

國立臺灣大學工學院土木工程學研究所

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

添加爐石和飛灰對石灰石水泥混凝土之耐久性研究

Study on the Durability of Limestone Cement Concrete

with the Addition of Slag and Fly Ash

林品宏

Ping-Hung Lin

指導教授：詹穎雯 博士

Advisor: Yin-Wen Chan, Ph.D.

中華民國 114 年 7 月

July, 2025



謝辭

在這兩年的研究所生活中，首先要感謝的是我的指導教授詹穎雯教授。詹老師在我課業和研究遇到瓶頸時，總是提供方向和寶貴的建議，並且不時關心我們實驗和研究的進度。老師不僅教會了書本上的知識，還教會了做人處事的道理。老師的耐心指導，確實讓這兩年成為我求學生涯中最充實的一段時光。我謹此向詹穎雯老師獻上我最崇高的敬意和深深的謝意。

我也要感謝廖文正教授和胡瑋秀教授在每次的團體討論中所給予的寶貴建議。廖老師總是以嚴謹的態度審視我的研究，並提供具體而實用的建議。胡老師則以專業知識，為我的研究提供了見解和建議。每次的團體討論，不僅是知識的交流，更是思維的碰撞，讓我在學術上有了更全面的成長。

我衷心感謝口試委員廖文正教授、楊仲家教授和胡瑋秀教授在我的論文口試過程中所給予的寶貴意見和指導。老師們的建議使我的論文更加完善，讓我在學術上獲得了更深刻的認識和成長。

在研究過程中，我誠摯感謝營建院的育聖組長、李軒學長、喬茵學姊、峻輔學長與永霖學長。在實驗方面提供了大量的協助，幫助我克服了许多挑戰，順利完成了各項實驗工作。感謝你們的支持和幫助，讓我的研究能夠順利進行。另外，感謝威佑學長在這兩年來對我的關心與幫助。

感謝 812 研究室的學長峻輔、竣帆、濂淞、尚恩、奕霖和瀚仁以及庭安。不僅給予了修課上的寶貴建議，還分享考古題的解答，讓在學業上可以更加得心應手。

感謝 812 研究室的同學，甫安、昀庭、林康、淳瑋、恆育、宏彬、宥霖。在碩一時期，我們一起面對修課上的挑戰，互相討論問題、分享心得，讓彼此的學習更上一層樓。到了碩二，我們在研究上互相協助，共同克服困難，並在閒暇時光一起打牌、吃飯，讓日子過得充實且快樂。

感謝 812 研究室的學弟峻誠、霆恩、文政、宇斐、智輝、宇祥、詣承、學妹喬
嶸、佳穎、旺達的協助與支持。祝福你們在未來的研究道路上一帆風順。
最後，我要感謝我的家人在過去兩年間的陪伴和支持。他們在我遇到困難時給
予了無私的支持，使我得以克服種種困難，順利完成學業。





摘要

本研究旨在探討石灰石水泥系統中摻配爐石與飛灰等礦物摻料對混凝土力學性能與耐久性之影響，進一步評估其作為低碳建材於實務工程中之可行性與永續應用潛力。隨著全球面對氣候變遷與淨零碳排的壓力日益加劇，建築材料產業積極尋求低碳轉型。水泥工業長期為高碳排放源，其燒製過程中熟料階段約貢獻全球二氧化碳總排放量的 7% 至 8%。石灰石水泥因可降低熟料用量，減少能耗與碳排放，已成為具發展潛力之替代型水泥材料。然而，其耐久性表現仍具高度變異，尤其於暴露於氯離子滲透與硫酸鹽侵蝕等嚴苛環境下，其微觀反應行為與長期穩定性尚待驗證。

本研究採用石灰石水泥與卜特蘭 I 型水泥，搭配不同比例之爐石與飛灰，分別製備多組混凝土與水泥砂漿試體，並設計不同水膠比（0.4、0.5、0.6）及石灰石粉細度變化作為主要變因。系統性評估其新拌混凝土性質（工作度、泌水率、含氣量等）、力學性質（抗壓強度、劈裂抗張強度、彈性模數）及耐久性（RCM、RCPT、硫酸鹽浸泡、乾燥收縮等指標）。其中，核心比較對象為三元混合膠結材料系統（CS35F15M、LS35F15M），即以 35% 爐石與 15% 飛灰取代水泥，藉此探討其與石灰石水泥共同作用下之反應行為與性能表現。

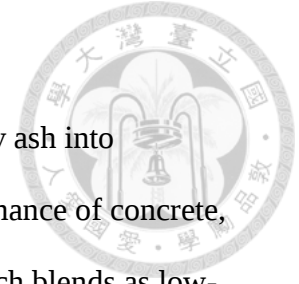
試驗結果顯示，石灰石水泥因具填充效應與成核效應，能有效促進早期水化反應，儘管早期抗壓強度略低於 I 型水泥，但於 28 天後展現良好後期強度發展潛力。尤其搭配飛灰與爐石摻配後，能有效補足石灰石水泥稀釋效應所造成之反應性不足，顯現出材料間的協同效應。RCM 與 RCPT 試驗顯示，三元系混凝土之氯離子傳輸係數可降至 $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 以下，具優異之抗滲性與緻密結構。硫酸鹽侵蝕試驗亦顯示，複合摻料可顯著提升體積穩定性與抗劣化能力，減少裂縫與重量損失，且隨石灰石粉細度增加，其耐硫酸鹽性能亦同步提升，顯示細度控制對微觀反應結構具正面影響。

此外，乾燥收縮結果指出，石灰石與爐灰摻配可有效降低毛細水逸散與孔隙連通性，改善早期乾縮與開裂風險。整體而言，石灰石水泥與爐石、飛灰三者之複摻系統不僅具良好工作性、力學性與長期耐久性，更能有效降低水泥用量與碳排放，符合現今低碳建材發展趨勢。

本研究成果可作為石灰石水泥與複合礦物摻料應用於混凝土材料設計之實驗依據，亦有助於未來永續建築與基礎設施中之實務推廣與標準制定，為綠色工程與低碳社會發展貢獻一份助力。

關鍵字：石灰石水泥、爐石、飛灰、卜作嵐反應、混凝土耐久性、氯離子傳輸係數、硫酸鹽侵蝕

ABSTRACT



This study investigates the effects of incorporating slag and fly ash into limestone cement systems on the mechanical and durability performance of concrete, aiming to evaluate the feasibility and long-term sustainability of such blends as low-carbon construction materials. In response to the global push for carbon neutrality and sustainable development, the cement industry—responsible for approximately 7–8% of total global CO₂ emissions, primarily from clinker calcination—has become a key target for decarbonization. Limestone cement, which reduces clinker consumption and energy use, offers promising environmental benefits. However, concerns remain regarding its durability, especially under aggressive conditions such as chloride ingress and sulfate attack.

In this study, domestic Type I Portland cement and limestone cement were used in combination with various proportions of ground granulated blast-furnace slag (GGBS) and fly ash to produce multiple series of concrete and mortar specimens. Key variables included water-to-binder ratio (0.4, 0.5, 0.6), mineral admixture type and content, and limestone fineness. A comprehensive experimental program was conducted to evaluate fresh properties (slump, bleeding rate, air content), mechanical properties (compressive strength, splitting tensile strength, and modulus of elasticity), and durability indicators including rapid chloride migration (RCM), rapid chloride permeability (RCPT), sulfate immersion, and drying shrinkage. The core comparative focus was placed on ternary blended binders (CS35F15M and LS35F15M) containing 35% slag and 15% fly ash, to examine the synergistic effects within the limestone cement matrix.

Experimental results revealed that although limestone cement exhibited slightly lower early-age strength, its filler effect and nucleation ability effectively accelerated

hydration. With the addition of slag and fly ash, the later-age strength improved significantly, indicating a strong synergistic interaction among the mineral components. RCM and RCPT tests demonstrated that ternary mixes achieved chloride migration coefficients below 10^{-8} cm²/s, highlighting excellent impermeability and pore structure densification. Sulfate immersion tests also showed improved dimensional stability and resistance to chemical degradation, particularly for mixes with finer limestone particles, which enhanced long-term durability.

Furthermore, drying shrinkage tests indicated that incorporating limestone powder and supplementary cementitious materials reduced capillary water loss and pore connectivity, helping to mitigate cracking risks at early age. Overall, the ternary system combining limestone cement with slag and fly ash provided a favorable balance between workability, strength development, and long-term durability, while also contributing to substantial clinker reduction and carbon savings.

The findings of this study provide experimental support for the design of green concrete mixtures using blended cements and supplementary cementitious materials. They also offer practical insights for the promotion of sustainable building practices and the development of standards for low-carbon infrastructure, contributing meaningfully to the advancement of environmentally friendly construction and carbon-neutral engineering.

Keywords: Limestone Cement, Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS), Fly Ash, Pozzolanic Reaction, Concrete Durability, Chloride Ion Transport, Sulfate Attack

目次



謝辭.....	I
摘要.....	III
ABSTRACT.....	V
目次.....	VII
圖次.....	X
表次.....	XV
第一章、緒論.....	1
1.1. 研究動機.....	1
1.2. 研究目的.....	2
1.3. 研究流程圖.....	2
第二章、文獻回顧.....	4
2.1. 卜特蘭水泥.....	4
2.1.1. 水泥成分.....	4
2.1.2. 水化作用及產物.....	7
2.2. 石灰石水泥、.....	11
2.2.1. 組成.....	11
2.2.2. 填充效應.....	12
2.2.3. 成核效應.....	15
2.2.4. 化學效應.....	20
2.2.5. 稀釋效應.....	24
2.2.6. 石灰石對混凝土性質的影響.....	28
2.3. 卜作嵐摻料.....	29
2.3.1. 爐石.....	29
2.3.2. 飛灰.....	30

2.3.3. 卜作嵐反應機理.....	31
2.3.4. 卜作嵐摻料加石灰石協同效應.....	32
2.4. 乾燥收縮.....	33
2.5. 耐久性.....	34
2.5.1. 氯離子傳輸機制.....	34
2.5.2. 影響傳輸行為的因素.....	35
2.5.3. 不同材料對氯離子傳輸的影響.....	36
2.5.4. 硫酸鹽侵蝕機理.....	37
2.5.5. 不同材料對硫酸鹽侵蝕的抵抗能力.....	40
2.5.6. 硫酸鹽侵蝕因素.....	41
第三章、實驗計畫.....	44
3.1. 試驗材料.....	45
3.2. 試驗儀器.....	51
3.2.1. 力學性質試驗.....	51
3.2.2. 耐久性試驗.....	52
3.3. 試體製作.....	54
3.3.1. 製作混凝土試體.....	54
3.3.2. 製作水泥砂漿試體步驟（依據 CNS 3655）.....	54
3.4. 配比設計.....	55
3.4.1. 石灰石水泥搭配固定爐灰比的混凝土配比.....	55
3.4.2. 石灰石水泥搭配不同爐灰比的混凝土配比.....	56
3.4.3. 添加不同細度石灰石粉的水泥砂漿配比.....	58
3.4.4. 石灰石水泥搭配不同爐灰比的水泥砂漿配比.....	59
3.5. 新拌混凝土性質試驗.....	59
3.5.1. 混凝土坍度試驗.....	60
3.5.2. 混凝土單位重試驗.....	60

3.5.3. 混凝土含氣量試驗.....	61
3.5.4. 混凝土泌水試驗.....	61
3.5.5. 混凝土凝結試驗.....	62
3.5.6. 混凝土氯離子含量試驗.....	63
3.5.7. 混凝土 pH 值.....	63
3.6. 力學性質試驗.....	64
3.6.1. 抗壓強度試驗.....	64
3.6.2. 劈裂抗張強度試驗.....	65
3.6.3. 彈性模數試驗.....	66
3.7. 耐久性試驗.....	67
3.7.1. 快速氯離子傳輸試驗(RCM).....	67
3.7.2. 快速氯離子滲透試驗(RCPT).....	69
3.7.3. 硫酸鹽浸泡試驗-長度變化.....	70
3.7.4. 硫酸鹽浸泡試驗-重量變化.....	71
3.7.5. 乾燥收縮.....	72
第四章、分析結果與討論.....	73
4.1. 石灰石水泥添加固定爐灰比的混凝土.....	73
4.1.1. 新拌性質試驗結果.....	73
4.1.2. 力學性質試驗結果.....	75
4.1.3. 耐久性試驗結果.....	87
4.2. 石灰石水泥搭配不同爐灰比的混凝土.....	95
4.2.1. 抗壓強度結果.....	95
4.2.2. RCM 試驗結果.....	103
4.3. 添加不同細度石灰石粉的水泥砂漿.....	115
4.4. 石灰石水泥搭配不同爐灰比的水泥砂漿.....	127
4.4.1. 方塊抗壓強度 28 天.....	127

4.4.2. 硫酸鹽浸泡試驗-重量變化	129
第五章、結論與建議.....	148
5.1. 結論.....	148
5.2. 建議.....	149
第六章、文獻回顧.....	151

圖次

圖 1.3-1 研究流程圖	3
圖 2.1-1 ASTM C150 / C150M – Standard Specification for Portland Cement	4
圖 2.1-2 水泥熟料的微觀結構	6
圖 2.1-3 水泥礦物之相對反應性	6
圖 2.1-4 各種水泥熟料礦物的水化速率排序與水化程度	6
圖 2.1-5 水泥水化階段與放熱曲線	9
圖 2.1-6 微觀水化機制示意圖	9
圖 2.1-7 反應階段示意圖伴隨礦物生成	10
圖 2.1-8 水化產物演化與衍生礦物生成曲線	10
圖 2.2-1 石灰石粉的 SEM (掃描電子顯微) 顯微影像	12
圖 2.2-2 細粒填料微觀結構作用示意圖	14
圖 2.2-3 成核與成長示意圖	17
圖 2.2-4 異質成核動態示意圖	17
圖 2.2-5 異質 vs 均質成核之自由能對比.....	18
圖 2.2-6 礦物摻料顆粒粒徑分布比較	19
圖 2.2-7 氯鋁酸鹽 (Friedel's salt) 對氯離子的化學結合等溫線	23
圖 2.2-8 Friedel's salt 形成量 vs Cl^- 濃度曲線.....	23
圖 2.2-9 放熱速率變化圖	25
圖 2.2-10 放熱速率曲線變化	26

圖 2.2-11 Powers 模型示意圖	26
圖 2.2-12 不同粒徑與替代率的放熱累積曲線	27
圖 2.5-1 Mass of specimens related to exposure duration in a 1.8% MgSO ₄ solution at 5°C.	43
圖 3.2-1 抗壓試驗機	51
圖 3.2-2 圓柱試體端面研磨機	51
圖 3.2-3 應變環	52
圖 3.2-4 劈裂夾具	52
圖 3.2-5 電源供應器	52
圖 3.2-6 真空處理器	52
圖 3.2-7 RCM 試驗儀器	53
圖 3.2-8 RCPT 試驗儀器	53
圖 3.2-9 RCPT 試驗架設	53
圖 3.2-10 橘桶和試體	53
圖 3.7-1 RCM 試樣之切割	67
圖 3.7-2 長度變化儀器和量測	71
圖 4.1-1 A 公司抗壓強度曲線(一般時間).....	79
圖 4.1-2 A 公司抗壓強度曲線(對數時間).....	79
圖 4.1-3 AL/AC 抗壓強度比	79
圖 4.1-4 B 公司抗壓強度曲線(一般時間).....	79
圖 4.1-5 B 公司抗壓強度曲線(對數時間).....	80
圖 4.1-6 BL/BC 抗壓強度比	80
圖 4.1-7 C 公司抗壓強度曲線(一般時間).....	80
圖 4.1-8 C 公司抗壓強度曲線(對數時間).....	80
圖 4.1-9 CLS35F15/CCS35F15 的抗壓強度比	81
圖 4.1-10 D 公司抗壓強度曲線(一般時間).....	81

圖 4.1-11 D 公司抗壓強度曲線(對數時間).....	81
圖 4.1-12 DLS35F15/DCS35F15 的抗壓強度比	81
圖 4.1-13 A 公司的石灰石水泥劈裂強度	84
圖 4.1-14 B 公司的石灰石水泥劈裂強度.....	84
圖 4.1-15 C 公司的石灰石水泥劈裂強度.....	84
圖 4.1-16 A 公司的石灰石水泥彈性模數	86
圖 4.1-17 B 公司的石灰石水泥彈性模數.....	86
圖 4.1-18 C 公司的石灰石水泥彈性模數.....	86
圖 4.1-19 D 公司的石灰石水泥彈性模數	86
圖 4.1-20 A 公司氯離子傳輸係數試驗(RCM)結果	89
圖 4.1-21 B 公司氯離子傳輸係數試驗(RCM)結果	89
圖 4.1-22 C 公司氯離子傳輸係數試驗(RCM)結果	89
圖 4.1-23 D 公司氯離子傳輸係數試驗(RCM)結果	89
圖 4.1-24 A 公司氯離子傳輸係數試驗(RCPT)結果	91
圖 4.1-25 B 公司氯離子傳輸係數試驗(RCPT)結果	91
圖 4.1-26 C 公司氯離子傳輸係數試驗(RCPT)結果	91
圖 4.1-27 D 公司氯離子傳輸係數試驗(RCPT)結果.....	91
圖 4.1-28 A 公司的乾燥收縮	91
圖 4.1-29 B 公司的乾燥收縮.....	91
圖 4.1-30 C 公司的乾燥收縮.....	92
圖 4.1-31 D 公司的乾燥收縮	92
圖 4.1-32 A 公司硫酸鹽侵蝕-長度變化	93
圖 4.1-33 B 公司硫酸鹽侵蝕-長度變化	93
圖 4.1-34 C 公司硫酸鹽侵蝕-長度變化	94
圖 4.1-35 D 公司硫酸鹽侵蝕-長度變化	94
圖 4.2-1 不同爐灰比的石灰石水泥 56 天抗壓強度	96

圖 4.2-2 不同水膠比的石灰石混凝土+固定爐灰比 56 天抗壓強度.....	97
圖 4.2-3 不同爐灰比的石灰石水泥 91 天抗壓強度	99
圖 4.2-4 不同水膠比的石灰石混凝土+固定爐灰比 91 天抗壓強度	100
圖 4.2-5 M 組的抗壓強度(56/90 天)	102
圖 4.2-6 S50M 組的抗壓強度(56/90 天).....	102
圖 4.2-7 F25M 組的抗壓強度(56/90 天).....	102
圖 4.2-8 S35F30M 組的抗壓強度(56/90 天).....	102
圖 4.2-9 S35F15M 組的抗壓強度(56/90 天).....	102
圖 4.2-10 S35F15H 組的抗壓強度(56/90 天)	102
圖 4.2-11 S35F15L 組的抗壓強度(56/90 天).....	102
圖 4.2-12 氯離子傳輸係數—56 天（石灰石水泥添加不同爐灰比）	106
圖 4.2-13 氯離子傳輸係數—56 天（水膠比變化）	107
圖 4.2-14 氯離子傳輸係數—90 天（石灰石水泥添加不同爐灰比）	111
圖 4.2-15 氯離子傳輸係數—90 天（水膠比變化）	112
圖 4.2-16 氯離子傳輸係數—56/90 天（添加不同爐灰比）	113
圖 4.2-17 氯離子傳輸係數—56/90 天（水膠比變化）	113
圖 4.3-1 50g/L 的硫酸鹽溶液(A)	116
圖 4.3-2 200g/L 換水的硫酸鹽溶液(A)	117
圖 4.3-3 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液(A)	117
圖 4.3-4 50g/L 的硫酸鹽溶液(A)對數圖	118
圖 4.3-5 200g/L 換水的硫酸鹽溶液(A)對數圖	118
圖 4.3-6 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液(A)對數圖	119
圖 4.3-7 50g/L 的硫酸鹽溶液(B).....	121
圖 4.3-8 200g/L 換水的硫酸鹽溶液(B).....	121
圖 4.3-9 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液(B).....	122
圖 4.3-10 50g/L 的硫酸鹽溶液(B)對數圖.....	122

圖 4.3-11 200g/L 換水的硫酸鹽溶液(B)對數圖.....	123
圖 4.3-12 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液(B)對數圖.....	123
圖 4.3-13 試體外觀(50g/l)(A).....	126
圖 4.3-14 試體外觀(50g/l)(B)	126
圖 4.3-15 試體外觀(200g/l 換水)(A).....	126
圖 4.3-16 試體外觀(200g/l 換水)(B)	126
圖 4.3-17 試體外觀(200g/l 不換水)(A)	126
圖 4.3-18 試體外觀(200g/l 不換水)(B)	126
圖 4.4-1 方塊 28 天抗壓強度	128
圖 4.4-2 試體外觀(50g/l)	130
圖 4.4-3 試體外觀(200g/l 換水).....	130
圖 4.4-4 試體外觀(200g/l 不換水).....	130
圖 4.4-5 50g/L 的硫酸鹽溶液	131
圖 4.4-6 50g/L 的硫酸鹽溶液 (C 組).....	131
圖 4.4-7 50g/L 的硫酸鹽溶液 (L 組).....	132
圖 4.4-8 50g/L 的硫酸鹽溶液 (純水泥組).....	133
圖 4.4-9 50g/L 的硫酸鹽溶液 (50%爐石組).....	133
圖 4.4-10 50g/L 的硫酸鹽溶液 (35%爐石+15%飛灰組)	134
圖 4.4-11 50g/L 的硫酸鹽溶液 (25%飛灰組).....	134
圖 4.4-12 50g/L 的硫酸鹽溶液 (35%爐石+30%飛灰組)	135
圖 4.4-13 200g/L 換水的硫酸鹽溶液.....	136
圖 4.4-14 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (C 組).....	137
圖 4.4-15 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (L 組).....	137
圖 4.4-16 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (純水泥組).....	139
圖 4.4-17 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (50%爐石組).....	139
圖 4.4-18 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (35%爐石+15%飛灰組)	140

圖 4.4-19 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (25%飛灰組).....	140
圖 4.4-20 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (35%爐石+30%飛灰組)	141
圖 4.4-21 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液.....	142
圖 4.4-22 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (C 組).....	143
圖 4.4-23 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (L 組).....	143
圖 4.4-24 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (純水泥組)	144
圖 4.4-25 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (50%爐石組).....	144
圖 4.4-26 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (35%爐石+15%飛灰組)	145
圖 4.4-27 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (25%飛灰組).....	145
圖 4.4-28 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (35%爐石+30%飛灰組)	146

表次

表 2.1-1 成分介紹表	5
表 2.1-2 水化產物介紹	8
表 2.2-1 不同規範的石灰石水泥規定	11
表 2.2-2 填充效應主要機制	14
表 2.3-1 綜合機制與性能	31
表 2.5-1 水泥在硫酸鹽環境中反應產物	38
表 2.5-2 石灰石水泥在硫酸鹽環境中增加的反應產物	40
表 2.5-3 不同材料在硫酸鹽侵蝕的原因	41
表 3.1-1 B 公司卜特蘭 I 型水泥物理成分.....	46
表 3.1-2 B 公司卜特蘭 I 型水泥化學成分.....	47
表 3.1-3 B 公司卜特蘭 II 型水泥物理成分	47
表 3.1-4 B 公司卜特蘭 II 型水泥化學成分	48
表 3.1-5 爐石的物理性質	48
表 3.1-6 爐石的化學成分	49

表 3.1-7 飛灰的物理性質	50
表 3.1-8 飛灰的化學成分	50
表 3.4-1 水泥搭配固定礦物摻料之混凝土配比	56
表 3.4-2 混凝土試驗項目	56
表 3.4-3 水泥搭配不同礦物摻料之混凝土配比	57
表 3.4-4 I 型水泥搭配礦物摻料的混凝土詳細配比	57
表 3.4-5 石灰石水泥搭配礦物摻料的混凝土詳細配比	58
表 3.4-6 混凝土 RCM 試驗項目	58
表 3.4-7 水泥添加不同細度石灰石粉的砂漿配比	58
表 3.4-8 石灰石水泥搭配爐石和飛灰的水泥砂漿配比	59
表 3.7-1 正常膠結材含量混凝土試體之測試電壓與試驗時間對照表	68
表 3.7-2 CNS 14795 建議評估值	69
表 4.1-1 石灰石水泥+固定爐灰比新拌性質數據	74
表 4.1-2 石灰石水泥+固定爐灰比初終凝時間	74
表 4.1-3 A 公司的石灰石水泥抗壓強度	76
表 4.1-4 CS35F15 和 LS35F15 的抗壓強度比	76
表 4.1-5 B 公司的石灰石水泥抗壓強度	76
表 4.1-6 C 公司的石灰石水泥抗壓強度	77
表 4.1-7 CL/CC 的抗壓強度比	77
表 4.1-8 D 公司的石灰石水泥抗壓強度	77
表 4.1-9 A 公司的石灰石水泥劈裂強度	82
表 4.1-10 B 公司的石灰石水泥劈裂強度	82
表 4.1-11 C 公司的石灰石水泥劈裂強度	82
表 4.1-12 D 公司的石灰石水泥劈裂強度	82
表 4.1-13 A 公司的石灰石水泥彈性模數	84
表 4.1-14 B 公司的石灰石水泥彈性模數	84

表 4.1-15 C 公司的石灰石水泥彈性模數.....	85
表 4.1-16 D 公司的石灰石水泥彈性模數	85
表 4.1-17 A 公司氯離子傳輸係數試驗(RCM)結果.....	87
表 4.1-18 B 公司氯離子傳輸係數試驗(RCM)結果	87
表 4.1-19 C 公司氯離子傳輸係數試驗(RCM)結果	87
表 4.1-20 D 公司氯離子傳輸係數試驗(RCM)結果.....	87
表 4.1-21 A 公司氯離子傳輸係數試驗(RCPT)結果.....	89
表 4.1-22 B 公司氯離子傳輸係數試驗(RCPT)結果	89
表 4.1-23 C 公司氯離子傳輸係數試驗(RCPT)結果.....	90
表 4.1-24 D 公司氯離子傳輸係數試驗(RCPT)結果.....	90
表 4.2-1 不同爐灰比的石灰石水泥 56 天抗壓強度	95
表 4.2-2 不同爐灰比的石灰石水泥 91 天抗壓強度	98
表 4.2-3 石灰石水泥添加不同爐灰比 56 天 RCM 試驗結果.....	105
表 4.2-4 石灰石水泥添加不同爐灰比 90 天 RCM 試驗結果.....	109
表 4.2-5 不同齡期各種配比的氯離子傳輸係數試驗結果(*10 ⁻⁸ cm ² /s)	112
表 4.4-1 方塊抗壓強度 28 天	128

第一章、緒論



1.1.研究動機

隨著全球氣候變遷與永續發展議題的興起，建築材料的低碳轉型已成為產業與學術界的重要課題。水泥工業長期被視為高碳排產業，其製程中熟料煅燒階段釋放大量二氧化碳，約佔全球總碳排放量的 7% 至 8%。為實現節能減碳與邁向淨零碳排的目標，發展替代性低碳水泥成分成為研究重點。其中，石灰石水泥（Limestone Cement）因可部分取代熟料成分，降低煅燒能耗與碳排放，已成為具發展潛力之永續建材。

然而，石灰石填料（Limestone Filler, LF）的加入對混凝土之耐久性仍具不確定性，尤其在面對嚴苛環境條件下，如：氯離子侵入與硫酸鹽侵蝕的雙重劣化作用。氯離子可穿透混凝土進而誘發鋼筋腐蝕，而硫酸鹽則可能與水泥水化產物反應生成膨脹性礦物（如 ettringite 或 thaumasite），導致材料龜裂、膨脹與強度劣化。這些作用對鋼筋混凝土結構之長期服役壽命構成威脅，特別是在港灣設施、污水設施或高硫地下水區域，尤為關鍵。

目前已有研究指出，石灰石填料在初期可能因稀釋效應與粒徑效應導致孔隙率增加，使氯離子與硫酸鹽更易滲透；然而，若與其他卜作嵐摻料（如飛灰、爐石粉、矽灰等）共同使用，則可能透過二次水化反應改善微觀結構，提升抗劣化性能。因此，深入探討石灰石水泥於長齡期（如 90 天、180 天、365 天）對上述劣化機制的抵抗行為，將有助於驗證其作為低碳材料的可行性。

本研究擬以 RCM 試驗（Rapid Chloride Migration）與硫酸鹽暴露試驗為主，系統評估不同石灰石摻量與摻合材料對混凝土於長齡期下抵抗氯離子與硫酸鹽侵蝕的表現，期望提供同時兼顧碳減量與長期耐久性的混凝土材料設計依據，推動永續建材於實務端之應用。



1.2.研究目的

隨著全球氣候變遷與減碳壓力日益升高，建築材料的永續發展成為重要課題。水泥工業作為高碳排產業之一，積極尋求替代原料以減少碳足跡，其中石灰石、爐石與飛灰等礦物摻料因其潛在的環保效益而受到重視。石灰石水泥具備降低熟料使用量與提升早期強度的優勢，而爐石與飛灰則可進一步改善耐久性能與後期發展潛力。

本研究聚焦於探討石灰石水泥中摻配不同比例的爐石與飛灰組合對混凝土耐久性能的影響，涵蓋抗壓強度、劈裂強度、彈性模數等力學性質，以及抗氯離子滲透、硫酸鹽侵蝕、乾縮等耐久性指標。研究設計涵蓋不同水膠比與礦物摻料配比，藉由實驗比較與分析不同組合下混凝土的性能變化。

透過實驗結果，本研究旨在釐清各類礦物摻料的協同作用與其對混凝土微觀結構及宏觀性能的影響，評估其在實務工程中之應用可行性。特別是石灰石、爐石與飛灰在共同使用下，是否能發揮補強與耐久性的效果，達成性能與環境效益的雙重目標。

本研究成果可提供混凝土配比設計上的參考依據，有助於制定更環保且具性能保障的材料選擇策略。期望本研究能促進石灰石複合水泥的應用發展，進一步推動低碳建築材料在實務工程中的普及，為未來綠色建築與永續工程提供技術支撐。

1.3.研究方法與流程圖

本研究之整體流程如圖 1.3-1 所示，主要分為六個階段：首先，透過廣泛蒐集與分析國內外相關文獻，釐清石灰石水泥、爐石與飛灰等礦物摻料之材料特性、水化行為及其對混凝土耐久性之影響，作為研究基礎與配比設計之依據。接續進行水泥、爐石、飛灰等材料之物理與化學性質檢測，包括密度、細度、化學組成等，以評估材料反應潛能與適用性，作為後續實驗設計與分析比較之基礎。

第三階段為配比設計與試體製作，分別針對混凝土與水泥砂漿進行試驗設計，探討不同水泥種類（I 型與石灰石水泥）、水膠比（0.4、0.5、0.6）、礦物摻料組合（爐石、飛灰、複合摻料），以及石灰石粉細度變化對材料性能之影響。第四階段進行試體製作與養護，依 CNS 相關試驗規範製作混凝土與砂漿試體，完成後進行標準齡期養護，並分別執行各項新拌性質、力學性質與耐久性試驗。第五階段進行各項試驗，包括新拌性質（坍度、含氣量、單位重、泌水率、凝結時間）、力學性質（抗壓強度、劈裂抗張強度、彈性模數）及耐久性評估（RCM、RCPT、硫酸鹽侵蝕、乾燥收縮等），以全面掌握各組配比之性能表現。最後，彙整並分析各項試驗數據，探討石灰石水泥搭配不同礦物摻料與水膠比條件下之綜效表現，進而提出適用於工程實務之材料設計建議與後續研究方向。

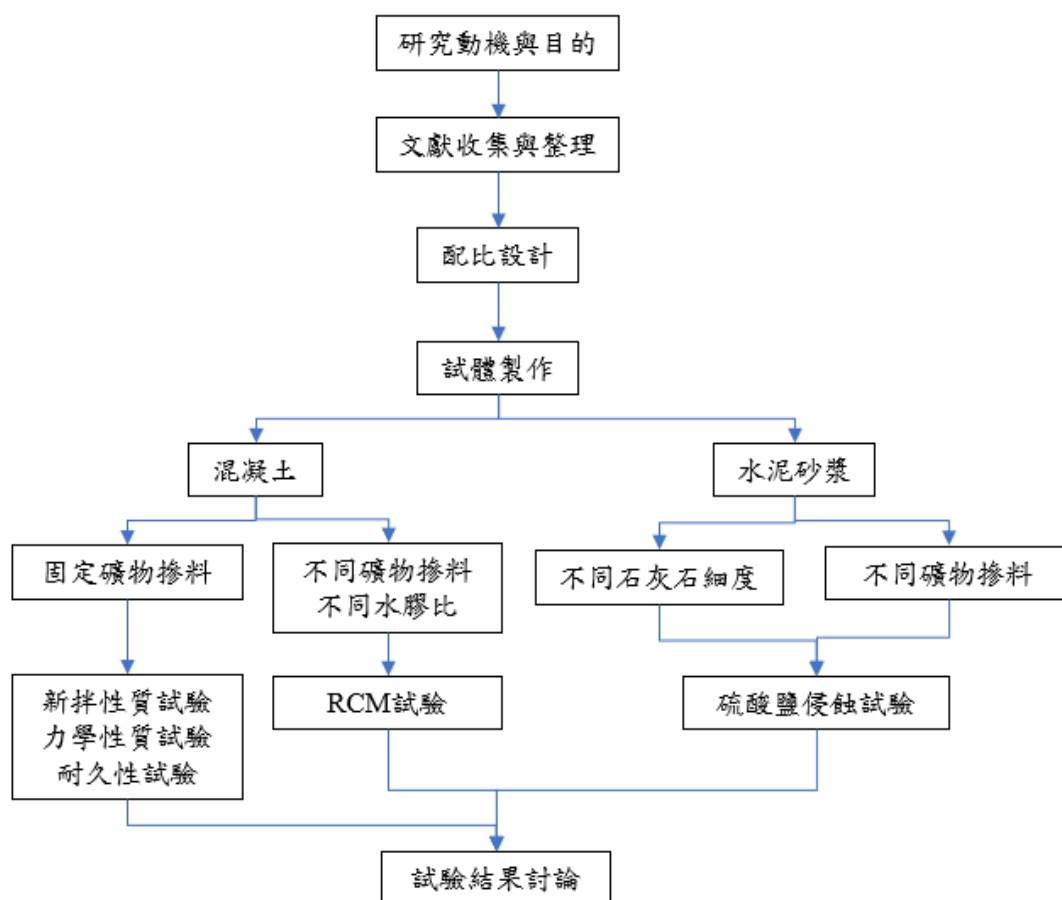


圖 1.3-1 研究流程圖

第二章、文獻回顧



2.1. 卜特蘭水泥

卜特蘭水泥是一種典型的水硬性膠結材料，能與水發生水化反應並在潮濕環境中持續硬化。其主要礦物成分經水化後生成具有強度的矽酸鈣水化物（C-S-H），使水泥具有優異的膠結能力與體積穩定性，廣泛應用於現代混凝土結構中，例如：建築物、橋梁、道路、隧道、水壩等。

為了滿足混凝土在不同使用環境與工程條件下的性能需求，如早期強度發展、水化熱控制、抗硫酸鹽侵蝕能力等。各型水泥在熟料礦物（特別是 C_3A 、 C_3S 含量）比例上的調整，會直接影響其水化反應速率、耐久性與施工適應性，根據 ASTM C150，波特蘭水泥分為五大類型（Type I ~ Type V），可因應不同結構需求。[1]

類型	設計用途 / 結構需求	說明
Type I	一般結構使用	一般用水泥，適用於常規建築，無特殊耐久性需求。
Type II	中等硫酸鹽環境 / 控制水化熱	抗中度硫酸鹽，並可稍微控制水化熱，適合地下工程。
Type III	高早期強度需求	早期強度高，適合快速施工、寒冷氣候、搶修用。
Type IV	大體積結構 / 低水化熱設計	水化熱低，適用於大體積混凝土如壩體，避免裂縫。
Type V	高硫酸鹽環境	抗高濃度硫酸鹽，常用於鹽鹼地、海邊與污水設施。

圖 2.1-1 ASTM C150 / C150M – Standard Specification for Portland Cement

2.1.1. 水泥成分

水泥是一種由多種熟料礦物所組成的膠結材料，主要成分包括三鈣矽酸（ C_3S ）、二鈣矽酸（ C_2S ）、三鈣鋁酸（ C_3A ）與四鈣鋁鐵酸鹽（ C_4AF ）。其

中， C_3S 是早期強度的主要來源，使水泥在澆置後能迅速硬化並獲得基本強度； C_2S 則反應較慢，貢獻混凝土的長期強度發展。 C_3A 的反應性極高，會影響水泥的凝結時間，但同時也對硫酸鹽等化學侵蝕較為敏感；而 C_4AF 對整體反應影響較小，主要作用在調整水泥顏色與部分早期反應行為。這些礦物相的比例配置，將直接影響水泥的反應速率、強度發展與耐久性能[2]。表 2.1-2 為成分介紹表[3]。圖 2.1-2 為水泥熟料的微觀結構，其中標示了 C_3S （三鈣矽酸）與 C_2S （二鈣矽酸）等主要礦物相。圖 2.1-3 為水泥礦物之相對反應性[4]，此圖中“overall”曲線代表平均 Type I 水泥組成，包含 55% C_3S 、18% C_2S 、10% C_3A 與 8% C_4AF 。圖 2.1-4 說明水化速率的相對關係為： $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$ 。

[5]

表 2.1-1 成分介紹表[3]

成分	化學式	功能與說明
C_3S （三鈣矽酸）	$3CaO \cdot SiO_2$	快速水化，提供早期強度，水化熱高
C_2S （二鈣矽酸）	$2CaO \cdot SiO_2$	反應較慢，貢獻長期強度，水化熱低
C_3A （三鈣鋁酸）	$3CaO \cdot Al_2O_3$	早期反應快，與硫酸鹽反應形成膨脹產物（ettringite）
C_4AF （四鈣鋁鐵酸鹽）	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	影響水泥顏色，反應性低

150 micron

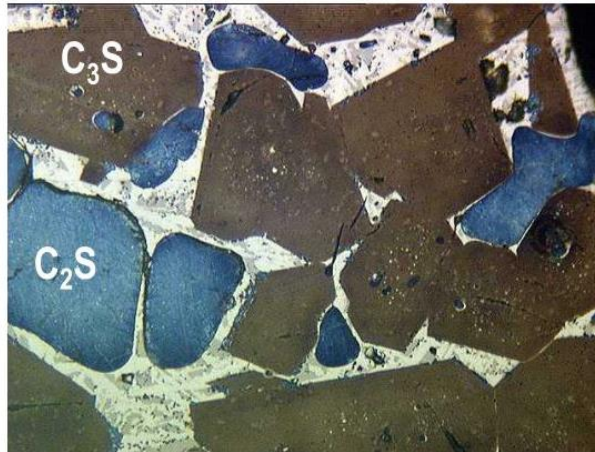


圖 2.1-2 水泥熟料的微觀結構[2]

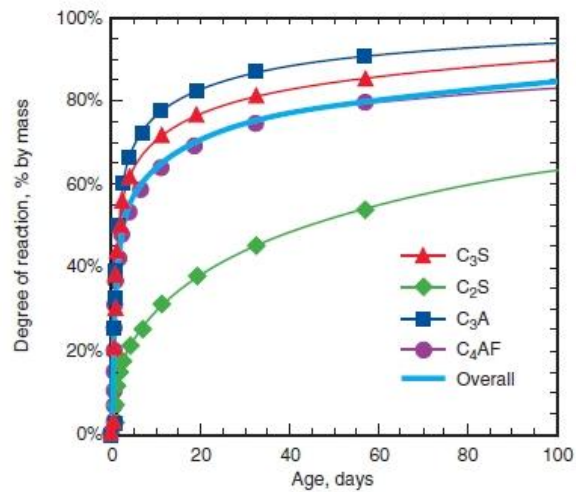


圖 2.1-3 水泥礦物之相對反應性[2]

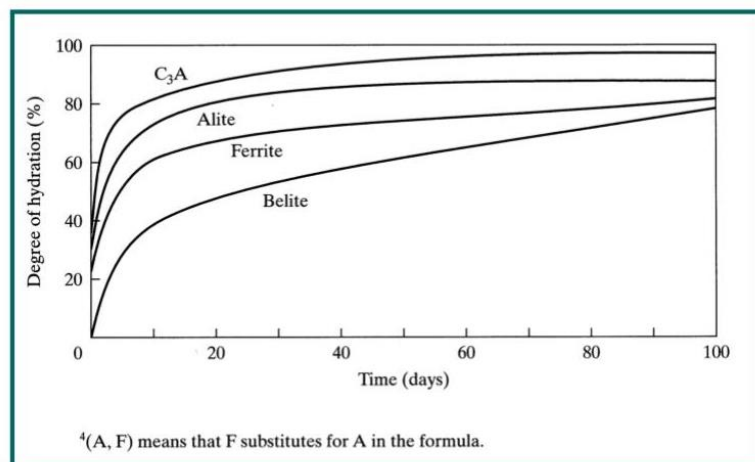


圖 2.1-4 各種水泥熟料礦物的水化速率排序與水化程度[2]

2.1.2.水化作用及產物

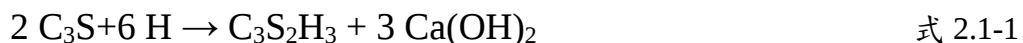
水泥水化作用是指水泥與水接觸後所發生的一系列化學反應，是水泥材料從粉體轉變為堅固固體的關鍵過程。當水泥拌水後，其內部的主要熟料礦物，如三鈣矽酸（C₃S）、二鈣矽酸（C₂S）、三鈣鋁酸（C₃A）與四鈣鋁鐵酸鹽（C₄AF）會開始與水反應，產生一系列膠狀或晶體狀的水化產物。這些產物會逐漸填充水泥孔隙、包裹骨材，並在整體系統中形成連續且致密的結構，使材料具有初凝、硬化與發展強度的能力[2]。

其中，最重要的反應產物是矽酸鈣水化物（C-S-H），它是一種半晶質的膠體結構，是混凝土強度與耐久性最主要的來源。除此之外，水化過程中也會產生氫氧化鈣（Ca(OH)₂），提供高鹼環境，有利於卜作嵐反應進行，但同時也是硫酸鹽侵蝕的敏感點。三鈣鋁酸與石膏反應生成 ettringite，可控制初凝速度，但若後期再與硫酸根作用則可能導致膨脹性破壞[3]。

水化過程不是瞬間完成，而是具有明顯的階段性。起初為誘導期（數小時內），此時反應速率緩慢；接著進入加速期與主反應期，強度快速上升；最終進入長期緩慢水化期。整體反應受熟料成分、水膠比、養護條件與摻料等多重因素影響，對混凝土的工作性、早期與長期強度、孔隙結構與耐久性表現均具有決定性作用。[4]

水化作用反應式如下：

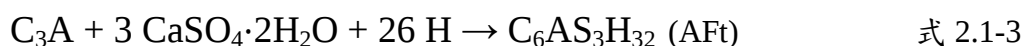
1. 三鈣矽酸 C₃S（水化快，提供早期強度）



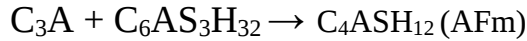
2. 二鈣矽酸 C₂S（水化慢，提供長期強度）



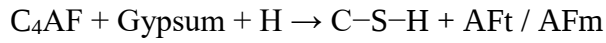
3. 三鈣鋁酸 C₃A（與石膏反應形成 AFt）



若石膏不足，AFt 會轉變為 AFm [7]



4. 四鈣鋁鐵酸鹽 C_4AF (水化反應較次要)



水化產物如下表 2.1-2 [5]

表 2.1-2 水化產物介紹

C-S-H 膠體	混凝土的主力「黏著劑」，決定強度與致密性
$Ca(OH)_2$	提供高鹼環境，有助於鋼筋保護，卻容易被硫酸鹽侵蝕
鈣礬石 Ettringite (AFt)	短期穩定，有助於調節凝結；若過度生成，可能造成延遲膨脹
單硫鋁酸鈣水合物 Monosulfate (AFm)	後期穩定產物，若與石灰石反應可形成碳鋁酸鹽 (carboaluminate)，有助於提升體積穩定性

圖 2.1-5 為水泥水化階段與放熱曲線，顯示初期溶解、誘導期、加速期、遲滯期與擴散穩定期的熱流變化，清楚標示各階段的時間與熱峰位置。非常適合用於說明反應流程與不同礦物貢獻時機。圖 2.1-6 為微觀水化機制示意圖，展示水泥粒子接觸水后如何析出 C-S-H 凝膠與 $Ca(OH)_2$ 晶體，有助於在「機制」或「微觀結構」段落中輔助說明晶體生成與孔隙封閉過程[8]。圖 2.1-7 反應階段示意圖伴隨礦物生成，圖中標示 C_3S 、C-S-H 和 $Ca(OH)_2$ 的反應動態，與水化階段熱流對應，說明不同礦物階段性貢獻強度和體積變化。圖 2.1-8 為水化產物演化與衍生礦物生成曲線，列出 C-S-H、 $Ca(OH)_2$ 、ettringite (AFt)、 AFm 等生成趨勢。[9]



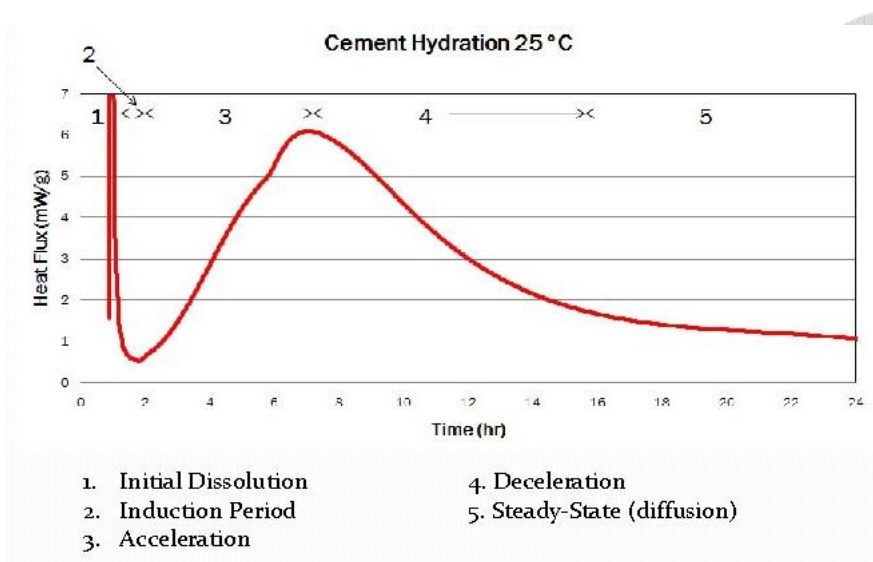


圖 2.1-5 水泥水化階段與放熱曲線[5]

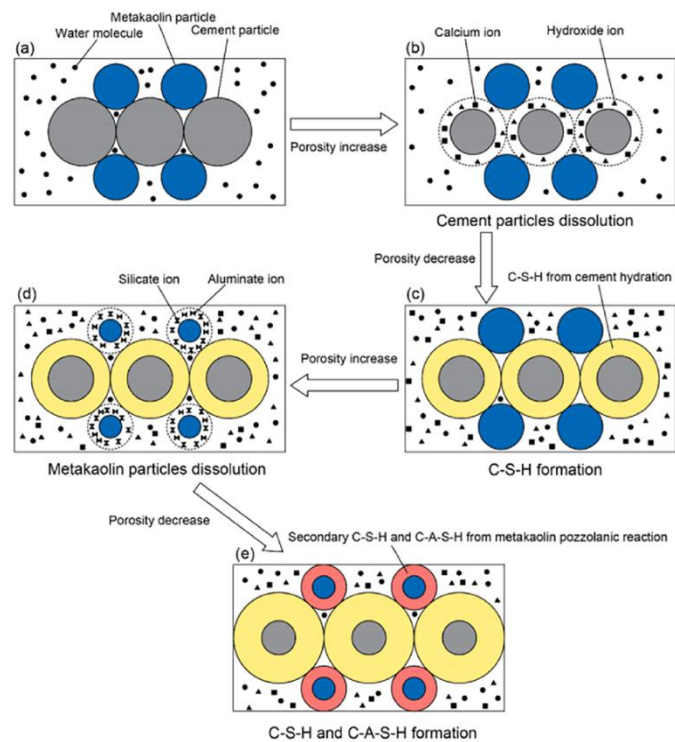


圖 2.1-6 微觀水化機制示意圖[5]

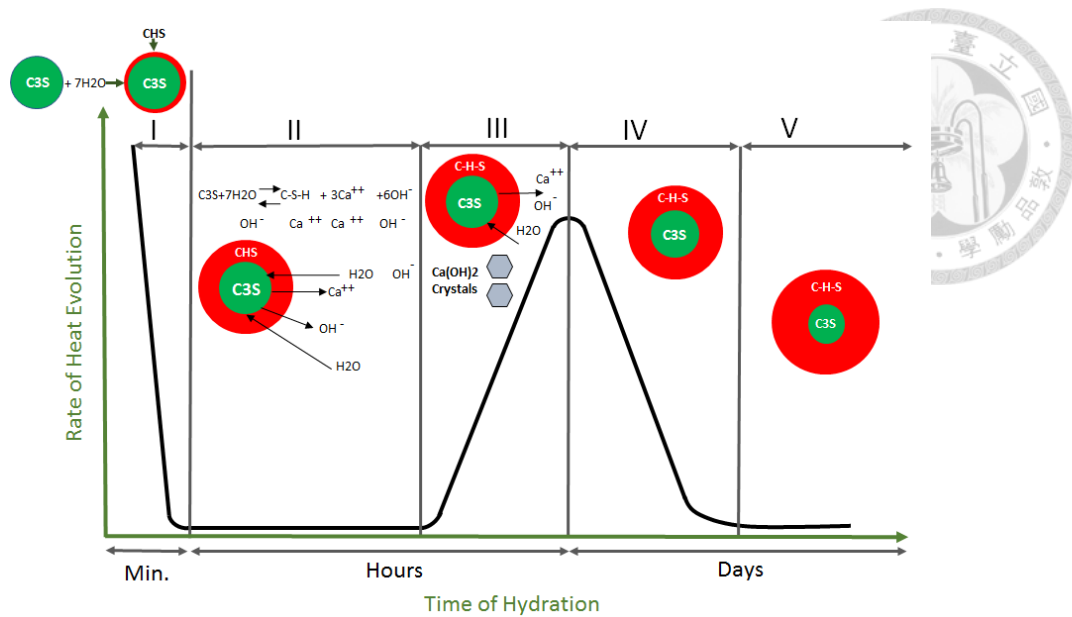


圖 2.1-7 反應階段示意圖伴隨礦物生成[5]

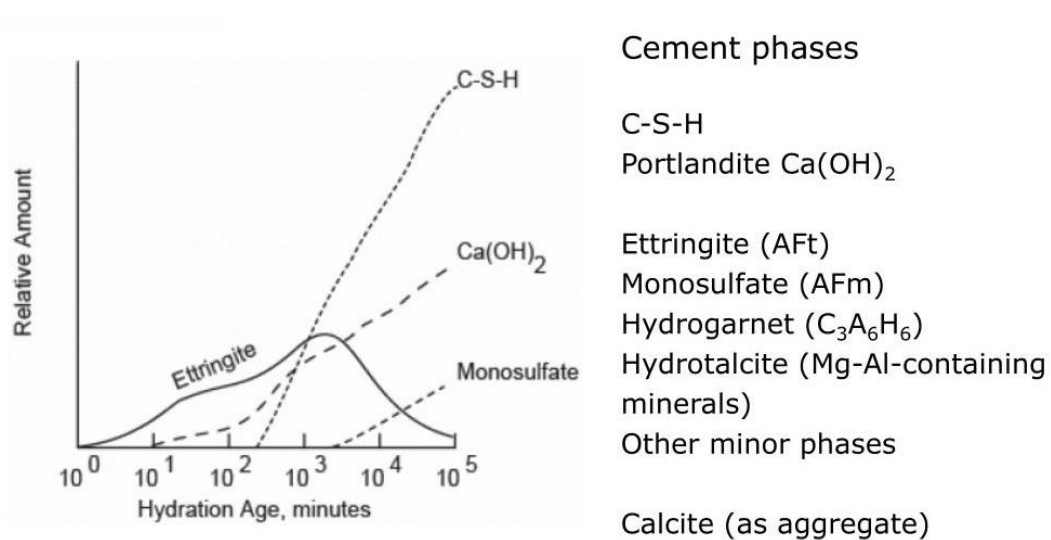


圖 2.1-8 水化產物演化與衍生礦物生成曲線[6]



