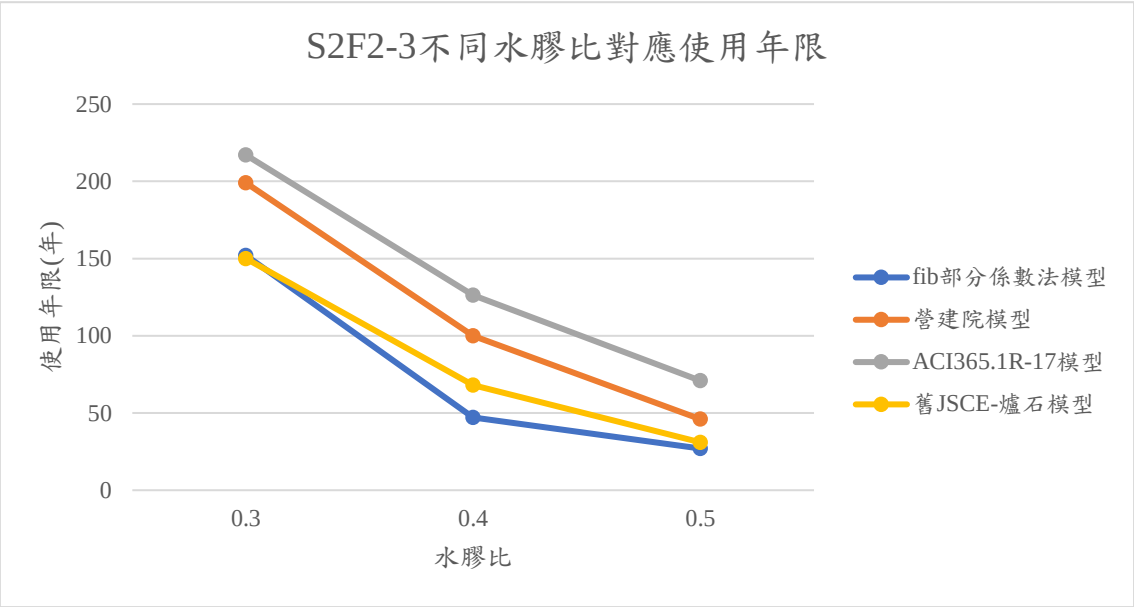


圖 5-6 不同水膠比下臨界，初始及表面氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

doi:10.6342/NTU202503522

5.1.3.3保護層厚度與使用年限之關係

繼水膠比分析後，本研究進一步以保護層厚度為變因，探討其對使用年限計算結果之影響。分析方式延續 5.1.3.2 中提到的，僅針對輸入參數逐一替換為台灣數據，其餘條件仍採各模型原始建議值設定，以釐清保護層厚度與模型壽命預測間之關聯性。考量到保護層厚度為氯離子擴散過程中關鍵的邊界距離參數，其變化將直接影響氯離子抵達鋼筋處所需時間，進而對結構使用年限產生顯著影響。因此，本小節利用 4，6，8，10cm 四組保護層厚度，針對不同模型進行分析，呈現不同保護層厚度下的使用年限變化趨勢。不同參數的變化所導致的使用年限結果已經在上一節中說明，因此本小節不再贅述。

分析結果顯示，隨著保護層的下降，使用年限也會隨著下降（表 5-15 至表 5-18）。Fib 模型所得到的使用年限為最保守的，原因為其擴散係數為使用 RCM 試驗所得到的傳輸係數，細節請參考 5.1.3.1。值得注意的是，本次分析中僅改變保護層厚度參數，在此假設下，fib 模型於保護層厚度為 4 cm 時所計算出的使用年限僅為 4 年（表 5-15），雖符合該模型理論計算架構，然實際工程中鮮少觀察到混凝土結構於短短數年內即因氯離子侵入導致達臨界濃度之情況，顯示此結果在物理意義上與常理有所落差。此一結果可歸因於氯離子從混凝土表面傳輸至鋼筋所需穿透的距離大幅縮短。在傳輸係數固定的條件下，擴散過程遵循 Fick 定律，氯離子將更快抵達鋼筋位置，鋼筋處濃度導致提前達到臨界氯離子濃度，從而使用年限大幅降低。此現象在極薄保護層條件下尤為明顯，模型計算結果也因此呈現出與常理略有落差結果。儘管此為理論推估，但實際工程中保護層厚度通常不會設計得過於薄弱，且尚包含其他防蝕機制（如表面塗料、使用防蝕材料等），因此建議對於此類極端條件下的模型結果仍須謹慎解讀，並視需求輔以實驗驗證。

doi:10.6342/NTU202503522

表 5-15 不同保護層厚度下使用年限結果

使用年限（年）				
保護層厚度(cm)	舊 JSCE 爐石模型	營建院模型	Fib 模型	ACI 模型
4	9	13	4	22.09
6	69	57	28	73.37
8	134	119	107	159.1
10	222	199	288	279.99

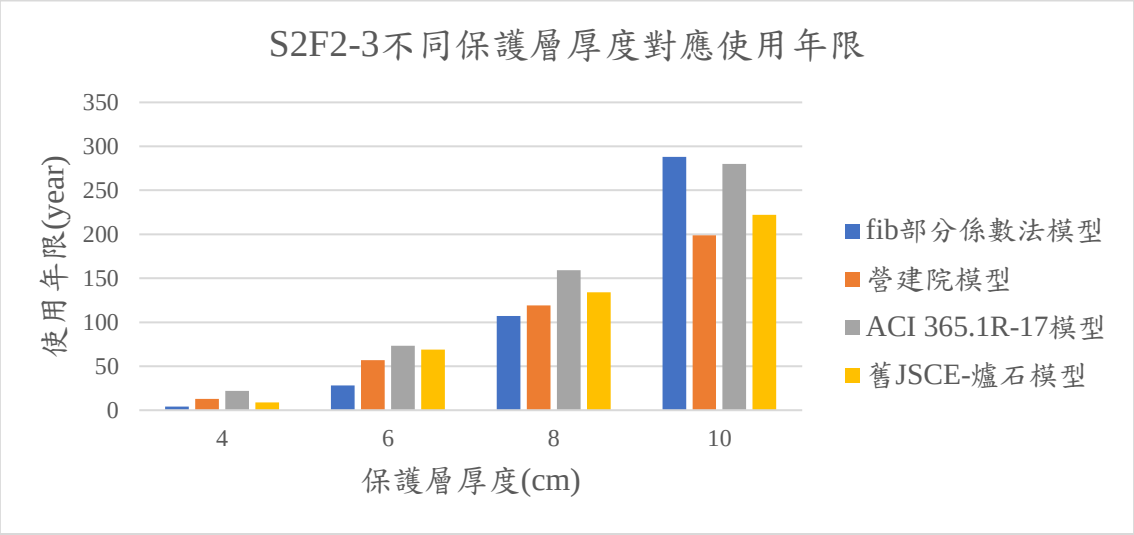


圖 5-7 不同保護層厚度下使用年限結果

doi:10.6342/NTU202503522

表 5-16 不同保護層厚度下臨界氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

使用年限（年）				
保護層厚度(cm)	舊 JSCE 爐石模型	營建院模型	Fib 模型	ACI 模型
4	9	13	3	23.94
6	69	57	20	78.8
8	134	119	76	170.03
10	222	199	205	298.3

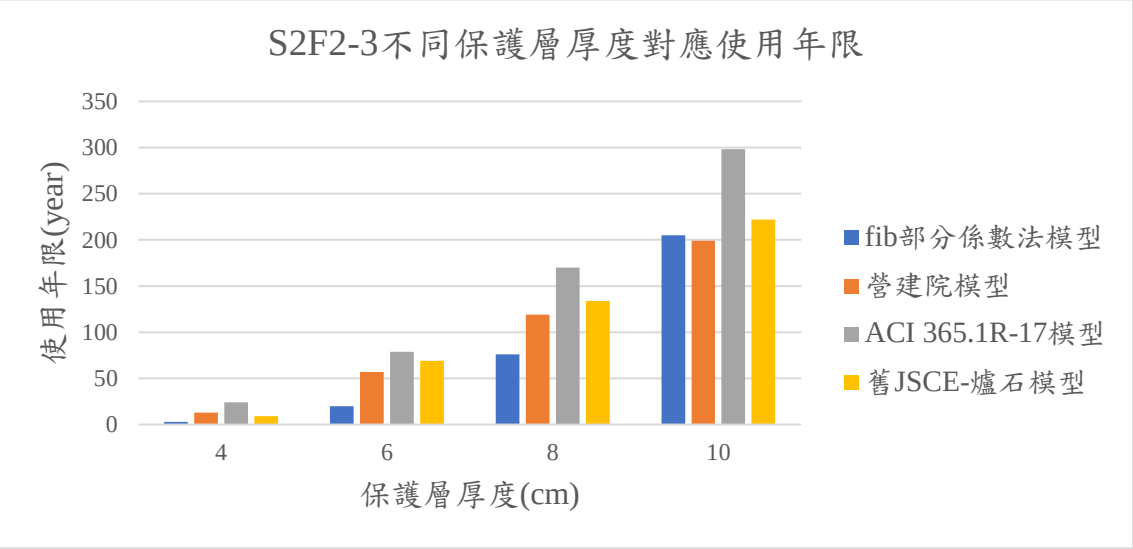


圖 5-8 不同保護層厚度下臨界氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

doi:10.6342/NTU202503522

表 5-17 不同保護層厚度下臨界與初始氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

使用年限（年）				
保護層厚度(cm)	舊 JSCE 爐石模型	營建院模型	Fib 模型	ACI 模型
4	26	13	3	23.94
6	72	57	21	78.8
8	141	119	80	170.03
10	232	199	215	298.3

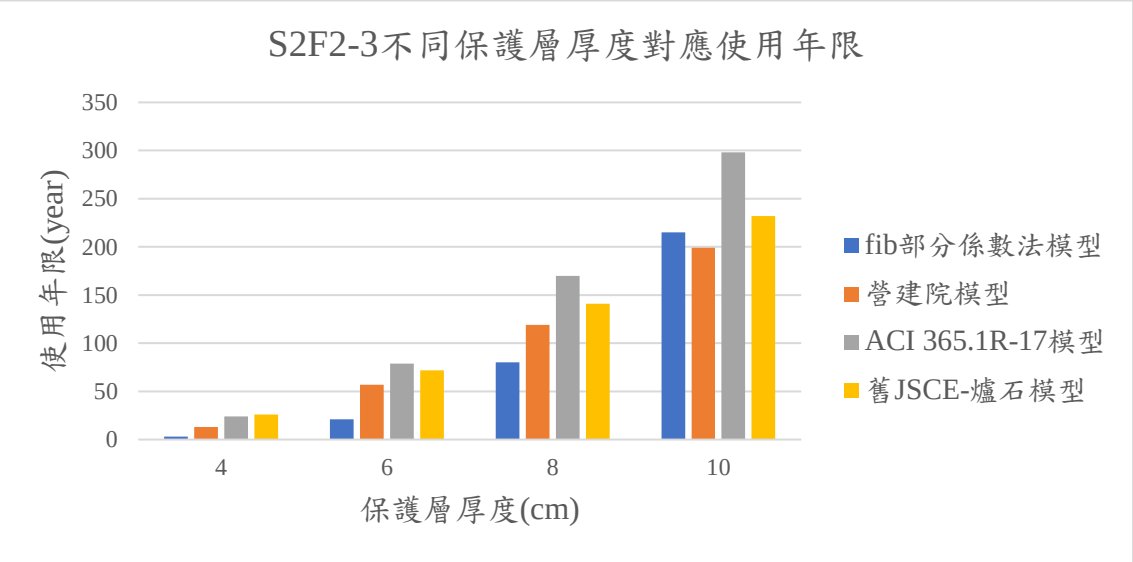


圖 5-9 不同保護層厚度下臨界與初始氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

doi:10.6342/NTU202503522

表 5-18 不同保護層厚度下臨界，初始及表面氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

使用年限（年）				
保護層厚度(cm)	舊 JSCE 爐石模型	營建院模型	Fib 模型	ACI 模型
4	17	13	2	15.97
6	46	57	16	54.98
8	91	119	60	121.73
10	150	199	162	217.03

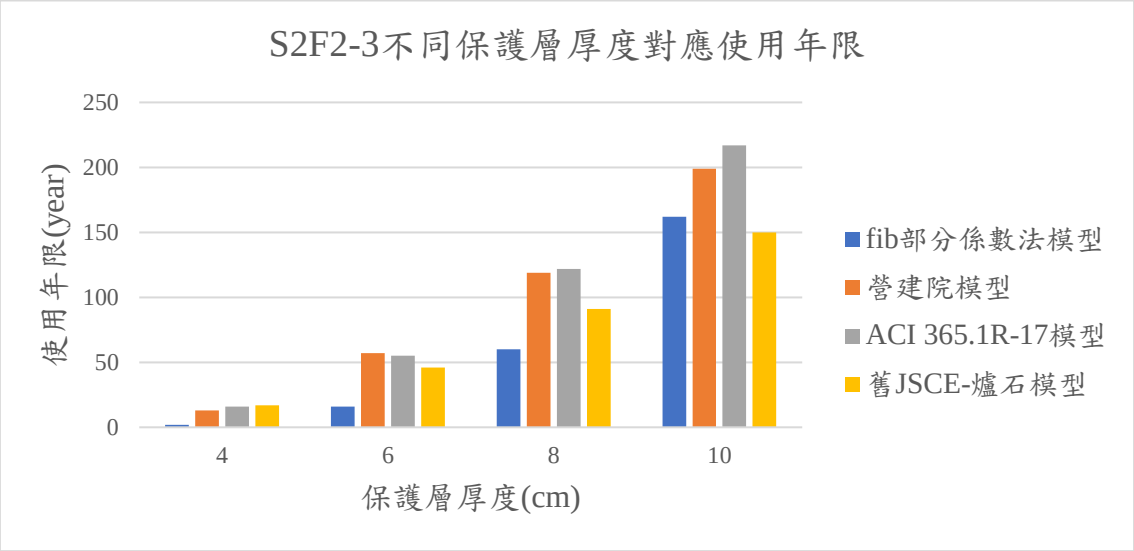


圖 5-10 不同保護層厚度下臨界，初始及表面氯離子濃度替換為台灣數據之使用年限結果

doi:10.6342/NTU202503522

5.2應用全機率法模型之使用年限分析結果

5.2.1模型介紹及參數設定

此次分析使用的方法為 Monte Carlo 法，具體步驟如下：

1. 針對模型內的參數找出對應的概率分佈，比如$D_{RCM,28}$遵循常態分佈，表面氯離子濃度C_s遵循對數常態分佈等等。

2. 決定分析需要使用年限的大小，此次分析年限範圍 0 至 300 年。

3. 產生 N 組隨機樣本，此次樣本數量為 N=100000。

4. 針對極限方程式式 3-7 進行分析，計算$C(x,t)$, 找出失效樣本數也就是$Z \leq 0$的次數，統計失敗概率P_f與可靠性指數β，這樣對每個使用年限都可以得到一個可靠性指數β,公式如式 5-4 所示。

5. 重複步驟 4。

6. 利用每個使用年限t所得到的可靠性指數β繪製出可靠性指數與使用年限的關係圖，規範規定使用年限內可靠性指數不能低於 1.5（Fib,2024），低於 1.5 被認為此時鋼筋開始去鈍化，結構物達到最大的使用年限。

$$Z = \mathrm{C_{crit}} - \mathrm{C(x,t)}$$
$$\text{for every t, } \mathrm{P_f} = \frac{N(\mathrm{Z} \leq 0)}{\mathrm{N}} \qquad \text{式 5-4}$$
$$\beta = -\Phi^{-1}(\mathrm{P_f})$$

參數設定結果如表 5-19 所示，此次分析中的結構物假設位於基隆沿海，使用的配比為 S2F2-3，保護層厚度設定為 10cm，臨界氯離子濃度及表面氯離子濃度的參數分別利用 ACI 文件數據，台灣營建院文件數據，JSCE 規範數據及 Fib 規範數據。ACI 數據參考[38]中第七章例子 10 的數據，fib 數據參考 Fib-bulletin 76 中的建議值[27]，JSCE 數據參考規範建議值[5]，營建院數據將參考文件建議值[33]，傳

doi:10.6342/NTU202503522

輸係數的數據利用楊老師團隊 28 天齡期混凝土的實驗結果[39]，衰減係數α參考表 3-5 中飛灰的數據，T_{real}為參考台灣氣象局統計基隆從 1991 至 2020 的溫度數據，所有參數的標準差設定都參考 Fib 的建議設定方式[2]。

表 5-19 全機率法模型之參數設定

參數	資料來源	單位	分佈	均值	標準差	下限 a	上限 b
$D_{RCM,28}$	實驗數據	$*10^{-12}\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$	常態分佈	4.81	0.2*4.81		
α	Fib	-	Beta 分佈	0.6	0.15	0	1
T_0	Fib	年	常數	0.0767	-		
T_{sl}		年	常數	300	-		
T_{ref}	Fib	K	常數	293			
T_{real}	氣象局	K	常態分佈	295.25	4.93		
b_e	Fib	K	常態分佈	4800	700		
C_s	台灣營建院	wt.%/binder	對數常態分佈	5.6	2.52		
	日本 JSCE	wt.%/binder	對數常態分佈	2.42	1.09		
	Fib	wt.%/binder	對數常態分佈	4	1.8		
	ACI365.1 R-17	wt.%/binder	對數常態分佈	3.61	1.62		

doi:10.6342/NTU202503522

Δ_x	Fib	mm	常數	8.9	-	-	
C_{crit}	台灣營建院	wt.%/binder	Beta 分佈	0.43	0.11	0.2	2
	日本 JSCE	wt.%/binder	Beta 分佈	0.43	0.11	0.2	2
	Fib	wt.%/binder	Beta 分佈	0.6	0.15	0.2	2
	ACI365.1 R-17	wt.%/binder	Beta 分佈	0.4	0.1	0.2	2
c		mm	常態分佈	100	9	-	

5.2.2分析結果與討論

本研究透過 Monte Carlo 模擬，基於全機率法架構考量材料性質與環境參數之不確定性，建立不同資料來源（台灣、JSCE、fib、ACI）下鋼筋腐蝕可靠度隨時間變化之關係，如圖 5-11 所示。分析結果顯示可靠性指數β隨時間遞減，當β降至 1.5 時，即可判定結構達到設計容許風險上限，其對應時間即為使用年限。使用台灣數據的使用年限為 98 年，ACI 數據使用年限為 137 年，Fib 數據使用年限為 190 年，JSCE 數據為 234 年。

在四組模型中，台灣數據與 ACI 數據對應年限相對保守，而 JSCE 數據與 fib 則展現較高可靠度與較長設計年限。在擴散係數與衰減係數固定的情況下，台灣數據的使用年限為最保守的，推測原因為台灣所建議表面氯離子濃度為最高的，造成使用年限下降。特別值得注意的是，台灣資料係根據本地材料與環境實測統計參數所建立，其預測結果具有區域代表性與實務參考價值，能更貼近國內實際情況。

doi:10.6342/NTU202503522

此外，本研究發現用 fib 全機率法與 fib 部分係數法兩種方法計算出來的使用年限有所不同，兩者都是用 fib 的建議環境參數及使用台灣本土材料所得到的傳輸係數，fib 全機率法使用年限為 190 年，fib 部分係數法為 288 年，全機率法結果為部分係數法結果的 66%。推測原因為規範中兩者變異係數有所差異，如表 5-20 所示。為釐清各隨機參數對結構使用年限之影響程度，本研究進行 Spearman 敏感性分析，以探討各隨機參數對結構使用年限之影響程度，結果如圖 5-12 所示。分析發現，衰減係數的敏感性係數隨時間上升，長期趨近 0.5，顯示其為影響使用年限的主導參數。衰減係數愈大，表示氯離子擴散能力衰退愈快，導致氯離子抵達鋼筋所需時間延長，使用年限增加。相對地，傳輸係數$D_{RCM,28}$與表面氯離子濃度C_s的敏感性係數則呈逐漸下降趨勢，最終趨近負值，顯示兩者變大時將導致結構使用年限縮短。這與物理機制一致：傳輸係數愈大，氯離子滲入速度愈快；表面濃度愈高，擴散驅動力加大，皆將促使氯離子更快達臨界濃度，縮短使用年限。

因此，本研究認為此全機率法分析結果可作為未來台灣耐久性設計規範建立可靠度設計基準之參考依據。透過量化各不確定性參數對使用年限預測之影響程度，可提供更具風險管理導向之設計準則。未來若能配合大量本土數據建立統計模型，將有助於發展具區域適應性的耐久性設計方法。

doi:10.6342/NTU202503522

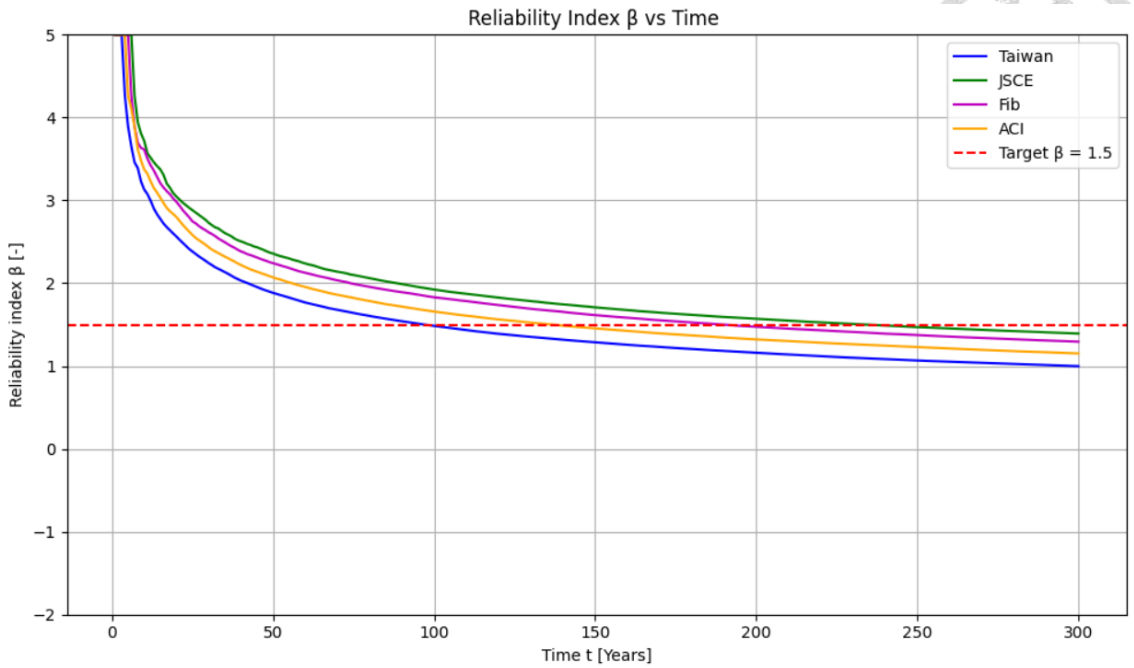


圖 5-11 全機率法分析結果

$$\gamma = \frac{m}{m - \beta\sigma}$$

$$CoV = \frac{\sigma}{m}$$

式 5-5

m=均值

σ=標準差

β=可靠性指數

CoV=變異係數

表 5-20 部分係數法與全機率法變異係數之差異[2][26]

參數	變異係數(%)	
	部分係數法	全機率法
$D_{RCM,28}$	25	20
α	11	25
C_s	31.5	45

doi:10.6342/NTU202503522

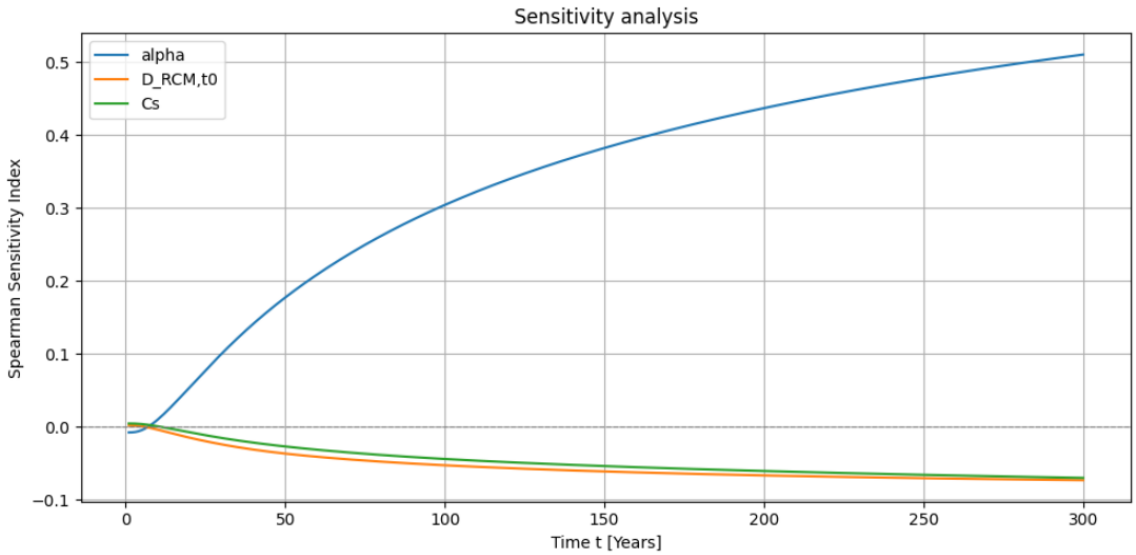


圖 5-12 Spearman 敏感性分析結果

doi:10.6342/NTU202503522

第六章、針對台灣規範之建議

6.1目標使用年限應用於台灣規範之執行流程圖

參照前面國外規範關於如何達到目標使用年限之方法，本研究認為應該把結構物使用年限與與台灣現行規範進行連接，因此本研究定出目標使用年限應用於台灣規範之執行流程圖，如圖 6-1 所示，這流程圖會建議放在現行建築物混凝土結構設計規範第 19 章內，除目前針對結構物曝露環境下的混凝土配比限制之外，本研究提出以下建議：耐久性設計一開始必須根據結構物的重要性定出使用年限，使用年限可被分為 50，75，100 年，其次將結構物依據其構件進行拆分，以橋樑作為例子，構件可被分為基礎及基樁，柱，版，牆等等，接著則需要了解該構件所處於的曝露環境，接下來進行選擇材料的部分，首先執行 level 1 來選出構件最低保護層厚度，混凝土最大水膠比及最低強度，接下來建議執行 level 2，參考歐洲規範 ERC 的方式也就是根據不同的中性化速率、氯離子擴散係數及鋼筋種類選擇合適的保護層厚度，保守起見建議取 level 1 與 level 2 的保守值，至此完成耐久性設計。

如果結構物有更高的使用年限需求，如 120 年或以上的話，本研究建議使用部分係數法或全機率法來驗證該材料是否能滿足使用年限的要求，在鹽害環境下必須了解材料的初始氯離子濃度，表面氯離子濃度，臨界氯離子濃度，材料的擴散或傳輸係數及保護層厚度來進行分析，在內陸高濕度的環境下，除了保護層厚度之外必須了解材料的碳化速率，相對濕度，二氧化碳濃度及降雨天數來分析中性化發生的可能性。level 3 與 level 4 的不同之處在於部分係數法的參數要求為特徵值，全機率法的參數需要知道其均值與標準差，部分係數法的執行範例請參考 5.1，全機率法的執行範例請參考 5.2，部分係數法執行完畢後需檢視使用年限是否有大於一開始的設計使用年限，全機率法執行完畢後需檢視其可靠性指數是否有大於規範建議值，可靠性指數有 1.5 與 1.3 兩種選項，如果不通過的話則需要增加保護層厚度或更換成擴散係數更低的混凝土來分析直至通過為止，至此完成使用年限需求

doi:10.6342/NTU202503522

更高的結構物耐久性設計。

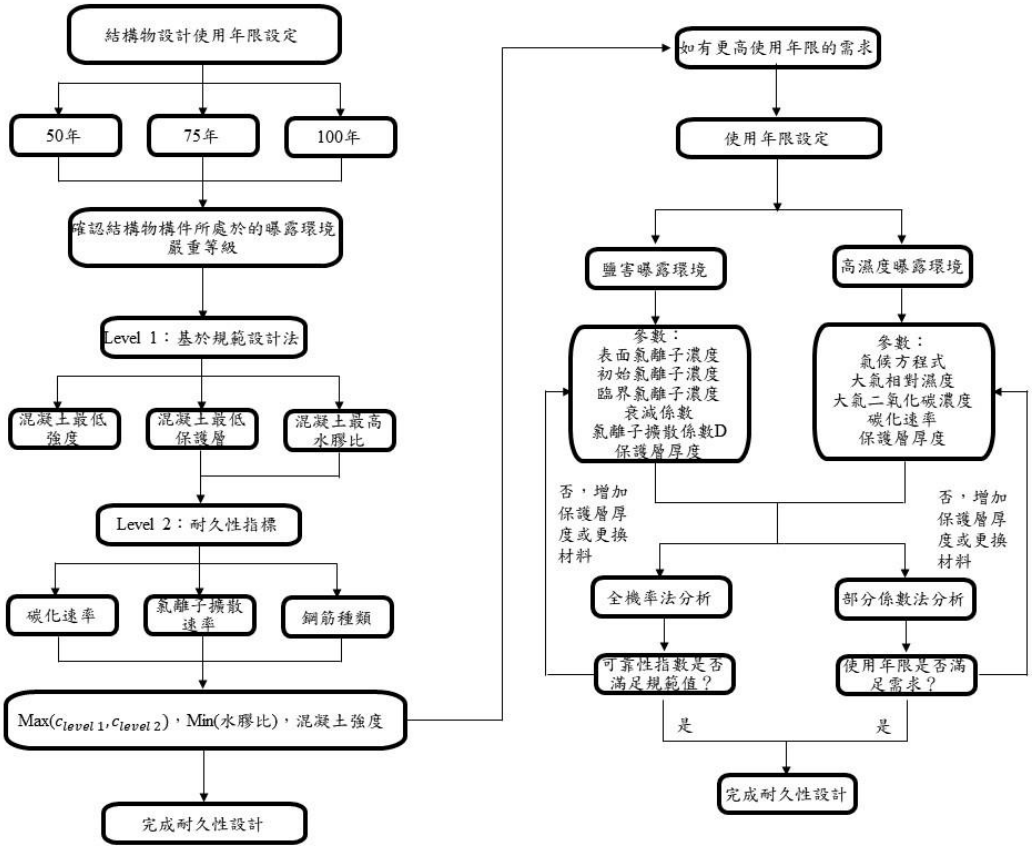


圖 6-1 以使用年限為目標之耐久性設計流程圖

6.2不同模型下氯離子擴散係數容許值探討

目前臺灣現行的混凝土相關設計規範，如建築物混凝土結構設計規範及公路橋梁設計規範[12][13]中，雖針對不同曝露環境分級提出最大水膠比、最小抗壓強度及鋼筋保護層厚度等要求作為耐久性設計的基本指標，細節參閱 2.4.1，2.4.2。。相較之下，Fib Model Code、日本 JSCE、ACI 365.1R-17 等國際規範皆提供與氯離子擴散相關的耐久性設計模型，允許依據設計使用年限與材料參數反推所需性能指標。

根據本研究提出的以使用年限為目標之耐久性設計流程（圖 6-1），在鹽害環境下，材料本身的氯離子擴散係數是否足以滿足設計使用年限的要求，是耐久性評估的關鍵；然而，目前臺灣相關規範尚未針對不同混凝土配比之氯離子擴散係數訂

doi:10.6342/NTU202503522

定具體評估方法。因此本研究選擇 5.1.1 中四種耐久性模型建立擴散係數與使用年限之關係式，試圖建立臺灣規範在不同設計條件下應具備之最大容許氯離子擴散係數，以提供一套可行之評估標準，作為日後耐久性設計規範強化之參考依據。

儘管各國規範已提出不同的參數建議，但考量到各國環境條件、材料來源及施工品質之差異，直接引用其原始參數可能無法準確反映臺灣本土環境下的實際耐久性表現。因此，本研究統一採用臺灣本土之環境數據為輸入參數，包含混凝土表面氯離子濃度、臨界氯離子濃度、初始氯離子濃度，其他參數則是參考規範的建議值，以建立四種不同耐久性模型下，不同使用年限、曝露環境、配比、水膠比及保護層厚度之氯離子擴散係數容許範圍（表 6-1）。台灣本土表面氯離子濃度則是參考表 4-4，表面氯離子濃度取該鹽害環境的最大建議值，XS1，2，3 對應中度、嚴重、極嚴重鹽害環境。各模型參數細節如式 6-1 所示。需特別說明的是，氯離子擴散係數容許值之計算過程中所需之齡期衰減係數（ageing coefficient），係根據特定混凝土配比實驗結果推估而得，因此本研究所建立之模型與分析結果，主要適用於文獻中採用之幾組配比（例如 C、S2、F2、S2F2、S1F4、S2F3 等[22][39]）。然而實務工程中之混凝土配比組合多樣且應用場域不同，建議未來可針對實際常用配比進行齡期係數評估與氯離子擴散行為試驗，以擴充模型應用範圍，提升其在工程設計階段之適用性與可靠性。

表 6-1 不同條件下之氯離子擴散係數建議值

<table>
<tr><td colspan="2">使用年限</td><td colspan="6">50，75，100</td></tr>
<tr><td colspan="2">曝露環境</td><td colspan="6">XS1，XS2，XS3</td></tr>
<tr><td colspan="2">水膠比</td><td colspan="6">0.3，0.4</td></tr>
<tr><td colspan="2">配比表</td><td>C</td><td>S2</td><td>F2</td><td>S2F2</td><td>S2F3</td><td>S1F4</td></tr>
<tr><td rowspan="3">保護層厚度</td><td>10</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

doi:10.6342/NTU202503522

營建院模型：

$$D_{ref} = \frac{\left(\frac{x}{2erf^{-1}\left(1-\frac{C_t - C_i}{(C_o + C_i)}\right)}\right)^2}{\beta_{cl} * \left[\frac{{t_{ref}}^m t_s^{1-m}}{1-m} + \left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^m (t - t_s)\right]}$$

$\beta_{cl} = 1.5$
$x = 10cm$
$C_t = 2.32kg/m^3(w/b = 0.3), 2.06kg/m^3(w/b = 0.4)$
$C_o = 30,20,10\ kg/m^3$
$C_i = 0.15\ kg/m^3$
$t_{ref} = 28,91days$
$t_s = 25years$
$t = 50,75,100\ years$
$m(C) = 0.2$
$m(S2) = 0.31$
$m(F2) = 0.36$
$m(S2F2) = 0.47$ 式 6-1
$m(S2F3) = 0.55$
$m(S1F4) = 0.58$

Fib 模型：

$$D_{RCM,k}(t_0) = \frac{\left(\frac{c_{min} - \Delta x}{2 * erfc^{-1}((C_{crit} - C_{0,k})/(C_{s,\Delta x,k} * \gamma_C - C_{0,k})}\right)^2}{k_{e,k} * \gamma_D * \left(\frac{t_0}{t_{SL}}\right)^{\frac{\alpha_k}{\gamma_\alpha}} * t_{SL}}$$

$\Delta x = 0.89cm$
$c_{min} = 10cm$
$C_{crit} = 2.32kg/m^3(w/b = 0.3), 2.06kg/m^3(w/b = 0.4)$
$C_{s,\Delta x,k} = 30,20,10\ kg/m^3$
$C_{0,k} = 0.15\ kg/m^3$
$t_0 = 28days$
$k_{e,k} = 1.133$
$t_{sl} = 50,75,100\ years$
$\gamma_C = 1.9$
$\gamma_D = 1.6$

doi:10.6342/NTU202503522

$\gamma_\alpha = 1.2$
$\alpha_k(C) = 0.3$
$\alpha_k(S2) = 0.45$
$\alpha_k(F2) = 0.6$
$\alpha_k(S2F2) = 0.6$
$\alpha_k(S2F3) = -$
$\alpha_k(S1F4) = -$
-:不適用

舊 JSCE 爐石模型：

$$D_k = \frac{\left(\frac{0.1 * c_d}{2erf^{-1}\left(1 - \frac{(C_{limit} - C_i)}{\gamma_i * \gamma_{cl} * C_0}\right)}\right)^2}{\gamma_c * \beta_{cl} * t}$$

$c_d = 10cm$
$C_{limit} = 2.32kg/m^3(w/b = 0.3), 2.06kg/m^3(w/b = 0.4)$
$C_0 = 30,20,10\ kg/m^3$
$C_i = 0.15\ kg/m^3$
$t = 50,75,100\ years$
$\gamma_i = 1.1$
$\gamma_{cl} = 1.3$
$\gamma_c = 1.3$
$\beta_{cl} = 1.5$

ACI 365.1R-17 模型：

$$D_{28} = \frac{\left(\frac{x}{2erf^{-1}\left(1 - \frac{C_{crit}}{C_0}\right)}\right)^2}{\left((\frac{28}{t})^m + \left(\frac{28}{36500}\right)^m (1 - (\frac{28}{t})^m)\right)t}$$

$x = 10cm$
$C_{crit} = 2.32kg/m^3(w/b = 0.3), 2.06kg/m^3(w/b = 0.4)$
$C_0 = 30,20,10\ kg/m^3$
$t = 50,75,100\ years$
$m(C) = 0.26$
$m(S2) = 0.37$
$m(F2) = 0.42$

doi:10.6342/NTU202503522

$m(S2) = 0.31$
$m(S2F3) = 0.53$
$m(S1F4) = 0.64$

6.2.1應用於台灣規範之氯離子擴散係數容許建議值

營建院模型分析結果分為齡期為 28 天的混凝土的結果（表 6-2、表 6-3、表 6-4）與齡期為 91 天的混凝土的結果（表 6-5、表 6-6、表 6-7）。本研究觀察到隨著使用年限需求的減少，齡期 28 天與 91 天的混凝土都可以容許更大的氯離子擴散係數，在相同使用年限之下，曝露環境越嚴峻（XS1-3），齡期 28 天與 91 天的混凝土氯離子擴散係數容許值越低，此外，隨著水膠比的增加或保護層厚度的減少都會造成越低的氯離子擴散係數容許值。配比方面本研究觀察到純水泥的混凝土氯離子擴散係數容許值最低，爐石與飛灰取代量各 10%與 40%的混凝土氯離子擴散係數容許值最高，礦物參料取代水泥量越多將造成衰減係數 m 越大，這將加速氯離子的衰減速率，在相同的使用年限下將造成氯離子擴散係數容許值上升。混凝土齡期方面本研究觀察到如果利用營建院模型來進行計算的話，齡期為 28 天的混凝土將比齡期為 91 天的混凝土容許更大的氯離子擴散係數，這與表 5-2 中混凝土齡期越長，氯離子擴散係數將越低的結果相反，本研究認為這是由於營建院模型內分母項$\frac{{t_{ref}}^{m} t_s^{1-m}}{1-m} + \left(\frac{t_{ref}}{t_s}\right)^{m} (t - t_s)$所造成的，$t_{ref}$為混凝土的曝露時間，可理解為齡期。$t_{ref}$的減少將造成模型內分母項的降低，從而允許更大的氯離子擴散係數容許值。

