

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 Thesis



以砂箱試驗探討 MICP 工法對於土壤改良之成效

Effect of MICP Method on Soil Improvement by Sandbox
Test

劉玳語

Dye-Yu Liu

指導教授：葛宇甯 博士

Advisor: Louis Ge, Ph.D.

中華民國 112 年 6 月

June, 2023



致謝

很開心終於走到這一步了，至今回首都覺得很不可思議，從原先甚麼都不懂的小碩一，到現在竟然可以悠閒地寫致謝!! 一切當然最感謝葛宇甯老師的用心良苦了，也謝謝老師讓我看到不同高度的視野，能有勇氣嘗試出國闖蕩，還有讓我挑戰許多繪畫機會，最終收割不少滿意作品。接著也謝謝非常認真上進的兩璇學姊，學姊時常陪我一起腦力激動論文要做甚麼內容、細菌要怎麼培養、實驗要怎麼規劃設計等等，對我來說都好新鮮也好有趣! 我的碩士生涯要是沒有學姊真不知道該怎麼辦呢!

感謝我的爸爸，讓我能安心的繼續讀碩班，不會有經濟的煩惱，給我多兩年時間探索未來的可能! 也感謝研究室的同學們總是互相扶持，大家明明都很繁忙，但在特定日子也不忘聚在一起聊天喝酒，尤其辛苦昊擎每次都上演喝酒裝瘋的戲碼，帶給大家歡樂快活的氣氛。

最後，感謝同個研究室的梁維同學，不論是課業上、研究實驗上都幫忙我不少，在遇到研究瓶頸時，還會找我去河邊騎自行車；甚至對星象還頗有專業，可以為我指點一二；也深具甜點鑑賞的品味，每個月都會端上一道令人滿意的放鬆小點；對於交通路網更是精通，還可以帶我漫遊台北! 第一次北上念書，真的很幸運能遇到如此靠普的好同學呢!!!





摘要

台灣因位處歐亞板塊及菲律賓海板塊交界之環太平洋地震帶上，故地震相當頻繁，而當大規模地震發生時，常伴隨土壤液化產生並帶來嚴重災情，而隨著人口密度越來越高，對於土地利用之需求也與日俱增，原先傳統之低矮建物，漸漸開始由密集之高樓大廈所取代，因此進行土壤改良刻不容緩。本研究使用一種環境友善且具經濟性之地盤改良工法：微生物誘導碳酸鈣沉澱 (Microbially Induced Calcite Precipitation)，簡稱 MICP，該工法應用土壤中之細菌進行砂粒固結，藉此改善軟弱土壤之工程性能。本研究針對三種尺度進行 MICP 改良成效探討，分別為表面滲透之小型砂箱試驗、側向加壓滲透之中型砂箱試驗、側向加壓滲透之現地試驗。第一種小型砂箱試驗，將符合標準靜三軸試驗規格設計之取樣器 A 埋入後填砂，進行表面 MICP 改良液滲透，待七日養護完畢後，由酸洗試驗及靜三軸試驗結果顯示具有均勻且整體強度提升之改良成效。第二種中型砂箱試驗，將不產生側壁溶液阻擋之取樣器 B 埋入後填砂，進行側向 MICP 改良液加壓滲透，待七日養護完畢後，由酸洗試驗可以觀察到在 400 kPa 側向加壓下，有效改良範圍符合預期之走向。第三種現地試驗，將取樣器 A 及澆灌管線輔助壓克力基座埋入，進行側邊雙向 MICP 改良液加壓滲透，待七日養護完畢後，因現地試驗之不可控因素相當多，由酸洗試驗結果發現大部分取樣點仍有明顯之碳酸鈣結晶生成，顯示該澆灌系統之設計可以有效地將改良液滲透進土壤中。

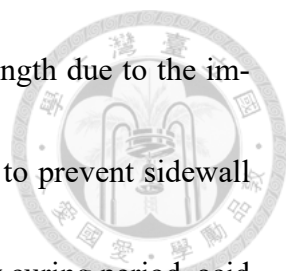
關鍵字： MICP、微生物誘導碳酸鈣沉澱、土壤液化、土壤改良、砂箱試驗





Abstract

As Taiwan is situated on the Circum-Pacific Seismic Belt, where earthquakes happen frequently and can lead to soil liquefaction, resulting in severe disasters. As the population density continues to increase and the demand for land use grows, traditional low-rise buildings are gradually being replaced by densely packed high-rise buildings. Therefore, soil improvement is urgently needed. This study employs an environmentally friendly and cost-effective ground improvement technique called Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP). MICP utilizes bacteria present in the soil to consolidate sand particles, thereby improving the engineering properties of weak soils. The effectiveness of MICP improvement was investigated at three scales: small-scale sandbox tests with surface infiltration, medium-scale sandbox tests with lateral pressure infiltration, and field tests with lateral pressure infiltration. In the small-scale sandbox test, sampler A, designed according to standard consolidated drained triaxial test specifications, was buried and filled with sand. After a seven-day curing period, the results of acid digestion tests and consolidated



drained triaxial tests indicated a uniform and overall increase in strength due to the improvement. In the medium-scale sandbox test, sampler B, designed to prevent sidewall solution blockage, was buried and filled with sand. After a seven-day curing period, acid digestion tests revealed that the effective improvement range matched the expected trend under a lateral pressure of 400 kPa. In the field test, sampler A and an acrylic base with watering pipelines were buried. After a seven-day curing period, due to numerous uncontrollable factors in the field test, acid digestion test results showed significant calcium carbonate crystal formation in most sampling points, indicating that the design of the watering system effectively allowed the improvement solution to permeate the soil.

Keywords: Microbially Induced Calcite Precipitation, Soil Liquefaction, Soil Improvement, Sandbox Tests



目錄

	Page
致謝	i
摘要	iii
Abstract	v
目錄	vii
圖目錄	xii
表目錄	xviii
符號列表	xix
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究動機與目的	2
1.3 研究方法	3
1.4 研究架構	3
第二章 文獻回顧	5
2.1 土壤液化機制與破壞	5
2.1.1 土壤液化發生機制	6
2.1.2 土壤液化之破壞	7
2.2 生物介導之土壤改良	13



2.2.1	土壤改良	13
2.2.2	概述生物介導之土壤改良	15
2.2.3	微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP)	18
2.2.4	MICP 機制	18
2.2.5	MICP 影響因子	24
2.2.6	MICP 在大地工程之應用	36
第三章 研究方法		41
3.1	菌液配製與培養	41
3.1.1	試驗材料與器材	41
3.1.2	液態培養基配製	43
3.1.3	固態培養基配製	46
3.1.4	凍菌配製	48
3.1.5	菌液品質檢測	49
3.1.6	MICP 菌液完整配製流程	51
3.2	砂箱試驗材料	53
3.2.1	石英砂	53
3.2.2	尿素	53
3.2.3	氯化鈣	54
3.2.4	濾紙	54
3.2.5	離心管	56
3.2.6	取樣器	56
3.2.6.1	取樣器 A	56
3.2.6.2	取樣器 B	60

3.2.7	頂土器	61
3.2.8	壓克力砂箱	61
3.2.8.1	小型壓克力砂箱	61
3.2.8.2	中型壓克力砂箱	62
3.2.9	可拆式排水緩衝池	63
3.3	試體準備	64
3.3.1	壓力鍋試驗	64
3.3.1.1	純砂試體準備	64
3.3.1.2	MICP 之乾試體準備	65
3.3.1.3	MICP 改良試體準備	66
3.3.2	靜態三軸壓密排水剪切試驗	68
3.3.3	酸洗試驗	69
3.4	試驗方法	69
3.4.1	壓力鍋試驗	70
3.4.1.1	比重試驗	70
3.4.1.2	含水量試驗	71
3.4.1.3	壓力鍋試驗流程	71
3.4.2	靜態三軸壓密排水剪切試驗	74
3.4.3	酸洗試驗	77
3.4.4	表面滲透之小型砂箱試驗	80
3.4.4.1	試驗設備	80
3.4.4.2	表面滲透之小型砂箱試驗流程	80
3.4.5	側向加壓滲透之中型砂箱試驗	83
3.4.5.1	試驗設備	83
3.4.5.2	試驗測試	84
3.4.5.3	側向加壓滲透之中型砂箱試驗流程	88

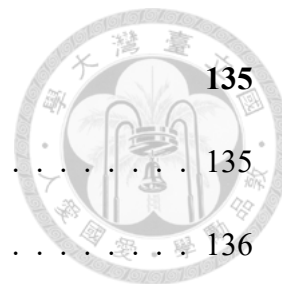
3.4.6	側向加壓滲透之現地試驗	93
3.4.6.1	試驗規劃	93
3.4.6.2	試驗設備	94
3.4.6.3	澆灌系統配置	95
3.4.6.4	回填土物性試驗	98
3.4.6.5	MICP 改良液配製	98
3.4.6.6	側向加壓滲透之現地試驗流程	101
第四章	結果與討論	107
4.1	壓力鍋試驗	107
4.2	表面滲透之小型砂箱試驗	108
4.2.1	酸洗試驗結果	108
4.2.2	靜態三軸壓密排水剪切試驗結果與比較	111
4.3	側向加壓滲透之中型砂箱試驗	116
4.3.1	噴液有效範圍分布	116
4.3.2	含水量分布	119
4.3.3	酸洗試驗結果	120
4.3.3.1	垂直向改良成效	121
4.3.3.2	水平向改良成效	123
4.3.3.3	取樣器 B 對改良液滲透之影響	125
4.4	側向加壓滲透之現地試驗	127
4.4.1	含水量分布	127
4.4.2	酸洗試驗結果	128
4.4.2.1	垂直向改良成效	128
4.4.2.2	水平向改良成效	129
4.4.3	靜態三軸壓密排水剪切試驗結果	130

第五章 結論與建議

5.1 結論 135

5.2 建議 136

參考文獻 138



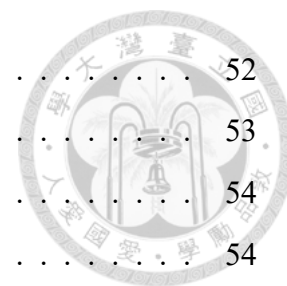


圖目錄

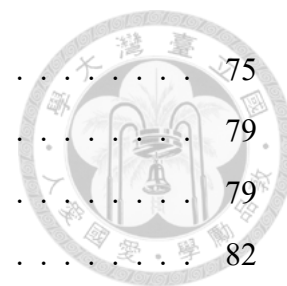
2.1	理想現地受循環加載示意圖 (Obermeier, 1996)	5
2.2	1964 年日本新潟縣因土壤液化造成建物傾倒 (Bird et al., 2005)	6
2.3	液化引致土壤顆粒排列改變 (Obermeier, 1996)	6
2.4	1995 年阪神大地震造成神戶港港灣設施嚴重受損 (Bird et al., 2005) .	9
2.5	地面振盪示意圖 (Youd, 1984)	9
2.6	噴砂示意圖 (Obermeier, 1996)	10
2.7	噴砂現象 (Bird et al., 2005)	10
2.8	結構物傾斜示意圖 (Youd, 1984)	11
2.9	1999 年土耳其科賈埃利地震造成建築物傾斜倒塌 (Bird et al., 2005) .	11
2.10	側潰示意圖 (Kramer, 1996)	12
2.11	1989 年美國洛馬普里塔地震造成側潰破壞 (Bird et al., 2005)	12
2.12	流動示意圖 (Kramer, 1996)	12
2.13	不同土壤類型適合之土壤改良方法 (Han, 2015)	14
2.14	不同類型之微生物特徵 (Mitchell and Santamarina, 2005)	16
2.15	概述生物介導之土壤改良系統 (DeJong et al., 2010)	17
2.16	<i>Bacillus pasteurii</i> (Dejong et al., 2013)	19
2.17	<i>Bacillus pasteurii</i> (SEM) (Bang et al., 2010)	19
2.18	不同菌種與土壤顆粒之對應關係 (Mitchell and Santamarina, 2005) . .	20
2.19	細胞膜表面螯合鈣離子 (Ca^{2+}) 示意圖 (Vijay et al., 2017)	20
2.20	以尿素水解方式使微生物誘導碳酸鈣沉澱 (DeJong et al., 2010)	22
2.21	<i>Bacillus pasteurii</i> 誘導碳酸鈣沉澱 (DeJong et al., 2010)	22
2.22	碳酸鈣結合土壤顆粒示意圖 (DeJong et al., 2010; Rahman et al., 2020)	23
2.23	碳酸鈣結合土壤顆粒 (SEM) (Choi et al., 2016)	23

2.24	細菌細胞濃度對碳酸鈣晶體尺寸之影響 (Al Thawadi S, 2012)	26
2.25	細菌細胞濃度對碳酸鈣晶體形態之影響 (Cheng et al., 2007)	27
2.26	細菌細胞濃度對試體剪力強度之影響 (Chou et al., 2011)	27
2.27	細菌細胞濃度對試體體積應變之影響 (Chou et al., 2011)	27
2.28	環境 pH 值對碳酸鈣晶體形狀之影響 (Soon et al., 2013)	29
2.29	環境溫度與尿素活性之關係 (Van Paassen, 2009)	31
2.30	環境溫度對碳酸鈣晶體形狀之影響 (Wang et al., 2005)	31
2.31	環境溫度對碳酸鈣晶體大小之影響 (Cheng et al., 2014)	32
2.32	膠結效率對碳酸鈣固化作用之影響 (Mortensen et al., 2011)	34
2.33	不同膠結溶液濃度對土壤滲透性之影響 (Al Qabany and Soga, 2013)	34
2.34	不同鈣源對碳酸鈣晶體形態之影響 (Soon et al., 2013)	35
2.35	不同鈣源產生之碳酸鈣晶體形態 (Wong, 2022)	35
2.36	不同鈣源對碳酸鈣晶體形態之影響 A 氯化鈣；B 醋酸鈣；C 乳酸鈣；D 葡萄糖酸鈣 (Gorospe et al., 2013)	36
2.37	鬆散礫石之固結現地試驗 (Van Paassen, 2011)	38
2.38	改良砂柱之 SEM 圖 (De Muynck et al., 2008)	38
2.39	改良砂柱之 XRD 分析 (De Muynck et al., 2008)	38
2.40	大尺度砂粒固結試驗配置 (Van Paassen et al., 2010b)	39
2.41	大尺度砂粒固結試驗 (Van Paassen et al., 2010b)	39
2.42	沙灘之固結與防蝕現地試驗 (Gomez et al., 2015)	40
2.43	沙灘砂顆粒之固結效果 (Gomez et al., 2015)	40
3.1	培養基配製	45
3.2	將滅菌指示膠帶貼於鋁箔紙上	45
3.3	以 $0.22\ \mu m$ 過濾膜混合尿素水溶液與培養基	46
3.4	以畫盤方式培養 <i>Bacillus pasteurii</i> 之菌落	47
3.5	固態培養基配製過程	48
3.6	<i>Bacillus pasteurii</i> 之凍菌	49
3.7	以可見光分光光譜儀檢測菌液之 OD_{600}	50
3.8	以 pH 測量儀檢測菌液之 pH 值	50
3.9	以水平震盪機培養菌液	52

3.10 菌液配製流程示意圖	52
3.11 越南石英砂之粒徑分布	53
3.12 試藥級尿素	54
3.13 工業級氯化鈣	54
3.14 型號 541 之濾紙	55
3.15 0.2 μm 膜片式濾紙	55
3.16 酸洗試驗用離心管	56
3.17 取樣器 A 初始設計圖	57
3.18 取樣器 A 初始設計及底部洞洞板	57
3.19 取樣器 A 第二版設計圖	58
3.20 取樣器 A 第二版	58
3.21 取樣器 A 最終版設計圖	59
3.22 取樣器 A 最終版	59
3.23 取樣器 B	60
3.24 以頂土器取樣示意圖	61
3.25 小型壓克力砂箱	62
3.26 中型壓克力砂箱	62
3.27 可拆式排水緩衝池設計圖	63
3.28 可拆式排水緩衝池成品	63
3.29 試體環、透水石及濾紙	65
3.30 小型圓紙筒	66
3.31 MICP 改良試體封上塑膠袋進行養護	67
3.32 取下紙筒之 MICP 改良試體	67
3.33 壓力鍋之 MICP 改良試體修整準備	67
3.34 靜態三軸壓密排水剪切試驗之 MICP 改良試體準備	68
3.35 酸洗之 MICP 改良試體準備	69
3.36 試體覆蓋透水石及濾紙以除氣水浸泡	73
3.37 飽和試體取出後進鍋	73
3.38 壓力鍋試驗設備	73
3.39 靜態三軸壓密排水剪切試驗設備	74



3.40 將 MICP 改良試體置於三軸底座上	75
3.41 酸洗試驗	79
3.42 酸洗試驗設備	79
3.43 表面滲透之小型砂箱試驗填砂	82
3.44 表面滲透之小型砂箱試驗改良液澆灌	82
3.45 改良噴管前之加壓染色水於水中產生非水平噴射路徑	84
3.46 200 <i>kPa</i> 加壓染色水於乾砂之滲透情形 (藍色)	85
3.47 350 <i>kPa</i> 加壓染色水於乾砂中發生砂湧 (紅色)	86
3.48 澆灌管設計更新	87
3.49 服貼之上部乾砂負載	87
3.50 不同壓力下之染色範圍測試	88
3.51 砂箱底部排水系統準備	90
3.52 放入取樣器 B	90
3.53 MICP 改良液配製材料	91
3.54 側向加壓滲透之中型砂箱試驗配置	91
3.55 側向加壓滲透之中型砂箱試驗示意圖	92
3.56 MICP 改良液澆灌完畢	92
3.57 試坑位置	93
3.58 補充 MICP 改良液之漏斗形容器	96
3.59 改良液補充/澆灌調整閥	96
3.60 可進行雙向澆灌之黃銅三通閥	97
3.61 澆灌管線輔助壓克力基座之成品	97
3.62 回填土用之越南砂粒徑分布	98
3.63 以磁石攪拌機培養菌液 (轉速 360 <i>RPM</i> ，進行 24 小時)	100
3.64 濃縮液態培養基	100
3.65 每水桶所需之 MICP 改良液材料	101
3.66 怪手開挖試坑	102
3.67 放置澆灌管線輔助壓克力基座	103
3.68 放置取樣器 A	103
3.69 承壓板及上部負載	103



3.70	裝取 MICP 改良液	104
3.71	改良試體開挖及取樣	104
3.72	側向加壓滲透之現地試驗配置圖	105
3.73	側向加壓滲透之現地試驗示意圖	105
4.1	純砂與改良試體之 SWCC (體積含水量 vs 試體基質吸力)	107
4.2	第一組酸洗結果	109
4.3	第二組酸洗結果	109
4.4	第三組酸洗結果	109
4.5	第四組酸洗結果	110
4.6	第五組酸洗結果	110
4.7	紙模試體與五組小砂箱試體之酸洗結果比較	110
4.8	紙模試體與小砂箱試體在圍壓 50 <i>kPa</i> 之應力應變曲線比較 (0.5 <i>M</i> 氯化鈣，養護七日)	112
4.9	紙模試體與小砂箱試體在圍壓 50 <i>kPa</i> 之體積應變曲線比較 (0.5 <i>M</i> 氯化鈣，養護七日)	112
4.10	紙模試體與小砂箱試體在圍壓 100 <i>kPa</i> 之應力應變曲線比較 (0.5 <i>M</i> 氯化鈣，養護七日)	113
4.11	紙模試體與小砂箱試體在圍壓 100 <i>kPa</i> 之體積應變曲線比較 (0.5 <i>M</i> 氯化鈣，養護七日)	113
4.12	紙模試體與小砂箱試體在圍壓 200 <i>kPa</i> 之應力應變曲線比較 (0.5 <i>M</i> 氯化鈣，養護七日)	114
4.13	紙模試體與小砂箱試體在圍壓 200 <i>kPa</i> 之體積應變曲線比較 (0.5 <i>M</i> 氯化鈣，養護七日)	114
4.14	純砂試體在不同圍壓下之莫爾圓 (Wong, 2022)	115
4.15	紙模試體在不同圍壓下之莫爾圓 (Wong, 2022) (0.5 <i>M</i> 氯化鈣，養護七日)	115
4.16	小砂箱試體在不同圍壓下之莫爾圓 (0.5 <i>M</i> 氯化鈣，養護七日)	115
4.17	開挖前後不同方向之染色液分布	117
4.18	開挖後內部之染色液分布情形	118

4.19	加壓噴液產生滲流孔洞 (A: 噴口處正前方之兩取樣器尚未取出; B: 取出外側之取樣器後; C: 取出內側之取樣器後; D: 滲流孔洞與澆灌噴口放大圖)	118
4.20	開挖前後之 MICP 改良液分布	118
4.21	第一排取樣器 B 內外部之含水量分布	119
4.22	第二排取樣器 B 內部及下層水平延伸處之含水量分布	119
4.23	第一排取樣器 B 內外部之碳酸鈣分布	120
4.24	第二排取樣器 B 內部及下層水平延伸處之碳酸鈣含量分布	121
4.25	不同 Y 座標位置隨深度變化之碳酸鈣分布	122
4.26	在深度 $Z=11.5\text{ cm}$ 處之碳酸鈣分布	123
4.27	在深度 $Z=18.5\text{ cm}$ 處之碳酸鈣分布	123
4.28	在深度 $Z=25.5\text{ cm}$ 處之碳酸鈣分布	124
4.29	在深度 $Z=32.5\text{ cm}$ 處之碳酸鈣分布	124
4.30	在深度 $Z=39.5\text{ cm}$ 處之碳酸鈣分布	124
4.31	不同 X 座標位置於深度 $Z=32.5\text{ cm}$ 及 $Z=39.5\text{ cm}$ 處之碳酸鈣分布	125
4.32	在座標 $X=14\text{ cm}$ 及 $X=24\text{ cm}$ 處隨深度變化之碳酸鈣分布	126
4.33	現地取樣點分布如白球及黃球所示 (白球為隨深度定點取樣, 黃球為深度 33 cm 及 66 cm 處之水平分布取樣)	127
4.34	現地各取樣點之含水量分布	128
4.35	在橫向 $X=138\text{ cm}$ 及 $X=93\text{ cm}$ 兩處之垂直方向碳酸鈣含量分布	129
4.36	在深度 $Z=33\text{ cm}$ 及 $Z=66\text{ cm}$ 兩處之水平方向碳酸鈣含量分布	130
4.37	水洗前後之粒徑分布曲線變化	131
4.38	現地改良試體在圍壓 100 kPa 之應力應變曲線 (0.5 M 氯化鈣, 養護七日)	132
4.39	現地改良試體在圍壓 100 kPa 之體積應變曲線 (0.5 M 氯化鈣, 養護七日)	132
4.40	小砂箱試體與現地試體在圍壓 100 kPa 之應力應變曲線比較 (0.5 M 氯化鈣, 養護七日)	133
4.41	小砂箱試體與現地試體在圍壓 100 kPa 之體積應變曲線比較 (0.5 M 氯化鈣, 養護七日)	133



表目錄

2.1	不同細菌產生之碳酸鈣晶體特徵 (Tang et al., 2020)	25
3.1	541 濾紙規格	55
3.2	0.2 μm 膜片式濾紙規格	55
4.1	不同試體類型之應力應變比較	111
4.2	不同試體類型之土壤強度參數比較	111
4.3	現地試體資訊	131



符號列表

Q_{10}	尿素酶活性因子
r	特定時間點之尿素水解速率
r_0	初始之尿素水解速率
T	溫度
C_u	均勻係數
C_c	曲率係數
OD_{600}	光密度
D_r	相對密度
γ_d	乾土單位重
Δu	試體超額孔隙水壓增量
$\Delta\sigma_3$	圍壓增量
H_c	壓密後試體高

H_0	初始試體高
ΔH	試體高度變化量
A_c	壓密後試體斷面積
V_0	試體初始體積
ΔV	試體體積變化量
ϵ_f	破壞時之應變
L	試體長度
t_f	破壞時間
C	凝聚力
ϕ	摩擦角





第一章 緒論

1.1 研究背景

台灣因位處歐亞板塊及菲律賓海板塊交界之環太平洋地震帶上，故地震相當頻繁，而當大規模地震發生時，較鬆散之砂質土壤因孔隙水壓提高，砂土抗剪能力下降，使砂土結構重新排列，土壤狀態如流體般且承载力差，此現象即為土壤液化。土壤液化常伴隨嚴重災情，如 1999 集集地震、2010 甲仙地震、2016 年美濃地震等造成大規模土壤液化現象，使地面許多建物因承载力不足而倒塌毀損，由歷史見證許多起土壤液化造成之嚴重災害，促使國人更加正視土壤液化引致之破壞風險。

