

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



不同模內水化程度及預處理時間對混凝土碳封存之影響

Study on the Effect of In-mold Hydration and Pre-conditioning Time on Concrete Carbon Sequestration

劉瀚仁

Han-Ren Liu

指導教授：詹穎雯 教授

Advisor: Yin-Wen Chan, Ph.D.

中華民國 113 年 8 月

August, 2024





國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY
MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE

不同模內水化程度及預處理時間對混凝土碳封存之影響

Study on the Effects of In-Mold Hydration and Pre-conditioning on Concrete Carbon Sequestration

本論文係 劉瀚仁 (R11521234) 在國立臺灣大學土木工程學系結構工程組
完成之碩士學位論文，於民國113年7月17日承下列考試委員審查通過及口試
及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of Civil Engineering (Structural) Engineering on
07/17,2024 have examined a Master's Thesis entitled above presented by 劉瀚仁
(R11521234) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

詹穎雯

(指導教授 Advisor)

廖文正

楊仲家

胡瑋秀

詹穎雯

廖文正

楊仲家

胡瑋秀

系主任 Director :

葛宇甯

葛宇甯

誌謝



兩年碩士生活轉眼間就即將結束了，在這段時間裡，讓我在解決問題、做人處事及生活態度上都有很大的進步，在離自己故鄉高雄如此遠的台北生活，也讓我學習了獨立自主以及學會與他人合作溝通，使得我在每一天都過得充實且充滿意義。

首先，我第一位要感謝的就是我的指導教授-詹穎雯教授，非常感謝教授一開始讓我加入研究團隊，感謝教授在每次的討論都耐心的聽取我的想法，也給出一針見血的見解及抓出我的缺失，這些過程都給我很多的養分，讓我有更寬闊的視野及更縝密的思考邏輯。

再來，我要感謝的是廖文正教授，在每次的 meeting 中給出很多的指教，讓我的研究架構更加完整；感謝胡瑋秀教授，因教授的專業與我的研究內容有共同之處，所以得到教授很多的幫助以及教導，給我更好的研究方向及調整。

感謝營建院季軒學長，幫助我實驗材料的訂購，也細心地教我儀器的操作；感謝台科大同學廷霖，每次都耗費時間幫我開台科大實驗場門借我切割機鑰匙。

感謝 812 上一屆的學長彥輔、文國、灝先、宇筌、澧恩、項先、奕親、威翰、映捷，在研究及學業方面，都給我很大的幫助。

感謝 812 的同學奕霖、庭安、峻帆、濂淞、峻輔、尚恩，也在學業上給我很大的幫助，大家都很好相處，也很大方地分享知識，讓我們研究室有很好的氣氛，大家都互相扶持。

感謝 812 的學弟宥霖、品宏、宏彬、甫安、淳瑋、昀庭、恆育、林康，在我的研究需要人手幫助時，都願意犧牲自己的時間來幫忙，也祝福學弟們都可以在未來順順利利。

最後，感謝我的家人，常常打來關心我的生活、學業等等，讓我可以放心地去解決完成研究上大大小小的事；也感謝我的女友玉婷，在我身邊不斷的鼓勵我，讓我克服困難，順利畢業。

摘要



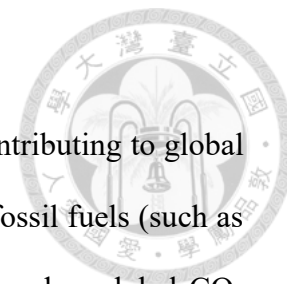
二氧化碳 (CO₂) 是導致全球氣候變化的主要溫室氣體之一，其排放主要來自於燃燒化石燃料（如煤炭、石油和天然氣）以及森林砍伐等人類活動。過去幾十年，全球二氧化碳排放量不斷增加，導致溫室氣體濃度上升。為應對氣候變化，許多國家和國際組織已開始採取措施減少二氧化碳排放，如推廣可再生能源、提高能源效率和發展碳捕集與封存技術等。

針對碳封存技術，混凝土中的一些成分能與二氧化碳反應生成碳酸鈣，這種碳封存方法既能減少大氣中的二氧化碳，又能提高混凝土的耐久性。許多學者正在研究如何在不影響混凝土性能的情況下最大限度地提高其碳封存能力，這可能成為未來具有發展性的碳封存技術之一。

本研究封存二氧化碳的方式主要為碳化養護，其中針對與“水”最相關的三個碳化養護參數作探討，因碳化養護中二氧化碳是利用試體內蒸散之水分形成的孔隙進入，因此與水相關的碳化養護參數分別為水灰比、模內水化時間、預處理時間，在這三者的參數搭配下，進行碳化養護流程後，對其二氧化碳吸收量、28 天抗壓強度、碳化深度分析，比較以上參數對碳化養護之混凝土的影響。

關鍵詞：全球暖化、碳化養護參數、碳封存、水泥砂漿、混凝土

Abstract



Carbon dioxide (CO₂) is one of the main greenhouse gases contributing to global climate change. Its emissions primarily come from the burning of fossil fuels (such as coal, oil, and natural gas) and deforestation. Over the past few decades, global CO₂ emissions have continuously increased, leading to higher concentrations of greenhouse gases. To address climate change, many countries and international organizations have begun to take measures to reduce CO₂ emissions, such as promoting renewable energy, improving energy efficiency, and developing carbon capture and storage technologies.

Regarding carbon capture and storage, certain components in concrete can react with CO₂ to form calcium carbonate. This method of carbon sequestration not only reduces CO₂ in the atmosphere but also enhances the durability of concrete. Many researchers are studying how to maximize the carbon sequestration capacity of concrete without compromising its performance, making this a potentially promising carbon capture technology for the future.

This study primarily utilizes carbonation curing to sequester carbon dioxide, focusing on the three carbonation curing parameters most related to "water." During carbonation curing, carbon dioxide enters through the pores formed by the evaporation of water within the specimen. Therefore, the water-related carbonation curing parameters are the water-cement ratio, in-mold hydration time, and preconditioning time. Under the combination of these three parameters, after the carbonation curing process, the study analyzes the carbon dioxide absorption, 28-day compressive strength, and carbonation depth to compare the effects of these parameters on the concrete subjected to carbonation curing.

Keywords : global warming 、 carbonation curing parameters 、 carbon capture and storage 、 mortar 、 concrete

目次



誌謝.....	i
摘要.....	ii
Abstract.....	iii
目次.....	iv
圖次.....	viii
表次.....	xiii

第一章、緒論

1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究流程圖.....	3

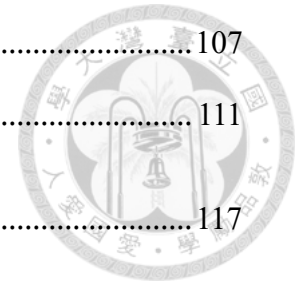
第二章、文獻回顧.....4

2.1 二氧化碳捕捉與封存技術 (CCS)	4
2.1.1 碳捕捉.....	4
2.1.2 碳運輸.....	6
2.1.3 碳封存.....	6
2.1.4 混凝土碳化反應機制.....	8
2.2 二氧化碳養護介紹.....	14
2.2.1 二氧化碳養護流程.....	14
2.2.1.1 模內初期水化.....	15
2.2.1.2 預處理.....	15
2.2.1.3 碳化養護.....	16
2.2.1.4 後養護.....	18

2.2.2 二氧化碳養護參數.....	18
2.2.2.1 配比(水灰比).....	18
2.2.2.2 模內水化時間.....	20
2.2.2.3 預處理時間.....	22
2.2.2.4 碳化濃度.....	24
2.2.2.5 碳化壓力.....	26
2.2.2.6 碳化溫度.....	27
2.2.2.7 碳化養護時間.....	30
2.2.2.8 後養護齡期.....	32
2.2.3 二氧化碳吸收量分析方法.....	33
2.3 二氧化碳養護混凝土之微觀性質.....	36
2.3.1 熱重分析法(TGA/DTG).....	36
2.3.2 X 射線繞射(XRD).....	38
2.3.3 壓汞法(MIP).....	40
2.3.4 掃描式電子顯微鏡 SEM.....	44
第三章、實驗設計與分析方法.....	47
3.1 實驗內容與架構.....	47
3.2 試驗材料.....	48
3.3 試驗儀器.....	52
3.4 試體拌合與澆置.....	57
3.4.1 水泥砂漿拌合與澆置.....	57
3.4.2 混凝土拌合與澆置.....	57
3.5 試驗參數.....	58
3.6 實驗設計.....	60

3.6.1 水泥砂漿於不同水灰比下模內水化與預處理時間對碳化養護之影響試驗.....	61
3.6.1.1 抗壓強度試驗.....	61
3.6.1.2 碳化深度試驗.....	63
3.6.2 混凝土於不同水灰比下模內水化與預處理時間對碳化養護之影響試驗.....	63
3.6.2.1 抗壓強度試驗.....	63
3.7 實驗分析方法.....	64
3.7.1 二氧化碳吸收量及碳化度.....	64
3.7.2 抗壓強度試驗.....	65
3.7.3 碳化深度試驗.....	66
第四章、試驗結果分析與討論.....	67
4.1 水泥砂漿於不同水灰比下模內水化與預處理時間對碳化養護之影響試驗結果.....	67
4.1.1 水灰比 0.4.....	67
4.1.2 水灰比 0.5.....	76
4.1.3 水灰比 0.6.....	84
4.2 水泥砂漿碳化深度試驗結果.....	91
4.2.1 模內水化時間 5 小時.....	92
4.2.2 模內水化 11 小時.....	95
4.2.3 模內水化 24 小時.....	98
4.3 混凝土於不同水灰比下模內水化與預處理時間對碳化養護之影響試驗結果.....	101
4.3.1 水灰比 0.4.....	101

4.3.2 水灰比 0.5.....	107
4.3.3 水灰比 0.6.....	111
第五章、 結論與建議.....	117
5.1 結論.....	117
5.2 建議.....	120
第六章、 參考文獻.....	122



圖次



圖 1.3-1 研究流程圖	3
圖 2.1-1 碳化反應的反應物與反應產物[15].....	9
圖 2.1-2 $CSH_C(t)$ 與 $CSH_{SG}(t)$ 與抗壓強度之迴歸圖[16]	14
圖 2.2-1 二氧化碳養護流程[15].....	15
圖 2.2-2 二氧化碳進入試體孔隙反應示意圖[15].....	16
圖 2.2-3 封閉式系統	16
圖 2.2-4 流通式系統	17
圖 2.2-5 在封閉與流通式系統下碳化度與抗壓強度隨時間關係圖[2].....	17
圖 2.2-6 封閉式系統與流通式系統碳化度與抗壓強度比較圖[2].....	18
圖 2.2-7 二氧化碳進入不同水灰比試體孔隙示意圖[15].....	19
圖 2.2-8 不同水灰比試體在不同碳化時間的抗壓強度[23].....	19
圖 2.2-9 碳化養護對不同初期水化齡期試體之影響[40].....	20
圖 2.2-10 28 天水化物束縛水含量和抗壓強度與初期水化齡期關係[40].....	21
圖 2.2-11 預處理時間與二氧化碳吸收量、殘餘水量關係圖[8].....	22
圖 2.2-12 二氧化碳吸收量與預處理水分損失量關係圖[53].....	23
圖 2.2-13 二氧化碳吸收量與預處理水分損失量關係圖[53].....	23
圖 2.2-14 不同預處理時間下試體之抗壓強度[7].....	24
圖 2.2-15 碳化濃度與碳化度關係圖[34].....	25
圖 2.2-16 不同碳化濃度與不同碳化時間之抗壓強度[34].....	25
圖 2.2-17 碳化壓力與碳化度關係圖[2].....	26
圖 2.2-18 碳化壓力與抗壓強度關係[2].....	27
圖 2.2-19 碳化溫度與碳化度關係圖[2].....	28
圖 2.2-20 碳化溫度與抗壓強度關係圖[2].....	28
圖 2.2-21 碳化養護過程試體內部溫度曲線[41].....	29

圖 2.2-22 碳化養護過程封閉容器內部溫度變化圖[45].....	30
圖 2.2-23 碳化養護時間與試體碳化度關係[2].....	30
圖 2.2-24 碳化養護時間與孔隙率關係圖[3].....	31
圖 2.2-25 碳化養護時間與抗壓強度關係圖[3].....	32
圖 2.2-26 不同養護條件下水泥之反應程度[15].....	32
圖 2.2-27 TG/DTA 曲線各升溫階段示意圖[26]	35
圖 2.2-28 質量曲線法實驗示意圖[31].....	35
圖 2.3-1 不同碳化養護時間下 TGA 和 DTG 曲線[30]	36
圖 2.3-2 不同深度下的 TGA 和 DTG 曲線[30]	37
圖 2.3-3 不同預處理時間下 TGA 和 DTG 曲線[30]	37
圖 2.3-4 預處理 2 小時、碳化養護 8 小時的 XRD 圖[30]	39
圖 2.3-5 預處理 16 小時、碳化養護 8 小時的 XRD 圖[30]	39
圖 2.3-6 預處理 16 小時、碳化養護 16 小時的 XRD 圖[30]	39
圖 2.3-7 未碳化和碳化水泥漿隨時間的 XRD 圖[21]	40
圖 2.3-8 不同碳化時間下水泥漿體孔隙大小分布[21].....	41
圖 2.3-9 不同碳化養護時間下孔隙率與孔隙平均大小[21].....	42
圖 2.3-10 未碳化的水泥漿體孔隙分布圖[21].....	43
圖 2.3-11 碳化養護 1 小時的水泥漿體孔隙分布圖[21].....	43
圖 2.3-12 碳化養護 72 小時的水泥漿體孔隙分布圖[21].....	43
圖 2.3-13 經過 24 小時碳化的水泥漿體 SEM 圖(↑ 碳酸鈣；←未反應水泥)[3] 45	
圖 2.3-14 在水中養護 24 小時的水泥漿體 SEM 圖(↑ 氫氧化鈣；←鈣礬石；→ CSH 膠體)[3].....	45
圖 2.3-15 不同碳化時間下的水泥漿體 SEM 圖[3]	45
圖 2.3-16 水化反應與碳化反應的微觀結構示意圖[3].....	46
圖 3.3-1 烘箱	52
圖 3.3-2 直立式單軸拌合機	52

圖 3.3-3 振動台	53
圖 3.3-4 恆溫恆濕室	53
圖 3.3-5 可程式恆溫恆濕機	54
圖 3.3-6 碳化養護鋼桶	54
圖 3.3-7 抽氣機	55
圖 3.3-8 二氧化碳鋼瓶與壓力調整器	55
圖 3.3-9 MTS100 噸萬能材料試驗機	56
圖 3.3-10 小型鑽心試體切割機	56
圖 3.6-1 水泥砂漿實驗流程	62
圖 3.6-2 水泥砂漿實驗流程	64
圖 3.7-1 酚酞試驗之假設	66
圖 4.1-1 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.4)	70
圖 4.1-2 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖(水灰比 0.4)	71
圖 4.1-3 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖	71
圖 4.1-4 碳化度(水灰比 0.4) (模內水化時間 5 小時)	72
圖 4.1-5 碳化度(水灰比 0.4) (模內水化時間 11 小時)	73
圖 4.1-6 碳化度(水灰比 0.4) (模內水化時間 24 小時)	73
圖 4.1-7 抗壓強度(水灰比 0.4) (模內水化時間 5 小時)	74
圖 4.1-8 抗壓強度(水灰比 0.4) (模內水化時間 11 小時)	74
圖 4.1-9 抗壓強度(水灰比 0.4) (模內水化時間 24 小時)	75
圖 4.1-10 抗壓強度增加量(水灰比 0.4) (實驗組/控制組)	75
圖 4.1-11 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.5)	78
圖 4.1-12 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖(水灰比 0.5)	79
圖 4.1-13 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖	80
圖 4.1-14 碳化度(水灰比 0.5) (模內水化時間 5 小時)	81
圖 4.1-15 碳化度(水灰比 0.5) (模內水化時間 11 小時)	81

圖 4.1-16 碳化度(水灰比 0.5) (模內水化時間 24 小時).....	82
圖 4.1-17 抗壓強度(水灰比 0.5) (模內水化時間 5 小時).....	83
圖 4.1-18 抗壓強度(水灰比 0.5) (模內水化時 11 小時).....	83
圖 4.1-19 抗壓強度(水灰比 0.5) (模內水化時間 24 小時).....	83
圖 4.1-20 抗壓強度增加量(水灰比 0.5) (實驗組/控制組).....	84
圖 4.1-21 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.6).....	86
圖 4.1-22 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖(水灰比 0.6).....	87
圖 4.1-23 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖	87
圖 4.1-24 碳化度(水灰比 0.6) (模內水化時間 5 小時).....	88
圖 4.1-25 碳化度(水灰比 0.6) (模內水化時間 11 小時).....	88
圖 4.1-26 碳化度(水灰比 0.6) (模內水化時間 24 小時).....	89
圖 4.1-27 抗壓強度(水灰比 0.6) (模內水化時間 5 小時).....	90
圖 4.1-28 抗壓強度(水灰比 0.6) (模內水化時間 11 小時).....	90
圖 4.1-29 抗壓強度(水灰比 0.6) (模內水化時間 24 小時).....	91
圖 4.1-30 抗壓強度增加量(水灰比 0.6) (實驗組/控制組).....	91
圖 4.3-1 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.4).....	103
圖 4.3-2 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖(水灰比 0.4).....	104
圖 4.3-3 碳化度(水灰比 0.4)(模內水化時間 11 小時).....	104
圖 4.3-4 碳化度(水灰比 0.4)(模內水化時間 24 小時).....	105
圖 4.3-5 抗壓強度(水灰比 0.4) (模內水化時間 11 小時).....	106
圖 4.3-6 抗壓強度(水灰比 0.4) (模內水化時間 24 小時).....	106
圖 4.3-7 抗壓強度增加量(水灰比 0.4) (實驗組/控制組).....	106
圖 4.3-8 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.5).....	108
圖 4.3-9 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖(水灰比 0.5).....	108
圖 4.3-10 碳化度(水灰比 0.5) (模內水化時間 11 小時).....	109
圖 4.3-11 碳化度(水灰比 0.5) (模內水化時間 24 小時).....	109

圖 4.3-12 抗壓強度(水灰比 0.5) (模內水化時間 11 小時).....	110
圖 4.3-13 抗壓強度(水灰比 0.5) (模內水化時間 24 小時).....	111
圖 4.3-14 抗壓強度增加量(水灰比 0.5) (實驗組/控制組).....	111
圖 4.3-15 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.6).....	113
圖 4.3-16 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖(水灰比 0.6).....	113
圖 4.3-17 碳化度(水灰比 0.6) (模內水化時間 11 小時).....	114
圖 4.3-18 碳化度(水灰比 0.6) (模內水化時間 24 小時).....	115
圖 4.3-19 抗壓強度(水灰比 0.6) (模內水化時間 11 小時).....	116
圖 4.3-20 抗壓強度(水灰比 0.6) (模內水化時間 24 小時).....	116
圖 4.3-21 抗壓強度增加量(水灰比 0.6) (實驗組/控制組).....	116

表次



表 2.1-1 C_3S 、 C_2S 與 C-S-H 膠體的碳化反應速率常數[28].....	12
表 2.2-1 不同水灰比試體之碳化結果比較[53].....	19
表 3.1-1 本研究碳化養護流程與各階段介紹	47
表 3.2-1 波特蘭水泥第 I 型水泥化學成分報告(國產實業提供)	49
表 3.2-2 波特蘭第 I 型水泥物理性質(國產實業提供)	50
表 3.2-3 細粒料花蓮砂之篩分析結果與物理性質	51
表 3.5-1 水泥砂漿配比表(單位: kg/m^3).....	58
表 3.5-2 混凝土配比表(單位: kg/m^3).....	59
表 3.6-1 拌合顆數	62
表 3.6-2 拌合顆數	64
表 4.1-1 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.4)(模內水化 5 小時)	68
表 4.1-2 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.4)(模內水化 11 小時)	69
表 4.1-3 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.4)(模內水化 24 小時)	69
表 4.1-4 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.5)(模內水化 5 小時)	77
表 4.1-5 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.5)(模內水化 11 小時)	77
表 4.1-6 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.5)(模內水化 24 小時)	78
表 4.1-7 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.6)(模內水化 5 小時)	85

表 4.1-8 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.6) (模內水化 11 小時)	85
表 4.1-9 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.6) (模內水化 24 小時)	86
表 4.2-1 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果 (模內水化 5 小時-預處理時間 3 小時).....	93
表 4.2-2 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果 (模內水化 5 小時-預處理時間 6 小時).....	93
表 4.2-3 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果 (模內水化 5 小時-預處理時間 9 小時).....	94
表 4.2-4 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果 (模內水化 11 小時-預處理時間 3 小時).....	96
表 4.2-5 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果 (模內水化 11 小時-預處理時間 6 小時).....	96
表 4.2-6 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果 (模內水化 11 小時-預處理時間 9 小時).....	97
表 4.2-7 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果 (模內水化 24 小時-預處理時間 3 小時).....	99
表 4.2-8 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果 (模內水化 24 小時-預處理時間 6 小時).....	100
表 4.2-9 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果 (模內水化 24 小時-預處理時間 9 小時).....	100
表 4.3-1 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.4) (模內水化 11 小時)	102
表 4.3-2 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.4) (模內水化 24 小時)	103

表 4.3-3 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.5) (模內水化 11 小時)	107
表 4.3-4 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.5) (模內水化 24 小時)	107
表 4.3-5 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.6) (模內水化 11 小時)	112
表 4.3-6 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據 (水灰比 0.6) (模內水化 24 小時)	112

第一章、緒論



1.1 研究動機

近年來，全球各國在應對氣候變化方面紛紛設立了 2050 年碳排放淨零的目標，並在國際層面簽署了多項協定，如《巴黎協定》、《英國碳排放淨零法案》。這些協定旨在最大限度地減少溫室氣體排放，並通過碳捕集封存和再利用（CCS、CCUS）等負碳技術，實現碳排放的淨零目標。2050 淨零轉型是全世界的目標，也是臺灣的目標，我國 2050 淨零排放路徑將會以「能源轉型」、「產業轉型」、「生活轉型」、「社會轉型」等四大轉型，及「科技研發」、「氣候法制」兩大治理基礎，輔以「十二項關鍵戰略」，就能源、產業、生活轉型政策預期增長的重要領域制定行動計畫，落實淨零轉型目標。

混凝土是工程中非常常用的材料，其主要成分水泥在生產過程中會產生大量的二氧化碳。根據文獻資料，每年全球二氧化碳排放量高達 360 億噸，其中 5% 至 8% 來自水泥製造，這對全球暖化問題影響重大。因此，未來該行業的長期目標是減少混凝土生產過程中的碳排放。目前的碳捕集技術已能夠在水泥製造過程中捕捉二氧化碳，並將其儲存為濃度 100% 的純二氧化碳。

現今混凝土製造的原料配比技術，利用礦物摻料如飛灰和水淬爐石等，不僅能提升混凝土的工程性質，還能減少水泥的使用比例，從而降低混凝土材料的整體碳排放量。此外，飛灰和水淬爐石粉分別是燃煤發電和高爐煉鐵產生的工業副產物，這樣的搭配不僅能減少碳排放，還能將副產物循環再利用，減少混凝土材料對環境的衝擊。另一方面，混凝土材料因水化作用產生的氫氧化鈣，遇到大氣中的二氧化碳時，會轉變為碳酸鈣存於混凝土中。這個轉變過程改變了混凝土材料的微觀結構，提高了材料的緻密性，從而增強混凝土強度。

現今，使用二氧化碳養護的方式、條件以及各種可能影響碳化養護的參數和碳化過程的機理，仍有許多可以研究的部分，因此，本研究旨在針對不同的碳化養護參數對混凝土的影響。

1.2 研究目的

本研究針對二氧化碳養護中三個與‘水’有最直接關聯的三個參數:水灰比、模內水化時間、預處理時間進行研究。因二氧化碳進入試體反應的碳酸鈣是填補於試體內的孔隙，因此試體內水分經過預處理後，形成的孔隙為二氧化碳進入反映的區域，而水灰比、模內水化時間及預處理時間皆會直接的影響試體內的水分及孔隙。

本研究以水灰比 0.4、0.5、0.6 為參數進行二氧化碳養護流程，流程進行模內水化時間 5、11、24 小時個別搭配預處理時間 3、6、9 小時，總共一個水灰比進行 9 組的模內水化-預處理時間。經過模內水化及預處理後，放入鋼桶中進行碳化養護，以 5 大氣壓灌入濃度 100%之二氧化碳，碳化時間 24 小時後取出，記錄其重量變化，計算水分損失量及二氧化碳吸收量。再將試體放入飽和石灰水進行後養護至指定齡期 28 天，進行抗壓強度試驗，比較碳化養護組與水養護組的強度，根據強度關係，判斷各組水灰比的參數中適合應用於實務。本研究經過碳化養護流程再做了碳化深度試驗，目的是探討試體內部的碳化反應範圍，比較二氧化碳吸收量及抗壓強度，更瞭解上述三種碳化養護參數的影響。

由文獻可知，孔隙越多可以有更多的二氧化碳進入試體反應，因此本研究進行了水泥砂漿外，再加入粗骨材於試體，進行上述的三種參數對碳化養護的影響研究，目的是探討加入粗骨材替代部分砂，是否可以有更好的二氧化碳吸收量及抗壓強度的變化。

1.3 研究流程圖

本研究試驗流程如圖 1.3-1 所示。本研究欲探討不同水灰比下，在不同的模內水化時間及預處理時間，對於碳化養護厚的水泥砂漿及混凝土的影響。因此，設計水泥砂漿及混凝土(加入粗骨材)水灰比在 0.4、0.5、0.6 下，進行碳化養護流程，其中模內水化時間(5、11、24 小時)搭配預處理時間(3、6、9 小時)，共九組參數，經過碳化養護後進行後續分析，如計算二氧化碳吸收量、碳化度、28 天抗壓強度及碳化深度試驗，比較在以上不同的參數對碳化養護後之混凝土的影響。

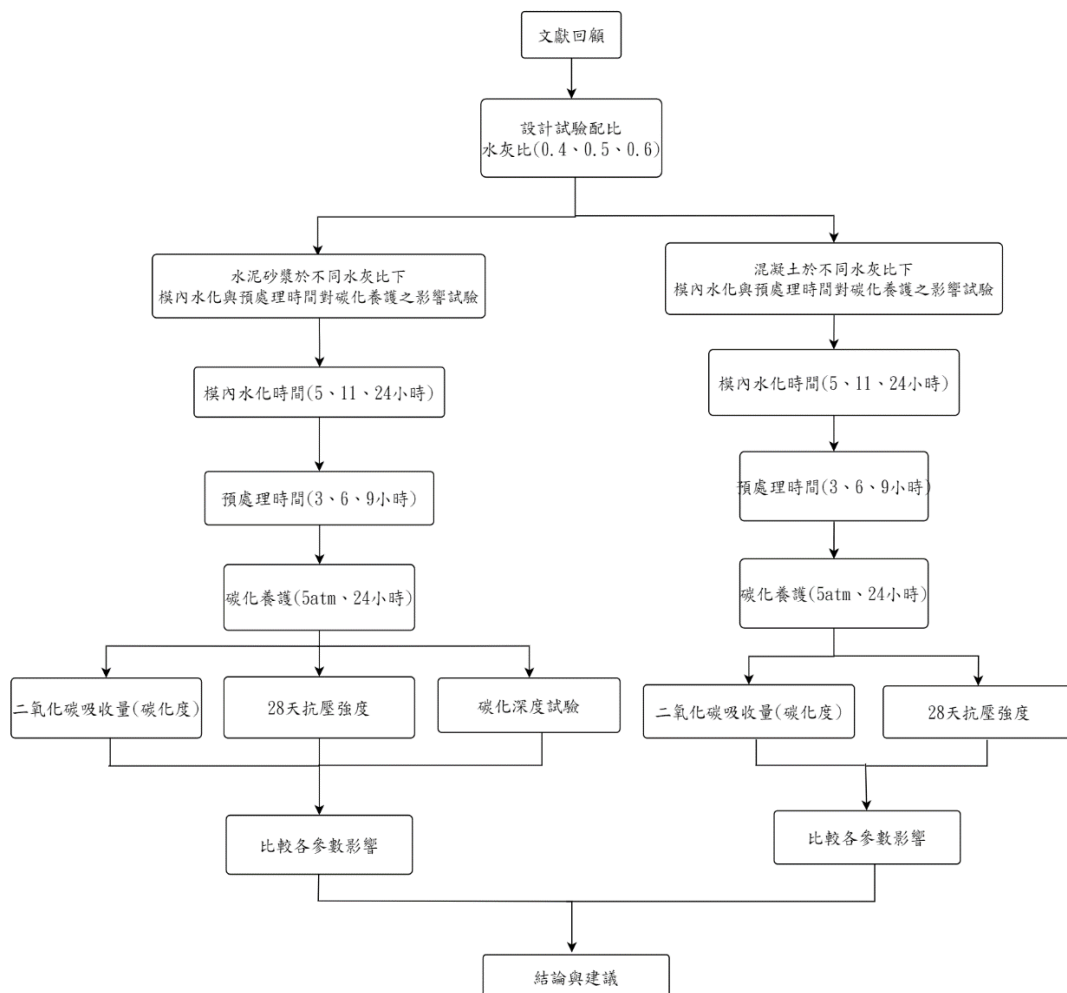


圖 1.3-1 研究流程圖

第二章、文獻回顧



2.1 二氧化碳捕捉與封存技術 (CCS)

近年來，隨著工業革命的進展，世界各地興建了大量的工業廠房、電廠、鋼鐵煉製廠和水泥廠。在製造過程中，這些設施排放了大量的二氧化碳和廢氣，成為全球暖化的主要因素。這一現象迫使全球的科學家開始重視並研究如何顯著減少二氧化碳排放量和碳足跡，以應對日益嚴峻的氣候變化問題。各國近年來不斷投入研究，開發出有望解決這一難題的技術，稱為「二氧化碳捕捉與封存技術 (CCS, Carbon Capture and Storage)」。

二氧化碳捕捉與封存技術 (CCS, Carbon Capture and Storage) 可分為三個主要階段。第一階段是「碳捕捉」，是指回收工廠製程中排放的大量廢氣，將空氣中混濁骯髒的廢氣透過各種技術來捕捉二氧化碳；第二階段是「碳運輸」，將捕捉到的二氧化碳運送至封存地點；第三階段是「碳封存」，指在不同條件下將二氧化碳存放於海洋、地層、人工儲槽等特定的環境中，並利用物理吸附、化學反應或生物吸收等不同機制來達成封存二氧化碳的技術。以下將詳細介紹 CCS 技術的這三個階段。

2.1.1 碳捕捉

碳捕捉的方式最常見的主要是燃燒前捕獲、燃燒後捕獲、富氧燃燒和工業製程四種方式，以下將逐一介紹：

(1) 燃燒前捕獲 (Pre-Combustion Capture)

燃燒前捕獲是一種在燃燒化石燃料之前分離和捕捉二氧化碳的技術。首先，將固體或液體化石燃料（如煤或重油）在高溫高壓下與氧氣和水蒸氣反應，轉化為合成氣，主要成分是一氧化碳 (CO) 和氫氣 (H₂)。接著，通過水煤氣轉化反應，將合成氣中的一氧化碳與水蒸氣反應生成二氧化碳和更多的氫氣，從而提高二氧化碳的濃度。然後使用吸收劑、吸附劑或膜分離技術

將合成氣中的二氧化碳分離出來。最後，捕捉到二氧化碳後，剩下的主要成分是氫氣，可以作為清潔燃料，通過燃氣輪機或燃料電池產生電力和熱能，從而實現低碳或零碳排放的能源利用。



(2) 燃燒後捕獲 (Post-Combustion Capture)

燃燒後碳捕獲是一種在燃燒化石燃料後從廢氣中分離和捕捉二氧化碳的技術，主要應用於燃煤電廠、天然氣發電廠和工業設施的煙氣處理。首先，燃燒化石燃料產生的煙氣含有二氧化碳、氮氧化物、二氧化硫、水蒸氣和顆粒物等雜質，需要先進行廢氣處理以去除這些雜質。然後，使用化學吸收法利用胺類溶液吸收煙氣中的二氧化碳，或通過物理吸附法、膜分離法和低溫分離法來捕捉二氧化碳。接著，將吸收了二氧化碳的胺溶液加熱，分離出純二氧化碳，再生可再利用的胺溶液。燃燒後碳捕捉技術可以直接應用於現有的燃煤電廠和工業設施，無需對燃燒過程進行大規模改造，能顯著減少二氧化碳排放量。

(3) 富氧燃燒 (Oxy-fuel Combustion)

富氧燃燒技術是增加燃燒過程中空氣中的氧氣濃度，通常是通過使用純氧或高濃度的氧氣來替代空氣中的氮氣，提升燃料的燃燒效率，產生一個高濃度的二氧化碳氣流，有利於後續的捕捉和處理。在富氧燃燒過程中，燃料燃燒產生的主要氣體包括二氧化碳和水蒸氣，相對於傳統燃燒過程中含有大量氮氣的煙氣，這使得從燃燒後氣體中分離二氧化碳變得更加高效和成本效益，且可以使用不同的燃料預處理方法，如燃料氧化、氧化還原和氯化等，以確保燃料與氧氣之間的反應達到最佳效果。

(4) 工業製程 (Industrial processes)

此方法又可以分為化學迴圈燃燒技術和鈣循環技術。化學迴圈燃燒技術主要利用氧化還原反應進行。首先，金屬氧化物與燃料反應生成二氧化碳、氫氣和還原後的金屬，然後將還原後的金屬與氧氣反應，重新生成金屬氧化物，進而回到第一步的循環過程。鈣循環技術的原理是使用氧化鈣與二氧化

碳結合生成碳酸鈣，隨後經過高溫處理釋放二氧化碳，剩餘的物質是氧化鈣，可再次循環使用。



2.1.2 碳運輸

碳運輸其主要目的是將從工業設施或能源生產過程中捕獲的二氧化碳安全地運送至儲存或利用地點。這項技術涉及多種運輸方式，包括管道、槽車、鐵路和船舶等，每種方式都有其適用的情境和優勢。管道運輸通常用於長距離和大規模運輸，具有高效率 and 較低的運輸成本；槽車運輸則適合於短距離或小規模的運輸需求。鐵路和船舶運輸則主要用於跨越長距離或需要跨海運輸的情況。碳運輸過程中，安全性和監控是至關重要的，需要實施嚴格的安全措施來防止二氧化碳的泄漏或意外事件。此外，考慮到能源消耗和碳足跡，選擇最適合的運輸方式和最佳路線也可以最大程度地降低運輸過程的環境影響。

2.1.3 碳封存

碳封存為 CCS(Carbon Capture and Storage)中最關鍵的階段，目前主要方式分為礦化封存、地質封存、海洋封存和生物封存等四大類，詳細說明如下：

(1) 礦化封存

礦化封存是一種利用地表的鹼金屬或鹼土金屬氧化物與二氧化碳進行化學反應的技術，目的是將二氧化碳轉變成固態碳酸鹽或其他穩定形式，從而有效封存二氧化碳。在這過程中，鈣和鎂因其在地殼中豐富的含量，常被用作封存二氧化碳的氧化物。礦化封存技術主要有兩種方式：乾式和溼式。乾式方式是直接將鹼金屬氧化物與二氧化碳接觸反應，形成穩定的礦物堆積。而溼式方式則是先將二氧化碳溶解於溶液中，再與鹼金屬氧化物反應生成穩定的礦物沉澱，最後通過分離的方式去除沉澱物。溼式方式的封存技術穩定性較高，但相對來說成本也較高。這些技術的發展和應用有助於減少大氣中二氧化碳的含量，進而對抗全球暖化和氣候變遷，是當前被廣泛研究和探索的重要領域之一。

(2) 地質封存

地質封存是一種將二氧化碳轉化為流體後注入地下數千公尺深的存儲區域的技術。這些存儲區域可以包括老舊油氣層、難以開採的煤礦層以及深層地下水層等地質環境。利用地下高壓高溫的條件，使得二氧化碳能夠保持流體狀態進行碳封存。地質封存技術之所以被認為是有效的二氧化碳封存方法，一方面是因為地底的孔隙空間相對有限，可以有效限制二氧化碳的擴散。另一方面，地下高壓高溫的環境有助於保持二氧化碳的流體狀態，使其能夠穩定地儲存長期。實施地質封存技術需要進行仔細的地質探勘和初步研究，以確保適合的地下儲存區選址。考慮到地質特徵、地下水資源保護等因素，並進行長期監測是至關重要的。這些措施有助於確保地質封存技術的安全性和可持續性，同時降低潛在的環境風險。總的來說，地質封存技術被視為目前可行性最高的二氧化碳封存方法之一，具有高潛能和相對較低的成本，對於減少大氣中二氧化碳含量、應對氣候變遷具有重要意義。

(3) 海洋封存

海洋封存是一種將二氧化碳透過船舶運輸或管線輸送至深層海洋中，並通過溶解或灌注在海床上形成人工湖的技術。這種方法雖然具有封存二氧化碳的潛力高和成本適中的優點，但同時也引發了環保爭議。海洋封存技術的主要爭議點在於可能增加海水中的二氧化碳濃度，對海洋生態系統和生物的生存環境造成不利影響。二氧化碳在海水中溶解會形成碳酸，降低海水的pH值，對珊瑚礁、貝類等海洋生物可能產生負面影響，這些生物對酸化敏感。因此，海洋封存技術的實施需要考慮和解決這些生態風險，必須進行詳細的環境影響評估和監測。儘管存在許多挑戰，海洋封存技術作為一種潛在的二氧化碳封存方式，仍然吸引了科學家和工業界的注意，因為其可以利用廣闊的海洋空間來封存大量的二氧化碳，可以顯著解決氣候變遷及暖化問題。

(4) 生物封存

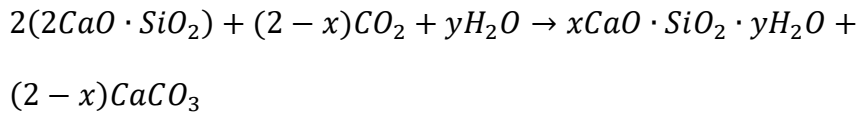
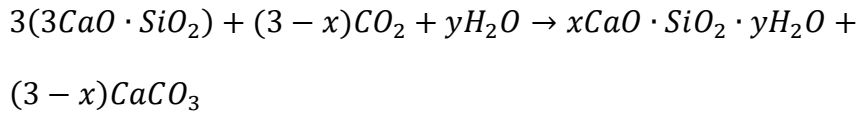
生物封存是一種利用綠色藻類進行光合作用，從而將二氧化碳固定和封存的技術。這種方法涵蓋了養殖微藻和植樹等多種方式。在生物封存的過程中，綠色藻類透過光合作用將二氧化碳轉化為有機碳，同時釋放氧氣。近年來，國內產業在生物封存技術上進行了相關研究，希望能夠利用這些技術來回收二氧化碳，同時轉化成具有經濟效益的產物。例如，利用養殖微藻來生產生物燃料、飼料等，不僅可以減少大氣中的碳排放，還可以創造新的產品價值。生物封存技術不僅有助於減少溫室氣體的排放，還能促進生態保護和永續發展。儘管在實施過程中面臨技術挑戰和成本問題，但其潛力和環境效益仍使其成為當前重要的研究和發展領域之一。

2.1.4 混凝土碳化反應機制

因水泥及其水化產物中包含可與二氧化碳反應的成分，故自70年代起，學者們就提出將二氧化碳封存在混凝土內的想法，但高昂的二氧化碳生產成本和對混凝土性能可能產生的負面影響，一直是其發展的主要障礙。然而，隨著全球溫室氣體減排的迫切性增加和技術進步，這一概念再次受到關注。目前的研究集中在找到不影響混凝土強度和性能的情況下，有效封存二氧化碳的方法。

混凝土之碳封存是藉由二氧化碳與混凝土產生的碳化反應使二氧化碳得以吸收於混凝土當中[15]，而碳化反應的反應物與產物如圖 2.1-1所示，主要分為「水泥碳化反應」與「水泥水化物碳化反應」。

水泥的碳化反應是指 C2S 和 C3S 與二氧化碳反應後形成 C-S-H 膠體和碳酸鈣的過程，這是目前公認的水泥碳化反應機制[5][15]。主要的反應方程式如式 2.1-1 式 2.1-2 所示。碳化反應生成的產物是由 C-S-H 膠體和碳酸鈣混合而成，這些產物能夠覆蓋混凝土表面並填充孔隙，從而提高混凝土的微觀結構緻密性，並增強其早期強度。



水泥水化物之碳化反應如式 2.1-3、式 2.1-4、式 2.1-5、式 2.1-6 所示，氫氧化鈣(CH)和 C-S-H 膠體和二氧化碳反應構成碳酸鈣和矽膠[5][15]，而式 2.1-4 被視為可能對混凝土強度發展有害，因為 C-S-H 膠體的分解會導致強度降低，但若此反應是發生於早齡期，反而可利用碳化反應對其強度與性能進行改善，並提高混凝土的耐久性。

