

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis



由微生物誘導碳酸鈣沉澱改良砂土之動態性質研究

Dynamic Properties of Sand Improvement via

Microbially Induced Calcite Precipitation

張詒茹

Yi-Ru Chang

指導教授：葛宇甯 博士

Advisor : Louis Ge, Ph. D.

中華民國 114 年 6 月

June 2025

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

由微生物誘導碳酸鈣沉澱改良砂土之動態性質研究

Dynamic Properties of Sand Improvement via Microbially Induced Calcite Precipitation

本論文係 張詒茹 (R12521120) 在國立臺灣大學土木工程學系大地工程組
完成之碩士學位論文，於民國114年6月20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 Geotechnical Engineering on 20 June ,2025 have examined a Master's Thesis entitled above presented by Yi-Ru Chang (R12521120) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

葛宇甯 _____ 葛宇甯 _____
(指導教授 Advisor)
卓雨璇 _____ 卓雨璇 _____
黃郁惟 _____ 黃郁惟 _____

系主管 Director : 葛宇甯

葛宇甯

誌謝



在本論文完成的過程中，我深深感受到眾多師長、學長姐、同儕與好友的支持與陪伴，謹在此致上誠摯的感謝。

首先，衷心感謝指導老師葛宇甯老師，不僅在研究上給予我明確的方向與許多資源，也讓葛門這個大家庭充滿溫暖與凝聚力，許多聚餐時光至今仍讓人難忘。感謝卓雨璇博士在研究與實驗過程中的耐心指導，無論是實驗設計、操作細節，或資料分析上的討論，都給予我極大的幫助，也協助我完成菌液的準備與酸洗試驗，使研究能順利推進。

誠摯感謝海洋所黃致展老師及其實驗室的助理與同學們，協助我進行 CT 掃描試驗；感謝貴儀中心紀小姐在 SEM 掃描上的支援，讓本研究的微觀分析得以順利進行。

感謝實驗室的周先生，在共振柱故障的那段時間，每天與我一同嘗試找出問題、設法修復，讓我得以順利完成實驗，也謝謝郭先生的協助與支援。感謝惠文姊幫忙處理報帳，讓我在繁忙實驗之餘能安心專注於研究工作。謝謝楊老闆製作各種零件與修理共振柱，讓實驗得以順利進行。感謝學姊們（品秀、鄭瀅、思涵、Ula）在我實驗遇到瓶頸時，總是給我「有人幫就不慌」的安心感，也感謝葛門的學長姐們（品秀、佳榮、世凡、沂倩）一路上的照顧與建議，讓我在面對難題時總能找到方向。也謝謝葛門學弟妹們在實驗室的陪伴與協助，一起努力的日子充滿笑聲與活力。

同儕方面，特別感謝琮淯在我準備菌液與焦慮之際，總是第一個伸出援手，彷彿實驗室裡的萬事通小老師。感謝李曷兩年來的陪伴，不論遇到什麼事情，總是我第一個想到的人。也感謝葛門的夥伴們——志穎、靜穎、均侑、筱丰——一起奮戰的日子讓研究生生活增添了许多笑聲與力量。修儀器的那個月，謝謝大元陪我在台北四處奔走尋找零件；志穎在實驗過程中總是幫忙鎖螺絲，還有辛奕呈幫我秤了無數瓶瓶罐罐；212 的大家總是熱情辦活動、共享歡樂時光，幾次喝到天亮的徹夜長談仍記憶猶新。

謝謝林宥宏在颱風天還來陪我製作試體，謝謝于耀綜在暑假頻繁來找我，順便變成我的實驗小幫手，還有璽安替我奔波拿零件，給了我很大的實質幫助。最後，感謝蘇文安在我報告前焦慮時總是願意聽我反覆練習，並慷慨提供我 GPT 兩年的白嫖機會（真的很實用）。這段旅程因為有你們每一位，才如此豐富而難忘。



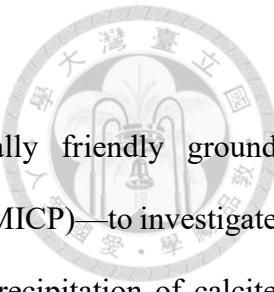
摘要



本研究旨在應用一種有效且環境友善的地盤改良技術——微生物誘導碳酸鈣沉澱法，於砂土改良上，瞭解其動態性質之變化。微生物誘導碳酸鈣沉澱法透過一系列生化反應促使方解石沉積於土壤孔隙中，藉此降低孔隙率與水力傳導性，顯著提升土壤強度。本研究以不同改良澆灌次數及不同養護齡期為主題，探討其對碳酸鈣沉澱行為與砂土動態力學性質之影響。實驗中改良液濃度固定為 $OD_{600} = 1.0$ ，養液採用 0.5 M 氯化鈣與 0.5 M 尿素等莫耳混合溶液。試體製備採單向注入方式，分別進行 1、2、3 與 5 次改良，其中改良 1 次與 2 次組設有 7、14 與 21 天養護條件，改良 3 次與 5 次者則固定養護 7 天。為評估微生物誘導碳酸鈣沉澱法改良效果，本研究亦以酸洗試驗、電腦斷層掃描與掃描式電子顯微鏡分析碳酸鈣沉澱量與分佈，並以共振柱試驗量測剪力模數與阻尼比等動態參數。試驗結果顯示，碳酸鈣沉澱量隨改良次數增加而顯著提升，顯示膠結反應可隨灌漿次數累積而增強。剪力模數亦隨養護齡期與改良次數提升而增加，反映碳酸鈣生成與結晶成長對土壤之勁度具有強化效果。阻尼比則於中高剪應變區顯現顯著提升，顯示膠結結構於變形過程中具有良好能量耗散能力。本研究確認了微生物誘導碳酸鈣沉澱技術在不同養護時間及多次改良條件下，能有效增強土壤動態力學性質，為地震易液化區域提供一種環境友善且永續的地盤改良解決方案。

關鍵字：微生物誘導碳酸鈣沉澱、液化、共振柱試驗、剪力模數、阻尼比

Abstract



This study aims to apply an effective and environmentally friendly ground improvement technique—Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP)—to investigate the dynamic behavior of treated sandy soils. MICP promotes the precipitation of calcite within soil pores through a series of biochemical reactions, thereby reducing porosity and hydraulic conductivity, and significantly enhancing soil strength.

The experimental program focuses on evaluating the effects of varying grouting frequencies and curing periods on calcium carbonate precipitation and the dynamic mechanical properties of sand. The treatment solution was prepared at a fixed bacterial concentration ($OD_{600} = 1.0$), using an equimolar mixture of 0.5 M calcium chloride and 0.5 M urea. Specimens were prepared via unidirectional injection and subjected to one, two, three, or five treatment cycles. For one-time and two-time treatments, curing durations of 7, 14, and 21 days were adopted, whereas three-time and five-time treatments were cured for 7 days.

To evaluate the effectiveness of microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP), this study employed acid-washing tests, computed tomography (CT) scanning, and scanning electron microscopy (SEM) to analyze the amount and distribution of calcium carbonate. In addition, resonant column tests were conducted to measure dynamic properties such as shear modulus and damping ratio.

The results show that calcium carbonate content increased significantly with the number of treatment cycles, indicating that the cementation reaction is accumulative. The shear modulus also increased with curing duration and treatment frequency, reflecting the strengthening effects of calcite formation and crystal growth. Moreover, notable

enhancements in damping ratio were observed under medium to high shear strains, suggesting that the cemented structure effectively dissipates energy during deformation.

This study confirms that MICP can effectively enhance the dynamic properties of sandy soils under varying curing times and multiple treatment cycles. It demonstrates the potential of this sustainable and eco-friendly technique as a viable ground improvement solution for liquefaction-prone regions.

Keywords: Microbially Induced Calcite Precipitation, Liquefaction, Resonant Column Test, Shear Modulus, Damping Ratio.

目次



口試委員審定書	I
誌謝	II
摘要	IV
Abstract	V
目次	VII
圖次	X
表次	XV
第 1 章 緒論	1
1.1 研究動機與目的	1
1.2 研究方法	2
1.3 研究架構	3
第 2 章 文獻回顧	5
2.1 微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 的原理與應用	5
2.1.1 微生物誘導碳酸鈣沉澱基本原理	5
2.1.2 MICP 在土壤改良中的應用範疇	6
2.2 共振柱試驗原理	14
2.3 MICP 改良對砂土剪力模數與阻尼比影響	16
2.4 MICP 改良參數對效能影響之研究	19
2.4.1 灌漿次數	19
2.4.2 養護齡期	21
2.4.3 灌漿均勻性與沉澱分佈關係	25
第 3 章 試驗內容	31
3.1 試驗材料	31



3.1.1 砂土	31
3.1.2 菌株	32
3.1.3 培養基	34
3.2 改良液配製與培養	35
3.2.1 試驗材料與器材	35
3.2.2 凍菌	37
3.2.3 液態培養基配製	38
3.2.4 MICP 改良液之配製流程	40
3.3 MICP 改良試體製備	42
3.3.1 電腦斷層掃描試體製備	42
3.3.2 共振柱試體製備	44
3.4 碳酸鈣含量檢測	50
3.4.1 酸洗試驗	50
3.4.2 電腦斷層掃描	52
3.4.3 掃描式電子顯微鏡 (SEM)	56
3.5 共振柱試驗	57
3.5.1 設備介紹	57
3.5.2 試驗步驟	59
第 4 章 結果與討論	79
4.1 改良試體均勻性	80
4.1.1 酸洗試驗結果	80
4.1.2 電腦斷層掃描結果	84
4.1.3 掃描式電子顯微鏡結果	93
4.2 共振柱試驗結果	99
4.2.1 養護齡期比較	99



4.2.2 改良次數比較	107
4.3 討論	118
4.3.1 酸洗結果與電腦斷層掃描結果之交叉比對	118
4.3.2 掃描式電子顯微鏡觀察與元素分析之整合探討	120
4.3.3 剪力模數與阻尼比之整體變化趨勢	121
4.3.4 非線性行為與能量耗散機制推論	122
第 5 章 結論與建議	125
5.1 結論	125
5.2 建議	127
參考文獻	128

圖次

圖 2-1 細胞膜表面形成碳酸鈣沉澱過程 (DeJong, 2006)	6
圖 2-2 碳酸鈣結合土壤顆粒示意圖 (Rahman et al., 2020)	6
圖 2-3 MICP 改良與未改良試體之應力-應變行為與孔壓變化比較 (Lim et al., 2025).9	
圖 2-4 不同膠結液濃度下 MICP 改良風積砂之 CaCO_3 含量與 UCS 變化 (Duo et al., 2018).....	9
圖 2-5 不同改良方式對鹽漬土孔隙比與壓力關係之影響 (Zhang et al., 2024)	10
圖 2-6 不同 FA1 摻配比例下 MICP 改良砂土之偏應力一軸向應變曲線 (J. Zhang et al., 2020).....	11
圖 2-7 MICP 改良金礦尾礦後之剪應力一剪應變行為 (Behzadipour & Sadrekarimi, 2023).....	12
圖 2-8 金礦尾礦經 MICP 改良後之 SEM 影像 (Behzadipour & Sadrekarimi, 2023)...	12
圖 2-9 MICP 改良前後剪力模數 G 於側向壓力 100 kPa 條件下之變化 (Torfehnezhad et al., 2025).....	17
圖 2-10 MICP 改良前後阻尼比 D 於側向壓力 100 kPa 條件下之變化 (Torfehnezhad et al., 2025).....	17
圖 2-11 不同改良條件下正規化剪力模數關係圖 (Zhang et al., 2022)	18
圖 2-12 不同灌漿次數下 CaCO_3 生成效率變化 (Wang et al., 2022)	20
圖 2-13 微流體通道內不同灌漿次數下之 CaCO_3 沉澱影像 (Wang et al., 2022).....	20
圖 2-14 不同灌漿次數試體之 CSR 與液化震動次數關係圖 (Han et al., 2016)	21
圖 2-15 不同養護齡期對未固結抗壓強度 (UCS) 之影響 (Prongmanee et al., 2023).23	
圖 2-16 不同養護齡期試體之 CaCO_3 沉澱型態 SEM 影像 (Prongmanee et al., 2023)	
.....	24

圖 2-17 不同注漿方式與流速下 CaCO_3 含量沿試體高度的分佈變化 (Tian et al., 2023)	26
圖 2-18 不同灌漿方式與流速下試體內殘留 Ca^{2+} 濃度沿高度分佈變化 (Tian et al., 2023).....	27
圖 2-19 各膠結劑濃度下之碳酸鈣沉澱均勻性變化 (Li & Chen, 2022)	27
圖 2-20 MICP 改良後砂樣之三維孔隙結構與多方向切面影像 (CT 掃描結果) (Li & Chen, 2022)	28
圖 2-21 不同粒徑級配與相對密度條件下 MICP 改良次數對滲透係數變化量 (Δk) 之影響 (Li & Chen, 2022)	29
圖 3-1 石英砂	31
圖 3-2 材料粒徑分布曲線	32
圖 3-3 尿素	34
圖 3-4 氯化鈣	41
圖 3-5 CT 試體容器	43
圖 3-6 壓力系統	46
圖 3-7 鋁合金分裂模	47
圖 3-8 壓克力模	47
圖 3-9 灌漿系統	48
圖 3-10 頂土器	48
圖 3-11 灌漿過程圖	49
圖 3-12 墊塊	49
圖 3-13 頂土過程	50
圖 3-14 酸洗試體準備	51
圖 3-15 抽氣過濾系統	52
圖 3-16 GDS 設計之固定底端-自由頂端共振柱.....	63

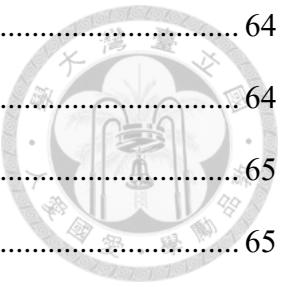


圖 3-17 GDS RCA 控制盒系統.....	64
圖 3-18 氣壓控制系統.....	64
圖 3-19 壓力體積控制系統.....	65
圖 3-20 加速度放大計	65
圖 3-21 三軸室	66
圖 3-22 電磁驅動系統.....	66
圖 3-23 加速度計	67
圖 3-24 LVDT.....	67
圖 3-25 內環壓力室	68
圖 3-26 六角支撐柱.....	68
圖 3-27 壓力計	69
圖 3-28 製作除氣水.....	69
圖 3-29 底座	70
圖 3-30 O-ring	70
圖 3-31 超音波清洗機.....	71
圖 3-32 夾土鉗.....	71
圖 3-33 試體轉移	72
圖 3-34 安裝試體	72
圖 3-35 試體自立	73
圖 3-36 電磁驅動器調整後樣貌	73
圖 3-37 儀器架設	74
圖 3-38 設置試體基本參數及反水壓加壓	75
圖 3-39 壓密設置	76
圖 3-40 掃描過程圖	77
圖 3-41 粗掃曲線	77



圖 3-42 細掃曲線	78
圖 3-43 阻尼比測試	78
圖 4-1 改良一次共振前試體於不同高度位置之碳酸鈣含量分佈	81
圖 4-2 改良兩次共振前試體於不同高度位置之碳酸鈣含量分佈	82
圖 4-3 改良三次共振前試體於不同高度位置之碳酸鈣含量分佈	82
圖 4-4 改良五次共振前試體於不同高度位置之碳酸鈣含量分佈	83
圖 4-5 各改良次數下試體碳酸鈣含量整體平均值比較	83
圖 4-6 改良一次試體 MICP1_S01 之 CT 影像	87
圖 4-7 改良兩次試體 MICP2_S01 之 CT 影像	88
圖 4-8 改良三次試體 MICP3_S01 之 CT 影像	89
圖 4-9 改良五次試體 MICP5_S02 之 CT 影像	90
圖 4-10 不同改良次數下試體碳酸鈣分布之 CT 影像結果 (a) 改良 1 次、(b) 改良 2 次、(c) 改良 3 次、(d) 改良 5 次	91
圖 4-11 不同改良次數下試體碳酸鈣含量變化趨勢圖	92
圖 4-12 純砂試體之掃描式電子顯微鏡影像	94
圖 4-13 改良一次試體之掃描式電子顯微鏡影像	94
圖 4-14 改良二次試體之掃描式電子顯微鏡影像	95
圖 4-15 改良三次試體之掃描式電子顯微鏡影像	95
圖 4-16 改良五次試體之掃描式電子顯微鏡影像	96
圖 4-17 改良一次下各齡期最大剪力模數	102
圖 4-18 改良二次下各齡期最大剪力模數	103
圖 4-19 不同齡期改良一次試體之剪力模數變化曲線	103
圖 4-20 不同齡期改良二次試體之剪力模數變化曲線	104
圖 4-21 正規化後不同齡期改良一次試體之剪力模數變化曲線	104
圖 4-22 正規化後不同齡期改良二次試體之剪力模數變化曲線	105

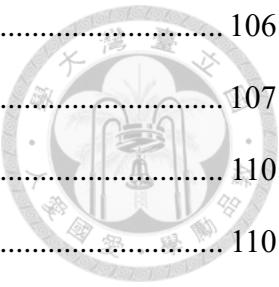


圖 4-23 不同齡期改良一次試體之阻尼比變化曲線	106
圖 4-24 不同齡期改良二次試體之阻尼比變化曲線	107
圖 4-25 齡期七天時不同改良次數之最大剪力模數	110
圖 4-26 齡期十四天時不同改良次數之最大剪力模數	110
圖 4-27 齡期二十一天時不同改良次數之最大剪力模數	111
圖 4-28 不同改良次數試體於齡期七天下之剪力模數變化曲線	111
圖 4-29 不同改良次數試體於齡期十四天下之剪力模數變化曲線	112
圖 4-30 不同改良次數試體於齡期二十一天下之剪力模數變化曲線	112
圖 4-31 正規化後不同改良次數試體於齡期七天下之剪力模數變化曲線	113
圖 4-32 正規化後不同改良次數試體於齡期十四天下之剪力模數變化曲線	113
圖 4-33 正規化後不同改良次數試體於齡期二十一天下之剪力模數變化曲線	114
圖 4-34 不同改良次數試體於齡期七天下之阻尼比變化曲線	116
圖 4-35 不同改良次數試體於齡期十四天下之阻尼比變化曲線	116
圖 4-36 不同改良次數試體於齡期二十一天下之阻尼比變化曲線	117
圖 4-37 不同改良次數試體之酸洗試驗與電腦斷層掃描碳酸鈣含量比較	119

表次



表 2-1 MICP 應用於不同土壤類型之比較	13
表 3-1 砂土基本物理性試驗結果	32
表 3-2 CT 掃描參數設定	55
表 3-3 SEM 操作參數設定	56
表 4-1 試體代號說明	79
表 4-2 酸洗試體代號組成與含義說明	81
表 4-3 各改良次數試體之砂與碳酸鈣質量及質量鈣化率統計表	86
表 4-4 純砂試體之 EDS 元素分析結果	97
表 4-5 改良一次試體之 EDS 元素分析結果	97
表 4-6 改良二次試體之 EDS 元素分析結果	97
表 4-7 改良三次試體之 EDS 元素分析結果	98
表 4-8 改良五次試體之 EDS 元素分析結果	98
表 4-9 各試體最大剪力模數整理	102

第 1 章 緒論



1.1 研究動機與目的

臺灣位於環太平洋地震帶，地震頻繁且地質條件複雜，砂質和粉質土壤廣泛分布於臺灣西部，使土壤液化成為一項重大工程挑戰。當地震發生時，這些飽和的砂質土壤若發生液化，造成地表沉陷、建築物傾斜或倒塌，對人民的生命財產安全構成嚴重威脅。因此，如何有效防治土壤液化成為工程界亟需解決的課題。

傳統的土壤改良技術雖然能夠增強土壤的強度和勁度，但也存在一些限制。常見的工法如灌漿、混合、夯實和振動各有其局限性。例如，灌漿中使用的水泥或化學材料會在生產和使用過程中造成地下水和空氣污染，對環境帶來負面影響；而夯實和振動工法則可能影響鄰近建築物的穩定性，甚至可能導致結構傾斜倒塌；化學藥劑和水泥的使用可能在製造或應用後造成空氣污染或地下水污染。此外，這些工法依賴重型設備，耗費大量油與電，增加了碳排放。面對大規模土壤改良需求，僅靠這些傳統技術已經不足，亟需引入更具經濟效益且環境友善的替代技術。

隨著全球對淨零碳排放及生態永續議題的重視，生物技術在土壤改良中的創新應用逐漸受到重視，其中微生物誘導碳酸鈣沉澱 (Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP) 技術是備受關注的一種方法。MICP 利用微生物分解尿素，促使碳酸鈣沉積於土壤顆粒之間，形成穩固的膠結體。此技術具有低擾動性及低碳排放的優勢，且在提高土壤穩定性的同時減少環境污染，符合淨零碳排與永續發展的目標，為傳統工法之外的優質替代方案。

本研究旨在評估 MICP 改良對砂土動態性質之影響，並透過實驗探討改良次數與養護齡期兩項變因下之力學行為變化。研究中分別進行 1、2、3 與 5 次改良，其中改良 1 次與 2 次者搭配 7、14 與 21 天養護，改良 3 次與 5

次者固定養護 7 天；同時輔以酸洗試驗 (Acid Digestion Test) 與電腦斷層掃描 (Computed Tomography, CT) 分析碳酸鈣生成情形，並以共振柱試驗量測剪力模數與阻尼比，作為土壤動態行為之評估依據。本研究的重點包括：

1. 分析酸洗與電腦斷層掃描結果，以探討改良次數對碳酸鈣生成量與分佈狀態之影響。
2. 評估不同改良次數 (1、2、3、5 次) 與養護齡期 (7、14、21 天) 對砂土剪力模數與阻尼比之影響趨勢。

1.2 研究方法

本研究旨在探討微生物誘導碳酸鈣沉澱 (Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP) 技術對砂土動態性質之影響，實驗設計以不同改良次數與養護齡期為主要變因，評估改良後土壤的力學行為，並透過共振柱試驗進行動態參數量測，同時搭配酸洗法與電腦斷層掃描分析試體內部的均勻性與碳酸鈣分佈情形。

實驗材料選用比重為 2.66 的澳洲 306 號石英矽砂作為基礎顆粒材料，微生物來源則為具有高尿素酶活性的 *Sporosarcina pasteurii* (原名 *Bacillus pasteurii*)，並以尿素與氯化鈣 (CaCl_2) 混合製備膠結液，其中氯化鈣為考量溶解性與反應效率後所選定之鈣源。

試體製備階段，為確保成型品質與後續脫模操作的完整性，研究採用兩種模具型式：一為透明壓克力模具，便於觀察灌漿過程與控制飽和程度；另一為鋁合金分裂模，具備良好勁度與可拆卸性，可有效提升試體成型的一致性並簡化脫模程序。所有模具均進行密封處理，以防止養護期間水分蒸發或外部空氣干擾。

灌漿作業採用固定流量與時間控制之灌漿系統，將改良液與膠結液交替注入試體中，透過設定不同的注入次數 (一次至五次) 與間隔時間，達成碳酸鈣沉澱量與分佈的變化控制。養護階段則於恆溫環境中進行，設計不同養護齡期 (7 日、14 日、21 日) 以觀察沉澱物成長的時間效應。

為分析灌漿效果與沉澱均勻性，初步進行酸洗試驗 (Acid Digestion Test) 以定量測得不同部位之碳酸鈣含量，再輔以電腦斷層掃描 (Computed Tomography, CT) 獲取砂柱內部垂直與水平斷層影像，觀察碳酸鈣分佈趨勢與滲透均勻性。

最後，針對各組試體進行共振柱試驗 (Resonant Column Test)，量測其剪力模數 (Shear Modulus, G) 與阻尼比 (Damping Ratio, D) 於不同剪應變範圍內之變化，作為綜合評估微生物灌漿改良技術之動態性質依據。

1.3 研究架構

本研究全文共分成五章，第一章為緒論，介紹本研究之動機與目的、研究方法以及架構；第二章為文獻回顧，介紹微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 原理與應用，並說明共振柱基本原理，以及土壤剪力模數與阻尼比的影響因子；第三章為試驗內容，說明本試驗所使用的材料、改良液配製、改良試體製備、碳酸鈣含量檢測，並介紹 GDS 共振柱儀器使用步驟；第四章為試驗結果，介紹本研究 MICP 改良試體之均勻性以及共振柱試驗結果；第五章為結論與建議，對於本研究之試驗結果提出結論，並針對其提出改善及建議；最後為本篇研究之參考文獻。



第 2 章 文獻回顧



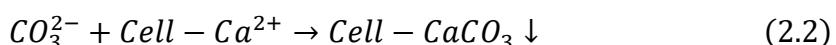
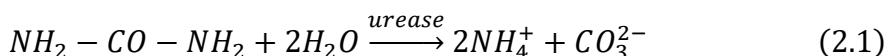
2.1 微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 的原理與應用

2.1.1 微生物誘導碳酸鈣沉澱基本原理

微生物誘導碳酸鈣沉澱 (Microbial Induced Calcite Precipitation, MICP) 是一種基於微生物在土壤中進行一系列生物化學反應的技術。其核心原理是特定微生物 (如 *Bacillus pasteurii*) 分泌尿素酶 (Urease) 催化尿素 ($\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2$) 的分解反應，生成氨離子 (NH_4^+) 和碳酸根離子 (CO_3^{2-})，該反應提高了環境的 pH 值，並增加了碳酸根離子的濃度，如式 2.1 所示 (DeJong et al., 2010)。最後，碳酸根離子 (CO_3^{2-}) 與細胞表面的細胞-鈣離子絡合物 (Cell- Ca^{2+}) 結合，生成碳酸鈣 (CaCO_3) 沉澱。該沉澱物逐漸堆積，形成穩定的固體結構如式 2.2 所示 (DeJong et al., 2010)。

如圖 2-1 所示，此反應歷程可細分為三個階段：(a) 細菌細胞膜吸附尿素與鈣離子，並透過酵素反應生成氨與碳酸根；(b) 鈣離子開始於細胞膜周圍結合並形成晶核；(c) 隨著反應進行，碳酸鈣晶體逐漸於細胞表面沉積，最終覆蓋整個細胞外層，形成穩定礦物結構。該機制顯示細胞膜本身即具備晶核誘導的功能，可視為沉澱反應之生物模板，有助於碳酸鈣在微尺度上的有序成核與生長 (DeJong et al., 2006)。

如圖 2-2 所示，生成的碳酸鈣晶體可有效填充土壤孔隙，並在顆粒間形成橋接作用，從而顯著提升土壤的強度和穩定性。隨著碳酸鈣逐步沉積，這些晶體能夠將土壤顆粒結合在一起，改善土壤的力學性能，如抗壓強度、抗剪強度及抗滲性能。該技術在土壤改良和地基加固等工程領域展現了廣泛的應用前景。



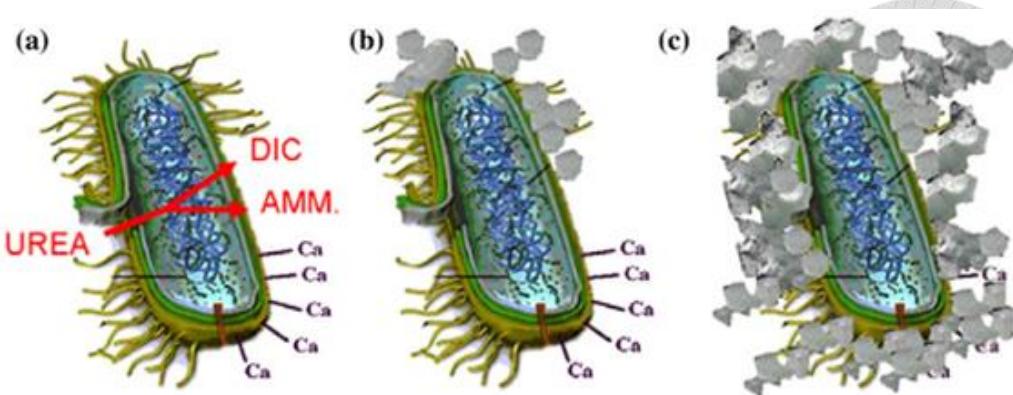


圖 2-1 細胞膜表面形成碳酸鈣沉澱過程 (DeJong, 2006)

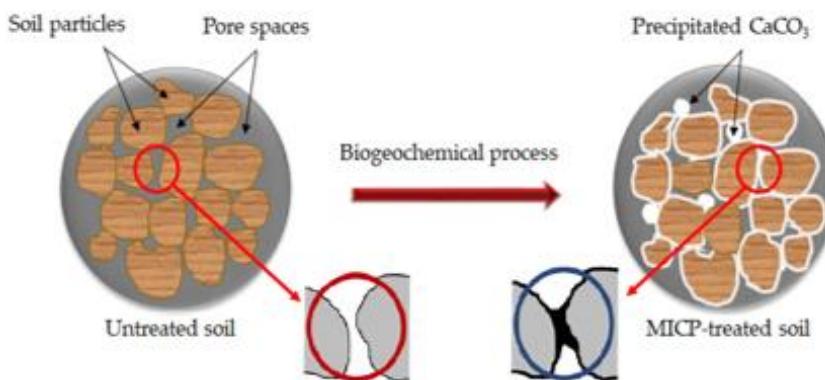


圖 2-2 碳酸鈣結合土壤顆粒示意圖 (Rahman et al., 2020)

2.1.2 MICP 在土壤改良中的應用範疇

隨著對環境永續與低碳排放目標的重視，傳統土壤改良工法逐漸面臨環境衝擊與成本高昂等挑戰。微生物誘導碳酸鈣沉澱 (Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP) 技術作為新興生物地工技術之一，因其具備低能耗、低污染及可塑性高等特點，近年來廣受學術界與工程實務關注。MICP 技術主要透過微生物分泌尿素酶促進尿素分解，產生碳酸根離子進而與鈣離子結合，於土壤孔隙中生成碳酸鈣結晶，形成顆粒間的膠結，進而提升土壤的強度與勁度 (Whiffin et al., 2007)。

目前 MICP 已被廣泛應用於降低土壤滲透性 (Blauw et al., 2009; DeJong et al., 2010)、砂土加固 (Han et al., 2016)、處理汙染土壤 (Fujita et al., 2010 ; Li et al., 2013)、裂隙封堵 (Liu et al., 2024) 等多種工程領域，顯示其在地盤改良應用上具

備高度潛力與靈活性。以下將彙整相關研究成果與應用案例，探討 MICP 在不同土壤類型與工程條件下之適用性與改良成效。

Han 等人 (2016) 針對 MICP 技術於抗液化砂的應用進行動態三軸與振動台試驗，結果顯示改良後試體可有效抑制地震模擬荷載下的孔隙水壓力發展，並減少表層沉陷，動態行為趨近於緻密砂，具顯著抗液化效能。此外，MICP 反應時間短、用液量少，施工效率優於傳統化學灌漿，展現工程可行性。

除砂土外，MICP 亦成功應用於多種不同性質土壤。Lim 等人 (2025) 針對殘留土進行改良試驗，發現即便碳酸鈣沉澱量較低，仍可顯著提升偏應力與破壞強度，改良組試體孔壓變化劇烈，反映其由鬆散轉為密實結構，與未改良樣本形成鮮明對比（圖 2-3）。

在特殊地層應用方面，Duo 等人 (2018) 探討沙漠風積砂經不同濃度膠結液改良後之力學行為，結果顯示 CaCO_3 沉澱量與無側限抗壓強度呈正相關（圖 2-4），沉澱物主要填補孔隙與包覆砂粒，有效提升密實度與降低滲透性。

針對鹽漬土，Zhang 等人 (2024) 進一步將 MICP 結合活性碳改良，發現複合改良後試體之孔隙比於各應力階段皆維持最低水準（圖 2-5），結構穩定性顯著提升，並改善壓縮特性與保水能力。

Zhang 等人 (2020) 以 3% Class-F 飛灰 (FA1) 混合砂土施作 MICP 改良，三軸試驗峰值偏應力由 800 kPa 提升至 1959 kPa（圖 2-6），強度提升達 154%。但若摻量過高，則可能導致孔隙堵塞與菌體活性下降。TCLP 重金屬溶出測試亦顯示其環境風險極低，具應用安全性。

在黏性土改良方面，Prongmanee 等人 (2023) 開發微生物方解石粉末施用於黏土中，證實其具孔隙填補與強度提升效果，且隨養護時間延長仍維持強度增長趨勢。

針對礦業尾礦改良應用，Behzadipour 與 Sadrekarimi (2023) 進行 MICP 多次灌漿改良後，試體之摩擦角平均提升約 5° 、黏聚力增加約 19 kPa (圖 2-7)，SEM 影像亦顯示碳酸鈣均勻沉積於粒間，形成穩固膠結 (圖 2-8)。

近期研究亦將 MICP 應用於乾旱地區土壤乾裂問題之緩解。Liu 等人 (2024) 於臺灣進行實地示範，透過多次表面施灑 MICP 培養液於裸露土壤表層，成功在降雨前建立碳酸鈣覆層，顯著抑制乾化作用所導致之裂縫發展與土壤侵蝕。研究指出，改良後土壤裂縫密度明顯下降，表面電導度降低，反映其滲透性與含鹽量同步改善，並兼具防裂與保水功能。

如表 2-1 所示，MICP 技術已成功應用於多種土壤類型，包含可液化砂、殘留土、風積砂、鹽漬土、飛灰摻合砂土、黏性土與尾礦材料。這些案例顯示，MICP 不僅可透過碳酸鈣沉澱有效提升土體的抗剪強度、抗壓能力與微觀結構穩定性，亦可針對不同地層條件調整改良方式以達到最佳改良效果。特別是在抗液化、防滲強化、重金屬穩定化與工業副產物再利用等應用面向上，皆展現出顯著的工程價值與環境友善性。由於其具備高靈活性、可控制性與施工效率，MICP 技術已成為當代地盤改良領域中極具潛力之綠色工程解決方案，亦為本研究進一步探討砂土動態性質改良效益提供堅實基礎。

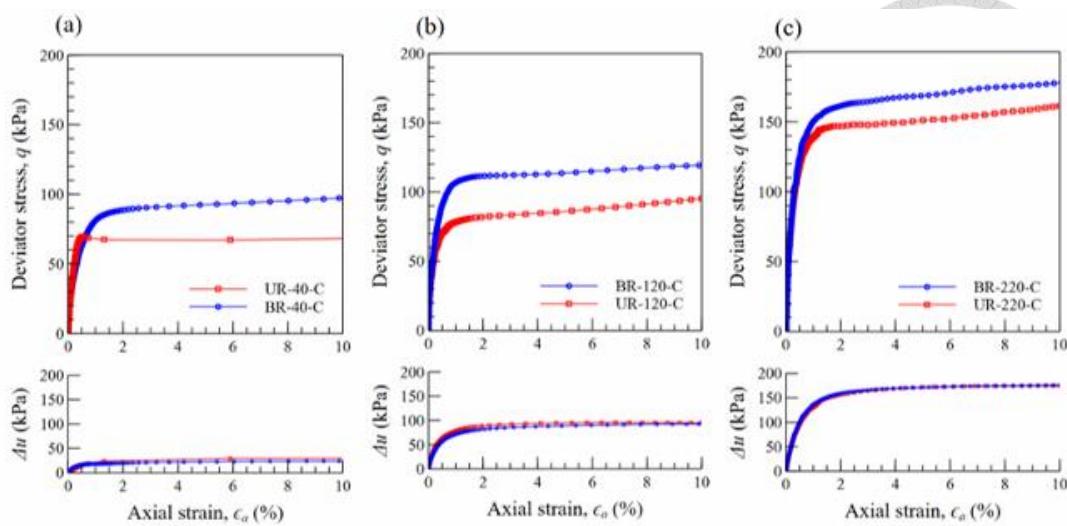


圖 2-3MICP 改良與未改良試體之應力-應變行為與孔壓變化比較 (Lim et al., 2025)

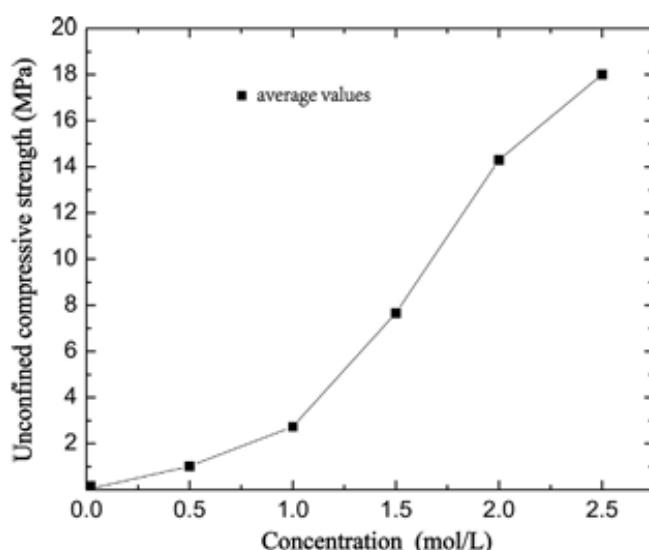


圖 2-4 不同膠結液濃度下 MICP 改良風積砂之 CaCO_3 含量與 UCS 變化 (Duo et al., 2018)