2.2.石灰石水泥、

2.2.1.組成

石灰石水泥是指在傳統波特蘭水泥（OPC）中，加入一定比例的細磨石灰石粉（ CaCO_3 ）作為礦物摻料的混合型水泥。根據 ASTM C595 或 EN 197-1 等國際規範，石灰石的添加比例通常為 5%~15%，最多可達 35%（在台灣不太適用），台灣主要是使用 Type IL（CNS61：石灰石摻量 5–15%），石灰石是一種沉積性碳酸鹽岩，主要成分為碳酸鈣（ CaCO_3 ），其純度通常超過 90%。根據地質與應用目的的不同，也可能含有以下少量雜質，在台灣工業用石灰石標準中， CaCO_3 含量需達 $\geq 90\text{--}95\%$ ， MgO 通常需 $< 2\%$ ， $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ 總雜質最好 $< 5\%$ [10][11]，表 2.2-1 為不同規範的石灰石水泥規定，根據台灣規範去設計石灰石水泥的相關配比。

表 2.2-1 不同規範的石灰石水泥規定

資料類型	標準 / 文件名稱	重點內容
ASTM	C595 / C595M – Blended Hydraulic Cements	Type IL（Limestone）定義，摻量上限、物理與化學要求
EN	EN 197-1 – Cement - Composition, specifications and conformity	定義 CEM II/A-L, II/B-L, CEM III-IV 等石灰石水泥摻量上限（可達 35%）
台灣 CNS	CNS 61：水泥類產品通則	明確定義 Type IL，規範石灰石摻量為 5–15%， CaCO_3 純度 $\geq 90\%$ 等

石灰石粉由天然石灰石經過乾燥、粉碎與高能細磨等工序所製得，最終形成粒徑微細、粒型近似球形的無機填料。其主要成分為碳酸鈣（ CaCO_3 ），在研磨過程中通常不會發生相變或熱分解，故可保留其晶體結構。根據 Lothenbach et al. (2008) [16]與 Mehta & Monteiro (2014) [12]的研究指出，石灰石粉的平均粒徑（D50）控制在 3~10 μm 範圍內時，能有效發揮微填充效應，填

補水泥漿體中的孔隙，提升密實度與早期強度。細度提升亦有助於提供更多反應界面，增強水泥水化產物（如 C-S-H）的成核效應，特別是在初期水化階段。此外，若石灰石粉粒徑分布合理，其對漿體的流動性與工作性亦有助益，並可能參與與 C₃A 水化反應生成碳鋁酸鹽，進一步改善體積穩定性[17]。這些特性使石灰石粉在現代混凝土配比設計中，不僅是被動填充材料，也具備部分化學反應潛力，可作為一種低碳型機能性礦物摻料。如圖 2.2-1 所示，展現經乾燥、粉碎、高能細磨後的石灰石粉粒型與表面形貌，清楚看到碳酸鈣晶粒聚集、邊緣形狀與尺寸分布

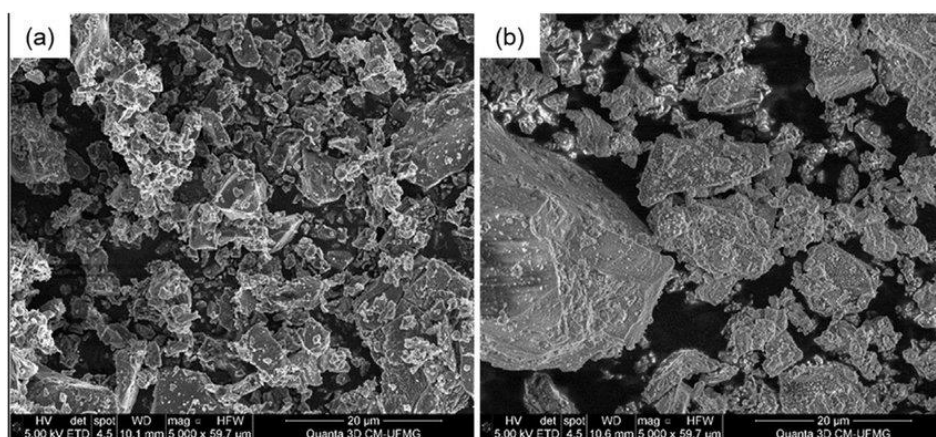


圖 2.2-1 石灰石粉的 SEM (掃描電子顯微) 顯微影像[17]

2.2.2.填充效應

石灰石摻入水泥系統後，最顯著的影響之一即為其所展現的填充效應（filler effect）。石灰石粉具有細微顆粒尺寸，能有效嵌入水泥漿體中的空隙，特別是在水泥膠體與骨材交界處的過渡區（ITZ），可大幅降低孔隙率與提高緻密性。此種微觀結構的改善，進而有助於減緩氯離子、硫酸鹽等有害離子穿透混凝土的速率，提升抗滲性與耐久表現[14][20]。

除了孔隙結構優化，石灰石粉的加入亦能改善混合料的粒徑分布與顆粒包裝密度（packing density），使得漿體流動性提升並降低拌合所需水量，有助於施工性與體積穩定性的平衡[14]。雖然填充效應主要為物理性質驅動，但有越來越多研究指出，這些微細粉體表面能成為水化產物的成核位置，促進 C-S-H

膠體在早期快速生成，對初期強度發展具有正面影響[18][19]。此種「物理+成核」的雙重效益使石灰石不再僅是惰性填料，更具有參與水化結構形成的功能角色。

石灰石作為礦物摻料摻入水泥系統後，對水化行為與材料性能展現多重影響。De Weerd 等人[21]針對石灰石與波特蘭水泥的反應關係進行研究，指出石灰石雖不具火山灰活性，卻能透過物理填充與成核效應促進早期水化反應，尤其是在與 C_3A 的交互作用中，可生成穩定的碳鋁酸鹽類，進而改變水化產物的相組成與體積穩定性。

Bentz [22]則利用微觀模擬工具 CEMHYD3D 模型，探討石灰石粉摻入後對水化反應速率與孔隙結構的影響。他發現，細粒石灰石不僅能提高水化產物的成核速率，有助於 C-S-H 的生成，還可藉由填補微孔與降低孔隙率來改善混凝土的密實性與早期強度。此外，石灰石摻量與細度對其作用效果密切相關，適度摻入（約 10–15%）最有利於微觀結構與力學性能的提升。

石灰石粉除具備基本填充效應外，亦對水泥基材料的微觀結構與耐久性能產生更深層的影響。其細微顆粒可有效改善粗骨材與膠結材交界處之過渡區（Interfacial Transition Zone, ITZ），減少此區域高水膠比導致的孔隙集聚現象，進而提升膠結強度與整體結構致密性。有研究指出石灰石與高反應性礦物摻料（如矽灰、偏高嶺土）並用時可產生協同效應，藉由多尺度粒徑包裝提升顆粒堆積密度，進一步促進水化反應與漿體融合。石灰石粉的填充亦能有效降低孔隙連通性與滲透路徑彎繞度，對於抑制氯離子與二氧化碳等有害物質之擴散具長期助益。

此外，若石灰石摻量適當，也可能與水泥中 C_3A 發生反應，生成穩定的碳鋁酸鹽相，如單碳鋁酸鈣水合物，進一步提升水化物的體積穩定性與抗膨脹能力[17]。綜合上述，石灰石粉對於水泥基材的微觀結構、力學性能與耐久性皆具有多重正面影響，其作用機制可歸納如下表 2.2-2 所示。

表 2.2-2 填充效應主要機制

作用面向	說明
孔隙填補	石灰石細粉能有效填補水泥糊內的微細孔隙與骨材界面區（ITZ），降低總孔隙率，提升材料致密度與抗滲性。
改善粒徑分佈	微細石灰石顆粒優化整體粒徑分布，提升包裝密度（packing density），進而改善流動性並降低需水量。
支援成核效應	雖屬物理作用，但石灰石表面也能成為水化產物（如 C-S-H）的成核點，加速早期水化反應（與成核效應協同）。
提升早期強度	因孔隙減少與水化反應促進，特別在早齡期（如 1~7 天）可觀察到明顯的抗壓強度提升。

石灰石粉作為一種微細礦物摻料，具備顯著的填充效應，能有效改善水泥基材料的微觀結構與力學性能。Senhadji (2014) [24]比較石灰石粉、天然卜作嵐與矽灰對砂漿性能的影響，指出石灰石雖不具明顯火山灰活性，但其微細粒徑可改善界面結構、降低孔隙率與滲透性，進而提升抗酸性與長期強度。圖 2.2-2 清楚說明當摻入細粉填料(如石灰石粉)時，其在界面與膠體中提供的填充位置（細粒料 c & d）如何優於粗粒料（e & f）。

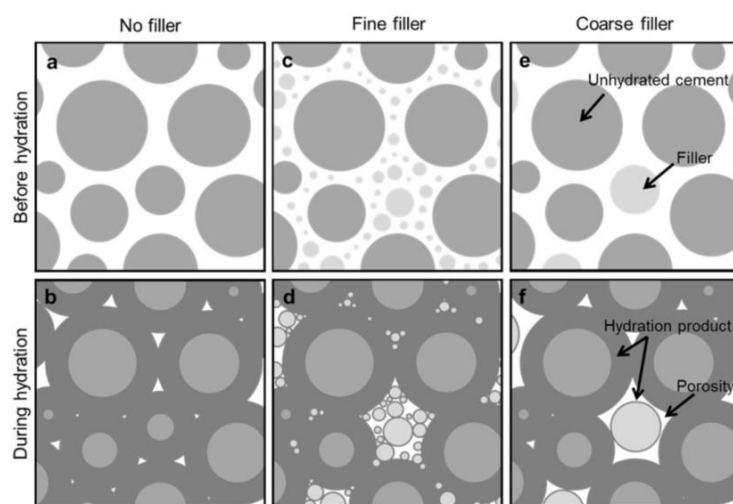


圖 2.2-2 細粒填料微觀結構作用示意圖[24]

Bederina (2011)[25]則進一步證實，當石灰石粉取代部分細骨材時，混凝土的密度與抗壓強度明顯提高，特別是在早齡期，其細顆粒有助於填補孔隙並優

化骨材包裹結構。此外，填充效應對漿體的水膠比設計與包裝密度亦有關鍵影響。Marchetti [26] 研究發現，石灰石粉與偏高嶺土共同摻入可顯著提高系統的包裝密度，並藉由減少水膜厚度促進水化反應與早期剛性發展。Chen (2016) [27]則利用石灰石粉與超細水泥、矽灰進行複合填料研究，證明多種超微細摻料搭配可進一步提升顆粒緊密堆積與微結構致密化效果。Valcuende (2012) [28]則以自充填混凝土為對象，發現石灰石粉結合黏度調節劑能顯著降低總孔隙率與毛細孔容積，有效提升體積穩定性與耐久性。

綜合上述，石灰石粉之填充效應不僅能提升顆粒包裝密度、降低孔隙率，亦有助於成核反應與水化產物均勻分布，進而改善水泥基材料之流動性、早期強度與長期耐久性。其在工程實務與混凝土配比設計中具高度應用價值。

2.2.3.成核效應

石灰石作為惰性或低活性的礦物摻料，其細小顆粒在水泥漿體中可成為 C-S-H 凝膠的成核點。由於水泥熟料（如 C_3S ）水化反應會產生 C-S-H 膠體，而這些膠體更容易在固態表面上成核成長，因此當系統中有大量細微的石灰石顆粒時，就能提供更多成核接觸面，促進水化反應進行。[29]

主要整理的機制如下

1. 提供成核點：

C-S-H 膠體在固體表面上更容易形成穩定結構，而石灰石顆粒表面成為理想的成核點。這會提升水泥早期水化速率，尤其對 C_3S （水化生成 C-S-H 與 $Ca(OH)_2$ ）特別明顯[16]。

2. 提高早期強度：

Lothenbach et al. (2008) [16]指出，C-S-H 凝膠較易於在固態顆粒表面成核，而石灰石細粉所提供的大量比表面積，恰好成為理想的成核平台。尤其當粒徑控制在 $3-5\ \mu m$ 以下時，其促進水化反應的能力更為顯著[32]。這些早期生

成的水化產物可優先沉積在石灰石顆粒表面，形成微結構連續性良好的膠結網絡，從而提升 1 至 3 天的抗壓強度

3. 與卜作嵐材料的協同作用：

石灰石能促進飛灰與爐石在早期發揮潛在活性，即使這些材料反應本身較慢，透過成核作用也能提早啟動反應，有助於整體系統的微觀結構演化[21]。

4. 細顆粒與粒徑效應：

石灰石粒徑越小（ $<5\ \mu\text{m}$ ），比表面積越大，成核效率越高。超細粉（sub-micron）級石灰石在提供成核位置、反應界面與微觀分散性上表現更佳。然而，過細亦可能造成水膠比上升與混物流動性下降，故在應用上需取得平衡[32]。

石灰石的成核效應亦能與卜作嵐材料產生協同作用[21]。在研究石灰石與爐石、飛灰等材料共同摻用時發現，石灰石能有效縮短卜作嵐材料反應啟動時間，使原本反應較慢的材料（如 Class F 飛灰）於早期即參與反應，並加快其 C-A-S-H 或 C-S-H 的生成。Antoni et al.也指出，石灰石與偏高嶺土具有良好協同效應，可促進填充效應與反應性發揮雙重功能，使漿體在保持流動性的同時，仍具備優異的早期強度與微觀致密性。

石灰石粉雖屬低活性礦物摻料，但其細微顆粒具有優良的**成核能力**，可作為 C-S-H 膠體的異質成核位置，促進水泥熟料（特別是 C_3S ）的早期水化反應。此效應可提升水泥漿體在初期的反應速率與強度發展，並與飛灰、爐石等卜作嵐材料產生協同反應，有助於加速微觀結構的形成與致密化。石灰石粒徑越小、分散越均勻，成核效果越明顯，成為現代綠色水泥系統中兼具物理與化學強化功能的重要摻料之一。圖 2.2-3 以簡化方式呈現 C-S-H 在無控制與有成核控制條件下的成核行為。當石灰石粉作為核點存在時，可誘導 C-S-H 從隨機生長轉為層狀有序生長方式，促進形成更密集結構。圖 2.2-4 中展示在水化過程中，石灰石細顆粒成為 C-S-H 外部成核中心，導致膠體從毛細孔區域快速生成，並加快反應速率

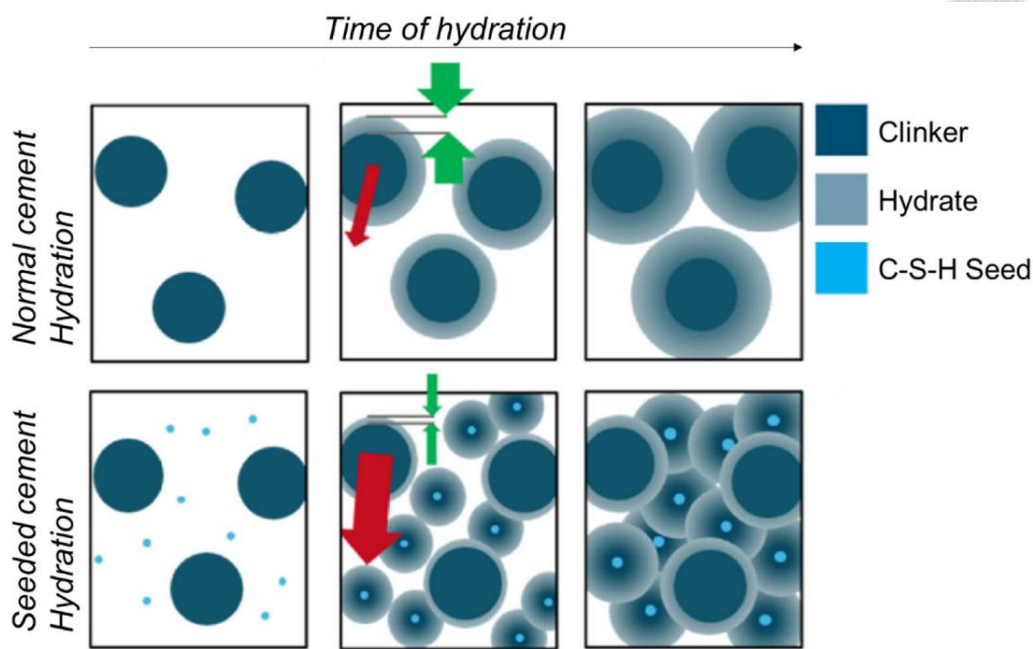


圖 2.2-3 成核與成長示意圖[21]

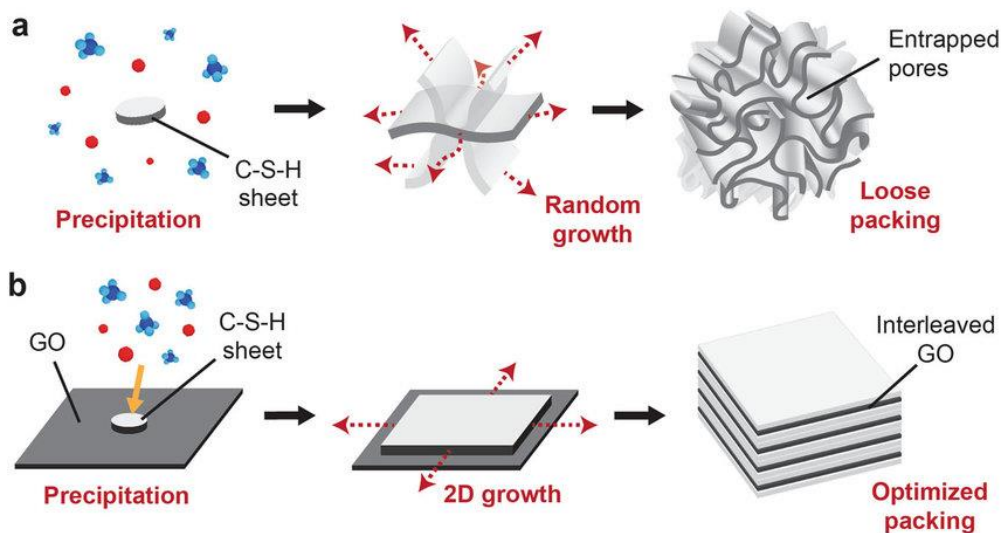


圖 2.2-4 異質成核動態示意圖[96]

石灰石成核效應可與飛灰、爐石等卜作嵐材料產生協同作用，幫助提早進行火山灰反應或潛在水化反應，提升材料的整體致密度與長期耐久性。文獻亦指出，石灰石的粒徑越小，其成核效應越顯著，因此粒徑控制與分散均勻性是發揮此效應的關鍵。石灰石的成核效應不僅強化早期性能，還為多元摻合材系統提供反應平台，是現代綠色水泥設計中極具潛力的物理強化機制之一。

石灰石粉提供的成核位置除了加快 C-S-H 的形成外，也能促進這些水化產物更早期、均勻地沉積於漿體內部。相較於無成核顆粒系統中，C-S-H 常沿粗

水泥顆粒表面或孔隙壁聚集，導致膠結體分布不均，成核平台的存​​在可讓反應產物向空間中擴散沉澱，形成更緻密、連續性更佳的 C-S-H 網絡，提升整體微觀均質性與長期耐久性。文獻指出，C-S-H 在無基底的溶液中成核需克服較高自由能障，但若有固體顆粒（如石灰石）作為異質成核面，可顯著降低成核所需的臨界能量。這一點使得石灰石在早期低溫環境中更具優勢，能提升反應起始速率，有利於冷天澆置或快硬型混凝土應用。由於成核效應可加速 C-S-H 的初始析出，因此熱釋峰值（main hydration peak）在石灰石摻入系統中通常會提早出現，表示主水化反應發生時間提前。這現象也間接提升了早期強度與硬化速率，特別在添加 3~10 μm 的石灰石粉時效果明顯。圖 2.2-5 中展示兩種成核情境的自由能與晶核尺寸關係，均質成核需克服較高的自由能障（surface + volume energy），形成的臨界晶核較大。異質成核（如在石灰石顆粒表面進行）可顯著降低自由能障及臨界晶核尺寸，有助於 C-S-H 在早期更快成核。這說明為何石灰石粉作為“核點”能使水化反應在早期加速進行。

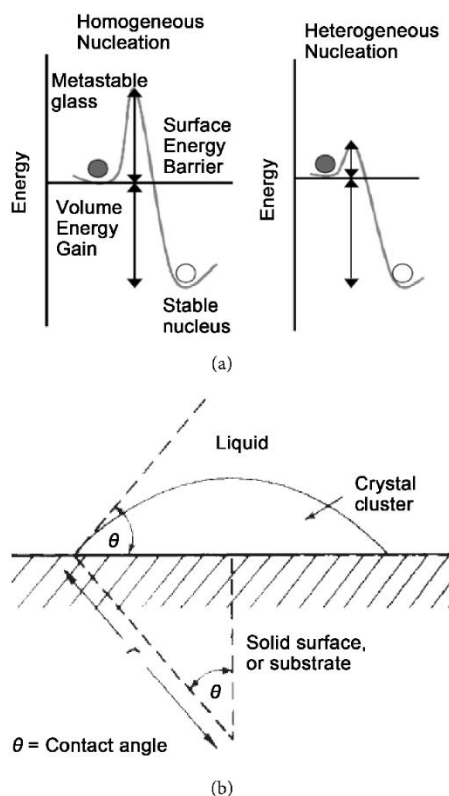


圖 2.2-5 異質 vs 均質成核之自由能對比[96]

石灰石粉的添加常被觀察到會在量熱曲線上表現出加速水化反應的現象。Lothenbach 等人[16]指出，相較於未摻石灰石的普通水泥，摻有 4% 石灰石粉的水泥約於拌合後第 3 小時進入加速期，並於約第 10 小時達到最大熱釋放速率；而對照組則於第 11 小時才達峰值，顯示細磨方解石（calcite）的加入可略微促進水泥水化的進程。進一步的實驗由 Vance 等人[34]進行，他們採用等溫量熱分析法（isothermal calorimetry），研究不同粒徑石灰石粉對水泥水化反應的影響（如圖 2.2-5 所示）。試驗比較了摻有 10% 不同粒徑石灰石粉的三組水泥漿體與普通水泥漿的放熱曲線。結果發現，石灰石粉粒徑越小，其加速水化反應的效果越明顯。特別是粒徑為 $0.7\ \mu\text{m}$ 的超細石灰石粉，其主要水化反應峰值比未摻樣本高出約 15%，且反應速率加快約 25%，在加速與減速階段的水化速率亦提升約 40%[35]。此結果突顯石灰石粉的粒徑效應對水泥系統水化動力學的顯著影響。圖 2.2-6 呈現不同摻料的粒徑分布，水泥：粒徑較粗（數十至數百 μm ）。飛灰/爐石：中等粒徑（幾到十幾 μm ）。石灰石粉：更細（約 $1\text{--}10\ \mu\text{m}$ ）。矽灰（silica fume）：超細（ $<1\ \mu\text{m}$ ）。此圖可用以說明石灰石粉在多尺度摻料設計中的中介角色：微粒石灰石可作為橋樑，提升不同尺度材料間的成核接觸，有助於形成連續性更佳的膠結結構。

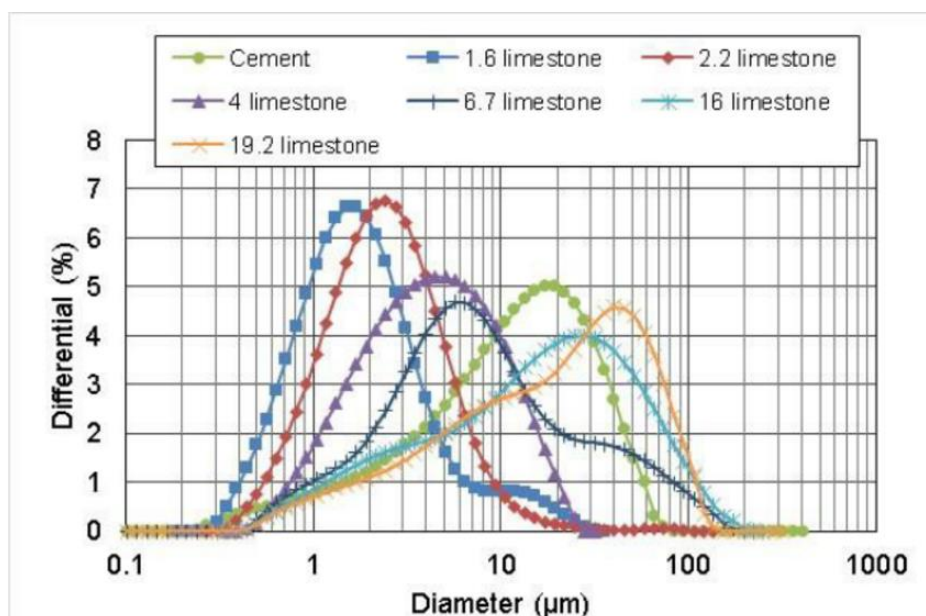
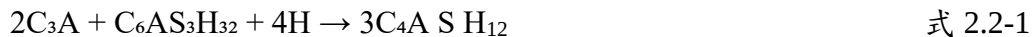


圖 2.2-6 礦物摻料顆粒粒徑分布比較[41]

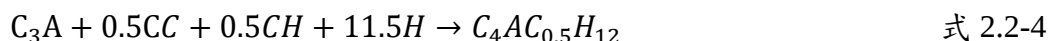
2.2.4.化學效應

卜特蘭水泥中摻入石灰石粉後，不僅加速了水泥早期的水化反應，還改變了水化產物的組成。石灰石粉中的碳酸鈣會參與水泥的水化反應，生成碳鋁酸鹽類水化物，這就是石灰石的化學效應。這種化學效應使鈣礬石（ettringite）更加穩定，同時增加水化產物的總體積，降低混凝土的孔隙率，從而提高混凝土的強度。

化學效應主要來自石灰石中碳酸鈣與水泥熟料中的 C_3A 之間的反應。在傳統水泥中， C_3A 與石膏反應生成針狀的鈣礬石，後續可能轉化為單硫鋁酸鈣水合物，鈣礬石相對不穩定，容易導致體積膨脹與開裂[21]，化學式如下。



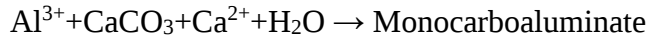
而當系統中存在石灰石時， $CaCO_3$ 會取代部分 SO_4^{2-} 與 C_3A 反應，生成穩定的碳鋁酸鹽（carboaluminate phases），例如單碳鋁酸鹽（monocarboaluminate）與半碳鋁酸鹽（hemicarboaluminate），化學式如下，有效穩定系統，並減少有害相的生成。



單硫酸鹽在外部硫酸鹽侵蝕條件下，可能導致裂縫。



這些碳鋁酸鹽的生成會抑制鈣礬石，有助於提升水泥漿體的穩定性，並減少體積變化與裂縫風險，有助於水泥硬化結構的穩定性與抗硫酸鹽能力。石灰石的存在可能改變矽酸鈣水化物（C-S-H）與鋁相的反應平衡，使得矽酸鹽中部分鋁被釋放，參與 AFm 的形成，間接強化碳鋁酸鹽穩定性的建立。當石灰石參與反應時，AFt 可透過與碳酸根反應生成 AFm，這是一種有利於結構穩定的轉化過程，並降低後續因硫酸鹽侵蝕而生成膨脹性的鈣礬石的風險。



式 2.2-6

石灰石與水泥中 C_3A 反應生成的碳鋁酸鹽（AFm phases）不僅取代部分硫酸鹽反應產物，更改變整個水化產物的平衡。傳統 C_3A 與 SO_4^{2-} 所生成的鈣礬石具有針狀結構，在水化初期能夠填充孔隙，但在後期若未轉化為穩定的單硫酸鹽，可能會因外部環境（如硫酸鹽侵蝕）再次生成鈣礬石，造成體積膨脹與開裂。而當系統中摻有石灰石時，碳酸根（ CO_3^{2-} ）與 C_3A 優先反應，形成穩定的單碳鋁酸鹽，相較於單硫酸鹽更具熱力學穩定性，不易在濕熱或侵蝕條件下轉化為膨脹性的鈣礬石。此類反應轉化不僅提升系統穩定性，亦因 AFm 相的生成促進孔隙結構緻密化，使得整體孔隙率下降，有助於提高水泥漿體的抗滲性與抗裂性。研究亦指出，當石灰石摻量控制得宜，能有效抑制後期有害相的再生，進而延緩劣化機制的啟動。此外，碳酸鈣參與水化反應也會釋放部分鋁離子，這些鋁可從矽酸鹽水化物（C-S-H）中遷移出來，重新結合形成穩定的 AFm，相當於提升了系統內鋁的利用效率。綜合上述，石灰石的化學效應在水泥水化微觀結構形成中扮演著關鍵角色，不僅改善孔隙分布，也提升材料耐久性基礎。

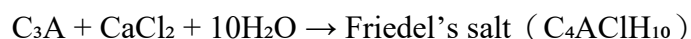
延遲性鈣礬石形成（DEF, Delayed Ettringite Formation）是一種與水泥系統中 ettringite 生成時間延遲相關的體積膨脹現象，主要出現在早期水化反應受高溫（如蒸養）抑制而未形成穩定 ettringite，之後在濕潤或硫酸鹽環境下重新生成時所引起的內部破壞。高溫會使早期 AFt 相的形成受到抑制，進而造成潛在反應未完全釋放的 C_3A 與 SO_4^{2-} 保留在固相中，等到混凝土冷卻並再次吸水時，延遲生成的 ettringite 在毛細孔或界面中析出，會產生內部應力並誘發體積膨脹與裂縫。DEF 常見於預製構件、蒸養混凝土或高溫施工環境，且其發生需具備三個基本條件：高 C_3A 含量、高溫養護及濕潤環境。DEF 的危害在於其反應具有潛伏性，常在混凝土硬化數週至數月後才表現出體膨現象與強度劣化。若在石灰石摻量較高的系統中搭配高 C_3A 水泥使用，可能因碳鋁酸鹽生成量不穩或過飽和反應，間接導致 DEF 發生率上升。文獻指出（Hooton & Thomas,

2002) [26]，當石灰石摻量超過 15%，且水泥中 C_3A 含量超過 8% 時，DEF 發生風險顯著增加，因此必須慎重設計配比條件，避免觸發延遲性反應所造成的潛在劣化。

石灰石粉雖然本身的主要成分碳酸鈣並不直接與氯離子 (Cl^-) 發生化學反應，但其摻入水泥系統中會改變水化產物的組成與結構，特別是透過生成不同形式的 AFm 相（鋁酸鹽水化物），間接影響氯離子的固定能力。在無石灰石摻料的水泥中，氯離子多以物理吸附、C-S-H 鍵合或與 AFm 相中鋁酸根反應形成氯鋁酸鹽（Friedel's salt）等方式被結合。而當石灰石粉加入後，其碳酸根

(CO_3^{2-}) 與 C_3A 水化產物發生化學反應，生成單碳鋁酸鹽或半碳鋁酸鹽，取代原本系統中穩定存在的單硫酸鹽。這種相變化會改變 AFm 層間陰離子的性質，使其與氯離子的競爭關係發生轉移。例如， CO_3^{2-} 離子的親和力強於 Cl^- ，當系統中 AFm 已穩定為單碳鋁酸鹽時，氯離子更難進行離子置換反應，進而減少氯離子的結合能力。根據 Lothenbach 與 Wieland (2006) 的熱力學研究，AFm 相的陰離子交換行為受其層間結構與周圍溶液中陰離子活度控制，而石灰石所形成的碳鋁酸鹽會降低 AFm 對 Cl^- 的置換能力，導致可結合氯離子 (bound Cl^-) 的總量下降。這顯示石灰石對氯離子滲透的影響不單來自孔隙結構，也牽涉到微觀水化相的化學穩定性。

在傳統水泥系統中，氯離子可與 C_3A 水化物反應生成氯鋁酸鹽（Friedel's salt），這是一種具有層狀結構的 AFm 相，化學式為 C_4AClH_{10} （或 $Ca_2Al(OH)_6Cl \cdot 2H_2O$ ），是水泥材料中氯固定的主要形式之一。其生成反應如下：



當水泥系統摻入石灰石粉時， $CaCO_3$ 與 C_3A 優先生成碳鋁酸鹽，而非讓 C_3A 保留與 Cl^- 結合的潛力。因此，氯離子想要生成 Friedel's salt，必須先與已存在的單碳鋁酸鹽發生離子交換反應，釋放 CO_3^{2-} 並引入 Cl^- ，反應如下：



然而，此類陰離子交換反應的進行條件受限，尤其在碳酸根含量高或系統中 pH 偏高的環境下，單碳鋁酸鹽具有更高的熱力學穩定性，不易被 Cl^- 所置換。Mesbah 等人（2011）對 Friedel's salt 結構的研究指出，其形成過程依賴 AFm 結構的層間陽離子可調整性，若原先已形成穩定碳酸根插層，則離子交換會受到抑制。此外，Hong 與 Glasser（2002）也指出，在含石灰石水泥系統中，結合氯離子的比例會略低於普通水泥，代表氯離子主要以自由態形式存在於孔隙水中，增加其移動性與腐蝕鋼筋的潛在風險。綜合上述，石灰石粉雖能改善水泥材料之微觀結構與致密性，降低總氯滲透性，但其對氯離子的化學結合能力具有一定抑制作用，特別需在海工或鹽害環境中慎重考量其長期影響。圖 2.2-7 中顯示在不同氯離子濃度（NaCl vs CaCl_2 溶液）下，每克水化漿體所結合的 Cl^- 量。可見隨氯濃度增加， Cl^- 固定量上升，但存在飽和現象。圖 2.2-8 顯示在不同氯離子總濃度下，形成的 Friedel's salt 含量；含石灰石（L 樣品）的水泥曲線（方塊標記）與普通矽（圓圈標記）有所差異，可推測石灰石對生成效率有影響。

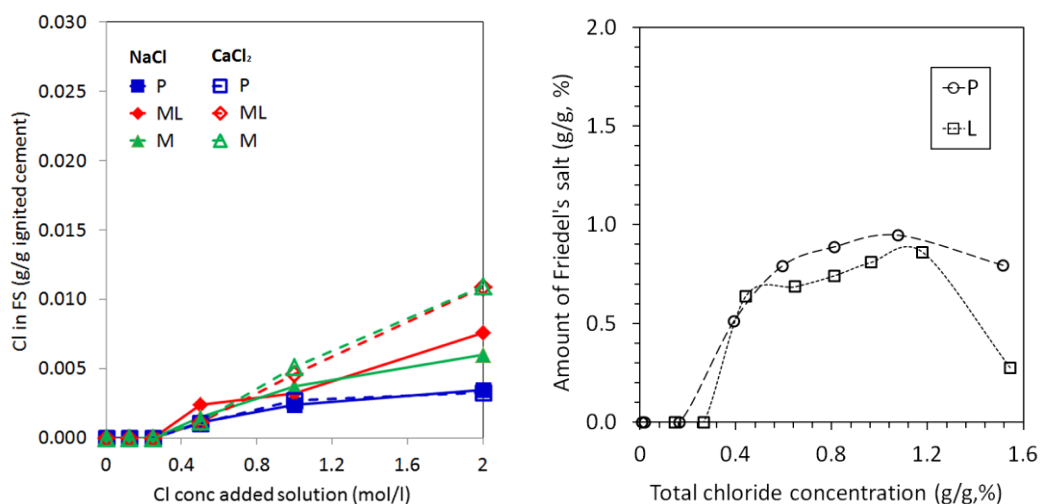


圖 2.2-7 氯鋁酸鹽（Friedel's salt）對氯離子的化學結合等溫線[97]

圖 2.2-8 Friedel's salt 形成量 vs Cl^- 濃度曲線[97]

2.2.5.稀釋效應

石灰石因其低反應性或惰性特性，當作為部分取代水泥熟料的摻料使用時，會引起所謂的「稀釋效應」（dilution effect）。此效應源於石灰石無法參與主要的矽酸鹽水化反應，導致系統中 C_3S 、 C_2S 與 C_3A 等反應性熟料成分的比例下降，進而減少 C-S-H、CH 等水化產物的總量，對於強度發展與微觀結構致密化構成潛在不利[45]。Bentz et al. (2009) 利用 CEMHYD3D 模型模擬指出，石灰石摻量越高，總生成的水化產物量越少，尤其在齡期超過 7 天後，其強度貢獻呈現明顯衰退。

儘管如此，若石灰石摻量控制在 10–15% 以內，並搭配其成核效應發揮，早期強度仍可與純水泥系統相當，甚至略為提升。Berodier 與 Scrivener[43]透過實驗觀察指出，石灰石細粉在水泥初期水化階段中可促進 C-S-H 凝膠成核與沉積，縮短誘導期並提升 1~3 天的強度。該研究亦發現，這種強度增益與石灰石顆粒尺寸及分散狀態有顯著關聯。

稀釋效應雖可能抑制中後期強度發展，但也帶來部分工程應用上的優勢，特別是在大體積混凝土或高溫養護條件下。石灰石的稀釋作用會降低水泥系統整體的放熱反應速率與總熱量，有助於抑制溫升，減少溫差引起的熱裂風險[44]。然而，Schöler et al.[47]警告，若缺乏反應性摻合材搭配，石灰石可能造成孔隙率上升、水化物填充不足，導致漿體微結構疏鬆與耐久性下降。圖 2.2-7 顯示未摻與摻入不同重量與粒徑的石灰石（水泥替代 10%、30%），其水化放熱峰值提前且強度變化明顯，反映了成核促進效應與稀釋效應並存的機制。

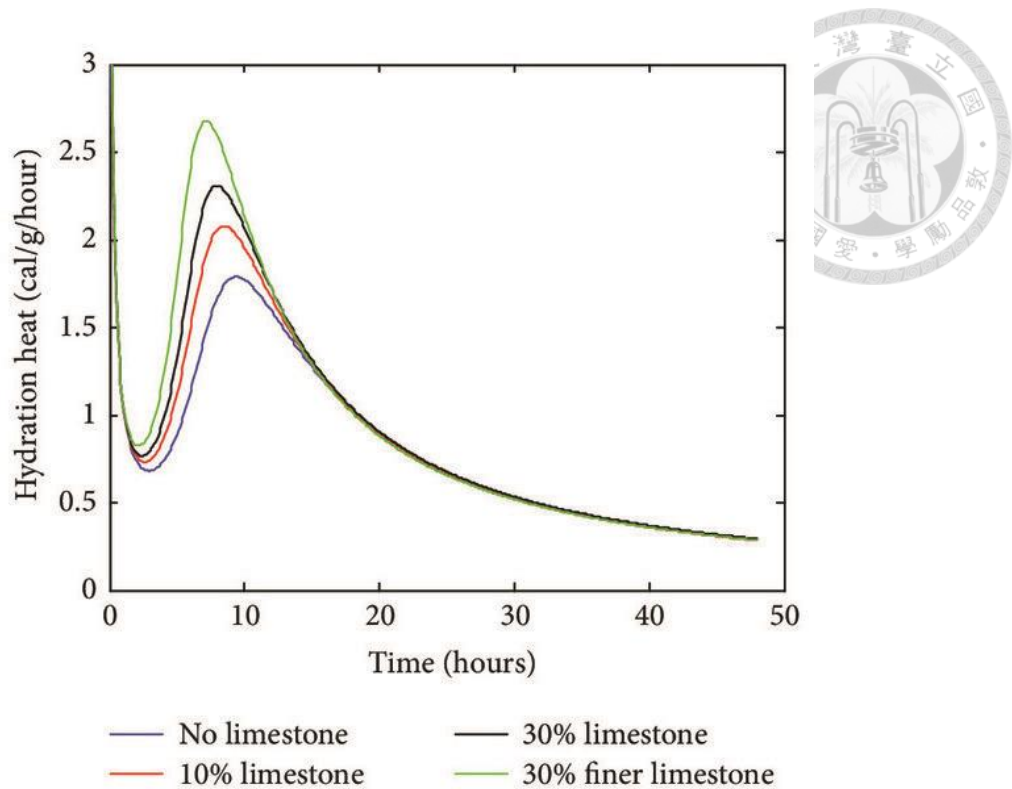


圖 2.2-9 放熱速率變化圖[44]

因此，Scrivener et al.[47]建議，石灰石不應單獨高比例使用，而應與飛灰、爐石等反應性礦物摻料協同搭配。這樣不僅能發揮石灰石的成核與填充作用，亦能藉由其他活性材料補償其反應性稀釋所造成的不利影響，達成強度、耐久與環境效益的平衡設計。根據 John et al. (2018) 對各類填料的綜述，石灰石的摻入雖可改善流動性與水化熱控制，但其稀釋反應性材料的本質限制了其貢獻水化產物與長期強度的能力，尤其當摻量過高時，其缺點更為顯著。

Thongsanitgarn et al.[48]探討高鈣飛灰與石灰石粉共同摻入對水化熱的影響時發現，石灰石粒徑越小，其成核效應越明顯，但稀釋效應也同步產生，尤其在中後期反應階段更顯著。實驗結果顯示，即便微細石灰石顆粒能促進早期反應，但因其本身無法參與矽酸鹽水化反應，總體水化熱累積值會下降，水化產物體積也會隨之減少。圖 2.2-7 顯示在摻入微量石灰石粉後，放熱峰提前出現且強度略升，說明石灰石的成核作用加速了早期水化反應，即使有稀釋效應存在。此圖可用以解釋上述兩篇的研究結論。

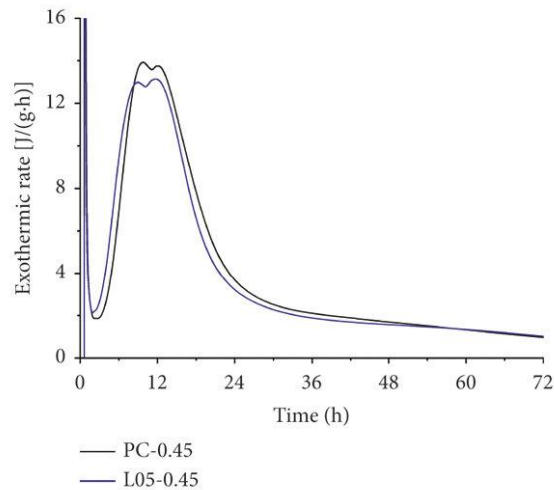


圖 2.2-10 放熱速率曲線變化[48]

De Weerd et al.[50]則進一步探討石灰石與飛灰在三元系統中的互補性。研究指出，石灰石雖具有稀釋效應，但在與飛灰共同使用時可形成協同機制，其中石灰石提供成核平台，加速飛灰的潛在反應活性。此機制可在一定程度上緩解稀釋效應對中後期強度的不利影響，並穩定水泥漿體的微觀結構。該研究亦強調石灰石摻量應控制在合理範圍內（例如 10–15%），過高則會壓抑整體反應性材料的作用，導致強度與耐久性的下滑。圖 2.2-8 為通用水化示意圖，但適用於說明稀釋效應導致的水化產物量減少與孔隙結構影響，可協助表述稀釋效應\機理與中後期強度走弱的效應。

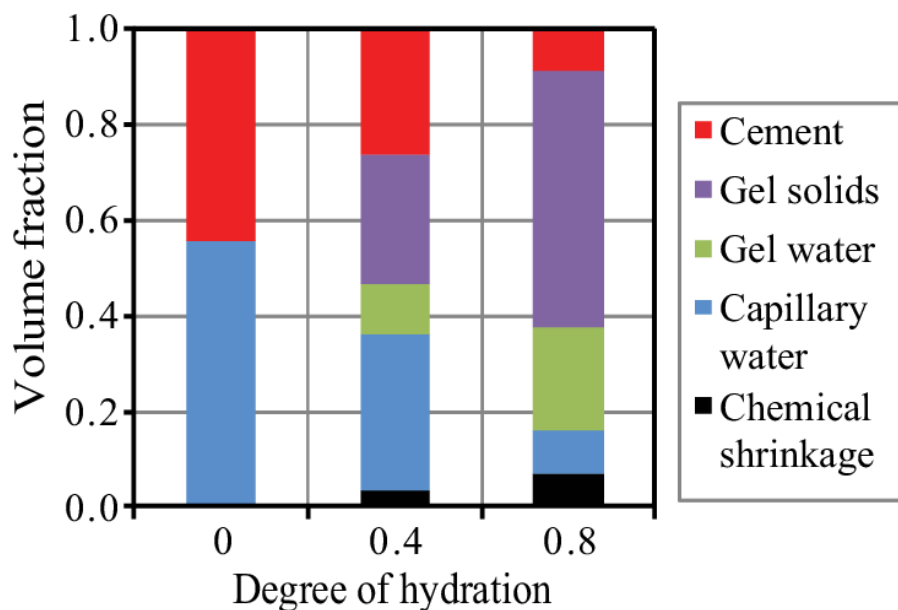


圖 2.2-11 Powers 模型示意圖[3]

Tikkanen et al.[51]則從水化產物生成的角度進行分析，發現當石灰石取代水泥時，其對水化反應初期的放熱速率與產物形成有所干擾。研究指出，若缺乏其他活性礦物補償，石灰石將降低 C-S-H 膠體的總量，導致孔隙率提升、材料密實度下降。因此，研究建議石灰石的使用應與高活性材料如飛灰或矽灰協同摻配，以減輕稀釋造成的不利影響，並維持水泥系統的整體性能。圖 2.2-9 展示不同粒徑石灰石摻量配比的放熱累積變化，微細石灰石粉（如 $3\mu\text{m}$ ）在 5%、20%、35% 替代率下均提升初期放熱反應，支持稀釋效應與成核效應並行的機理（Vance et al. / Knop et al. 實驗結果）。

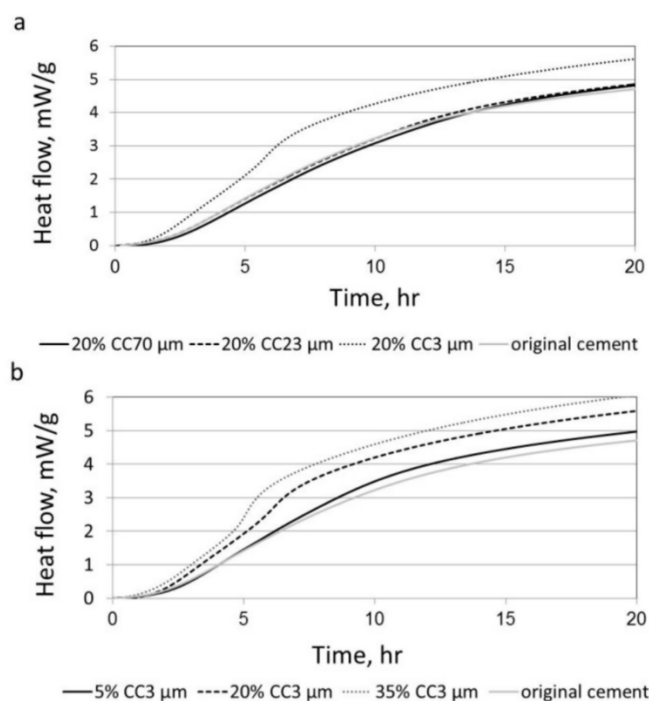


圖 2.2-12 不同粒徑與替代率的放熱累積曲線[47]

綜上所述，石灰石粉的稀釋效應主要與其反應性低、無法生成大量水化產物有關。雖然其能降低水化熱、改善工作性，亦可藉由成核效應促進早期強度發展，但若摻量不當或未搭配其他活性摻料，則可能導致強度發展不良與耐久性風險。因此，應將石灰石視為具有物理助益但需搭配補償機制之摻料，在混合設計中審慎應用。



2.2.6.石灰石對混凝土性質的影響

(1) 工作性

石灰石細粉的添加可有效改善混凝土新拌階段的工作性，其主要機制為填充效應與潤滑效應。細顆粒的石灰石可填補水泥膠體中的孔隙，提升漿體的均勻性與穩定性，並在流動過程中降低內部摩擦，使混凝土更容易拌合與澆置[52]。此外，石灰石細粉具有潤滑作用，能減少骨材之間的內摩擦，有助於混凝土在模板中的流動與振動密實。這種效應在低水膠比（如 0.30–0.45）系統中尤其明顯，可顯著改善混凝土的填充性與澆置性能。然而，若所使用的石灰石粒徑過於細小（如小於 $1\ \mu\text{m}$ ），其比表面積增大，易吸附更多拌合水，反而導致拌合水不足，降低拌合物的流動性。因此，在實務設計中，應控制石灰石粉的粒徑與摻量，以取得最佳流動性與穩定性。

(2) 抗壓強度

石灰石粉在早期強度發展中可展現一定的促進效應，尤其歸功於其成核效應。石灰石顆粒表面可成為水化產物（特別是 C-S-H 膠體）的成核點，提升水泥熟料（如 C_3S ）的水化速率，促進膠體快速生成，進而提高 1~3 天的早期抗壓強度[53]。然而，隨著養護齡期延長，中後期強度（28 天以上）發展會受到稀釋效應影響。石灰石作為低活性或惰性材料，取代部分高反應性的水泥熟料後，總水化產物產率下降，導致長齡期強度略微衰退[54]。但此效應可透過搭配其他卜作嵐材料（如高反應性爐石、飛灰）補償，藉由協同反應共同提升水化反應與微觀結構致密性，維持整體力學性能。

(3) 水化熱

石灰石可顯著降低混凝土早期水化熱，這對於大體積混凝土澆置（如壩體、地基、厚壁結構）或炎熱氣候下施工極具優勢。石灰石取代部分熟料，稀釋反應性成分，會降低整體反應速率與放熱峰值[55]。此外，石灰石粉的成核作用雖會略微提前放熱高峰出現時間，但放熱總量明顯降低，可有效減少溫升

速率與最大溫差，有助於抑制因熱膨脹收縮差異所引起的熱裂縫風險[56]。因此，石灰石摻料在兼顧強度與施工安全方面，展現出良好應用潛力。

(4) 孔隙率與密實性

石灰石細粉可透過物理填充效應，填補水泥膠體中的毛細孔隙，使微觀結構更緊密，進而降低總孔隙率並改善耐久性[57]。這種效應在初期齡期表現顯著，尤其在粒徑控制於 $5\mu\text{m}$ 以下時，可與 C-S-H 膠體共同構築密實的水泥結構體系。然而，當摻量過高或取代率超過 15–20%，由於石灰石本身反應性低，會減少整體水化產物生成量，進而導致總體結構密實度下降，增加孔隙率。此一「反應性稀釋」機制也可能影響後期乾縮與吸水率，因此摻量與粒徑需綜合設計考量。

(5) 耐久性

石灰石在混凝土中可促進穩定的碳鋁酸鹽（carboaluminate phases）生成，抑制不穩定的硫鋁酸鹽（如 ettringite 與 monosulfate）持續轉化，從而提升抗硫酸鹽侵蝕能力[58]。此外，石灰石所形成的穩定 AFm 相，有助於微觀結構穩定性，減少延遲性膨脹風險（如 DEF）。對於氯離子的傳輸，石灰石改善的微觀結構可降低氯離子擴散速率，提升鋼筋保護能力；而在乾縮與龜裂風險上，石灰石提升的結構密實性亦有正面貢獻[59]。綜合而言，適當摻量與粒徑分布的石灰石粉，能在力學與耐久層面上展現協同強化效果。

2.3. 卜作嵐摻料

2.3.1. 爐石

爐石（Ground Granulated Blast Slag, GGBS）是高爐煉鐵過程中的副產物，當熔融狀態的高爐爐渣以水急冷形成玻璃質顆粒後，再經乾燥與粉磨處理，便可作為水泥摻料使用。由於其化學成分富含矽（ SiO_2 ）、鈣（ CaO ）、鋁（ Al_2O_3 ）與鎂（ MgO ）等氧化物，在鹼性環境下具備潛在水硬性，可參與水化反應並生成水化產物。

爐石在氫氧根離子濃度高（如水泥孔隙液）條件下能活化反應，生成與水泥類似的 C-S-H 凝膠與少量 AFm 相，提供結構強度[60]。水泥相比，爐石反應速率較慢，常導致初期強度較低但後期強度發展穩定，特別適合用於長齡期性能要求高的工程[61]。爐石混凝土具更低的孔隙率與更細密的微觀結構，對抗滲性、抗硫酸鹽侵蝕與抗氯離子擴散性能皆有顯著提升[62]。由於水化反應較緩慢且熱釋放較低，適合大體積混凝土應用；同時也有助於降低乾縮與熱裂縫風險[63]。爐石屬於工業副產物，可部分取代熟料，降低水泥製造過程中的 CO₂ 排放，是永續混凝土設計的重要材料之一[64]。

2.3.2. 飛灰

飛灰（Fly Ash）是燃煤火力發電廠排出之煙道灰塵，經收集後所得的細粉狀材料，屬於火山灰類材料（pozzolanic material）。其主要化學成分包括二氧化矽（SiO₂）、三氧化鋁（Al₂O₃）與氧化鐵（Fe₂O₃）等，並依據 ASTM C618 分為 Class F（低鈣飛灰）與 Class C（高鈣飛灰）兩類，在台灣通常以 F 級灰居多。飛灰本身無水硬性，但在鹼性環境中能與氫氧化鈣（CH）發生卜作嵐反應（pozzolanic reaction），生成額外的 C-S-H 凝膠，改善混凝土的力學性能與耐久性。