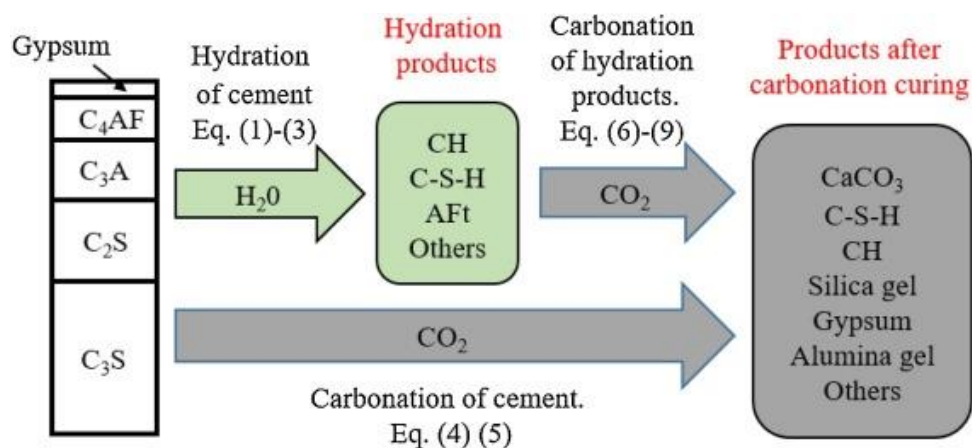
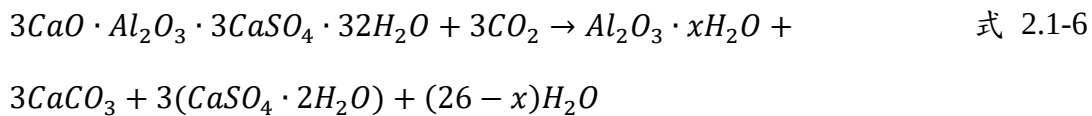
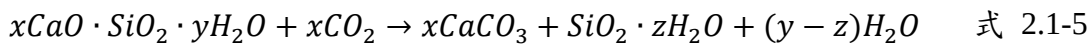
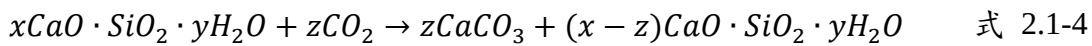
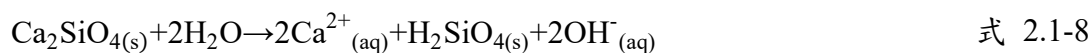


圖 2.1-1 碳化反應的反應物與反應產物[15]

而在文獻中[26][28]為了得到混凝土碳化反應中更詳細的反應行為，推導出了碳化反應的數學理論模型，該模型主要分為五個階段，以下將分別說明。

第一階段為混凝土之脫鈣作用，混凝土中含有鈣離子的化學成分如 C_2S 、 CaO 因溶解於水中而解離出鈣離子，其解離出的鈣離子會游離在水中，並且生成 OH^- 使得混凝土的pH值上升，如式 2.1-7與式 2.1-8所示。



第二階段為二氧化碳開始進入混凝土孔隙並且向內擴散，其會受到二氧化碳的灌入速率、二氧化碳的擴散係數以及二氧化碳從氣態轉換成水溶液態的影響，如式 2.1-9所示。

$$\frac{\partial(\varepsilon\varphi^a[CO_{2(g)}])}{\partial t} = D_{CO_{2(g)}} \frac{\partial^2(\varepsilon\varphi^a[CO_{2(g)}])}{\partial x^2} - v \frac{\partial(\varepsilon\varphi^a[CO_{2(g)}])}{\partial x} - r_{CO_{2(aq)}} \quad \text{式 2.1-9}$$

D_{CO_2} ：氣態二氧化碳的擴散係數 [$m \cdot s^{-1}$]

ε ：孔隙率 [dimensionless]

v ：氣態二氧化碳灌入的速率 [$m \cdot s^{-1}$]

φ^a ：孔隙水佔全部孔隙的比例 [dimensionless]

$r_{CO_{2(aq)}}$ ：氣態二氧化碳溶解於孔隙水中轉成水溶液態的速率 [$mol \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$]

第三階段為氣態二氧化碳溶解於孔隙水中轉變成水溶液態，此階段會因為牽涉到二氧化碳由氣態轉換成水溶液態而受到亨利定律的影響，除此之外，還有水溶液態二氧化碳的擴散係數、二氧化碳水化成碳酸(H_2CO_3)並解離成 H^+ 與 CO_3^{2-} 的反應速率以及碳化反應率的影響，如式 2.1-10所示。

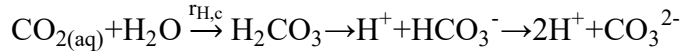
當二氧化碳溶於水中後，將會進行水化反應形成碳酸(H_2CO_3)，並解離出 H^+ 、 HCO_3^{2-} 、 CO_3^{2-} ，其中二氧化碳的水化速率 $r_{H,c}$ 會受到整體溶液的 pH 值影響，在 pH 值低($pH < 9$)的情況下，水化速率 $r_{H,c}$ 會僅與 $CO_{2(aq)}$ 有關，但在 pH 值高($pH > 9$)的情況下，水化速率 $r_{H,c}$ 不僅會與 $CO_{2(aq)}$ 有關，還與 $[OH^-]$ 有關，如式 2.1-11、式 2.1-12、式 2.1-13 所示。因此，氣態的 $CO_{2(g)}$ 溶解於孔隙水中轉變成水溶液態的 $CO_{2(aq)}$ 並進行水化反應的這兩個化學反應可以由式 2.1-14 的偏微分描述之。

$$r_{\text{CO}_2(\text{aq})} = k_t(k_{\text{Henry}}[\text{CO}_2(\text{g})] - [\text{CO}_2(\text{aq})])$$

式 2.1-10

k_t ：二氧化碳氣相與液相的質量轉換係數，約為 $3.47 \text{ [s}^{-1}]$

k_{Henry} ：二氧化碳氣體溶入水中的亨利係數， 25°C 下約為 $0.8317 \text{ [dimensionless]}$



式 2.1-11

高pH值 ($\text{pH} > 9$):

$$r_{\text{H,c}} = k [\text{OH}^-][\text{CO}_{2(\text{aq})}]$$

式 2.1-12

低pH值 ($\text{pH} < 9$):

$$r_{\text{H,c}} = k' [\text{CO}_{2(\text{aq})}]$$

式 2.1-13

$r_{\text{H,c}}$ ：二氧碳酸水化的速率 $[\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}]$

k ：高pH值下， 25°C 的 CO_2 水化反應常數，約為 $8.3 \text{ [mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}]$

k' ：低pH值下， 25°C 的 CO_2 水化反應常數，約為 $3.58 \times 10^{-2} \text{ [s}^{-1}]$

$$\frac{\partial(\varepsilon\varphi^w[\text{CO}_{2(\text{aq})}])}{\partial t} = D_{\text{CO}_{2(\text{aq})}}^* \frac{\partial^2(\varepsilon\varphi^w[\text{CO}_{2(\text{aq})}])}{\partial x^2} + r_{\text{CO}_{2(\text{aq})}} - r_c$$

式 2.1-14

$D_{\text{CO}_2}^*$ ：水溶液態 $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ 的擴散係數，約為 $1.16 \times 10^{-13} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$

r_c ：水溶液態 $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ 與水泥成份參與碳化反應的速率 $[\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}]$

φ^w ：孔隙中空氣佔全部孔隙的比例 $[\text{dimensionless}]$

第四階段則是水溶液態 $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ 與水泥的化學成份如 C_3S 、 C_2S 、 C-S-H 膠體的碳化反應，其中 r_i 係指水泥中化學成份 i 與二氧化碳進行碳化反應的碳化速率，此項受到水泥化學成份 i 的反應速率常數 k_i 、水泥化學成份 i 的孔隙接觸表面積 $a_{s,i}$ 影響。隨著碳化反應進行，混凝土的表面會先行與二氧化碳接觸而反應，生成碳酸鈣堆積沉澱，然後碳酸鈣將會堆滿表面孔洞，阻擋二氧化碳進一步的向內部擴散，使內部的水泥成份無法有效的參與碳化反應。因此，碳化過程中的孔隙將會因為碳酸鈣的形成而降低，文獻[28]因而採用 f_c 這項孔隙折減係數來描述此物理現象，如式 2.1-15、式 2.1-16、式 2.1-17、式 2.1-18、式 2.1-19所示，各水化產物的反應速率常數如表 2.1-1所示。

表 2.1-1 C₃S、C₂S 與 C-S-H 膠體的碳化反應速率常數[28]

	k _{C3S}	k _{C2S}	k _{CSH}
反應速率常數k [m.s ⁻¹]	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹

$$r_C = 3r_{C_3S} + 2r_{C_2S} + 3r_{CSH} + 3r_{AF_t} + \varepsilon \phi^w r_{CH} \quad \text{式 2.1-15}$$

$$r_i = k_i \cdot a_{s,i} \cdot [\text{CO}_{2(\text{aq})}] \quad \text{式 2.1-16}$$

$$a_{s,i} = a_s \cdot \frac{1}{1-\varepsilon} \cdot \bar{V}_i \quad \text{式 2.1-17}$$

$$a_s = a_{s0} - f_c \cdot [\text{CaCO}_3] \quad \text{式 2.1-18}$$

$$a_{s0} = S \cdot \rho_{\text{con}} \quad \text{式 2.1-19}$$

$\bar{V}_i$ ：每莫耳下水泥化學成分i的體積 [m³·mol⁻¹]

a_s ：每單位體積下孔隙的表面積 [m²·m⁻³]

$a_{s,i}$ ：每個化學成份i的單位體積下孔隙的表面積 [m²·m⁻³]

a_{s0} ：每單位體積下孔隙的初始表面積 [m²·m⁻³]

S ：每單位重量下樣品孔隙的比表面積 [m²·kg⁻¹]

f_c ：孔隙折減係數，用來描述碳酸鈣沉澱減少孔隙的物理現象

第五階段則是游離的Ca²⁺與孔隙水中的CO₃²⁻結合，形成穩定的碳酸鈣鹽類(CaCO₃)並沉澱至孔隙內部或堆積於混凝土表面，如式 2.1-20所示。

$$Q_{\text{CO}_2} = \frac{d(C_{\text{CaCO}_3})}{dt} = -\frac{d(\text{CO}_3^{2-})}{dt} = k[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] \quad \text{式 2.1-20}$$

C_{CaCO_3} ：碳酸鈣的濃度 [mole/L]

k ：反應速率常數 [L/mol·sec]，25°C下實驗結果為2.08(L/mol/sec) [11]

除了二氧化碳能夠藉由理想的數學模型量化之外，文獻[16]同樣認為可以計算出混凝土中C-S-H膠體的生成量、Ca(OH)₂的生成量，而其原理是透過化學反應式的係數比例關係來求得各生成量，如式 2.1-21、式 2.1-22、式 2.1-23、

式 2.1-24所示。

$$CH(t)=R_{CHCE} \times Co \times \alpha \cdot v_{SG} \cdot \alpha_{SG} \cdot P$$

式 2.1-21

$$CSH(t)=CSH_c(t)+CSH_{SG}(t)$$

式 2.1-22

$$CSH_c(t)=3.71 \times fs'_c \times Co \times \alpha$$

式 2.1-23

$$CSH_{SG}(t)=3.04 \times fs'_p \times P \times \alpha_{SG}$$

式 2.1-24

Co：水泥的質量 [kg]

α ：水泥的水化度 [dimensionless]

α_{SG} ：爐石的水化度 [dimensionless]

P：膠結材的質量 [kg]

v_{SG} ：每單位爐石水化下產生的 $Ca(OH)_2$ 重量，以數學式 $\frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{slag}}$ 表示 [kg]

因為爐石成份較複雜，文獻[16]提出計算 v_{SG} 的經驗公式為 $0.25-0.1 \frac{P}{P+Co}$

fs'_c ： SiO_2 佔水泥的重量比例 [dimensionless]

fs'_p ： SiO_2 佔爐石的重量比例 [dimensionless]

R_{CHCE} ：每單位水泥水化產生的 $Ca(OH)_2$ 重量，以數學式 $\frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{cement}}$ 表示 [kg]

$Ca(OH)_2$ 的生成量和C-S-H膠體的生成量皆考慮材料中有水泥與爐石參與的化學反應。有文獻認為C-S-H膠體的生成量與 SiO_2 息息相關，因此以 SiO_2 作為C-S-H膠體的數學模型生成來源。除此之外，水泥水化後的C-S-H膠體和爐石進行卜作嵐反應後的C-S-H膠體，不再是常見的 $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ 型態，會因為矽容易被鋁取代而降低C-S-H膠體內部的鈣矽比，經過大量的實驗數據統計後得知水泥水化後生成的C-S-H膠體為 $C_{1.76}SH_{3.26}A_{0.05}$ (分子量為222.34)，而爐石進行卜作嵐反應後生成的C-S-H膠體則為 $C_{1.14}SH_{2.64}A_{0.11}$ (分子量為182.58)，這兩種C-S-H膠體的分子量各自除以二氧化矽(SiO_2)的分子量60，即為式 2.1-23、式 2.1-24 的係數3.71與3.04。

混凝土的強度來源被認為是來自於C-S-H膠體隨齡期的改變而增加強度，因此許多混凝土強度公式都與C-S-H膠體有關。文獻[16]提出水泥水化後的C-S-H膠

體(CSH_c)以及爐石水化後生成的C-S-H膠體(CSH_{SG})量化的數學模型，並利用式 2.1-25來迴歸混凝土強度公式，迴歸結果如圖 2.1-2所示。

$$f'_c(t) = A_1 \times \frac{CSH_c(t)}{W_o} + A_2 \times \frac{CSH_{SG}(t)}{W_o} - A_3$$

式 2.1-25

CSH_c(t)：水泥隨水化時間進行而生成的 C-S-H 膠體總量 [kg·sec⁻¹]

CSH_{SG}(t)：爐石隨水化時間進行而生成的 C-S-H 膠體總量 [kg·sec⁻¹]

W_o：水的質量 [kg]

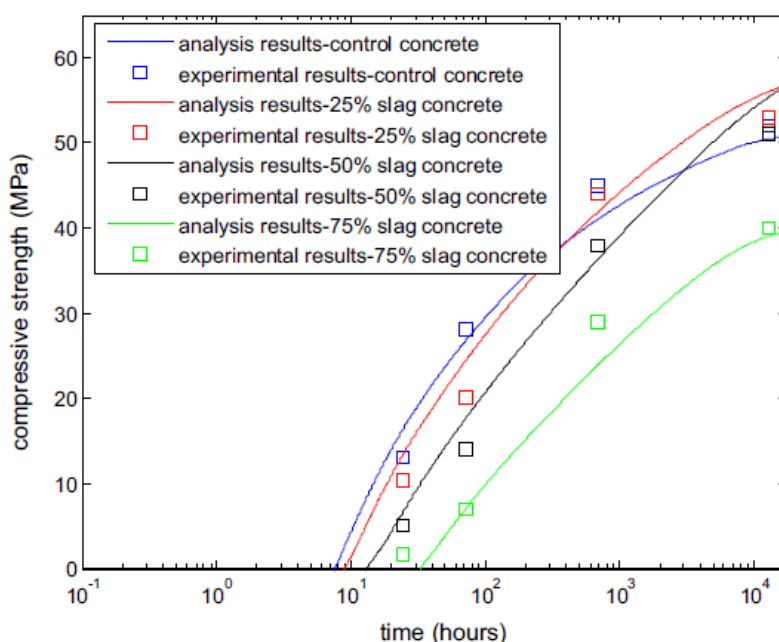


圖 2.1-2 CSH_c(t)與 CSH_{SG}(t)與抗壓強度之迴歸圖[16]

2.2 二氧化碳養護介紹

二氧化碳養護是混凝土碳封存中的其中一項方法，文獻中針對二氧化碳養護的方式及流程有很多種嘗試，本研究使用現今最常見的二氧化碳養護流程進行試驗，以下會詳細介紹二氧化碳養護各個流程，並介紹影響二氧化碳養護的各個參數。

2.2.1 二氧化碳養護流程

常見的二氧化碳養護流程如圖 2.2-1 所示，每個步驟對混凝土碳化程度與混凝土的性能都會產生些許的影響，各個步驟詳細介紹如下。

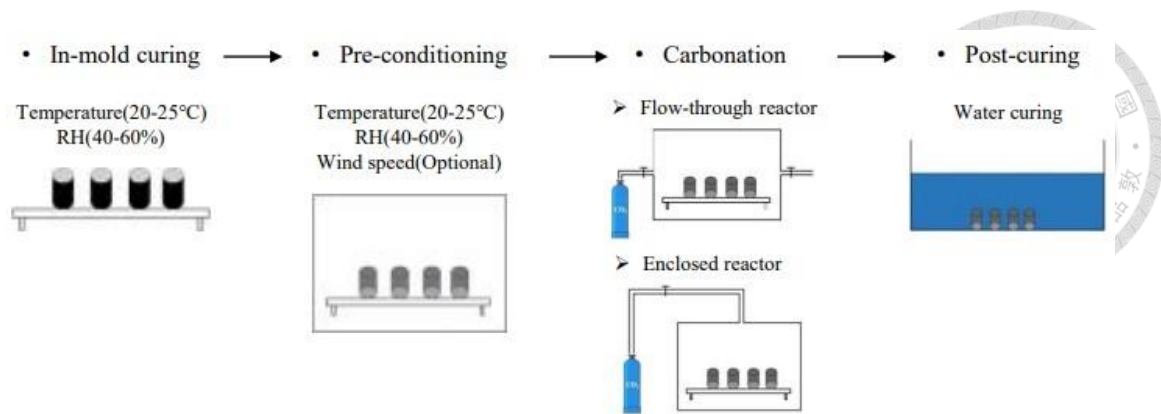


圖 2.2-1 二氧化碳養護流程[15]

2.2.1.1 模內初期水化

當混凝土試體澆置完成後，讓試體在模具中進行模內初期水化反應，直到測試或指定模內水化時間時再拆模進行下一個步驟。

2.2.1.2 預處理

在混凝土試體拆模後，為了促進二氧化碳進入孔隙進行碳化反應，通常會進行預處理以使試體失去部分水分並形成孔隙。這些孔隙允許二氧化碳進入混凝土，進行碳化反應，最終形成碳酸鈣，如圖 2.2-2 所示。這有助於提高混凝土的碳化養護效果。

當混凝土試體拆模後，其中的孔隙會充滿水分，這些水分可能阻礙二氧化碳進入孔隙進行碳化反應。因此，在 20 至 25 度溫度和 40%到 60%相對濕度的乾燥環境中進行預處理是必要的，以幫助孔隙中的水分逐漸散失。

然而，水分損失不應過多，因為水是混凝土進行碳化和水化反應的必要成分。過多的水分損失不僅可能影響水化反應並導致強度下降，還可能影響二氧化碳與混凝土的反應。因此，找到最佳的水分損失量以在二氧化碳吸收和混凝土強度之間取得平衡至關重要，這是碳化養護中不可忽視的重要因素。

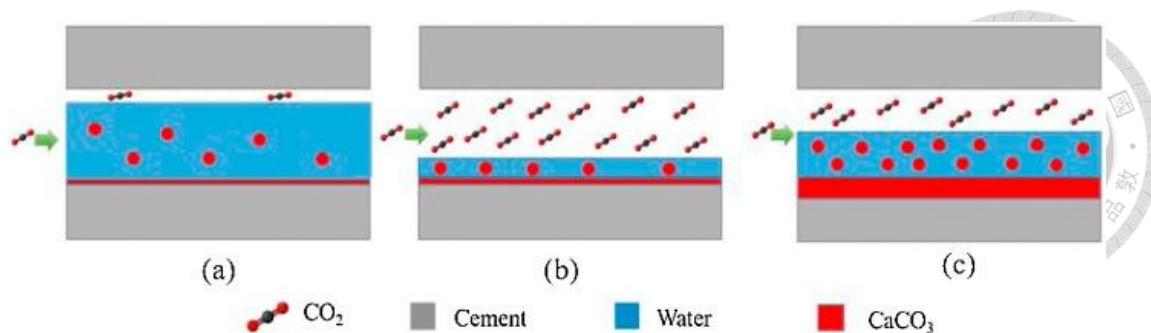


圖 2.2-2 二氧化碳進入試體孔隙反應示意圖[15]

2.2.1.3 碳化養護

預處理結束後，會進行碳化養護。這是將混凝土暴露於二氧化碳之中，使混凝土中尚未水化的水泥或是一些水泥的水化產物與二氧化碳進行反應。

碳化反應方式主要可以分成兩種方式，分別是封閉式跟流動式。封閉式系統如圖 2.2-3，為將試體放入密閉的壓力容器後，灌入高壓二氧化碳來進行碳化養護，是較常見之碳化養護方式，其優點為可以透過施加高壓二氧化碳來促進二氧化碳擴散，進而提升試體之吸收效率和碳化程度。流動式系統如圖 2.2-4，是在一般大氣壓下灌入流動的二氧化碳，使二氧化碳在容器中循環流動與試體進行反應，此種養護方式規模較龐大，且試體之吸收效率和碳化程度相對於封閉式低，因此較為少見。

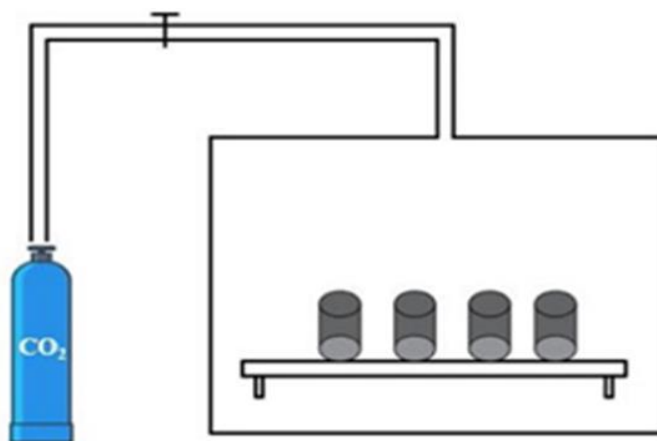


圖 2.2-3 封閉式系統

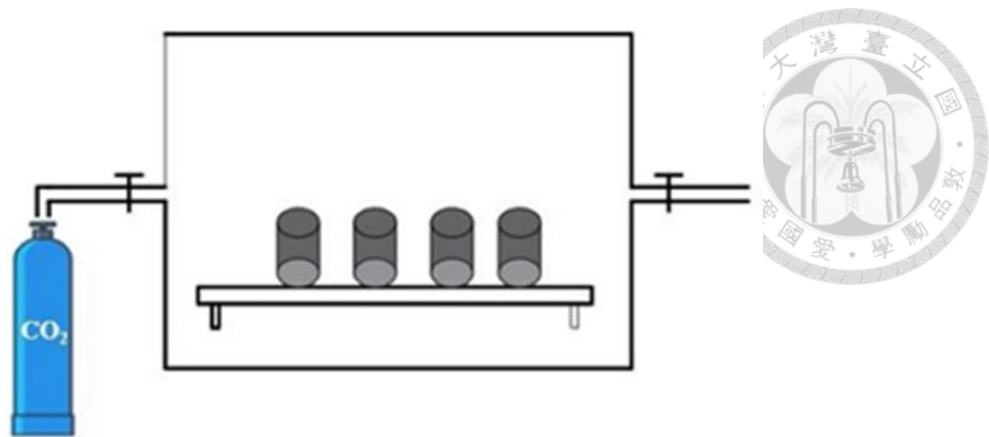


圖 2.2-4 流通式系統

在圖 2.2-5 與圖 2.2-6 中 PCC 代表封閉式碳化養護，FCC 代表流通式碳化養護。圖 2.2-5 為在不同的碳化養護時間下比較不同養護方式之碳化度，可以看到，在碳化養護時間較短的情況下，FCC 之碳化度明顯低於 PCC 之碳化度，推測原因為 FCC 之碳化濃度與壓力較低而導致。而隨著養護時間的增加，FCC 之碳化度將逐漸追上 PCC 之碳化度，到 24 小時時僅略低於 PCC，推測原因為 FCC 之二氧化碳能夠持續流動帶走更多孔隙內水分，使更多二氧化碳進入孔隙進行碳化反應，以 FCC 能夠自行帶走水分的特性來看，或許 FCC 不需要預處理即可達到可觀的碳化度。圖 2.2-6 則為 FCC 與 PCC 碳化度與抗壓強度關係圖，可以看到碳化度皆與抗壓強度呈現正相關的趨勢，而兩種養護之間的差距不明顯，由此結果來看，無論使用哪種養護方式，只要試體之碳化度夠高，就能有效提升強度。

Curing time, hours		1	2	4	8	12	24
Curing degree, %	PCC-	47.5	55.6	59.5	61.3	63.9	64.1
	FCC-	13.2 ± 0.5	28.8 ± 0.6	40.4 ± 0.5	41.1 ± 0.9	46.4 ± 0.6	53.1 ± 0.7
Compressive strength, MPa	PCC-	17.7 ± 0.7	24.0 ± 0.5	24.6 ± 0.3	25.3 ± 0.6	26.8 ± 0.4	28.6 ± 0.6
	FCC-	—	13.8 ± 1.7	19.3 ± 0.3	22.3 ± 0.5	24.2 ± 1.4	28.1 ± 1.1

圖 2.2-5 在封閉與流通式系統下碳化度與抗壓強度隨時間關係圖[2]

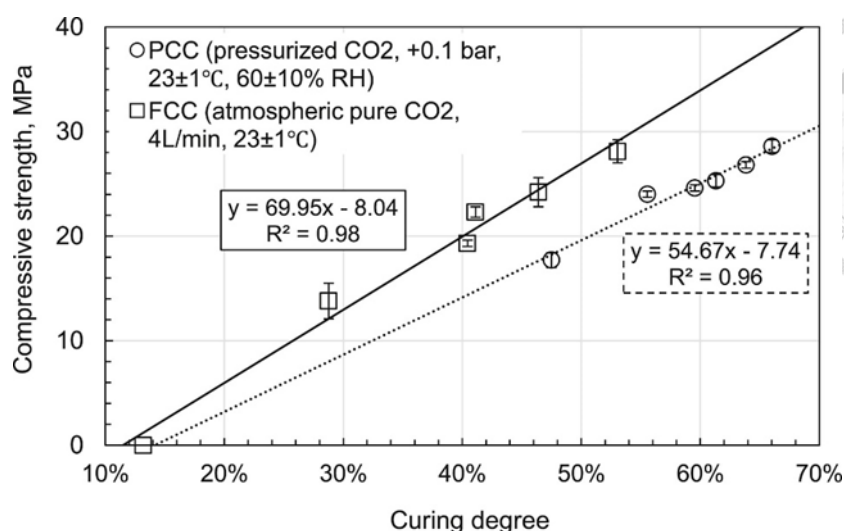


圖 2.2-6 封閉式系統與流通式系統碳化度與抗壓強度比較圖[2]

2.2.1.4 後養護

在碳化養護結束後，會將混凝土放入飽和石灰水進行後養護，目的是為了補足試體在預處理和碳化養護過程中損失的水分，使尚未發生反應的水泥可以繼續進行水化反應，並於指定測試齡期再取出。

2.2.2 二氧化碳養護參數

2.2.2.1 配比(水灰比)

理論上，混凝土的水灰比越低，表示其中水泥的含量越高，因此在碳化養護過程中理論上應該有更多水泥參與反應。然而，根據文獻[15][23][25][53]的研究結果，實際情況則與此相反。造成這一現象的原因在於，當水灰比越高時，試體在失去水分後會留下更多且更大的孔隙，如圖 2.2-7 所示。比較左側為低水灰比試體，右側為高水灰比試體，在失去水分後，右側的孔隙顯然比左側更大，這使得二氧化碳更容易進入試體中進行碳化反應，進而提高碳化度。表 2.2-1 中的數據也顯示，隨著水灰比的增加，碳化深度、碳化面積比例和碳化度均呈現增加的趨勢，這進一步驗證了前述的理論。

在圖 2.2-8 中，觀察到隨著碳化養護時間的增加，試體的抗壓強度也隨之增加。以水灰比為 0.3 的試體為例，碳化 3 小時後其強度相較於未碳化時增加了

7.5%；而水灰比為 0.4 的試體，增加了 19.4%。當碳化時間延長至 6 小時時，水灰比為 0.3 的試體強度增加了 19.6%，而水灰比為 0.4 的則增加了 32.6%。這些數據清楚地顯示，碳化養護對於水灰比較高的試體在抗壓強度上貢獻更顯著。這是因為高水灰比試體具有較高的碳化度，從而在碳化養護的早期階段顯著增強了材料的力學性能。

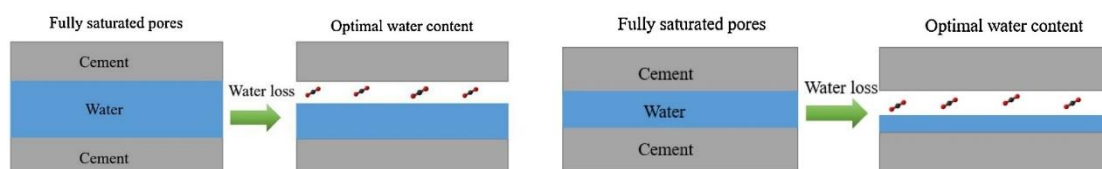


圖 2.2-7 二氧化碳進入不同水灰比試體孔隙示意圖[15]

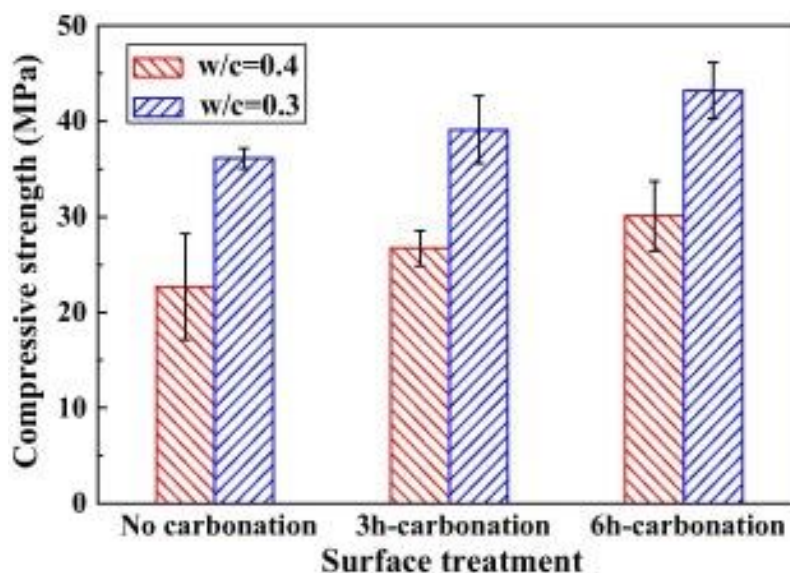


圖 2.2-8 不同水灰比試體在不同碳化時間的抗壓強度[23]

表 2.2-1 不同水灰比試體之碳化結果比較[53]

水灰比	碳化深度	碳化面積比例	碳化度
0.45	0.41cm	30.06%	20.66%
0.55	0.62cm	43.30%	32.67%
0.65	1.10cm	68.47%	45.36%

2.2.2.2 模內水化時間

當水泥漿試體澆置完成後，會在模具內進行初期水化一段時間，待達到指定的水化齡期後再進行拆模、預處理和碳化養護。然而，根據文獻[40]的研究，目前許多碳化養護相關的文獻都忽略了碳化養護前試體的水化齡期對結果的影響。該文獻探討了不同初期水化齡期的水泥漿試體進行碳化養護 1 小時的情況，結果顯示如圖 2.2-9 所示：藍色代表二氧化碳吸收量，橘色代表重量增加量，紅色則表示碳化過程中的水分損失。研究指出，當初期水化齡期較短時，試體吸收的二氧化碳量較多。這是因為較短的水化齡期意味著試體中有更多的水泥和水尚未進行反應，因此更多的反應物可以參與碳化反應，進一步增加了二氧化碳的吸收量。然而，較短的初期水化齡期也意味著在碳化反應進行較快的情況下，試體內未反應的游離水分較多，這將導致更多的熱能釋放和未反應水的蒸發，使得水泥漿體嚴重失水，進而降低了其強度和性能。從重量增加量的角度來看，雖然較短的初期水化齡期會導致較高的二氧化碳吸收量，但實際的重量增加量卻較少，這是由於過多的水分損失所導致的結果。

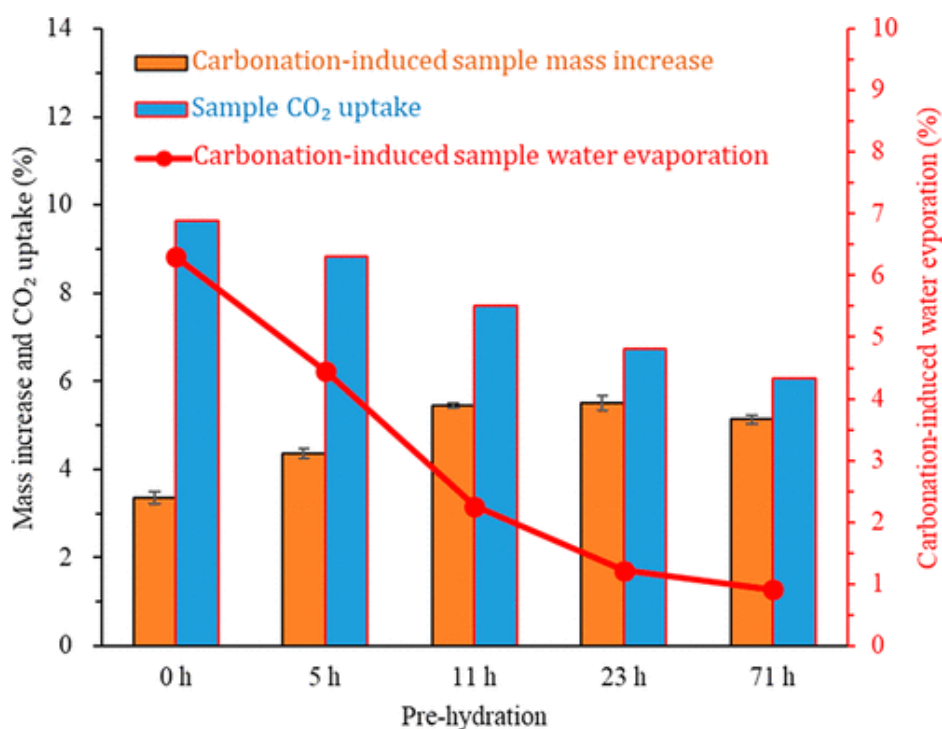


圖 2.2-9 碳化養護對不同初期水化齡期試體之影響[40]

文獻[40]研究指出，在試體完成碳化養護後，為了補償試體的水分損失，首先使用去離子水進行補充，然後將試體用防滲透膜包裹，存放在水封容器中，直到達到 28 天齡期後再進行水化物束縛水含量和抗壓強度的測試。根據結果顯示在圖 2.2-10 中，隨著初期水化齡期的增加，試體中的 C-S-H、AFt、AFm 束縛水含量也相應增加。這可能是因為初期水化齡期較長，試體的碳化程度較低，使得後續的水泥水化反應比例增加。特別是在初期水化齡期達到 11 小時時，試體的束縛水含量接近未碳化的試體水平。這表明，在這個初期水化齡期下進行碳化反應，可以使未反應的水泥在幾乎不影響其水化反應的情況下進行碳化反應，進而改善混凝土的強度和性能。至於抗壓強度方面，研究指出過短的初期水化齡期確實可能會影響水泥漿體後續的水化反應，從而降低其強度；然而，當初期水化齡期超過 11 小時後，試體的抗壓強度均有顯著提升。

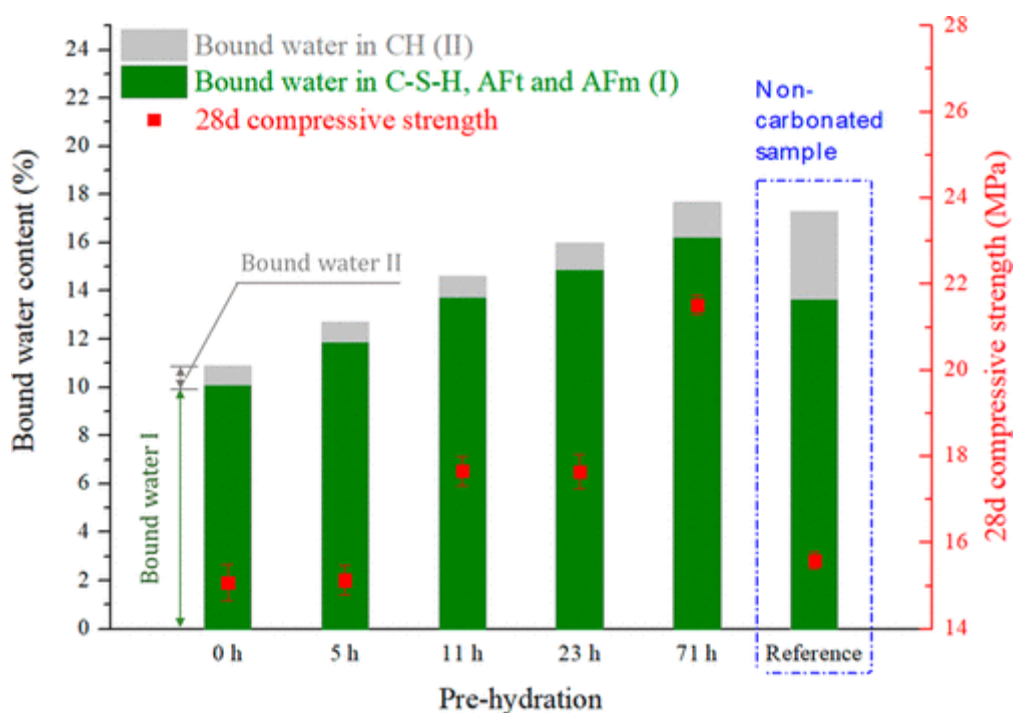


圖 2.2-10 28 天水化物束縛水含量和抗壓強度與初期水化齡期關係[40]

2.2.2.3 預處理時間

在 2.2.1.2 預處理 節中介紹了預處理的環境與目的，從中可以得知試體中的含水量會影響碳化度，而不同的預處理時間對於混凝土試體之水分損失量、二氧化碳吸收量與強度皆會造成影響。

文獻[8]研究了預處理時間對試體內部殘餘水量和二氧化碳吸收量的影響關係。根據圖 2.2-11 的結果顯示，隨著預處理時間的增加，試體內部的殘餘水量逐漸減少，直到預處理 4 小時後，損失水量接近 30%，此後損失速率減緩，可能是因為試體與預處理環境達到了一定的水分平衡。在碳化養護過程中，試體的碳化度在預處理時間為 4 小時內隨著時間的增加而提高。這是因為長時間的預處理導致更多的水分損失，使得試體內部釋放出更多的孔隙，有利於二氧化碳進入孔隙進行碳化反應。當預處理時間達到四小時後，試體的碳化度約為 20%，此後碳化度沒有顯著增加。這與前述的損失水量趨勢相似，顯示兩者之間存在正相關。文獻[53][54]的研究也得到了類似的結果，如圖 2.2-12、圖 2.2-13 所示，試體的二氧化碳吸收量與預處理水分損失量呈現正比關係。

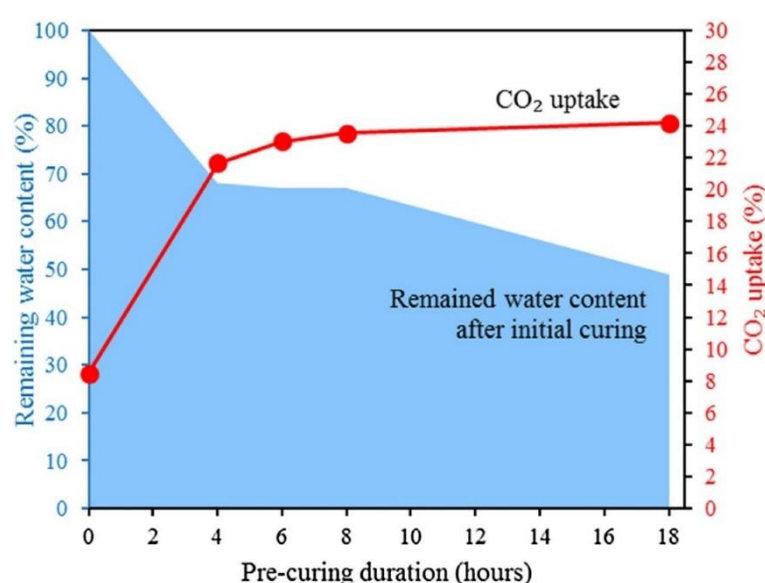


圖 2.2-11 預處理時間與二氧化碳吸收量、殘餘水量關係圖[8]

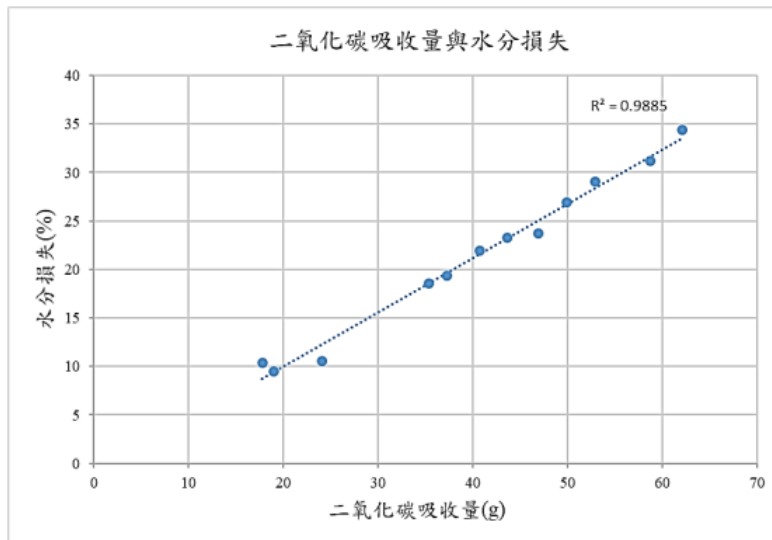


圖 2.2-12 二氧化碳吸收量與預處理水分損失量關係圖[53]