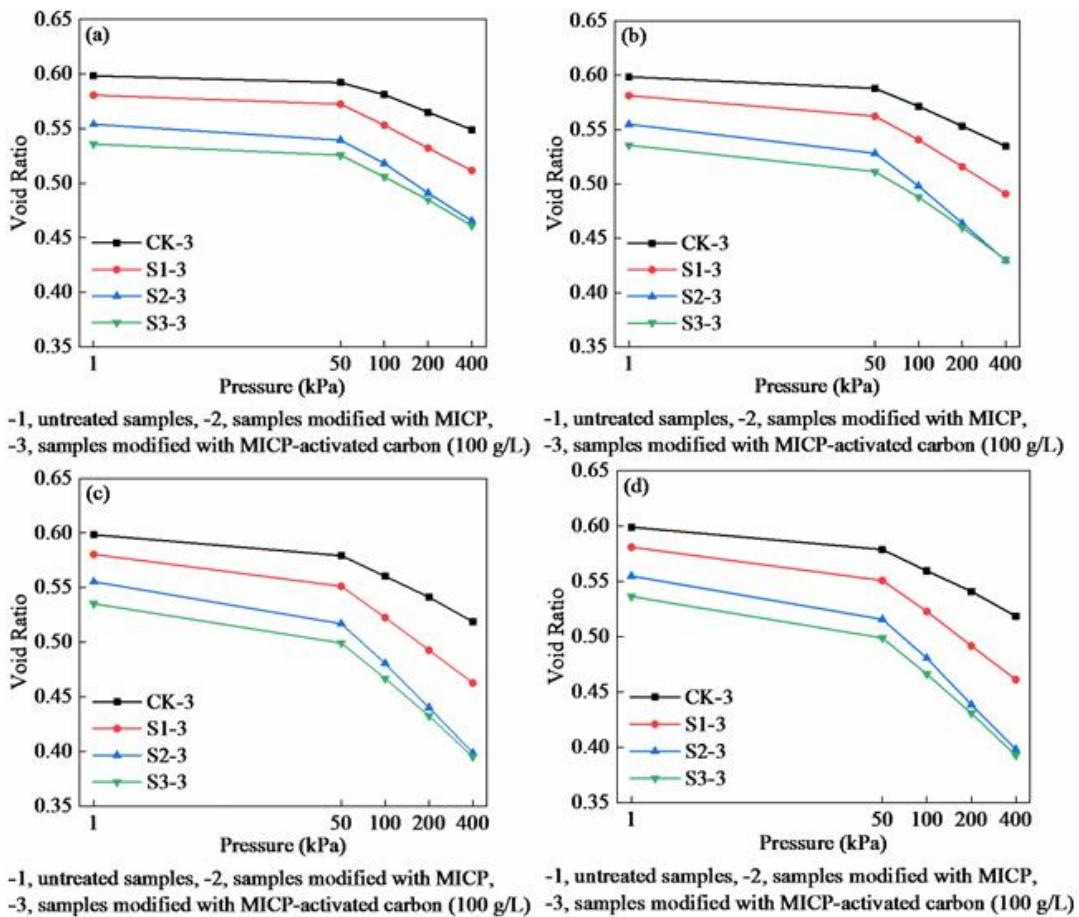


圖 2-5 不同改良方式對鹽漬土孔隙比與壓力關係之影響 (Zhang et al., 2024)

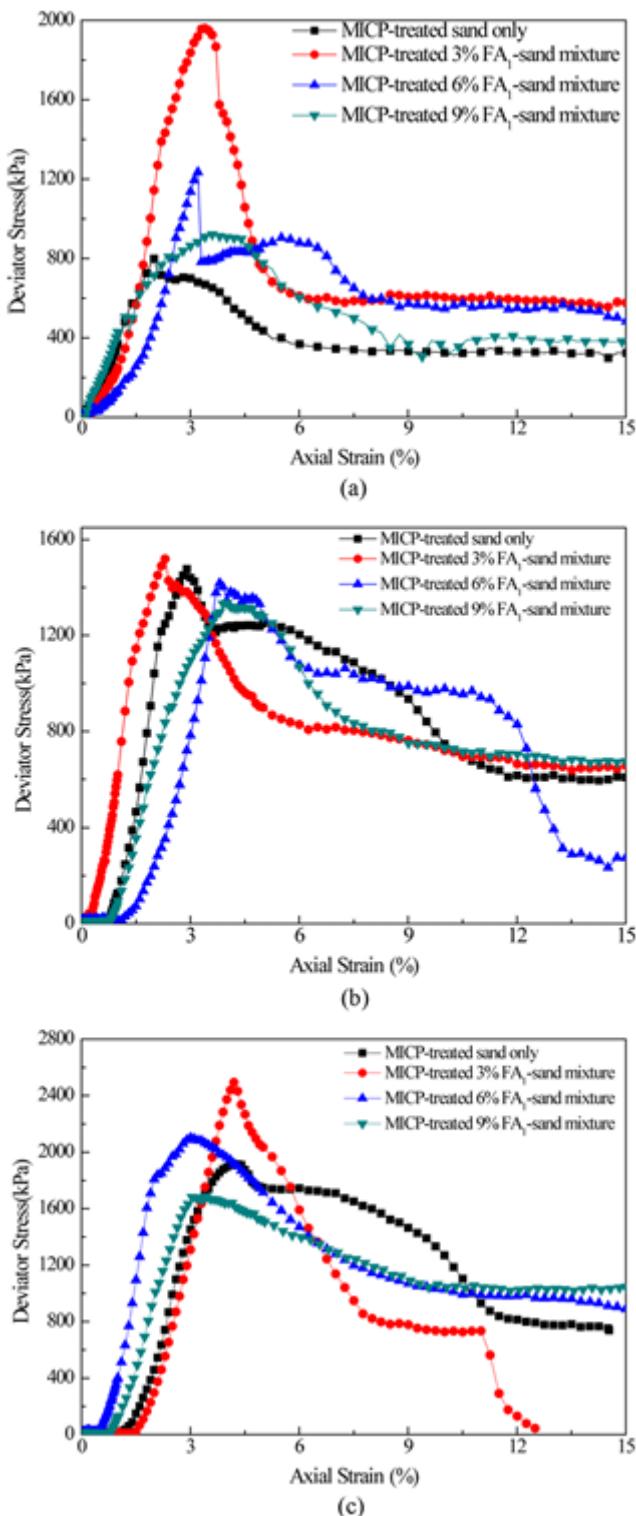


圖 2-6 不同 FA₁ 摻配比例下 MICP 改良砂土之偏應力—軸向應變曲線 (J. Zhang et al., 2020)

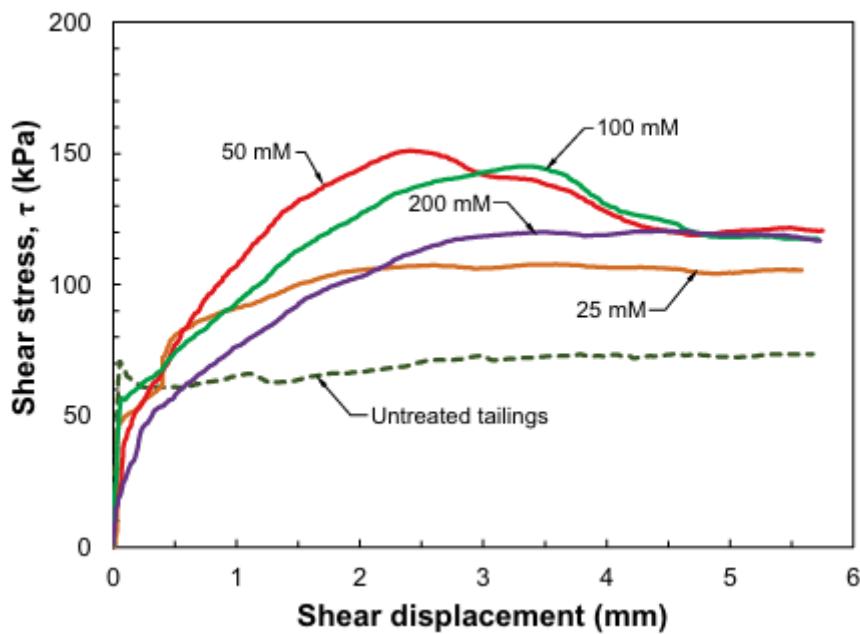


圖 2-7 MICP 改良金礦尾礦後之剪應力－剪應變行為 (Behzadipour & Sadrekarimi, 2023)

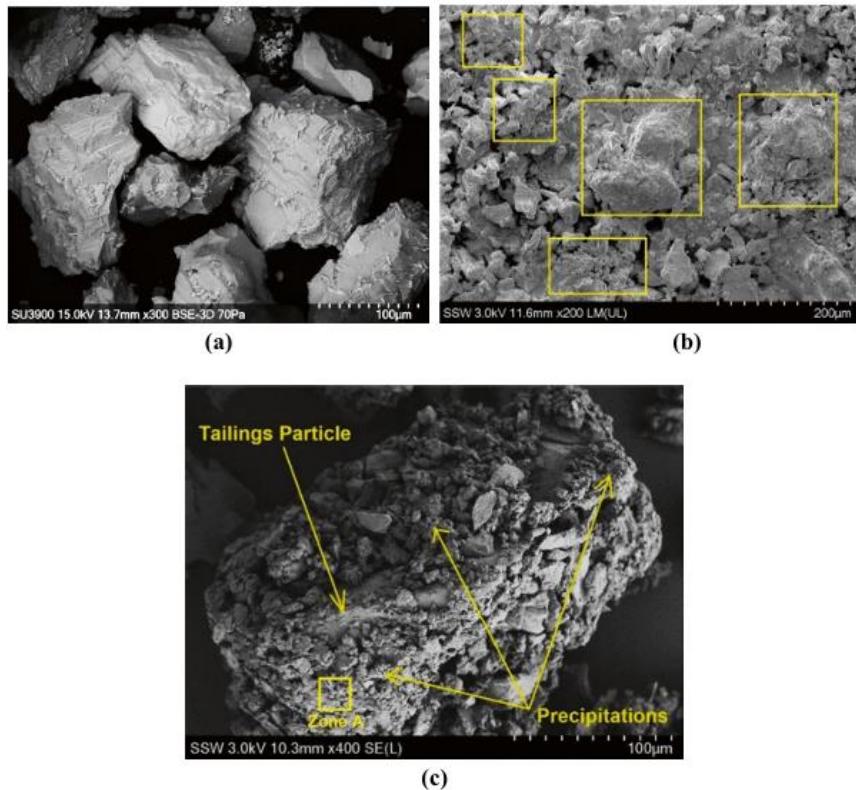


圖 2-8 金礦尾礦經 MICP 改良後之 SEM 影像 (Behzadipour & Sadrekarimi, 2023)

表 2-1 MICP 應用於不同土壤類型之比較



土壤類型	MICP 應用結果
可液化砂	成功抑制孔隙水壓力上升並減少地表沉陷
殘留土	偏應力顯著上升，破壞過程伴隨明顯孔壓變化
風積砂	CaCO_3 沉澱量與 UCS 隨膠結液濃度增加而同步提高
鹽漬土	添加活性碳後孔隙比顯著降低，結構穩定性明顯提升
飛灰砂土	在 3% FA1 摶配下偏應力提升達 154%，TCLP 測試合格
黏性土	UCS 隨養護時間延長而持續增強，粉末填補效果良好
金礦尾礦	摩擦角提高、黏聚力增加，SEM 顯示膠結明確
表層農業土壤	表面裂縫顯著減少，電導度降低並提升保水力



2.2 共振柱試驗原理

共振柱試驗 (Resonant Column Test) 為土壤動態試驗方法之一，主要用於量測剪力模數 (Shear Modulus, G) 與阻尼比 (Damping Ratio, D) 等動態特性。該試驗適用於微小至小應變範圍內 ($10^{-4}\%$ 至 $10^{-2}\%$)，且可與動力三軸試驗 (Dynamic Triaxial Test) 結合，以獲得完整的土壤動態參數曲線。本試驗可作為估算最大剪力模數 (G_{\max}) 之依據，並能反映土壤於微應變區間的能量耗散行為，故廣泛應用於地震工程、地基動力反應與液化潛能評估中。由於土壤在微小應變範圍內的剪力模數可作為最大剪力模數 (G_{\max}) 的估算依據，且此區間內的阻尼比能反映能量耗散特性，因此共振柱試驗廣泛應用於地震工程、土壤動力學與地基工程等領域。

最早之共振柱試驗由 Ishimoto 與 Iida (1937) 提出，初期主要用於研究波於土壤內部之傳播行為。其後，Drnevich (1970) 發現，在高振幅條件下，剪應變於試體半徑方向呈非線性分佈，進而提出空心試體 (Hollow Specimen) 測試法，以改善剪應變場之均勻性。

Stokoe 等人隨後對儀器結構加以改進，發展出具實用性的固定-自由型 (Fixed-Free Type) 與自由-自由型 (Free-Free Type) 共振柱設備，使試驗精度與穩定性大幅提升。

共振柱試驗基於波動理論 (Wave Propagation Theory)，並假設試體為均質、等向且符合線性彈性體行為。試驗過程中，當試體受到扭轉振動時，其剪應變可表示為式 2.3 所示，其中 r 為試體半徑， θ 為扭轉角， x 為試體高度。

$$\gamma = \frac{rd\theta}{dx} \quad (2.3)$$

根據牛頓第二運動定律，可得試體內部的剪應力分佈為式 2.4 所示。其中， G 為剪力模數，透過波動方程式可進一步推導為式 2.5 所示，式中， ρ 為土壤密

度， V_s 為剪力波速。此方程式說明，剪力模數與剪力波速平方成正比，亦即剪力波速的量測可用於估算土壤勁度。

$$\tau = G\gamma = G \frac{rd\theta}{dx} \quad (2.4)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (2.5)$$

共振柱試驗中，剪力模數 G 可由試體的共振頻率計算，根據彈性波傳理論，剪力模數的計算公式為式 2.6，阻尼比 D 反映土壤的能量耗散特性，可透過對數減幅法 (Logarithmic Decrement Method) 計算如式 2.7 所示。

$$G = \frac{4\pi^2 f^2 J_p}{m} \quad (2.6)$$

$$D = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{A_n}{A_{n+1}} \right) \quad (2.7)$$

f ：共振頻率

J_p ：極慣性矩

m ：試體質量

A_n ：第 n 次振幅

A_{n+1} ：第 $n + 1$ 次振幅

共振柱試驗透過施加扭轉振動，可有效測定試體於微小至小應變區間內之剪力模數與阻尼比，進而分析土壤之非線性動態行為。剪力模數與剪力波速平方成正比，可用於反映土壤勁度；而阻尼比則描述其能量耗散能力。兩者皆會受到土壤密度、有效圍壓與應變幅度等因素之影響，為地震地盤反應分析提供重要依據。



2.3 MICP 改良對砂土剪力模數與阻尼比影響

微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 技術除可提升砂土之強度與穩定性外，其膠結生成亦對動態性質產生重要影響。相關研究顯示，碳酸鈣沉澱可強化顆粒間接觸，進而提升剪力模數 (G) 並增強能量耗散能力，反映於阻尼比 (D) 之變化。為探討其動態行為改善機制，本節彙整文獻，分析 MICP 對砂土 G 與 D 之影響趨勢與成因。

Torfehnezhad et al. (2025) 以鬆砂土為材料，針對不同灌漿次數之試體進行動力三軸試驗，評估其剪力模數 (G) 與阻尼比 (D) 之變化。研究結果顯示，隨改良次數增加，試體在相同側向壓力條件下之剪力模數與阻尼比均呈上升趨勢，顯示碳酸鈣膠結可有效提升微觀接觸勁度與能量耗散能力。特別是在中高剪應變範圍，改良試體展現出更佳之勁度保持與耗能表現。其機制推測與 MICP 結構於剪切作用下產生滑移與局部破壞有關，進而提供額外耗能路徑，使阻尼比隨應變增加而上升（圖 2-9、圖 2-10）。

Zhang et al. (2022) 指出，低剪應變下 G 隨時間與碳酸鈣含量提升而升高（圖 2-11）。Banik et al. (2023) 研究結果指出，MICP 改良可顯著提升 G_0 ，且提升幅度隨膠結程度上升更為明顯，對於粒徑不均之樣本尤為顯著。此外，碳酸鈣沉澱亦可有效降低勁度異向性，改善不同方向剪力波速差異，反映其對顆粒間排列與結構均向性具有正面效應。

綜合而言，MICP 改良可於低至中應變範圍顯著提升砂土之剪力模數與阻尼比，其改善幅度受灌漿次數、膠結程度與膠結型態共同控制，適當調整改良條件將有助於優化動態性能。

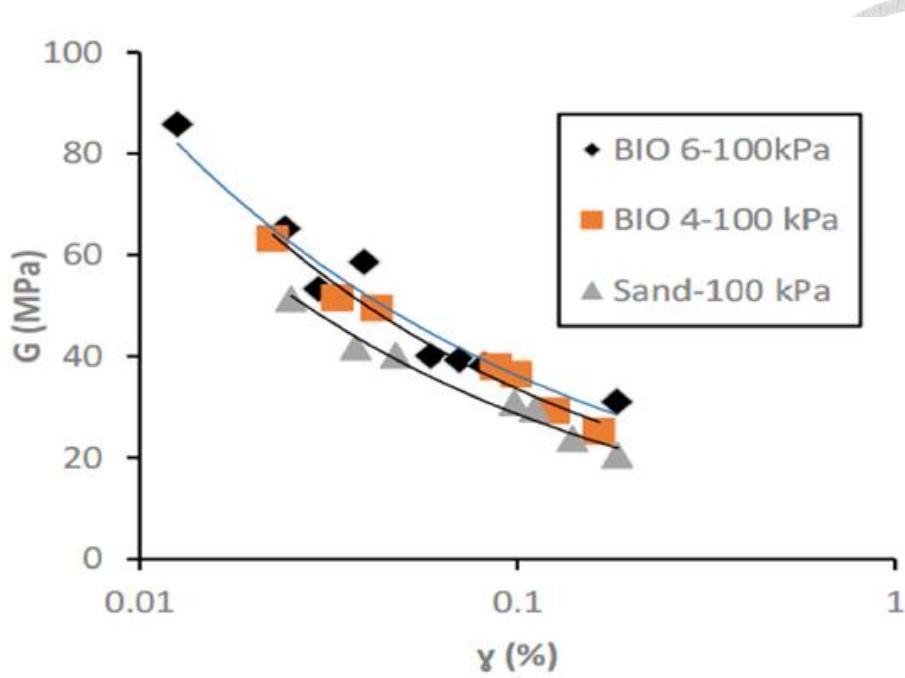


圖 2-9 MICP 改良前後剪力模數 G 於側向壓力 100 kPa 條件下之變化

(Torfehnezhad et al., 2025)

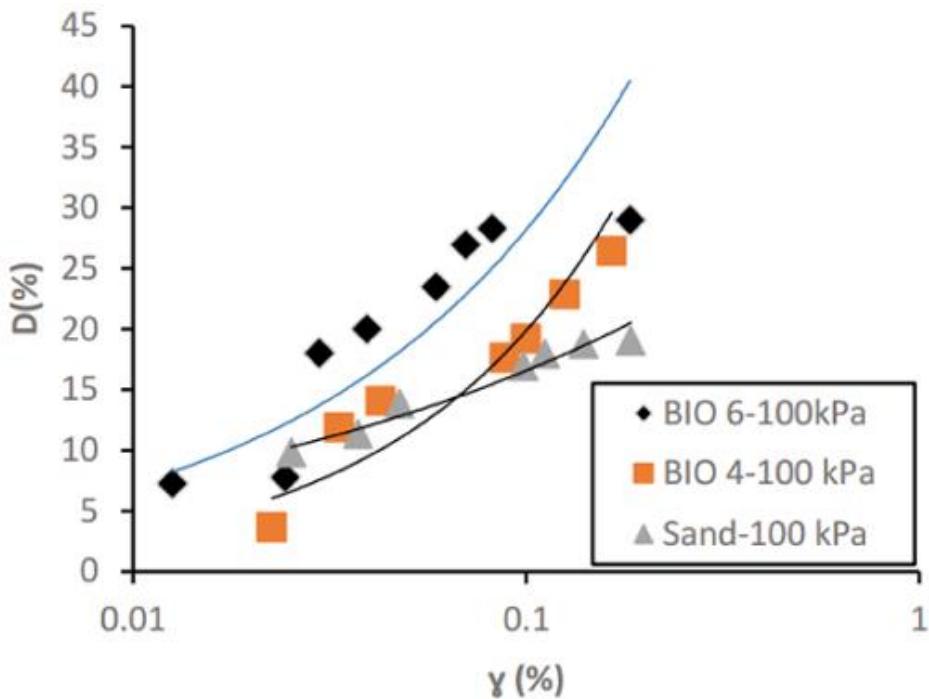


圖 2-10 MICP 改良前後阻尼比 D 於側向壓力 100 kPa 條件下之變化

(Torfehnezhad et al., 2025)

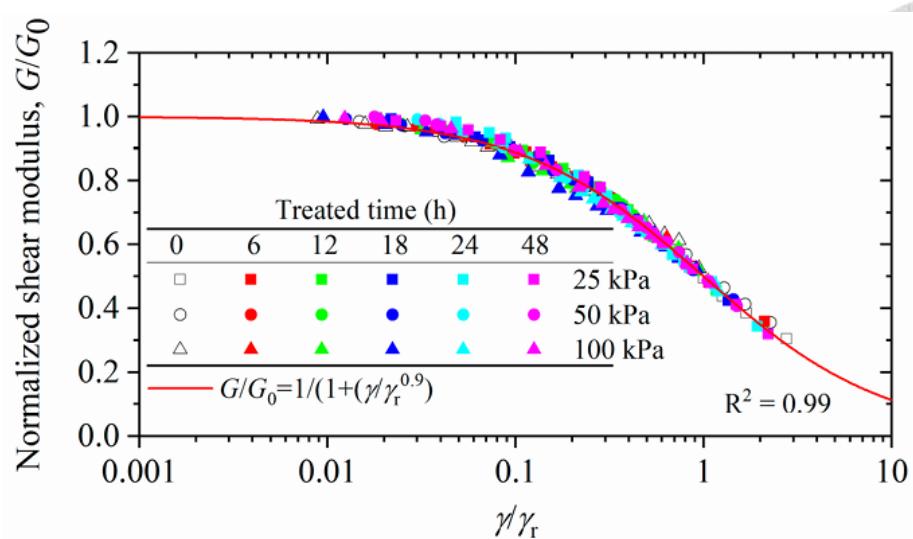


圖 2-11 不同改良條件下正規化剪力模數關係圖 (Zhang et al., 2022)



2.4 MICP 改良參數對效能影響之研究

2.4.1 灌漿次數

灌漿次數為影響微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 反應效率與力學改良成效之關鍵因素。多數研究顯示，隨著灌漿次數增加，碳酸鈣累積量提升，有助於形成更穩定之顆粒膠結結構，進而強化試體強度與抗剪能力。然而，過多次數亦可能因菌體活性衰退與反應飽和而導致沉澱效率遞減。

Wang 等人 (2022) 透過微流體晶片與砂柱試驗系統性探討不同灌漿次數對碳酸鈣生成效率與沉澱行為之影響。研究結果顯示，第 1 至第 6 次灌漿期間碳酸鈣含量快速累積，總體碳酸鈣體積占孔隙比由 1.5% 增至約 5.0%；然自第 7 次起增幅趨緩，第 12 次灌漿後僅增至約 6.0%。此外，其化學轉換效率亦由最初之 100% 降至僅約 69%，反映灌漿初期反應迅速，隨後因菌體流失與孔隙受阻導致效率下降 (圖 2-12)。觀察微流體通道影像亦可發現，沉澱物由初期分散顆粒逐漸聚集為體積較大且密度較高之晶體，並於節點處形成封閉式膠結結構，展現其於細部尺度下之力學改良潛能 (圖 2-13)。

針對 MICP 於抗液化砂土之應用，Han 等人 (2016) 則透過動態三軸試驗評估不同灌漿次數對液化抵抗力之影響。試驗結果顯示，單次灌漿 (MP10、MP11) 雖能降低液化潛能，惟改善效果有限；當灌漿次數增至兩次 (MP12)，液化次數大幅提升至 1080 次，表現接近緻密砂之行為；進一步施作至四次 (MP13)，試體可於 $CSR = 0.50$ 條件下耐受 3000 次震動而不液化 (圖 2-14)。該研究同樣指出過多灌漿將使成效趨緩，應依目標力學性能與地盤條件審慎規劃。

綜合上述結果可知，灌漿次數雖對碳酸鈣沉澱與土體改良具有正向效果，然其增益並非線性提升。考量資源利用效率與改良目標，建議實務中以 3 至 6 次為經濟且有效之反應範圍，避免因過度灌漿導致菌體沖刷、沉澱堵塞或反應飽和等現象，進而影響整體成效與工程效益。

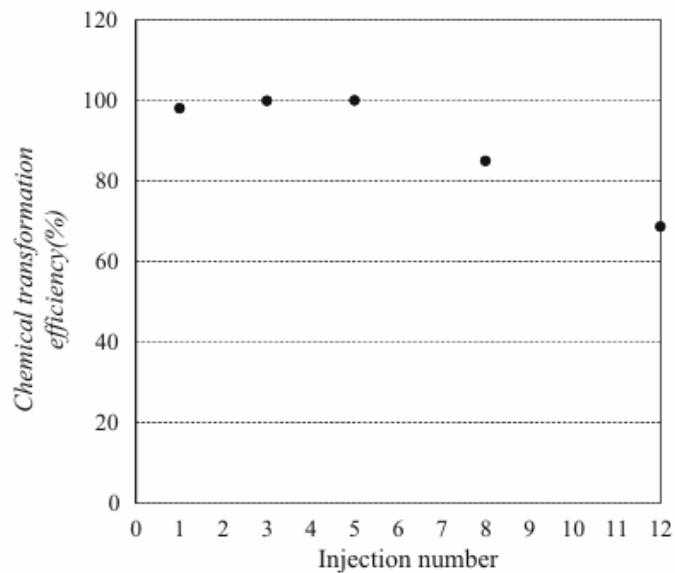


圖 2-12 不同灌漿次數下 CaCO_3 生成效率變化 (Wang et al., 2022)

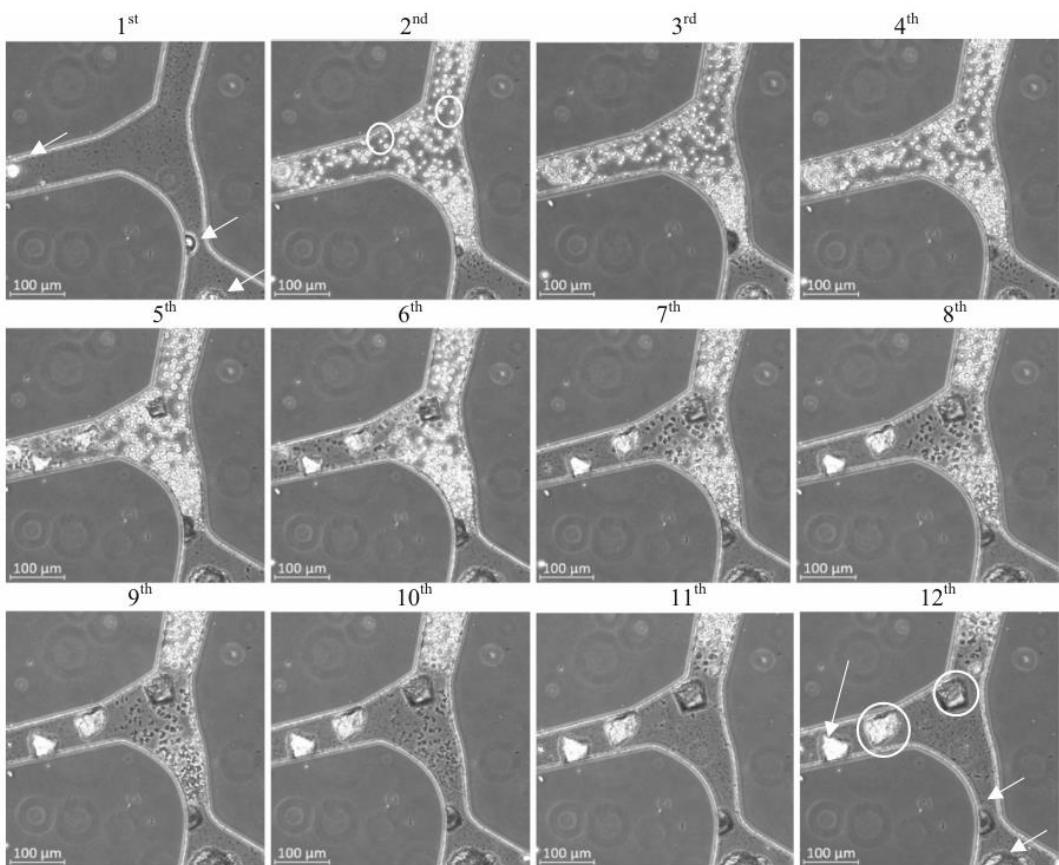


圖 2-13 微流體通道內不同灌漿次數下之 CaCO_3 沉澱影像 (Wang et al., 2022)

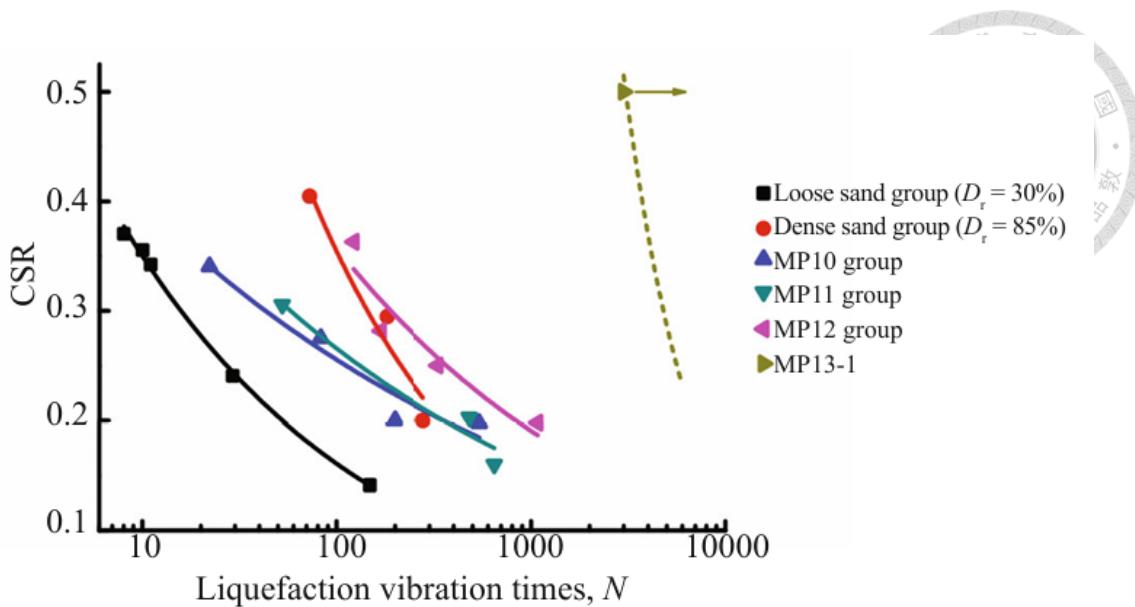


圖 2-14 不同灌漿次數試體之 CSR 與液化震動次數關係圖 (Han et al., 2016)

2.4.2 養護齡期

針對養護齡期對微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 穩定土壤效益之影響，現有研究普遍指出其沉澱行為與力學性質具有明顯之時間依賴性。以 Prongmanee et al. (2023) 所提出之簡化 MICP 製程應用於黏性土壤為例，其試驗設計涵蓋不同碳酸鈣結晶比例 (2–8%) 與養護齡期 (1–56 天)，並進行無側限壓縮強度 (UCS) 測試。試驗結果顯示，除最低碳酸鈣結晶量 (2%) 組別外，其餘樣本在第 28 天後仍持續展現強度增長，顯示碳酸鈣沉澱反應並未於初期即飽和，而是持續進行填隙與膠結作用 (圖 2-15 (a))。

為進一步分析強度發展趨勢，該研究將試體壓縮強度正規化至第 28 天基準值，所得回歸式為 $q_u/q_{u,28} = 0.7897e^{0.0115D}$ ，其決定係數 $\gamma^2 = 0.856$ (圖 2-15(b))，說明 MICP 改良黏土之強度隨養護齡期呈現指數型增長，與傳統水泥穩定土常見之對數式趨勢相異。此趨勢反映出碳酸鈣結晶初期以物理填隙為主，隨齡期推進則逐漸轉為晶體重組與微觀交聯的增強作用。

微觀觀察亦支持此一推論。Prongmanee et al. 利用 SEM-EDS 分析 56 天樣本，觀察到碳酸鈣晶體於孔隙中大量堆積，且部分區域顯示矽鈣水化物 (C-S-H)

之生成，顯示碳酸鈣晶體可能與矽鋁礦物產生次級 pozzolanic 反應，有助於進一步提升結構穩定性（圖 2-16 (e)）。

進一步而言，Wang et al. (2022) 以微流體實驗揭示，MICP 沉澱過程於長時間養護下會出現典型 Ostwald ripening 現象，即小晶體溶解並重新沉澱於大晶體表面，導致晶體粒徑成長與晶面規整化。該研究實際觀察到，晶體平均粒徑由約 $5\text{ }\mu\text{m}$ 增長至 $60\text{ }\mu\text{m}$ ，證明此過程有助於提升沉澱穩定性與結構承載能力，進而強化 UCS 與剪力模數等宏觀力學性質。

綜合而言，MICP 沉澱行為深受養護齡期影響，初期（7–14 天）以晶體生成與填隙為主，後期（28–56 天）則隨晶體成熟與重組過程加強土體結構。若養護時間不足（如僅 1–3 天）， CaCO_3 晶體仍處於發育初期，導致力學性質未臻穩定。因此，適當延長養護齡期為提升 MICP 改良成效之關鍵操作參數。

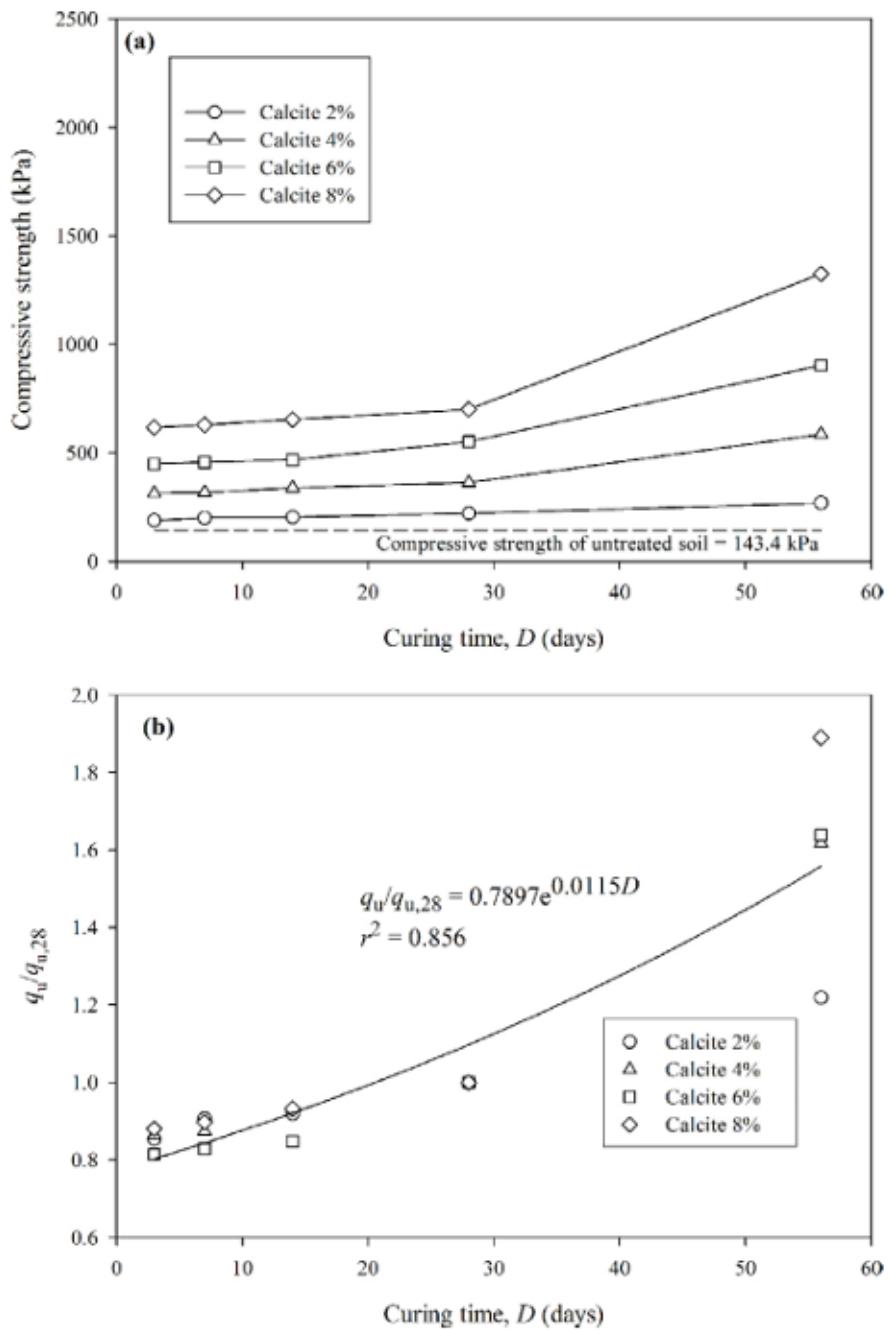


圖 2-15 不同養護齡期對未固結抗壓強度 (UCS) 之影響 (Prongmanee et al., 2023)