在台灣，隨著人口密度越來越高，對於土地利用之需求也與日俱增，原先傳統之低矮建物，漸漸開始由密集之高樓大廈所取代，因此進行土壤改良刻不容緩。常見之土壤改良工法有：灌漿工法、混合工法、動力夯實工法、地層冰凍工法等等。而 Boquet et al.(1973) 觀察到土壤中某些細菌具有可誘導碳酸鈣晶體產生沉澱之能力，可以將散砂固結成岩體，其中一種為巴氏芽孢桿菌 (*Sporosarcina pasteurii*，又名 *Bacillus pasteurii*)，許多工程界與學界人士開始將此特性應用於工程性能改善上，即為 MICP 工法。其應用案例如：在加拿大，以 MICP 技術治理灘地，以提高其穩定性 (Gomez et al., 2015)；在荷蘭，以 MICP 技術固結礫石，以利水平鑽孔作業 (Van Paassen, 2011)；在日本，以 MICP 技術加強固化土壤、防止土

壤液化 (Yasuhara et al., 2012)。



1.2 研究動機與目的

一般常見之土壤改良技術包括灌漿、混合、夯實和振動等工法，可用於提高現地土壤的強度與勁度。然而，這些土壤改良方法仍有其限制及缺點。例如，在傳統灌漿工法中，使用之水泥或化學物質會在製造過程、灌漿後造成地下水或空氣污染。而夯實和振動則會影響附近現有結構物之穩定性，也具有鄰房傾斜倒塌之隱憂，且使用之重型設備在電力能源消耗上也較為龐大。因此，欲改良相對大量之土壤，除了使用上述工法外，搭配其他具有經濟性且環保之土壤改良方法勢在必行。

隨著近期各國開始提倡淨零碳排、生態永續等議題，環境友善及永續共存之工法更顯必要，而以生物技術進行工法轉型之創新應用顯然已是趨勢，其中能應用土壤中之細菌進行砂粒固結之土改工法：微生物誘導碳酸鈣沉澱 (Microbially Induced Calcite Precipitation)，簡稱 MICP 工法，已於工程領域上逐漸備受重視與深入研究，為相當具有未來發展潛能之新型工程技術。

在本研究中，將針對以下幾點進行進一步地分析與探究：

1. 巴氏芽孢桿菌之培養與有效之 MICP 改良液配製。
2. 以 MICP 工法進行砂箱表面滲透之土壤改良成效。
3. 以 MICP 工法進行砂箱側向加壓滲透之土壤改良成效。
4. 以 MICP 工法進行現地加壓滲透之土壤改良可行性。



1.3 研究方法

本研究之砂箱試驗使用比重為 2.66 之越南石英砂，現地試驗使用比重為 2.65 之越南砂。菌種使用巴氏芽孢桿菌 (*Sporosarcina pasteurii*，又名 *Bacillus pasteurii*)，與尿素及氯化鈣配製成 0.5M 之 $Urea - CaCl_2$ 之 MICP 改良液。

本研究為探討 MICP 改良液對於土壤改良之成效，以砂箱試驗觀察表面滲透與側向加壓滲透兩種形式，接著設計一套簡易之澆灌系統進行現地試驗，探討現地 MICP 改良液之滲透行為，以供後續室內試驗有更實務之模擬參考。其中改良成效以酸洗試驗及靜態三軸壓密排水剪切試驗分別探討試體均勻性及剪力強度變化。

1.4 研究架構

本研究分五章節，第一章為緒論，說明本研究之研究背景、動機與目的、方法及架構。第二章為文獻回顧，介紹土壤液化之機制、災害以及改善方法，說明常見之土壤改良方法，並探討具有環境友善之 MICP 工法其機制與應用。第三章為研究方法，描述菌液配製方法、MICP 改良液配製方法、使用材料與設備，並針對各種室內試驗及現地試驗進行詳細之試驗目的介紹與操作流程說明。第四章為結果與討論，探討經由 MICP 工法改良後之試體，以壓力鍋試驗、靜態三軸壓密排水剪切試驗及酸洗試驗分別討論其試體排水能力、試體強度及試體均勻性之改良成效。第五章為結論與建議，針對本研究成果進行總結並為後續研究提出一些看法與建議。





第二章 文獻回顧

2.1 土壤液化機制與破壞

土壤液化是用來描述飽和之非凝聚性土壤在不排水情況下，受到瞬間或反覆加載(圖2.1)，導致土壤抗剪強度下降或產生大量土壤連續變化之現象。自從西元1964年，日本新潟縣(圖2.2)及美國阿拉斯加州(Seed and Idriss, 1971; Youd and Perkins, 1978; Satake and Abe, 1983; Bird et al., 2005)接連發生大規模土壤液化，促使許多學者重視液化災害，針對土壤液化機制進行深入研究，發展出許多評估法以探討各種土壤之抗液化能力(Seed et al., 1985; Skempton, 1986; Robertson, 1990)。

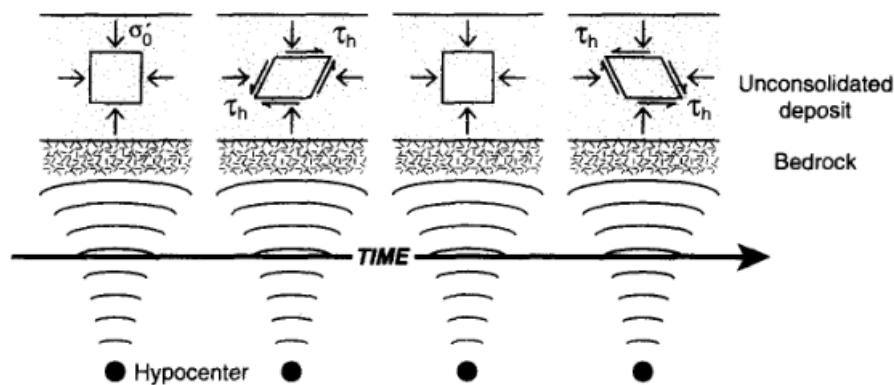


Figure 2.1: 理想現地受循環加載示意圖 (Obermeier, 1996)



Figure 2.2: 1964 年日本新潟縣因土壤液化造成建物傾倒 (Bird et al., 2005)

2.1.1 土壤液化發生機制

飽和且疏鬆之砂質土壤在不排水情況下，因地震使土壤受到短暫週期性之擾動時，剪力波由下往上傳遞，改變土壤顆粒之排列狀態，如圖2.3所示，該土壤在趨於緊密之過程中，顆粒間之孔隙縮小，使得孔隙水受到擠壓而激發超額孔隙水壓，此時土壤中無適當路徑供超額孔隙水壓有效地排除，當超額孔隙水壓力累積至初始土壤應力大小時，土壤有效應力為零，代表土壤已失去承载力，此時土體迅速產生大量連續變形，呈現如流體般，故稱之為土壤液化 (Seed and Idriss, 1971; Kramer and Seed, 1988; Obermeier, 1996)。

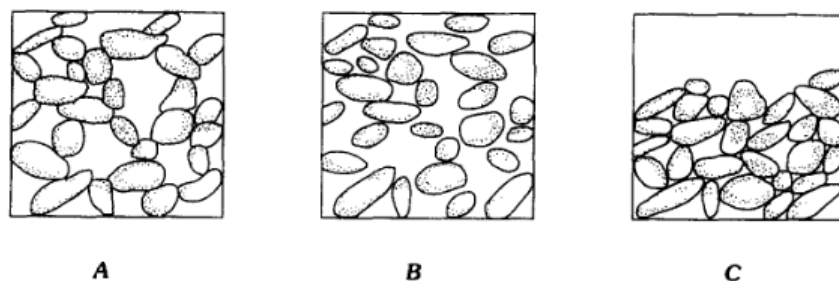


Figure 2.3: 液化引致土壤顆粒排列改變 (Obermeier, 1996)

土壤液化依其行為可再分為初始液化、液化、反覆流動 (Seed, 1979)，分別敘述如下：



1. 初始液化 (Initial Liquefaction):

疏鬆之飽和砂土受到動態週期性外力作用之過程中，孔隙水壓不斷上升，土壤漸漸失去其原有之剪力強度與支撐力，待其超額孔隙水壓與土壤有效應力相等時，此時之土壤達到液化之臨界狀態，該狀態稱為初始液化。

2. 液化 (Liquefaction):

孔隙水壓已累積或維持在較高水位時，此時土壤有效應力極小，當土壤受到靜態負載或動態週期性外力作用下，孔隙水壓急速上升，使土壤失去剪力強度與支撐力，該現象稱為液化。

3. 反覆流動 (Cyclic Mobility):

在液化過程中，土壤失去原有之剪力強度與支撐力，導致土壤發生顆粒重新排列和破碎化，在無殘餘阻抗時持續產生變形，產生類似流動之現象，該流動現象通常反覆發生，對土壤和建築物之破壞產生嚴重影響，此現象稱為反覆流動。

2.1.2 土壤液化之破壞

1995 年 1 月 17 日，同為環太平洋地震帶之日本發生規模 7.2 之阪神大地震，港區新生地發生大規模之液化與地層下陷，造成神戶港之碼頭、港灣設施嚴重損毀，如圖2.4所示，港灣機能全面癱瘓。此外，神戶大橋、港灣高速公路、阪神高速公路等交通設施亦受地震災害嚴重影響 (Bird et al., 2005)。大部分土壤液化破壞較少直接產生民眾傷亡，大多是因地表結構物大範圍沉陷傾斜或維生管線破壞導致間接傷亡，其中土壤液化所造成之常見破壞類型主要有以下六種類型 (Obermeier, 1996):



1. 地面振盪 (Ground Oscillation):

當液化發生在坡度平緩之地形，因土體受振時無側向位移之空間，使得上部覆土塊分離並於液化層上方來回碰撞，如圖2.5所示，此振盪伴隨著裂縫及地表沉陷，也可能對地下管線造成嚴重破壞。

2. 噴砂 (Sand Boils):

土體受振動時會激發超額孔隙水壓，若土層中具有不透水層，無處宣洩之孔隙水將不斷累積，水之累積造成土壤剪力強度大幅降低，當累積至一定壓力時，孔隙水壓力迅速找尋弱面或裂隙釋壓，此時地下水夾帶部分懸浮砂土由液化層向上滲流至地表噴出，在地表形成數個圓錐沉積物，如圖2.6及圖2.7所示，外型類似小型火山之錐體即為噴砂。

3. 沉陷與傾斜 (Settlement and Tilt):

疏鬆之飽和砂土受振後，其土壤顆粒懸浮於水中，待振動結束，孔隙水壓消散，土壤顆粒沉降並重新排列，造成地表沉陷，如圖2.8所示，其中更嚴重之差異沉陷恐導致上方結構物傾斜或倒塌，如圖2.9所示。

4. 側潰 (Lateral Spreading):

在約 1-3 度之緩坡，由於液化使土壤失去剪力強度，當液化發生於一連續之地層，且有一自由面 (如河道)，其上方尚未液化之土層因重力作用而往低處產生滑動，如圖2.10及圖2.11所示，滑動之位移量最多可達十米，側潰發生之地表常會出現數道幾乎平行於河道之裂縫。

5. 流動破壞 (Flow Failure):

在大於 3 度之斜坡，由於液化使土壤失去剪力強度，地勢較高之土體因重力作用而往低處流動，如圖2.12所示，此破壞類型規模較大，土塊位移可達數

公里，常出現於路堤、邊坡、土壩，當受到地震作用時，常造成邊坡滑動或壩體流失。



6. 地下結構物上浮 (Buoyant Rise of Buried Structure):

地下結構如管線、人孔、儲槽等重量較周圍土體為輕，當土體受振動時會激發超額孔隙水壓，給予地下結構物上浮力，造成其上浮或斷裂破壞。



Figure 2.4: 1995 年阪神大地震造成神戶港港灣設施嚴重受損 (Bird et al., 2005)

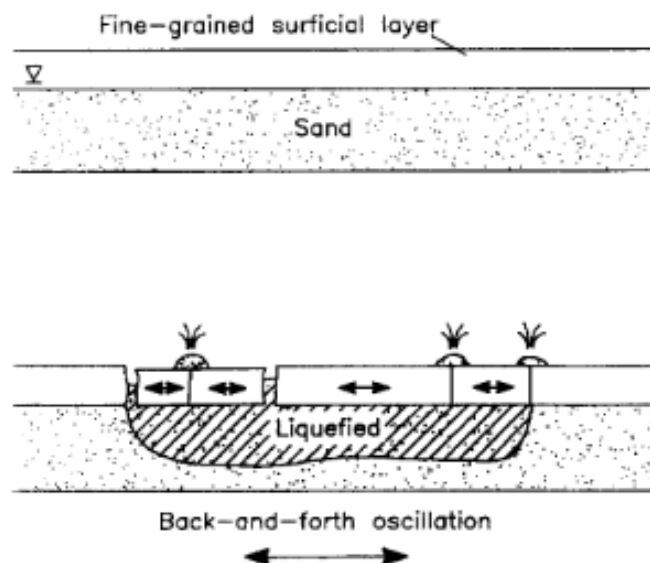


Figure 2.5: 地面振盪示意圖 (Youd, 1984)

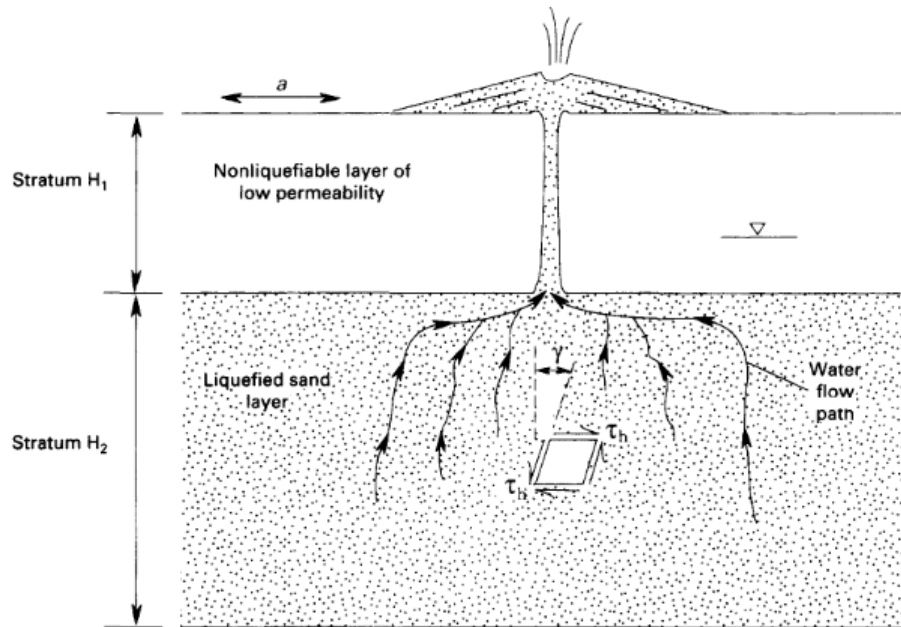


Figure 2.6: 噴砂示意圖 (Obermeier, 1996)



Figure 2.7: 噴砂現象 (Bird et al., 2005)

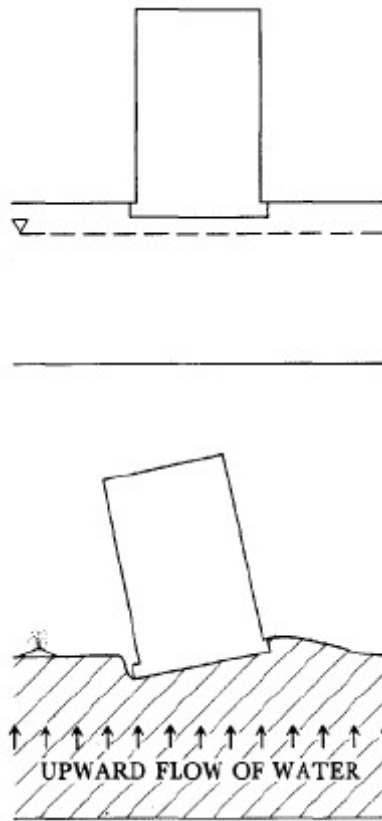


Figure 2.8: 結構物傾斜示意圖 (Youd, 1984)



Figure 2.9: 1999 年土耳其科賈埃利地震造成建築物傾斜倒塌 (Bird et al., 2005)

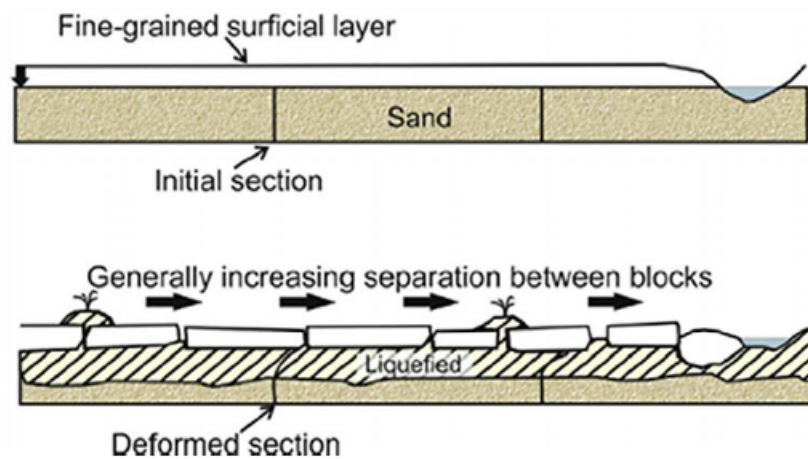
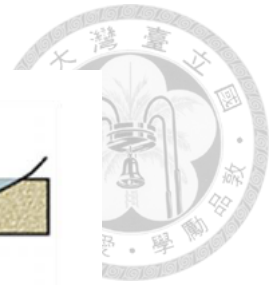


Figure 2.10: 側潰示意圖 (Kramer, 1996)



Figure 2.11: 1989 年美國洛馬普里塔地震造成側潰破壞 (Bird et al., 2005)

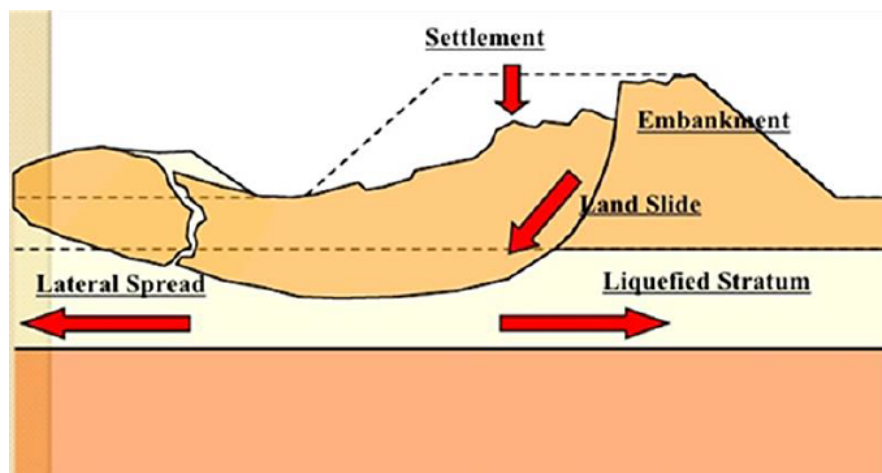


Figure 2.12: 流動示意圖 (Kramer, 1996)



2.2 生物介導之土壤改良

2.2.1 土壤改良

隨著工業化帶動整體產業結構轉型，再到現在高科技發展吸引人潮發展新市鎮，人口之聚集性日益明顯，然而，隨著城市人口不斷激增，交通建設、民宅、商辦大樓等不論是大跨距之結構物、低矮建物與高樓層建物之需求與時俱增。因台灣位處於環太平洋地震帶上，不論是舊城市或是規劃開發中之新市鎮，皆無可避免地震恐造成之直接結構破壞或是因土壤液化間接造成之地表沉陷、傾倒及管線上浮，而台灣各地之土壤組成並非一致，部分地區處於相對軟弱地盤，受到地震產生之液化危害可能較高，因此，預先做好最根本之土壤改良即有其必要性。

Han (2015) 建議，在選擇一適當之土壤改良方法前需考慮以下條件：

1. 結構條件：

包含結構與基腳之類型、形狀及尺寸；載重分布；結構與基腳單元之靈活性及延展性；性能要求(如總沉陷、差異沉陷、側向位移及最小安全係數)。

2. 地工條件：

包含地理景觀；地質構造；地工材料之類型、位置及厚度；地下水位高度；土層年齡；土壤組成類型；土壤粒徑分布等，其中不同土壤類型適合之土壤改良方法如圖2.13所示。

3. 環境條件：

包含有限制之振動、噪音、空氣及水汙染；廢棄土等。

4. 建造條件：

包含場址條件；容許建造工時；建材及建造設備適用性；合格承包商；建造成本等。



5. 可靠性及耐久性:

包含建材、土工及結構體之變異性；承包商施工品質等。

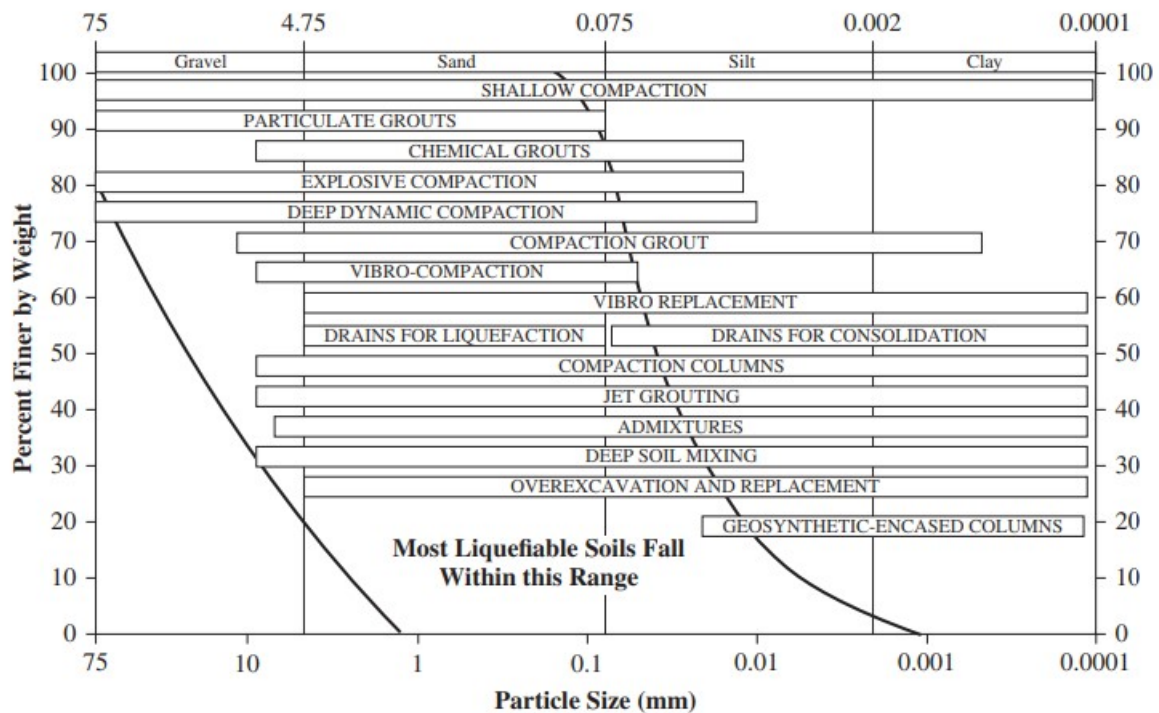


Figure 2.13: 不同土壤類型適合之土壤改良方法 (Han, 2015)

DeJong et al. (2010) 提到，全球 40000 件以上執行中之土壤改良計畫，每年總支出超過 6 億美元，這當中大部分之土壤改良技術利用機械能或人造材料，這兩者皆需大量能源與生產原料才得以持續進行。其中一種常見之方法為注入人工合成材料(如微細水泥、環氧樹脂、丙烯醯胺、酚醛塑料、矽酸鹽和聚氨酯)進入土壤孔隙中，使土壤顆粒結合在一起 (Xanthakos et al., 1994; Karol, 2003)，為一種透過各種化學、噴射及滲透作用來完成之灌漿技術。然而，這些方法在環境方面頗具爭議，備受公共政策與輿論之審查，結果顯示: 除了矽酸鹽外，所有化學灌漿方法皆具有毒性 (Karol, 2003)。1974 年，日本福岡發生丙烯醯胺灌漿液污染水井事件，與五起水中毒有關，導致幾乎所有化學灌漿被禁止 (Karol, 2003)，這也在美

國引起回響，待審核之法規要求市場大部分產品撤回，部分國家也提議禁止使用各種人工合成灌漿材料。



此外，除了環境問題，大部分灌漿工法也存在著低執行確定性之問題。一般來說，灌漿工法僅在距離灌漿點 $1 \sim 2\text{ m}$ 處為有效注入 (DeJong et al., 2010)，施工期間之灌漿品質控制多為考慮灌注量與灌注壓力，確切漿液流向實則難以判斷，較少針對地下實際變化進行即時量測。灌漿之不確定性迫使設計過度保守，導致不必要之項目成本及灌漿量過度消耗。

因此，可靠之監測技術有其必要，且開發具有可持續性(如經濟效益、環境友善)之新型態土壤改良方法更顯重要。其中，相對新興之生物介導工法，即為透過生物技術來調節土壤特性，是目前較具有可持續性及發展性之土壤改良方式，該新興工法之潛在優勢將於下一小節討論。

2.2.2 概述生物介導之土壤改良

土壤為一豐富之生態系，在地表附近每克土壤有超過 10^9 個微生物細胞，微生物細胞之濃度通常隨著深度增加而減少，在大部分土壤改良工程下限 30 米深處，每克土壤仍存在大約 10^6 個微生物細胞 (Whitman et al., 1998)，表示對於生物介導之土壤改良工法，可利用之微生物數量相當龐大。其中單細胞之微生物包含各種細菌 (Bacteria)、古細菌 (Archaea) 及真核生物 (Eukarya)，根據 Mitchell and Santamarina (2005) 之研究，其不同微生物之特徵，如圖 2.14 所示。

大環境對微生物之生物量有顯著之影響，土壤保護力也會強烈影響土壤中之微生物性能。其中土壤保護力即為受母質影響之環境因素，包含土壤質地、黏土含量、飽和度或酸鹼值 (Van Veen et al., 1984)。除了環境因素影響微生物之生物量，其實微生物同時也參與著土壤之生成，以構成適合其生長之棲息地 (Paul and

Clark, 1989)。微生物普遍存在於地底下已有很長時間，因此，透過微生物之行為來改良土壤性質相當具有可行性。

Bacteria	Archea	Eukarya
- Peptidoglycan in the cell wall is unique to bacteria (attacked by some antibiotics) - Some bacteria can survive harsh conditions by forming spores.	- Most cell walls contain significant amount of protein. - They are primarily present in anaerobic subsurface environments and around organic compounds.	- This domain includes: algae (photosynthetic eukarya - produce most of the oxygen in the world), fungi (gather energy by decomposing sources of organic carbon - includes tube-like filaments call mold), and protozoa (complex single cell decomposers). - They may not have a cell wall (1). Many cell functions are not implemented by the membrane (2), but by specialized membrane-enclosed organelles (3). They always have a membrane-enclosed nucleus (4). - Diatoms are eukarya with cell walls. Foraminiferan have internal shells. - Compartmentalization allows eukarya to be larger (diameter 2-100 μm) than bacteria and archea - Most eukarya are aquatic. The population size is expected to be small in pristine aquifer sediments, but it increases in sediments contaminated with organic compounds. - Most eukarya require oxygen. Therefore, they are less common microorganisms in the subsurface. - There are multiple forms of reproduction and motion in the eukarya domain (e.g., flagela, cilia, pseudopods).
Common Characteristics - Bacteria and archea have different chemical composition but similar cellular structure: a strong cell wall in most cases (1), membrane (2), cytoplasm (3), folded chromosome (4). They have no membrane-enclosed nucleus. - The semi-permeable cell membrane controls the transport of chemicals and electrical charges in-and-out of the cell. In addition, the cell membrane conducts many functions including energy generation. - They are spherical, rod and curved shaped, and typically 0.5-to-3 μm long. Size reflects optimal conditions between volume-related internal functions and surface-related transport of input and waste. - There are cells that can live under extreme pH, temperature, and salt concentration. Therefore, they are present in most subsurface environments. - They reproduce by fission into two (reproduction time: from minutes to few days). Flagela may protrude from the surface to propel the cell, and pili to attach the cell to surfaces.		