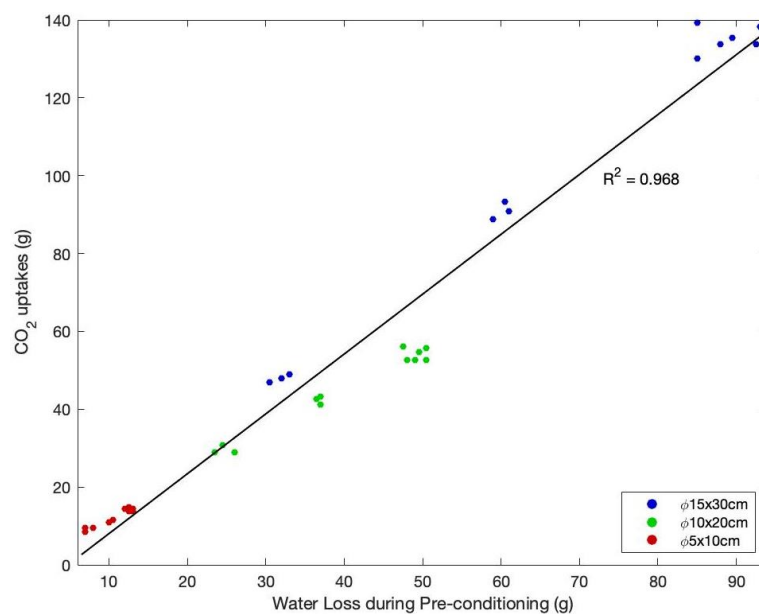


圖 2.2-13 二氧化碳吸收量與預處理水分損失量關係圖[53]

文獻[7]中對不同預處理時間下試體的抗壓強度進行了比較，如圖 2.2-14 所示。圖中黑色表示試體完成預處理後直接進行抗壓強度試驗，灰色則是完成預處理後再進行 2 小時碳化養護後的抗壓強度，最右邊的 Steam Curing 部分則展示了高溫蒸氣養護後的抗壓強度。研究發現，在預處理 2、4、8 小時後進行碳化養護，試體的早期抗壓強度顯著提升。特別是在預處理 8 小時後再進行 2 小時碳化養護

的情況下，試體的抗壓強度接近高溫蒸氣養護的水平。然而，在預處理 12、18 小時後，碳化養護對試體的強度沒有增加反而有所減少。這是因為過長的預處理時間導致水分損失過多，阻礙了水泥的碳化和水化反應的完整進行，進而影響了試體的碳化度和抗壓強度。

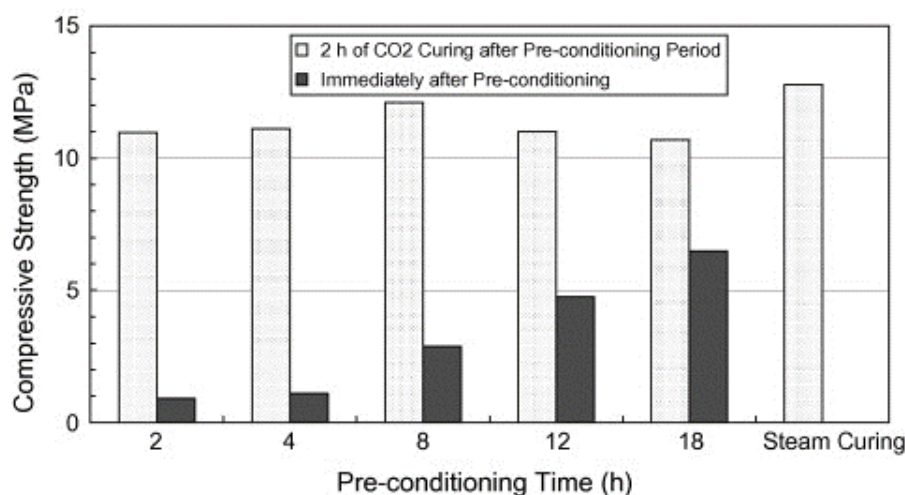


圖 2.2-14 不同預處理時間下試體之抗壓強度[7]

總結來看，從文獻[7][8][53][54]的研究中可以得出，當預處理時間達到一定程度時，試體與環境的水分損失速率會顯著減少，同時二氧化碳吸收量與水分損失量呈現正比關係。因此，只要確保在這個時間點上不要損失過多水分，避免對強度和碳化度造成負面影響，利用此預處理時間進行碳化養護可以在保證早期強度提升的同時，以相對較短的時間內獲得顯著的二氧化碳吸收量。

2.2.2.4 碳化濃度

碳化濃度指的是在二氧化碳養護過程中注入的二氧化碳濃度。文獻[15][34]比較了不同碳化濃度對二氧化碳養護的影響，如圖 2.2-15 所示，當二氧化碳濃度增加，試樣的碳化程度也會提高，兩者呈現指數關係，這是因為二氧化碳濃度直接影響其擴散效率，而擴散效率又與試樣的碳化效率密切相關，因此二氧化碳濃度越高，試樣的碳化程度也越高。

在圖 2.2-16 中顯示，試體的抗壓強度也隨著碳化濃度的增加而提升，這可能是由於較高的二氧化碳濃度使試樣的碳化程度增加，從而改善了試樣的微觀結構，導致強度的提升。

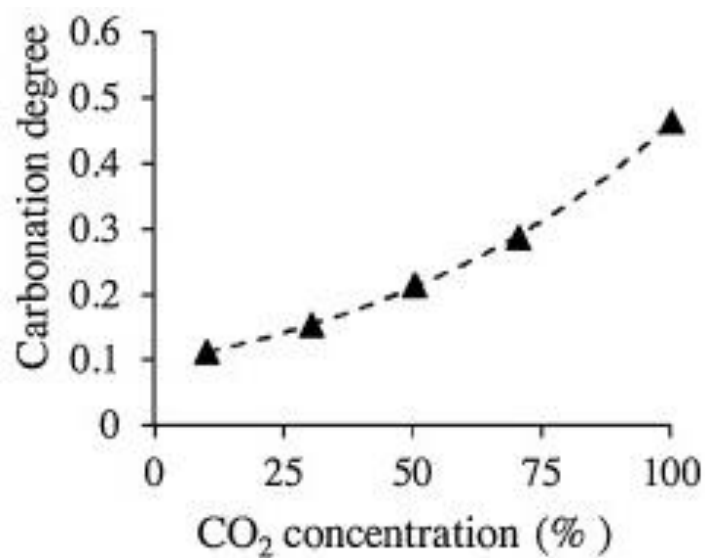


圖 2.2-15 碳化濃度與碳化度關係圖[34]

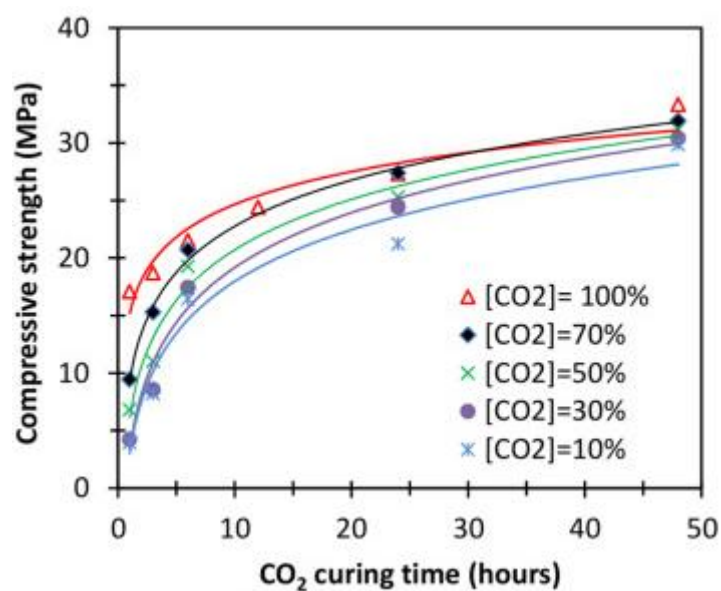


圖 2.2-16 不同碳化濃度與不同碳化時間之抗壓強度[34]

2.2.2.5 碳化壓力

在進行碳化養護之前，通常會先將封閉容器內抽成真空狀態，然後再注入二氧化碳。碳化壓力指的是注入容器內的二氧化碳氣壓大小。當碳化壓力越高，二氧化碳滲透速度越快，溶解在孔隙中的二氧化碳也越多，這會加快碳化速率。同時，較高的碳化壓力表示容器內有更多的二氧化碳可以參與反應。

文獻[2]比較了不同碳化壓力對碳化養護的影響，其中 RAS 為使用再生骨材的混凝土，NAS 為使用一般骨材的混凝土。圖 2.2-17 和圖 2.2-18 分別展示了碳化壓力與碳化度的關係，以及碳化壓力與抗壓強度的關係。當壓力從 0.1 大氣壓增加到 0.5 大氣壓時，NAS 的碳化程度從 23.8% 上升到 28.2%，RAS 的碳化程度從 39.9% 增加到 45.9%；同時，NAS 的抗壓強度從 18.9MPa 增加到 20.9MPa，RAS 的抗壓強度從 14.3MPa 增加到 17.4MPa。當氣壓從 0.5 大氣壓增加到 4 大氣壓時，NAS 的碳化度提高到 34.3%，RAS 提高到 50.1%；NAS 的抗壓強度最終達到 25.5MPa，RAS 達到 19.6MPa。

然而，儘管 NAS 和 RAS 的碳化度與抗壓強度隨著碳化壓力的增加而增加，其關係並非線性，而是類似對數關係。在碳化壓力從 0.1 大氣壓增加到 0.3 大氣壓時，增幅非常明顯，但超過 0.3 大氣壓後，增幅顯著減緩。因此，適當提升碳化壓力有助於提升混凝土的碳化度與抗壓強度，但過高的碳化壓力並沒有顯著意義，在碳化過程中維持適當的壓力即可有效促進試體與二氧化碳的碳化反應。

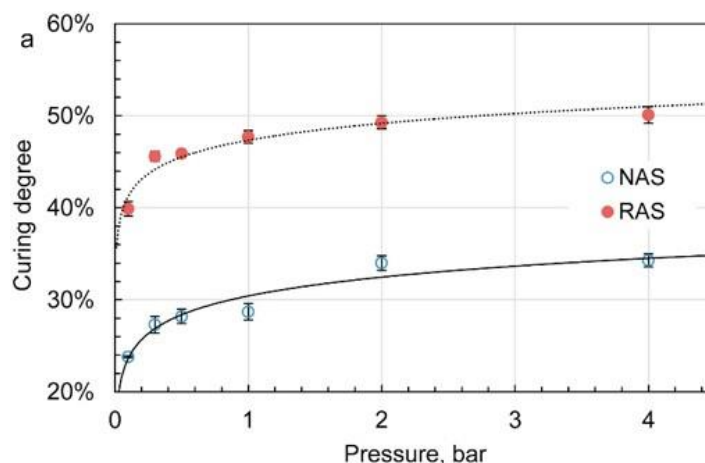


圖 2.2-17 碳化壓力與碳化度關係圖[2]

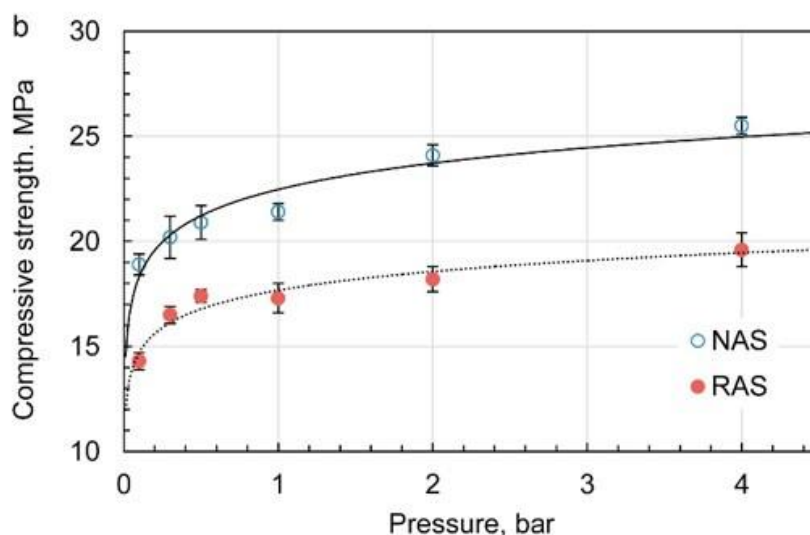


圖 2.2-18 碳化壓力與抗壓強度關係[2]

2.2.2.6 碳化溫度

碳化溫度是指碳化養護過程中的環境溫度。文獻[2]中比較了不同碳化溫度對碳化養護的影響，研究了使用再生骨材(RAS)和一般骨材(NAS)的混凝土。在這項研究中，碳化養護時間為2小時，碳化壓力控制在0.1 bar，相對氣壓下分別在20°C、35°C、50°C、70°C和80°C的溫度進行試驗。在圖2.2-19中展示的碳化溫度與碳化度的關係中，碳化溫度對RAS和NAS的碳化度影響很小。然而，在圖2.2-20中展示的碳化溫度與抗壓強度的關係中，抗壓強度明顯受到影響。當碳化溫度從20°C升高到80°C時，RAS的抗壓強度略有下降，而NAS的抗壓強度則略有上升。

碳化溫度對兩者影響不同的原因可能是，由於碳化溫度的升高，矽酸鹽中溶解出的鈣離子量增加，並且提高了二氧化碳的擴散速度。但同時，碳化溫度升高降低了二氧化碳的溶解性，使孔隙水的pH值升高，減慢了鈣離子的溶解速率。此外，碳化溫度的提升可能會帶走碳化反應中產生的熱能，進而帶走更多的游離水，這阻礙了後續的水化與碳化反應。綜合所有上述碳化溫度對於碳化養護之正面與負面影響，最終導致不同的實驗結果。

在實務方面，碳化溫度對試體的碳化度和抗壓強度沒有顯著影響，因此在碳化養護過程中利用儀器維持特定碳化溫度並不符合效益。比較合理的方法是直接在室溫下進行碳化養護。這樣的條件下，碳化反應和水化反應都是放熱反應，通過觀察試體內部的溫度變化，可以間接評估其在碳化養護過程中的反應情況。

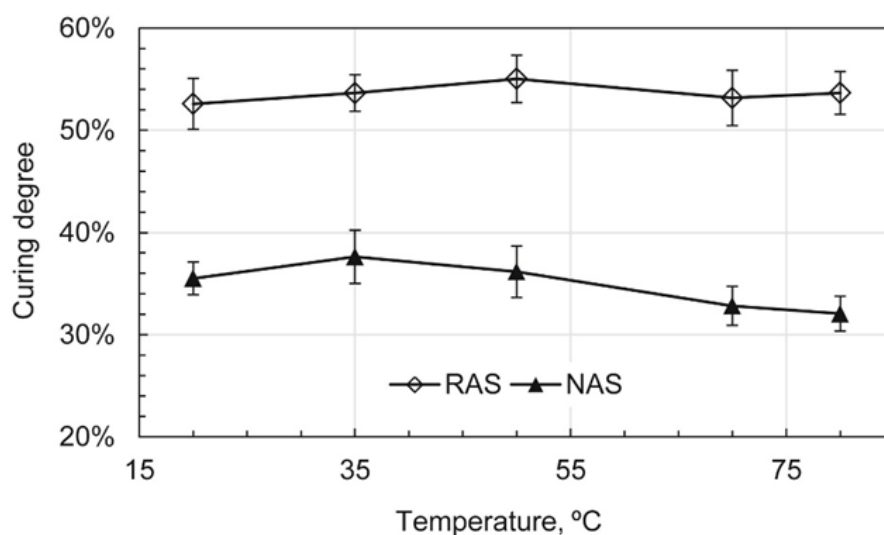


圖 2.2-19 碳化溫度與碳化度關係圖[2]

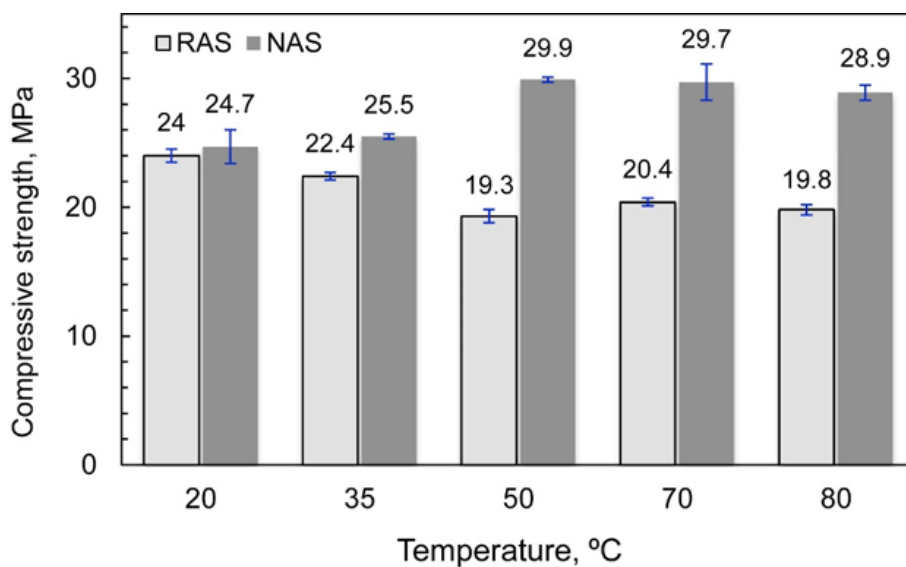


圖 2.2-20 碳化溫度與抗壓強度關係圖[2]

文獻[31]將溫度計放置在混凝土內部，觀察碳化反應過程中的溫度變化。如圖 2.2-21 所示，在碳化養護開始前 5 分鐘內，試體內部溫度沒有明顯變化。這可能是因為二氧化碳從鋼瓶注入容器時，液態二氧化碳變為氣態吸熱，而碳化反應放熱，兩個反應平衡了整體溫度。在 0 到 15 分鐘內，試體內部溫度急劇上升，並在 15 分鐘時達到約 60°C 的最高溫度。15 分鐘後，溫度隨時間增加而下降。這可能是因為碳化養護初期試體表面發生大量碳化反應，放出大量熱能使溫度急速上升，隨著碳化反應進行，生成的碳酸鈣逐漸覆蓋表面並填充孔隙，使二氧化碳難以滲透至試體內部，從而減慢碳化反應速率並減少放熱量。

文獻[41]比較了不同養護流程下，封閉容器內溫度的變化。如圖 2.2-22 所示，無論哪種養護流程，封閉容器內溫度都隨碳化養護時間增加而上升，且隨著時間推進，溫度增加趨勢趨於平緩。在碳化養護初期，溫度先下降再上升，與文獻[31]的結果相符，但整體而言，封閉容器內的溫度增加量並不明顯。

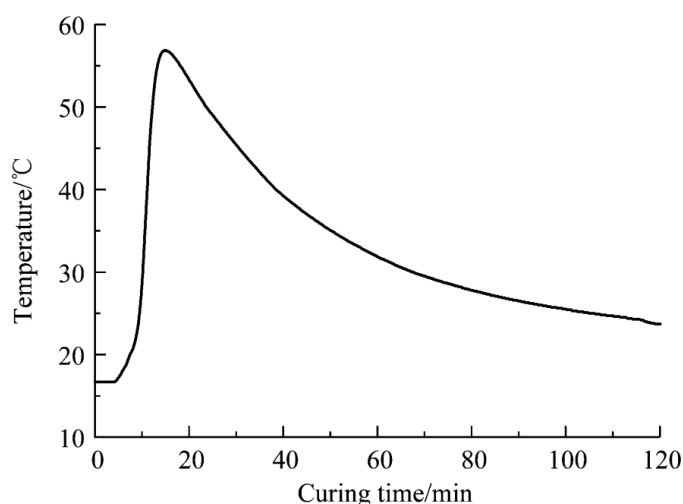


圖 2.2-21 碳化養護過程試體內部溫度曲線[41]

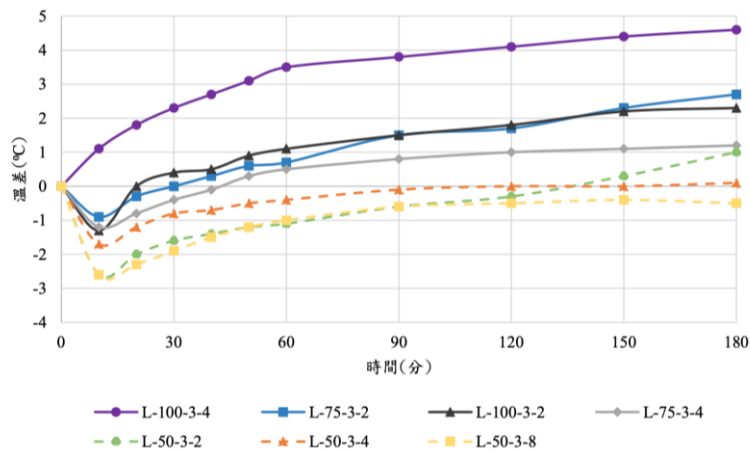


圖 2.2-22 碳化養護過程封閉容器內部溫度變化圖[45]

2.2.2.7 碳化養護時間

碳化養護時間是碳化養護過程中的關鍵因素。養護時間越長，試體與二氧化碳接觸的時間越長，從而能吸收更多的二氧化碳。文獻[2]中研究了使用再生骨材（RAS）和一般骨材（NAS）的混凝土，並展示了碳化養護時間與試體碳化度的關係（圖 2.2-23）。結果顯示，無論是 RAS 還是 NAS，碳化度都隨著碳化養護時間的增加而增加，但這種增加呈對數關係，而非正比關係。在碳化養護約 2 小時時，碳化度已達到 72 小時的一半。這可能是因為隨著碳化養護時間的增加，生成的碳酸鈣逐漸在試體表面和孔隙中堆積，使二氧化碳越來越難以滲透到試體內部，從而減慢了碳化反應的速率。

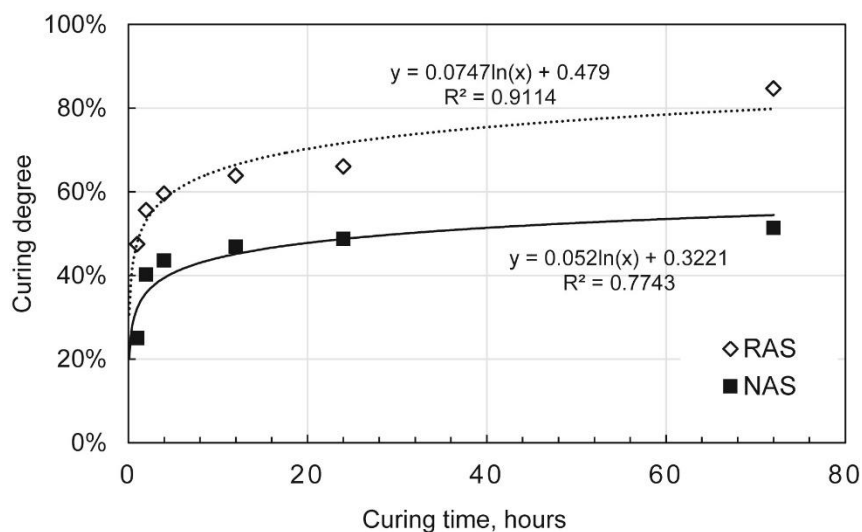


圖 2.2-23 碳化養護時間與試體碳化度關係[2]

文獻[3]中比較了不同碳化養護時間對混凝土孔隙率和抗壓強度的影響。如圖 2.2-24 所示，試體的孔隙率隨著碳化養護時間的增加而降低。在碳化養護 2 小時後，試體的孔隙率低於 24 小時水養護的試體，這表明碳化養護能有效提高混凝土的緻密性。然而，到了 28 天齡期，無論是碳化養護還是水養護，試體的孔隙率趨於一致。孔隙率的變化與抗壓強度是相對應，如圖 2.2-25 所示，在不同碳化養護時間下，試體的抗壓強度有所不同。碳化養護確實可以提升試體的早期抗壓強度，隨著碳化養護時間的增加，試體的早期抗壓強度顯著上升。碳化養護 24 小時的試體抗壓強度達到 48.4MPa，幾乎是水養護試體的 2 倍，甚至接近水養護 28 天的試體抗壓強度(52.4MPa)。然而，不論碳化養護時間長短，最終在水養護 28 天後的抗壓強度相差不大。這可能是因為碳化養護中的碳化反應會生成碳酸鈣，填充混凝土孔隙並包覆未完全反應的水泥顆粒。當碳酸鈣生成更多時，水泥顆粒的鈣離子溶解及水的擴散通道減少，導致後續水化反應無法完全進行。此外，水化和碳化反應之間存在競爭關係，在反應物固定的情況下，碳化反應越多，可能導致水化反應減少。

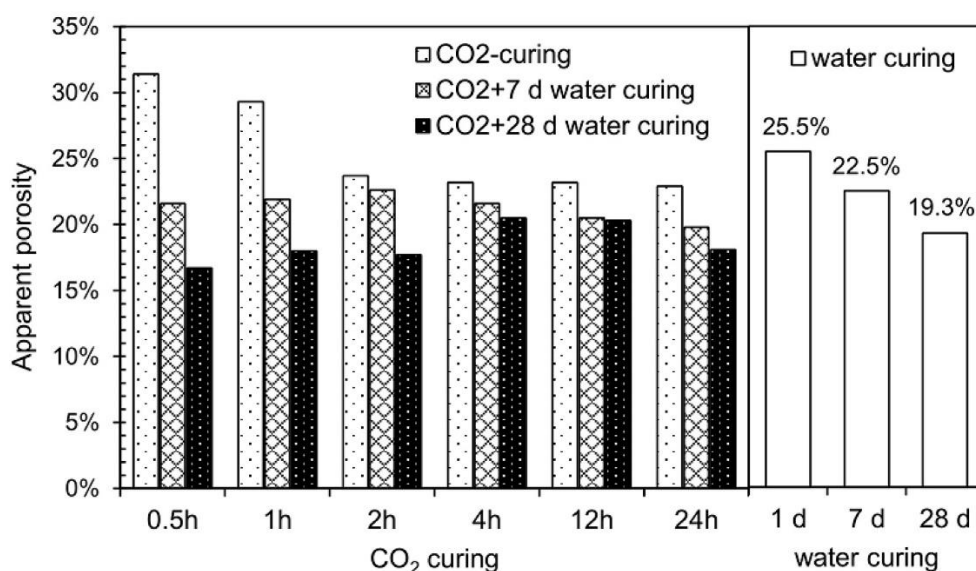


圖 2.2-24 碳化養護時間與孔隙率關係圖[3]

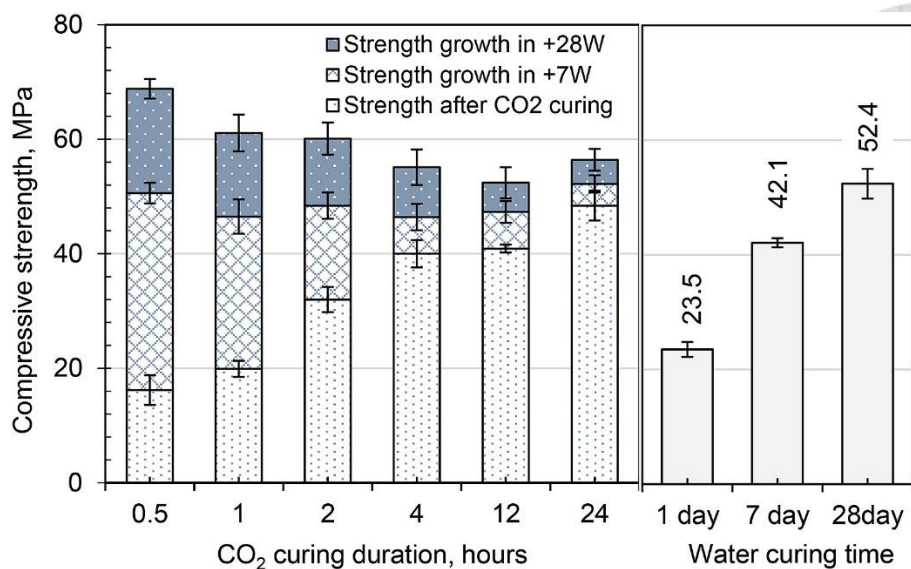


圖 2.2-25 碳化養護時間與抗壓強度關係圖[3]

2.2.2.8 後養護齡期

後養護是指在試體完成碳化養護後，將其置於飽和石灰水中進行養護。因為在碳化養護過程中試體處於較乾燥的環境，導致試體內仍有許多水泥未進行水化和碳化反應，且可能缺乏足夠的水分進行後續反應，這會影響混凝土的強度。因此，可以利用後續的水養護來補充混凝土中流失的水分，進一步改善其微觀結構並提升強度。如圖 2.2-26 所示，碳化養護 2 小時和 24 小時後進行後養護，分別能進一步增加約 20%和 10%的水泥水化反應，顯著改善了混凝土的微觀結構。

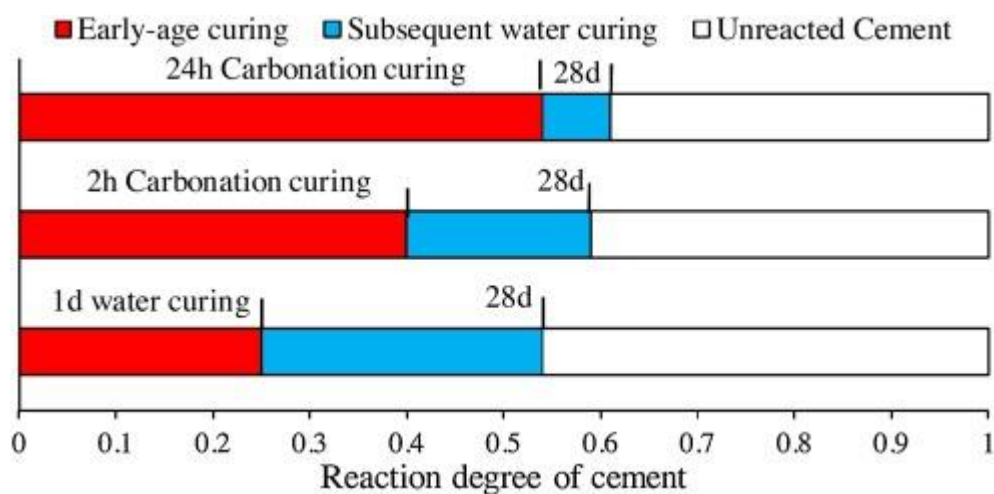


圖 2.2-26 不同養護條件下水泥之反應程度[15]

2.2.3 二氧化碳吸收量分析方法



在二氧化碳養護完成後，需要使用可靠的方式來計算試體的二氧化碳吸收量。主要有四種常用方式來估算二氧化碳的吸收量，包括重量差異法、氣壓推算法、質量曲線法和熱重分析法。以下分別說明這四種方法：

(1) 重量差異法

在碳化養護過程中，混凝土試體會吸收二氧化碳，導致其重量發生變化。此外，碳化反應是一種放熱反應，釋放出的熱能會使試體孔隙中的游離水散失到空氣中並凝結於容器內壁。此方法僅適用於封閉式碳化養護，因為洩氣時容器內空氣中的水分可能會隨著氣體排放到容器外部，故有效地收集散失水分十分重要。

重量差異法利用養護前後試體的重重量差異再加上碳化養護過程中散失的水分量來計算試體吸收的二氧化碳量，計算公式如式 2.2-1 所示。

二氧化碳吸收實驗值(g) =

式 2.2-1

$$Mass_{after\ CO_2} - Mass_{before\ CO_2} + Mass_{water\ loss}$$

(2) 氣壓推算法

此方式利用理想氣體方程式計算混凝土試體吸收的二氧化碳量，因此僅適用於封閉式碳化養護。通過記錄碳化養護前後的氣壓和溫度，以及容器的大小，將這些數據代入理想氣體方程式即可計算出混凝土試體吸收的二氧化碳量，具體計算如式 2.2-2 所示。在正常情況下，大多數氣體的行為都可近似為理想氣體，因此理想氣體方程式是計算反應中消耗二氧化碳量的有效工具。根據實驗設置，方程式中的體積 V 指的是容器的總體積減去試體和其他放置在容器內物體的體積（固定值）， R 為理想氣體常數（固定值）。碳化養護開始前測得的壓力為 P_1 ，溫度為 T_1 ，養護結束後的壓力為 P_2 ，溫度為

T2，經過整理後得出的式 2.2-3 即可計算碳化養護過程中消耗的二氧化碳量。

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$\Delta n = \frac{P_1 \cdot V}{R \cdot T_1} - \frac{P_2 \cdot V}{R \cdot T_2}$$

式 2.2-2

式 2.2-3

(3) 熱重分析法(TG/DTG)

熱重量/示差熱分析裝置 TG/DTG (Thermo Gravimetry/Differential Thermal Gravimetry) 是一種用於觀察樣品在升溫、恆溫或降溫過程中重量變化的分析工具。這種裝置適用於固體和液體樣品，通常將固體樣品取樣一部分並磨成細粉後放入裝置中。TG/DTG 常用於評估試料的酸化、分解、還原、耐熱性、附著水或結晶水的含量、灰分量等性質。

當應用 TG/DTG 進行水泥漿體試驗時，升溫過程中不同溫度階段會有不同的物質消散。根據文獻[26]，將水泥漿體的升溫過程分為三個主要階段，如圖 2.2-27 所示。計算二氧化碳吸收量的方法主要基於 Ldc(去碳化階段)的物質損失量，該階段溫度介於 430-530°C，主要消散的是含碳物質如碳酸鈣 (CaCO₃)，這可用來推算試體吸附的二氧化碳量。封閉式和流動式碳化養護均可利用熱重分析法來計算吸收量，若取樣具有代表性且試體保存良好，則可以得到相當精確的結果。然而，由於操作過程需要將試體磨成細粉，因此操作稍顯繁瑣。

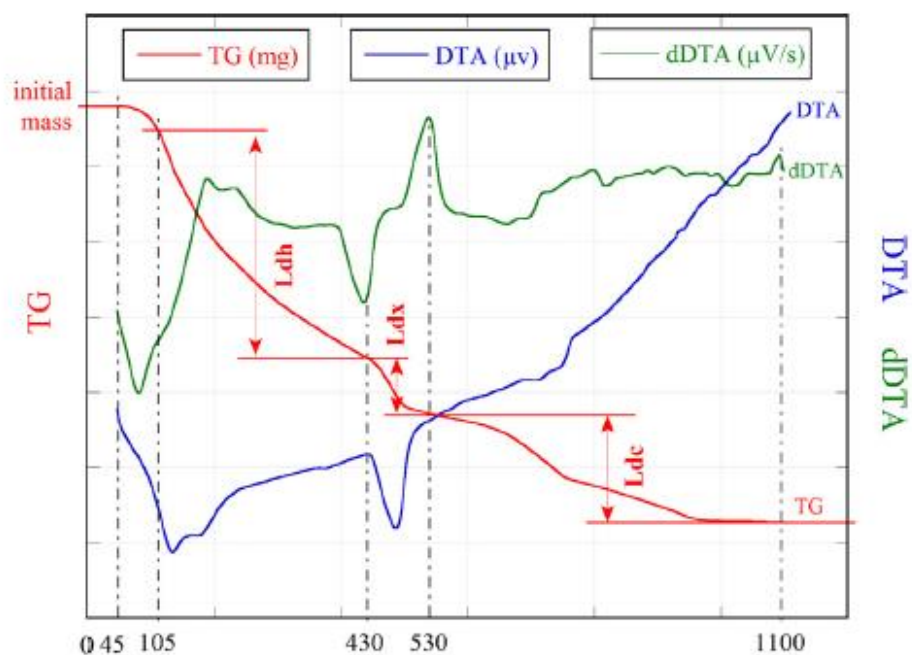


圖 2.2-27 TG/DTA 曲線各升溫階段示意圖[26]

(4) 質量曲線法(Mass curve method)

此方法基於封閉系統中試體的重量變化來計算二氧化碳的吸收量。操作時，試體和其容器放置在秤上，並固定在特定的氣壓下，如圖 2.2-28。在養護過程中，可以隨時記錄和監測試體的重量變化。通過監測重量隨時間的變化，可以繪製出重量隨時間的曲線，這些曲線反映了二氧化碳的吸收過程。且此方法之結果可以與其他方法（如理想氣體方程式計算法或重量差異法）的結果進行對比和驗證。

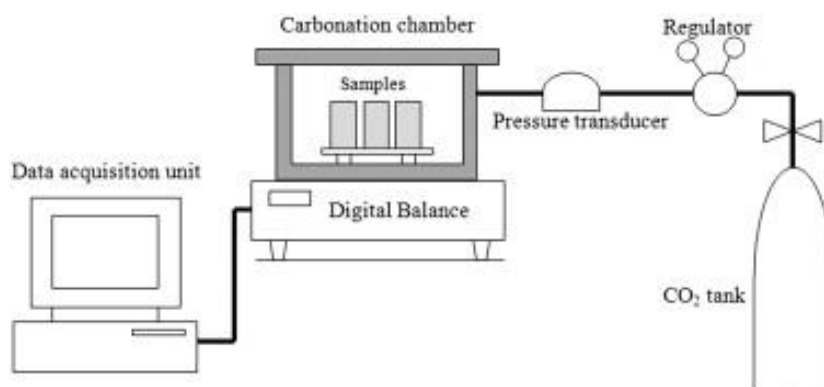


圖 2.2-28 質量曲線法實驗示意圖[31]

2.3 二氧化碳養護混凝土之微觀性質

在文獻[3][21][30]中，透過不同的微觀試驗研出碳化養護對混凝土機理產生的影響，常見的微觀實驗主要分為 TGA(DTG)、XRD、MIP、SEM 等四種，以下將逐一介紹：

2.3.1 熱重分析法(TGA/DTG)

熱重分析法 (Thermogravimetric analysis, TGA) 是一種分析物質隨溫度或時間變化其物理和化學性質的方法。TGA 通過觀察物質在分解、氧化或揮發過程中質量的減少或增加來分析其特性。利用 TGA 可以測量混凝土中的化學鍵結水、氫氧化鈣和碳酸鈣的含量。在圖 2.3-1 中，試體經過 16 小時的預處理，從表面 0~5 毫米深度取樣，進行不同碳化養護時間（2、8、16 小時）的 TGA 分析。隨著碳化養護時間的延長，氫氧化鈣和化學鍵結水的含量減少，而碳酸鈣的含量增加。這是因為碳化養護時間越長，碳化反應越多，生成的碳酸鈣量增加。同時，氫氧化鈣與二氧化碳反應，導致氫氧化鈣的量隨碳化養護時間增加而減少。此外，碳化養護產生的碳酸鈣會堆積在水泥顆粒表面，可能阻礙後續的水化反應；而且，由於碳化反應和水化反應在二氧化碳養護過程中同時進行且部分反應物相同，這兩種反應會互相競爭，使碳化反應可能抑制水化反應的進行。

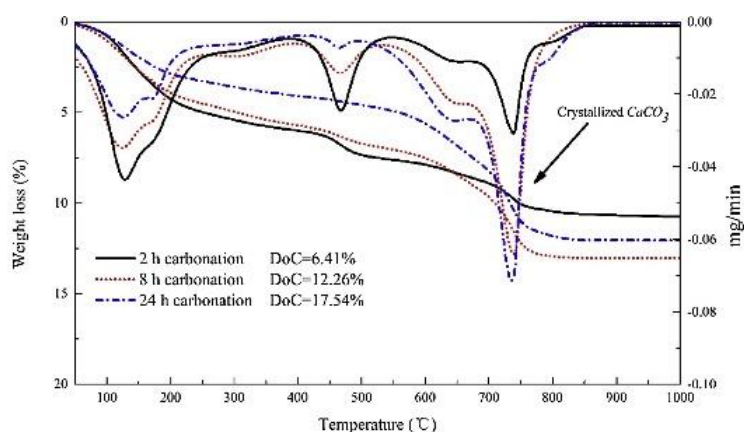


圖 2.3-1 不同碳化養護時間下 TGA 和 DTG 曲線[30]

在圖 2.3-2 中，試體的預處理時間和碳化養護時間均為 16 小時。比較不同深度的 TGA 曲線，可以明顯看出，隨著深度的增加，碳酸鈣的含量逐漸減少，而氫氧化鈣的含量則增加。這表明碳化反應主要集中在試體表面，二氧化碳難以深入試體內部進行反應。