Fib 模型分析結果如表 6-8、表 6-9、表 6-10 所示，Fib 文件建議以齡期 28 天之混凝土利用快速氯離子遷移試驗(RCM)所測得結果作為傳輸係數。本研究觀察到隨著使用年限需求的減少，混凝土都能容許更大傳輸係數，在相同使用年限之下，曝露環境越嚴峻將導致氯離子傳輸係數容許值越低。隨著水膠比的增加或保護層厚度的減少都會造成越低的氯離子傳輸係數容許值。配比方面，純水泥的混凝土的

doi:10.6342/NTU202503522

傳輸係數容許值最低，接著是爐石取代量 20%的混凝土及飛灰 20%取代量的混凝土。由於 S2F2 配比的混凝土也有 20%飛灰的取代量，因此建議採用與飛灰 20%相同的衰減係數，導致兩者所容許的傳輸係數的一樣的，S2F3 與 S1F4 無法得到其傳輸係數容許值原因為 Fib 文件並沒有提供 30%與 40%飛灰取代量的衰減係數建議值。

接下來說明 ACI 與 JSCE 模型的不適用性，兩者分析結果如表 6-11 及表 6-12 所示，JSCE 模型由於氯離子擴散容許值的單位都落在$10^{-9}\mathrm{m}^2/\mathrm{s}$，台灣本土試驗數據都落在$10^{-11}\sim10^{-12}\mathrm{m}^2/s$，這意味著如果使用 JSCE 模型的結果作為檢驗標準，大多數的配比都能輕易達到設計使用年限。ACI 模型與 JSCE 模型的結果類似，氯離子擴散係數單位都落在$10^{-10}\sim10^{-11}\mathrm{m}^2/s$，綜上所述，本研究認為 JSCE 與 ACI 模型的分析結果並無太大參考價值，因此後續針對這兩個模型做討論。

最後，本研究亦認為本次計算所得之氯離子擴散係數容許值結果，應視為示範性之演算與比較，主要用於探討設計流程與模型參數對評估結果之影響。由於實際工程所採用材料其齡期衰減係數需依實測資料進行校正，方能得知其真實隨齡期變化之傳輸行為，未來應針對常用配比材料進行長期實驗，以強化模型於實務應用之可信度與適用性。

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-2 氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：100 年，混凝土齡期：28 天)

使用年限		100years											
曝露環境		XS3											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	1.02	1.81	2.31	4.16	6.18	6.90	0.95	1.70	2.17	3.91	5.81	6.48
	8	0.66	1.16	1.47	2.66	3.96	4.42	0.61	1.09	1.38	2.50	3.71	4.15
使用年限		100years											
曝露環境		XS2											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	1.29	2.28	2.90	5.24	7.77	8.67	1.19	2.11	2.65	4.85	7.19	8.03
	8	0.83	1.40	1.79	3.22	4.78	5.34	0.76	1.29	1.64	2.96	4.38	4.89
使用年限		100years											
曝露環境		XS1											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	2.27	3.89	4.95	8.94	13.27	14.81	1.99	3.46	4.41	7.94	11.79	13.16
	8	1.45	2.49	3.17	5.72	8.50	9.48	1.27	2.22	2.82	5.09	7.56	8.43
	6	0.82	1.40	1.78	3.22	4.78	5.34	0.71	1.25	1.59	2.86	4.25	4.74

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-3 氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：75 年，混凝土齡期：28 天)

使用年限		75years											
曝露環境		XS3											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	1.34	2.34	2.96	5.23	7.64	8.48	1.24	2.20	2.78	4.91	7.18	7.96
	8	0.86	1.49	1.89	3.35	4.89	5.43	0.80	1.41	1.78	3.14	4.59	5.10
使用年限		75years											
曝露環境		XS2											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	1.70	2.94	3.71	6.58	9.61	10.66	1.56	2.72	3.44	6.09	8.89	9.87
	8	1.08	1.81	2.29	4.05	5.59	6.6	0.99	1.66	2.10	3.71	5.42	6.01
使用年限		75years											
曝露環境		XS1											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	2.97	5.02	6.34	11.22	16.40	18.20	2.61	4.46	5.64	9.97	14.57	16.17
	8	1.90	3.21	4.07	7.19	10.50	11.65	1.66	2.86	3.61	6.39	9.33	10.36
	6	1.07	1.81	2.28	4.04	5.91	6.55	0.94	1.61	2.03	3.59	5.25	5.82

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-4 氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：50 年，混凝土齡期：28 天)

使用年限		50years											
曝露環境		XS3											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	1.93	3.2	4.11	7.03	9.99	11.00	1.80	3.10	3.86	6.60	9.39	10.33
	8	1.24	2.11	2.63	4.50	6.40	7.04	1.15	1.97	2.47	4.23	6.01	6.61
使用年限		50years											
曝露環境		XS2											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	2.45	4.13	5.17	8.84	13.83	12.57	2.25	3.82	4.79	8.19	11.63	12.80
	8	1.57	2.54	3.18	5.44	7.73	8.51	1.43	2.33	2.91	5.44	7.09	7.80
使用年限		50years											
曝露環境		XS1											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	4.03	7.06	8.82	15.09	21.45	23.61	3.77	6.28	7.84	13.42	19.07	20.98
	8	2.75	4.52	5.65	9.67	13.74	15.12	2.39	4.02	5.02	8.59	12.21	13.44
	6	1.54	2.54	3.18	5.44	7.73	8.51	1.36	2.26	2.82	4.83	6.87	7.56

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-5 氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：100 年，混凝土齡期：91 天)

使用年限		100years											
曝露環境		XS3											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	0.81	1.25	1.511	2.38	3.21	3.50	0.75	1.17	1.41	2.24	3.02	3.28
	8	0.52	0.80	0.97	1.52	2.06	2.24	0.48	0.75	0.91	1.43	1.93	2.10
使用年限		100years											
曝露環境		XS2											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	1.02	1.57	1.89	2.99	4.05	4.39	0.94	1.45	1.76	2.77	4.04	4.39
	8	0.65	0.96	1.17	1.84	2.49	2.7	0.60	0.88	1.07	1.68	2.28	2.47
使用年限		100years											
曝露環境		XS1											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	1.80	2.69	3.24	5.11	6.91	7.50	1.58	2.39	2.88	4.54	6.14	6.67
	8	1.15	1.72	2.08	3.27	4.42	4.80	1.00	1.53	1.85	2.91	3.93	4.27
	6	0.64	0.97	1.17	1.84	2.49	2.70	0.57	0.86	1.04	1.64	2.21	2.40

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-6 氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：75 年，混凝土齡期：91 天)

使用年限		75years											
曝露環境		XS3											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	1.06	1.62	1.93	2.99	3.98	4.30	0.99	1.52	1.82	2.81	3.73	4.03
	8	0.68	1.03	1.24	1.92	2.54	2.75	0.63	0.97	1.16	1.79	2.39	2.58
使用年限		75years											
曝露環境		XS2											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	1.34	2.03	2.43	3.76	5.00	5.40	1.23	1.88	2.25	3.48	4.62	5.00
	8	0.86	1.25	1.49	2.31	3.07	3.32	0.78	1.14	1.37	2.12	3.04	2.81
使用年限		75years											
曝露環境		XS1											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	2.35	3.46	4.15	6.42	8.53	9.22	2.06	3.08	3.69	5.71	7.58	8.19
	8	1.50	2.22	2.66	4.11	5.46	5.90	1.31	1.97	2.36	3.65	4.86	5.25
	6	0.84	1.25	1.50	2.31	3.07	3.32	0.74	1.11	1.33	2.05	2.73	2.95

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-7 氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：50 年，混凝土齡期：91 天)

使用年限		50years											
曝露環境		XS3											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	1.53	2.27	2.69	4.02	5.20	5.57	1.42	2.13	2.52	3.77	4.88	5.23
	8	0.98	1.45	1.72	2.57	3.33	3.57	0.91	1.45	1.72	2.57	3.33	3.56
使用年限		50years											
曝露環境		XS2											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	1.94	2.86	3.38	5.05	6.54	7.00	1.77	2.64	3.13	4.68	6.05	6.48
	8	1.24	1.75	2.08	3.11	4.02	4.31	1.13	1.61	1.91	2.85	3.68	3.95
使用年限		50years											
曝露環境		XS1											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	3.40	4.87	5.77	8.63	11.16	11.96	2.98	4.33	5.13	7.67	9.92	10.63
	8	2.17	3.12	3.70	5.53	7.15	7.66	1.89	2.78	3.29	4.91	6.35	6.81
	6	1.22	1.76	2.08	3.11	4.02	4.31	1.07	1.56	1.85	2.76	3.57	3.83

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-8 氯離子傳輸係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：100 年，混凝土齡期：28 天)

使用年限		100years											
曝露環境		XS3											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4	C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4
保護層厚度 (cm)	10	0.99	2.41	5.91	5.91	−	−	1.13	2.29	5.63	5.63	−	−
	8	0.71	1.45	3.57	3.57	−	−	0.69	1.40	3.43	3.43	−	−
使用年限		100years											
曝露環境		XS2											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4	C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4
保護層厚度 (cm)	10	1.20	2.86	7.03	7.03	−	−	1.13	2.69	6.61	6.61	−	−
	8	0.71	1.72	4.22	4.22	−	−	0.69	1.65	4.04	4.04	−	−
使用年限		100years											
曝露環境		XS1											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4	C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4
保護層厚度 (cm)	10	1.73	4.17	10.2	10.2	−	−	1.64	3.85	9.44	9.44	−	−
	8	1.09	2.52	6.19	6.19	−	−	0.99	2.55	5.52	5.52	−	−
	6	0.56	1.25	3.06	3.06	−	−	0.51	1.2	2.94	2.94	−	−

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-9 氯離子傳輸係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：75 年，混凝土齡期：28 天)

使用年限		75years											
曝露環境		XS3											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4	C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4
保護層厚度 (cm)	10	1.51	2.89	6.83	6.83	−	−	1.40	2.75	6.50	6.50	−	−
	8	0.89	1.74	4.11	4.11	−	−	0.86	1.67	3.96	3.96	−	−
使用年限		75years											
曝露環境		XS2											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4	C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4
保護層厚度 (cm)	10	1.51	3.43	8.12	8.12	−	−	1.40	3.23	7.64	7.64	−	−
	8	0.89	2.06	4.88	4.88	−	−	0.86	1.97	4.67	4.67	−	−
使用年限		75years											
曝露環境		XS1											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4	C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4
保護層厚度 (cm)	10	2.15	4.99	11.8	11.8	−	−	2.04	4.61	10.9	10.9	−	−
	8	1.35	3.02	7.15	7.15	−	−	1.24	2.69	6.37	6.37	−	−
	6	0.69	1.50	3.54	3.54	−	−	0.63	1.44	3.40	3.40	−	−

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-10 氯離子傳輸係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：50 年，混凝土齡期：28 天)

使用年限		50years											
曝露環境		XS3											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4	C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4
保護層厚度(cm)	10	2.04	3.72	8.37	8.37	-	-	1.90	3.54	7.96	7.96	-	-
	8	1.20	2.24	5.04	5.04	-	-	1.17	2.16	4.85	4.85	-	-
使用年限		50years											
曝露環境		XS2											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4	C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4
保護層厚度(cm)	10	2.04	4.43	9.94	9.94	-	-	1.90	4.16	9.36	9.36	-	-
	8	1.20	2.66	5.97	5.97	-	-	1.16	2.54	5.72	5.72	-	-
使用年限		50years											
曝露環境		XS1											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4	C	S2	F2	S2F2	S2 F3	S1 F4
保護層厚度(cm)	10	2.92	6.44	14.4	14.4	-	-	2.77	5.94	13.3	13.3	-	-
	8	1.84	3.90	8.75	8.75	-	-	1.68	3.47	7.80	7.80	-	-
	6	0.94	1.90	4.33	4.33	-	-	0.86	1.85	4.16	4.16	-	-

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-11 JSCE 模型氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-9}m^2/s$，使用年限：100 年，曝露環境：XS3)

使用年限		100years											
曝露環境		XS3											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	1.79	1.72	1.72	-	-	-	1.68	1.64	1.64	-	-	-

表 6-12 ACI 模型氯離子擴散係數容許值(單位：$10^{-12}m^2/s$，使用年限：100 年，曝露環境：XS3)

使用年限		100years											
曝露環境		XS3											
水膠比		0.3						0.4					
配比表		C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4	C	S2	F2	S2F2	S2F3	S1F4
保護層厚度(cm)	10	18.4	38.4	52.8	118.4	209.1	246.	17.2	36.2	49.8	111.6	197.4	232.2

doi:10.6342/NTU202503522

6.2.2不同條件下之配比適用性

本研究上一節已使用營建院模型與 Fib 模型制定出不同條件下的氯離子傳輸/擴散係數最大容許值，接下來本研究想觀察台灣本土材料在不同使用年限與曝露環境的表現，因此，本研究收集國立海洋大學楊仲家老師團隊各配比的擴散與傳輸係數試驗結果[22][39]，如表 6-13、表 6-14、表 6-15 所示，並以 6.2.1 中各配比的最大氯離子傳輸/擴散係數容許值結果除以台灣本土試驗數據，並將其結果定義為耐久性指數（Durability Index，DI），當 DI 值大於 1，表示該混凝土配比在所設定條件下可滿足耐久性要求，反之小於 1 則該配比無法滿足耐久性要求。值得說明的是，本研究所推導之 DI 值僅適用於本研究所使用之特定配比與材料條件，作為耐久性設計之參考指標與概念性示範，尚無法直接套用於所有工程實務配比或納入規範標準中。

分析結果如表 6-16 至表 6-36 及圖 6-2 至圖 6-43 所示。表格中 RCM t0=28 為使用 fib 模型所得到的氯離子傳輸係數容許值除以表 6-13 中台灣本土試驗數據的 DI 結果；Ponding t0=91 為使用營建院模型所得到的氯離子擴散係數容許值除以表 6-14 中台灣本土試驗數據的 DI 結果；Ponding t0=28 為使用營建院模型所得到的氯離子擴散係數容許值除以表 6-15 中台灣本土試驗數據的 DI 結果。分析結果顯示隨著使用年限要求與曝露環境嚴重程度的下降，各配比的 DI 呈現上升的趨勢。各配比中 S2F3 的表現最好，隨著水膠比的上升與保護層厚度的下降，各配比的 DI 都呈現下降的趨勢。

本研究觀察到 RCM t0=28 天的 DI 結果皆小於 Ponding t0=28 及 Ponding t0=91 的 DI 結果，原因推測為雖然同種配比下利用兩種模型所得到的氯離子擴散係數容許值差異不大，但台灣本土試驗數據顯示大部分配比的 RCM 與貯鹽試驗結果有著 2 倍以上的差距，這也導致大部分 RCM t0=28 的 DI 結果皆小於 1。此外， S2F3 與 S1F4 無法得到其 RCM t0=28 的 DI 結果原因為 Fib 文件並沒有提供 30%與 40% 飛灰取代量的衰減係數建議值。

doi:10.6342/NTU202503522

本研究發現 Ponding t0=28 的 DI 皆大於 Ponding t0=91 的 DI 結果，這結果似乎代表 28 天齡期的混凝土耐久性表現會 91 天齡期的混凝土更好，與試驗結果中混凝土齡期為 91 天的氯離子擴散係數較低呈現相反的結果，以使用年限 100 年、環境嚴重程度 XS3、水膠比 0.3 及保護層厚度 10cm 為例子來說明，Ponding t0=91 的 DI 結果為$(2.38/1.32) * 10^{-12} = 1.80$, Ponding t0=28 的 DI 結果為$(4.16/1.93) * 10^{-12} = 2.15$，本研究認為 Ponding t0=28 的 DI 的結果會比 Ponding t0=91 更高是由於模型的計算方式造成的。公式如式 4-3 所示，在所有參數不變的情況下，僅把t_{ref}從 91 天換成 28 天，此舉動將降低模型內分母項的數值，導致其氯離子擴散係數容許值的增加，雖然試驗數據顯示所有配比 28 天貯鹽試驗的擴散係數結果都比 91 天貯鹽試驗的結果還要高，但其增加的速度遠遠比不上模型所計算的擴散係數容許值，上訴原因造成了 Ponding t0=28 的 DI 比 Ponding t0=91 的 DI 還要高，但這結果並未意味著齡期 28 天的混凝土耐久性表現會比 91 天的混凝土還要好，各配比耐久性表現由劣至佳的排名為 C、S2、F2、S1F4、S2F2、S2F3。

總上所訴，本研究提供了目前台灣規範尚未涵蓋的補充資料，並整理出鋼筋混凝土各配比在不同條件下的擴散係數參考值，期望能讓未來的工程師在設計與評估上更便利、更有依據。

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-13 氯離子擴散係數試驗結果(混凝土齡期：28 天) [22]

t0=28	傳輸係數($*10^{-12}m^2/s$)					
水膠比	C	S2	F2	S2F2	S1F4	S2F3
0.3	11.31	7.58	14.40	4.81	7.63	4.17
0.4	17.23	11.15	19.04	8.22	10.48	6.93
0.5	23.31	15.00	29.08	10.23	15.50	9.59

表 6-14 氯離子擴散係數試驗結果(混凝土齡期：91 天) [22]

t0=91	擴散係數($*10^{-12}m^2/s$)					
水膠比	C	S2	F2	S2F2	S1F4	S2F3
0.3	5.90	2.82	1.82	1.32	2.53	1.46
0.4	8.45	4.42	2.87	2.23	2.92	1.76
0.5	13.49	7.09	4.66	3.72	4.02	2.46

表 6-15 氯離子傳輸係數試驗結果(混凝土齡期：28 天) [22]

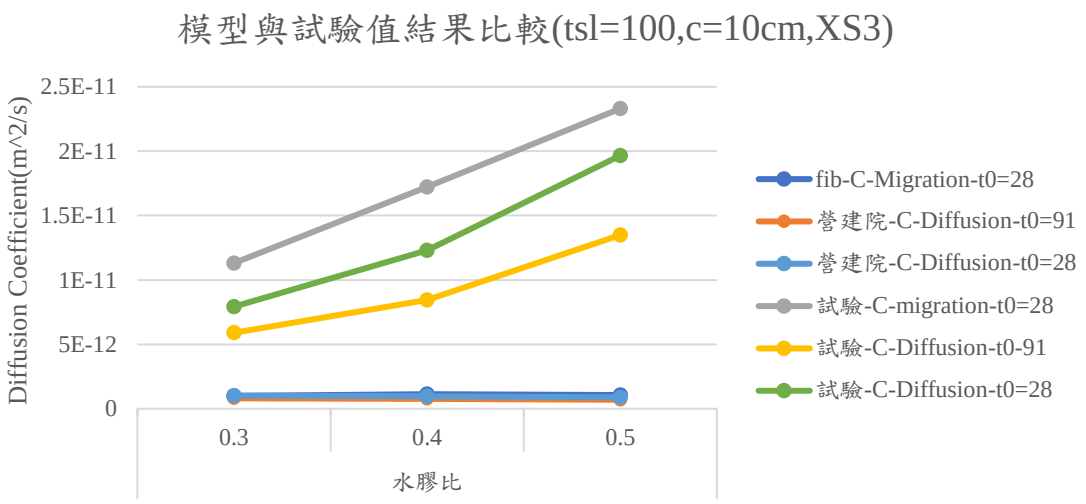
t0=28	擴散係數($*10^{-12}m^2/s$)					
水膠比	C	S2	F2	S2F2	S1F4	S2F3
0.3	7.93	3.35	4.98	1.93	2.92	1.75
0.4	12.31	5.59	5.52	3.09	3.91	2.25
0.5	19.66	6.95	10.24	3.93	6.70	4.54

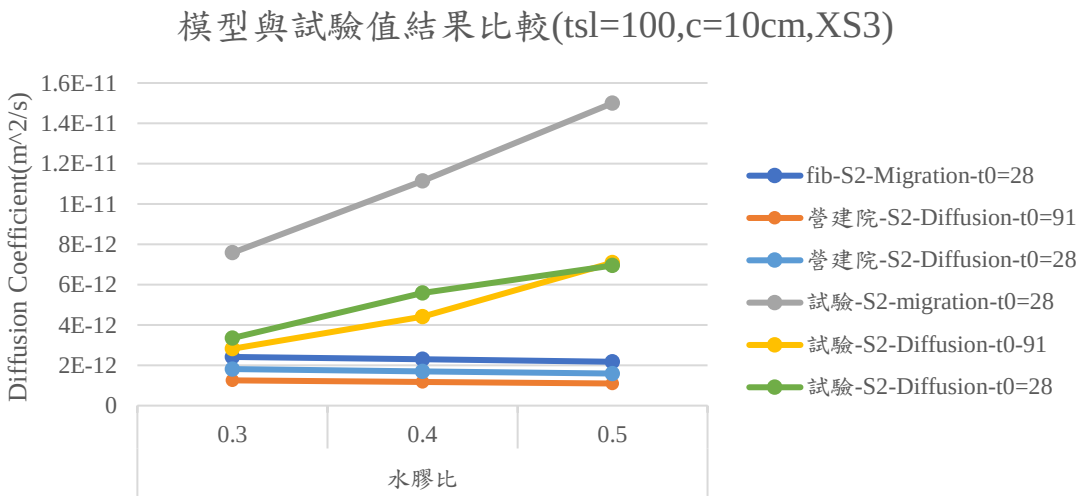
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-16 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS3，保護層厚度：10cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.09	0.14	0.13
0.4	0.07	0.09	0.08
0.5	0.05	0.05	0.04
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.32	0.44	0.54
0.4	0.21	0.27	0.30
0.5	0.14	0.15	0.23
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.41	0.83	0.46
0.4	0.30	0.49	0.39
0.5	0.18	0.28	0.20
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	1.23	1.80	2.16
0.4	0.69	1.00	1.27
0.5	0.52	0.56	0.93
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	–	2.20	3.53
0.4	–	1.72	2.58
0.5	–	1.15	1.20
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.38	2.36
0.4	-	1.12	1.66
0.5	-	0.76	0.90

doi:10.6342/NTU202503522





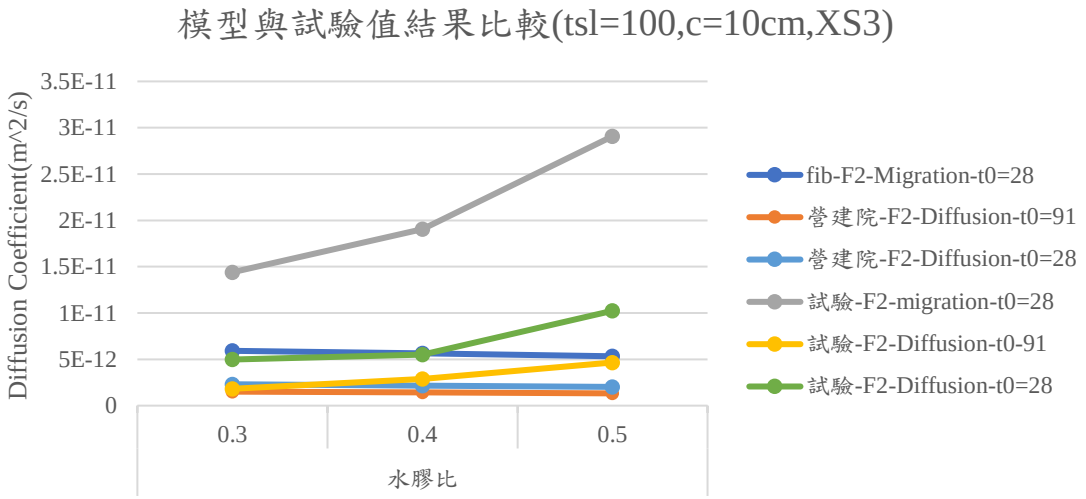
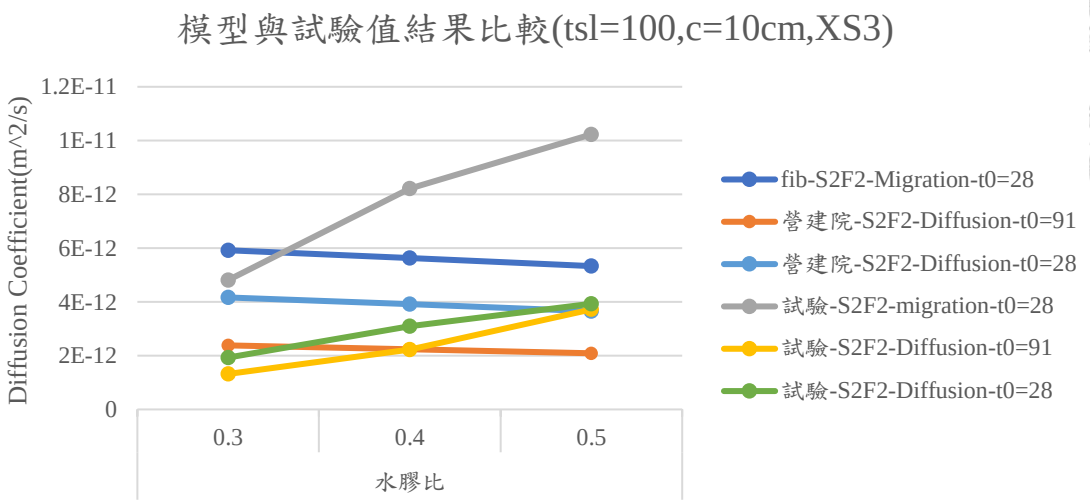
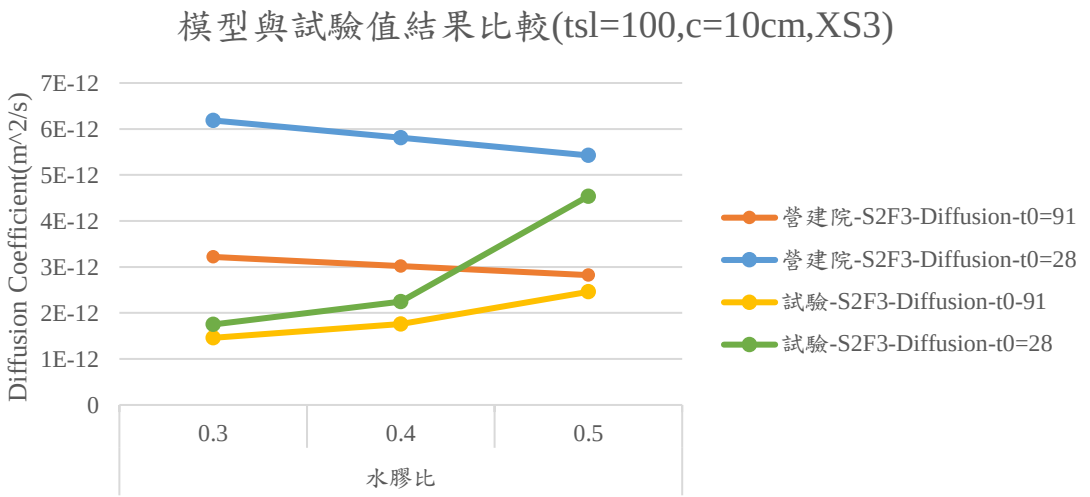


圖 6-2 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=10cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





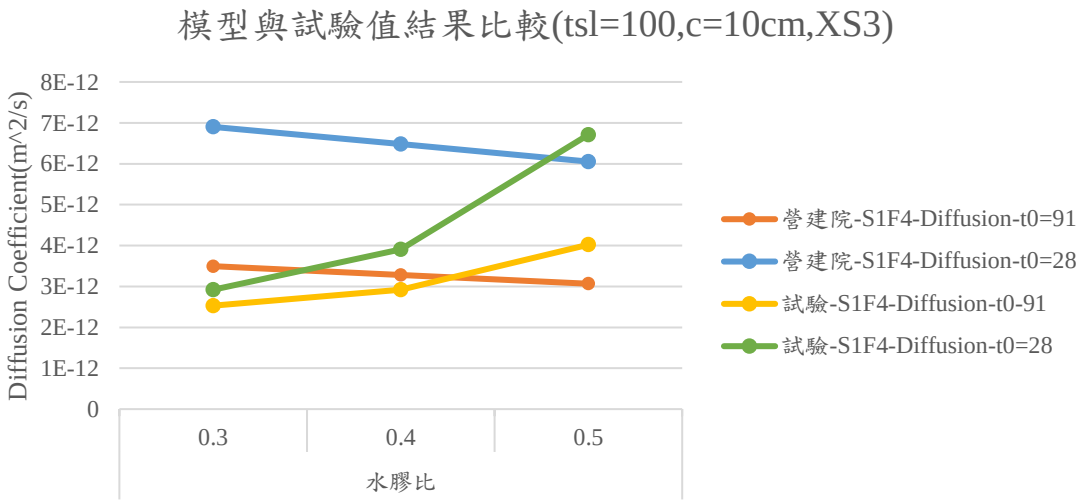


圖 6-3 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=10cm,XS3)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-17 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS3，保護層厚度：8cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.06	0.09	0.08
0.4	0.04	0.06	0.05
0.5	0.03	0.03	0.03
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.19	0.28	0.35
0.4	0.13	0.17	0.20
0.5	0.09	0.10	0.15
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.25	0.53	0.30
0.4	0.18	0.32	0.25
0.5	0.11	0.18	0.13
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.74	1.15	1.38
0.4	0.42	0.64	0.81
0.5	0.32	0.36	0.59
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.41	2.26
0.4	-	1.10	1.65
0.5	-	0.73	0.76
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	0.88	1.51
0.4	-	0.72	1.06
0.5	-	0.49	0.58

doi:10.6342/NTU202503522

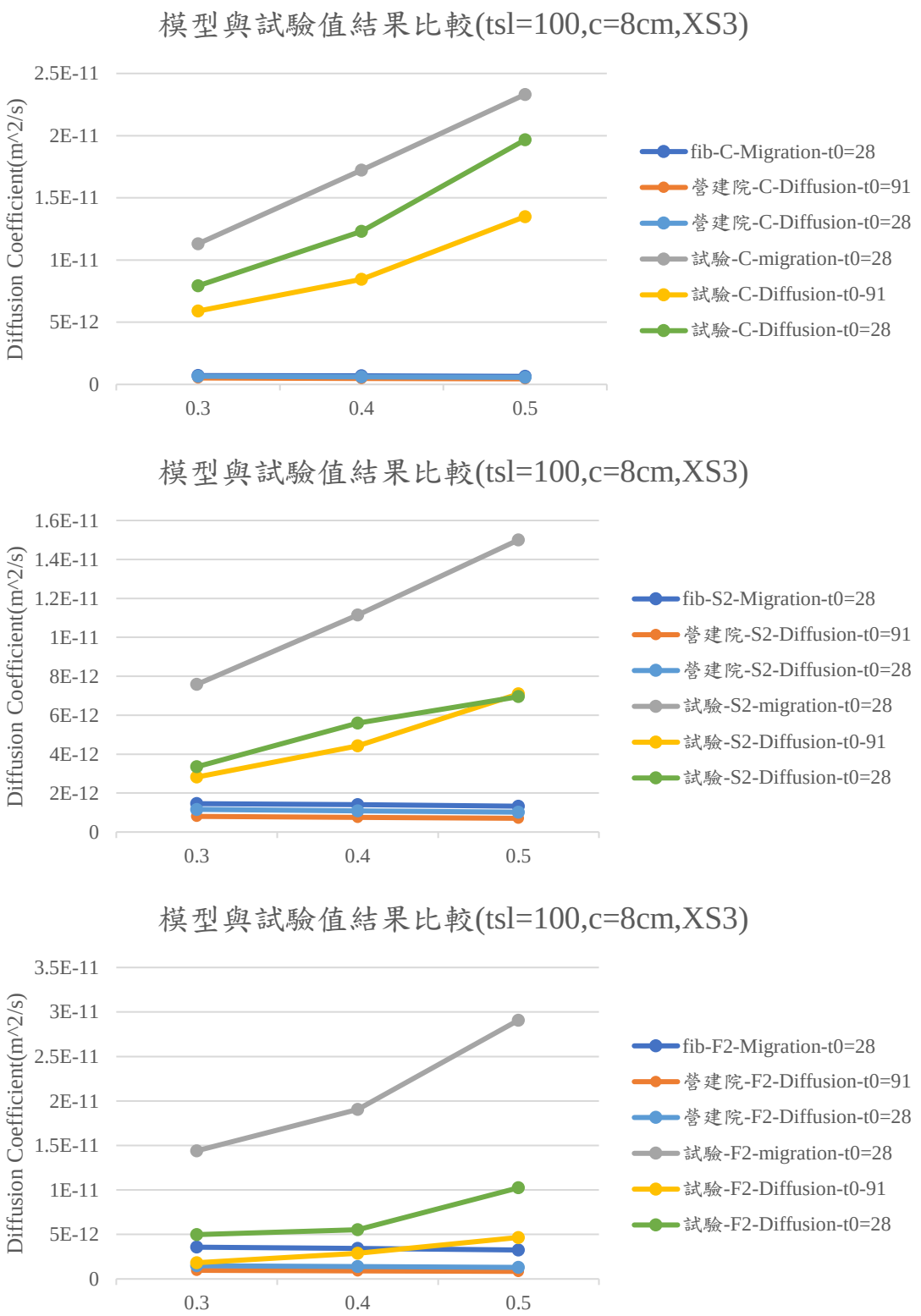
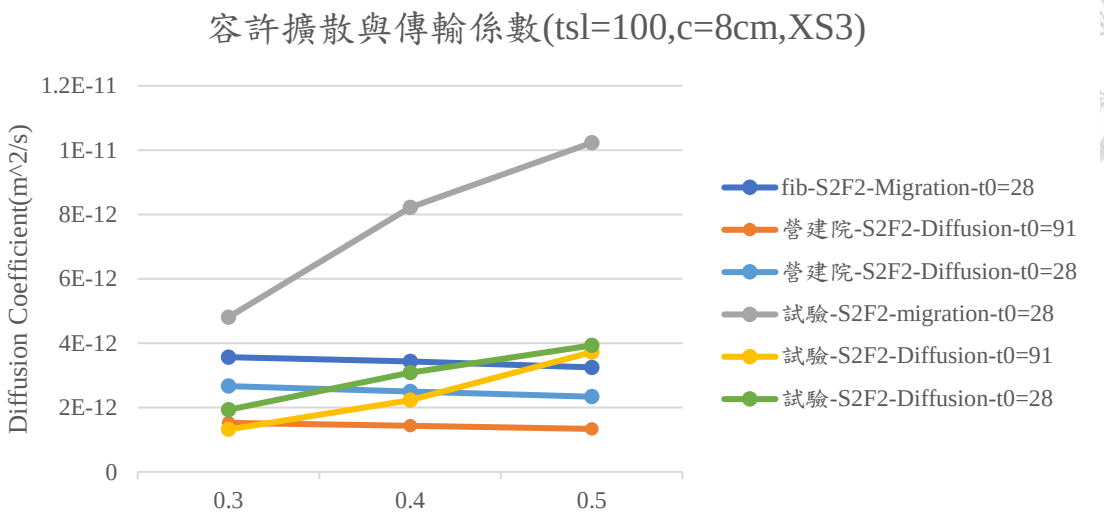
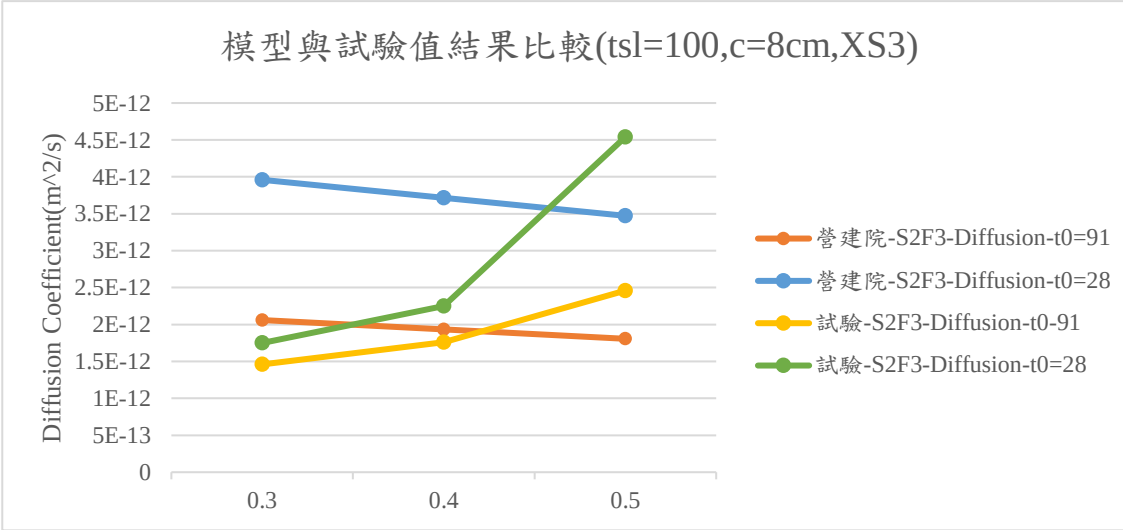