飛灰中的矽酸鹽與鋁酸鹽會與水泥水化產生的氫氧化鈣（CH）反應，生成二次 C-S-H 凝膠與少量 AFm 相，提升中後期強度與結構密實性[65]。飛灰顆粒呈球狀，可降低內摩擦、提升混凝土流動性，適用於泵送與自充填混凝土[66]。飛灰水化反應速率較慢，初期放熱低，有利於大體積混凝土控制溫升與開裂風險[67]。飛灰混凝土具較低的孔隙率與氯離子擴散率，抗滲性與抗硫酸鹽侵蝕能力均優於普通水泥混凝土[68]。飛灰為工業副產物，使用可減少水泥用量與碳排放，符合永續建材的發展方向[64]。儘管早期強度較低，但因卜作嵐反應在中後期持續進行，最終強度可能與或超越純水泥系統。

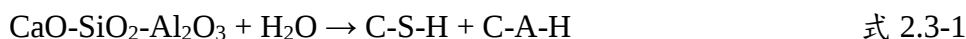


2.3.3. 卜作嵐反應機理

卜作嵐反應（pozzolanic reaction）是指含矽與鋁的非晶態材料在鹼性環境中，與水泥水化產生的氫氧化鈣發生反應，進而生成次生的水化矽酸鈣與鋁酸鹽相（如 AFm、AFt）。爐石與飛灰作為常見的卜作嵐材料，其反應特性與水泥熟料不同，對水化歷程、微觀結構與耐久性表現皆有顯著影響。

1. 爐石

爐石則具備潛在水硬性，含有活性的鈣、矽、鋁氧化物，可在強鹼條件下與水反應，直接生成與水泥類似的水化產物。其反應不一定需要外部 Ca(OH)_2 作為啟動劑，但強鹼性（如 OH^- 來自水泥）是其活化關鍵[65]。



2. 飛灰

飛灰主要由玻璃質的矽酸鹽（ SiO_2 ）與鋁酸鹽（ Al_2O_3 ）構成，本身不具水硬性，但在水泥水化產生的強鹼性環境下，能與 Ca(OH)_2 反應生成次生 C-S-H 凝膠，並可能參與鋁相反應形成 AFm/AFt 類水化物。反應式如下：



飛灰和爐石的機制比較，如表

表 2.3-1 綜合機制與性能

項目	飛灰（Fly Ash）	爐石（GGBFS）
反應類型	卜作嵐反應 （需 Ca(OH)_2 ）	潛在水硬性（不需 Ca(OH)_2 ）
初期反應速率	慢（>7 天）	中等（可自發水硬）
主要生成物	C-S-H、AFm	C-S-H、C-A-H、水鋁酸鹽
對 CH 的影響	消耗 CH，降低鹼度	少量形成 CH
對強度的貢獻階段	中後期 （28 天後顯著）	早期即有反應 中後期強度穩定提升



2.3.4. 卜作嵐摻料加石灰石協同效應

石灰石近年廣泛應用於混凝土中，除可作為惰性填料替代部分熟料外，更可與卜作嵐類材料（如爐石與飛灰）共同發揮協同效應（synergistic effect），改善混凝土性能與生態效益。此協同機制主要來自石灰石的三重作用：物理填充效應（filler effect）、成核效應（nucleation effect）與化學參與效應

（chemical effect）[69]。一方面，石灰石可細化微觀孔隙結構，提升漿體密實性；另一方面，其作為晶核促進早期水化產物的生成，進而加速初期反應歷程，改善早齡期強度與結構穩定性。

在與卜作嵐材料（如爐石與飛灰）共同使用時，石灰石能進一步參與化學反應。當爐石或飛灰釋放出鋁離子（ Al^{3+} ）時，石灰石中的碳酸鈣（ CaCO_3 ）可提供碳酸根離子（ CO_3^{2-} ）與其反應，形成穩定的碳鋁酸鹽相，如單碳鋁酸鹽與半碳鋁酸鹽。此反應可降低水化產物中 monosulfate 向 ettringite 或其他不穩定相的轉化，有助於提升漿體體積穩定性與耐硫酸鹽侵蝕能力[69][70]。

此外，卜作嵐摻料的反應性依賴鹼性孔隙液條件。石灰石釋放的 Ca^{2+} 離子可有助於維持孔隙液的鹼度與穩定性，從而營造有利於爐石或飛灰反應的環境[64]。同時，石灰石微粒與爐石表面形成反應界面（interface zone），亦可促進卜作嵐材料的活化，提升其潛在水硬性表現。研究指出，這類複摻系統中石灰石與卜作嵐材料間的化學交互作用與微觀結構協調，可有效提升混凝土的抗滲性、抗氯離子擴散性與長期耐久性[71]。

因此，石灰石與卜作嵐材料的協同作用不僅具備強度與耐久性層面的工程效益，更有助於減少水泥熟料使用與 CO_2 排放，為推動低碳與永續混凝土設計的重要技術途徑。

石灰石與卜作嵐材料的協同效應對混凝土性能具有顯著正面影響：

1. 早期強度：石灰石的成核效應可補足飛灰初期反應性不足問題。
2. 後期強度：卜作嵐材料反應提升長期 C-S-H 產出量。
3. 微觀結構：填充與次生水化物共同作用，降低孔隙率。
4. 耐久性：碳鋁酸鹽生成可改善抗硫酸鹽、抗滲與碳化行為。



2.4.乾燥收縮

乾燥收縮 (Drying Shrinkage) 是混凝土或砂漿在硬化後暴露於乾燥環境中，因水分從毛細孔隙中蒸發而產生的體積減少現象。這種體積變化會在結構中產生拉應力，若超過材料的抗裂能力，可能導致表面裂縫，進而影響混凝土的耐久性與使用壽命。

乾燥收縮的主要驅動力來自孔隙水的蒸發與毛細張力的變化。當混凝土內部水分蒸發至外部環境時，毛細孔中的水面產生張力，拉動膠體結構向內收縮。此外，C-S-H 凝膠本身在脫水過程中亦會發生結構調整，導致微觀尺度的體積收縮。

影響乾燥收縮的主要因素包括水膠比、環境濕度、膠結材料類型、齡期、養護條件與添加材料等。高水膠比會導致較高的孔隙率與水分蒸發速率，進而提升收縮量，下列根據三種材料分別介紹對乾縮的影響

1. 石灰石

石灰石屬於惰性填料，雖不參與水化反應，但其細小粒徑具有良好的填充能力，可改善漿體的孔隙結構，降低毛細孔體積，進而在某些條件下有助於減少乾燥收縮。然而，石灰石同時也具有稀釋效應，會降低膠結材料反應性與水化產物總量，若取代率過高，可能導致結構不夠密實而提高收縮量。研究[72]顯示，石灰石對乾縮的影響在早齡期並不顯著，長齡期（28 天以上）則依取代率與水膠比條件而異，可能略高或略低於普通水泥漿體。

2. 爐石

爐石具有潛在水硬性，在鹼性環境下會逐漸與水反應生成 C-S-H 凝膠。由於其反應速度較水泥熟料慢，導致在早齡期水化產物生成較少，結構尚未緊密，因而表現出較高的乾縮量。隨著齡期增加，爐石逐漸反應，膠體產量提升，孔隙結構愈加致密，乾縮趨勢逐漸降低。文獻[73]指出，爐石混凝土在 28 天至 56 天後的乾縮可能與 OPC 相當或略低，表現出良好的長期穩定性。

3. 飛灰

飛灰為具卜作嵐反應性的摻料，在水泥水化生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 後，飛灰會於中後期參與反應並生成次生的 C-S-H 凝膠，有助於填補孔隙、提升密實性與減少毛細水逸散。其球狀顆粒形貌亦有助於改善流動性與減緩內部水分蒸發，進一步降低乾縮。儘管飛灰在早期反應緩慢，可能造成初期收縮略高於 OPC，但 28 天以後隨反應活性增加，乾縮量顯著下降，對長期性能改善成效明顯[74][75]。

2.5. 耐久性

2.5.1. 氯離子傳輸機制

氯離子傳輸性為混凝土耐久性之關鍵指標，直接影響鋼筋的銹蝕潛勢與混凝土結構之服役壽命。當混凝土暴露於含氯環境（如海洋氯鹽、除冰鹽或工業區域）時，氯離子可經由孔隙水進入材料內部，並藉由擴散、滲透與毛細吸力等傳輸機制遷移至鋼筋表面。氯離子的傳輸行為主要受混凝土之孔隙率、孔隙連通性、C-S-H 凝膠密度與水化產物吸附能力等因素控制。在結構內部，氯離子可能以物理吸附（於凝膠表面暫時吸附）或化學鍵結（與水化鋁酸鹽反應形成 Friedel's salt）方式被部分固定，進一步影響其有效濃度與傳輸速率。

為量化混凝土對氯離子的抵抗能力，常用試驗方法包括 RCPT（Rapid Chloride Permeability Test）與 RCM（Rapid Chloride Migration Test）。其中，RCPT（ASTM C1202）係利用直流電場加速氯離子通過混凝土，測量 6 小時內的總電通量（Coulomb），間接反映孔隙率與離子傳輸性。然而，RCPT 易受溫度升高、極化效應與試體飽和度等干擾，難以單純反映氯離子擴散特性。

相較之下，RCM (NT Build 492) 提供較準確之氯離子遷移能力評估。此法將混凝土樣品置於裝置中央，一側為氯化鈉溶液，另一側為氫氧鈉溶液，並施加直流電場促進氯離子從高濃度端向低濃度端遷移。當氯離子穿透試體並進入鹼性側後，與硝酸銀作用產生可視化之白色沉澱（氯化銀），藉此測量遷移深度。透過公式計算可得表觀擴散係數 D_{RCM} ，用以評估材料對氯離子的阻隔能力。

2.5.2. 影響傳輸行為的因素

氯離子在混凝土中的傳輸行為直接關係到鋼筋腐蝕潛勢與整體結構之耐久性，受多重材料組成與環境條件交互影響。其移動過程受限於混凝土內部之孔隙率、孔隙連通性、膠體密度與水化產物的吸附與結合能力。此外，氯離子傳輸行為亦與水膠比、水泥替代材料類型、齡期發展與養護條件密切相關，透過優化這些參數可顯著提升混凝土對氯離子的阻隔效能[81]。

水膠比 (w/b) 為影響氯離子擴散能力最主要的參數之一。當水膠比升高，未參與水化之自由水含量增多，導致水化後孔隙率上升、毛細孔連通度提高，形成氯離子傳輸的快速通道[82]。反之，低水膠比可限制初始孔隙結構，有助於形成更為緻密之水化產物網絡。研究指出，當水膠比由 0.6 降低至 0.3 時，氯離子擴散係數可降低超過 50%[83]。此外，良好濕養條件可延長水化反應進程，提升 C-S-H 膠體密度，進一步細化孔徑分布，抑制氯離子滲透能力。

齡期對氯離子傳輸行為具顯著影響。於早齡期（如 7~28 天），混凝土內部水化反應尚未完成，孔隙結構鬆散，氯離子易穿透至深層；而隨著齡期延長（56 天甚至至 90 天以上），水泥及卜作嵐材料之反應進一步推進，形成更多膠體與反應產物，導致孔隙率下降、微孔隙佔比提升與連通性降低，進而有效提升氯離子阻隔能力[80][84]。此外，次生反應如飛灰的卜作嵐反應或爐石的後期水化亦會補充膠體生成，進一步減緩氯離子的傳輸速率與滲透深度。

多數研究均指出，混凝土氯離子傳輸係數隨齡期呈顯著下降趨勢，尤其於 28 天後至 90 天期間下降幅度最大，反映材料內部孔隙系統持續演化，具潛在封閉與精化機能[85]。因此，在探討氯離子耐久性能時，齡期與材料演化階段需作為重要考量因素之一。

2.5.3.不同材料對氯離子傳輸的影響

混凝土中氯離子的傳輸性與孔隙結構、膠體密度與化學鍵結能力密切相關。常見礦物摻料如石灰石、爐石與飛灰，因其物理與化學特性不同，對氯離子阻隔機制亦有顯著差異，影響其耐久性發展趨勢如下：

1. 石灰石對氯離子傳輸的影響

石灰石作為惰性填料，主要透過填充效應與成核效應改善水泥漿體的微觀結構。其細微顆粒可填補毛細孔，降低孔隙率，並加速 C_3S 水化反應，促進早期膠體生成。然而，石灰石不具火山灰活性，也不具與氯離子形成穩定結合物的能力，其對氯離子傳輸之抑制效果主要來自微結構細化而非化學鍵結。石灰石亦可與 C_3A 反應形成硫鋁酸鹽，在部分條件下略具物理吸附或離子交換能力，但對 Cl^- 的結合力遠低於 Friedel's salt[88][89]。整體而言，石灰石在早期可稍微抑制氯離子傳輸，但長期效果有限，通常需與其他具活性的摻料（如飛灰或爐石）併用，以提升整體耐久性。

2. 爐石對氯離子傳輸的影響

爐石具有潛在水硬性，可在鹼性環境下水化形成大量 C-S-H 凝膠，有效填補孔隙並細化微觀結構，大幅降低氯離子擴散速率。此外，爐石中的鋁含量可促進 Friedel's salt ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) 的生成，使氯離子以化學鍵結方式固定於固相中。爐石同時兼具物理阻隔與化學吸附能力，對提升混凝土抗氯離子侵蝕性能極為有效，長齡期下氯離子擴散顯著下降[86][87]。

3. 飛灰對氯離子傳輸的影響

飛灰中的矽酸與鋁酸鹽成分可透過卜作嵐反應生成次生 C-S-H 與 AFm 水化產物，顯著改善微觀結構，降低孔隙率與連通性。其球形顆粒亦有助於優化漿體流動性與密實度，間接抑制氯離子通道。同時，飛灰中鋁含量高，具備良好的氯離子鍵結能力，可生成 Friedel's salt 等穩定相，進一步提升抗氯離子滲透能力。文獻指出，飛灰對氯離子傳輸的抑制效果優於石灰石與爐石，特別是在長齡期表現更加明顯，使用爐石與飛灰摻料之混凝土在 90 天、180 天齡期下電通量大幅下降，證明其長期耐氯性能顯著改善[86][90]。



2.5.4. 硫酸鹽侵蝕機理

一、硫酸鹽滲入與擴散

外部硫酸鹽（如 Na_2SO_4 、 MgSO_4 ）進入混凝土孔隙液中，經由毛細吸力、滲透壓或擴散作用向內傳輸。傳輸速率受混凝土孔隙率、連通性與濕潤狀態影響，是侵蝕的前導階段。

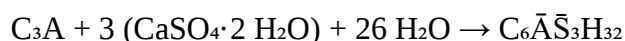
二、生成石膏

硫酸根（ SO_4^{2-} ）與水泥水化產物中的氫氧化鈣（CH）或 C-S-H 反應，生成石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ），石膏生成導致體積膨脹與內部應力上升，為後續劣化鋪路。



三、生成鈣礬石

SO_4^{2-} 接續與水泥中的鋁酸鈣（如 C_3A 或 monosulfate）反應，生成具體體積膨脹性的鈣礬石（ettringite），鈣礬石晶體體積大，易造成混凝土內部膨脹與裂縫擴展。



四、微結構劣化與開裂

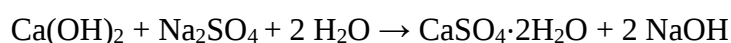
石膏與鈣礬石的膨脹效應會產生內部拉應力，當超過材料抗裂強度時，導致裂縫出現與擴大，形成惡性循環，最終導致強度下降與結構破壞。

表 2.5-1 水泥在硫酸鹽環境中反應產物

產物名稱	特性	生成時期	作用與影響
Ettringite 針狀鈣鋁酸鹽	高吸水性	早期（數天至數週）	增加重量
	體積膨脹	水泥初期水化即生成 硫酸根侵入後數天內 產生二次生成	造成裂縫與剝離
Gypsum(石膏)	較穩定 使結構疏鬆	中早期（1~4 週）	增加重量，形成 大量沉積、導致 孔隙充填與後續 反應源
Thaumasite (長期侵蝕)	對 C-S-H 破壞大	長期（數月至 1~2 年）	初期略增重，後 期可能質量下降

A. 硫酸鈉侵蝕機理

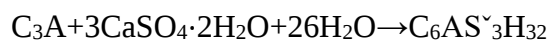
硫酸鈉（ Na_2SO_4 ）為自然與人工環境中最常見的侵蝕性硫酸鹽之一，廣泛存在於鹽鹼地、地下水與部分工業廢液中。當混凝土暴露於含硫酸鈉環境時，將面臨嚴重的耐久性劣化風險。硫酸鹽侵蝕主要係由硫酸根離子（ SO_4^{2-} ）進入混凝土孔隙液後，與水化產物發生反應，生成體積膨脹性產物（如石膏與矽鋁石），導致內部應力累積、裂縫萌生與微觀結構破壞，最終影響結構之抗滲性與長期力學性能[91]。硫酸鈉在水中會完全解離為 Na^+ 與 SO_4^{2-} ，其中 SO_4^{2-} 會透過毛細作用、擴散或濕潤遷移等機制進入混凝土內部。若材料本身具高孔隙率與連通性，將加速硫酸根的傳輸速度與反應範圍。氫氧化鈣與硫酸根反應生成石膏



一、單硫鋁酸鈣與石膏反應生成鈣礬石



二、三鈣鋁酸與石膏反應生成鈣礬石



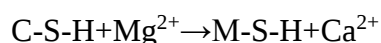
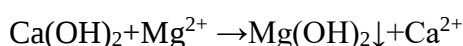
三、C-S-H 與硫酸根反應導致降解



B. 硫酸鎂侵蝕機理

硫酸鎂是一種具有強侵蝕性的鹽類，當混凝土長期暴露於硫酸鎂環境（如工業廢水、土壤或地下水中）時，其侵蝕行為將同時造成體積膨脹性破壞與化學分解性劣化。這與一般硫酸鹽如硫酸鈉不同，因為除了常見的石膏與鈣礬石反應機制外， Mg^{2+} 還會參與對 C-S-H 凝膠的破壞作用，對混凝土結構造成更加深層的破壞[91]。

首先，混凝土孔隙液中的氫氧化鈣（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）會與溶液中的鎂離子（ Mg^{2+} ）反應，生成不溶的氫氧化鎂（ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ），也稱為「布氏石」沉澱。這個反應會同時釋放出游離的鈣離子（ Ca^{2+} ），使孔隙液中的鈣濃度下降，導致整體水化系統的去鈣化現象[92]。其次， Mg^{2+} 還會與混凝土中最重要的膠結產物——C-S-H 凝膠發生反應。這個反應會破壞原本的矽酸鈣結構，轉變為低膠結性的 M-S-H 凝膠（Magnesium Silicate Hydrate），這種轉換過程伴隨著混凝土強度與黏結力的顯著下降。硫酸根離子也會與水泥水化產物（如氫氧化鈣與單硫鋁酸鹽）反應，產生石膏與鈣礬石。這些反應均伴隨明顯體積膨脹，當生成的結晶在孔隙或界面區大量沉積時，會導致內部拉應力提升、產生微裂縫與剝離現象[93]。



硫酸鎂侵蝕不僅涉及晶體生成造成體積膨脹，還涉及水化產物的化學分解與鈣溶出，因此被認為是最具破壞性的硫酸鹽侵蝕形式之一。其對混凝土耐久性的危害程度，遠高於硫酸鈉等單純膨脹型硫酸鹽。



2.5.5.不同材料對硫酸鹽侵蝕的抵抗能力

一、石灰石

石灰石中主要成分碳酸鈣可與水泥中之三鈣鋁酸鹽反應生成穩定的碳鋁酸鹽，能在早期水化階段穩定鋁相，有助於抑制過量 ettringite 的形成。然而，當外來 SO_4^{2-} 滲入時，碳鋁酸鹽可能遭受硫酸根置換，生成膨脹性 ettringite，誘發裂縫與劣化。此外，石灰石本身亦可能與鈣離子與硫酸根反應生成石膏，進一步堵塞孔隙甚至膨脹破壞。根據 [89]與[91]指出，適當取代比例（如 $\leq 15\%$ ）的石灰石可提升早期強度與微觀穩定性，但高取代量可能加劇長期劣化風險。

將石灰石水泥於硫酸鹽環境中新增的反應產物整理如下表 2.5-2：

表 2.5-2 石灰石水泥在硫酸鹽環境中增加的反應產物

產物名稱	特性	生成時期	作用與影響
Carboaluminate 碳鋁酸鹽	穩定水化產物	早期水化階段 (1~7 天) 石灰石與 C_3A 反應生成	抑制部分 ettringite 形成，結構較穩定 可改善孔隙結構與早期強度

二、爐石

爐石為高矽、高鋁的玻璃質材料，與水化過程中生成大量的 C-S-H 凝膠與鋁相產物。爐石活化產物中鋁含量較高，提供額外反應位點生成 Ettringite。在硫酸鹽環境下，初期具有孔隙緻密化、降低 CH 含量、減緩硫酸根滲透等正面效果。但在長期 SO_4^{2-} 持續侵入時，可能因 Ettringite 晶體累積與石膏生成導致劣化與裂縫。在中低濃度硫酸鹽環境下耐久性良好，高濃度或長期曝露仍需注意鈣礬石堆積 [93][94]。

三、飛灰

飛灰中含矽與鋁，具卜作嵐潛能，參與二次反應生成 C-S-H 凝膠與少量鋁相產物，反應較爐石緩慢，主要於中長齡期提供抗侵蝕貢獻。飛灰可有效降低 CH 含量、提高緻密性、延緩 SO_4^{2-} 擴散，減少石膏與 Ettringite 的生成。但在低溫潮濕條件下，反應生成的 C-S-H 有可能與 $\text{SO}_4^{2-} + \text{CO}_3^{2-}$ 生成 Thaumassite，導致 C-S-H 分解與材料粉化。長齡期有利於抗硫酸鹽侵蝕，但須注意低溫高濕環境下之 Thaumassite 風險[95][89][94]。

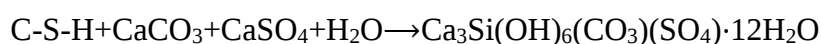


表 2.5-3 不同材料在硫酸鹽侵蝕的原因

材料	抗硫酸鹽機制	潛在風險	適用情境
石灰石	穩定鋁相 成核效應	被置換為 Ettringite	低取代率可穩定反應
爐石	緻密化 降低 CH	生成 Ettringite 過多	中期良好，長期需觀察
飛灰	二次反應 提升密實性	Thaumassite（低溫）	中長期環境耐久性佳

單一材料難以全面抵禦硫酸鹽侵蝕，多元摻料設計與良好養護條件（如控制濕度與鹽濃度）是提升混凝土抗硫酸鹽能力的有效策略。適當配比的爐石與飛灰可顯著提升緻密性與反應穩定性，並抑制膨脹相的生成。

2.5.6. 硫酸鹽侵蝕因素

硫酸鹽侵蝕是混凝土結構耐久性劣化的重要機制之一，主要受到多種因素交互作用的影響。這些因素不僅決定侵蝕速率，也影響劣化形式與長期服役性能。根據 [91]、[92] 及 [93] 的研究，可將影響硫酸鹽侵蝕的因素歸納如下：

(1) 硫酸鹽來源與濃度

硫酸鹽可來自土壤、水源或工業廢液。其濃度高低直接影響反應速率與生成產物的數量與型態。例如高濃度 Na_2SO_4 會快速導致石膏與 Ettringite 的形成，造成混凝土膨脹與開裂。



(2) 水膠比與孔隙結構

較高的水膠比會產生較多的毛細孔，提升硫酸鹽的擴散速率，加劇反應程度。此外，開放性孔隙越多，越容易形成連通通道，增加侵蝕深度。

(3) 膠結材料組成

含高 C_3A 的水泥較易與 SO_4^{2-} 反應形成 Ettringite，膨脹破壞風險較高。相對地，摻入爐石、飛灰或石灰石可降低 CH 與 C_3A 含量，改善抗硫酸鹽能力。

(4) 環境條件（濕度、溫度）

濕度是硫酸鹽傳輸的關鍵動力來源，持續濕潤環境會促進反應進行；而低溫（ $<15^\circ\text{C}$ ）則有利於 Thaumateite 的生成，造成 C-S-H 凝膠分解與粉化[95]。

(5) 齡期與反應時間

早齡混凝土毛細孔尚未封閉，對硫酸鹽更敏感；隨齡期增長，若摻料反應充分，緻密性提升，可抵禦外來離子滲透，改善長期耐久性。低溫硫酸鹽侵蝕（Thaumateite form of sulfate attack, TSA）是一種特殊且破壞性強的混凝土劣化機制，會直接破壞水泥水化產物中的 C-S-H 結構，導致混凝土強度與黏結性顯著下降。相關研究指出，TSA 的形成與水泥中石灰石含量、砂料種類以及環境溫度密切相關。實驗發現，在低溫（如 5°C ）且石灰石取代率高（如 35%）的條件下，若混凝土長期曝露於含 $MgSO_4$ 之硫酸鹽溶液中，約在 126 天後即可能觀察到莎氏礦生成，表面會出現剝離與軟化現象，顯示明顯劣化徵兆。此外，砂料成分亦扮演重要角色，像是含有碳酸根的珊瑚砂或細粉砂，因其提供額外的 CO_3^{2-} 與促進孔隙連通，會加速 TSA 生成與侵蝕進程。因此在寒冷地區或含碳酸鹽砂料的應用環境中，建議避免使用高石灰石含量的水泥，並可搭配低 C_3A 水泥或添加其他礦物摻料（如飛灰、爐石），以抑制 TSA 的發生並提升材料的長期耐久性。[2]

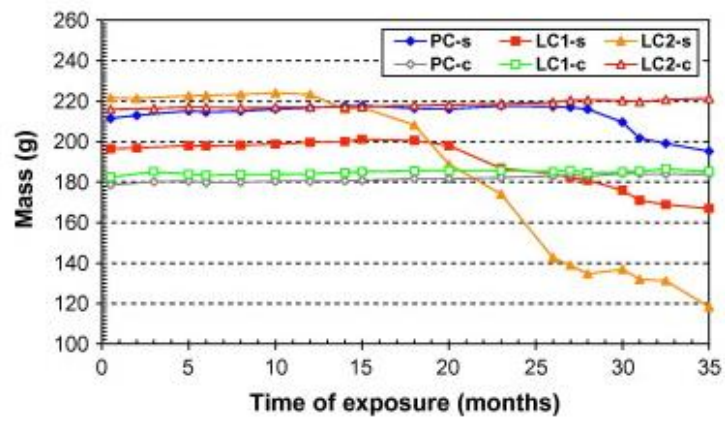


圖 2.5-1 Mass of specimens related to exposure duration in a 1.8% MgSO_4 solution at 5°C.[2]

第三章、實驗計畫



本研究針對石灰石水泥系統，搭配爐石與飛灰等卜作蘭材料，探討其於混凝土中對力學性質與耐久性的影響。選定兩組複合膠結材料配比進行研究，分別為以水泥替代爐石 35%與飛灰 15%之「CS35F15M」組，以及替代石灰石粉 35%與飛灰 15%之「LS35F15M」組。兩者皆屬於高取代率之混合材系統，目標為減少熟料用量以達成低碳排放之永續建材目標。在物理性能方面，量測其抗壓強度、劈裂抗拉強度與彈性模數，評估材料的基本力學表現。在耐久性部分，設計進行快速氯離子遷移試驗（RCM）、快速氯離子滲透試驗（RCPT），以評估其抗氯離子滲透能力；並進行硫酸鹽侵蝕試驗，藉由長度變化觀察其抗化學侵蝕的體積穩定性。透過本系列實驗，期望釐清不同膠結材料組合對混凝土整體性能的影響，作為未來低碳混凝土配比優化之依據。

本研究的配比設計考慮了不同配比對材料性能的影響，共設計十組配比之混凝土，分為兩種水泥材料：普通水泥與石灰石水泥。每一配比皆包含純水泥組、單一礦物摻料組（爐石或飛灰），以及複合摻料組（爐石＋飛灰），並針對「CS35F15」、「LS35F15」,設計三種水膠比條件，設計三種不同水膠比：M 表示 0.5，L 表示 0.6，H 表示 0.4，進行快速氯離子遷移試驗（RCM）和抗壓強度於齡期 56、91、182、364 天量測，觀察其長期抗氯離子滲透能力變化，並搭配各齡期抗壓強度測試，以評估不同水膠比及膠結材料對混凝土耐久性與力學性質之影響，作為發展低碳、高性能混凝土之依據，以探討水膠比與膠結材料對混凝土力學與耐久性能之綜合影響。

本研究將混凝土的配比做為參考，設計十組配比之水泥砂漿，分為兩種水泥材料：普通水泥與石灰石水泥。每一配比皆包含純水泥組、單一礦物摻料組（爐石或飛灰），以及複合摻料組（爐石＋飛灰），固定水膠比，進行硫酸鹽侵蝕試驗以及抗壓強度試驗，針對各配比進行硫酸鹽侵蝕試驗及抗壓強度測試，硫酸鹽侵蝕部分，除觀察裂縫與表面劣化情形外，亦量測試體隨時間之重

量變化。另外，延續著本研究群做石灰石水泥，將研究不同石灰石粉細度對水泥砂漿的影響，進行 8 組配比的硫酸鹽浸泡試驗，量測長齡期重量變化，藉以分析侵蝕進程及體積穩定性表現，。以探討不同材料與摻料對砂漿耐久性與力學性能之影響。

透過對混凝土與水泥砂漿的深入研究，可全面掌握各項因素對材料性能的影響，進而尋求最適配比。研究涵蓋石灰石水泥、礦物摻料及粒料等變因，有助於建立更科學的配比設計依據，提升混凝土之力學與耐久性能，強化結構品質。藉由試驗結果的分析與比較，可歸納結論並提出建議，為後續研究與實務應用提供指引，推動建材技術持續進步與優化。

3.1.試驗材料

以下四間公司所使用的試驗材料，其報告皆由各自公司提供。

1. I 型水泥：

本研究採用四間公司生產的卜特蘭 I 型水泥，表 3.1-1 和表 3.1-2 分別為 B 公司卜特蘭 I 型水泥的物理性質及化學成分。

2. 石灰石水泥：

本研究採用四家公司生產的卜特蘭石灰石水泥，表 3.1-3 表 3.1-4 分別為 B 公司卜特蘭石灰石水泥的物理性質及化學成分。

3. 爐石粉：

本研究採用四家公司使用的爐石粉，表 3.1-5 表 3.1-6 分別為 B 公司爐石的物理性質及化學成分。

4. 飛灰：

本研究採用四家公司使用的飛灰，表 3.1-7 表 3.1-8 分別為 B 公司飛灰的物理性質及化學成分。飛灰來源為台中發電廠。

5. 化學摻料

本研究採用四家公司使用的化學摻料以及實驗室所使用的化學摻料（減水劑）。

6. 細粒料和粗粒料

本研究混凝土使用了四家公司的水泥搭配不同來源粒料，細粒料是砂，粗粒料是石頭，砂漿都是使用標準砂，本試驗中所使用之標準砂依 CNS 382 規範選用，主要為天然砂，其粒徑分布、潔淨度與形狀經嚴格控制，作為製備水泥膠砂抗壓強度試體之參考骨材，以確保測試結果之再現性與一致性。

表 3.1-1 B 公司卜特蘭 I 型水泥物理成分

試驗項目	試驗結果	CNS 61:2021 規範要求 Type I
密度 (g/cm^3)	3.13	-----
細度 (氣透儀法) (m^2/kg)	409	260 MIN.
水泥熱壓膨脹試驗 (%)	0.05	0.80 MAX.
空氣含量 (%)	6	12 MAX.
正常稠度用水量 (%)	25	-
凝結時間檢驗(費開氏針法)		
初凝(分)	181	45 MIN. ; 375 MAX.
終凝(分)	345	-----
抗壓強度(kgf/cm^2)		
3 天	284.6	122 MIN.
7 天	368.4	194 MIN.
28 天	444.0	286 MIN.

表 3.1-2 B 公司卜特蘭 I 型水泥化學成分



試驗項目	試驗方法	試驗結果	CNS 61:2021 規範要求 Type I
氧化鋁(Al_2O_3)	CNS	4.4	---
氧化鐵(Fe_2O_3)	1078:2020	3.0	---
氧化鎂(MgO)		3.3	最大值 6.0
氧化鈉(Na_2O)		0.28	
氧化鉀(K_2O)		0.43	
三氧化硫(SO_3)		2.68	當 $\text{C}_3\text{A} \leq 8\%$ 最大值 3.0 ; 當 $\text{C}_3\text{A} > 8\%$ 最大值 3.5
鹼類 ($\text{Na}_2\text{O} + 0.685\text{K}_2\text{O}$)		0.56	最大值 0.60(適用低鹼水泥)
燒失量 LOI		1.3	當未添加石灰石時 最大值 3.0 ; 當添加石灰石時 最大值 3.5
不溶殘渣(I.R)		0.05	最大值 1.5

表 3.1-3 B 公司卜特蘭 II 型水泥物理成分

試驗項目	試驗方法	試驗結果	CNS 61:2021 規範要求
密度 (g/cm^3)	CNS 11272 : 985	3.14	-----
細度(氣透儀法) (m^2/kg)	CNS 2924 : 1984	454	260 MIN.
水泥熱壓膨脹試驗 (%)	CNS 1258 : 1985	0.02	0.80 MAX.
凝結時間檢驗(費開氏針法)			
初凝(分)	CNS 786 : 1983	191	45 MIN. ; 375 MAX.
終凝(分)		390	-----

抗壓強度(kgf/cm ²)			
3 天	CNS 1010 : 1993	289.4	122 MIN.
7 天		342.1	194 MIN.
28 天		417.9	286 MIN.

表 3.1-4 B 公司卜特蘭 IL 型水泥化學成分

試驗項目	試驗方法	試驗結果
氧化鋁(Al ₂ O ₃)	CNS 1078:2020	3.5
氧化鐵(Fe ₂ O ₃)	CNS 1078:2020	3.2
氧化鎂(MgO)	CNS 1078:2020	3.2
二氧化鈦(TiO ₂)	CNS 1078:2020	0.24
五氧化二磷(P ₂ O ₅)	CNS 1078:2020	0.09
三氧化硫(SO ₃)	CNS 1078:2020	2.45
鋁酸三鈣(C ₃ A _f)	CNS 61:2021	3
不溶殘渣(I.R)	CNS 1078:2020	0.17

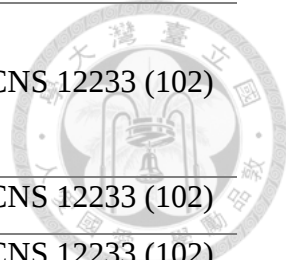
表 3.1-5 爐石的物理性質

試驗項目	試驗結果	標準規定	試驗方法
密度 (Mg/m ³)	2.89	—	CNS 12549:2009, CNS 11272:1985
細度：比表面積 (氣透儀法) (cm ² /g)	4130	—	CNS 12549:2009, CNS 2924:1984
細度：#325 濕篩 (%)	3	≤20	CNS 12549:2009, CNS 11273:1985
摻料空氣含量 (%)	3	≤12	CNS 12549:2009, CNS 787:1983
活性指數 (7 天)(%)	76	≥70(80 級)	CNS 12549:2009
活性指數 (28 天)(%)	114	≥90(100 級)	CNS 12549:2009

焙失量 (%)	0.9	≤ 5.0	ASTM C114-18
硫化物硫 (S)(%)	0.8	≤ 2.5	CNS 12549:2009
三氧化硫 (SO ₃)(%)	0.1	≤ 4.0	CNS 1078:2020

表 3.1-6 爐石的化學成分

試驗項目	檢驗結果	標準規定	試驗方法
細度：比表面積 (cm ² /g)	8084	≥ 3000	CNS 2924 (111)
細度：0.045mm 濕 篩餘 (%)	2	≤ 20	CNS 11272 (74)
比重 (g/cm ³)	2.65	—	CNS 1010 (82)
28 天抗壓強度 (MPa)	33.9	—	CNS 4603 (90)
活性指數 (7 天)(%)	80 級	≥ 75	CNS 12549
活性指數 (28 天)(%)	120 級	≥ 90	CNS 12549
氯離子 (%)	0.18	≤ 0.02	CNS 4603 (90)
三氧化硫 (%)	0.85	≤ 5.0	CNS 1078 (109)
焙失量 LOI (%)	4.22	≤ 6.0	CNS 1078 (109)
二氧化矽 SiO ₂ (%)	33.6	—	CNS 12233 (102)
三氧化硫 Al ₂ O ₃ (%)	20.3	—	CNS 12233 (102)
三氧化鐵 Fe ₂ O ₃ (%)	4.2	—	CNS 12233 (102)
氧化鈣 CaO (%)	33.0	—	CNS 12233 (102)
氧化鎂 MgO (%)	4.3	≤ 5.0	CNS 12233 (102)
氧化鉀 K ₂ O (%)	0.33	—	CNS 12233 (102)
氧化鈉 Na ₂ O (%)	0.42	—	CNS 12233 (102)



有效鹼			
Na ₂ O+0.658K ₂ O (%)	0.85	≤0.75	CNS 12233 (102)
TiO ₂ (%)	0.18	—	CNS 12233 (102)
MnO (%)	—	—	CNS 12233 (102)
不溶於鹽酸 (%)	—	—	CNS 1078 (109)

表 3.1-7 飛灰的物理性質

試驗項目	試驗結果	標準規定	試驗方法
密度 (Mg/m ³)	2.34	—	CNS 10896:2009
細度 (#325 濕篩法) (%)	16	≤34	CNS 10896:2009, CNS 11272:1985
需水量 (%)	98	≤105	CNS 10896:2009
健康 (%)	0.0	≤0.8	CNS 10896:2009, CNS 1258:1985
強度活性指數 (7 天)(%)	90	≥75	CNS 10896:2009
強度活性指數 (28 天)(%)	94	≥75	CNS 10896:2009

表 3.1-8 飛灰的化學成分

檢驗項目	CNS 標準	檢驗結果
#325 篩除(%)	≤34	—
活性指數(7 天)(%)	≥75	—
活性指數(28 天)(%)	≥75	—
健康(%)	≤0.8	—
需水量(%)	≤105	—
燒失量 LOI(%)	≤6	2.7
SiO ₂ (%)	—	51.4
Al ₂ O ₃ (%)	—	24.0
Fe ₂ O ₃ (%)	三項總和 ≥70.0	4.40
CaO(%)	—	2.8

MgO(%)	≤ 5.0	1.1
SO ₃ (%)	≤ 5.0	0.55
K ₂ O(%)	—	1.04
Na ₂ O(%)	—	1.23
有效鹼(Na ₂ O 計)(%)	≤ 1.5	1.23
含氣量(%)	≤ 3.0	0.3

3.2.試驗儀器

3.2.1.力學性質試驗

- (1) 抗壓強度試驗所使用圓柱試體端面研磨機
- (2) 彈性模數試驗所使用應變環
- (3) 劈裂強度試驗所使用劈裂夾具



圖 3.2-1 抗壓試驗機

圖 3.2-2 圓柱試體端面研磨機



圖 3.2-3 應變環

圖 3.2-4 劈裂夾具

3.2.2.耐久性試驗

快速氯離子傳輸試驗(RCM)所使用電源供應器、水箱、正負電線、真空處理器，如圖 3.2-5 和圖 3.2-6 和圖 3.2-7 表示，快速氯離子滲透試驗(RCPT)所使用電源供應器，RCPT 試驗儀器如圖 3.2-8 和圖 3.2-9 表示，硫酸鹽侵蝕試驗所使用橘桶和磅秤和硫酸鹽粉末，如圖 3.2-10 表示。



圖 3.2-5 電源供應器

圖 3.2-6 真空處理器



圖 3.2-7 RCM 試驗儀器

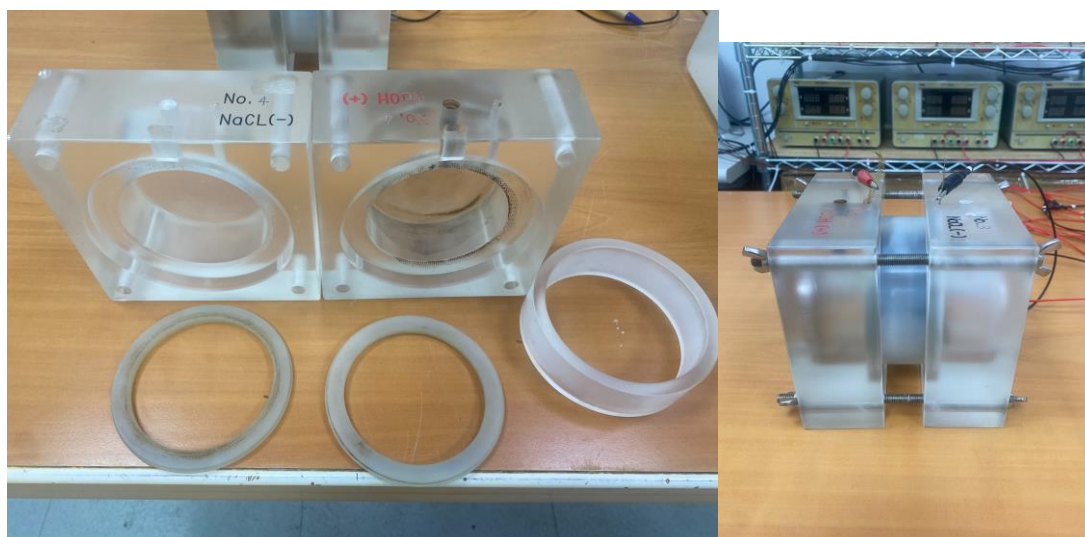


圖 3.2-8 RCPT 試驗儀器

圖 3.2-9 RCPT 試驗架設



圖 3.2-10 橘桶和試體



3.3.試體製作

3.3.1.製作混凝土試體

本研究的混凝土試體部分在預拌混凝土廠製作，有些在台大土木研究室實驗場，並與台灣營建研究院合作完成。

試體製作步驟（依據 CNS 1230）

一、拌合作業

- (1) 將粗粒料、部分拌合水量及液狀摻料投入拌合機中。
- (2) 啟動拌合機後，依序加入細粒料、石灰石水泥及爐石及飛灰及剩餘的拌合水。
- (3) 開始拌合 3 分鐘後，停止 3 分鐘（此時應以蓋子覆蓋拌合機開口，避免水分蒸發），再次拌合 2 分鐘。
- (4) 將拌合完成的混凝土倒入拌合盤，使用鐵鏟手工翻拌，使其外觀更加均勻。

二、試體成型與養護

- (1) 將拌合完成的混凝土倒入圓柱試體模具 12*24 和 10*20 和角柱 10*10*28.5 中，分三層澆置。
- (2) 每一層使用鋼針搗實 25 下，完成後再用木槌輕敲模具側邊，幫助氣泡逸出及密實化。
- (3) 最上層完成後，使用鋤刀將試體表面鋤平。
- (4) 靜置 24 小時，待混凝土初凝硬化。
- (5) 24 小時後拆模，並將試體置入飽和石灰水中養護，以確保水化反應充分進行。

3.3.2.製作水泥砂漿試體步驟（依據 CNS 3655）

本研究的混凝土試體在台大土木研究室實驗場完成

一、拌合作業



- (1) 將標準砂和拌合水倒入拌合機中。
- (2) 加入石灰石水泥和爐石和飛灰，開啟拌合器以低速攪拌 30 秒。
- (3) 低速拌合期間，於 30 秒內將砂緩慢加入。
- (4) 停止拌合器，改為中速攪拌 30 秒。
- (5) 停止拌合後，靜置 90 秒，並將附著於拌碗側壁的砂漿刮回碗中。
- (6) 再以中速拌合 60 秒，至此拌合完成。

二、試體成型與養護

- (1) 將拌合完成的水泥砂漿分兩層灌入方形模具和角柱 2.5*2.5*28.5 中。
- (2) 每層灌入後均進行搗實，確保密實度。
- (3) 用鏟刀將表面抹平。
- (4) 靜置 24 小時後進行拆模。
- (5) 將試體放入飽和石灰水中養護，以促進充分水化。

3.4. 配比設計

本研究針對國內品牌的卜特蘭石灰石水泥，分別進行混凝土配比參數與水泥砂漿配比的設計與分析。混凝土部分，設計重點包括三項：首先，探討石灰石水泥與礦物摻料（爐石取代率 35%、飛灰取代率 15%）的組合對力學性能與耐久性的影響；其次，進一步評估不同摻料配置下的抗壓強度與耐久行為；最後，進行相關配比參數的綜合比較。至於水泥砂漿部分，則聚焦於石灰石水泥搭配爐石和飛灰組合對抗壓強度與耐久性的影響，同時亦針對不同細度的石灰石水泥進行耐久性評估與分析。

3.4.1. 石灰石水泥搭配固定爐灰比的混凝土配比

探討石灰石水泥搭配爐石取代率 35%、飛灰取代率 15%之影響，採用國內品牌的卜特蘭I型水泥和卜特蘭(II)石灰石水泥，I型+35%爐石粉+15%飛灰、II+35%爐石粉+15%飛灰，並搭配水膠比 0.5，如表 3.4 1 所示，有四間公司 (A,B,C,D)進行各項新拌混凝土性質試驗和力學性質試驗和耐久性試驗，如表

3.4.2 所示，「C」代表卜特蘭I型水泥，「L」代表卜特蘭石灰石水泥，「S」代表爐石粉取代，其後數字為取代率，「F」代表飛灰取代，其後數字為取代率，「M」代表水膠比為 0.5。

表 3.4-1 水泥搭配固定礦物摻料之混凝土配比

水泥類別	爐灰比率	水膠比 0.5
50%I 型	35%爐石粉+15%飛灰	CS35F15M
50%IL	35%爐石粉+15%飛灰	LS35F15M

表 3.4-2 混凝土試驗項目

混凝土試驗		規範	試體尺寸	試體數量
新拌	坍度	CNS1176	-	-
	單位重	CNS11151		
	含氣量			
	泌水	CNS1235		
	凝結時間	CNS14220		
	氯離子	CNS13465		
	pH 值	-		
力學	抗壓強度	CNS1232	圓柱 12*24	18
	彈性模數	ASTM C469	圓柱 10*20	6
	劈裂強度	CNS3801		6
耐久性	RCPT	CNS14795		3
	RCM	NT Build 492		
		硫酸鹽侵蝕	CNS 14794	角柱 2.5*2.5*28.5
體積穩定性	乾縮	CNS 14603	角柱 10*10*28.5	3

3.4.2.石灰石水泥搭配不同爐灰比的混凝土配比

探討石灰石水泥搭配爐石取代率、飛灰取代率之影響，包含 100%I型、100%IL、I型+50%爐石粉、IL+50%爐石粉、I型+25%飛灰、IL+25%飛灰、I型+35%爐石粉+15%飛灰、IL+ 35%爐石粉+15%飛灰、I型+35%爐石粉+30%飛

灰、IL+ 35%爐石粉+30%飛灰，並搭配水膠比 0.5，又根據爐石取代率 35%、飛灰取代率 15%，再搭配水膠比 0.4、0.5、0.6，共計 14 組配比，將這些配比於不同齡期 56、90、180、360 天進行 RCM 實驗，「C」代表卜特蘭I型水泥，「L」代表卜特蘭石灰石水泥，「S」代表爐石粉取代，其後數字為取代率，「F」代表飛灰取代，其後數字為取代率，「H」代表水膠比為 0.4，「M」代表水膠比為 0.5，「L」代表水膠比為 0.6。

表 3.4-3 水泥搭配不同礦物摻料之混凝土配比

水泥類別	爐灰比率	水膠比		
		0.4	0.5	0.6
100%I 型	0%		CM	
100%IL			LM	
50%I 型	50%爐石粉		CS50M	
50%IL			LS50M	
75%I 型	25%飛灰		CF25M	
75%IL			LF25M	
50%I 型	35%爐石粉+15%飛灰	CS35F15H	CS35F15M	CS35F15L
50%IL		LS35F15H	LS35F15M	LS35F15L
35%I 型	35%爐石粉+30%飛灰		CS35F30M	
35%IL			LS35F30M	

表 3.4-4 I 型水泥搭配礦物摻料的混凝土詳細配比

	水泥	爐石	飛灰	拌合水	六分石	三分石	砂
CM	370	0	0	185	162	648	983
CF25M	278	0	92	185	162	648	952
CS50M	185	185	0	185	162	648	967
CS35F15H	230	161	69	184	162	648	874
CS35F15M	185	129	56	185	162	648	954
CS35F15L	155	108	47	186	162	648	1006
CS35F30M	130	129	111	185	162	648	939

表 3.4-5 石灰石水泥搭配礦物摻料的混凝土詳細配比

	石灰石水泥	爐石	飛灰	拌合水	六分石	三分石	砂
LM	370	0	0	185	162	648	983
LS50M	185	185	0	185	162	648	967
LF25M	278	0	92	185	162	648	952
LS35F15H	230	161	69	184	162	648	874
LS35F15M	185	129	56	185	162	648	954
LS35F15L	155	108	47	186	162	648	1006
LS35F30M	130	129	111	185	162	648	939

表 3.4-6 混凝土 RCM 試驗項目

混凝土試驗		規範	試體尺寸	試體數量
抗壓強度		CNS1176	圓柱 10*20	12
耐久性	RCM	NT Build 492		6

3.4.3. 添加不同細度石灰石粉的水泥砂漿配比

本節延續本研究群探討在水泥砂漿中添加不同細度石灰石粉對其性能的影響。所採用的材料為標準砂(以重量計)，水膠比為 0.485，考慮石灰石細度的不同的影響，「C」代表卜特蘭I型水泥，「L」代表是有添加石灰石粉的水泥，「4」代表細度 4000 cm²/g，「5」代表細度 5000 cm²/g，「6」代表細度 6000 cm²/g，配比使用兩家公司的水泥，在配比編號前面添加代號 A 和 B，代表兩家公司的水泥，共計 8 個配比，進行硫酸鹽浸泡試驗。

表 3.4-7 水泥添加不同細度石灰石粉的砂漿配比

試驗組別	水泥種類	石灰石粉		水膠比
		細度(cm ² /g)	取代水泥比例	0.485
對照組	卜特蘭 I 型水泥	-	0%	C
實驗組	卜特蘭 I 型水泥 + 石灰石粉	4000	15%	L4
		5000		L5
		6000		L6

3.4.4.石灰石水泥搭配不同爐灰比的水泥砂漿配比

本節延續本研究群探討在水泥砂漿中石灰石水泥添加礦物摻料(爐石和飛灰)對其性能的影響。所採用的材料為標準砂(以重量計)，水膠比為 0.485，「C」代表卜特蘭I型水泥，「L」代表卜特蘭石灰石水泥，「S」代表爐石粉取代，其後數字為取代率，「F」代表飛灰取代，其後數字為取代率，進行硫酸鹽侵蝕試驗。

表 3.4-8 石灰石水泥搭配爐石和飛灰的水泥砂漿配比

水泥類別	爐灰比率	水膠比
		0.485
100%I 型	0%	C
100%IL		L
50%I 型	50%爐石粉	CS50
50%IL		LS50
75%I 型	25%飛灰	CF25
75%IL		LF25
50%I 型	35%爐石粉+15%飛灰	CS35F15
50%IL		LS35F15
35%I 型	35%爐石粉+30%飛灰	CS35F30
35%IL		LS35F30

3.5.新拌混凝土性質試驗

本研究之混凝土新拌性質試驗於預拌混凝土廠進行，並與台灣營建研究院合作完成。試驗過程由研究院主導操作，我負責全程協助，並進行試驗數據之紀錄與後續分析。

為評估新拌混凝土的工作性與品質穩定性，本研究進行多項新拌性質試驗。試驗內容包括坍度試驗以判斷混凝土的流動性，單位重與含氣量試驗用以評估密實程度與拌合均勻性；泌水試驗可觀察混凝土的穩定性與離析傾向；凝結時間測定拌合物從初凝到終凝的過程；此外，亦量測氯離子含量與 pH 值，

以了解其對鋼筋腐蝕與水化反應的影響。各項試驗結果將作為混凝土性能評估與配比調整的重要依據。



3.5.1.混凝土坍度試驗

為比較卜特蘭石灰石水泥與卜特蘭I型水泥同時添加爐石和飛灰在工作度上的差異，以及化學摻料對新拌性質的影響，本研究依據 CNS 1176「混凝土坍度試驗法」進行坍度試驗，試驗步驟如下：

- (1) 將模具潤濕後置於不吸水的濕潤剛性平面上。
- (2) 操作者以雙腳踩住模具底片固定位置，將混凝土分三層填入並各自搗實 25 下，沿螺旋路徑由外向內進行。
- (3) 第一層搗棒需穿透到底，第二與第三層則應插入下層約略貫通。
- (4) 最上層略高於模具後完成搗實，使用搗棒刮除多餘混凝土並清除底部外溢部分。
- (5) 以穩定動作在 5 ± 2 秒內垂直提起模具，立即量測試體中心高度差，即為坍度值。
- (6) 於 40 分鐘後再次量測，評估其坍度損失程度。