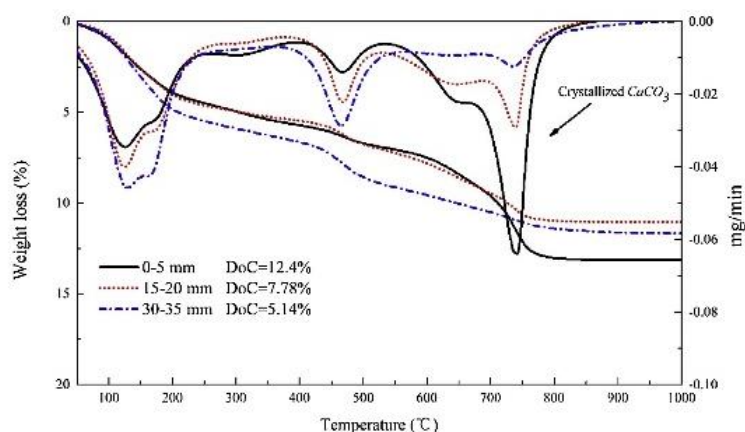


圖 2.3-2 不同深度下的 TGA 和 DTG 曲線[30]

在圖 2.3-3 中，試樣經過 16 小時的碳化養護後，從深度 30 至 35 毫米處取樣進行熱重分析，並比較不同預處理時間（2、8、16 小時）的 TGA 曲線。可以觀察到，如果預處理時間過短，即使經過 16 小時的二氧化碳養護，氣體也難以有效擴散至試樣內部。

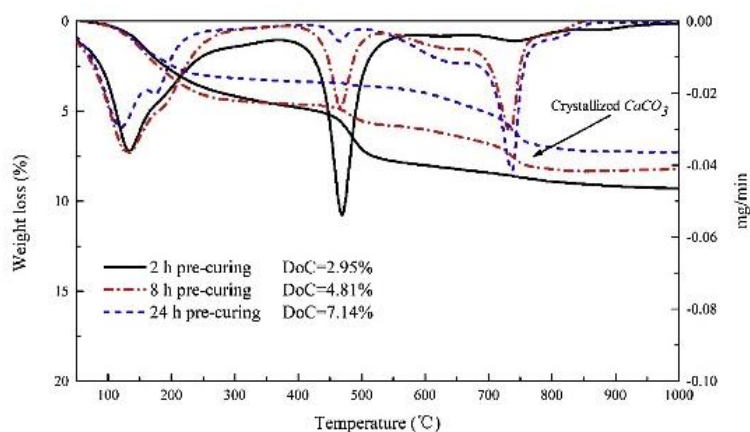


圖 2.3-3 不同預處理時間下 TGA 和 DTG 曲線[30]

2.3.2 X 射線繞射(XRD)

X 射線繞射 (XRD) 是利用 X 射線在晶體內發生繞射現象來獲取繞射後的 X 射線信號特徵，並通過處理得到繞射圖譜。當一束單色 X 射線射入晶體時，由於晶體由原子規則排列的晶胞組成，這些原子的間距與入射 X 射線的波長相當，因此不同原子散射的 X 射線會相互干涉，在某些特定方向上產生強烈的繞射。繞射線在空間中的分佈和強度與晶體結構密切相關。通過對材料進行 XRD 分析其繞射圖譜，可以了解材料的組成、內部原子或分子的結構和形態，用於確定晶體結構。

在文獻[21][30]中，研究者利用 XRD 技術來研究經二氧化碳養護後混凝土的微觀成分變化。文獻[30]探討了在二氧化碳養護過程中，預處理時間和碳化養護時間的改變對微觀結構的影響，如圖 2.3-4、圖 2.3-5 和圖 2.3-6 所示。氫氧化鈣、碳酸鈣和鈣礬石 (Aft) 是主要的水化和碳化反應產物，從圖中可以看出，隨著深度增加，氫氧化鈣的含量會增加，而碳酸鈣的含量則從外部向內部逐漸減少。此外，鈣礬石的含量隨深度增加，因為在碳化過程中二氧化碳會與鈣礬石反應，導致試樣表面鈣礬石含量較低。

通過比較圖 2.3-4 和圖 2.3-5 中氫氧化鈣、碳酸鈣及鈣礬石的含量，可以看出延長預處理時間會增加試樣內部的碳化程度。從圖 2.3-5 和圖 2.3-6 的比較中可以發現，延長碳化養護時間不僅改變了上述水化和碳化產物的含量，還會使更多的 C_3S 被碳化消耗，尤其是在試樣的表層。

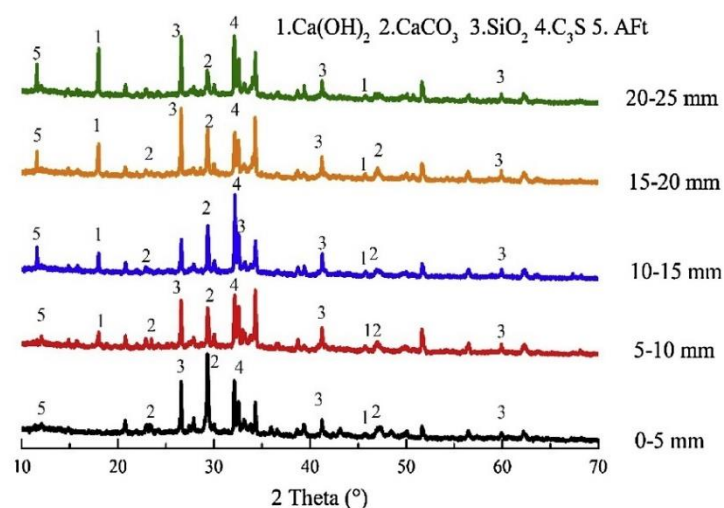


圖 2.3-4 預處理 2 小時、碳化養護 8 小時的 XRD 圖[30]

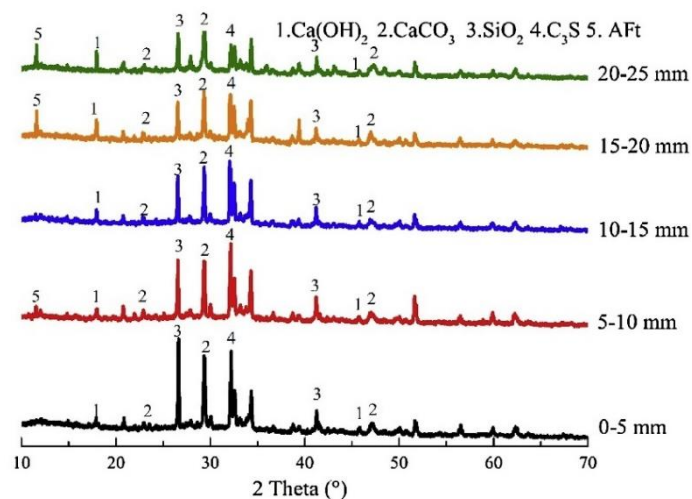


圖 2.3-5 預處理 16 小時、碳化養護 8 小時的 XRD 圖[30]

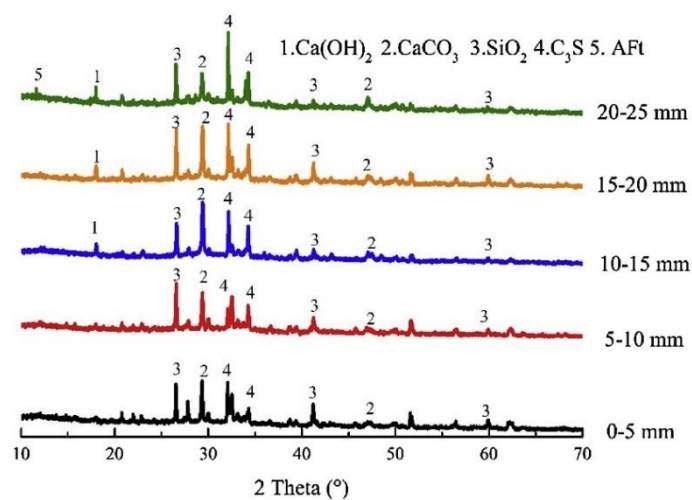


圖 2.3-6 預處理 16 小時、碳化養護 16 小時的 XRD 圖[30]

圖 2.3-7 顯示了不同碳化養護時間下水泥漿體成分的變化。其中，"reference"代表試體在水中進行對照養護，"1h"和"72h"表示碳化養護時間，"28d"表示碳化後放在水中養護 28 天。從"reference"可以看出，氫氧化鈣和鈣礬石的含量在水養護 28 天後顯著增加。從"1h"和"1h+28d"的比較中也可以觀察到相似的趨勢，但增加量較少，代表 1 小時的碳化可能阻礙了後續的水化反應進行。相反，"72h"和"72h+28d"的水泥漿體幾乎沒有檢測到氫氧化鈣和鈣礬石，顯示在碳化反應結束後幾乎沒有進行水化反應。這些結果與文獻[23]中的研究結果一致，即高碳化程度的試體中，水泥顆粒可能因為被碳酸鈣包覆而阻礙了後續的水化反應。

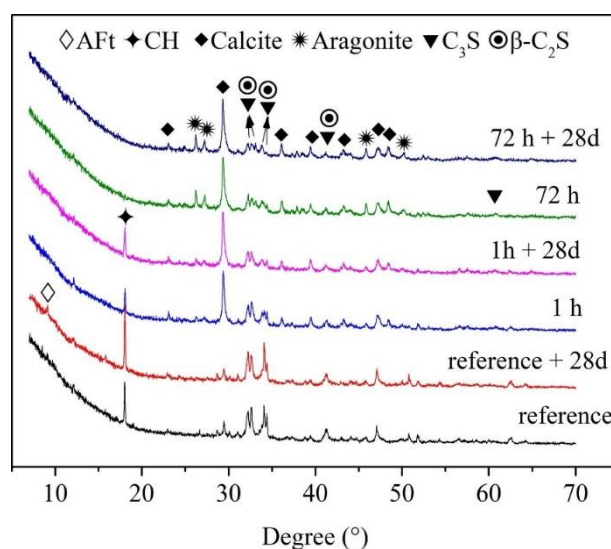


圖 2.3-7 未碳化和碳化水泥漿隨時間的 XRD 圖[21]

2.3.3 壓汞法(MIP)

壓汞法 (Mercury intrusion porosimetry, MIP) 是一種在不同外加壓力下通過測量汞滲入試體孔隙來量測孔隙的大小和體積的方法。這種方法通常用於材料科學和工程中，特別是用於檢測混凝土、砂漿等材料的孔隙率。根據文獻[21]中的描述，圖 2.3-8 和圖 2.3-9 顯示了在不同碳化時間下水泥漿樣品的孔徑分佈。碳化養護 1 小時後，試體的孔隙體積顯著減少，特別是在 0.01-2 μm 孔徑範圍內。當碳化養護時間增加到 24 小時時，0.4-2 μm 範圍內的孔隙體積繼續減小，而 0.01-0.4 μm 範圍內的孔隙體積變化不大。這些孔隙結構的變化可能是由於矽酸三鈣、

矽酸二鈣和氫氧化鈣的碳化反應引起的體積膨脹效應。當碳化養護時間進一步增加到 72 小時時，0.4-2 μm 範圍內的孔隙體積顯著增加。根據圖 2.3-9 的數據顯示，水泥漿體在碳化養護前的孔隙率為 50.3%，碳化養護 1 小時後迅速下降至 29.5%，碳化養護 24 小時繼續下降到 19.4%，而在碳化養護 72 小時後降至 17.8%。另外，平均孔徑從碳化前的 175.4 μm 分別下降到碳化養護 1 小時的 60.2 μm 和碳化養護 24 小時的 56.4 μm ，但當碳化養護時間增加到 72 小時時，平均孔徑卻顯著增加至 73.2 μm 。從圖 2.5 8 中可以看出，當碳化養護時間從 24 小時增加到 72 小時時，0.4 到 2 μm 之間的孔隙體積增加。這種現象可能與 C-S-H 膠體的分解有關，因為根據式 2.24，當碳化養護時間過長時，C-S-H 膠體可能會分解，導致孔隙體積增加並降低強度。此外，其他文獻[3][30]中也發現了碳化反應導致的孔隙結構緻密化對材料性能的影響。

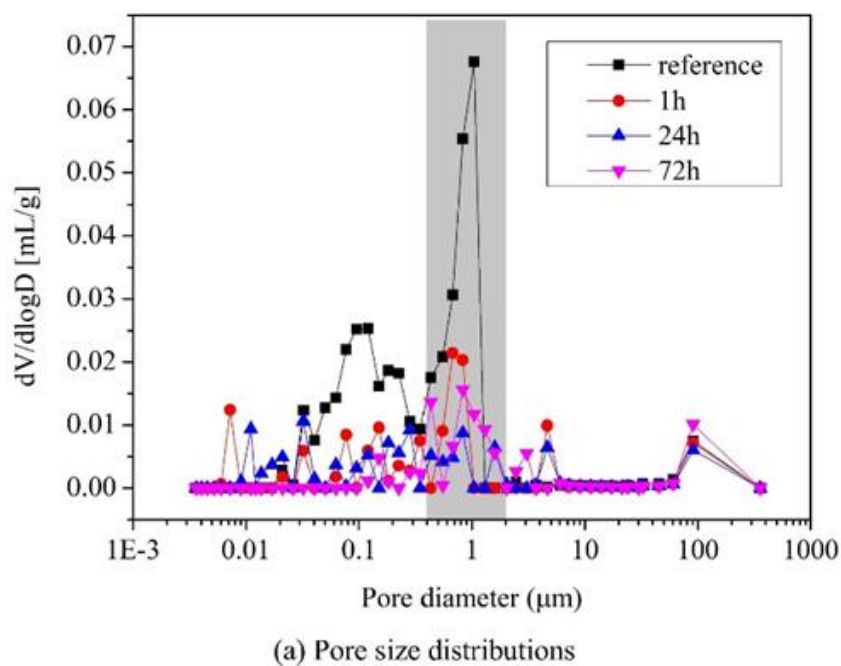


圖 2.3-8 不同碳化時間下水泥漿體孔隙大小分布[21]

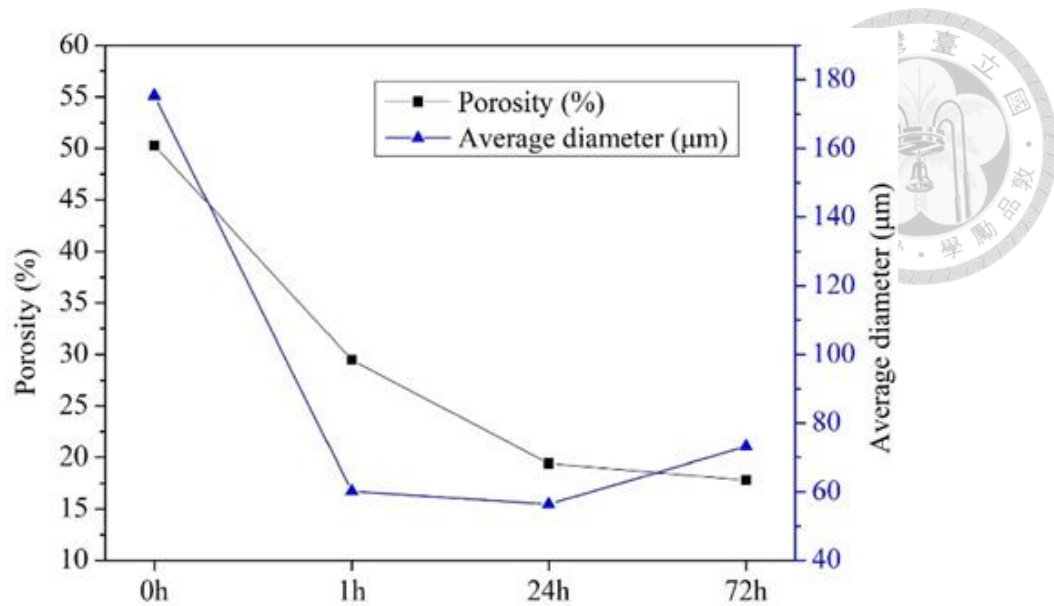


圖 2.3-9 不同碳化養護時間下孔隙率與孔隙平均大小[21]

圖 2.3-10、圖 2.3-11 和圖 2.3-12 比較了在不同碳化養護時間下，試體在水中養護後孔隙的變化。根據圖 2.3-10 的顯示，未經碳化的試體在水化 28 天後， $0.1-1\ \mu\text{m}$ 範圍內的孔隙顯著減少，而 $0.01-0.1\ \mu\text{m}$ 範圍內的孔隙則增加。這是由於水泥在水化過程中生成的 C-S-H 凝膠填充了這些孔隙結構。圖 2.3-11 顯示了碳化養護 1 小時後的試體類似的模式，但減少的孔隙量較少。這是因為碳化養護 1 小時後，水化過程受到了一定程度的阻礙。此外，根據圖 2.3-12 的數據，在碳化養護 72 小時後的試體，在 $0.4-2\ \mu\text{m}$ 範圍內的孔隙體積也較低。

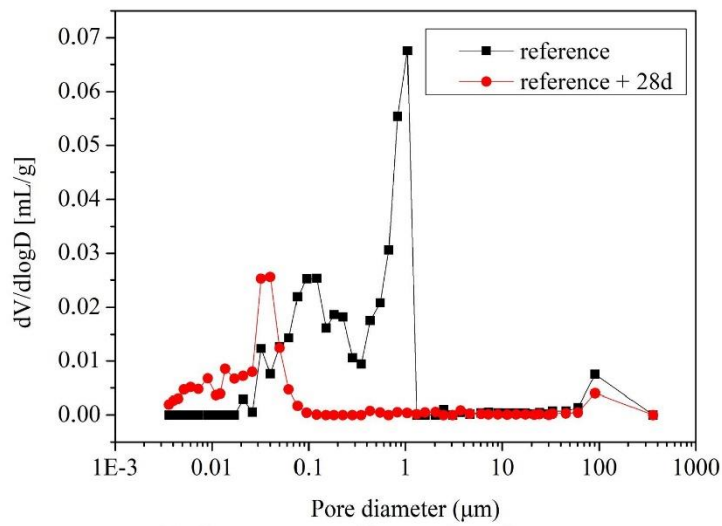


圖 2.3-10 未碳化的水泥漿體孔隙分布圖[21]

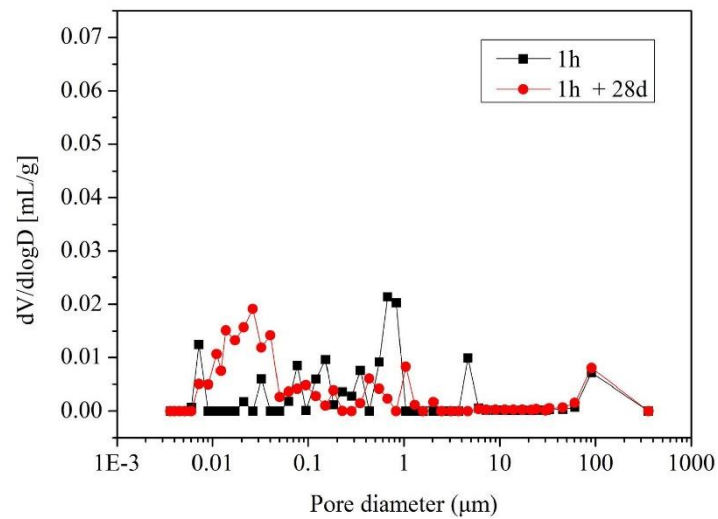


圖 2.3-11 碳化養護 1 小時的水泥漿體孔隙分布圖[21]

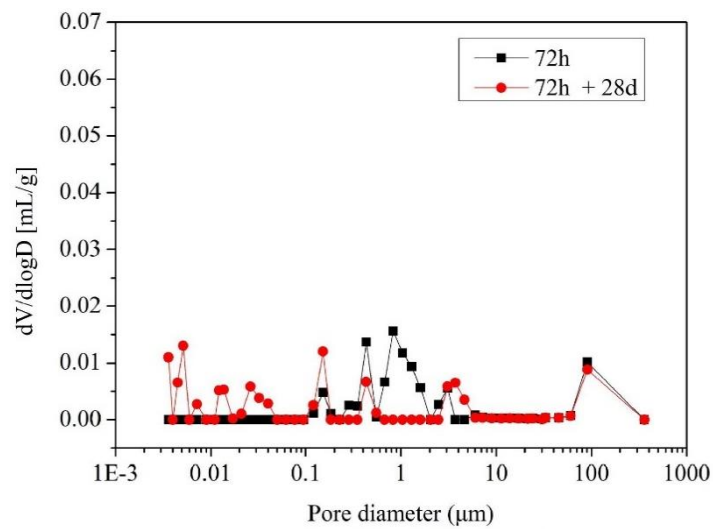


圖 2.3-12 碳化養護 72 小時的水泥漿體孔隙分布圖[21]

2.3.4 掃描式電子顯微鏡 SEM

掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM)，是一種透過聚焦電子束掃描樣品的表面來產生樣品表面圖像的電子顯微鏡。文獻[3]使用掃描式電子顯微鏡 (SEM) 分析了經過二氧化碳養護及水中養護 24 小時後水泥漿體的微觀結構，如圖 2.3-13 和圖 2.3-14 所示。在碳化養護後的水泥漿體中，觀察到大量 0.5-1 μm 尺寸的粒狀方解石晶體，這些晶體的元素組成通過 EDX 光譜確認，碳峰與鈣峰幾乎重疊 (圖 2.3-13(b))。這些方解石晶體不規則地聚集在一起，填充了原本充滿水的孔隙結構，這些孔隙應填滿水泥漿體的水化產物。圖 2.3-14 展示了一般水泥的常見微觀結構，包括板狀氫氧化鈣、纖維狀 CSH 膠體和針狀鈣礬石，但在碳化養護後的試體中很少觀察到這些成分。通過比較圖 2.3-13 和圖 2.3-14，可以看出碳化反應後的水泥漿體微觀結構比水中養護的試體更細緻、更緻密。

圖 2.3-15 展示了在不同碳化養護時間下，水泥漿體中反應產物的形態變化。在碳化養護 2 小時後 (圖 2.3-15(a))，碳酸鈣晶體易於識別，呈現清晰的四面體形狀。當碳化養護時間延長至 24 小時 (圖 2.3-15(b))，形成的碳酸鈣晶體仍呈顆粒狀，但表面有 CSH 膠體沉積，使得碳酸鈣顆粒比碳化養護 2 小時的更緻密。隨後經過 28 天的水養護後 (圖 2.3-15(c))，幾乎無法觀察到清晰的碳酸鈣顆粒，相反，觀察到大量纖維狀和蜂窩狀的 CSH 膠體，通常沿著孔隙邊緣堆積。這代表一旦碳化反應停止，後續的水養護促使未反應的水泥顆粒進行水化反應，新形成的 CSH 膠體開始生長並填充剩餘的孔隙。因此，碳酸鈣顆粒開始與 CSH 膠體混合，並逐漸被覆蓋，這解釋了在後續水養護過程中碳化養護的水泥漿體孔隙率降低和化學鍵結水增加的現象。

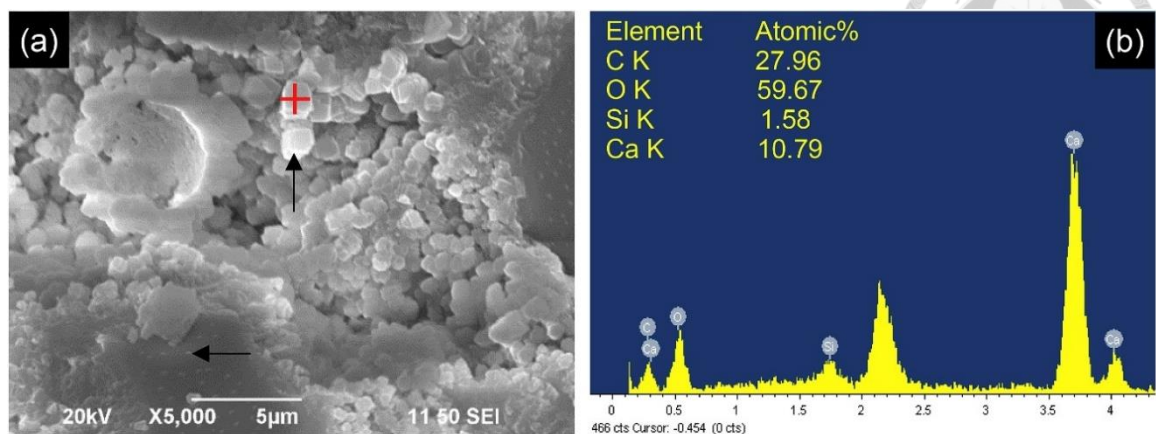


圖 2.3-13 經過 24 小時碳化的水泥漿體 SEM 圖(↑ 碳酸鈣；←未反應水泥)[3]

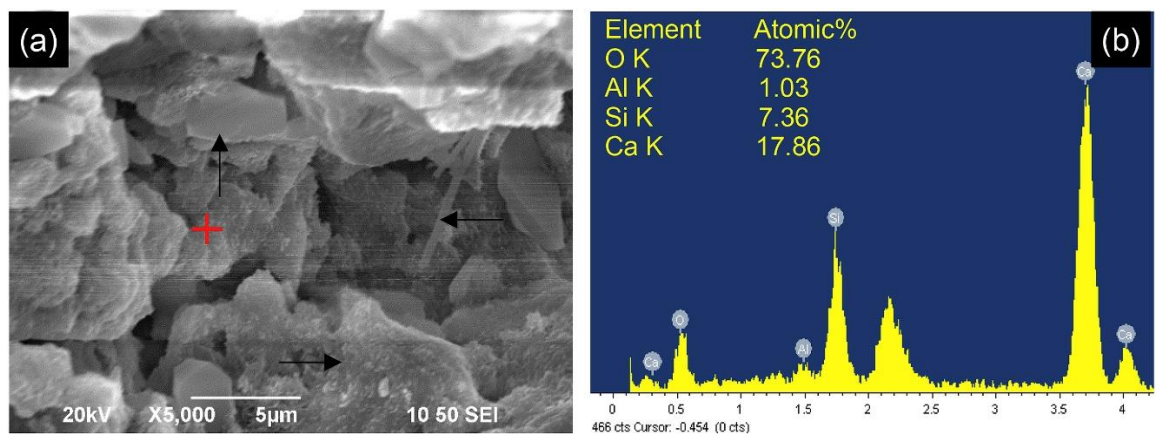


圖 2.3-14 在水中養護 24 小時的水泥漿體 SEM 圖(↑ 氫氧化鈣；←鈣礬石；→ CSH 膠體)[3]

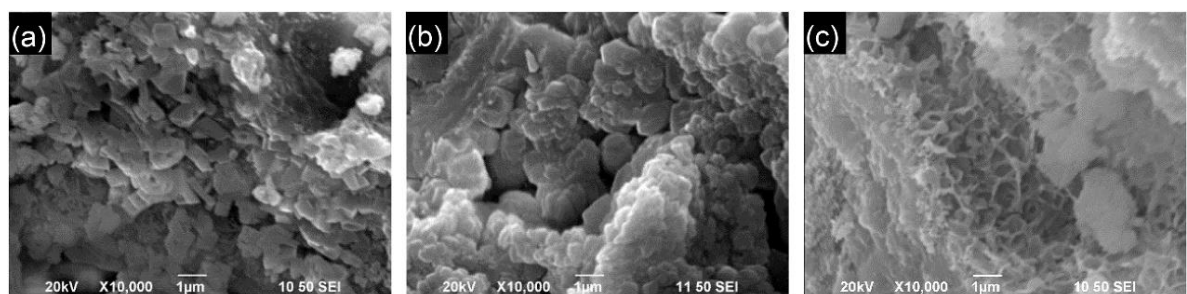


圖 2.3-15 不同碳化時間下的水泥漿體 SEM 圖[3]

圖 2.3-16 中的(a)和(b)展示了水化反應時水泥漿體的微觀結構變化，而(c)和(d)則展示了碳化反應時的微觀結構變化。對於正常的水泥漿體，水化產物（主要是 CSH 膠體）會開始沉積在水泥顆粒表面，如圖 2.3-16(a)所示。隨後，未反應的水泥顆粒會在幾個小時內被水化產物包覆，這減緩了水泥的反應速率，並且形成了更粗糙和多孔的微觀結構，如圖 2.3-16(b)所示。碳化反應和水化反應之間最大的區別在於是否有二氧化碳參與反應。從經過碳化反應的試體的 XRD、SEM 和熱重分析結果可以看出，碳化反應的水泥漿體中矽酸鈣的成分明顯比水化反應的試體少。這是因為在碳化過程中，鈣離子會與碳酸根離子反應，形成碳酸鈣晶體。根據其他文獻[13][33]的研究結果，這些微小的碳酸鈣晶體可以作為異質成核點，促進 CSH 膠體的形成，從而增加了水泥漿體的反應程度。因此，經過碳化養護的水泥漿體中的孔隙率通常比在水中養護的水泥漿體中的孔隙率要小。

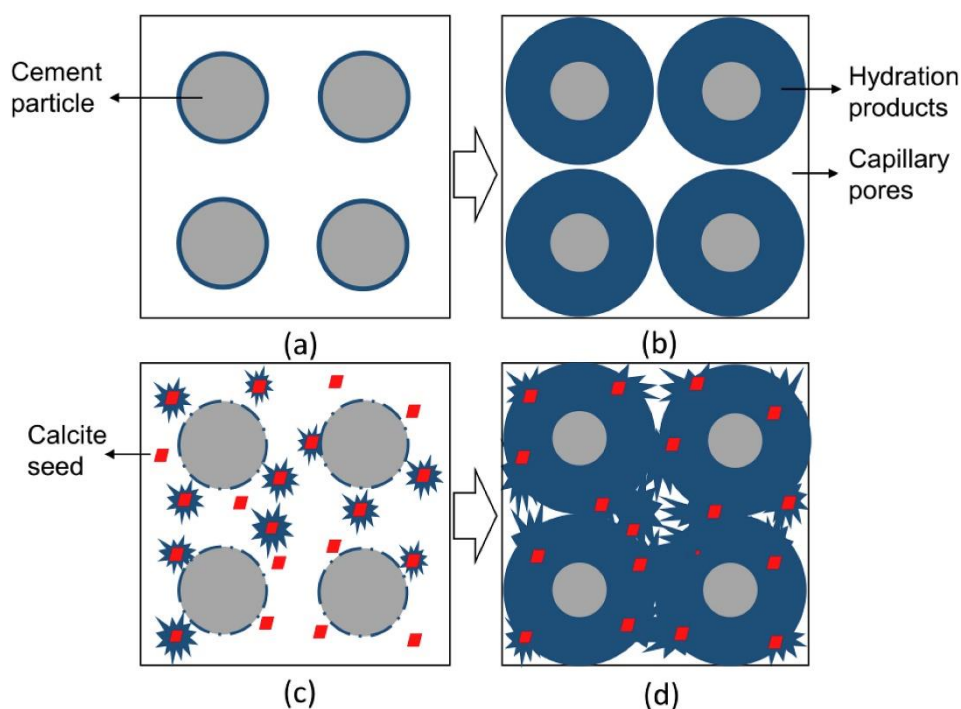


圖 2.3-16 水化反應與碳化反應的微觀結構示意圖[3]

第三章、實驗設計與分析方法



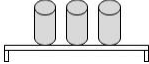
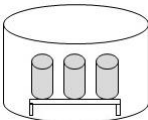
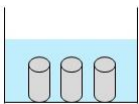
3.1 實驗內容與架構

本研究的目的是比較在不同水灰比條件下，不同的模內水化時間和預處理時間組合，對碳化養護後水泥砂漿和混凝土的二氧化碳吸收量、28 天抗壓強度、碳化深度及試體內部機理的影響。

於文獻[53][54]對於碳化養護之研究，皆固定模內水化時間，而由 2.2.2 節碳化養護參數之介紹下，可知試體內'水'的含量變化，對於二氧化碳的吸收量有很大的影響，因此對於碳化養護的過程中與水最相關的參數分別為:水灰比、模內水化時間、預處理時間。綜合各文獻之研究結果，決定不考慮尺寸下，以 5*10 之圓柱試體，水灰比(0.4、0.5、0.6)，模內水化時間(5hr、11hr、24hr)，預處理時間(3hr、6hr、9hr)進行碳化養護，觀察其水分損失量、二氧化碳吸收量及 28 天抗壓強度。

觀察出的二氧化碳吸收量及 28 天強度之結果，進而探討水泥砂漿在不同水灰比下，不同模內水化時間及預處理時間進行碳化養護，試體內部情形。因此進行碳化深度試驗，利用酚酞的變色範圍分辨，進而探討內部機理變化。

表 3.1-1 本研究碳化養護流程與各階段介紹

階段	I	II	III	IV
名稱	模內初期水化 In-mold curing	預處理 Pre-conditioning	碳化養護 Carbonation curing	後養護 Post-curing
示意圖				
環境	恆溫恆濕室 $T \cong 23^{\circ}\text{C}$ $\text{RH} \cong 100\%$	可程式恆溫恆濕機 $T \cong 23^{\circ}\text{C}$ $\text{RH} \cong 50\%$	碳化養護鋼桶 T 和 RH 不固定 碳化壓力	飽和石灰水中 T 不固定
時間	24 小時	預處理時間	碳化養護時間	養護至指定齡期

3.2 試驗材料

◆ 試驗材料

本研究使用水泥砂漿及混凝土進行試驗，拌合材料包括水、水泥、細粒料、粗粒料等，其詳細成分與性質如下：

(1) 水泥

使用台灣水泥公司品牌第 I 型波特蘭水泥，化學成分列於表 3.2-1，物理性質列於表 3.2-2。

(2) 細粒料

使用花蓮砂，比重為 2.68，篩分析結果與物理性質列於表 3.2-3。

(3) 粗粒料

◆ 試驗尺寸

本研究使用高與直徑比例約為 2:1 的圓柱試體進行試驗，試體製作使用的紙模其詳細尺寸如下：

(1) $\Phi 5 \times 10$ cm 水泥砂漿圓柱試體

模具內實際直徑為 5.2 公分、高為 10.4 公分。



表 3.2-1 波特蘭水泥第 I 型水泥化學成分報告(國產實業提供)

試驗項目	CNS 15286		試驗結果
化學試驗	二氧化矽 SiO ₂ (%)		20.34
	氧化鋁 Al ₂ O ₃		4.95
	氧化鐵 Fe ₂ O ₃		3.96
	氧化鈣 CaO (%)		63.44
	氧化鎂 MgO (%)		Min. 6.0
	三氧化硫 SO ₃ (%)	C ₃ A ≤ 8%	Min. 3.0
		C ₃ A > 8%	Min. 3.5
	燒失量(Loss on ignition) (%)		Min. 3.0
	不容殘渣		Min. 0.75
	水淬高爐爐渣、飛灰、石灰石三者總添加量		Min. 5.0
	鹼(Na ₂ O+0.658K ₂ O)		-
	氧化鈉 (Na ₂ O)		-
	氧化鉀 (K ₂ O)		-
	游離石灰 (Free CaO)		1.1
	矽酸三鈣 (C ₃ S)		53.7
	矽酸二鈣 (C ₂ S)		17.9
	鋁酸三鈣 (C ₃ A)		6.4
	鐵鋁四酸鈣 (C ₄ AF)		12.0

表 3.2-2 波特蘭第 I 型水泥物理性質(國產實業提供)

試驗項目			CNS 15286	試驗結果
物理試驗	比重(Density)		-	3.15
	細度(透氣儀) (m ² /kg)		Min. 260	362
	正常稠度用水量(%)		-	26.5
	假凝結(%)		Min. 50	80.0
	熱膨脹壓(%)		Min. 0.8	0.03
	抗壓強度(Mpa)	3 day	Min. 12.0	25.4
		7 day	Min. 19.0	32.0
		28 day	Min. 28.0	42.2
	凝結時間-初凝 (費開氏Vicat針法)	不小於(分)	Min. 45	183
		不大於(分)	Min. 375	
	水泥壩料空氣含量(體積百分比) (%)		Min. 12.0	8.3

表 3.2-3 細粒料花蓮砂之篩分析結果與物理性質

試驗項目		試驗項目		試驗方法
		C 料砂	規範	
篩分析(過篩百分率)	3/8"	100	100	CNS 486(2001)
	#4	98	95-100	
	#8	80	80-100	
	#16	57	50-85	
	#30	39	25-60	
	#50	24	5-30	
	#100	10	0-10	
細度模數		2.92	2.3-3.1	CNS 486(2001)
通過#200 號篩材料(%)		5.0	≤ 5.0	CNS 491(2001)
S,S,D 比重		2.64	≥ 2.5	CNS 487(2013)
吸水率(%)		1.7	-	
粘土塊及易碎顆粒(%)		0.1	≤ 3.0	CNS 1171(1995)
貝殼含量(%)		0.0	-	CNS15706(2014)
黏土塊及易碎顆粒+貝殼含量(%)		0.1	≤ 3.0	
健度試驗損失量(%) (硫酸鈉溶液五循環)		0.7	≤ 10	CNS 1167(1995)
輕值粒料含量(%)		0.03	≤ 1.0	CNS 10990(1998)
粒料中水溶性氯離子(%)		0.001	<0.012	CNS 13407(2015)
粒料單位重 kg/m ³	搗實方	1745	-	CNS 1163(2008)
	鬆方	1417	-	

3.3 試驗儀器



(1) 烘箱:

由建成科學儀器股份有限公司所製作。用於烘乾細骨材及粗骨材，量測其含水率以調整拌合配比



圖 3.3-1 烘箱

(2) 直立式單軸拌合機:

由文昌儀器行販售。本研究用於水泥砂漿及混凝土拌合，含三段拌合速度，容量約 0.007m^3 。



圖 3.3-2 直立式單軸拌合機

(3) 振動台

本研究用於澆置時，震動出試體內部孔洞及氣泡。



圖 3.3-3 振動台

(4) 恆溫恆濕室:

由巨孚公司製作。符合 ASTM 標準養護室(溫度 23°C，相對溼度 100%)，，內部材質為 SUS#304 耐熱不鏽鋼板，外部採用鋼板烤漆。本研究用於試體之初期水化養護。



圖 3.3-4 恆溫恆濕室

(5) 可程式恆溫恆濕機:

由弘達儀器股份有限公司製作。有可使用之觸控式面板進行溫度與濕度設定，本研究用於試體初期水化養護後之預處理，溫度設定為 23°C，相對濕度設定為 50%。





圖 3.3-5 可程式恆溫恆濕機

(6) 碳化養護鋼桶:

容量約為 24L，含壓力計與閥門，上蓋交接處有內嵌橡膠墊片防止氣體外洩，
確認鋼桶螺栓皆鎖緊後即可注入二氧化碳進行碳化養護。



圖 3.3-6 碳化養護鋼桶

(7) 抽氣機:

由慧智實業有限公司製作。本研究用於在鎖緊碳化養護鋼桶後，以管線確實
皆於鋼桶閥門後，抽出鋼桶內空氣，使鋼桶內達到真空。



圖 3.3-7 抽氣機

(8) 二氧化碳高壓鋼瓶與壓力調整器:

由吉利氣體有限公司販售。容量為 35 公升，二氧化碳濃度 100%，以管線確
實連接碳化養護鋼桶閥門後，轉緊壓力調整器，即可將二氧化碳注入碳化養
護鋼桶內，達到所需壓力值，關閉閥門，轉鬆壓力調整器，進行碳化養護。



圖 3.3-8 二氧化碳鋼瓶與壓力調整器

(9) 液壓混凝土抗壓試驗機:

由弘達儀器股份有限公司生產，最大試驗載重 150 噸。本研究用於量測水泥砂漿及混凝土之抗壓強度。



圖 3.3-9 MTS100 噸萬能材料試驗機

(10) 小型鑽心試體切割機:

由台灣科技大學提供。本研究用於切割碳化養護試體後，噴上酸鹼指示劑酚酞，以觀察試體內部碳化深度。



圖 3.3-10 小型鑽心試體切割機



3.4 試體拌合與澆置

為了盡可能消除每次試體拌合與澆置過程中造成的誤差，本研究以固定的拌合與澆置流程與方法，來去拌合與澆置水泥砂漿及混凝土。

3.4.1 水泥砂漿拌合與澆置

拌合方法參照 ASTM[C305]以拌合機拌合水泥砂漿之規範，詳細流程如下：

- (1) 拌合前一天取樣約 2 公斤砂放入烘箱，以 100°C 的溫度烘乾，拌合前取出測量其含水率。
- (2) 輸入含水率於配比表中，以面乾內飽和狀態調整所需的拌和水量與拌合砂量。
- (3) 拌合前將攪拌葉片及拌合鍋擦乾，安裝完成後將其拉升至拌合高度，確認葉片與鍋底有確實接觸，避免鍋底試料拌合不完全。
- (4) 先倒拌合用水入鍋，再加入部分砂，再加入水泥入鍋。
- (5) 以 1 速拌合 30 秒，拌合過程中徐徐加入剩下之砂。
- (6) 停機，換成 2 速拌合 30 秒。
- (7) 停機，在 15 秒內將沾鍋之試料以刮刀迅速刮落，並使試料在鍋內停留 90 秒。
- (8) 以 2 速拌合 60 秒後停機下料。

拌和完成後將水泥砂漿澆置於 $\Phi 5 \times 10 \text{cm}$ 紙模中，分別分成 2、4、6 層澆置，每層用搗棒搗實 25 次，每層搗實完靜待 30 秒並以震動釋出孔洞與氣泡，最後利用鏟刀將澆置面鏟平後放入恆溫恆濕室進行模內初期水化養護。