圖 6-4 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





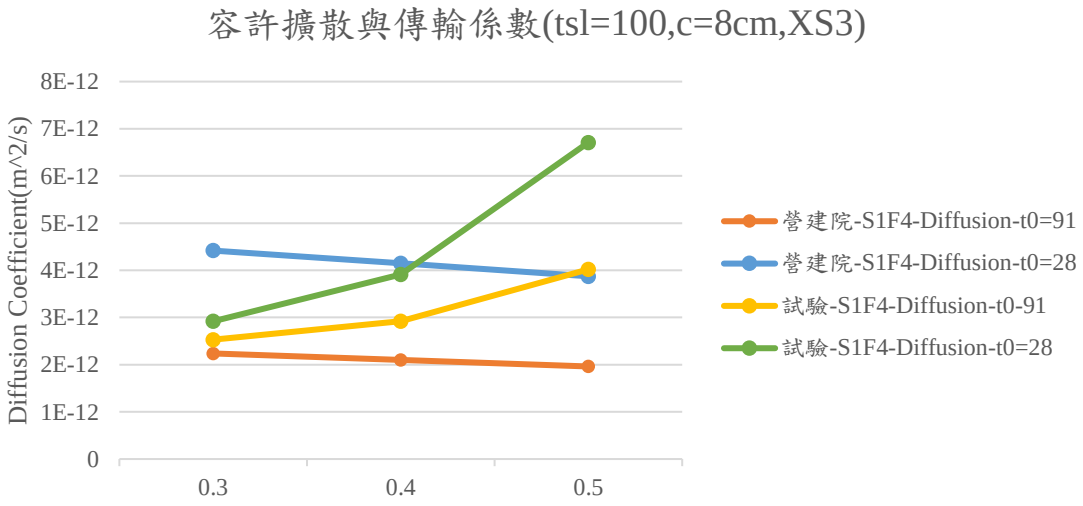


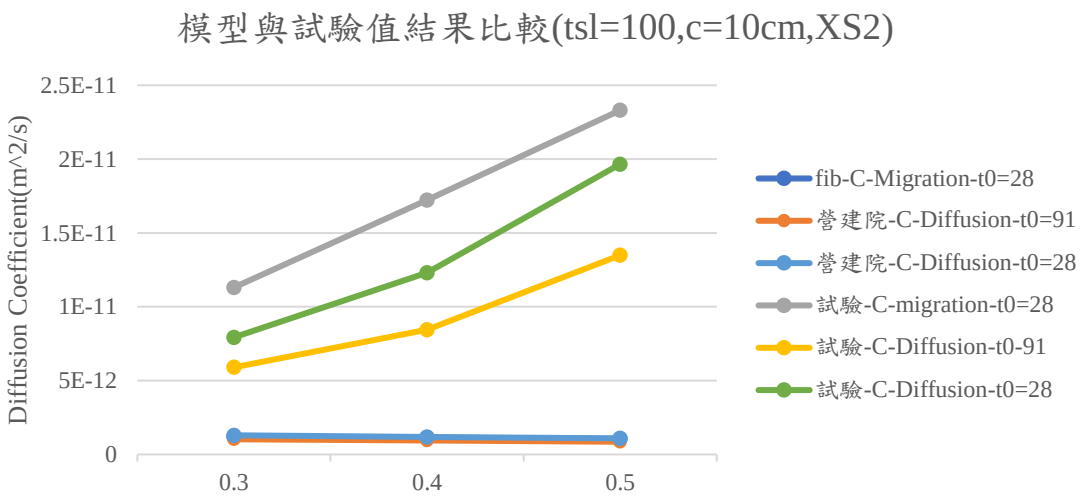
圖 6-5 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS3)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

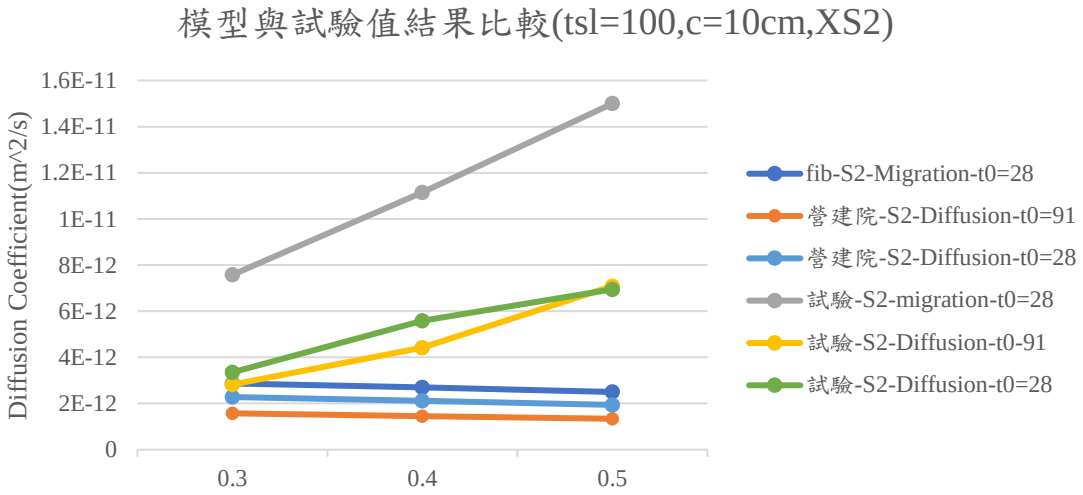
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-18 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS2，保護層厚度：10cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.11	0.17	0.16
0.4	0.07	0.11	0.10
0.5	0.05	0.06	0.06
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.38	0.56	0.68
0.4	0.24	0.33	0.38
0.5	0.17	0.19	0.28
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.49	1.04	0.58
0.4	0.35	0.61	0.49
0.5	0.21	0.35	0.24
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	1.46	2.27	2.71
0.4	0.81	1.24	1.57
0.5	0.60	0.68	1.13
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.77	4.44
0.4	-	2.13	3.20
0.5	-	1.40	1.46
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.74	2.97
0.4	-	1.39	2.05
0.5	-	0.93	1.10

doi:10.6342/NTU202503522





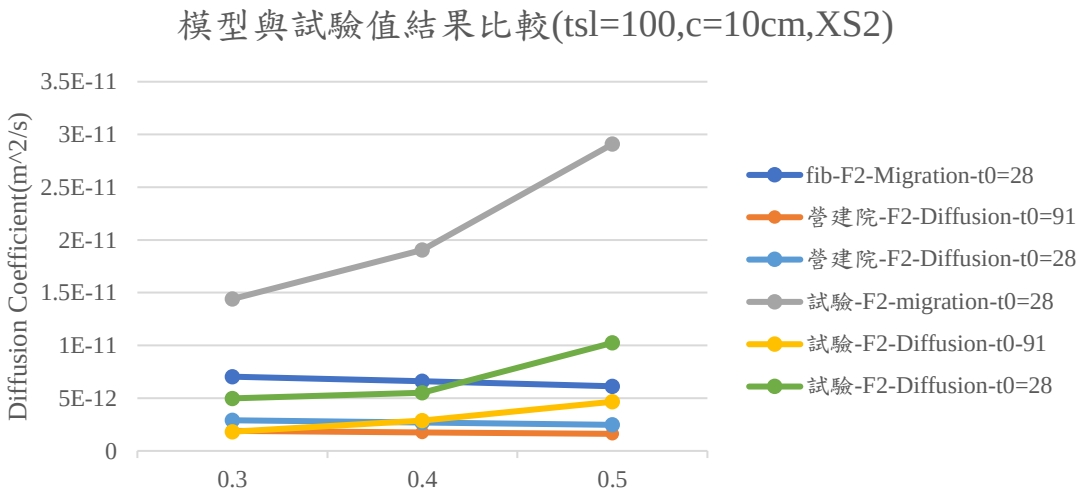
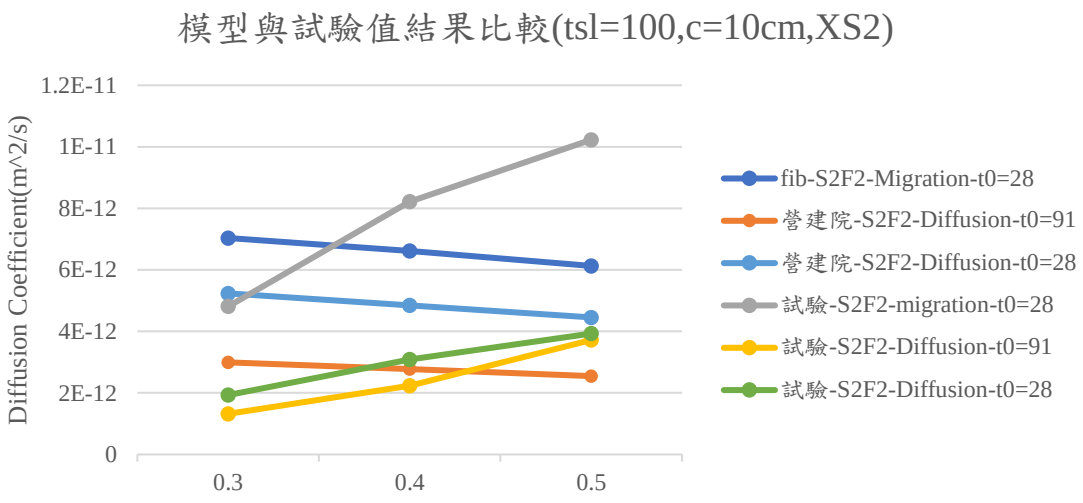
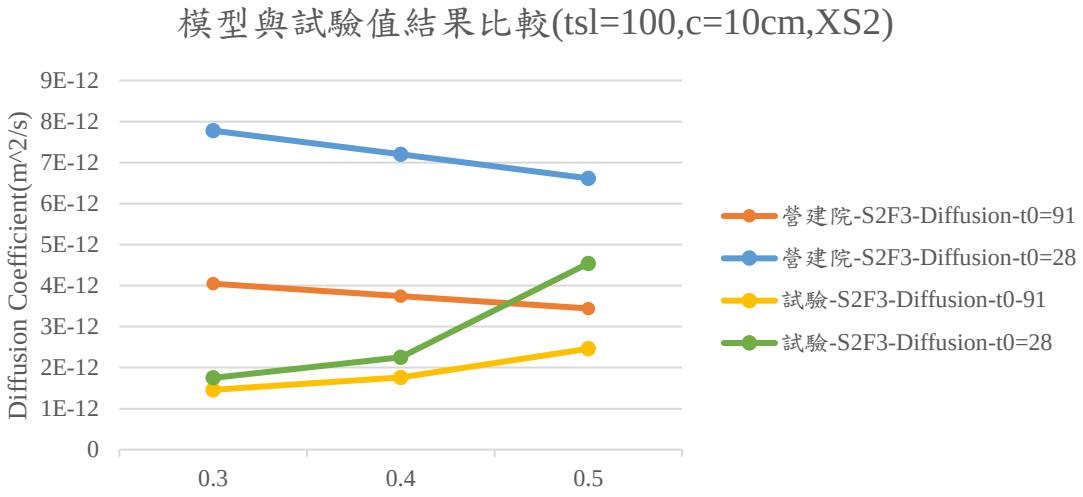


圖 6-6 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=10cm,XS2)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





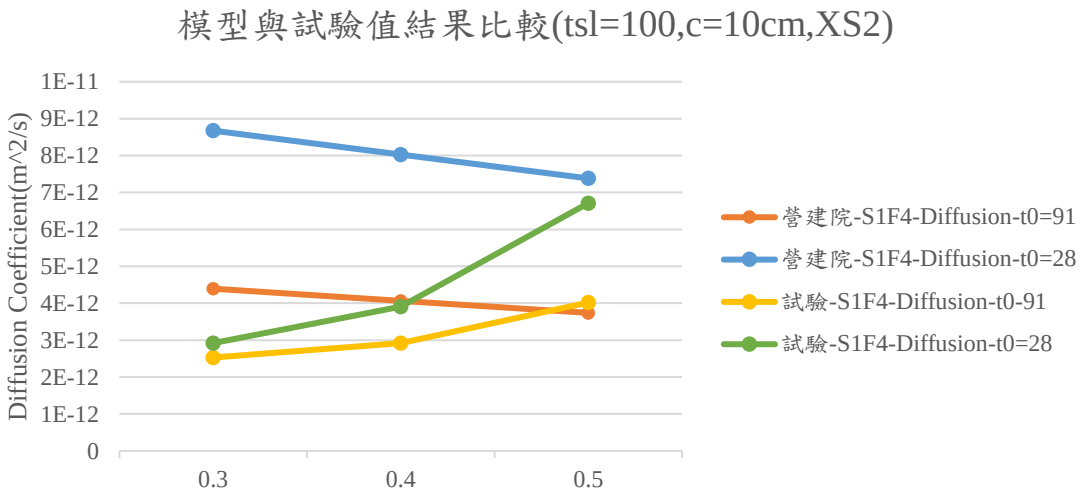


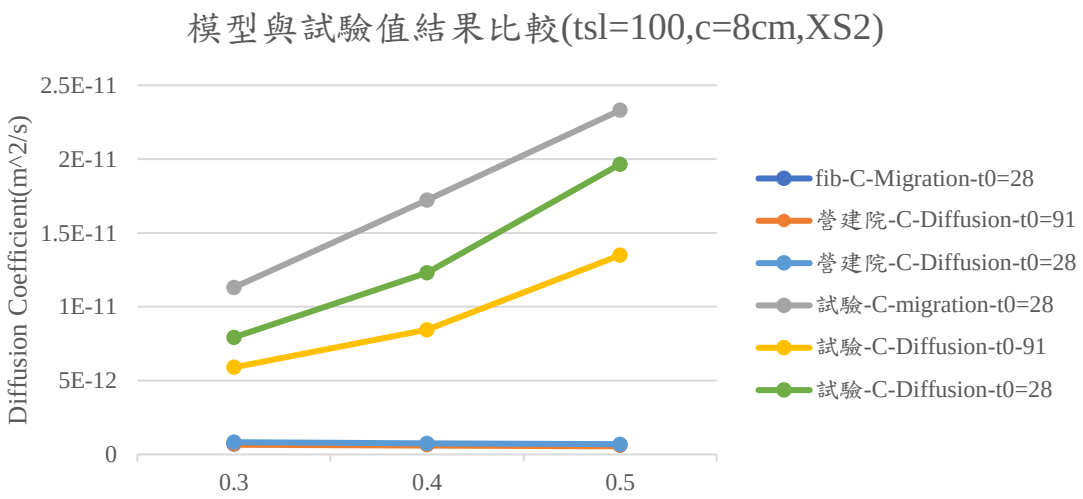
圖 6-7 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=10cm,XS2)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

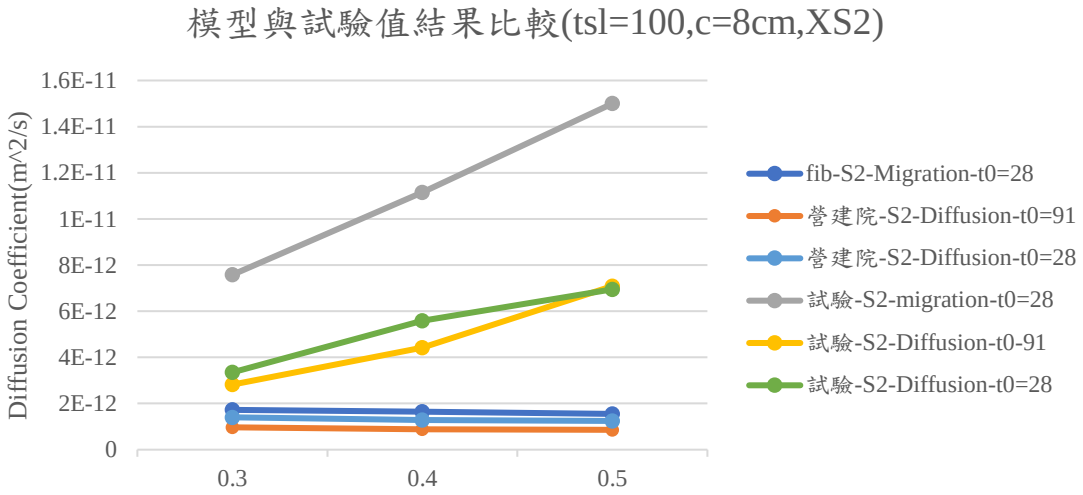
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-19 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS2，保護層厚度：8cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.06	0.11	0.10
0.4	0.04	0.07	0.06
0.5	0.03	0.04	0.04
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.23	0.34	0.42
0.4	0.15	0.20	0.23
0.5	0.10	0.12	0.18
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.29	0.64	0.36
0.4	0.21	0.37	0.30
0.5	0.13	0.22	0.15
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.88	1.39	1.67
0.4	0.49	0.76	0.96
0.5	0.37	0.44	0.73
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.70	2.73
0.4	-	1.30	1.95
0.5	-	0.90	0.93
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.07	1.83
0.4	-	0.85	1.25
0.5	-	0.60	0.71

doi:10.6342/NTU202503522





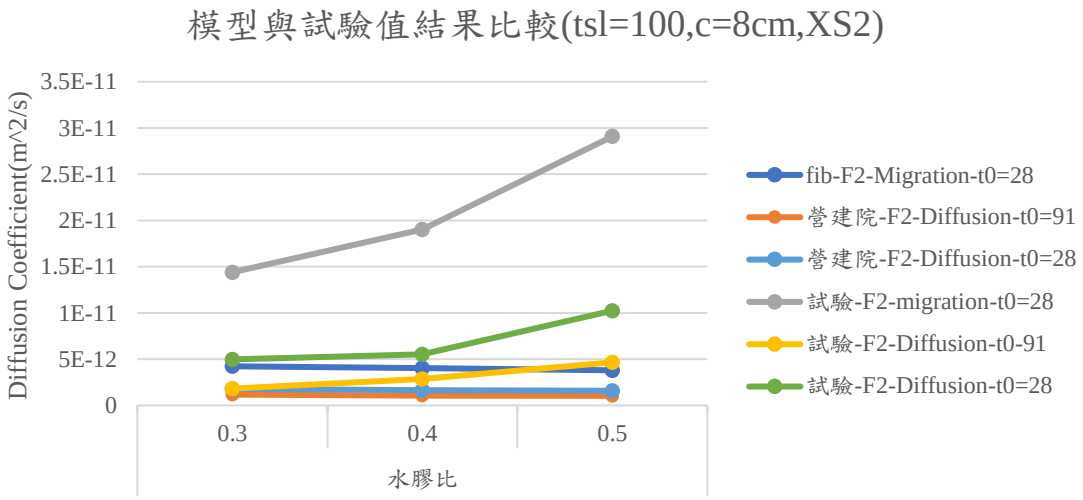


圖 6-8 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS2)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

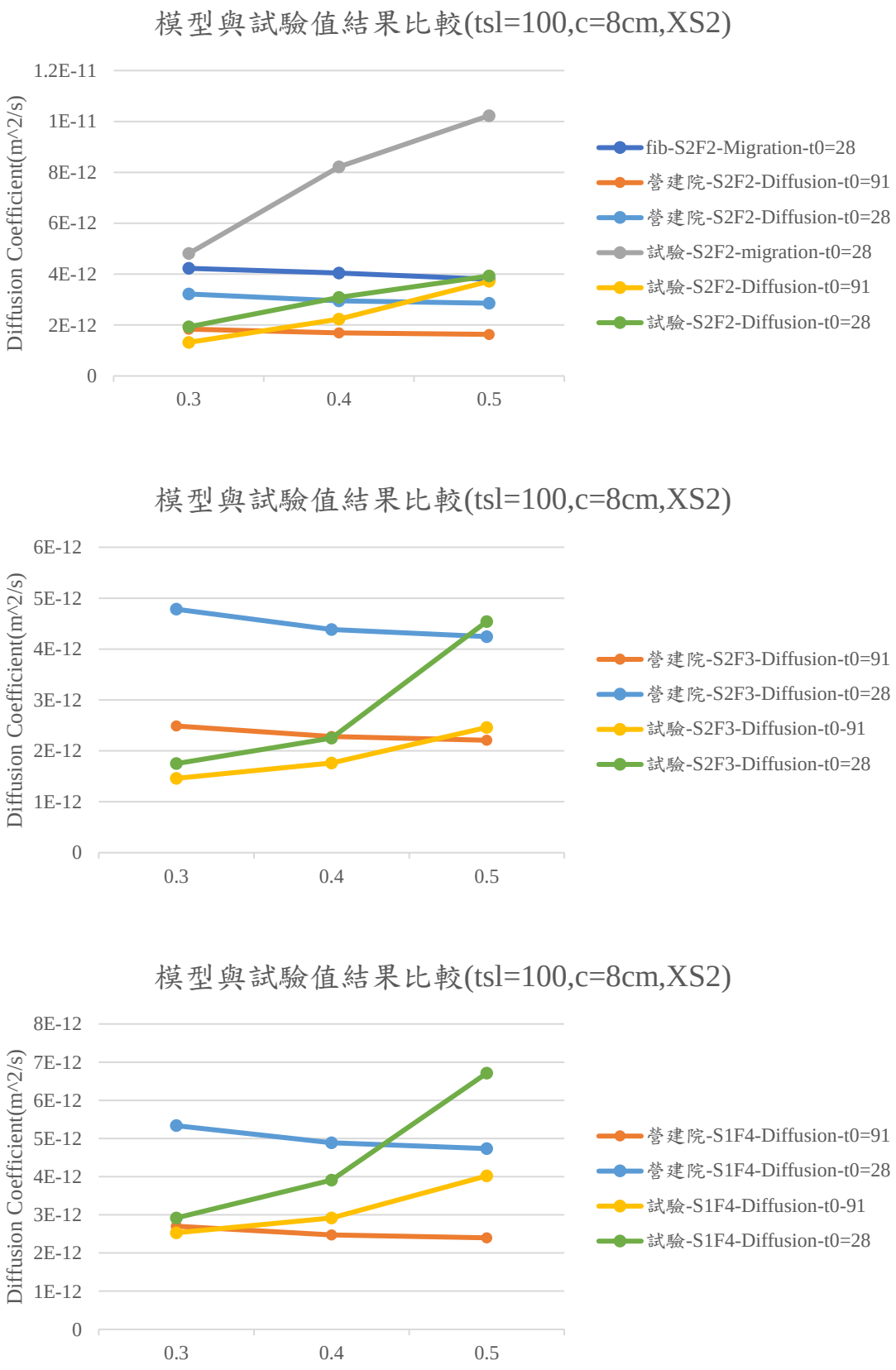


圖 6-9 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS2)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-20 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：10cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.15	0.31	0.29
0.4	0.10	0.19	0.16
0.5	0.06	0.04	0.04
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.55	0.95	1.16
0.4	0.35	0.54	0.62
0.5	0.24	0.30	0.44
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.71	1.78	1.00
0.4	0.50	1.00	0.80
0.5	0.30	0.55	0.38
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	2.13	3.87	4.63
0.4	1.15	2.04	2.57
0.5	0.85	1.09	1.80
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	4.73	7.58
0.4	-	3.49	5.24
0.5	-	2.23	2.32
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.96	5.07
0.4	-	2.28	3.37
0.5	-	1.48	1.75

doi:10.6342/NTU202503522

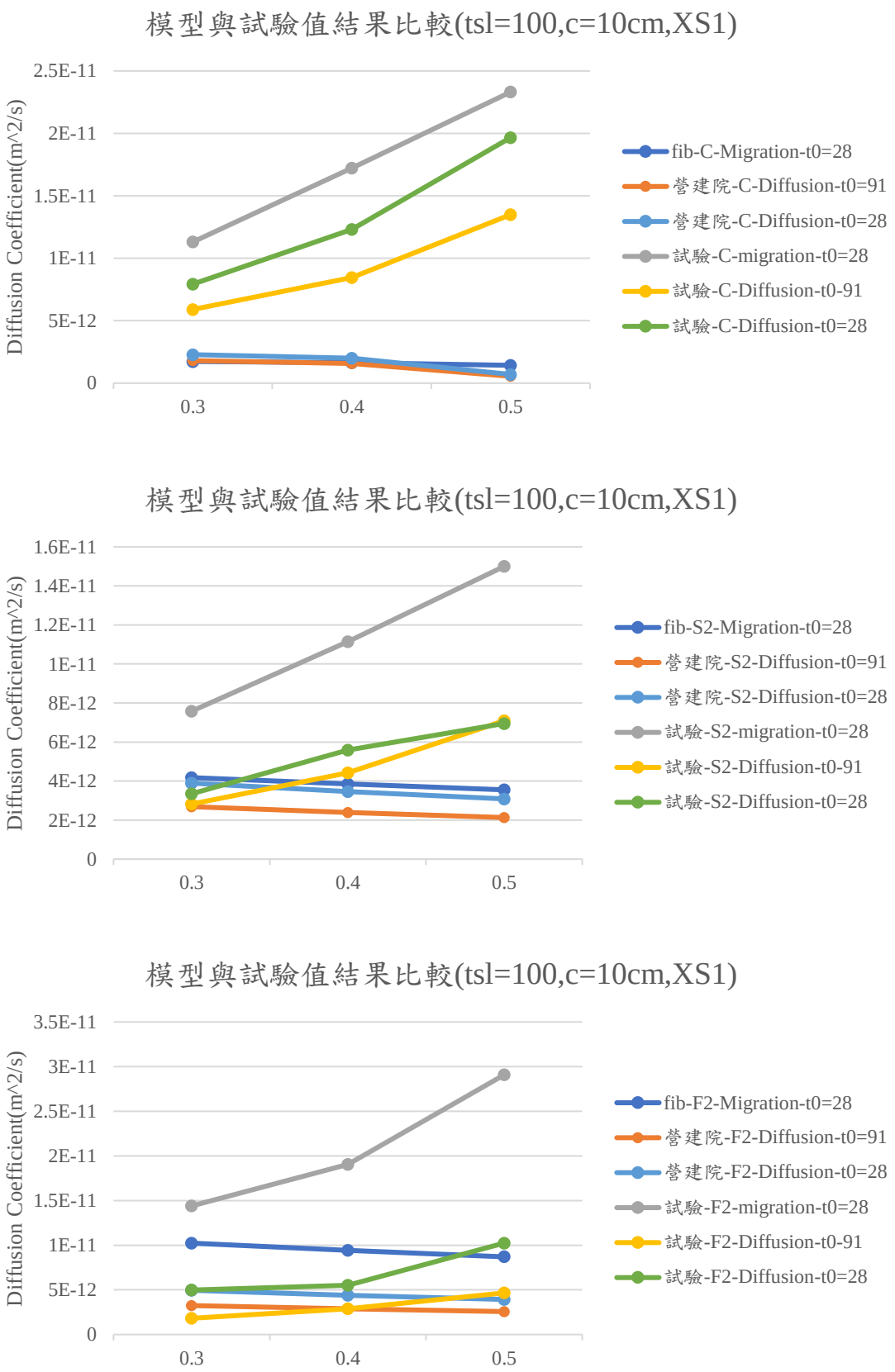
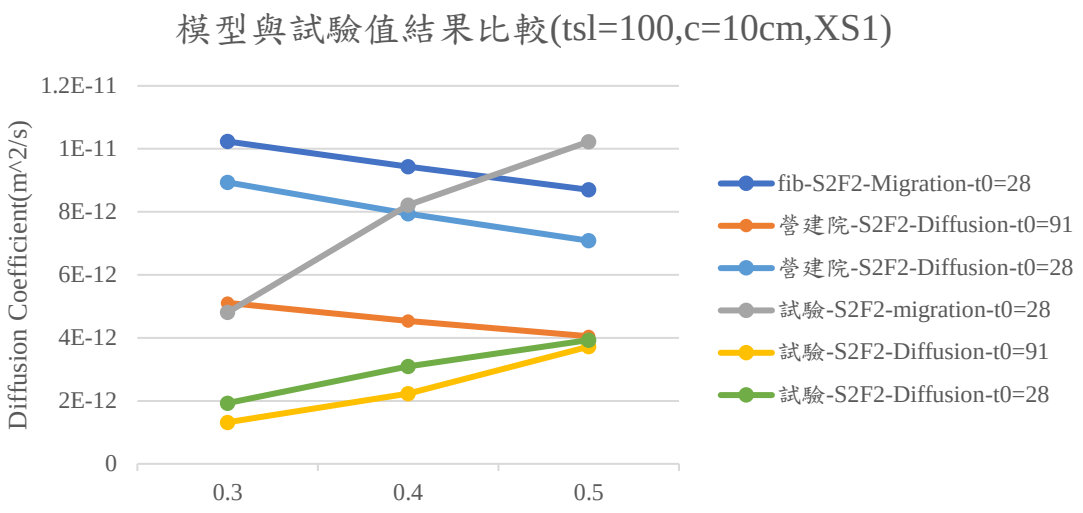
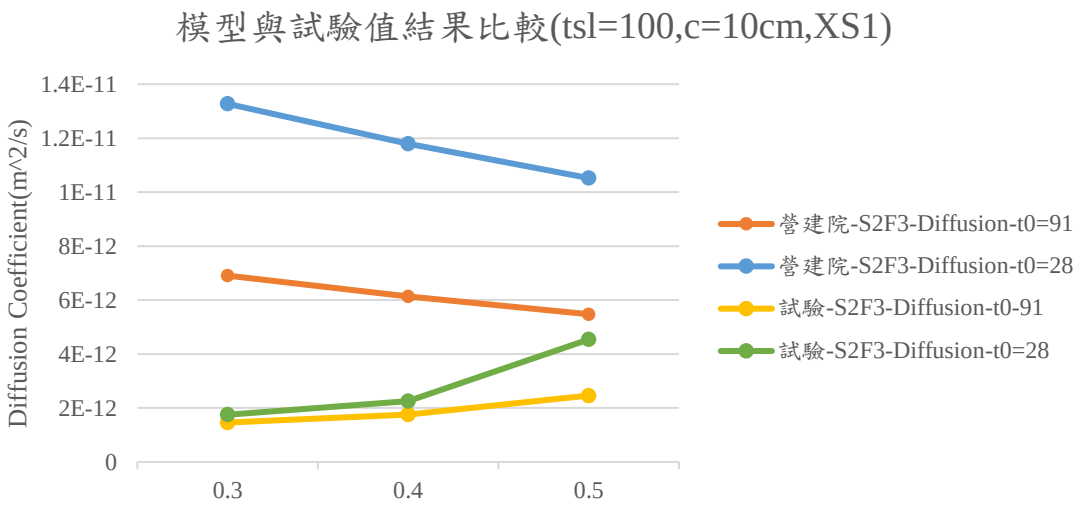


圖 6-10 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=10cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





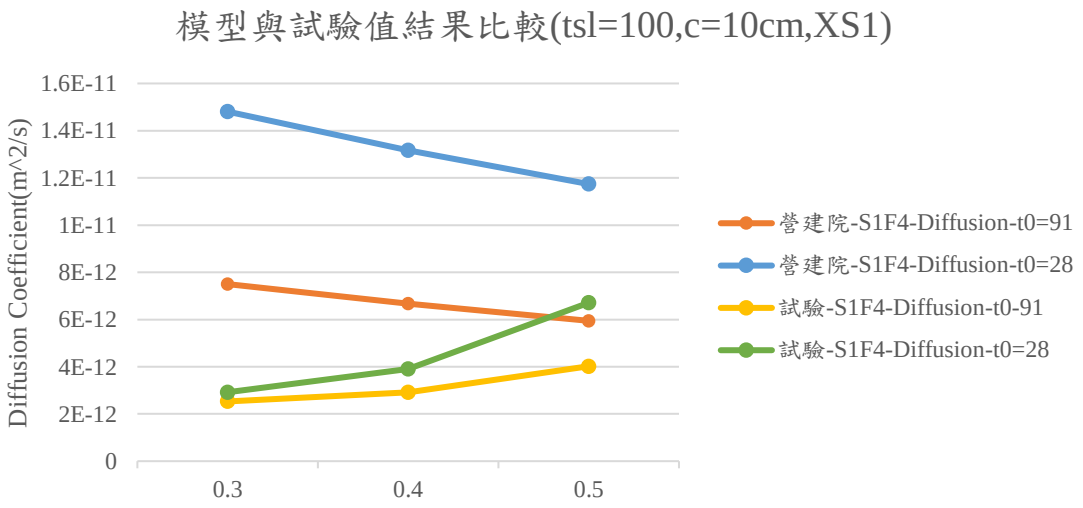


圖 6-11 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=10cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-21 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：8cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.10	0.19	0.18
0.4	0.06	0.12	0.10
0.5	0.04	0.07	0.06
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.33	0.61	0.74
0.4	0.20	0.35	0.40
0.5	0.14	0.19	0.28
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.43	1.14	0.64
0.4	0.29	0.64	0.51
0.5	0.18	0.35	0.24
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	1.29	2.48	2.97
0.4	0.67	1.30	1.65
0.5	0.52	0.69	1.15
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	3.03	4.86
0.4	-	2.23	3.36
0.5	-	1.42	1.47
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.90	3.25
0.4	-	1.46	2.16
0.5	-	0.94	1.11

doi:10.6342/NTU202503522

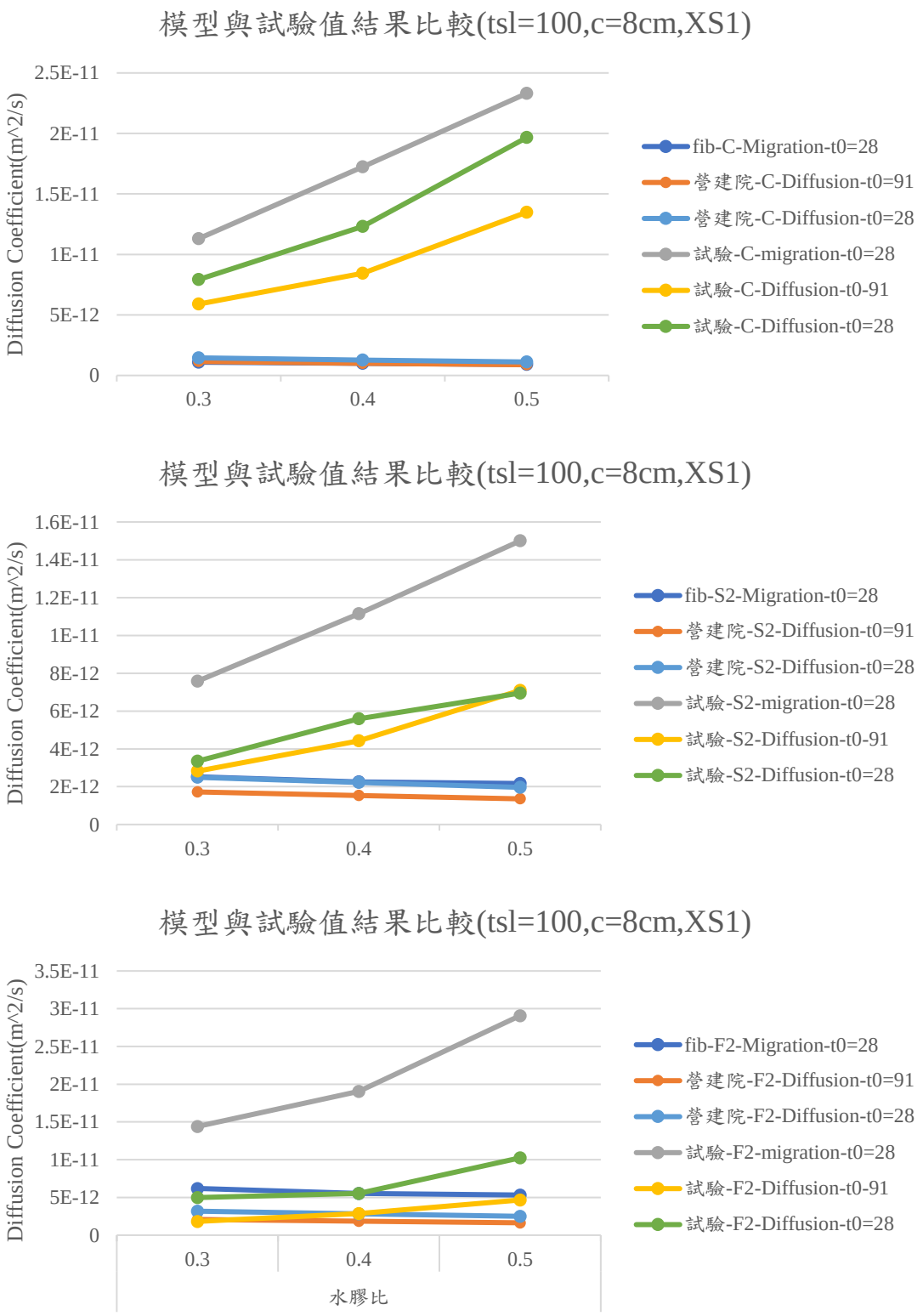


圖 6-12 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

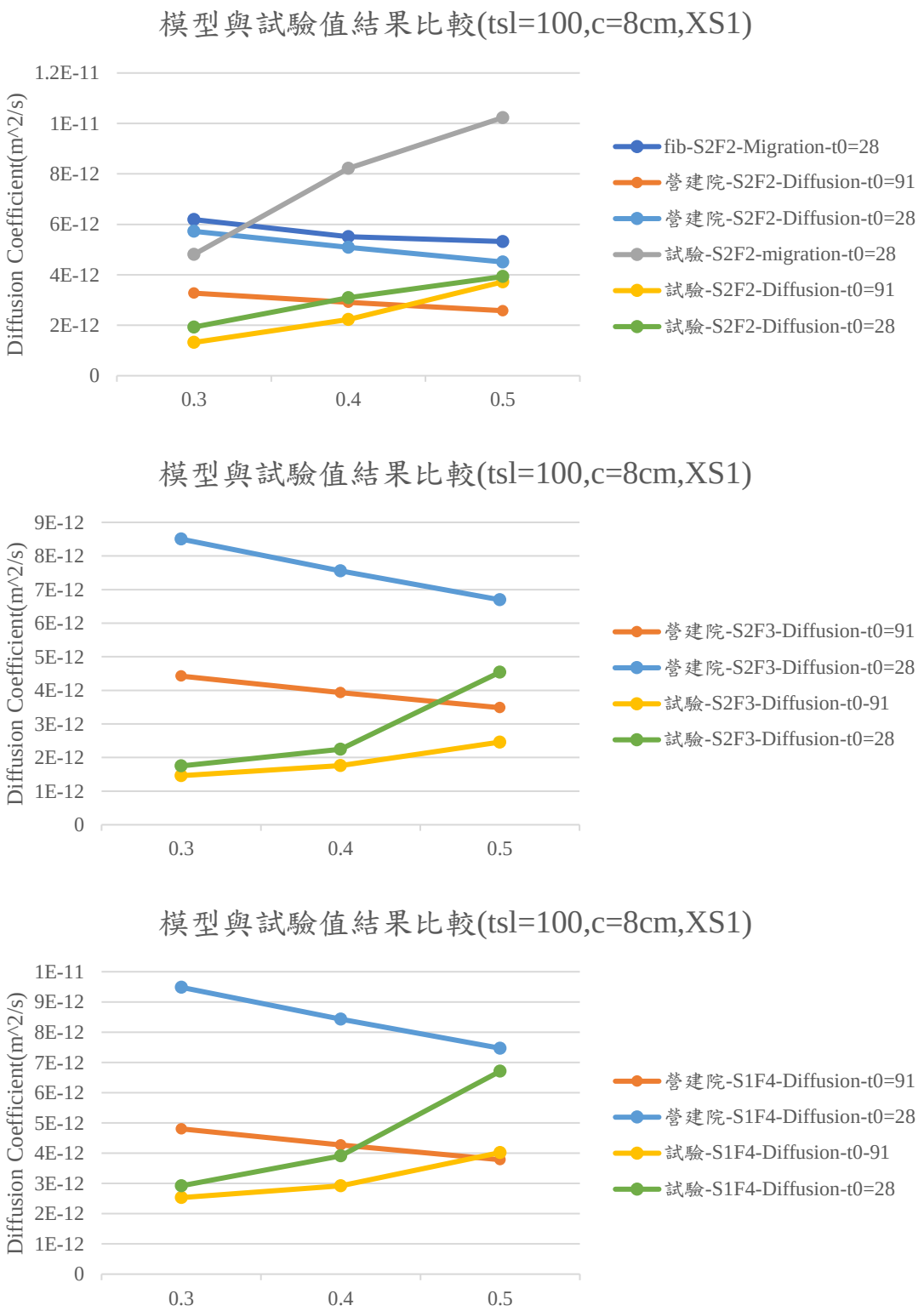


圖 6-13 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-22 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：6cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.05	0.11	0.10
0.4	0.03	0.07	0.06
0.5	0.02	0.04	0.03
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.16	0.34	0.42
0.4	0.11	0.19	0.22
0.5	0.08	0.11	0.16
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.21	0.64	0.36
0.4	0.15	0.36	0.29
0.5	0.10	0.20	0.14
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.64	1.39	1.67
0.4	0.36	0.73	0.93
0.5	0.28	0.77	0.64
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.70	2.73
0.4	-	1.26	1.89
0.5	-	0.79	0.83
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.07	1.83
0.4	-	0.82	1.21
0.5	-	0.53	0.62

doi:10.6342/NTU202503522

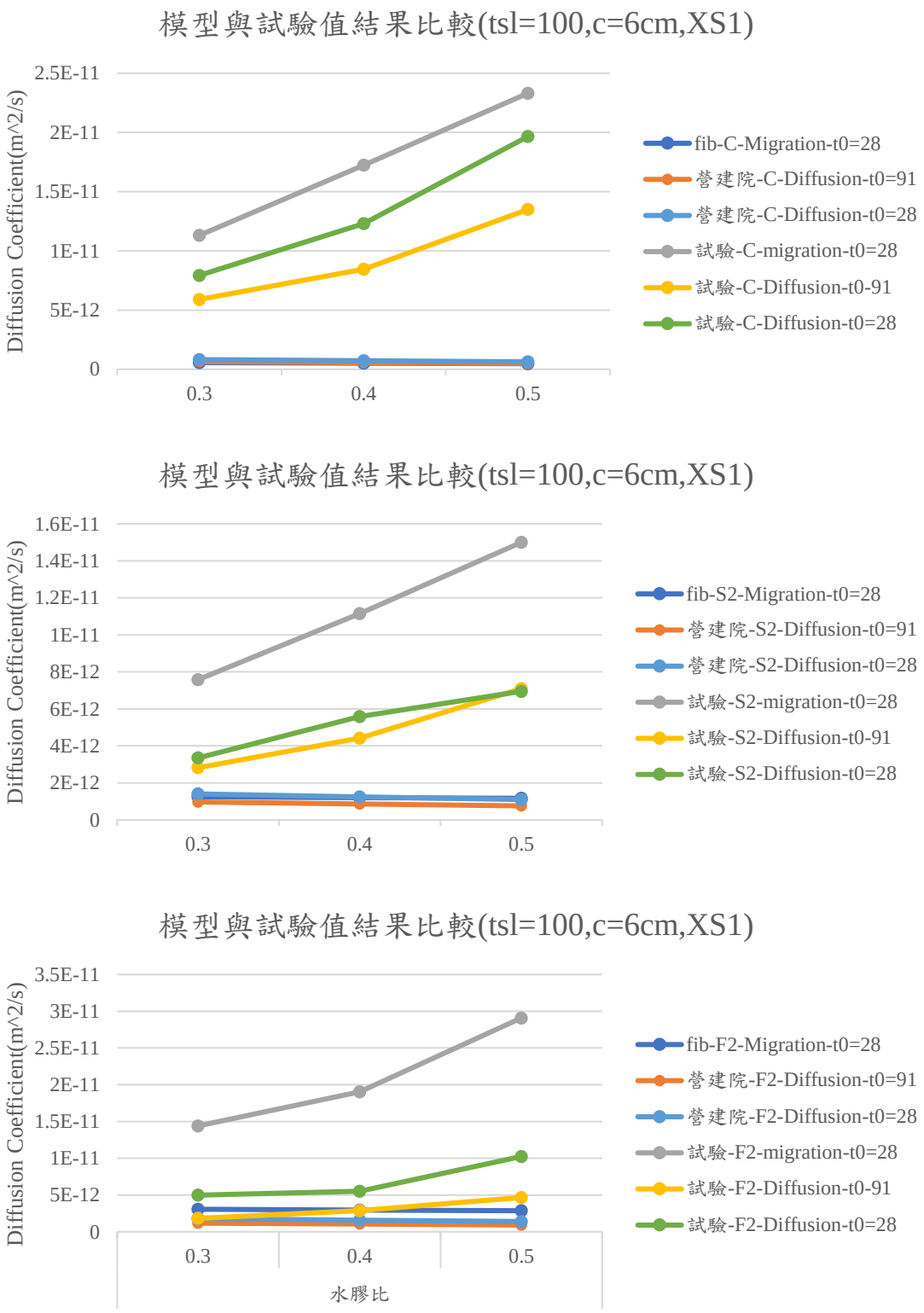


圖 6-14 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=6cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