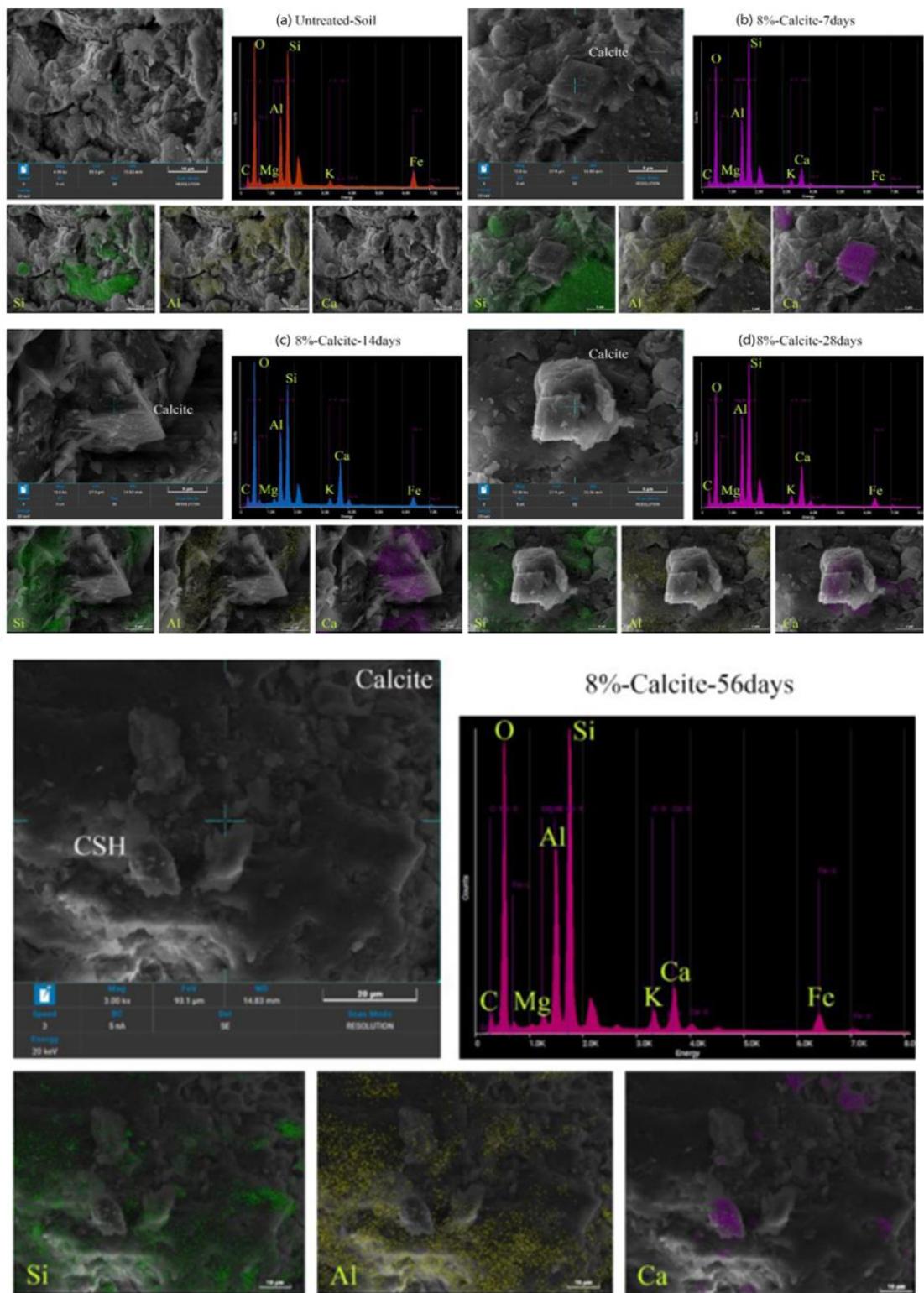
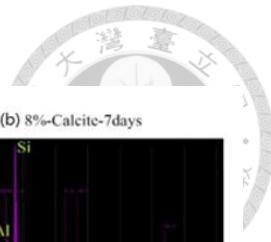


圖 2-16 不同養護齡期試體之 CaCO_3 沉澱型態 SEM 影像 (Prongmanee et al., 2023)



2.4.3 灌漿均勻性與沉澱分佈關係

在微生物誘導碳酸鈣沉澱 (Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP) 應用中，灌漿方式與灌漿壓力將直接影響反應物於土體中的傳輸歷程，進而主導碳酸鈣 (CaCO_3) 沉澱的空間分佈與改良均勻性。Tian et al. (2023) 針對砂柱試體設計四種注漿方式 (U-U、D-D、U-D、D-U)，其中 D-U 組係採菌液自底部注入、化學液自頂部注入之逆向灌漿方式，形成類雙向灌注的流場條件。結果顯示，相較於單向灌漿 (如 D-D) 容易導致碳酸鈣沉澱集中於進液端，D-U 組則可有效延長反應物於孔隙中之滯留時間，使碳酸鈣沿試體垂向均勻分佈 (圖 2-17)。進一步觀察孔隙水 Ca^{2+} 濃度 (圖 2-18) 亦發現，D-U 組於深層區域仍保有較高濃度之反應物，推論其具備更完整之滲透反應潛力，適合作為促進深部改良之灌漿。

Wang et al. (2023) 則以砂質黏質紫色土為對象，透過控制菌液濃度與注漿流速比較不同組別下之碳酸鈣均勻性變化。A 組採高濃度菌液 ($1.26 \times 10^8 \text{ CFU/mL}$) 配合不同流速進行灌漿，B 組則為低濃度對照組。由圖 2-19 可見，A 組在各膠結劑濃度條件下均顯示明顯較高的碳酸鈣均勻性指標，說明在低壓滲透條件下，提升菌液濃度可有效促進反應物均勻擴散與沉澱。

此外，Li & Chen (2022) 針對鈣質砂進行低壓滲透式 MICP 改良試驗，並以 CT 斷層掃描與滲透率量測分析其改良歷程。圖 2-20 為試體經 MICP 改良後所重建之三維孔隙結構與多方向切面影像，紫色區域代表孔隙分佈。從結構重建結果可觀察局部孔徑呈現封閉與收斂趨勢，推測碳酸鈣沉澱已部分填充孔隙，可能有助於降低水流通道之連通性。進一步地，圖 2-21 彙整不同顆粒級配 (曲率係數 C_c 、均勻係數 C_u)、相對密度 (D_r) 與試體條件下滲透係數變化量 (Δk) 之變化趨勢。實驗結果顯示，在初期數次注漿循環內 ($MT = 1\text{--}3$)， Δk 劇烈上升，顯示 CaCO_3 沉澱主要集中於初期階段並形成有效封堵結構。其中，具高均勻係數 ($C_c = 8$) 與高曲率係數 ($C_u = 2.0$) 之試體 (如 C1、C2、C3) 在低密度條件 ($D_r = 30\%$) 下封堵效果最佳 (圖 7(d))；反之，隨密實度提高，孔隙率下降致使反應

物傳輸受限， Δk 下降幅度趨緩（圖 2-21）。顯示透過級配設計與灌注方式調整，低壓灌漿亦具良好實用潛力基於 MICP 的微生物固化鈣質砂滲透性試驗研究。

綜合以上文獻可知，單向灌漿易造成沉澱不均，而雙向或交錯注入方式有助於延展反應歷程與分佈範圍，特別適用於深部改良；同時，低壓滲透灌漿若搭配合適之菌液濃度與注漿配方設計，亦可促成良好沉澱反應與封堵效能，提供 MICP 工法於實場地盤改良設計上可行之參考依據。

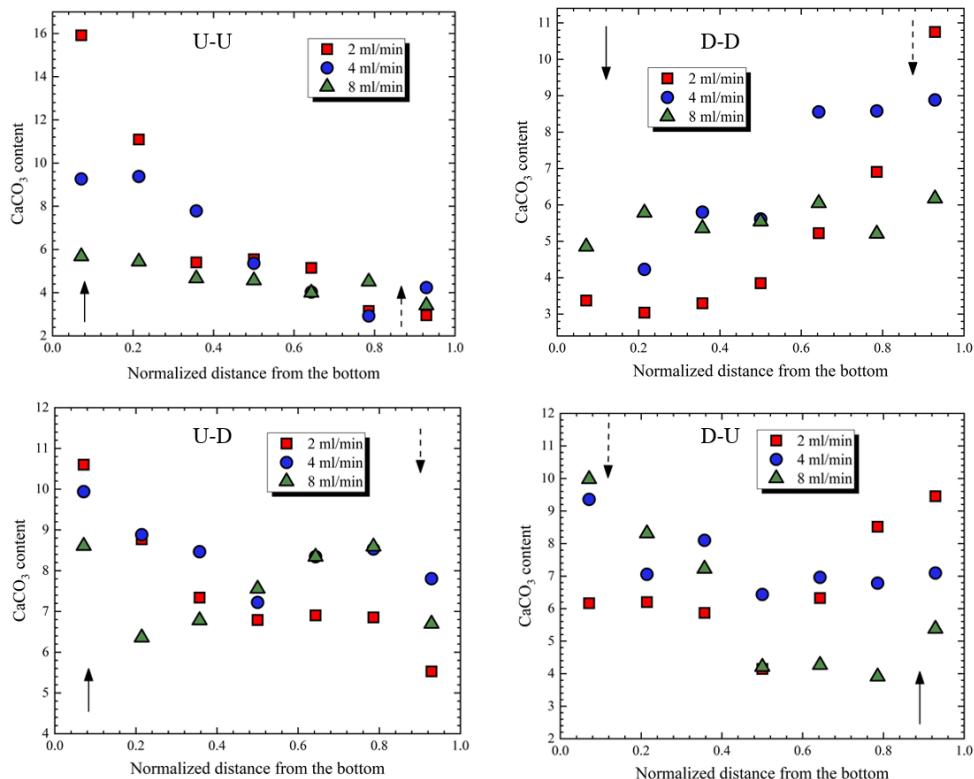


圖 2-17 不同注漿方式與流速下 CaCO_3 含量沿試體高度的分佈變化 (Tian et al., 2023)

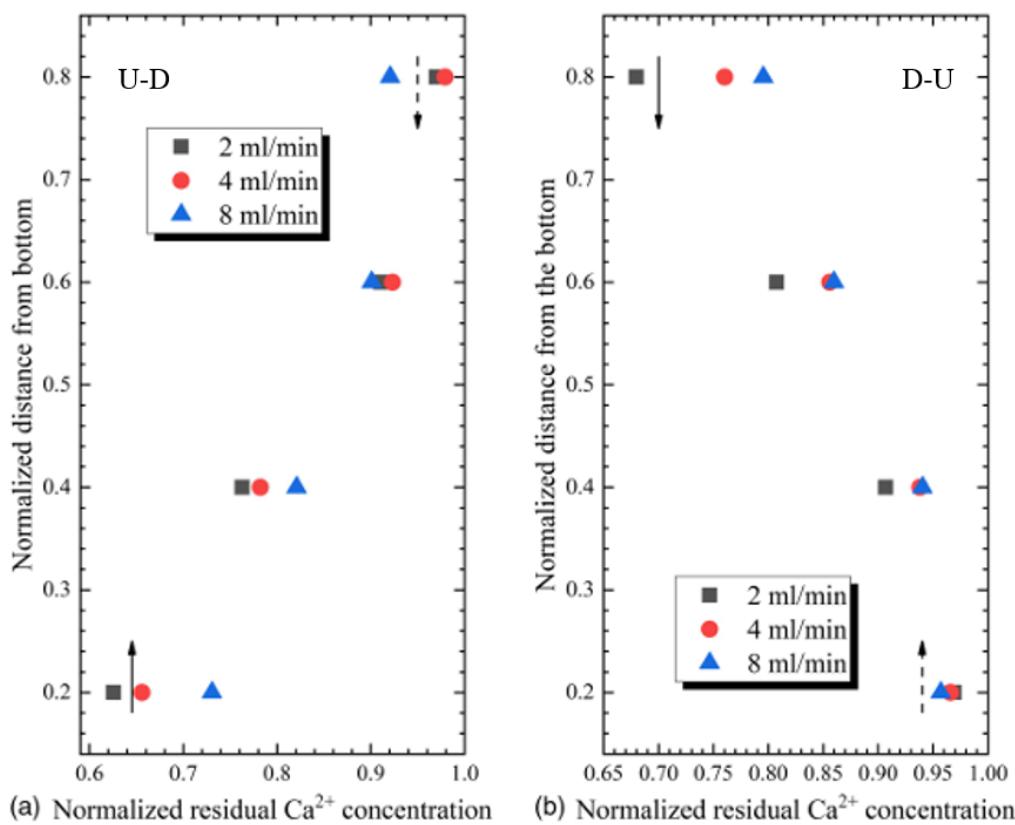


圖 2-18 不同灌漿方式與流速下試體內殘留 Ca^{2+} 濃度沿高度分佈變化 (Tian et al., 2023)

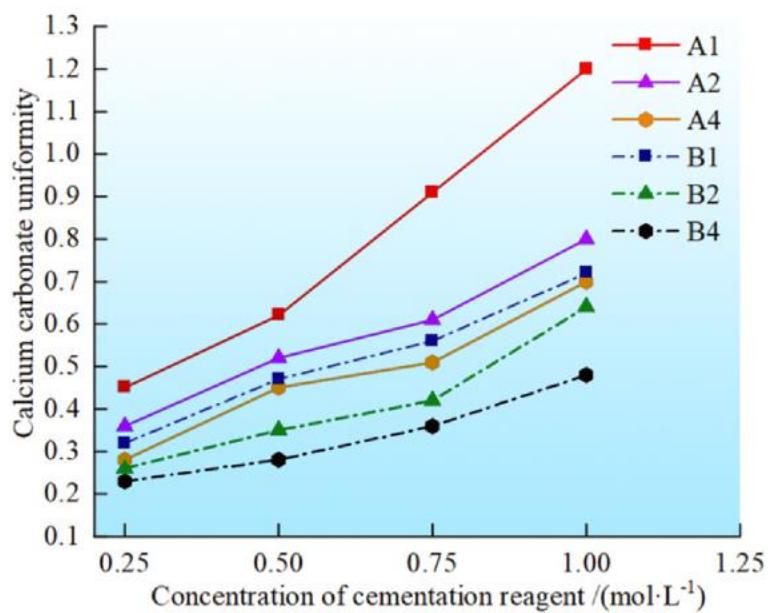


圖 2-19 各膠結劑濃度下之碳酸鈣沉澱均勻性變化 (Li & Chen, 2022)

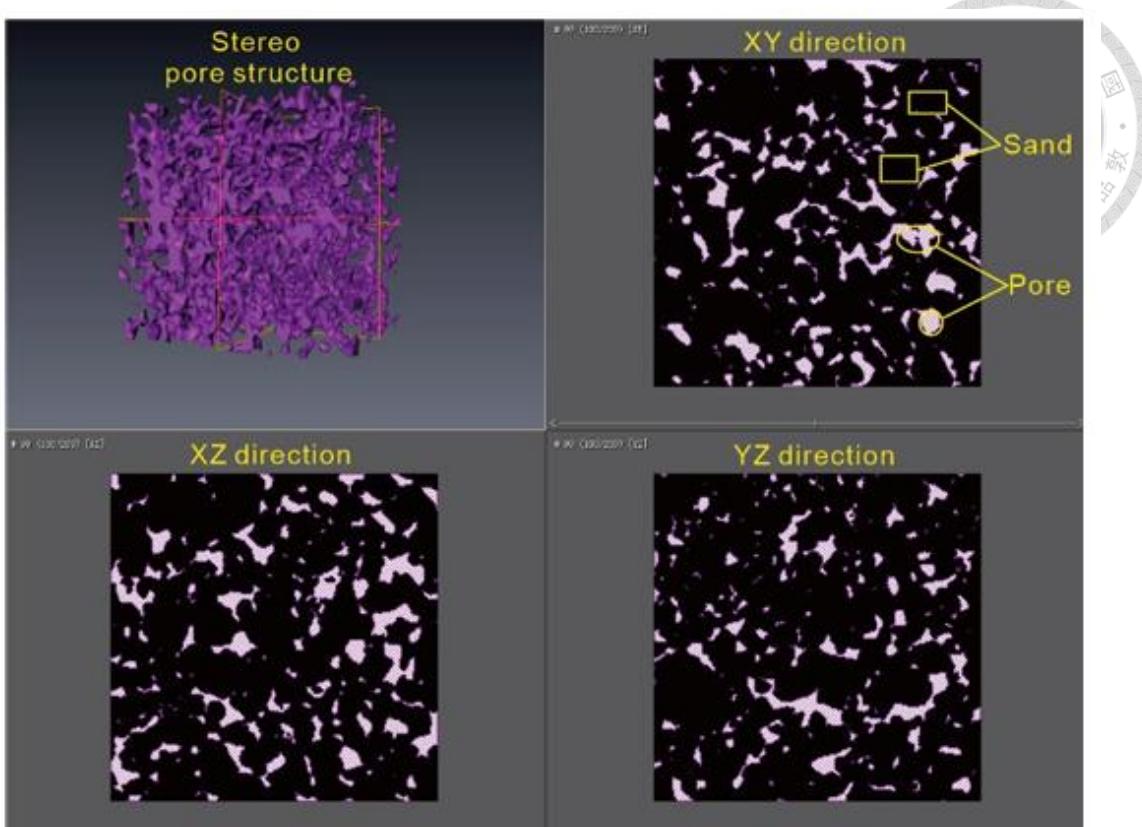


圖 2-20 MICP 改良後砂樣之三維孔隙結構與多方向切面影像 (CT 掃描結果)
(Li & Chen, 2022)

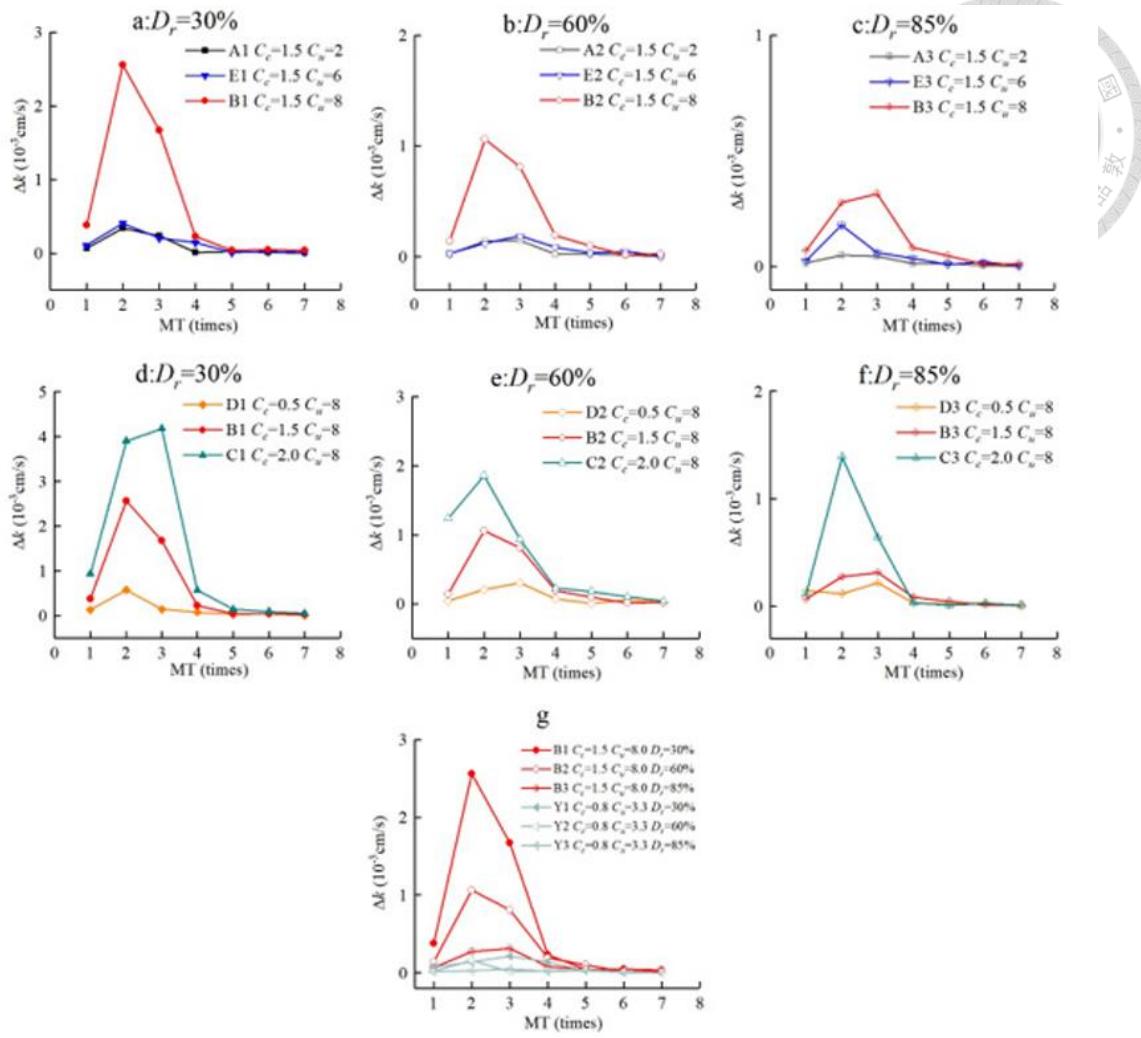


圖 2-21 不同粒徑級配與相對密度條件下 MICP 改良次數對滲透係數變化量

(Δk) 之影響 (Li & Chen, 2022)



第 3 章試驗內容



本章將介紹試驗設置相關細節，首先介紹使用材料、MICP 改良液製備方法、改良試體製作過程以及碳酸鈣含量檢測，最後說明共振柱試驗儀器與操作步驟。

3.1 試驗材料

3.1.1 砂土

本研究採用的砂土為澳洲 306 號石英砂，其外觀如圖 3-1 所示，粒徑分佈如圖 3-2 所示，基本性質試驗結果詳列於表 3-1。依據統一土壤分類系統 (Unified Soil Classification System, USCS)，該砂土被歸類為不良級配砂 (Poorly Graded Sand, SP) (ASTM, 2017)。



圖 3-1 石英砂

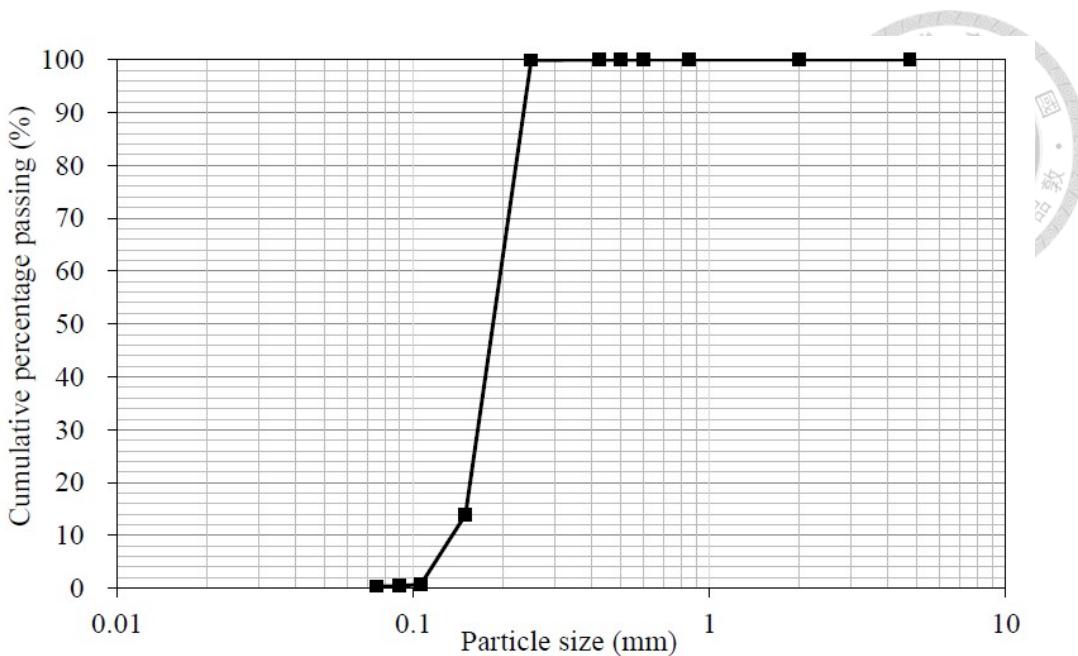


圖 3-2 材料粒徑分布曲線

表 3-1 砂土基本物理性試驗結果

物理意義	數值
比重 G_s	2.66
均勻係數 C_u	1.49
曲率係數 C_c	1.02
最大乾密度 (g/cm^3)	1.690
最小乾密度 (g/cm^3)	1.392

3.1.2 菌株

本研究所採用之菌株為 *Sporosarcina pasteurii*，其舊有分類名為 *Bacillus pasteurii*，為一種具備高度尿素酶活性的需氧性革蘭氏陽性細菌。該菌株能於有氧條件下進行細胞呼吸，並具備分解尿素的能力，在此過程中產生氨氣 (NH_3) 與二氧化碳 (CO_2)。由於氨的釋放會顯著提高環境 pH 值，使得鈣離子 (Ca^{2+}) 與碳酸根 (CO_3^{2-}) 易於反應生成碳酸鈣 (CaCO_3) 沉澱，因此 *S. pasteurii* 已成為微生物

物誘導碳酸鈣沉澱 (Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP) 應用中的代表性菌種 (Ma et al., 2020)。

在大地工程領域中，*Sporosarcina pasteurii* 之應用價值主要來自其能有效提升土壤骨架之黏結性與強度，藉由碳酸鈣沉澱於土壤孔隙中，改善其力學性質與穩定性。相較其他細菌，該菌種擁有較短的培養週期與良好的環境適應能力，使其成為多數 MICP 實驗與實場應用的首選。

本研究所使用之菌株由財團法人食品工業發展研究所生物資源保存與研究中心 (BCRC) 取得。改良液於使用前以低溫 (-80°C) 冷凍保存，並加入 30% 甘油以防止細胞內冰晶形成所造成之損害。為確保培養穩定性與批次間一致性，每次使用皆從單管冷凍樣本中分取，避免反覆凍融對菌株活性造成影響。改良液的培養程序，詳見第 3.2 節說明。



3.1.3 培養基

本研究所使用之培養基以酵母抽出物 (Yeast Extract) 與蛋白胨 (Peptone) 為主要營養來源，配比分別為 3 g/L 與 5 g/L，提供微生物生長所需之碳源與氮源。另依實驗階段需求添加尿素作為菌體代謝基質，促進尿素酶反應以進行碳酸鈣沉澱。部分階段則使用不含尿素之培養基，以調整菌液性質與控制 pH 值。整體配方旨在提供穩定且具反應活性的培養環境，以利微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 機制順利進行。詳細操作步驟與各階段改良液條件，請參見第 3.2.4 節之說明。



圖 3-3 尿素



3.2 改良液配製與培養

本研究採用液態培養基培養 *Bacillus pasteurii*，並透過持續搖晃方式維持改良液的均勻生長與活性。改良液之配製方式，分別針對試驗材料與器材，凍菌、培養基及 MICP 改良液配製流程進行詳細說明。

3.2.1 試驗材料與器材

本研究於台大環境工程所進行無菌環境之 *Bacillus pasteurii* 配製，試驗材料及 所需器材如下：

1. 試驗材料

- (1) 純水：將自來水經過一次過濾後之水。
- (2) 去離子水：去除了鈉、鈣、鐵、銅等元素之陽離子以及氯、溴等元素之陰離子後之水，為經過二次過濾之水。
- (3) 尿素 (Urea)：配製細菌培養基之原料。
- (4) 蛋白胨 (Peptone)：一種含肽可溶性混合物，配製細菌培養基之原料。
- (5) 酵母萃取物 (Yeast Extract)：配製細菌培養基之原料。
- (6) 牛組織之脫水萃取物 (Beef Extract)：配製細菌培養基之原料。
- (7) 洋菜粉 (Agar)：配製固態細菌培養基之原料。
- (8) 甘油：配製冷凍菌株之原料。

2. 試驗器材

- (1) 無菌操作台。
- (2) 高溫滅菌釜。
- (3) 血清瓶 1 L、2 L、5 L。
- (4) 0.2 μm 過濾膜。
- (5) 針筒。
- (6) 鋁箔紙。
- (7) 培養皿。



- (8) 錐形瓶。
- (9) 透氣矽膠塞蓋。
- (10) 滅菌指示膠帶。
- (11) 白金接種環。
- (12) 水平震盪機。
- (13) 25 °C 恒溫培養箱。
- (14) -80 °C 冷凍庫。
- (15) 磁石攪拌器。
- (16) 磁石攪拌子。
- (17) 微量電子天秤。
- (18) pH 測量儀。
- (19) 分光光度計。



3.2.2 凍菌

為確保菌種的長期穩定保存，本研究採用 30% 甘油水溶液作為冷凍保護劑，並依以下步驟製備凍菌，以維持 *Bacillus pasteurii* 的活性與存活率：

- (1) 甘油水溶液之配製：於 15 mL 小型離心管中加入 3 mL 甘油後，添加 7 mL 去離子水，以配製 30% 甘油水溶液。
- (2) 均質混合：將配製完成之甘油水溶液置於震盪器上，以 200 rpm 持續搖晃 1 分鐘，使溶液均勻混合。
- (3) 滅菌前處理：將小離心管的管蓋略為鎖緊，並以鋁箔紙完整包覆管蓋。為確保滅菌指示，於鋁箔紙上貼附一小段滅菌指示膠帶。
- (4) 高溫高壓滅菌：將經包裝處理之 30% 甘油水溶液置於高溫滅菌釜中，以高溫高壓蒸氣進行滅菌處理，確保無菌條件。
- (5) 冷卻與無菌操作準備：滅菌程序完成後，取出甘油水溶液並待其降溫至室溫，隨後移至無菌操作台進行後續分裝步驟。
- (6) 無菌環境準備：於無菌操作台內，使用 75% 酒精消毒小斜口夾，並以其夾取經滅菌處理之 1.5 mL 分裝管，依序放置於分裝架上，以備後續操作。
- (7) 改良液與甘油水溶液混合與分裝：在無菌操作台中，取 5 mL 之初始 *Bacillus pasteurii* 改良液，與 5 mL 之 30% 甘油水溶液以 1:1 比例混合，置於震盪器上以 200 rpm 持續搖晃 1 分鐘，使改良液均勻分散於甘油保護劑中。隨後，以每 1 mL 為單位，將混合液分裝至 1.5 mL 分裝管中，共分裝 10 份，並立即放置於 -80 °C 超低溫冷凍櫃進行長期保存。



3.2.3 液態培養基配製

為提供細菌適合的生長環境，使其能在受控條件下穩定繁殖，本研究配製兩種類型的液態培養基，分別為含尿素與不含尿素之培養基。以下說明其具體配製流程。

1. 含尿素之液態培養基 (1 L)

- (1) 成分準備：先以電子天平秤量 3 g 酵母萃取物 (Yeast Extract) 及 5 g 蛋白胨 (Peptone)，以確保成分精確，維持培養基的營養組成。
- (2) 溶解與混合：取 1 L 血清瓶，加入約 500 mL 去離子水，並放入磁石攪拌棒後，置於磁力攪拌器上開始攪拌。接著將步驟 (1) 所秤取的成分緩慢加入，使其充分溶解，並再加入 400 mL 去離子水，確保培養基均勻混合後取下。
- (3) 減菌前處理：為避免減菌過程中壓力累積，輕旋血清瓶瓶蓋，避免過度鎖緊。接著以鋁箔紙完整包覆瓶蓋，並於鋁箔紙上貼上滅菌指示膠帶，以確保滅菌效果可監測。
- (4) 高溫滅菌：將準備好的培養基置於高壓蒸氣滅菌釜中，以高溫高壓滅菌方式進行滅菌，以確保培養基的無菌環境。
- (5) 冷卻與尿素溶液製備：待滅菌程序結束後，取出培養基並置於室溫冷卻，移至無菌操作台進行後續處理。同時，以電子天平秤量 50 g 尿素 (Urea)，作為後續尿素溶液的製備。
- (6) 尿素溶液混合：取 200 mL 燒杯，加入 100 mL 去離子水，放入磁石攪拌棒，置於磁力攪拌器上攪拌。將步驟 (5) 中秤量的尿素逐步加入，直至完全溶解後取下。
- (7) 無菌過濾與混合：在無菌操作環境下，以 $0.2 \mu\text{m}$ 過濾膜 過濾尿素水溶液，以去除雜質與可能的污染源。過濾後，使用無菌針筒將尿素溶液緩

慢加入已滅菌的培養基中，使其均勻混合，即完成 1 L 含尿素培養基之配製。



2. 不含尿素之液態培養基 (1 L)

- (1) 成分準備：以電子天平秤量 3 g 酵母萃取物及 5 g 蛋白胨，確保營養成分準確，以提供適合細菌生長的環境。
- (2) 溶解與混合：取 1 L 血清瓶，加入 500 mL 去離子水，放入磁石攪拌棒，置於磁力攪拌器上攪拌，並逐步加入步驟 (1) 所秤取的成分，使其完全溶解。再加入 500 mL 去離子水，確保培養基均勻混合後取下，並取出磁石攪拌棒，以避免影響後續處理。
- (3) 滅菌前處理：為確保滅菌過程順利進行，輕旋瓶蓋，避免過度鎖緊，以利氣體交換。接著，以鋁箔紙包覆瓶蓋，並貼上滅菌指示膠帶，確保滅菌過程可監測。
- (4) 高溫滅菌：將處理完畢的培養基放入高壓蒸氣滅菌釜中，執行高溫滅菌程序，確保培養基的無菌狀態。滅菌結束後，即完成 1 L 不含尿素培養基之配製。



3.2.4 MICP 改良液之配製流程

本研究之改良液配製採三階段進行，以確保菌體在培養過程中能夠逐步適應培養環境，並維持適當的生長條件，以利後續微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 之應用。各階段的操作與調整方式如下所述。

1. 第一階段：改良液 S1 之配製

初始改良液的培養過程於無菌操作環境下進行，首先取自 -80 °C 冷凍保存之 *Bacillus pasteurii* 凍存改良液 1 mL，以微量吸管移入 50 mL 含尿素之液態培養基。為提供穩定的生長環境，培養瓶置於水平震盪機上，以 100 rpm 轉速在室溫下持續培養 24 小時。隨著培養過程的進行，菌體開始增殖，導致培養基由原先的透明狀態逐漸轉為混濁。當菌體密度達到穩定狀態後，測量改良液之光學密度 (OD_{600}) 與 pH 值，以評估改良液生長情形與培養環境的酸鹼變化。此階段的培養條件可確保菌體活性，並為後續改良液培養提供適當的初始濃度。

2. 第二階段：改良液 S2 之配製

在無菌操作台內，取 5 mL S1 改良液移入 50 mL 不含尿素之液態培養基，透過降低尿素濃度以調整菌體生長環境。培養瓶同樣放置於水平震盪機，維持 100 rpm 轉速，於室溫環境下培養 24 小時。培養過程中，菌體持續繁殖，培養基的透明度逐漸降低，顯示菌體密度的增加。培養結束後，進行 OD_{600} 及 pH 值測量，以評估改良液的濃度變化與酸鹼環境的調整狀況。此階段的操作使菌體濃度進一步提高，並適應不同培養基成分，為後續應用提供更穩定的改良液。

3. 第三階段：改良液 S3 之配製

為控制改良液的 pH 值，使其適合應用於 MICP 反應並避免鈣離子與碳酸根離子過早結合於澆灌表面，需進一步調整改良液的組成。此階段將 150 mL S2 改良液移入 850 mL 不含尿素之液態培養基，調整為 15%

體積濃度之改良液，以確保菌體濃度符合實驗需求。混合後，以手動搖晃方式，使改良液與培養基均勻融合。靜置過程中，可觀察到改良液逐漸由透明轉為混濁，顯示菌體已開始適應新環境並持續生長。此階段完成後，測量 OD₆₀₀ 及 pH 值，以確認改良液已達適當條件，可進一步應用於微生物改良工程。

作為碳酸鈣沉澱反應之鈣離子來源，本研究選用工業級氯化鈣 (Calcium Chloride, CaCl₂)，其分子量為 111.1 g/mol，具有良好溶解性與穩定性，可快速釋放鈣離子進行反應，如圖 3-4 所示。本研究中氯化鈣溶液濃度設定為 0.5 M，以確保與碳酸根離子形成沉澱反應時的有效性。

改良液完成培養後，將其用於改良液之配製。本研究改良液由尿素與氯化鈣組成，配製流程為：先量取濃度為 0.5 M 之尿素 (對應質量為 30.03 g) 與氯化鈣 (對應質量為 55.5 g)，分別加入預先配置之培養基中，充分攪拌混合均勻，最後加入 150 mL 經三階段培養完成之 S3 改良液，即可完成 MICP 改良液的製備。該配方適用於各試體改良次數 (0、1、2、3、5 次) 之滲透灌漿作業。



圖 3-4 氯化鈣



3.3 MICP 改良試體製備

本研究依試驗需求，需製備兩種不同規格之微生物誘導碳酸鈣沉澱改良試體，分別用於電腦斷層掃描 (Computed Tomography, CT)、共振柱試驗與酸洗試驗，以探討 MICP 改良效果。

所有試體均以相對密度 50% 之石英砂為基礎材料，並透過不同次數之改良液澆灌 (0、1、2、3、5 次)，搭配不同養護齡期 (7 天、14 天、21 天) 進行處理，以模擬不同改良程度與養護條件下材料性質之變化。後續各節將分別說明不同試驗對應之試體規格與製備流程。

3.3.1 電腦斷層掃描試體製備

X 光 CT 分析所用之試體需適合小體積、高解析掃描，因此採用聚乙烯塑膠 (PE) 製容器，其內徑約 15 mm，高度 42 mm，總容量約為 5 mL (圖 3-5)，足以容納相對密度 50% 之石英砂填料與多次 MICP 改良液澆灌。

製備步驟如下：

- (1) 試體容器與填砂：先將 PE 容器底部以細針刺孔，形成可排水孔洞，使用防水膠帶封閉孔洞，並以自由落體方式將石英砂填入至目標高度，達成相對密度 50%。
- (2) 改良液澆灌與孔洞控制：澆灌次數分別為 0、1、2、3 與 5 次。每次澆灌前，先打開底部孔洞，排出前次改良液，以防止養護液殘留干擾後續反應。排除完成後，使用防水膠帶封閉孔洞，再進行新一輪改良液澆灌。
- (3) 澆灌方式與養護：每次澆灌均從試體頂部緩慢注入改良液，使其以重力滲透方式穿過砂層，並控制滲流均勻，以避免局部集中的碳酸鈣沉澱現象。每次改良後靜置養護 48 小時，進行下一輪澆灌前皆重複前述排液與密封步驟。

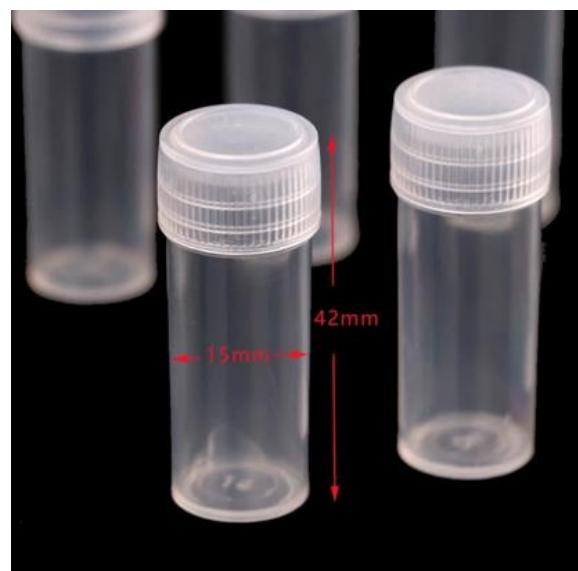
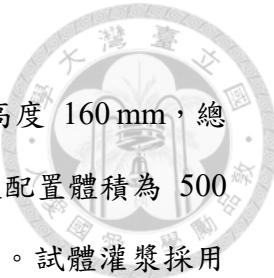