3.4.2 混凝土拌合與澆置

拌合方法參照 CNS1230 以拌合機拌合混凝土之規範，詳細流程如下：

- (1) 拌合前一天取樣約 2 公斤砂及三分、六分石放入烘箱，以 100°C 的溫度烘乾，拌合前取出測量其含水率。
- (2) 輸入含水率於配比表中，以面乾內飽和狀態調整所需的拌和水量、拌合砂量、拌合粗粒料量。

(3) 拌合前將攪拌葉片及拌合鍋擦乾，安裝完成後將其拉升至拌合高度，確認葉片與鍋底有確實接觸，避免鍋底試料拌合不完全。

(4) 先加入粗粒料、部分拌和水量及液狀摻料。

(5) 啟動拌合機，運轉拌合 3 分鐘，在拌合機運轉同時依序加入細粒料、水泥及拌和水。

(6) 停止 3 分鐘，將沾鍋之試料以刮刀迅速刮落，並使試料在鍋內停留 3 分鐘。

(7) 再轉動拌和 2 分鐘後停機下料。

拌和完成後將混凝土澆置於 $\Phi 5 \times 10 \text{cm}$ 紙模中，分別分成 2、4、6 層澆置，每層用搗棒搗實 25 次，每層搗實完靜待 30 秒並以震動釋出孔洞與氣泡，最後利用鏟刀將澆置面鏟平後放入恆溫恆濕室進行模內初期水化養護。

3.5 試驗參數

本研究針對水灰比、模內水化時間及預處理時間三個碳化養護參數進行試驗，其餘碳化養護參數在實驗中皆固定，以下分別詳細描述之。

(1) 配比(水灰比)

由文獻[15][23][25][53]可以看到水灰比對於碳化養護試體造成的影響，而本研究欲探討水泥砂漿及混凝土(加入粗骨材)不同水灰比對碳化養護的影響。本研究設定水灰比 0.4、0.5、0.6 為試驗參數，水泥砂漿之配比參考文獻[54]水泥砂漿配比，固定水根據水灰比設定得到水泥量，配比表如表 3.5-1。

表 3.5-1 水泥砂漿配比表(單位: kg/m^3)

水灰比	水泥	水	砂
0.4	590	236	1525
0.5	472	236	1615
0.6	394	236	1685

本研究混凝土配比參考文獻[51]，固定水及三分石、六分石比例，再根據水灰比得到水泥量，配比表如表 3.5-2。

表 3.5-2 混凝土配比表(單位: kg/m³)

水灰比	水泥	水	砂	六分石	三分石	強塑劑
0.4	450	180	950	250	580	5.75
0.5	360	180	995	261	607	5.75
0.6	300	180	1015	268	620	5.75

(2) 模內初期水化時間

碳化養護因試體的水量對二氧化碳吸收量有很大的影響，且根據文獻[40]，因此本研究探討初期水化齡期5、11、24小時，搭配預處理時間，觀察碳化養護後28天強度及碳化深度。

(3) 預處理時間

根據文獻[8][53][54]可知預處理時間越長水分損失量越多，而超過6小時後水分損失量會漸趨於穩定，因此決定在初期水化齡期5、11、24小時，搭配預處理時間3、6、9小時。探討水灰比、初期水化齡期、預處理時間，三個參數對試體內部水分損失的各種影響情況，進而觀察二氧化碳吸收量、28天的強度、碳化深度等後去試驗。

(4) 碳化濃度

由文獻[34]中，試體之二氧化碳吸收量會隨著碳化濃度的提高而提升，為了最大程度觀測碳化養護對試體帶來的影響，本實驗固定灌入的二氧化碳濃度為100%，並且在灌入二氧化碳前會將碳化養護鋼桶內的空氣抽出。

(5) 碳化壓力

由文獻[54]可知鋼桶內碳化壓力若維持1.6大氣壓以上可以維持碳化養護時最佳的吸收效率，且於此文獻中表示初始碳化壓力為4大氣壓，而此研究為

水灰比0.5、初期水化齡期24小時的結果，於本研究中有更高的水灰比及更短得初期水化停期，因此可知有更多的孔隙可吸收二氧化碳形成之碳酸鈣，故本研究之初始碳化壓力決定為5大氣壓，為確保鋼桶內之壓力可以維持1.6大氣壓以上。

(6) 碳化養護時間

由文獻[2]可知碳化時間越長吸收效率下降，又由文獻[54]得知最有效率的碳化時間為21小時，因此為維持最佳效率及實驗排程，決定碳化養護時間為24小時。

3.6 實驗設計

在試體完成拌合與澆置後，後續的養護流程與詳細步驟如下：

- (1) 將試體放入恆溫恆濕室中進行模內初期水化，環境溫度約為 23°C、相對濕度約為 100%。
- (2) 根據實驗模內初期水化齡期達 5 或 11 或 24 小時後，將試體拆模並記錄此時的試體重量。
- (3) 量測重量後，立即將試體放入可程式恆溫恆濕機中進行預處理，環境溫度約為 23°C、相對濕度約為 50%。
- (4) 達指定預處理時間 3 或 6 或 9 小時後，將試體從儀器取出並記錄此時的試體重量。預處理前後重量差異計算預處理水分損失量。
- (5) 在試體放入碳化養護鋼桶前，先量測吸水布及網狀墊片之重量後，於鋼桶底部放置吸水布及網狀墊片以吸收碳化養護期間水分的損失，再將試體放入碳化養護鋼桶內。
- (6) 將鋼桶上的螺栓以對角的方式依序利用 Y 行扳手鎖緊，確認鎖緊後利用抽氣機將內部抽至約 0.5 大氣壓的狀態。
- (7) 以管線確實連接二氧化碳鋼瓶與鋼桶輸氣閥，灌入濃度 100%之二氧化碳達到指定碳化壓力 5 大氣壓時關閉閥門，拆起管線，開始進行碳化養護。

(8) 達到碳化養護時間 24 小時後，打開閥門將鋼桶內氣體排出，解鎖螺栓後，取出試體紀錄此時的試體重量，再用鋼桶內吸水布擦取碳化養護中蒸發後凝結於鋼桶內壁的水分，並量測此時的吸水布重，碳化養護前後吸水布重量差異為碳化養護水分損失量，故藉由碳化養護前後的試體重量差異與碳化過程中的水分損失量計算試體的二氧化碳吸收量。

完成上述所有流程後，欲進行 28 天抗壓試驗則放入飽和石灰水，進行後養護達指定齡期後，取出進行抗壓試驗；欲進行碳化深度試驗，則完成流程後使用小型鑽心試體切割機，切出試體斷面後進行。

3.6.1 水泥砂漿於不同水灰比下模內水化與預處理時間對碳化養護之影響試驗

本試驗為研究水灰比 0.4、0.5、0.6 的水泥砂漿(表 3.5-1)，其初期水化齡期 5、11、24 小時，搭配預處理時間 3、6、9 小時，一個水灰比有九組模內水化-預處理時間之參數搭配。目的在於探討與'水'有關的三個參數，對於碳化養護後的水泥砂漿試體之影響。

每一組參數的搭配碳化養護後，分別作抗壓強度試驗、碳化深度試驗，個別試驗詳細介紹如下。

3.6.1.1 抗壓強度試驗

本試驗為三種水灰比經過初期水化齡期-預處理時間後，放入鋼桶內進行碳化養護後，再放入飽和石灰水進行後養護，以補償前面養護時之水損失，使試體內部 CSH 膠體繼續發展至指定齡期 28 天後，試體上鋪上石膏蓋平完，放上液壓混凝土抗壓試驗機，記錄試體之抗壓強度值。詳細實驗流程及拌合顆數如下圖 3.6-1、表 3.6-1。

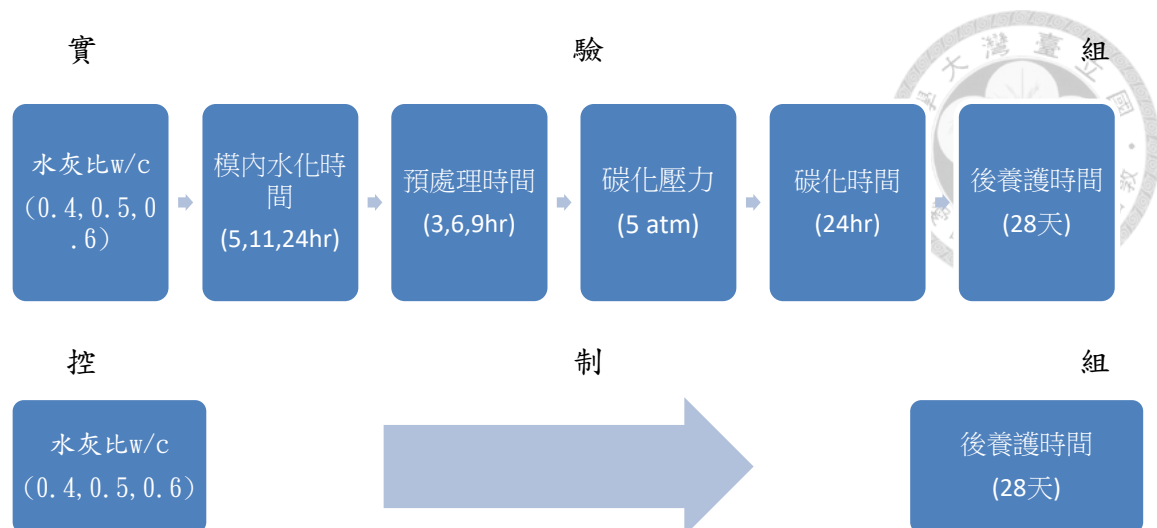


圖 3.6-1 水泥砂漿實驗流程

表 3.6-1 拌合顆數

水灰比	預處理時間 模內水化時間	3 小時		6 小時		9 小時		總計
		C	W	C	W	C	W	
0.4	5 小時	3	3	3	3	3	3	18
	11 小時	3	3	3	3	3	3	18
	24 小時	3	3	3	3	3	3	18
0.5	5 小時	3	3	3	3	3	3	18
	11 小時	3	3	3	3	3	3	18
	24 小時	3	3	3	3	3	3	18
0.6	5 小時	3	3	3	3	3	3	18
	11 小時	3	3	3	3	3	3	18
	24 小時	3	3	3	3	3	3	18



3.6.1.2 碳化深度試驗

混凝土的 pH 值通常大於 12，本實驗使用之酚酞指示劑是取用 0.1 克的酚酞溶入 90 毫升的酒精(95%)與 10 毫升水之混和液。其變色範圍在 8.2-10 左右，而混凝土 PH 值高於變色範圍會表現出紫紅色，小於此區間則為無色，因此若試體經過碳化養護後，未被碳化的區域則會顯現出紫紅色，故可藉由此結果經過影像辨識系統，得知碳化深度。

本試驗流程為經過碳化養護後，先使用小型鑽心試體切割機，將試體切出斷面，並在斷面上噴上酚酞後，待其變色穩定，拍照留存輸入影像辨識系統，辨識紫紅色變色面積，換算碳化深度。

3.6.2 混凝土於不同水灰比下模內水化與預處理時間對碳化養護之影響試驗

本試驗混凝土是加入粗骨材，配比如表 3.5-2。於本試驗欲探討加入粗骨材後其內部孔隙變大，是否可以吸收更多的二氧化碳，以及抗壓強度之變化。實驗流程如水泥砂漿，然而本研究先做完水泥砂漿部分後，發現模內水化時間 5 小時的水泥砂漿試體，在 28 天抗壓強度表現很差，無法在實務上應用，因此在本試驗只取用模內水化時間 11 及 24 小時。本試驗每一組的參數搭配碳化養護後，進行抗壓強度試驗，詳細內容如下。

3.6.2.1 抗壓強度試驗

本試驗使用水灰比 0.4、0.5、0.6 之混凝土，模內水化時間 11、24 小時搭配預處理時間 3、6、9 小時，實驗流程及拌合顆數如圖 3.6-2 及表 3.6-2。

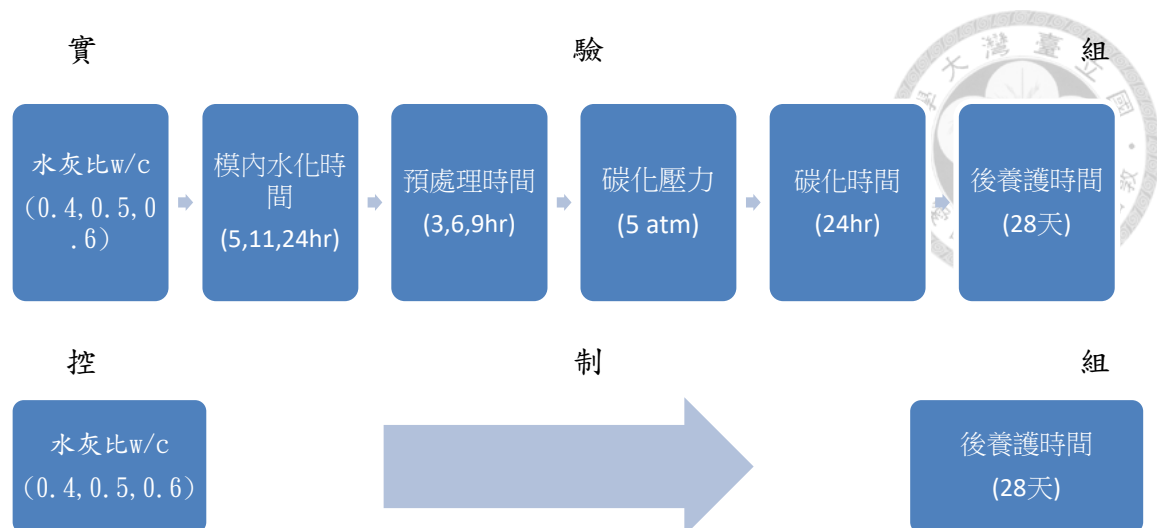


圖 3.6-2 水泥砂漿實驗流程

表 3.6-2 拌合顆數

水灰比	預處理時間 模內水化時間	3 小時		6 小時		9 小時		總計
		C	W	C	W	C	W	
0.4	11 小時	3	3	3	3	3	3	18
	24 小時	3	3	3	3	3	3	18
0.5	11 小時	3	3	3	3	3	3	18
	24 小時	3	3	3	3	3	3	18
0.6	11 小時	3	3	3	3	3	3	18
	24 小時	3	3	3	3	3	3	18

3.7 實驗分析方法

3.7.1 二氧化碳吸收量及碳化度

由文獻[53][54]可知重量差異法及氣壓推算法皆可推算二氧化碳吸收量，且兩者誤差低於 10%內，因此本研究使用重量差異法計算二氧化碳吸收量，

二氧化碳吸收實驗值(g) =

$$M_{after\ CO_2} - M_{before\ CO_2} + M_{water\ loss}$$

$$M_{before\ CO_2} = \text{碳化養護前的試體重量(g)}$$

$$M_{after\ CO_2} = \text{碳化養護後的試體重量(g)}$$

$$M_{water\ loss} = \text{碳化養護過程中散失水分的重量(g)}$$

另外，大多文獻皆使用「碳化度」來代表混凝土試體的二氧化碳吸收程度，碳化度計算方式如式 3.7-所示，分子為實驗得到的二氧化碳吸收量，分母則為試體中所有水泥可以吸收的二氧化碳極限值。二氧化碳吸收最大百分比計算方式如式 3.7-，此式所代表之意義為水泥當中可與二氧化碳反應的百分比，將水泥中所含之各種成分百分比帶入式 3.7-後乘上試體的水泥重即可得到式 3.7-之分母，計算得到試體之碳化度。本研究所使用之水泥當中CaO為 63.44%，SO₃為 2.29%，MgO為 1.75%，Na₂O與K₂O都為 0%，代入式 3.7-可知本研究水泥之二氧化碳吸收最大百分比為 50.45%。而碳化度依各配比水泥重及實驗中所得之二氧化碳吸收量計算而得。

二氧化碳吸收最大百分比(%) =

$$0.785(CaO - 0.7SO_3) + 1.091MgO + 1.42Na_2O + 0.935K_2O$$

式 3.7-2

$$\text{碳化度(\%)} = \frac{\text{二氧化碳吸收實驗值(g)}}{\text{水泥重} \times \text{二氧化碳吸收最大百分比(\%)}}$$

式 3.7-3

3.7.2 抗壓強度試驗

本研究的力學性質試驗主要採用單軸抗壓試驗，希望透過抗壓強度的變化得到碳化養護對於不同水灰比、模內水化時間、預處理時間試體之影響。在進行抗壓試驗前會將圓柱試體以石膏蓋平，確保試體在測試過程中均勻受壓，待石膏硬化後使用 MTS 萬能材料試驗機進行單軸抗壓試驗。試驗採位移控制 0.01mm/sec 的加載速率進行，當試體抗壓強度低於當前最高強度的 90%時停止試驗，並記錄最高的抗壓強度作為抗壓強度之實驗值。



3.7.3 碳化深度試驗

本研究將在試體完成碳化養護後，以混凝土試體切割機將試體對半切開，再立即噴灑酚酞指示劑於試體剖面上，並拍攝剖面照片。最後，使用影像辨識軟體 Image-Pro Plus 計算試體被染色區域的面積，進而推算未染色區域之深度與體積。

本研究假設二氧化碳均勻的從四面八方進入試體進行碳化反應，在同樣深度的區域內碳化程度相同，四周的未染色深度也相同，如圖 3.7-1 酚酞試驗之假設所示。而未染色深度的代表意義為，該深度下的碳化程度足以使 pH 值低於酚酞指示劑的變色範圍，並非實際的碳化深度，僅能代表較高碳化程度的碳化深度，計算方式如式 3.7-4 所示。

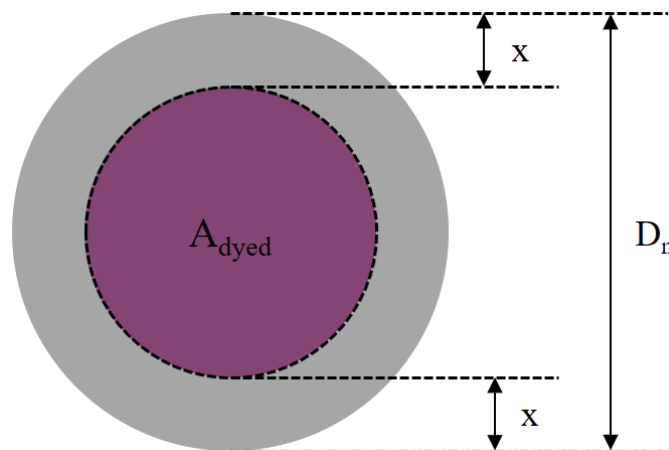


圖 3.7-1 酚酞試驗之假設

A_{dyed} ：由影像辨識軟體計算的染色區域面積 (cm^2)

D_n ：圓柱試體直徑 (cm)

x ：未染色深度 (mm)

$$x = 0.5 \times \left(D_n - \sqrt{\frac{4 \times A_{dyed}}{\pi}} \right) \quad \text{式 3.7-4}$$

第四章、試驗結果分析與討論



本研究旨在探討水泥砂漿及混凝土碳化養護中與水有直接關係之參數:水灰比、初期水化齡期、預處理時間。在這三個參數的搭配下，進行碳化養護試驗，並記錄其二氧化碳吸收量、28 天抗壓強度、碳化深度。根據試驗結果進行分析，比較試驗結果與這三個參數間之關係，以更了解碳化養護流程中各個參數之間對試驗結果之影響，試驗結果詳細分析與討論如下。

4.1 水泥砂漿於不同水灰比下模內水化與預處理時間對碳化養護之影響試驗結果

本試驗分別記錄初期水化齡期 5、11、24 小時搭配預處理 3、6、9 小時的重量值，以分析碳化養護過程中預處理水分損失量、二氧化碳吸收量(式 3.7-1)，最後再進行 28 天抗壓強度試驗，比較不同的二氧化碳吸收量其強度的變化。

本節將試驗結果分別以水灰比 0.4、0.5、0.6 進行詳細說明。

4.1.1 水灰比 0.4

表 4.1-1、表 4.1-2、表 4.1-3，分別為初期水化齡期 5、11、24 小時搭配預處理 3、6、9 小時的預處理水分損失量及二氧化碳吸收量，由此三表格分別整理出圖 4.1-1 三個模內水化時間中，預處理時間與水分損失百分比之關係及圖 4.1-2、圖 4.1-3 預處理水分損失量與二氧化碳吸收量之關係，又因碳化養護中二氧化碳吸收量與尺寸及水泥量有很大的關係，因此整理出圖 4.1-4、圖 4.1-5、圖 4.1-6，以碳化度分析可以將數據正規化比較。由表 4.1-1、表 4.1-2、表 4.1-3 之結果可得到以下結論:

- (1) 先由預處理水分損失量分析，模內水化時間不論是 5、11、24 小時，預處理時間越長，水分損失量也越多，如圖 4.1-1 所示。然而在模內水化

24 小時，預處理水分損失量在 6、9 小時差異不大，可知在超過 6 小時後，試體內部水分與預處理環境達平衡，此結果與文獻[8][53][54]相符。

(2) 再由二氧化碳吸收量分析，在模內水化時間 5、11 小時，可以看到預處理時間越長，預處理水分損失量越多，使二氧化碳的吸收量越高，此結果與文獻[53][54]相符。然而，在模內水化時間 24 小時，其二氧化碳吸收量沒有太大的差異，皆落在 10 公克左右，其原因也與預處理 6、9 小時水分損失量差異不大，從而使得二氧化碳吸收量十分接近。

(3) 再看到碳化養護水分損失量，依文獻其損失量應與試體內水分含量有關，因此預處理時間越長，碳化養護水分損失量應越低，然而在三表的實驗值紀錄有這樣的趨勢但不明顯，其原因應為水灰比 0.4 本身的含水量就較低、在鋼桶碳化養護過程中溫度不固定，可能因天氣變化影響水分的損失量，進而影響二氧化碳吸收量。然而，在鋼桶內的水分損失都是比較少量，主要影響二氧化碳吸收量的還是模內水化時間與預處理時間之間。

表 4.1-1 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.4) (模內水化 5 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	9.5	+28.0	6.0	30.0
	9.5	+27.0		29.0
	10.0	+36.0		28.0
6	22.0	+31.0	3.5	32.167
	23.0	+30.0		31.167
	22.5	+32.0		33.167
9	27.0	+35.0	3.0	36.0
	27.0	+35.5		36.5
	27.5	+35.0		36.0

表 4.1-2 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.4) (模內水化 11 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	14.5	+19.5	4.5	21.0
	14.0	+19.0		20.5
	14.5	+19.5		21
6	17.0	+21.5	5.5	23.33
	17.5	+22.0		23.83
	16.5	+21.5		23.33
9	21.5	+23.5	2.0	24.167
	21.5	+24.5		25.167
	21.5	+24.5		25.167

表 4.1-3 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.4) (模內水化 24 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	4.5	+9.5	2.5	10.33
	3.5	+9.5		10.33
	4.5	+9.0		9.833
6	6.0	+10.0	4.5	11.5
	6.0	+9.5		11.0
	6.0	+10.0		11.5
9	7.0	+10.5	0.5	10.67
	7.5	+10.5		10.67
	7.5	+10.0		10.167

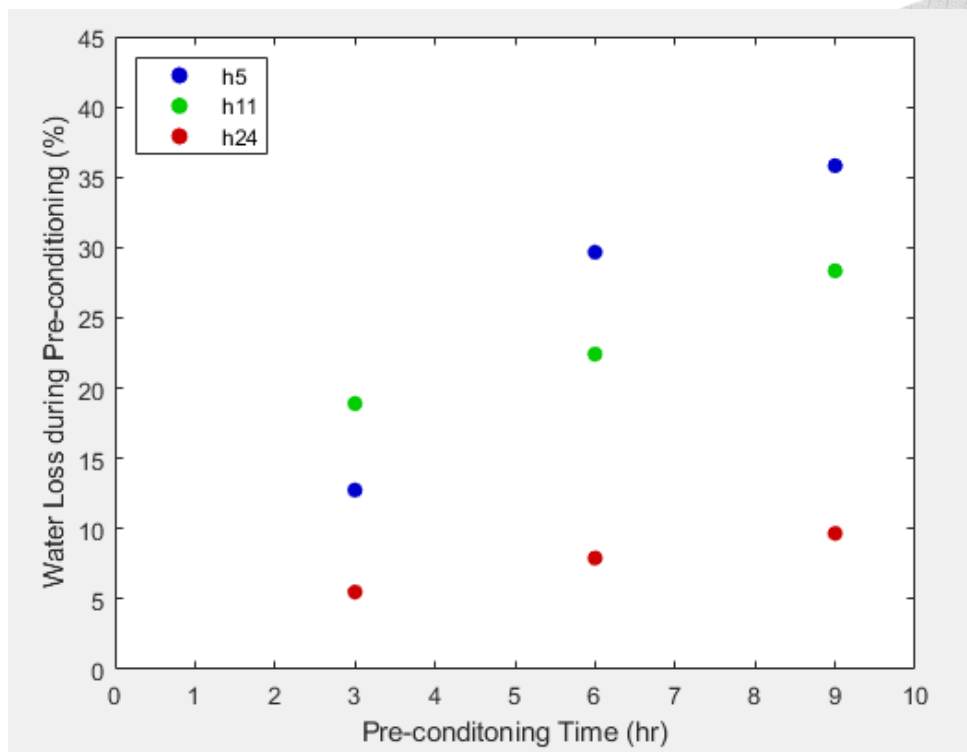


圖 4.1-1 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.4)

圖 4.1-2、圖 4.1-3 為預處理水分損失量及二氧化碳吸收量關係圖，依文獻 [53][54] 可知預處理時間及二氧化碳吸收量應為正比關係，但兩文獻皆為固定模內水化時間 24 小時，因此本研究進而探討不同模內水化時間下的影響，詳細結論如下：

- (1) 圖 4.1-2 其相關係數平方約為 0.74，其相關性低於文獻之結果，若將模內水化時間 5 小時之實驗值拿掉，其相關係數平方可達 0.95，如圖 4.1-3。由上述之結果分析，其可能原因模內水化五小時即拆模進行預處理，而模內水化五小時其內部還仍有許多水分尚未與水泥進行完整的水化反應，又經過預處理後仍有許多試體內部的的水分尚未損失，導致於碳化養護過程中，在鋼桶內仍在損失水分並有二氧化碳持續進入孔隙中形成二氧化碳，因此圖 4.1-2 中的橫軸為預處理水分損失，非總水量的損失，導致無法得到正比結果。

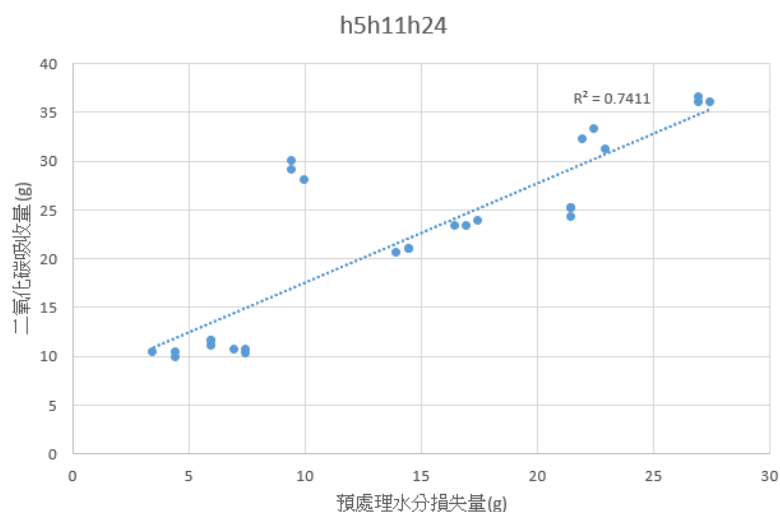


圖 4.1-2 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖(水灰比 0.4)

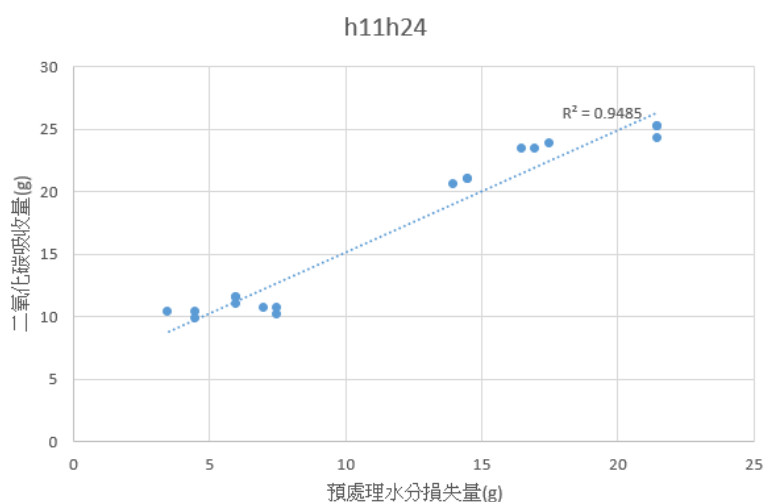


圖 4.1-3 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖
(水灰比 0.4) (去除模內水化 5 小時)

圖 4.1-4、圖 4.1-5、圖 4.1-6 為水分損失百分比與碳化度的關係圖，其中碳化度利用式 3.7-2、式 3.7-3 得出，由此三圖之結果可得以下結論：

- (1) 由碳化度結果比較相同水灰比下不同模內水化時間與預處理時間影響之關係，由圖 4.1-4 可知模內水化時間五小時，碳化度可達約 33-42%，且預處理時間越長碳化度會略為增加，符合理論上預處理時間越長水分損失越多二氧化碳吸收量亦越多；由圖 4.1-5 可知模內水化時間 11 小時，碳化度約為 22%-28%，預處理時間越長碳化度亦略為上升；由圖

4.1-6 可知模內水化 24 小時，碳化度約為 11-13%，然而其碳化度未依理論上預處理時間越長有碳化度越高的趨勢，其原因應為模內水化時間 24 小時後，水分損失及碳化反應都侷限於試體外層，且水分損失量在預處理時間越長沒有很明顯的增加，已達到試體內部水分蒸散之極限，因此二氧化碳吸收量也達極限約為 10 公克左右。

(2) 由三圖可觀察出，雖然在模內水化 5、11 小時有預處理時間越長碳化度增加的趨勢，但其增幅皆不大，而碳化度較明顯的差異取決於模內水化時間之長短，可得結論模內水化時間越長，水分損失量越高，二氧化碳吸收量低，碳化度越低。

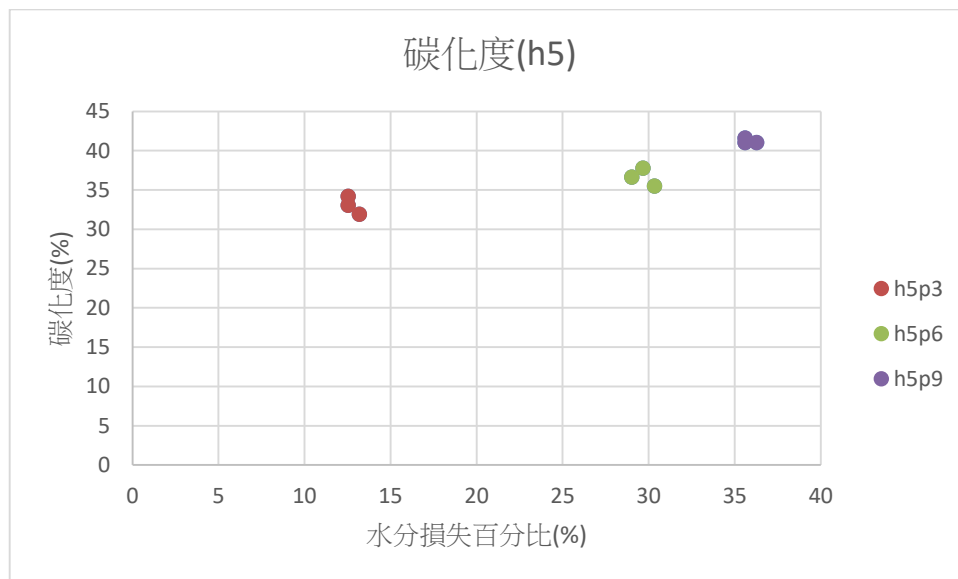


圖 4.1-4 碳化度(水灰比 0.4) (模內水化時間 5 小時)

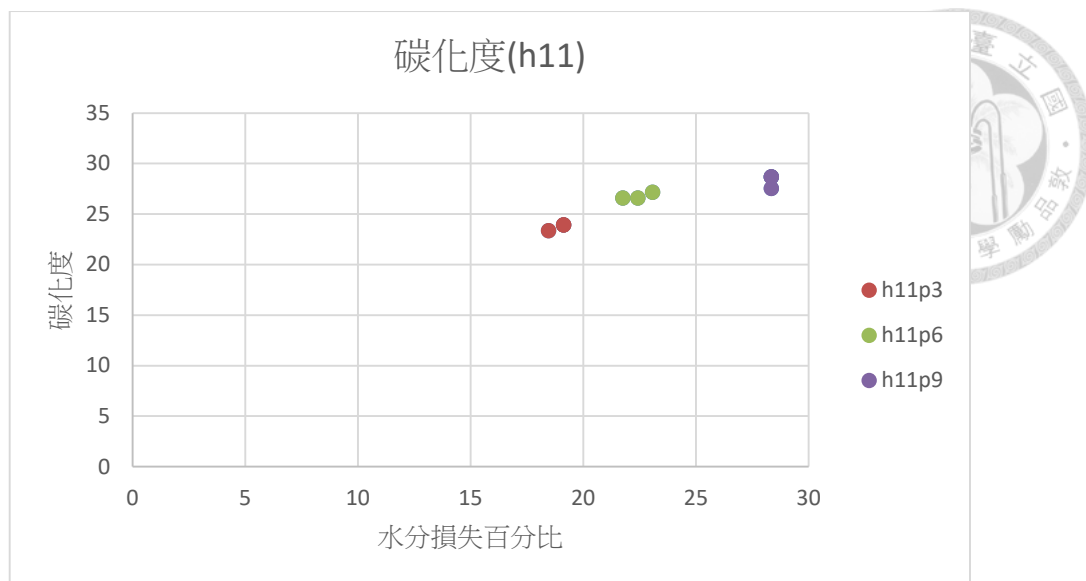


圖 4.1-5 碳化度(水灰比 0.4) (模內水化時間 11 小時)

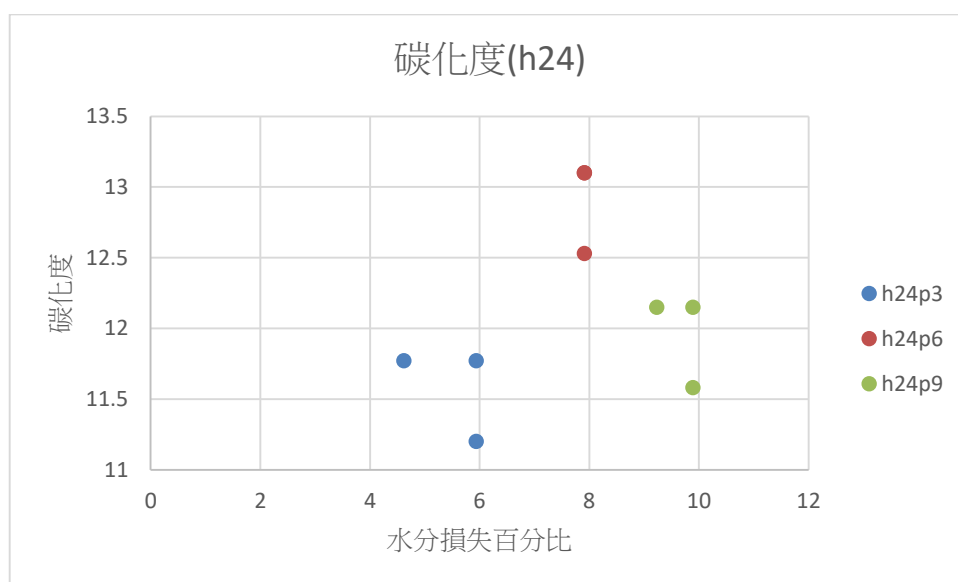


圖 4.1-6 碳化度(水灰比 0.4) (模內水化時間 24 小時)

圖 4.1-7、圖 4.1-8、圖 4.1-9 水灰比 0.4 模內水化時間 5、11、24 小時，在預處理時間 3、6、9 小時後，經過碳化養護 24 小時，後養護 28 天後的抗壓強度比較圖，W:代表指定之模內水化時間後進行水養護達 28 天齡期的控制組；C:代表經過指定模內水化及預處理時間進行碳化養護後放入水養護達 28 天齡期的實驗組。圖 4.1-10 為抗壓強度增加量，水灰比 0.4 在相同的模內水化及預處理時間，利用實驗組抗壓強度除以控制組抗壓強度，更方便觀察碳化養護組及水養護組間的強度關係，由以上之結果可得以下結論:

- (1) 水灰比 0.4 在模內水化 5、11、24 小時，個別在預處理 3、6、9 小時，強度與控制組皆沒有太大的差異，而特別在模內水化 24 小時預處理 6 及 9 小時，甚至有比控制組更好的抗壓強度，此結果與文獻[53]相符。
- (2) 在水灰比 0.4 下模內水化 5、11 小時是可行的，因為在強度上與水養護組不會有太大的差異，代表碳化養護組在吸收二氧化碳下仍可維持強度，且二氧化碳的吸收量可以達到模內水化 24 小時兩倍以上。

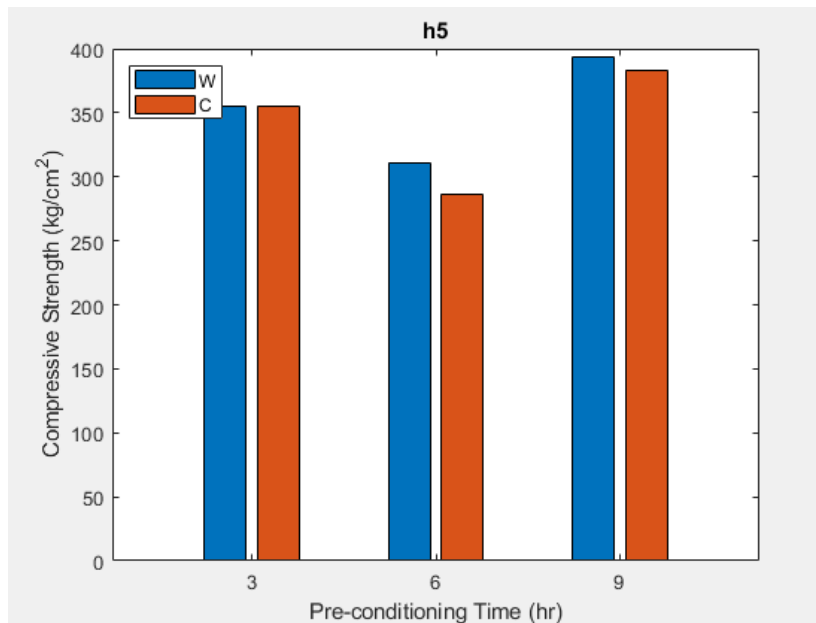


圖 4.1-7 抗壓強度(水灰比 0.4)(模內水化時間 5 小時)

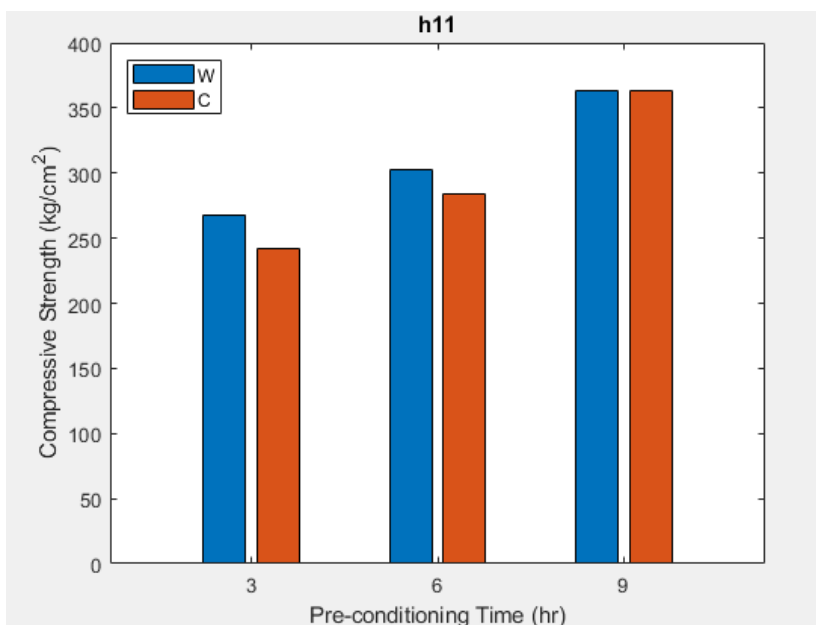


圖 4.1-8 抗壓強度(水灰比 0.4)(模內水化時間 11 小時)