Figure 2.14: 不同類型之微生物特徵 (Mitchell and Santamarina, 2005)

生物介導之土壤改良系統是指一類似化學反應之網路，生物活動在土壤中被控制，而其產生之副產物可以改變土壤之工程性質 (DeJong et al., 2010)。生物活動提供了控管化學網路反應之時間、速率及空間分布之能力，進而產生得以改善土壤特性之副產物，如圖2.15所示。根據Kohnhauser (2007)，在生物介導下，其化學過程主要可以生成三種副產物形式：無機沉澱、有機沉澱及氣體生成，分別可代表生物礦化、生物膜形成及生物氣體生成。其中生物礦化過程包含磁鐵礦 (Magnetite)、硫複鐵礦 (Greigite)、非晶矽 (Amorphous silicon) 及方解石 (Calcite) 之生成。

而產生之副產物於空間上需在特定區域，才能有效地影響土壤行為。對於生物礦化，無機沉澱物若能夠形成於顆粒之間之縫隙，該礦化行為對於強度、剛度或滲透性之變化有較明顯貢獻。對於生物膜，若有機沉澱物是形成於溶液中或暴露於顆粒表面，便能夠有效增加滲透性之變化。最後，對於生物氣體，產生之氣

泡必須在特定之大小範圍並均勻地分布於孔隙流體中，才能顯著地降低孔隙流體之壓縮性 (DeJong et al., 2010)。

在生物介導之土壤改良中，可利用兩種方法來調整反應時間，第一種方法是生物刺激 (Bio-stimulation)，即注入營養物質以刺激原微生物族群之增殖；另一種方法為生物增強 (Bio-augmentation)，即透過注入額外微生物以增加或增強微生物族群量。不論是生物刺激抑或是生物增強，其目的皆為提高微生物族群之活性水平或濃度，使其達到啟動及維持化學反應所需之水平。而微生物之活性會改變環境之酸鹼值，直到觸發化學反應之特定條件出現。當化學反應網路被啟動後，微生物代謝過程之速率可決定所得之產物 (DeJong et al., 2010)。

因此，生物介導之土壤改良方法在大地工程上具有強大之潛力，該工法可以改善許多土壤性質，包含強度、剛度、透水性、壓縮性及體積變化等 (Whiffin et al., 2007; Van Paassen, 2009; DeJong et al., 2010; Al Qabany, 2011)。

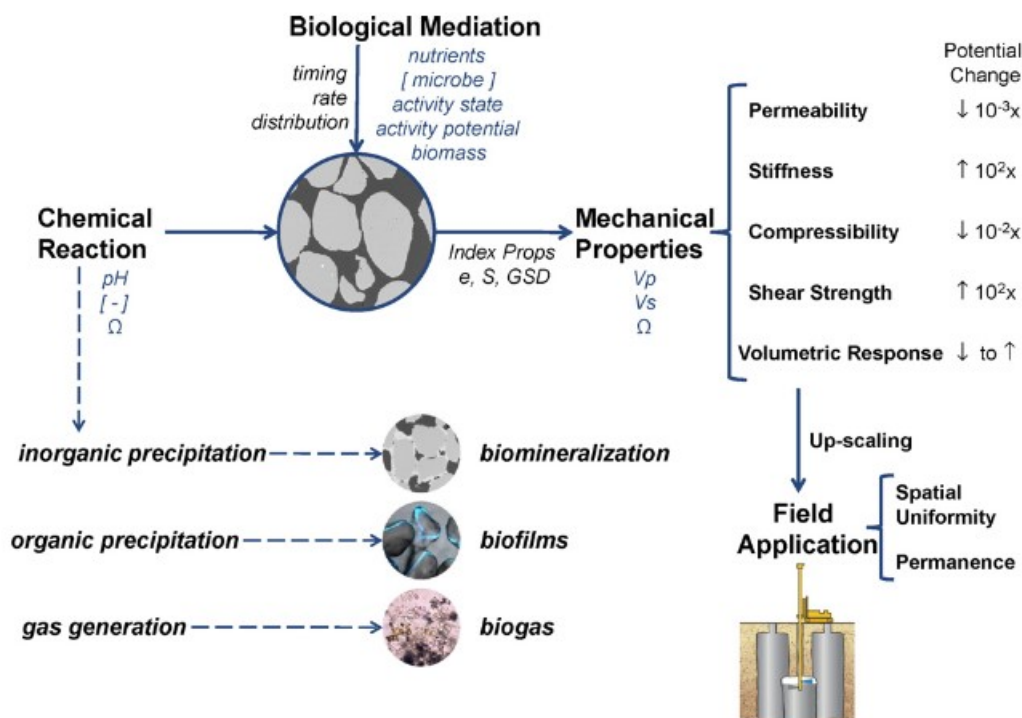


Figure 2.15: 概述生物介導之土壤改良系統 (DeJong et al., 2010)



2.2.3 微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP)

其中一種生物介導之土壤改良技術稱為: 微生物誘導碳酸鈣沉澱 (Microbially Induced Calcite Precipitation), 簡稱 MICP。

MICP 係以微生物在土壤中進行一連串生物化學反應, 其產物有助於碳酸鈣沉積於土壤孔隙中, 受到膠結之孔隙可以有效地降低孔隙率及水力傳導度。該技術利用土壤微生物進行土壤改良, 是為較先進之工法之一。

至今, 大地工程與生物化學之跨領域研究中, 微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 一直是主要焦點。在 MICP 中, 微生物會因代謝作用產生碳酸鈣 (Stocks-Fischer et al., 1999; Ramachandran et al., 2001), 其中, 根據 DeJong et al. (2010), 微生物可以藉由不同之生物化學過程產生碳酸鈣, 包含尿素水解 (Benini et al., 1999; Ciurli et al., 1999)、脫氮作用 (Van Paassen et al., 2010a)、硫酸鹽還原使白雲石沉澱 (Warthmann et al., 2000)、鐵還原使方解石沉澱 (Roden et al., 2002)。而在這些生物化學過程中, 尿素水解方式對微生物有較少能源消耗, 且在大量之微生物與植物中均有發現尿素酶活性 (Bachmeier et al., 2002)。

2.2.4 MICP 機制

在大地工程領域中, 尿素酶細菌因其成本低、效率高、可控制反應過程及容易進行分離與取樣等, 因此相對較受到關注。在 MICP 相關研究當中, 進行土壤改良大多以芽孢桿菌為主, 其體內之尿素酶可以有效地進行尿素水解反應, 如巴氏芽孢桿菌 *Bacillus pasteurii* (Stocks-Fischer et al., 1999; Ramachandran et al., 2001; DeJong et al., 2006; Achal et al., 2009; Tobler et al., 2011)、巨型桿菌 *Bacillus megaterium* (Soon et al., 2014) 以及圓形芽孢桿菌 *Bacillus sphaericus* (De Belie and

De Muynck, 2008; Chou et al., 2011; Ercole et al., 2012)，都被證實可以誘導碳酸鈣沉澱。其中又以巴氏芽孢桿菌 *Bacillus pasteurii* 之研究最為廣泛。



Figure 2.16: *Bacillus pasteurii* (Dejong et al., 2013)

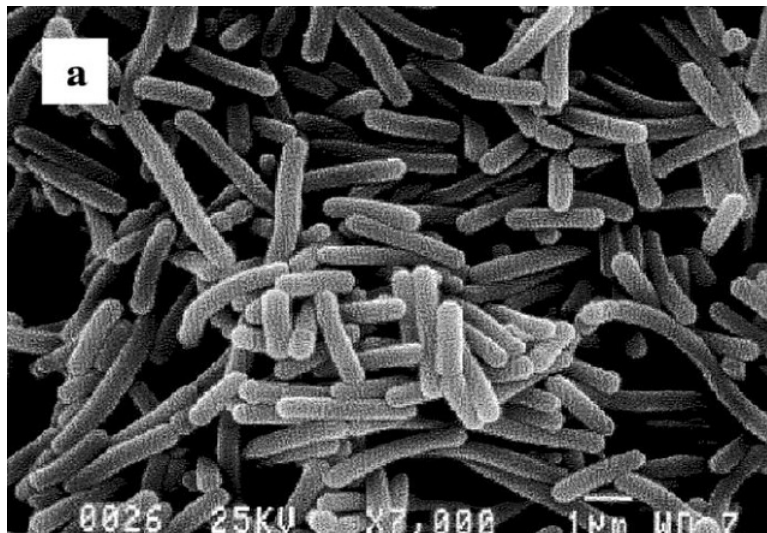


Figure 2.17: *Bacillus pasteurii* (SEM) (Bang et al., 2010)

Bacillus pasteurii 為一種普遍存在於大自然中之好氧細菌，嗜鹼性且具有高活性之尿素酶 (Ferris et al., 1996)，其外型如圓桿狀，如圖2.16及2.17所示。微生物能夠在粗顆粒土壤孔隙中自由移動，無論是透過自身推動抑或是被動擴散，然而，若土壤顆粒孔徑過小將會阻擋其進出，根據Mitchell and Santamarina (2005)，此類細菌細胞直徑通常約為 $0.5\ \mu\text{m} \sim 3\ \mu\text{m}$ ，因此，細菌不會進入孔徑低於 $0.4\ \mu\text{m}$ 之土壤類型，關於不同菌種與土壤顆粒之對應關係，如圖2.18所示。

Bacillus pasteurii 可以形成大量之細胞內尿素酶 (Urease)，菌株在生長時會不斷從環境中分解營養來源，使環境之 pH 值增加，以供適合尿素酶活性之鹼性環境，而細菌之細胞膜表面帶有負電荷之水溶性物質會不斷螯合鈣離子 (Ca^{2+})，當晶體離子之濃度升高至利於核化反應時，碳酸根離子逐漸與細胞表面之鈣離子結合，產生碳酸鈣 ($CaCO_3$) 沉澱 (Kroll, 1990)，如圖2.19所示，即所謂之微生物誘導碳酸鈣沉澱 (MICP) 過程。

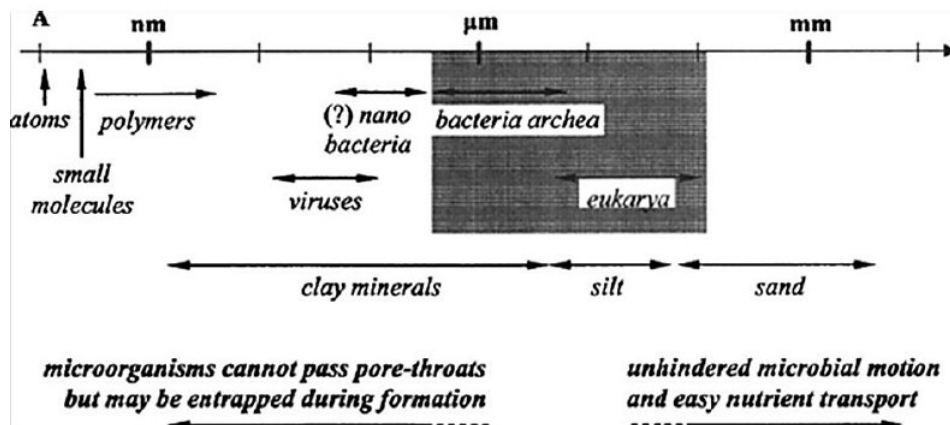


Figure 2.18: 不同菌種與土壤顆粒之對應關係 (Mitchell and Santamarina, 2005)

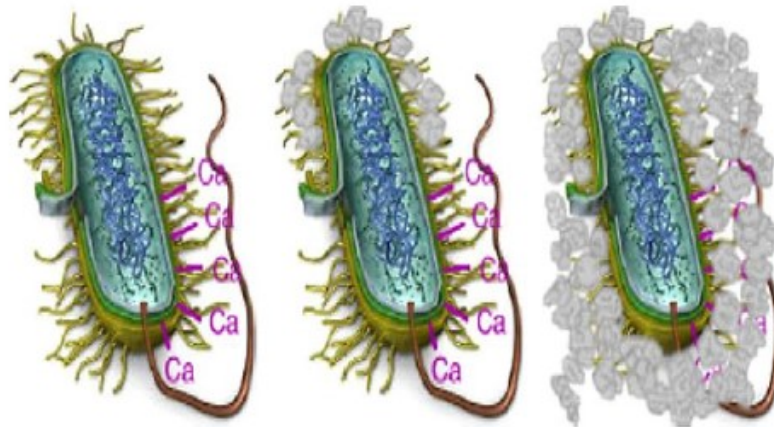


Figure 2.19: 細胞膜表面螯合鈣離子 (Ca^{2+}) 示意圖 (Vijay et al., 2017)

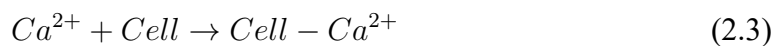
基於尿素水解進行之 MICP 技術，在其生物化學反應過程中，生物活性會使土壤中之碳酸鈣均勻沉澱，並提高環境之酸鹼值，以創造適合尿素酶活性之反應條件 (DeJong et al., 2006; Whiffin et al., 2007)，其基本原理為：能產生尿素酶之細菌表面帶負電荷，可從周圍環境吸收鈣離子 (Ca^{2+})，同時藉由自身之尿素酶

催化環境之尿素 $((NH_2)_2CO)$ 進行水解，產生氨 (NH_3) 與二氧化碳 (CO_2) ，其中氨 (NH_3) 再與水 (H_2O) 作用，產生銨根離子 (NH_4^+) 與氫氧根離子 (OH^-) ；二氧化碳 (CO_2) 則接著與氫氧根離子 (OH^-) 作用，產生碳酸根離子 (HCO_3^-) ，最終，吸附在尿素酶細菌上之鈣離子 (Ca^{2+}) 與環境之碳酸根離子 (HCO_3^-) 、氫氧根離子 (OH^-) 結合，產生碳酸鈣 $(CaCO_3)$ 與水 (H_2O) ，如圖2.20及2.21所示，這些產生之碳酸鈣晶體可以結合土壤顆粒，並填補內部之孔隙與裂縫，如圖2.22及2.23所示，其主要之反應式如下 (Kantzas et al., 1992; Ramachandran et al., 2001; DeJong et al., 2006):

尿素水解與碳酸根離子生成:



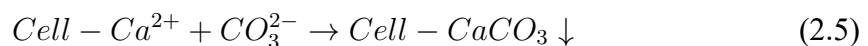
帶有負電荷之細胞表面吸收鈣離子:



環境中氫氧根離子增加，促使細胞表面之鈣離子與碳酸根離子結合:



細胞表面碳酸鈣沉澱之淨反應式:



碳酸鈣沉澱之淨反應式：

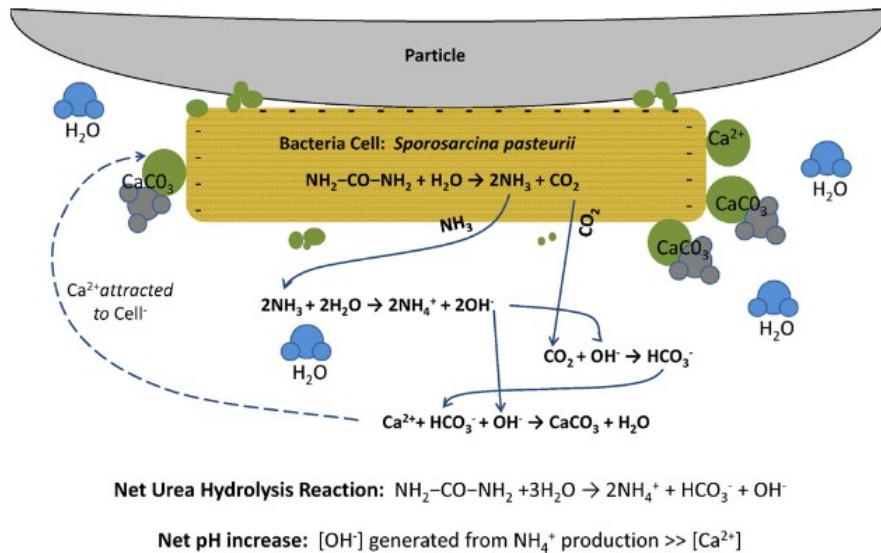


Figure 2.20: 以尿素水解方式使微生物誘導碳酸鈣沉澱 (DeJong et al., 2010)

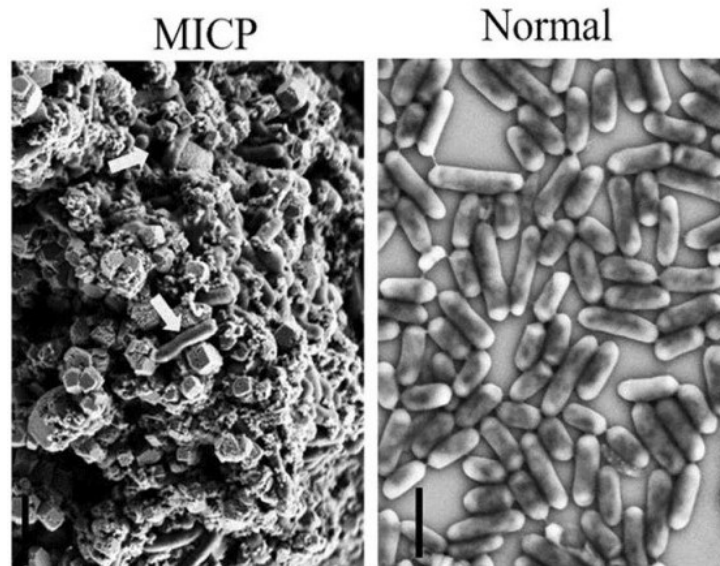


Figure 2.21: *Bacillus pasteurii* 誘導碳酸鈣沉澱 (DeJong et al., 2010)

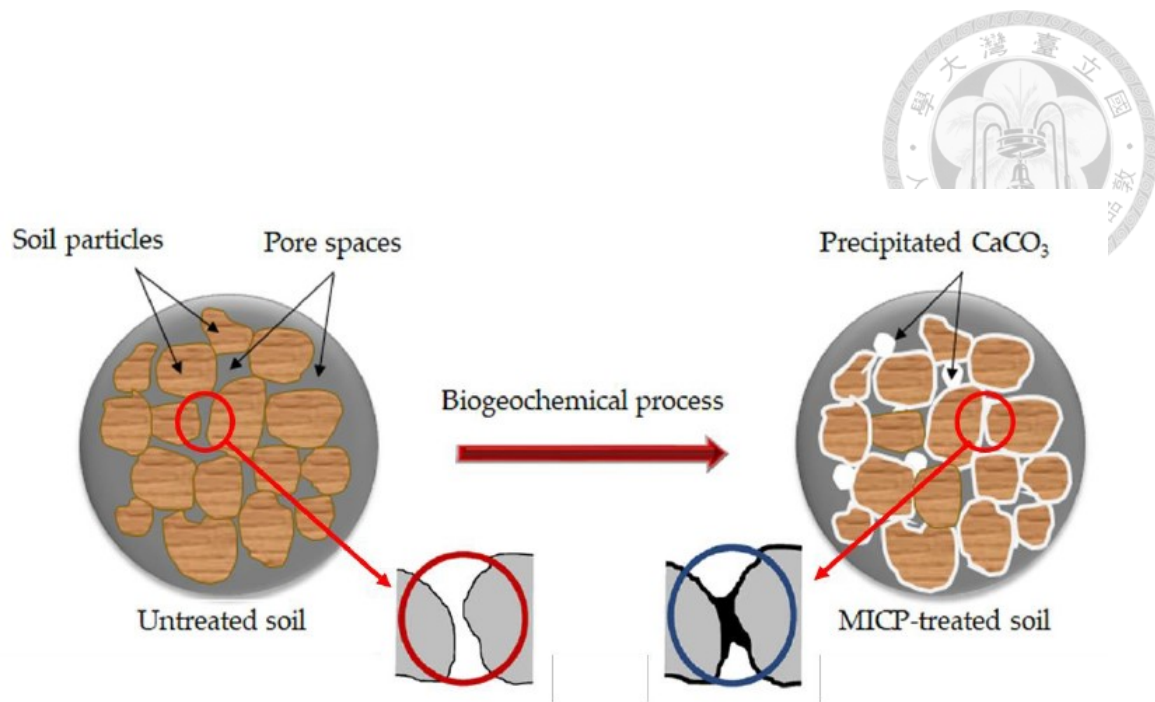


Figure 2.22: 碳酸鈣結合土壤顆粒示意圖 (DeJong et al., 2010; Rahman et al., 2020)

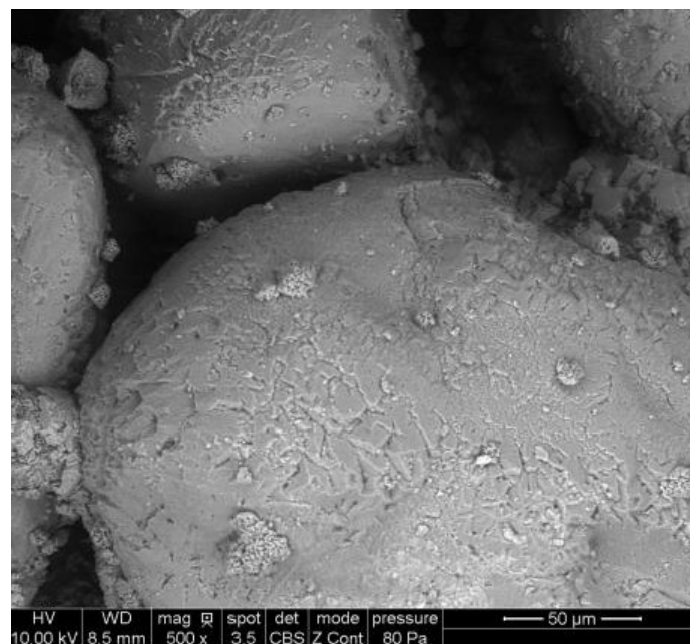


Figure 2.23: 碳酸鈣結合土壤顆粒 (SEM) (Choi et al., 2016)



2.2.5 MICP 影響因子

有許多環境、生物、物理和化學因素會影響 MICP 進行材料改良之性能，其中這些因素包含：細菌類型、細菌細胞濃度、環境 pH 值、環境溫度、改良液濃度、鈣源種類等 (Kitamura et al., 2002; Tang et al., 2020)，分別敘述如下：