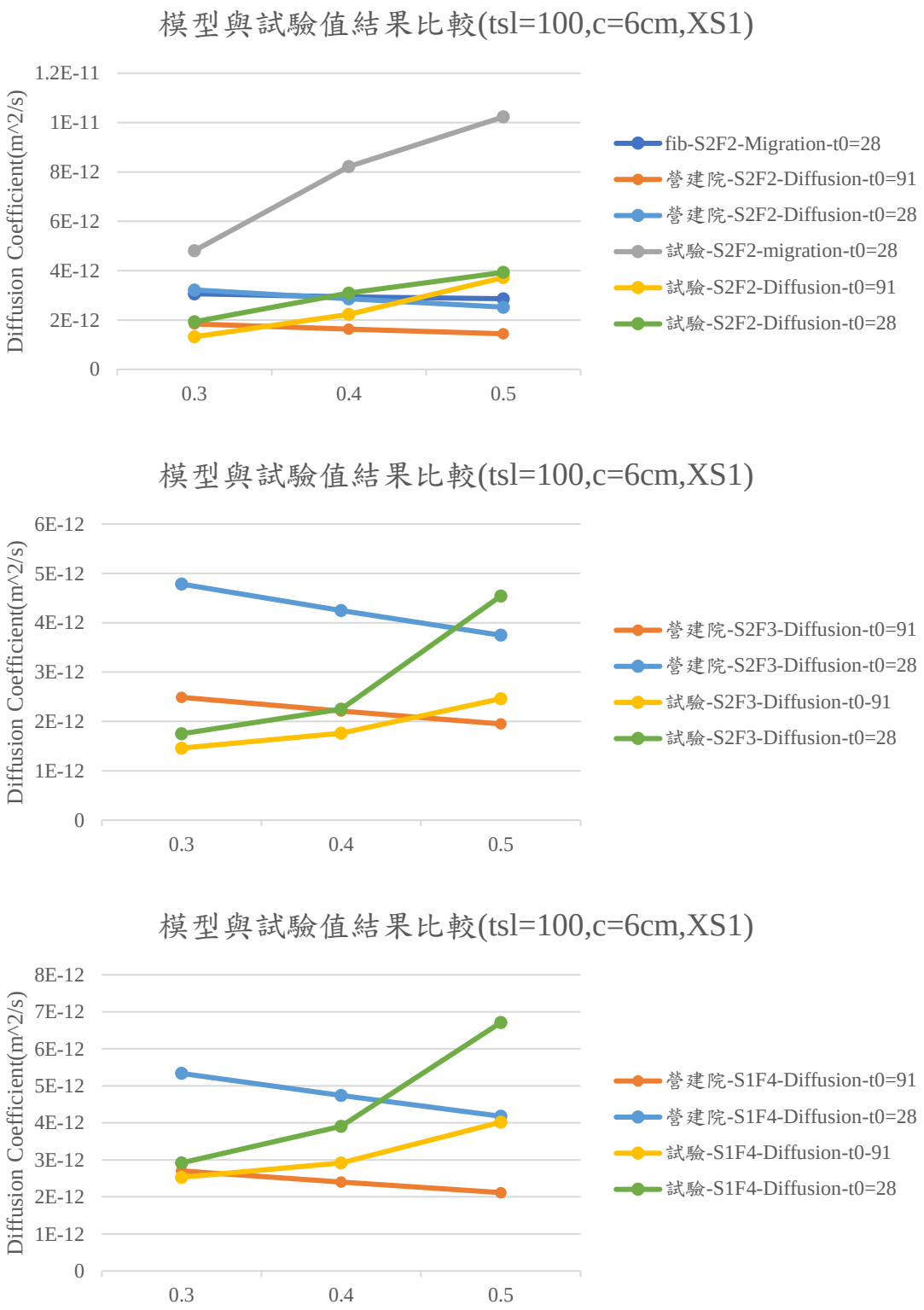


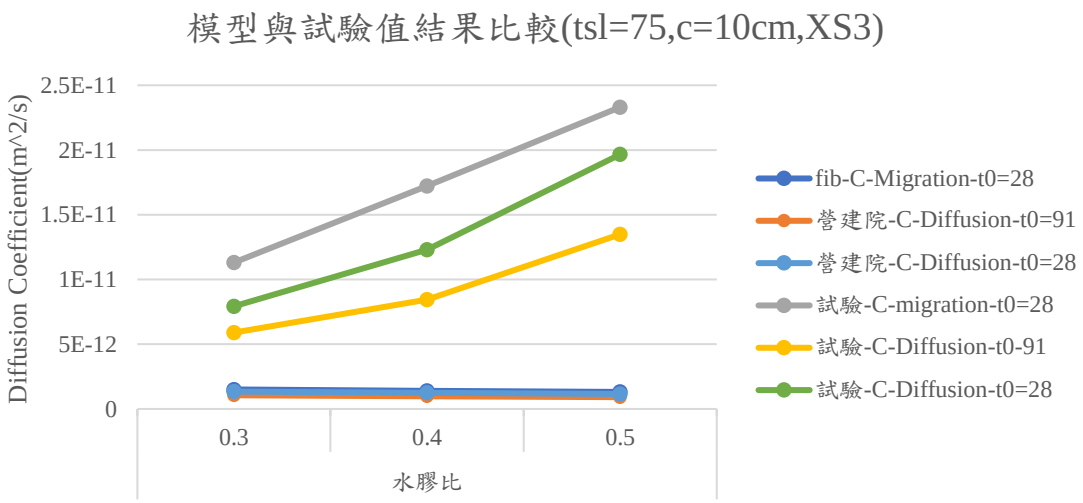
圖 6-15 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=6cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

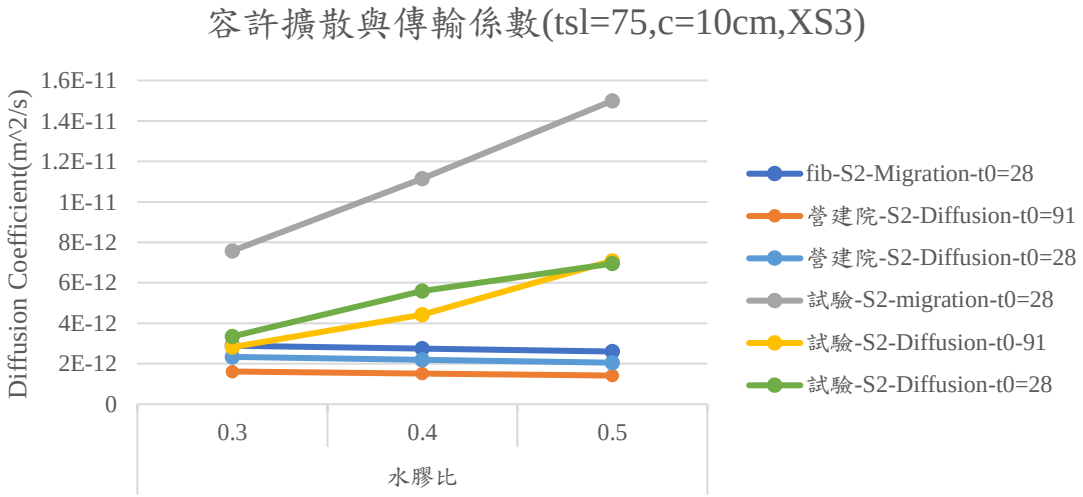
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-23 各配比 DI 結果（使用年限：75 年，曝露環境：XS3，保護層厚度：10cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.13	0.18	0.17
0.4	0.08	0.12	0.10
0.5	0.06	0.07	0.06
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.38	0.57	0.70
0.4	0.25	0.34	0.39
0.5	0.17	0.20	0.30
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.47	1.06	0.59
0.4	0.34	0.63	0.50
0.5	0.21	0.36	0.25
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	1.42	2.27	2.71
0.4	0.79	1.26	1.59
0.5	0.60	0.71	1.17
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.72	4.37
0.4	-	2.12	3.19
0.5	-	1.42	1.48
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.70	2.90
0.4	-	1.38	2.04
0.5	-	0.94	1.11

doi:10.6342/NTU202503522





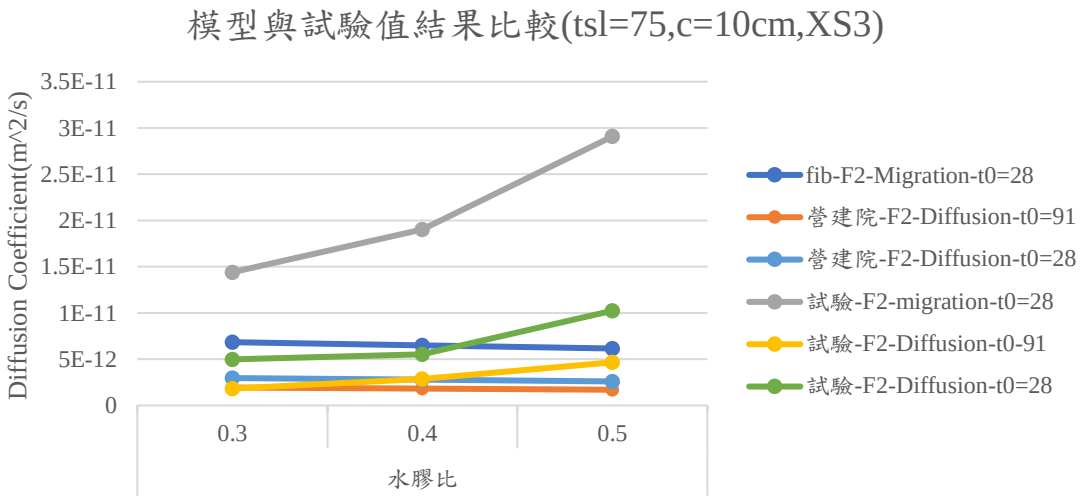


圖 6-16 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=10cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

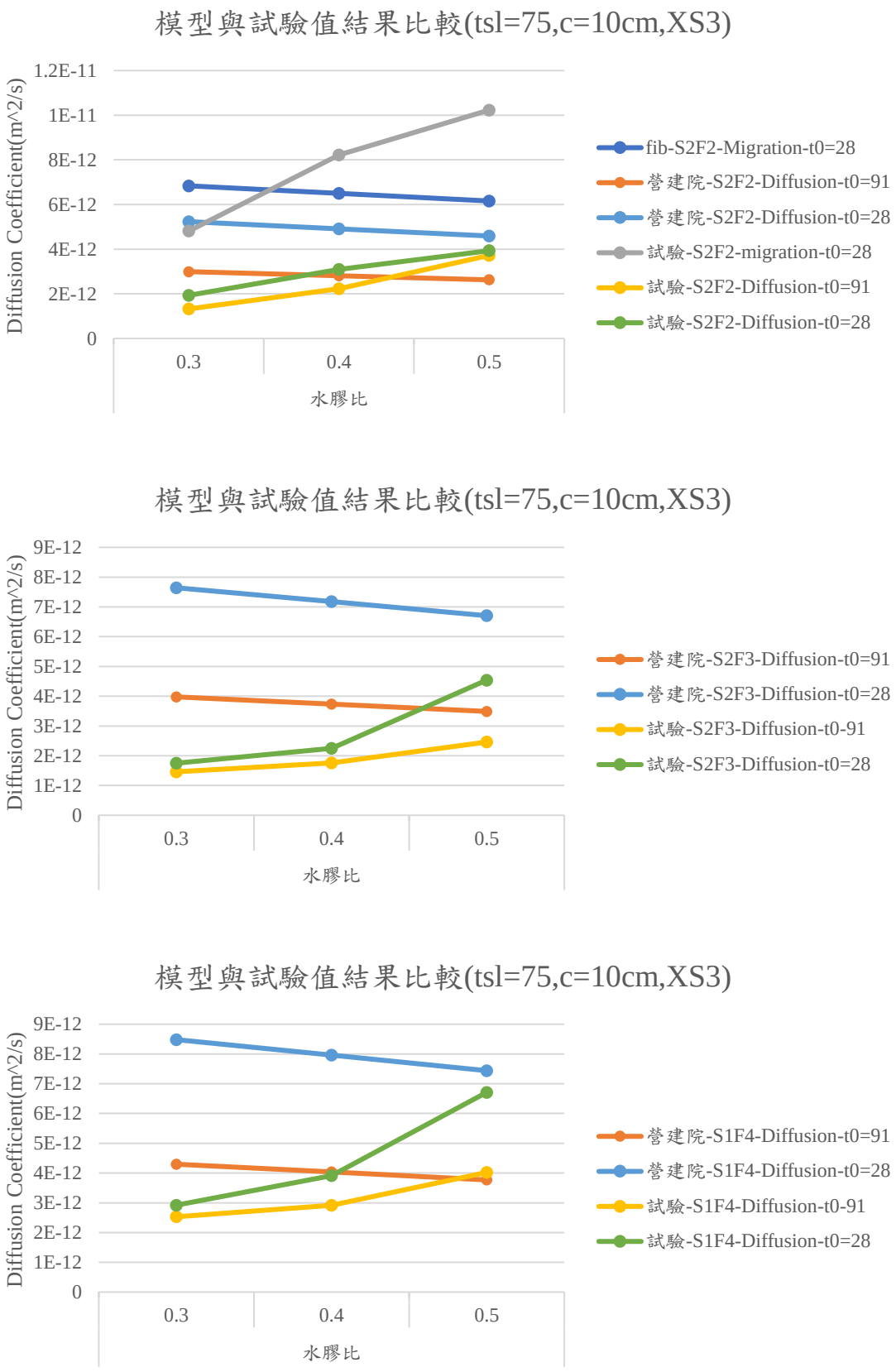


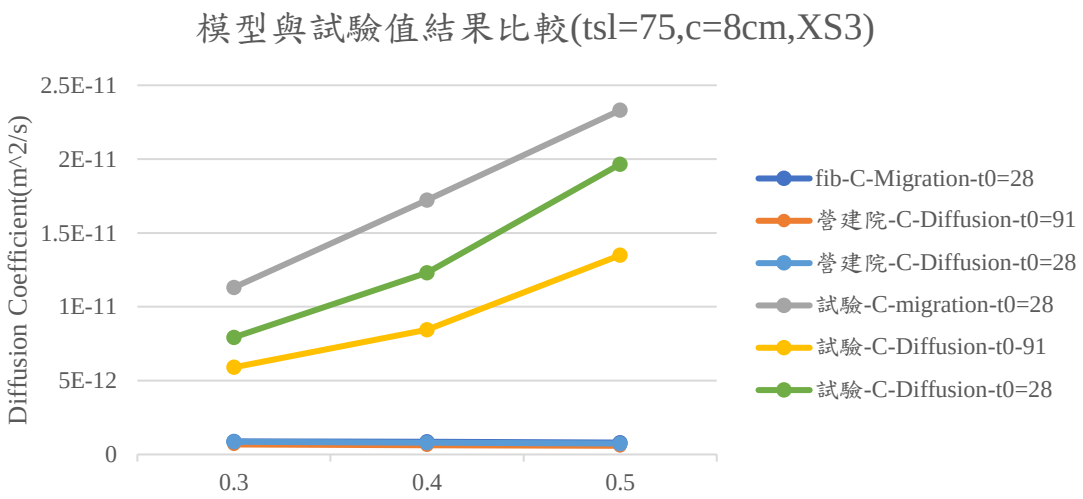
圖 6-17 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=10cm,XS3)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

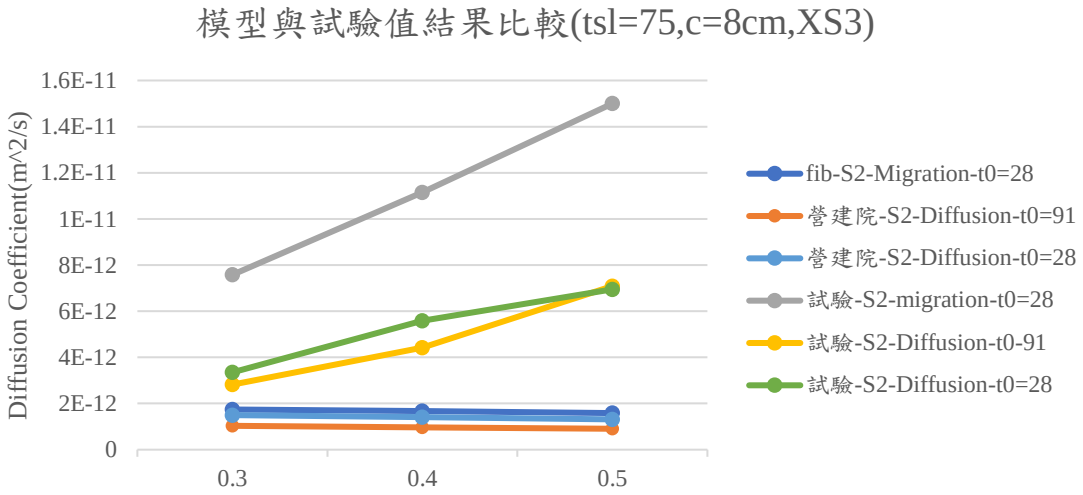
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-24 各配比 DI 結果（使用年限：100 年，曝露環境：XS3，保護層厚度：8cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.08	0.11	0.11
0.4	0.05	0.07	0.06
0.5	0.03	0.04	0.04
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.23	0.37	0.45
0.4	0.15	0.22	0.25
0.5	0.11	0.13	0.19
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.29	0.68	0.38
0.4	0.21	0.41	0.32
0.5	0.13	0.23	0.16
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.86	1.45	1.74
0.4	0.48	0.81	1.02
0.5	0.37	0.45	0.75
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.74	2.80
0.4	-	1.36	2.04
0.5	-	0.91	0.95
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.09	1.86
0.4	-	0.88	1.30
0.5	-	0.60	0.71

doi:10.6342/NTU202503522





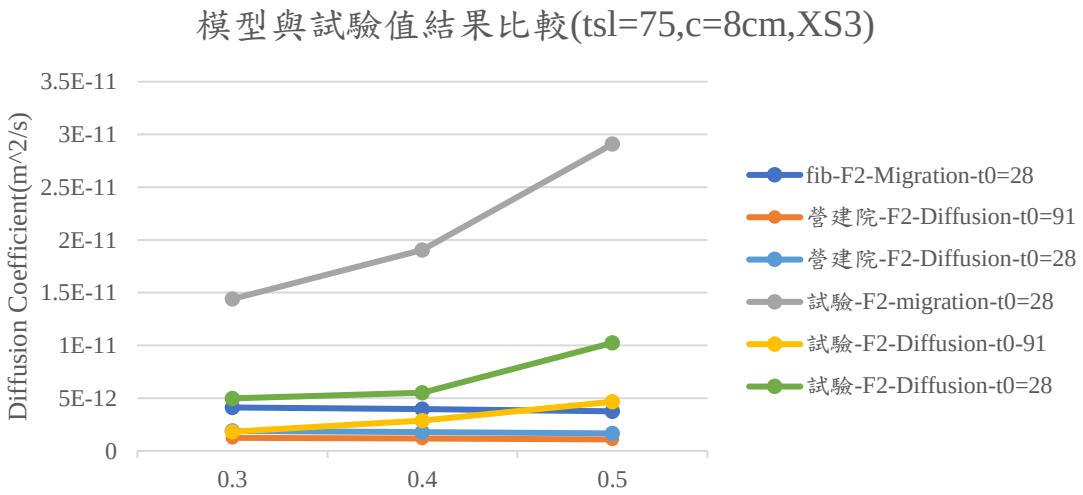
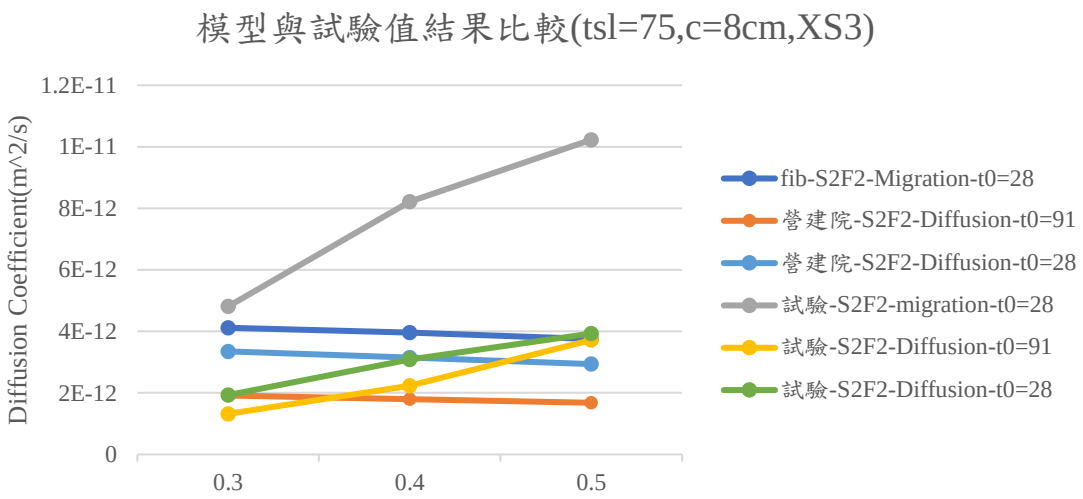
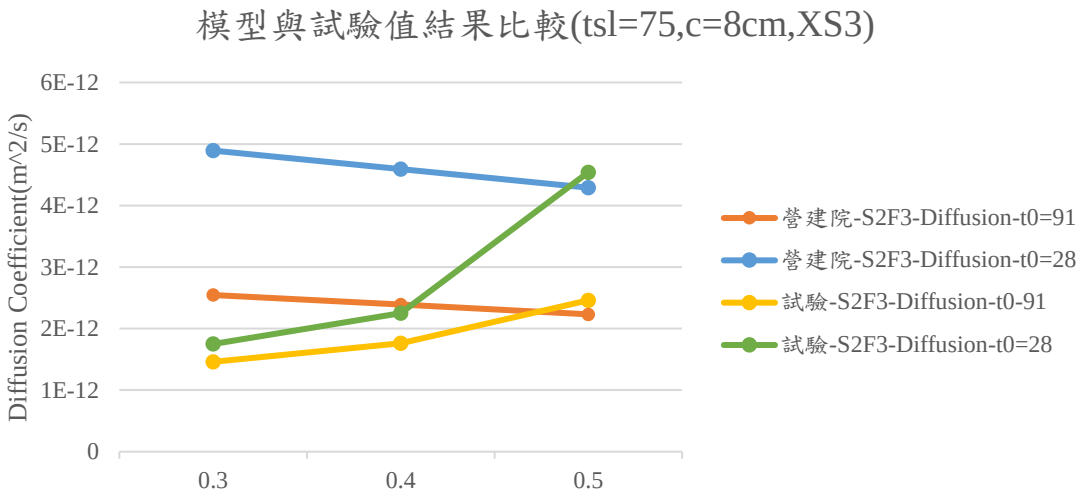


圖 6-18 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





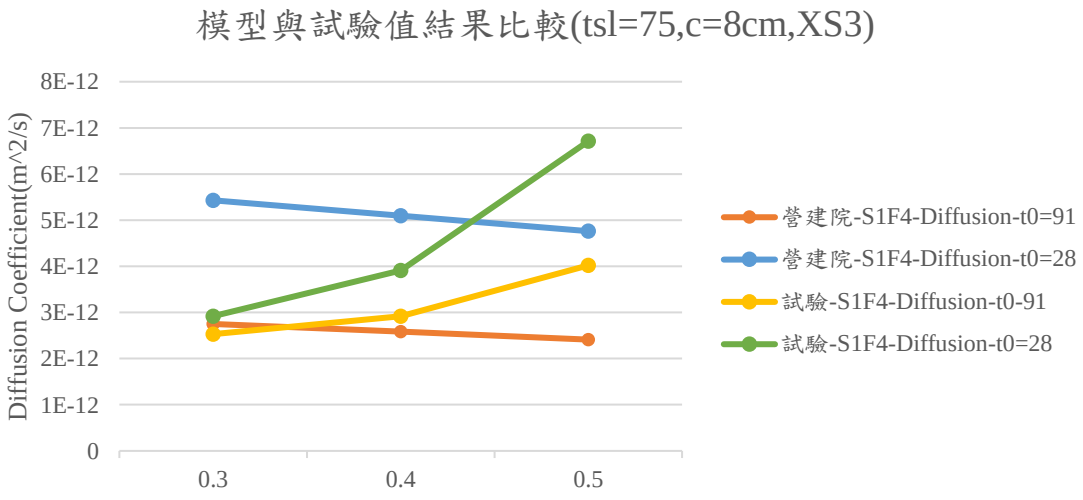


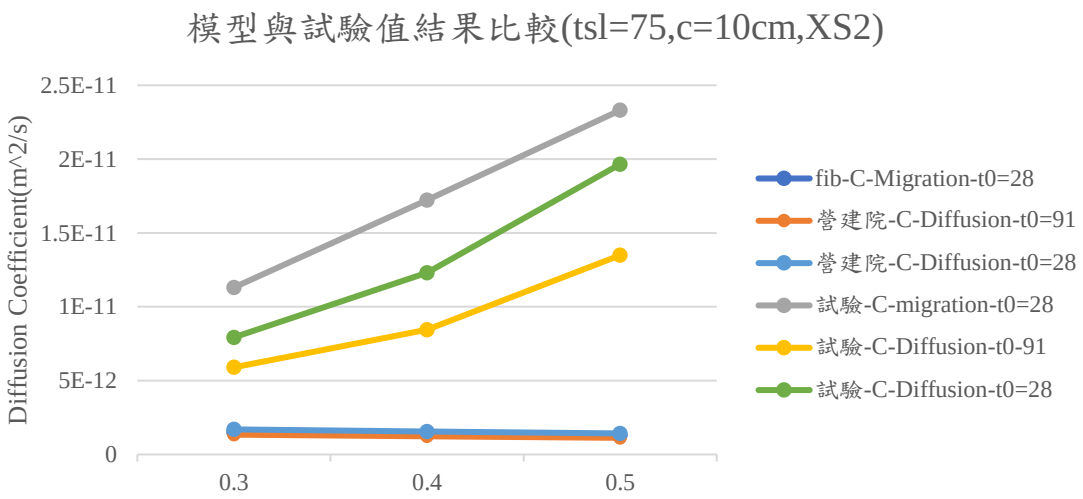
圖 6-19 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS3)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

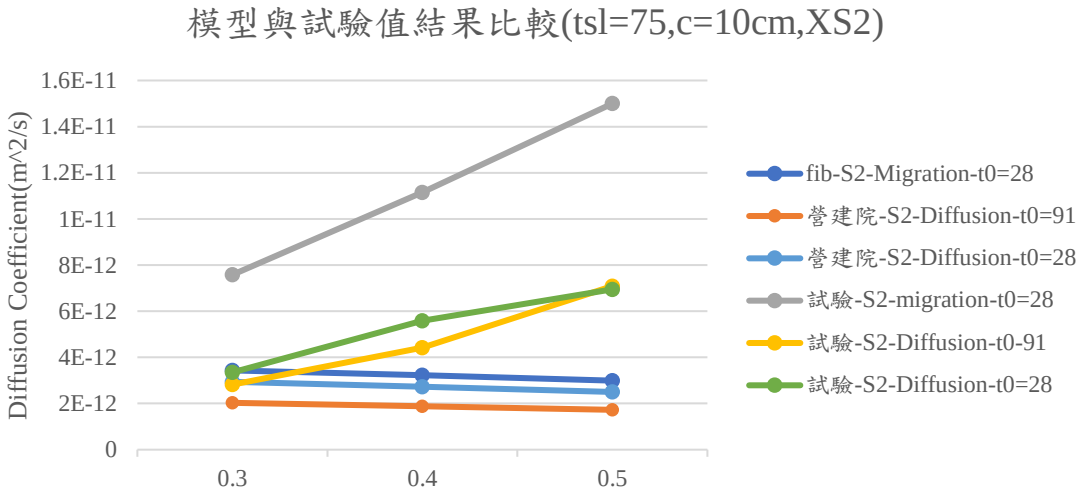
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-25 各配比 DI 結果（使用年限：75 年，曝露環境：XS2，保護層厚度：10cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.13	0.23	0.21
0.4	0.08	0.15	0.13
0.5	0.06	0.08	0.07
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.45	0.72	0.88
0.4	0.29	0.43	0.49
0.5	0.20	0.24	0.36
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.56	1.34	0.75
0.4	0.40	0.78	0.62
0.5	0.24	0.44	0.31
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	1.69	2.85	3.41
0.4	0.93	1.56	1.97
0.5	0.69	0.86	1.42
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	3.42	5.49
0.4	-	2.63	3.95
0.5	-	1.73	1.80
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.13	3.65
0.4	-	1.71	2.52
0.5	-	1.14	1.35

doi:10.6342/NTU202503522





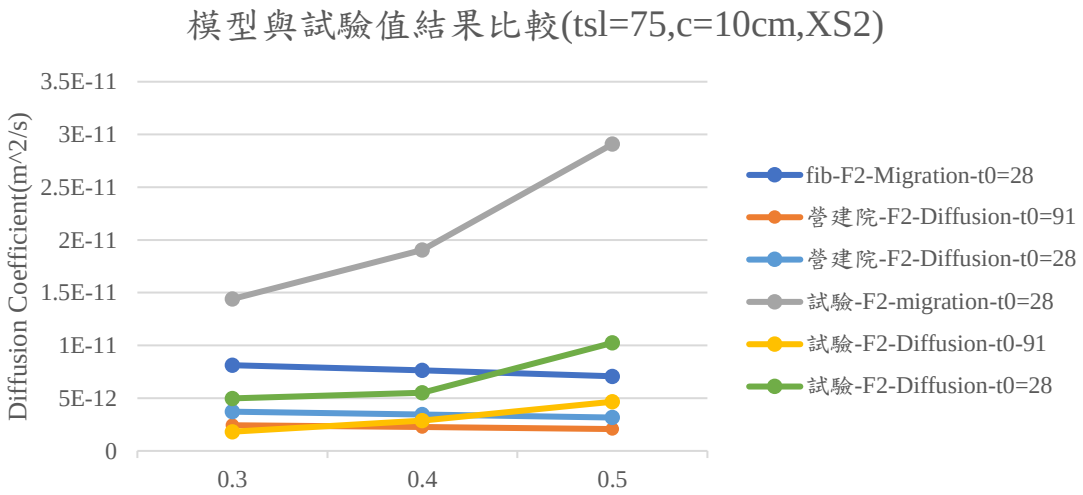
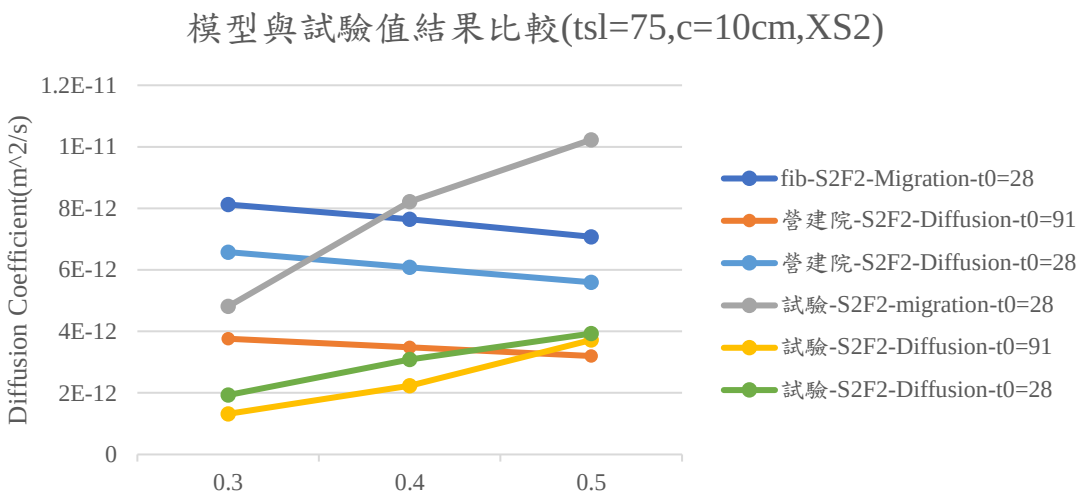
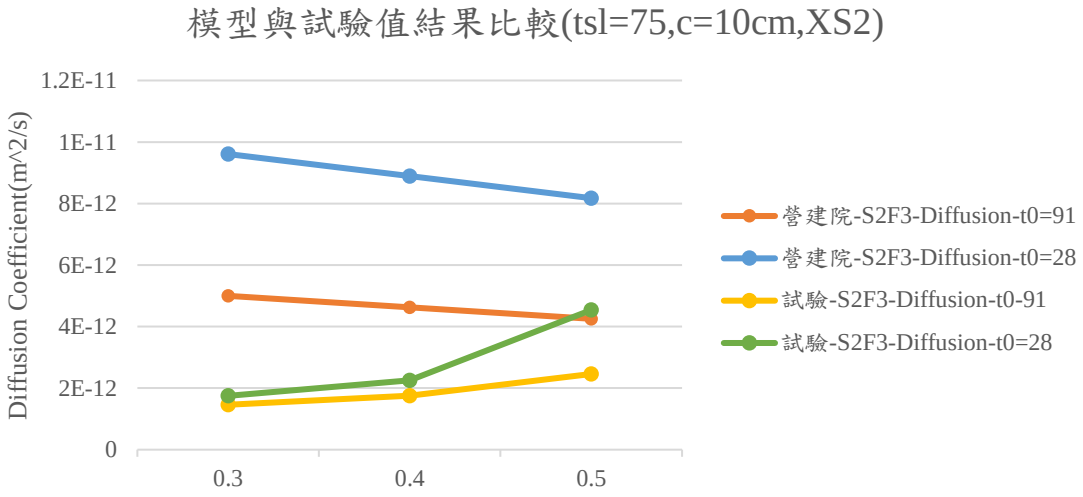


圖 6-20 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=10cm,XS2)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