3.5.2.混凝土單位重試驗

本研究為評估混凝土拌合物之密實程度與材料均勻性，進行混凝土單位重試驗。試驗依據 CNS 11151「混凝土單位重、拌和體積及含氣量（比重）試驗法」進行，透過量測新拌混凝土於標準容器中之質量與體積，計算其單位重（ kg/m^3 ），並可進一步推估拌和體積與含氣量等指標。此試驗有助於掌握混凝土拌合狀態是否穩定，並作為品質控制與配比驗證的重要依據之一，試驗步驟如下。

1. 將混凝土樣品分三層置入量桶，每層體積大致相同，並以搗棒搗實 25 下。每層完成後，再以木槌輕敲量桶外側 10~15 下，以排除氣泡。
2. 壓實完成後，混凝土應略高出量桶頂緣約 3mm，避免過多或不足。

- 
3. 使用刮板將表面刮平並修整，使混凝土與桶口齊平，表面平整光滑。
 4. 清除量桶外部附著的混凝土，接著量測桶內混凝土的總重量。
 5. 以總重扣除空桶重量，得出混凝土淨質量（kg），再除以量桶體積，即可計算出混凝土單位重（ kg/m^3 ）。

3.5.3.混凝土含氣量試驗

本研究為評估混凝土拌合物之密實程度、材料均勻性與含氣特性，進行混凝土單位重及含氣量試驗。試驗依據 CNS 11151「混凝土單位重、拌和體積及含氣量（比重）試驗法」進行，透過量測新拌混凝土於標準量桶中的質量與體積，計算其單位重（ kg/m^3 ）。

此外，根據理論單位重與實測單位重的差值，可進一步推估拌合物中所含的空氣含量（%）。含氣量為評估混凝土拌合均勻性、保工作性及泌水或離析潛勢的重要指標之一，亦與材料耐久性密切相關。整體試驗結果可作為混凝土品質控制與配比設計修正的重要參考依據，試驗步驟如下。

1. 將混凝土樣品分三層填入量桶，每層搗實 25 下，並敲打桶壁 10~15 次以排除氣泡。
2. 混凝土填滿後表面應齊平，不可過多或不足。
3. 刮平表面後蓋上桶蓋，並注水至溢出為止，再關緊閥門。
4. 透過打氣加壓，待壓力穩定後讀取壓力表，即可得知混凝土的空氣含量（%）。

3.5.4.混凝土泌水試驗

本研究為評估混凝土拌合物的穩定性與離析潛勢，進行混凝土泌水試驗。試驗依據 CNS 1235「混凝土泌水率試驗法」進行，藉由量測混凝土靜置後表面滲出水量，評估其泌水率，反映拌合物中水泥漿與骨材的分離情形。泌水現象若過於嚴重，可能導致混凝土表面強度下降、保水性不良及與後續養護不相容

等問題，因此透過本試驗可作為混凝土可施工性與拌合品質之判定依據，有助於確保混凝土結構的整體性能與耐久性，試驗步驟如下。



1. 試樣鏟平後立即記錄時間，並量測容器與試樣的總重量。
2. 將試樣置於水平平台，避免震動，並加蓋防止泌水蒸發。
3. 除了吸水操作，其餘時間容器均需保持加蓋狀態。
4. 試驗前 40 分鐘，每隔 10 分鐘吸取一次泌水；之後改為每 30 分鐘吸取一次，直到無泌水為止。
5. 將所有時間點的泌水量加總，並換算為占拌合水的百分比，作為泌水率評估依據。

$$C = \left(\frac{w}{W}\right) \times S \quad \text{式 3.5-1}$$

$$\text{泌水}(\%) = \left(\frac{D}{C}\right) \times 100 \quad \text{式 3.5-2}$$

C：試樣內水量（g）、w：每次拌合量之淨水量（kg）、W：每次拌合量之總質量（kg）

S：試樣質量（g）、D：泌水質量（g）

3.5.5.混凝土凝結試驗

本研究為了解混凝土拌合物的凝結行為，進行混凝土凝結時間試驗，依據 CNS 14220「混凝土凝結時間試驗法」進行。該試驗旨在量測混凝土從拌合完成到達初凝與終凝狀態所需之時間，評估其工作時間長短與施工適應性。本試驗可用來評估水泥品種、礦物摻料、化學藥劑等因素對混凝土凝結行為的影響，並作為施工時間控制及調配計畫的重要依據，試驗步驟如下。

1. 於混凝土拌合完成後，立即將新拌混凝土倒入錐形模內，鏟平表面，作為試驗樣品。
2. 自拌合完成起即開始計時，並依時間間隔，使用壓入式測針（如吉爾摩針或維卡針）測量混凝土表面的抗壓能力。

3. 當試針無法深入混凝土一定深度（通常為 25mm）時，即視為達到初凝狀態。
4. 持續量測至試針無法插入表面，僅留輕微壓痕時，則視為終凝完成。
5. 將各時間點記錄下來，即可獲得初凝與終凝時間。



3.5.6.混凝土氯離子含量試驗

本研究為評估混凝土中氯離子對鋼筋腐蝕風險之潛在影響，進行新拌混凝土中水溶性氯離子含量試驗。試驗依據 CNS 13465「新拌混凝土中水溶性氯離子含量試驗法」進行，並採用氯離子含量測定器（chloride meter）進行快速分析。本試驗可作為混凝土材料進場檢驗與品質管控的重要指標，有助於確保混凝土中氯離子含量符合標準規範，預防鋼筋鏽蝕並提升結構耐久性。

試驗過程中，取適量新拌混凝土樣品，經過拌勻、過濾或離心處理後取得濾液，將其注入測定儀器中進行檢測。儀器會自動分析其中的水溶性氯離子濃度，並以重量百分比（%）或 mg/kg 為單位顯示。

3.5.7.混凝土 pH 值

本研究為了解新拌混凝土的鹼性環境，進行其 pH 值測量。試驗過程中，取適量新拌混凝土漿體，利用 pH 計進行直接檢測，藉以掌握拌合物中的鹼性程度，並評估其對水泥水化反應及鋼筋保護能力的潛在影響。

3.6.力學性質試驗

本研究進行混凝土之力學性質試驗，旨在評估其不同齡期下的結構性能與應力承受能力，作為材料設計與工程應用的重要依據。試驗內容包含抗壓強度、劈裂抗張強度及彈性模數三項，分別反映混凝土在受壓、受張及受載變形等不同力學行為的表現。透過各項測試結果，可全面掌握材料強度發展趨勢與力學反應特性，並提供後續耐久性評估與配比優化之參考依據。

1. **抗壓強度試驗**：評估混凝土在軸向受壓下的承載能力。
2. **劈裂抗張強度試驗**：模擬混凝土受張時的破壞行為。
3. **彈性模數試驗**：量測混凝土在受壓變形過程中的彈性回復能力，反映其剛性與變形。

3.6.1.抗壓強度試驗

本研究之混凝土抗壓強度試驗依據 CNS 1232「混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法」進行，並與台灣營建研究院合作完成。所有試體皆為直徑 12 cm、高度 24 cm 的圓柱體，針對各齡期分別製作三到六個試體，取其平均值作為該齡期之抗壓強度。為確保壓力施加均勻，試驗前先以石膏將試體頂面與底面蓋平，避免因表面不平整造成局部應力集中。正式試驗以單軸抗壓機進行，並控制加載速率為每秒 3.0 kg/cm²，確保試驗數據穩定可靠，試驗步驟如下。

1. 製作圓柱試體（直徑 12 cm × 高度 24 cm），各齡期製作 3-6 支試體。
2. 養護至指定齡期後，取出試體進行試驗。
3. 使用石膏將試體兩端蓋平，以確保受壓面平整。
4. 將試體置於抗壓機中，調整位置確保受力均勻。
5. 以每秒 3.0 kg/cm² 之加載速率進行單軸抗壓試驗。
6. 紀錄破壞荷重，計算抗壓強度，並取 3-6 支試體平均值作為該齡期之強度結果。

本研究之水泥砂漿抗壓強度試驗依據 CNS 1010「水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法」進行。試體採用邊長 50 mm 的立方體，每一齡期分別製作三至六顆立方體試體，並取其平均值作為該齡期之抗壓強度結果。

試驗前，需將試體表面多餘水分擦乾，並清除與壓盤接觸面上的附著砂粒，以確保受壓面平整，有助於準確施力並避免應力集中，確保試驗結果之準確性與重現性，試驗步驟如下。

1. 製作 50 mm × 50 mm × 50 mm 的立方體試體。
2. 各齡期分別準備三到六顆試體，作為平均抗壓強度依據。
3. 試驗前用乾布擦乾試體表面水分。
4. 清除試體上下兩端與壓盤接觸面之附著砂粒，確保接觸面平整。
5. 將試體置入壓縮機中，進行單軸抗壓試驗。
6. 紀錄破壞荷重，計算強度，取三到六顆試體平均值為代表結果。

抗壓強度的計算公式，如

式 3.6-1 所示

$$\sigma = \frac{P}{\pi r^2} \quad \text{式 3.6-1}$$

σ ：混凝土抗壓強度 (kgf/cm²)

P：破壞時施加之最大載重 (kgf)

r：試體半徑 (cm)

3.6.2. 劈裂抗張強度試驗

本研究依據 CNS 3801「混凝土圓柱試體劈裂抗張強度試驗法」進行劈裂強度試驗，並與台灣營建研究院合作完成，由我進行後續數據統整與分析。試體尺寸採用直徑 10 公分、高度 20 公分之圓柱體，各齡期製作三顆試體，取其平均值作為劈裂抗張強度結果，強度計算式如下，藉此評估材料之抗張性能與內部結構品質，試驗步驟如下。

1. 製作圓柱 10 cm × 20 cm 試體，各齡期三到六支。

2. 施力方向沿圓柱側面水平加壓。
3. 紀錄破裂荷重，計算劈裂強度。
4. 平均三支試體數值作為結果。
5. 依據試驗結果進行分析與比較。



$$T = 2P / \pi Ld$$

式 3.6-2

T：抗張劈裂強度 (kgf/cm²)、P：最大載重 (kgf)

L：試體長度 (cm)、d：試體直徑 (cm)

3.6.3.彈性模數試驗

本研究與台灣營建研究院合作完成，後續由我進行資料分析。依據 ASTM C469「Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression」進行彈性模數試驗，試體採用直徑 10 cm、高度 20 cm 的圓柱體，各齡期製作三支試體，取其平均值作為該齡期之彈性模數結果，為評估混凝土材料在受壓狀態下的變形行為與彈性回復能力，試驗步驟如下。

1. 製作 10 cm × 20 cm 之圓柱試體，各齡期三支作為代表。
2. 試體兩端以端面研磨機磨平，確保受壓面平整、施力均勻。
3. 在試體中央裝設應變計或應變環，以量測壓縮變形。
4. 將試體置於抗壓試驗機，依規範施加载重，並同步記錄應力與應變資料。
5. 繪製應力—應變曲線，取其線性區段斜率，作為彈性模數 (Modulus of Elasticity)。
6. 將三支試體的彈性模數取平均，作為該齡期代表值，供本研究進行後續分析與比較。

3.7.耐久性試驗

為評估混凝土在長期服役環境下的抗劣化能力，本研究進行三項耐久性試驗，包括快速氯離子傳輸試驗（RCM）、快速氯離子滲透試驗（RCPT）與硫酸鹽浸泡試驗，分別用以檢測材料對氯離子滲透與硫酸鹽侵蝕的抵抗性能。試驗結果可作為評估混凝土耐久性與材料選用的重要依據，並輔助配比優化與工程應用設計。

3.7.1.快速氯離子傳輸試驗(RCM)

試驗標準：依據 NT Build 492 進行，分為三階段：試樣前處理、真空處理、電化學加速試驗，並搭配硝酸銀比色法量測氯離子侵入深度。本研究與台灣營建研究院合作完成，由我進行後續數據統整與分析。

I. 試樣前處理

- (1) 當圓柱試體（10 cm × 20cm）達指定齡期後，使用濕式切割機切割為 10 cm × 5 cm 試樣。
- (2) 固定中間切面為氯離子侵入面。
- (3) 試樣周圍塗佈環氧樹脂防滲，靜置 24 小時使其硬化。
- (4) 試樣兩端以砂輪拋光，清除多餘環氧層。

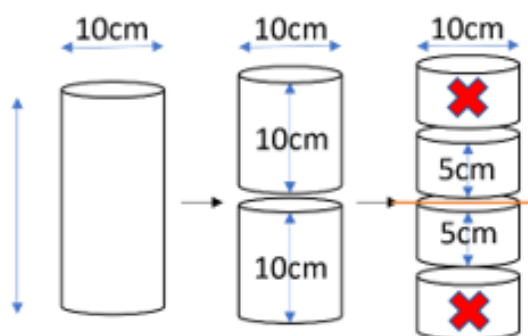


圖 3.7-1 RCM 試樣之切割

II. 真空處理（經過海洋大學楊仲家老師研究團隊改良過後）

- (1) 乾抽：3 torr 真空壓力下抽氣 1 小時。
- (2) 濕抽：加入飽和氫氧化鈣（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）溶液抽氣 1 小時。

(3) 浸泡：再將試樣浸入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中 18 ± 2 小時。

圖



III. 電化學加速試驗

- (1) 將試樣纏上絕緣膠帶，裝入矽膠套環，放入壓克力底座，固定方向陰極朝上、陽極朝下。
- (2) 陰極槽加 10% NaCl，陽極槽加 0.3N NaOH，通以直流電壓（初始 30V），依據初始電流參考電流表決定測試條件。
- (3) 試驗期間記錄電流與溫度變化，觀察是否穩定。
- (4) 試驗完成後，試樣與電極以去離子水清潔。

表 3.7-1 正常膠結材含量混凝土試體之測試電壓與試驗時間對照表

Initial current (with 30 V) (mA)	Applied voltage U (after adjustment) (V)	Possible new initial current I_0 (mA)	Test duration t (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

IV. 氯離子侵入深度測定：硝酸銀比色法

- (1) 試樣以劈裂方式斷開，將斷面噴灑 0.1N 硝酸銀溶液，靜置 30 分鐘
- (2) 反應區域會變色，標記邊界並量測每面 7 點，共 14 點深度

(3) 取其平均作為氯離子平均侵入深度

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{(U - 2)}} \right)$$

D_{nssm} 為氯離子傳輸係數($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)、 T 為試驗溫度($^{\circ}\text{C}$)、 L 為試體厚度(mm)、 U 為施加電壓(V)、 x_d 為傳輸深度(mm)。

3.7.2.快速氯離子滲透試驗(RCPT)

快速氯離子滲透試驗 (Rapid Chloride Penetration Test, RCPT) 為一種以電化學原理為基礎的加速試驗方法，用以評估水泥基材料對外界氯離子侵入的抵抗能力，屬於耐久性評估的重要快速指標。本研究採用 CNS 14795 A3395「混凝土抗氯離子穿透能力試驗法—通過電荷量表示法」作為試驗依據。

1. 製作直徑 10 cm、厚度 5 cm 之混凝土圓盤試體。
2. 試體置入真空設備抽氣，除去內部空氣。再注入水，使試體完全飽水。
完成後靜置於水中 18 ± 2 小時。
3. 裝置將飽水試體夾於電極槽中央。一側電極槽加入 0.3N 氫氧化鈉 (NaOH) 溶液。另一側加入 3% 氯化鈉 (NaCl) 溶液。
4. 施加 60V 直流電壓，通電持續 6 小時。每隔時間紀錄電流值，並計算總通電電荷量 (庫侖, Coulombs)。
5. 以通過電荷總量作為混凝土抗氯離子穿透能力之指標 (數值越低，抗氯性能越佳)。

表 3.7-2 CNS 14795 建議評估值

通過電荷量(C)	氯離子穿透性
>4,000	高
2,000~4,000	中

1,000~2,000	低
100~1,000	甚低
<100	可忽略

3.7.3. 硫酸鹽浸泡試驗-長度變化

本研究依據 CNS 14794「水硬性水泥砂漿棒暴露於硫酸鹽溶液中之長度變化試驗法」，進行混凝土角柱 10*10*28.5 cm 試體之硫酸鹽侵蝕試驗。試體在養護 28 天後開始進行浸泡，由台灣營建研究院執行試驗，並由我進行後續數據分析，試驗步驟如下。

1. 將混凝土角柱試體養護 28 天後取出作為測試對象。
2. 配製硫酸鹽溶液：將 50.0g Na₂SO₄ 溶於 900 mL 去離子水中，再稀釋至 1.0L。
3. 量測並確認溶液 pH 值應介於 6.0~8.0，若超出範圍則需更換溶液。
4. 將試體浸入硫酸鹽溶液中，放置於穩定環境下進行侵蝕。
5. 使用精密測長儀定期量測試體長度，觀察其膨脹行為與長度變化。

$$\Delta L(\%) = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100(\%) \quad \text{式 3.7-1}$$

L_x ：試體在 x 齡期時，由精密測長儀所讀得長度值

L_i ：試體之初始長度（精密測長儀初始值）

L_g ：試體的有效標距（標稱量測長度）



圖 3.7-2 長度變化儀器和量測

3.7.4. 硫酸鹽浸泡試驗-重量變化

硫酸鹽重量變化試驗主要用來評估砂漿在硫酸鹽侵蝕環境中之耐久性表現。透過將試體長期浸泡於不同濃度的硫酸鈉 (Na_2SO_4) 溶液中，並定期量測其重量變化，可觀察材料因膨脹、劣化、表面剝落或裂解所導致的質量增減情形。

此試驗可作為判斷材料在硫酸鹽環境中之穩定性與抗劣化能力的重要依據，常與外觀變化、長度變化試驗一同搭配分析，本實驗在台大進行實驗和數據分析，試驗步驟如下。

1. 製作立方體 $5*5*5$ cm 的砂漿。
2. 濃度分為三種組別：50 g/L (定期更換) 200 g/L (分為「更換」與「不更換」兩種條件)，取 50 g 和 200 g 之 Na_2SO_4 溶於 900 mL 蒸餾水或去離子水中，再稀釋至 1.0 L 完整配置體積。
3. 定期目視觀察試體表面與外觀變化 (是否劣化、裂縫、變色等)。
4. 量測試體重量變化，評估溶液侵蝕對試體膨脹或損耗的影響。

(1) 初始乾燥並秤重 (W_0)



一、試體經表面擦乾後用精密電子天平秤重

(2) 定期取出擦乾並秤重 (W_x)

一、測試頻率：360 天前都是兩周量一次，360 天後一個月量一次

二、計算重量變化率，如 $\Delta W(\%) = \frac{W_x - W_i}{W_i} \times 100(\%)$ 式

3.7-2

$$\Delta W(\%) = \frac{W_x - W_i}{W_i} \times 100(\%) \quad \text{式 3.7-2}$$

W_x ：試體在 x 齡期時，由磅秤所讀得重量值

W_i ：試體之初始重量（初始值）

3.7.5.乾燥收縮

評估混凝土或砂漿在乾燥環境下水分蒸發造成體積收縮的行為，判斷其體積穩定性與裂縫潛勢，由台灣營建研究院執行試驗，並由我進行後續數據分析，試驗步驟如下。

1. 製作砂漿棒 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 285 \text{ mm}$
2. 使用精密測長儀，測定初始長度 (L_0)
3. 乾燥暴露養護條件： $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ， $50 \pm 4\% \text{ RH}$ （相對濕度）
4. 定期量測長度 (L_x)，測量頻率：3 天、7 天、14 天、28 天、56 天……最長可至 180 天以上測量前擦拭表面水分，避免誤差

5. 計算乾縮率，如 $\Delta L(\%) = \frac{L_x - L_0}{L_0} \times 100\%$ 式 3.7-3

$$\Delta L(\%) = \frac{L_x - L_0}{L_0} \times 100(\%) \quad \text{式 3.7-3}$$

L_x ：試體在 x 齡期時，由精密測長儀所讀得長度值

L_0 ：試體之初始長度（初始值）

第四章、分析結果與討論

本研究探討石灰石水泥混凝土與水泥砂漿中摻入爐灰材料（爐石與飛灰）對其新拌性質、力學性能與耐久性的影響。首先針對添加固定爐灰比之混凝土，進行新拌性質、抗壓強度與 RCM 試驗等評估。進一步比較不同爐灰取代率對混凝土抗壓與氯離子遷移行為之影響。水泥砂漿部分，則以硫酸鹽浸泡試驗，探討不同細度石灰石粉及不同爐灰取代率對抗硫酸鹽侵蝕能力之影響。綜合試驗結果，評估石灰石與爐灰之協同效應，並提出石灰石水泥材料於實務工程中兼顧環保與耐久性的應用建議。

4.1.石灰石水泥添加固定爐灰比的混凝土

本章針對水膠比 0.5 且爐灰總取代率為 50%（35%爐石粉 + 15%飛灰）之混凝土進行性能評估，選用 I 型水泥與 II 類石灰石水泥兩種，對應配比代號為 CS35F15M 與 LS35F15M，並依據四間公司提供材料進行對比研究。試驗內容涵蓋新拌性質、力學性質及耐久性能等三個面向，詳細說明如下：

4.1.1.新拌性質試驗結果

新拌性質部分包含以下試驗項目：坍度、單位重、含氣量、泌水率、初凝與終凝時間、氯離子濃度及混凝土拌合液 pH 值等。此等指標用以評估不同水泥類型對工作度與初期反應環境之影響。

本研究針對石灰石水泥與不同爐灰配比之混凝土進行新拌性質試驗，評估項目包括坍度、單位重、含氣量、泌水率、凝結時間、氯離子濃度與拌合液 pH 值等。坍度反映混凝土的工作性與施工適應性，單位重則可評估拌合物的密實程度，進而影響後續的力學與耐久性能。適當的含氣量有助於提升混凝土的抗凍融性能，但過高則會降低強度；而泌水率的高低則會影響表面品質與裂縫風險。凝結時間的長短與施工作業與養護時間安排息息相關，氯離子濃度過高則可能對鋼筋腐蝕造成潛在風險。此外，混凝土拌合液的 pH 值反映其鹼性環境，對鋼筋的鈍化保護層形成具重要影響。透過上述多項指標之整合分析，可

有效掌握不同水泥與爐灰系統對新拌混凝土性能的影響，為後續耐久性與工程應用提供基礎依據。

本研究針對水膠比 0.5、爐石粉 35% 與飛灰 15% 的混凝土配比進行新拌性質測試，探討不同公司與水泥類型對工作性與拌合品質之影響。

表 4.1-1 石灰石水泥+固定爐灰比新拌性質數據

配比名稱	坍度(cm)		氯離子濃度	單位重	含氣量	pH	溫度	泌水
	0 分	40 分	kg/m ³	kg/m ³	%			
ACS35F15	21	20.5	0.024	2317	1.4	12.2	24	4.81%
ALS35F15	22	21	0.027	2331	1.4	12.2	23	3.78%
BCS35F15	23	23	0.008	2350	1.3	12.66	17	17.42%
BLS35F15	23	23	0.009	2351	1.3	12.5	17.5	17.08%
CCS35F15	24	23.5	0.013	2335	1.9	12.97	18.8	3.98%
CLS35F15	23.5	22.5	0.015	2330.9	1.5	13.12	19.1	4.27%
DCS35F15	19.0	15.0	0.066	2350	1.4	12.2	18.5	11.9%
DLS35F15	21.5	18.5	0.045	2354	1.3	12.2	18.5	10.4%

表 4.1-2 石灰石水泥+固定爐灰比初終凝時間

配比名稱	凝結時間(hr)	
	初凝	終凝
ACS35F15	8	11.12
ALS35F15	8.4	10.19
BCS35F15	10.67	13.89
BLS35F15	11.01	15.68
BLS35F15(23)	10.59	14.65
CCS35F15	6.93	8.56
CLS35F15	7.63	9.64
DCS35F15	9.1	11.9
DLS35F15	10	13.6



在凝結時間方面，在 A 公司中，石灰石組（ALS35F15）初凝時間略晚（8.4 小時）但終凝時間明顯提前（10.19 小時），相較於控制組（ACS35F15）終凝為 11.12 小時，顯示石灰石在此系統中有助於縮短凝結歷程，加速系統反應，可能與其提供額外晶核促進水化產物形成有關。B 公司石灰石組（BLS35F15）無論在初凝（11.01 小時）或終凝（15.68 小時）均明顯晚於控制組（初凝 10.67 小時，終凝 13.89 小時），顯示石灰石延緩整體凝結進程，特別是終凝時間增加顯著，可能因為石灰石影響水泥與飛灰間的早期反應或和膠體結構發展有關。C 公司石灰石組（CLS35F15）初凝與終凝時間亦稍微延後（分別為 7.63 與 9.64 小時），與控制組（6.93 與 8.56 小時）相比，差距雖小，但呈現一致的延遲趨勢。整體仍屬快速凝結系統，表示石灰石對凝結影響有限，屬於溫和的緩和效果。D 公司石灰石組（DLS35F15）初凝與終凝時間皆延後，從控制組的 9.10 與 11.90 小時增加至 10.00 與 13.60 小時，顯示石灰石使整體凝結反應放緩，延長漿體由可流動轉變為硬化的時間，可能與水化抑制或反應推遲機制有關。

總結而言，石灰石水泥在適當條件下可縮短終凝時間，降低工程等待時間，並藉由配合劑調整其早期反應性與工作時間，展現良好的施工實用性與調控潛力，是推動綠色建材應用的重要特性之一。

4.1.2.力學性質試驗結果

A. 抗壓強度

以下為四家公司的抗壓強度數據，本試驗針對配比中爐石取代率為 35%、飛灰取代率為 15% 的混凝土，分別以一般卜特蘭 I 型水泥（CS35F15）與石灰石水泥（LS35F15）為膠結材料，進行各齡期之抗壓強度試驗，以探討兩種水泥類型在相同礦物摻料條件下對力學性能之影響。

表 4.1-3 A 公司的石灰石水泥抗壓強度

配比	齡期(天)	抗壓強度(kgf/cm ²)			
		1	2	3	平均
ACS35F15	3	134.0	137.0	139.0	136.7
	7	239.0	239.0	232.0	236.7
	28	443.7	456.8	426.9	442.5
	56	543.0	511.8	545.5	533.4
	91	600.2	612.9	597.5	603.5
	180	611.3	631.9	625.5	622.9
ALS35F15	3	189.0	195.0	195.0	193.0
	7	337.0	347.0	342.0	342.0
	28	492.8	496.1	507.6	498.8
	56	578.9	570.6	602.1	583.9
	91	586.8	571.6	622.6	593.6
	180	686.3	679.9	649.6	671.9

表 4.1-4 AC 和 AL 的抗壓強度比

抗壓強度比	3	7	28	56	91	180
ALS35F15/ACS35F15	1.412	1.445	1.127	1.095	0.984	1.079

表 4.1-5 B 公司的石灰石水泥抗壓強度

配比	齡期(天)	抗壓強度(kgf/cm ²)			
		1	2	3	平均
BCS35F15	3	157.0	166.0	170.0	164.3
	7	280.0	281.0	292.0	284.3
	28	548.0	558.0	566.0	557.3
	56	679.0	719.0	723.0	707.0
	91	763.0	732.0	757.0	750.7
	180	806.0	822.0	824.0	817.3
BLS35F15	3	163.0	161.0	164.0	162.7
	7	306.0	308.0	315.0	309.7
	28	542.0	535.0	525.0	534.0
	56	614.0	628.0	600.0	614.0

	91	648.0	656.0	671.0	658.3
	180	694.0	697.0	685.0	692.0

表 4.1-6 BL/BC 的抗壓強度比

抗壓強度比	3	7	28	56	91	180
BLS35F15/BCS35F15	0.990	1.089	0.958	0.868	0.877	0.810

表 4.1-7 C 公司的石灰石水泥抗壓強度

配比	齡期(天)	抗壓強度(kgf/cm ²)			
		1	2	3	平均
CCS35F15	3	161	160	163	161
	7	290	300	294	295
	28	512	505	551	523
	56	628	605	612	615
	91	696	701	649	682
	180	752	732	778	754
CLS35F15	3	204	202	207	204
	7	351	343	352	349
	28	504	553	515	524
	56	616	596	613	608
	91	692	705	681	693
	180	728	716	743	729.0

表 4.1-8 CL/CC 的抗壓強度比

抗壓強度比	3	7	28	56	91	180
CLS35F15/CCS35F15	1.267	1.183	1.003	0.989	1.016	0.967

表 4.1-9 D 公司的石灰石水泥抗壓強度

配比	齡期(天)	抗壓強度(kgf/cm ²)			
		1	2	3	平均
DCS35F15	3	191.0	184.0	179.0	184.7
	7	357.0	367.0	371.0	365.0
	28	562.0	575.0	577.0	571.3
	56	567.0	552.0	598.0	572.3
	91	627.0	627.0	616.0	623.3

	180	632.0	632.0	636.0	633.3
DLS35F15	3	212.0	216.0	216.0	214.7
	7	376.0	378.0	392.0	382.0
	28	571.0	584.0	575.0	576.7
	56	586.0	611.0	587.0	594.7
	91	635.0	647.0	630.0	637.3
	180	646.0	628.0	654.0	642.6

表 4.1-10 DL/DC 的抗壓強度比

抗壓強度比	3	7	28	56	91	180
DLS35F15/DCS35F15	1.162	1.047	1.009	1.039	1.022	1.014

由圖 4.1-1 至圖 4.1-4 可見，四家公司之混凝土配比在不同齡期（3 至 180 天）皆呈現穩定增強之抗壓強度趨勢。大多數組別於 28 天後即進入強度成長高原期，至 91 天或 180 天時強度接近飽和。部分公司（如 A 與 B）呈現早期強度差異顯著、後期收斂的現象，而另一些公司（如 D 公司）則從早期至長齡期皆維持相近表現。此外，在 B 公司與 C 公司中可見普通水泥（C）於後期強度略優於石灰石水泥（L），但差異並不一致，顯示其表現與配比與原材料條件密切相關。

整體而言，石灰石水泥（LS）在早期齡期（3~7 天）普遍展現良好之促進效益，特別是在 A 公司中 ALS35F15 組於 3 天即達 190 kgf/cm²，顯著高於對照組，顯示其具備成核促進作用，能加速初期水化反應。然至中長期齡期（56~180 天），石灰石效益表現不一，C 與 D 公司之 L 組與 C 組幾乎重疊，說明石灰石水泥於後期強度發展之影響較為中性；在 B 公司中甚至略遜於 C 組，可能與材料反應性與填充效應飽和有關係。因此，石灰石水泥對早期強度具潛在助益，但長齡期表現仍依原料細度與反應協同性而異。

所有配比皆採用 S35F15（三元膠材系統，即爐石 35% 與飛灰 15%）條件，從數據可觀察到齡期內強度皆有穩定提升，顯示爐石與飛灰對於水泥系統的長期貢獻。爐石具潛在卜作嵐活性，能在中後期持續生成 C-S-H 凝膠，有助於填補孔隙、提升結構密實性；飛灰則在高 pH 環境中逐漸反應，促進二次水化並細

化微結構。本研究結果顯示，三元系統在各公司下皆能提供穩定之長期強度基礎，即便石灰石水泥初期略高或略低，最終強度仍可維持於 600 kgf/cm² 以上水準，具備實用與環保兼顧之應用潛力。

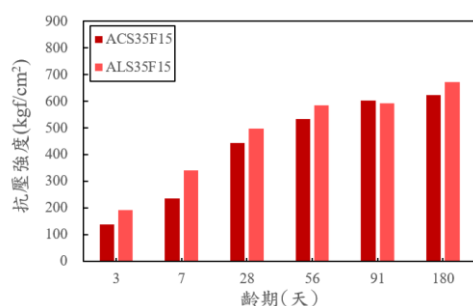


圖 4.1-1 A 公司抗壓強度曲線(一般時間)

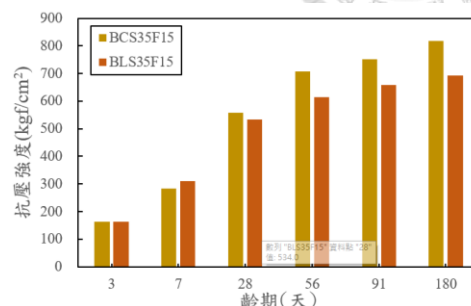


圖 4.1-2 B 公司抗壓強度曲線(一般時間)

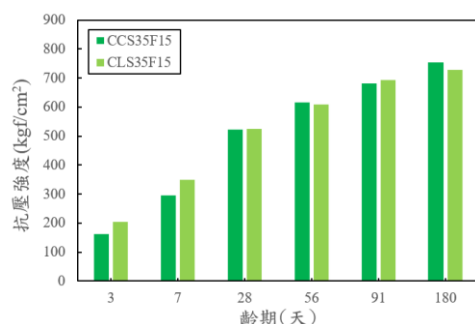


圖 4.1-3 C 公司抗壓強度曲線(一般時間)

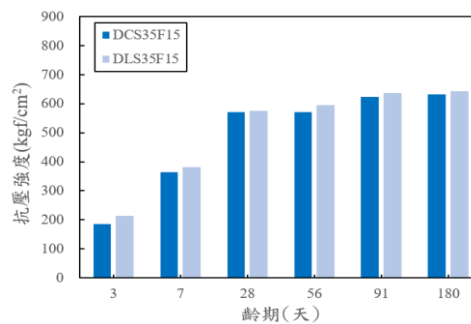


圖 4.1-4 D 公司抗壓強度曲線(一般時間)

圖 4.1-5 至圖 4.1-8 呈現 A 至 D 四家公司之混凝土於對數時間尺度下的抗壓強度變化。由圖可見，所有配比（LS35F15 與對照組 CS35F15）皆顯示出早期強度快速增長、後期趨於穩定的典型水泥硬化特徵。對數時間尺度有助於明顯呈現初期水化階段（齡期 < 10 天）強度急速上升的趨勢。整體來看，不同公司間強度最終可達 600~750 kgf/cm²，其中 A 公司與 C 公司於 28 天後成長曲線接近直線，而 B 公司與 D 公司則在 91 天以後增長幅度趨緩，呈現強度飽和現象。

以四組對比資料觀察，石灰石水泥（L 組）在早期齡期大多展現與 C 組相近甚至略優之強度，顯示其促進早期水化作用具有一定成效。如圖 4.1-5 中 ALS35F15 組於初期強度高於 ACS35F15，表現出良好之早強性；而在圖 4.1-6 中，BLS35F15 與對照組於初期接近，但中後期（對數齡期 > 1.5）則由

BCS35F15 超越，顯示石灰石效果有限或受稀釋效應影響。C 與 D 公司（圖 4.1-7、4.1-8）則呈現 L 組與 C 組幾乎重疊之趨勢，表示石灰石水泥在這些材料與配比條件下並未顯著改變抗壓強度發展。整體而言，石灰石水泥對早期強度具正面影響，但中長期效益則具系統依賴性。

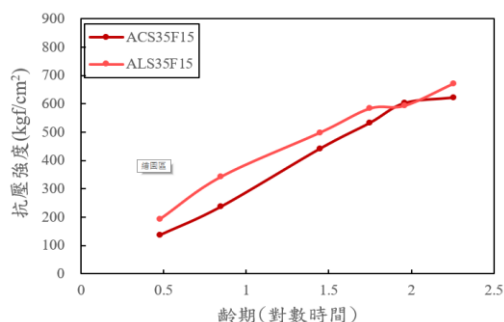


圖 4.1-5 A 公司抗壓強度曲線(對數時間)

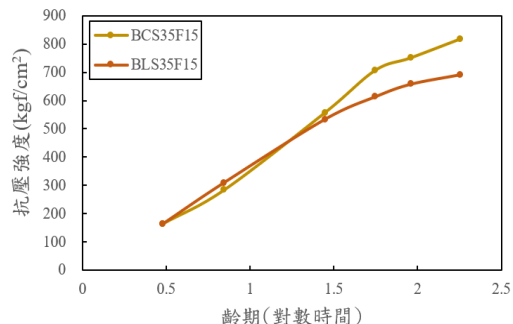


圖 4.1-6 B 公司抗壓強度曲線(對數時間)

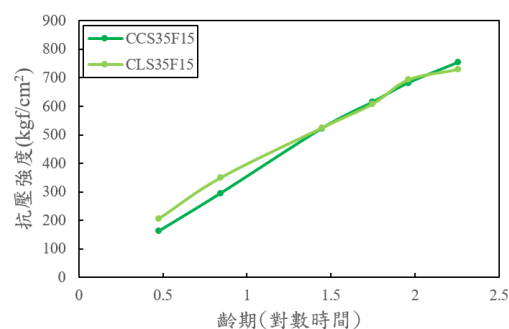


圖 4.1-7 C 公司抗壓強度曲線(對數時間)

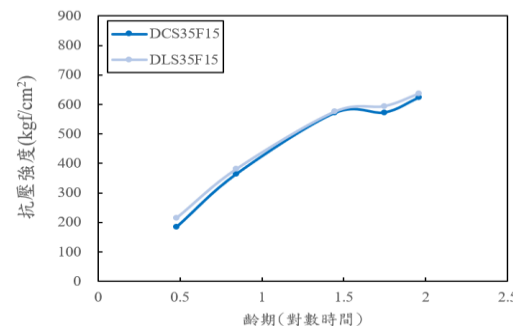


圖 4.1-8 D 公司抗壓強度曲線(對數時間)

圖 4.1-9 至圖 4.1-12 分別顯示 A 至 D 公司石灰石水泥 (L 組) 與普通水泥 (C 組) 之抗壓強度比 (L/C) 隨齡期變化情形。整體而言，四家公司在 3 天齡期時 L 組普遍高於 C 組，L/C 比值皆大於 1，顯示早期石灰石水泥具一定強度優勢。然後至 28 天以後，各公司趨勢分歧：A 公司呈現先降後升，B 公司則呈持續下降趨勢，C 與 D 公司則大致穩定於 0.97~1.05 間。這顯示石灰石水泥於不同系統下其長齡期表現具有差異性，與原材料、拌製方式或養護條件可能相關。

從強度比可更清楚觀察石灰石水泥的相對效益。A 公司（圖 4.1-9）於早期（3 天）達最高值 1.45，反映成核與填充效應可顯著提升早期強度，惟中期（91 天）降至最低 0.98，顯示後期稀釋效應可能主導整體表現。B 公司（圖

4.1-10) L/C 比值隨時間遞減，180 天已降至 0.81，說明石灰石在該系統下對中後期強度反而產生不利影響。相比之下，C 公司（圖 4.1-11）早期雖有高點（1.27），但後期回穩於 0.97~1.02 間，D 公司（圖 4.1-12）更於整個齡期維持接近 1.0 的水準，顯示石灰石水泥與普通水泥在該系統下效能相當，屬中性反應系統。

本試驗中所有組別均為 S35F15 配比，即爐石 35% 與飛灰 15%。該三元系統理論上應具補償石灰石稀釋效應、提升中長期強度之效果。從數據觀察，C 與 D 公司之強度比曲線穩定，顯示三元摻料確實有助於維持石灰石水泥與普通水泥之強度平衡。然在 A 與 B 公司中，爐石與飛灰未能完全彌補石灰石稀釋效應，尤其 B 公司仍呈現顯著下降，推測可能與爐石活性、飛灰延遲反應性或界面反應條件有關。因此，雖三元系統具潛力，但其實際強度表現仍受材料與系統條件高度影響，應依各廠實際配方進行優化調整。

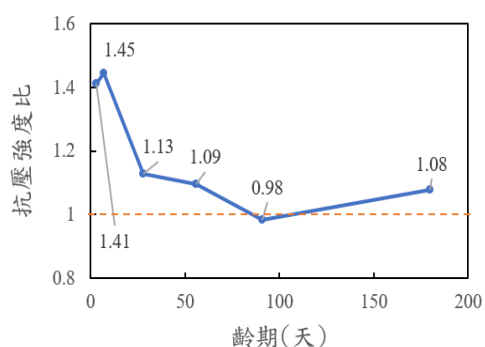


圖 4.1-9 A 公司的抗壓強度比

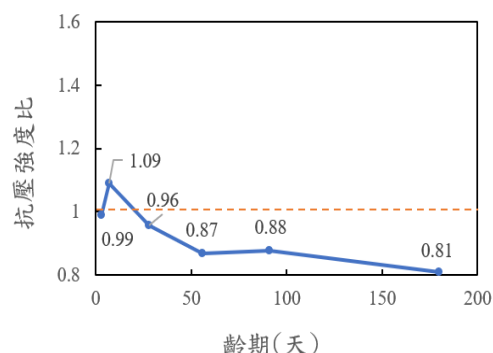


圖 4.1-10 B 公司的抗壓強度比

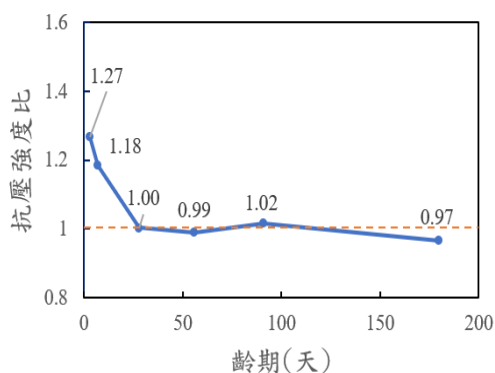


圖 4.1-11 C 公司的抗壓強度比

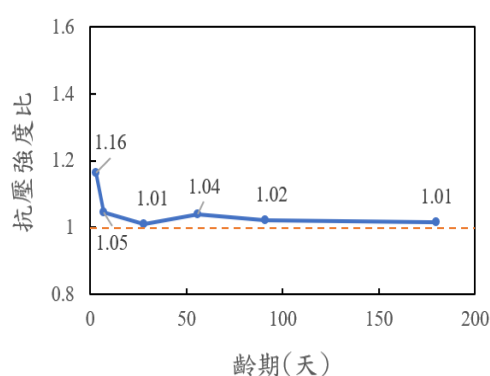


圖 4.1-12 D 公司的抗壓強度比

B. 劈裂強度

表 4.1-11 A 公司的石灰石水泥劈裂強度

配比	齡期(天)	劈裂強度(kgf/cm ²)			
		1	2	3	平均
ACS35F15	28	36.01	34.98	37.05	36.01
	56	37.33	36.21	40.80	38.12
ALS35F15	28	38.34	36.21	36.77	37.11
	56	38.82	40.95	42.75	40.84

表 4.1-12 B 公司的石灰石水泥劈裂強度

配比	齡期(天)	劈裂強度(kgf/cm ²)			
		1	2	3	平均
BCS35F15	28	39.35	42.50	41.20	41.02
	56	47.30	45.44	48.98	47.24
BLS35F15	28	47.80	49.86	45.14	47.60
	56	52.50	55.82	49.54	52.62

表 4.1-13 C 公司的石灰石水泥劈裂強度

配比	齡期(天)	劈裂強度(kgf/cm ²)			
		1	2	3	平均
CCS35F15	28	38.32	36.11	37.70	37.38
	56	42.67	43.00	43.33	43.00
CLS35F15	28	38.67	40.20	37.50	38.79
	56	42.88	46.53	44.70	44.70

表 4.1-14 D 公司的石灰石水泥劈裂強度

配比	齡期(天)	劈裂強度(kgf/cm ²)			
		1	2	3	平均
DCS35F15	28	47.19	48.24	50.21	48.55
	56	50.18	49.00	49.80	49.66
DLS35F15	28	46.82	48.31	47.18	47.44
	56	48.30	47.50	46.20	47.33

從圖 4.1-13 - 4.1-16 中可見，四家公司於 28 與 56 天齡期進行劈裂抗拉強度測試，整體強度分布介於約 36 至 53 kgf/cm² 之間。除 D 公司外，其餘三家公司皆顯示 56 天強度高於 28 天，呈現齡期增長與劈裂強度同步提升的趨勢。B 公司表現最為突出，BLS35F15 組於 28 天與 56 天分別達 47.6 與 52.62 kgf/cm²，優於對照組，顯示其在拉力傳遞與微裂縫控制上具有優勢。而 D 公司之 LS 組則於 56 天略低於 C 組，顯示可能受材料反應性或內部結構影響，造成長期拉力表現差異。

石灰石水泥（L 組）整體於早期與中期齡期的劈裂強度表現多優於或近似對照組。以 A 公司為例，ALS35F15 在 28 與 56 天皆略高於 ACS35F15，提升幅度分別為約 1.1 kgf/cm² 與 2.7 kgf/cm²，顯示石灰石成核與孔隙細化效益對劈裂強度有所貢獻。C 公司亦展現 CLS35F15 優於 CCS35F15 的穩定性，而 D 公司則略為相反，DLS35F15 於兩齡期皆略低，可能因拌和程序或材料均勻性等非化學性因素導致。總體而言，石灰石水泥在劈裂強度表現上具潛在助益，但受系統條件影響明顯，並非一致提升。

本研究採用爐石 35% 與飛灰 15% 之三元系統（S35F15）配比，其在劈裂強度發展中展現良好表現。爐石水化反應可持續產出 C-S-H 膠體，填補骨材間孔隙、強化微結構，飛灰則可促進界面區緻密化，有助於提升抗拉應力傳遞效率。以 B 公司為例，其 LS 組在兩齡期皆明顯優於 CS 組，顯示三元材料在該系統下與石灰石呈現協同效應；相對地，D 公司雖同為三元系統，但未能明顯提升劈裂強度，顯示摻料與石灰石間的效應具有系統依賴性。整體而言，石灰石配合爐石與飛灰在大多數案例下可維持甚至提升劈裂強度，具工程應用潛力。

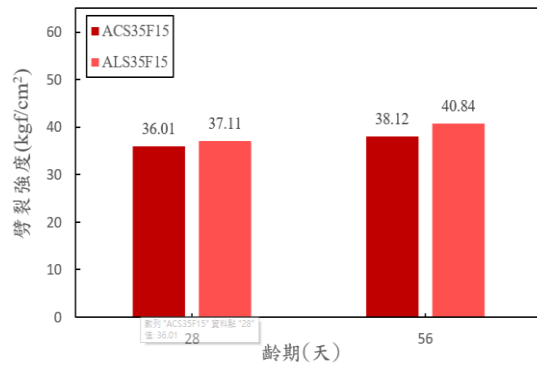


圖 4.1-13 A 公司的石灰石水泥劈裂強度

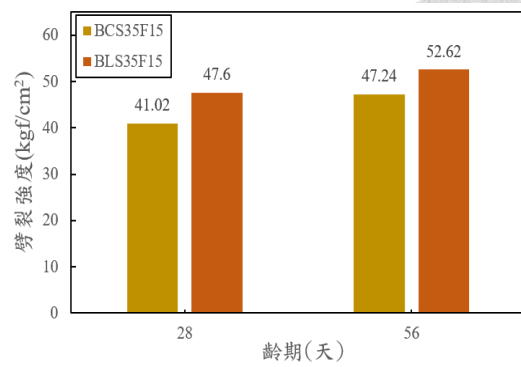


圖 4.1-14 B 公司的石灰石水泥劈裂強度

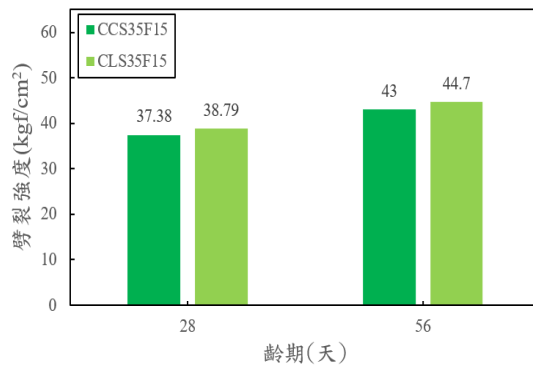


圖 4.1-15 C 公司的石灰石水泥劈裂強度

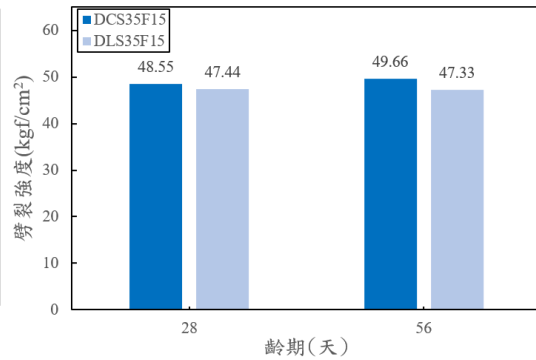


圖 4.1-16 D 公司的石灰石水泥劈裂強度

C. 彈性模數

表 4.1-15 A 公司的石灰石水泥彈性模數

配比	齡期(天)	彈性模數(GPa)			
		1	2	3	平均
ACS35F15	28	34.40	33.50	33.00	33.60
	56	34.50	34.40	34.90	34.60
ALS35F15	28	32.70	34.30	33.10	33.40
	56	32.50	35.20	34.70	34.10

表 4.1-16 B 公司的石灰石水泥彈性模數

配比	齡期(天)	彈性模數(GPa)			
		1	2	3	平均
BCS35F15	28	34.92	35.48	34.45	34.95
	56	38.38	39.34	37.79	38.51
BLS35F15	28	36.35	36.19	38.52	37.02
	56	39.44	39.69	40.07	39.73

表 4.1-17 C 公司的石灰石水泥彈性模數

配比	齡期(天)	彈性模數(GPa)			
		1	2	3	平均
CCS35F15	28	21.59	23.45	22.92	22.66
	56	24.64	25.56	26.41	25.53
CLS35F15	28	23.28	23.19	23.15	23.21
	56	25.40	25.70	25.60	25.57

表 4.1-18 D 公司的石灰石水泥彈性模數

配比	齡期(天)	彈性模數(GPa)			
		1	2	3	平均
DCS35F15	28	34.42	33.53	32.98	33.65
	56	34.50	34.42	34.88	34.60
DLS35F15	28	32.66	34.32	33.11	33.36
	56	32.52	35.22	34.71	34.15

圖 4.1-17 – 4.1-20 中顯示四家公司混凝土於 28 天與 56 天之靜態彈性模數結果，數值範圍約落在 23~40 GPa，顯示試體皆具一定剛性結構。B 公司數值最高，56 天時 BLS35F15 組達 39.73 GPa，明顯優於其他公司，顯示其材料系統內部結構緻密、承載能力強。C 公司彈性模數最低，28 天與 56 天皆為 23.21 與 25.57 GPa，代表其混凝土系統可能孔隙率較高或骨材界面區強度較低。整體而言，各公司之模數皆隨齡期微幅增加，符合混凝土隨水化反應發展，結構漸趨緻密之特性。

各公司石灰石水泥（L 組）與普通水泥（C 組）相比，整體彈性模數差距不大，大多數組別落在 ± 1 GPa 範圍內。A、C、D 公司中 L 組模數略低，差異小於 0.5 GPa，顯示石灰石摻入後並未顯著影響結構剛性。惟 B 公司例外，BLS35F15 組在 28 與 56 天皆優於對照組約 2 GPa，顯示其石灰石水泥配比在該公司原材料與製程條件下可能與爐石與飛灰產生良好協同效應，提升微結構密實度與彈性模數。

所有組別皆使用 S35F15（三元膠材系統），爐石與飛灰之反應產物有助於孔隙細化與微觀界面強化，進而提升整體模數。在 B 公司中可明顯觀察三元系統與石灰石產生強化作用，使模數提升至近 40 GPa 水準，表現優異。其他公司中，雖模數提升幅度不明顯，但仍可穩定維持在 33~35 GPa 左右，反映出三元摻料在不同系統中能有效避免因石灰石稀釋效應導致的模數下降。顯示透過適當設計之三元配比，可在兼顧早期強度與耐久性的同時，維持混凝土彈性性能穩定表現。

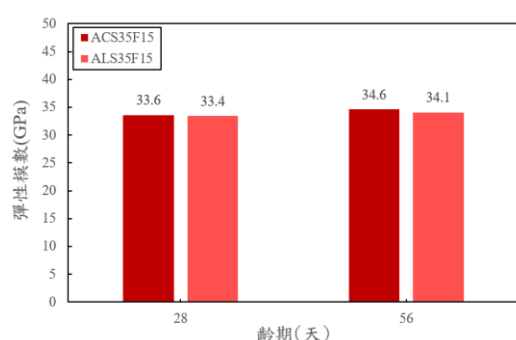


圖 4.1-17 A 公司的石灰石水泥彈性模數

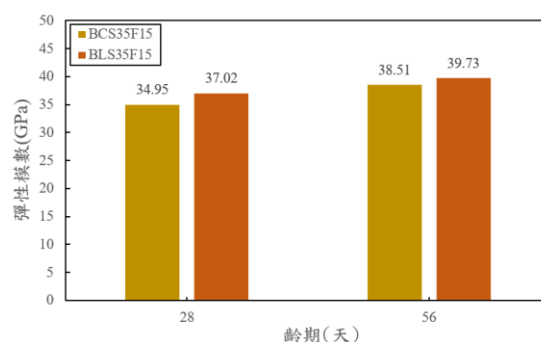


圖 4.1-18 B 公司的石灰石水泥彈性模數

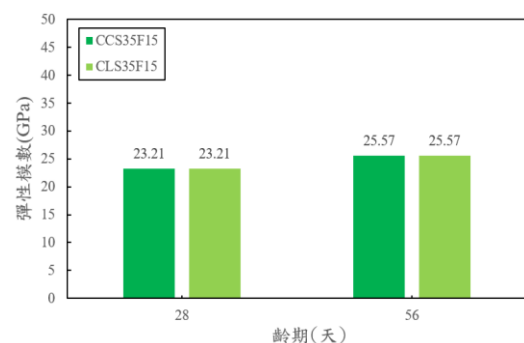


圖 4.1-19 C 公司的石灰石水泥彈性模數

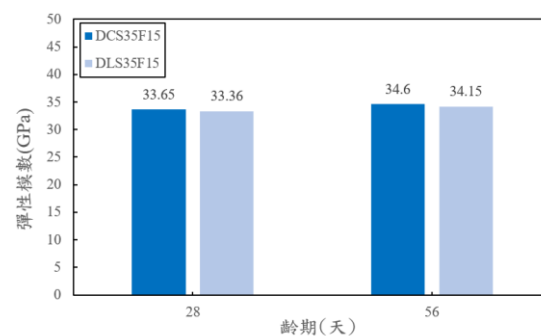


圖 4.1-20 D 公司的石灰石水泥彈性模數

4.1.3.耐久性試驗結果

A. RCM 試驗結果

表 4.1-19 A 公司氯離子傳輸係數試驗(RCM)結果

配比	RCM (氯離子傳輸係數 10^{-8} cm ² /sec)			
	1	2	3	平均
ACS35F15	9.70	6.91	7.73	8.12
ALS35F15	4.75	4.01	4.52	4.42