圖 3-5CT 試體容器



3.3.2 共振柱試體製備

共振柱試體目標高度為 15 cm，試體模具內徑為 70 mm，高度 160 mm，總體積約為 615.752 cm^3 ，實際填置試體高度控制於 15 cm。改良液配置體積為 500 mL，每次澆灌後均進行七日以上之養護，養護條件為室溫靜置。試體灌漿採用低壓滲透方式進行，並使用以下設備輔助實驗流程：

試驗儀器與設備：

- (1) **壓力系統 (Pressure System)**：灌漿過程中提供目標壓力值，使改良漿液能有效地滲透到試體內部 (圖 3-6)。
- (2) **試體模具 1_鋁合金分裂模 (Specimen Mold)**: 用於提供未改良土壤之圍束力，並且模具應具備足夠的勁度，防止試體在灌漿時，因為輸入壓力而發生土體變形，其模具內直徑為 70 mm、高度 160 mm，其模具的體積為 615.752 cm^3 (圖 3-7)。
- (3) **試體模具 2_壓克力模 (Acrylic Mold)**：壓克力模的透明設計可更清晰地觀察改良液的滲透路徑，同時，其勁度亦足以防止試體在灌漿過程中因輸入壓力而發生變形。模具的內部尺寸與鋁合金分裂模相同，直徑 70 mm，高度 160 mm，體積同樣為 615.752 cm^3 (圖 3-8)。
- (4) **灌漿系統 (Grouting System)**：灌漿系統確保試體在灌漿前達到充分的飽和狀態，以模擬實際條件下的灌漿效果。該系統設計旨在準確控制漿液的注入速率與壓力，從而實現改良過程的高效性與可控性 (圖 3-9)。
- (5) **頂土器**：頂土器是一種將試體從模具中脫出的器具。其設計特點是能夠在不損壞試體結構的情況下，均勻施加推力，輕鬆地將試體從模具中分離，確保試體的完整性與後續實驗的準確性 (圖 3-10)。



試驗置備：

- (1) 準備試體：首先，量測試體模具之內徑與高度，並計算模具內部 15 cm 高試體的體積。根據計算結果，將所需的石英砂均勻分裝成五袋空塑膠袋。為防止拆模時試體剝落，在模具內部鋪上一層投影片並在內部上油。
- (2) 試體填置：在模具底部鋪上一層濾紙，接著分五層使用漏斗以自由落體方式填置試體，確保每層填置過程中試體的每一部分均勻分布相同的石英砂量。每層填置後，整平試體表面，並以三點量測法量測當前試體高度。若試體高度高於目標高度，則使用夯垂輕輕夯實，以確保試體符合目標相對密度 50%。完成五層填置後，在試體表面放置另一張濾紙，以防止後續 MICP 改良液澆灌時造成的表面沖蝕，並有效控制澆灌流速。最後，量秤填置完成後試體的總重量及塑膠袋中剩餘的石英砂重量，計算填置過程中的石英砂損失，並由此計算最終的乾土單位重。
- (3) 準備改良液：首先量取濃度為 0.5 M 之尿素與氯化鈣，分別對應質量為尿素 30.03 g、氯化鈣 55.5 g。將上述化學試劑加入預先配製之培養基中，並充分攪拌使其均勻溶解，最後加入 150 mL 改良液，完成改良液之配製。
- (4) 試體飽和：使用灌漿系統對模具內的砂土通水飽和。灌漿系統與模具下端的閥連接，將除氣水通入模具中，保持上端閥打開，使砂土內的空氣能被排出。當通水至上端閥的管線無氣泡出現時，視為飽和完成。使砂土先飽和的目的是在灌漿時減少砂土顆粒之間的孔隙，從而提高漿液替代孔隙內水分的效果。
- (5) 調整灌漿壓力：壓力系統調整至 5 kPa，並將壓力系統連接到灌漿系統。讓灌漿材料透過壓力輸送進入試體模具中的試體。
- (6) 灌漿過程：觀察是否有改良液從試體的另一端流出，以確認低壓滲透灌漿(圖 3-11)。



試體脫模：

- (1) 將模具上下蓋拆除並移置頂土器中，在試體下方墊一塊與模具尺寸相符的墊塊（圖 3-12）。
- (2) 將頂土器上下鉗對齊試體模具並調整水平，以確保頂出試體的完整性。
- (3) 開始進行頂土操作，當頂土塊的長度不夠時，暫停操作並打開油門，將第二塊頂土塊放置於底部，之後持續頂土，直到試體完整取出（圖 3-13）。



圖 3-6 壓力系統



圖 3-7 鋁合金分裂模



圖 3-8 壓克力模



圖 3-9 灌漿系統



圖 3-10 頂土器



鋁合金分裂模

壓克力模

圖 3-11 灌漿過程圖



圖 3-12 墊塊

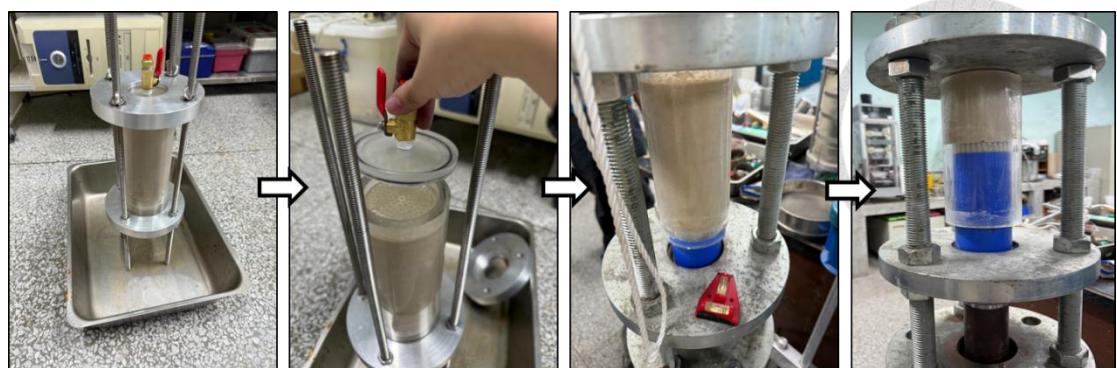


圖 3-13 頂土過程

3.4 碳酸鈣含量檢測

3.4.1 酸洗試驗

本研究之酸洗試驗旨在探討經 MICP 改良後試體內碳酸鈣的沉澱量，藉此評估試體的膠結效果，並進一步分析其均勻性。試驗同時檢驗透過灌漿設備製備試體的均勻性，相關試體灌漿流程詳見 3.3 節。

試體取樣後，利用刮刀將試體均分為上、中、下三等份，每一等份再細分為中間與外圈，總計六個部分，並分別置入不鏽鋼分裝皿中（如圖 3-14 所示）。隨後，試體於 110°C 之烘箱內乾燥 24 小時。烘乾後，各部分試體均分別裝入塑膠袋中備用，以確保其水分含量一致，避免環境因素對試驗結果的影響。

本試驗透過酸洗法來測定試體的碳酸鈣含量，利用其與稀鹽酸的化學反應特性，即碳酸鈣與 4 M 稀鹽酸水溶液反應後，產生氯化鈣、水及二氧化碳氣體，二氧化碳的逸散將導致試體重量減少，因此可透過試驗前後重量變化推算碳酸鈣的含量。本研究使用 PP 材質之離心管作為反應容器，便於直接觀察化學反應。

為了分析試體內部的均勻性，試體被劃分為上、中、下三個部分，並於每層隨機取樣 10 g 乾試體，放入離心管中進行酸洗試驗。試驗流程如下：

- (1) 先測量空離心管重量，並置入 10 g 之 MICP 改良試體。
- (2) 配製 4 M 稀鹽酸水溶液。
- (3) 將 10 mL 之 4 M 稀鹽酸水溶液加入離心管內試體中。



- (4) 緊鎖離心管並上下搖動，使稀鹽酸與試體充分混合。
- (5) 反應 24 小時後，以去離子水稀釋經鹽酸處理之試體溶液。
- (6) 建立抽氣過濾系統，包括真空幫浦、緩衝瓶、磁式過濾漏斗、過濾座、抽氣過濾瓶及橡皮管，如圖 3-15 所示。
- (7) 於過濾座上放置已預先測重之濾紙，以防止試體過濾時的顆粒流失。
- (8) 啟動真空幫浦確認抽氣系統正常運作，將稀釋後之試體溶液倒入抽氣過濾瓶，再次加入去離子水至離心管內充分混合，並重複過濾至少 5 次，以確保清洗完全。
- (9) 乾燥前測量濾紙重量，以提高測量精確度。
- (10) 過濾後的濾紙與試體一同置於離心管中，放入 60 °C 烘箱烘乾。
- (11) 烘乾完成後，測量包含濾紙與試體的總重量。
- (12) 計算酸洗試驗前後的重量變化，以求得試體的碳酸鈣含量。



圖 3-14 酸洗試體準備



圖 3-15 抽氣過濾系統

3.4.2 電腦斷層掃描

本節旨在以非破壞性方式觀察微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 改良後試體內部碳酸鈣 (CaCO_3) 結晶之分布特徵，故採用 X-ray 電腦斷層掃描 (Computed Tomography, CT) 技術進行分析。透過電腦斷層掃描，可以取得試體內部的三維結構影像，進一步進行碳酸鈣沉澱空間分布及均勻性評估，彌補傳統破壞性採樣無法全面揭露內部細節的限制 (Duliu, 1999)。

CT 成像的原理為 X 射線通過物質時所產生的衰減作用，主要包括光電吸收 (photoelectric absorption) 與康普頓散射 (Compton scattering) 兩種交互作用 (Curry et al., 1990; Duliu, 1999)。在本研究所使用的 90 kV 掃描能量下，光電效應為主導，其衰減強度與材料之有效原子序 (Z) 呈三次方關係，因此原子序較高的元素對 X 射線有更強吸收能力，對應影像中較高灰階值。而於較高能量時，康普頓散射則與材料電子密度相關 (Curry et al., 1990)。

本研究所分析之試體中，碳酸鈣 (CaCO_3) 含有原子序為 20 的鈣 (Ca) 元素，而石英砂 (SiO_2) 則含有原子序為 14 的矽 (Si) 元素。加上碳酸鈣的密度 (2.71 g/cm^3) 略高於石英砂 (2.66 g/cm^3)，使得兩者在 CT 影像中呈現出可辨識的灰階差異。基於此物理特性，本研究得以藉由影像中灰階值的分布來區分不同材料。

本研究之 CT 掃描與影像分析流程如下所述。首先，試體掃描於國立臺灣大學地球科學系 ECHO 實驗室進行，使用 Geotek Rotating X-ray CT 系統 (RXCT)，並將試體封裝於 PVC 管內以避免掃描過程中結構變形。掃描設定包括 X-ray 電壓 90 kV 、電流 $450 \mu\text{A}$ ，像素尺寸為 $22.55 \mu\text{m}$ ，如表 3-2 所示。掃描完成後，使用 Geotek 專屬軟體將數據重建為 16-bit TIFF 格式切片影像，灰階值範圍設定於 0 至 65535 之間。本研究重建所得之三維影像為等長體素 (isotropic voxel)，其體素邊長為 $22.55 \mu\text{m}$ ，對應於試體 Z 軸總高度約 42 mm ，因此共獲得約 1863 張連續切片。此高解析度切片堆疊提供後續影像二值化與三維重建之基礎，使碳酸鈣沉澱區域之空間分布與均勻性得以非破壞性地觀察與量化分析。

影像分析階段，首先於純砂區域與明顯膠結區域選取多個影像分析區域 (Region of Interest, ROI)，並使用 ORS Dragonfly 軟體進行灰階統計，結果顯示純砂平均灰階值約為 15000。此外，另製備純碳酸鈣試體進行 CT 掃描，作為單一成分對照，其初步分析結果顯示灰階值約為 18800 至 19000 間，明顯高於純砂區域。後續將依該結果設定灰階值閾限定義為碳酸鈣沉澱區域，進行二值化處理後，再進行 2D 切片與 3D 重建，視覺化呈現沉澱分布，並比較不同改良次數之空間差異。

為評估試體中碳酸鈣的沉澱程度，考量酸洗試驗所得數據係以質量為基準，故本研究換算為質量鈣化率，以利與酸洗實驗結果進行直接比較。本研究使用電腦斷層掃描影像中所提供的體積百分比資料進行後續定量分析，主要計算各試體中矽與碳酸鈣之質量。計算流程分為三個步驟，說明如下：

首先，依據 CT 分割後所取得的砂與碳酸鈣體積百分比（以 ROI 為基礎），可計算其實際體積如下：

$$V_{\text{Sand}} = V_{\text{total}} \times \frac{\text{Sand} (\%)}{100} \quad (3.3)$$

$$V_{\text{CaCO}_3} = V_{\text{total}} \times \frac{\text{CaCO}_3 (\%)}{100} \quad (3.4)$$

其中， V_{total} 為 CT 軟體所選取之影像分析區域內的總體積。

再者，利用已知材料密度進行質量換算。石英砂密度採用 2.66 g/cm^3 ，碳酸鈣密度採用 2.71 g/cm^3 ：

$$M_{\text{Sand}} = V_{\text{Sand}} \times \rho_{\text{Sand}} \quad (3.5)$$

$$M_{\text{CaCO}_3} = V_{\text{CaCO}_3} \times \rho_{\text{CaCO}_3} \quad (3.6)$$

最後，為最後，為標準化試體間的比較基礎，將碳酸鈣質量轉換為每 10 克試體所含之碳酸鈣質量，計算式如下：R

$$\text{CaCO}_3 (\text{g}/10 \text{ g sample}) = \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CaCO}_3} + M_{\text{Sand}}} \times 10 \quad (3.7)$$

本研究將此轉換值作為代表性指標，以評估 MICP 改良後實際碳酸鈣沉澱量，並作為與酸洗法對照之依據。

表 3-2CT 掃描參數設定



項目	設定值
Type	Sand
Liner Diameter	25 mm
Source	1105 mm
SDD	789 mm
Detector	255 mm
Pixel size	22.55 μm
Voltage	90 kV
Current	450 μA
Filter	Cu 0.5 mm
Detector Mode	1 × 1
Frame Rate	6 fps



3.4.3 掃描式電子顯微鏡 (SEM)

為觀察微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 後砂土中碳酸鈣晶體於微觀尺度下之分布與膠結形貌，本研究使用【EM022502】型場發射掃描式電子顯微鏡 (Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM) 進行觀察，並輔以能量散射 X 光光譜分析系統 (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) 進行元素組成分析。

觀察所用樣品取自己完成電腦斷層掃描之 MICP 改良試體。樣品經烘乾至恆重後，研磨成細粉將粉末黏附於雙面碳膠帶上，固定於 SEM 載台。掃描過程中針對砂粒表面與粒間接觸區進行重點觀察，以辨識碳酸鈣晶體之形貌特徵與分布情形，並透過 EDS 圖譜確認其主要元素組成。掃描參數如表 3-3 所示，係依粉體樣品性質與觀察需求調整所得。

表 3-3 SEM 操作參數設定

項目	參數值
放大倍率 (Magnification)	×500
加速電壓 (Accelerating Voltage)	10.0 kV
掃描模式 (Imaging Mode)	LEI
工作距離 (Working Distance)	16.8 mm
尺度尺 (Scale Bar)	10 μm



3.5 共振柱試驗

3.5.1 設備介紹

本研究使用了由英國 GDS Instruments 設計的固定底端—自由頂端共振柱儀器（圖 3-16），此儀器主要用於測量土壤在小應變範圍內的動態性質，包括剪力模數與阻尼比等參數。設備的具體配製如圖所示，其壓力室內的主要部件則以示意圖形式顯示於圖中。以下將逐一介紹該系統的關鍵設備與其功能：

- (1) GDS RCA 控制盒系統：GDS RCA 控制盒系統由三個主要組件構成，包括串行接口 (Serial Pad)、功率放大器 (Power Amplifier) 以及 RCA 控制盒 v2 (圖 3-17)。該系統的主要功能是輸出電壓以驅動整個驅動系統，從而控制共振柱的振動頻率與幅度。此外，該系統能放大輸出電壓，提高信號的功率，確保驅動系統可以產生足夠的扭轉力，進一步滿足試驗需求。同時，控制盒系統還能實時接收並處理試驗中的各類數據，包括壓力、LVDT 變形量及共振頻率測試結果，並將這些數據傳送至控制電腦，以實現對試驗過程的精確監控與管理。
- (2) 氣壓控制器 (Pneumatic Controller)：圍壓控制裝置 (圖 3-18) 主要用於調節壓力室內的圍壓。該裝置能提供最高達 1 MPa 的氣態圍壓，確保壓力室內始終保持穩定的受壓條件。這一功能在模擬土層深部環境時尤為重要，可以有效再現試樣在實際工程條件下的壓應力狀態。
- (3) 壓力體積控制系統 (Pressure/Volume Controller)：壓力體積控制系統 (圖 3-19) 是試驗中的核心裝置，可提供的最大壓力為 1 MPa，以滿足試樣完全飽和的需求。該系統總容量為 200,000 mm³，試驗所需的最大壓力為 800 kPa，遠低於系統的壓力上限，完全符合使用標準。該裝置通過水來施加反水壓，並能精確檢測試樣在飽和和壓密過程中的水量體積變化。此外，該裝置同時具備壓力傳感與體積變化監測功能，能有效監測試樣內外的水流量，判斷水分的流動方向與速率，並記錄孔隙水壓隨時間或試驗條件的變化。

- (4) 加速度計放大器 (Accelerometer charge amplifier)：加速度計放大器 (圖 3-20) 能夠將加速度計的信號放大百倍或千倍，以顯著提高剪應變測量的精度。放大倍數可根據剪應變的大小進行選擇，當記錄較大剪應變時，選擇百倍放大即可滿足需求；而在測量極小剪應變時，則需要使用千倍放大，以確保在小應變條件下仍能獲取準確數據。
- (5) 三軸室 (Triaxial Cell)：本試驗所使用之三軸室 (圖 3-21) 是一個密閉的高壓裝置，能承受最高 3.5 MPa 的氣態圍壓。三軸室內部結構設計精密，能夠模擬深層土壤環境中的壓力條件，為試樣提供穩定且受控的外部壓力環境。
- (6) 電磁驅動系統 (Electromagnetic drive system)：電磁驅動系統 (圖 3-22) 由一個四臂轉子構成，每個臂的末端均安裝有永久磁鐵，磁鐵周圍被一對線圈包圍。該系統利用電磁感應的原理，當線圈通電後會產生電磁場，推動磁鐵旋轉，從而對試樣施加扭矩。這一旋轉運動進一步引發試樣的扭轉振動，使其在扭剪條件下運動，從而模擬土壤在實際應力條件下的剪切行為。
- (7) 加速度計 (Accelerometer)：加速度計 (圖 3-23) 安裝於轉子的側面，用於記錄試樣在振動過程中的加速度數據並用於計算試樣的剪切模數與阻尼比。
- (8) LVDT (Linear Variable Differential Transformer)：LVDT (圖 3-24) 是一種高精度傳感器，用於測量試樣在整個試驗過程中的垂直變形量。
- (9) 內環壓力室 (Inner Cell)：內環壓力室 (圖 3-25) 是一個壓克力環裝置，圍繞在試樣的外部，在內環與試樣之間加入矽油。該壓力室的功能主要是將氣態圍壓轉換為液壓，並將壓力均勻地施加到試樣上，從而模擬均質的受壓環境。
- (10) 六角支撐柱 (Hex support cylinder)：六角支撐柱 (圖 3-26) 是一個鋼製結構，位於試樣與內環壓力室的外部，主要用於支撐驅動系統的重量，以確保設備在試驗過程中的穩定性。同時，該結構還負責維持線圈的固定高度，避免因試驗中的振動而導致線圈位置發生位移，從而確保試驗條件的一致性和測量數據的準確性。



(11) 壓力計 (Pressure Transducer)：壓力計其可測量的最大孔隙水壓上限為 1 MPa，該感測器會連接三軸試體的其中一個底閥以測量流過的水壓（圖 3-27）。

(12) GDSLAD 控制軟體 (GDSLAD Software)：GDSLAD 控制軟體是由 GDS Instruments 設計的專用測試系統軟體包，具備多種功能以支持試驗的全面執行。該軟體包含飽和，用於對試樣飽和過程進行精確的控制與監測，確保試樣在試驗前達到理想的飽和狀態；B 值檢測，用於評估試樣的飽和程度，確認試驗條件符合標準要求；壓密，負責控制試樣的固結壓力與排水條件，模擬土壤在壓密過程中的真實行為；以及動態共振測試模組，通過共振頻率掃描記錄剪應變與阻尼比數據。

3.5.2 試驗步驟

本研究之共振柱試驗係依據 ASTM D4015-21 所訂定之標準方法進行，透過固定基座式共振柱儀測得試體之剪力模數與阻尼比，並於不同剪應變範圍內記錄其動態反應行為 (ASTM, 2021)。

試驗前置作業：

- (1) 製作除氣水：將水注入水庫，確保水位不超過臨界標示(如圖 3-28 紅線所標示)，啟動真空抽氣機和水庫內的馬達，通過水的波動排除水中的空氣，完成除氣過程約需 1 小時。除氣完成後，將處理過的水轉移至動態三軸試驗儀器的水庫中備用。
- (2) 橡皮膜檢測與測量：在試驗開始前，需確認橡皮膜無任何破損，以防止圍壓通過裂縫滲入試樣內部，導致孔隙水壓升高甚至試樣變形崩塌。檢測橡皮膜是否完好可分為兩步：首先，手動撐開橡皮膜置於光源下觀察其兩端是否有透光現象；其次，將橡皮膜充滿水，握住兩端輕壓，檢查是否有水柱噴出。若發現透光或水柱現象，則需立即更換橡皮膜。此外，使用儀器測量橡皮膜的厚度，取前、中、後三處厚度的平均值作為橡皮膜厚度。

(3) 器材清潔：確保三軸試驗底座（圖 3-29）、橡皮膜、兩塊夾土鉗、四條橡皮筋 O-ring（圖 3-30），以及兩條橡皮帶完全乾淨，無水無砂。底座以外的器材可以使用清水清洗後，再經超音波清洗機（圖 3-31）進行深層清潔，特別是夾土鉗需進行至少兩次超音波震盪清洗，因為研究中大多使用細顆粒材料，這些顆粒易堵塞夾土鉗，降低其透水性。

試體上機步驟：

- (1) 儀器量測：先量測上下夾土鉗與底座及兩張濾紙高度。
- (2) 試體量測：將改良試體脫模後，量測重量、高度與直徑，可得改良試體實際單位重。
- (3) 試體轉移：在進行試體轉移前，需先將底座的通路充滿水，並選用適合試體使用之夾土鉗（圖 3-32），將夾土鉗和濾紙浸泡在水中，鎖在底座與頂蓋，在底座周圍圖上絕緣，以避免過多空氣在通水飽和階段進入試體內部。而後，小心地將試體放置於底座上，再覆蓋頂蓋。接著，使用真空抽氣機吸住橡皮膜，將橡皮膜平穩地套入試體外部，緩慢關閉真空抽氣機，讓橡皮膜與試體表面貼合。隨後，用一粗一細的四條束制橡皮筋 O-ring 和兩條橡皮帶將橡皮膜牢牢固定（圖 3-33）。
- (4) 安裝試體：放上六角支撐柱並鎖於三軸室底鉗，將頂蓋兩側之管線穿過內環壓力室再鎖上頂蓋，以免安裝內環壓力室時壓到管線（圖 3-34）。
- (5) 試體自立：將真空抽氣瓶連接至三軸底座的頂閥，並將抽氣機調整至 -20 kPa 的真空壓力後開啟閥門，以建立試體的自立性。在操作過程中需密切觀察真空抽氣瓶內是否有氣泡持續產生，若出現持續氣泡現象，應立即檢查試體是否存在洩漏情況並進行修正（圖 3-35）。
- (6) 儀器架設：將含有合金電磁鐵的驅動器安裝到六角支撐柱並與試體相連，確保驅動器與頂蓋鎖定緊密，使試體與驅動器結合為一體。調整驅動器的水平，使合金電磁鐵的位置位於驅動線圈的中心。調整完成後，將驅動盤穩固地鎖

定在六角支撐柱上，同時接上驅動器的訊號線。在接上加速度計後，需先進行粗略檢查，確認其是否能產生共振，確定無誤後再進行最終安裝，完成後如圖 3-36 所示。將含有近接感測器的平盤放置於驅動盤上，確認近接感測器與反射板無接觸，隨後將平盤鎖定在驅動盤上，確保感測器的位置精確對齊至程式內的歸零位置。接著連接 LVDT 的訊號線，並調整 LVDT 的位置，鎖定平盤後進行 LVDT 的歸零操作。完成上述所有安裝並檢查無誤後，蓋上三軸室（圖 3-37）。

- (7) 壓力轉換：將氣壓逐步以每階 10 kPa 的方式加壓，使圍壓穩定上升至 20 kPa。同時，逐步以每階 10 kPa 的方式降低真空壓力，逐漸解除真空吸力，直至真空抽氣瓶內的壓力回復至大氣壓。

試體飽和：

在此階段，包含通水、反水壓加壓以及檢測 B 值三個主要步驟，旨在確保試體達到目標飽和度後進入壓密階段。

- (1) 通水：通水過程由試體底部以每分鐘 8 至 10 mL 的流量通入除氣水，直至頂閥持續流出水為止。為確保孔隙水壓維持在 10 kPa 以下，需以 10 秒的頻率反覆開關兩個底閥並搭配頂閥操作，使除氣水通過不同路徑進入試體，確保所有孔隙均被水填充。
- (2) 反水壓加壓：將頂閥與其中一個底閥連接至壓力體積控制系統。連接前，需向系統加入約四顆體積的除氣水並清除管線中的氣泡，以避免空氣進入試體影響飽和度。連接完成後，利用 GDSLAB 軟體設置試體基本參數，並設定目標反水壓 (Back Pressure) 及達到目標所需的時間 (圖 3-38)。同時，在反水壓逐步上升過程中，圍壓 (Cell Pressure) 也需同步提升以維持最初設定的 20 kPa 有效圍壓。通過體積控制系統的反水壓體積數據，可以觀察試體的吸水速率，若吸水過快導致試體可能受到過多擾動，則應適當延長達到目標反水壓的時間以減少對試體的影響。

- (3) 檢測 B 值：透過檢測 B 值以確認試體的飽和程度。B 值是圍壓差與孔隙水壓 (Pore Pressure) 差的比值，當 B 值大於 0.95 時，試體可視為飽和，進入壓密階段。檢測過程需關閉所有三軸閥門，待孔隙水壓穩定後記錄此時的圍壓與孔隙水壓，然後輸入 10 kPa 的圍壓增量，再次待穩定後記錄數據，直至滿足飽和條件。

壓密：

利用 GDS 軟體設定試體的反水壓與圍壓，調整至目標有效圍壓 100 kPa (圖 3-39)。在此過程中，同時開啟兩個排水閥，讓試體在設定條件下進行壓密操作。當壓力體積控制系統顯示試體的體積不再排出水時，即可認為壓密階段已完成，同時進行低振幅試驗。

動態振動試驗：

在本研究的最終測試階段，進行動態振動測試，採用扭轉模式來探討試樣的動態性質。

- (1) 啟用軟體並設定參數：啟動 GDS 軟體並選擇扭轉模式，設定輸出電壓的振幅範圍為 0.001 V 至 1 V，操作時從最小電壓值開始。此操作旨在確保測試過程中獲得對應於小剪應變的最大剪力模數，為後續測試提供準確的基礎。
- (2) 進行粗略掃描：設置初始頻率範圍為 30 Hz 至 150 Hz，系統以每隔 5 Hz 的間隔激發一次振動 (圖 3-40)。粗略掃描後曲線如圖 3-41 所示。這一過程是為了快速確定試樣共振頻率的大致範圍，從而縮小後續精細掃描的目標範圍。
- (3) 進行精細掃描：根據粗略掃描的結果，將大致確定的共振頻率範圍自動輸入至軟體中。設定精細掃描的頻率範圍參數及頻率遞增值 (圖 3-42)，進行更高解析度的掃描，從而精確測定試樣的共振頻率。共振頻率是試樣在峰值輸出電壓時的振動頻率。

- (4) 計算剪應變：根據共振頻率下的峰值輸出電壓，計算試樣的剪應變。此計算基於試樣在峰值輸出電壓下的扭轉角度，而扭轉角度則由驅動系統的加速度測量數據推算得出。
- (5) 進行阻尼測試：利用共振測試所得的振幅與頻率數據進行自由振動測試（圖3-43）。在此過程中，完全關閉驅動系統，讓試樣自由振動，並記錄其振動數據。根據振幅的對數遞減率計算阻尼比，對數遞減率為振幅對振動次數的斜率。
- (6) 完成動態特性測試：在完成共振測試與阻尼測試後，逐步增加輸出電壓並重複上述步驟，最終繪製試樣動態特性的完整曲線，展現其在不同剪應變下的力學行為特徵。