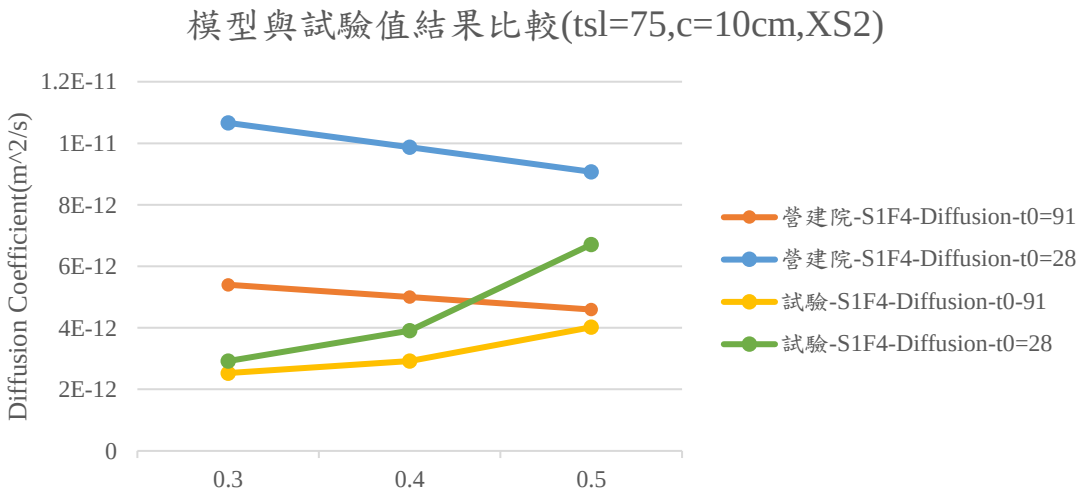


圖 6-21 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS2)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-26 各配比 DI 結果（使用年限：75 年，曝露環境：XS2，保護層厚度：8cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.08	0.15	0.14
0.4	0.05	0.09	0.08
0.5	0.03	0.05	0.05
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.27	0.44	0.54
0.4	0.18	0.26	0.30
0.5	0.12	0.16	0.23
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.34	0.82	0.46
0.4	0.25	0.48	0.38
0.5	0.15	0.28	0.20
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	1.02	1.75	2.10
0.4	0.57	0.95	1.20
0.5	0.43	0.55	0.91
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.11	3.38
0.4	-	1.60	2.41
0.5	-	1.11	1.16
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.31	2.25
0.4	-	1.04	1.54
0.5	-	0.73	0.87

doi:10.6342/NTU202503522

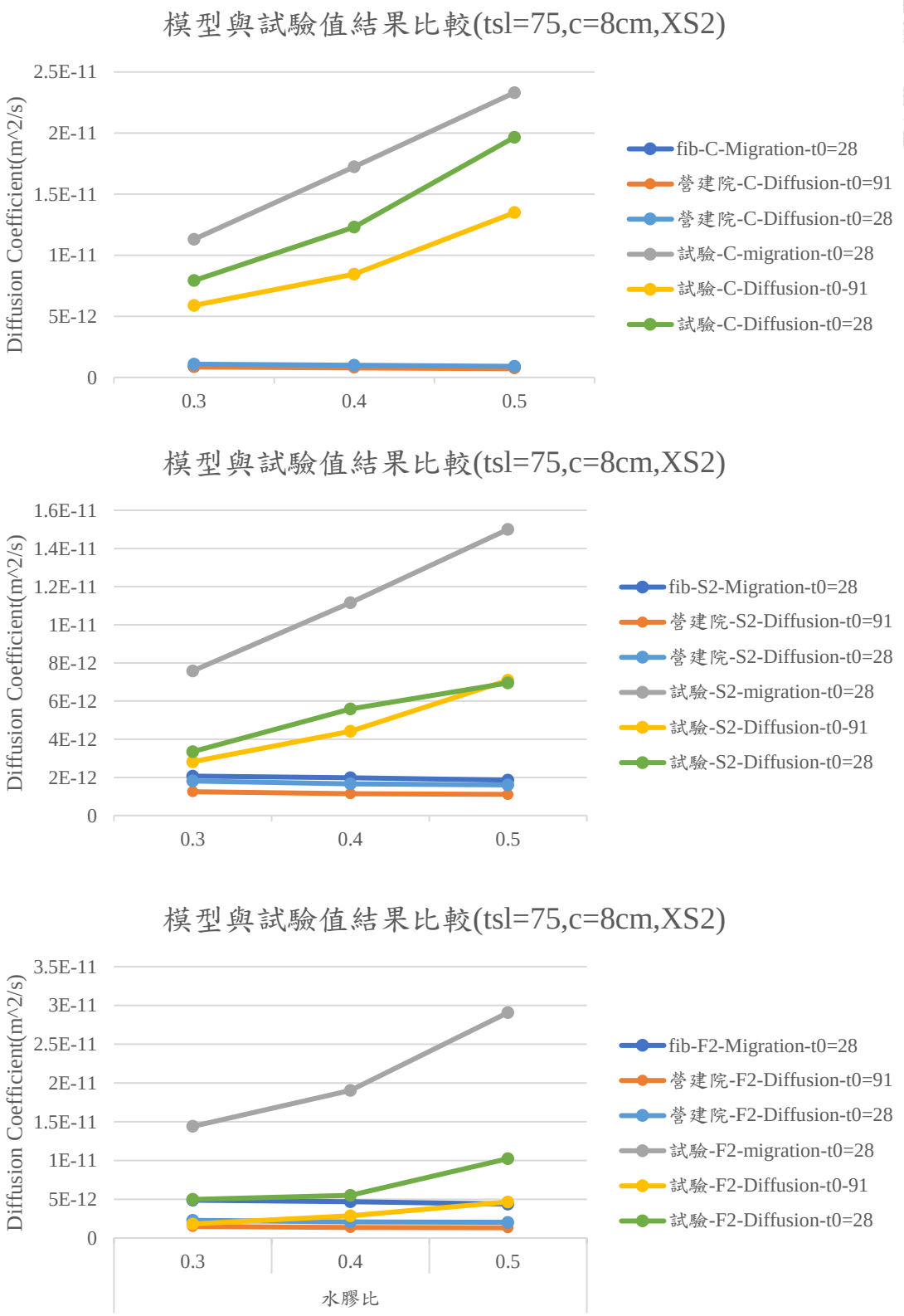


圖 6-22 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS2)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

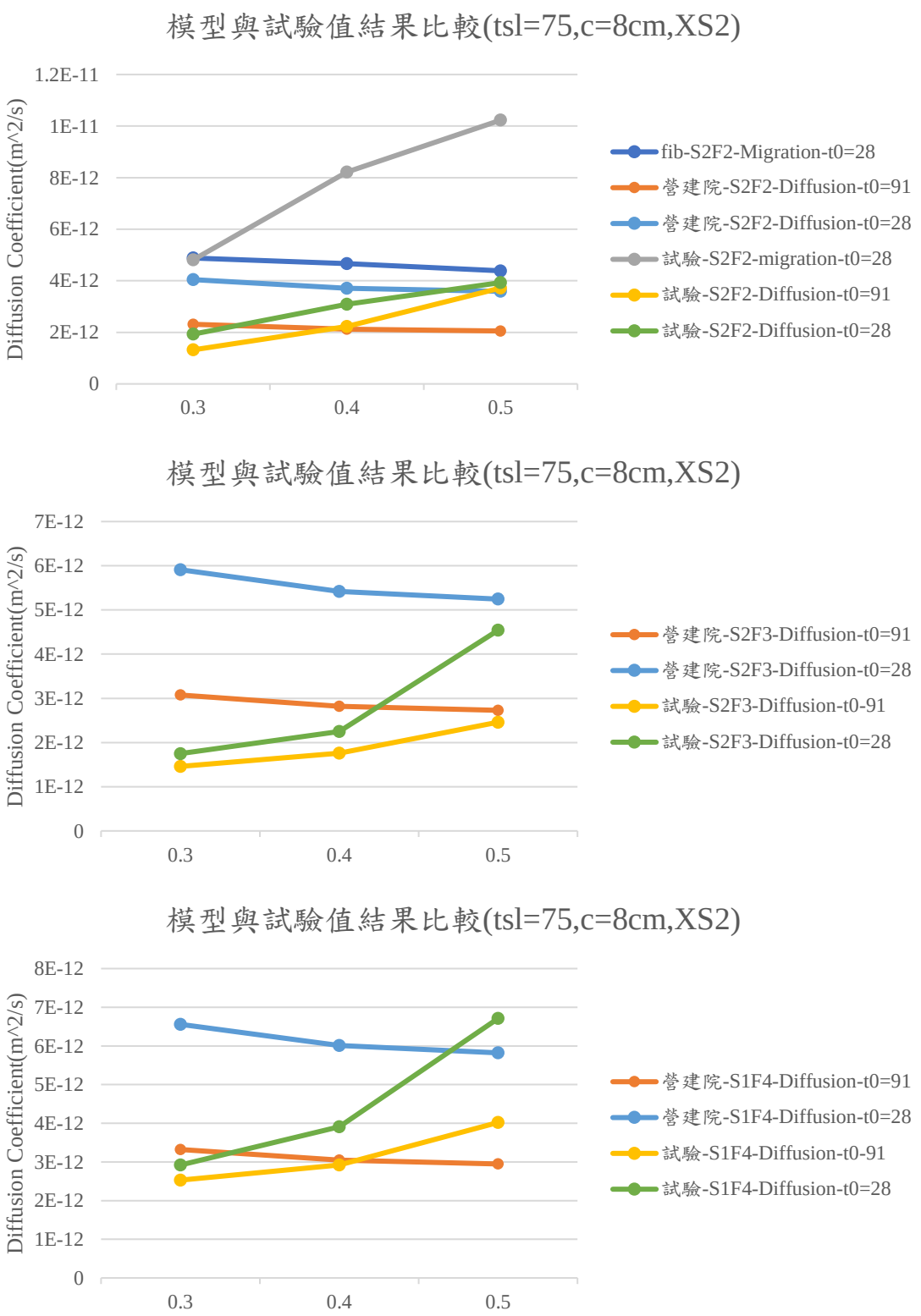


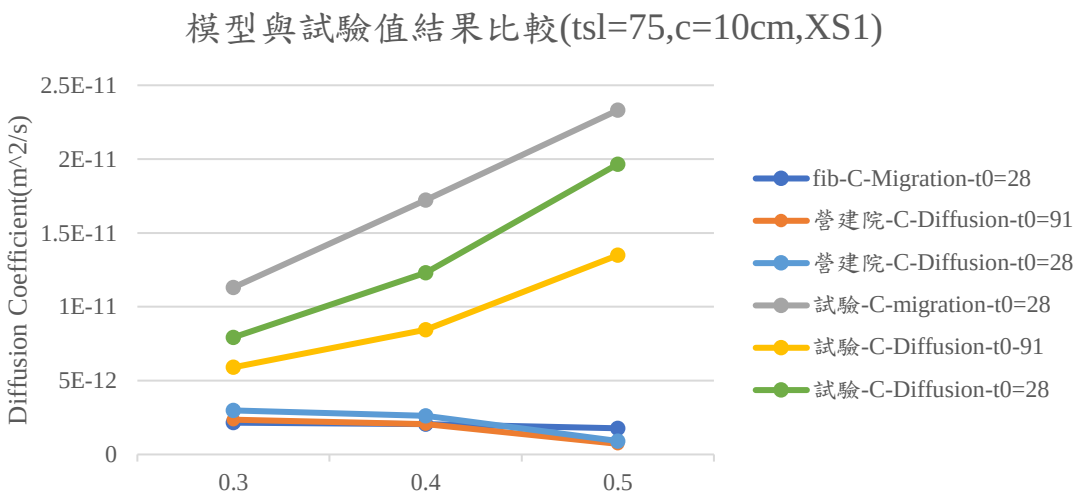
圖 6-23 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS2)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

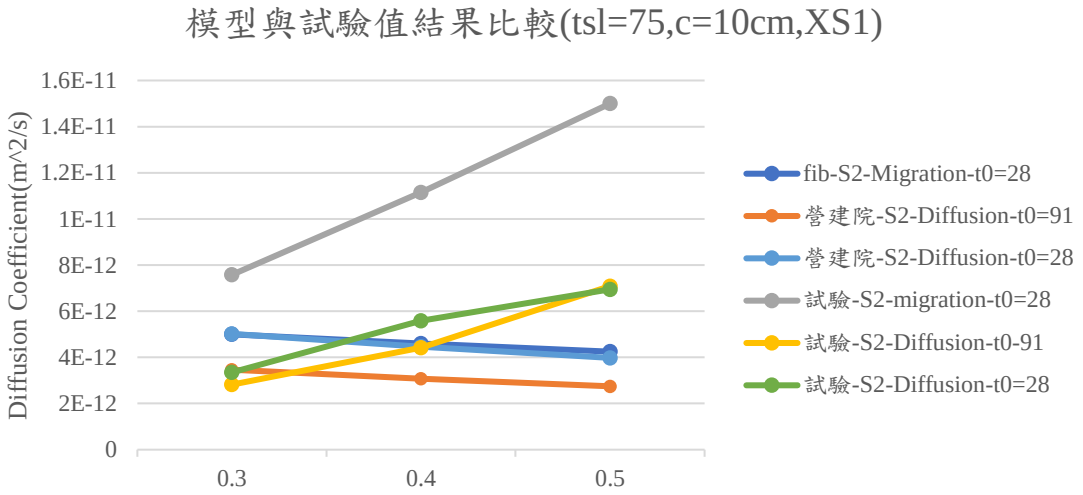
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-27 各配比 DI 結果（使用年限：75 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：10cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.19	0.40	0.38
0.4	0.12	0.24	0.21
0.5	0.08	0.05	0.05
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.66	1.23	1.50
0.4	0.41	0.70	0.80
0.5	0.28	0.39	0.57
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.82	2.28	1.27
0.4	0.57	1.29	1.02
0.5	0.35	0.71	0.49
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	2.46	4.86	5.82
0.4	1.33	2.56	3.23
0.5	0.98	1.37	2.26
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	5.84	9.37
0.4	-	4.31	6.48
0.5	-	2.75	2.86
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.33	3.99
0.4	-	1.80	2.65
0.5	-	1.16	1.37

doi:10.6342/NTU202503522





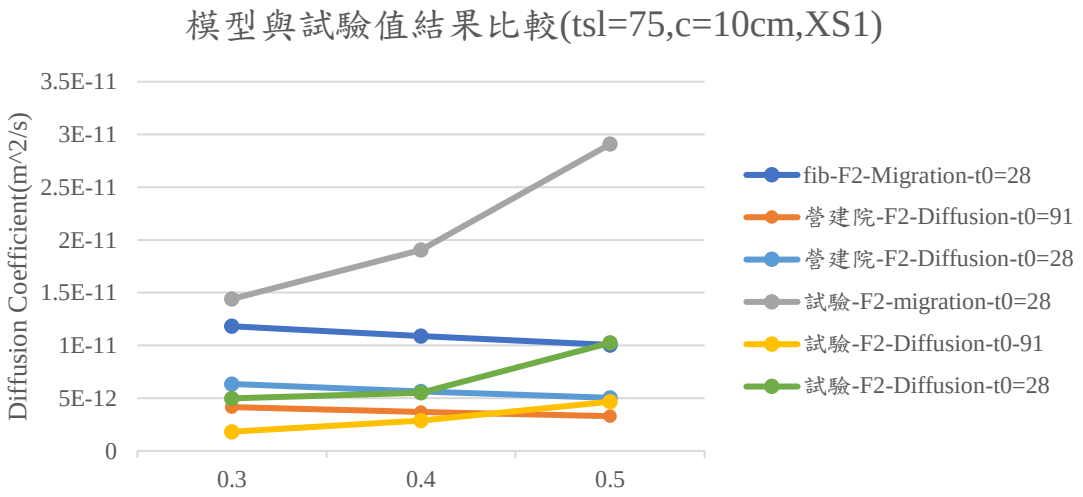


圖 6-24 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=10cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

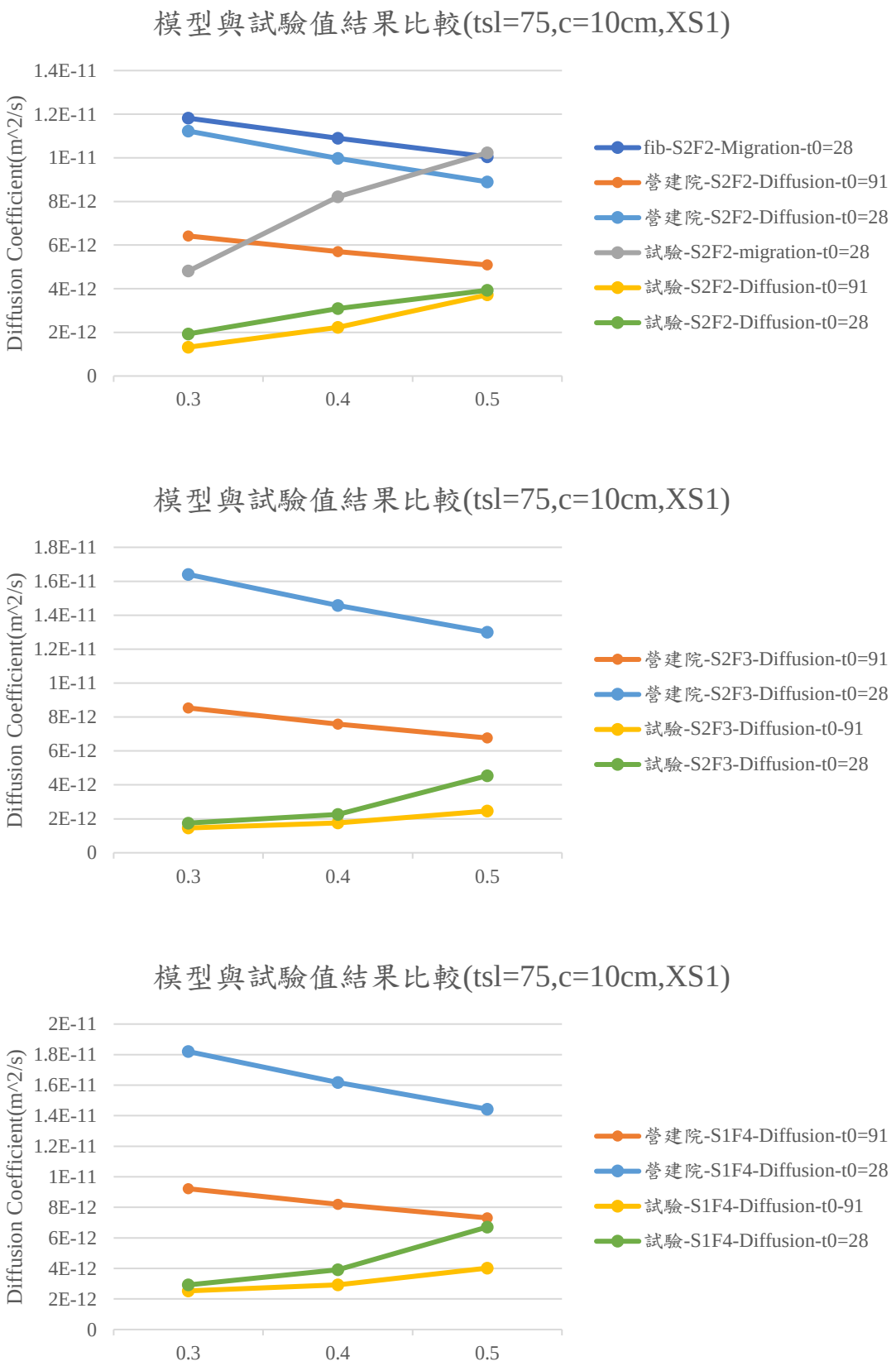


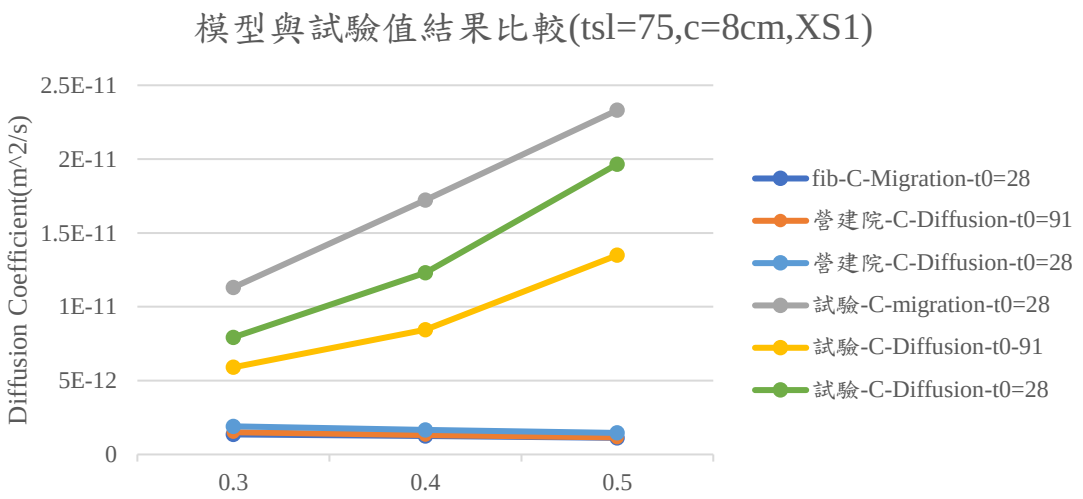
圖 6-25 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=10cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

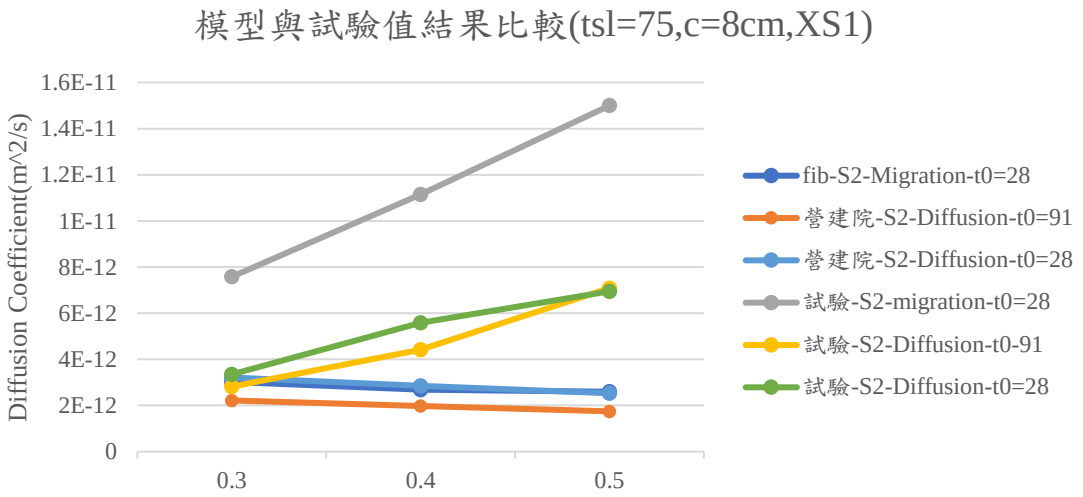
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-28 各配比 DI 結果（使用年限：75 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：8cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.19	0.40	0.38
0.4	0.12	0.24	0.21
0.5	0.08	0.05	0.05
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.66	1.23	1.50
0.4	0.41	0.70	0.80
0.5	0.28	0.39	0.57
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.82	2.28	1.27
0.4	0.57	1.29	1.02
0.5	0.35	0.71	0.49
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	2.46	4.86	5.82
0.4	1.33	2.56	3.23
0.5	0.98	1.37	2.26
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	5.84	9.37
0.4	-	4.31	6.48
0.5	-	2.75	2.86
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.33	3.99
0.4	-	1.80	2.65
0.5	-	1.16	1.37

doi:10.6342/NTU202503522





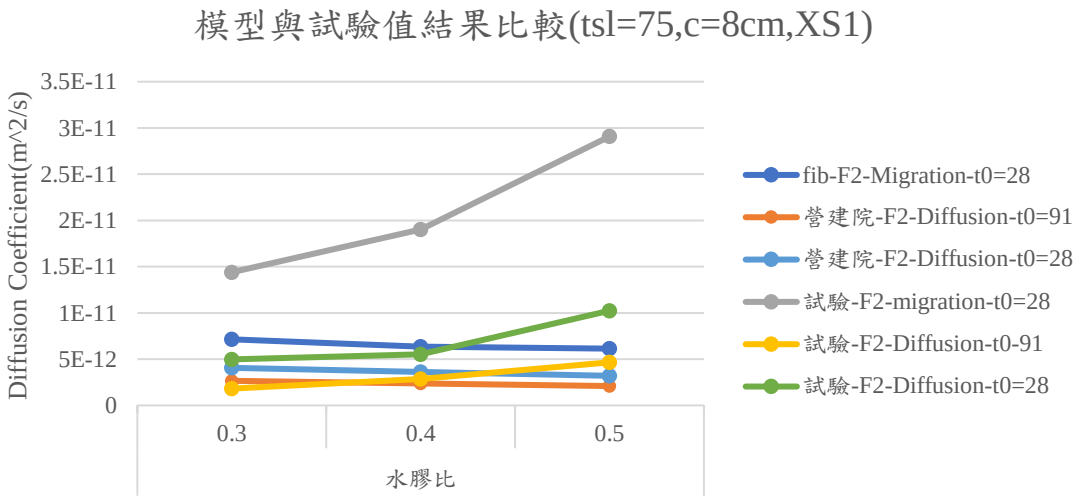
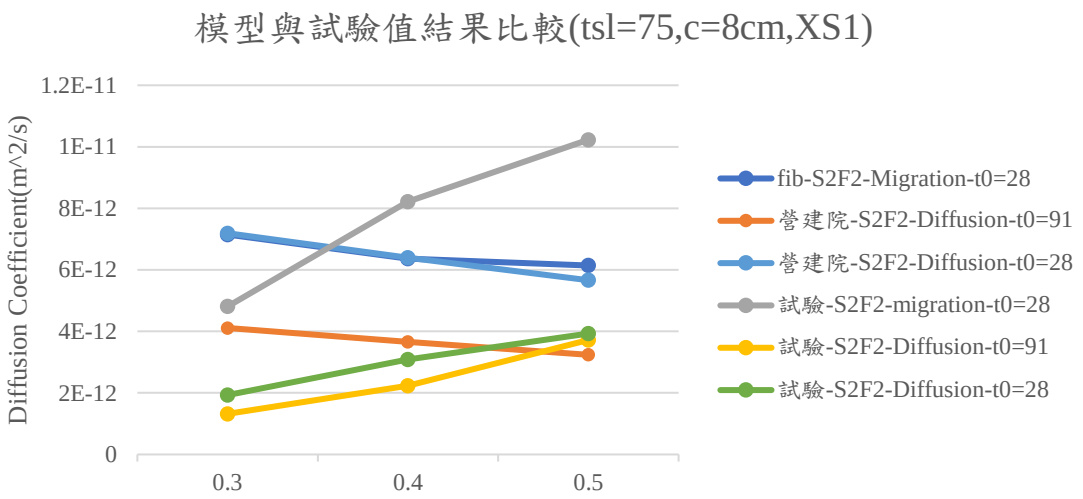
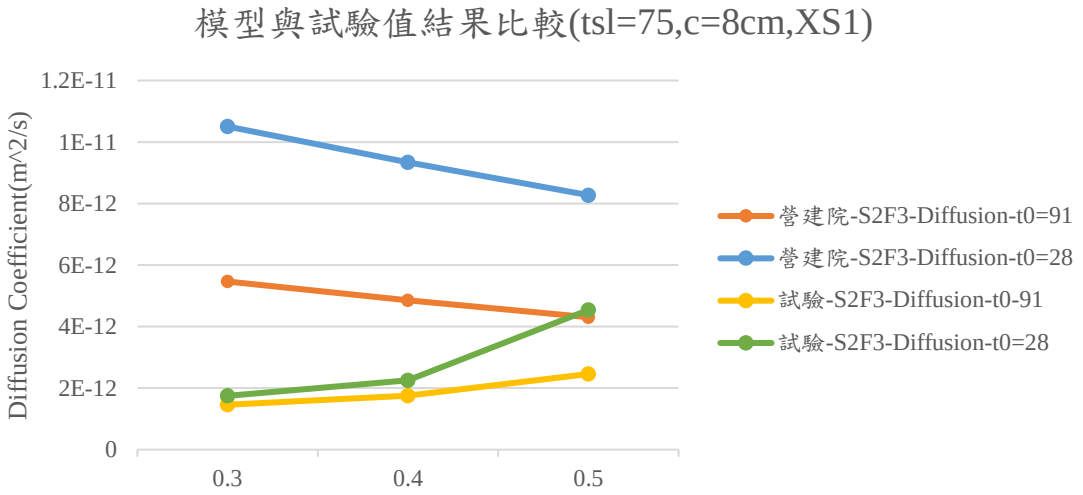


圖 6-26 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





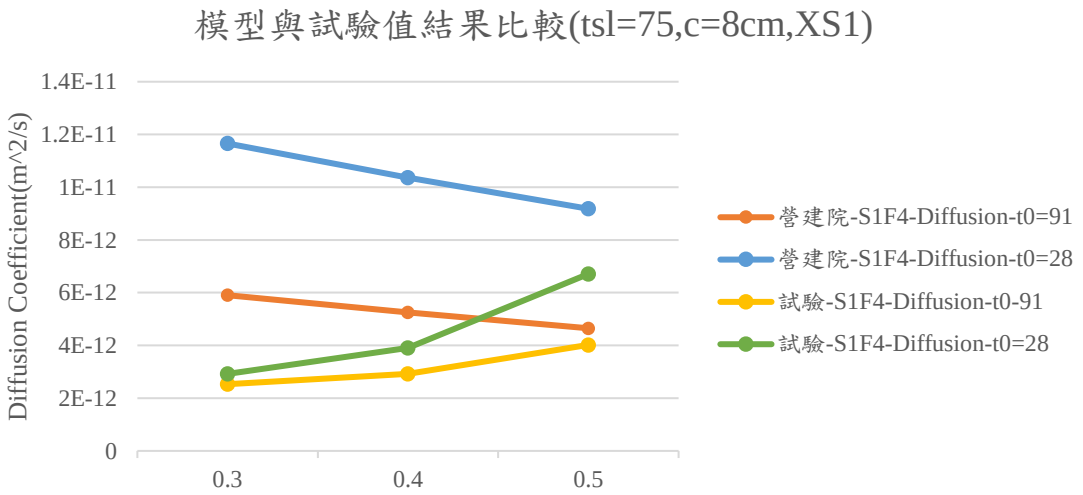


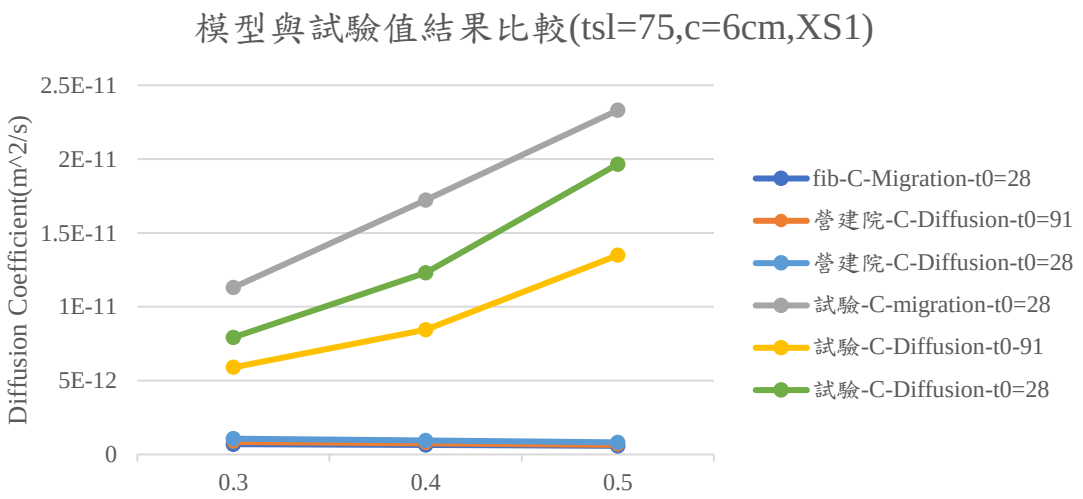
圖 6-27 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=8cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

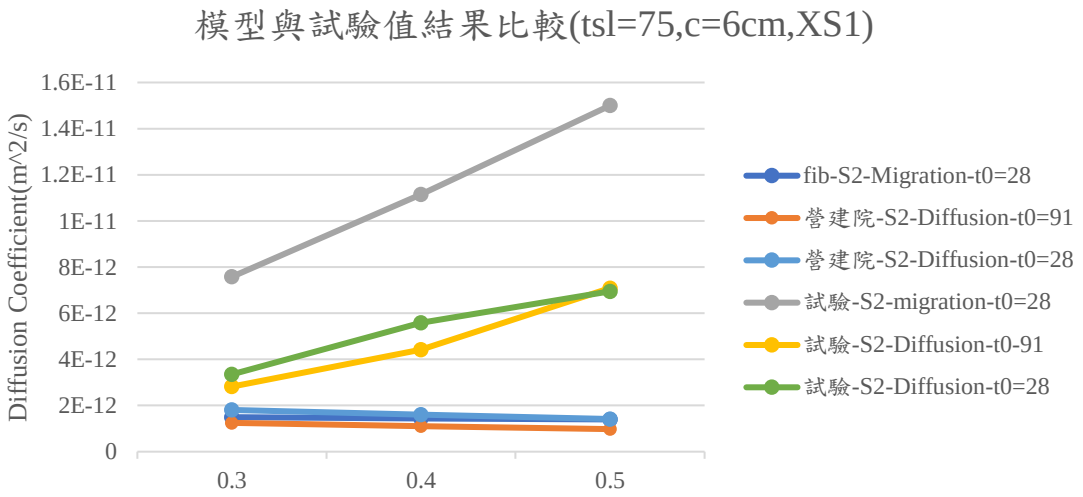
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-29 各配比 DI 結果（使用年限：75 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：6cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.06	0.14	0.13
0.4	0.04	0.09	0.08
0.5	0.03	0.05	0.04
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.20	0.44	0.54
0.4	0.13	0.25	0.29
0.5	0.09	0.14	0.20
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.25	0.82	0.46
0.4	0.18	0.46	0.37
0.5	0.11	0.25	0.17
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.74	1.75	2.10
0.4	0.41	0.92	1.16
0.5	0.32	0.89	0.81
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.11	3.38
0.4	-	1.55	2.33
0.5	-	0.98	1.02
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.31	2.25
0.4	-	1.01	1.49
0.5	-	0.65	0.77

doi:10.6342/NTU202503522





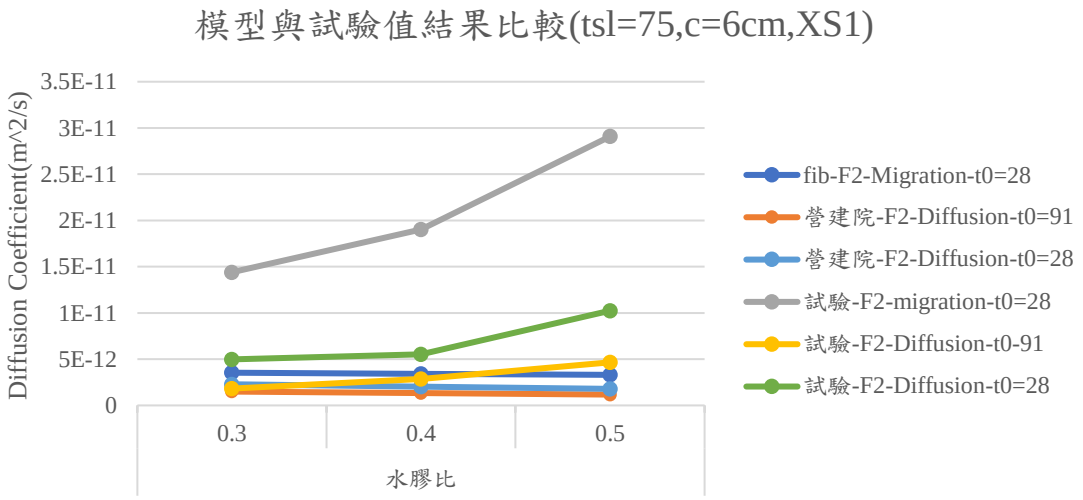
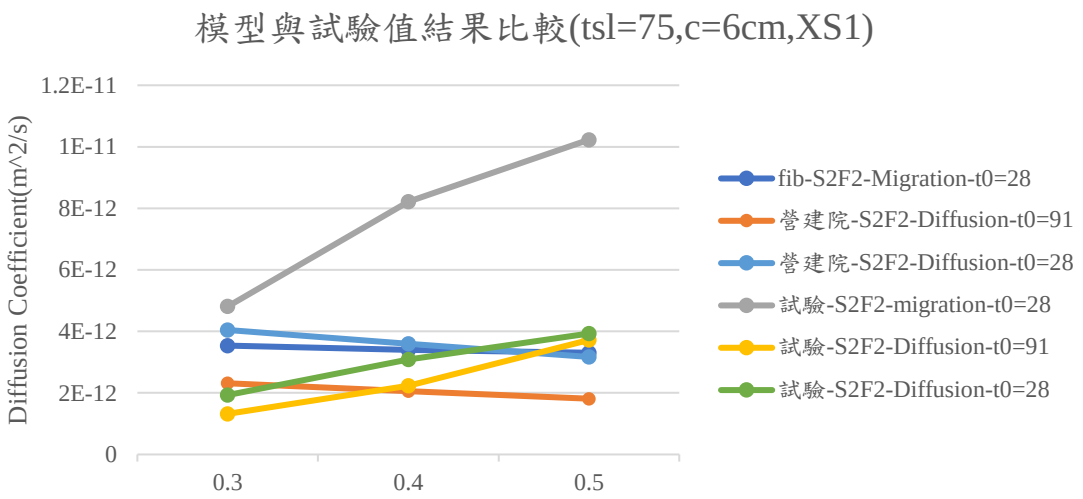
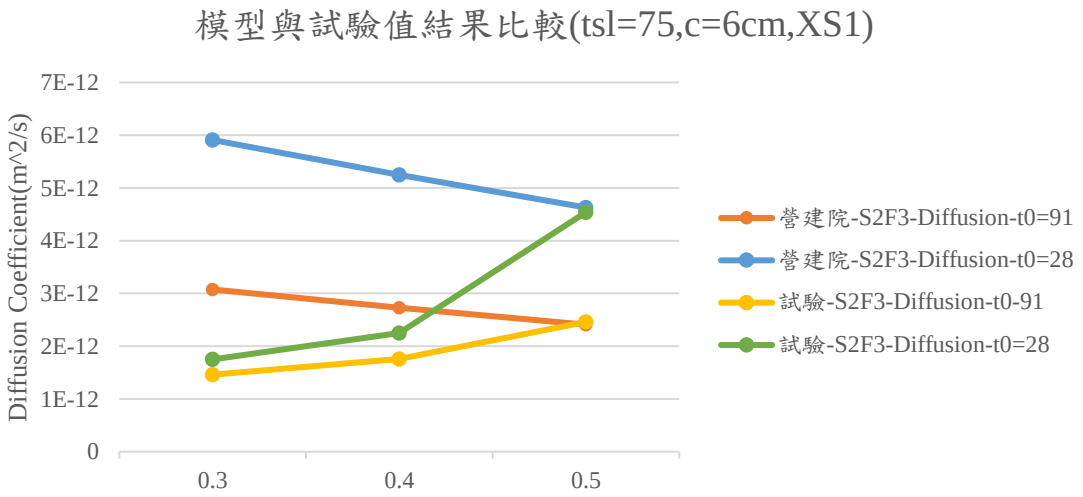