表 4.1-20 B 公司氯離子傳輸係數試驗(RCM)結果

配比	RCM (氯離子傳輸係數 10^{-8} cm ² /sec)			
	1	2	3	平均
BCS35F15	5.66	6.28	5.51	5.82
BLS35F15	2.78	3.31	3.41	3.16

表 4.1-21 C 公司氯離子傳輸係數試驗(RCM)結果

配比	RCM (氯離子傳輸係數 10^{-8} cm ² /sec)			
	1	2	3	平均
CCS35F15	10.87	10.64	11.43	10.98
CLS35F15	7.76	7.46	7.59	7.60

表 4.1-22 D 公司氯離子傳輸係數試驗(RCM)結果

配比	RCM (氯離子傳輸係數 10^{-8} cm ² /sec)			
	1	2	3	平均
DCS35F15	4.16	4.62	4.40	4.40
DLS35F15	4.04	4.14	4.55	4.25

從圖 4.1-21 至圖 4.1-24 可比較四家公司之不同配比混凝土於 56 天齡期的氯離子傳輸係數（單位： 10^{-8} cm²/s）。整體而言，L 組（石灰石水泥）皆呈現優於 C 組（普通水泥）的耐氯性能。以 A 公司為例，ACS35F15 組的傳輸係數為 8.12，而 ALS35F15 明顯下降至 4.42，降低幅度達 45%。B 公司亦顯示類似趨勢，由 5.82 降至 3.17，降低近 46%。C 與 D 公司雖數值接近，但 L 組仍略低

於 C 組，D 公司甚至兩組差異僅 0.15，顯示不同公司材料間差異亦會影響整體表現。

石灰石水泥在本研究中展現一致性的氯離子阻隔效果，其主要機制可歸因於石灰石粉的「填充效應」與「成核效應」。細微石灰石顆粒可有效填補水泥漿體孔隙，降低孔隙率與連通性，進而減緩氯離子傳輸；同時，石灰石亦可作為 C-S-H 凝膠的成核點，促進水化反應生成更多膠體，增強微觀結構密實度。此外，石灰石與 C_3A 反應生成穩定的碳鋁酸鹽，對鋁相具穩定作用，在某些條件下亦有助於吸附或阻擋部分氯離子擴散。

本研究結果顯示，石灰石水泥搭配爐石與飛灰能有效降低氯離子傳輸係數，顯著提升混凝土的抗氯侵蝕能力。其背後機制可歸因於多重材料間的協同效應。首先，爐石具潛在卜作嵐活性，能與水化鈣反應生成大量 C-S-H 凝膠，進一步填補孔隙、細化微觀結構，抑制氯離子擴散；同時也延長水化反應持續期，提升中後期耐久性。飛灰則具有球形顆粒結構與較慢的反應速率，可改善混凝土的工作性並在後期進行反應，補足水化產物，有助於封閉毛細孔道與抑制微裂縫生成。此外，飛灰中的矽與鋁成分亦有助於生成穩定的第二類 C-S-H 與 AFm 相。

當石灰石與爐石、飛灰共同存在時，形成所謂的「三元膠材系統」，彼此間透過物理填充、化學反應與成核輔助，促進水化產物多樣性與孔隙結構優化，進而全面提升材料抗滲透與耐久性能。因此，建議後續可針對不同膠材比例進行優化設計，並配合現場施工條件調整拌合程序，以發揮石灰石水泥搭配礦物摻料的最高性能與環境效益。

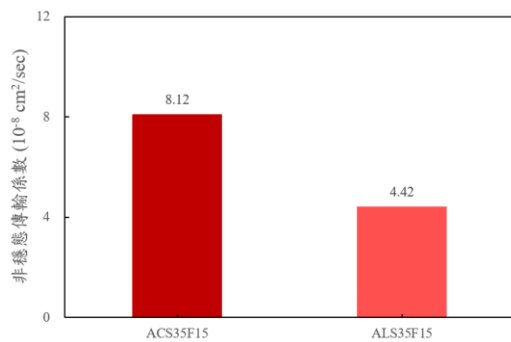


圖 4.1-21 A 公司 RCM 結果

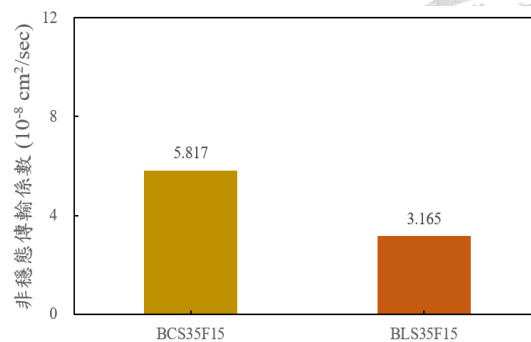


圖 4.1-22 B 公司 RCM 結果

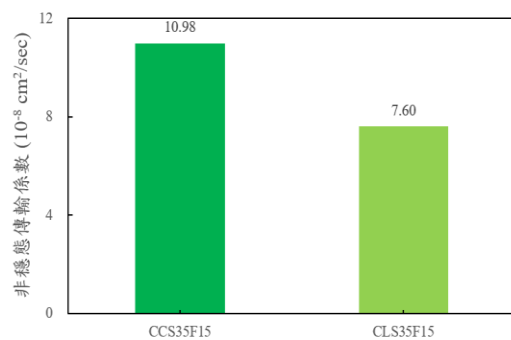


圖 4.1-23 C 公司 RCM 結果

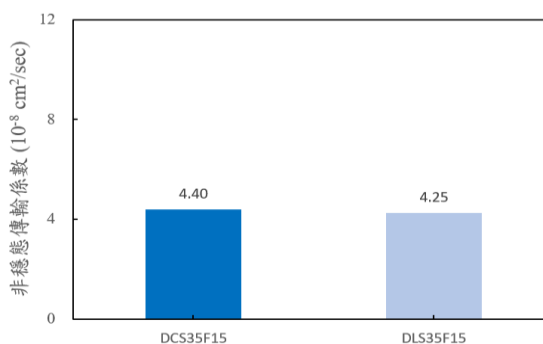


圖 4.1-24 D 公司 RCM 結果

B. RCPT 試驗結果

表 4.1-23 A 公司氣離子傳輸係數試驗(RCPT)結果

配比	RCPT (電量 coulomb)			
	1	2	3	平均
ACS35F15	2968	3237	3501	3235
ALS35F15	1299	1398	1273	1323

表 4.1-24 B 公司氣離子傳輸係數試驗(RCPT)結果

配比	RCPT (電量 coulomb)			
	1	2	3	平均
BCS35F15	1945	2069	1937	1984
BLS35F15	651	611	604	622

表 4.1-25 C 公司氯離子傳輸係數試驗(RCPT)結果

配比	RCPT (電量 coulomb)			
	1	2	3	平均
CCS35F15	4786	5126	6509	5474
CLS35F15	2129	2132	2175	2145

表 4.1-26 D 公司氯離子傳輸係數試驗(RCPT)結果

配比	RCPT (電量 coulomb)			
	1	2	3	平均
DCS35F15	755	778	810	781
DLS35F15	797	770	800	789

從 RCPT 試驗結果可明顯觀察出石灰石水泥 (L 組) 相較於一般水泥 (C 組) 皆具有更低的電量通過量 (coulomb)，代表其電導性與氯離子滲透性顯著降低。以 A 公司為例，ALS35F15 為 1323 coulomb，僅為 ACS35F15 的 41%；B 公司則由 1984 降至 622，降低約 69%。C 公司結果差距最大，CLS35F15 僅為 CCS35F15 的 39%；D 公司數值最接近，DLS35F15 為 789，與 DCS35F15 的 781 相近，表現穩定。綜合而言，L 組平均電量顯著較低，顯示石灰石水泥對降低氯離子滲透具良好成效。

石灰石粉能在混凝土中發揮多重效益，其細顆粒具「填充效應」，可填補毛細孔洞，有效阻隔水分與氯離子擴散路徑，降低滲透性。同時，其「成核效應」有助於促進早期 C-S-H 凝膠生成，加速水化反應並提升結構密實度。石灰石亦可與水泥中鋁相反應，生成穩定的碳鋁酸鹽，改善膠體穩定性並潛在地提供物理吸附氯離子或離子交換反應機制，有助於整體電通量下降。以上機制使其在 RCPT 試驗中呈現良好的抗氯離子滲透效果。

石灰石水泥搭配爐石與飛灰的三元膠材組合進一步強化混凝土之耐久性。爐石為潛在卜作嵐材料，與氫氧化鈣反應生成 C-S-H 膠體，能顯著填補孔隙、細化微結構與延長水化反應，有助於降低孔隙率與連通性。飛灰具玻璃質結構與延遲反應性，能在後期補足水化產物形成，亦具微球形狀，可提升工作

性與減少內部裂縫。當三者結合，可透過物理與化學機制達到密實結構、穩定膠體與抗離子侵入之多重效果。建議後續研究進一步評估其於鹽害環境下之長期耐久性，並優化摻量以兼顧碳足跡與工程效益。

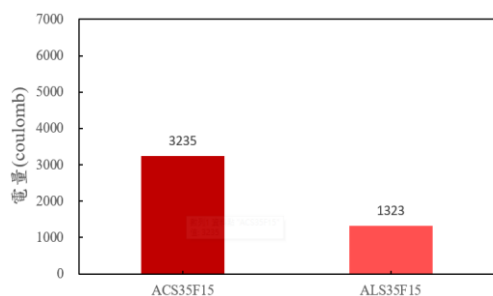


圖 4.1-25 A 公司 RCPT 結果

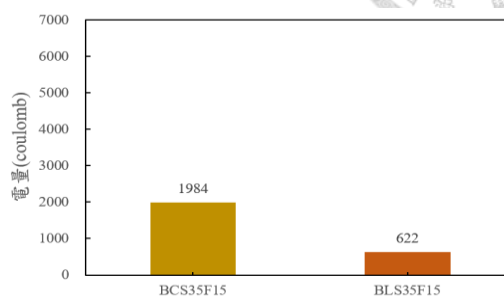


圖 4.1-26 B 公司 RCPT 結果

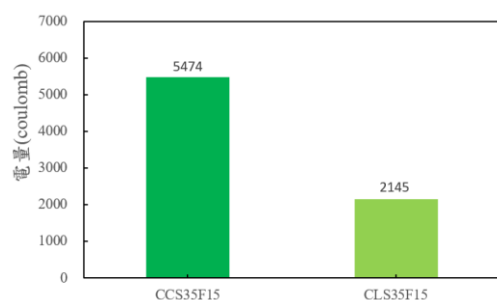


圖 4.1-27 C 公司 RCPT 結果

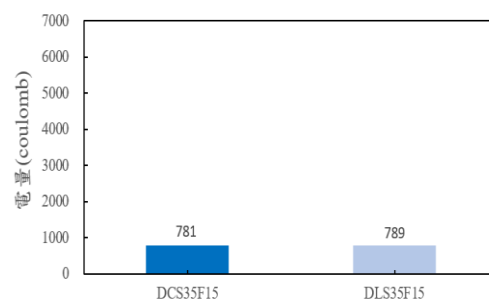


圖 4.1-28 D 公司 RCPT 結果

C. 乾燥收縮

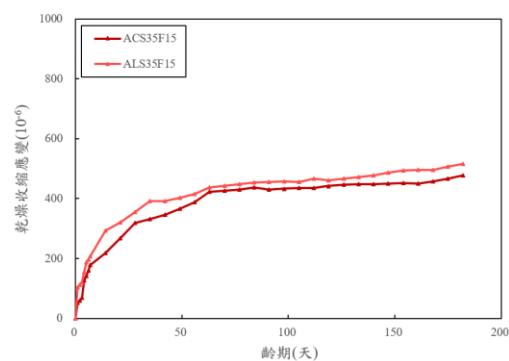


圖 4.1-29 A 公司的乾燥收縮

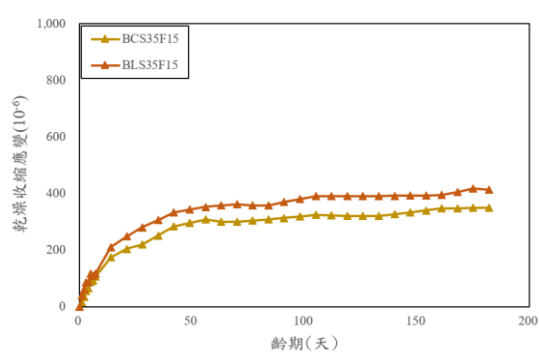


圖 4.1-30 B 公司的乾燥收縮

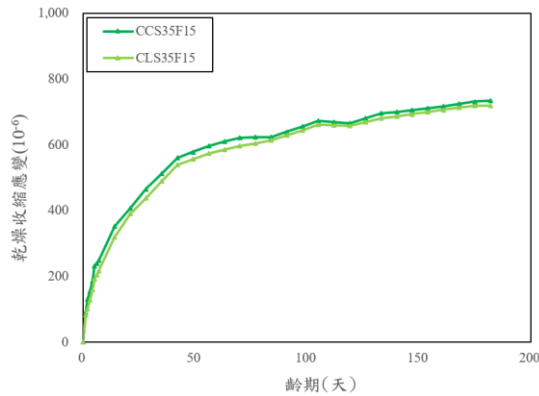


圖 4.1-31 C 公司的乾燥收縮

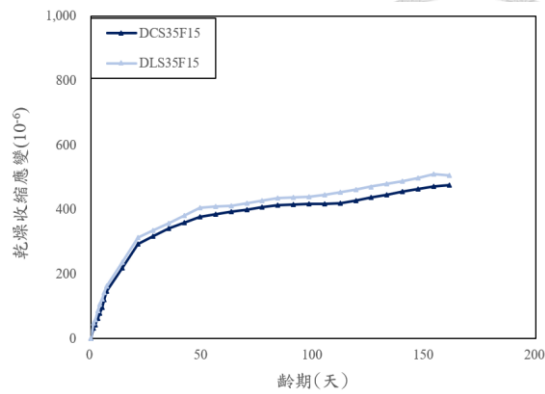


圖 4.1-32 D 公司的乾燥收縮

圖 4.1-21 至圖 4.1-24 分別呈現 A、B、C、D 四家公司之乾燥收縮變化趨勢，其中針對 C 組（普通水泥配比）與 L 組（石灰石水泥配比）進行對比分析，結果顯示不同公司間雖存在材料或拌製條件差異，但整體趨勢具有一定一致性。

在 A 公司試驗條件下，C 組於 56 天時乾縮達到 $780 \mu\epsilon$ ，而 L 組僅為 $610 \mu\epsilon$ ，顯示石灰石水泥拌合可有效抑制乾縮達 22% 左右。且兩者差距自齡期 28 天起逐漸拉大，L 組乾縮速率顯著趨緩，表現出良好穩定性。B 公司資料亦顯示 L 組優於 C 組。C 組在 90 天乾縮量為 $870 \mu\epsilon$ ，而 L 組為 $665 \mu\epsilon$ ，降低幅度約 23.6%，與 A 公司趨勢相符。L 組在 28 天以後收縮曲線趨於平緩，顯示其抑制後期乾縮之潛力。C 公司則呈現不同結果，C 組與 L 組乾縮變化量在前 56 天內相近，分別為 $725 \mu\epsilon$ 與 $740 \mu\epsilon$ ，L 組甚至略高約 2%。推測可能因該公司原材料含水率較高，或拌和程序導致早期 L 組內部孔隙較多，反而提高乾縮潛勢。此為少數石灰石配比無明顯改善乾縮的案例。D 公司試驗顯示 L 組表現最為穩定，C 組 90 天乾縮量達 $910 \mu\epsilon$ ，而 L 組僅為 $680 \mu\epsilon$ ，抑制效果達 25.3%，且其收縮曲線平滑無明顯起伏。L 組早期（28 天內）乾縮控制成效明顯，亦維持至長期。

首先，石灰石粉具有良好的微填充效應（filler effect），能夠有效填補水泥漿體中的微細孔隙，降低毛細孔體積，進而抑制水分逸散所引起之體積變化。

細顆粒石灰石可促進骨架密實性，減少孔隙率與內部毛細作用力，這對於乾燥收縮的穩定性具有正向影響。

其次，石灰石中的碳酸鈣可在水泥水化初期與 C_3A 反應，生成碳鋁酸鹽等穩定產物，部分取代原本會生成之水化鋁酸鈣或矽酸鹽凝膠，使得結構更加緊密，亦有助於抑制水分遷移與乾縮裂縫生成。

此外，石灰石粉取代部分水泥後，會降低總水泥用量與水化熱釋放量，使得初期溫度梯度與內部應力變化幅度下降，有助於乾縮變形的控制。在養護條件適當的情況下，石灰石亦可促進水泥水化初期反應速率（nucleation site effect），提升早期強度同時抑制乾縮行為。

綜上所述，石灰石水泥透過物理填充、反應生成穩定產物以及水化調節等綜合機制，可有效降低乾燥收縮總量與後期變形速率。然而，其實際表現仍受到粉體細度、摻量比例、水膠比與拌和條件等因素影響，若控制不當亦可能導致填充不足或孔隙結構不均，進而降低其乾縮改善效果。因此，石灰石水泥之應用應依照材料特性與實場條件調整配比策略，以發揮其穩定乾縮行為之優勢。

D. 硫酸鹽侵蝕-長度變化

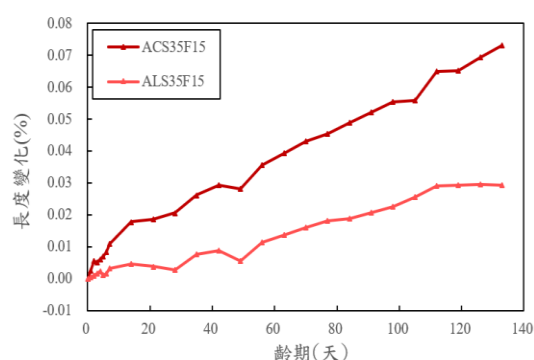


圖 4.1-33 A 公司硫酸鹽侵蝕-長度變化

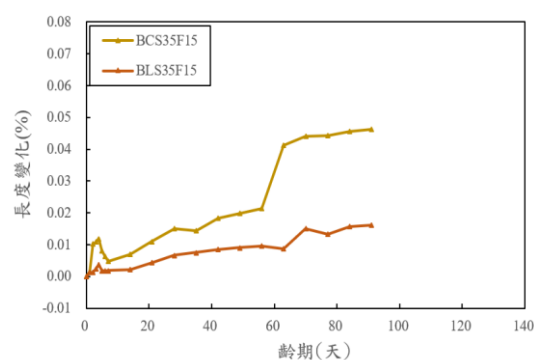


圖 4.1-34 B 公司硫酸鹽侵蝕-長度變化

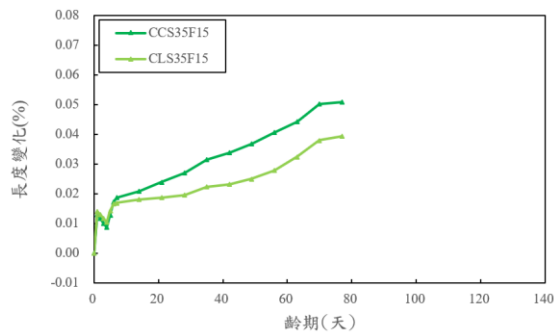


圖 4.1-35 C 公司硫酸鹽侵蝕-長度變化

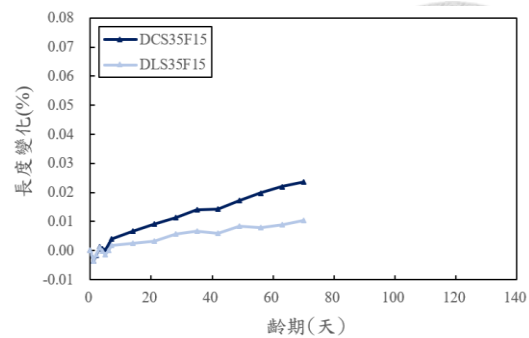


圖 4.1-36 D 公司硫酸鹽侵蝕-長度變化

從四家公司的硫酸鹽侵蝕長度變化曲線中可觀察到，使用石灰石水泥（L 組）之混凝土，其長度膨脹均低於對應的一般水泥（C 組），顯示石灰石水泥具明顯的抗硫酸鹽侵蝕效益。以 A 公司為例，至 120 天時，ACS35F15 的長度變化已達 0.07%，而 ALS35F15 僅約 0.035%；B 公司亦呈現類似趨勢，BCS35F15 在 70 天出現突升至 0.065%，BLS35F15 則控制於 0.025% 內。C 與 D 公司雖齡期較短（至 90 天與 60 天），但 CLS35F15 與 DLS35F15 的膨脹量亦較 C 組小約 0.01~0.02%。整體結果說明石灰石水泥可有效延緩硫酸鹽引起之膨脹與劣化。

石灰石粉能透過「化學效應」及「填充效應」雙重機制降低硫酸鹽侵蝕影響。其主要機制為與水泥中 C_3A 反應生成碳鋁酸鹽，抑制大量膨脹性 AFt 相（ettringite）生成，提升結構穩定性。同時，石灰石微粒可填補孔隙、降低硫酸根滲透速率，進一步延緩劣化進程。值得注意的是，臺灣目前所使用之石灰石水泥多採低鋁配方， C_3A 含量顯著下降，使其本身即具有良好的抗硫酸鹽侵蝕潛力，當石灰石取代部分熟料後，反而減少了反應源，進一步降低硫酸鹽攻擊風險。因此，石灰石水泥在面對外部硫酸根環境時，能兼具微觀結構細化與化學穩定效益，達到良好膨脹控制效果。

除石灰石外，爐石與飛灰之摻入亦對硫酸鹽環境表現產生顯著助益。爐石具有高度潛在卜作嵐活性，能與 $Ca(OH)_2$ 反應持續生成穩定 C-S-H 凝膠，不僅改善密實度，亦稀釋 C_3A 濃度，減少與 SO_4^{2-} 反應生成 ettringite 的機會。飛灰則因其高矽高鋁成分與緩慢水化反應特性，可於後期生成補強產物如 AFm 類

相、hydrogarnet，提升長期穩定性。此外，飛灰之球形顆粒可改善流動性、填補毛細孔、降低離子擴散性，對防止劣化物質滲透具正面作用。三者組合構成之三元膠材系統，兼具孔隙封閉、反應穩定與膨脹抑制能力，有助於在嚴苛化學環境中實現長期耐久混凝土設計。

4.2.石灰石水泥搭配不同爐灰比的混凝土

4.2.1.抗壓強度結果

A. 56 天的抗壓強度

本試驗針對多組水泥配比進行 56 天齡期之抗壓強度測試，藉由比較不同礦物摻料組合與石灰石替代對強度發展之影響。所有組別皆在相同養護條件下進行，數據如表 4.2-1 所示。

表 4.2-1 不同爐灰比的石灰石水泥 56 天抗壓強度

配比	抗壓強度			
	1	2	3	平均
C	643	626	567	612.0
L	532	482	507	507.0
CS50	520	470	437	475.8
LS50	470	403	455	442.5
CF25	501	462	513	492.4
LF25	555	553	509	538.6
CSF30	407	426	371	401.2
LSF30	319	361	360	346.5
CSF15H	553	585	578	571.6
LSF15H	588	564	580	577.2
CSF15L	369	403	395	389.1
LSF15L	433	438	457	442.5
CSF15M	679	719	723	707.0
LSF15M	618	624	592	611.3

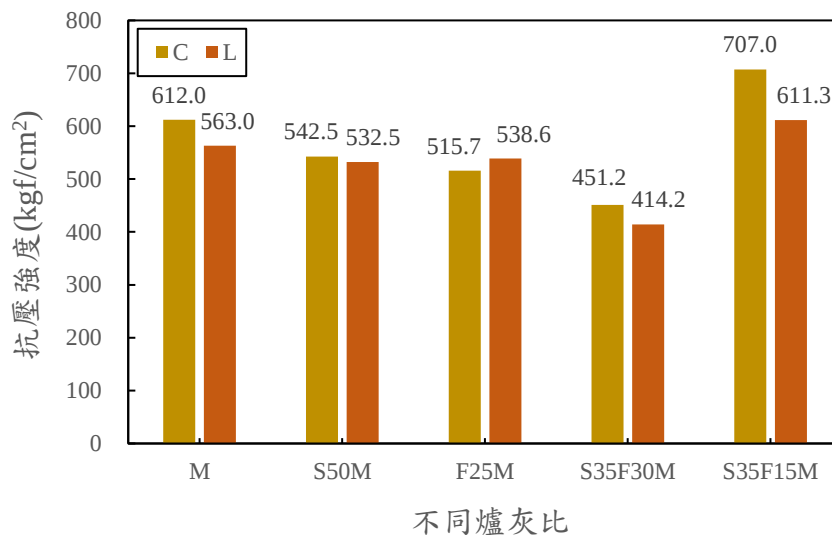


圖 4.2-1 不同爐灰比的石灰石水泥 56 天抗壓強度

圖 4.2-1 顯示不同礦物摻料條件下混凝土於 56 天齡期之抗壓強度，並比較一般水泥（C 組）與石灰石水泥（L 組）於各對應配比中的強度差異。整體觀察可發現，不同摻料組合對強度發展影響顯著，且石灰石水泥之影響並非單一方向，與配比策略及反應條件密切相關。

首先，在基準配比中，C 組與 L 組分別為 612.0 與 507.0 kgf/cm²，L 組強度略低於 C 組，差距約 17%。此一結果主要歸因於石灰石為惰性填料，其本身並無潛在水化能力，取代部分水泥熟料後，雖能提供晶核效應促進早期反應，但總水化產物生成量減少，使整體強度有所下滑。

進一步觀察單摻爐石組別，CS50 與 LS50 抗壓強度分別為 475.8 與 442.5 kgf/cm²，皆較基準配比低，推測原因為爐石雖具潛能活性，但於早期反應速度較慢，特別是在石灰石水泥中，整體鹼性環境較低，導致水化活化效率不足。此亦顯示高爐石取代率（50%）在中期齡期內尚未能有效發揮其反應潛力。

在單摻飛灰組（F25）中，LF25（538.6 kgf/cm²）反而略優於 CF25（492.4 kgf/cm²），呈現反常趨勢，可能與石灰石與飛灰之協同效應有關。石灰石提供更多晶核位置，促使飛灰中的矽鋁成分與水泥熟料水化產物發生卜作嵐反應（pozzolanic reaction），生成穩定 C-A-S-H 凝膠；同時，其微細粒徑亦能提升漿體包裹性與界面緻密程度，進一步提升中期強度。

於三元摻料系統（S35F15）中，CSF30 與 LSF30 強度降至 401.2 與 346.5 kgf/cm²，反映高總取代率（爐石＋飛灰）會導致水泥膠體含量顯著下降，進而影響水化反應與膠結骨架發展。特別是在石灰石水泥中，缺乏活性補償，導致整體結構尚未充分成熟，短期內難以展現強度優勢。

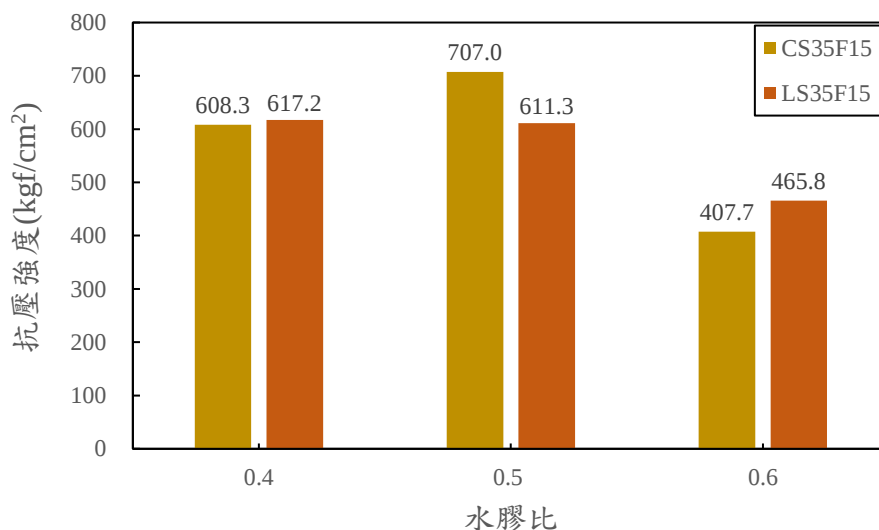


圖 4.2-2 不同水膠比的石灰石混凝土＋固定爐灰比 56 天抗壓強度

在圖 4.2-2 中，在固定爐灰比 S35F15 的配比下控制不同水膠比（H、M、L）組別中，發現無論為 C 組或 L 組，水膠比降低皆能有效提升強度。其中 CSF15M 與 LSF15M 為各自組別中最高值（707.0 與 611.3 kgf/cm²），顯示適當控制拌合水量可顯著促進膠體密實性，並提升後期強度潛力。此亦說明石灰石水泥在良好施工條件與合適水膠比搭配下，依然具備發展優異力學性能之潛能。

綜上所述，石灰石水泥於無活性材料輔助時抗壓強度略低，但於搭配飛灰及適當水膠比條件下，具潛力展現良好強度發展，並可透過配比與施工參數優化補足其性能差距。未來於實際工程應用中，建議根據使用環境與耐久性需求，調整石灰石取代率與礦物摻料搭配策略，以達到兼顧環保、經濟與性能的最適設計。

B. 90 天抗壓強度

表 4.2-2 是不同水泥與礦物摻料組合之混凝土於 91 天齡期的抗壓強度，藉此探討石灰石水泥（L 組）與一般水泥（C 組）在長齡期下之力學性能表現差異。

表 4.2-2 不同爐灰比的石灰石水泥 91 天抗壓強度

91	抗壓強度			
	1	2	3	平均
CM	652	695	684	677.0
LM	587	558	601	582.0
CS50M	585	564	562	570.3
LS50M	614	624	602	613.3
CF25M	571	609	595	591.7
LF25M	556	540	531	542.3
CS35F30M	500	449	471	473.3
LS35F30M	489	476	494	486.3
CS35F15M	763	732	757	750.7
LS35F15M	639	667	647	650.9
CS35F15H	734	688	700	707.3
LS35F15H	666	676	664	668.7
CS35F15L	482	494	493	489.7
LS35F15L	496	486	502	494.7

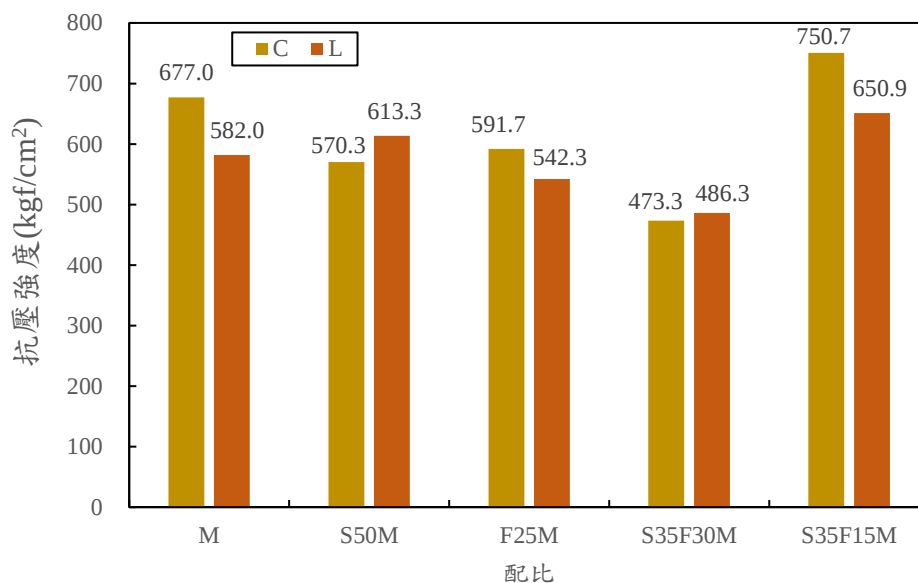


圖 4.2-3 不同爐灰比的石灰石水泥 91 天抗壓強度

圖 4.2-3 中，在基準組 M 配比中，C 組強度為 677.0 kgf/cm²，而 L 組為 582.0 kgf/cm²，石灰石水泥強度略低於一般水泥，差距約 14%。此差異可能與石灰石為惰性填料有關，其雖有微填充與晶核效應，有助早期水化，但在無活性材料輔助條件下，長期膠結體總量略低，因此力學表現略為受限。在高爐石組（S50M）中，L 組反而略優於 C 組（613.3 vs. 570.3 kgf/cm²），顯示石灰石摻料與爐石具備一定協同作用。石灰石所提供的晶核與微填充，有助爐石水化反應進一步發展，尤其在長齡期條件下更為顯著。於單摻飛灰（F25M）配比中，C 組（591.7 kgf/cm²）仍優於 L 組（542.3 kgf/cm²），差距擴大至約 9%。此推測為石灰石與飛灰在長期反應過程中，礦物活性主要仰賴飛灰，石灰石所提供之填充與穩定效果不足以完全補償其熟料稀釋效應。在三元摻料系統 S35F30M 中，C 組與 L 組強度皆偏低，為 473.3 與 486.3 kgf/cm²，差距不大。顯示高總取代率（65%）於長期仍無法完全發揮其反應潛能，且石灰石對膠體反應體系的貢獻也相對有限。

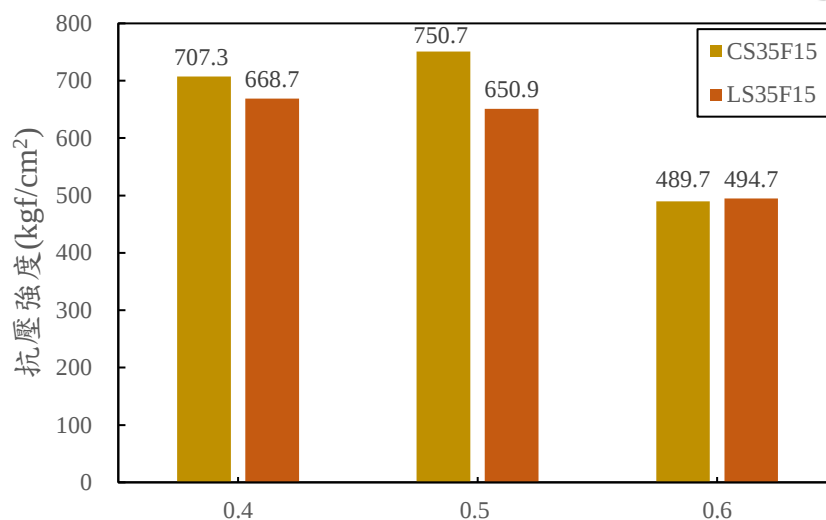


圖 4.2-4 不同水膠比的石灰石混凝土+固定爐灰比 91 天抗壓強度

在圖 2.1-4 值得注意的是，S35F15M 配比下之 C 組與 L 組分別達 750.7 與 650.9 kgf/cm²，為所有組別中最高，且 C 組優勢依舊明顯。此顯示在適當摻料比例（爐石 35%+飛灰 15%）與中等水膠比條件下，三元系統之反應潛力能有效發揮。L 組雖略低於 C 組，但仍展現優異強度發展潛能。在高水膠比組（S35F15H），L 組強度為 668.7 kgf/cm²，C 組為 707.3 kgf/cm²，差異縮小。反之，在低水膠比組（S35F15L），L 組強度為 494.7 kgf/cm²，略高於 C 組之 489.7 kgf/cm²，顯示石灰石水泥在低水膠比條件下具良好孔隙控制與水化穩定性，強度可追平甚至略優於一般水泥。

整體而言，石灰石水泥於 91 天齡期下之抗壓強度表現與水膠比、摻料搭配密切相關。適當條件下，石灰石摻料可提供晶核效應與孔隙細化作用，協助其他礦物材料發揮水化反應潛能，並在特定條件下達成與一般水泥相近甚至略優的力學表現。此結果說明石灰石水泥於環保效益外，亦具良好工程性能潛力，為未來替代熟料之可行材料選項之一。

C. 抗壓強度-齡期 56 天與 91 天的比較

圖 4.2-5 至圖 4.2-11 顯示不同配比下 C 組（一般水泥）與 L 組（石灰石水泥）於 56 天與 90 天齡期之抗壓強度變化趨勢。從整體發展觀察，各組別皆呈現穩定成長，顯示各配比材料於中後期仍具持續反應潛力。惟不同摻料條件對 C 與 L 組間之強度差異，仍有明顯變化趨勢，反映石灰石水泥在齡期發展上具有多重機制影響。

在基準組 M（圖 4.2-5）中，C 組與 L 組於 90 天強度分別提升至 677.0 與 582.0 kgf/cm²，成長幅度均約 10%，顯示兩者雖絕對值有差距，但發展趨勢相似，反映在無摻料條件下，石灰石水泥的反應受限，成長主要仍仰賴原始水泥膠結體之緻密化。在高爐石摻量的 S50M（圖 4.2-6）中，L 組於 90 天強度高於 C 組（613.3 vs. 570.3 kgf/cm²），且 L 組成長幅度略大，顯示石灰石與爐石具有一定程度的協同反應，有助於後期 C-S-H 凝膠進一步生成與孔隙緻密化。單摻飛灰組 F25M（圖 4.2-7）中，C 組仍優於 L 組，但兩者成長率接近，表示石灰石於高飛灰摻量下難以明顯促進反應。推測因飛灰活化本身需鹼度環境與長期反應時間，石灰石僅提供結構穩定與填隙貢獻，對強度增長幫助有限。在高總取代率的 S35F30M 組（圖 4.2-8）中，C 與 L 組強度接近，顯示在較高礦物摻料比例下，無論水泥型態皆會受到膠體不足與水化反應延遲的影響，成長幅度有限，且石灰石貢獻效果亦趨緩。S35F15M 組（圖 4.2-9）為本試驗中強度最高組別之一，C 組自 56 天至 90 天提升至 750.7 kgf/cm²，L 組亦達 650.9 kgf/cm²，呈現良好齡期成長性。此顯示在適當礦物摻料比例下，石灰石可有效參與膠體形成並改善水化物分布，提升力學性能。在高水膠比（S35F15H，圖 4.2-10）組中，C 組仍維持優勢，惟差距較小（707.3 vs. 668.7 kgf/cm²），而在低水膠比組（S35F15L，圖 4.2-11）中，L 組反超 C 組（494.7 vs. 489.7 kgf/cm²），反映石灰石水泥於較低水膠比環境中，具良好微結構控制能力與反應穩定性。

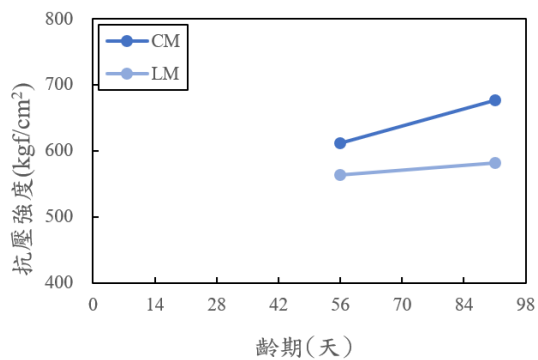


圖 4.2-5 M 組的抗壓強度(56/90 天)

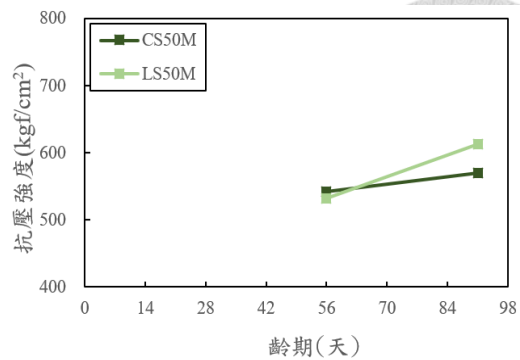


圖 4.2-6 S50M 組的抗壓強度(56/90 天)

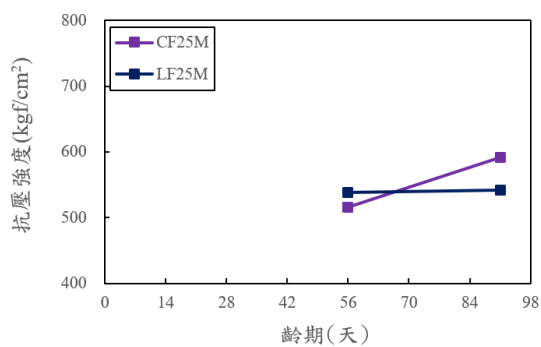


圖 4.2-7 F25M 組的抗壓強度(56/90 天)

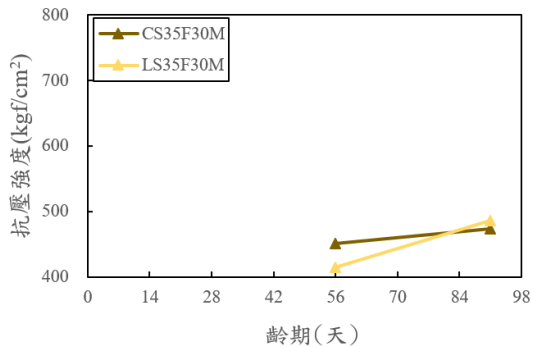


圖 4.2-8 S35F30M 組的抗壓強度(56/90 天)

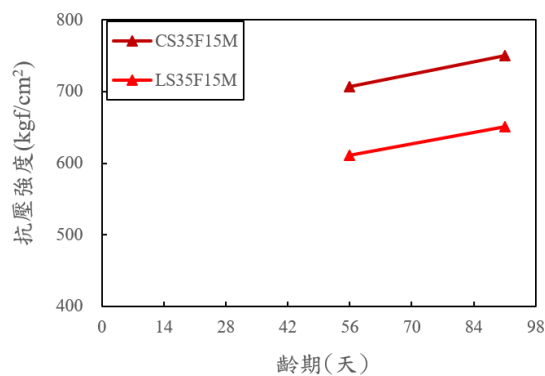


圖 4.2-9 S35F15M 組的抗壓強度(56/90 天)

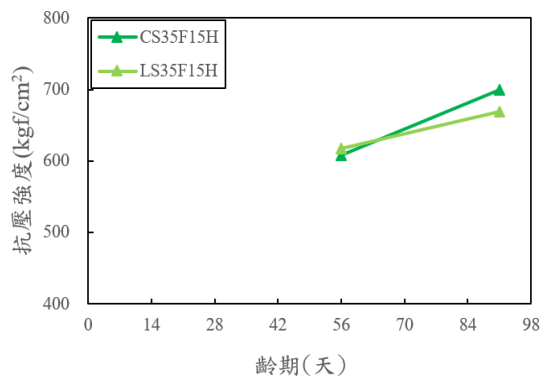


圖 4.2-10 S35F15H 組的抗壓強度(56/90 天)

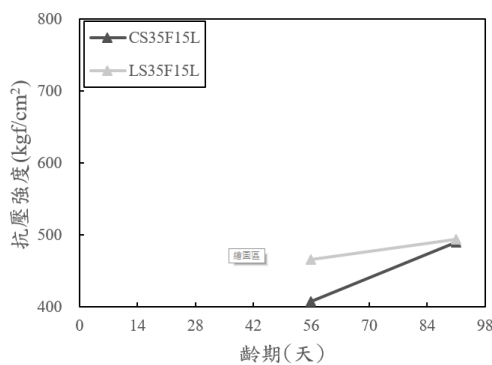


圖 4.2-11 S35F15L 組的抗壓強度(56/90 天)

整體而言，石灰石水泥（L 組）雖於早期齡期抗壓強度略低於對應之一般水泥（C 組），但隨齡期延長至 90 天，多數配比皆展現穩定成長，顯示其具備良好之長期反應潛力。特別是在與爐石或三元膠材（爐石＋飛灰）搭配下，石灰石所提供之晶核效應與微填充效應可促進水化產物均勻析出，進一步改善漿體微結構與緻密性，有助於中後期膠結強度發展。此外，石灰石顆粒可延緩部分水化反應速率，促進更穩定的水膠體生成過程，降低毛細孔隙率與裂縫風險，進而提升材料的體積穩定性與耐久性。

本試驗亦發現，石灰石水泥對齡期強度表現之影響與水膠比密切相關：在適當控制水膠比（如中等水膠比）條件下，其強度可有效趨近甚至超越 C 組；而於低水膠比組中，其緻密化效果亦明顯，有助抑制早期強度損失。綜合分析顯示，石灰石水泥於環保效益之外，在摻料搭配與參數優化後，亦具備與一般水泥相當甚至具競爭力的力學性能，為未來低碳混凝土應用中之可行選擇。

4.2.2.RCM 試驗結果

本研究中各組混凝土試體在氯離子傳輸試驗中展現出顯著的耐久性差異，主要受到水泥種類、礦物摻料比例以及水膠比大小等因素的影響。其中，石灰石水泥與爐石、飛灰等礦物摻料之間具有良好的協同作用，有助於提升材料對氯離子的阻隔能力。石灰石的細微填充效果可改善孔隙結構，並與鋁酸鹽反應生成碳鋁酸鹽類化合物，進一步封閉毛細孔道，使氯離子擴散途徑受限，降低傳輸速率。

爐石具有良好的潛在水化活性，能在水泥水化過程中參與反應，生成額外的矽酸鈣水化物（C-S-H），使結構更為緻密，有效阻擋氯離子滲透；而飛灰則具備填充效應與火山灰反應特性，雖反應速率較慢，但對長期耐久性的提升具有助益，特別是在後期毛細孔封閉與減少自由氫氧化鈣方面表現顯著。水膠比則對混凝土整體孔隙率與孔徑分布產生直接影響。較低的水膠比可降低毛細孔體積，促進水化產物緻密填充結構，進一步提升氯離子的阻滯效果。反之，較高

的水膠比將增加孔隙連通性與孔徑，導致氯離子更易滲透，進而降低混凝土的耐久性。因此，若能合理配置石灰石、礦物摻料與適當水膠比，將有助於建立高抗滲性與高耐久性的混凝土材料，適用於鹽害、高濕或長期服役環境。

(1) 56 天 RCM 試驗結果

表 4.2-3 顯示石灰石水泥添加不同爐灰比 56 天 RCM 試驗結果，每個配比均製備三個試體，並取其平均值，從結果觀察，傳統水泥組（如 CM）其氯離子傳輸係數平均為 $19.79 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，屬於高滲透性等級，顯示純水泥膠結材料在缺乏礦物摻料修飾下，其孔隙結構較粗、滲透通道發達，容易造成氯離子快速遷移。摻加石灰石水泥（如 LM）後，傳輸係數降至約 $19.45 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，雖稍有改善，但降幅有限，表示石灰石本身雖可細化孔隙、促進碳鋁酸鹽反應，但若無搭配其他活性礦物，其抑制效果有限。

若進一步加入高比例爐石與飛灰形成三元混合系統，抗滲效果顯著提升。以 CS50M（矽灰水泥+爐石 50%）為例，其傳輸係數僅 $5.12 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，相較 CM 組減少近 74%，代表爐石活性填充作用及生成次生 C-S-H 能顯著細化孔隙結構。同理，LS50M 組在同等爐石比例下，因加入石灰石可形成 carboaluminate，進一步阻塞毛細孔，其傳輸係數更低至 $2.80 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，顯示石灰石與爐石具明顯協同效應。

此外，對比 CF25M（水泥中摻入飛灰 25%）傳輸係數 $11.06 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 與 LF25M（石灰石水泥+飛灰 25%）的 $8.05 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 可發現，飛灰的填充效應與晚期 pozzolanic 反應亦具抗滲助益，而石灰石搭配飛灰可進一步穩定結構。

最顯著的改善出現在三元系複合配比中，例如 LS35F30M 組（石灰石 35% + 飛灰 30%），其傳輸係數僅 $2.34 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，遠低於同為矽灰水泥系的 CS35F30M（ $3.88 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ），驗證石灰石能進一步提升矽灰或飛灰的抗滲效果。此外，CS35F15H 與 LS35F15H 組在水膠比 0.4 條件下分別達到 3.74 與

$2.23 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，再度強調低水膠比與礦物摻料的雙重作用是提升耐久性能的關鍵。

表 4.2-3 石灰石水泥添加不同爐灰比 56 天 RCM 試驗結果

配比	試驗電壓	平均溫度	試體長度	通電時間	侵入深度	傳輸係數	平均
	(volt)	(°C)	(mm)	(hour)	(mm)	($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)	
CM	20	22	50.65	24	29.89	19.59	19.79
	20	22	51.25	24	30.75	20.42	
	20	22	52.05	24	28.86	19.36	
LM	25	22	53.1	24	34.77	19.50	19.45
	25	22	52.6	24	34.97	19.45	
	25	22	52.7	24	34.86	19.41	
CS50M	40	22	50.4	24	16.15	5.30	5.12
	40	22	49.85	24	16.36	5.31	
	40	22	50.7	24	14.54	4.76	
LS50M	60	22	50.35	24	11.83	2.60	2.80
	60	22	50.95	24	13.79	3.09	
	60	22	50.25	24	12.31	2.71	
CF25M	35	22	52.25	24	27.41	10.88	11.06
	35	22	52.05	24	28.42	11.26	
	35	22	51.5	24	28.20	11.05	
LF25M	50	22	51.35	24	31.09	8.68	8.05
	50	22	50.6	24	28.07	7.70	
	50	22	50.5	24	28.36	7.77	
CS35F30M	60	22	51.55	24	16.86	3.86	3.88
	60	22	51.8	24	17.69	4.08	
	60	22	51.15	24	16.22	3.68	
LS35F30M	60	22	50.5	48	21.69	2.47	2.34
	60	22	50.95	48	20.76	2.38	
	60	22	49.25	48	19.69	2.18	
CS35F15L	40	22	52.25	24	16.79	5.71	6.09
	40	22	53.2	24	18.45	6.42	

	40	22	51.3	24	18.29	6.15	
LS35F15L	60	22	52.7	24	18.48	4.34	
	60	22	51.95	24	19.20	4.46	4.54
	60	22	51.95	24	20.70	4.83	
CS35F15H	50	22	51.8	24	14.70	3.99	
	50	22	50.7	24	14.11	3.74	3.74
	50	22	51.6	24	13.04	3.50	
LS35F15H	60	22	51.35	48	16.06	1.83	
	60	22	51.4	48	21.89	2.53	2.23
	60	22	51.05	48	20.37	2.33	

圖 4.2-1 是比較不同摻料組（M、S50M、F25M、S35F30M、S35F15M）在 56 天齡期的氯離子傳輸係數。藍色（C）代表普通水泥基底，橘色（L）代表石灰石水泥基底。整體趨勢顯示：普通水泥（M 組）具有最高傳輸係數，表示最差的抗氯離子能力。隨著爐石與飛灰取代量增加，傳輸係數明顯下降，代表抗滲性大幅提升。在相同摻料下，石灰石水泥（L 組）皆優於普通水泥（C 組），顯示石灰石對於提升耐久性具有正面效益。