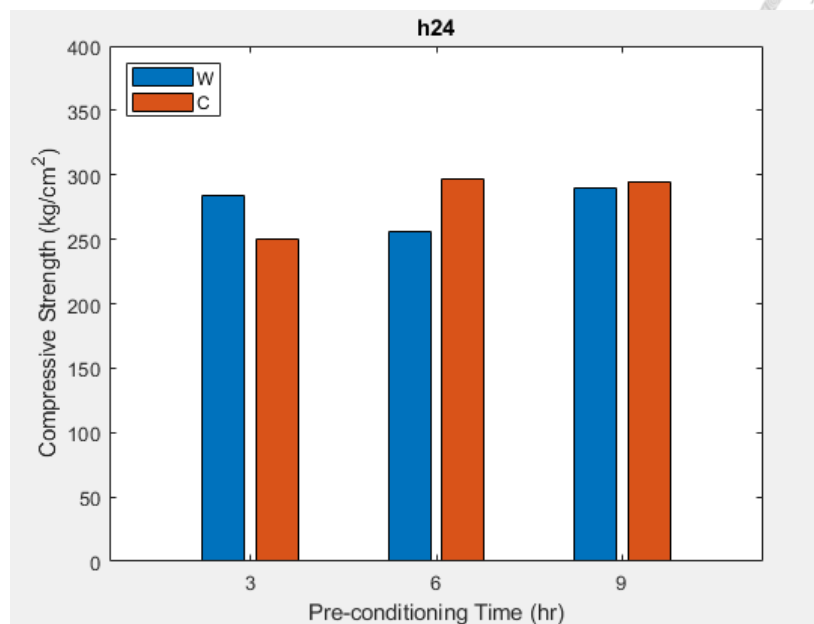


圖 4.1-9 抗壓強度(水灰比 0.4) (模內水化時間 24 小時)

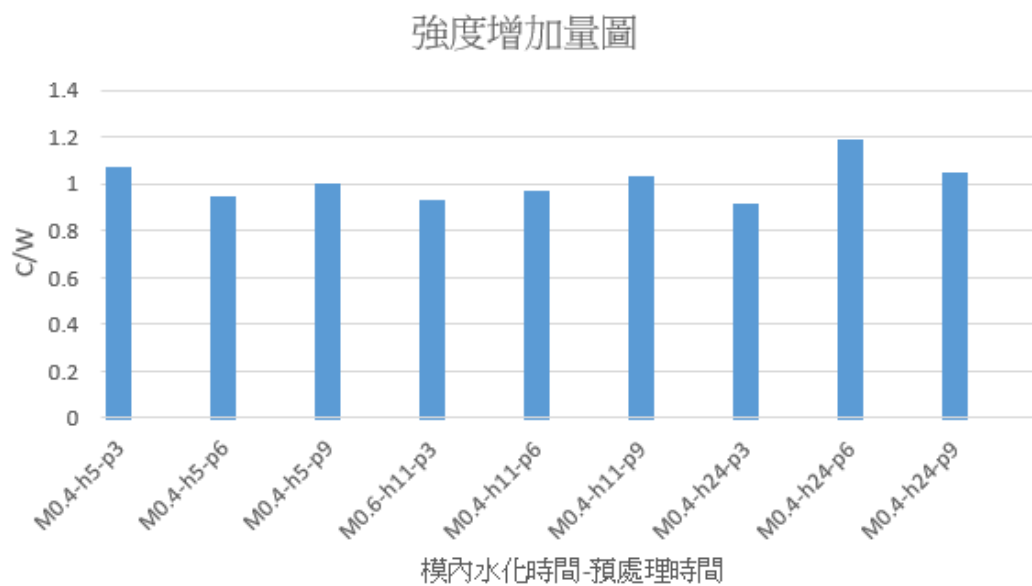


圖 4.1-10 抗壓強度增加量(水灰比 0.4) (實驗組/控制組)

4.1.2 水灰比 0.5

表 4.1-4、表 4.1-5、表 4.1-6 分別為初期水化齡期 5、11、24 小時搭配預處理 3、6、9 小時的預處理水分損失量及二氧化碳吸收量，圖 4.1-11 為三個模內水化時間中，預處理時間與水分損失百分比之關係，由這些結果可得以下結論：

(1) 先由預處理水分損失量分析，可以看出模內水化 5、11、24 小時，在預處理時間 3 及 6 小時間水分損失百分比明顯上升，在 6 及 9 小時有明顯的趨緩，尤其在模內水化 24 小時，預處理時間 6 小時後幾乎沒有更多的水分損失，此結果與文獻[54]符合。

(2) 再由二氧化碳吸收量分析，模內水化 5、11 小時的二氧化碳吸收量在搭配不同的預處理時間下，皆為約 30 公克左右；模內水化 24 小時，二氧化碳吸收量於不同預處理時間下，也皆約為 15 公克左右。由上述實驗結果可知，可更明顯看出模內時間越短，二氧化碳吸收量越高，模內水化 5 及 11 小時二氧化碳吸收量可以達模內水化 24 小時的兩倍，而預處理時間在個別的模內水化時間下，對二氧化碳吸收量影響不大。

較短的模內水化時間意味著試體內部含有更多水分，在模內水化 5 小時的部分，雖然 6 及 9 小時比較起來有趨緩但仍在上升水分損失百分比，因此可以推測試體內部仍有水分可以蒸散，還未與環境達到平衡，故由表 4.1-4 可以發現碳化養護過程中仍有許多的水分可以蒸散，形成孔隙，使更多二氧化碳可以進入試體反應形成碳酸鈣。

(3) 由碳化養護水分損失量分析，可以看到預處理時間越長，碳化養護過程中水分損失量越低，因為預處理目的即為將試體內部的水分蒸散形成孔隙，而預處理時間越長代表蒸散越多的水分，導致在碳化養護過程中，試體內部有較少的水分可以蒸散，此結果與文獻相符。

表 4.1-4 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.5) (模內水化 5 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	16.5	+22.5	18.5	28.667
	17.0	+25.5		31.667
	17.5	+23.0		29.167
6	29.5	+28.0	8.0	30.667
	29.0	+30.0		32.667
	28.0	+29.0		31.667
9	32.5	+29.5	5.0	31.167
	33.5	+29.0		30.667
	32.5	+29.0		30.667

表 4.1-5 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.5) (模內水化 11 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	18.5	+24.0	13.5	28.5
	19.5	+24.0		28.5
	18.0	+23.5		28.0
6	22.0	+27.0	8.5	29.83
	22.0	+27.0		29.83
	22.5	+28.0		30.83
9	25.0	+30.0	6.0	32.0
	25.0	+30.5		32.5
	24.5	+29.0		31.0

表 4.1-6 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.5) (模內水化 24 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損 失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	8.5	+12.0	8	14.667
	8.5	+13.5		16.167
	9.5	+12.0		14.667
6	12.0	+13.0	6	15.0
	11.5	+14.0		16.0
	12.0	+13.5		15.5
9	13.0	+14.5	5.5	16.33
	12.5	+13.5		15.33
	13.0	+13.5		15.33

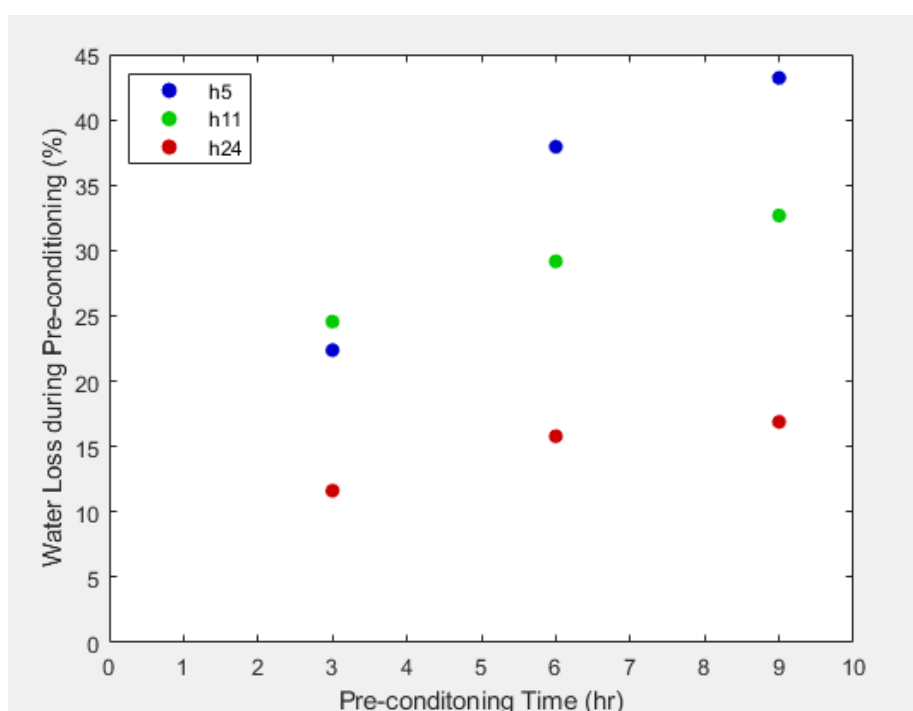


圖 4.1-11 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.5)

圖 4.1-12、圖 4.1-13 為由表 4.1-4、表 4.1-5、表 4.1-6 中預處理水分損失量及二氧化碳吸收量而來，所得之結論如下：

- (1) 圖 4.1-12 為模內水化 5、11、24 小時的線性回歸，相關係數平方約為 0.7，圖 4.1-13 為拿掉模內水化時間 5 小時的的線性回歸，相關係數平方可達約 0.92，去除模內水化 5 小時，與文獻較相符。可能原因為由表 4.1-4、表 4.1-5，比較模內水化 5 小時及模內水化 11 小時可以發現，預處理水損失量在模內水化 5 小時高於模內水化 11 小時，但在二氧化碳的吸收量是差不多的，因此推測試體已達其對二氧化碳的吸收量之極限。

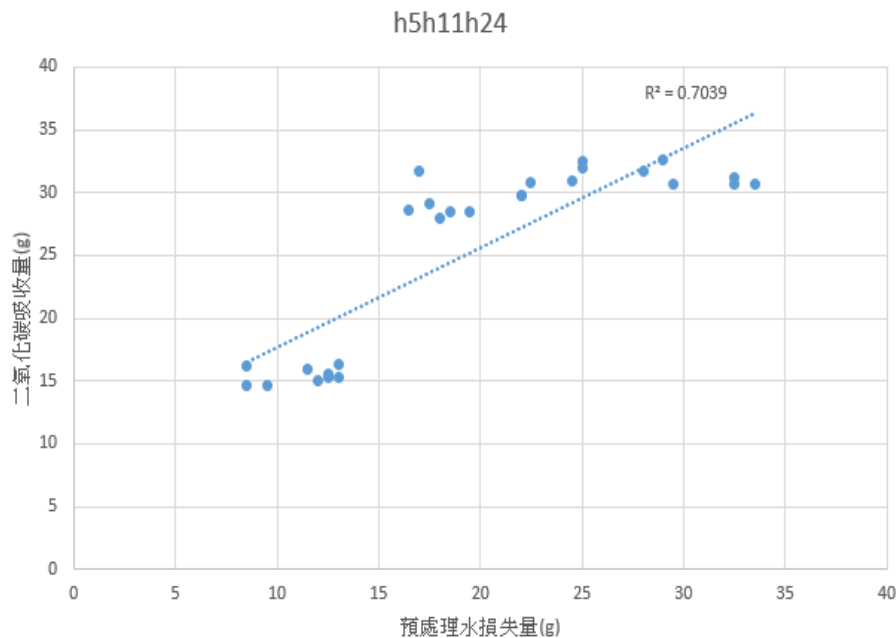


圖 4.1-12 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖(水灰比 0.5)

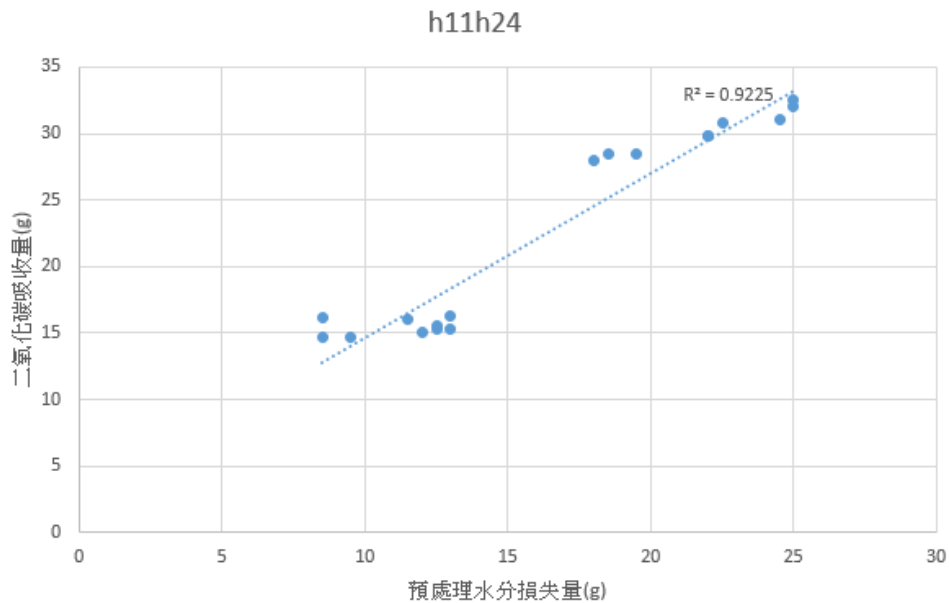


圖 4.1-13 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖
(水灰比 0.5) (去除模內水化 5 小時)

圖 4.1-14、圖 4.1-15、圖 4.1-16 為由式 3.7-2、式 3.7-3 計算水灰比 0.5-模內水化時間-預處理時間之碳化度，與水分損失百分比關係圖，可得結論如下：

(1)模內水化 5 小時碳化度約為 41-46%；模內水化 11 小時碳化度約為 40-46%；模內水化 24 小時碳化度約為 14-17%。模內水化 5、11 小時可高模內水化時間 24 小時碳化度的 2.5 倍，因此若欲增加二氧化碳的吸收量可以縮短模內水化時間。然而在相同模內水化時間，預處理時間 3、6、9 小時的碳化度結果，雖有略微上升趨勢但皆不明顯，因此可得結論相同的模內水化時間，預處理時間長短對二氧化碳吸收量及碳化度影響有限。以上與 4.1.1 節有相同結論。

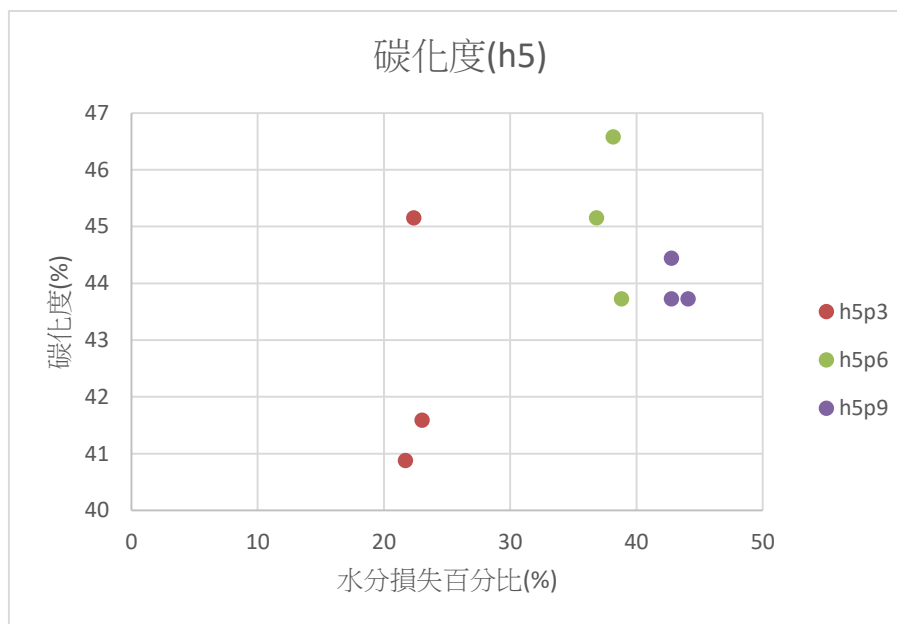


圖 4.1-14 碳化度(水灰比 0.5) (模內水化時間 5 小時)

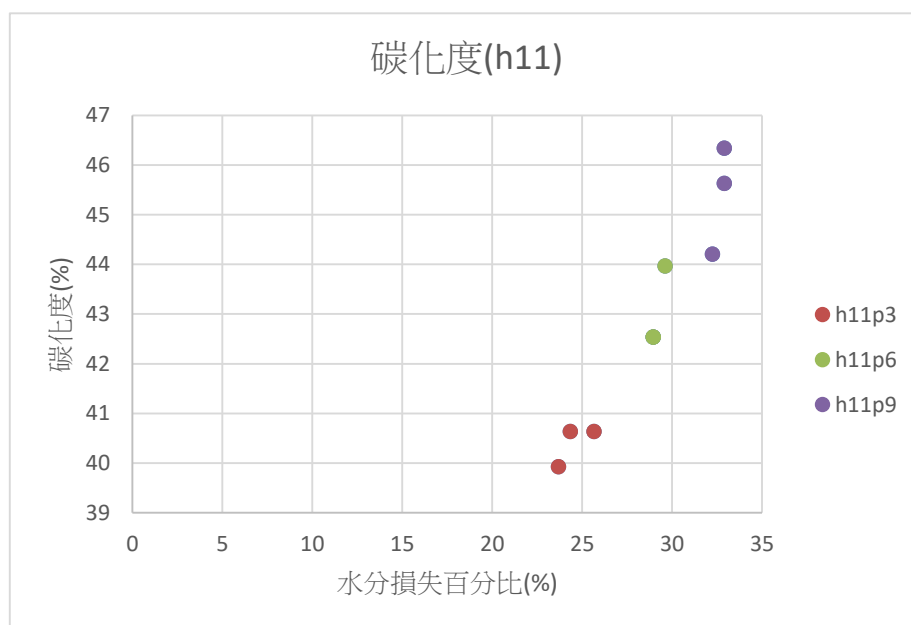


圖 4.1-15 碳化度(水灰比 0.5) (模內水化時間 11 小時)

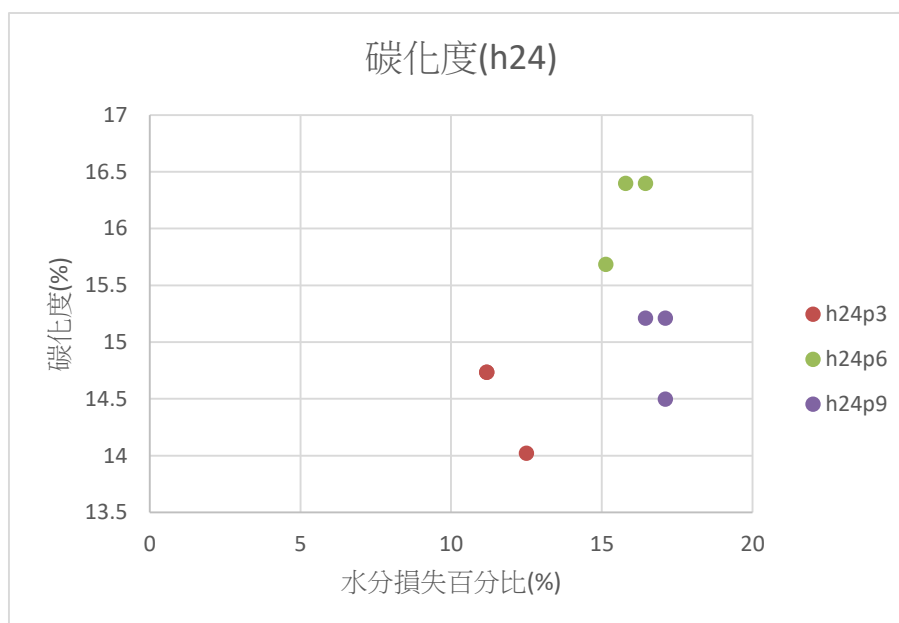


圖 4.1-16 碳化度(水灰比 0.5) (模內水化時間 24 小時)

圖 4.1-17、圖 4.1-18、圖 4.1-19 為水灰比 0.5 模內水化時間 5、11、24 小時，在預處理時間 3、6、9 小時後，經過碳化養護 24 小時，後養護 28 天後的抗壓強度比較圖，W:代表指定之模內水化時間後進行水養護達 28 天齡期的控制組；C:代表經過指定模內水化及預處理時間進行碳化養護後放入水養護達 28 天齡期的實驗組。圖 4.1-20 為抗壓強度增加量，水灰比 0.5 在相同的模內水化及預處理時間，利用實驗組抗壓強度除以控制阻抗壓強度，更方便觀察碳化養護組及水養護組間的強度關係，由這些結果可得以下結論:

- (1) 模內水化時間 5、11 小時，其抗壓強度皆低於水養護組許多，尤其是模內水化時間 5 小時，因此可以得知並非越高的二氧化碳吸收量可以得到更高的強度。此結果推測是因式 2.1-4 發生之反應，且前期模內水化時間越短，試體內的 csh 膠體發展越不完全，因此後續做碳化深度試驗可以幫助了解試體內部二氧化碳影響的範圍。
- (2) 由圖 4.1-19 可知模內水化 24 小時，碳化養護組可以達到與水養護控制組差不多的抗壓強度，此結果與文獻[54]相符。

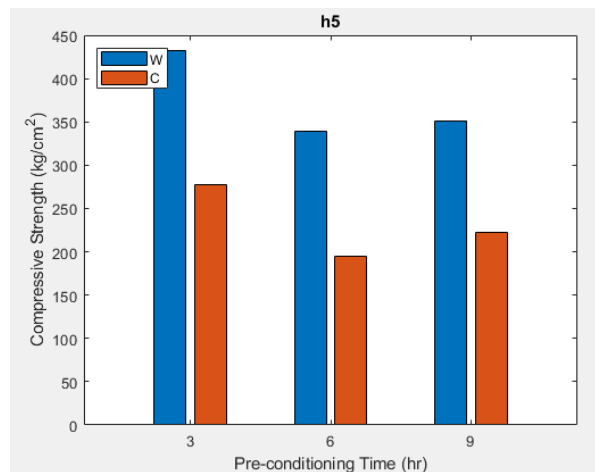


圖 4.1-17 抗壓強度(水灰比 0.5) (模內水化時間 5 小時)

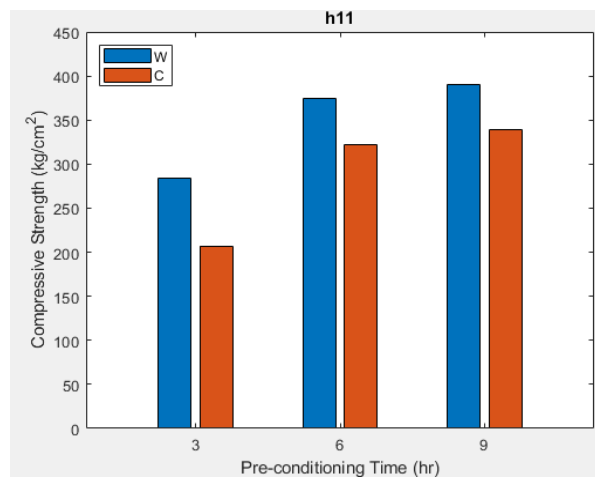


圖 4.1-18 抗壓強度(水灰比 0.5) (模內水化時 11 小時)

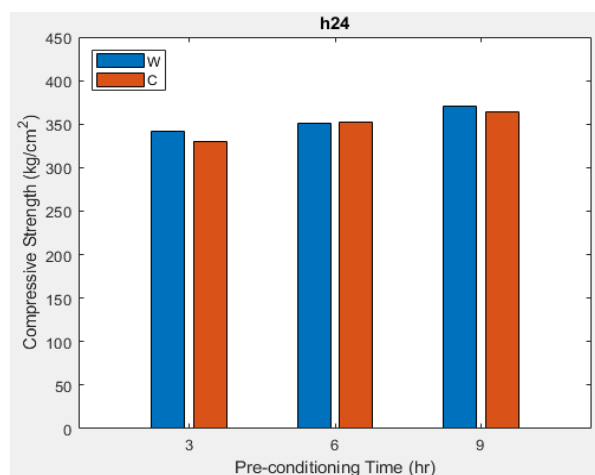


圖 4.1-19 抗壓強度(水灰比 0.5) (模內水化時間 24 小時)

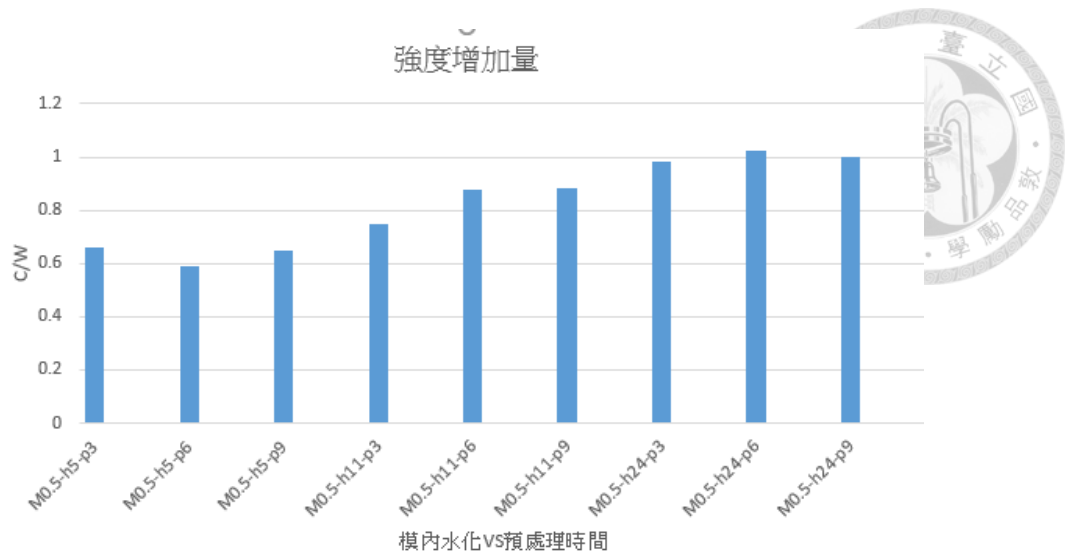


圖 4.1-20 抗壓強度增加量(水灰比 0.5) (實驗組/控制組)

4.1.3 水灰比 0.6

表 4.1-7、表 4.1-8、表 4.1-9 分別為初期水化齡期 5、11、24 小時搭配預處理 3、6、9 小時的預處理水分損失量及二氧化碳吸收量，圖 4.1-21 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.6)為三個模內水化時間中，預處理時間與水分損失百分比之關係，由這些結果可得以下結論：

- (1) 先由預處理水分損失量分析，與水灰比 0.4、0.5 皆有相同趨勢，預處理時間越長水分損失越多，且模內水化時間越短，水分損失量越多。
- (2) 再由二氧化碳吸收量分析，如同於水灰比 0.5，模內水化時間在 5、11 小時，不論搭配預處理時間 3、6、9 小時，皆有差不多的二氧化碳吸收量，可以推測試體以達二氧化碳的吸收極限。

表 4.1-7 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.6) (模內水化 5 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損 失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	18.0	+22.5	15.0	27.5
	17.5	+22.0		27.0
	17.5	+22.5		27.5
6	23.0	+25.5	10.5	29.0
	23..0	+25.0		28.5
	22.5	+26.0		29.5
9	29.0	+24.5	6.5	26.667
	27.0	+26.0		28.167
	28.0	+25.5		27.667

表 4.1-8 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.6) (模內水化 11 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損 失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	20.0	+23.5	18.5	29.667
	19.0	+23.0		29.167
	19.0.	+22.5		28.667
6	32.0	+23.0	6	25.0
	34.0	+21.0		23.0
	31.0	+24.0		26.0
9	32.5	+24.0	6.5	26.167
	32.5	+22.5		24.667
	33.5	+22.5		24.667

表 4.1-9 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.6) (模內水化 24 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	11.5	+13.5	7.5	16.0
	12.0	+14.0		16.5
	12.0	+13.5		16.0
6	14.5	+17.5	8.0	20.167
	15.0	+18.5		21.167
	14.5	+18.0		20.667
9	18.0	+19.5	8.5	22.33
	18.0	+19.5		22.33
	18.0	+20.0		22.833

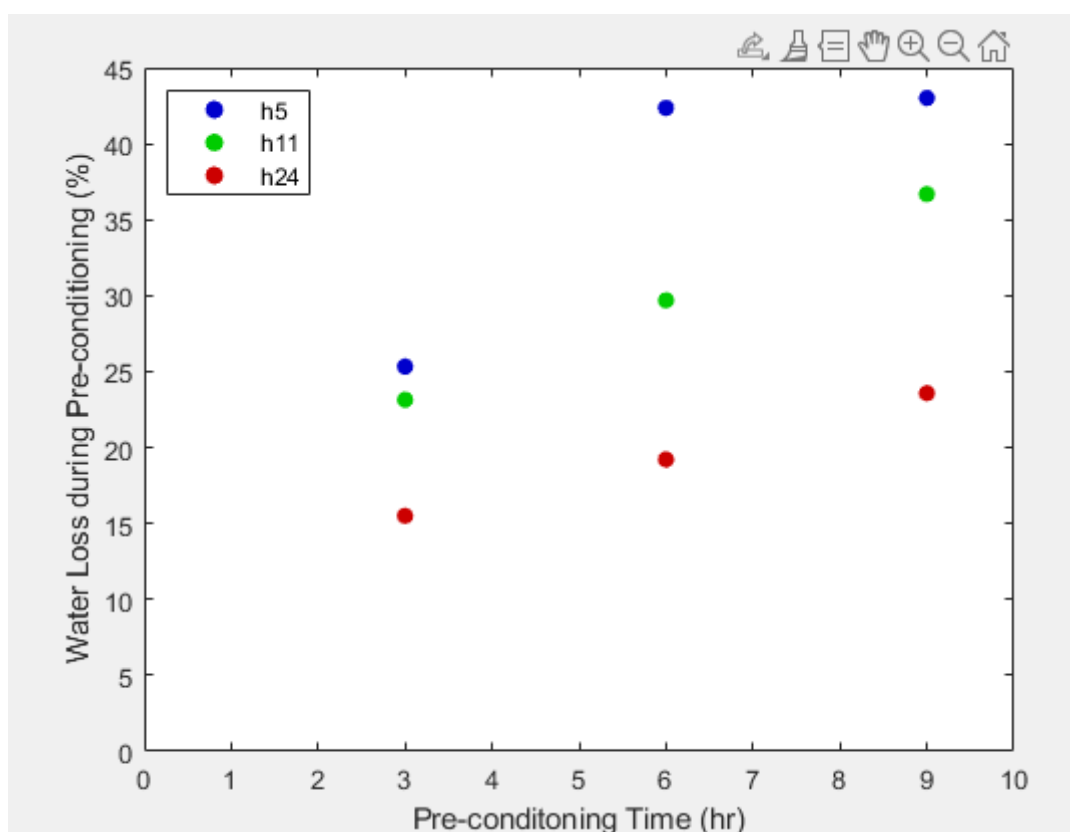


圖 4.1-21 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.6)

圖 4.1-22、圖 4.1-23 為由表 4.1-7、表 4.1-8、表 4.1-9 中預處理水分損失量及二氧化碳吸收量而來，所得之結論如下：

- (1) 圖 4.1-22 可看到線性回歸下的相關係數平方只有 0.22，去除掉模內水化時間 5 小時(圖 4.1-23)，相關係數也只有 0.66，未能達較高的正相關，其原因推測為因下圖橫軸為預處理水分損失量，在水灰比 0.6 試體內水分較高所以在預處理時間較短，其試體內仍有水分尚未蒸散，將會於碳化養護過程中蒸散，進而使更多二氧化碳可以進入試體反應，所以碳化養護的水分損失量沒有被納入，因此導致在預處理水分損失量與二氧化碳吸收量沒有達高度正相關。

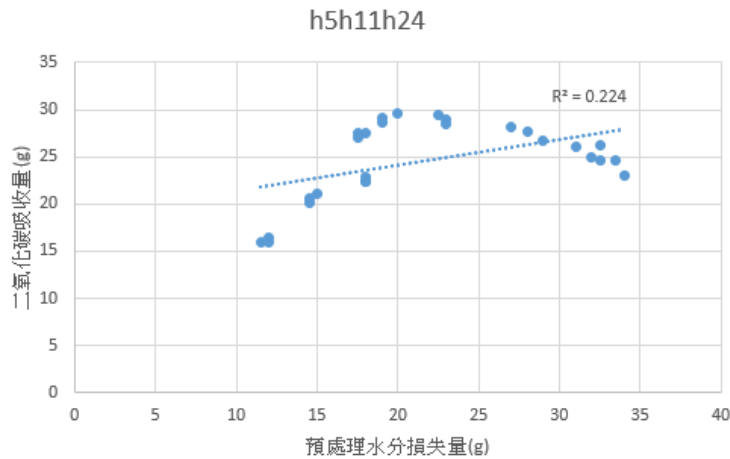


圖 4.1-22 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖(水灰比 0.6)

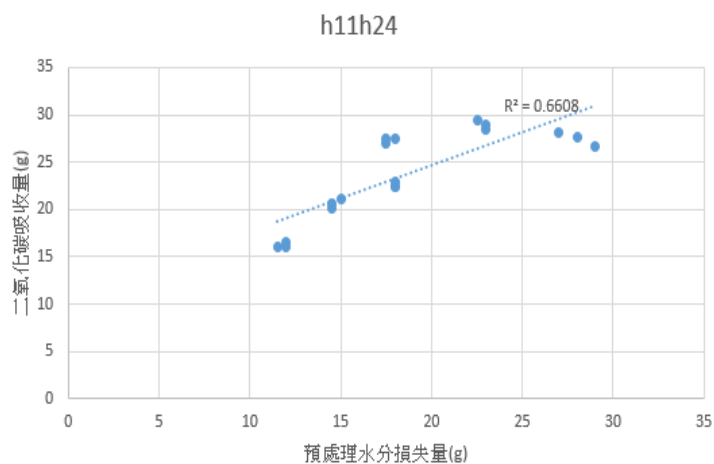


圖 4.1-23 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖

(水灰比 0.6) (去除模內水化 5 小時)

圖 4.1-24、圖 4.1-25、圖 4.1-26 為由式 3.7-2、式 3.7-3 計算水灰比 0.6-模內水化時間-預處理時間之碳化度，與預處理水分損失百分比關係圖，可得結論如下：

- (1) 模內水化 5 小時，碳化度約 40-50%；模內水化時間 11 小時，碳化度約 45-50%；模內水化 24 小時，碳化度約 25-28%。
- (2) 在相同的模內水化時間，不同的預處理時間對碳化度的影響沒有很大，此結論在水灰比 0.4、0.5、0.6 皆相同，主要影響為模內水化時間，模內水化時間越短二氧化碳吸收量越高，因此有更高的碳化度。

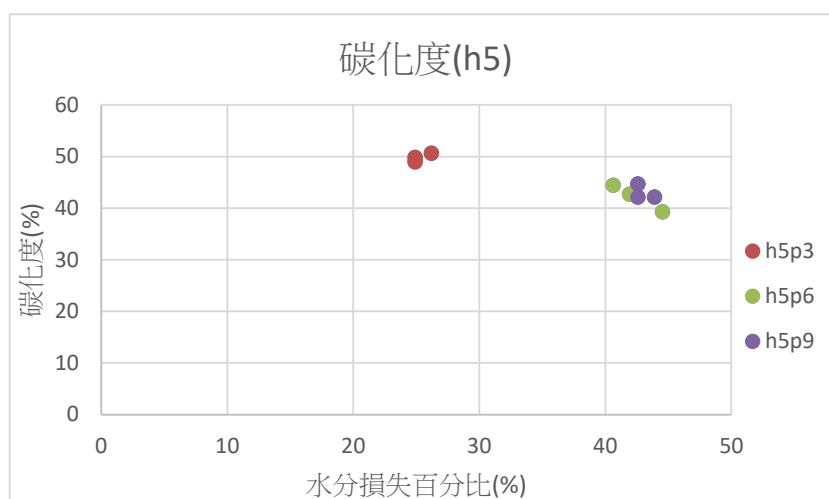


圖 4.1-24 碳化度(水灰比 0.6) (模內水化時間 5 小時)

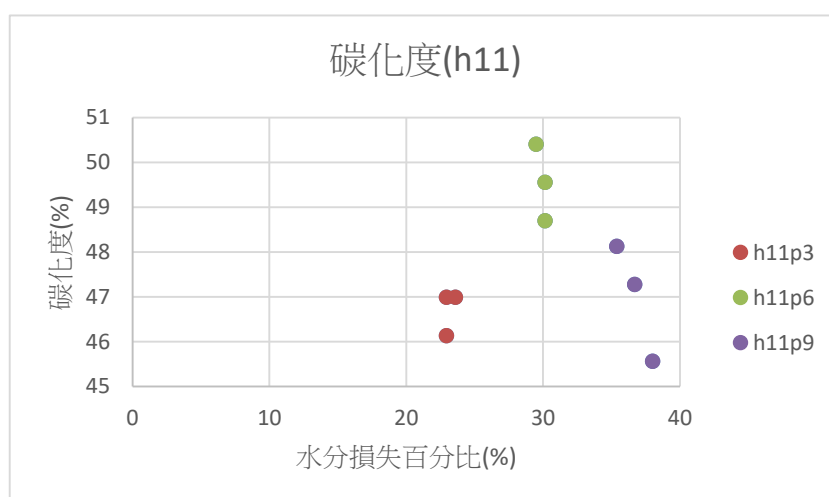


圖 4.1-25 碳化度(水灰比 0.6) (模內水化時間 11 小時)

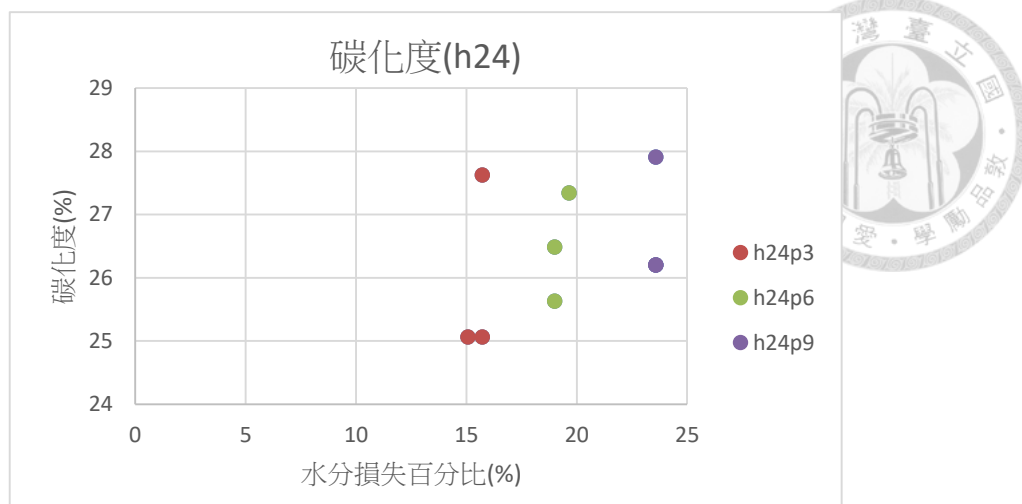


圖 4.1-26 碳化度(水灰比 0.6) (模內水化時間 24 小時)

圖 4.1-27、圖 4.1-28、圖 4.1-29 為水灰比 0.5 模內水化時間 5、11、24 小時，在預處理時間 3、6、9 小時後，經過碳化養護 24 小時，後養護 28 天後的抗壓強度比較圖，W:代表指定之模內水化時間後進行水養護達 28 天齡期的控制組；C:代表經過指定模內水化及預處理時間進行碳化養護後放入水養護達 28 天齡期的實驗組，圖 4.1-30 為抗壓強度增加量，水灰比 0.6 在相同的模內水化及預處理時間，利用實驗組抗壓強度除以控制組抗壓強度，更方便觀察碳化養護組及水養護組間的強度關係，由這些結果可得以下結論:

- (1) 如同水灰比 0.5，在模內水化時間 5、11 小時，28 天抗壓強度低於控制組很多，因此雖然模內水化時間 5、11 小時二氧化碳的吸收量可以達到模內水化 24 小時的 1.5-2 倍，但其強度的表現很差，此原因應為，模內水化時間過短，導致試體內部 csh 膠體尚未發展完全，就進入預處理及碳化養護。
- (2) 模內水化 24 小時的抗壓強度則皆低於控制組約 10-15%，與水灰比 0.4 及 0.5 的抗壓強度都是持平甚至超過相比表現比較差，因此可得結論在模內水化 24 小時，水灰比越高雖二氧化碳吸收量越高，但其強度的表現也越差，推測因二氧化碳吸收量越高，式 2.1-4 之反應越明顯所致。