圖 6-28 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=6cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





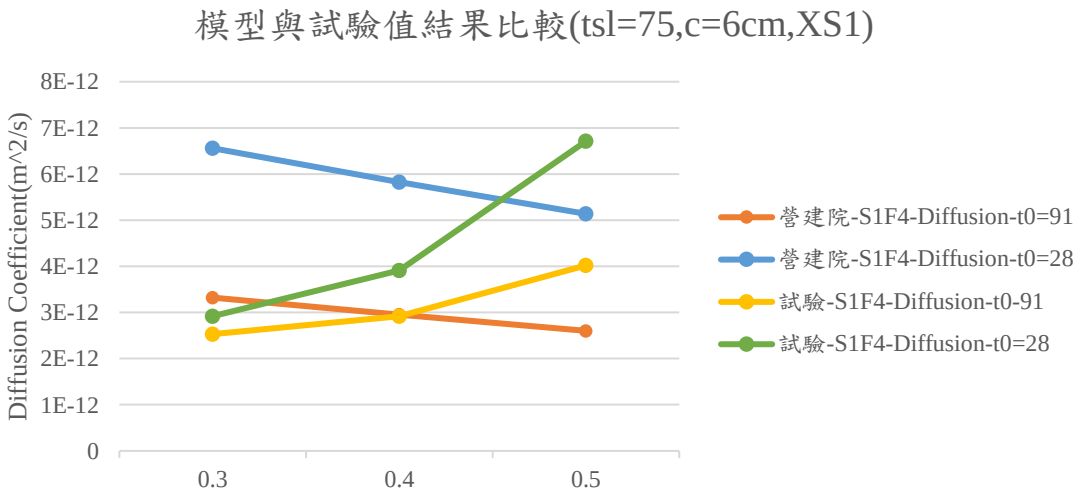


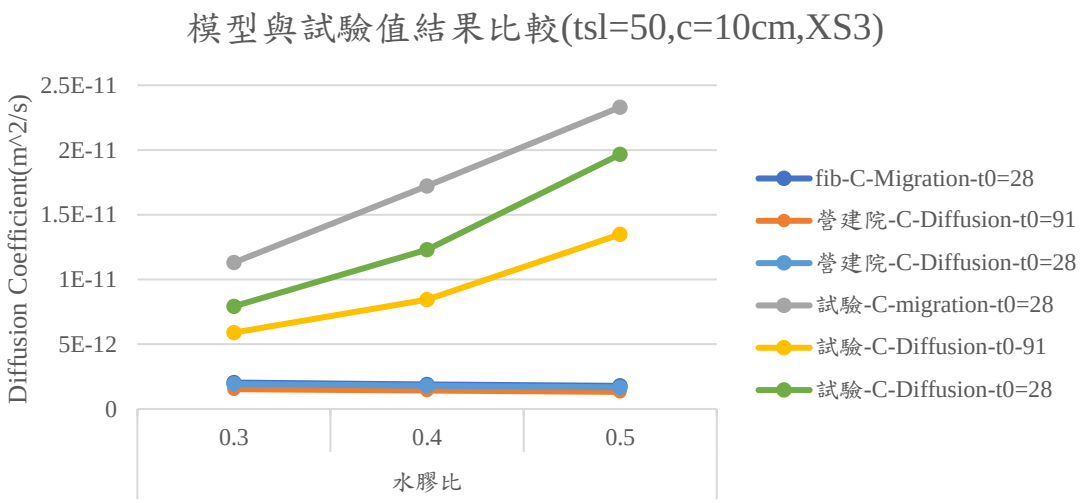
圖 6-29 模型與試驗值結果比較(tsl=75,c=6cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

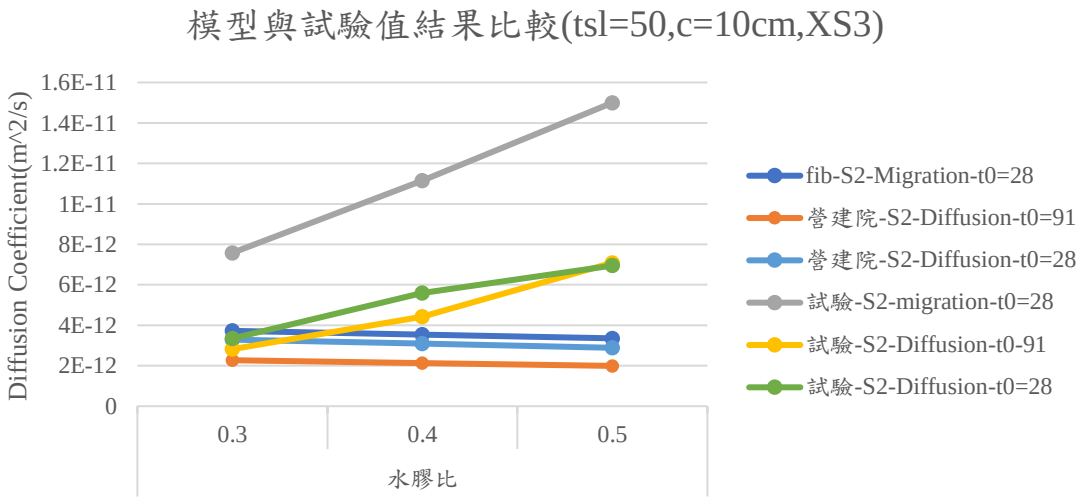
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-30 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS3，保護層厚度：10cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.18	0.26	0.24
0.4	0.11	0.17	0.15
0.5	0.08	0.10	0.08
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.49	0.81	0.98
0.4	0.32	0.48	0.55
0.5	0.22	0.28	0.42
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.58	1.48	0.83
0.4	0.42	0.88	0.70
0.5	0.26	0.51	0.35
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	1.74	2.08	4.02
0.4	0.97	1.69	2.14
0.5	0.74	0.95	1.57
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	3.56	5.71
0.4	-	2.78	4.17
0.5	-	1.86	1.93
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.20	3.77
0.4	-	1.79	2.64
0.5	-	1.22	1.44

doi:10.6342/NTU202503522





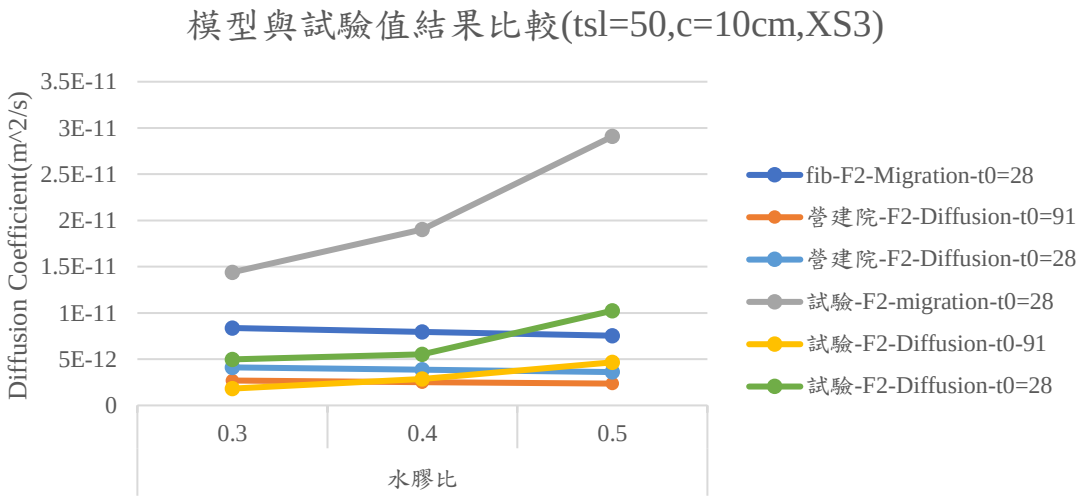
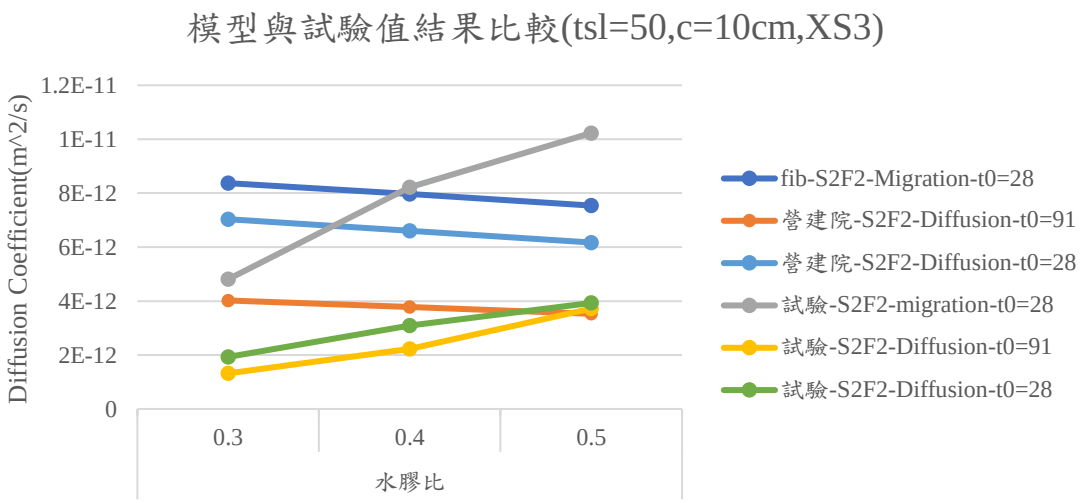
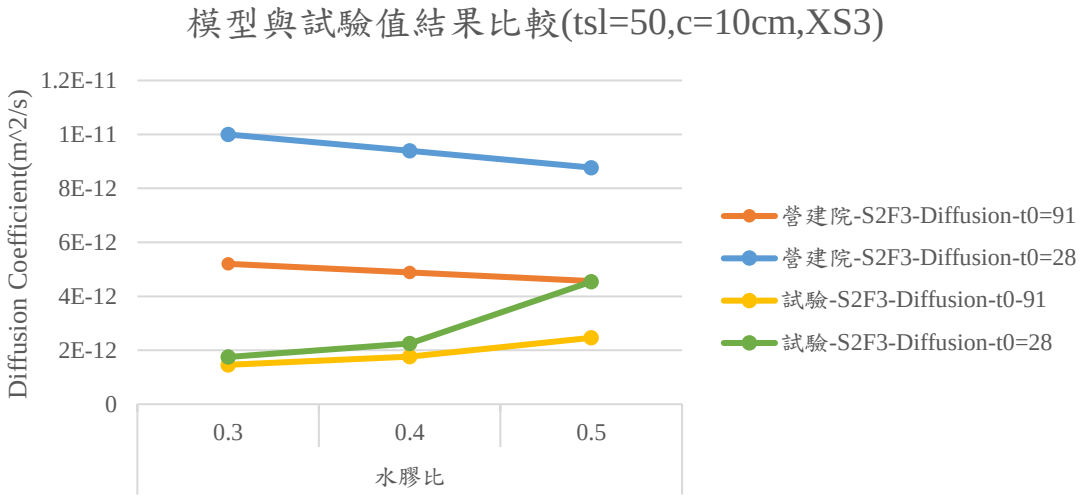


圖 6-30 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=10cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





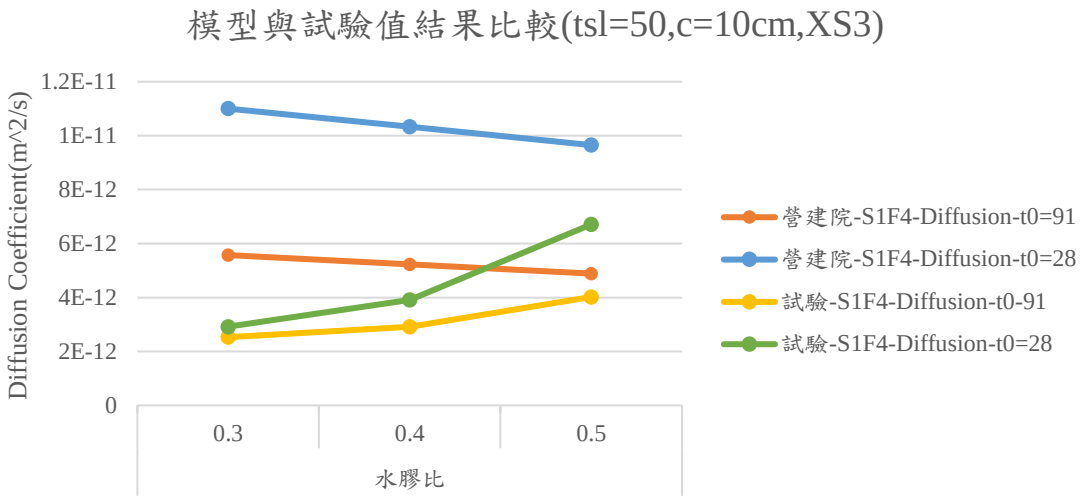


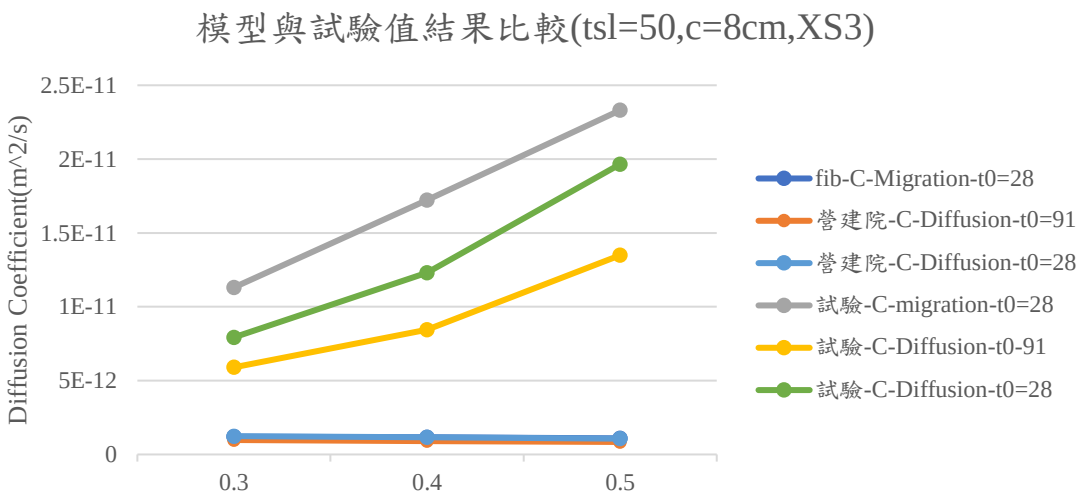
圖 6-31 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=10cm,XS3)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

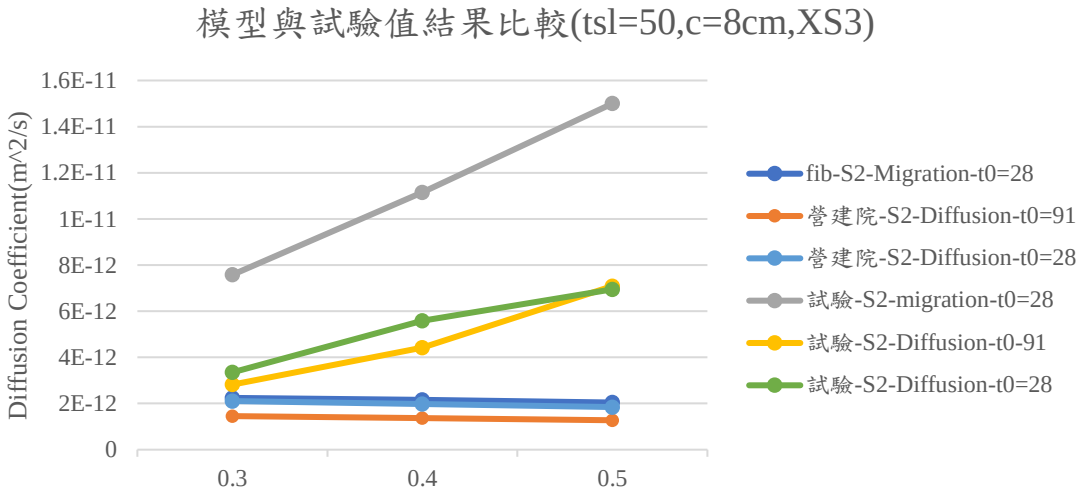
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-31 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS3，保護層厚度：8cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.11	0.17	0.16
0.4	0.07	0.11	0.09
0.5	0.05	0.06	0.05
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.30	0.52	0.63
0.4	0.19	0.31	0.35
0.5	0.14	0.18	0.27
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.35	0.95	0.53
0.4	0.25	0.56	0.45
0.5	0.16	0.32	0.23
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	1.05	1.33	2.57
0.4	0.59	1.08	1.37
0.5	0.45	0.61	1.00
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.28	3.66
0.4	-	1.78	2.67
0.5	-	1.19	1.24
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.41	2.41
0.4	-	1.15	1.69
0.5	-	0.78	0.92

doi:10.6342/NTU202503522





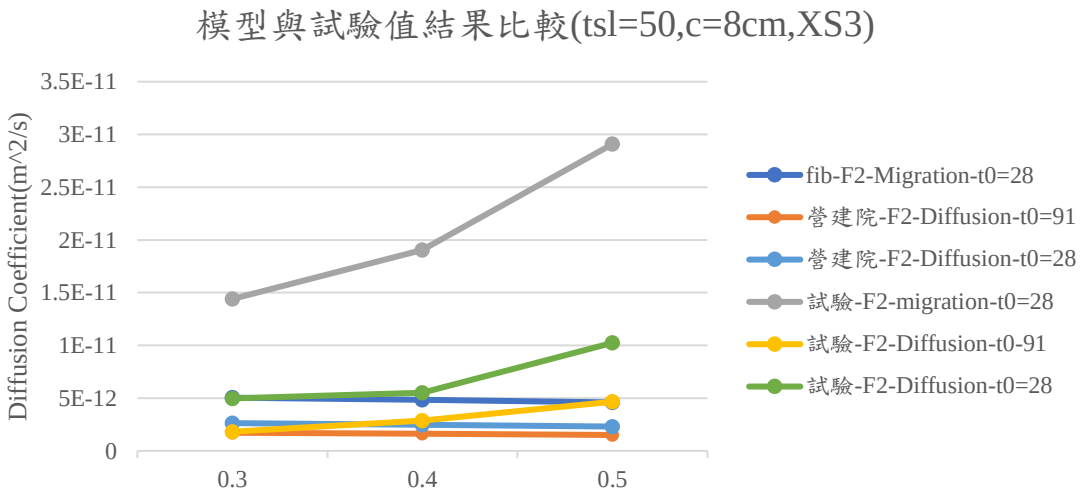


圖 6-32 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

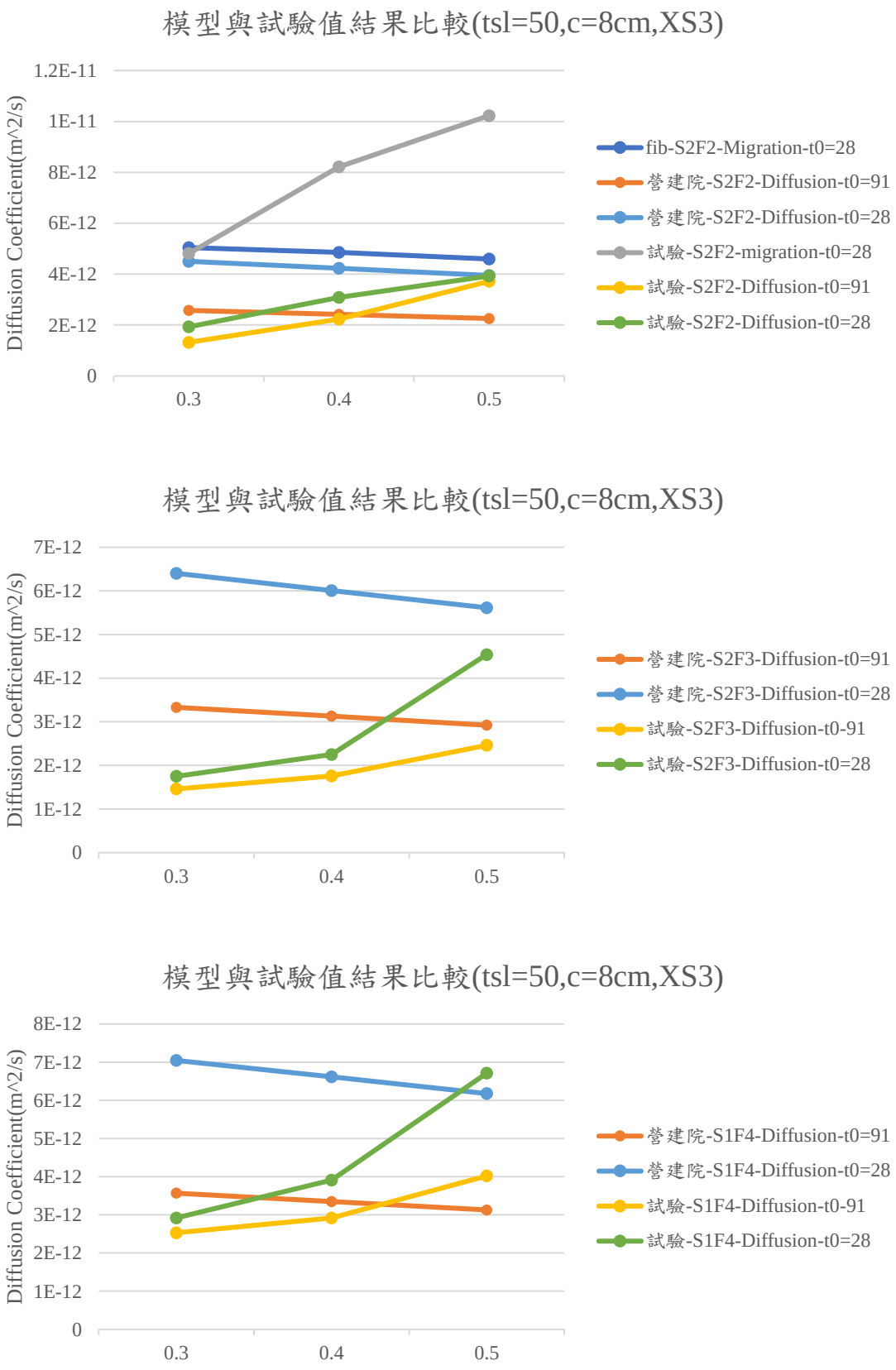


圖 6-33 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=8cm,XS3)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-32 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS2，保護層厚度：10cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.18	0.33	0.31
0.4	0.11	0.21	0.18
0.5	0.08	0.12	0.10
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.58	1.01	1.23
0.4	0.37	0.60	0.68
0.5	0.26	0.34	0.51
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.69	1.86	1.04
0.4	0.49	1.09	0.87
0.5	0.30	0.62	0.43
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	2.07	3.83	4.58
0.4	1.14	2.10	2.65
0.5	0.85	1.16	1.91
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	4.48	7.18
0.4	-	3.44	5.17
0.5	-	2.26	2.36
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.77	4.74
0.4	-	2.22	3.27
0.5	-	1.48	1.75

doi:10.6342/NTU202503522

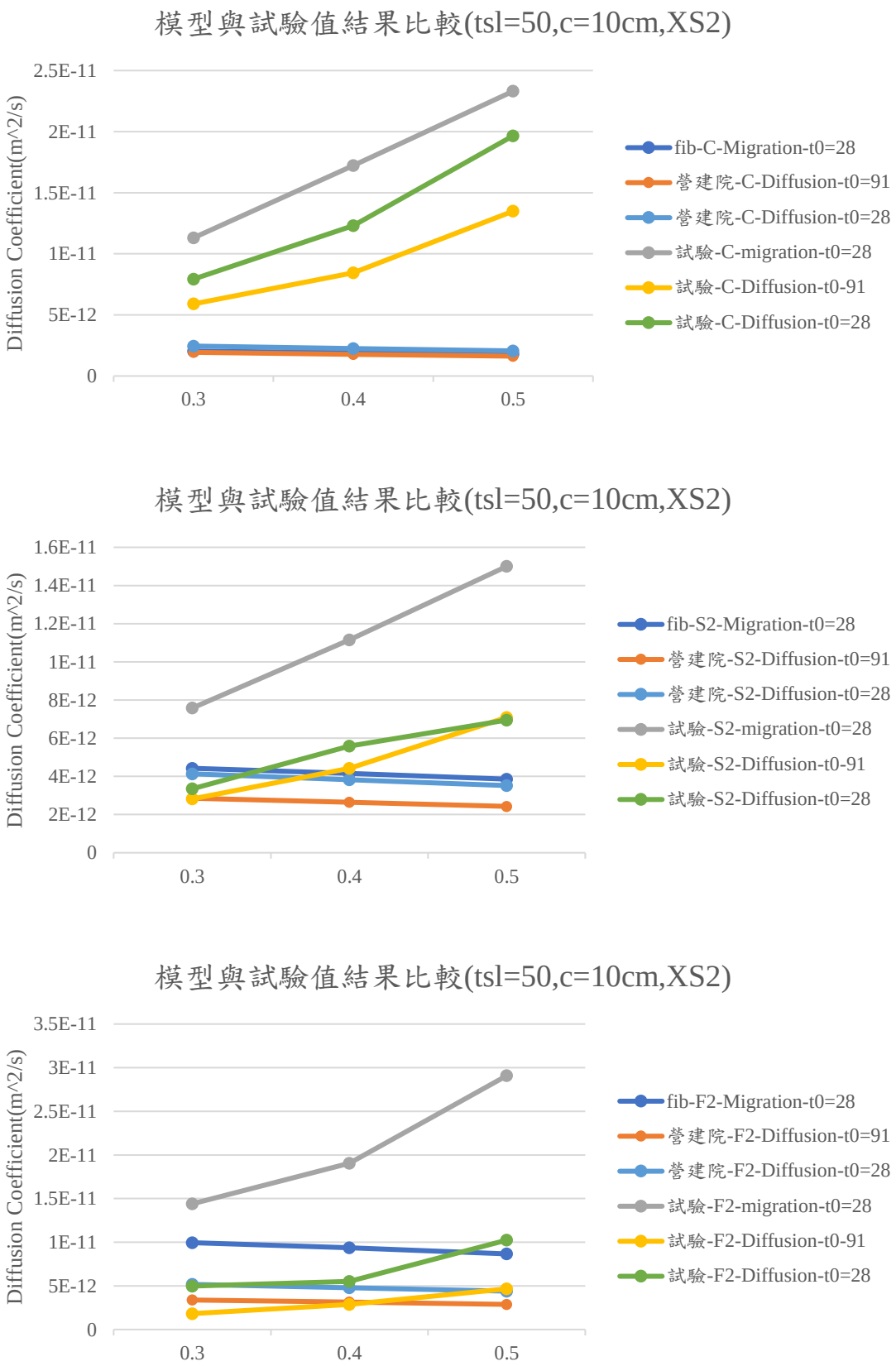
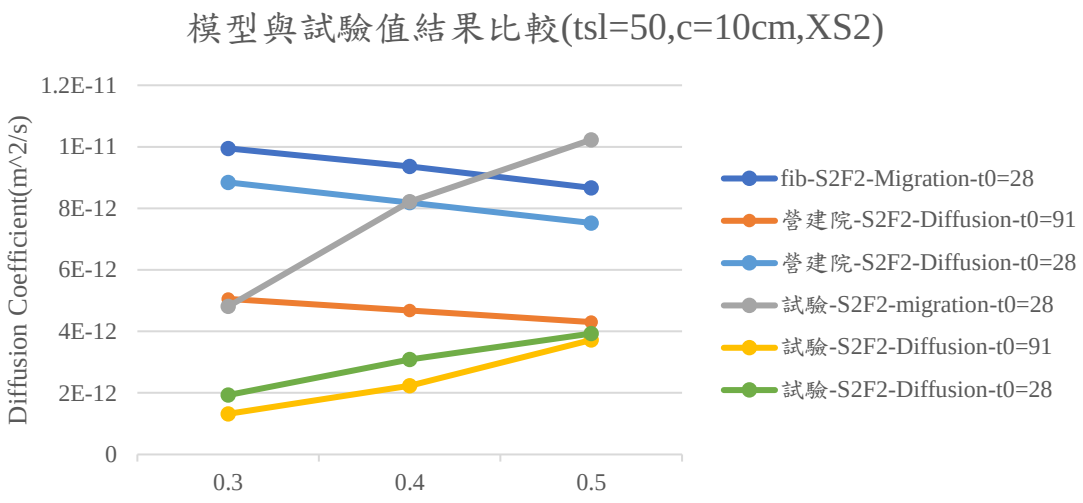
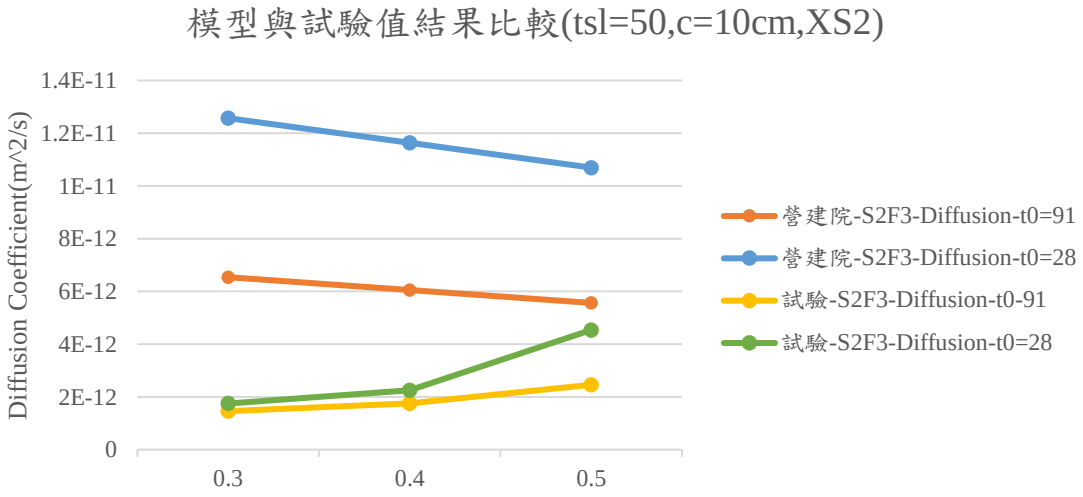


圖 6-34 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=10cm,XS2)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





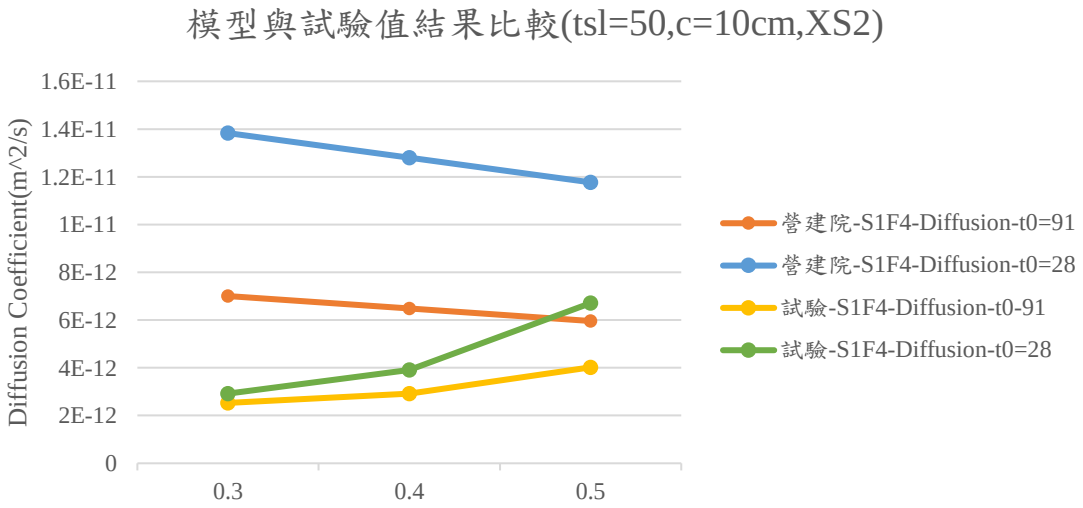


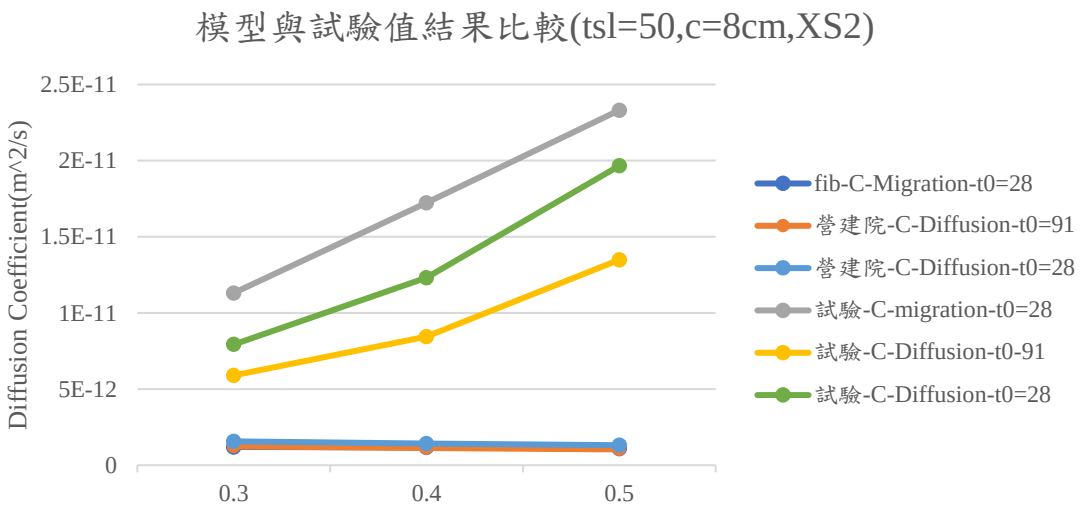
圖 6-35 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=10cm,XS2)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

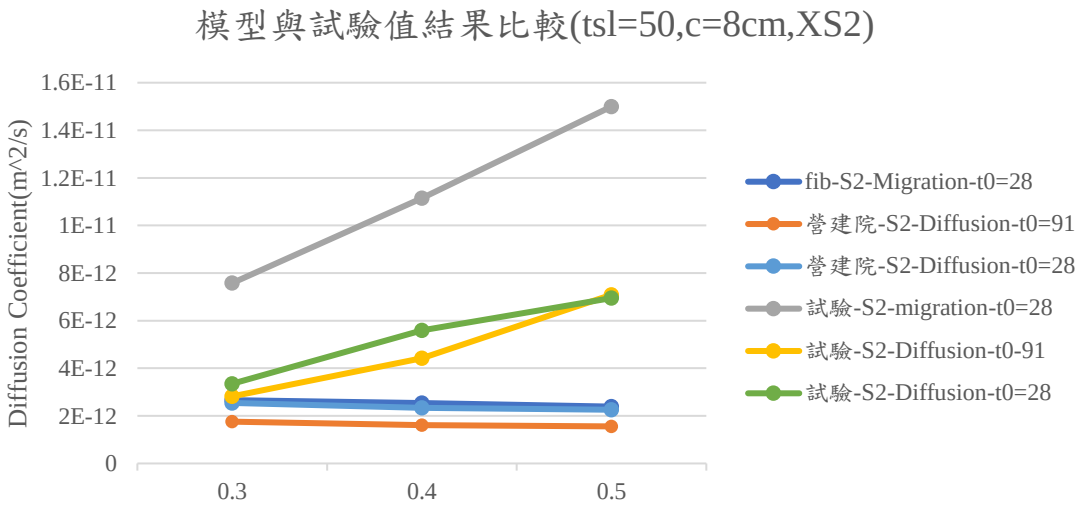
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-33 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS2，保護層厚度：8cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.11	0.21	0.20
0.4	0.07	0.13	0.12
0.5	0.05	0.08	0.07
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.35	0.62	0.76
0.4	0.23	0.36	0.42
0.5	0.16	0.22	0.32
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.42	1.14	0.64
0.4	0.30	0.66	0.53
0.5	0.18	0.40	0.28
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	1.24	2.36	2.82
0.4	0.70	1.28	1.61
0.5	0.53	0.74	1.23
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.76	4.42
0.4	-	2.10	3.15
0.5	-	1.45	1.51
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.70	2.91
0.4	-	1.35	1.99
0.5	-	0.95	1.13

doi:10.6342/NTU202503522





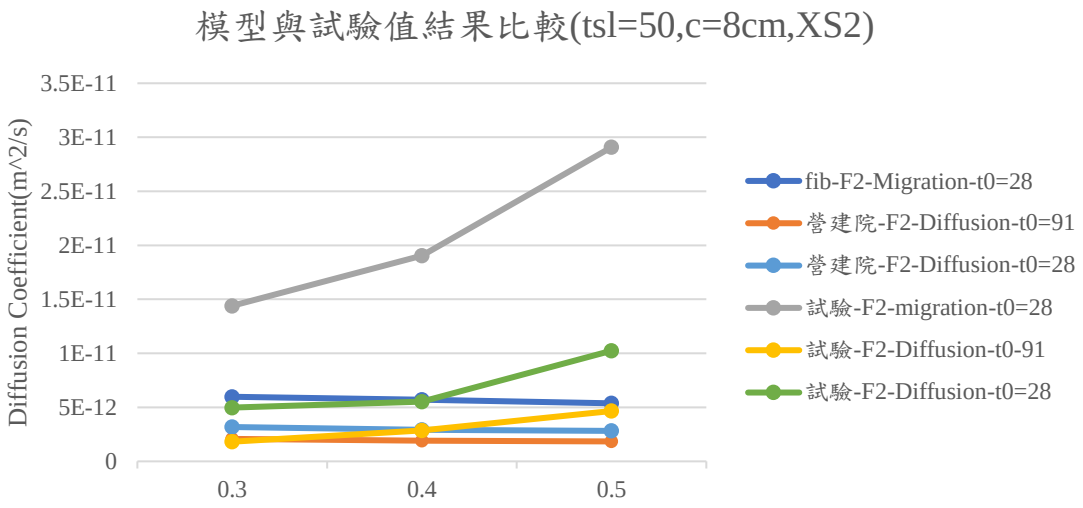
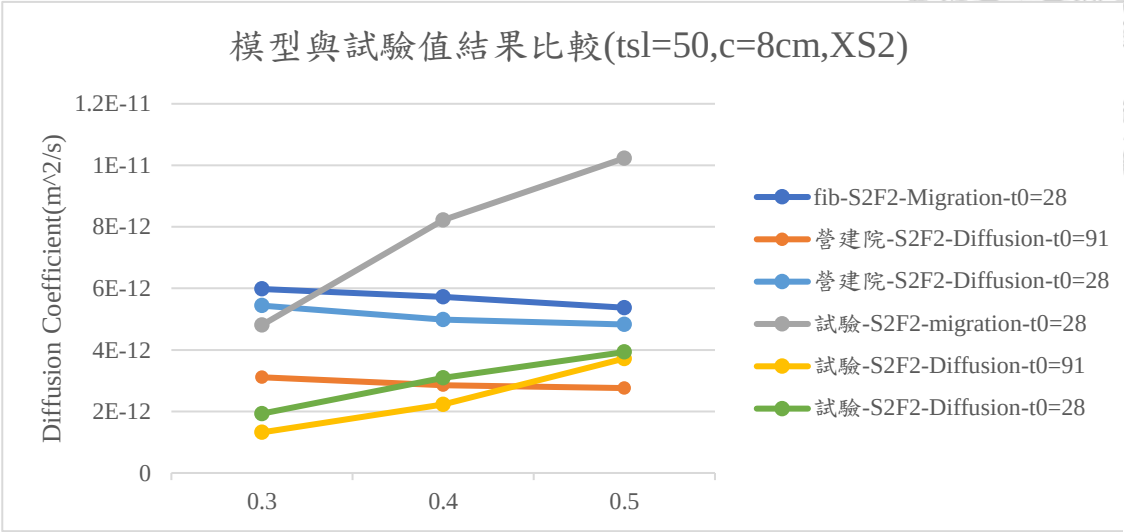
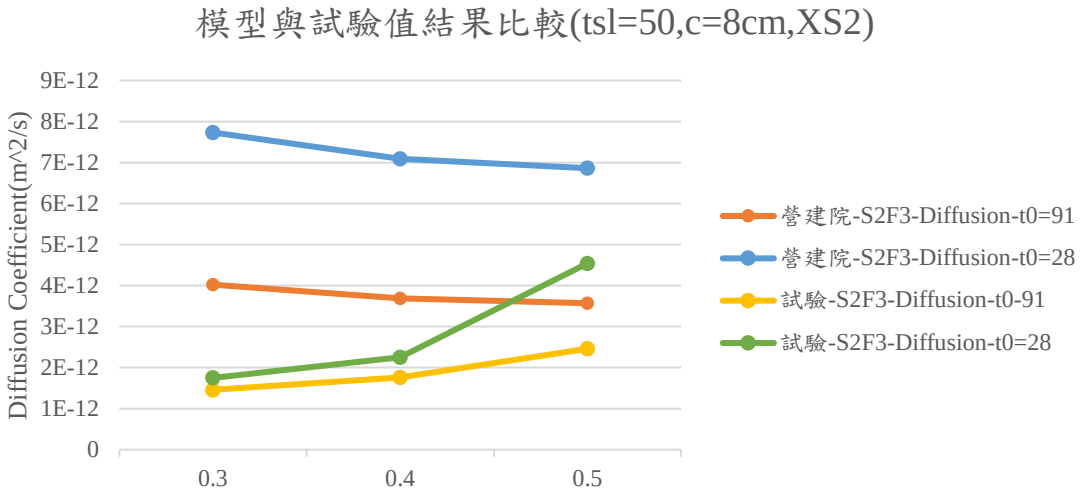