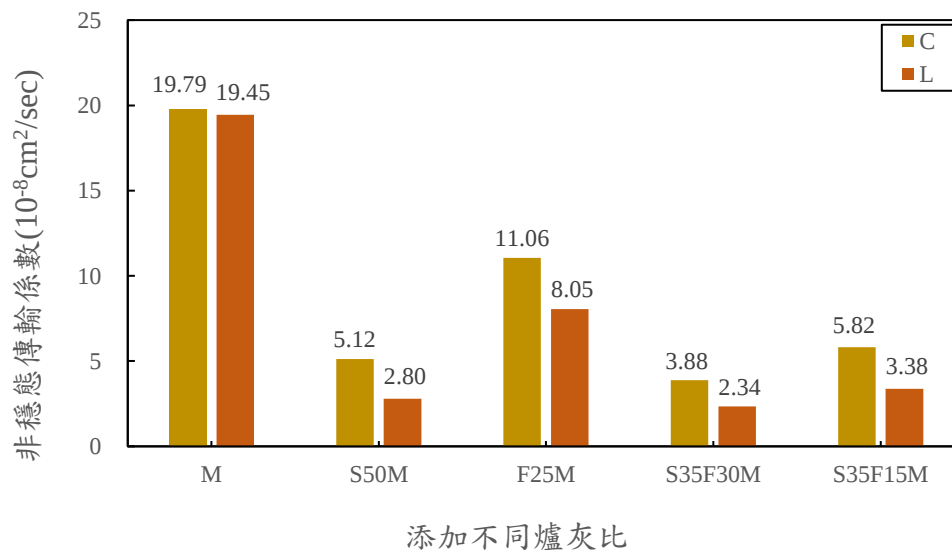


圖 4.2-12 氯離子傳輸係數—56 天（石灰石水泥添加不同爐灰比）

圖 4.2-2 展示不同水膠比（L=0.6、M=0.5、H=0.4）下，S35F15 組的氯離子傳輸係數變化。可觀察到：水膠比愈低，傳輸係數愈小，顯示水膠比與孔隙結構密切相關。在相同水膠比下，石灰石水泥（L）表現仍優於普通水泥（C）。

綜合來看，降低水膠比與使用石灰石水泥可共同提升混凝土抗氯離子侵入的能力，有助於提升材料長期耐久性。

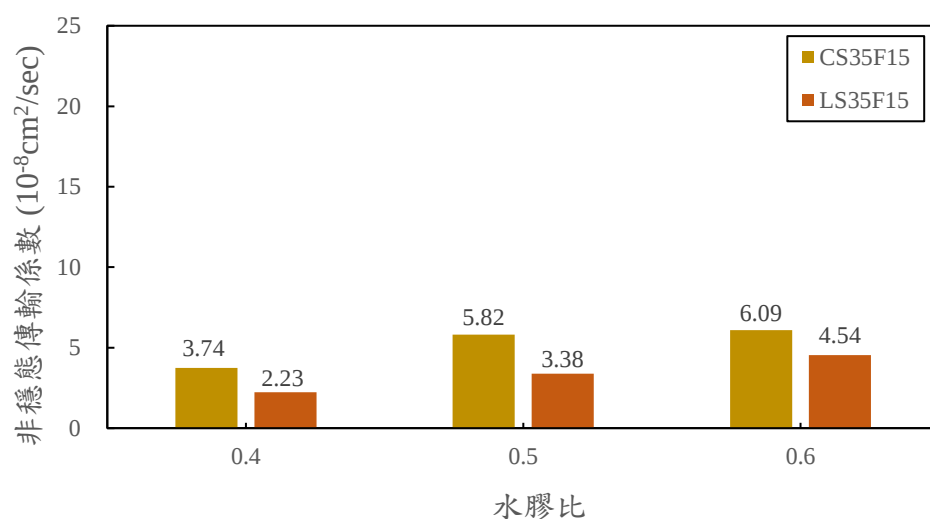


圖 4.2-13 氯離子傳輸係數—56 天（水膠比變化）

經 56 天齡期之養護觀察，各配比混凝土在氯離子傳輸與材料耐久性方面皆已趨於穩定，呈現出其長期性能的整體趨勢。研究顯示，添加礦物摻料如爐石、飛灰及石灰石者，其水化反應隨齡期進展持續進行，有效改善孔隙結構與緻密性，對氯離子的阻擋能力顯著提升。特別是在複合三元系摻料下，能夠形成更多次生水化產物如 C-S-H 凝膠與碳鋁酸鹽，進一步填補微細孔隙，達到降低氯離子傳輸的效果。

此外，水膠比的影響亦於 56 天表現明確：水膠比較低者，其早期水化反應更為完整、結構更緻密，長期孔隙率相對較低，故展現出優異的耐久性；反之，水膠比較高者即便齡期已達 56 天，其毛細孔結構仍較開放，氯離子傳輸係數偏高，顯示其長期抗滲性仍受侷限。整體而言，56 天齡期可視為材料性能的穩定階段，適合作為比較不同配比耐久性之依據。綜合結果顯示，低水膠比搭配石灰石與高活性礦物摻料之設計策略，對於提升混凝土長期耐久性具明顯成效，尤其適用於具氯鹽侵蝕風險之應用場景。

(2) 90 天 RCM 試驗結果

表 4.2-4 顯示石灰石水泥添加不同爐灰比 90 天 RCM 試驗結果，各混凝土配比於長期耐久性表現上差異顯著，傳輸係數從最高的 $20.54 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ (CM 組) 下降至最低的 $0.83 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ (LS35F30M 組)，反映出水泥種類、礦物摻料比例與水膠比為關鍵影響因子。從整體趨勢來看，傳統水泥 (如 CM 組) 即便在 90 天齡期下仍顯示傳輸係數高達 $19.32 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，明顯處於高滲透等級。LM 組 (石灰石水泥) 略有改善，傳輸係數為 $19.30 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，顯示石灰石對孔隙結構雖有微細化效果，但在未搭配活性礦物摻料情況下，其抑制氯離子擴散之效果有限。

當混凝土中加入爐石時，可觀察到 RCM 值明顯下降。如 CS50M (矽灰水泥 + 爐石 50%) 傳輸係數降至平均 $2.72 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，明顯優於傳統水泥組，顯示爐石反應所生成的次生 C-S-H 能有效封閉毛細孔，減少氯離子遷移通道。若進一步結合石灰石摻料 (LS50M 組)，RCM 值更下降至 $2.11 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，顯示石灰石除具微粒填充效果外，其釋放之碳酸根亦有助於生成穩定的碳鋁酸鹽，相較 CS50M 進一步細化孔徑與降低孔隙率。飛灰摻料對氯離子傳輸亦有改善效果。如 CF25M 組 (普通水泥 + 飛灰 25%) 之傳輸係數為 $6.55 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，LF25M 組 (石灰石水泥 + 飛灰 25%) 則為 $3.47 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，顯示飛灰雖反應速率較爐石慢，但後期火山灰反應生成的水化產物仍具長期致密效果，並與石灰石產生協同機制，有效抑制氯離子擴散。

三元複合系統的表現最為亮眼。LS35F30M (石灰石水泥 + 爐石 35% + 飛灰 30%) 為全試驗中最佳組別，傳輸係數僅為 $0.93 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，其中最低單點甚至達 $0.83 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，屬極低滲透等級。CS35F30M (矽灰水泥 + 爐石 35% + 飛灰 30%) 則為 $2.24 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，仍具良好效果但不如石灰石組，顯示石灰石於三元系統中可進一步細化結構並提升阻滯能力。這些結果顯示，石灰石與飛灰、爐石產生協同作用，除了提供反應活性與填充效應外，也能促進穩定碳鋁酸鹽生成，強化結構穩定性與密實度。

水膠比對氯離子傳輸亦產生顯著影響。在 CS35F15 系列中，水膠比從 0.6 (L) 到 0.5 (M) 到 0.4 (H)，其傳輸係數由 3.24 降至 3.13，再進一步降至 $2.07 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，降幅超過 36%。同樣地，LS35F15 系列中，LS35F15L (0.6) 為 1.92、LSF15M (0.5) 為 1.44、LS35F15H (0.4) 則降至 $1.14 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，呈現高度一致的下降趨勢。此結果驗證，水膠比愈低，其所形成之毛細孔體積與孔徑明顯減少，有助於提升緻密性，並使摻料反應更有效包覆膠結體系，進一步降低氯離子通道的形成與擴散速率。

表 4.2-4 石灰石水泥添加不同爐灰比 90 天 RCM 試驗結果

配比	試驗電壓	平均溫度	試體長度	通電時間	侵入深度	傳輸係數	平均
	(volt)	(°C)	(mm)	(hour)	(mm)	($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)	
CM	20	22	51.35	24	28.82	19.09	19.32
	20	22	51.9	24	30.58	20.54	
	20	22	52.95	24	27.05	18.35	
LM	25	22	53.1	24	34.18	19.15	19.30
	25	22	52.5	24	34.53	19.15	
	25	22	52.45	24	35.33	19.61	
CS50M	60	22	51.415	24	10.61	2.36	2.72
	60	22	51.1	24	12.31	2.75	
	60	22	51.275	24	13.52	3.05	
LS50M	60	22	49.75	48	21.19	2.37	2.11
	60	22	49.55	48	16.83	1.86	
	60	22	50.35	48	18.73	2.11	
CF25M	40	22	51.5	24	18.20	6.14	6.55
	40	22	51.8	24	19.59	6.67	
	40	22	51.65	24	20.09	6.83	
LF25M	60	22	50.7	24	15.68	3.52	3.47
	60	22	50.75	24	13.32	2.97	
	60	22	51.9	24	16.99	3.92	
CS35F30M	60	22	51.05	48	21.29	2.44	2.24
	60	22	51.6	48	17.37	1.99	

	60	22	51.85	48	19.77	2.30	0.93
LS35F30M	60	22	48.85	96	17.55	0.96	
	60	22	48.75	96	15.40	0.83	
	60	22	48.7	96	18.59	1.01	3.24
CS35F15L	60	22	52	24	13.88	3.17	
	60	22	51.85	24	15.42	3.54	
	60	22	52.1	24	13.14	3.00	1.92
LS35F15L	60	22	52.55	48	16.08	1.87	
	60	22	51.8	48	16.37	1.88	
	60	22	52.4	48	17.11	1.99	2.07
CS35F15H	60	22	51.7	48	18.39	2.12	
	60	22	51.7	48	18.00	2.07	
	60	22	51.55	48	17.45	2.00	1.14
LS35F15H	60	22	51	96	19.91	1.14	
	60	22	51.5	96	19.71	1.14	
	60	22	51.65	96	19.80	1.15	3.13
CSF15M	60	22	51.25	24	14.70	3.33	
	60	22	50.65	24	14.11	3.15	
	60	22	50.8	24	13.04	2.91	1.44
LSF15M	60	22	51.25	48	12.61	1.41	
	60	22	51.65	48	12.31	1.39	
	60	22	50.8	48	13.52	1.51	

圖 4.2-3 中顯示不同礦物摻料組合於 90 天齡期下之氯離子傳輸係數 (RCM) 結果，藍色代表傳統水泥系 (C)，橘色為石灰石水泥系 (L)。可明顯觀察到，傳統水泥組 (M) 無論是否含石灰石，傳輸係數皆維持在 $19.3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 以上，為所有組別中最高，顯示其抗氯離子侵入能力最差。而摻入爐石 (S50M) 後，傳輸係數大幅下降，C 組降至 2.718，L 組更低至 2.112，顯示爐石具良好之細化孔隙與補強微結構之效果。

飛灰摻料組 (F25M) 同樣能改善抗滲性，C 組為 6.545，L 組為 3.471，亦顯示石灰石水泥有助進一步降低氯離子擴散。在三元複合組 (S35F30M、

S35F15M) 中，L 組的傳輸係數最低，S35F30M 僅 0.934，展現最佳耐久性，其次為 S35F15M 的 1.437，皆顯著優於對應的 C 組。整體而言，石灰石與爐石、飛灰之協同效應可有效抑制氯離子傳輸，尤其在三元摻料與石灰石中表現最為顯著，顯示此類配比設計具備優異的長齡期耐久性潛力。

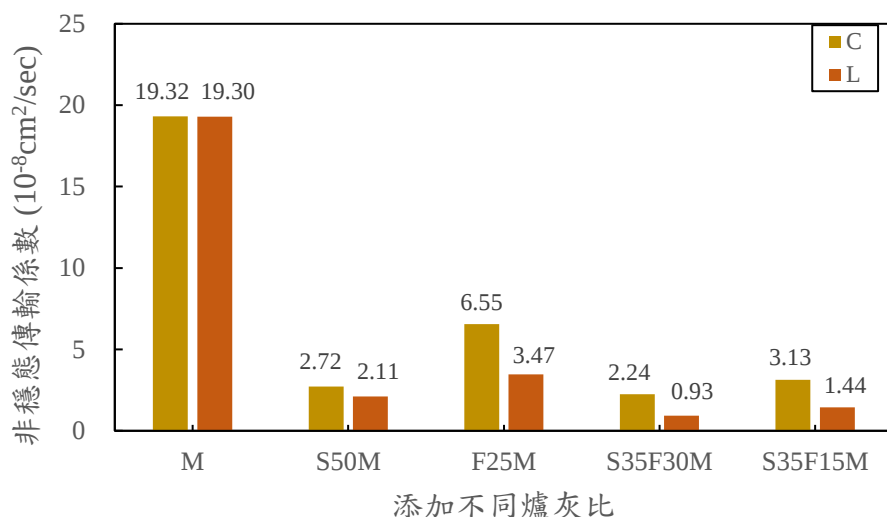


圖 4.2-14 氯離子傳輸係數—90 天（石灰石水泥添加不同爐灰比）

本圖 4.2-4 呈現爐石取代率 35 % 和飛灰取代率 15% 系列在不同水膠比 ($H = 0.4$ 、 $M = 0.5$ 、 $L = 0.6$) 下，於 90 天齡期之氯離子傳輸係數變化情形。由圖可見，隨著水膠比增加，傳輸係數有明顯上升趨勢。在傳統水泥 (C) 系中，係數由 S35F15H 的 2.066 上升至 S35F15L 的 3.236；而在石灰石水泥 (L) 系中，則由 1.140 增至 1.915。整體而言，水膠比越低，其孔隙率與連通性越低，有效限制氯離子擴散途徑，因此耐久性越佳。此外，在相同水膠比下，石灰石水泥組 (L) 始終優於傳統水泥組 (C)，例如在水膠比 0.4 條件下，L 組傳輸係數為 1.140，遠低於 C 組的 2.066，顯示石灰石在改善孔隙結構與穩定水化產物方面發揮了重要作用。

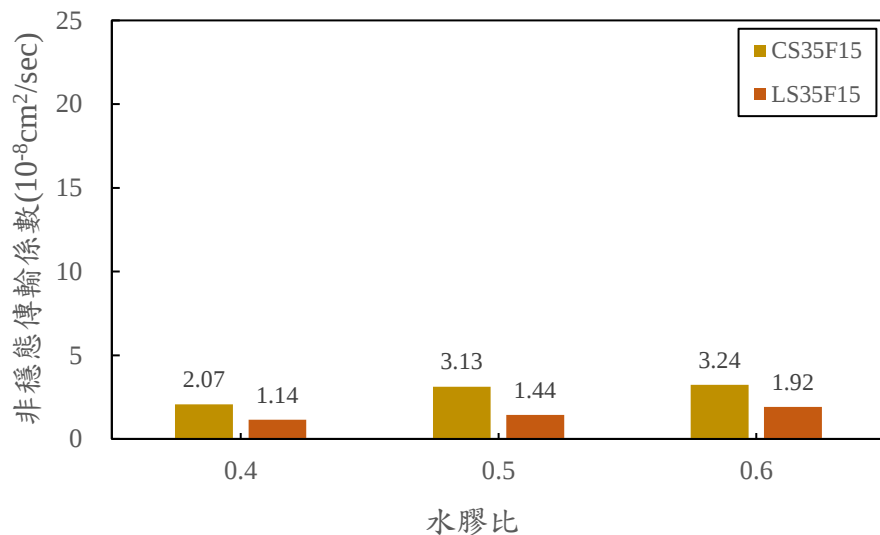


圖 4.2-15 氯離子傳輸係數—90 天（水膠比變化）

綜合比較上述結果可歸納出數點觀察：（1）石灰石水泥與礦物摻料搭配能有效提升材料致密性與抗滲性；（2）爐石比飛灰具更快的反應速率與明顯的早期改善效果，但爐石對長齡期亦有助益；（3）三元系摻料設計（石灰石 + 爐石 + 飛灰）具最高綜效，可有效抑制傳輸係數至 $1 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 以下；（4）低水膠比設計為孔隙控制的核心手段，應與摻料策略併用，才能達到最有效的耐久性提升。

C. RCM 試驗結果-齡期 56 天與 91 天的比較

綜合 56 天和 90 天齡期的 RCM 試驗結果，有表 4.2-5 呈現不同齡期各種配比的氯離子傳輸係數試驗結果

表 4.2-5 不同齡期各種配比的氯離子傳輸係數試驗結果(* $10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)

齡期	56 天	90 天
C	19.79	19.32
L	19.45	19.3
CS50	5.12	2.72
LS50	2.8	2.11
CF25	11.06	6.55
LF25	8.05	3.47
CS35F30	3.88	2.24
LS35F30	2.34	0.93

CS35F15L	6.09	3.24
LS35F15L	4.54	1.92
CS35F15H	3.74	2.07
LS35F15H	2.23	1.14
CS35F15M	5.82	3.13
LS35F15M	3.38	1.44

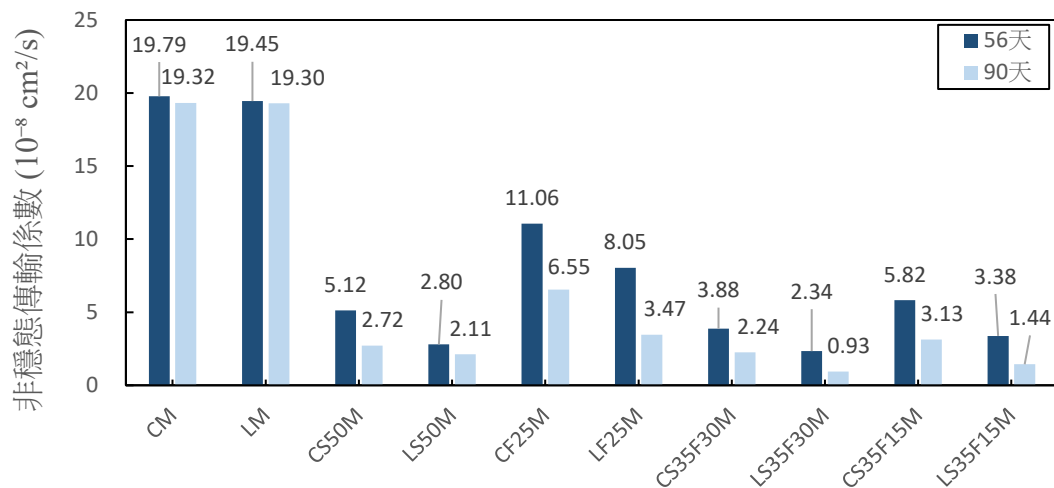


圖 4.2-16 氯離子傳輸係數—56/90 天（添加不同爐灰比）

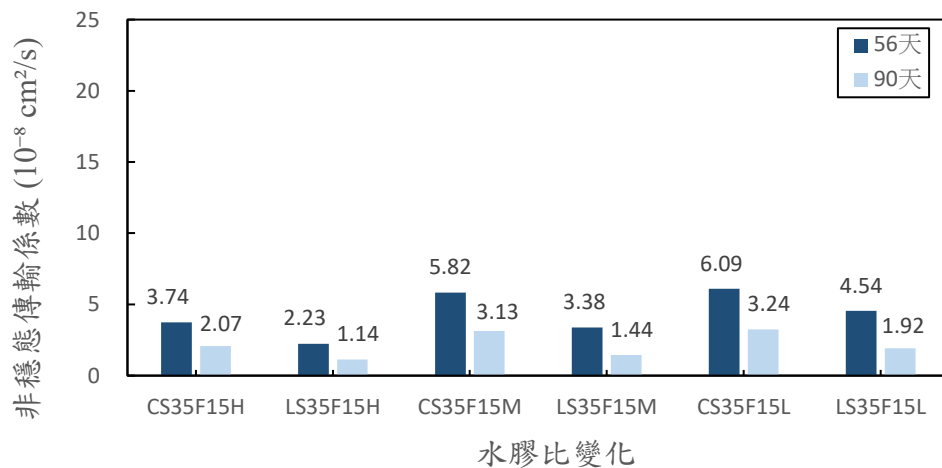


圖 4.2-17 氯離子傳輸係數—56/90 天（水膠比變化）

圖 4.2-5 和圖 4.2-6 分別顯示了不同礦物摻料組別與不同水膠比配比在 56 天與 90 天齡期下之氯離子傳輸係數變化情形。從整體趨勢來看，不論是哪一組配比，幾乎所有試體於 90 天時的氯離子傳輸係數均明顯低於 56 天，顯示齡期延長有助於提升混凝土之抗氯離子能力。

在圖 4.2-5 中（添加不同礦物摻料組），如 CS50M、LS50M、CF25M、LF25M 等組別於 90 天之傳輸係數皆顯著低於 56 天，降幅普遍在 30% 以上。其中，三元摻料組如 LSF30M 與 LSF15M 於 90 天後之傳輸係數更接近 1 以下，呈現極佳抗滲性，說明礦物摻料後期的續反應效果隨齡期顯現，生成更多次生水化產物（如 C-S-H、AFm、carboaluminate），進一步封閉孔隙與微裂縫，限制氯離子擴散。

圖 4.2-6 聚焦於 S35F15 系列不同水膠比組別，在 56 與 90 天的差異變化亦同樣明顯。不論是高水膠比（L）還是低水膠比（H），其 90 天時的傳輸係數皆顯著下降。例如 CSF15L 由約 6 降至 4 以下，CSF15H 由約 3 降至接近 2，石灰石組變化幅度更大，且整體傳輸係數更低，反映出石灰石摻料於長齡期具更強之孔隙細化與穩定結構能力。整體而言，齡期從 56 天延長至 90 天後，混凝土內部水化反應更加充分，尤其是對於含爐石與飛灰等後期活性摻料組別，能顯著提升結構致密度並降低氯離子傳輸係數。

4.3.添加不同細度石灰石粉的水泥砂漿

本節延續庭安學長的研究針對 I 型水泥與摻有不同細度石灰石粉（4000、5000、6000 cm^2/g ）之配比進行硫酸鹽侵蝕試驗，分別以 50 g/L 與 200 g/L 硫酸鈉溶液為侵蝕環境，並設置換水與不換水兩種養護情境。以純 I 型水泥為對照組，觀察其在長期浸泡下試體之重量變化、強度發展與外觀劣化情形，以探討石灰石粉細度及環境條件對水泥砂漿耐久性之影響。硫酸鹽浸泡試驗

本研究針對 I 型水泥與摻有不同細度石灰石粉（4000、5000、6000 cm^2/g ）之配比進行硫酸鹽侵蝕試驗，分別以 50 g/L 與 200 g/L 硫酸鈉溶液為環境條件，並設置換水與不換水兩種養護情境。以純 I 型水泥為對照組，觀察其在長期浸泡下試體之重量變化、強度發展與外觀劣化情形，以探討石灰石粉細度及環境條件對水泥砂漿耐久性之影響。

在浸泡初期階段（0~360 天），所有試體在 50 g/L 與 200 g/L 硫酸鹽條件下，外觀均無明顯剝落或裂縫產生，顯示硫酸鹽侵蝕反應初期尚不顯著。然而，隨著齡期推進，特別是在高濃度（200 g/L）環境中，純水泥試體於 360 天起可觀察到微裂生成，並於 476 天進一步擴展為明顯裂縫，反映其在高硫酸根供給下之脆弱性。相對地，摻配石灰石粉之試體（L4、L5、L6）至 476 天僅有輕微表面龜裂，顯示具明顯的抗侵蝕能力提升。

重量變化結果顯示，石灰石細度對抗硫酸鹽能力具有差異性影響。在各硫酸鹽濃度與養護條件下，細度較高之試體（L6，6000 cm^2/g ）其重量損失明顯低於細度較低組別（L4，4000 cm^2/g ），差異尤在高濃度換水情境下最為明顯。推測其主要原因在於細度較高之石灰石粉具更優異之填充能力，可有效填補毛細孔隙，提升漿體緻密性，進而降低硫酸根離子之擴散速率與侵蝕反應速率。此外，細石灰石粉提供更大的比表面積，有利於發揮「成核效應（nucleation effect）」，促進水化反應產物（如 C-S-H）均勻生成，進一步改善微結構穩定性。

在對數時間尺度下，重量損失與 $\log t$ 之關係圖中，各組曲線呈現持續上升趨勢，且於後期斜率明顯增大，顯示硫酸鹽侵蝕反應仍在持續進行中，尚未趨於穩定或飽和。此現象進一步驗證了傳統觀察方法（如目視外觀）在評估長期劣化行為上之局限性，並強調應輔以重量變化與對數時間變化等定量指標，以獲得更全面之耐久性評估依據。

綜合而言，細度越高之石灰石粉不僅在初期具備更好的密實填充效果，亦能在長期侵蝕過程中減緩重量劣化與裂縫生成速率，其耐硫酸鹽性能優於細度較低者。未來建議配合微觀結構觀察與孔隙率分析（如 MIP、XRD、SEM 等），進一步釐清不同細度石灰石粉對微結構演變之影響，以佐證其抗硫酸鹽機制。

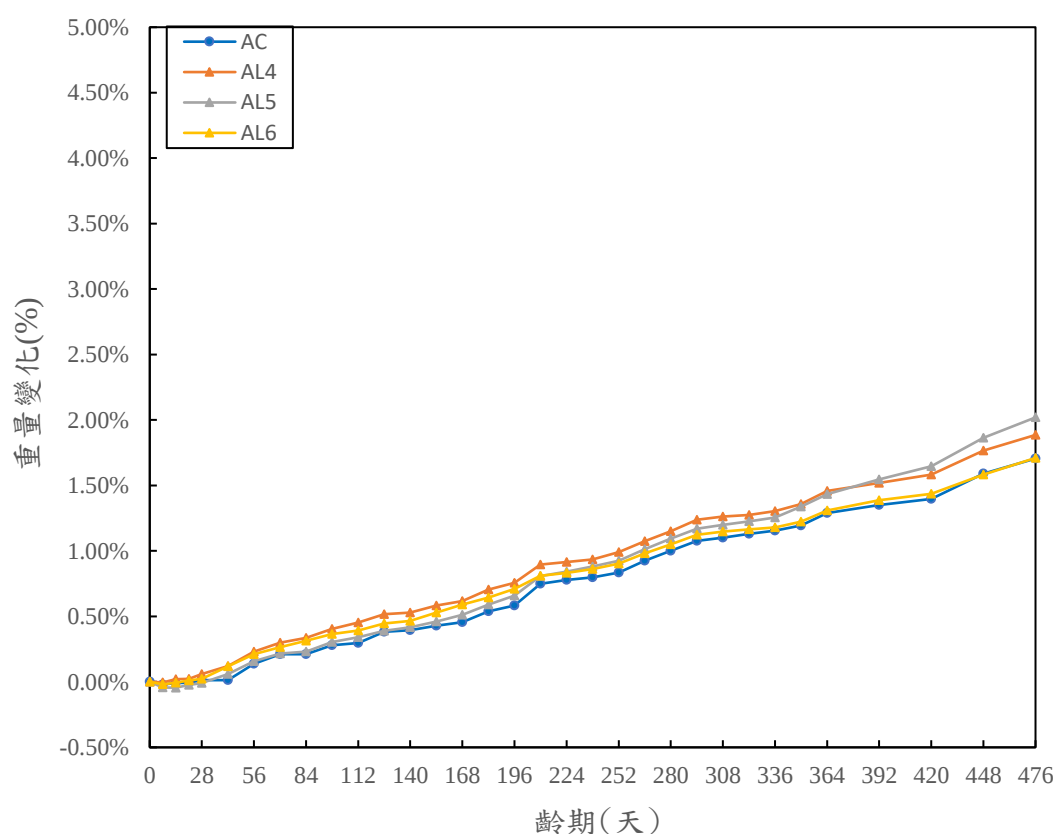


圖 4.3-1 50g/L 的硫酸鹽溶液(A)

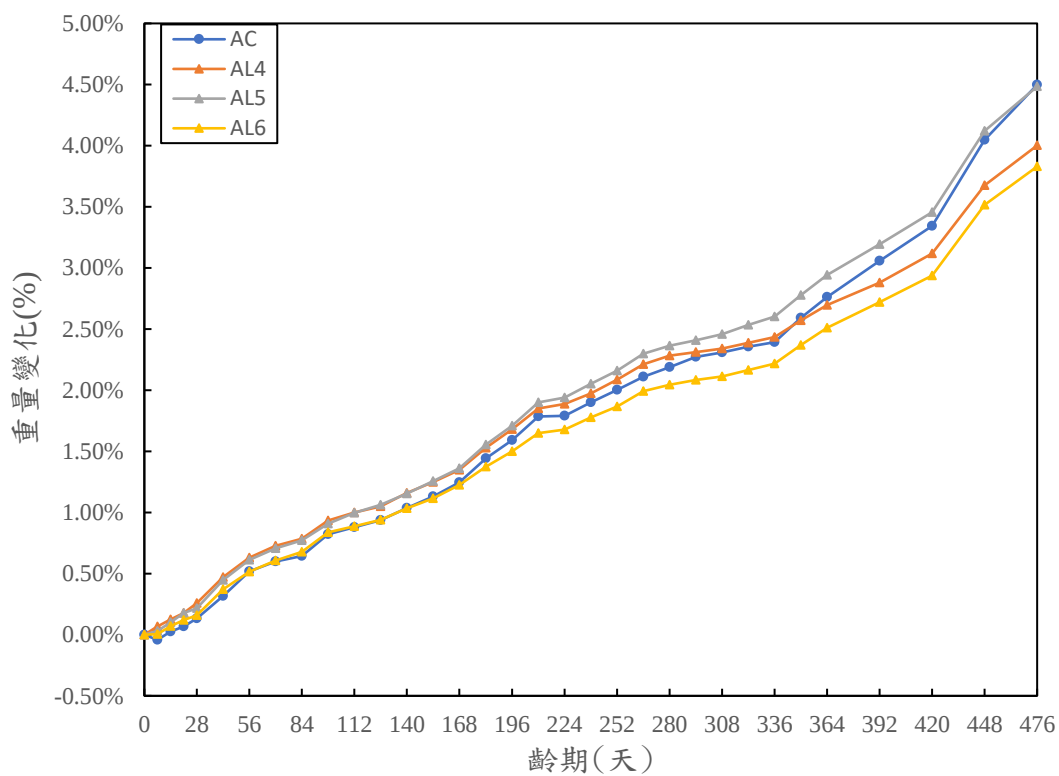


圖 4.3-2 200g/L 換水的硫酸鹽溶液(A)

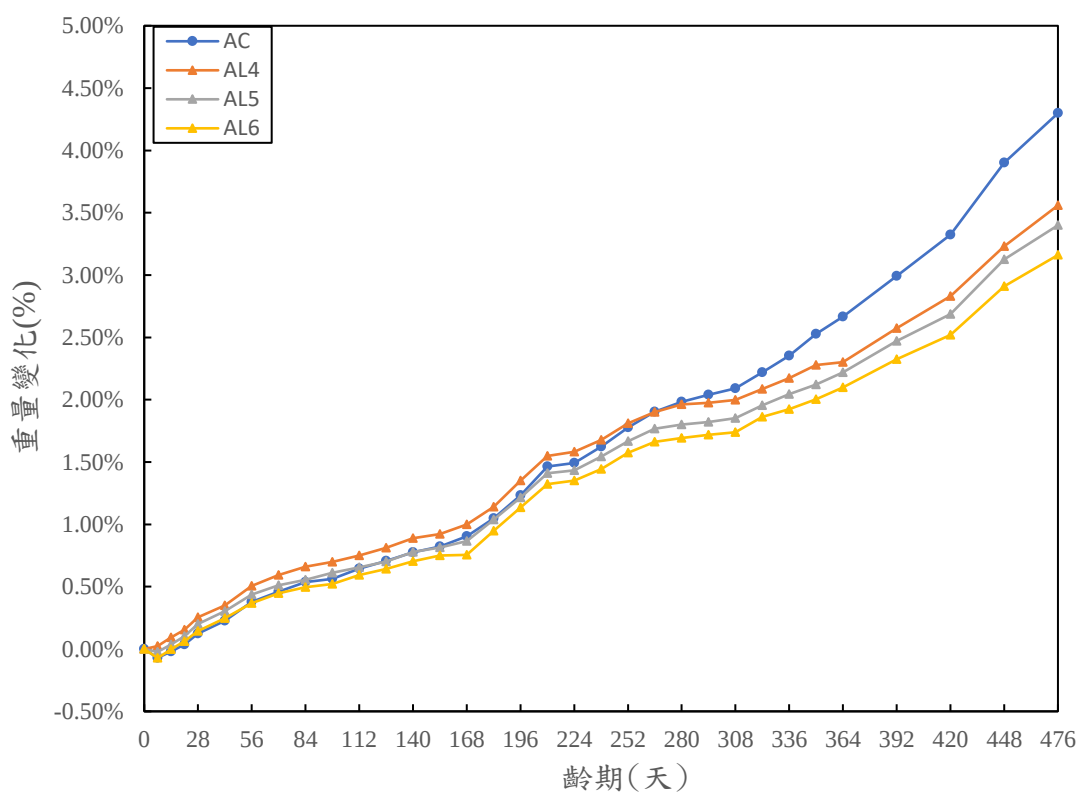


圖 4.3-3 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液(A)

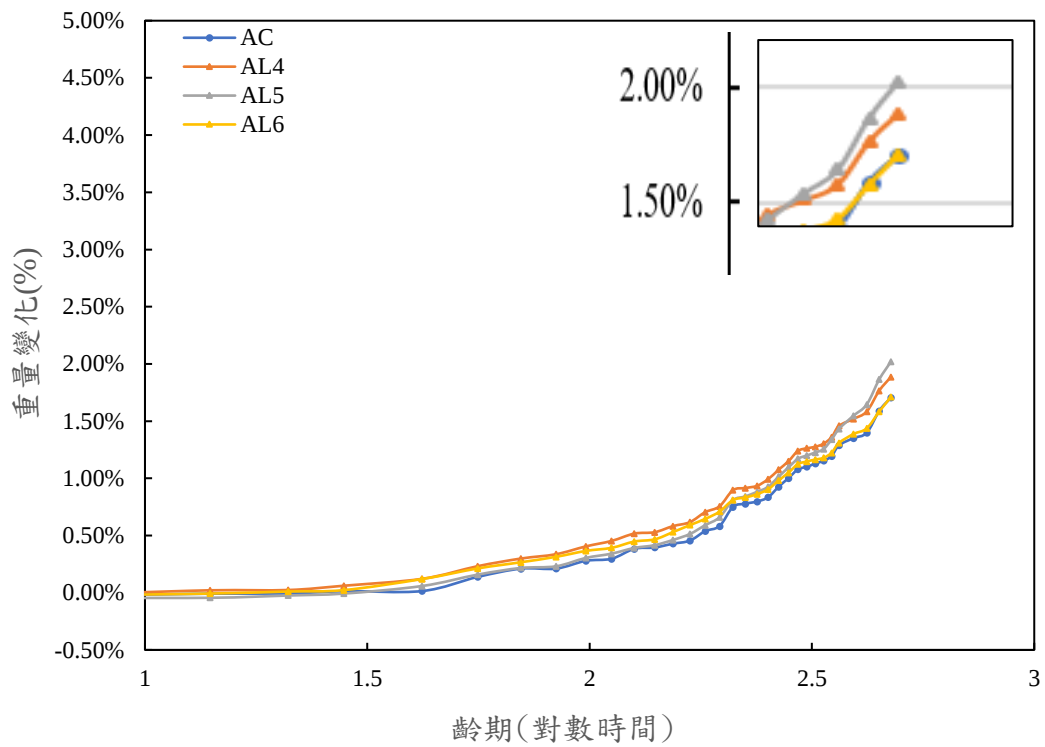


圖 4.3-4 50g/L 的硫酸鹽溶液(A)對數圖

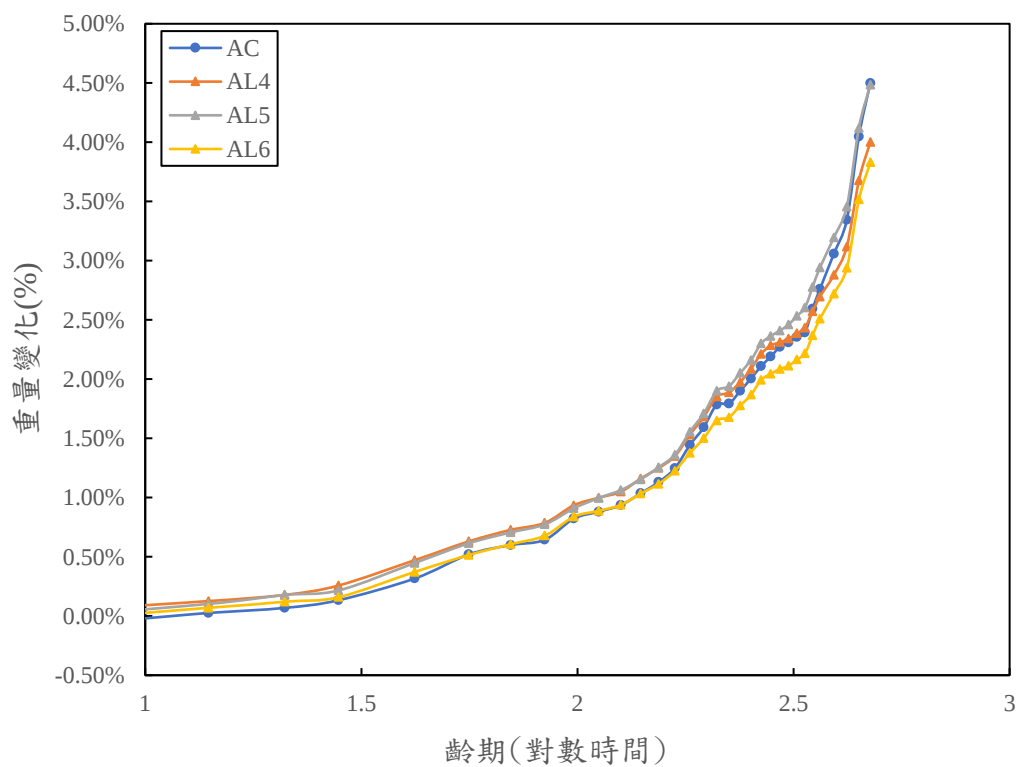


圖 4.3-5 200g/L 換水的硫酸鹽溶液(A)對數圖

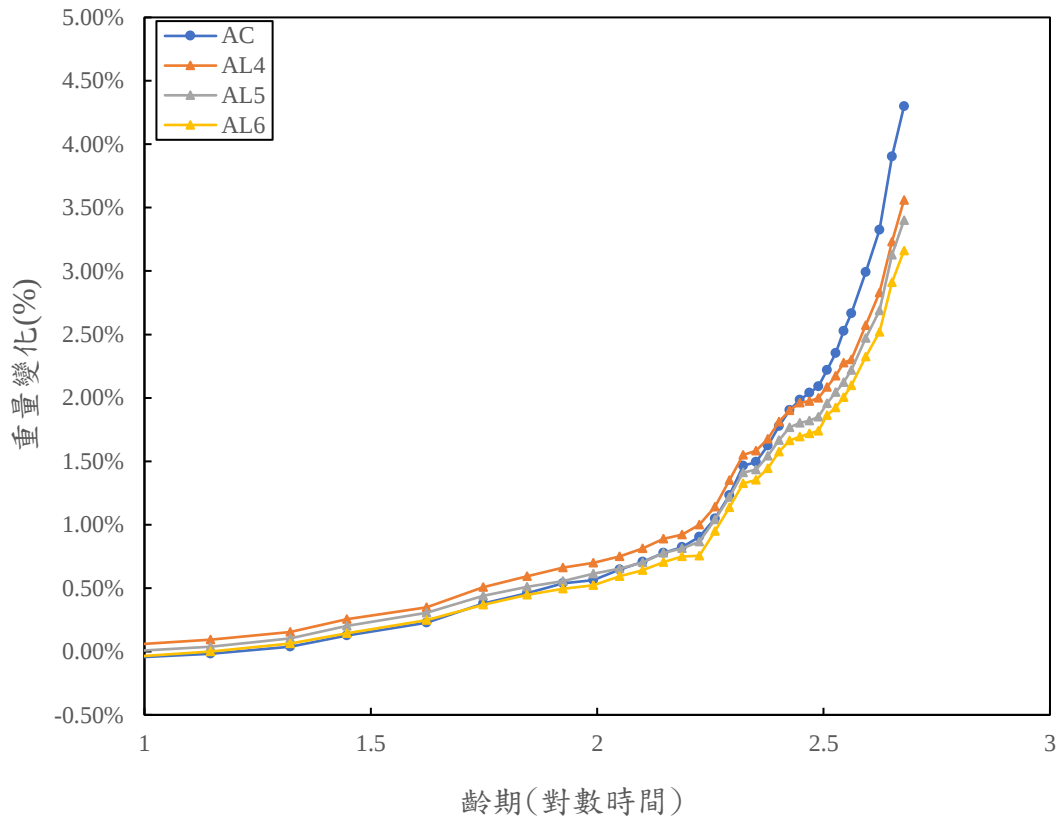


圖 4.3-6 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液(A)對數圖

圖 4.3-1 和圖 4.3-4 是 50 g/L 換水條件下的重量變化，在 50 g/L 換水條件下，各組樣品皆出現隨時間上升的重量變化趨勢。以天數為橫軸的圖表顯示，AC 組在 408 天左右的重量變化率最高，約為 4.18%，而 AL6 則相對較低，約為 3.65%。AL4 與 AL5 兩組在整體變化上則趨勢相近，顯示其受環境影響程度接近。若將時間以 $\log t$ 呈現，可以觀察到在 $\log t$ 大於約 2.2 後，所有樣品的重量變化皆開始明顯加劇，其中 AC 組最終達 2.1%，AL6 則最低為 1.85%，顯示高齡期下反應速度加快，且 AL6 有較佳的耐久性表現。

圖 4.3-2 和圖 4.3-5 是 200 g/L 換水條件下的重量變化與外觀破壞分析，當硫酸鹽濃度提升至 200 g/L 並持續更換溶液時，所有樣品的重量損失皆顯著增加。從圖 4.3-2 可見，至第 408 天左右，AC 組的重量損失達到最高，約 4.62%，而 AL6 組則為最低，約 3.75%，再次顯示 AL6 對於高腐蝕性環境具有較好的耐受性。AL4 與 AL5 的重量損失則約介於 4.0% 至 4.2% 之間，整體趨勢相對穩定。從圖 4.3-5 的 $\log t$ 圖來看，在 $\log t$ 約 2.6 時，所有樣品的重量損失

皆達高峰，AC 組仍為最顯著，其餘樣品則依序略低，整體趨勢清楚顯示出高濃度下換水操作會加速腐蝕反應進行。

特別值得注意的是，AC 組在高濃度換水條件下，於 360 天時即觀察到破裂現象，至 476 天時則出現明顯的大範圍破裂與崩解現象，顯示其在無摻料保護下，對硫酸鹽侵蝕的抵抗性明顯不足。此現象進一步說明，雖然 AL4~AL6 等摻料組的重量變化率略高，但其內部結構完整性與表面穩定性相對優於對照組，顯示摻料在延緩破壞擴展上具有實質效果。

圖 4.3-3 和圖 4.3-6 是 200 g/L 不換水條件下的重量變化與外觀破壞分析，在高濃度（200 g/L）但不更換溶液的條件下，樣品的重量損失幅度整體略低於換水組，顯示腐蝕反應因溶液濃度趨於飽和而較為緩和。從圖 4.3-3 觀察，AC 組最終重量損失約為 4.35%，AL6 組約為 3.50%，而 AL4 與 AL5 則維持在 3.9% 至 4.1% 左右，與換水條件下趨勢一致但整體值略為下降。log t 圖（圖 4.3-6）中亦顯示，所有組別於 $\log t \approx 2.6$ 附近皆出現損失高峰，但曲線整體變化較為平緩，說明腐蝕反應速度較慢。

此外，在不換水的條件下，AC 組雖仍出現重量損失較高的情形，但其破裂現象較晚發生，且破壞程度低於換水組。這表示雖然高濃度本身仍具破壞力，但當缺乏外來硫酸鹽持續補充時，AC 組內部受侵蝕程度可略為緩解，部分延後了表面劣化與結構崩解的時程。然而，整體而言，AC 組在 200 g/L 條件下的耐久性仍遠低於摻料組，顯示其缺乏反應緩衝與結晶控制機制，容易在後期遭受嚴重破壞。

綜合比較三種條件下的表現，可歸納以下結論：腐蝕程度排序：200 g/L 換水 > 200 g/L 不換水 > 50 g/L 換水。材料表現排序：AC 組普遍最差，AL6 則在各情境下均顯示出最佳耐久性，其重量變化與損失皆為最低。log t 分析價值：採用對數時間刻度可更清楚觀察高齡期腐蝕反應的加劇趨勢，特別是 $\log t > 2.2$ 以後反應加速顯著。

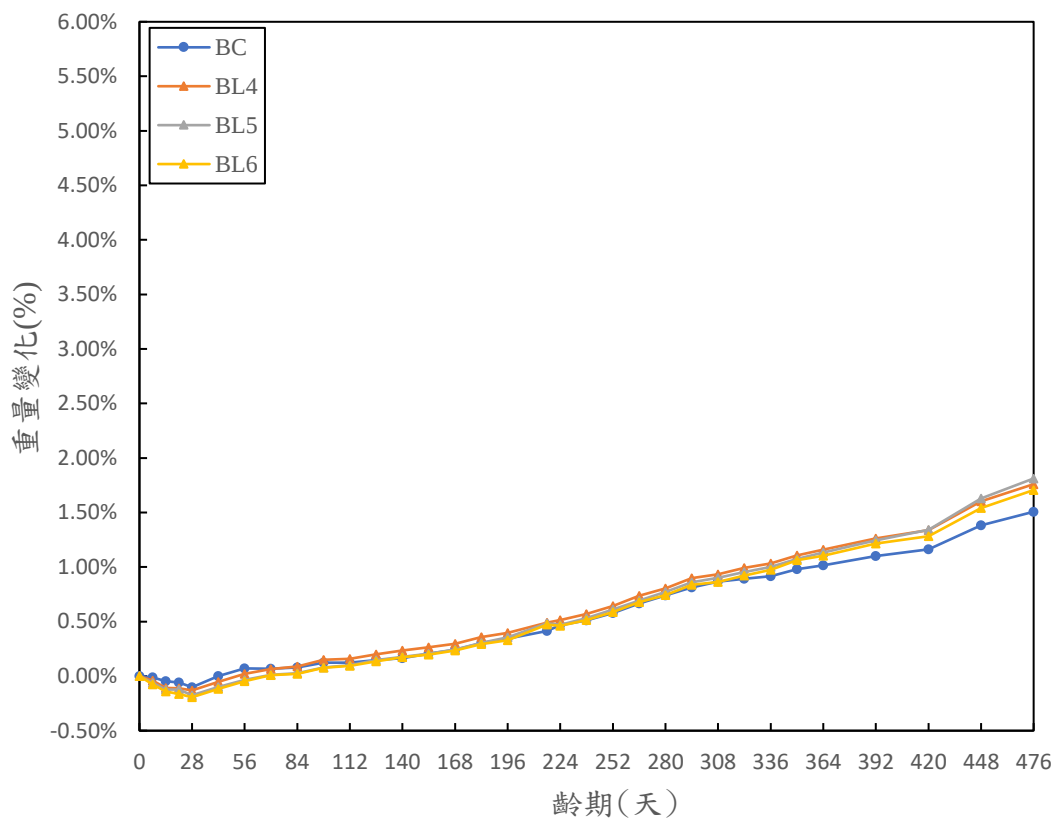


圖 4.3-7 50g/L 的硫酸鹽溶液(B)

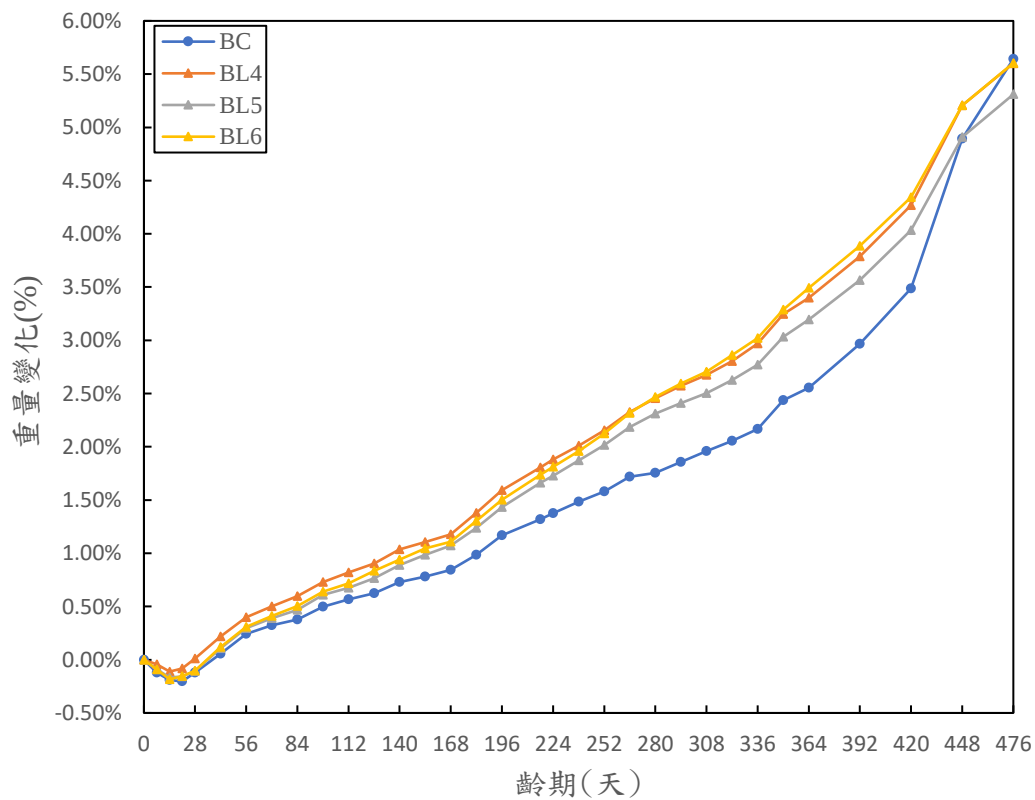


圖 4.3-8 200g/L 換水的硫酸鹽溶液(B)

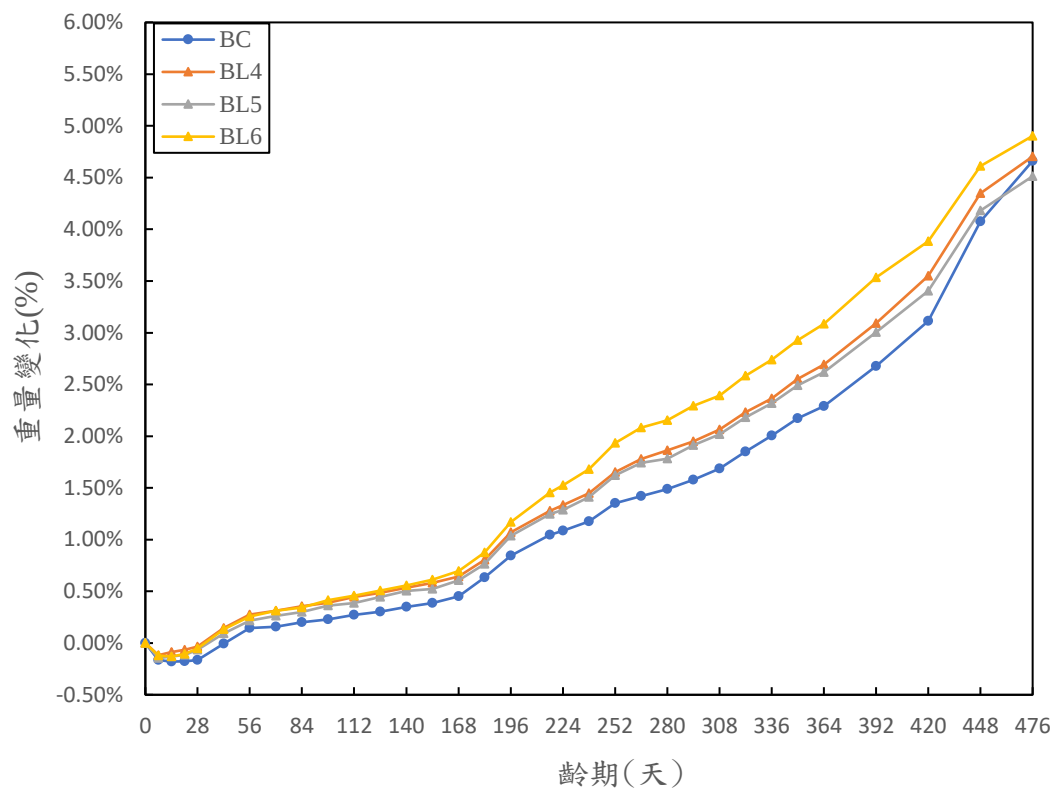


圖 4.3-9 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液(B)