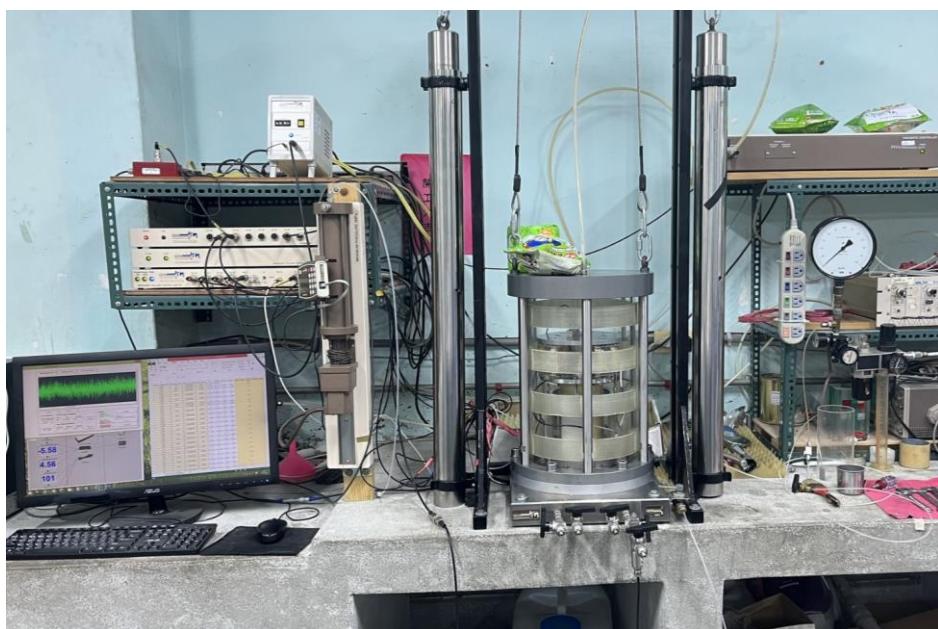


圖 3-16 GDS 設計之固定底端-自由頂端共振柱

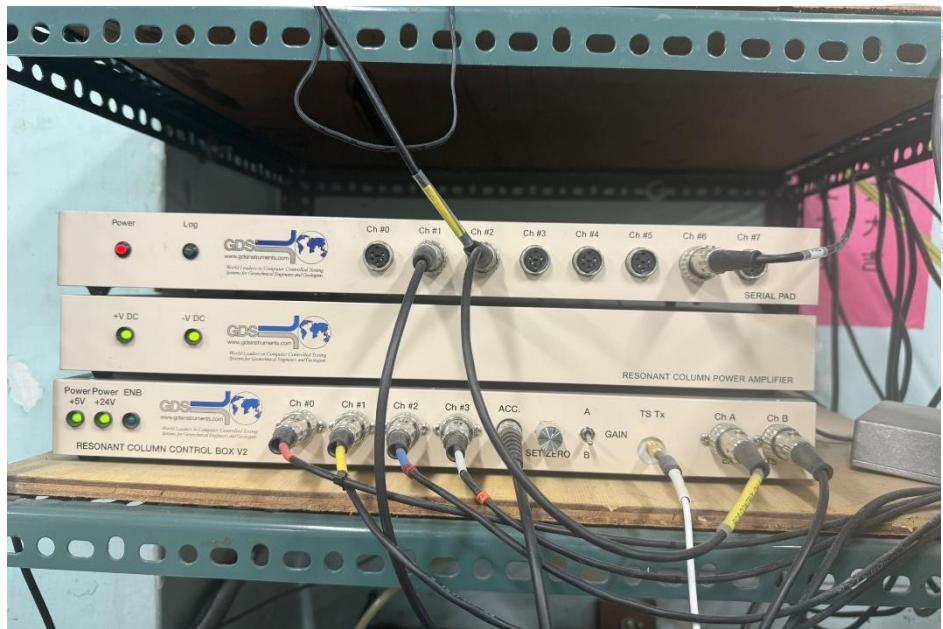


圖 3-17 GDS RCA 控制盒系統



圖 3-18 氣壓控制系統



圖 3-19 壓力體積控制系統



圖 3-20 加速度放大計



圖 3-21 三軸室

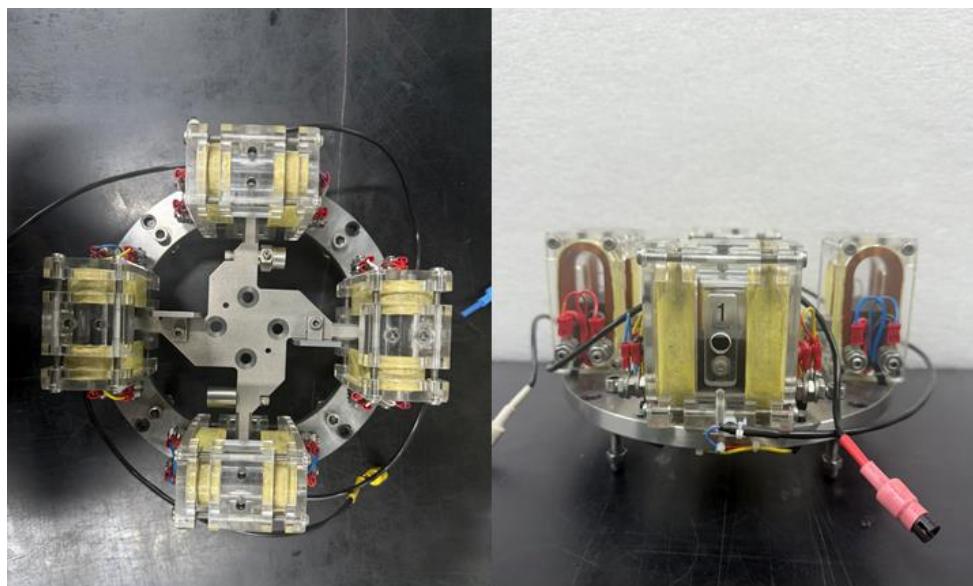


圖 3-22 電磁驅動系統



圖 3-23 加速度計



圖 3-24 LVDT

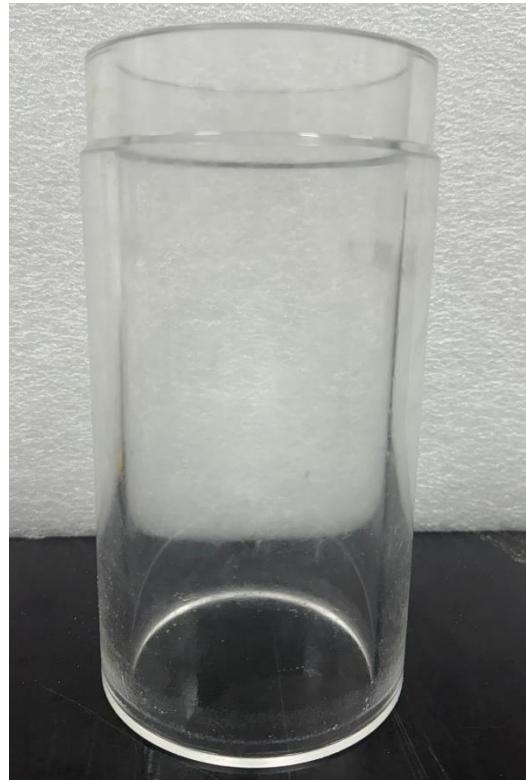


圖 3-25 內環壓力室

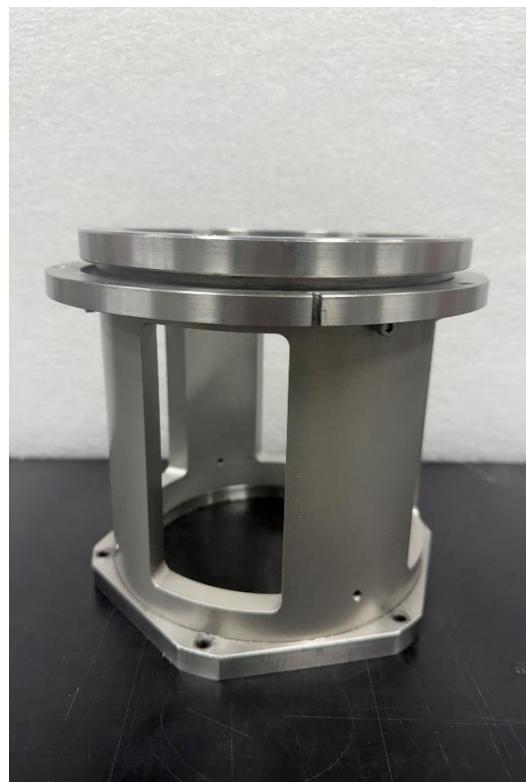


圖 3-26 六角支撐柱



圖 3-27 壓力計



圖 3-28 製作除氣水

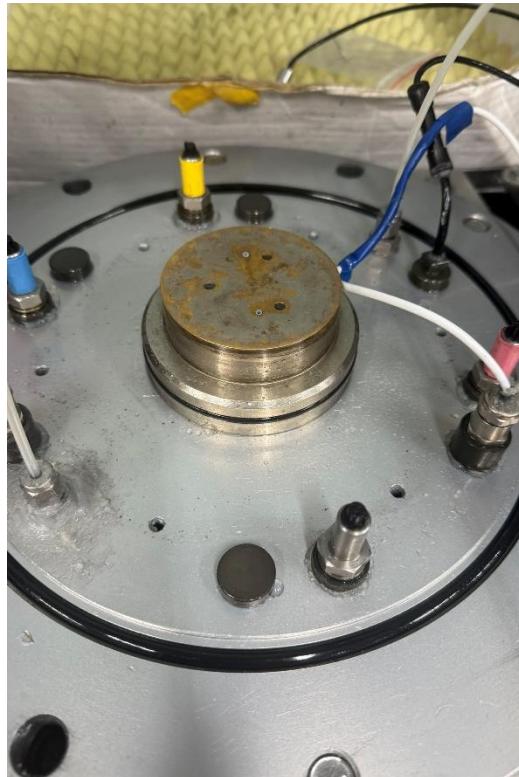


圖 3-29 底座



圖 3-30 O-ring



圖 3-31 超音波清洗機

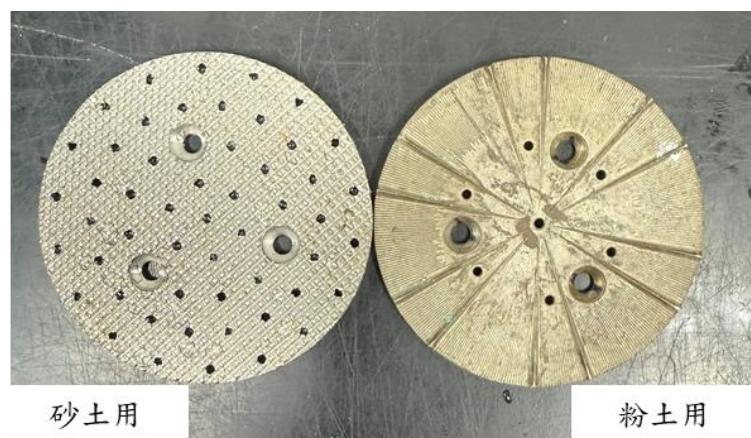


圖 3-32 夾土盤

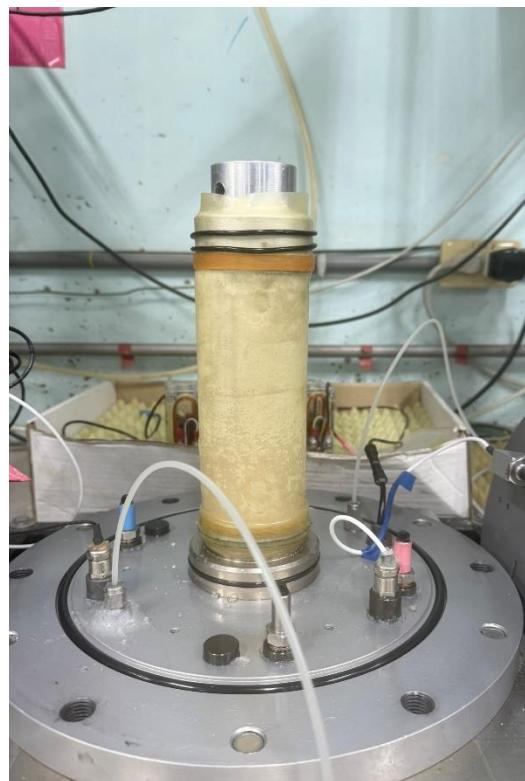


圖 3-33 試體轉移

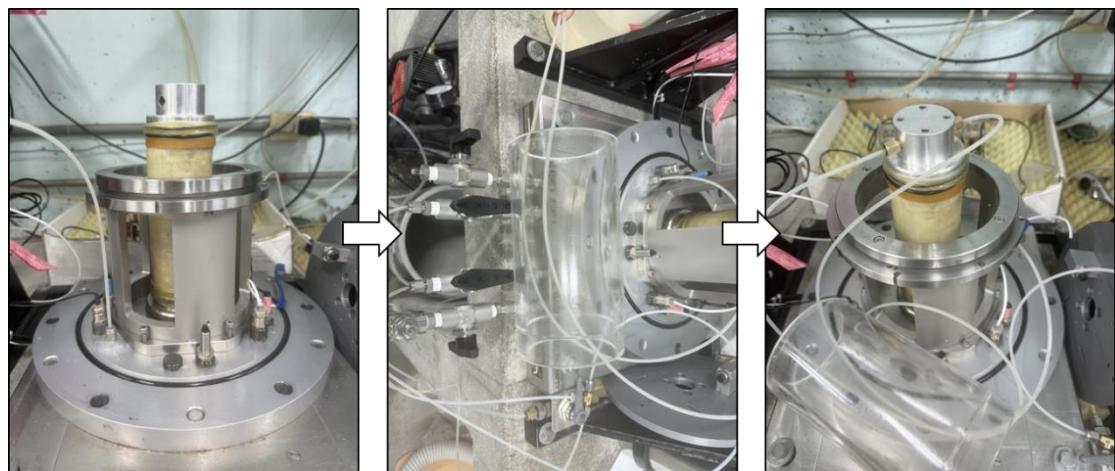


圖 3-34 安裝試體



圖 3-35 試體自立

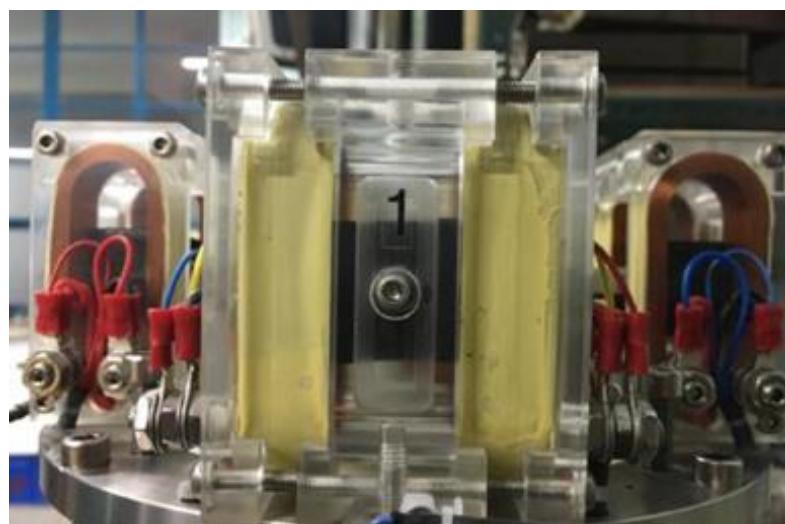


圖 3-36 電磁驅動器調整後樣貌

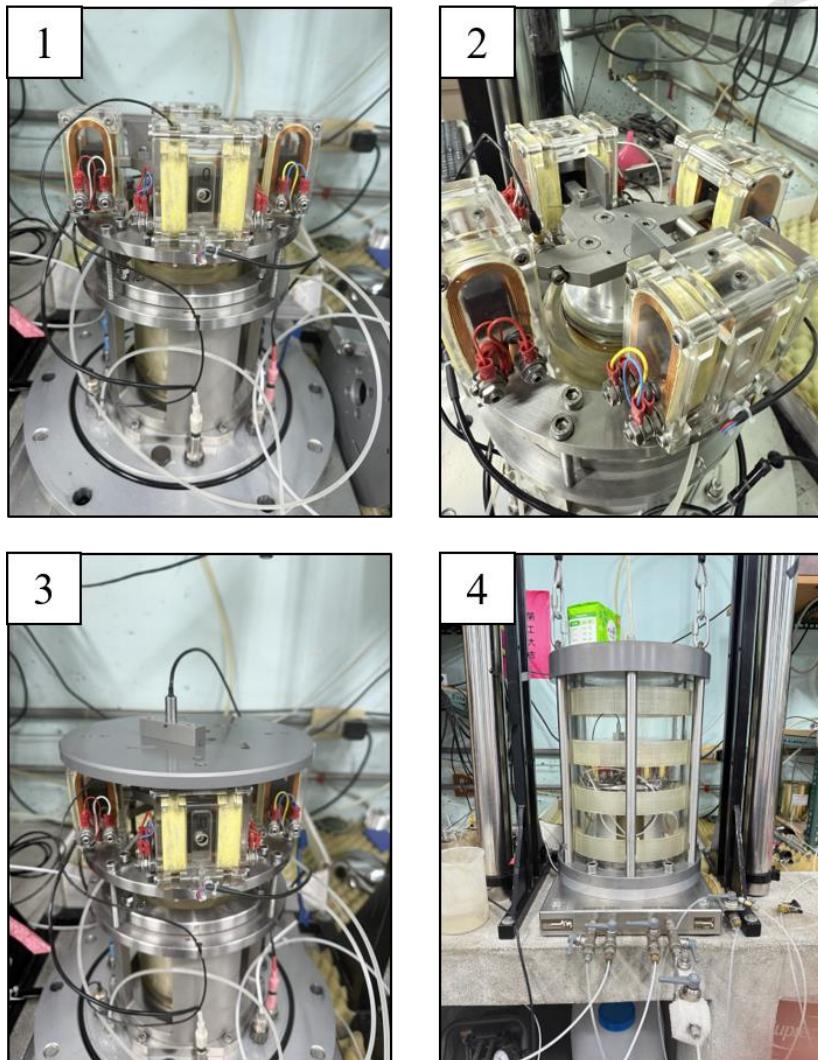


圖 3-37 儀器架設

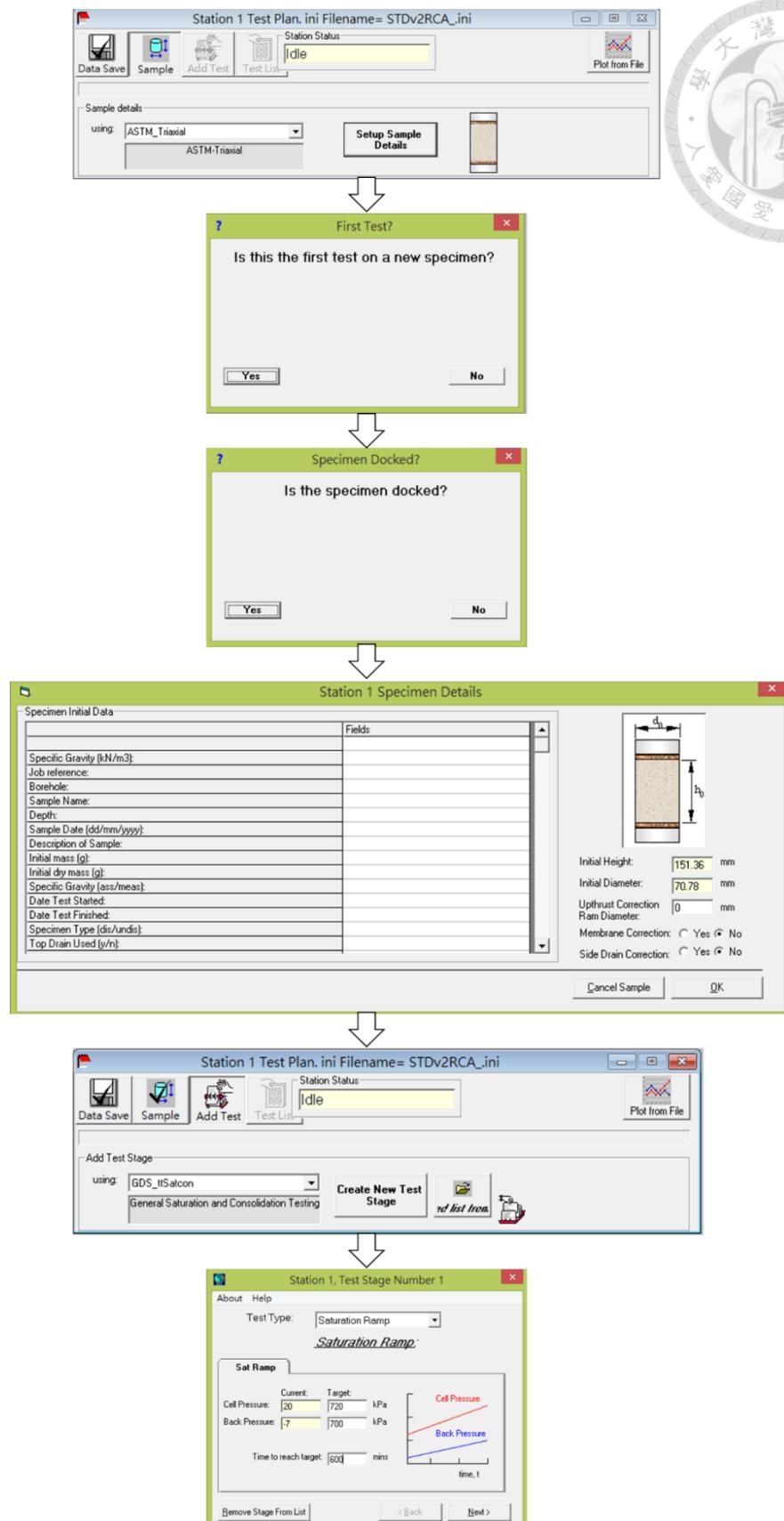


圖 3-38 設置試體基本參數及反水壓加壓



Station 1, Test Stage Number 1

About Help

Test Type: Consolidation

Consolidation:

Consolidation

Current: Target:
Cell Pressure: 729 800 kPa
Back Pressure: 699 700 kPa

Cell Pressure
Back Pressure

time, t

Use current Back Pressure value for target?

Remove Stage From List < Back Next >

Station 1, Test Stage Number 1

About Help

Optional Test Termination Conditions:

End of Saturation Ramp
Stop the test when the saturation ramp is complete

End of Consolidation when volume changes < 5 mm³ in 5 mins
Stop the test if the back volume change is less than the specified rate

Max Skempton B-Value 0.95
After 5 minutes if selected B-value is exceeded the test will stop

Hold Pressures at end of test
At end of test, send a final target pressure (not hold volume)

Maximum Test Length = 60 minutes
Stop the test after 'x' minutes in the current stage

Go to next stage automatically Wait for user interaction

Remove Stage From List < Back Next >

Station 1 Test Plan. ini Filename= STDv2RCA.ini

Data Save Sample Add Test Test List Station Status Stage: 0

Add Test Stage
using: GDS_ttSatcon
General Saturation and Consolidation Testing

Create New Test Stage

Test Plan

Stage	Test Stage Status	Test Type	Save Interval	Timebase
Stage 1	Idle	Consolidation	10	0 - Linear

Save list to file Go to Test

圖 3-39 壓密設置



圖 3-40 掃描過程圖

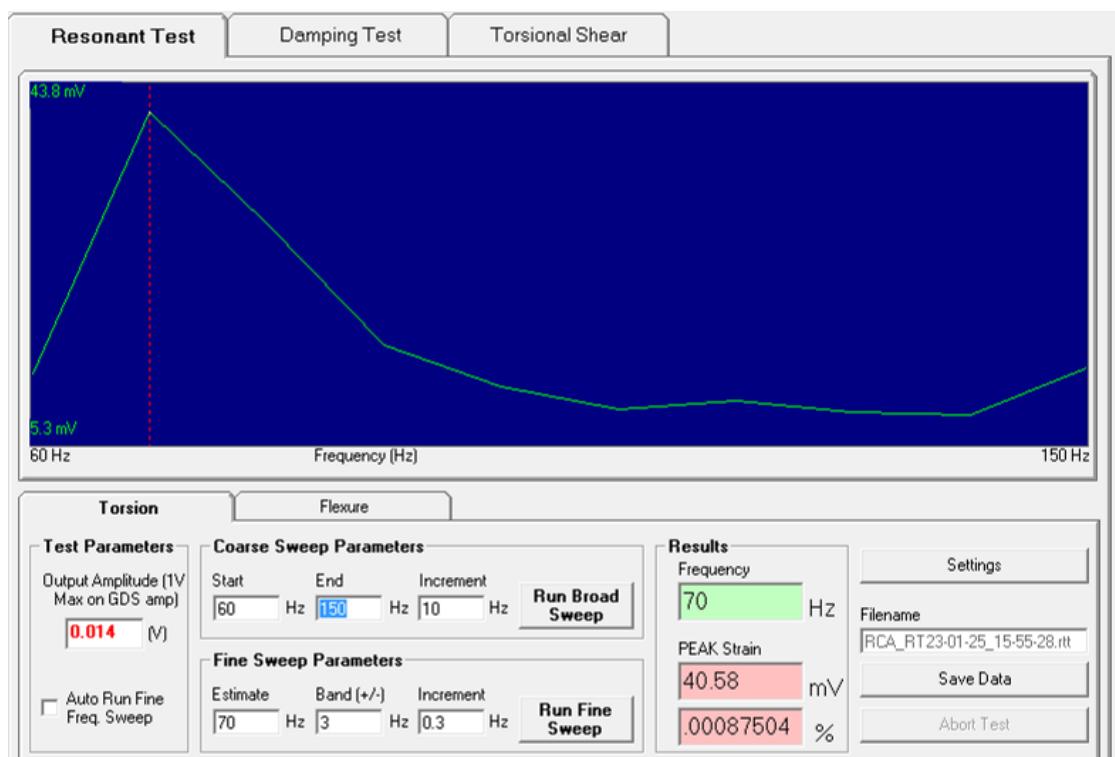


圖 3-41 粗掃曲線

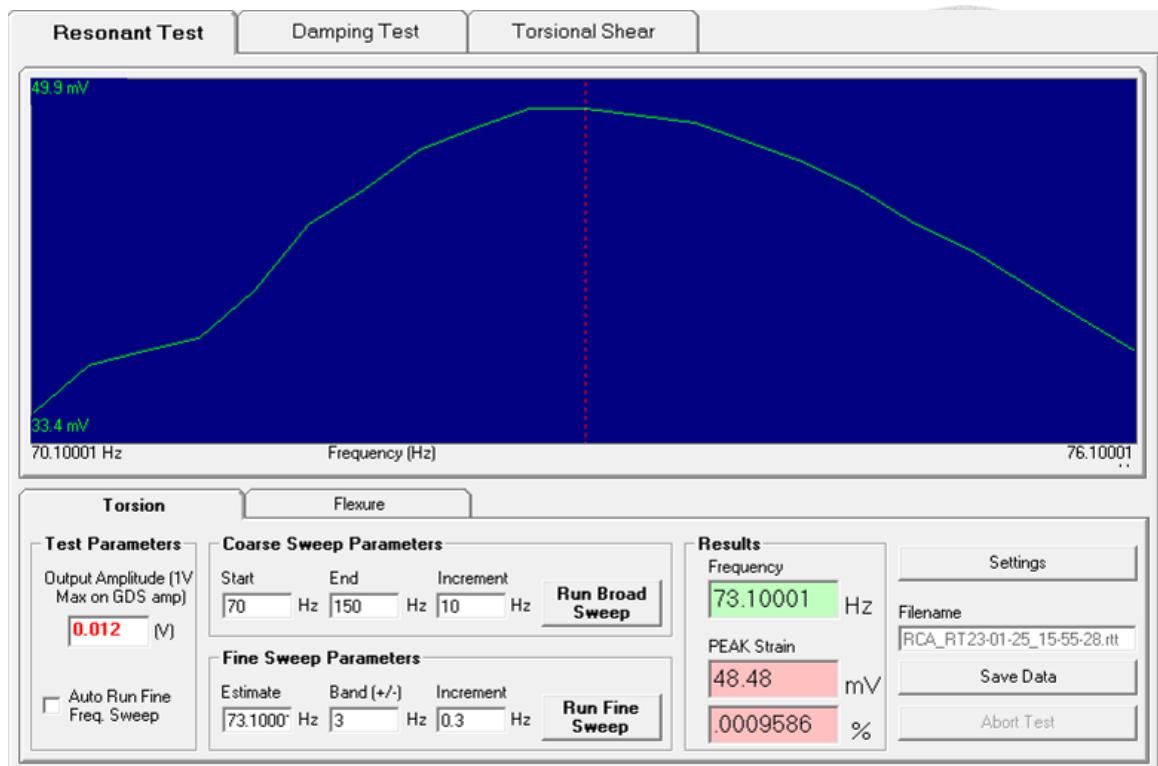


圖 3-42 細掃曲線

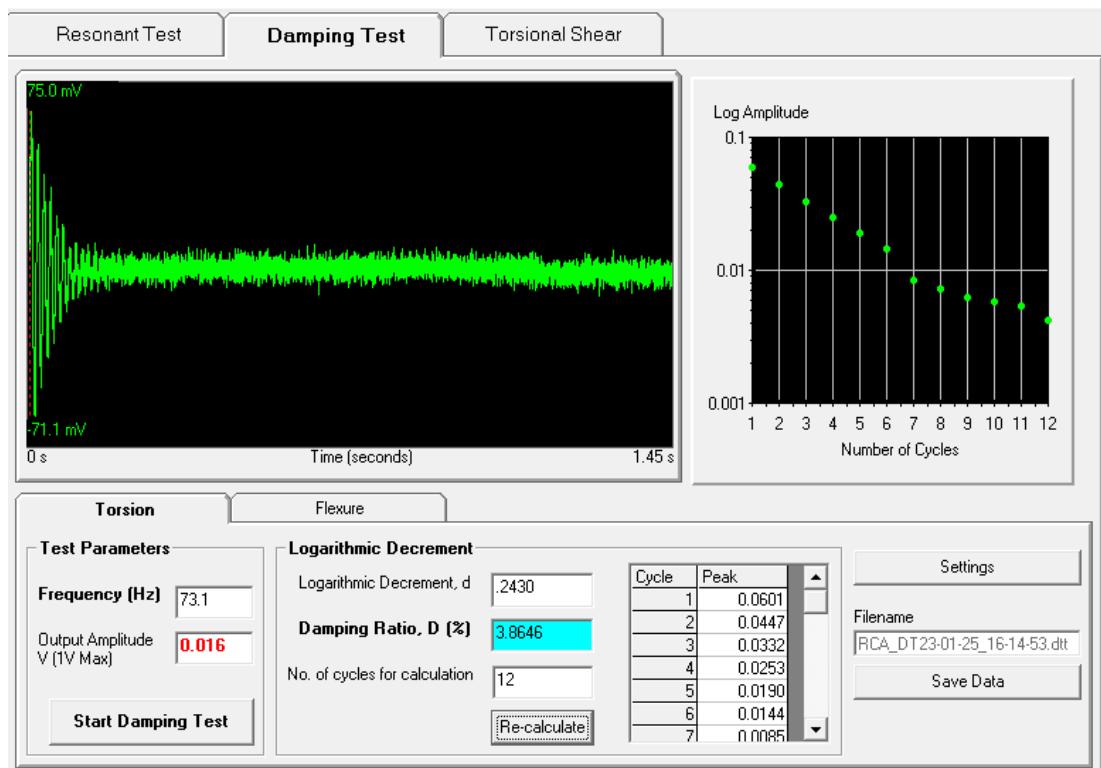


圖 3-43 阻尼比測試

第 4 章 結果與討論



本章將針對微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 改良砂土試體之試驗結果進行整理與討論。第 4.1 節主要透過酸洗試驗、電腦斷層掃描與掃描式電子顯微鏡三種方法，評估碳酸鈣在試體中之沉澱分布與微觀膠結形貌，以探討其空間均勻性與改良效果。酸洗與 CT 分析可提供試體整體及區域性碳酸鈣含量分布，而 SEM 則進一步觀察碳酸鈣晶體於砂粒表面與粒間接觸區之膠結型態與生長特徵。此節內容亦針對不同改良次數所造成之膠結分布變異進行比較，分析其均勻性與可控制性。

第 4.2 節則針對共振柱試驗結果進行分析，探討不同改良次數及養護齡期對試體動態性質之影響。分析內容涵蓋剪力模數與阻尼比之變化趨勢，並比較未改良與改良試體之差異，以評估 MICP 技術對砂土勁度與能量耗散能力的改善效果。同時，亦探討隨養護齡期增加，碳酸鈣結晶對動態行為演化之影響，進一步評估其時間延續性。

為方便後續試驗結果之描述與比較，本文試體統一採用代號系統進行編碼，具體規則如表 4-1 所示。

表 4-1 試體代號說明

代號	含義	說明範例
T	改良次數	T1：改良一次；T2：改良兩次
C	養護齡期（天）	C7：養護 7 天；C14：養護 14 天
S	試體編號	S01、S02、S03
—	未經改良之試體	表示為 pure sand



4.1 改良試體均勻性

MICP 技術應用於地盤改良時，其改良成效受碳酸鈣沉澱之分布均勻性所影響甚鉅。若沉澱不均，將可能導致局部結構鬆散、力學性質差異顯著，進而降低整體穩定性與工程可靠性。因此，評估改良後試體中碳酸鈣的分布狀況，為確認改良品質與機制之關鍵環節。

本節透過三種方法探討試體內部均勻性。第一為酸洗法，藉由分層採樣並測得各位置碳酸鈣含量，量化沉澱分布之差異；第二為電腦斷層掃描，以非破壞方式觀察試體內部碳酸鈣沉澱均勻性；第三為掃描式電子顯微鏡，藉由粉末樣品觀察砂粒表面之碳酸鈣晶體沉澱型態，輔以 EDS 能譜進行元素組成確認。有助於釐清不同改良次數及試體部位對沉澱均勻性之影響，並驗證灌漿控制參數與改良效果間之關聯性。

透過本節分析，得以初步掌握碳酸鈣沉澱之空間分布特徵，作為後續動態性質分析與改良機制討論之基礎。

4.1.1 酸洗試驗結果

為探討不同改良次數與試體空間位置對碳酸鈣沉澱量之影響，本研究針對 MICP 改良後之砂土試體進行酸洗試驗，並記錄各試體於頂部 (Top)、中段 (Middle) 與底部 (Bottom) 三處之碳酸鈣含量。各試體代號組成與含義詳列於表 4-2。

圖 4-1 至圖 4-4 呈現改良一次至五次之試體於不同高度位置的分佈情形，可見碳酸鈣含量隨改良次數增加而顯著上升。在各試體內部的垂直分佈方面，試體頂部、中段及底部之間數值差異大致在 $\pm 0.02 \text{ g}/10 \text{ g sample}$ 以內，反映出 MICP 沉澱在共振前已達一定程度的均勻性。進一步比較不同空間位置之試體表現，整體而言，位於試體中心 (1) 與邊緣 (0) 兩類樣本於各高度位置的碳酸鈣含量變異不大，並未呈現一致性的系統性差異。此結果顯示在本研究所採用之灌漿方式

與施作條件下，無論是中央或邊緣位置，微生物與反應物皆能充分滲透與作用，故改良後之碳酸鈣沉澱分佈可涵蓋整體試體空間，具備良好之均勻性。

圖 4-5 統整不同改良次數試體碳酸鈣含量分佈變化。從圖中可見，隨著改良次數增加，碳酸鈣含量呈現穩定上升趨勢，T1 試體碳酸鈣含量為 $0.186 \text{ g}/10 \text{ g sample}$ ，T2 為 0.261 g ，T3 為 0.376 g ，而 T5 達到最高值 0.548 g 。此結果顯示，MICP 改良次數的提升有助於促進碳酸鈣的生成沉澱，進而提高土體中碳酸鈣含量，代表改良效果的增強。

表 4-2 酸洗試體代號組成與含義說明

代號	含義	說明範例
T	改良次數	T1：改良一次；T2：改良兩次
B1/B0	採樣位置	B1：靠近中心位置，B0：靠近邊緣位置
S	試體編號	S01、S02、S03

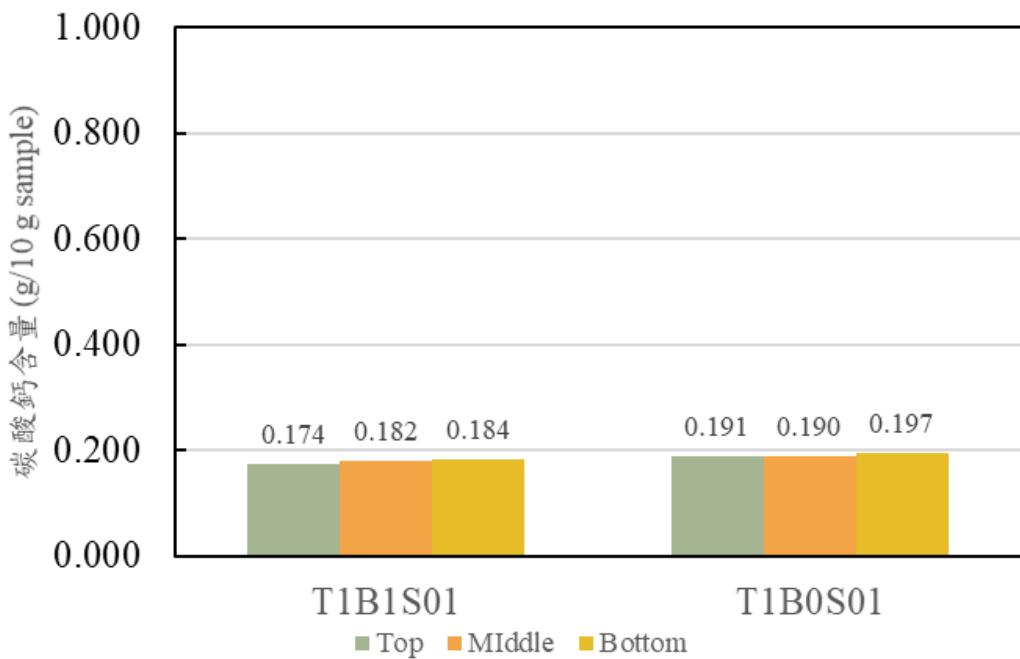


圖 4-1 改良一次共振前試體於不同高度位置之碳酸鈣含量分佈

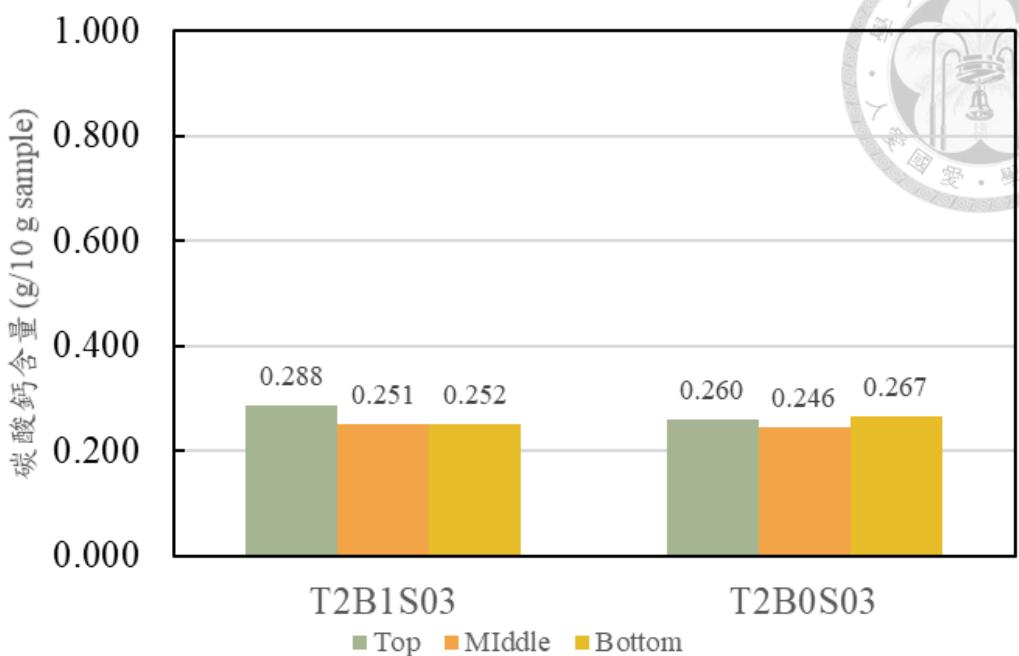


圖 4-2 改良兩次共振前試體於不同高度位置之碳酸鈣含量分佈

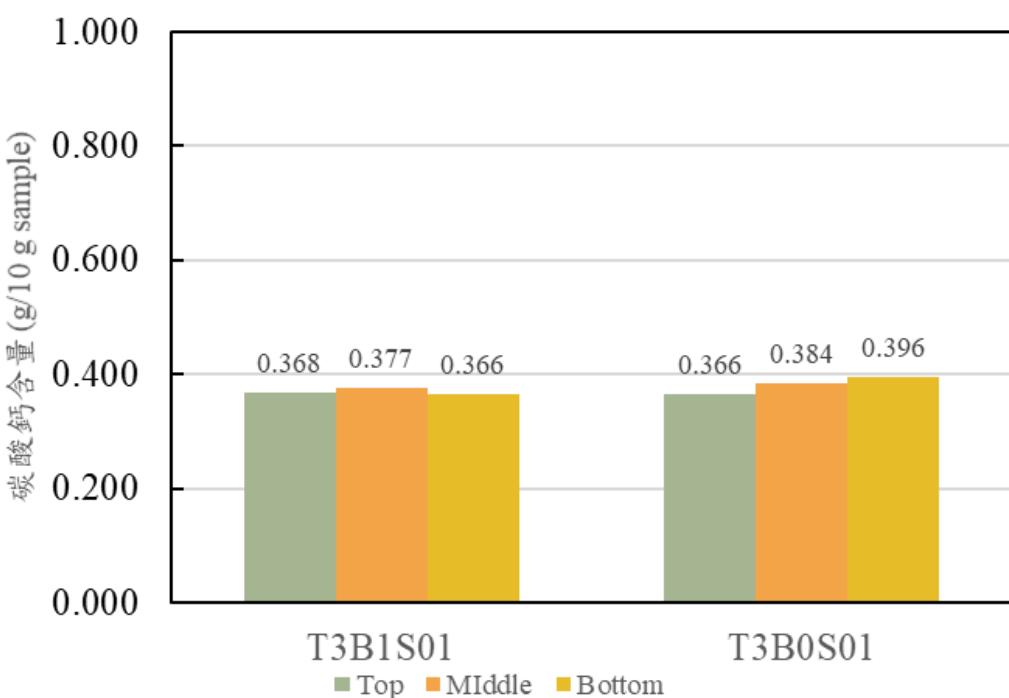


圖 4-3 改良三次共振前試體於不同高度位置之碳酸鈣含量分佈

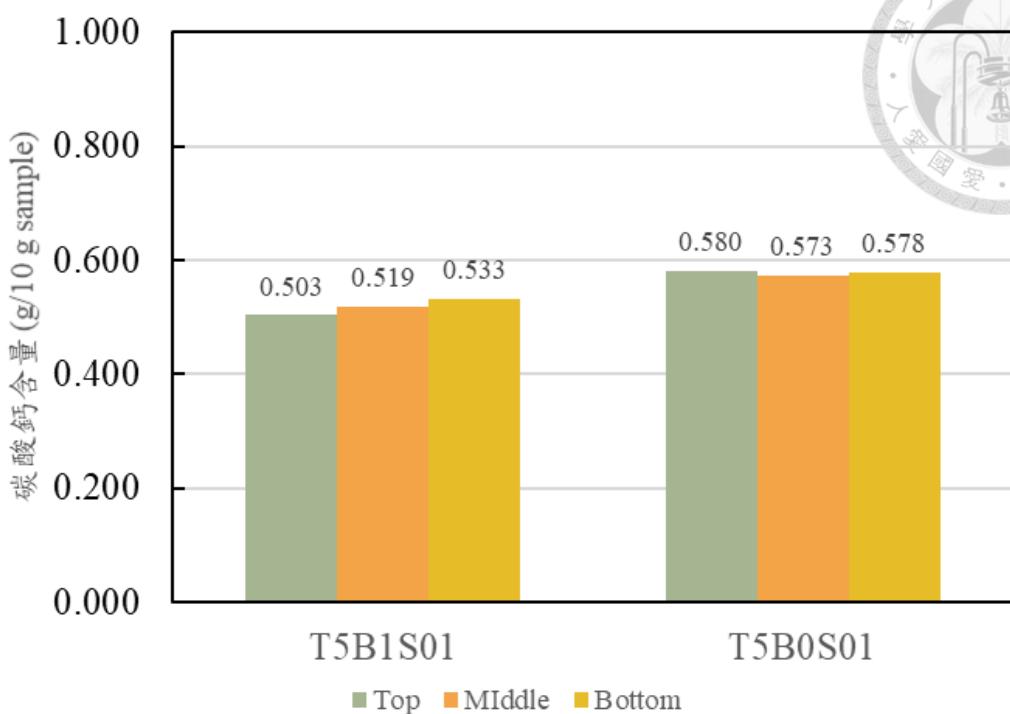


圖 4-4 改良五次共振前試體於不同高度位置之碳酸鈣含量分佈

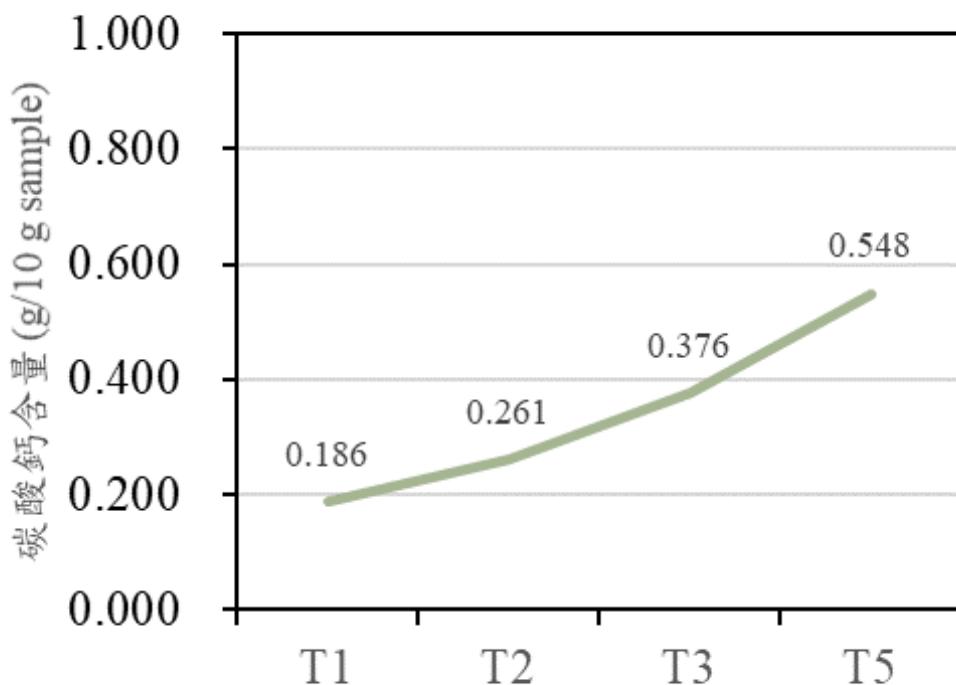


圖 4-5 各改良次數下試體碳酸鈣含量整體平均值比較

4.1.2 電腦斷層掃描結果

為觀察 MICP 試體內部碳酸鈣之分布特性與沉澱型態，本研究針對代表性樣本進行 X-ray 電腦斷層掃描影像重建與視覺化分析圖 4-6 至圖 4-9 分別顯示不同改良次數（1、2、3、5 次）下之試體水平與縱向切面影像，並輔以影像分割配色結果協助判讀材料分布。各圖中影像配色為視覺化後處理結果，用以區分不同材質之分布，惟實際顏色僅為呈現效果，並不對應特定礦物種類。石英砂與碳酸鈣之分割依據其 X-ray 灰階值範圍進行分類，並經多點抽樣與閾值標定完成，顏色區塊僅作為區辨用途。