圖 6-36 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=8cm,XS2)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





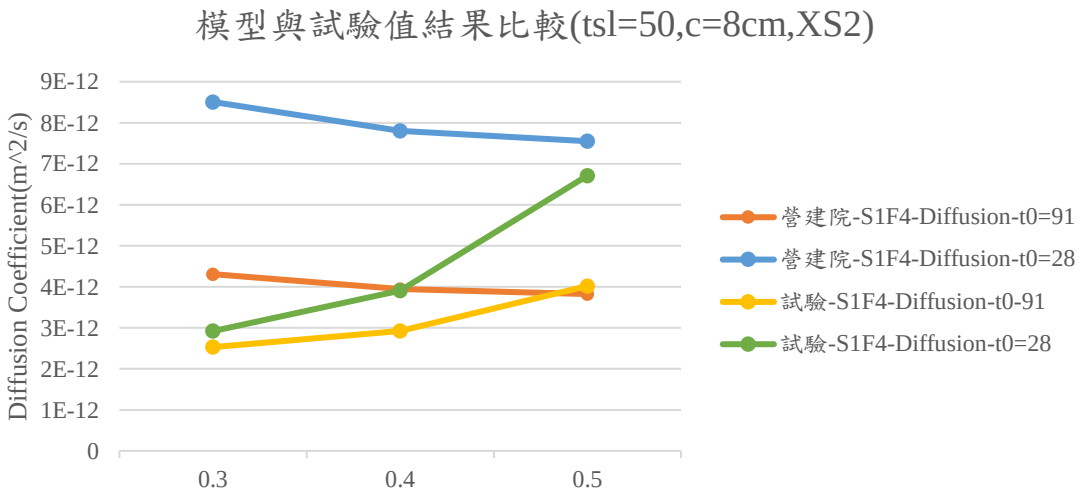


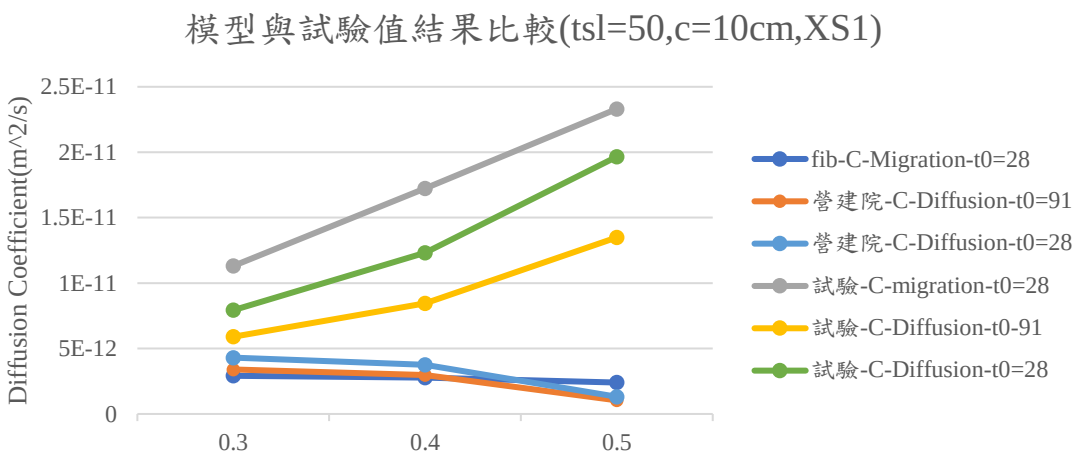
圖 6-37 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=8cm,XS2)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

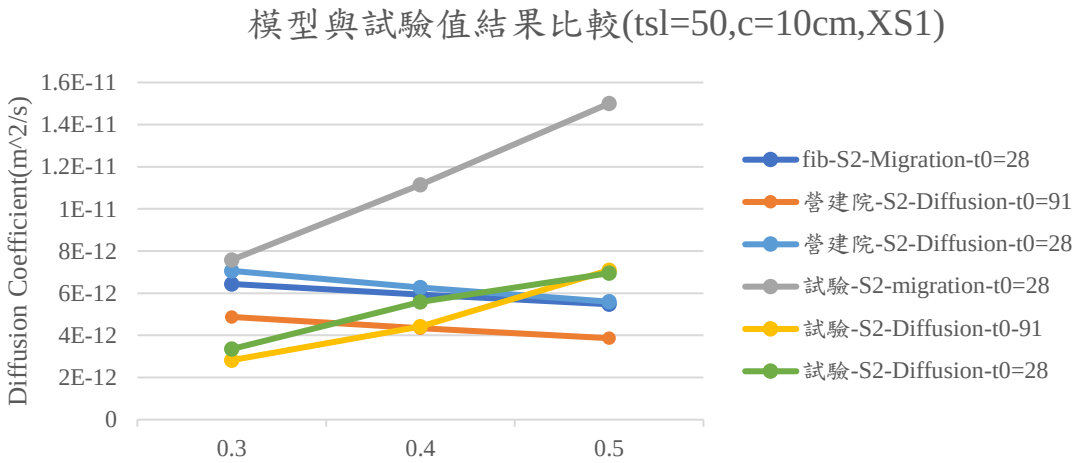
doi:10.6342/NTU202503522

表 6-34 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：10cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.26	0.58	0.54
0.4	0.16	0.35	0.31
0.5	0.10	0.08	0.07
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.85	1.73	2.11
0.4	0.53	0.98	1.12
0.5	0.36	0.55	0.81
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	1.01	3.17	1.77
0.4	0.70	1.79	1.42
0.5	0.42	0.98	0.68
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	3.01	6.54	7.82
0.4	1.62	3.44	4.34
0.5	1.20	1.84	3.04
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3		7.65	12.26
0.4		5.64	8.48
0.5		3.60	3.75
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	1.90	4.73	8.08
0.4	1.27	3.64	5.37
0.5	0.79	2.36	2.79

doi:10.6342/NTU202503522





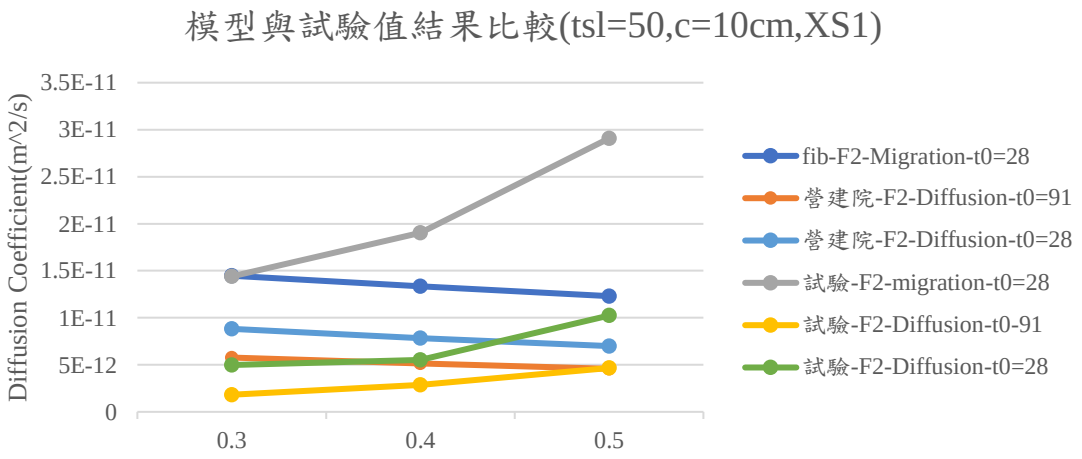
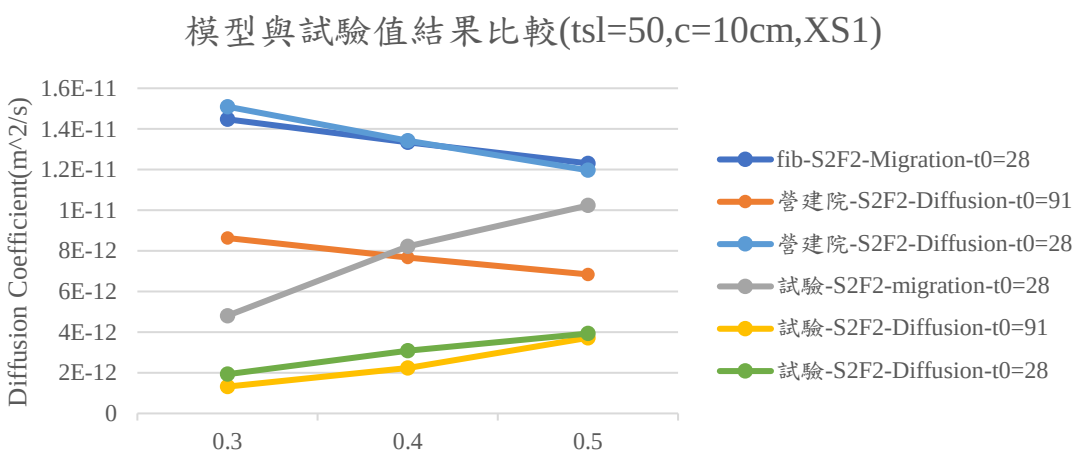
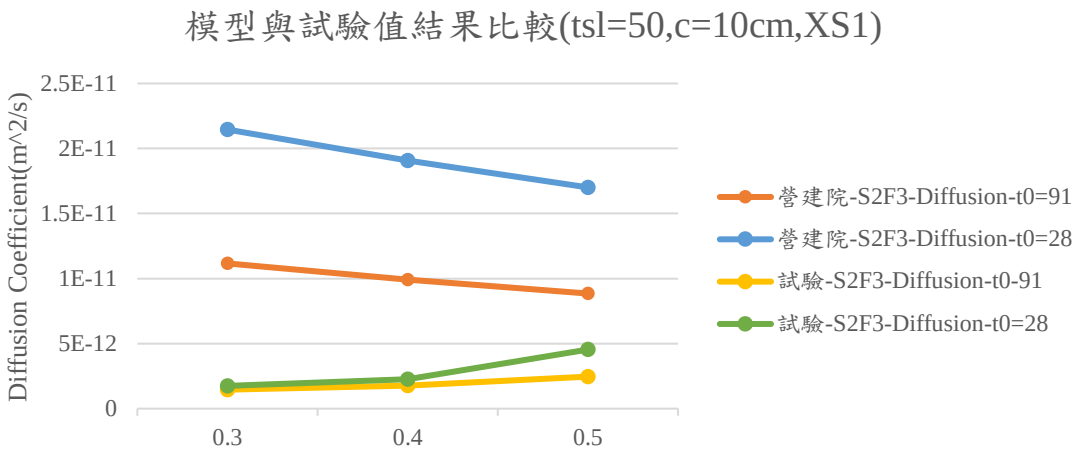


圖 6-38 模型與試驗值結果比較(tsl=100,c=8cm,XS3)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





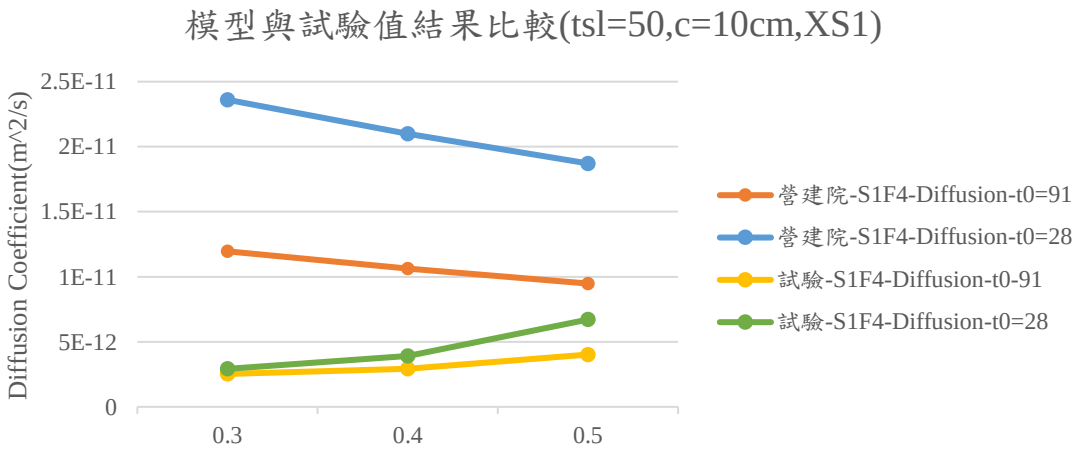


圖 6-39 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=10cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-35 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：8cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.16	0.37	0.35
0.4	0.10	0.22	0.19
0.5	0.07	0.12	0.11
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.51	1.11	1.35
0.4	0.31	0.63	0.72
0.5	0.22	0.35	0.51
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.61	2.03	1.13
0.4	0.41	1.15	0.91
0.5	0.26	0.62	0.43
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	1.82	4.19	5.01
0.4	0.95	2.20	2.78
0.5	0.74	1.17	1.94
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	4.90	7.85
0.4	-	3.61	5.43
0.5	-	2.29	2.38
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	3.03	5.18
0.4	-	2.33	3.44
0.5	-	1.50	1.77

doi:10.6342/NTU202503522

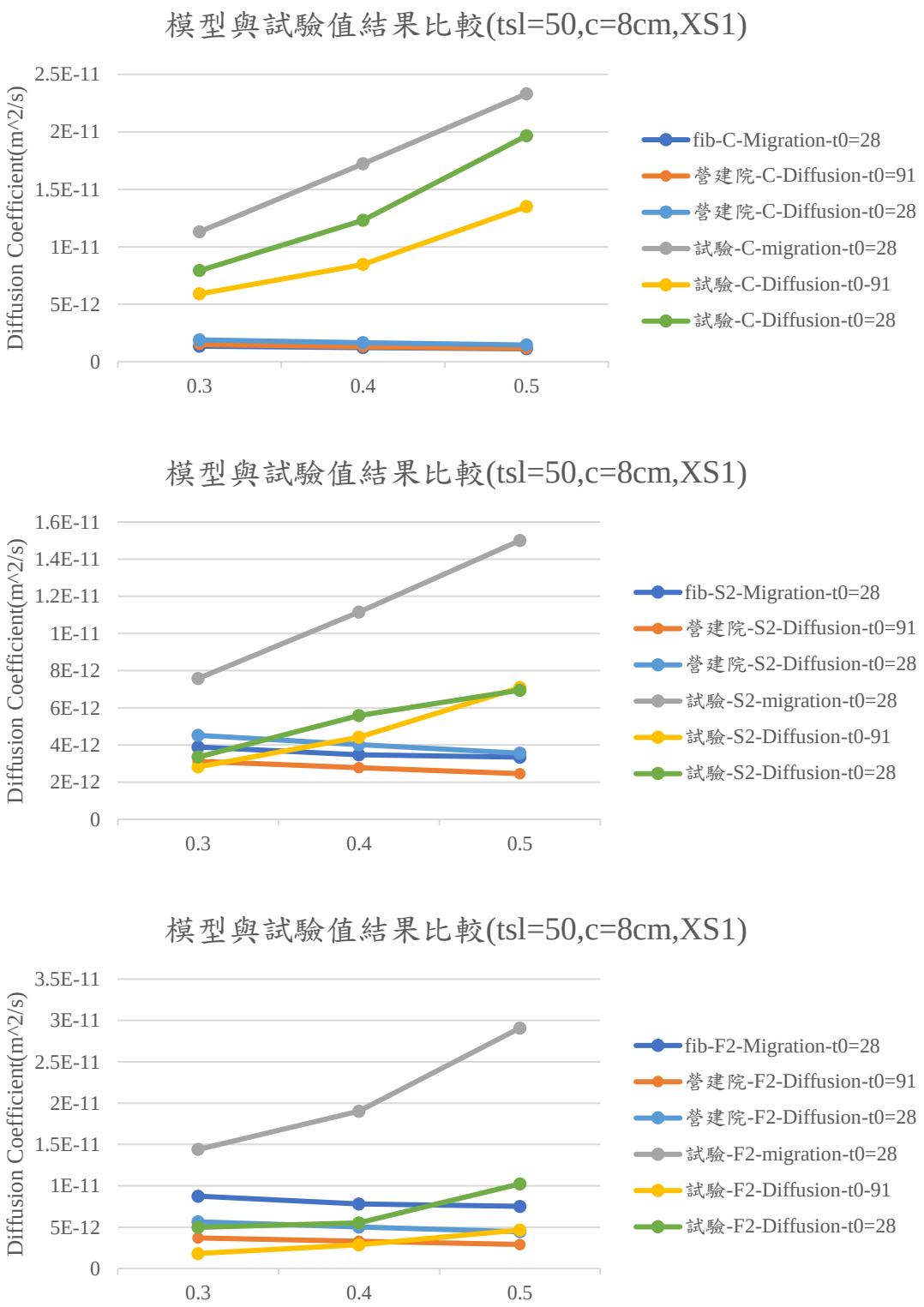


圖 6-40 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=8cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

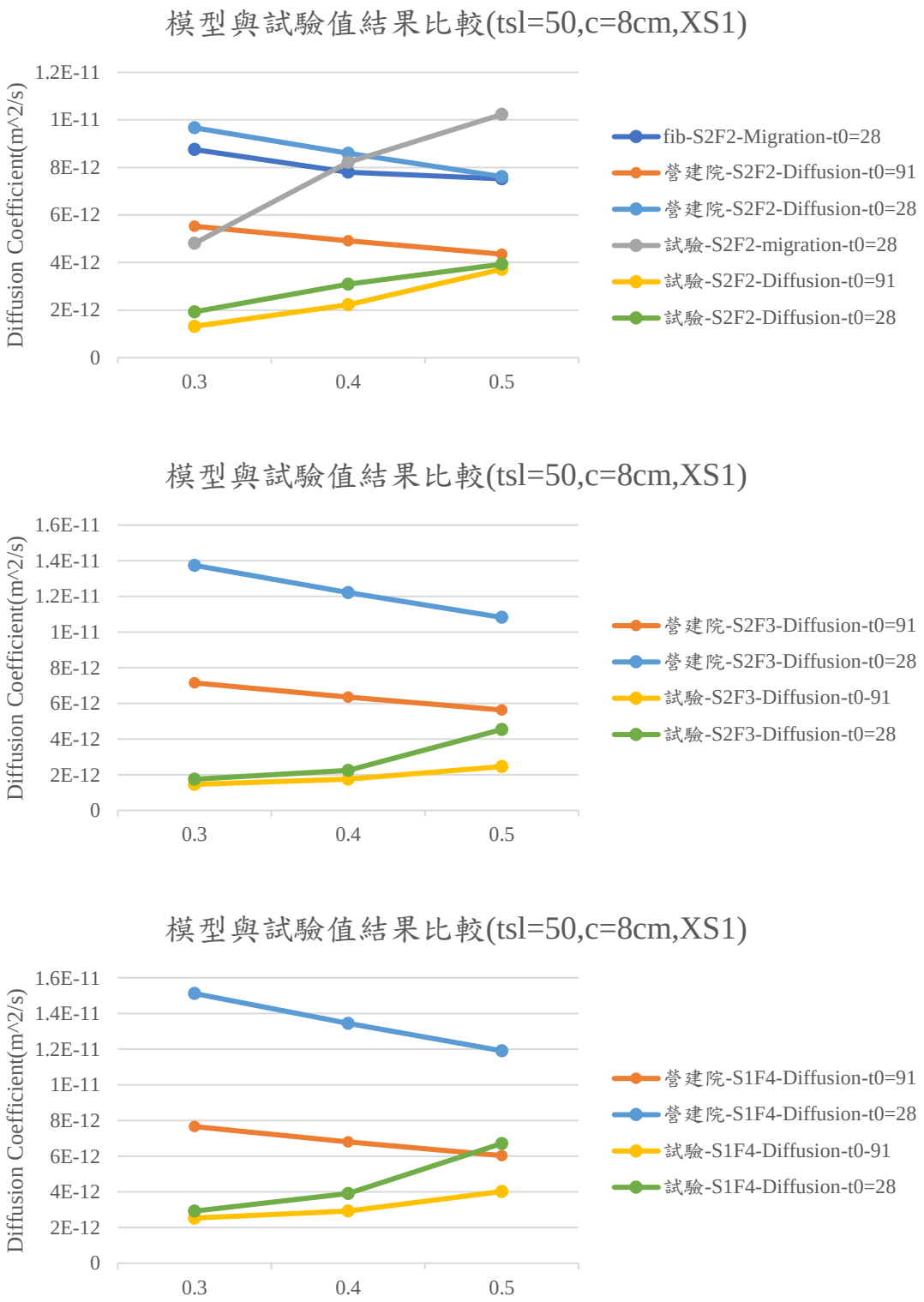


圖 6-41 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=8cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

表 6-36 各配比 DI 結果（使用年限：50 年，曝露環境：XS1，保護層厚度：6cm）

w/b	C		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.08	0.21	0.19
0.4	0.05	0.13	0.11
0.5	0.03	0.07	0.06
w/b	S2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.25	0.62	0.76
0.4	0.17	0.35	0.40
0.5	0.12	0.19	0.29
w/b	F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.30	1.14	0.64
0.4	0.22	0.64	0.51
0.5	0.14	0.35	0.24
w/b	S2F2		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	0.90	2.36	2.82
0.4	0.51	1.24	1.56
0.5	0.40	1.09	1.08
w/b	S2F3		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	2.76	4.42
0.4	-	2.03	3.05
0.5	-	1.28	1.33
w/b	S1F4		
	RCM t0=28	Ponding t0=91	Ponding t0=28
0.3	-	1.70	2.91
0.4	-	1.31	1.93
0.5	-	0.84	0.99

doi:10.6342/NTU202503522

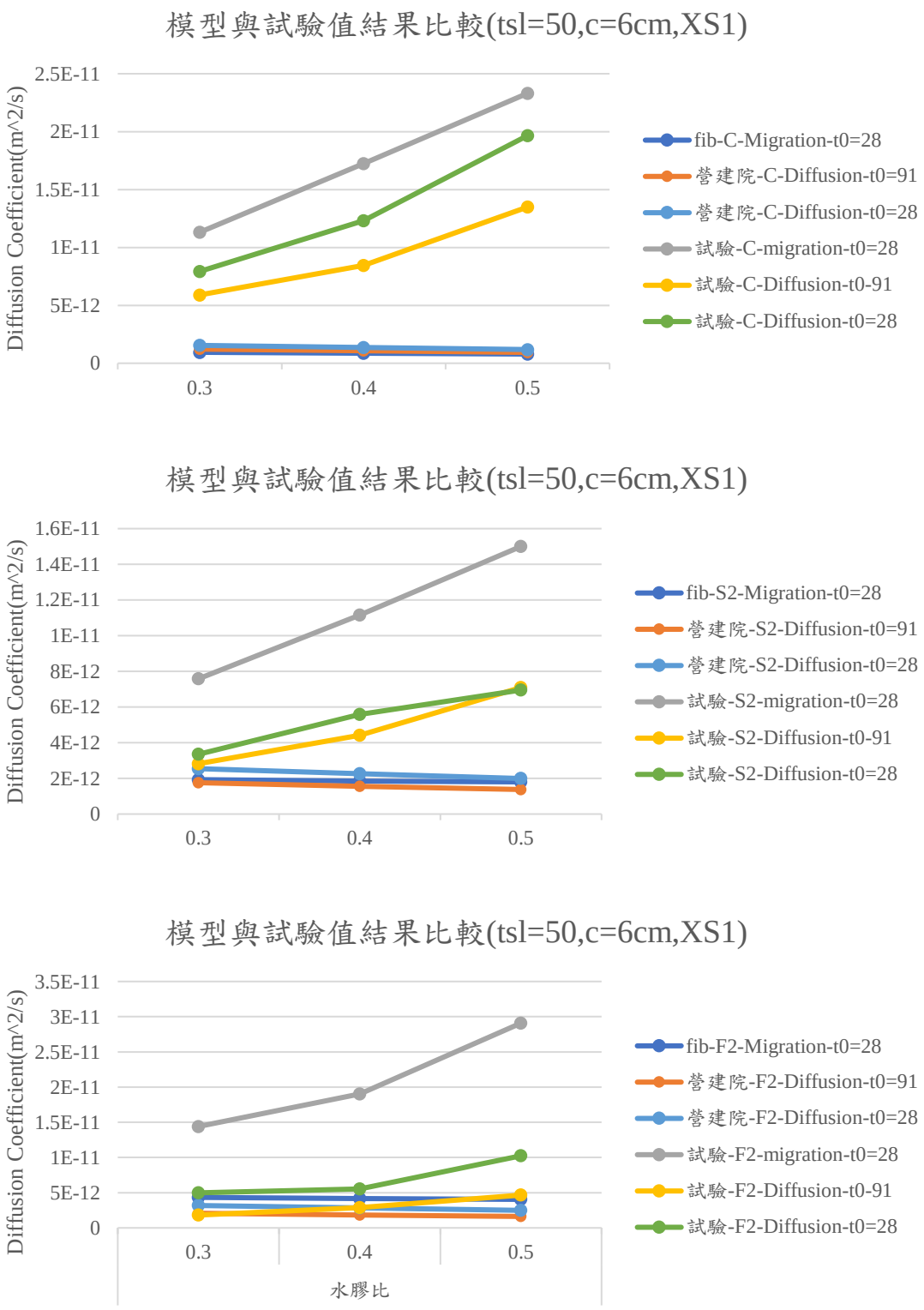
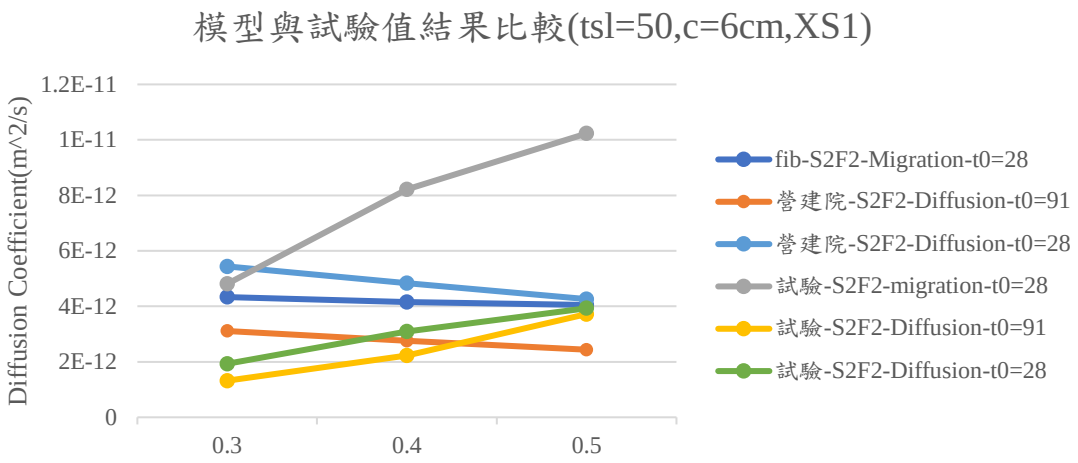
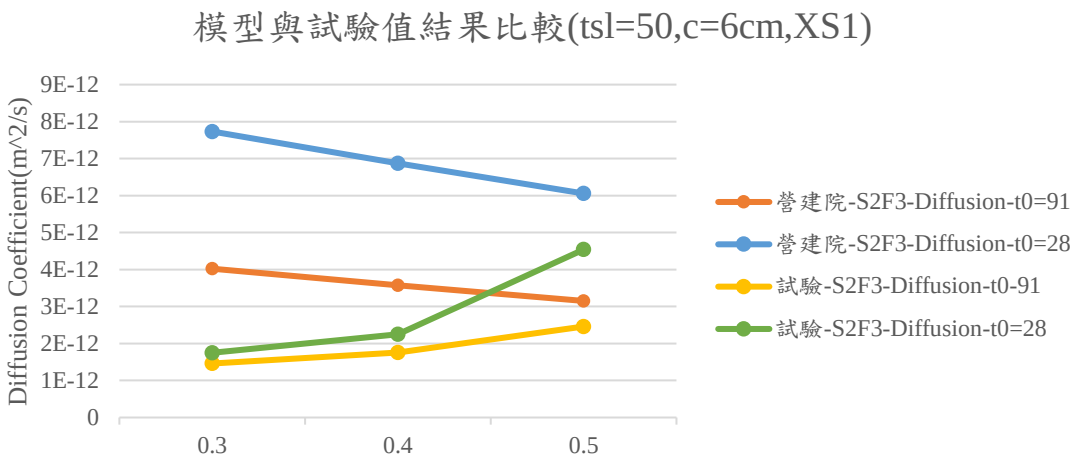


圖 6-42 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=6cm,XS1)(上：C 系列混凝土，中：S2 系列混凝土，下：F2 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522





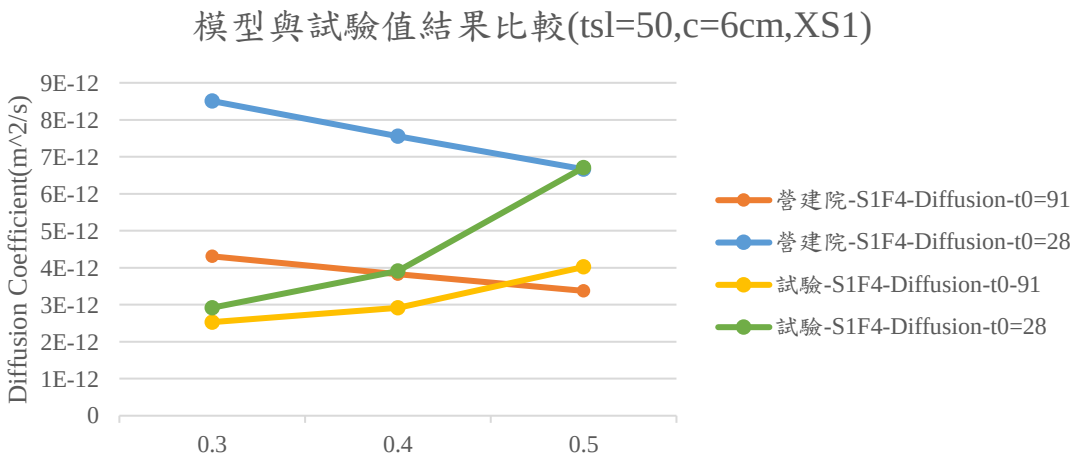


圖 6-43 模型與試驗值結果比較(tsl=50,c=6cm,XS1)(上：S2F2 系列混凝土，中：S2F3 系列混凝土，下：S1F4 系列混凝土)

doi:10.6342/NTU202503522

6.2.3氯離子擴散係數與使用年限關係

本研究利用營建院與 fib 模型得出混凝土氯離子擴散/傳輸係數與使用年限之關係圖，如圖 6-44 至圖 6-53 所示。本研究針對各混凝土配比分別考慮三種不同嚴重程度的鹽害環境進行耐久性分析，環境從輕微至嚴重分別為 XS1、XS2、XS3，水膠比部分則考利用了 0.3、0.4、0.5 三種水膠比來進行分析。

圖中 Migration coefficient 為利用 fib 模型來得到不同使用年限下氯離子傳輸係數的最大容許值，Diffusion coefficient 為利用營建院模型來得到不同使用年限下氯離子擴散係數的最大容許值，其中混凝土分為 28 天與 91 天兩種齡期。S2F3 與 S1F4 由於 fib 文件無提供其衰減係數建議值，因此無法計算其氯離子傳輸係數容許值。

本研究觀察到隨著使用年限需求的增加及結構物處於越嚴峻之鹽害環境時，各配比所容許的傳輸/擴散係數越低，隨著水灰比的增加，各配比所容許的傳輸/擴散係數也會隨著降低，此外，本研究也觀察到隨著環境越嚴峻，各配比方面，S2F3 的耐久性表現最好，擁有最高的氯離子擴散係數容許值而純水泥表現最差,其氯離子容許擴散係數最低。

doi:10.6342/NTU202503522

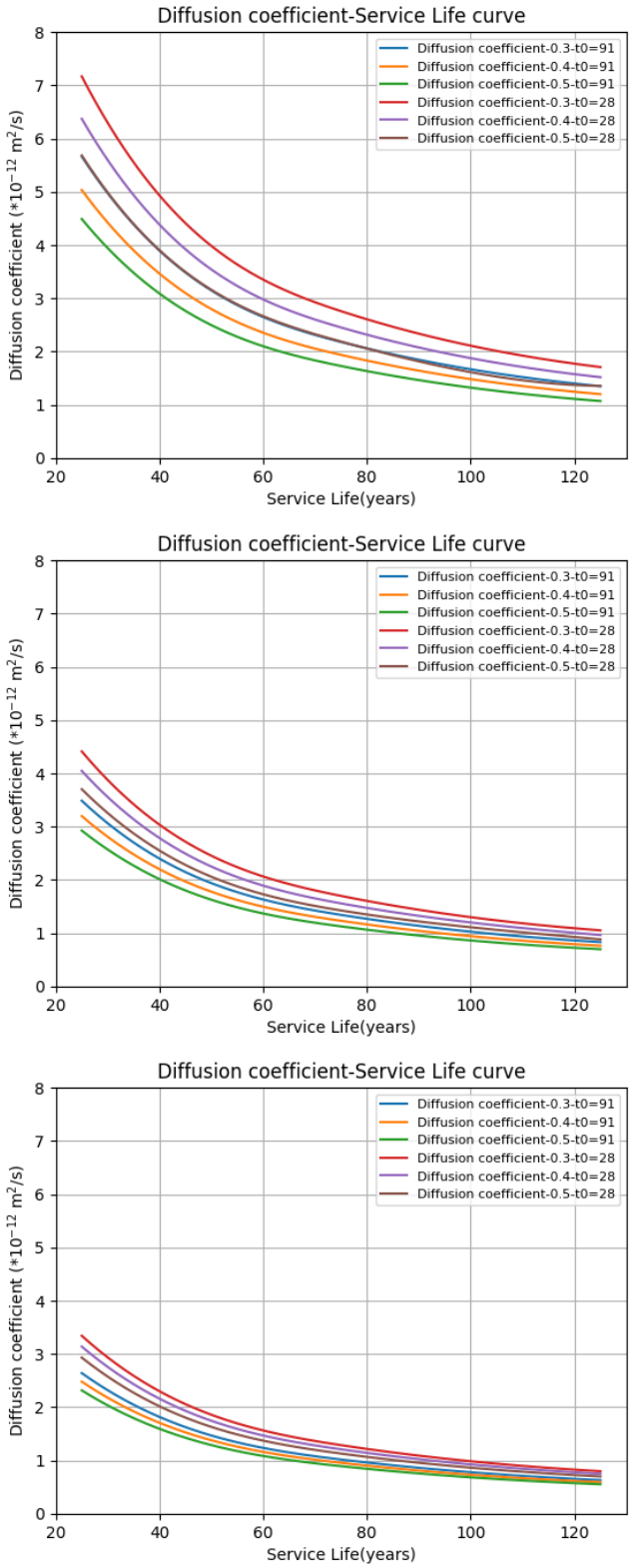
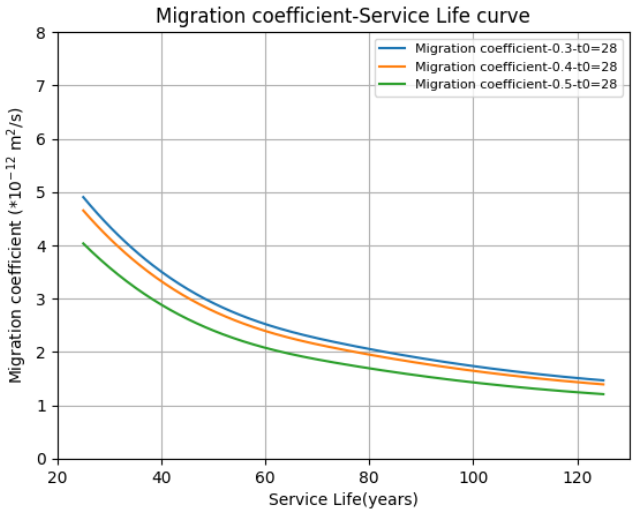
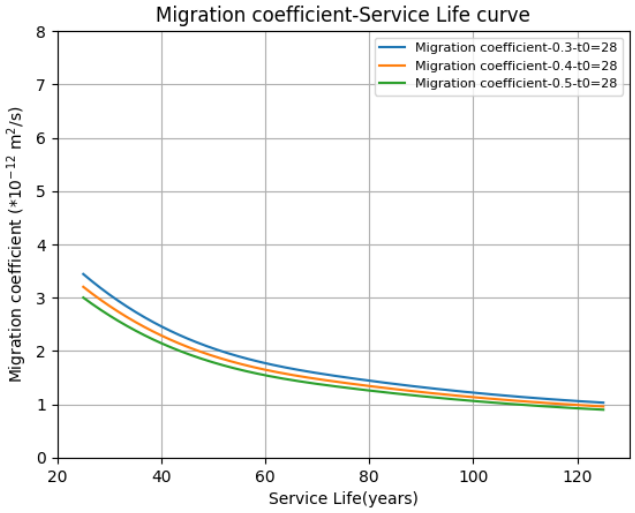