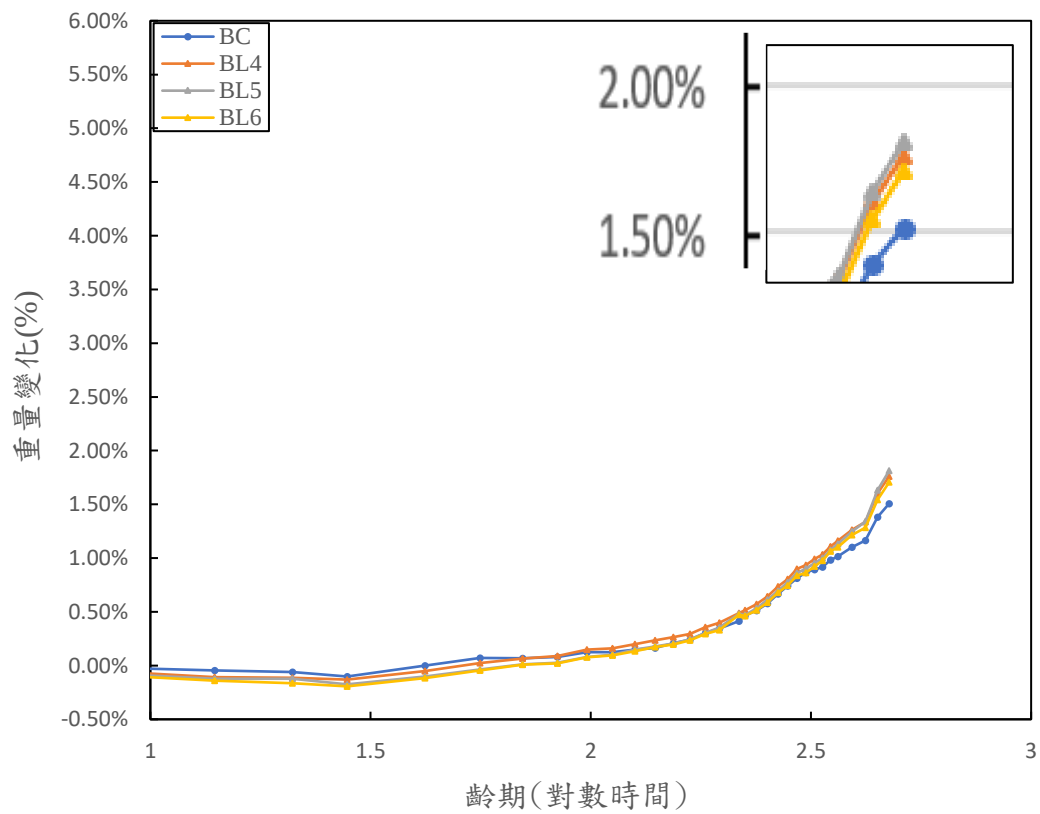


圖 4.3-10 50g/L 的硫酸鹽溶液(B)對數圖

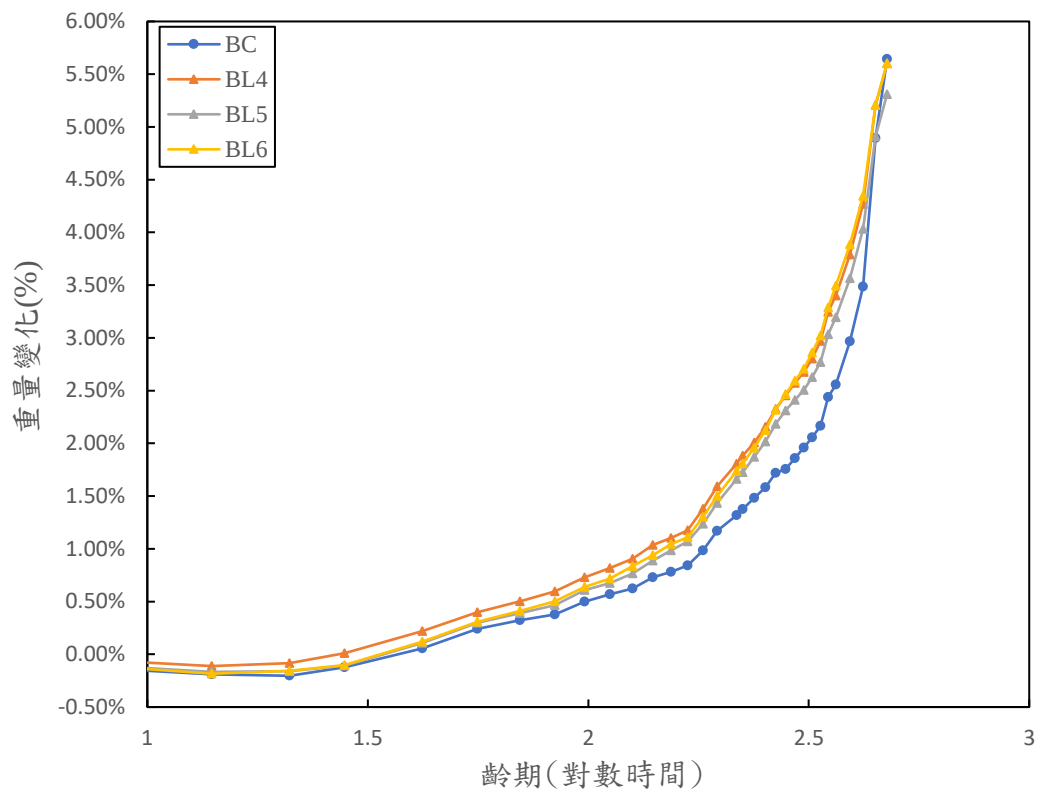


圖 4.3-11 200g/L 換水的硫酸鹽溶液(B)對數圖

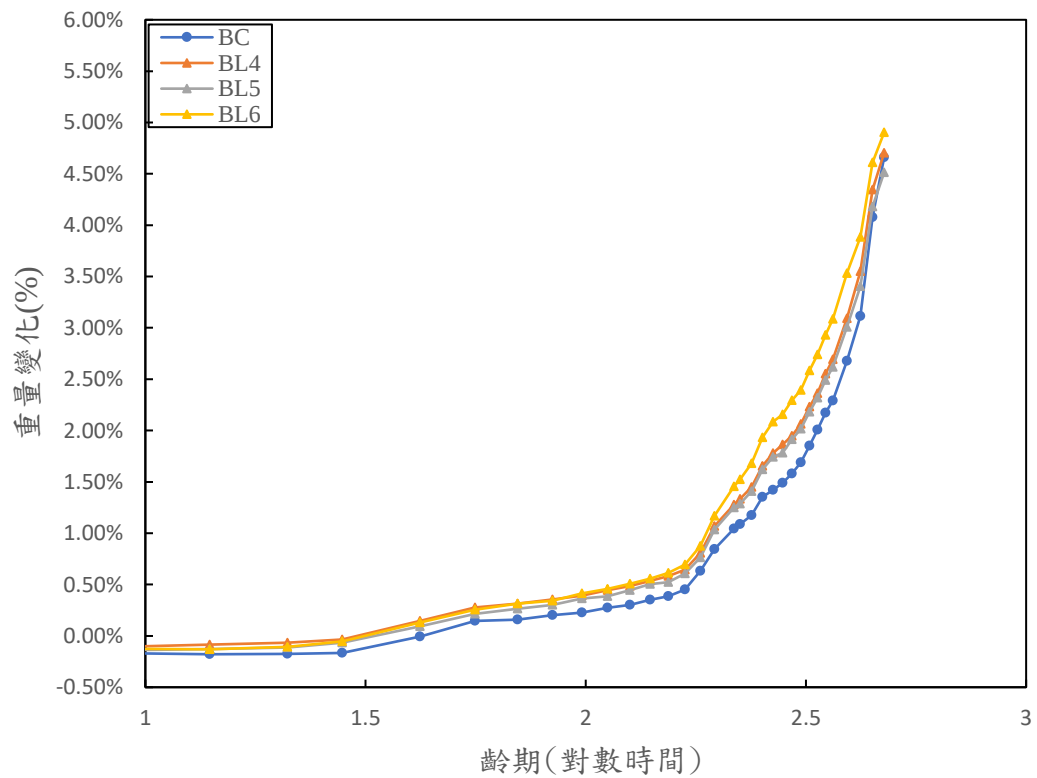


圖 4.3-12 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液(B)對數圖

圖 4.3-7 和圖 4.3-10 是 50 g/L 換水條件下之重量變化趨勢，在濃度較低（50 g/L）的硫酸鹽溶液中，各組樣品隨時間顯示出相對緩和的重量變化。以實驗天數為橫軸來觀察，至第 476 天時，BL6 組重量變化率最高，約為 1.63%，而控制組 BC 為最低，約 1.45%。BL4 與 BL5 的表現介於兩者之間，分別約為 1.50% 至 1.60%。當時間以對數（log t）尺度呈現時，各組曲線於 log t ≈ 2.6 至 2.8 之間出現明顯轉折與上升，說明反應速率在長期曝露下有所加劇，但整體腐蝕行為仍屬緩慢。此結果顯示，在較低濃度與換水條件下，雖然仍有硫酸鹽侵蝕作用，但其影響相對有限，尤其以 BC 組重量變化表現最為穩定。

圖 4.3-8 和圖 4.3-11 是 200 g/L 換水條件下之重量變化與外觀破壞分析，當硫酸鹽濃度提升至 200 g/L 且持續換水時，各組樣品的重量變化率皆大幅上升，反映出腐蝕反應顯著加劇。實驗至第 476 天時，BL6 組重量變化率最高，約 5.60%，其次為 BL5（5.50%）、BL4（5.40%），控制組 BC 則略低，約 5.10%。log t 曲線呈現出類似趨勢，在 log t 約 2.6 至 2.8 之間急遽上升，顯示隨曝露時間累積，腐蝕破壞反應明顯加劇。

然而，儘管 BC 組在數據上表現為最低重量變化，其實際外觀破壞卻是最為嚴重，包括明顯的表面剝落、粉化與裂縫生成等。這顯示出重量變化率未必能充分反映材料耐久性或破壞型態。BC 組因未摻入任何礦物摻料，缺乏可與硫酸根反應生成穩定產物的能力，導致硫酸鹽侵入後迅速與水化鈣產生膨脹性產物（如石膏、硫鋁酸鹽等），造成更劇烈的表層劣化。相對地，BL4 至 BL6 雖然重量損失較高，但外觀保存較佳，顯示其摻料成分具備一定的抑制膨脹性破壞機制，有助於延緩材料劣化進程。

圖 4.3-9 和圖 4.3-12 是 200 g/L 不換水條件下之重量變化與外觀破壞分析，在同樣 200 g/L 高濃度硫酸鹽環境下，若不進行換水，樣品整體重量變化仍顯著，但比起換水條件略為緩和。至第 476 天時，BL6 約為 5.35%，BL5 約 5.25%，BL4 約 5.20%，控制組 BC 則為約 4.90%。由 log t 曲線可觀察到所有樣品同樣在 log t 約 2.6 至 2.8 時段急遽上升，顯示反應隨時間累積仍不可忽

視。不過，不換水條件下，由於溶液中硫酸鹽濃度逐漸趨於飽和，反應速率略為降低，腐蝕進程略微延緩。

值得注意的是，即便 BC 組的重量變化依然最低，其外觀損壞仍為最明顯，顯示其雖可能在初期尚具一定穩定性，但缺乏摻料保護下，對於膨脹性腐蝕產物的抑制效果較差，易導致表面劇烈劣化。BL4~BL6 組雖然數值略高，但外觀整體較為完整、裂縫與剝落相對輕微，進一步印證摻料在硫酸鹽環境中扮演的補強與緩衝角色。此一差異再次說明：重量變化率應結合外觀或微觀分析綜合判讀，方能全面評估材料耐久性。

在本研究中，觀察到硫酸鹽濃度對混凝土劣化行為具有顯著影響。當濃度提升至 200 g/L 時，無論是否更換溶液，樣品的重量損失皆較 50 g/L 條件明顯增加，顯示外部硫酸根離子濃度越高，腐蝕反應越加劇烈。進一步比較換水與不換水條件下的表現可發現，持續更換溶液會加速硫酸根進入試體內部，進一步與水化產物反應，形成膨脹性產物如石膏或硫鋁酸鹽，導致材料重量增加或結構破壞。log t 分析則顯示，腐蝕行為在長期曝露下具有遞增特性，大多樣品在 log t 約 2.6 至 2.8（對應 360 至 476 天）時，重量變化率迅速上升，顯示硫酸鹽侵蝕屬於長期累積型破壞機制。

此外，試驗中亦觀察到部分樣品雖重量變化率相對較低，但外觀已出現明顯劣化，如表面粉化、裂縫與大面積剝落，特別是在高濃度換水條件下，有試體於 360 天即發生破裂，至 476 天則觀察到嚴重崩解。此結果指出，重量損失率雖可作為腐蝕程度指標，但未必能全面反映材料耐久性，仍須結合外觀觀察與微觀分析進行整體判斷。同時也顯示材料本身的抗侵蝕能力與其組成、結構致密性以及反應後產物的穩定性有關，未來可針對摻料設計進行進一步優化，以提升混凝土於硫酸鹽環境下的整體耐久性。



圖 4.3-13 試體外觀(50g/L 換水)(A)



圖 4.3-14 試體外觀(50g/L 換水)(B)



圖 4.3-15 試體外觀(200g/L 換水)(A)



圖 4.3-16 試體外觀(200g/L 換水)(B)



圖 4.3-17 試體外觀(200g/l 不換水)(A)



圖 4.3-18 試體外觀(200g/l 不換水)(B)

4.4.石灰石水泥搭配不同爐灰比的水泥砂漿

本研究針對石灰石水泥搭配不同爐石與飛灰摻料之水泥砂漿進行硫酸鹽侵蝕試驗，設計三種不同浸泡條件，分別為 50 g/L 及 200 g/L 濃度之硫酸鈉溶液，其中前兩者每兩個月更換溶液一次，後者則為高濃度且不更換溶液，以模擬不同服役環境下的侵蝕狀況。試體於標準養護 28 天後進行抗壓強度檢測，確認皆達 20 MPa 以上後方投入硫酸鹽溶液中，觀察其至第 140 天之耐久性變化。硫酸鹽侵蝕主要發生於硫酸根離子與水泥水化產物反應生成膨脹性物質（如石膏與針狀 ettringite），導致材料膨脹、開裂與強度衰退。摻入爐石與飛灰可降低自由 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量並生成致密結構，進而提升抗侵蝕能力，而石灰石水泥則因含 CaCO_3 能穩定部分 C_3A 反應產物，對硫酸鹽亦具一定抑制效果。

4.4.1.方塊抗壓強度 28 天

本試驗針對十組不同礦物摻料配比之水泥砂漿進行 28 天抗壓強度測試，結果顯示各組強度介於 304 至 449 kgf/cm^2 之間。整體而言，以純卜特蘭水泥（C）組表現最佳，平均抗壓強度達 449.40 kgf/cm^2 ，顯示其在早期水化階段反應完整、強度發展迅速。而單獨使用石灰石水泥（L）組，其平均強度為 407.11 kgf/cm^2 ，略低於 C 組但仍具良好早期性能。

摻入 50% 爐石的 CS50 與 LS50 組別，平均強度分別為 406.05 與 374.55 kgf/cm^2 ，雖略低於 C 與 L 組，但仍維持穩定，顯示爐石反應雖較慢，但生成致密結構有助於後期強度發展。雙摻爐石與飛灰之組別中，LS35F15（石灰石水泥 + 35% 爐石 + 15% 飛灰）表現尤為突出，平均強度達 416.93 kgf/cm^2 ，為全組第二高，顯示石灰石與礦物摻料間具有良好協同效果；而 CS35F15 平均強度僅為 379.20 kgf/cm^2 ，略低於石灰石對應組，反映水泥種類對摻料反應機制具影響性。

在飛灰單獨摻入 25% 者中，CF25 組平均強度為 341.96 kgf/cm^2 ，屬於中低等級；然而 LF25 組則達 406.93 kgf/cm^2 ，表現顯著優於 CF25，顯示石灰石水泥能

補償飛灰早期反應不足的弱點。而在高飛灰摻量（30%）組別中，CS35F30 與 LS35F30 分別為 304.05 與 323.72 kgf/cm²，為所有配比中最低，推測飛灰過高比例明顯抑制早期水化反應與強度形成，不利於短期性能發展。

綜合分析，適量摻入爐石與飛灰可提升石灰石水泥砂漿的力學性能，尤以 LS35F15 表現最佳，不僅維持高強度，亦具備潛在的長期耐久性發展潛力。而過高飛灰比例雖對後期耐久性有助，但需考量初期強度不足之問題。

表 4.4-1 方塊抗壓強度 28 天

配比	抗壓強度			平均(kgf/cm ²)
	1	2	3	
CM	435.20	474.72	438.28	449.40
LM	407.36	404.00	409.96	407.11
CS50M	401.56	410.12	406.48	406.05
LS50M	392.64	366.92	364.08	374.55
CS35F15M	377.88	370.92	388.80	379.20
LS35F15M	415.12	421.96	413.72	416.93
CF25M	337.36	354.96	333.56	341.96
LF25M	376.20	453.36	391.24	406.93
CS35F30M	295.04	318.36	298.76	304.05
LS35F30M	318.48	327.32	325.36	323.72

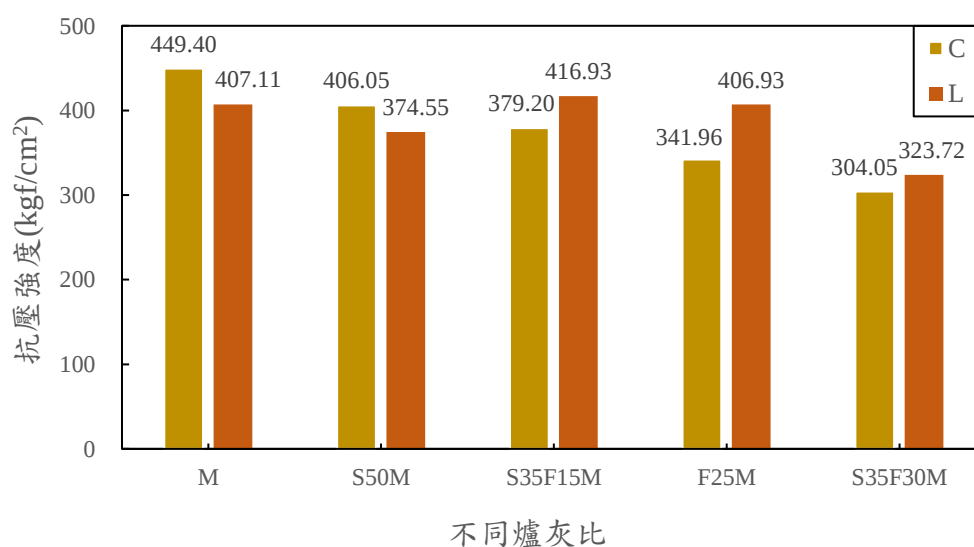


圖 4.4-1 方塊 28 天抗壓強度

由圖 4.4.1 可進一步觀察各組配比於 28 天齡期之抗壓強度差異，圖中比較 C 系（卜特蘭水泥）與 L 系（石灰石水泥）於相同礦物摻料條件下之表現。結果顯示，在 S35F15M 與 F25M 兩組中，L 系強度分別較 C 系高出約 38 與 65 kgf/cm²，顯示石灰石水泥搭配適量爐石與飛灰有助於提升早期抗壓性能，推測其原因可能與石灰石微粒促進水化反應以及形成穩定矽酸鈣膠體結構有關。

反之，在 S50M 與 S35F30M 組中，C 系強度略優於 L 系，推測高比例爐石或飛灰取代會稀釋有效水泥量，導致石灰石水泥於早期強度發展上的補償作用受限。此外，M 組（無摻料）中則可見 C 系明顯優於 L 系，符合一般對純水泥早期強度發展較快之理解，亦作為整體比較之基準。

整體而言，石灰石水泥於摻入適量礦物摻料（特別是 35% 爐石 + 15% 飛灰或 25% 飛灰）時可展現良好早期強度，甚至優於對應 C 系組別，顯示其具備作為綠色水泥替代材料之潛力。然而在高飛灰取代下，早期強度普遍偏低，須依使用需求調整配比以兼顧強度與耐久性發展。

4.4.2. 硫酸鹽浸泡試驗-重量變化

圖 4.4-2 至圖 4.4-7 為不同硫酸鹽濃度與養護條件下之試體外觀對照圖，旨在探討硫酸根離子對水泥試體耐久性之影響。

在低濃度硫酸鹽溶液（50 g/L）中（圖 4.4-2、圖 4.4-3），試體整體外觀變化輕微，表面僅觀察到局部邊角色澤變淡或細微白化現象，無明顯龜裂或剝落。此結果顯示，在較低侵蝕性環境下，試體具有良好的穩定性與抗硫酸鹽侵蝕能力。

相較之下，置於高濃度硫酸鹽溶液（200 g/L）且定期換水條件下之試體（圖 4.4-4、圖 4.4-5），其外觀劣化現象顯著增加。試體邊角出現破損、表面泛白及粉化現象，局部甚至可見微裂紋，顯示長期暴露於高濃度、持續供應硫酸根離子環境中，會加劇硫酸鹽侵蝕反應，進而導致結構劣化與耐久性下降。而在相同濃度但不更換溶液的條件下（圖 4.4-6、圖 4.4-7），試體亦有明顯外

觀變化，如表面粗糙、白色結晶析出等，但劣化程度相對較低。推測因長期浸泡導致溶液濃度逐漸降低或接近飽和，反應動力趨緩，使得試體受損程度相對減緩。整體而言，試體外觀變化與硫酸鹽濃度及養護條件具高度關聯，尤其高濃度且定期更換溶液之條件最具破壞性，後續應搭配質量損失率與力學強度進行整合討論。



圖 4.4-2 試體外觀(50g/L 換水)



圖 4.4-3 試體外觀(200g/L 換水)



圖 4.4-4 試體外觀(200g/L 不換水)

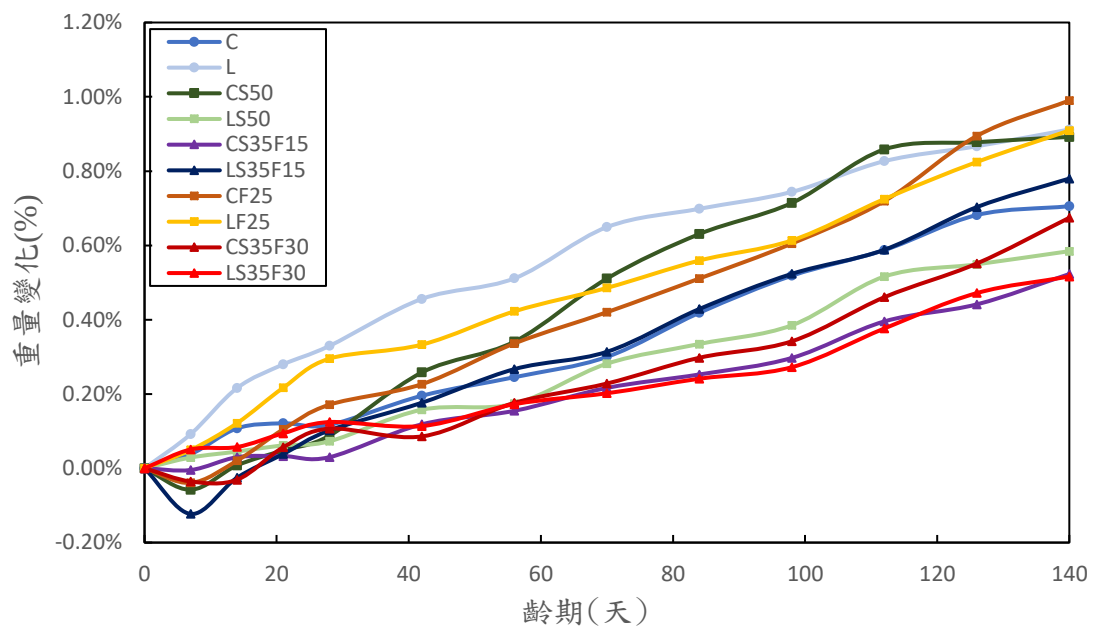


圖 4.4-5 50g/L 的硫酸鹽溶液

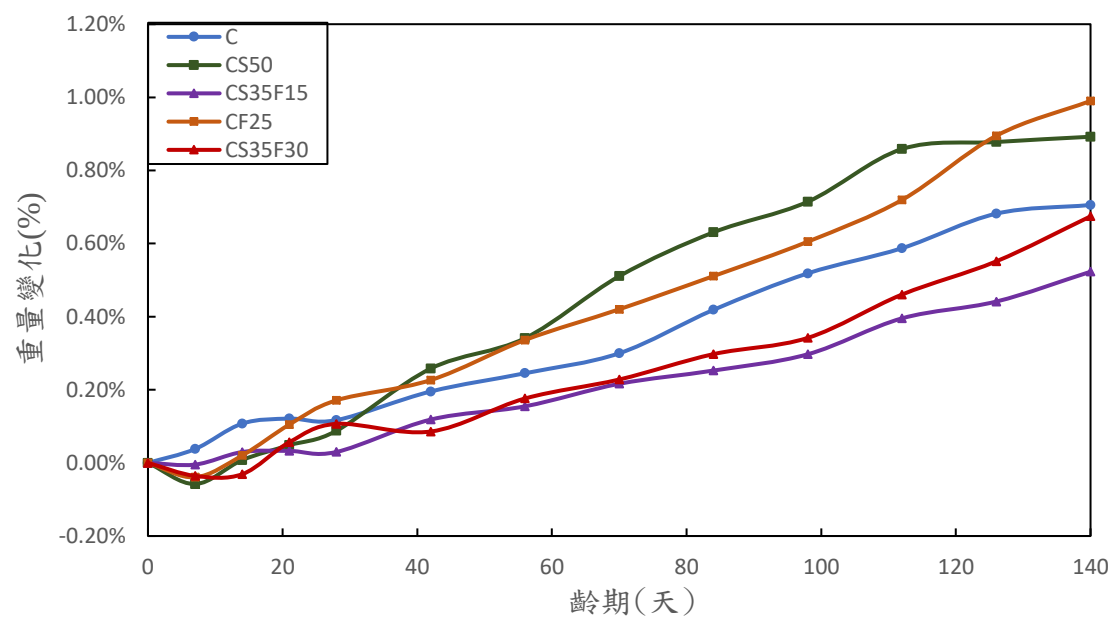


圖 4.4-6 50g/L 的硫酸鹽溶液 (C 組)

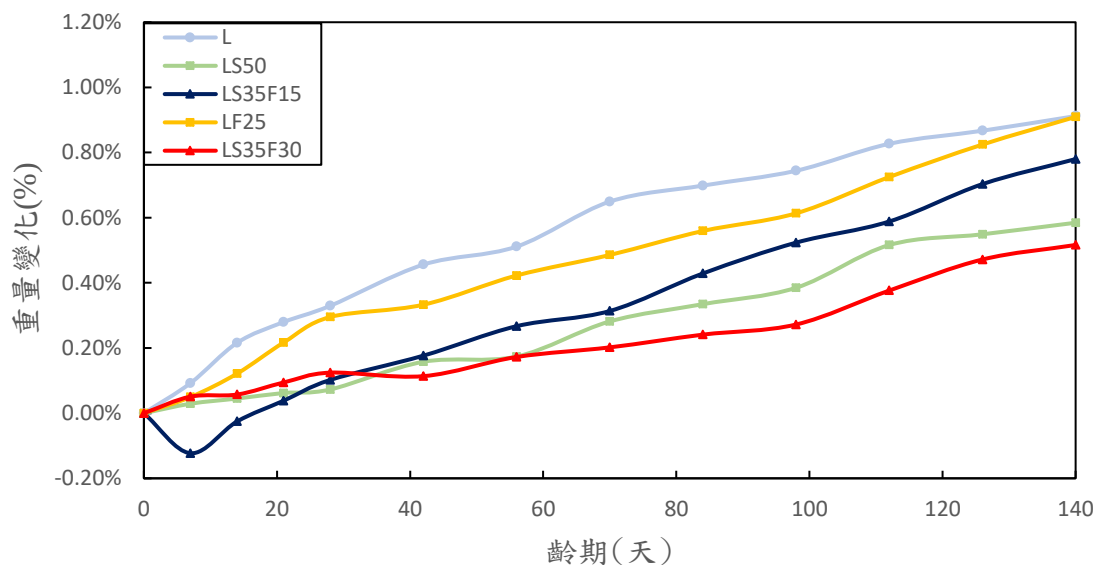


圖 4.4-7 50g/L 的硫酸鹽溶液 (L 組)

圖 4.4-5 顯示，L 組（石灰石水泥）與 LF25（含飛灰之石灰石水泥）的質量增加率高於 C 組（一般水泥），並於 140 天時分別達約 0.95% 與 0.90%，而控制組 C 約為 0.80%。此說明石灰石水泥在硫酸鹽環境中雖可抑制部分溶解性反應，但生成物的體積膨脹與填塞作用可能更明顯，導致外部質量增加較快。

圖 4.4-6 顯示，進一步比較 C 系列組別可見，CS50（C + 爐石 50%）於中後期產生最大質量增幅，140 天時達約 1.05%，高於 C 組及其他取代組（CS35F15、CF25、CS35F30）。此顯示高爐石取代雖有潛在化學穩定性；其中 CS35F15 與 CS35F30 則表現較穩定，顯示摻配飛灰有助於降低質量變異程度，減緩侵蝕副作用。

圖 4.4-7 顯示，L 系列各組整體呈質量遞增趨勢，其中 L（基準組）與 LF25（飛灰 25%）皆高於其他配比組，特別是 LF25 接近 0.95%。相對地，摻配爐石或飛灰比例較高者（如 LS35F15 與 LS35F30）則展現出相對較低之質量變化率（<0.6%），顯示此類三元膠材設計有助於控制反應物生成與擴散，進而降低長期劣化風險。

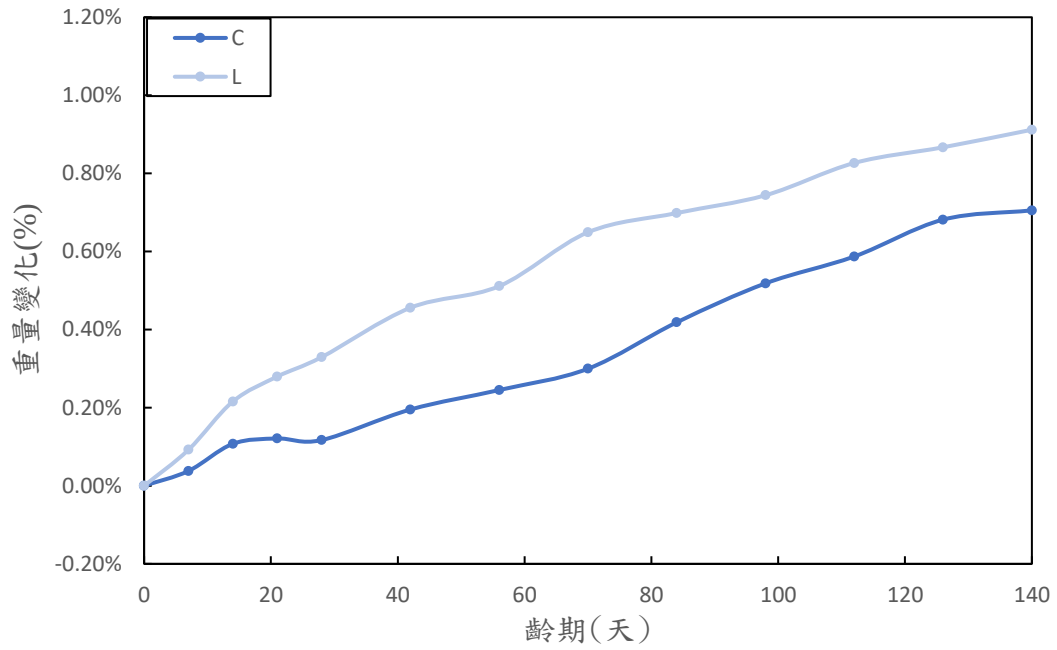


圖 4.4-8 50g/L 的硫酸鹽溶液 (純水泥組)

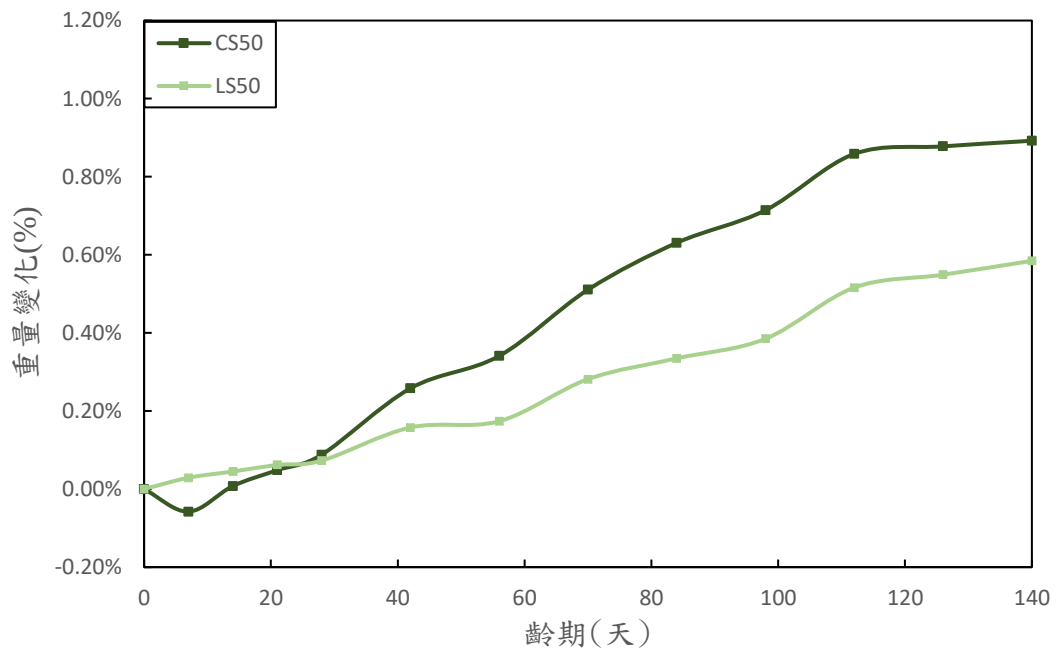


圖 4.4-9 50g/L 的硫酸鹽溶液 (50%爐石組)

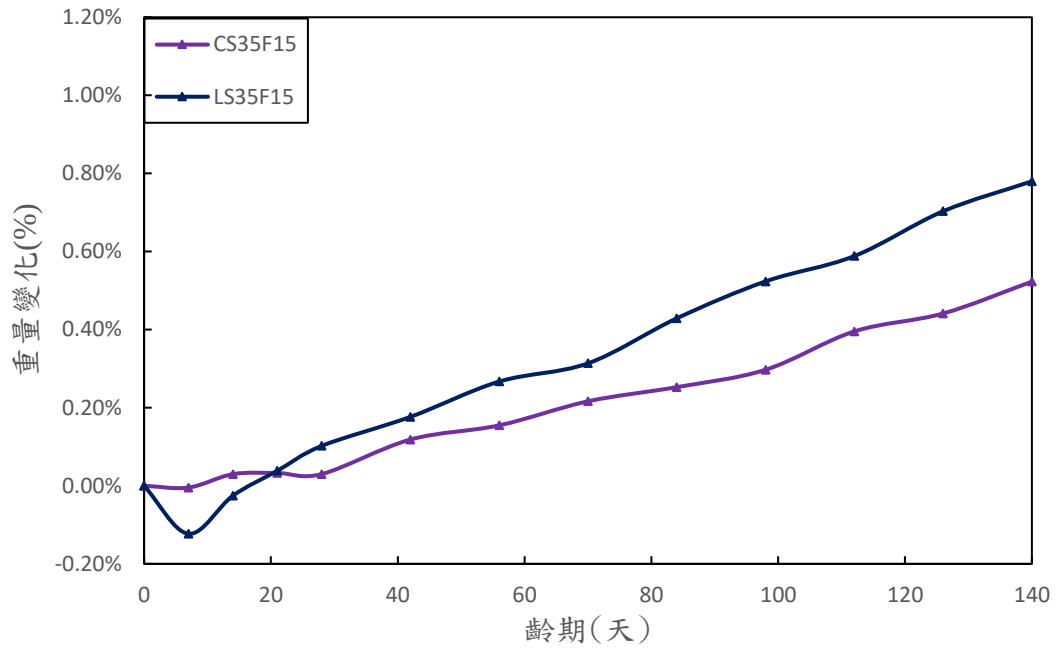


圖 4.4-10 50g/L 的硫酸鹽溶液 (35%爐石+15%飛灰組)

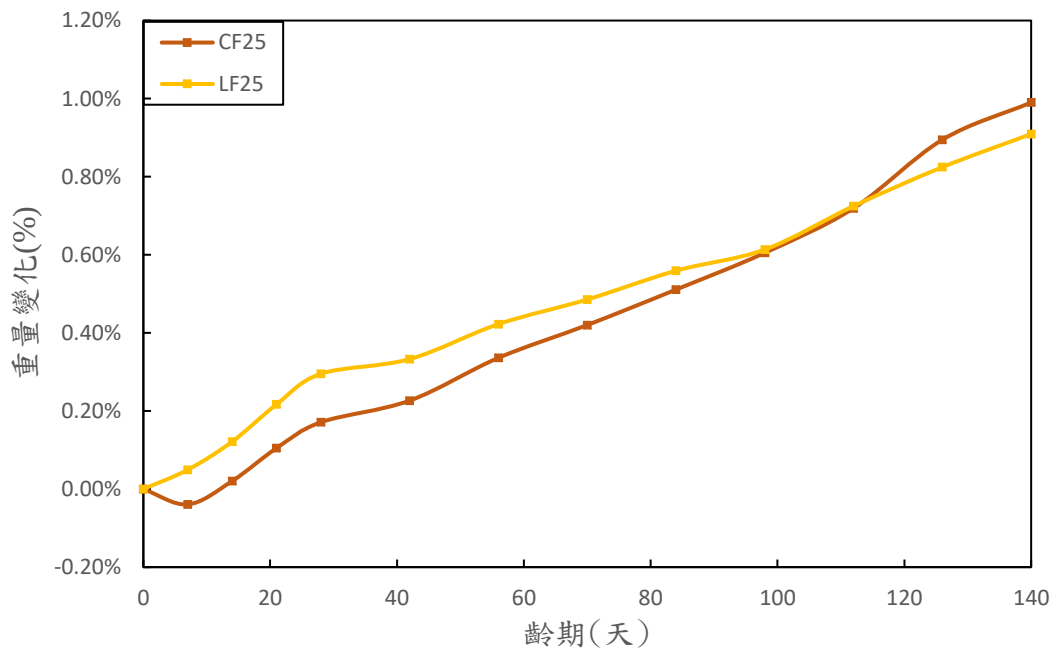


圖 4.4-11 50g/L 的硫酸鹽溶液 (25%飛灰組)

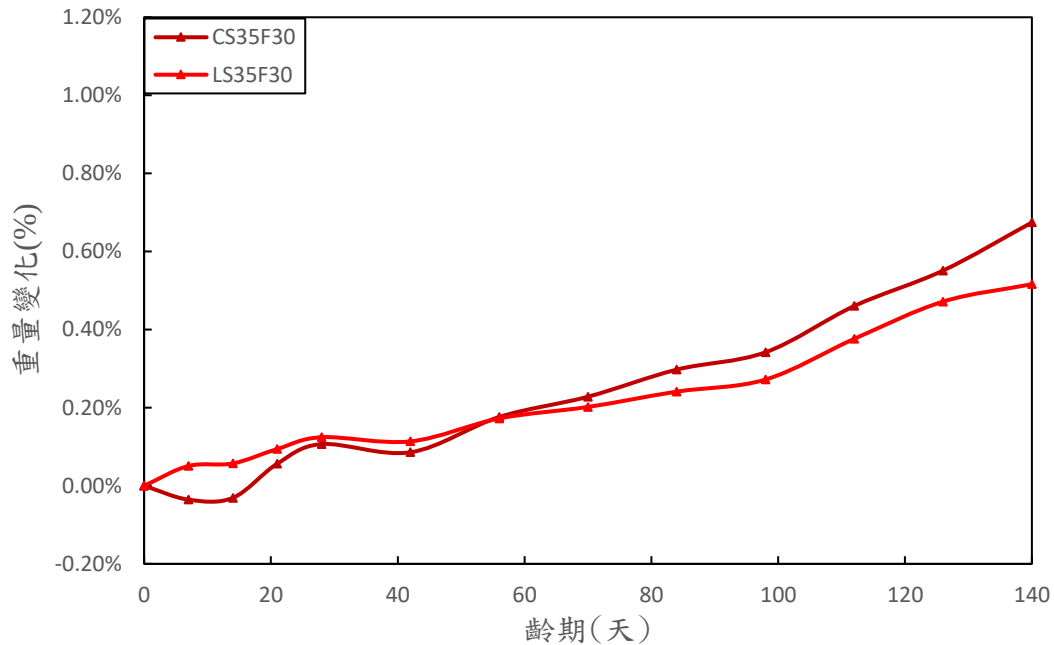


圖 4.4-12 50g/L 的硫酸鹽溶液 (35%爐石+30%飛灰組)

圖 4.4-8 至圖 4.4-12 顯示不同膠結材料配比於 50 g/L 硫酸鹽溶液中浸泡至第 140 天的質量變化率趨勢。整體而言，各組試體質量變化率皆隨齡期增加而上升，推測與硫酸鹽與水化產物反應後所生成之石膏、矽酸鈣水合物衍生成物（如 Aft 等）於孔隙中填塞或沉積有關，導致質量逐漸增加。

如圖 4.4-8 所示，C 組（一般水泥）與 L 組（石灰石水泥）在前期（0~50 天）變化趨勢相近，但中後期 L 組質量變化顯著增加，最終達 0.95%，高於 C 組之 0.80%。此顯示石灰石水泥雖具促進早期反應的能力，但在硫酸鹽環境下可能加速膨脹產物生成與累積。

進一步觀察摻配單一礦物摻料的配比（圖 4.4-9、圖 4.4-10），可見 CS50（C + 爐石 50%）與 LF25（L + 飛灰 25%）之質量變化率分別為 1.05% 與 0.95%，均為各自系列中變化幅度最大者。此結果顯示，單一高比例的爐石或飛灰雖可改善水化反應與微結構，但在長期硫酸鹽暴露下反而容易導致副產物聚集，進一步導致質量上升。

相比之下，三元膠結材料組表現更為穩定。圖 4.4-11 與圖 4.4-12 顯示，CS35F15、LS35F15、CS35F30、LS35F30 等組別於全齡期呈現緩慢穩定上升趨

勢，最終變化率介於 0.50% 至 0.70% 間，遠低於其他單一摻料或基準組。此現象顯示，適當搭配爐石與飛灰可平衡其化學與微結構優勢，提升系統整體穩定性並降低硫酸鹽入侵反應之敏感度。

綜合分析結果如下：質量變化最高組別為 CS50（1.05%）與 LF25（0.95%），反映高摻量單一摻料可能促使過量副產物生成。C 與 L 組表現中等，石灰石水泥雖早期穩定，但後期反應加劇仍導致質量增加。三元系配比（CS35F15、CS35F30、LS35F15、LS35F30）表現最佳，證實其在硫酸鹽環境下之長期穩定性與耐久性較佳，為後續工程應用之優選組合。

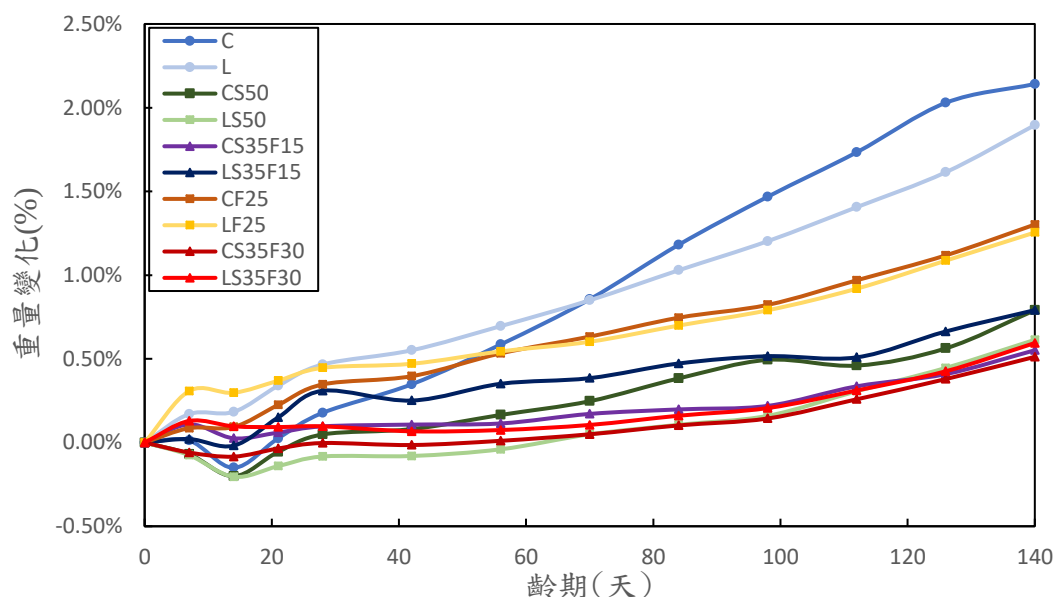


圖 4.4-13 200g/L 換水的硫酸鹽溶液

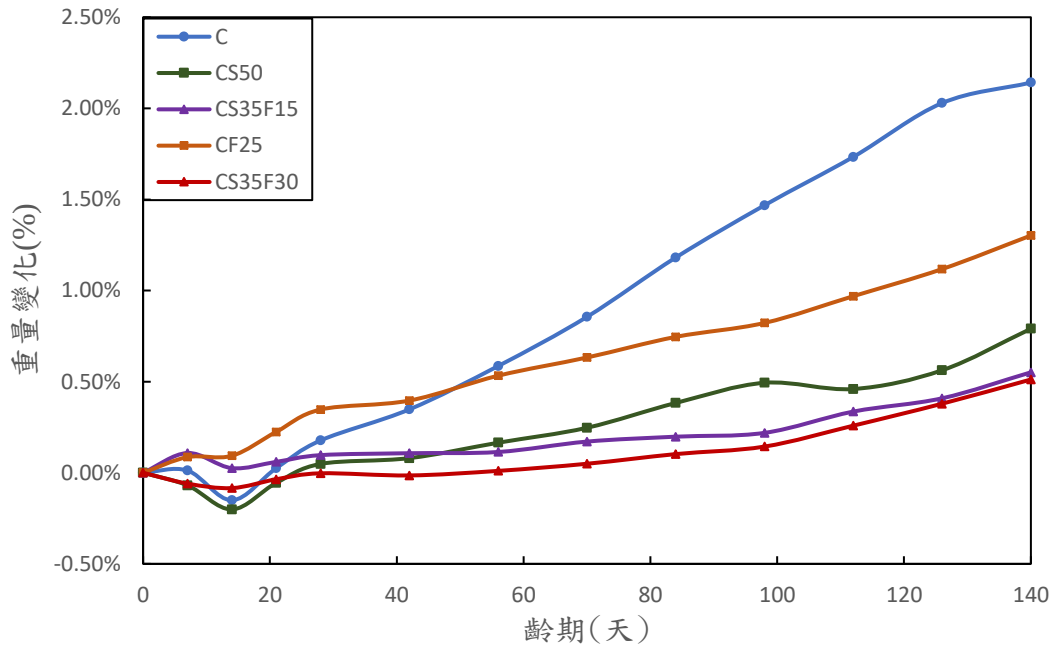


圖 4.4-14 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (C 組)

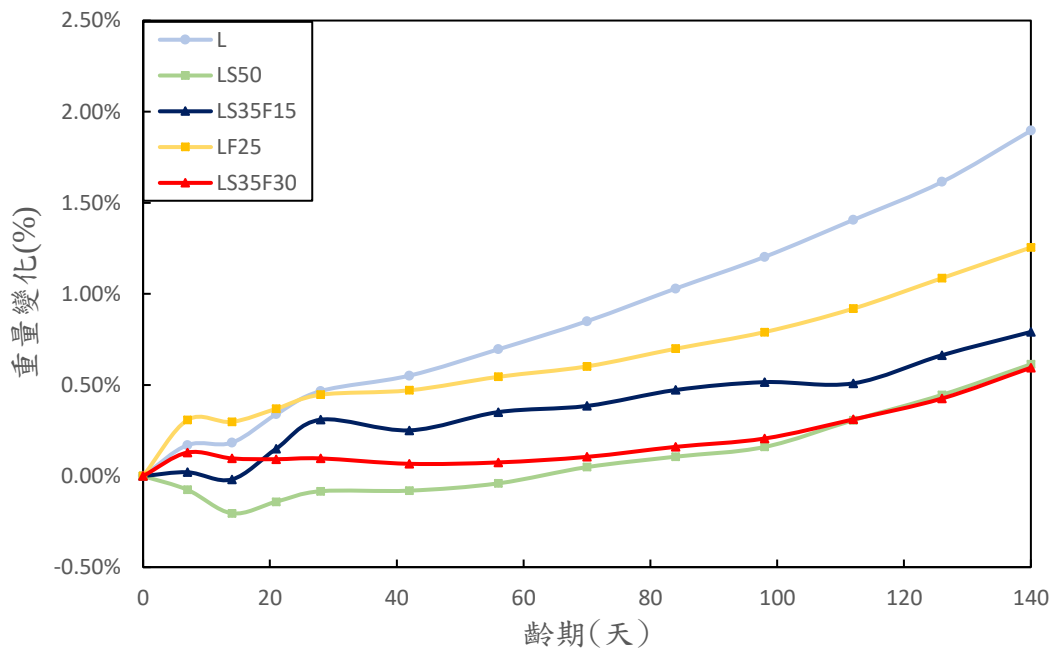


圖 4.4-15 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (L 組)

圖 4.4-13 至圖 4.4-15 顯示各配比試體在高濃度硫酸鹽溶液（200 g/L）並定期換水之條件下，其質量變化率隨齡期變化之趨勢。結果顯示，所有試體之質量均呈持續上升，且變化幅度明顯高於 50 g/L 組，顯示換水操作有助於維持硫酸根濃度與反應活性，進一步加劇材料劣化與反應產物的累積。

如圖 4.4-13 所示，C 組與 L 組分別為一般水泥與石灰石水泥基準配比，於 140 天時其質量變化率分別達 2.15% 與 1.80%，為所有試體中變化幅度最高者，顯示傳統膠結材料在高濃度硫酸鹽環境中極易受到侵蝕與副產物聚集影響。

圖 4.4-14 為一般水泥（C 組）系列之比較。摻配單一摻料如 CS50（爐石 50%）與 CF25（飛灰 25%）可部分降低質量變化，最終變化率約為 1.0% 至 1.2%。而摻配雙摻礦物摻料之三元系，如 CS35F15 與 CS35F30 則表現最為穩定，其質量變化率分別低於 0.8% 與 0.7%。此結果顯示，在高侵蝕性環境中，單一礦物摻料雖具抑制效果，但仍難以完全遏制反應副產物之聚集，需透過三元設計達成孔隙緻密化與反應控制之雙重效果。

圖 4.4-15 為石灰石水泥（L 組）系列之比較結果。L 組雖具早期水化促進優勢，但長期在高濃度硫酸鹽環境中表現劣於摻料組，其質量變化率最高。摻配單一爐石或飛灰者（LS50、LF25）變化幅度稍低，但仍約在 0.9% 至 1.3%。而三元系如 LS35F15 與 LS35F30 則顯示相對穩定，最終質量變化率低於 0.8%，與 C 組三元組相近，驗證此類配比具備良好長期穩定性與抗硫酸鹽劣化能力。

綜合分析如下：C 與 L 組為質量變化最大者，高達 2% 以上，顯示未摻礦物摻料之傳統配比在高濃度條件下易受侵蝕；CS50、LF25、CF25 等單一摻料組雖可抑制部分反應，但仍有超過 1% 的變化幅度；CS35F15、CS35F30、LS35F15、LS35F30 等三元系配比表現最為穩定，最終變化率多控制在 0.6%~0.8% 之間，驗證其於高濃度硫酸鹽條件下之優越耐久性。