改良一次之試體 MICP1_S01 顯示初步碳酸鈣膠結，鈣化型態較為局部，對應碳酸鈣含量約為 0.2281 g/10g。改良兩次之試體 MICP2_S01 中，碳酸鈣分布更為均勻，包含孔隙表面與粒間填充，碳酸鈣含量上升至約 0.3170 g/10g。而三次改良試體 MICP3_S01 則可見碳酸鈣明顯集中於試體上半部，對應碳酸鈣含量約 0.4027 g/10g。五次改良之試體 MICP5_S02 碳酸鈣含量最高，達約 0.5890 g/10g。

圖 4-10 彙整不同改良次數下試體於三個高度（約為 +1/5H、0H、-1/5H）處的 CT 水平切面影像，呈現碳酸鈣於垂直方向的沉澱變化趨勢。由圖 (a) 可見，改良一次之試體 MICP1_S01 在試體上方 (+1/5H) 形成較明顯之碳酸鈣沉澱斑點，顯示灌漿液主要滯留於上方空隙，而下方 (-1/5H) 則僅見零星沉澱，沉澱分布具明顯高度差異。此可能與初次灌漿時反應尚未均質擴散、孔隙結構限制傳輸路徑等因素有關。圖 (b) 與圖 (c) 分別為改良兩次與三次試體，可見碳酸鈣分布已更趨均勻，各高度皆有小型沉澱物形成，顯示多次灌漿後灌注路徑得以拓寬，反應範圍擴大，垂直方向沉澱差異減小。至圖 (d) 五次改良時，試體各高度皆形成密集沉澱，碳酸鈣斑點密布且尺寸較大，顯示沉澱反應已在整體體積中充分發生，且有部分團塊狀集中區域形成，整體均勻性與飽和程度皆顯著提升。

為配合影像觀察進行定量分析，本研究同時彙整各試體在 CT 軟體中所選取區域 (ROI) 內砂與碳酸鈣之體積與質量，並計算質量鈣化率作為評估改良效率之指標。其數值係依據第 3.4.2 節所述方法，根據各材質體積比例乘以對應密度計算質量後，再推得質量鈣化率。表 4-3 為各試體之計算結果彙整。由於 CT 軟體所選取的 ROI 區域可能涵蓋樣本邊界或空氣背景，影像分割後石英砂與碳酸鈣的百分比總和常低於 100%。惟此誤差主要來自非材料區域，對於試體內部膠結趨勢的判斷與各組間相對比較，並不構成實質影響。

為清晰呈現不同改良次數對碳酸鈣沉澱效果之影響，圖 4-11 繪製出各試體在電腦斷層掃描分析下所換算之「每 10 g 試體中碳酸鈣質量」。從圖中可見，碳酸鈣含量隨改良次數穩定上升，三次改良後已具有顯著膠結增幅，而五次改良則達至本研究中觀察到的最大沉澱量，與影像中膠結範圍之發展趨勢相符。

表 4-3 各改良次數試體之砂與碳酸鈣質量及質量鈣化率統計表

試體編號	改良次數	$M_{\text{Sand}} (\text{g})$	$M_{\text{CaCO}_3} (\text{g})$	$\text{CaCO}_3 (\text{g}/10 \text{ g sample})$	平均 (g)
MICP1_S01		12.8050	0.2988	0.2281	
MICP1_S02	1	12.8011	0.2983	0.2278	0.2223
MICP1_S03		12.8499	0.2772	0.2112	
MICP2_S01		13.0571	0.4275	0.3170	
MICP2_S02	2	13.5228	0.4220	0.3026	0.3120
MICP2_S03		13.2661	0.4335	0.3164	
MICP3_S01		12.5434	0.5263	0.4027	
MICP3_S02	3	12.1889	0.4859	0.3834	0.3897
MICP3_S03		12.5591	0.5004	0.3831	
MICP5_S01		12.2711	0.7413	0.5697	
MICP5_S02	5	12.6395	0.7911	0.5890	0.5852
MICP5_S03		11.6611	0.7404	0.5970	

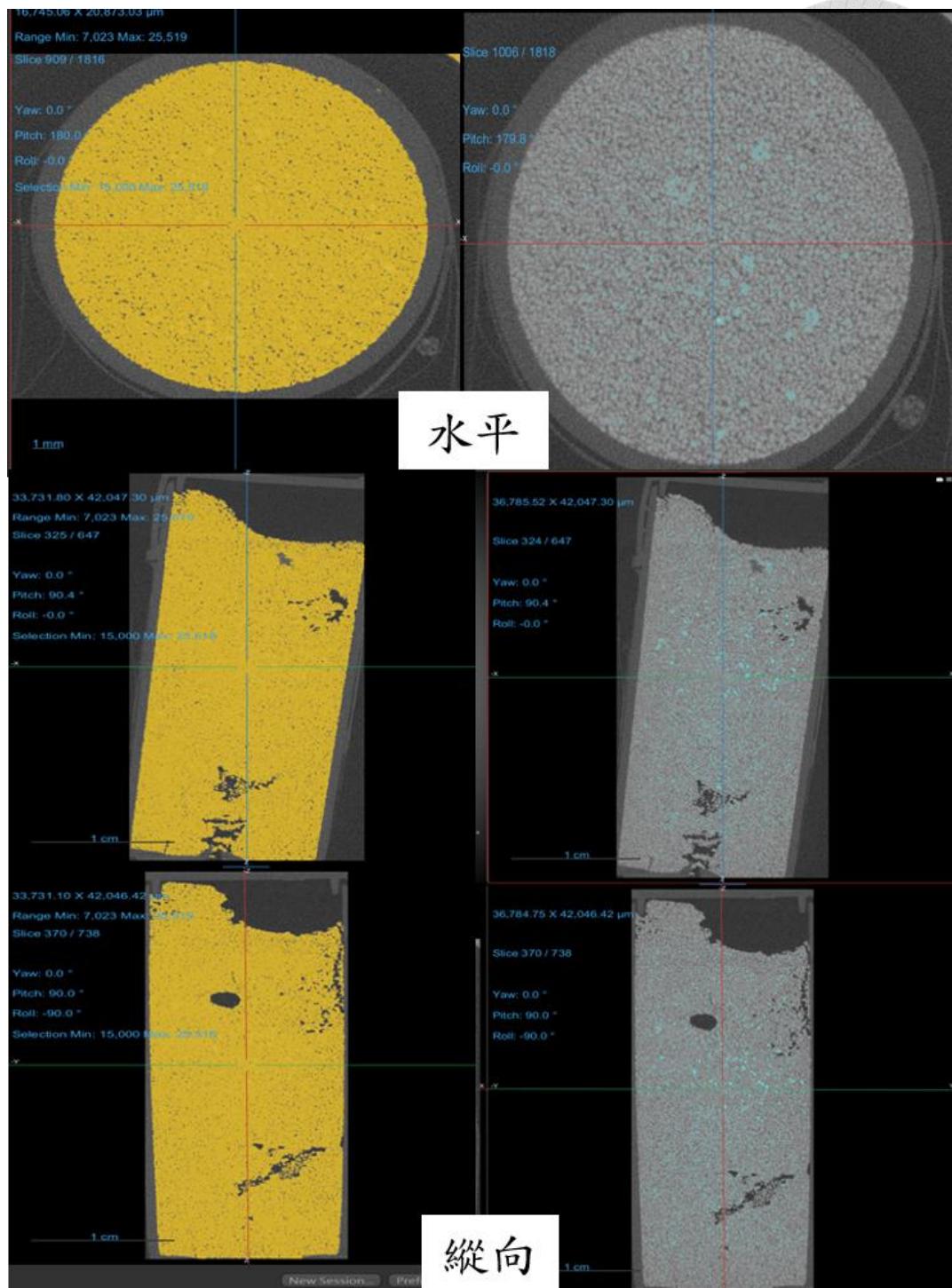


圖 4-6 改良一次試體 MICP1_S01 之 CT 影像

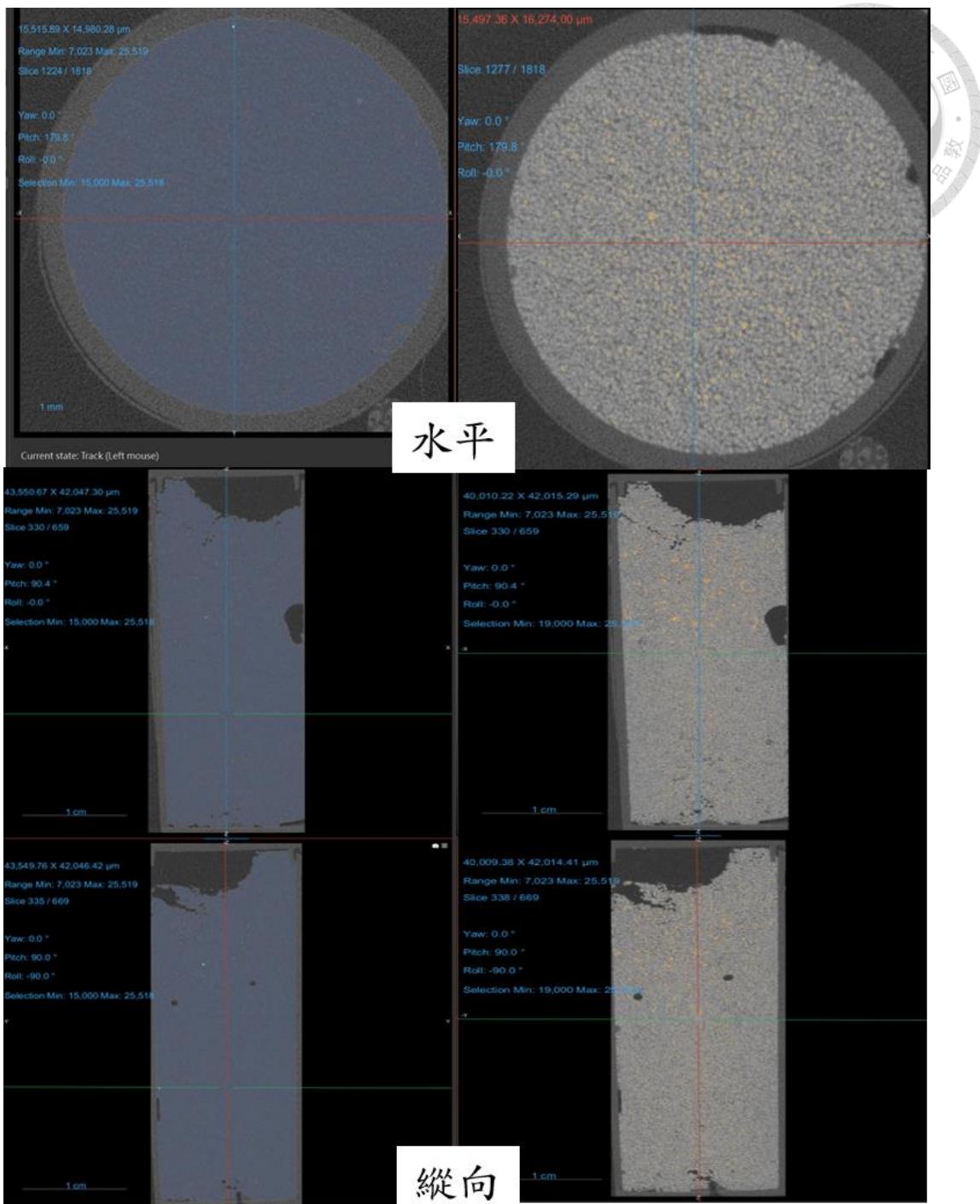


圖 4-7 改良兩次試體 MICP2_S01 之 CT 影像

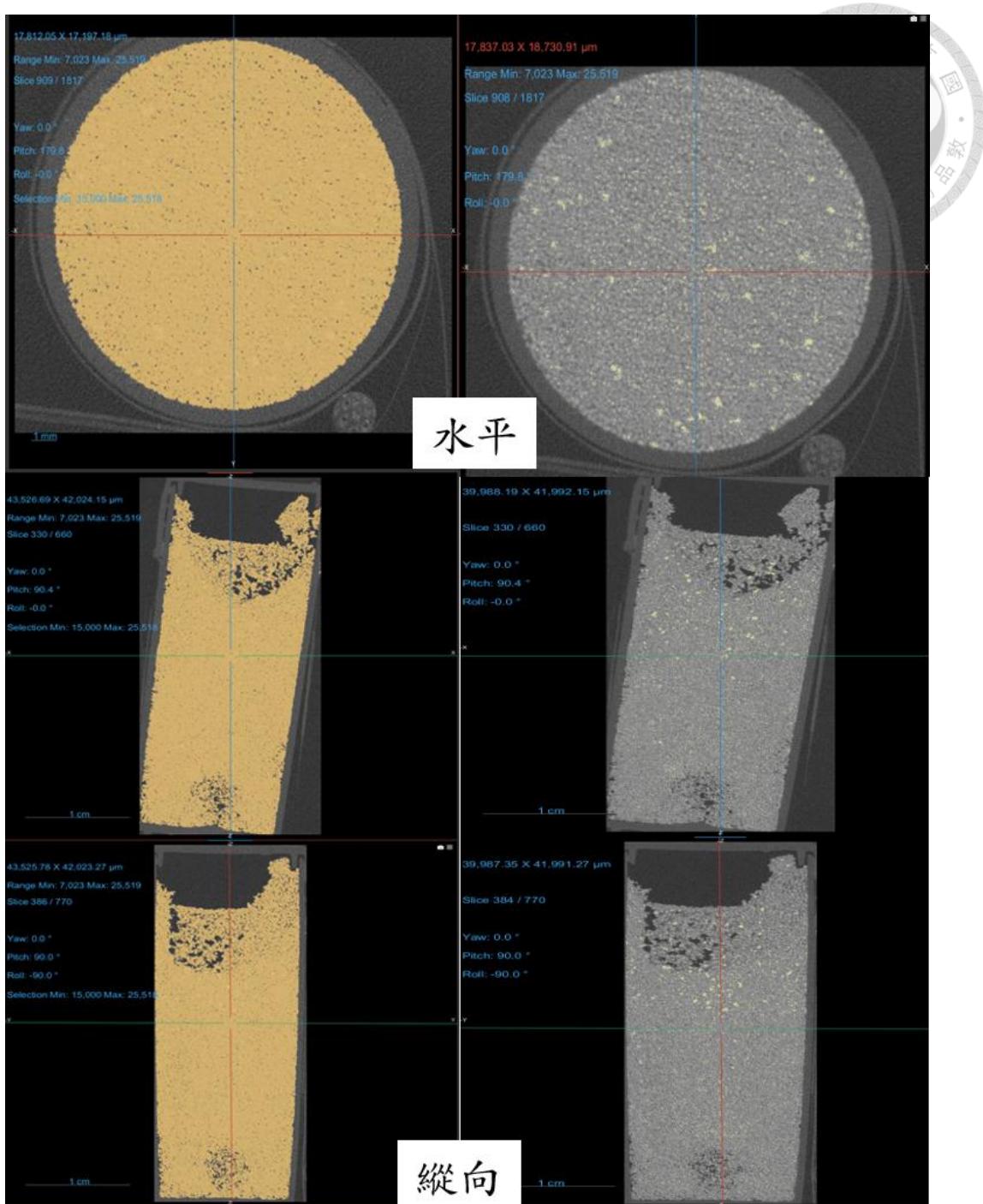


圖 4-8 改良三次試體 MICP3_S01 之 CT 影像

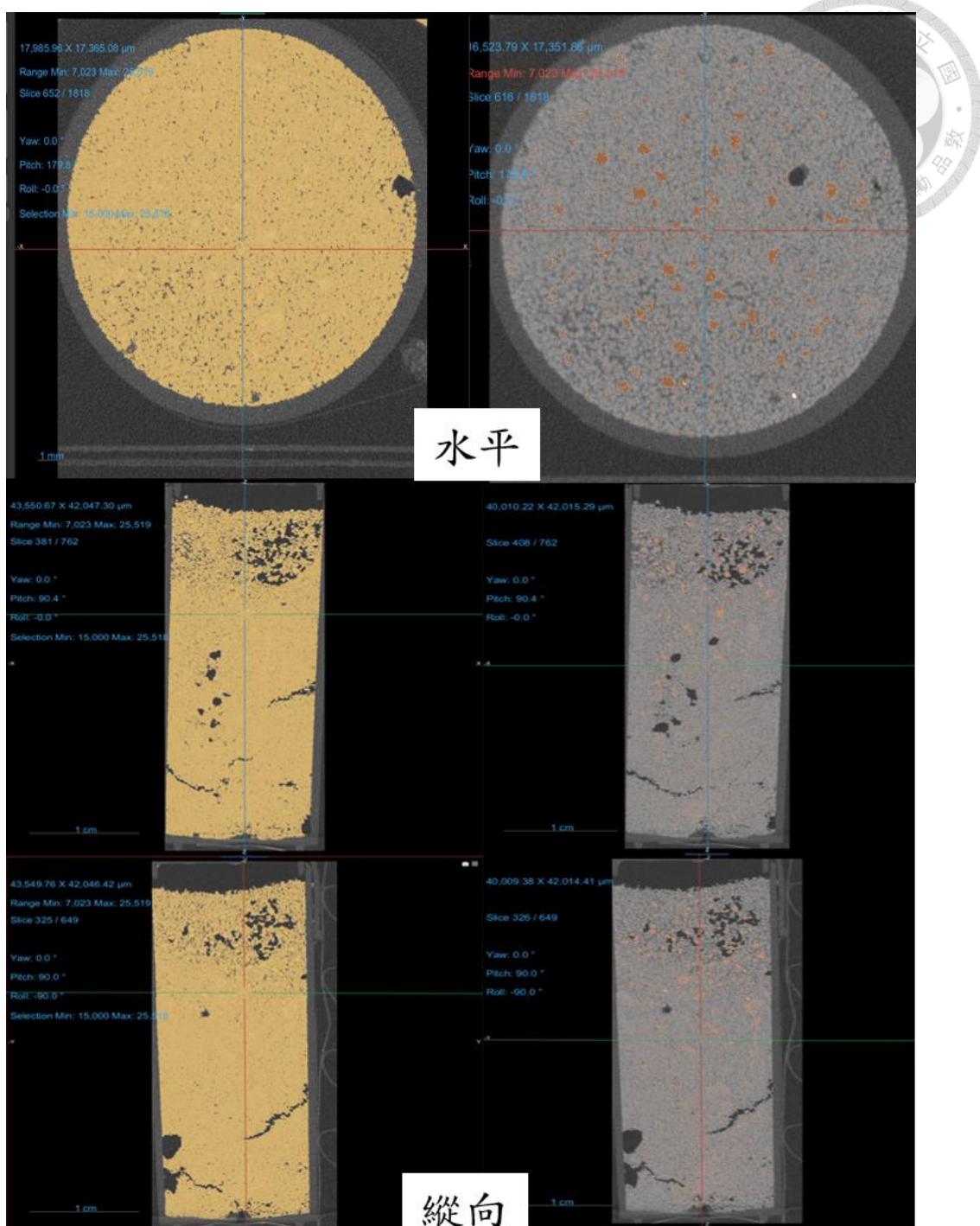


圖 4-9 改良五次試體 MICP5_S02 之 CT 影像



+ $\frac{1}{5}$ H (上方)

0H (中心)

- $\frac{1}{5}$ H (下方)

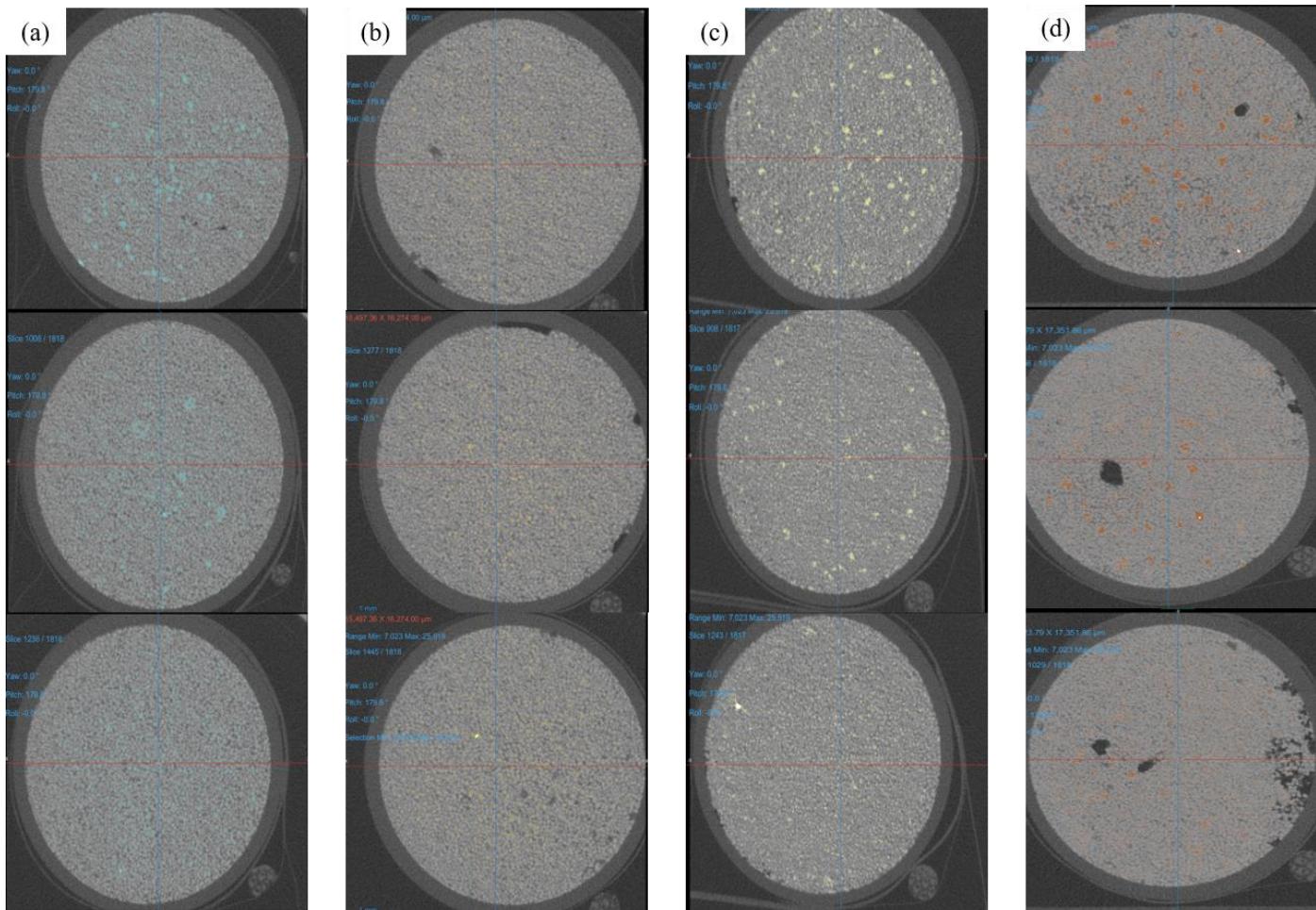


圖 4-10 不同改良次數下試體碳酸鈣分布之 CT 影像結果 (a) 改良 1 次、(b) 改良 2 次、(c) 改良 3 次、(d) 改良 5 次

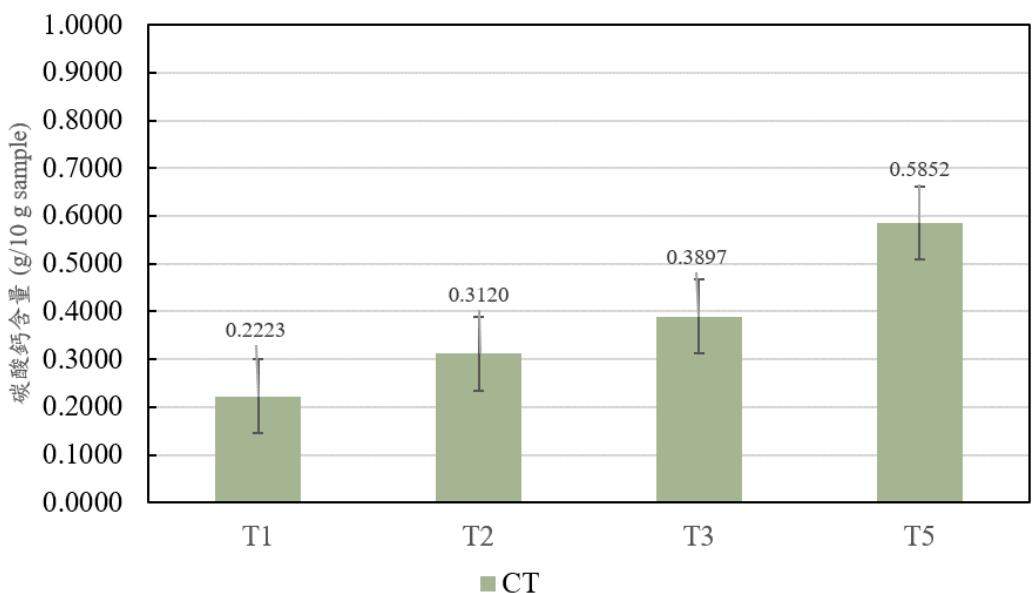


圖 4-11 不同改良次數下試體碳酸鈣含量變化趨勢圖



4.1.3 掃描式電子顯微鏡結果

為進一步觀察碳酸鈣於試體微觀尺度之沉澱位置與膠結形貌，本研究針對不同改良次數（1、2、3 與 5 次）之試體進行場發射掃描式電子顯微鏡（FE-SEM）觀察，並搭配能量散射 X 光光譜分析（EDS）進行元素定量，結果如圖 4-13 至圖 4-16 及表 4-5 至表 4-8 所示。

圖 4-12 為未經 MICP 改良之純砂樣品 SEM 影像，可見其表面平滑，無明顯晶體或膠結物附著。圖 4-13 顯示經一次改良之試體，表面出現少量不連續的細小沉澱，分布稀疏，膠結效果仍不顯著。圖 4-14 為改良二次之樣品，晶體沉澱量略為增加，並開始集中於砂粒表面粗糙區。圖 4-15 與圖 4-16 分別為三次與五次改良樣品，可觀察到大量且連續性佳之沉澱堆積，部分沉澱物形成顆粒間橋結，顯示碳酸鈣生成已趨成熟。

對應之 EDS 分析結果如表 4-4 至表 4-8 所示。純砂試體（表 4-4）僅含 O 與 Si 兩種主要元素，未檢測到 Ca，確認其為石英砂組成，無碳酸鈣背景。隨 MICP 改良次數增加，Ca 含量逐步上升：一次改良樣品（表 4-5）Ca 含量僅 0.39 wt%，至二次改良（表 4-6）增至 2.20 wt%，三次（表 4-7）與五次改良（表 4-8）更分別達 5.09 wt% 與 6.67 wt%，其對應原子比亦由 0.18 at% 提升至 3.06 at%。此外，C 與 O 元素比例亦同步提升，整體組成趨近碳酸鈣理論比例 ($\text{Ca:C:O} \approx 1:1:3$)，顯示沉澱物主要為 CaCO_3 。

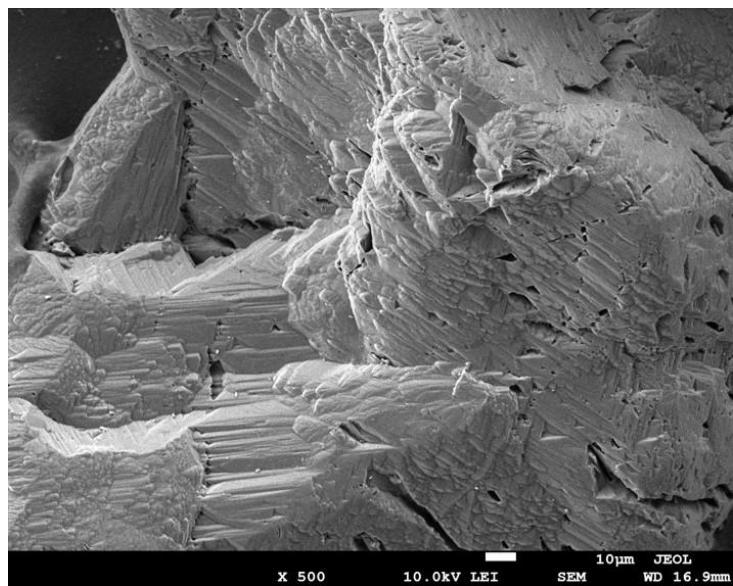


圖 4-12 純砂試體之掃描式電子顯微鏡影像

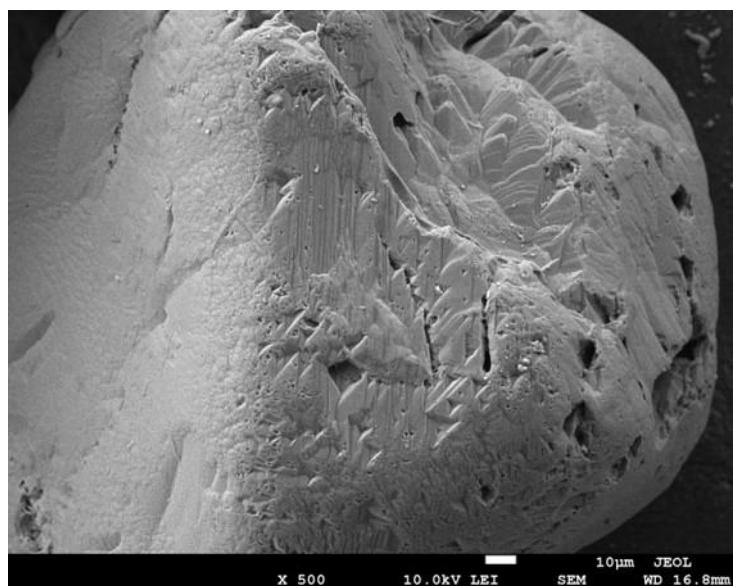


圖 4-13 改良一次試體之掃描式電子顯微鏡影像

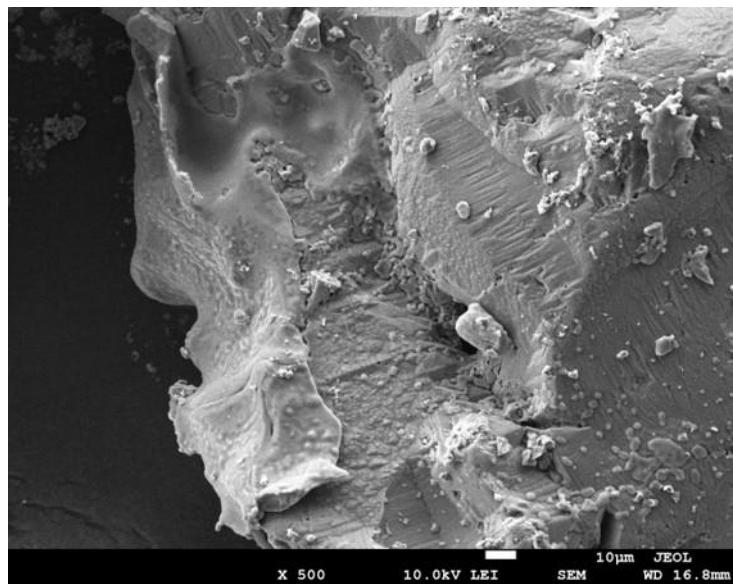


圖 4-14 改良二次試體之掃描式電子顯微鏡影像

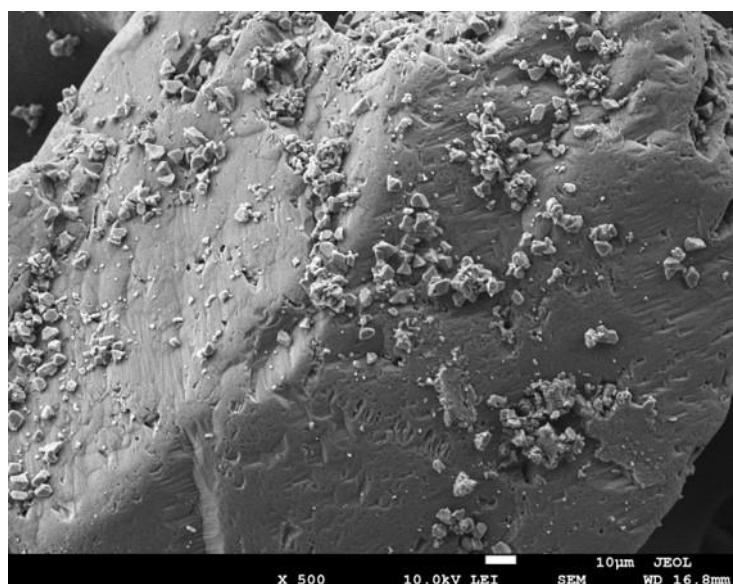


圖 4-15 改良三次試體

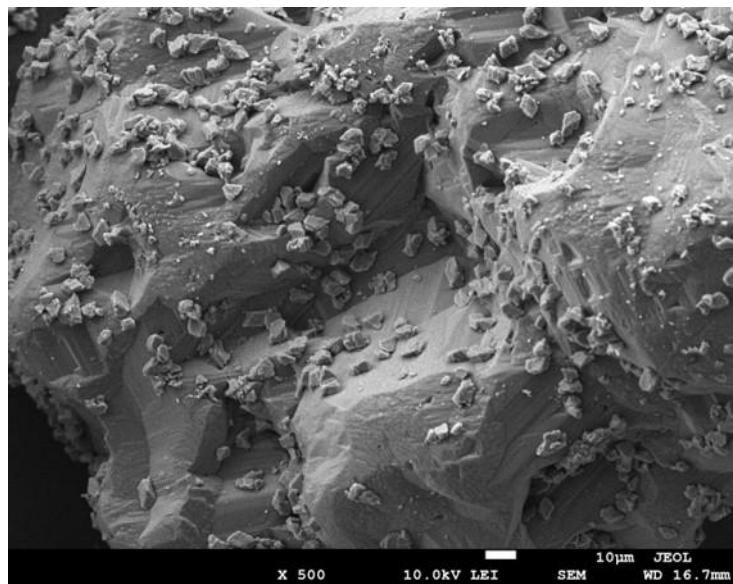


圖 4-16 改良五次試體之掃描式電子顯微鏡影像

表 4-4 純砂試體之 EDS 元素分析結果

Element	Weight%	Atomic%
C	4.58	7.22
O	55.82	66.07
Si	39.61	26.71
Totals	100.00	

表 4-5 改良一次試體之 EDS 元素分析結果

Element	Weight%	Atomic%
C	8.97	13.77
O	53.84	62.06
Si	35.51	23.32
Cl	1.29	0.67
Ca	0.39	0.18
Totals	100.00	

表 4-6 改良二次試體之 EDS 元素分析結果

Element	Weight%	Atomic%
C	9.38	14.78
O	50.56	59.85
Si	29.28	19.75
Cl	8.58	4.58
Ca	2.20	1.04
Totals	100.00	

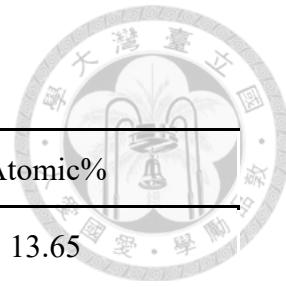


表 4-7 改良三次試體之 EDS 元素分析結果

Element	Weight%	Atomic%
C	8.65	13.65
O	50.94	60.38
Si	33.19	22.41
Cl	2.13	1.14
Ca	5.09	2.41
Totals	100.00	

表 4-8 改良五次試體之 EDS 元素分析結果

Element	Weight%	Atomic%
C	11.35	17.40
O	52.66	60.58
Si	27.41	17.96
Cl	1.91	0.99
Ca	6.67	3.06
Totals	100.00	



4.2 共振柱試驗結果

本節將試驗結果依兩個方向進行分析：首先探討固定改良次數下，不同養護齡期對剪力模數與阻尼比之影響；再進一步分析固定養護齡期下，不同改良次數對動態性質之影響。各組試體之結果均以剪應變變化曲線呈現，並透過橫向比較方式，說明改良參數對 MICP 試體勁度與耗能行為之強化效果與變化趨勢。

4.2.1 養護齡期比較

在本研究中，養護齡期為影響 MICP 改良效果之重要參數之一，其影響碳酸鈣沉澱之晶體發育與結構穩定性，進而改變砂土於動態剪應變下之勁度與耗能行為。本節針對相同改良次數下之不同養護齡期試體進行比較，分析其剪力模數與阻尼比之變化趨勢。剪力模數結果詳述於第 4.2.1.1 剪力模數變化曲線比較節，阻尼比變化則彙整於第 4.2.1.2 阻尼比變化曲線比較節中，以探討養護時間對 MICP 改良砂土動態性質之影響。