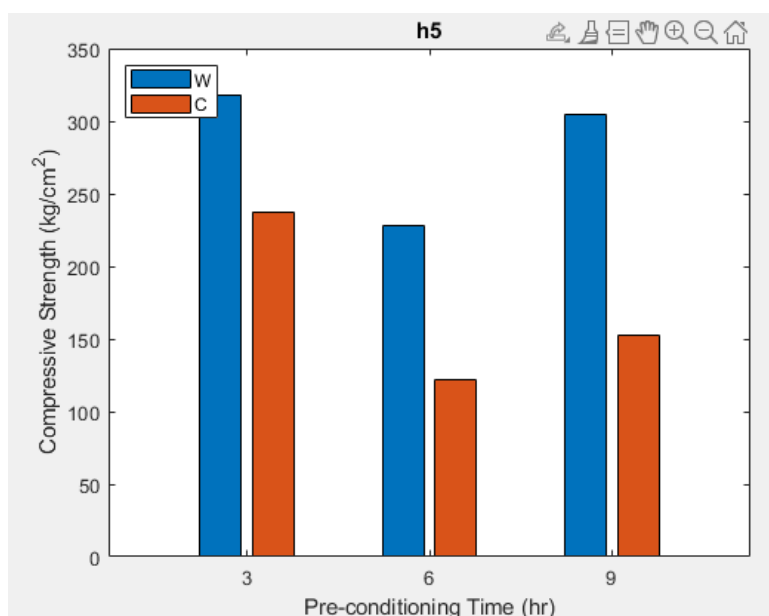


圖 4.1-27 抗壓強度(水灰比 0.6) (模內水化時間 5 小時)

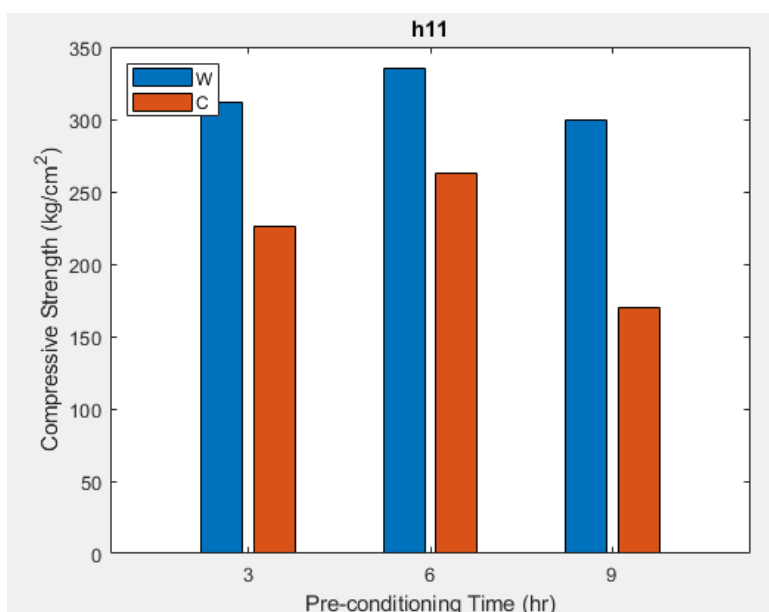


圖 4.1-28 抗壓強度(水灰比 0.6) (模內水化時間 11 小時)

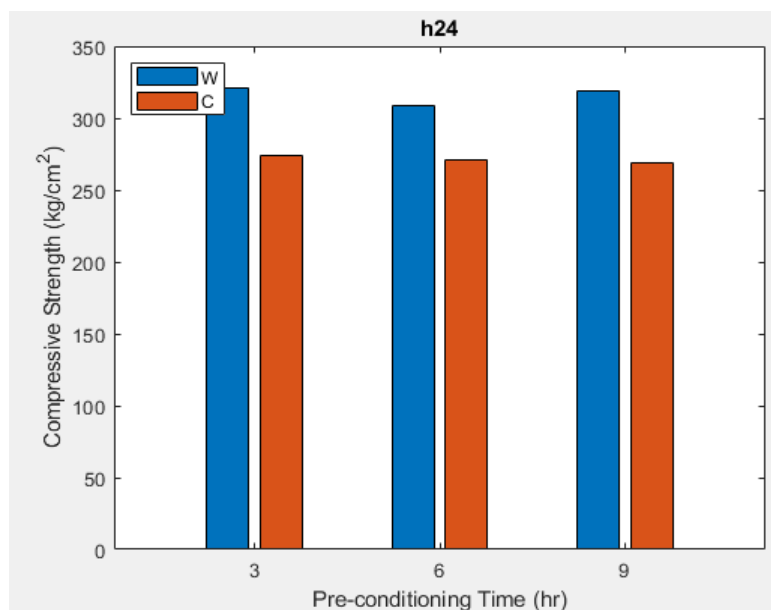


圖 4.1-29 抗壓強度(水灰比 0.6) (模內水化時間 24 小時)

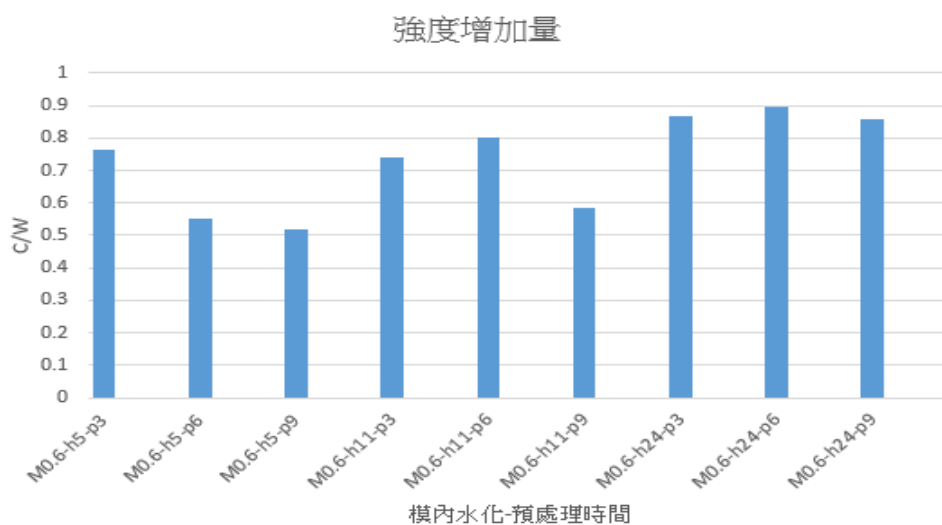


圖 4.1-30 抗壓強度增加量(水灰比 0.6) (實驗組/控制組)

4.2 水泥砂漿碳化深度試驗結果

由 4.1 節之試驗結果，可知模內水化時間越短，二氧化碳吸收量越多，然而在抗壓強度得表現上不理想，欲更了解試體內部的碳化情形，進行碳化深度試驗，且因文獻[53][54]之碳化深度試驗結果，皆為模內水化 24 小時，且二氧化碳反應範圍侷限在外層，然而由 4.1 節的模內水化 5、11 小時的二氧化碳吸收量可以達

到模內水化 24 小時的 1.5-2 倍，因此推測其二氧化碳反應範圍應該更深，才有足夠的孔隙，被碳化反應之碳酸鈣填補，又由試驗結果得知模內水化 5、11 小時的抗壓強度較差，也因此推測碳化度太高可能發生式 2.1-4 之反應，故由碳化深度試驗可知二氧化碳形成碳酸鈣的範圍，比較 4.1 節之試驗結果。

碳化深度試驗結果中，在試體剖面顯現出紫紅色區域代表沒有發生碳化反應；而無色部分為二氧化碳反應生成碳酸鈣的範圍，再由影像辨識軟體分析碳化面積，換算碳化深度。並記錄其二氧化碳吸收量，再由式 3.7-2、式 3.7-3 換算三個水灰比下的碳化度，因水灰比不同水泥量也不同，換算碳化度以互相比較。

本試驗結果分析分為模內水化時間 5、11、24 小時搭配預處理時間 3、6、9 小時下水灰比 0.4、0.5、0.6 的碳化面積、碳化深度、碳化度，詳細如下：

4.2.1 模內水化時間 5 小時

以下表 4.2-1 表 4.2-2、表 4.2-3 分別為水灰比 0.4、0.5、0.6，在模內水化時間 5 小時，搭配預處理 3、6、9 小時的碳化深度試驗值之結果，其詳細結論如下：

- (1) 先由水灰比 0.4 比較，在模內水化時間 5 小時下，預處理 3、6、9 小時，其碳化深度依其碳化度增加其碳化深度亦增加，甚至於預處理九小時其碳化深度可以達到試體中心；在水灰比 0.5 及 0.6，其於模內水化時間 5 小時，預處理時間 3、6、9 小時的碳化深度都可以達到試體中心。此碳化深度結果，也與之前文獻[53][54]因以模內水化時間 24 小時做碳化深度試驗，而推測碳化反應侷限於試體的外層部分有出入，於本試驗發現於較短的模內水化時間，二氧化碳進入試體反應是可以達到更深的深度，甚至深入整個試體中心。
- (2) 由碳化度分析，可以看到模內水化時間 5 小時在此三種水灰比下，其碳化度皆約為 40-50%之間，在此範圍下的碳化深度可以達到幾乎整個試體。且水灰比越高碳化度越高，因水灰比越高預處理後在試體內的孔隙更多，可以吸收更多的二氧化碳進行碳化反應，此結論與文獻[15]相符。

(3) 根據試體碳化深度及碳化度結果，比較其各自的 28 天抗壓強度表現的結果，在水灰比 0.4 時模內水化時間 5 小時(圖 4.1-7)其強度與水養護的控制組接近持平；而在水灰比 0.5、0.6(圖 4.1-17、圖 4.1-27)下，其抗壓強度差控制組非常多。綜合比較下，因模內水化時間 5 小時，試體內部的 csh 膠體反展尚未完整，且碳化養護之二氧化碳可以進到試體較深處反應，更導致式 2.1-4 的反應發生阻礙 csh 膠體的發展，雖由文獻可知碳酸鈣可以提供早期抗壓強度，但對於水泥而言，有本試驗可以推測相較碳酸鈣 csh 膠體貢獻的強度較為重要，因此在實務面不可為了有更高的二氧化碳吸收量，犧牲抗壓強度的發展。

表 4.2-1 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果
(模內水化 5 小時-預處理時間 3 小時)

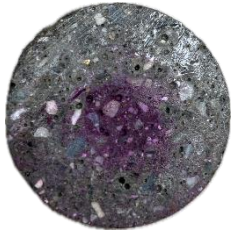
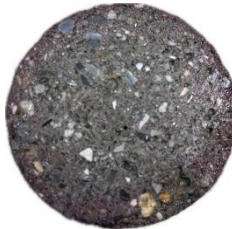
水灰比	試體剖面 h5p3	碳化面積比例	碳化深度	二氧化碳吸收量	碳化度
0.4		81.55%	14.26mm	34.5g	39.3%
0.5		100%	25.00mm	31.5g	44.92%
0.6		100%	25.00mm	28.3g	48.36%

表 4.2-2 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果
(模內水化 5 小時-預處理時間 6 小時)

水灰比	試體剖面 h5p6	碳化面積比例	碳化深度	二氧化碳吸收量	碳化度
0.4		97.45%	21.01mm	38g	43.29%
0.5		100%	25.00mm	36.5g	52.05%
0.6		100%	25.00mm	29.5g	50.41%

表 4.2-3 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果
(模內水化 5 小時-預處理時間 9 小時)

水灰比	試體剖面 h5p9	碳化面積比例	碳化深度	二氧化碳吸收量	碳化度
0.4		100%	25.00mm	38.67g	44.05%
0.5		100%	25.00mm	30.17g	43.02%
0.6		100%	25.00mm	24.17g	41.30%

4.2.2 模內水化 11 小時

以下表 4.2-4 表 4.2-5、表 4.2-6 分別為水灰比 0.4、0.5、0.6，在模內水化時間 11 小時，搭配預處理 3、6、9 小時的碳化深度試驗值之結果，其詳細結論如下：

- (1) 由三表結果分析，可以明顯看出在相同模內水化時間-預處理時間，水灰比越高碳化深度明顯的更深，碳化度也越高。水灰比 0.4 的碳化度約 18-24%，其碳化深度約 4.93-5.60mm；水灰比 0.5 的碳化度約 33-37%，其碳化深度約 10.33-12.14mm；水灰比 0.6 的碳化度約 45-47%，其碳化深度約 18.44-20.02mm。
- (2) 由三表可看出與 4.1 節相同結果，在相同的模內水化時間，不同預處理時間對於碳化度、碳化深度等，沒有太大的影響，主要影響的為水灰比及模內水化時間。
- (3) 模內水化 11 小時相較模內水化 5 小時有更長的時間讓 csh 膠體發展，導致試體內部的的水分先與水泥反應形成 csh 膠體，使預處理的水分損失位於試體較外層處，此結果於水灰比 0.4 較明顯，因水灰比 0.4 又較多的水泥量，使大部分水先與水泥反應，而水灰比較高的 0.5、0.6，相較水灰比 0.4 的水泥量較少，導致在相同的水量下與水泥反應完剩餘的水分較多，因此有較多的水分於預處理過程中損失，使其試體有更多的孔隙，使二氧化碳進入試體內反應形成碳酸鈣，造成以下水灰比較高碳化深度較深之結果。
- (4) 由下表水灰比 0.6 的碳化度約 45-47%，比較 4.2.1 節的模內水化 5 小時的碳化深度及碳化度之結果，可發現碳化度在 40%以上，其碳化深度可以達到近乎試體中心。
- (5) 由碳化深度及碳化度之結果比較 28 天抗壓強度，水灰比 0.4 在較淺的碳化深度，其抗壓強度(圖 4.1-8)可以與控制組持平；而水灰比 0.5 有較深

的碳化深度，其抗壓強度(圖 4.1-18)表現與控制組有一定的落差；水灰比 0.6 則有更深的碳化深度，其抗壓強度(圖 4.1-28)表現與前兩者相比更差。於此結果可知碳化深度越深其導致抗壓強度表現更差，進而再度顯示出 csh 膠體相較碳酸鈣對強度發展更重要。

(6) 於水灰比 0.4 模內水化時間 11 小時的碳化度及抗壓強度結果(表 4.1-2、表 4.1-3 及圖 4.1-8)，其二氧化碳吸收量可達約兩倍，且抗壓強度也與控制組持平，因此若為了有更高二氧化碳吸收量，在水灰比 0.4 下，模內水化時間 11 小時是可行的。

表 4.2-4 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果
(模內水化 11 小時-預處理時間 3 小時)

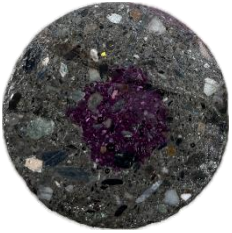
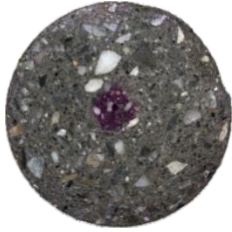
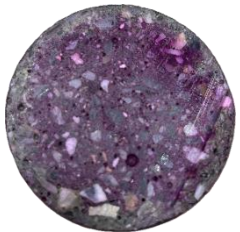
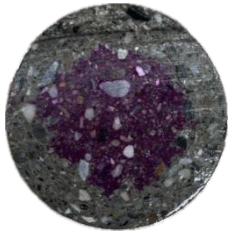
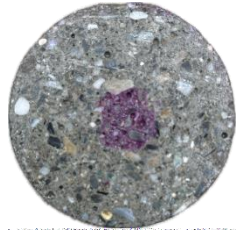
水灰比	試體剖面 h11p3	碳化面積比例	碳化深度	二氧化碳吸收量	碳化度
0.4		39.53%	5.60mm	21.83g	24.87%
0.5		73.55%	12.14mm	26.33g	37.55%
0.6		96.33%	20.02mm	26.33g	44.99%

表 4.2-5 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果
(模內水化 11 小時-預處理時間 6 小時)

水灰比	試體剖面 h11p6	碳化面積比例	碳化深度	二氧化碳吸收量	碳化度

0.4		37.12%	5.17mm	16.17g	18.42%
0.5		71.32%	11.61mm	25.17g	35.89%
0.6		93.12%	18.44mm	27.17g	46.43%

表 4.2-6 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果
(模內水化 11 小時-預處理時間 9 小時)

水灰比	試體剖面 h11p9	碳化面積比例	碳化深度	二氧化碳吸收量	碳化度
0.4		35.52%	4.93mm	15.33g	17.46%
0.5		65.55%	10.33mm	23.33g	33.27%
0.6		95.00%	19.41mm	27.33g	46.70%

4.2.3 模內水化 24 小時

以下表 4.2-7、表 4.2-8、表 4.2-9 分別為水灰比 0.4、0.5、0.6，在模內水化時間 24 小時，搭配預處理 3、6、9 小時的碳化深度試驗值之結果，其詳細結論如下：

- (1) 由三表結果分析，如同前兩小節可以看出在相同模內水化時間-預處理時間，水灰比越高碳化深度明顯的更深，碳化度也越高。水灰比 0.4 的碳化度約 7.6-12%，其碳化深度約 0.38-0.81mm；水灰比 0.5 的碳化度約 12.36-16.16%，其碳化深度約 3.51-5.69mm；水灰比 0.6 的碳化度約 21.65-33%，其碳化深度約 5.64-9.01mm。
- (2) 水灰比 0.4，經過模內水化 24 小時後，進行預處理，與碳化度及碳化深度比較，可以發現碳化反應幾乎只侷限於試體表層，其原因為水灰比 0.4 的試體水量占比較低，故進行預處理蒸散得水分留下得孔隙較少，進而導致二氧化碳進入試體反應生成碳酸鈣含量有限；水灰比 0.5，經過模內水化 24 小時，與同水灰比下模內水化 5、11 小時相比，前期的試體內部 csh 膠體發展較完全，故在碳化深度明顯較淺，因此碳化度也較低，且與文獻[54]相同的水灰比 0.5 模內水化時間 24 小時預處理時間 6 小時的碳化深度相符，加強試驗結果的準確性；水灰比 0.6，如同上述水灰比 0.5，但其碳化度較高且碳化深度也較深，與理論及文獻相符。
- (3) 在模內水化 24 小時中，相同水灰比在不同的預處理的時間，有相較模內水化 5、11 小時，更明顯預處理時間越長碳化度越高且碳化深度越深的趨勢，但在預處理時間 6 及 9 小時間，沒有太明顯的差異，此結果符合文獻中，預處理 6 小時後水分損失量達到極限，因此二氧化碳吸收量亦達極限。
- (4) 綜合 4.2.1、4.2.2、4.2.3 節的碳化度及碳化深度之結果，碳化度在 15%以下，碳化深度侷限於幾乎表面低於 1mm；碳化度在約 15-25%間，碳化

深度在試體剖面外層約 5mm，約佔試體的五分之一；在碳化度 25-35%，碳化深度可以更深入達約 10mm，約佔試體的二分之一；在碳化度 40% 以上，碳化深度可以達 18mm 至試體中心，幾乎遍布全試體。

- (5) 由碳化深度及碳化度之結果比較 28 天抗壓強度，水灰比 0.4，其碳化反應範圍侷限於試體的表面，試體內的 csh 膠體發展完整，不受式 2.1-4 影響，在抗壓強度(圖 4.1-9)的表現可以與控制組持平甚至高於控制組；水灰比 0.5，其碳化反應範圍於試體外層約佔試體五分之一，其試體內部亦有完整發展不受式 2.1-4 影響的 csh 膠體提供主要強度，其抗壓強度(圖 4.1-19)亦可持平甚至高於控制組，此結果與文獻相符；水灰比 0.6，其碳化反應範圍約佔試體二分之一，其抗壓強度(圖 4.1-29)略低於控制組。
- (6) 綜合 4.2.1、4.2.2、4.2.3 碳化深度與 28 天抗壓強度結果，可得結論若碳化反應範圍侷限於外層五分之一，亦碳化深度為半徑五分之一，其抗壓強度可有較水養護更佳表現；若碳化反應更深超過半徑的二分之一，其抗壓強度會差於水養護。故推測因式 2.1-4 的反應，導致若碳化深度太深，會影響 csh 膠體的發展，也可以藉此可知 csh 膠體所提供的強度較碳酸鈣重要；若碳化反應侷限於外層，是有相輔相成的效果，使抗壓強度更好。

表 4.2-7 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果
(模內水化 24 小時-預處理時間 3 小時)

水灰比	試體剖面 h24p3	碳化面積比例	碳化深度	二氧化碳吸收量	碳化度
0.4		3.05%	0.38mm	6.67g	7.60%

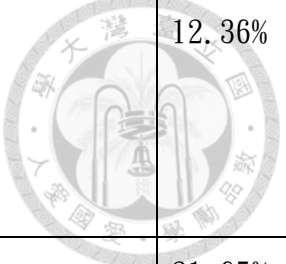
0.5		26.08%	3.51mm	8.67g		12.36%
0.6		40.02%	5.64mm	12.67g		21.65%

表 4.2-8 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果
(模內水化 24 小時-預處理時間 6 小時)

水灰比	試體剖面 h24p6	碳化面積比例	碳化深度	二氧化碳吸收量	碳化度
0.4		6.12%	0.78mm	9.83g	11.20%
0.5		39.83%	5.62mm(符合彥輔學長之結果)	11.33g	16.16%
0.6		59.08%	9.01mm	19.33g	33.03%

表 4.2-9 碳化養護後試體剖面與碳化深度試驗結果
(模內水化 24 小時-預處理時間 9 小時)

水灰比	試體剖面 h24p9	碳化面積比例	碳化深度	二氧化碳吸收量	碳化度
-----	------------	--------	------	---------	-----

0.4		6.34%	0.81mm	10.83g	12.34%
0.5		40.36%	5.69mm	11.33g	16.16%
0.6		55.04%	8.24mm	17.83g	30.46%

4.3 混凝土於不同水灰比下模內水化與預處理時間對碳化養護之影響試驗結果

本試驗混凝土為水泥砂漿加入粗骨材，其配比如表 3.5-2，欲探討在加入粗骨材後，水灰比 0.4、0.5、0.6，模內水化時間 11、24 小時搭配預處理時間 3、6、9 小時的二氧化碳吸收量及 28 天抗壓強度變化。

本試驗分別記錄初期水化齡期 11、24 小時搭配預處理 3、6、9 小時的重量值，以分析碳化養護過程中預處理水分損失量、二氧化碳吸收量(式 3.7-1)並換算碳化度(式 3.7-2、式 3.7-3)，最後再進行 28 天抗壓強度試驗，比較不同的二氧化碳吸收量其強度的變化。

本節同 4.1 節將試驗結果分別以水灰比 0.4、0.5、0.6 進行詳細說明。

4.3.1 水灰比 0.4

表 4.3-1、表 4.3-2 分別為初期水化齡期 11、24 小時搭配預處理 3、6、9 小時的預處理水分損失量及二氧化碳吸收量，由此兩表及圖 4.3-1 可得以下結論：

- (1) 由預處理水分損失量分析，模內水化時間 11 小時，預處理水分損失量約 14-17 公克；模內水化時間 24 小時，預處理水分損失量約 6-9 公克。此結果搭配圖 4.3-1 可以看出，相同模內水化時間，預處理時間越長水分損失量雖越多，但不明顯，此結果趨勢也與 4.1 節的結果相符。
- (2) 由二氧化碳吸收量分析，模內水化時間 11 小時，二氧化碳吸收量約 24-26 公克；模內水化時間 24 小時，二氧化碳吸收量約 14-18 公克。此結果也與 4.1 節中模內水化時間 11 小的二氧化碳吸收量約為模內水化時間 24 小時 1.5-2 倍。且在相同模內水化時間，預處理時間越長二氧化碳吸收量雖越多，但亦不明顯。
- (3) 由上述結果，在相同模內水化時間下，預處理時間的長短影響程度不高，主要由模內水化時間及水灰比控制，影響預處理得水分損失量及二氧化碳吸收量，此結論與 4.1 節的結果相符。

表 4.3-1 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.4) (模內水化 11 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	14.5	+22.5	9.5	25.67
	14.0	+20.5		23.67
	14.0	+23.0		26.17
6	15.0	+22.5	6.0	24.50
	15.5	+24.0		26.00
	15.0	+24.0		26.00
9	17.0	+23.0	5.0	24.67
	16.5	+22.5		24.17
	17.5	+24.5		26.17

表 4.3-2 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.4) (模內水化 24 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	6.0	+12.0	5.5	13.83
	5.5	+12.0		13.83
	6.0	+12.0		13.83
6	6.5	+14.0	6.0	16.0
	6.5	+15.5		17.5
	6.0	+13.5		15.5
9	9.5	+16.5	4.5	18.0
	8.5	+17.0		18.5
	9.0	+16.0		17.5

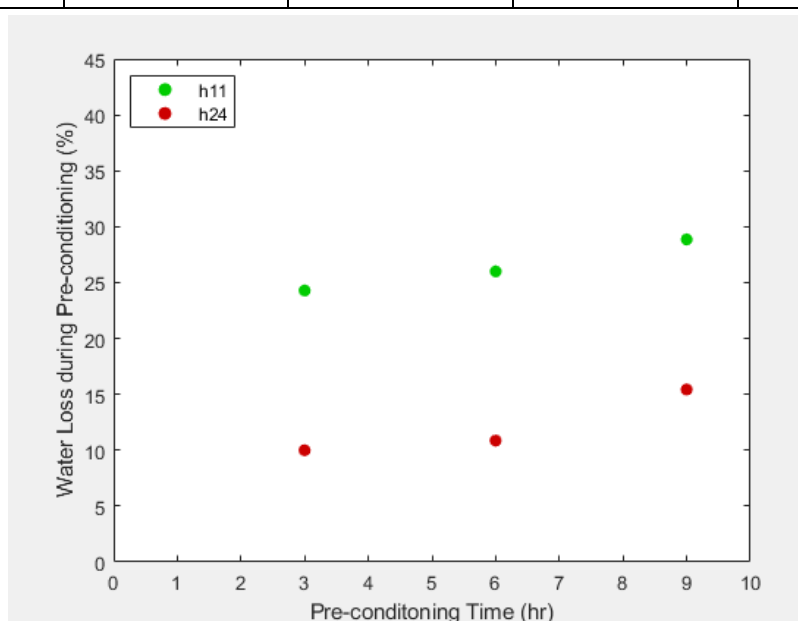


圖 4.3-1 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.4)

圖 4.3-2 為由表 4.3-1、表 4.3-2 中預處理水分損失量及二氧化碳吸收量而來，所得之結論如下：

- (1) 由表可知，預處理水分損失量及二氧化碳吸收量，經過線性回歸相關係數平方約為 0.93，此高度正相關結果與 4.1.1 節水泥砂漿及文獻[8]相符。
因預處理水分之損失所形成之孔隙，為碳化養護過程二氧化碳反應形成

之碳酸鈣主要填補。碳化養護過程中的水分損失量較侷限於試體外層，所以二氧化碳吸收量較由預處理水分損失量控制。

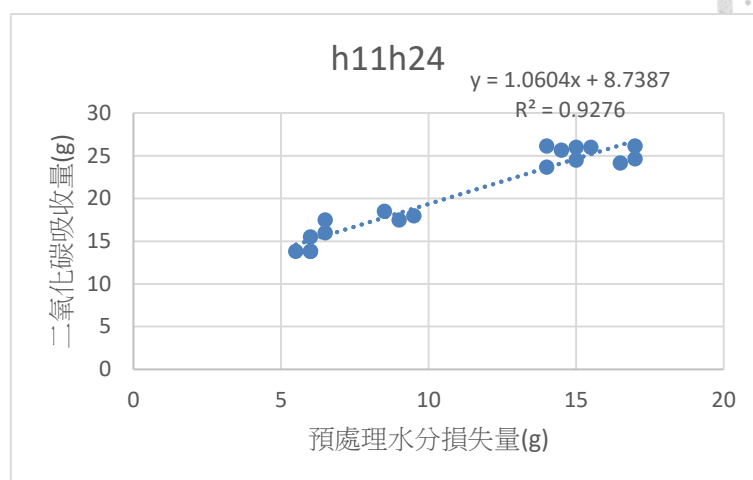


圖 4.3-2 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖(水灰比 0.4)

圖 4.3-3、圖 4.3-4 為由式 3.7-2、式 3.7-3 計算水灰比 0.4-模內水化時間-預處理時間之碳化度，與水分損失百分比關係圖，可得結論如下：

- (1) 由兩圖分析可知，模內水化 11 小時，其碳化度約 35-39%；模內水化 24 小時，其碳化度約 21-27%間。由兩圖一樣可以看出，在相同的模內水化時間，預處理時間越長雖有碳化度越高的趨勢，但不明顯。
- (2) 與水灰比 0.4 的水泥砂漿相比(圖 4.1-5、圖 4.1-6)，碳化度在模內水化時間 11 及 24 小時，都相較水泥砂漿的高，也符合推測的結果，在相同水灰比下，加入粗骨材的混凝土相較水泥砂漿，經過預處理後，應有更多更大的孔隙，可以使較多二氧化碳進入試體反應形成碳酸鈣。

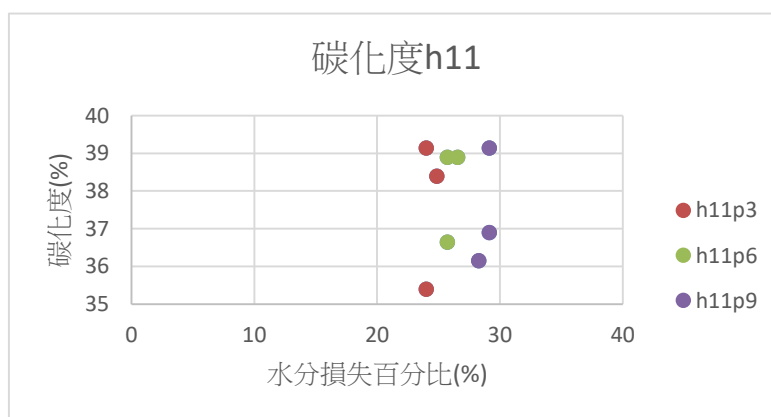


圖 4.3-3 碳化度(水灰比 0.4)(模內水化時間 11 小時)

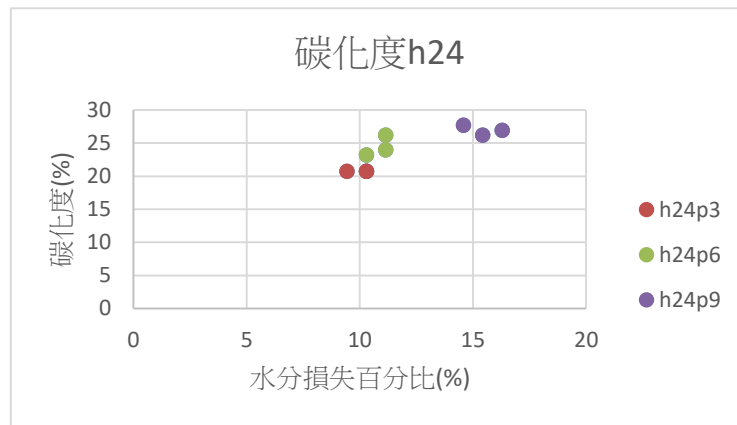


圖 4.3-4 碳化度(水灰比 0.4)(模內水化時間 24 小時)

圖 4.3-5、圖 4.3-6 為混凝土水灰比 0.4 模內水化時間 11、24 小時，在預處理時間 3、6、9 小時後，經過碳化養護 24 小時，後養護 28 天後的抗壓強度比較圖，W:代表指定之模內水化時間後進行水養護達 28 天齡期的控制組；C:代表經過指定模內水化及預處理時間進行碳化養護後放入水養護達 28 天齡期的實驗組。圖 4.3-7 為抗壓強度增加量，混凝土水灰比 0.4 在相同的模內水化及預處理時間，利用實驗組抗壓強度除以控制組抗壓強度，更方便觀察碳化養護組及水養護組間的強度關係，由這些結果可得以下結論:

- (1) 模內水化 11 小時-預處理時間 3、6、9 小時的 28 天抗壓強度，碳化養護組略低於水養護控制，但幾乎持平，故在水灰比 0.4，模內水化 11 小時在實務上使可行的，且其二氧化碳吸收量，在相同的尺寸下可已高於模內水化 24 小時 1.5-2 倍。
- (2) 模內水化 24 小時-預處理時間 3、6、9 小時，碳化養護組強度可已高於水養護控制組，此結果與水泥砂漿相符，證明先有足夠的模內水化時間，使試體內部 csh 膠體完整發展，再進行後續碳化養護流程，可以使碳酸鈣及 csh 膠體提供之強度相輔相成。
- (3) 由圖 4.3-6 比較圖 4.1-9，可以發現其趨勢相符。若由強度選取最佳的碳化養護參數搭配，為水灰比 0.4-模內水化 24 小時-預處理 6 小時。

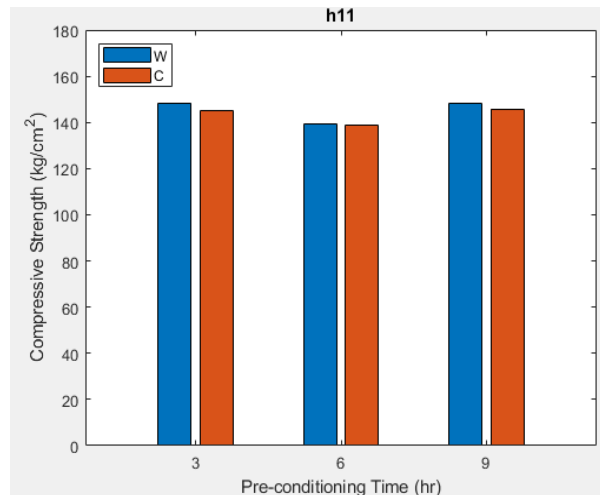


圖 4.3-5 抗壓強度(水灰比 0.4) (模內水化時間 11 小時)

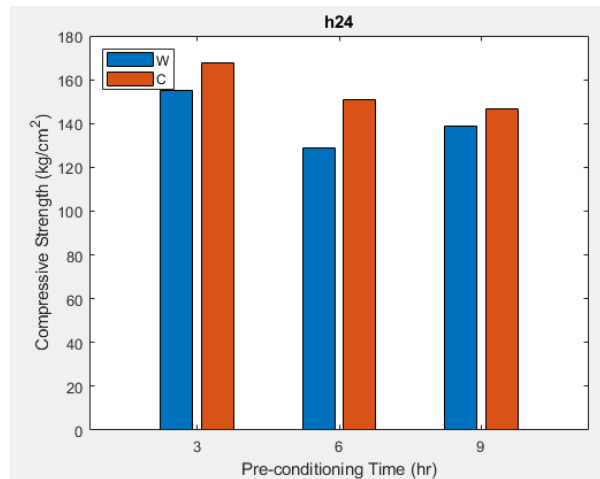


圖 4.3-6 抗壓強度(水灰比 0.4) (模內水化時間 24 小時)

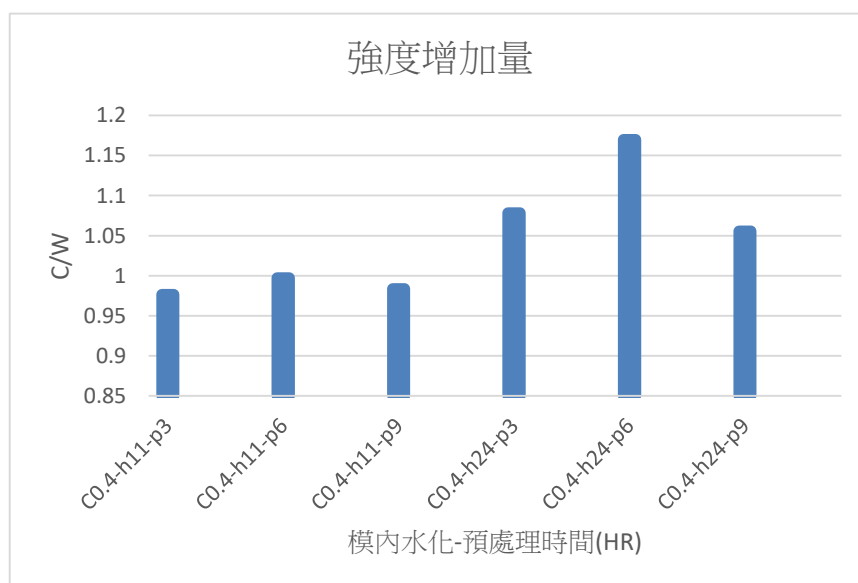


圖 4.3-7 抗壓強度增加量(水灰比 0.4) (實驗組/控制組)

4.3.2 水灰比 0.5

表 4.3-3、表 4.3-4 分別為初期水化齡期 11、24 小時搭配預處理 3、6、9 小時的預處理水分損失量及二氧化碳吸收量，由此兩表及圖 4.3-8 可得以下結論：

- (1) 由預處理水分損失量及二氧化碳吸收量分析，可以看出模內水化時間 11 小時，其二氧化碳吸收量高於模內水化時間 24 小時，其符合先前實驗之結論。且在相同模內水化時間，預處理時間越長，預處理水分損失量及二氧化碳吸收量，變化不大，此結果也符合先前試驗之結果。

表 4.3-3 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.5) (模內水化 11 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	14.5	+22.5	9.5	22.5
	14.5	+20.5		22.5
	15.0	+23.0		23.5
6	16.5	+22.5	6.0	24.0
	16.0	+24.0		23.5
	16.5	+24.0		23.5
9	18.0	+23.0	5.0	25.5
	18.5	+11.5		24.5
	18.0	+24.5		25.0

表 4.3-4 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.5) (模內水化 24 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	8.5	+12.0	5.5	17.0
	8.0	+12.0		16.5
	8.0	+12.0		16.0
6	9.5	+14.0	6	18.5
	10.0	+15.5		16.5

	10.0	+13.5		19.0
9	10.5	+16.5	4.5	19.5
	10.5	+17.0		21.0
	11.0	+16.0		20.0

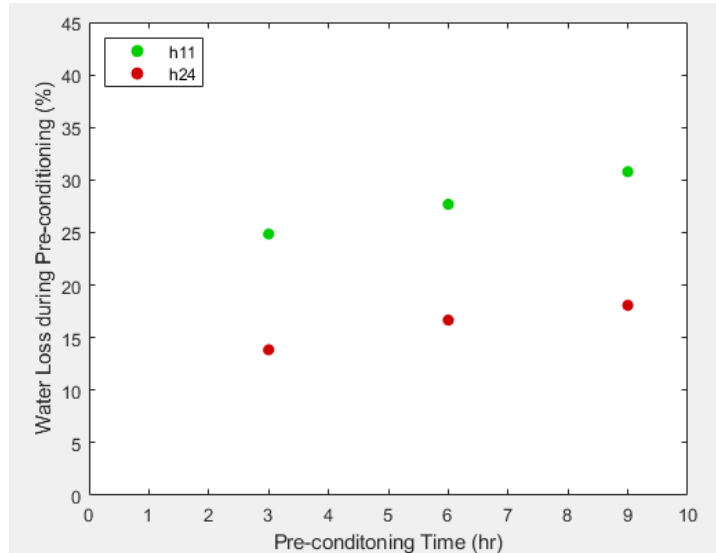


圖 4.3-8 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.5)

圖 4.3-9 為由表 4.3-3、表 4.3-4 中預處理水分損失量及二氧化碳吸收量而來，所得之結論如下：

- (1) 與水灰比 0.5 之水泥砂漿(圖 4.1-13)比較，兩者在預處理水分損失量及二氧化碳吸收量線性回歸，其相關係數平方都能達 0.9 以上，呈現高度正相關，此結論與文獻相符。

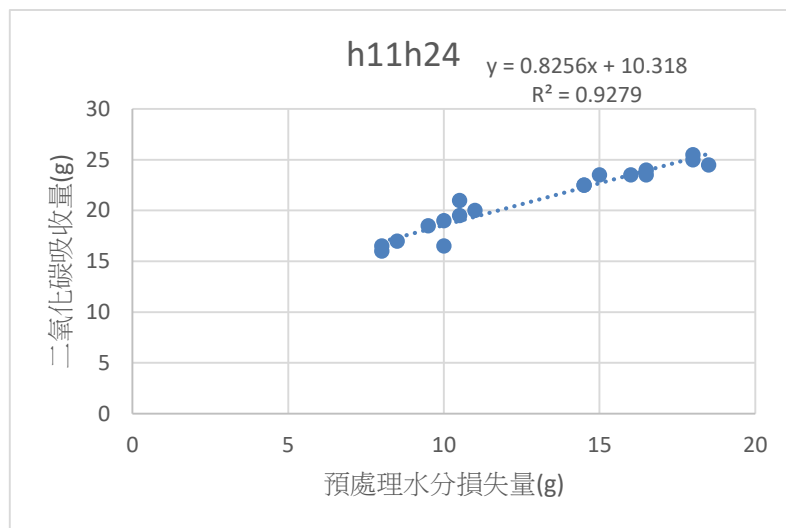


圖 4.3-9 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖(水灰比 0.5)

圖 4.3-10、圖 4.3-11 為由式 3.7-2、式 3.7-3 計算水灰比 0.5-模內水化時間-預處理時間之碳化度，與水分損失百分比關係圖，可得結論如下：

- (1) 由兩圖分析可知，模內水化 11 小時，其碳化度約 42-47%；模內水化 24 小時，其碳化度約 31-39%間。由兩圖可以看出，與先前結論相符，碳化度受模內水化時間影響較多，而預處理時間的影響有限。
- (2) 在模內水化時間 24 小時，相較水灰比 0.5 的水泥砂漿(圖 4.1-16)，其碳化度增加許多，此結果亦符合推測之結果，因加入粗骨材使得預處理過程後，剩餘之孔隙較多較大，可以使更多的二氧化碳進入試體反應，故碳化度較高。