1. 細菌類型

不同尿素酶細菌產生之碳酸鈣在形態上與晶體類型皆有所不同，主要是因為沉積於細胞表面之胞外聚合物 (Extracellular Polymeric Substances，簡稱 EPS)。EPS 是由蛋白質及多醣所組成，不同尿素酶細菌所產生之 EPS 對其生物化學特性有相當大之差異，Ercole et al. (2012) 從 *Bacillus sphaericus* 菌株中提取出可誘導方解石之 EPS。方解石因其具有較佳之穩定性及良好之結合效果，所以最適用於 MICP 工法 (Meldrum and Coelfen, 2008)。Tourney and Ngwenya (2009) 發現 *Bacillus licheniformis* 表面之 EPS 具有機碳功能，可減少細菌細胞周圍之碳酸鈣飽和度並以菱方晶體之形式沉澱結晶。而菱方晶體相對稍不穩定，容易轉化為方解石 (Kralj et al., 1994)。

藉由不同尿素酶細菌株產生之不同碳酸鈣晶體性質，可以選擇最適合之菌株以有效地提高微生物誘導碳酸鈣之沉澱效率：

- (a) 晶體尺寸方面，大尺寸晶體有助於粗顆粒土壤之膠結，並且對地質材料之力學性質改善也有貢獻；而小尺寸晶體更有利於細顆粒土壤之膠結與提高其防水性 (Al Qabany et al., 2012)。
- (b) 晶體形態方面，橢圓形、球形及不規則立方狀之碳酸鈣有助於更佳之膠結效果。(Meldrum and Coelfen, 2008)

Dhami et al. (2013) 比較了五種桿菌之晶體特性，發現在相同培養條件下，不

同菌株產生之晶體類型、外觀及大小均存在差異，如表所示，由Tang et al. (2020) 總結了不同細菌產生碳酸鈣晶體之差異與特徵。



Table 2.1: 不同細菌產生之碳酸鈣晶體特徵 (Tang et al., 2020)

Species	Crystal-type	Size (μm)	Apperance
<i>Bacillus megaterium</i>	Mainly calcite, little vaterite	30–50	Spherical, ellipsoidal, rhombic, triangular, with smooth surface
<i>Bacillus subtilis</i>	Mainly calcite, trace vaterite	10–50	Spherical, ellipsoid, with smooth surface
<i>Bacillus thuringiensis</i>	Mainly vaterite, little calcite	2–15	Small size round, circular, rectangular
<i>Bacillus cereus</i>	Mainly calcite, trace vaterite	15–40	Needle shape, lamella shape, irregular square shape
<i>Fusobacterium</i>	Vaterite	2–10	Mesh-like lamella, with rough surface

2. 細菌細胞濃度

在 MICP 過程中，細菌細胞對碳酸鈣晶體之形成有兩個主要作用。第一，細菌主要可以做為碳酸鈣晶體形成之成核點，透過分解溶液中之尿素，細菌釋放出大量之 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 及 OH^- ，以提供得以產生碳酸鈣沉澱之鹼性環境及成分 (Ferris et al., 1987)。第二，細菌表面之 EPS 及負離子團也可以作為碳酸鈣晶體之成核點，並調節晶體之型態與類型 (Dhami et al., 2013)。在較微觀之層面，細菌細胞之聚集會控制成核點處之碳酸鈣生長模式，且微生物之數量會明顯影響 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 及 H^+ 之濃度。因此，細菌濃度會顯著影響碳酸鈣之生成、晶體形態、地質材料之膠結效果 (Bosak et al., 2004)。此外，較高之細菌細胞濃度對於改良試體之力學性質也很有貢獻，其相關前人研究如下：

(a) Okwadha and Li (2010) 發現，細菌細胞濃度與碳酸鈣沉澱量、尿素分解速率呈現正相關。當尿素及鈣離子濃度達一定水平，細菌細胞濃度成為主要影響因素。

(b) Al Thawadi S (2012) 發現，細菌細胞濃度會影響碳酸鈣晶體之大小。他們使用無菌鹽水溶液稀釋原始細菌培養物，以達到所需稀釋倍數

(30 g/L、3 g/L、0.3 g/L、0.03 g/L)。結果顯示，隨著細菌細胞濃度之增加，晶體之平均尺寸也隨之增加，如圖2.24所示。

(c) Cheng et al. (2007) 則是發現，細菌細胞濃度會影響碳酸鈣晶體之結晶形態。結果顯示，在低細菌細胞濃度下，碳酸鈣晶體呈菱形及立方體狀，與方解石具有類似之形態；而在高細菌細胞濃度下，碳酸鈣晶體呈球狀，並存在聚集之現象，如圖2.25所示。

(d) Chou et al. (2011) 對經由 *Bacillus pasteurii* 細菌溶液改良後之石英砂試體進行直剪試驗，結果顯示，以高細胞濃度之細菌溶液改良之試體，其具有較高之剪力強度及較低之體積應變，如圖2.26及圖2.27所示。

(e) Al-Salloum et al. (2017) 也對 *Bacillus pasteurii* 細菌溶液改良後之水泥砂漿試體進行抗壓強度試驗，結果顯示，使用較高細胞濃度 (10^9 cfu/mL) 之細菌溶液改良後之水泥砂漿，其強度高於使用較低細胞濃度 (10^8 cfu/mL) 改良後之試體，當然也高於無菌溶液之對照組強度。

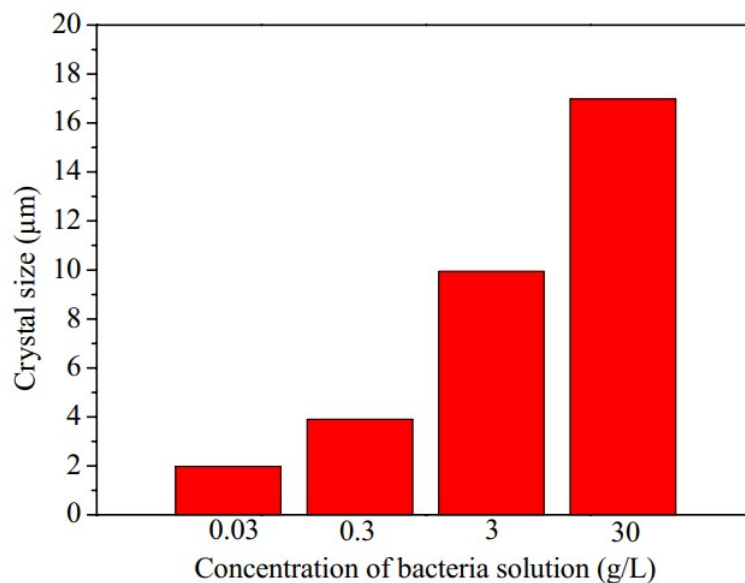
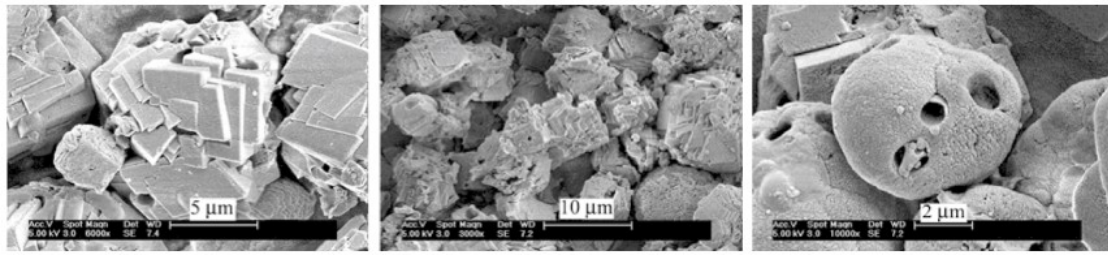


Figure 2.24: 細菌細胞濃度對碳酸鈣晶體尺寸之影響 (Al Thawadi S, 2012)



(a) 25% bacteria solution (b) 50% bacteria solution (c) 100% bacteria solution

Figure 2.25: 細菌細胞濃度對碳酸鈣晶體形態之影響 (Cheng et al., 2007)

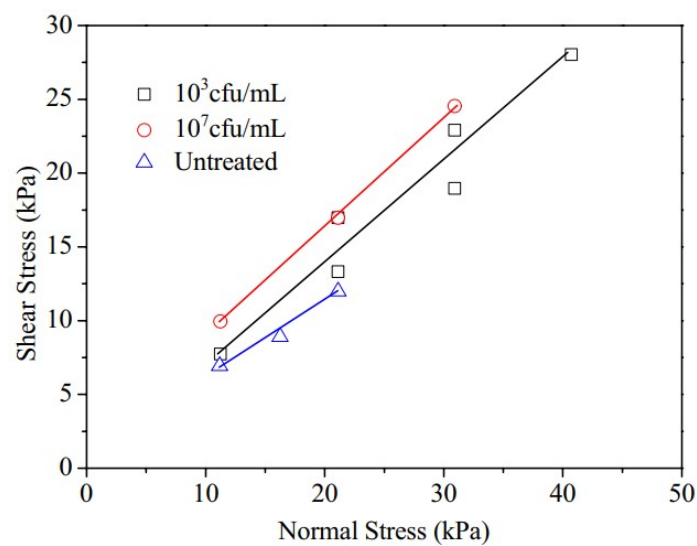


Figure 2.26: 細菌細胞濃度對試體剪力強度之影響 (Chou et al., 2011)

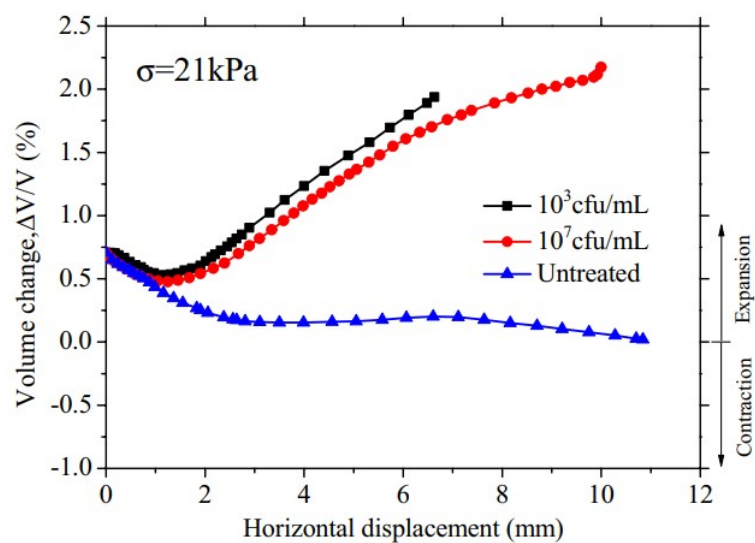


Figure 2.27: 細菌細胞濃度對試體體積應變之影響 (Chou et al., 2011)

3. 環境 pH 值

常用於 MICP 之尿素酶細菌多適合生長於鹼性環境中，大多數芽孢桿菌最適生長之 pH 值高於 9.0。而 pH 值範圍對於尿素酶細菌之生長、代謝、碳酸鈣結晶及改善大地材料之工程性質等方面，具有相當重要之影響力，分別敘述如下：

- (a) 細菌生長: Wiley and Stokes (1962) 發現 *Bacillus pasteurii* 之最適生長 pH 值約為 $pH = 9.25$ ，在 $pH > 10.0$ 時，細菌停止生長。Ryznar-Luty et al. (2015) 確定了 *B.licheniformis*、*Bacillus cyclobacillus*、*Bacillus lateralis* 和 *Bacillus flamentosa* 之最適生長 pH 值大約落在 $pH = 9.5$ 左右。
- (b) 細菌代謝: Stocks-Fischer et al. (1999) 研究了 pH 值對 *Bacillus pasteurii* 提取之尿素酶活性之影響。結果顯示，尿素酶活性在 $pH = 7.5 \sim 8$ 時達到最高峰。
- (c) 細菌適應性: Whiffin et al. (2007) 在 $25^{\circ}C$ 下使用 25 mmol/L 尿素接種不同 pH 條件下之細菌溶液，並在培養 5 小時候測量尿素分解速率。結果顯示，在 $pH = 7.0 \sim 8.0$ 之範圍內，細菌溶液之單位尿素分解速率最高，略低於 *Bacillus pasteurii* 之最適生長 $pH = 9.25$ 。
- (d) 碳酸鈣產量: pH 值變化會改變孔隙溶液中 NH_3 、 NH_4^+ 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 之濃度，從而改變碳酸鈣之產量及沉澱速率。Stocks-Fischer et al. (1999) 在不同 pH 值之情況下使用 25.2 mmol/L 之 $CaCl_2$ 和尿素溶液（濃度比 = 1:1）接種 *Bacillus pasteurii*。結果顯示，當 $pH > 9.0$ 時，碳酸鈣之產量達到最大值並保持穩定。而 Arunachalam et al. (2010) 也研究了 pH 值對 *Bacillus sphaericus* 產生碳酸鈣之影響。他們發現，在 $pH = 8$ 時，碳酸鈣產量達到最大值（約 25 mg/mL ）。
- (e) 碳酸鈣晶體特性: 溶液中離子（如 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} ）之過飽和濃

度越高，礦物結晶速度越快，晶體尺寸越小，反之亦然。Whifn (2004) 發現，當 $pH < 8.0$ 時， CO_3^{2-} 之過飽和濃度較低，因此碳酸鈣之沉澱速率也降低，而得到之晶體較大、膠結性較強，有利於提高固結土壤之強度。Cheng et al. (2007) 分析了在 $pH = 8.0$ 及 $pH = 9.0$ 下由 *Bacillus pasteurii* 結晶之碳酸鈣形態。由 XRD 分析顯示，在 $pH = 8.0$ 時，碳酸鈣之晶相為方解石，形狀主要是球形；在 $pH = 9.0$ 時，晶相仍為方解石，但形狀主要是正方形及花瓣狀，如圖2.28所示。

- (f) 大地材料之膠結性能: Keykha et al. (2017) 以粉砂質土壤（過 $75\ \mu m$ 篩網），探討 *Bacillus pasteurii* 在不同 pH 值下進行 MICP 之膠結情形。結果顯示，隨 pH 值增加，膠結後試體之無圍壓縮強度 (UCS) 以及碳酸鈣含量均增加。而 Cheng et al. (2014) 分別在初始 pH 值為中性、酸性及鹼性條件下對純砂砂柱進行膠結，並比較其抗壓強度及碳酸鈣含量。結果顯示，碳酸鈣含量隨 pH 值增加而增加；而養護後之無圍壓縮強度則是在中性環境表現較佳。

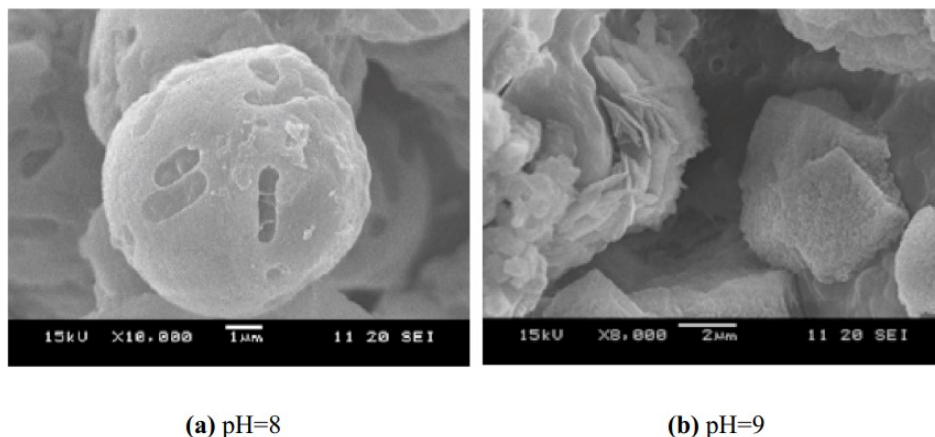


Figure 2.28: 環境 pH 值對碳酸鈣晶體形狀之影響 (Soon et al., 2013)

4. 環境溫度

在 MICP 過程中，溫度變化會影響尿素酶活性、尿素自發離化程度以及改良液之尿素水解速率。Van Paassen (2009) 研究了尿素酶活性與溫度之關係，

提出一適配之方程式，如式2.7。

$$\frac{r}{r_0} = \exp \left((T - T_0) \frac{\ln Q_{10}}{10} \right) \quad (2.7)$$



在 $5 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 之間，尿素酶活性因子 Q_{10} 為 3.4， r 表示特定時間點之尿素水解速率， r_0 表示初始尿素水解速率， T 表示該時間點的溫度，如圖2.29所示。Ferris et al. (2004) 指出，尿素在溶液中之游離常數在溫度從 10°C 上升至 20°C 時增加約 10 倍，其中當尿素溶液之游離常數增加，尿素之分解速率也隨之增加。Ferris et al. (2004) 也依其實驗證實，溫度與尿素水解速率有正相關。Gillman et al. (1995) 也指出，當環境溫度從 5°C 上升至 20°C 時，尿素酶細菌之尿素水解速率增加了近 18 倍。

而溫度也影響了碳酸鈣晶體之產量、形態及化學穩定性，進而改善大地材料之工程性質，分別敘述如下：

- (a) 碳酸鈣晶體之產量: Huang et al. (2009) 將砂土與菌液在 10°C 、 20°C 、 30°C 及 40°C 下分別進行混合，並加入尿素-氯化鈣之膠結改良液 ($\text{pH} = 8$, $[\text{Ca}^{2+}] = 25.2 \text{ mM}$)。在養護 10 天後計算碳酸鈣含量。結果顯示，在 30°C 下之碳酸鈣含量最高，約為 20°C 或 40°C 下之五倍，而在 10°C 下幾乎沒有碳酸鈣生成。
- (b) 碳酸鈣晶體形態及化學穩定性: Wang et al. (2005) 使用 X 光繞射 (XRD) 及掃描式電子顯微鏡 (SEM) 分析了 *Bacillus pasteurii* 產生之碳酸鈣晶體形態。結果顯示，在 5°C 時，細菌產生之碳酸鈣晶體主要以方解石為主，外觀無定形、聚集不完全；而在 25°C 時，產生分佈均勻且結晶完全之方解石，外觀呈球形。然而，在 50°C 時，產生方解石及球霏石，外觀呈現球形、方形及棒狀，而球霏石為方解石之亞穩態同質異形體，故穩定性較差，如圖2.30所示。因此，在 25°C 時，結晶情況較

佳且分佈均勻，表示室溫有利於 MICP 之進行。

- (c) 大地材料之膠結性能: Cheng et al. (2014) 使用 *Bacillus pasteurii* 對直徑 45 mm、長度 180 mm 之純砂砂柱進行 MICP 膠結，分別在高溫 (50°C) 及低溫 (25°C) 條件下進行。結果顯示，50°C 下之膠結試體中，其碳酸鈣含量是 25°C 下之三倍。然而，50°C 下之無圍壓縮強度 (UCS) 只有 25°C 下的 60%。使用掃描式電子顯微鏡 (SEM) 進行分析，發現 50°C 下雖生成較多碳酸鈣，但晶體直徑只有約 2 ~ 5 μm ，且細小晶體分散在砂粒表，在 25°C 下，碳酸鈣晶體大小約為 15 ~ 20 μm ，能夠填滿裂縫並將砂粒結合，如圖 2.31 所示。

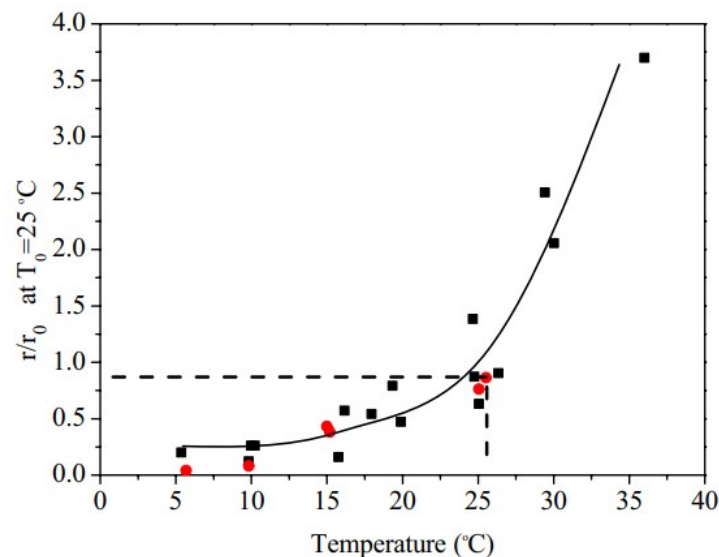


Figure 2.29: 環境溫度與尿素活性之關係 (Van Paassen, 2009)

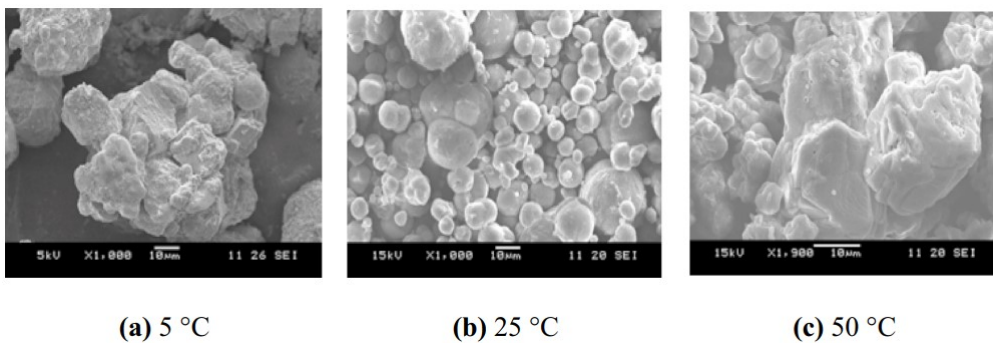


Figure 2.30: 環境溫度對碳酸鈣晶體形狀之影響 (Wang et al., 2005)

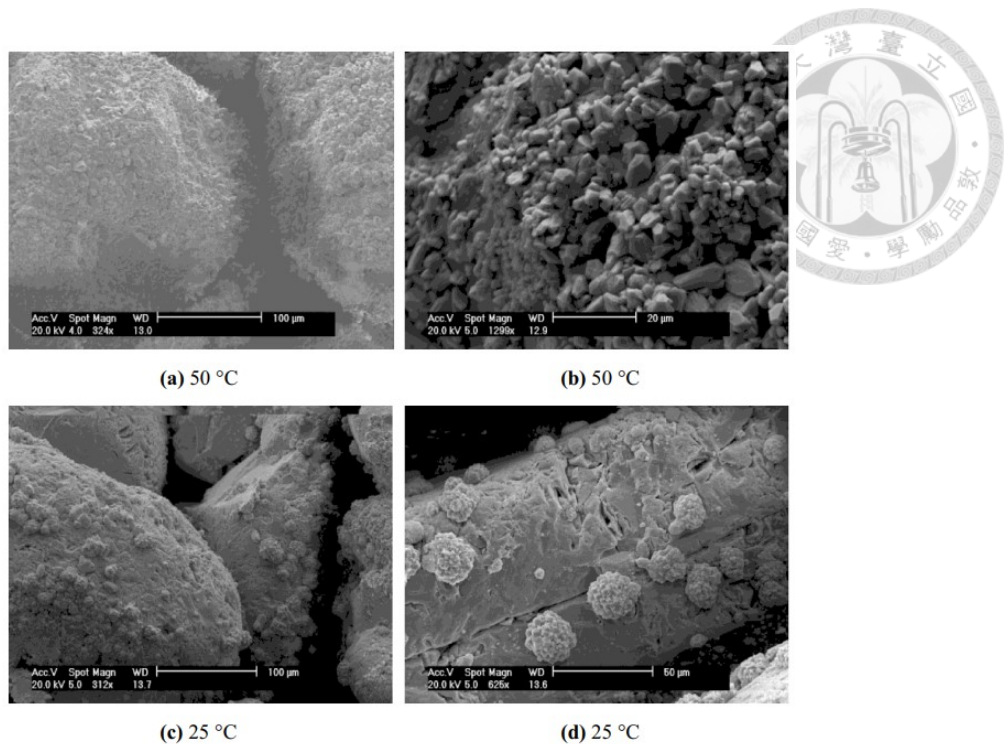


Figure 2.31: 環境溫度對碳酸鈣晶體大小之影響 (Cheng et al., 2014)