4.2.1.1 剪力模數變化曲線比較

為探討不同養護齡期對改良砂土初始勁度之影響，圖 4-17 與圖 4-18 分別比較改良一次與改良兩次之試體，在不同養護齡期下的最大剪力模數 (G_{max}) 變化情形。本研究在分析土壤動態性質時，將最大剪力模數 (G_{max}) 定義為在極小應變條件下所測得的剪力模數。此一定義與土力學領域的普遍認知相符，多數文獻如 Richart 等人 (1970) 和 Seed 與 Idriss (1970) 均指出，土壤在剪應變小於約 $10^{-4}\%$ 時，其剪力模數達到最大值且相對穩定。依循此原則，本研究將在剪應變為 $10^{-4}\%$ 時量測到的剪力模數值作為 G_{max} ，如表 4-9 所示。

由圖 4-17 可觀察到，改良一次下試體之 G_{max} 值隨養護齡期由 7 天增加至 21 天呈現穩定上升趨勢，顯示碳酸鈣膠結逐漸成熟，提升了土體剛性。圖 4-18 所示之改良兩次試體亦呈相同趨勢，且整體 G_{max} 數值高於改良一次者，顯示重複灌漿確實可進一步增強剪力模數。整體而言， G_{max} 分析結果驗證 MICP 改良效果受養護齡期顯著影響，且改良次數增加亦有助於初始勁度之提升。

從圖 4-19 顯示一次改良試體於不同養護齡期下的剪力模數變化情形，三組試體分別為 T1_C7_S03、T1_C14_S04 與 T1_C21_S01。T1_C21_S01 試體於 $\gamma \approx 0.0005\%$ 時其 G 值達約 112 MPa， $\gamma \approx 0.005\%$ 附近仍高於 105 MPa，至 $\gamma \approx 0.02\%$ 時約為 85 MPa 左右，顯示其整體勁度表現穩定且衰減速率和緩。T1_C14_S04 初始剪力模數約為 105 MPa，在 $\gamma \approx 0.005\%$ 時降至 95 MPa， $\gamma \approx 0.02\%$ 時進一步下滑至約 80 MPa，整體曲線較 T1_C21_S01 稍低。T1_C7_S03 為三者中勁度最低者，其初始 G 值約為 96 MPa， $\gamma \approx 0.005\%$ 附近為 85 MPa，至 $\gamma \approx 0.02\%$ 已接近 70 MPa，衰減幅度相對明顯。

此外，純砂試體 (pure sand 2) 於 $\gamma \approx 0.0005\%$ 僅約 87 MPa， $\gamma \approx 0.02\%$ 時已降至 70 MPa 以下，為各組中勁度表現最低者，曲線始終位於最下方。此結果顯示即使在單次改良情況下，隨養護時間延長，剪力模數亦有穩定增幅，反映碳酸鈣沉澱對顆粒結構的鞏固效果逐漸成熟，且可有效提升初始勁度與抗剪穩定性。

圖 4-20 顯示改良兩次之三組試體中，T2_C21_S02 於 $\gamma \approx 0.0005\%$ 時剪力模數達約 130 MPa， $\gamma \approx 0.005\%$ 時仍高達約 122 MPa，至 $\gamma \approx 0.02\%$ 時亦維持約 100 MPa，整體剪力模數水準穩定且衰減緩慢。相較之下，T2_C14_S03 在 $\gamma \approx 0.0005\%$ 處之 G 值約為 120 MPa， $\gamma \approx 0.01\%$ 時約為 112 MPa。T2_C7_S02 於 $\gamma \approx 0.0005\%$ 時約為 105 MPa， $\gamma \approx 0.01\%$ 時已降至 90 MPa 以下， $\gamma \approx 0.05\%$ 時進一步降至約 80 MPa。此三組試體於 $\gamma \approx 0.005\%$ 區段之剪力模數差距已達 25 MPa 以上，顯示養護齡期對勁度表現有顯著差異。

為排除初始勁度基準差異並專注觀察模數衰減趨勢，本研究進一步將剪力模數正規化為 G/G_{max} ，繪製於圖 4-21(一次改良) 與圖 4-22(二次改良) 中。透過 G/G_{max} 曲線之比較，可揭示試體在非線性應變階段的勁度保持能力與膠結穩定性，作為 MICP 改良效果評估的重要依據。

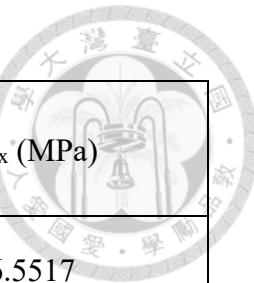
在圖 4-21 中，一次改良試體 G/G_{max} 曲線皆隨剪應變增加而下降，反映非線性模數衰退行為。三組試體曲線整體趨勢相近，均呈現典型之非線性遞減行為，

且於初期剪應變範圍 ($\gamma \leq 0.001\%$) 內皆維持 G/G_{max} 接近 1，顯示各齡期試體初始勁度表現穩定。隨著剪應變增加，各曲線約自 $\gamma \approx 0.001\%$ 起陸續出現模數衰減，至 $\gamma \approx 0.01\%$ 附近 G/G_{max} 均降至約 0.85 至 0.9 間，下降幅度相當一致。顯示於改良一次之條件下，養護齡期對非線性階段之剪力模數保持能力並未造成明顯差異。此結果推測，在初步膠結形成階段，養護時間對膠結結構之補強雖有助益，但在未進行重複灌漿條件下，其影響仍相對有限。

圖 4-22 為二次改良試體 G/G_{max} 曲線。三組試體在初始剪應變範圍 ($\gamma < 0.001\%$) 內皆維持 G/G_{max} 接近 1，顯示初期彈性反應良好，膠結結構於小變形階段可有效穩定顆粒排列。隨剪應變增加，各曲線於 $\gamma \approx 0.003\%$ 後開始出現模數衰減，惟不同齡期之下降幅度存在明顯差異。T2_C21_S02 之 G/G_{max} 曲線下降最為明顯，自 $\gamma \approx 0.005\%$ 起即快速遞減，至 $\gamma \approx 0.02\%$ 已降至 0.7 以下，顯示該試體雖具高初始勁度，但其膠結結構於中高剪應變下較易產生破壞或鬆動，可能與局部膠結集中導致脆性化有關。相對地，T2_C7_S02 與 T2_C14_S03 則於中應變區段展現出較緩之下降趨勢，尤其 T2_C14_S03 曲線在 $\gamma \approx 0.01\%$ 時仍高於 0.8，顯示其膠結穩定性較佳。

整體而言，圖 4-19 至圖 4-22 及表 4-9 所示數據指出：在固定改良次數條件下，養護齡期對剪力模數基值具有顯著影響，較長養護時間可提升初期勁度表現。然而，其對 G/G_{max} 曲線形狀之影響則較不一致，勁度衰減趨勢與養護齡期間存在交互效應，需綜合考量膠結質量、晶體成熟度與分佈均勻性，以正確評估 MICP 改良之非線性反應潛勢。相關細節將於第 4.3 節中進一步綜合探討其可能之機制與結構意涵。

表 4-9 各試體最大剪力模數整理



Group	Specimen ID	G_{\max} (MPa)
MICP1	T1_C7_S03	96.5517
	T1_C14_S04	103.7467
	T1_C21_S01	116.2452
MICP2	T2_C7_S02	106.9388
	T2_C14_S03	122.1163
	T2_C21_S02	139.7142
MICP3	T3_C7_S01	111.9254
MICP5	T5_C7_S01	122.1055

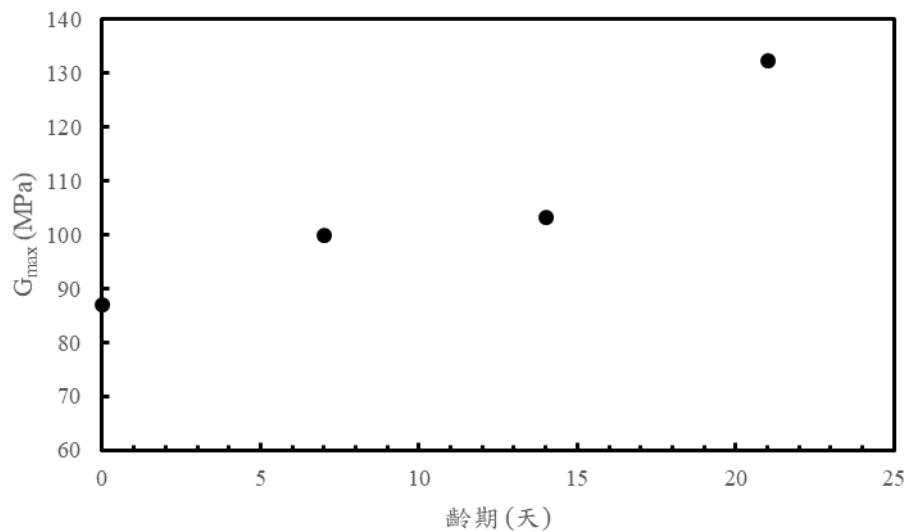


圖 4-17 改良一次下各齡期最大剪力模數

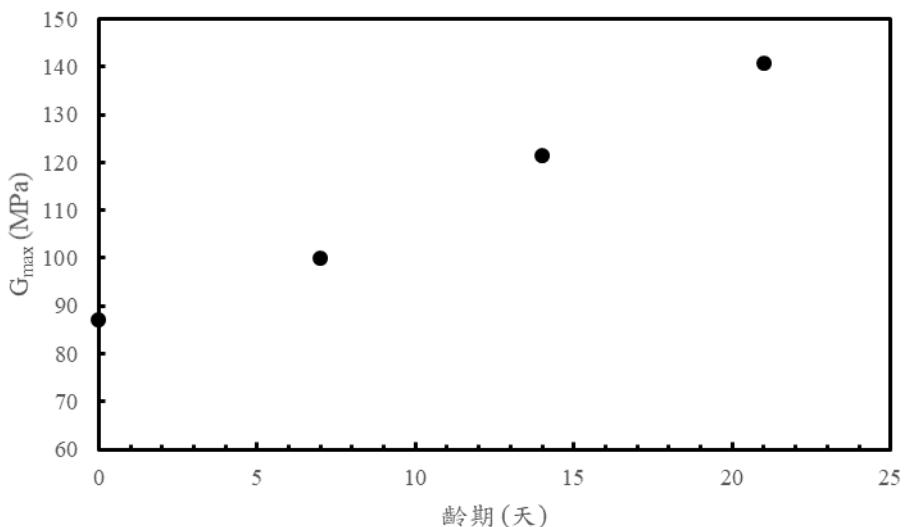


圖 4-18 改良二次下各齡期最大剪力模數

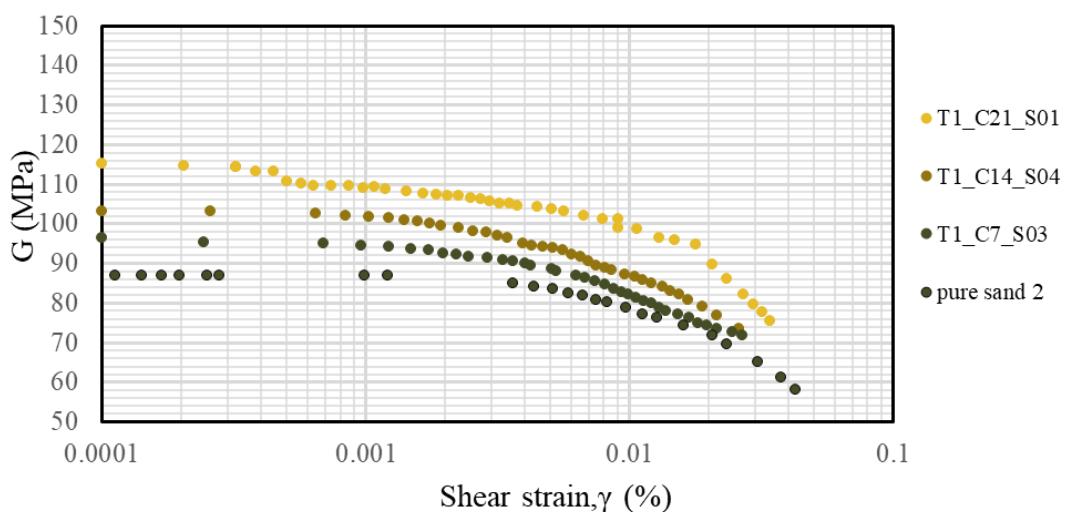


圖 4-19 不同齡期改良一次試體之剪力模數變化曲線

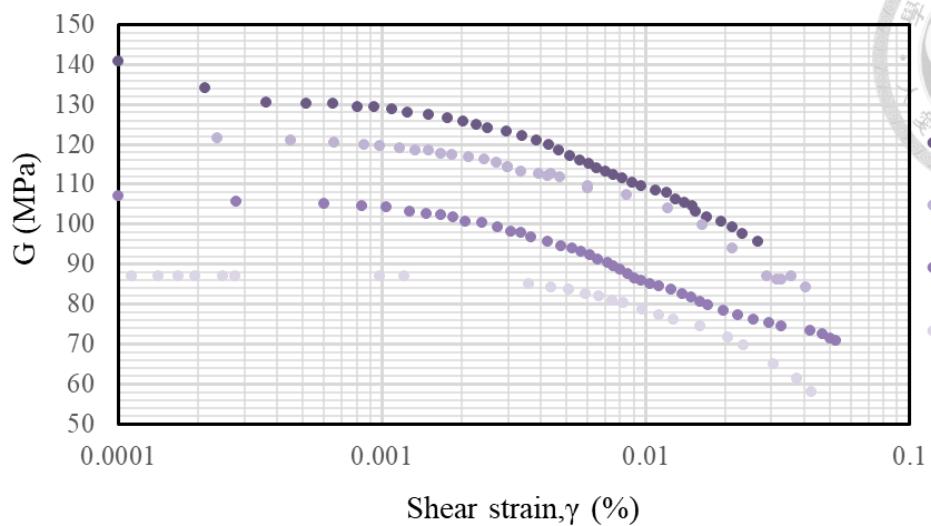
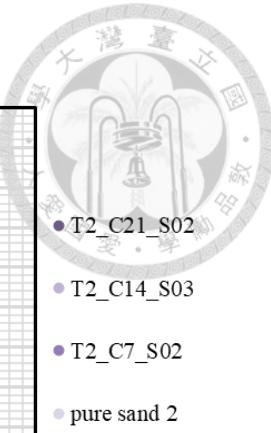


圖 4-20 不同齡期改良二次試體之剪力模數變化曲線

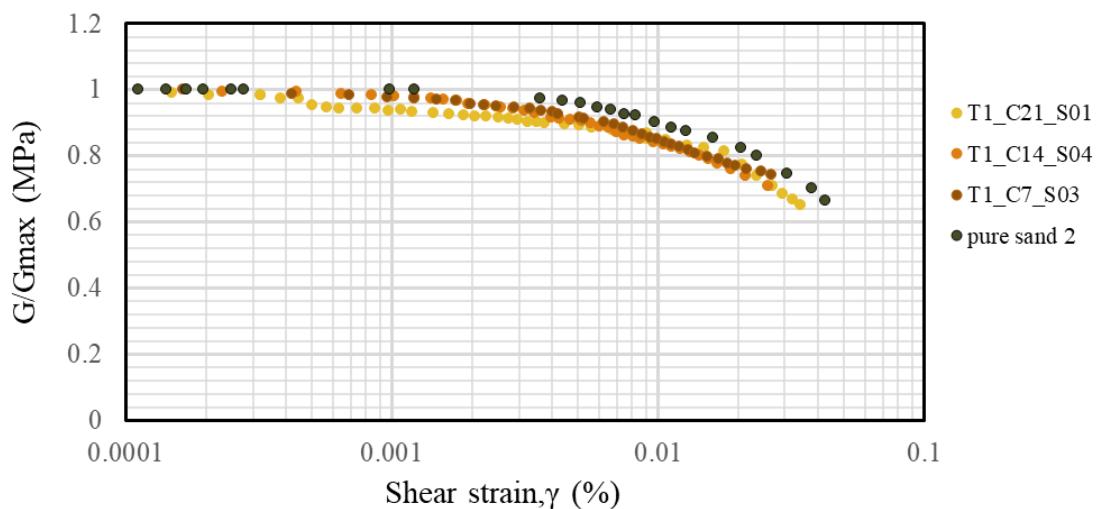


圖 4-21 正規化後不同齡期改良一次試體之剪力模數變化曲線

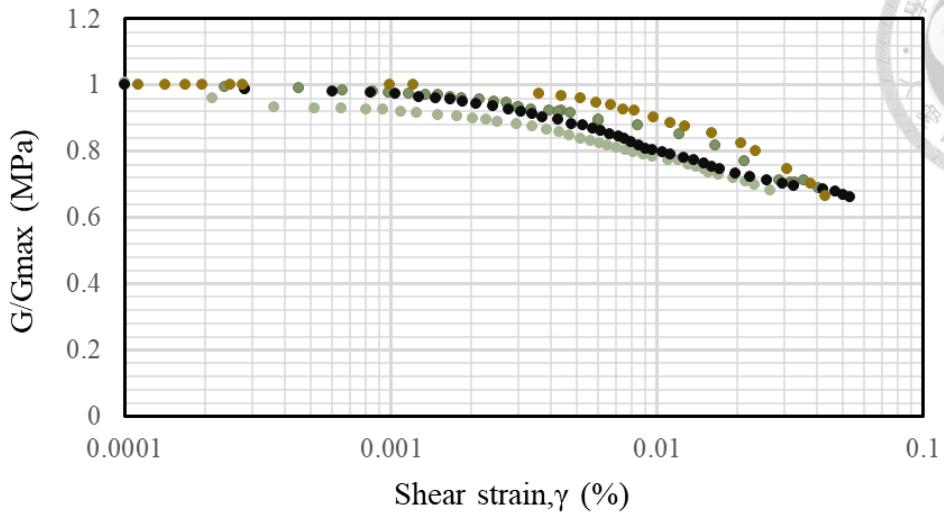
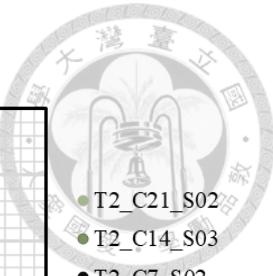


圖 4-22 正規化後不同齡期改良二次試體之剪力模數變化曲線

4.2.1.2 阻尼比變化曲線比較

阻尼比 (Damping Ratio) 為無因次量，可用以描述材料於動態載重作用下之能量耗散能力，其大小反映土壤內部摩擦、結構鬆動與膠結破壞等行為之綜合影響。在微小剪應變範圍內，土壤主要表現為彈性行為，阻尼比較低；隨著剪應變增大，粒子間相對滑移與接觸破壞現象逐漸增加，阻尼比亦隨之上升，形成典型之非線性增長曲線。

本節分析不同養護齡期在固定改良次數下之阻尼比變化行為。圖 4-23 與圖 4-24 分別呈現一次與二次 MICP 改良試體於不同齡期下，其阻尼比 ($D, \%$) 隨剪應變之變化趨勢。圖中橫軸為剪應變 (Shear Strain, %)，縱軸為阻尼比，皆採對數刻度以呈現微小應變區段的細部變化。

由圖 4-23 可觀察改良一次試體在不同養護齡期下之阻尼比變化趨勢。

T1_C21_S01 試體於 $\gamma \approx 0.0005\%$ 時之阻尼比約為 1.3%，至 $\gamma \approx 0.005\%$ 上升至約 3.5%，並於 $\gamma \approx 0.034\%$ 達最大值約 7.1%。T1_C14_S04 於相同應變範圍內由 0.8% 增至約 2.8%，整體數值略低於 21 天齡期試體。T1_C7_S03 起始阻

尼比約為 0.9%，上升至約 3.2%，上升幅度較為平緩。未改良之 pure sand 2 初始阻尼比與部分改良試體相近，但整體上升幅度最小，至 $\gamma \approx 0.04\%$ 僅約 2.0%。

圖 4-24 則呈現改良兩次之各試體阻尼比變化趨勢。T2_C21_S02 初始阻尼比約為 2.2%，至 $\gamma \approx 0.03\%$ 升至最大值約 8.7%，為各試體中最高者。T2_C14_S03 阻尼比由 1.9% 增至 6.7%，T2_C7_S02 則由約 1.0% 上升至 4.3%，整體曲線變化趨勢一致，差異主要反映於高應變區段之 D 值水準。

整體而言，圖 4-23 與圖 4-24 顯示，在相同改良次數條件下，養護齡期的增加與阻尼比上升幅度具有一定關聯性。長齡期試體於中高剪應變範圍內普遍呈現較高的阻尼比，數值差異於 $\gamma > 0.01\%$ 區段更為顯著，顯示養護時間長短對阻尼比表現具有實質影響。相關原因與結構行為將於第 4.3 節進一步探討。

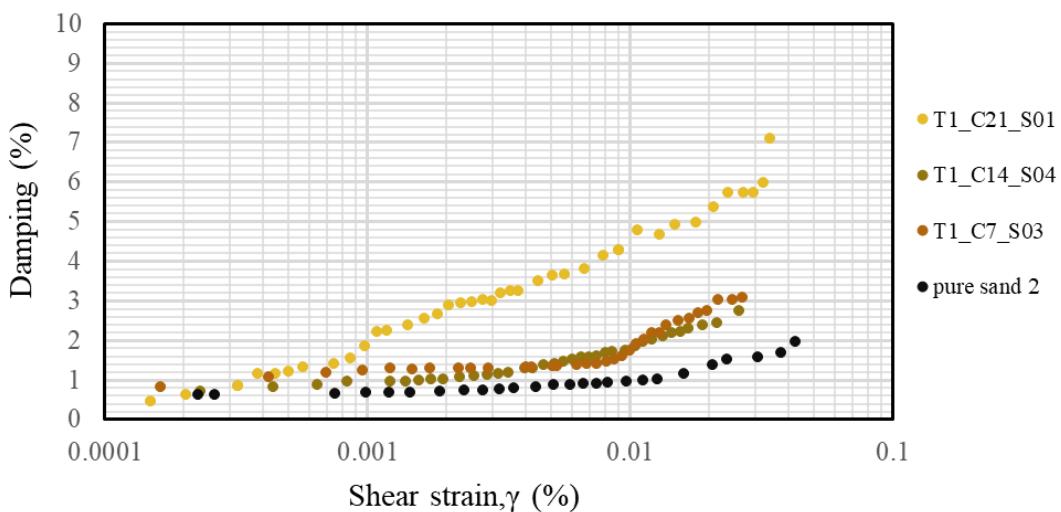


圖 4-23 不同齡期改良一次試體之阻尼比變化曲線

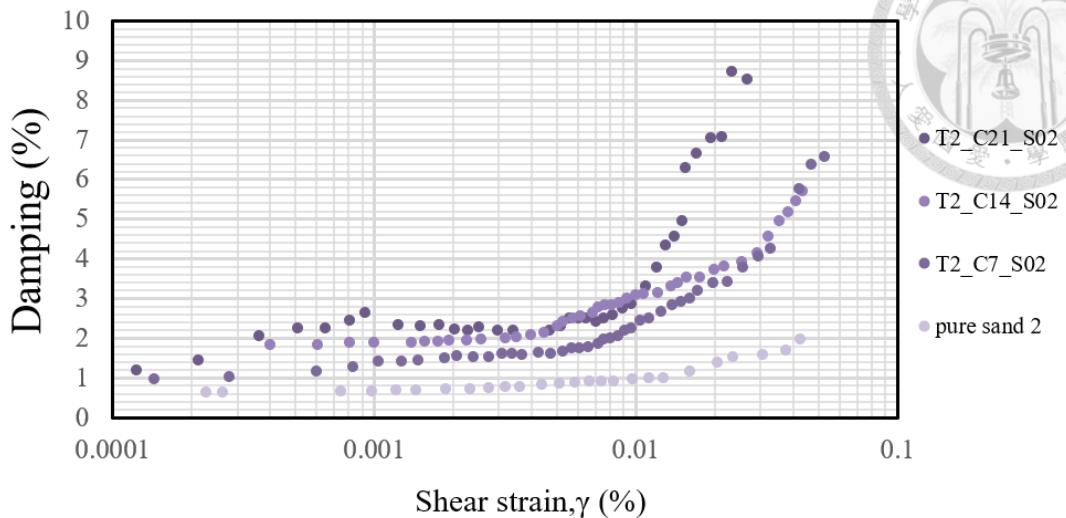


圖 4-24 不同齡期改良二次試體之阻尼比變化曲線

4.2.2 改良次數比較

在本研究中，MICP 灌漿次數為主要控制參數之一，對碳酸鈣之沉澱量與空間分佈具有關鍵影響，進而改變砂土之動態反應特性。本節針對相同養護齡期下之不同改良次數試體進行比較，分析其剪力模數與阻尼比之變化行為。剪力模數結果詳述於 4.2.2.1 不同改良次數剪力模數演化趨勢 節，阻尼比變化趨勢則彙整於 4.2.2.2 阻尼比隨改良次數變化之能量耗散推論 節中。

4.2.2.1 不同改良次數剪力模數演化趨勢

為進一步驗證改良次數對砂土剪力模數基值的影響，圖 4-25 至圖 4-27 分別整理養護 7 天、14 天與 21 天下，不同改良次數試體於剪應變 $\gamma = 10^{-4}\%$ 條件下所獲得之最大剪力模數 (G_{max}) 變化趨勢。由圖 4-25 可見，在養護 7 天條件下， G_{max} 隨改良次數提升而穩定增加；圖 4-26 為養護 14 天之結果，亦顯示從未改良至二次改良 G_{max} 增幅與 7 天齡期相似。圖 4-27 則為養護 21 天下之試體，最大剪力模數提升幅度最大。綜合而言，在不同齡期條件下，改良次數的提升皆有助於初始剪力模數之提升，且提升幅度隨齡期延長略有增強。

圖 4-28 顯示在養護 7 天條件下，不同改良次數試體之剪力模數變化趨勢。

未改良之 pure sand 試體剪力模數最低，經一次改良的 T1_C7_S03 試體曲線略高於純砂，剪應變 $\gamma \approx 0.001\%$ 處約為 93 MPa。二次改良的 T2_C7_S02 則明顯提高，在 $\gamma \approx 0.001\%$ 附近 G 值達約 105 MPa，隨剪應變增加呈現穩定下降趨勢。三次改良試體 T3_C7_S01 在整體表現上略高於 T2_C7_S02，其剪力模數曲線於 $\gamma \approx 0.001\%$ 區段約為 110 MPa，且在中高剪應變區段 ($\gamma \approx 0.01\%$) 仍維持約 90 MPa 的水準，顯示其結構穩定性略優於前兩組。五次改良之 T5_C7_S01 表現最佳，初期剪應變下 G 值約 120 MPa，且整體曲線高於其他組別，展現最顯著之改良成效。綜合上述結果顯示，在相同齡期條件下，改良次數對剪力模數具有明顯累積效益，改良次數越多，剪力模數提升越顯著，反映出碳酸鈣沉澱與膠結密度之強化效應。

圖 4-29 呈現不同改良次數試體於養護 14 天 (C14) 條件下之剪力模數隨剪應變變化之曲線。從圖中可觀察，T2_C14_S03 (改良二次) 在 $\gamma \approx 0.0005\%$ 附近之 G 值最高，約為 120 MPa，且整體曲線水準維持於 80 MPa 以上，展現出其優異的初始勁度與較佳的抗剪穩定性。相較之下，T1_C14_S04 在 $\gamma \approx 0.0005\%$ 之 G 值約為 100 MPa，整體低於 T2_C14_S03，剪應變大於 0.01% 時快速下降至 90 MPa 以下。進一步比較純砂試體 (pure sand 2)，其 G 值於 $\gamma \approx 0.0005\%$ 僅約為 90 MPa，為三者中最低，顯示在無膠結狀態下，顆粒間接觸力易隨剪應變產生結構鬆動與勁度流失。

圖 4-30 呈現養護 21 天條件下之差異性，數據顯示，T2_C21_S02 (改良二次) 於 $\gamma \approx 0.0005\%$ 時之 G 值高達約 130 MPa，曲線在 $\gamma < 0.01\%$ 區間維持於 110 MPa 以上，呈現緩降特性，顯示膠結均勻性與結構穩定性皆優。相較之下，T1_C21_S01 (改良一次) 於相同應變下的 G 值約為 110 MPa，隨剪應變增加亦有明顯衰減趨勢，但整體勁度仍高於純砂試體。綜合而言，圖 4-30 顯示在相同養護條件下，MICP 改良次數對 G 值具有明顯強化效果。

圖 4-31 至圖 4-33 呈現不同改良次數試體於相同養護齡期下之剪力模數正規化結果，以 G/G_{\max} 表示，橫軸為剪應變 ($\gamma, \%$)，縱軸為剪力模數與最大剪力模數之比值 (G/G_{\max})，採用對數刻度以突顯低應變區段之變化趨勢。

圖 4-31 為養護 7 天試體之正規化曲線。各改良試體的 G/G_{\max} 曲線趨勢相近。T1_C7_S03 至 T5_C7_S01 之間並無明顯衰減差異，皆在 $\gamma \approx 0.001\%$ 後開始出現模數下降，至 $\gamma \approx 0.01\%$ 時 G/G_{\max} 降至約 0.8~0.9。相較之下，pure sand 2 的曲線最為平緩，顯示其雖然勁度基值低，但因缺乏膠結結構，模數變化幅度反而較小。

圖 4-32 為養護 14 天試體之正規化結果。T2_C14_S03 與 T1_C14_S04 的 G/G_{\max} 曲線高度重疊，兩者在 $\gamma \approx 0.01\%$ 前後均呈現穩定下降， G/G_{\max} 降至約 0.8 左右，差異不大。pure sand 2 仍為整體最平緩者。此結果顯示，在中期養護條件下，改良次數雖提高至兩次，但對於正規化剪力模數衰減的控制效果並無明顯提升。

圖 4-33 呈現養護 21 天之剪力模數正規化曲線。各試體 G/G_{\max} 曲線間差異開始出現。其中，T2_C21_S02 於 $\gamma \approx 0.03\%$ 前後出現明顯下降，為改良組中下降最明顯者。T1_C21_S01 曲線相對平緩，pure sand 2 的變化仍最小，曲線整體高於改良組，未見明顯衰退。

整體而言，圖 4-28 至圖 4-33 所示剪力模數實測曲線與正規化結果均顯示，MICP 改良次數與養護齡期對試體之動態勁度表現均具有顯著影響。改良次數的提升可有效提高初始剪力模數，顯示膠結程度與粒間勁度均隨改良強度增加而增強；而養護齡期之延長亦能進一步促進碳酸鈣沉澱作用，使膠結結構更加成熟， G 值隨之上升。至於剪力模數正規化曲線，則反映試體在剪應變作用下的非線性反應趨勢。雖部分改良組試體於中高應變區段呈現較明顯的模數衰減，但整體而言， G/G_{\max} 曲線變化與改良次數或養護齡期間之關係未呈現單一方向性，反映非

線性剪力模數行為受到膠結分佈、結晶型態與微觀破壞模式等多重因素影響，需搭配其他觀測結果綜合解讀。

上述觀察反映出養護齡期與改良次數兩者對試體動態勁度行為之強化效果並存且具有累積性。相關影響機制與微觀結構意涵，將於第 4.3 節中進一步探討與解析。

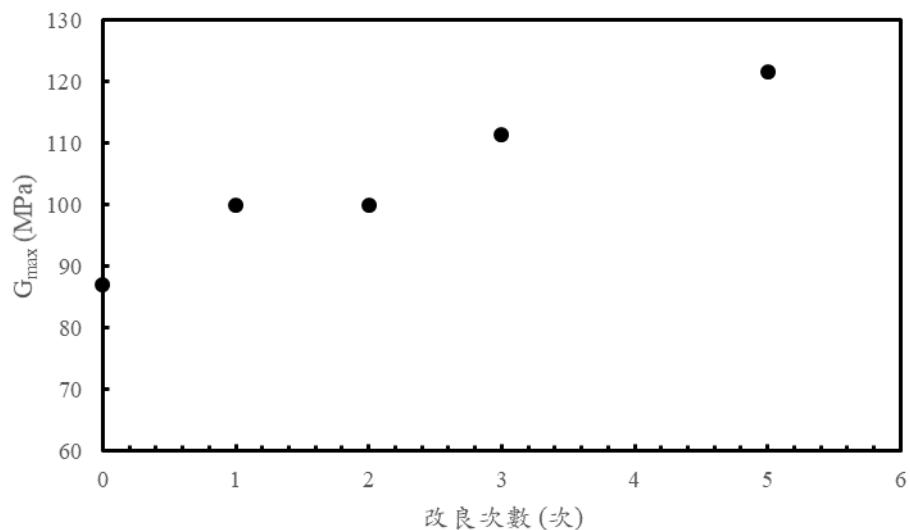


圖 4-25 齡期七天時不同改良次數之最大剪力模數

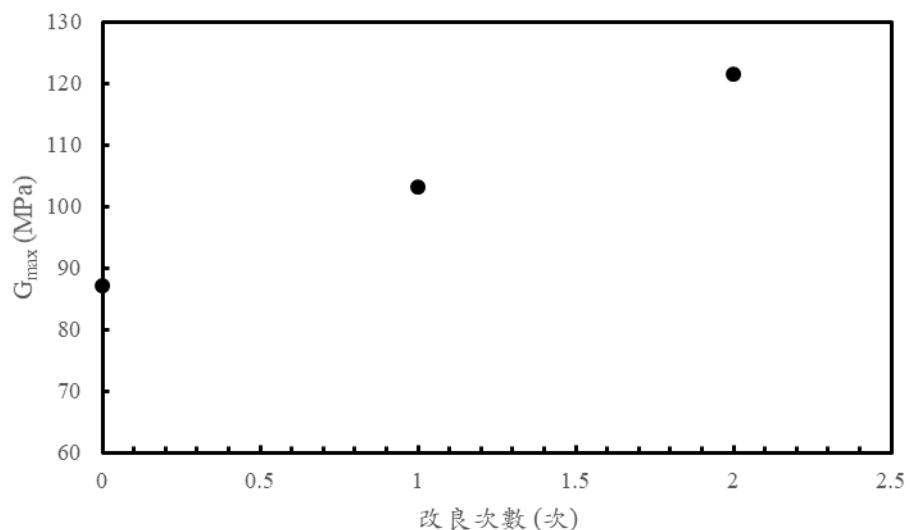


圖 4-26 齡期十四天時不同改良次數之最大剪力模數

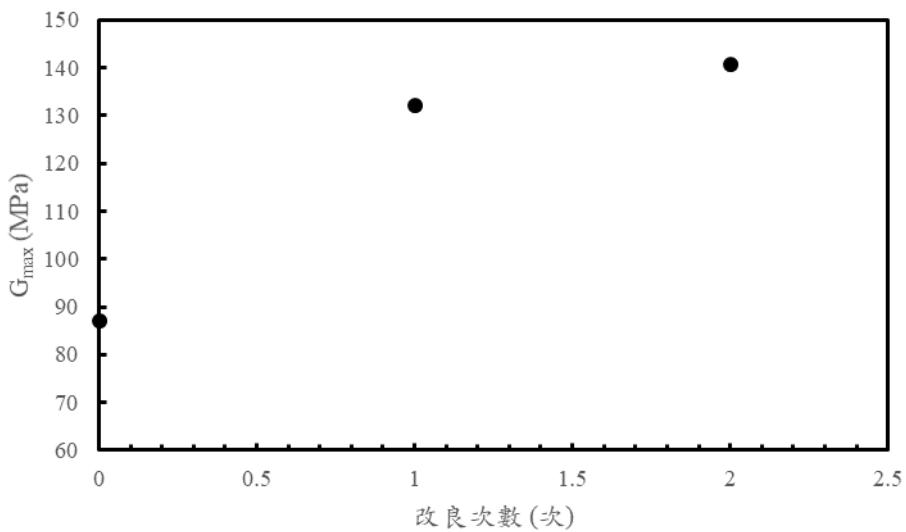


圖 4-27 齡期二十天時不同改良次數之最大剪力模數

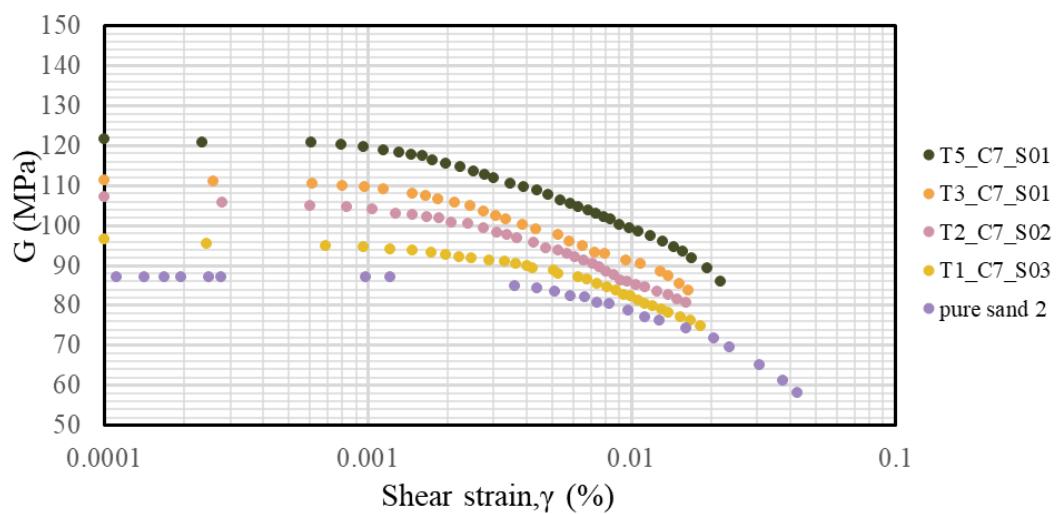


圖 4-28 不同改良次數試體於齡期七天下之剪力模數變化曲線

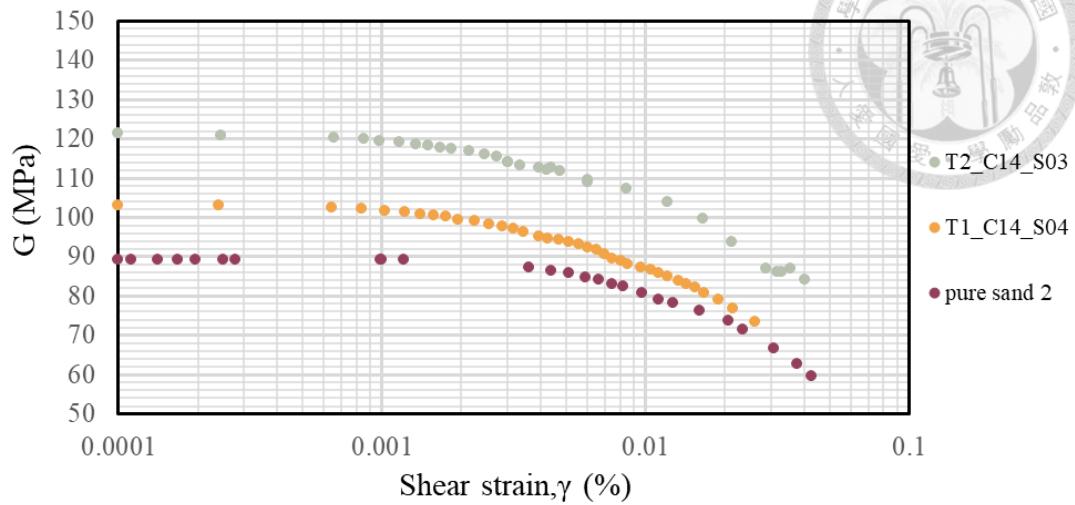


圖 4-29 不同改良次數試體於齡期十四天下之剪力模數變化曲線

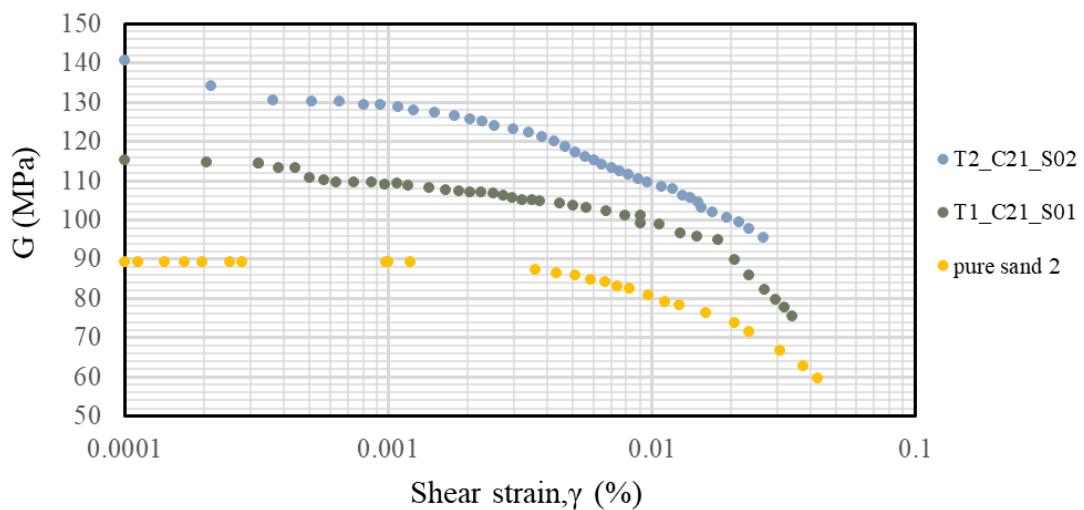


圖 4-30 不同改良次數試體於齡期二十一天下之剪力模數變化曲線

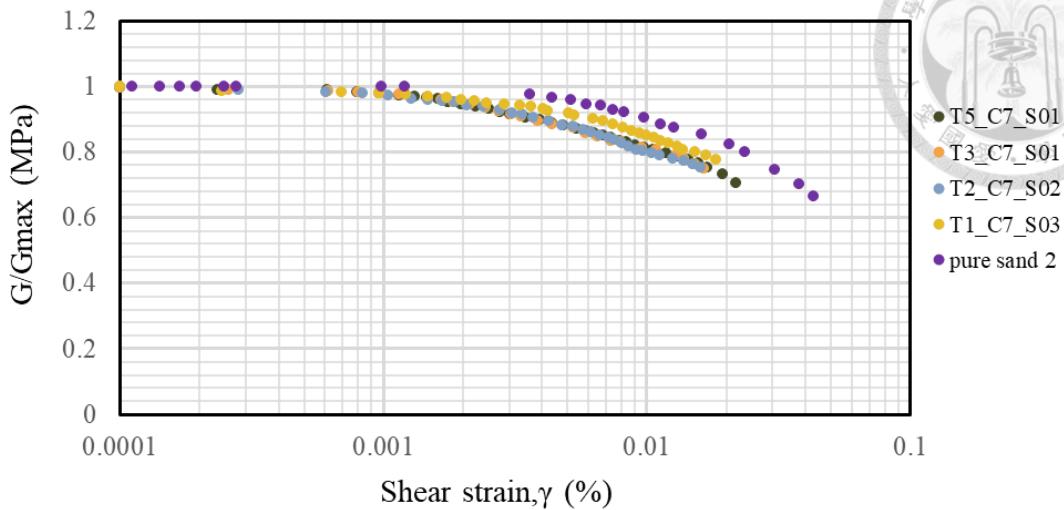
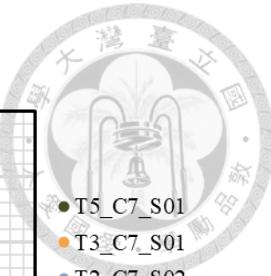