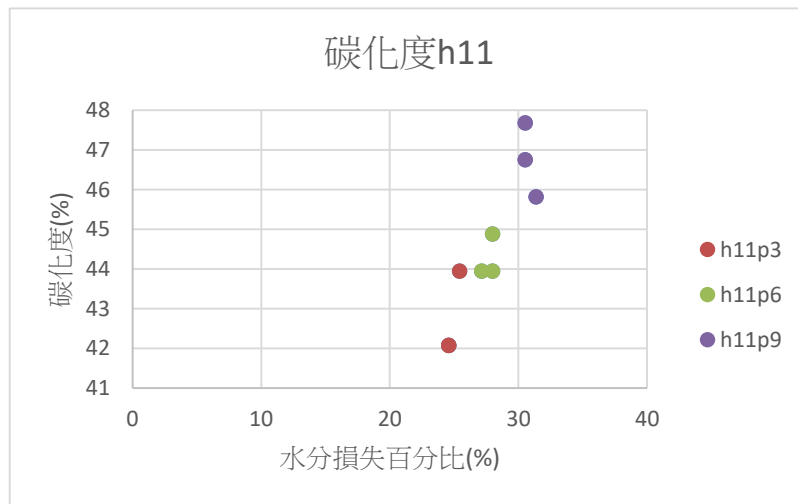


圖 4.3-10 碳化度(水灰比 0.5) (模內水化時間 11 小時)

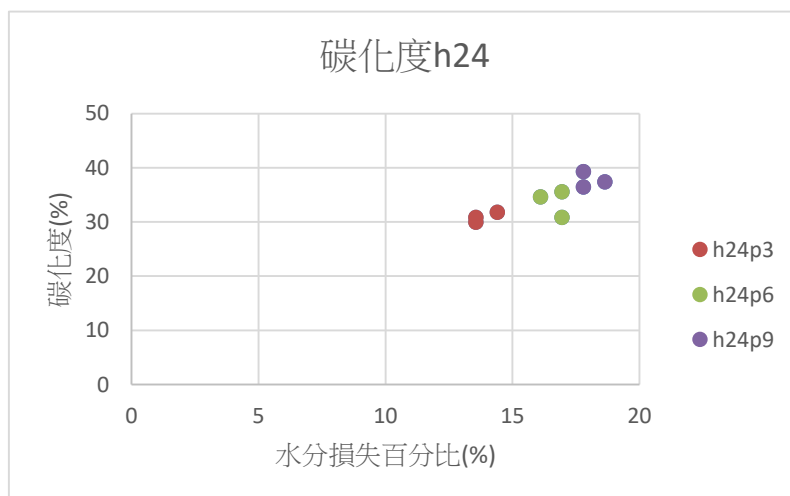


圖 4.3-11 碳化度(水灰比 0.5) (模內水化時間 24 小時)

圖 4.3-12 圖 4.3-13 為混凝土水灰比 0.5 模內水化時間 11、24 小時，在預處理時間 3、6、9 小時後，經過碳化養護 24 小時，後養護 28 天後的抗壓強度比較圖，W:代表指定之模內水化時間後進行水養護達 28 天齡期的控制組；C:代表經過指定模內水化及預處理時間進行碳化養護後放入水養護達 28 天齡期的實驗組。圖 4.3-14 為抗壓強度增加量，混凝土水灰比 0.5 在相同的模內水化及預處理時間，利用實驗組抗壓強度除以控制組抗壓強度，更方便觀察碳化養護組及水養護組間的強度關係，由這些結果可得以下結論:

- (1) 模內水化 11 小時及模內水化 24 小時，兩者在預處理 3、6、9 小時，碳化養護組皆高於控制組，此結果相較水灰比 0.5 的水泥砂漿(圖 4.1-18、圖 4.1-19)，強度的穩定性高出許多。且兩者碳化度也高於水泥砂漿，故可以得出結論，在加入粗骨材的混凝土，經過碳化養護，其強度仍可以有相較水泥砂漿更高的穩定性。

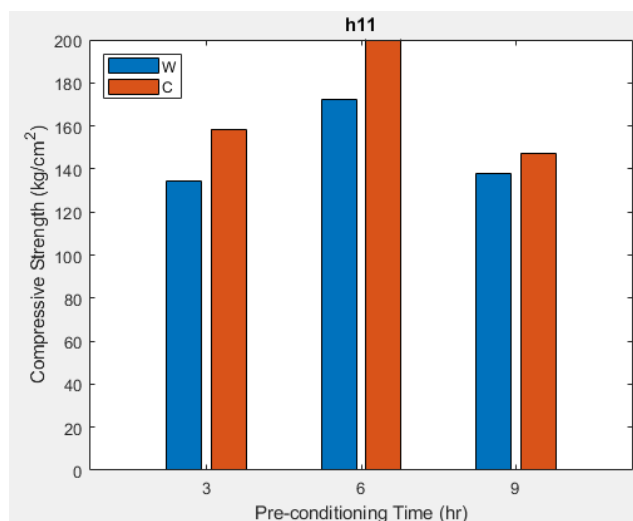


圖 4.3-12 抗壓強度(水灰比 0.5) (模內水化時間 11 小時)

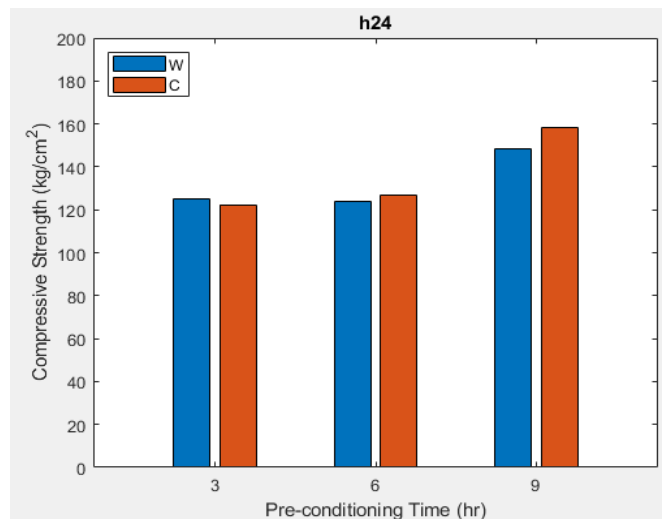


圖 4.3-13 抗壓強度(水灰比 0.5) (模內水化時間 24 小時)

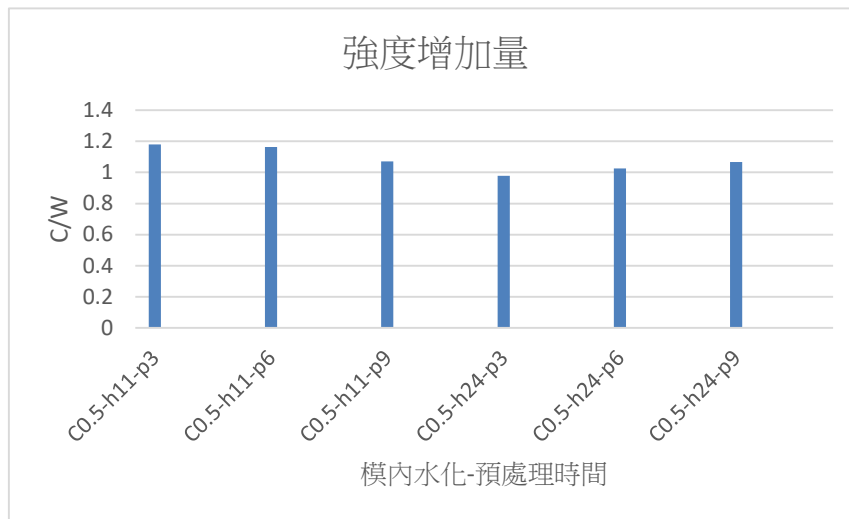


圖 4.3-14 抗壓強度增加量(水灰比 0.5) (實驗組/控制組)

4.3.3 水灰比 0.6

表 4.3-5、表 4.3-6 分別為初期水化齡期 11、24 小時搭配預處理 3、6、9 小時的預處理水分損失量及二氧化碳吸收量，由此兩表及圖 4.3-15 可得以下結論：

- (1) 先由預處理水分損失量分析，與先前之結論一樣，在相同的模內水化時間預處理時間越長水分損失量越多，但不明顯。模內水化時間較短，預處理水分損失量越多，且也較明顯。
- (2) 再由二氧化碳吸收量分析，可以得知如同上述，因在相同的模內水化時間，預處理時間越長預處理水分損失量增加不多，因此二氧化碳吸收量

在預處理時間越長，其增加量亦不明顯。而二氧化碳吸收量，如同先前之結論，模內水化時間 11 小時其吸收量大於模內水化時間 24 小時。

表 4.3-5 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.6) (模內水化 11 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	15.5	+18.5	9.5	21.67
	16.0	+20.0		23.17
	15.5	+19.5		22.67
6	17.0	+20.5	7.5	23.0
	18.0	+21.0		23.5
	17.0	+20.0		22.5
9	21.0	+22.0	4.5	23.5
	21.0	+22.5		24.0
	20.0	+21.0		22.5

表 4.3-6 預處理水分損失量與以重量差異法計算二氧化碳吸收量之實驗數據
(水灰比 0.6) (模內水化 24 小時)

預處理時間 (hr)	預處理水分損失量(g)	碳化養護試體 重量變化(g)	碳化養護水分 損失量(g)	試體二氧化碳 吸收量(g)
3	10.5	+16.0	9.5	19.17
	10.5	+16.0		19.17
	10.5	+16.0		19.17
6	12.0	+15.5	7.5	18.0
	12.5	+16.5		19.0
	12.5	+16.5		19.0
9	14.5	+17.5	6.0	19.5
	15.5	+19.0		21.0
	15.0	+19.0		21.0

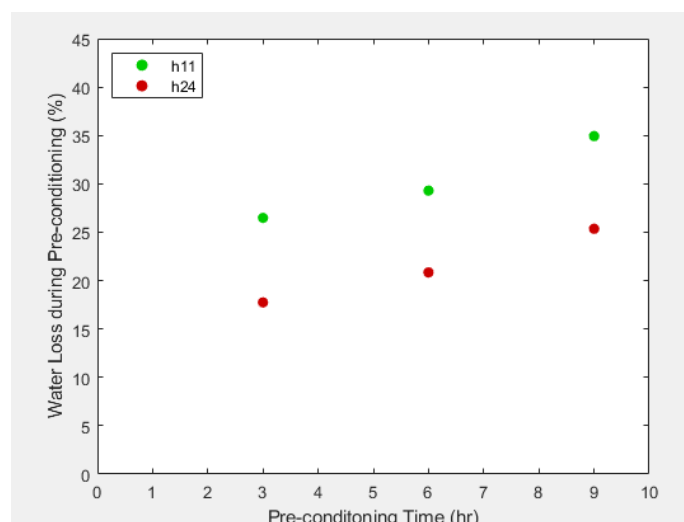


圖 4.3-15 預處理時間 vs 水分損失百分比(水灰比 0.6)

圖 4.3-16 為表 4.3-5、表 4.3-6 中預處理水分損失量及二氧化碳吸收量而來，所得之結論如下：

- (1) 與圖 4.1-23 比較，一樣在水灰比 0.6，加入粗骨材的預處理水分損失量與二氧化碳吸收量之線性回歸，相關係數約 0.8，高於水泥砂漿之結果，推測其原因為加入粗骨材在預處理過程水分損失已將試體大部分水分蒸散，而水泥砂漿因內部較緻密孔隙較小，在相同預處理時間下，試體內可能剩餘較多水分未蒸散，導致其在碳化鋼桶內進行碳化養護時，還有很多的水分損失，進而導致正相關性較低。

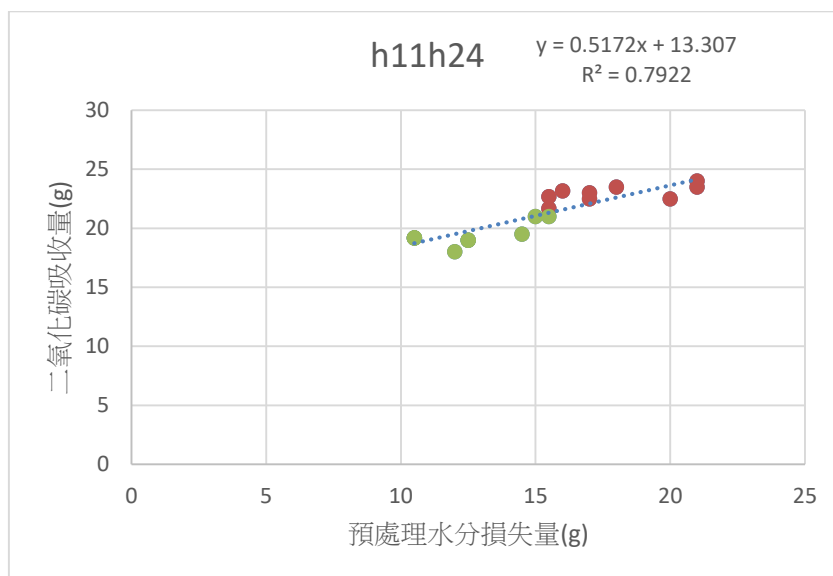


圖 4.3-16 試體預處理水分損失量與二氧化碳吸收量關係圖(水灰比 0.6)

圖 4.3-17 圖 4.3-18 為由式 3.7-2、式 3.7-3 計算水灰比 0.5-模內水化時間-預處理時間之碳化度，與水分損失百分比關係圖，可得結論如下：

- (1) 由兩圖分析可知，模內水化 11 小時，其碳化度約 49-53%；模內水化 24 小時，其碳化度約 42.5-47%間。由兩圖可以看出，在相同的模內水化時間，預處理時間越長雖有碳化度越高的趨勢，但不明顯。
- (2) 比較水泥砂漿圖 4.1-25、圖 4.1-26 碳化度，在相同模內水化時間，可以發現加入粗骨材的混凝土，其碳化度高於水泥砂漿的，其原因也與其預處理後所留下的孔隙有關，亦符合推測之相同水灰比，因混凝土預處理殘留孔隙越大，使其可有更多的二氧化碳進入孔隙形成碳酸鈣填滿。
- (3) 在模內水化時間 24 小時，比較水泥砂漿及混凝土，加入粗骨材之混凝土其碳化度可達 42.5-47%，高於一樣式水灰比 0.6 水泥砂漿很多，因此加入粗骨材增加孔隙，使碳化度提高是可行的。

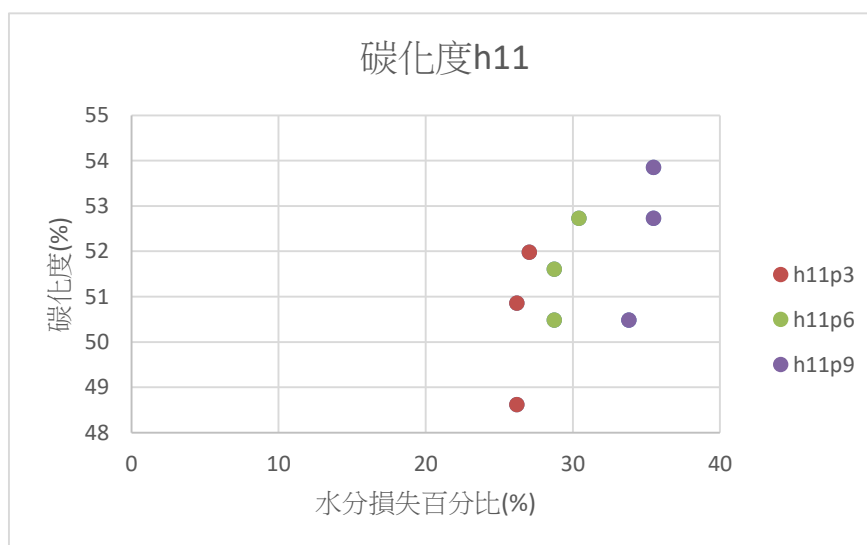


圖 4.3-17 碳化度(水灰比 0.6) (模內水化時間 11 小時)

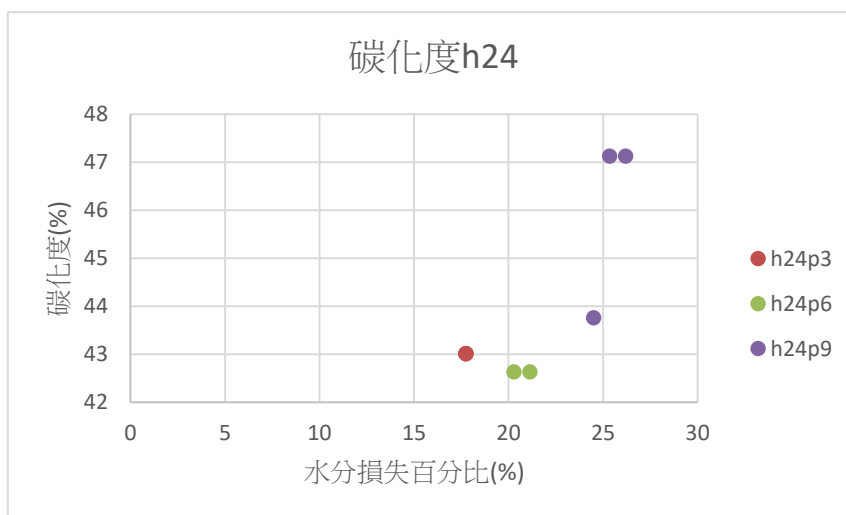


圖 4.3-18 碳化度(水灰比 0.6) (模內水化時間 24 小時)

圖 4.3-19、圖 4.3-20 為混凝土水灰比 0.6 模內水化時間 11、24 小時，在預處理時間 3、6、9 小時後，經過碳化養護 24 小時，後養護 28 天後的抗壓強度比較圖，W:代表指定之模內水化時間後進行水養護達 28 天齡期的控制組；C:代表經過指定模內水化及預處理時間進行碳化養護後放入水養護達 28 天齡期的實驗組。圖 4.3-21 為抗壓強度增加量，混凝土水灰比 0.6 在相同的模內水化及預處理時間，利用實驗組抗壓強度除以控制組抗壓強度，更方便觀察碳化養護組及水養護組間的強度關係，由這些結果可得以下結論:

- (1) 在模內水化時間 11 小時，碳化養護組抗壓強度低於控制組，其結果與水泥砂漿(圖 4.1-28)結果相符，然而其抗壓強度式略低於控制組，不如水泥砂漿的抗壓強度差異這麼多；在模內水化時間 24 小時，碳化養護組的抗壓強度可以持平甚至高於控制組。由上述的結果可知，加入粗骨材的混凝土，可以提高強度的穩定性，故在實務方面更有可行性。

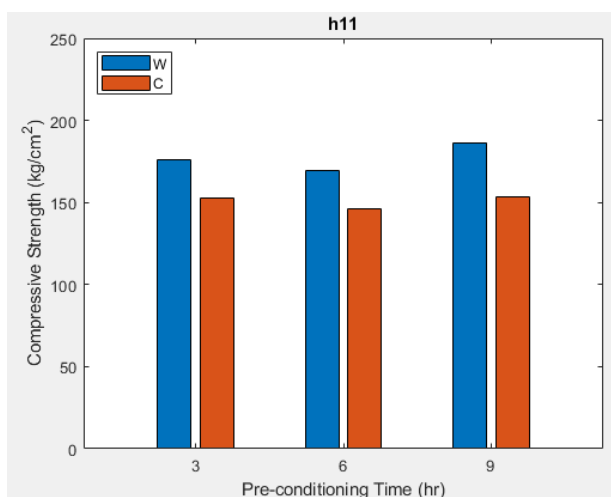


圖 4.3-19 抗壓強度(水灰比 0.6) (模內水化時間 11 小時)

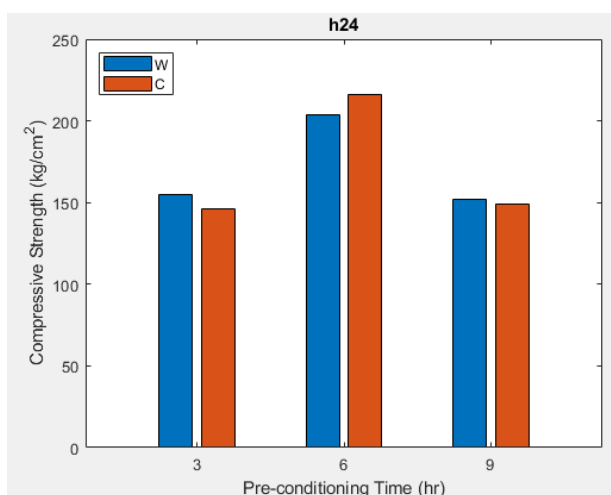


圖 4.3-20 抗壓強度(水灰比 0.6) (模內水化時間 24 小時)

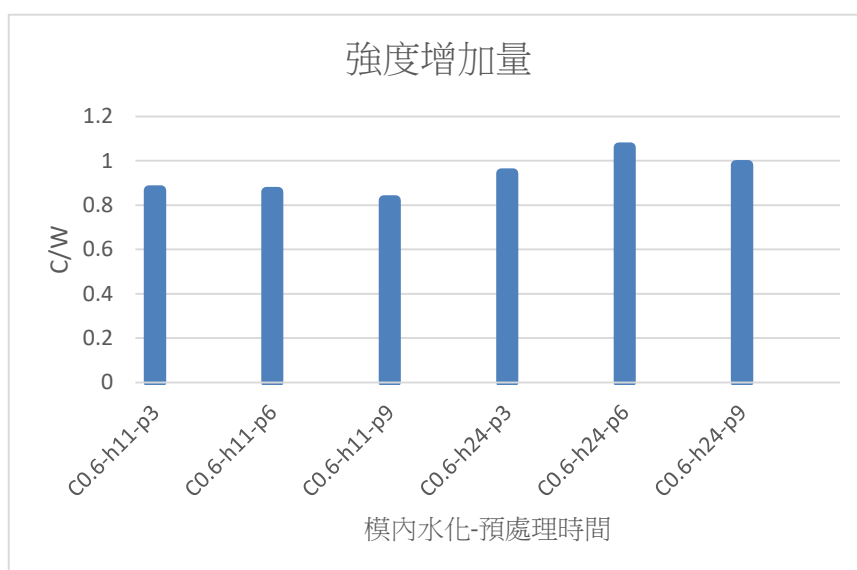


圖 4.3-21 抗壓強度增加量(水灰比 0.6) (實驗組/控制組)

第五章、結論與建議



5.1 結論

本研究欲探討水灰比、模內水化時間、預處理時間，三個碳化養護參數，對於水泥砂漿及混凝土的影響，根據試驗的結果分析與討論，與文獻相互比較可以得到以下結論：

- (1) 在水泥砂漿及混凝土的碳化養護試驗中，兩者皆有相同的結論，在三種水灰比 0.4、0.5、0.6，皆有模內水化時間越短，二氧化碳吸收量越高，碳化度越高之結果。而若在相同模內水化時間，不同的預處理時間，雖如文獻[8][53][54]結果，預處理時間越長，二氧化碳吸收量越高，但其增幅不如模內水化時間影響明顯，因此根據文獻[8][53][54]及本試驗之結果，可以在之後碳化養護試驗固定預處理時間 6 小時，因預處理 6 小時已可將試體大部分水分蒸散，使二氧化碳進入試體反應。
- (2) 在文獻[15]中得知水灰比越高二氧化碳吸收量越高，因此本研究欲探討模內水化時間、預處理時間搭配對於碳化養護試驗的影響，故加入水灰比為研究之碳化養護參數，因此得到以下結論，在相同的模內水化時間-預處理時間搭配下，水泥砂漿及混凝土經過碳化養護試驗，皆表現出水灰比越高，碳化度越高之結果，此結果與文獻相符。
- (3) 本研究探討的三個參數對於 28 天抗壓強度的結果，發現水泥砂漿在模內水化 5 小時，碳化養護組的抗壓強度都較水養護控制組差，在水灰比越高的試體更明顯。推測以上原因為模內水化較短，其前期的 CSH 膠體發展不足，且較短的模內水化時間進入預處理，可以蒸散更多的試體內的水分使更多二氧化碳進入試體反應，可能造成式 2.1-4 中的反應較明顯，因此探討試體內部二氧化碳反應情形，進行碳化深度試驗，由碳化深度試驗之結果可以看到，模內水化時間 5 小時，不論水灰比 0.4、0.5、0.6，其在碳化深度幾乎是遍布整個試體可以達到試體中心，由此

結果可得結論，模內水化時間越短，雖然二氧化碳吸收量越多碳化度越高，但碳化深度越深，會影響 CSH 膠體發展，從而導致抗壓強度表現較差，因此於本研究參數設定認為模內水化 5 小時不可行。

- (4) 水泥砂漿在模內水化時間 11 小時的 28 天抗壓強度表現，只有在水灰比 0.4，其碳化養護組可以與控制組持平，在水灰比 0.5 及 0.6，碳化養護組的抗壓強度與控制組有一定差距，且根據碳化深度試驗之結果，可知在水灰比 0.4 模內水化時間 11 小時的碳化反應得範圍較侷限於外層，而在水灰比 0.5 及 0.6 模內水化時間 11 小時的碳化深度已深入到試體超過一半的範圍，故可得結論，水灰比 0.4 搭配模內水化時間 11 小時是可行的，且二氧化碳吸收量可以較模內水化時間 24 小時多出 1.5-2 倍的吸收量，而水灰比 0.5 及 0.6 在實務上模內水化時間 11 小時則不可行。
- (5) 水泥砂漿在模內水化時間 24 小時的 28 天抗壓強度表現，在水灰比 0.4 及 0.5 可以發現，碳化養護組可以持平甚至高於控制組，而水灰比 0.6，碳化養護組會略低於控制組，又根據碳化深度試驗結果，可知模內水化時間 24 小時，水灰比 0.4 及 0.5 的碳化反應範圍只侷限於試體的外層，而水灰比 0.6，碳化深度相較前兩者略深一點，但相較模內水化時間 11 小時的試體，其碳化深度仍侷限在從外層。故可得結論，在實務上模內水化時間 24 小時是可行的，雖然二氧化碳吸收量較低，但其抗壓強度較不會因碳封存而折減，碳化深度侷限於外層其抗壓強度才有較好的表現。
- (6) 在混凝土碳化養護試驗中，因水泥砂漿試驗的結果得知模內水化時間 5 小時在實務上不可行，所以在混凝土的試驗中將模內水化時間 5 小時此參數刪除。而在混凝土中 28 天抗壓強度趨勢與水泥砂漿相符，但其在模內水化時間 11 小時的碳化養護組的抗壓強度表現較好，在水灰比 0.4 及 0.5 都可以持平甚至高於控制組，而在水灰比 0.6 碳化養護組略低於

控制組，因此如同水泥砂漿之結論，較低的水灰比下模內水化 11 小時是可行的，較高的水灰比較不可行，而不論水灰比高或低，模內水化時間 24 小時皆為最佳選擇，其抗壓強度表現較佳。

- (7) 在混凝土碳化養護試驗中，不論水灰比 0.4、0.5、0.6，在相同的模內水化時間及預處理時間下，碳化度相較水泥砂漿碳化養護試驗組，都有較高的結果，此結論應證試驗設計的推測，加入粗骨材進行碳化養護，會因預處理後試體內的孔隙較大較多，使更多的二氧化碳進入形成碳酸鈣，進而讓試體的碳化度增加，且搭配抗壓強度結果，碳化組的強度部會差於控制組太多，甚至有更好的表現，故加入粗骨材的混凝土，以達到更高的二氧化碳吸收量是可行的。
- (8) 綜合以上結論，在實務方面，若為了有更多的二氧化碳吸收量，選擇更短的模內水化時間，其抗壓強度表現會不理想，由試驗結果，建議水灰比 0.4 可以選擇模內水化時間 11 及 24 小時；水灰比 0.5 及 0.6 建議模內水化時間 24 小時，使試體內部 CSH 膠體在前期可以有足夠的發展，再經過碳化養護流程，使碳化反應侷限於試體的外層，這樣試體方可有較好的抗壓強度，在實務上更有可行性。

5.2 建議

本研究透過一系列試驗探討水灰比、模內水化時間、預處理時間對碳化養護試體帶來的影響，從最一開始的文獻回顧到試驗結束，過程中也有發現一些可以改進、討論和其它研究方向的建議，建議分述如下：

- (1) 在混凝土中添加卜作嵐摻料可以減少水泥的使用量，從而降低混凝土的碳足跡。此外，爐石和飛灰中也含有可進行碳化反應的成分。如果以適當比例的爐石和飛灰取代部分水泥並進行碳化養護，或許能在保持力學性能的同時，減少水泥使用量和碳足跡，並將二氧化碳封存於混凝土中，提升整體效益。因此，可以探討添加卜作嵐摻料後碳化養護對混凝土機理的影響。
- (2) 本研究僅探討齡期為 28 天的抗壓強度，無法確認更長齡期時，碳化養護試體與水養護試體的強度關係。因此建議可以將碳化養護試體放置更長齡期並與水養護試體比對，觀察試體的強度變化。
- (3) 許多文獻比較了不同碳化養護參數對碳化養護效果的影響，而本研究則著重探討試體的水灰比、模內水化時間和預處理時間等碳化養護參數對碳化養護的影響。建議持續擴充各種碳化養護條件下試體二氧化碳吸收量的數據，並整合現有數據，推導出試體二氧化碳吸收量的預測公式。這樣，未來只需將各參數值代入預測公式，即可預測試體在特定碳化養護條件下的二氧化碳吸收量。
- (4) 由於碳化養護能在早齡期為混凝土表層提供一層強化薄殼，建議可以通過探討碳化養護後試體的抗壓強度和楊氏模數的變化，以及試體的碳化度，來分析這層強化薄殼對混凝土力學性能的影響。
- (5) 由於碳化養護能增加早期試體表面結構的緻密性，建議利用這一特性進行混凝土耐久性能的研究。例如，探討碳化養護試體是否更不易受到硫

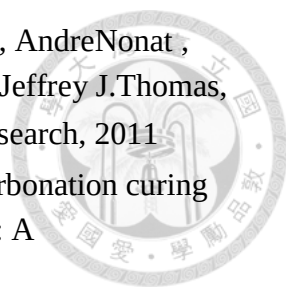
酸鹽侵蝕、在水中的磨耗表現是否更佳，以及碳化養護混凝土的中性化情況。

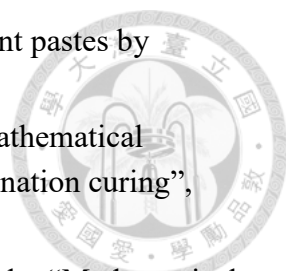
- 
- (6) 本研究於碳化深度試驗中，發現碳化養護不侷限於試體的外層，可以更深入試體，然而無法得知在不同深度下，碳化反應產生之碳酸鈣的量，因此建議可以將試體根據不同深度分段切下後磨粉，進行熱重分析法，探討在試體內部的微觀情形，更有利分析碳酸鈣與 CSH 膠體的貢獻，以及內部的化學反應。
- (7) 在實務應用方面，碳化養護更可能應用於混凝土預鑄工程中。雖然在封閉容器內加壓進行碳化養護可以提高碳化效率，但這種方法的規模容易受到限制。因此，若要將碳化養護應用於實務中，或許採用流動式取代封閉式的碳化養護更為可行。這種方法更容易擴大工程規模，有利於進行更大型建築構件的碳化養護。

第六章、參考文獻



- [1] A.Bentur, "Microstructure Interfacial Effects and Micromechanics of Cementitious Composites" , Advances In Cementitious Material, Ceramic Transaction, Vol.16(1990).
- [2] Bao Jian Zhan, Dong Xing Xuan, Chi Sun Poon, Cai Jun Shi, "Effect of curing parameters on CO₂ curing of concrete blocks containing recycled aggregates", Cement and Concrete Composites, 2016
- [3] Bao Jian Zhan, Chi Sun Poon, Cai Jun Shi, "Materials characteristics affecting CO₂ curing of concrete blocks containing recycled aggregates", Cement and Concrete Composites, 2016
- [4] Bao Jian Zhan, Dong Xing Xuan, Chi Sun Poon, Cai Jun Shi, "Mechanism for rapid hardening of cement pastes under coupled CO₂-water curing regime", Cement and Concrete Composites, 2019
- [5] C. J. Goodbrake, J. F. Young, "Reaction of Beta-Dicalcium Silicate and Tricalcium Silicate with Carbon Dioxide and Water Vapor", Journal of the American Ceramic Society, (1979) 168-171.
- [6] Chaofeng Liang, Bihao Pan, Zhiming Ma, Zhihai He, Zhenhua Duan, "Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review", Cement and Concrete Composites, 2020
- [7] Caijun Shi, Fuqiang He, Yanzhong Wu, "Effect of pre-conditioning on CO₂ curing of lightweight concrete blocks mixtures", Construction and Building Materials, 2012
- [8] Duo Zhang, Zaid Ghoulah, Yixin Shao, "Review on carbonation curing of cement-based materials", Journal of CO₂ Utilization, 2017
- [9] Duo Zhang, S.M.ASCE, Xinhua Cai, and Yixin Shao, "Carbonation Curing of Precast Fly Ash Concrete" , Cement and Concrete Composites, 2016
- [10] DEL VISO, J. R.; CARMONA, J. R.; RUIZ, G. Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete. Cement and Concrete Research, 2008, 38.3: 386-395.
- [11] Hilal El-Hassan , Yixin Shao, "Early carbonation curing of concrete masonry units with Portland limestone cement" , Cement and Concrete Composites, 2015
- [12] Ishida, T. and Maekawa, "Modeling of PH Profile in Pore Water Based on Mass Transport and Chemical Equilibrium Theory", Proc. JSCE 648: 203–215, 2000
- [13] J. J. Beaudoin, T. Sato, "Effect of nano-CaCO₃ on hydration of cement containing supplementary cementitious materials", Advances in Cement Research Volume 23 Issue 1, Canada, 2011

- 
- [14] Jeffrey W.Bullard, Hamlin M.Jennings, Richard A.Livingston, AndreNonat , George W.Scherer , Jeffrey S.Schweitzer, Karen L.Scrivener, Jeffrey J.Thomas, “Mechanisms of cement hydration”, Cement and Concrete Research, 2011
 - [15] LIU, Zhuo; MENG, Weina. Fundamental understanding of carbonation curing and durability of carbonation-cured cement-based composites: A review. Journal of CO2 Utilization, 2021, 44: 101428.
 - [16] Lee Han-Seung, Xiao-Yong Wang, “Evaluation of compressive strength development and carbonation depth of high volume slag-blended concrete”, Hanyang University, Korea, 2016
 - [17] M. F. Bertos, S.J.R. Simons , C.D. Hills , P.J. Carey, “A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO2, Journal of Hazardous Materials”, B112 (2004) 193-205.
 - [18] M. Thiery, P. Dangla, P. Belin, G. Habert, N. Roussel, “Carbonation kinetics of a bed of recycled concrete aggregates: a laboratory study on model materials”, Cem. Concr. Res. 46, 2013
 - [19] M.A. Sorochkin, A.F. Shchurov, I.A. Safonov, “Study of the possibility of using carbon dioxide for accelerating the hardening of products made from Portland cement”, J. Appl. Chem. USSR 48 (1975) 1211–1217
 - [20] Metha,P.,P.J.M.Monterio,”ConcreteStructure,Propertiesand Materials”,Prentice-Hall inc.,Englewood-Cliffs,N.J.,1996.
 - [21] Min Liu, Shuxian Hong, Yanshuai Wang, Jinrui Zhang, Dongshuai Hou, Biqin Dong, “Compositions and microstructures of hardened cement paste with carbonation curing and further water curing”, Construction and Building Materials, 2021
 - [22] O.Buyukozturk,A.H.Nilson and F.O.Slate, “Stress-Strain Response and Fracture of a Concrete Model in Biaxial Loading” , ACI J., Vol.68, (1971).
 - [23] Pingping He, Caijun Shi, Zhenjun Tu, Chi Sun Poon, Jiake Zhang, “Effect of further water curing on compressive strength and microstructure of CO2-cured concrete”, Cement and Concrete Composites, 2016
 - [24] PAN, Xiaoying, et al. Effects of CO2 surface treatment on strength and permeability of one-day-aged cement mortar. Construction and Building Materials, 2017, 154: 1087-1095.
 - [25] PAN, Xiaoying, et al. Properties and microstructure of CO2 surface treated cement mortars with subsequent lime-saturated water curing. Cement and Concrete Composites, 2019, 99: 89-99.
 - [26] Shu-Yuan Pan, E.E. Chang, Pen-Chi Chiang, “CO2 Capture by Accelerated Carbonation of Alkaline Wastes: A Review on Its Principles and Applications”, Taiwan, NTU, Environmental Engineering, 2012

- 
- [27] S.M.Monteagudo, "The degree of assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis", 2014
 - [28] Sormeh Kashef-Haghighi, Yixin Shao, Subhasis Ghoshal, "Mathematical modeling of CO₂ uptake by concrete during accelerated carbonation curing", McGill University, Canada, 2015
 - [29] Sormeh Kashef-Haghighi, Yixin Shao, Subhasis Ghoshal, "Mathematical modeling of CO₂ uptake by concrete during accelerated carbonation curing", Cement and Concrete Research, 2015
 - [30] Tiefeng Chen, Xiaojian Gao, "Effect of carbonation curing regime on strength and microstructure of Portland cement paste", Journal of CO₂ Utilization, 2019
 - [31] Tiefeng Che and Xiaojian Gao, "Use of Carbonation Curing to Improve Mechanical Strength and Durability of Pervious Concrete", Cement and Concrete Composites, 2020
 - [32] Vahid Rostami, Yixin Shao, Andrew J. Boyd, ZhenHe, "Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing", Cement and Concrete Composites, 2012
 - [33] Xin Qian, Jialai Wang, Yi Fang, Liang Wang, "Carbon dioxide as an admixture for better performance of OPC-based concrete", Journal of CO₂ Utilization, 2018
 - [34] XUAN, Dongxing; ZHAN, Baojian; POON, Chi Sun. A maturity approach to estimate compressive strength development of CO₂-cured concrete blocks. Cement and Concrete Composites, 2018, 85: 153-160.
 - [35] Xiangping Xian, Duo Zhong, Han Lin, Yixin Shao, "Ambient pressure carbonation curing of reinforced concrete for CO₂ utilization and corrosion resistance", Cement and Concrete Composites, 2022
 - [36] Y. Shao, H. El-Hassan, "CO₂ Utilization in Concrete", Third international Conference on Sustainable, Construction Material and Technologies, 2010.
 - [37] Y. Shao, M. S. Mirza, X. Wu, CO₂ Sequestration using calcium silicate concrete, Canadian Journal of Civil Engineering, 33 (2006) 776-784.
 - [38] ZABIHI, Niloufar; EREN, Özgür. Compressive strength conversion factors of concrete as affected by specimen shape and size. Research journal of applied sciences, engineering and technology, 2014, 7.20: 4251-4257.
 - [39] Zehua Li, Yin Wang, Hong Yao, Shiyang Lin, "Novel CO₂ sorbent: Ca(OH)₂ with high strength", Fuel Processing Technology, 2015
 - [40] ZHANG, Duo; LI, Victor C.; ELLIS, Brian R. Optimal pre-hydration age for CO₂ sequestration through portland cement carbonation. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6.12: 15976-15981.
 - [41] 史才軍、王吉云、涂貞軍、王德輝, 「二氧化碳養護混凝土技術進展」, 材

料導報A:綜述篇，第31卷，第3期，第134-138頁，2017年。

- [42] 史才軍、何平平、涂貞軍、曹張，「預養護二氧化碳養護混凝土過程及微觀結構的影響」，矽酸鹽學報，第42卷，第8期，第996-1104頁，2014年。
- [43] 史才軍、鄒廣炎、何富強，「二氧化碳養護混凝土的動力學研究」，矽酸鹽學報，第38卷，第7期，第1179-1184頁，2010年。
- [44] 行政院公共工程委員會，「公共工程高爐石混凝土使用手冊」。
- [45] 李明君, 王勇智, 高士軒, 蘇育民, & 黃子源. (2019). 二氧化碳養護對混凝土性質影響之研究. 中國土木水利工程學刊, 31(3), 263-271。
- [46] 李修齊，「高強度混凝土水中磨耗性質之機理探討」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程研究所，1997。
- [47] 周理、呂昌忠、王怡林、姚金花、王瑜，「述評超臨界溫度氣體在多孔固體上的物理吸附」，天津大學化學工程研究所高壓吸附研究室，化學進展，第11卷第3期，1999。
- [48] 林建宏，「爐石混凝土水中磨耗性質研究」，碩士論文，國立台灣大學土木工程研究所，2004。
- [49] 湯為憲，「高強度混凝土水中磨耗性質與早期收縮行為之研究」，碩士論文，國立台灣大學土木工程研究所，1997。
- [50] 趙文成，「高等混凝土」，講義，交通大學，1997，新竹。
- [51] 馬迪祥，「新拌混凝土碳封存技術之初步研究」，碩士論文，台灣大學，2020。
- [52] 趙伯融，「新拌混凝土碳封存及碳化養護之研究」，碩士論文，台灣大學，2021。
- [53] 吳承禹，「增進混凝土碳封存之研究」，碩士論文，台灣大學，2022。
- [54] 陳彥輔，「混凝土碳封存尺寸效應之研究」，碩士論文，台灣大學，2023。
- [55] 龔龍山，「高強度波索蘭混凝土之基本工程性質研究」，碩士論文，國立交通大學土木工程研究所，1991。