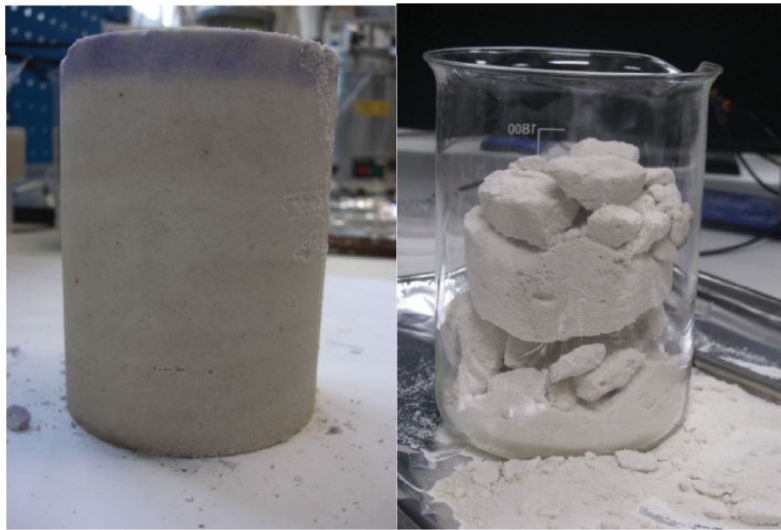
5. 改良液濃度

大部分 MICP 中之膠結溶液為尿素、鈣鹽與微量營養物質所組成之混和物 (Whifn, 2004; Arunachalam et al., 2010; Keykha et al., 2017)。其中膠結溶液之濃度與比例對細菌活性、碳酸鈣生成、膠結效率、晶體特性以及改善大地材料之力學與水力特性皆有很大之影響。

- (a) 細菌活性: Al Qabany and Soga (2013) 研究以 *Bacillus pasteurii* 進行 MICP 改良後，石英砂表面之方解石晶體大小及分佈。結果顯示，在 $0.25\text{ M} \sim 1\text{ M}$ 範圍內，高濃度之膠結溶液有利於形成更大之方解石晶體及更不均勻之晶體分佈。其研究也說明了高濃度之膠結溶液可能會降低部分 MICP 之細菌活性。而 Rivadeneyra et al. (2000) 研究了 *Coriobacterium neisseriae* 之 MICP 過程，發現高濃度之膠結溶液不僅抑制了微生物活性，還降低了方解石之生成效率。與此同時，膠結溶液之濃度也會影響到碳酸鈣晶體類型。

- (b) 碳酸鈣生成: Okwadha and Li (2010) 發現，當尿素濃度從 0.33 M 增加到 0.66 M 時，鈣離子之初始濃度增加了十倍（從 0.025 M 增加到 0.25 M），碳酸鈣之產量增加了 100%。Soon et al. (2013) 發現，使用 *B. megaterium* 時，在膠結溶液濃度為 0.25 M 和 0.5 M 之情況下，於 0.5 M 濃度下之碳酸鈣沉澱較 0.25 M 濃度下更加密集。
- (c) 膠結效率: Nemati et al. (2005) 研究了膠結溶液濃度及不同比例對 *Proteus vulgaris* 進行 MICP 之影響。結果發現，當 CaCl_2 濃度低於 15 g/L 時，溶液中碳酸鈣之膠結效率超過 80%。當 CaCl_2 濃度 > 20 g/L 時，碳酸鈣幾乎不會生成。當 CaCl_2 和尿素之濃度比為 2.5 和 3.0 時（莫耳比 1 和 1.2），碳酸鈣之膠結效率為 99%。由此可知，較高之 CaCl_2 濃度、較低之膠結溶液濃度比，可能會降低膠結效率，從而降低對土壤之膠結效果。圖 2.32 顯示了不同膠結效率對石英砂固化效果之影響。
- (d) 碳酸鈣晶體特性: 在使用 *Bacillus pasteurii* 改善水泥基材料耐腐蝕性能之研究中，Qian et al. (2009) 發現，碳酸鈣晶體主要為方解石。隨著膠結溶液濃度之增加（鈣源為硝酸鈣，測試中最高濃度為 0.3 M），晶體變得更大。與此同時，他們也發現在 MICP 過程中，適當控制 Ca^{2+} 濃度之增加，並且在對數生長之期間使用細菌可以誘導大型菱鎂石晶體之形成，當鈣濃度為 0.3 M 時，晶體大小可達到 100 μm 。因此，在膠結溶液中，鈣源及尿素之濃度與比例決定了碳酸鈣晶體之類型及大小，從而影響 MICP 之效率。
- (e) 大地材料之膠結性能: DeJong et al. (2010) 測量在 0.012 M ~ 0.2 M 之 CaCl_2 膠結溶液中，其固化後之試體剪切波速，發現較高之 CaCl_2 濃度生成之方解石，其分佈更加密集且土壤剛度更高。Van Paassen (2009) 使用 *Bacillus pasteurii* 在 1 M 之 Ca^{2+} 條件下膠結砂土，發現可將滲透

性降低 60%。Al Qabany and Soga (2013) 則是發現，當膠結溶液濃度為 1 M 時，土壤之滲透性降低了 30%，其中大部分碳酸鈣含量在 MICP 過程之初期階段增加較明顯，而土壤之不透水性在較長之膠結時間才會達到平穩狀態。當膠結溶液濃度為 0.25 M 時，土壤之滲透性隨著碳酸鈣含量之增加而緩慢下降。如圖 2.33 所示。



(a) Mineralization Efficiency 70%-100% (b) Mineralization Efficiency 20%

Figure 2.32: 膠結效率對碳酸鈣固化作用之影響 (Mortensen et al., 2011)

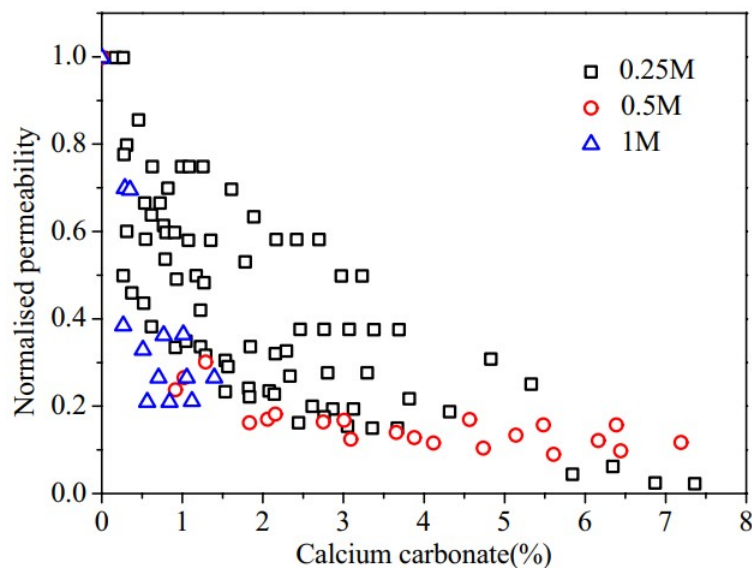


Figure 2.33: 不同膠結溶液濃度對土壤滲透性之影響 (Al Qabany and Soga, 2013)

6. 鈣源種類

不同類型之鈣源會影響碳酸鈣之晶體形態，Zhang et al. (2014) 使用 *Bacillus pasteurii* 將工業砂與不同之鈣源 (0.5 M) 進行膠結。使用 CaCl_2 時，碳酸鈣晶體為呈現六角形之方解石，表面光滑。使用 $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 時，碳酸鈣晶體主要呈現為針狀之方解石。使用 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 時，碳酸鈣晶體主要呈現為六角形之方解石，表面粗糙，如圖2.34所示。Wong (2022) 也比較了 CaCl_2 、 $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 產生之碳酸鈣晶體，如圖2.35所示。

Gorospe et al. (2013) 研究了 *Bacillus pasteurii* 在使用不同鈣源作為 MICP 過程之結晶特性，其中包含氯化鈣 CaCl_2 、醋酸鈣 $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 、乳酸鈣及葡萄糖酸鈣作為鈣源進行微生物誘導碳酸鈣沉積 (MICP) 的結晶特性。結果顯示，使用氯化鈣會形成菱形之方解石；醋酸鈣則是生成如萵苣狀或層狀之球霏石；而乳酸鈣主要生成聚集之球霏石，其晶體最大，最大可達數十微米；葡萄糖酸鈣則是生成直徑約 $5\ \mu\text{m}$ 之球霏石，如圖2.36所示。

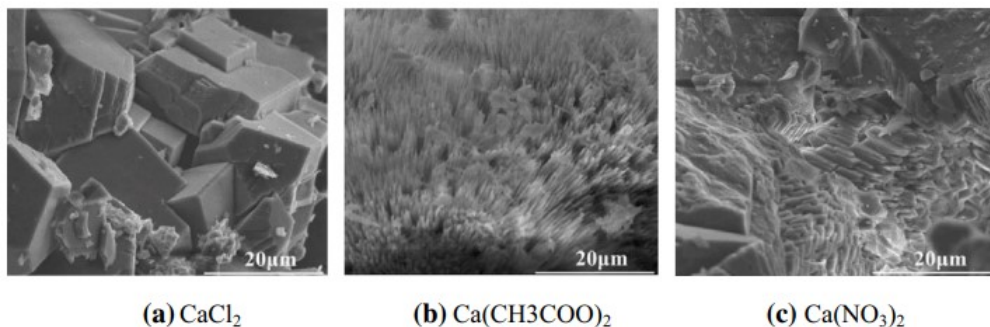


Figure 2.34: 不同鈣源對碳酸鈣晶體形態之影響 (Soon et al., 2013)

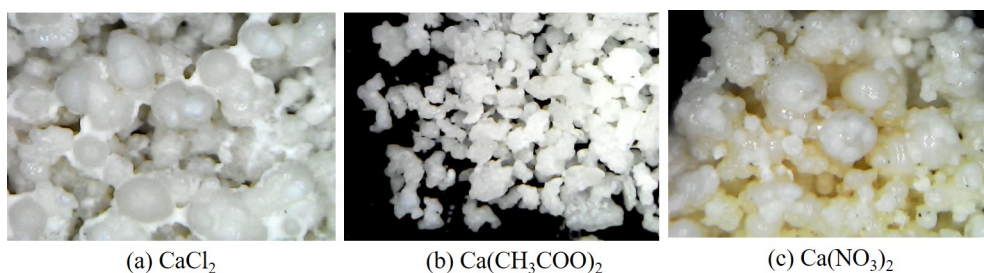


Figure 2.35: 不同鈣源產生之碳酸鈣晶體形態 (Wong, 2022)

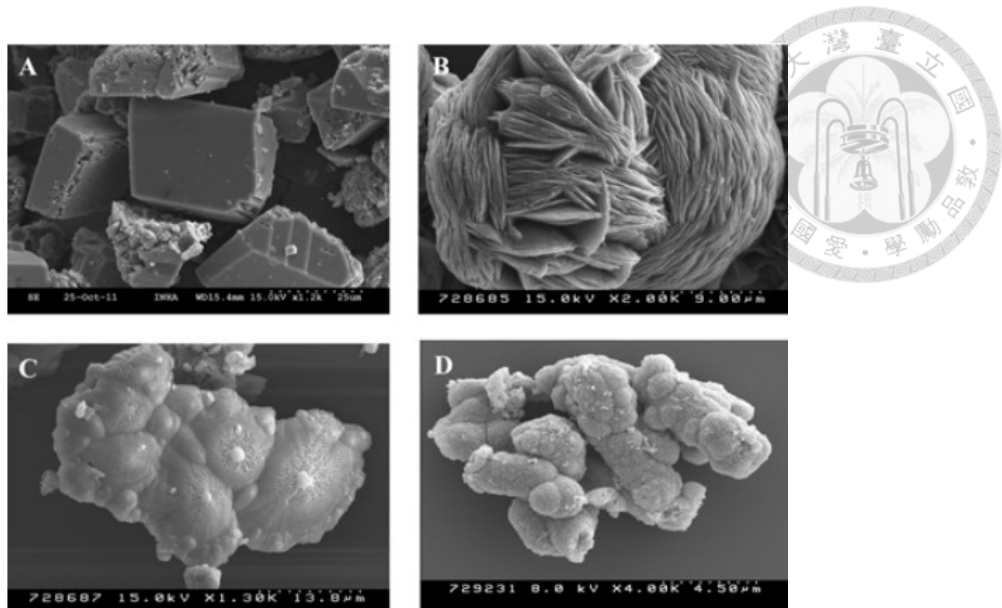


Figure 2.36: 不同鈣源對碳酸鈣晶體形態之影響
A 氯化鈣；B 醋酸鈣；C 乳酸鈣；D 葡萄糖酸鈣 (Gorospe et al., 2013)

2.2.6 MICP 在大地工程之應用

1. 礫石之固結:

Visser & Smit Hanab 公司於 2010 年在荷蘭為了進行天然氣管道之水平定向鑽孔 (HDD)，以 MICP 工法來穩定礫石 (Van Paassen, 2011)，如圖2.37(a)所示。在深度距地表下 $3\text{ m} \sim 20\text{ m}$ 、體積 1000 cm^3 之範圍內，將實驗室培養之細菌懸浮液加入尿素與氯化鈣，配製成 $\text{Urea} - \text{CaCl}_2$ 之改良液，分兩次進行澆灌，接著以電阻率進行 MIC 之監測，進行地下水採樣及物理採樣，量測其碳酸鈣含量。結果顯示，鬆散之礫石可以透過該工法得到有效之固結效果，取得穩定之 HDD，如圖2.37(b),(c) 所示。

2. 砂柱之膠結:

De Belie and De Muynck (2008) 將 *Bacillus pasteurii* 加入砂中以配製改良圓柱試體，其試體尺寸為直徑 15.24 cm ，高 30.48 cm ，置於含有 $\text{Urea} - \text{CaCl}_2$ 之培養基中浸潤式養護 10 天，養護完成後以掃描式電子顯微鏡 (SEM) 及 X 光繞射 (XRD) 進行觀察與分析 (De Muynck et al., 2008)。結果顯示，由 SEM

觀察到，*Bacillus pasteurii* 在 MICP 過程中會附著於不同之碳酸鈣晶體及砂粒表面之間，如圖2.38所示。另外，由 XRD 分析其礦物質成分，可以發現大部分碳酸鈣沉澱於砂柱表面，在試體表面 3.81 cm 深度以下則沒有發現碳酸鈣沉澱，如圖2.39所示。該現象之主因可能為 *Bacillus pasteurii* 屬好氧菌，在表面處之氧氣含量較豐沛，故誘導較多之碳酸鈣沉澱，因此使用 MICP 工法時，氧氣與養分來源皆須為必要之考量。

3. 大尺度砂粒固結試驗:

Van Paassen et al. (2010b) 於實驗室中進行大尺度砂粒固結試驗，該大尺度混凝土製砂箱尺寸為 $8.0\text{ m} \times 5.6\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ ，試驗使用之平均乾土單位重為 1.56 tw/m^2 。首先於底部鋪一層較薄之德國細砂 (約 0.25 m)，並埋設 48 個數據感測器，接著將剩下 2.25 m 之德國細砂填入，並將 6 支 PVC 管也配置於砂箱中，該 PVC 管分兩側配置，一側為三支澆灌管，另一側為三支抽氣管，抽氣管連接抽氣幫浦，而需以抽氣管抽氣之目的，為使改良液可以在砂層中流動並被有效地帶至砂箱較遠側，如圖2.40所示。該實驗先將 5 m^3 之 *Bacillus pasteurii* 改良液引至砂層中流動，接著將 5 m^3 、0.05 M 之氯化鈣溶液也引至砂層中流動，最後將 96 m^3 之 0.05 M 氯化鈣及 1 M 尿素分 10 次，於 16 天內引至砂層中流動。結果顯示，16 天養護完成後發現砂粒被成功固化成塊狀，如圖2.41所示。

4. 沙灘之固結與防蝕:

Gomez et al. (2015) 在加拿大之 Key Lake 沙灘，以 MICP 工法來進行固灘及防蝕，如圖2.42所示。其將三種不同濃度之改良液分別澆灌進沙層中，發現該工法確實可以有效固結砂顆粒，以達固灘及防蝕之成效，改良後之固化試體，如圖2.43所示。



Figure 2.37: 鬆散礫石之固結現地試驗 (Van Paassen, 2011)

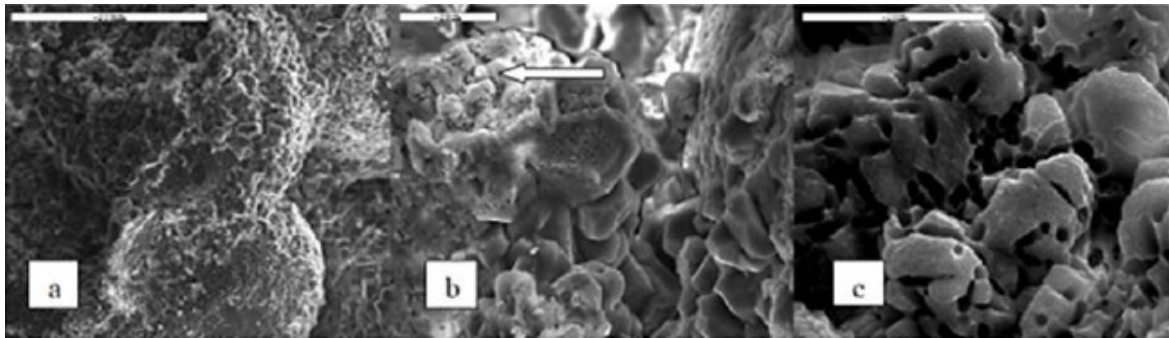


Figure 2.38: 改良砂柱之 SEM 圖 (De Muynck et al., 2008)

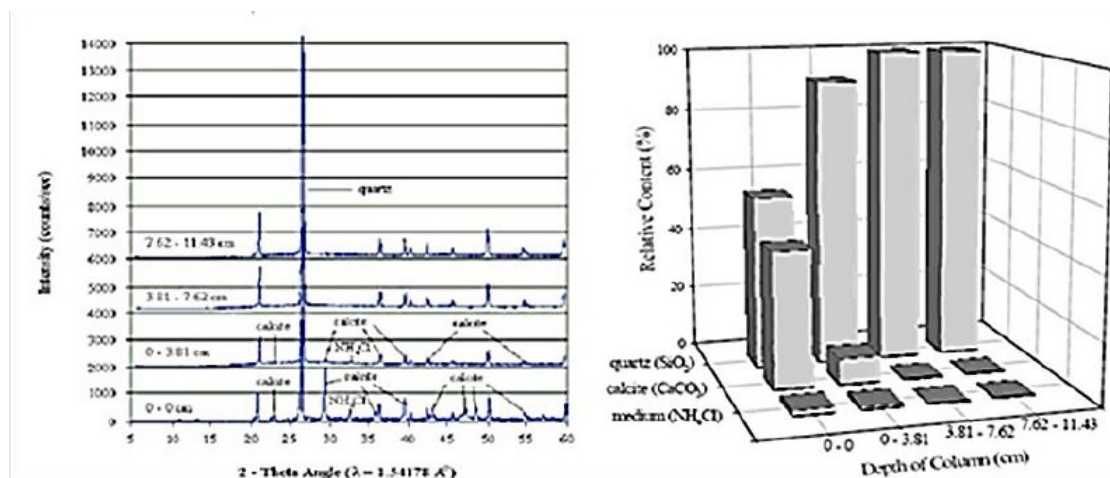


Figure 2.39: 改良砂柱之 XRD 分析 (De Muynck et al., 2008)

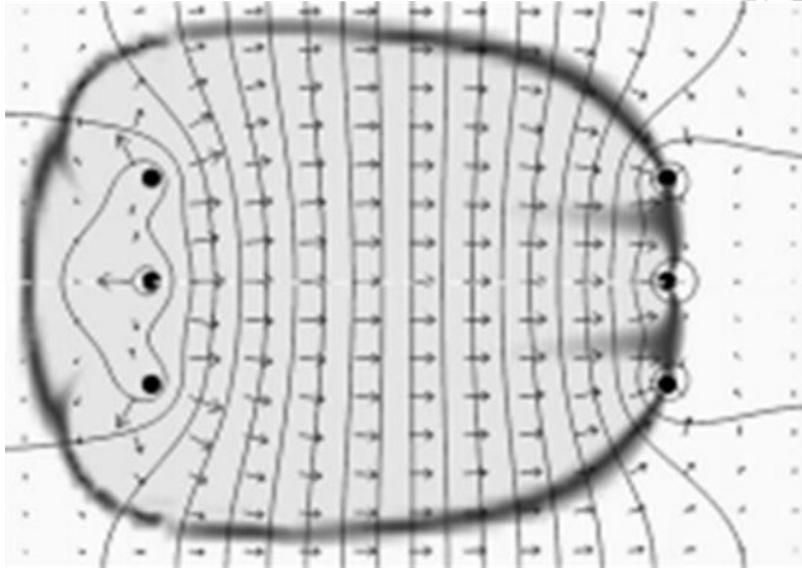


Figure 2.40: 大尺度砂粒固結試驗配置 (Van Paassen et al., 2010b)



Figure 2.41: 大尺度砂粒固結試驗 (Van Paassen et al., 2010b)

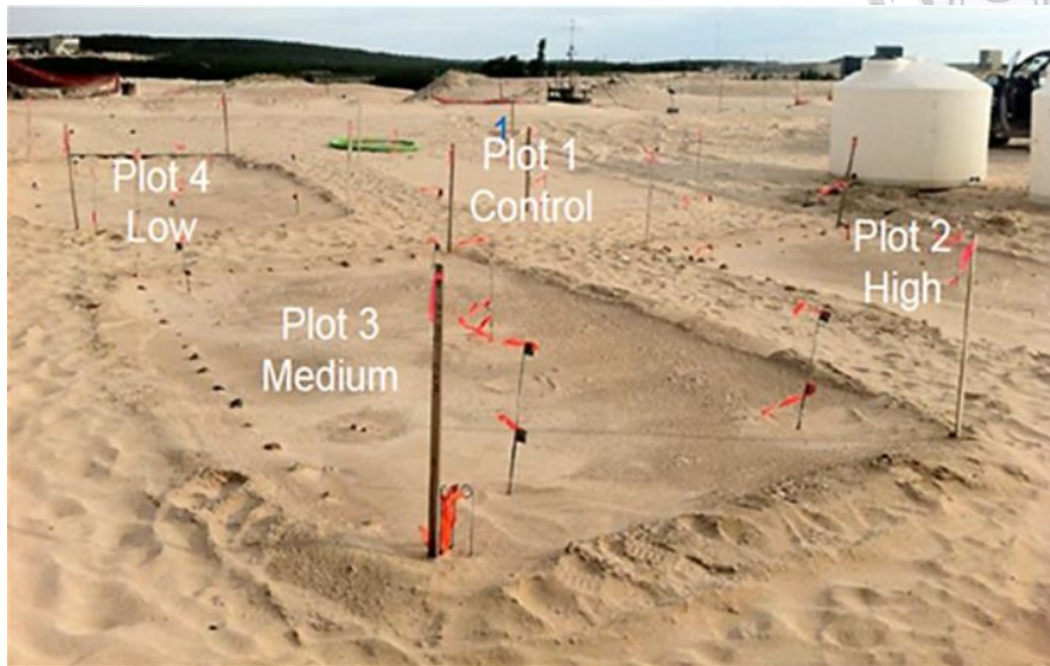


Figure 2.42: 沙灘之固結與防蝕現地試驗 (Gomez et al., 2015)

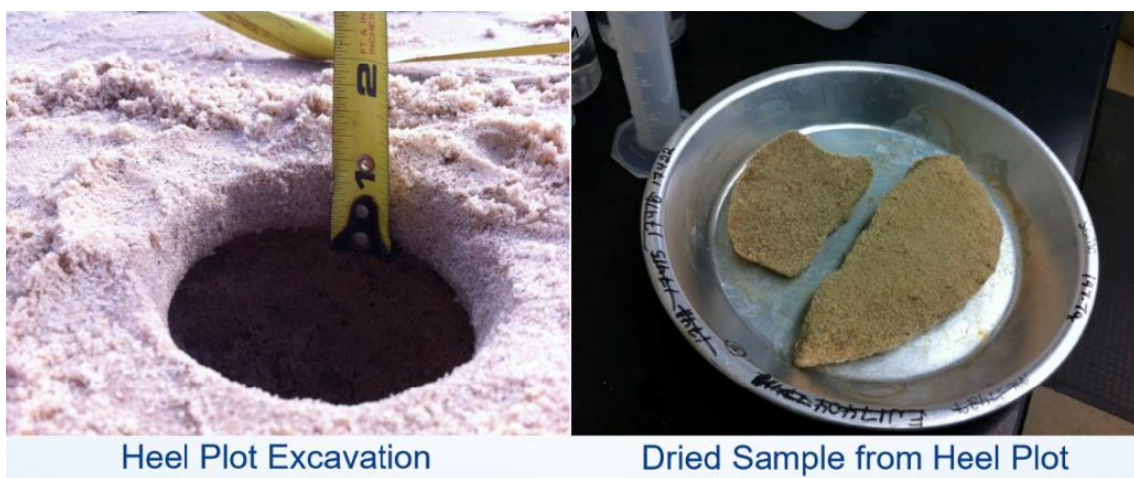


Figure 2.43: 沙灘砂顆粒之固結效果 (Gomez et al., 2015)



第三章 研究方法

本研究為探討 MICP 改良液對於土壤改良之成效，以砂箱試驗分別觀察表面滲透與側向加壓滲透兩種行為，接著設計一套簡易之澆灌系統進行現地試驗，探討現地 MICP 改良液之滲透行為，以供後續室內試驗有更實務之模擬參考。其中改良成效以酸洗試驗及靜態三軸壓密排水剪切試驗分別探討試體均勻性及剪力強度變化，此外，也進行壓力鍋試驗，以觀察試體改良後之水分特性。