圖 4-31 正規化後不同改良次數試體於齡期七天下之剪力模數變化曲線

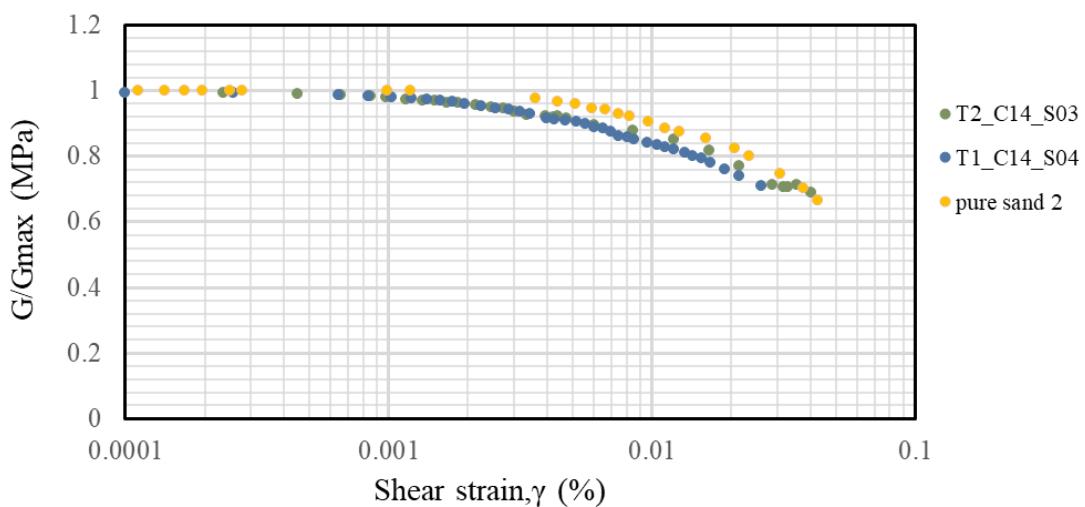


圖 4-32 正規化後不同改良次數試體於齡期十四天下之剪力模數變化曲線

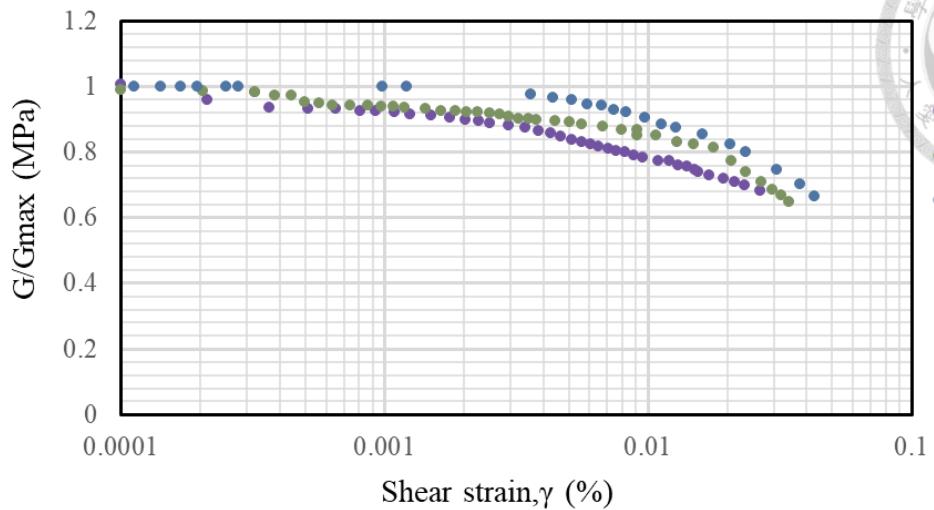
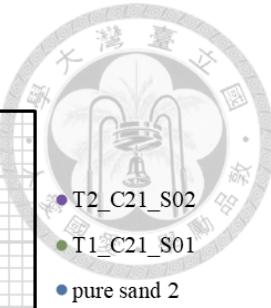


圖 4-33 正規化後不同改良次數試體於齡期二十一天下之剪力模數變化曲線



4.2.2.2 阻尼比隨改良次數變化之能量耗散推論

本節針對相同養護齡期下，不同 MICP 改良次數對阻尼比曲線之影響進行比較，進一步推論其結構能量耗散機制。

圖 4-34 顯示養護 7 天條件下之試體阻尼比變化。改各改良次數試體於 $\gamma < 0.001\%$ 區段阻尼比差異不大，初始值大致介於 0.9% 至 1.3%。隨剪應變上升，各組阻尼比皆呈穩定上升趨勢，其中 T2_C7_S02 與 T5_C7_S01 於 $\gamma \approx 0.01\%$ 附近的 D 值分別達 2.44% 與 2.14%，略高於 T1_C7_S03 與 T3_C7_S01。未改良試體 pure sand 2 之 D 值則維持在 1.8% 以下，整體變化幅度最小。

圖 4-35 呈現養護 14 天結果。養護 14 天試體整體阻尼比水準略低於養護 7 天者。T1_C14_S04 與 T2_C14_S03 曲線差異不大，前者在 $\gamma \approx 0.01\%$ 處約為 1.75%，後者為 2.53%，反映改良次數對耗能能力之影響在此養護階段已開始明顯分化。

圖 4-36 為養護 21 天試體之阻尼比曲線。T1_C21_S01 於 $\gamma \approx 0.01\%$ 區段之阻尼比達 4.79%，為三組中最高，曲線上升幅度亦最顯著，推測在膠結成熟後，其結構受剪產生破壞行為更活躍，耗能能力隨之增加。相對而言，T2_C21_S02 曲線變化趨緩，阻尼比由 2.64% 穩定上升至 2.85%，整體表現平穩，未見過度能量釋放現象。

綜合圖 4-34 至圖 4-36 可知，隨著改良次數增加，試體於中高剪應變區段之阻尼比上升幅度亦相對提高，顯示膠結結構在受剪過程中參與耗能反應的程度增加。特別是在二次與五次改良試體中，可觀察到剪應變大於 0.005% 後之阻尼比顯著提升，反映膠結強化雖有助於提升勁度，亦會導致更多結構滑移與局部破壞行為產生，進而促使能量耗散能力增強。

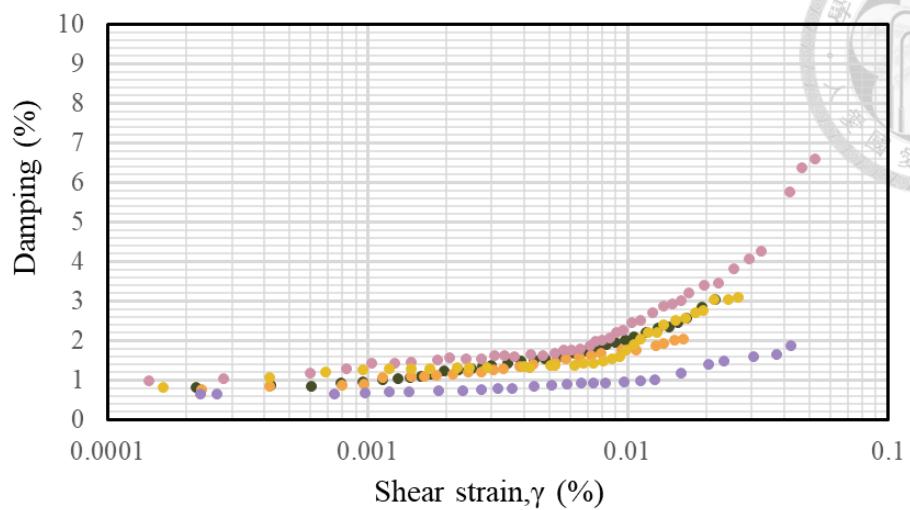
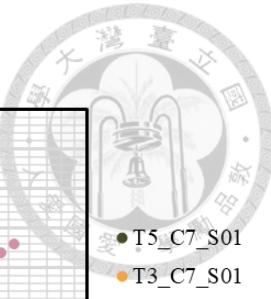


圖 4-34 不同改良次數試體於齡期七天下之阻尼比變化曲線

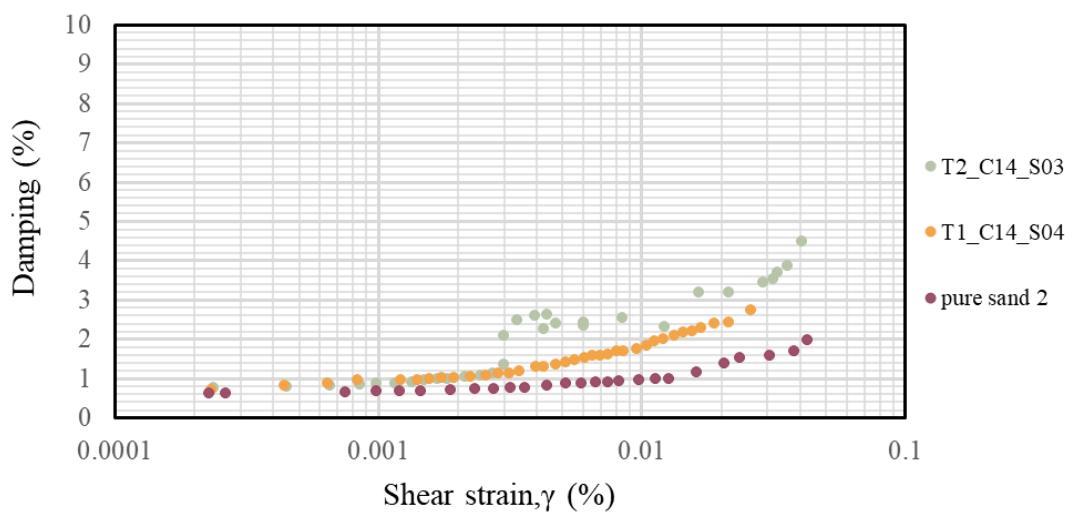


圖 4-35 不同改良次數試體於齡期十四天下之阻尼比變化曲線

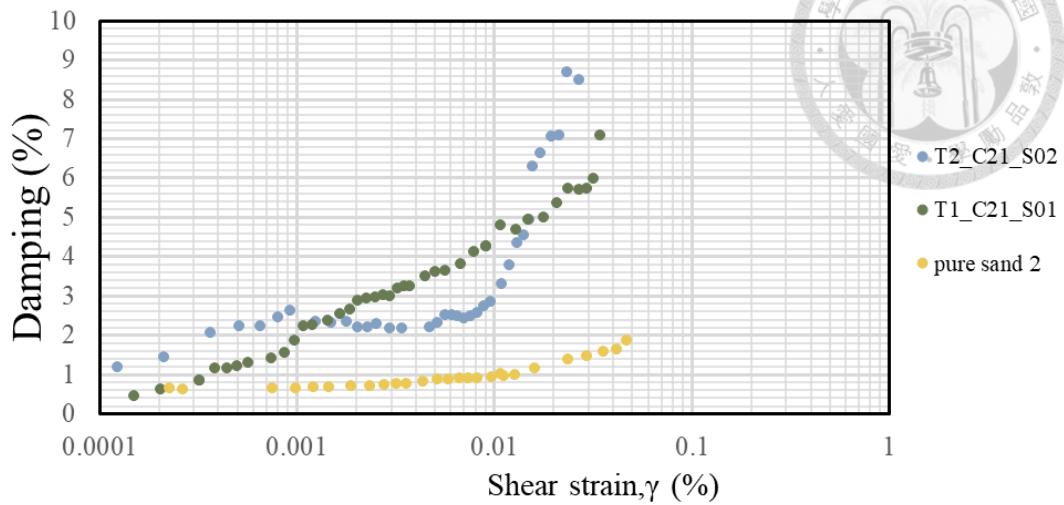
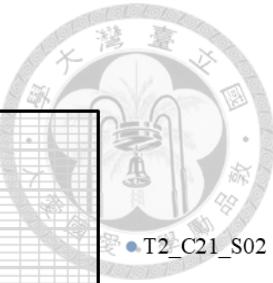


圖 4-36 不同改良次數試體於齡期二十一天下之阻尼比變化曲線



4.3 討論

4.3.1 酸洗結果與電腦斷層掃描結果之交叉比對

為驗證不同試體中碳酸鈣沉澱量之估算與空間分布特徵，本研究分別採用酸洗試驗與電腦斷層掃描進行碳酸鈣含量估算，並針對各改良次數試體進行交叉對比，相關結果如圖 4-37 所示。由圖中可見，無論以酸洗試驗或電腦斷層掃描結果判斷，碳酸鈣含量皆隨改良次數增加而明顯上升，顯示 MICP 反應具累積效果，重複灌漿可有效促進碳酸鈣持續生成與沉澱。

從圖 4-37 中可明顯觀察到，不論採用酸洗或 CT 分析，碳酸鈣含量皆隨改良次數穩定上升，顯示改良次數是影響碳酸鈣生成量的主要因素。一次改良 (T1) 之酸洗與 CT 結果分別為 0.186 與 0.2223 g/10 g sample，至五次改良 (T5) 則提升至 0.548 與 0.5852 g，兩者皆呈現穩定且近似線性上升趨勢。此結果說明，在固定灌漿組成與反應條件下，增加 MICP 改良次數能有效提升碳酸鈣總生成量，並進一步增強膠結效果。

兩種方法所得結果在趨勢上具有高度一致性，反映本研究試體在不同改良次數下之沉澱行為具有良好一致性與重現性。此結果亦強化先前觀察到之影像分布現象，顯示碳酸鈣隨改良次數提升不僅總量增加，分布密度與範圍亦趨向穩定與均勻，有助於後續力學特性之改善與分析。

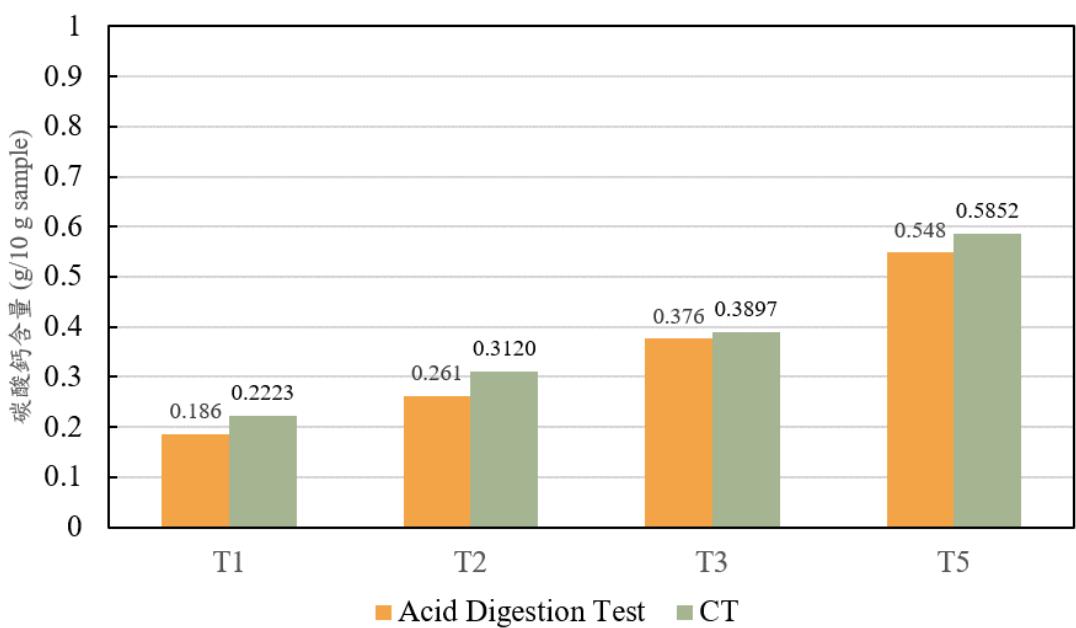


圖 4-37 不同改良次數試體之酸洗試驗與電腦斷層掃描碳酸鈣含量比較



4.3.2 掃描式電子顯微鏡觀察與元素分析之整合探討

綜合 SEM 影像與 EDS 元素分析可發現，MICP 改良次數對試體表面之碳酸鈣沉澱分布與結晶行為具有關鍵影響。初期改良（如 1 次與 2 次）僅於局部表面產生零星顆粒，可能因菌體數量不足，無法促成有效且連續性良好的碳酸鈣成核與成長反應。此階段沉澱物多以細小晶體形式附著於粗糙處，難以形成穩定的膠結結構。

至三次與五次改良後，隨菌液注入頻率與反應物濃度累積，砂粒表面出現大範圍結晶堆積，部分區域甚至形成連續沉澱，顯示 MICP 反應已具穩定機制，能在接觸界面上形成微觀橋結結構，有助於試體結構整體緻密化。

為釐清所觀測之鈣是否來自 MICP 反應所產生之碳酸鈣沉澱，亦針對未經任何改良之純砂進行 SEM 與 EDS 觀察（圖 4-12、表 4-4）。結果顯示，純砂樣品表面光滑、無沉澱附著，且 EDS 中未檢測到 Ca 元素，僅有 O 與 Si 為主成分，確認其為石英砂組成。此結果提供本研究評估 MICP 沉澱的背景基準，並排除原砂中天然鈣干擾的可能性。

元素分析方面，Ca 含量與改良次數間呈現明顯正相關，尤以三次與五次改良試體，其 Ca 原子比例分別為 2.41 at% 與 3.06 at%，顯示沉澱反應趨於成熟。由於原始樣品未檢測出 Ca 元素，而 MICP 改良後之樣品 Ca 含量大幅上升，C 與 O 元素比例亦同步提升，整體組成趨近碳酸鈣理論比例 ($\text{Ca:C:O} \approx 1:1:3$)，顯示沉澱物主要為碳酸鈣，故可合理判斷鈣元素來源為微生物誘導碳酸鈣沉澱，非來自砂土本身，亦非分析背景干擾。

綜合以上觀察推論，碳酸鈣沉澱首先從砂粒表面粗糙區或孔隙周邊進行成核，隨反應條件優化後逐漸擴展，並在多次改良後形成連續且穩定之晶體覆蓋結構。



4.3.3 剪力模數與阻尼比之整體變化趨勢

綜合第 4.2 節所呈現之結果可知，MICP 改良砂土試體之剪力模數與阻尼比，皆受改良次數與養護齡期顯著影響，並展現出一致且具物理意涵之力學反應趨勢。

就剪力模數而言，試體普遍於微小至中剪應變範圍內呈現典型之勁度衰減行為，反映土壤非線性之力學特性。在相同改良次數下，養護齡期愈長者，其初始 G 值較高，顯示碳酸鈣隨時間持續沉澱並於顆粒接觸面形成穩定膠結結構。同樣地，在固定養護條件下，改良次數的增加亦可穩定提升剪力模數，表示灌漿次數越多，碳酸鈣分布愈廣泛、膠結密度愈高，對整體勁度之貢獻愈顯著。

若進一步橫向比較各參數組合之差異，亦可發現養護齡期與改良次數間具交互補償效果。例如，T2_C14 (改良兩次、養護十四天) 之剪力模數曲線表現與 T5_C7 (改良五次、養護七天) 相近，顯示在改良次數受限的工程情境下，適當延長養護時間亦可獲得相當之勁度強化效果。

在阻尼比方面，各試體均表現出隨剪應變增加而上升之耗能趨勢，為典型非線性動態反應。高改良次數與長養護齡期的試體於中高剪應變範圍內之 D 值上升幅度明顯，推測其膠結網絡於變形過程中啟動滑移、斷裂與重排等機制，使能量以摩擦與膠結破壞形式逐步耗散。相對地，pure sand 2 初始阻尼比雖略低，但隨剪應變升高，表示其缺乏有效膠結支撐，主要由粒子接觸與重組導致能量釋放，難以展現穩定之耗能能力。

綜合剪力模數與阻尼比的變化結果可看出，隨著改良次數與養護時間增加，土壤的勁度與受振耗能能力明顯提升，顯示 MICP 在動態行為改善上具有成效。



4.3.4 非線性行為與能量耗散機制推論

剪力模數正規化 (G/G_{\max}) 可排除試體間初始勁度差異對比較的干擾，使得試體於非線性應變範圍內之勁度衰減行為更為明顯。本研究結果顯示，不同改良次數與養護齡期對 G/G_{\max} 曲線形狀的影響，實質反映了 MICP 所建構之膠結結構在變形歷程中對非線性反應的調控能力。

整體而言，改良組試體在初始剪應變範圍內 ($\gamma < 0.001\%$) 普遍維持穩定之 G/G_{\max} 水準，顯示膠結結構於小變形階段提供良好之顆粒拘束效果。當剪應變逐漸增加，部分試體開始出現明顯勁度衰減。雖多次改良可提高初期勁度，但在特定條件下亦可能因局部膠結集中或脆性破壞導致勁度下降加劇，顯示改良強度與結構韌性間仍存平衡需求。此現象反映雖膠結密度提升，但若膠結尚未成熟或分布不均，則易於較低應變下提前進入膠結破壞階段，進而加速勁度下降。

特別值得注意的是，改良次數與養護齡期對 G/G_{\max} 曲線的影響，並未呈現單調性。部分高次改良試體在中高剪應變區段反而出現較大衰減幅度，顯示過度灌漿所形成的脆性膠結可能缺乏韌性，當受剪時產生快速崩解，導致結構反應較不穩定。反觀低次改良且養護期充足者，其膠結雖較稀疏，但若分布均勻且形成較多具延展性的微結構橋接，反而能更有效延緩模數衰退，展現出具韌性之非線性調節行為。

此外，pure sand 2 試體表現出最低的勁度基準，但在正規化後，反而顯示其非線性衰減最為緩和。這一現象反映，顆粒間接觸控制主導之土體，在缺乏膠結網絡參與下，其反應機制較為單純，以彈塑性摩擦滑移為主，結構變化雖易啟動，但因不涉及脆性膠結破壞，反而可維持較為線性的模數遞減趨勢。

綜合而言， G/G_{\max} 曲線所呈現之非線性反應，實為 MICP 改良過程中微觀膠結型態、分布密度與晶體成熟度交互作用之反映。膠結均勻且穩定發展者，能夠於不同應變階段提供持續支撐力路，延緩勁度崩解；反之，若膠結局部集中或過度脆弱，則反應過程易因界面破壞而產生突降。此一觀察結果提醒，未來設計

MICP 改良參數時，應同時考量「總膠結量」與「膠結品質」，以兼顧初期勁度與長期變形下之穩定性表現，確保非線性階段仍具韌性與耐久性，強化其在動態荷載下之應用潛力。





第 5 章結論與建議



5.1 結論

本研究採用微生物誘導碳酸鈣沉澱 (Microbially Induced Calcite Precipitation, MICP) 技術對砂土進行力學性質改良，所使用之改良液濃度為 $OD_{600}=1.0$ ，培養基配比為 0.5 M 氯化鈣與 0.5 M 尿素混合溶液。實驗中分別進行改良一次、二次、三次與五次之改良，並搭配 7 天、14 天及 21 天之養護齡期，其中三次與五次改良僅施作 7 天養護。針對不同試體，採用酸洗法、電腦斷層掃描與共振柱試驗分析其碳酸鈣含量與分佈特性，並評估其剪力模數與阻尼比等動態力學反應。

研究結果獲得以下主要結論：

- (1) 碳酸鈣沉澱量與分佈特徵隨改良次數增加而穩定提升：實驗結果顯示，碳酸鈣總量隨灌漿次數增加而穩定提升，反映 MICP 具備良好的累積反應能力。酸洗試驗能反映試體中可溶性碳酸鈣之實際質量，而 CT 掃描則提供沉澱物於砂體內部三維空間中的分佈特徵與體積估算。兩者結果在趨勢上相符，且隨改良次數增加，兩者差距逐漸收斂，顯示沉澱反應趨於穩定與均質。整體而言，MICP 可在多次改良與持續養護下於砂體中有效生成可量化且穩定存在之碳酸鈣，對於增強土體勁度與強度具實質貢獻。
- (2) 剪力模數 G 顯著受改良次數與養護齡期影響：改良一次與二次者在養護期延長至 21 天後之 G 值明顯高於 7 天與 14 天者，顯示碳酸鈣形成與晶體成長有助於粒間勁度發展；而改良三次與五次雖僅施作 7 天養護，其 G 值仍明顯優於低改良次數組，驗證膠結量累積對勁度提升之效益。
- (3) 正規化 G/G_{max} 曲線在小應變區表現穩定：各改良組試體在剪應變 $\gamma < 0.001\%$ 時之 G/G_{max} 皆維持穩定高值，反映膠結作用對初始勁度之正

向影響。然而中高應變區之 G/G_{max} 曲線變化無固定趨勢，可能與局部膠結分佈、裂縫形成與剪切路徑多樣性相關。

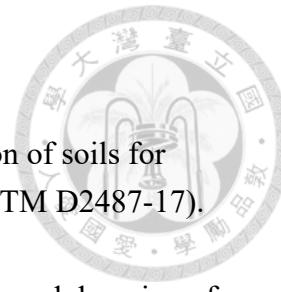
- (4) 阻尼比 D 隨剪應變上升而增加，受改良次數與齡期影響：各組試體之阻尼比曲線隨剪應變增大呈上升趨勢，尤其中高應變區 ($\gamma \geq 0.005\%$) 呈現明顯區別。在相同養護期下，改良次數愈多者其阻尼比較高；而於改良一次與二次者中，較長養護期亦有助於提升耗能能力。
- (5) MICP 為具潛力之地盤改良技術：本研究顯示，於固定配比條件下，可透過調整改良次數與養護齡期，達成針對性之勁度強化與耗能能力設計。MICP 於兼顧初期勁度與中高變形下耗能需求之工程中具應用潛力。



5.2 建議

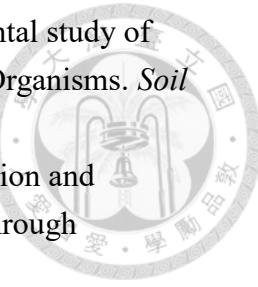
- (1) 導入重複荷載或動態衰退試驗，評估耐久性行為：本研究採共振柱試驗。評估單次動態加載反應，未來可進一步導入反覆剪力試驗或動態三軸試驗，模擬地震載重作用下之動態行為與勁度衰退歷程，作為災害韌性評估基礎。
- (2) 進一步解析微觀結構與沉澱機制對力學行為之影響：為釐清碳酸鈣晶體型態、分佈方式與顆粒間膠結效果之關係，建議可結合 X 光繞射分析 (XRD)，進行微觀結構觀察，並建立與剪力模數、阻尼比等動態參數間之機制性連結。

參考文獻



- [1] ASTM International. (2017). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)(ASTM D2487-17). ASTM International.
- [2] ASTM International. (2015). Standard test method for modulus and damping of soils by the resonant-column method (ASTM D4015-15). ASTM International.
- [3] ASTM International. (2021). Standard test methods for modulus and damping of soils by fixed-base resonant column devices (ASTM D4015-21). ASTM International.
- [4] Banik, N., Sarkar, R., & Uddin, M. E. (2023). Assessment of strength and low-strain shear modulus of bio-cemented sand considering MICP treatment. *Environmental Earth Sciences*, 82(4).
- [5] Behzadipour, H., & Sadrekarimi, A. (2023). Effect of microbial-induced calcite precipitation on shear strength of gold mine tailings. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(8).
- [6] Blauw, M., Lambert, J. W. M., & Latil, M. N. (2009). Biosealing: A method for in situ sealing of leakages. *Ground improvement technologies and case histories*.
- [7] Curry, T. S., Dowdley, J. E., & Murry, R. C. (1990). *Christensen's Physics of Diagnostic Radiology* (4th Edition ed.). Lea & Febiger.
- [8] DeJong, J. T. (2006). Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear. *J. Geotech. Geoenviron.*, 132(11): 1381-1392.
- [9] DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197-210.
- [10] Drnevich, V. P. (1970). Effects of strain history on the dynamic properties of sand. . *Ph.D. Dissertation, University of Michigan*.
- [11] Dului, O. G. (1999). Computer axial tomography in geosciences: An overview. *Earth-Science Reviews*, 48(4), 265-281.
- [12] Duo, L., Kan-liang, T., Hui-li, Z., Yu-yao, W., Kang-yi, N., & Shi-can, Z. (2018). Experimental investigation of solidifying desert aeolian sand using microbially induced calcite precipitation. *Construction and Building Materials*, 172, 251-262.
- [13] Fujita, Y., Taylor, J. L., Wendt, L. M., Reed, D. W., & Smith, R. W. (2010). Evaluating the potential of native ureolytic microbes to remediate a 90Sr contaminated environment. *Environmental Science & Technology*, 44(19), 7652–7658.

- [14] Han, Z., Cheng, X., & Ma, Q. (2016). An experimental study on dynamic response for MICP strengthening liquefiable sands. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(4), 673-679.
- [15] Hardin, B. O., & Drnevich, V. P. (1972). Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, ASCE*, 98(SM6), 603-624.
- [16] Li, M., Cheng, X., & Guo, H. (2013). Heavy metal removal by biomineralization of urease producing bacteria isolated from soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 76, 81-85.
- [17] Li, Y., & Chen, J. (2022). Experimental Study on the Permeability of Microbial-Solidified Calcareous Sand Based on MICP. *Applied Sciences*, 12(22).
- [18] Lim, J. X., Tanaka, Y., Chong, S. Y., Ong, Y. H., & Lee, M. L. (2025). Mechanistic Comparisons of MICP-treated Residual Soil and Sand Part I – Microstructural Formation and Deformation Behaviour of Soils. *Universiti Tunku Abdul Rahman*.
- [19] Liu, B., Tang, C.-S., Pan, X.-H., Xu, J.-J., & Zhang, X.-Y. (2024). Suppressing Drought-Induced Soil Desiccation Cracking Using MICP: Field Demonstration and Insights. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 150(3).
- [20] Ma, L., Pang, A. P., Luo, Y., Lu, X., & Lin, F. (2020). Beneficial factors for biomineralization by ureolytic bacterium *Sporosarcina pasteurii*. *Microb Cell Fact*, 19(1), 12.
- [21] Prongmanee, N., Horpibulsuk, S., Dulyasucharit, R., Noulmanee, A., Boueroy, P., & Chancharoonpong, C. (2023). Novel and simplified method of producing microbial calcite powder for clayey soil stabilization. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 35.
- [22] Rahman, M. M., Hora, R. N., Ahenkorah, I., Beecham, S., Karim, M. R., & Iqbal, A. (2020). State-of-the-Art Review of Microbial-Induced Calcite Precipitation and Its Sustainability in Engineering Applications. *Sustainability*, 12(15).
- [23] Richart, F. E., Jr., Hall, J. R., Jr., & Woods, R. D. (1970). Vibrations of soils and foundations. Prentice-Hall.
- [24] Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. *Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*.
- [25] Tian, Z., Tang, X., Xiu, Z., & Xue, Z. (2023). The Spatial Distribution of Microbially Induced Carbonate Precipitation in Sand Column with Different Grouting Strategies. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(2).



- [26] Torfehnezhad, M., Zareei, S. A., & Salemi, N. (2025). Experimental study of dynamic performance of loose sandy soil improved with micro-Organisms. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 190.
- [27] Wang, S., Shen, T., Tian, R., & Li, X. (2023). Uniformity evaluation and improvement technology of sandy clayey purple soil enhanced through microbially-induced calcite precipitation. *Biogeotechnics*, 1(4).
- [28] Wang, Y., Konstantinou, C., Soga, K., Biscontin, G., & Kabla, A. J. (2022). Use of microfluidic experiments to optimize MICP treatment protocols for effective strength enhancement of MICP-treated sandy soils. *Acta Geotechnica*, 17(9), 3817-3838.
- [29] Whiffin, V. S., van Paassen, L. A., & Harkes, M. P. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiology Journal*, 24(5), 417-423.
- [30] Yao, X., Huafeng, D., Jianlin, L., & Xingzhou, C. (2022). Shear performance and reinforcement mechanism of MICP-treated single fractured sandstone. *Frontiers in Earth Science*, 10.
- [31] Zhang, J., Su, P., Wen, K., Li, Y., & Li, L. (2020). Mechanical Performance and Environmental Effect of Coal Fly Ash on MICP-Induced Soil Improvement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(11), 3189-3201.
- [32] Zhang, M. S., Chiu, C. F., Zhou, Y. Z., & Wang, Y. N. (2024). Compression and water retention behavior of saline soil improved by MICP combined with activated carbon. *Sci Rep*, 14(1), 31484.
- [33] Zhang, X., Chen, Y., Liu, H., Zhang, Z., & Ding, X. (2020). Performance evaluation of a MICP-treated calcareous sandy foundation using shake table tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 129.
- [34] Zhang, X., Guo, J., Chen, Y., Han, Y., Yi, R., Gao, H., Liu, L., Liu, H., & Shen, Z. (2022). Mechanical Properties and Engineering Applications of Special Soils—Dynamic Shear Modulus and Damping of MICP-Treated Calcareous Sand at Low Strains. *Applied Sciences*, 12(23).