圖 6-44 C 系列混凝土擴散係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）

doi:10.6342/NTU202503522





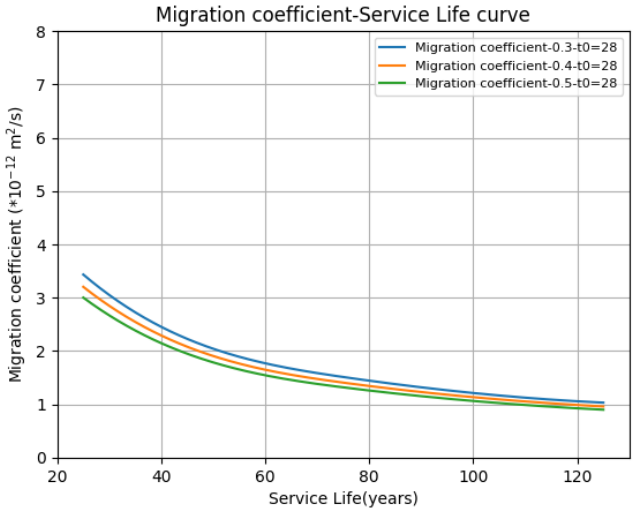


圖 6-45 C 系列混凝土傳輸係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）

doi:10.6342/NTU202503522

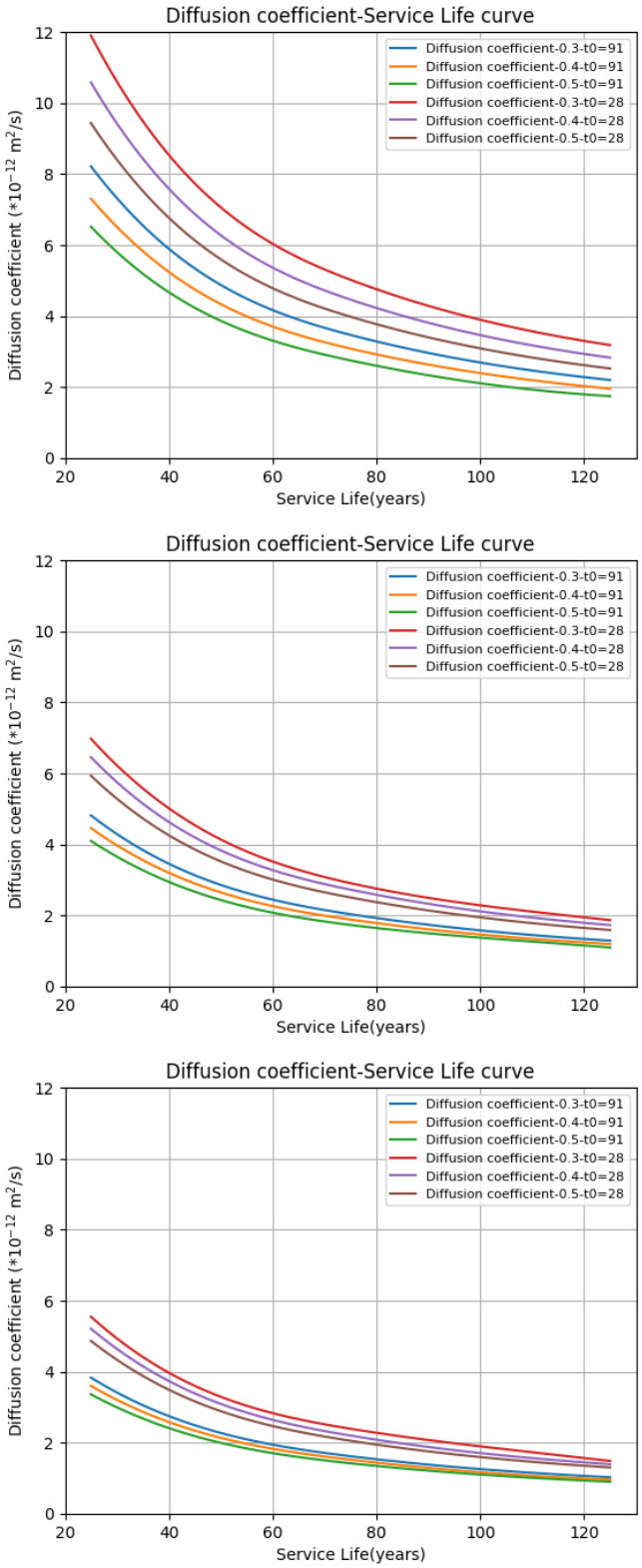
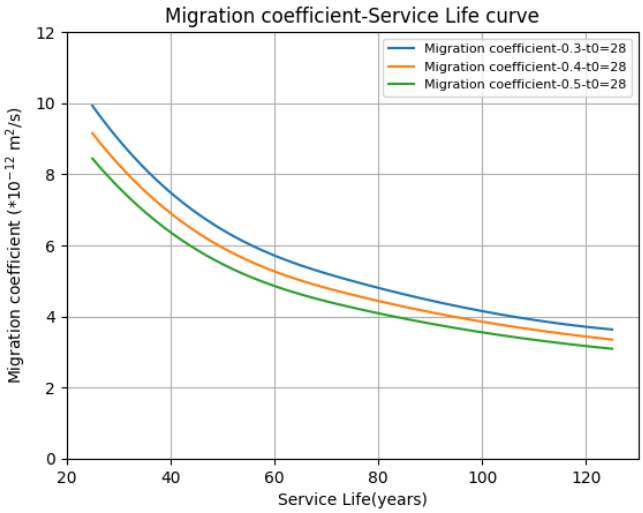
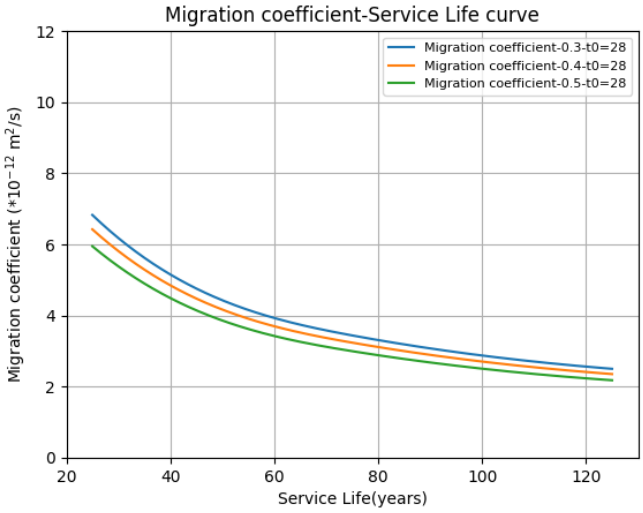


圖 6-46 S2 系列混凝土擴散係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）

doi:10.6342/NTU202503522





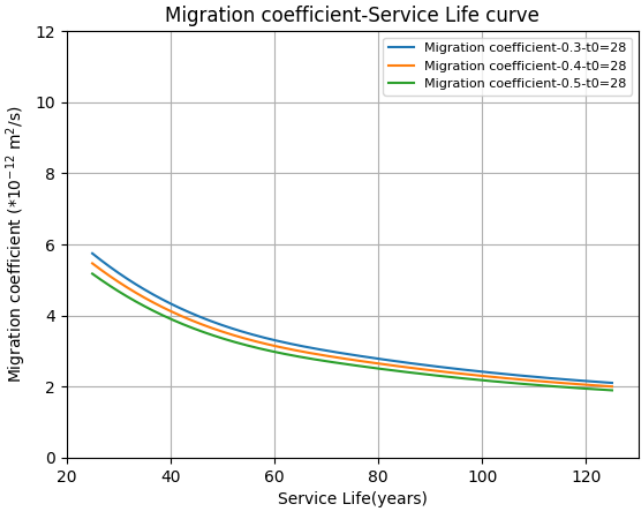


圖 6-47 S2 系列混凝土傳輸係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）

doi:10.6342/NTU202503522

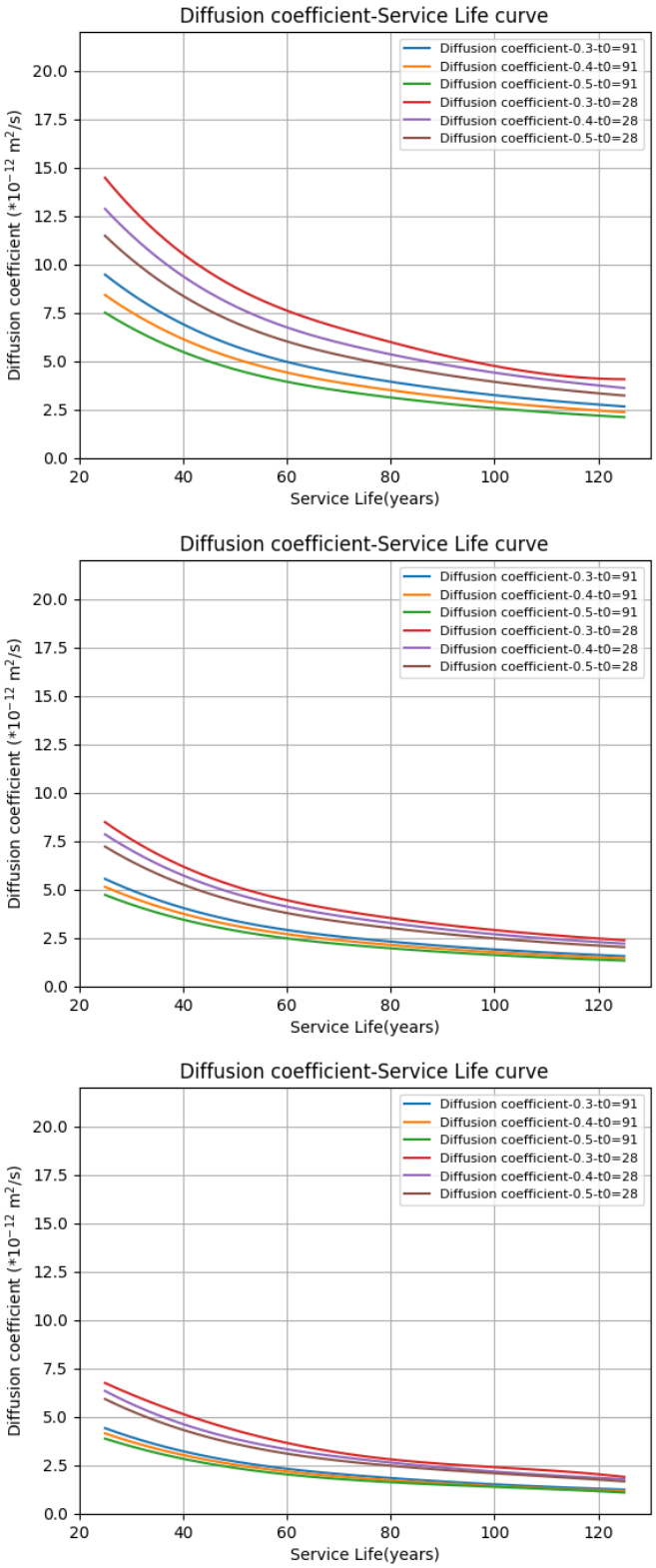


圖 6-48 F2 系列混凝土擴散係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）

doi:10.6342/NTU202503522

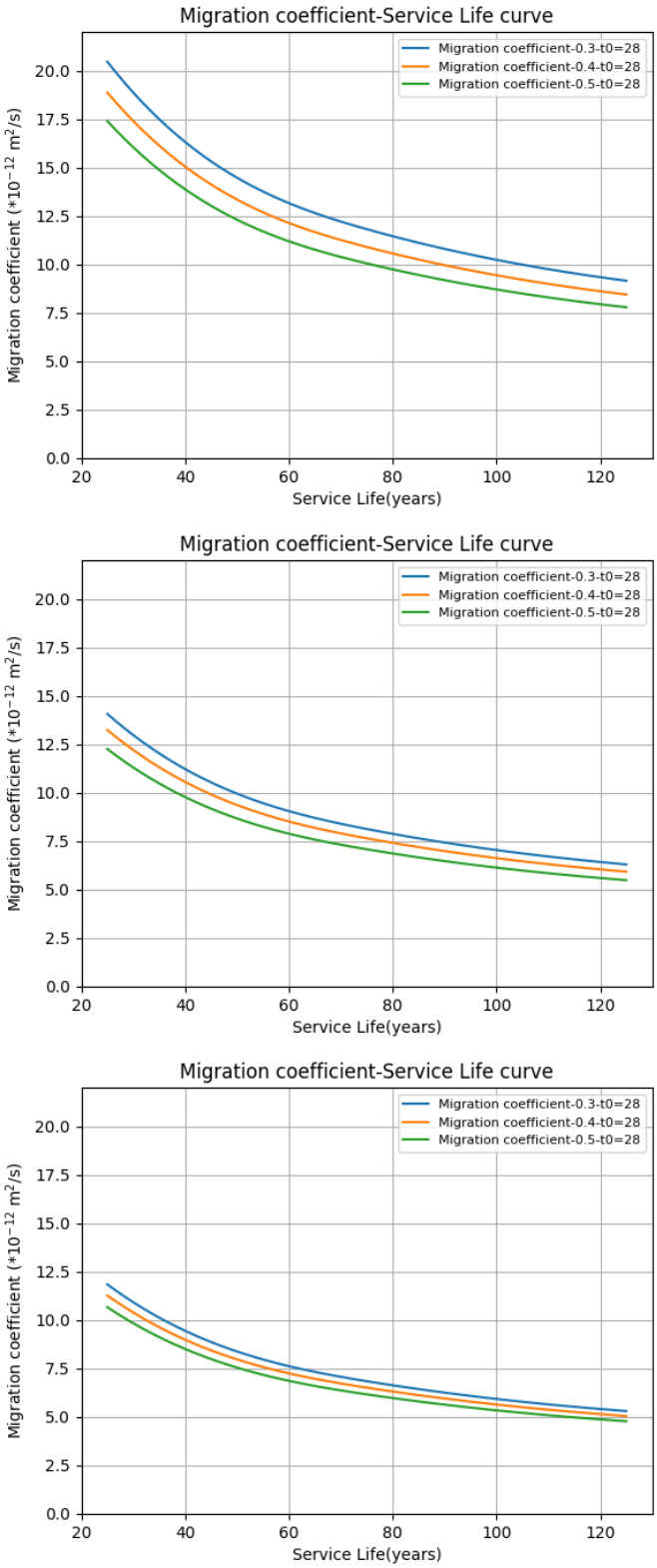


圖 6-49 F2 系列混凝土傳輸係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）

doi:10.6342/NTU202503522

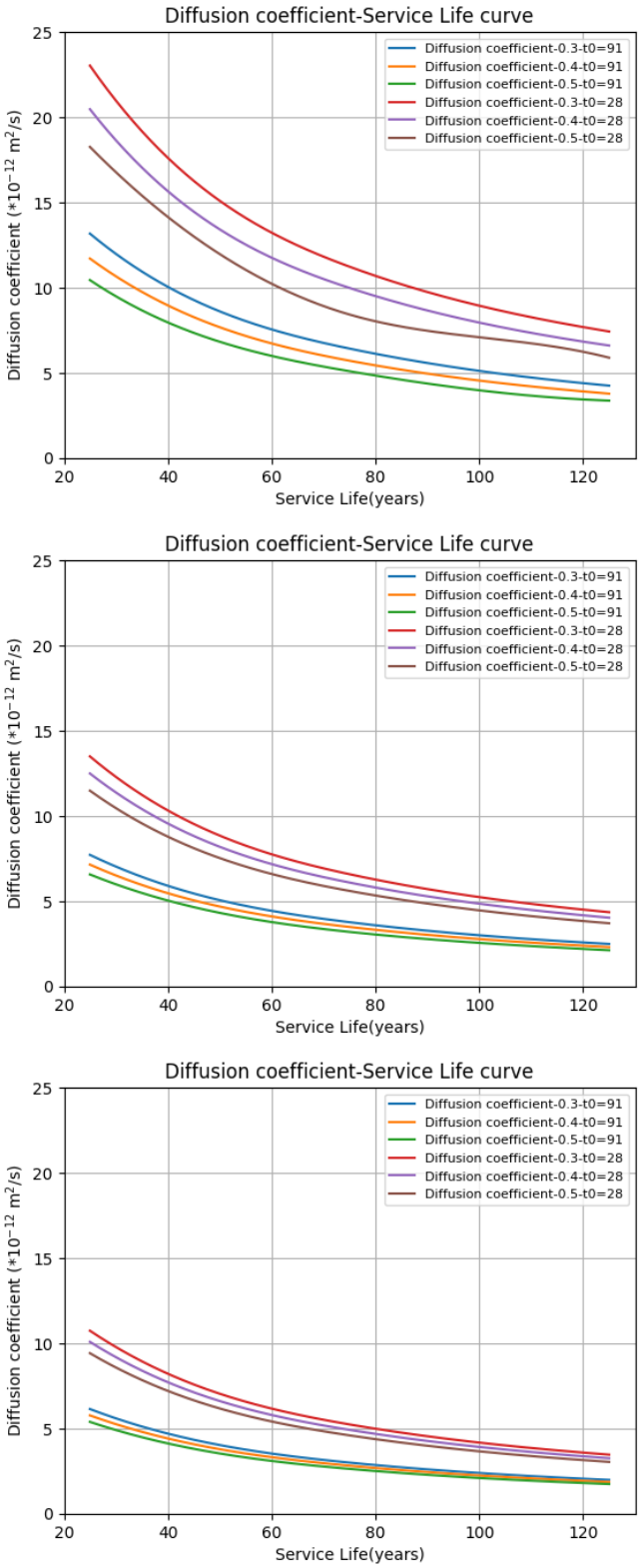


圖 6-50 S2F2 系列混凝土擴散係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）

doi:10.6342/NTU202503522

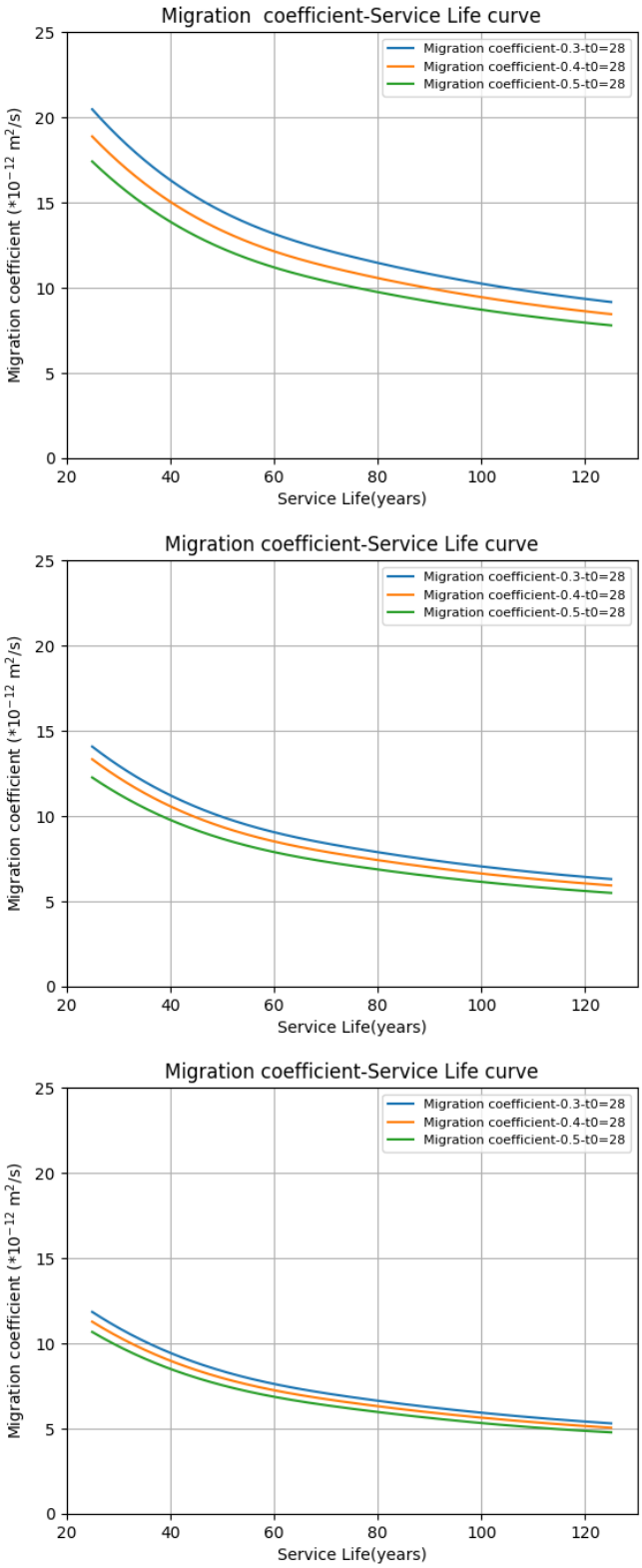


圖 6-51 S2F2 系列混凝土傳輸係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）

doi:10.6342/NTU202503522

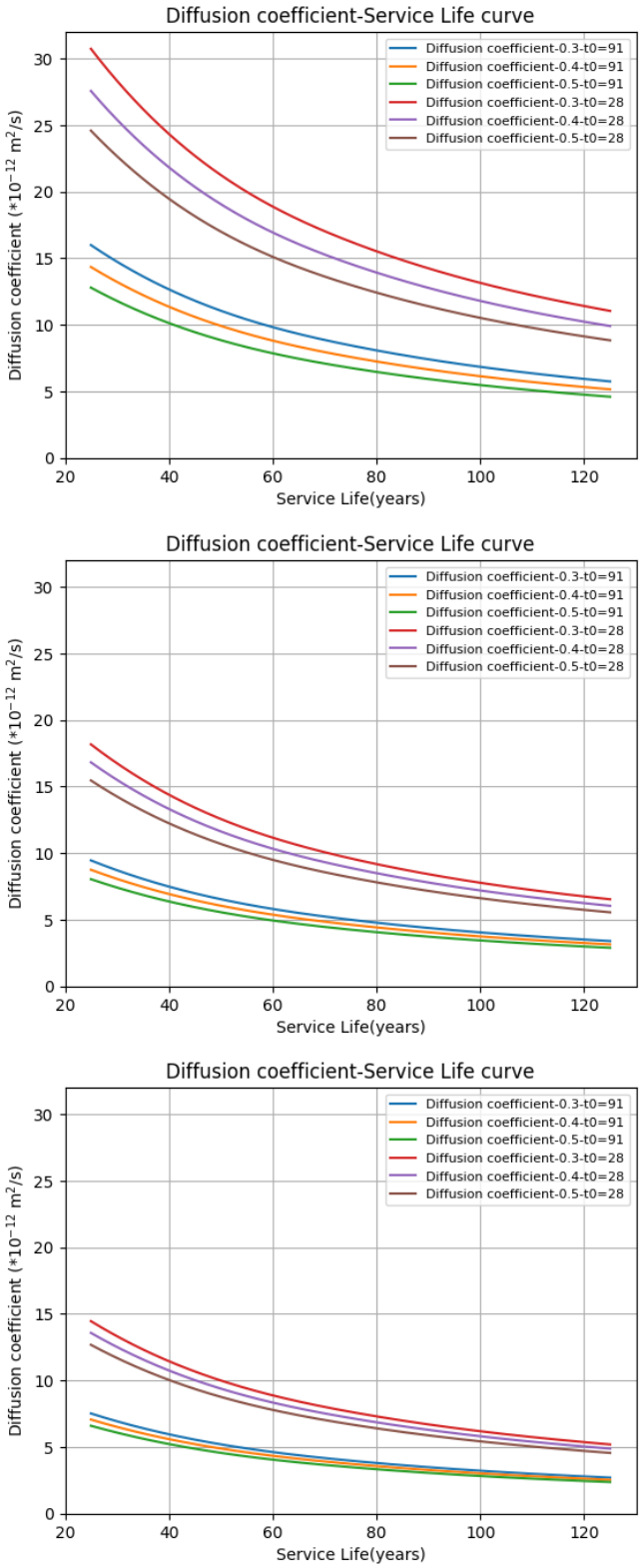
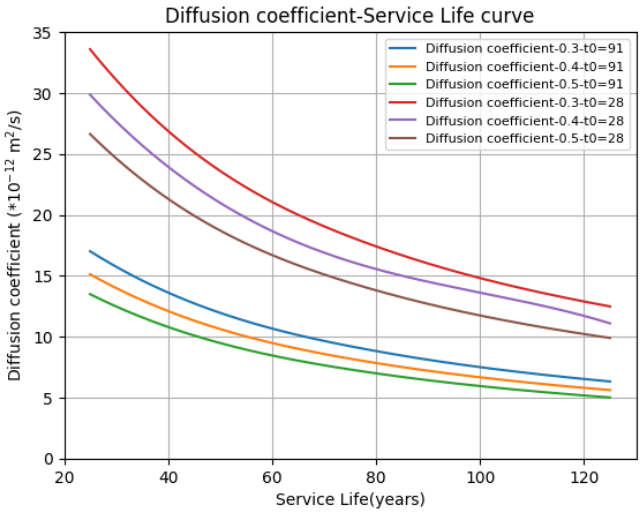
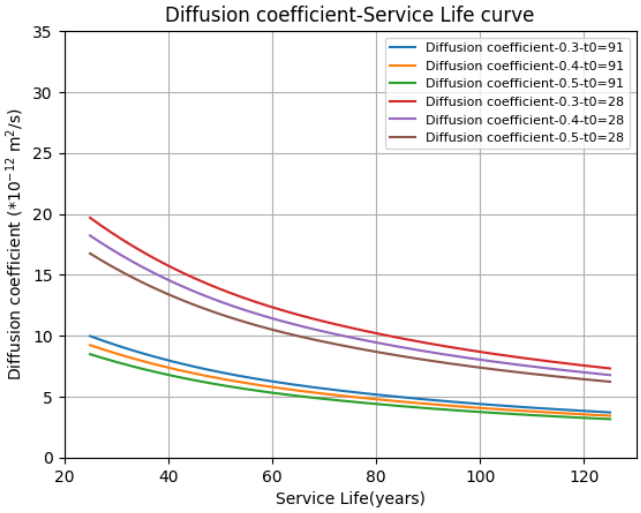


圖 6-52 S2F3 系列混凝土擴散係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）

doi:10.6342/NTU202503522





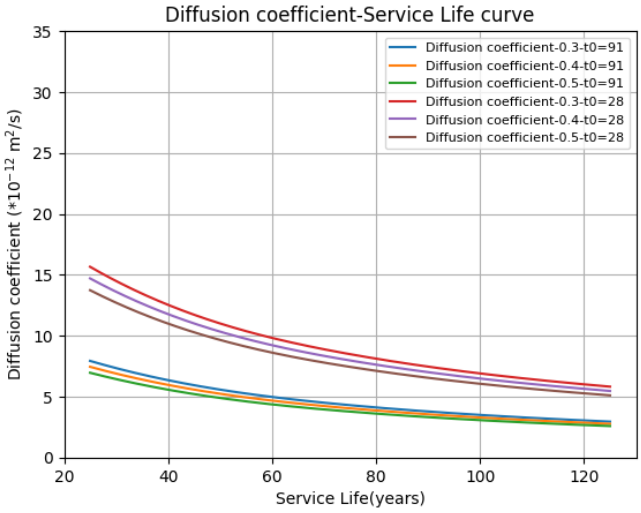


圖 6-53 S1F4 系列混凝土擴散係數與使用年限關係圖（上：XS1，中：XS2，下：XS3）

doi:10.6342/NTU202503522

第七章、結論與建議

7.1結論

1. 本研究整理並比較國內外耐久性設計規範，指出台灣目前混凝土設計規範耐久性仍以基於規範設計法(Prescriptive Design)為主，僅透過限制材料配比或保護層厚度間接確保耐久性，未能像性能設計法(Performance-based Design)中加入設計使用年限並利用部分係數法或全機率法等驗證方法真正評估結構物隨著時間逐步劣化的行為。

2. 本研究認為台灣現行規範雖已針對水膠比、強度與保護層厚度進行限制，但仍欠缺依據結構物重要性與實際環境條件設定合理使用年限的概念。因此本研究提出應用於台灣規範的耐久性設計流程圖，建議未來應根據結構物重要性確立使用年限作為耐久性設計核心依據，並進一步提出以耐久性指標如碳化速率、氯離子擴散係數、鋼筋種類選擇合適的方式來進行耐久性設計。當結構物使用年限需求較高，或位處於鹽害、高濕等嚴苛環境時，建議可採用性能設計法中之部分係數法或全機率法，驗證材料在設計年限內的耐久性表現。

3. 本研究使用部分係數法與全機率法針對台灣本土環境數據進行使用年限演示分析。使用年限分析結果顯示，混凝土水膠比越高，使用年限越低；保護層厚度越小，使用年限亦越低。雖然台灣規範針對不同曝露環境訂有最大水膠比限制，但分析結果指出，在相同水膠比的條件下，混凝土配比的變化仍會顯著影響使用年限的評估結果。

4. 根據不同設計使用年限、水膠比、保護層厚度可制定出各配比的氯離子擴散與傳輸係數容許值，分析結果顯示礦物摻料總量越多，氯離子擴散與傳輸係數容許值越高。容許值分析結果與台灣本土試驗數據相比較後提出

doi:10.6342/NTU202503522

耐久性指數 DI。DI 越大代表該配比耐久性越好，配比方面爐石飛灰取代量各 20%與 30%的 DI 值最大反之純水泥的 DI 值最小。

doi:10.6342/NTU202503522

7.2建議

1. S1F4 與 S2F3 配比由於 fib 文件中未提供 20% 以上飛灰取代量混凝土之衰減係數，導致實務上無法針對高飛灰取代量配比進行適用性評估，建議未來可針對實際工程所使用之混凝土配比，於不同齡期進行氯離子加速傳輸試驗（RCM），藉由不同齡期所對應之擴散係數值，反推其時間變化趨勢，進而推估對應之衰減係數 m。此法較能真實反映實際材料於服役期間之傳輸性能變化，有助於提升使用年限分析之準確性與實務性。

2. 全機率法中所採用之標準差多由 fib 文件提出計算方式，如果能系統性地收集台灣本土耐久性參數得到其均值及標準差後再進行全機率法的分析，可得到更貼近台灣實際情況的結構物可靠性指數與使用年限的關係圖。

3. 歐洲規範針對混凝土之 ERC 分類，具體可作為台灣耐久性規範的參考依據，因此建議台灣未來可根據在地實驗結果與長期觀測資料，建立以碳化速率與氯離子擴散係數為耐久性指標的方式建立台灣本土的 ERC 分類系統。

4. 耐久性劣化模型中礦物摻料取代量越高時，會導致衰減係數 m 值上升，進而推算出較高的擴散係數容許值，但實驗結果顯示並非取代量愈高耐久性愈好，應同時考慮摻料種類及其對混凝土微觀結構的影響。

doi:10.6342/NTU202503522

參考文獻

[1]. American Association of State Highway and Transportation Officials, “LRFD Bridge Design Specifications”, 9th ed. Washington, D.C.: AASHTO, 2020.

[2]. Fib, “Fib Bulletin 34:Model Code for Service Life Design”, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2006.

[3]. Fib, “Model Code for Concrete Structure 2020”, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2024.

[4]. CEN, “EN 1992-1-1: Eurocode 2 – Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings”, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2023.

[5]. JSCE, “Standard Specifications for Concrete structures:durability”, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 2018.

[6]. American Association of State Highway and Transportation Officials, Guide Specification for Service Life Design of Highway Bridges, 1st ed. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.

[7]. B. Sangoju, R. Gopal, B. B. H. Bharatkumar, "A review on performance-based specifications toward concrete durability," Structural Concrete, vol. 22, pp. 2526–2538, 2021.

[8]. H. Beushausen, R. Torrent, M. G. Alexander, "Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs," Cement and Concrete Research, vol. 119, pp. 11–20, May 2019.

doi:10.6342/NTU202503522

[9]. S. Demis, V. G. Papadakis, "Durability design process of reinforced concrete structures - Service life estimation, problems and perspectives," Journal of Building Engineering, vol. 26, November 2019.

[10]. V. M. John, M. Quattrone, P. C. R. A. Abrão, F. A. Cardoso, "Rethinking cement standards: Opportunities for a better future," Cement and Concrete Research, vol. 124, 2019.

[11]. M. Alexander, H. Beushausen, "Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique," Cement and Concrete Research, vol. 122, pp. 17–29, August 2019.

[12]. 內政部國土署，『建築物混凝土結構設計規範』，2023

[13]. 交通部，『公路橋梁設計規範，第十二章修訂版』，2015

[14]. American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary", Farmington Hills, MI, USA: ACI, 2019.

[15]. Standards Australia, "AS 3600:2018 – Concrete Structures",Sydney, Australia: Standards Australia, 2018.

[16]. CSA Group,"A23.1-09/A23.2-09: Concrete Materials and Methods of Concrete Construction / Test Methods and Standard Practices for Concrete″,Ontario, Canada: CSA International, 2009.

[17]. CEN, “EN 206: Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity”, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2013.

doi:10.6342/NTU202503522

[18]. CEN, “EN 1990: Eurocode – Basis of Structural Design”, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2023.

[19]. C. Moraru, A. Apostu, D. Georgescu, "Carbonation Resistance Classes of Concretes," Romanian Journal of Transport Infrastructure, vol. 10, no. 1, Article No.4, 2021.

[20]. SHRP 2, “Bridges for Service Life Beyond 100 Years: Service Limit State Design”, SHRP2 Report S2-R19B-RW-1, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2015.

[21]. BSI, " BS 8500-1:2006 – Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1 – Part 1: Method of specifying and guidance for the specifier", British Standards Institution, London, UK, 2006.

[22]. 葉冠麟,『利用快速氯離子滲透試驗與 90 天貯鹽試驗探討不同礦物摻料取代量對爐灰混凝土耐久性之影響』, 國立臺灣海洋大學材料工程研究所碩士班論文, 2024.

[23]. C.-K. Chiu, F.-C. Tu, C.-Y. Fan, "Risk assessment of environmental corrosion for reinforcing steel bars embedded in concrete in Taiwan," Department of Civil and Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan.

[24]. 許嘉芩,『學校建築混凝土中性化深度與齡期關係研究』, 國立臺北科技大學土木工程系土木與防災碩士班碩士學位論文, 2018.

[25]. Rahimi, "Semi-probabilistic Concept to the Service Life Design and Assessment of Concrete Structures Exposed to Chlorides," Doctoral thesis, Technische Universität München, Germany, 2016.

doi:10.6342/NTU202503522

[26]. Fib, “Fib Bulletin 112:complementary guidance on concrete durability”, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2024.

[27]. Fib, “Fib Bulletin 76:Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standrads”, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2015.

[28]. A. Leemann and F. Moro, "Carbonation of concrete: the role of CO_2 concentration, relative humidity and CO_2 buffer capacity," Materials and Structure*s*, vol. 50, no. 30, 2017

[29]. Nordtest, “NT Build 492: Concrete, mortar and cement-based repair materials – Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments”, Nordtest, Espoo, Finland, 1999.

[30]. K. Li, Q. Li, X. Zhou, and Z. Fan, "Durability design of the Hong Kong–Zhuhai–Macau sea-link project: Principle and procedure", J. Bridge Eng, 2015

[31]. CNS (Chinese National Standard). (2008). “Code for durability design of concrete structures.” GB/T50476-2008, China Building Industry Press, Beijing, China (in Chinese).

[32]. K. Li, D. Zhang, and Q. Li, "Service life design and assessment for concrete structures in HZM sea link project for 120 years," in Proc. Int. RILEM Conf. on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering – Segment on Service Life in Materials and Structures, Lyngby, Denmark, Aug. 2016.

[33]. 財團法人臺灣營建研究院,『淡江大橋鋼筋混凝土材料耐久性之探討』, 中興工程顧問股份有限公司，2016

doi:10.6342/NTU202503522

[34]. 財團法人臺灣營建研究院,『臺灣地區大氣中氯鹽與橋梁腐蝕劣化環境之研究』, 中興工程顧問股份有限公司，2015

[35]. Life 365, Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, Version 2.2, 2012

[36]. Elizabeth Rose Bales, Venkatasaikrishna Chitrapu, and Madeleine M. Flint, Ph.D., "Bridge Service Life Design", Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, VA, 2018.

[37]. JSCE, 『混凝土標準示方書，設計篇』, 2022.

[38]. ACI Committee 365, "ACI 365.1R-17: Service-Life Prediction – State-of-the-Art Report", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2017.

[39]. 羅永霖,『利用快速氯離子傳輸試驗探討爐灰對混凝土耐久性之影響』, 國立臺灣海洋大學材料工程研究所碩士班論文, 2024.

[40]. AASHTO, "Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration", AASHTO T259-80 (2011), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2011.

doi:10.6342/NTU202503522