3.1 菌液配製與培養

本研究使用之菌種為 *Bacillus pasteurii*，該菌種之繁殖方式主要可以分成兩種，一種為透過固態培養基以畫盤方式進行培養，另一種為透過液態培養基以持續搖晃方式進行培養。此外，為保留初始菌種，也會將 *Bacillus pasteurii* 以冷凍方式保存。菌液之配製方式，分別針對試驗材料與器材，培養基、凍菌及改良液配製進行詳細說明。

3.1.1 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所述：



1. 試驗材料

- (a) 純水: 將自來水經過一次過濾後之水。
- (b) 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。
- (c) Urea: 尿素，配製細菌培養基之原料。
- (d) Peptone: 蛋白胨，一種含肽可溶性混合物，配製細菌培養基之原料。
- (e) Yeast Extract: 酵母萃取物，配製細菌培養基之原料。
- (f) Beef Extract: 牛組織之脫水萃取物，配製細菌培養基之原料。
- (g) Agar: 洋菜粉，配製固態細菌培養基之原料。
- (h) 甘油: 配製冷凍菌株之原料。

2. 試驗器材

- (a) 無菌操作台
- (b) 高溫滅菌釜
- (c) 血清瓶 1 L、2 L、5 L
- (d) 0.2 μm 過濾膜
- (e) 0.22 μm 過濾膜
- (f) 針筒
- (g) 鋁箔紙
- (h) 培養皿
- (i) 錐形瓶
- (j) 透氣矽膠塞蓋



- (k) 滅菌指示膠帶
- (l) 白金接種環
- (m) 水平震盪機
- (n) 25 °C 恆溫培養箱
- (o) -80 °C 冷凍庫
- (p) 磁石攪拌器
- (q) 磁石攪拌子
- (r) 微量電子天秤
- (s) pH 測量儀
- (t) 分光光度計

3.1.2 液態培養基配製

配製液態培養基之目的為給予細菌封閉之營養環境，在溫度、震盪轉速等條件控制得宜之情況下得以順利大量繁殖。本研究使用兩種液態培養基，分別為含尿素與不含尿素，其配製流程如下：

1. 含尿素之液態培養基 (1 L)

- (a) 以微量電子天秤量秤 3 g 之 Yeast Extract 及 5 g 之 Peptone。
- (b) 取 1 L 之血清瓶加入約 500 mL 之去離子水後，放入磁石攪拌棒並置於磁石攪拌器上進行攪拌，如圖3.1所示。
- (c) 將步驟 (a) 加入步驟 (b)，並再添加 400 mL 之去離子水，待攪拌完畢後取下。



- (d) 輕微蓋上血清瓶蓋並將鋁箔紙完整包覆在瓶蓋上，取一小段滅菌指示膠帶貼於鋁箔紙上，如圖3.2所示。
- (e) 將上述包裝處理好之液態培養基置於高溫滅菌釜以高溫高壓蒸氣進行滅菌。
- (f) 滅菌結束後取出並待液態培養基溫度轉涼，將其置於無菌操作台。
- (g) 以微量電子天秤量秤 50 g 之 Urea。
- (h) 取 200 mL 之小燒杯加入約 100 mL 之去離子水後，放入磁石攪拌棒並置於磁石攪拌器上進行攪拌。
- (i) 將步驟 (g) 加入步驟 (h)，待攪拌完畢後取下。
- (j) 在無菌操作台以針筒吸取尿素水溶液並接上 0.22 μm 過濾膜，將尿素水溶液藉由過濾膜與液態培養基混合，如圖3.3所示，即完成 1 L 含尿素之液態培養基之配製。

2. 不含尿素之液態培養基 (1L)

- (a) 以微量電子天秤量秤 3 g 之 Yeast Extract 及 5 g 之 Peptone。
- (b) 取 1 L 之血清瓶加入約 500 mL 之去離子水後，放入磁石攪拌棒並置於磁石攪拌器上進行攪拌。
- (c) 將步驟 (a) 加入步驟 (b)，並再添加 500 mL 之去離子水，待攪拌完畢後取下並將磁石攪拌棒取出。
- (d) 輕微蓋上血清瓶蓋並將鋁箔紙完整包覆在瓶蓋上，取一小段滅菌指示膠帶貼於鋁箔紙上。
- (e) 將上述包裝處理好之液態培養基置於高溫滅菌釜以高溫高壓蒸氣進行滅菌。滅菌結束即完成 1 L 不含尿素之液態培養基之配製。



Figure 3.1: 培養基配製



Figure 3.2: 將滅菌指示膠帶貼於鋁箔紙上



Figure 3.3: 以 $0.22\ \mu\text{m}$ 過濾膜混合尿素水溶液與培養基

3.1.3 固態培養基配製

配製固態培養基之目的為藉由畫盤方式培養菌落，如圖3.4所示，接著以接種環取得盤上菌落加入液態培養基進行大量繁殖。此外，也可觀察畫盤後繁殖之菌落來判斷是否為純種菌株，若觀察到菌盤上長出其他細菌之菌落，可及早發現菌落恐受汙染。本研究使用含尿素之固態培養基，其配製流程如下：

1. 含尿素之固態培養基 (1 L)

- (a) 以微量電子天秤量秤 $3\ \text{g}$ 之 Beef Extract、 $5\ \text{g}$ 之 Peptone 及 $15\ \text{g}$ 之 Agar。
- (b) 取 $1\ \text{L}$ 之血清瓶加入約 $500\ \text{mL}$ 之去離子水後，放入磁石攪拌棒並置於磁石攪拌器上進行攪拌。
- (c) 將步驟 (a) 加入步驟 (b)，並再添加 $400\ \text{mL}$ 之去離子水，待攪拌完畢後取下。

- (d) 輕微蓋上血清瓶蓋並將鋁箔紙完整包覆在瓶蓋上，取一小段滅菌指示膠帶貼於鋁箔紙上。
- (e) 將上述包裝處理好之液態培養基置於高溫滅菌釜以高溫高壓蒸氣進行滅菌。
- (f) 滅菌結束後取出並待液態培養基溫度轉涼，將其置於無菌操作台。
- (g) 以微量電子天秤量秤 50 g 之 Urea。
- (h) 取 200 mL 之小燒杯加入約 100 mL 之去離子水後，放入磁石攪拌棒並置於磁石攪拌器上進行攪拌。
- (i) 將步驟 (g) 加入步驟 (h)，待攪拌完畢後取下。
- (j) 在無菌操作台以針筒吸取尿素水溶液並接上 0.22 μm 過濾膜，將尿素水溶液藉由過濾膜與液態培養基混合，混合完畢再置於磁石攪拌器上攪拌一次。
- (k) 在無菌操作台中將上述含尿素之液態培養基分裝倒入全新之培養皿中，待其冷卻轉為半固態，放置於 25 °C 恆溫培養箱 24 小時後取出，即完成含尿素之固態培養基之配製，如圖3.5所示。

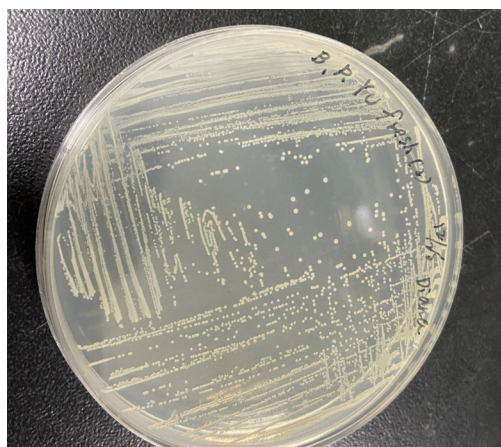


Figure 3.4: 以畫盤方式培養 *Bacillus pasteurii* 之菌落



Figure 3.5: 固態培養基配製過程

3.1.4 凍菌配製

配製凍菌之目的為保存最初始之菌種源。由3.1.3節所提及，可藉由固態培養基畫盤方式培養菌落，但隨著複製繁衍代數增加，菌落之活性會漸漸降低，故有必要先將初始菌種源先以冷凍方式做保存，如圖3.6所示。其配製流程如下：

1. 準備 15 mL 之小離心管，先添加 3 mL 之甘油，再添加 7 mL 之去離子水，配製 30% 甘油水溶液。
2. 將 30% 甘油水溶液置於震盪器上搖 1 分鐘使其混和均勻。
3. 小離心管管蓋略鎖緊並將鋁箔紙完整包覆在管蓋上，取一小段滅菌指示膠帶貼於鋁箔紙上。
4. 將上述包裝處理好之 30% 甘油水溶液置於高溫滅菌釜以高溫高壓蒸氣進行滅菌。
5. 滅菌結束後取出並待 30% 甘油水溶液溫度轉涼，將其置於無菌操作台。
6. 在無菌操作台中，以酒精消毒小斜口夾，以小斜口夾夾取已滅菌之 1.5 mL 分裝管置於分裝架上。

7. 在無菌操作台將 5 mL 初始之巴氏芽孢桿菌菌液與 5 mL 之 30% 甘油水溶液以 1:1 比例混和，置於震盪器上搖 1 分鐘使其混和均勻，以每 1 mL 為單位分裝成 10 份，放置於 -80°C 冷凍櫃保存。



Figure 3.6: *Bacillus pasteurii* 之凍菌

3.1.5 菌液品質檢測

為確認菌液品質，進行灌漿前會針對菌液中可有效產生尿素酶之細菌進行檢測，進而了解本次用於改良之菌液品質。本研究使用之檢測儀器為可見光分光光譜儀，依據光線透過或被細菌懸浮液吸收之量體評估細菌菌數，藉此觀察微生物生長情況，即測定光學密度 (Optical density，簡稱 OD 值)，如圖3.7所示。另外，也使用 pH 測量儀進行酸鹼度量測，以確保菌液維持在特定範圍之鹼性環境，如圖3.8所示。本研究在菌液配製上分三階段進行，各階段皆會進行 OD_{600} 及 pH 值量測。第一階段 $OD_{600} > 1.20$ 即可進入下一階段培養。



Figure 3.7: 以可見光分光光譜儀檢測菌液之 OD_{600}

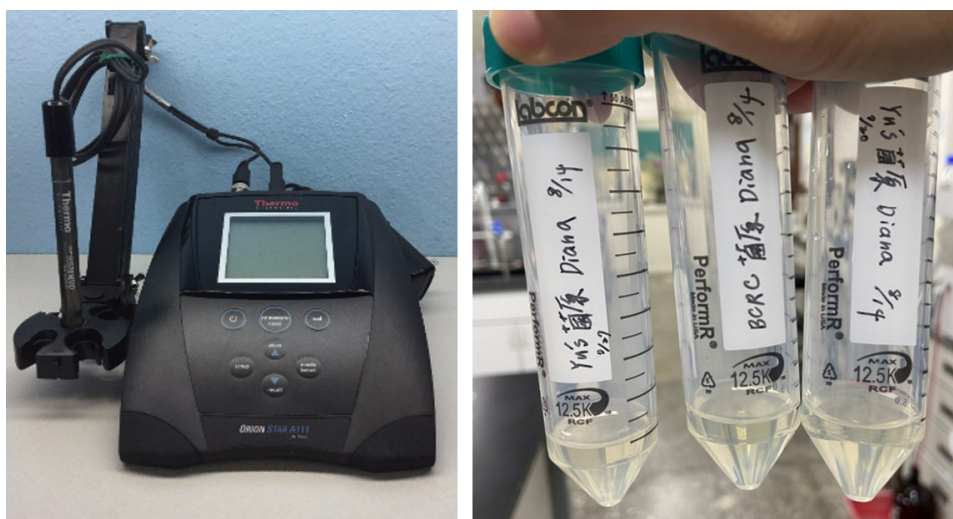


Figure 3.8: 以 pH 測量儀檢測菌液之 pH 值



3.1.6 MICP 菌液完整配製流程

本研究之菌液配製分為三階段進行，以下依各階段逐項說明：

1. 第一階段配製：菌液 S1

在無菌操作台中，將 1 mL 在 -80°C 冷凍保存之 *Bacillus pasteurii* 凍菌以微量吸管加入 55 mL 含尿素之液態培養基，置於水平震盪機上以 100 RPM 之轉速在室溫下進行 24 小時之培養，如圖3.9所示，待菌液 S1 顏色由清澈轉混濁後進行 OD_{600} 及 pH 值量測。S1 量測之 $OD_{600} = 1.20 \sim 1.50$ 、 $pH = 9.50 \sim 9.55$ 。

2. 第二階段配製：菌液 S2

在無菌操作台中，將 5 mL 之 S1 加入 50 mL 不含尿素之液態培養基，置於水平震盪機上以 100 RPM 之轉速在室溫下進行 24 小時之培養，待菌液 S2 顏色由清澈轉混濁後進行 OD_{600} 及 pH 值量測。S2 量測之 $OD_{600} = 2.30 \sim 2.60$ 、 $pH = 9.20 \sim 9.25$ 。

3. 第三階段配製：菌液 S3

為確保菌液之 pH 足夠低以抑制鈣離子與碳酸根離子不會過快結合於澆灌表面，將 150 mL 之 S2 加入 850 mL 不含尿素之液態培養基，配製成 15% 體積濃度之菌液 S3，接著以徒手搖動使菌液與培養基均勻混和，待菌液 S3 顏色由清澈轉混濁後進行 OD_{600} 及 pH 值量測。S3 量測之 $OD_{600} = 0.41 \sim 0.50$ 、 $pH = 8.50 \sim 8.65$ 。

菌液配製流程之示意圖，如圖3.10所示。



Figure 3.9: 以水平震盪機培養菌液

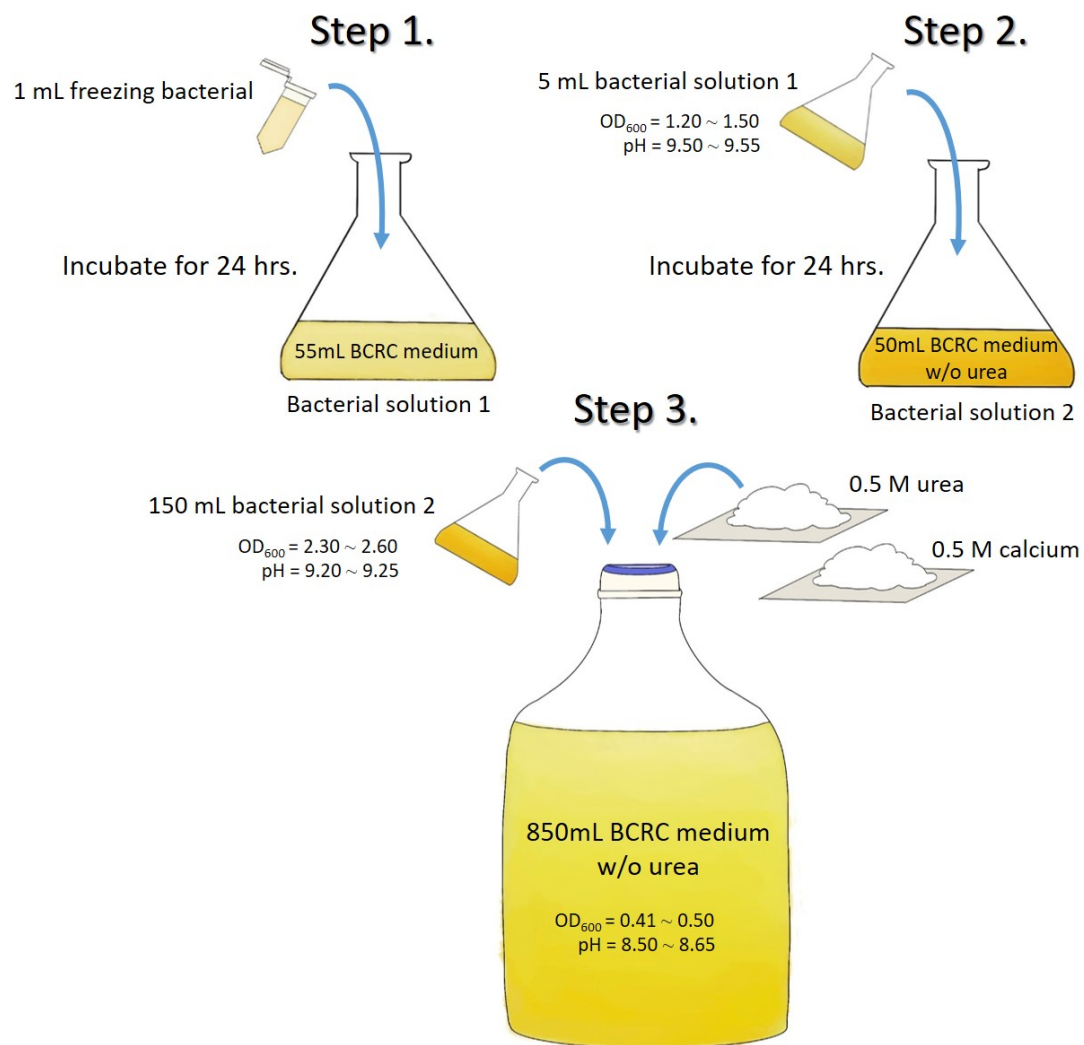


Figure 3.10: 菌液配製流程示意圖



3.2 砂箱試驗材料

以下針對本室內砂箱試驗所需之材料進行詳細說明：

3.2.1 石英砂

本砂箱試驗使用之砂體為越南石英砂，該粒徑分布如圖3.11所示，介於 $0.09\text{ mm} \sim 0.25\text{ mm}$ 。其均勻係數 C_u 為 1.49；曲率係數 C_c 為 1.02；比重為 2.66。其他粒徑參數： $D_{max} = 0.50\text{ mm}$ ； $D_{10} = 0.14\text{ mm}$ ； $D_{30} = 0.17\text{ mm}$ ； $D_{60} = 0.20\text{ mm}$ 。最大及最小土壤乾密度分別為 1.690 g/cm^3 及 1.392 g/cm^3 。根據統一土壤分類法，該越南石英砂被分類為不良級配。(UCUS；ASTM2006)

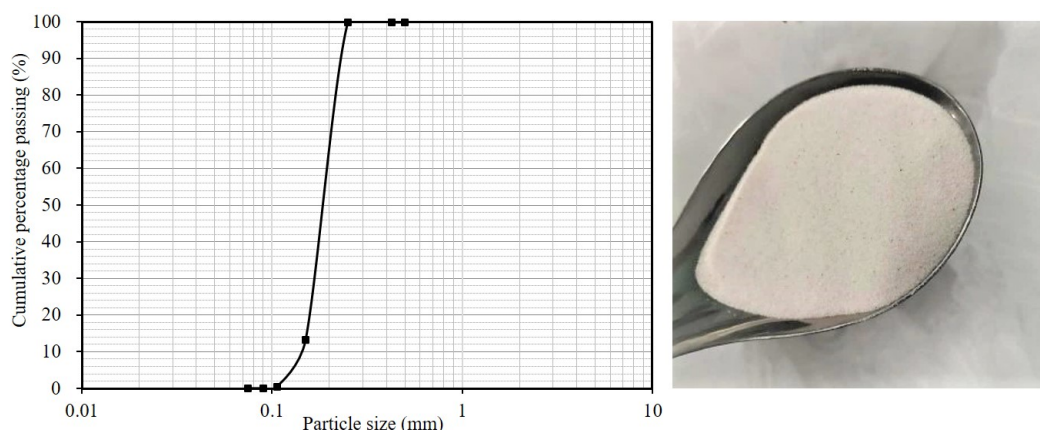


Figure 3.11: 越南石英砂之粒徑分布

3.2.2 尿素

本研究使用之尿素為最低純度有 99% 之試藥級尿素，如圖3.12所示，尿素之化學式為 $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ，分子量為 60.06 g/mol 。本研究使用之尿素濃度為 0.5 M 。



Figure 3.12: 試藥級尿素

3.2.3 氯化鈣

本研究使用之鈣源為工業級氯化鈣，如圖3.13所示，氯化鈣之化學式為 CaCl_2 ，分子量為 111.1 g/mol 。本研究使用之氯化鈣濃度為 0.5 M 。



Figure 3.13: 工業級氯化鈣

3.2.4 濾紙

本研究用於小型與中型壓克力砂箱之濾紙為硬質定量無灰濾紙，即 541 規格之濾紙，如圖3.14所示，其特色為具有高度濕強度與耐化學性。另外，用於酸洗試驗之濾紙為 $0.2 \mu\text{m}$ 膜片式濾紙，如圖3.15所示。其規格如表3.1及表3.2所示。

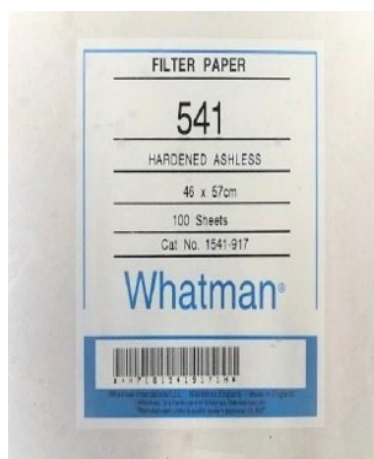


Figure 3.14: 型號 541 之濾紙



Figure 3.15: 0.2 μm 膜片式濾紙

Table 3.1: 541 濾紙規格

名稱	有機溶劑定量濾紙
製造廠商	Whatman
滲透速度	快 (過濾時間約 12 秒)
厚度 (mm)	0.16
孔徑 (μm)	20-25
灰份含量 (%)	< 0.006
基重 (gsm)	82

Table 3.2: 0.2 μm 膜片式濾紙規格

名稱	膜片式濾紙
製造廠商	PALL
濾膜材質	聚醚砜 (PES)
直徑 (mm)	47
孔徑 (μm)	0.2
包裝類型	個別
消毒方式	伽馬輻射



3.2.5 離心管

本研究使用 50 mL 之 PP 離心管，如圖3.16所示，主要應用於酸洗試驗。

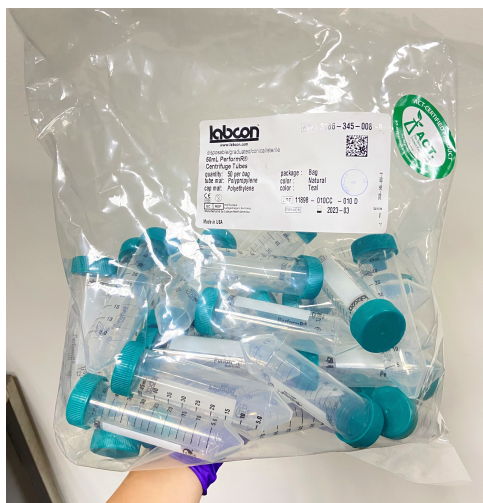


Figure 3.16: 酸洗試驗用離心管

3.2.6 取樣器

本實驗室前人以紙筒模具配製 MICP 試體，該紙筒模具係以一內徑約 73 mm、高約 150 mm 之紙筒構成，於其中分層填砂以配置目標相對密度 50% 之試體，並於該紙筒模型試體以 MICP 改良液進行表面滲透試驗 (Wong, 2022)，惟擔心紙筒具有吸水性，恐吸收本澆灌液材料，因此本試驗配置稍作改良，設計了兩種具有漿液流通性之取樣器，依試驗目的不同分成取樣器 A 與取樣器 B。

3.2.6.1 取樣器 A

取樣器 A 主要為表面滲透之小型砂箱試驗以及現地試驗之試體所使用，總高 170 mm，具孔徑之取樣器部分約 150 mm，內徑約 70 mm。本試驗使用之石英砂如本章3.2.1所提，粒徑分布為 0.09 mm ~ 0.25 mm。初始設計理念為使改良液可自由進出取樣器壁，又不可因取樣器壁孔徑過大導致過多後續取樣損失與試體擾

動，因此設計之取樣器壁孔徑僅需略大於粒徑大小。



1. 初始設計:

為了使取樣器具有剛性且不易變形，選擇不鏽鋼沖孔板作為取樣器壁材料，該沖孔板之小圓孔徑約 0.8 mm 。接著在取樣器壁上下分別安裝上束制環與下束制環，以確保取樣器壁之不鏽鋼沖孔板可受到兩端束制，以具有不易變形之剛性與較穩定之結構。其中在上部束制環左右兩側各打兩小孔，以方便後續取樣時可藉由小孔穿鐵線將取樣器取出。而底部束制環則是增加了底部加寬之設計，並放置略小於 70 mm 之圓板形不鏽鋼沖孔板於其上，該圓板形沖孔板之小圓孔徑約 1.8 mm ，目的為使其兼具底部排水與後續取樣功能。其初始設計圖及成品，如圖3.17及圖3.18所示。