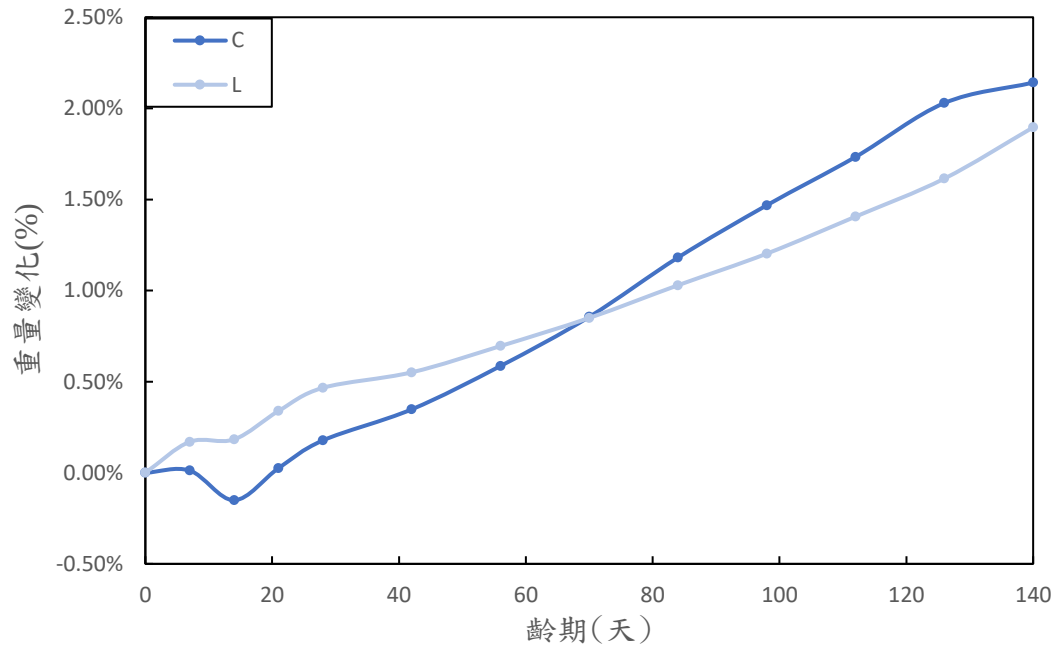


圖 4.4-16 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (純水泥組)

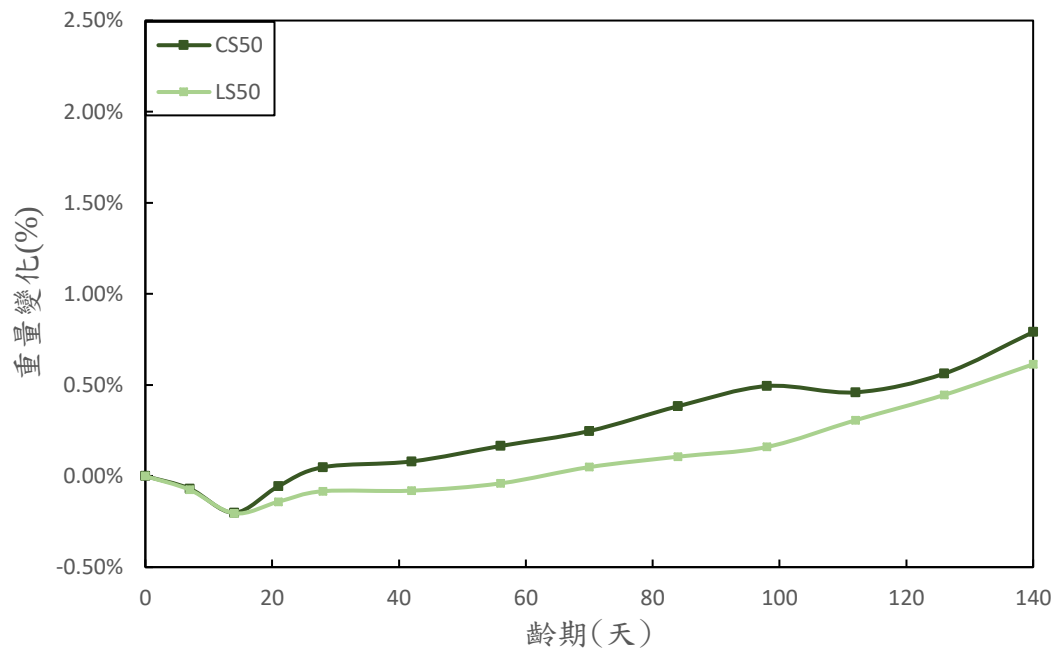


圖 4.4-17 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (50%爐石組)

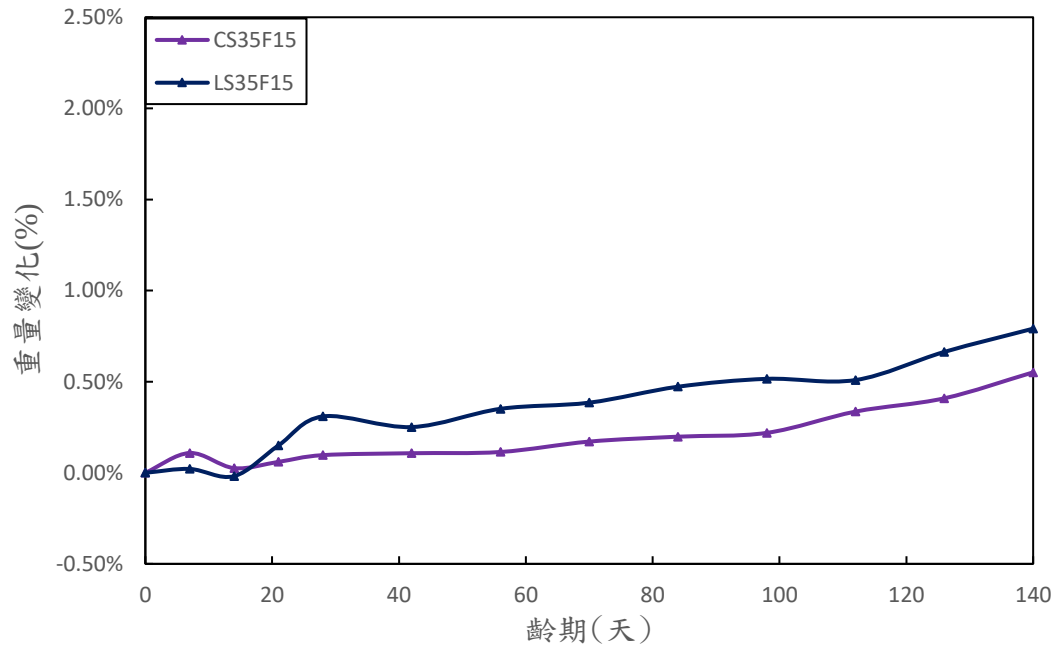


圖 4.4-18 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (35%爐石+15%飛灰組)

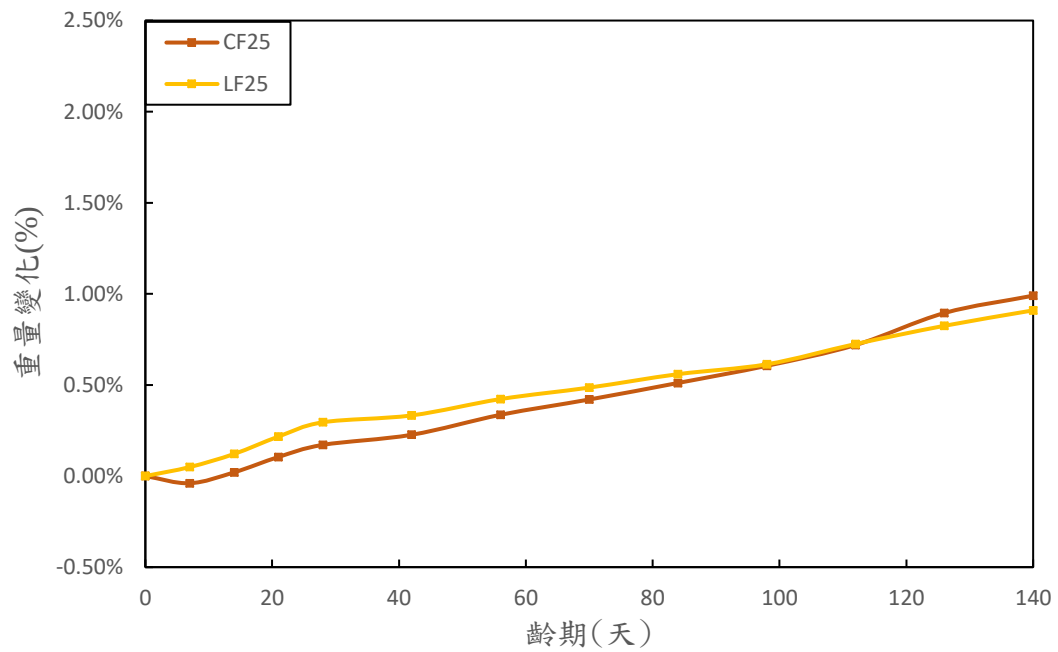


圖 4.4-19 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (25%飛灰組)

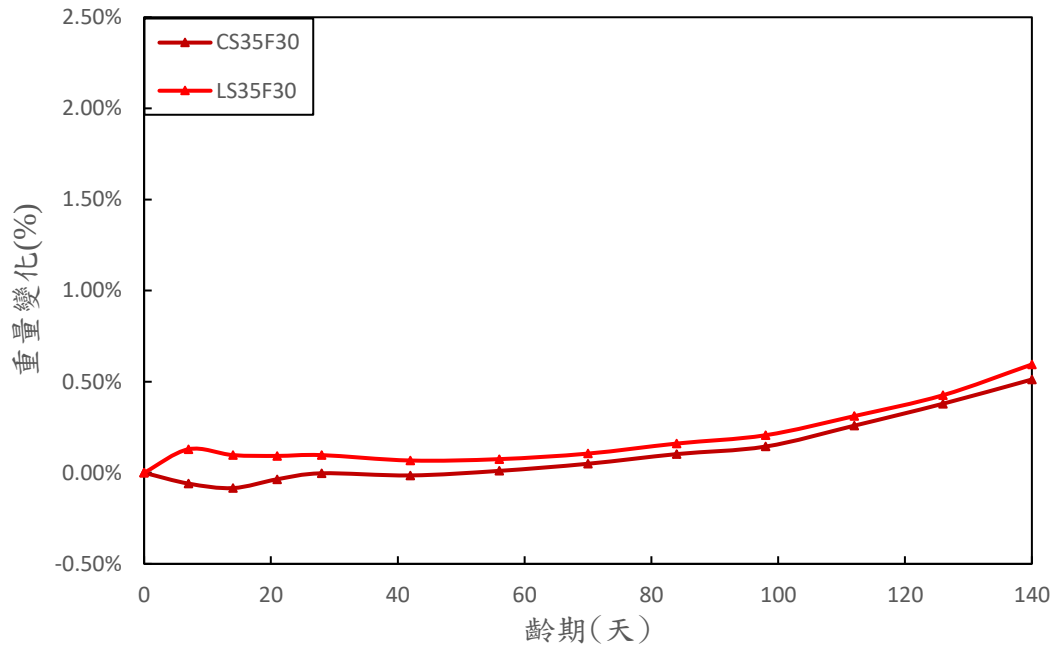


圖 4.4-20 200g/L 換水的硫酸鹽溶液 (35%爐石+30%飛灰組)

圖 4.4-16 至圖 4.4-20 分別呈現不同膠結材料配比（含基準組、單一礦物摻料組及三元系）在 200 g/L 硫酸鹽溶液並定期換水條件下，140 天內之質量變化率比較。結果顯示，膠結材配比對於硫酸鹽侵蝕下質量變化行為有顯著影響。

圖 4.4-16 是純水泥組（C、L），C 組（一般水泥）與 L 組（石灰石水泥）分別達約 2.15% 與 1.80%，為所有組別中質量變化幅度最大者。說明兩者在高濃度且硫酸鹽更新頻繁的環境下，極易與侵蝕離子反應，生成大量膨脹性產物（如石膏與 Aft），導致質量快速上升，且可能伴隨後續劣化風險。

圖 4.4-17 是單一爐石摻料配比組（CS50、LS50），CS50 與 LS50 雖質量變化略低於純水泥組，但仍高於 1%，分別約為 1.00%~1.20%。顯示高摻量爐石雖具有部分抑制效應，但於高濃度環境下仍無法有效控制反應副產物之累積，可能因爐石活性導致額外硫鋁酸鹽生成。

圖 4.4-18 是雙摻料配比（35%爐石 + 15%飛灰）組（CS35F15、LS35F15），CS35F15 與 LS35F15 皆展現穩定趨勢，140 天質量變化率控制於約 0.6%~0.8%，明顯低於單一摻料組與基準組，顯示此比例搭配有助於同時降低反應活性與細化孔隙，並有效抑制硫酸鹽入侵與副產物聚積。

圖 4.4- 19 是單一飛灰摻料配比組（CF25、LF25），單一飛灰摻配組之質量變化率則介於 約 1.00%~1.30%，略高於雙摻組，但仍低於純水泥組。說明飛灰具抑制 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成與孔隙填補作用，可延緩反應速率，但於高濃度硫酸鹽條件下仍有限制。

圖 4.4-20 三元組（CS35F30、LS35F30），CS35F30 與 LS35F30 為三元組中飛灰摻配比例最高組別，表現最佳，質量變化率最低，至第 140 天僅約 0.50%~0.55%。此結果顯示，高比例飛灰能進一步降低硫酸鹽反應動能，並透過二次反應與微結構優化，有效延緩劣化機制，為本研究中最具耐久性之配比。

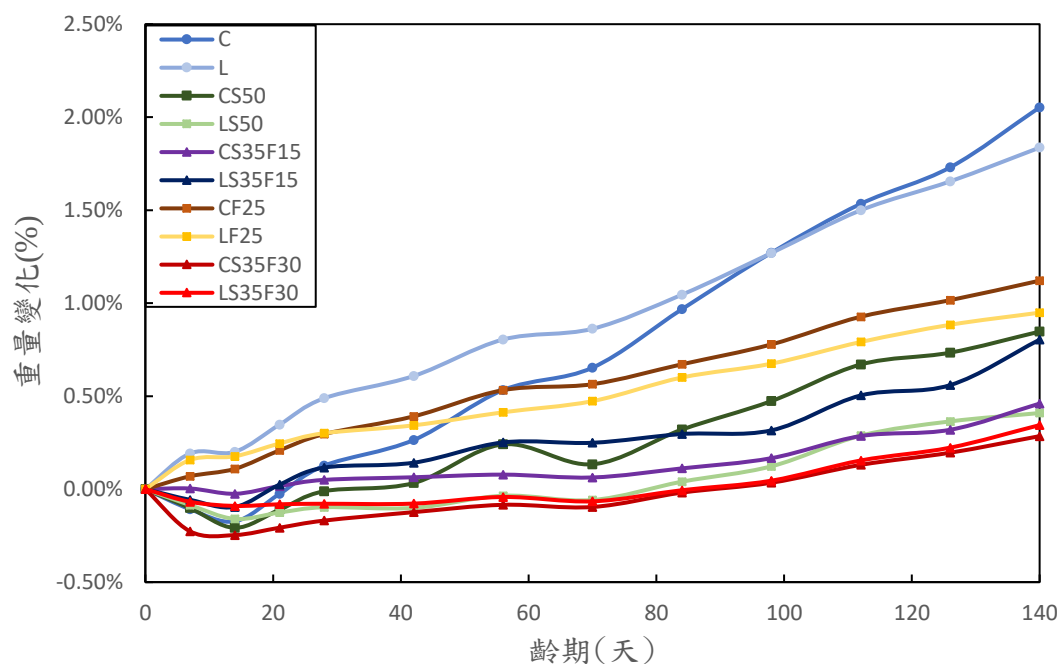


圖 4.4-21 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液

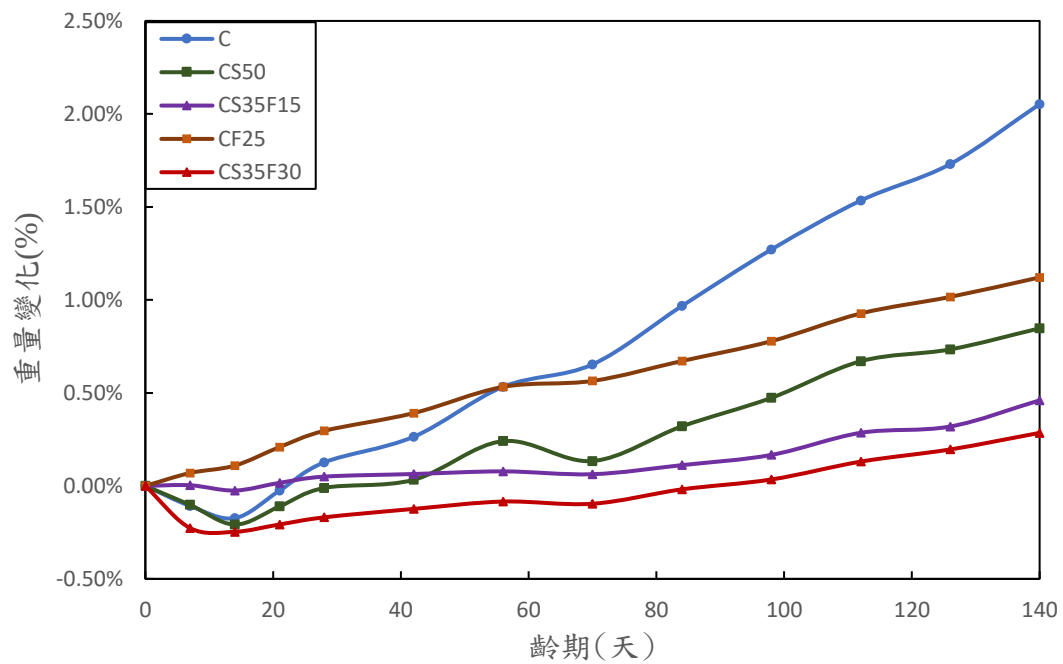


圖 4.4-22 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (C 組)

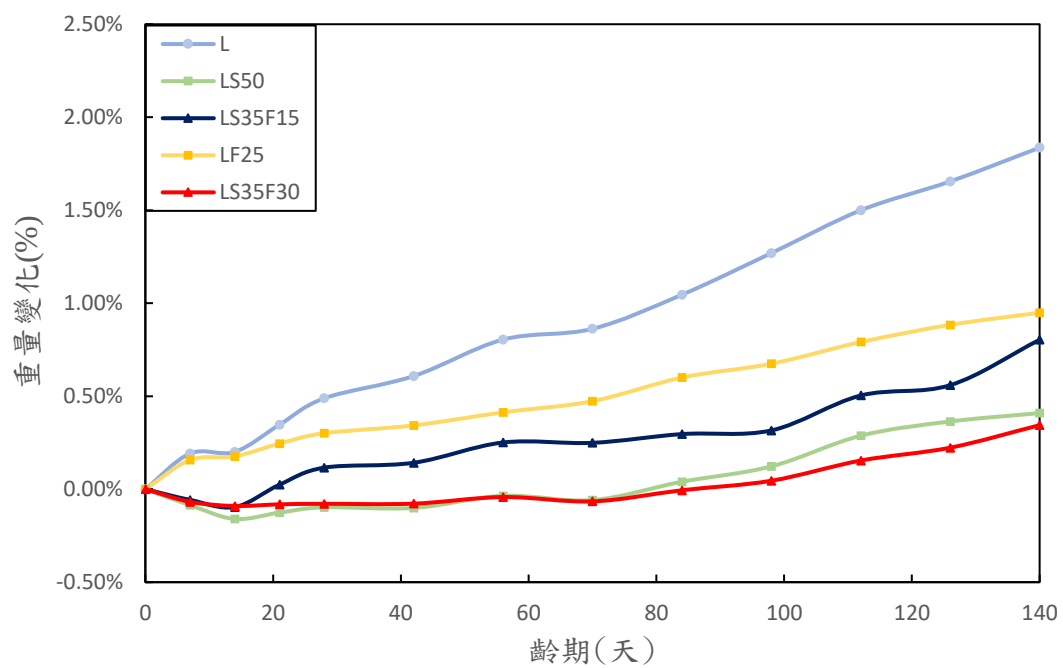


圖 4.4-23 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (L 組)

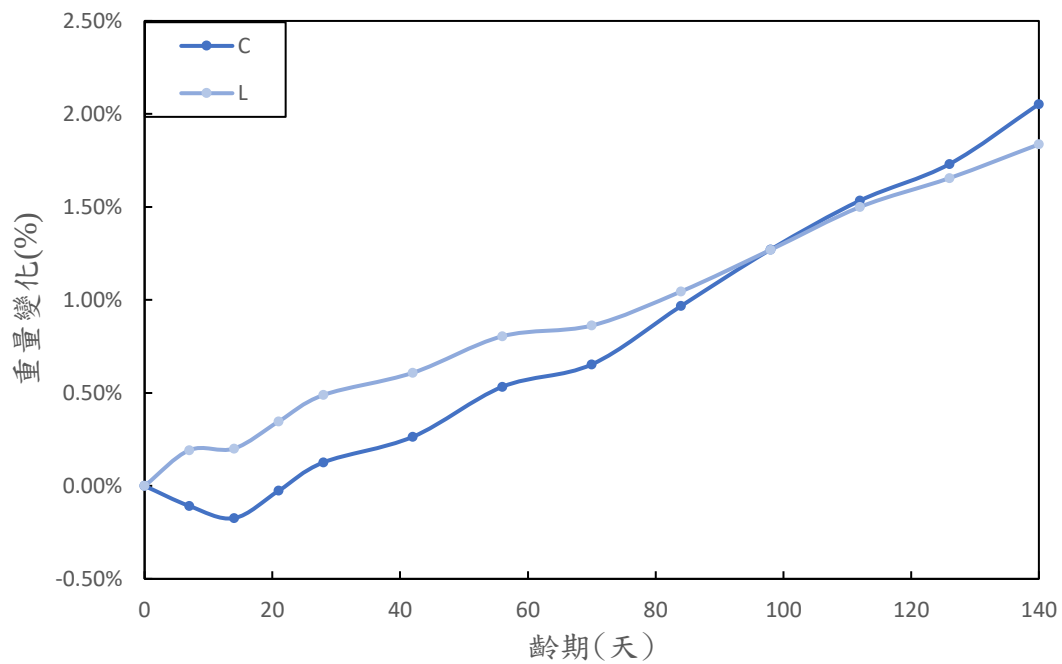


圖 4.4-24 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (純水泥組)

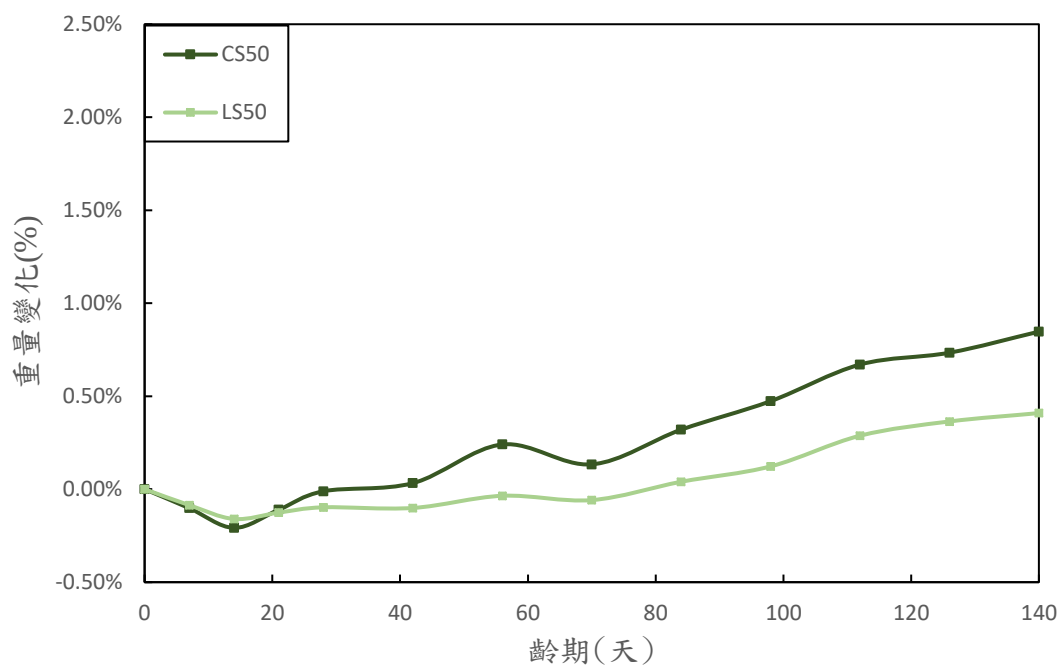


圖 4.4-25 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (50%爐石組)

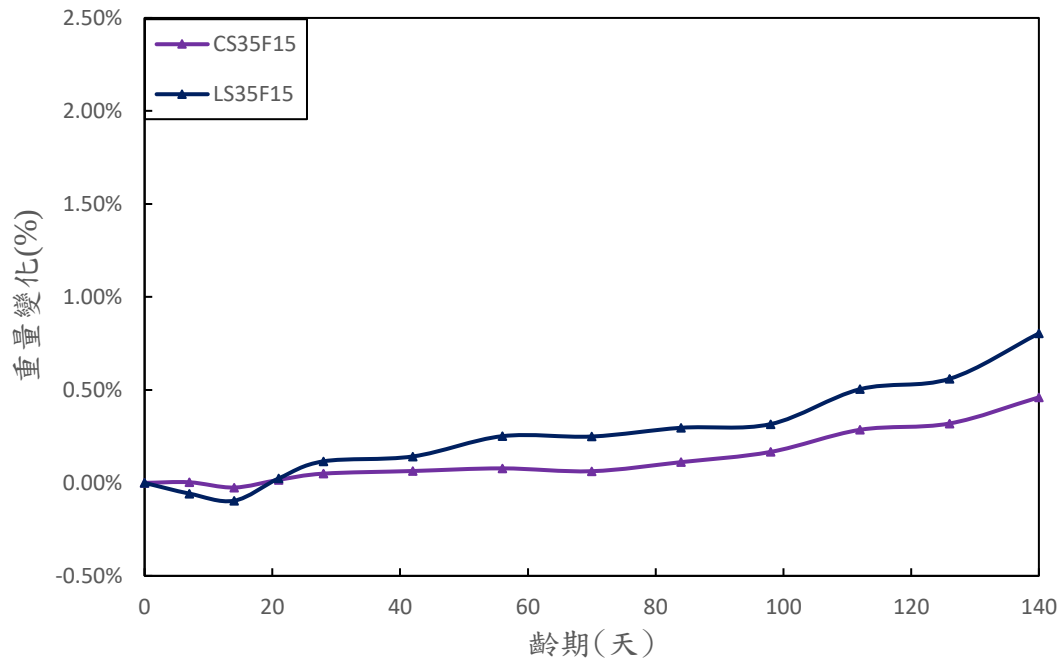


圖 4.4-26 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (35%爐石+15%飛灰組)

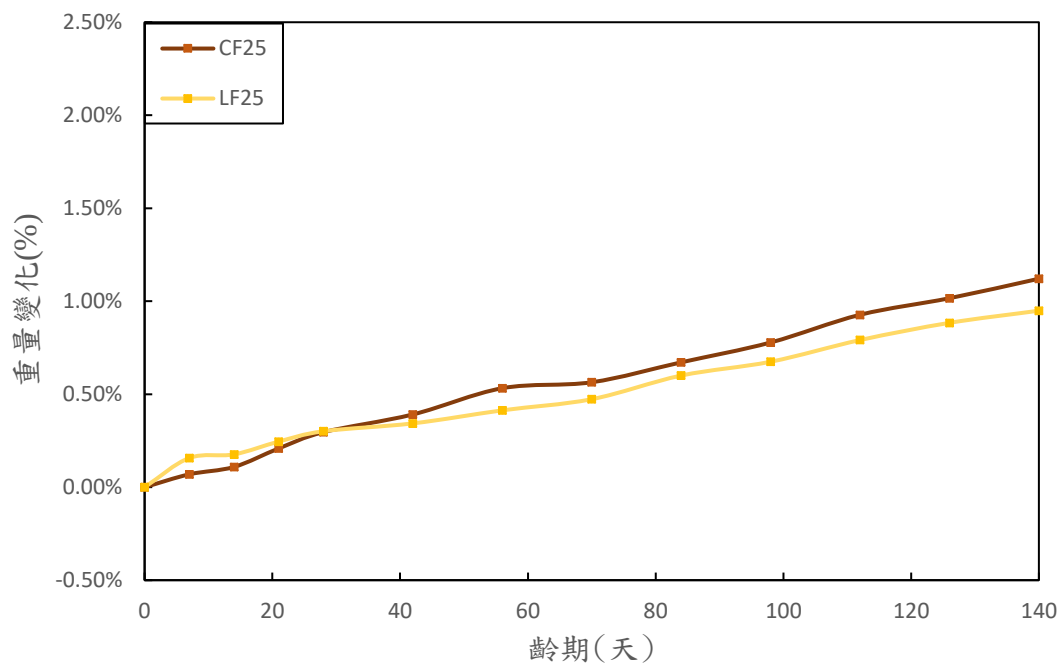


圖 4.4-27 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (25%飛灰組)

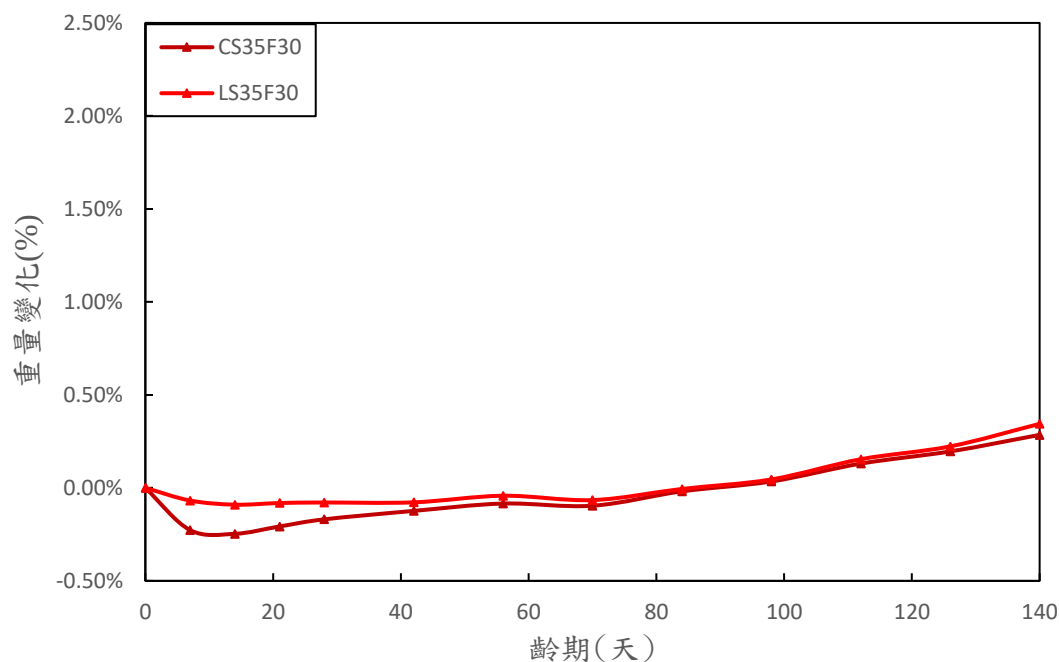


圖 4.4-28 200g/L 不換水的硫酸鹽溶液 (35%爐石+30%飛灰組)

圖 4.4-20 至圖 4.4-23 顯示各試體配比於 200 g/L 高濃度硫酸鹽溶液中長期浸泡且未更換溶液的情況下，其質量變化率隨齡期之變化情形。與換水組相比，本組硫酸鹽濃度雖初期相同，但隨反應進行濃度逐漸下降，使反應推動力降低，導致質量增加幅度明顯較小。

圖 4.4-24 是純水泥組（C、L），C 組與 L 組於 140 天後之質量變化率分別約為 2.05% 與 1.80%，整體趨勢類似於換水組，但變化速度較為緩和，顯示即便未換水，高濃度初期依然足以引發顯著反應，並造成副產物沉積與質量上升。由此可知，純水泥組在高濃度硫酸鹽環境下仍屬最易劣化組別。

圖 4.4-25 是 50% 爐石組（CS50、LS50），CS50 與 LS50 於不換水條件下的質量變化率為約 0.8%~0.9%，相較純水泥組明顯降低，顯示高取代爐石有助於改善材料微結構與反應均勻性。然而，其變化仍高於其他三元組，說明單一摻料於長期抗劣化能力仍有限。

圖 4.4-26 三元組（35%爐石 + 15%飛灰），CS35F15 與 LS35F15 於 140 天時質量變化分別約為 0.45% 與 0.60%，明顯優於純水泥與單一摻料組。此顯示

適當比例的爐石與飛灰可發揮協同效應，一方面減緩硫酸鹽滲透速率，另一方面穩定水化反應與結晶產物，為實務上較具應用潛力之組合。

圖 4.4-27 25%飛灰組（CF25、LF25），CF25 與 LF25 表現中等，最終質量變化約為 1.20% 左右，略低於純水泥組，但仍高於三元組，顯示飛灰可降低反應性與孔隙率，但在缺乏其他摻料輔助下效果仍有侷限。

圖 4.4-28 是三元組（35%爐石 + 30%飛灰），CS35F30 與 LS35F30 表現最佳，質量變化率控制於 0.40% 以下，且整體變化趨勢平穩。此結果說明，高比例三元組在控制反應性、降低氫氧化鈣生成與孔隙封閉性等方面效果顯著，有效延緩副產物生成與材料劣化，是本研究中抗硫酸鹽侵蝕表現最穩定之配比組合。

總結以上的實驗結果，50 g/L（低濃度）組，各組質量變化率普遍控制於 1% 以下，整體劣化現象相對輕微，唯石灰石水泥（L 組）與部分單摻組（如 LF25）於中後期仍有明顯增加趨勢，反映即便在低濃度環境中，長期滲透與微膨脹仍不可忽視。200 g/L 換水組，為三組中侵蝕最劇烈者，純水泥組（C、L）變化率分別高達 2.15% 與 1.80%，部分單一摻料組（CS50、CF25）亦超過 1%。三元組如 CS35F30、LS35F30 表現極為穩定，顯著抑制反應產物累積與膨脹效應。200 g/L 不換水組，雖初期質量變化仍快速，但因硫酸根濃度隨時間降低，反應速率逐漸趨緩，各組質量變化率介於低濃度與換水組之間。高取代的三元組（CS35F30、LS35F30）表現再次優異，140 天內變化率低於 0.4%。

侵蝕程度排序為：200 g/L 換水 > 200 g/L 不換水 > 50 g/L，可見持續供應硫酸根離子會顯著加劇反應進程與副產物累積。建議工程應用中，若面對高硫酸鹽風險環境，應避免使用純水泥或單一摻料高比例礦物材料，改採雙摻料三元組設計以提升長期耐久性。

第五章、結論與建議



5.1. 結論

本研究以石灰石水泥搭配不同爐石與飛灰取代比例，探討其對混凝土及水泥砂漿之力學與耐久性能之影響，並與普通水泥系統作比較。經由一系列試驗，歸納出以下結論：

1. 石灰石水泥（L 組）與 I 型水泥（C 組）搭配固定礦物摻料（爐石 35%+飛灰 15%）時，其新拌性質表現相近，包括坍度、凝結時間、單位重、泌水率、含氣量、pH 值與氯含量，顯示石灰石水泥可直接取代 I 型水泥使用於一般工程應用，顯示其可於不犧牲拌合與施工性能前提下，作為兼具早期強度與低碳特性的替代材料，具備工程應用潛力與實務可行性。
2. 石灰石水泥系統於早期齡期（3~7 天）抗壓強度普遍優於或相當於 I 型水泥組，顯示其成核效應與填充效應可促進早期水化。中後期齡期（28~180 天）強度發展穩定，部分 L 組甚至超越 C 組，特別是在複合摻料組（如 LS35F15）中，展現良好長期結構潛力。
3. 劈裂抗張強度與彈性模數結果亦顯示石灰石水泥具備良好整體力學性能，與 I 型水泥系統相當或略高，證實其不會劣化混凝土整體剛性或抗裂能力。
4. 石灰石水泥搭配爐石與飛灰材料展現出良好的抗氯離子滲透能力。RCM 與 RCPT 試驗結果顯示，三元系統（如 LS35F15）之氯離子擴散係數隨齡期顯著下降，不僅與 I 型水泥系統（C 組）相當，部分齡期甚至略為優越，顯示其微觀孔隙結構具有較佳的細化與封閉效果。
5. 硫酸鹽侵蝕試驗結果顯示，石灰石水泥系統具有良好的體積穩定性與抗化學侵蝕能力，尤其在高濃度（200 g/L）且不更換溶液的嚴苛條件下，其試體重量變化與長度膨脹皆優於 I 型水泥系統，顯示其對硫酸根侵入具有較佳的抵抗能力。此現象尤以同時摻入爐石與飛灰（如 LS35F15 組）之三元複合系統最為顯著，其耐久表現優於單一摻料或傳統水泥系統。

- 
6. 乾燥收縮表現穩定，石灰石水泥收縮量低於或相當於 I 型水泥，顯示其孔隙結構改善可抑制水分蒸發與體積變化。
 7. 石灰石水泥可有效降低熟料用量、減少 CO₂ 排放，同時維持混凝土性能穩定，兼具工程性能與永續發展潛力。搭配爐石與飛灰等卜作嵐材料，石灰石水泥展現出補強、成核與穩定化效應的協同作用，可作為未來低碳混凝土發展方向。
 8. 整體而言，本研究驗證了石灰石水泥在混凝土系統中搭配礦物摻料使用之可行性，不僅可有效發揮早期強度優勢，亦具備優良之長期力學與耐久性能，為推動低碳建材應用提供具體科學依據與實務潛力。

5.2.建議

1. 雖已量測抗壓強度與 RCM、硫酸鹽侵蝕等性能，未來可輔以微觀分析技術（如 SEM、XRD、TGA、MIP）探討水化產物、孔隙結構與劣化產物變化，進一步釐清石灰石與礦物摻料間之協同反應與侵蝕機理。
2. 石灰石水泥具有潛在的碳封存潛力，建議未來可結合 CO₂ 吸收量測或碳化養護試驗，分析其與硫酸鹽或氯鹽環境下的交互行為，以建立「碳吸附效益 vs 耐久性風險」的整合評估模型。
3. 本研究齡期最長至 180 天，建議後續延長觀察至一年（365 天）或以上，尤其針對硫酸鹽與氯鹽環境下之耐久性能變化，分析長期穩定性與劣化進程。
4. 本研究針對石灰石水泥與爐灰（包含爐石與飛灰）之複合使用，探討其對混凝土力學性質與耐久性能之影響。未來建議進一步延伸研究其他礦物摻料（如矽灰、偏高嶺土等）與石灰石水泥之協同效應，透過系統性比較不同摻料組合與配比，將有助於更全面掌握石灰石水泥與多元礦物摻料對混凝土性能之影響機制，並優化其工程應用潛力。特別是矽灰具高反應性與

填充能力，預期與石灰石粉可展現互補或強化效應，為未來低水膠比與高性能混凝土應用提供研究方向。

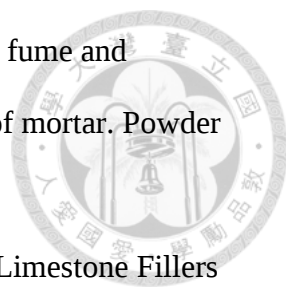
5. 硫酸鹽侵蝕屬於外部侵蝕機制，其作用由試體表面逐漸向內部擴散，進而影響材料微觀結構與宏觀性能。因此，試驗中所採用之溶液種類、濃度、溫度條件及試體尺寸等參數，均可能顯著影響最終試驗結果，表現在體積膨脹、強度劣化與重量變化等方面。建議後續研究可納入不同類型之硫酸鹽溶液進行比較，如硫酸鎂（ MgSO_4 ），以評估其對侵蝕機理與材料耐久性之差異影響，並強化對複雜環境條件下混凝土行為的理解。
6. 未來可將研究成果與實際工程結構設計連結，如結合結構鋼筋腐蝕潛勢模擬、服務壽命預測、耐久等級評估等，轉化為設計端可應用之資料。
7. 石灰石與爐石、飛灰皆屬低碳材料，建議後續結合生命週期評估與碳足跡分析，量化各配比組對於減碳貢獻與環境影響，強化永續混凝土設計依據。
8. 隨著材料組合複雜度提升，可考慮未來以機器學習模型（如 SVR、RF、ANN）訓練不同摻料、齡期、耐久性資料，建立配比-性能預測模型，提升混凝土設計效率與精準度。

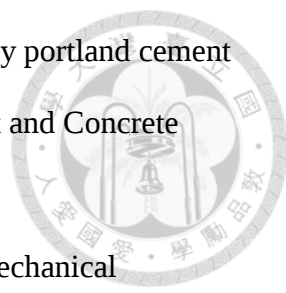
第六章、文獻回顧

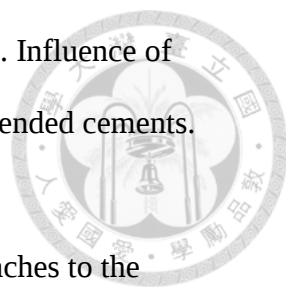


1. ASTM, A., 615/A 615M (2008), "Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement". ASTM International, 2020. 100: p. 19428-2959.
2. Concrete Mindess, S., Young, J.F., & Darwin, D. (2003)
3. Properties of Concrete Neville, A. M. (2011).
4. Tennis, P. D., & Jennings, H. M. (2000). A model for two types of calcium silicate hydrate in the microstructure of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30(6), 855–863.
5. Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry* (2nd ed.). Thomas Telford
6. Scrivener, K. L., & Nonat, A. (2011).. Hydration of cementitious materials, present and future, *Cement and Concrete Research*, 41(7), 651–665
7. Thomas, J. J., Jennings, H. M., & Chen, J. J. (2009). Influence of nucleation seeding on the hydration kinetics of tricalcium silicate and cement pastes, *Journal of the American Ceramic Society*, 92(10), 2313–2323
8. Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium sulfate in cement hydration, *Cement and Concrete Research*, 37(8), 1183–1194
9. Allen, A. J., Thomas, J. J., & Jennings, H. M. (2007). *Composition and density of nanoscale calcium–silicate–hydrate in cement*, *Nature Materials*, 6(4), 311–316
10. De Weerd, K. et al. (2011). The effect of limestone on the hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 30–38.
11. Hooton, R.D. (2010). Canadian use of ground limestone in Portland-limestone cement. *Cement and Concrete Composites*, 32(10), 819–826.

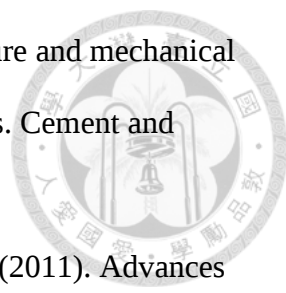
- 
12. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.)
 13. Kranjc, A., Baltazar Hacquet (1739/40-1815), the Pioneer of Karst Geomorphologists. *Acta Carsologica*, 2006. 35(2-3).
 14. Bentz, D.P., et al., Multi-scale investigation of the performance of limestone in concrete. *Construction and Building Materials*, 2015. 75: p. 1-10.
 15. Tennis, P. D., Thomas, M. D. A., & Weiss, W. J. (2011). State-of-the-Art Report on Use of Limestone in Cements at Levels of up to 15%
 16. Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., & Scrivener, K. (2008). Influence of limestone on the hydration of Portland cements, *Cement and Concrete Research*, 38(6), 848–860
 17. Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 551–558.
 18. Schmidt, W., & Lothenbach, B. (2015). *Influence of finely ground limestone on cement hydration*. *Cement and Concrete Research*, 76, 105–117.
 19. Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., & Scrivener, K. (2012). *Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone*. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 1579–1589.
 20. Zajac, M., Skibsted, J., & Lothenbach, B. (2021). *CO₂ uptake in cements blended with calcined clay and limestone*. *Cement and Concrete Research*, 146, 106468.
 21. De Weerd, K., et al., Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements. *Cement and Concrete Composites*, 2011. 33(1): p. 30-38.
 22. Bentz, D. P. (2006). Modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 124–129
 23. Hooton, R. D., & Thomas, M. D. A. (2002). Use of limestone in Portland cement: Effect on sulfate resistance

- 
24. Senhadji, Y., et al. (2014). Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. *Powder Technology*, 254, 314–323.
 25. Bederina, M., Makhloufi, Z., & Bouziani, T. (2011). Effect of Limestone Fillers on the Physic-Mechanical Properties of Limestone Concrete. *Physics Procedia*, 21, 28–34.
 26. Marchetti, G., Rahhal, V. F., & Irassar, E. F. (2017). Influence of packing density and water film thickness on early-age properties of cement pastes with limestone filler and metakaolin. *Materials and Structures*, 50(2).
 27. Chen, J. J., et al. (2016). Packing Density Improvement through Addition of Limestone Fines, Superfine Cement and Condensed Silica Fume. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 4, 29–36.
 28. Valcuende, M., et al. (2012). Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), 122–128.
 29. Schöler, A., Lothenbach, B., Winnefeld, F., & Müller, C. J. (2017). Early hydration of Portland cement with different limestone additions. *Materials and Structures*, 50(2).
 30. Ben Haha, M., Lothenbach, B., & Le Saout, G. (2011). Influence of limestone on cement hydration. *Cement and Concrete Composites*, 33(10), 1042–1049.
 31. Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., & Scrivener, K. (2012). Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 1579–1589.
 32. Kurdowski, W. (2014). *Cement and Concrete Chemistry*. Springer.
 33. Bazzoni, A. Study of early hydration mechanisms of cement by means of electron microscopy. 2014.

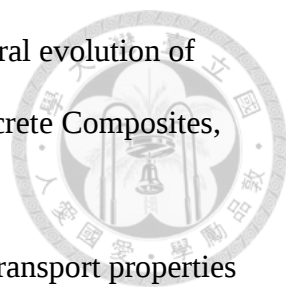
- 
34. Vance, K., et al., Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. *Cement and Concrete Composites*, 2013. 39: p. 93-103.
 35. Li, W., et al., Influence of Nanolimestone on the Hydration, Mechanical Strength, and Autogenous Shrinkage of Ultrahigh-Performance Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016. **28**(1): p. 04015068
 36. Bonavetti, V., Donza, H., Menéndez, G., Cabrera, O., & Irassar, E. F. (2001). Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy. *Cement and Concrete Research*, 31(4), 539–547.
 37. Scrivener, K. L., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2015). *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. Boca Raton, FL: CRC Press / EPFL Press.
 38. Vance, K., Sant, G., Brown, K., Li, W., Neithalath, N., & Mobasher, B. (2013). The influence of limestone particle size on hydration kinetics and reaction degree of cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 39, 1–9.
 39. Zajac, M., et al., Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Composites*, 2014. **46**: p. 99-108.
 40. Arora, A., G. Sant, and N. Neithalath, Ternary blends containing slag and interground/blended limestone: Hydration, strength, and pore structure. *Construction and Building Materials*, 2016. **102**: p. 113-124.
 41. De Weerd, K., et al., Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*, 2011. **41**(3): p. 279-291.
 42. Berodier, E., & Scrivener, K. (2014). Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H. *Cement and Concrete Research*, 56, 93–104.

- 
43. Bentz, D. P., Ferraris, C. F., Galler, M., & Winpigler, J. (2009). Influence of limestone powder on hydration and strength development of blended cements. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 731–735.
44. Gartner, E., & Hirao, H. (2015). A review of alternative approaches to the reduction of CO₂ emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 126–142.
45. Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 551–558.
46. Schöler, A., Lothenbach, B., Winnefeld, F., & Müller, C. J. (2017). The effect of supplementary cementitious materials on sulfate resistance of limestone cements. *Cement and Concrete Composites*, 83, 374–385.
47. Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2015). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
48. Thongsanitgarn, P., et al. (2014). Heat of hydration of Portland high-calcium fly ash cement incorporating limestone powder: Effect of limestone particle size. *Construction and Building Materials*, 66, 410–417.
49. John, V. M., et al. (2018). Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and future potential. *Cement and Concrete Research*, 114, 65–78.
50. De Weerd, K., et al. (2011). Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 30–38.
51. Tikkanen, J., Cwirzen, A., & Penttala, V. (2014). Effects of mineral powders on hydration process and hydration products in normal strength concrete. *Construction and Building Materials*, 72, 7–14.

- 
52. Bonavetti, V., & Irassar, E. F. (1994). The effect of stone dust content in sand on the properties of fresh and hardened concrete. *Cement and Concrete Research*, 24(3), 580–590.
53. Berodier, E., & Scrivener, K. (2014). Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C–S–H. *Cement and Concrete Research*, 56, 93–104.
54. Bentz, D. P., Ferraris, C. F., & Galler, M. A. (2009). Influence of limestone particle size on early-age autogenous strains and stresses in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 31(4), 245–249.
55. Gartner, E., & Hirao, H. (2015). A review of alternative approaches to the reduction of CO₂ emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 126–142.
56. Thongsanitgarn, P., Chalee, W., & Jaturapitakkul, C. (2014). Heat of hydration of Portland high-calcium fly ash cement incorporating limestone powder: Effect of limestone particle size. *Construction and Building Materials*, 66, 410–417.
57. Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 551–558.
58. Tikkanen, J., Cwirzen, A., & Penttala, V. (2014). Effects of mineral powders on hydration process and hydration products in normal strength concrete. *Construction and Building Materials*, 72, 7–14.
59. Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2015). *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials*. CRC Press.
60. Alonso, M. M., & Fernandez, L. (2004). Influence of slag cement on the pore structure and sorption properties of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(8), 689–696.

- 
61. Escalante-García, J. I., & Sharp, J. H. (2001). The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 695–702.
62. Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232–1243.
63. Bentz, D. P. (2007). Transient thermal behavior of portland cement mortars containing phase change materials. *Cement and Concrete Composites*, 29(7), 569–576.
64. Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2015). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26.
65. Bouzoubaa, N., & Malhotra, V. M. (2001). Current status of supplementary cementing materials in Canada. *ACI Materials Journal*, 98(6), 516–526.
66. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
67. Berry, E. E., & Malhotra, V. M. (1980). Fly ash for use in concrete – A critical review. *Journal of the American Concrete Institute*, 77(8), 59–73.
68. Naik, T. R., & Ramme, B. W. (1990). High-strength concrete containing large quantities of fly ash. *ACI Materials Journal*, 87(2), 111–118.
69. Berodier, E., & Scrivener, K. L. (2014). Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C–S–H. *Cement and Concrete Research*, 56, 93–104.
70. Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 551–558.

- 
71. Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232–1243.
72. Liu, J., Shi, C., & Shao, Y. (2018). Drying shrinkage of cementitious materials containing limestone powder. *Cement and Concrete Composites*, 89, 144–153.
73. Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256.
74. Kumar, M., Bishnoi, S., & Scrivener, K. L. (2010). Influence of fly ash on the drying shrinkage of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 40(5), 586–590.
75. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
76. Tang, L. (1996). Electrically accelerated methods for determining chloride diffusivity in concrete—current development. *Magazine of Concrete Research*, 48(176), 173–179.
77. NT Build 492. (1999). Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Nordtest Method.
78. Andrade, C., & Alonso, C. (1996). Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction and Building Materials*, 10(5), 315–328.
79. Thomas, M. D. A., & Bentz, E. C. (2001). Life-365 Service Life Prediction Model Manual. Life-365 Consortium.
80. Sisomphon, K., & Franke, L. (2007). Chloride penetration in concrete containing fly ash and ground granulated blast furnace slag. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), 485–493.

- 
81. Yang, Z., Makar, J. M., & Beaudoin, J. J. (2013). Microstructural evolution of cementitious materials under chloride attack. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 34–43.
82. Zhang, T., & Li, X. (2011). Effect of water-to-binder ratio on transport properties and durability of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3845–3850.
83. Song, H. W., & Saraswathy, V. (2006). Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview. *Journal of Materials Science*, 41, 824–836.
84. Papadakis, V. G., Fardis, M. N., & Vayenas, C. G. (1996). Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. *Materials and Structures*, 29, 25–33.
85. Thomas, M. D. A., & Bamforth, P. B. (1999). Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, 29(4), 487–495.
86. Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244–1256.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
87. Luping, T., & Nilsson, L. O. (1993). Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 23(2), 247–253.
88. Mesbah, H. A., et al. (2011). Influence of limestone filler on microstructure and chloride diffusivity of cement pastes. *Cement Wapno Beton*, 16(1), 25–36.
89. Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). Thermodynamic properties of AFm phases. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 118–130.

- 
90. Sisomphon, K., & Franke, L. (2007). Chloride penetration in concrete containing fly ash and ground granulated blast furnace slag. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(6), 485–493.
91. Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
92. Skalny, J., Marchand, J., & Odler, I. (2002). *Sulfate Attack on Concrete*. Spon Press.
93. Santhanam, M., Cohen, M. D., & Olek, J. (2001). Mechanism of sulfate attack: A fresh look Part 2. Proposed mechanisms. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 341–346.
94. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
95. Crammond, N. J. (2003). The thaumasite form of sulfate attack in the UK. *Cement and Concrete Composites*, 25(8), 829–837.
96. Pan, Z., et al. (2015). Graphene oxide–templated formation of C–S–H with ordered microstructure and enhanced mechanical performance of cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 58, 140–147.
97. Sato, R., & Diallo, F. (2006). Chloride binding in cementitious materials exposed to NaCl and CaCl₂. *Cement and Concrete Research*, 36, 91–103.