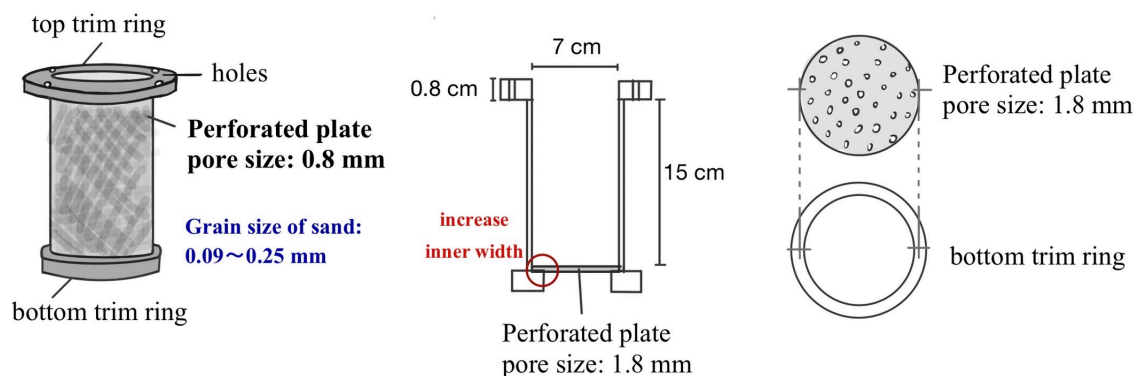


Figure 3.17: 取樣器 A 初始設計圖



Figure 3.18: 取樣器 A 初始設計及底部洞洞板

2. 第二版設計:

本取樣器 A 置於小型壓克力砂箱中進行填砂步驟時，因上部束制環較寬，而使位於上部束制環以下區域受阻擋而填砂不均勻，該處之相對密度相較於他處較為疏鬆，恐造成後續表面灌漿易產生優勢路徑，導致灌漿成效不佳。因此二次設計將上部束制環直徑縮小，改為焊接兩小圓環於上部束制環，代替初始設計之左右各兩孔。其二次設計圖及成品，如圖3.19及圖3.20所示。

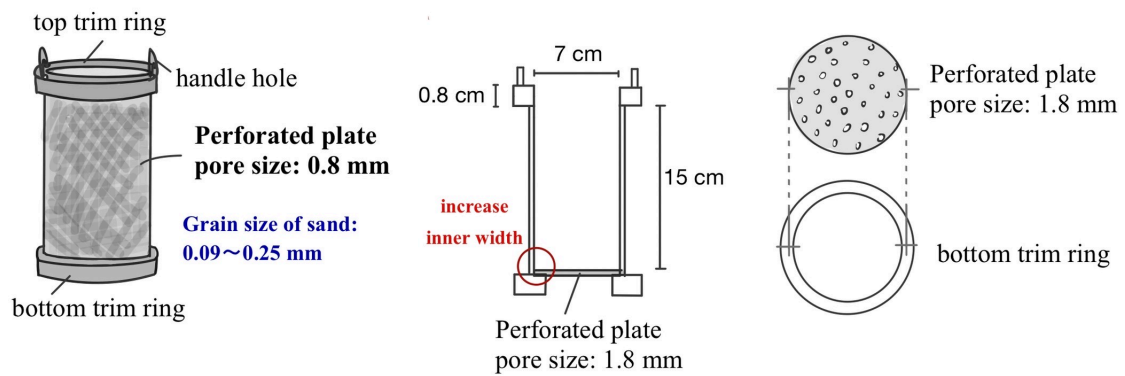


Figure 3.19: 取樣器 A 第二版設計圖



Figure 3.20: 取樣器 A 第二版

3. 最終版設計:

經過多次試驗測試發現，原先預計藉由上部束制環焊接之兩小圓環穿鐵線將取樣器取出，但因取樣器四周側向土壓力較大，若未將取樣器四周之砂體進行開挖，將難以單靠鐵線拉出取樣器，最佳做法仍是開挖後徒手將取樣器取出砂箱較為適宜。此外，取樣器壁在初始設計使用之沖孔板之小圓孔徑約為 0.8 mm ，取樣時試體外型相當完整，為使漿液流通性更佳，將略加大取樣器壁孔徑。因此設計最終版將取消焊接兩小圓環於上部束制環，並將取樣器壁之沖孔板之小圓孔徑由 0.8 mm 加大為 2.0 mm 。其最終設計圖及成品，如圖3.21及圖3.22所示。

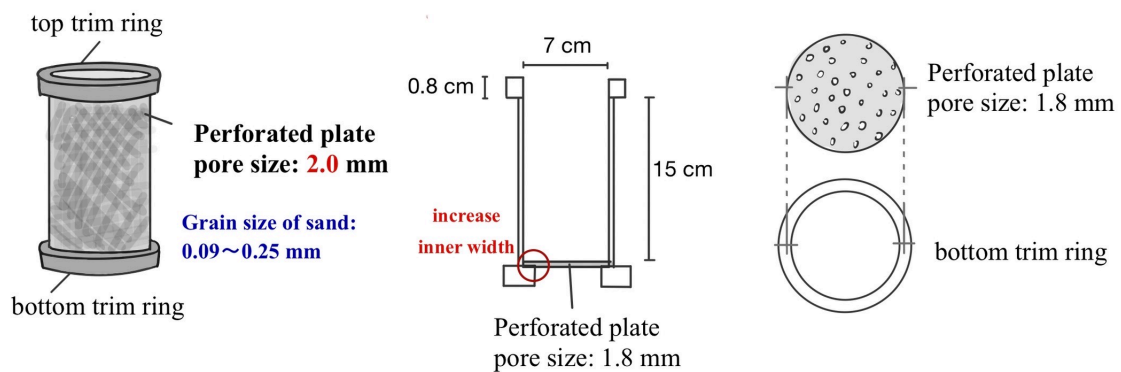


Figure 3.21: 取樣器 A 最終版設計圖



Figure 3.22: 取樣器 A 最終版

3.2.6.2 取樣器 B

取樣器 B 主要為側向加壓滲透之中型砂箱試驗之試體所使用，由於側向滲透需克服重力影響，故改良液噴射範圍有限，若選用之材料具有較大之改良液阻擋效果，將會大幅降低滲透成效。因此，側向加壓滲透所使用之取樣器壁材料不適合為厚度較厚、空隙率較低之不銹鋼沖孔板(如取樣器 A)，應調整為厚度較薄，且具有相對大之空隙率之「不鏽鋼網」較為適合。

本試驗所使用之取樣器 B 為厚度 0.25 mm 之 304 不鏽鋼紗窗網，網目 20 目，孔徑約 1.1 mm ，因本取樣器 B 欲使用於中型壓克力砂箱，故總高調整為 350 mm ，內徑約 50 mm ，如圖 3.23 所示。



Figure 3.23: 取樣器 B

3.2.7 頂土器

為配合取樣器 A 能順利取樣，以 3D 列印技術製作一頂土設備，其尺寸:長方體底部長寬高分別為 $9\text{ cm} \times 9\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ ；圓柱體部分直徑 5.1 cm 、高 20 cm ，如圖3.24所示。



Figure 3.24: 以頂土器取樣示意圖

3.2.8 壓克力砂箱

本研究所使用之砂箱均為易於觀察之透明壓克力砂箱，依試驗目的不同分為小型壓克力砂箱及中型壓克力砂箱。

3.2.8.1 小型壓克力砂箱

小型壓克力砂箱主要作為表面滲透試驗所使用，為厚度 1 cm 之五面壓克力板構成，其內長寬高分別為: $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 22\text{ cm}$ ，如圖3.25所示。



Figure 3.25: 小型壓克力砂箱

3.2.8.2 中型壓克力砂箱

中型壓克力砂箱主要作為側向加壓滲透試驗所使用，為厚度 2.5 cm 之五面壓克力板構成，其內長寬高分別為： $56\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 48\text{ cm}$ 。此外，為了具有排水功能，在正面下部開三孔，接上孔徑為 6 mm 之黃銅排水閥，如圖3.26所示。

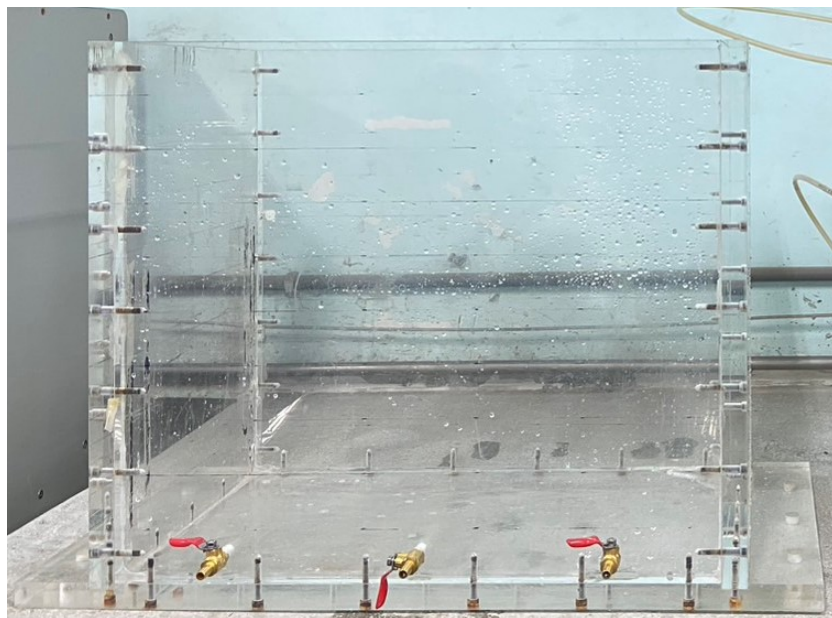


Figure 3.26: 中型壓克力砂箱



3.2.9 可拆式排水緩衝池

為使中型砂箱底部可排水，以 3D 列印技術製作一排水設備，以四段結構拼接成一符合砂箱尺寸之排水緩衝池，共有三個如小蓄水池之凹槽設計，每個小蓄水池間可以彼此連通，以防止某一出水閥開口發生阻塞情形，該設計及成品，如圖3.27及圖3.28所示。

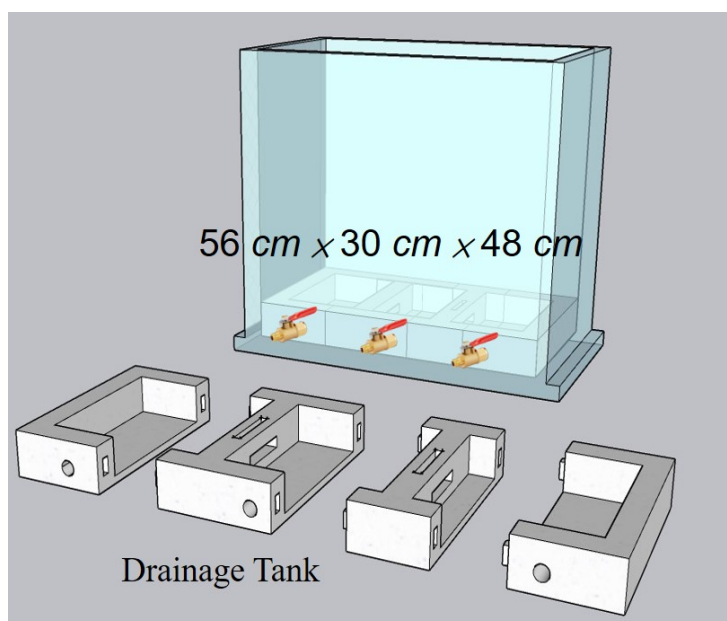


Figure 3.27: 可拆式排水緩衝池設計圖

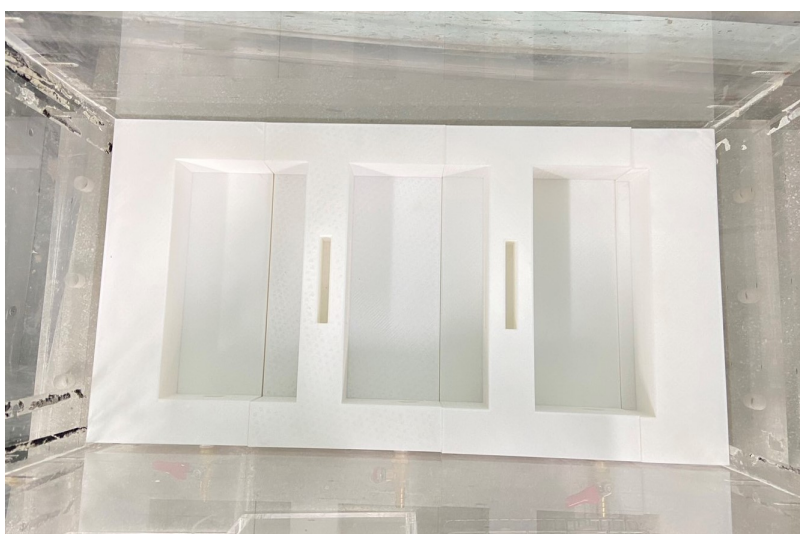


Figure 3.28: 可拆式排水緩衝池成品



3.3 試體準備

本研究所使用之試體相對密度皆設定為 50%，計算相對密度為 50% 情況下之乾土單位重為 1.527 gw/cm^3 。一旦試體、砂箱體積已知，即可得知所需填置之石英砂重量。相對密度公式如式3.1所示：

$$D_r = \left(\frac{\gamma_d - \gamma_{d_{min}}}{\gamma_{d_{max}} - \gamma_{d_{min}}} \right) \frac{\gamma_{d_{max}}}{\gamma_d} \times 100\% \quad (3.1)$$

本研究需準備之試體為壓力鍋試驗試體、靜態三軸壓密排水剪切試驗試體、酸洗試驗試體，由以下小節進行詳細描述。

3.3.1 壓力鍋試驗

依據規範 ASTM D6836-02，壓力鍋試驗需使用特定規格之試體環，本研究所使用之試體環為內徑 63.7 mm 、高 20 mm 。以小型圓紙筒準備 MICP 改良試體。該小型圓紙筒之內徑約為 65 mm 、高約 55 mm ，以此小型圓紙筒準備相對密度 50%、高度約 3 cm 之小試體。其試體準備流程如下：

3.3.1.1 純砂試體準備

1. 將試體環置於一塊透水石與一張濾紙上，如圖3.29所示，測量試體環之內高與內徑，計算填滿試體環時之體積。
2. 在相對密度為 50% 之情況下，量秤填滿試體環所需之石英砂重量以及使試體達 100% 飽和所需之除氣水量。
3. 將量秤好之石英砂與除氣水拌合均勻，加進試體環內，使含水石英砂試體高

度切齊試體環高。



Figure 3.29: 試體環、透水石及濾紙

3.3.1.2 MICP 之乾試體準備

1. 量秤小型圓紙筒之空重量，其中小型圓紙筒如圖3.30所示。
2. 在紙筒底部鑽五孔並貼上防水膠布。
3. 以三點量測法量測紙筒之內徑，計算目標 3 cm 試體高之體積。
4. 量秤空塑膠袋重並裝填所需石英砂重量。
5. 以矽利康油將紙筒內部上油，以防止後續折紙筒時產生之試體剝落。
6. 量秤兩張濾紙之重量與量測其厚度，將其中一張濾紙置於試體底部。
7. 使用漏斗以自由落體方式填置試體，確保填置過程中每處有相同石英砂量。
8. 整平試體表面並以三點量測法量測目前試體高度，若高度高於目標高度，則以夯垂輕輕夯實確保試體有符合目標相對密度 50% 。
9. 將另一張濾紙置於試體表面，以防止後續 MICP 改良液澆灌造成的表面沖蝕，並可有效控制澆灌流速。

10. 量秤最後試體總重與塑膠袋殘砂重，計算填置過程之石英砂損失，以計算最終之乾土單位重。

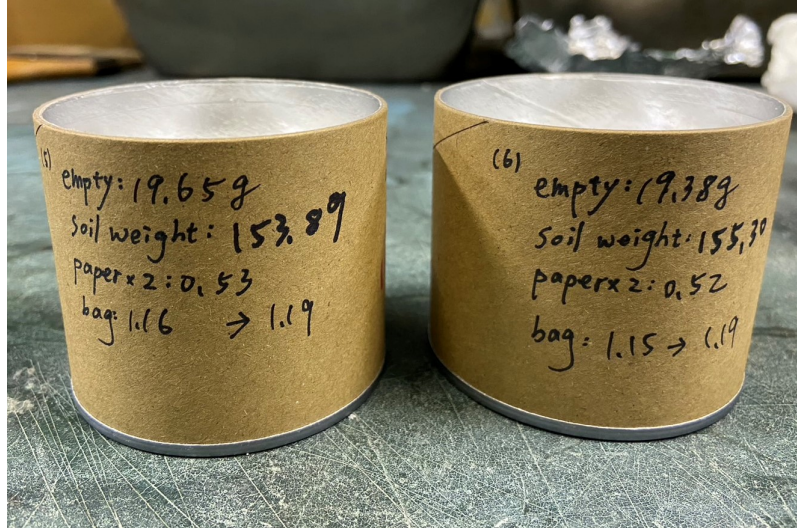


Figure 3.30: 小型圓紙筒

3.3.1.3 MICP 改良試體準備

本試驗提供 100% 飽和試體所需之 MICP 改良液量以供試體產生充分之礦化反應。本試驗設定之試體目標高度為 3 cm，澆灌 50 mL 之 MICP 改良液，並進行七天之養護。其 MICP 試體製作流程如下：

1. 量秤 0.5 M 之尿素與氯化鈣，分別為尿素 30.03 g、氯化鈣 55.55 g。
2. 將 50 mL 之 MICP 菌液分別先與尿素混和搖勻，再與氯化鈣混和搖勻成 MICP 改良液。
3. 將 MICP 改良液緩慢澆灌於乾試體表面。
4. 澆灌完畢之試體以塑膠袋將上部開口處封住，如圖3.31所示，置於防潮箱進行七天養護。
5. 在養護第四天將底部防水膠布取下並秤重，使其底部通透繼續養護。

6. 養護完畢後，將紙筒小心取下，如圖3.32所示，將試體環緩緩嵌入試體，並以刮刀將試體表面修整平順，切齊試體環高度即可。修整試體過程，如圖3.33所示。



Figure 3.31: MICP 改良試體封上塑膠袋進行養護



Figure 3.32: 取下紙筒之 MICP 改良試體



Figure 3.33: 壓力鍋之 MICP 改良試體修整準備



3.3.2 靜態三軸壓密排水剪切試驗

本研究之靜態三軸壓密排水剪切試驗之目的，除了觀察在表面滲透試驗下，若改以本研究設計之取樣器 A 充分浸潤於 MICP 改良液中，其強度是否得到提升外，也欲探討在現地側向加壓滲透試驗下，其力學性質之變化。試體準備流程將於3.4.4.2節及3.4.6.6節分別詳細說明。在本研究中，為取得符合標準靜態三軸壓密排水剪切試驗尺寸之試體，將取樣器 A 埋進小型壓克力砂箱及現地中，進行試體準備，接著以 3D 列印技術特製之試體頂土器進行取樣。以表面滲透之小型砂箱試驗為例之 MICP 改良試體取樣，如圖3.34所示，而靜態三軸壓密排水剪切試驗流程將於3.4.2節詳細說明。



Figure 3.34: 靜態三軸壓密排水剪切試驗之 MICP 改良試體準備



3.3.3 酸洗試驗

本研究之酸洗試驗，為觀察在砂箱表面滲透、砂箱側向加壓滲透、現地側向加壓滲透等不同滲透條件下，其試體均勻性之表現狀況。試體準備流程將於3.4.4.2節、3.4.5.3節及3.4.6.6節詳細說明。取樣完畢之試體，橫向置於器皿中以刮刀均分成上、中、下三等份，每份均放入小塑膠袋中混和均勻，如圖3.35所示，接著隨機取樣約 100 g 放入不鏽鋼分裝皿，置於 110°C 之烘箱 24 小時，待其烘乾。試體烘乾後，依據上、中、下三層各隨機取三份乾試體 10 g，分裝於空離心管中預備。酸洗試驗流程將於3.4.3節詳細說明。

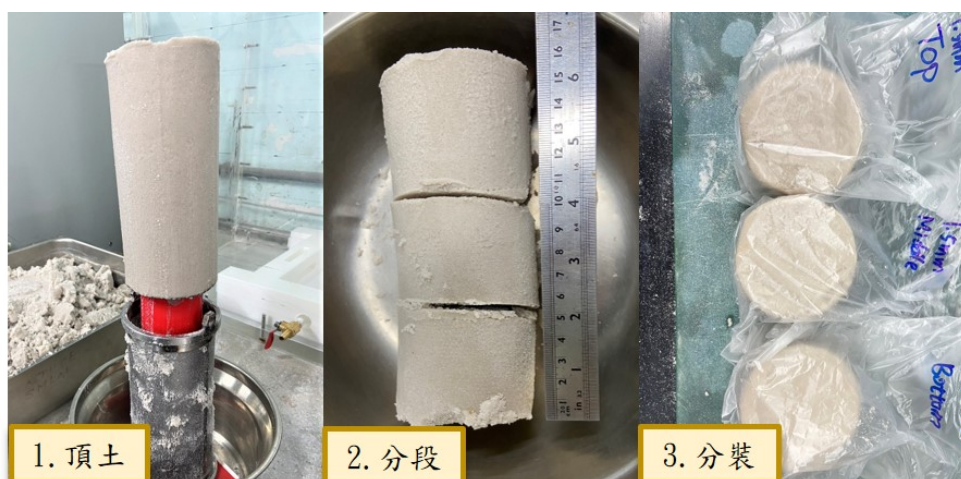


Figure 3.35: 酸洗之 MICP 改良試體準備

3.4 試驗方法

欲得知 MICP 灌漿工法對於土壤改良之可行性與成效，本研究設計了四項試驗方法，分成三項室內試驗及一項現地試驗，分別為壓力鍋試驗、表面滲透之小型砂箱、側向加壓滲透之中型砂箱試驗及側向加壓滲透之現地試驗。



3.4.1 壓力鍋試驗

土壤性質會受到許多因素影響，如土壤類型、含水量、壓實程度等，在大地工程中常需要進行土壤改良以改善其力學性質，如降低排水能力、提高土壤強度與抗壓能力等。壓力鍋試驗為評估土壤力學性質之其一方法，該試驗透過在壓力鍋中對土壤進行一定時間之加壓，以模擬土壤在不同應力下之排水行為，藉此評估土壤之力學特性與排水特性。

由壓力鍋試驗結果可以畫出土水特徵曲線 (SWCC)，土水特徵曲線為描述土壤孔隙水壓力與含水量關係之曲線，也可以探討土壤孔隙水壓力與飽和度之關係，由土水特徵曲線 (SWCC) 可以比較試體改良前後之曲線分布，藉由試體排水特性之變化可以看出其滲透性前後差異。

在畫出試體之土水特徵曲線 (SWCC) 之前，除壓力鍋試驗外，仍需進行比重瓶試驗與含水量試驗，進而求得該試體之初始孔隙比與初始飽和度。

3.4.1.1 比重試驗

為求取改良試體之初始孔隙比 e ，可由公式3.2推導：

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{(1 + e)} \quad (3.2)$$

其中 $\gamma_d = G_s \cdot \gamma_w$ ，故根據 ASTM D854-14，可由比重瓶試驗求取改良試體之比重 G_s 反推改良試體之初始孔隙比 e 。



3.4.1.2 含水量試驗

為求取改良試體之初始飽和度，可由公式3.3推導：

$$S \cdot e = \omega \cdot G_s \quad (3.3)$$

由3.4.1.1節可知孔隙比 e 及改良試體比重 G_s ，故根據 ASTM D2216-19，可由含水量試驗求取改良試體之含水量 ω 反推改良試體之初始飽和度 S 。

3.4.1.3 壓力鍋試驗流程

1. 陶瓷板洗淨：

先檢查壓力鍋內之陶瓷板是否有破損與漏洞，若無則將陶瓷板放進超音波清洗機徹底震動清洗，以壓力噴槍將陶瓷板表面吹乾，不能有一滴水。

2. 排水裝置連接：

將鍋內之排水管確實接到排水口，鍋外管線接入小量瓶，並在小量瓶瓶口以塑膠模封口，以減低蒸發造成之誤差。

3. 陶瓷板飽和：

將陶瓷板小心放置於不鏽鋼支架上，取 100 mL 除氣水平均倒入陶瓷板表面，給一特定壓力，待其流出近 100 mL 水，即完成陶瓷板飽和。本研究在此階段使用 3 bar 壓力。

4. 試體預濕：

於3.3.1節已完成試體準備，接著將整組試體(包含透水石、濾紙、試體環)放進抽氣室之支撐架上，以除氣水緩緩淹過透水石，此時先停止加除氣水，讓試體利用毛細原理向上吸收水分。待表面已明顯吸水，再將一張濾紙與一

塊透水石覆蓋於試體上，如圖3.36所示，即可繼續緩慢將除氣水淹過整個試體。



5. 試體飽和:

在抽氣室中讓試體先浸泡一日，接著使用抽氣機抽氣，抽氣壓力不宜一次抽太大，應緩慢調整，每次增加抽氣壓力均須確保試體沒有冒泡，以免導致試體產生孔洞。本試驗抽氣階段一共操作 30 分鐘。

6. 取出飽和試體:

飽和試體於壓力室移出後，盡快秤濕土重及飽和後試體高度，小心將試體環取下，如圖3.37所示。

7. 飽和試體進鍋:

將飽和試體放進壓力鍋中，此時透水石、濾紙與試體環均可取出，如圖3.37所示。接著將壓力鍋外之螺栓對角鎖緊，確保加壓時不會漏氣。

8. 開始加壓:

先關閉連接壓力鍋之進氣閥，透過加壓系統之放氣開關，確保加壓系統內無殘餘高壓與水氣，接著即可開啟加壓系統開關，旋轉氣閥開關以控制壓力大小，待壓力達到目標壓力後，即可打開進氣閥開始對試體進行加壓。壓力鍋試驗設備，如圖3.38所示。

9. 分段加壓

(a) 純砂試體: 本試驗分別施作 0 bar、0.1 bar、0.3 bar、0.4 bar、0.5 bar、0.7 bar、0.8 bar、0.9 bar、1.0 bar、1.5 bar、2.0 bar 之壓力，並秤每一壓力加載下之出水量。

(b) MICP 改良試體: 本試驗分別施作 0 bar、0.7 bar、1.4 bar、1.95 bar、2.2 bar、2.5 bar、2.75 bar、2.8 bar、3.0 bar、3.2 bar、3.55 bar、3.9 bar

之壓力，並秤每一壓力加載下之出水量。



10. 試驗結束:

將試體取出置於 110°C 之烘箱烘乾 24 小時後秤重，得試體乾土重。

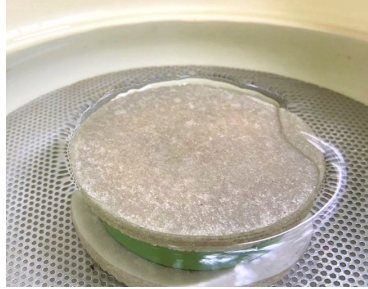


Figure 3.36: 試體覆蓋透水石及濾紙以除氣水浸泡

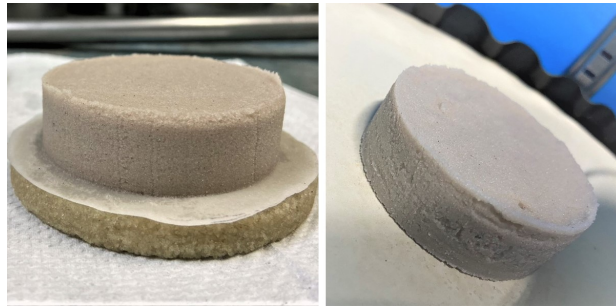


Figure 3.37: 飽和試體取出後進鍋



Figure 3.38: 壓力鍋試驗設備



3.4.2 靜態三軸壓密排水剪切試驗

靜態三軸壓密排水剪切試驗之目的為探討經由 MICP 改良過後之試體，其力學行為之變化。為了獲得更可靠之試驗結果，本試驗均在飽和條件下進行，以符合 ASTM D7181-11 之標準。

標準之三軸試驗設備包含三軸加壓室、軸向荷重測量裝置、荷重架裝置、軸向荷重活塞、兩台壓力控制裝置、壓力控制測量系統、變形指示器、橡皮膜、橡膠環、試體蓋、兩片透水石、兩張濾紙、四個閥和一個頂部洩壓螺栓，如圖3.39所示。其中本試驗使用之加載系統為 GDS 自動化系統。靜態三軸壓密排水剪切試驗設備之規格列於。在進行三軸試驗時，理想試體準備之平均高度與平均直徑比應介於 2 ~ 2.5 之間。標準三軸試驗之試體直徑為 7 mm，高度為 15 mm。為了解純砂之力學行為，本研究以重模方式準備純砂試體，其中重模試體為使用具有標準三軸試驗所需尺寸之圓形截面之分裂模具，將材料分五層壓實填製而成。透過夯槌輕壓方式，確保最終純砂質量符合目標相對密度。



Figure 3.39: 靜態三軸壓密排水剪切試驗設備

而經過 MICP 改良過之試體，由取樣器頂出後其自立性佳，如同完整試體，小心將試體移到三軸試驗台上。接著以橡皮模包覆試體，供其有效之防漏保護，該橡皮模於使用前，應仔細檢查橡皮模是否有明顯瑕疵或破損，若有則棄用。除了以橡皮模包覆試體外，仍需再以橡膠環固定以達最佳止水防漏效果，如圖3.40所示。

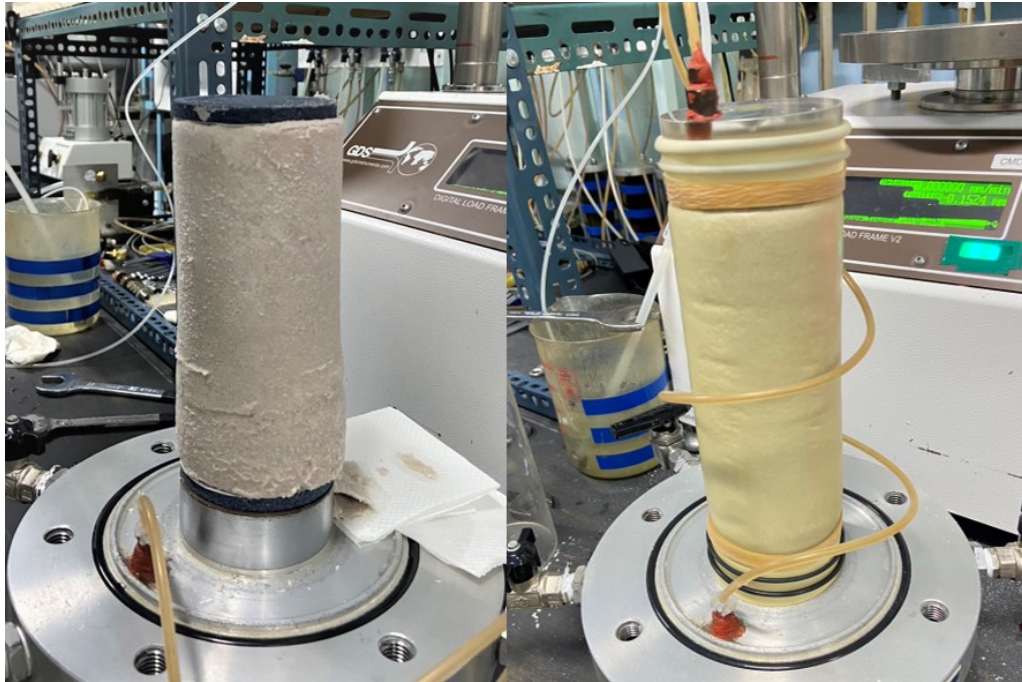


Figure 3.40: 將 MICP 改良試體置於三軸底座上

此外，在試體的上下兩端放置透水石與濾紙以提供排水與過濾雜質。透水石之滲透係數應不大於石英砂之滲透係數 ($1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$)。透水石使用完畢應以超音波清洗機徹底震動清洗，並檢查表面是否有堵塞現象，尤其以 MICP 改良後之試體會產生碳酸鈣，故需加強反覆清洗。靜態三軸壓密排水試體上機前之配置完成後，組裝三軸加壓室，並將三軸加壓軸桿與試體完整接觸於壓克力凹槽。接著注入除氣水，給予 20 kPa 之初使圍壓。

進行靜態三軸壓密排水剪切試驗包含三個階段，包含使試體飽和、壓密、剪切。其各階段之操作流程如下：



1. 飽和階段:

本試驗在飽和階段分成「通水」與「打反水壓」兩步驟，該階段之操作目的為使在不擾動試體之情況下，將試體之孔隙填滿水。在通水步驟，為了將試體內之空氣改以水取代，故使用除氣水進行通水以減少達飽和所需的時間。在打反水壓步驟，反水壓隨著圍壓之增加而增加，保持有效圍壓固定為 20 kPa 之情況下，不斷增加反水壓。在本試驗中，當孔隙壓力參數 B 之值達到 0.95 ，即可認為試體已達飽和。在本研究中，純砂及 MICP 改良試體均在施加 700 kPa 反水壓時達到 $B \geq 0.95$ 。其中孔隙壓力參數 B 之定義公式如式3.4:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (3.4)$$

此 Δu 指當試體在不排水條件下，隨圍壓變化而激發之試體超額孔隙水壓增量， $\Delta \sigma_3$ 即圍壓增量。

2. 壓密階段:

本階段之操作目的為使試體在目標有效圍壓下達到排水狀態之平衡。在壓密期間，固定每組試驗之壓密時間，當 100% 壓密完成時，體積變化量與時間之壓密曲線將趨於平穩，此時仍需繼續壓密一段時間，以確定壓密後試體高度 H_c 與壓密後試體截面積 A_c 。在本研究中，純砂與 MICP 改良試體均固定壓密時間為 3 小時。其中壓密後試體高度 H_c 之定義公式如式3.5:

$$H_C = H_0 - \Delta H \quad (3.5)$$

此 H_0 為試體之初始高度， ΔH 即壓密階段之試體高度變化量。

壓密後試體截面積 A_c 之定義公式如式3.6:



$$A_C = \frac{V_0 - \Delta V}{H_C} \quad (3.6)$$

此 V_0 為試體之初始體積， ΔV 即壓密階段之試體體積變化量。

3. 剪切階段:

本階段之操作目的為使試體在一定之剪切速率下進行剪切至破壞，該速度不宜過快，在壓密排水試驗過程中始終保持超額孔隙水壓為零。該剪切速率可使用 Head (1986) 提出之式3.7進行計算:

$$Shear\ rate = \frac{\varepsilon_f \% L}{100 t_f} \quad (3.7)$$

此 ε_f 為破壞時之應變， L 為試體長度，而 t_f 為破壞時間。

在剪切過程中應保持圍壓固定，並採用應變控制，以固定之軸向變形作為加載條件，推動加壓軸桿向下壓實試體。在本研究中，設定最大軸向應變為 20% 隨即停止軸向加載，得以觀察緊砂之尖峰強度與殘餘強度。

3.4.3 酸洗試驗

酸洗試驗之目的為探討經由 MICP 改良過後之試體，其碳酸鈣之沉澱量。由試體之碳酸鈣沉澱量可以得知試體之膠結效果，因此可以隨機取樣做酸洗試驗，進而探討試體經由 MICP 改良後之試體均勻性。

因碳酸鈣遇到稀鹽酸會產生泡騰現象，並生成氯化鈣、水、二氧化碳氣體，二氧化碳氣體之逸散會使試體重量減少，由酸洗試驗前後之試體重量變化可以得知其碳酸鈣含量。由在本研究中，使用 PP 材質之離心管進行酸洗試驗，該離心管可以直接觀察以 4 M 稀鹽酸水溶液溶解碳酸鈣之化學反應，如圖3.41所示。

為探討試體均勻性，將試體分成上、中、下三部分，分別於每層各取三份 10 g 乾試體放進 PP 離心管中。本試驗之試驗流程如下：



1. 空離心管秤重並放入 10 g 之 MICP 改良試體。
2. 準備 4 M 稀鹽酸水溶液，將 33.2 mL 之濃鹽酸以去離子水加至 100 mL。
3. 將 10 mL 之 4 M 稀鹽酸水溶液加進 10 g 之 MICP 改良試體中。
4. 鎖緊離心管並上下搖，使稀鹽酸得以與試體均勻混和。
5. 經 24 小時反應後，再以去離子水稀釋經稀鹽酸作用之試體溶液。
6. 準備抽氣過濾裝置：真空幫浦、緩衝瓶、磁式過濾漏斗、過濾座、抽氣過濾瓶、橡皮管，如圖3.42所示。
7. 濾紙秤重後放置於過濾座上，用以防止反覆洗砂過程之砂顆粒損失。
8. 真空幫浦開啟後確認設備已開始抽氣，將稀釋後之試體溶液倒入抽氣過濾瓶，再以前以去離子水加入離心管中稀釋並鎖緊上下搖，倒入抽氣過濾瓶，重複至少 5 次才算清洗完成。
9. 空濾紙包裝秤重，以計算精確之濾紙重量。
10. 將過濾完之濾紙與試體一同置於離心管中，於 60 °C 烘箱進行烘乾。
11. 待試體烘乾後，秤最終包含濾紙與試體之離心管總重。
12. 由酸洗試驗前後之重量變化計算碳酸鈣含量。

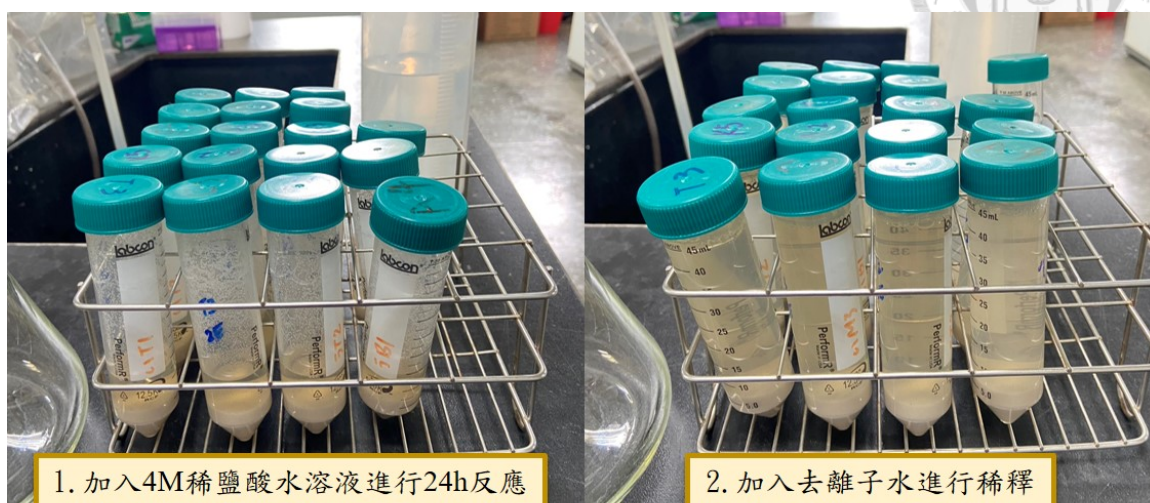


Figure 3.41: 酸洗試驗



Figure 3.42: 酸洗試驗設備



3.4.4 表面滲透之小型砂箱試驗

欲了解 MICP 機制在砂箱中之垂直向滲透情形，故設計了表面滲透之小型砂箱試驗，以垂直方向進行重力式澆灌，毋須額外添加壓力即可達到如垂直灌漿之效果。

本實驗室前人使用紙筒模具進行表面滲透試驗，試驗結果顯示改良試體之剪力強度有明顯提升 (Wong, 2022)，惟擔心紙筒具有吸水性，恐吸收本改良液材料，故本試驗配置稍作改良，將取樣器 A 置於小型壓克力砂箱中進行試體填製與改良液養護，養護七日後再以特製之頂土器進行試體取樣，以探討具孔隙之取樣器壁，是否可使澆灌均勻性提高並增加改良後之剪力強度。

3.4.4.1 試驗設備

1. 小型壓克力砂箱 (內長寬高分別為: $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 22\text{ cm}$ ，厚度均 1 cm)
2. 取樣器 A
3. 頂土器
4. 濾紙
5. MICP 改良液 1900 mL

3.4.4.2 表面滲透之小型砂箱試驗流程

依靜態三軸壓密排水剪切試驗規範，試體高度 $L \geq 2$ 倍試體直徑。本試驗所使用之取樣器 A 為直徑 7.0 cm ，高度 17 cm 之圓柱體；小型壓克力砂箱之內長寬高分別為: $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 22\text{ cm}$ ，為使澆灌液材料有滲透空間，石英砂在小型壓

克力砂箱中的填置高度為 20 cm，本試驗之試驗流程如下：



1. 空取樣器 A 秤重並記錄。
2. 在平均相對密度為 50% 之情況下，計算平均乾單位重 $\gamma_d = 1.527 \text{ gw/cm}^3$ 時所需之石英砂重量。
3. 將石英砂以自由落體方式進行填置，其中砂土分四層且每層高度 5 cm 依序填置。
4. 整平每層填置完之砂土，並確保有在指定高度上，填入下一層之前在表面略為刮花，以避免砂土產生分層而影響後續澆灌效果。
5. 填完最後一層砂土後，使用壓克力整砂板將表面刮平整，即完成填砂步驟，如圖3.43所示。
6. 在小型壓克力砂箱之砂土表面放置 14.5 cm × 14.5 cm 之濾紙一張，以避免由表面垂直澆灌時產生之衝擊速度導致砂土表面產生不必要之孔洞，並且可同時控制 MICP 改良液之澆灌流速。
7. 計算在相對密度 50% 之情況下，使試體達到 100% 飽和度所需之 MICP 改良液量，約為 1900 mL。
8. 將 1900 mL 之 MICP 菌液依序與 0.5 M 尿素、0.5 M 氯化鈣混合成 0.5 M 氯化鈣之 MICP 改良液，並以緩慢速度進行表面垂直澆灌，如圖3.44所示。
9. 七日養護完畢後，開挖出取樣器 A 並量秤包含試體之總重。
10. 以頂土器由取樣器 A 取出試體後，如圖3.34所示，量秤此時之取樣器 A 殘餘重量，以計算實際改良試體之重量。

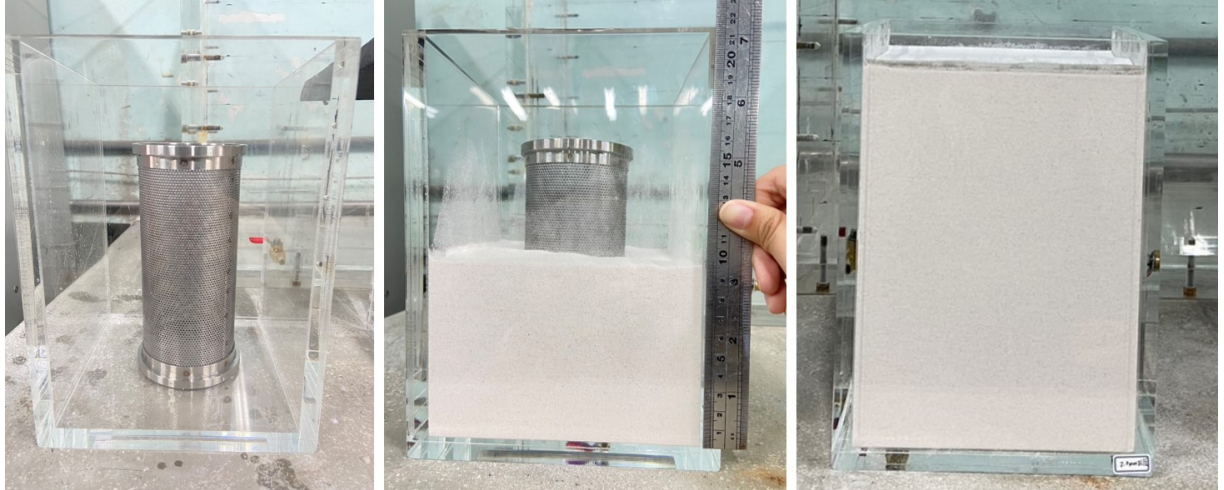


Figure 3.43: 表面滲透之小型砂箱試驗填砂



Figure 3.44: 表面滲透之小型砂箱試驗改良液澆灌



3.4.5 側向加壓滲透之中型砂箱試驗

欲了解 MICP 機制在砂箱中之側向滲透情形，故設計了側向加壓滲透之中型砂箱試驗，其中，因側向加壓滲透對於較具剛性之材料會有反彈現象，故將內部放置之取樣器 A 改成取樣器 B，取樣器 B 主要針對側向材料做修改，改成具有柔性之不鏽鋼網，以減少試驗上之不確定性。

3.4.5.1 試驗設備

1. 砂箱主體:

- (a) 中型壓克力砂箱 (內長寬高分別為: $56\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 46\text{ cm}$ ，厚度均 2 cm)
- (b) 黃銅排水閥 (孔內徑: 6 mm) $\times 3$
- (c) 取樣器 B $\times 4$

2. 澆灌系統:

- (a) 氣體加壓控制器
- (b) 耐壓壓克力澆灌容器 (3 L)
- (c) 耐壓塑膠管線
- (d) 抽氣機
- (e) 金屬澆灌管 (內徑: 8 cm ，長度 25 cm)

3. 排水系統:

- (a) 可拆式排水緩衝池
- (b) 不鏽鋼洞洞板 ($55\text{ cm} \times 29\text{ cm} \times 1\text{ mm}$)
- (c) 濾紙 ($55.5\text{ cm} \times 29.5\text{ cm} \times 0.15\text{ mm}$)

3.4.5.2 試驗測試

因 MICP 改良液滲透入實驗砂後即不可再重複實驗，為求可明顯觀察液體流向及不浪費實驗用品，本研究先進行幾種試驗前測試，分別為噴漿管可行性測試、砂湧測試、噴漿壓力與染色範圍測試，分別敘述如下：

1. 噴漿管可行性測試：

最初使用了一般壓力管線作為加壓管線，末端連接孔內徑為 6 mm 之 L 通閥作為噴管，為使澆灌管線可以於砂箱中自立，設計一不銹鋼 L 型勾並打四孔洞，以兩束線帶束制管線，如圖3.48所示。

為探討該澆灌管線是否可承受加壓而不產生位移，於壓克力澆灌容器中加入黃色廣告顏料染色水，觀察給予 500 kPa 之壓力下，黃色染色水於只含水之中型砂箱中，其噴射範圍走向，如圖3.45所示。結果顯示，噴管口噴射時有稍向上之角度，可能因束線帶之網綁手法不佳，導致不銹鋼 L 型勾不夠服貼於砂箱壁，進而產生不必要之傾角，因此改善束線帶之網綁手法後，如圖3.48之左圖所示，可使管線與噴管較為置中，接著進行砂湧測試。

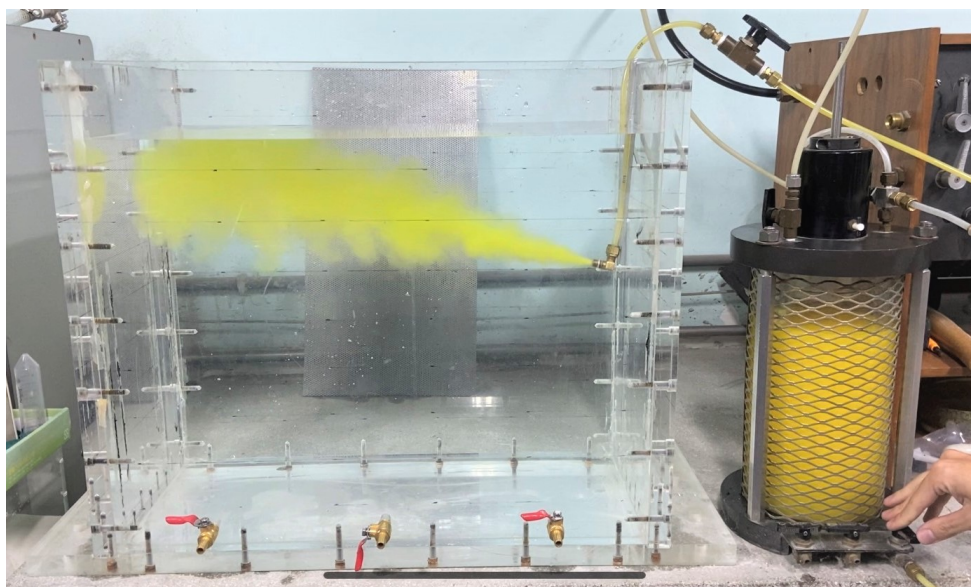


Figure 3.45: 改良噴管前之加壓染色水於水中產生非水平噴射路徑

2. 砂湧測試:



為探討不產生傾角之噴管在進行加壓滲透時，是否可有效向前噴射而不產生砂湧現象，本測試欲探討在加壓 200 kPa 、 350 kPa 及 500 kPa 情況下，加壓滲透之射程範圍。先於砂箱中填入 50% 相對密度、長寬高分別為 $56\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 之實驗石英砂，再於壓克力澆灌容器中分別加入染色水，進行分段加壓，每階段加入 3 L 之染色水，其中以藍色染色水代表 200 kPa 之壓力，以紅色染色水代表 350 kPa 之壓力，以黃色染色水代表 500 kPa 之壓力。結果顯示，在進行 200 kPa 之加壓滲透階段，染色路徑已明顯往上，如圖3.46所示；在進行到 350 kPa 之加壓滲透階段，加入不到 1 L 之紅色染色水，即於表面發生砂湧現象，如圖3.47所示。然而，因為已發生砂湧現象故不接著進行 500 kPa 黃色染色水測試。

而發生砂湧之原因，除了管線相當靠近砂箱壁而有相對平滑之交界面外，澆灌管線本身為塑膠材質，其表面相當光滑，在沒有足夠摩擦力之情況下，因加壓造成之管線振動可能使管線周圍之砂體變得較為疏鬆，進而產生優勢路徑；同時上方負載之金屬塊不夠服貼於砂表面而產生空隙，在第一階段 200 kPa 加壓已有明顯掏空現象，使得第二階段壓力增加為 350 kPa 時，隨即迅速地產生砂湧現象。



Figure 3.46: 200 kPa 加壓染色水於乾砂之滲透情形 (藍色)



Figure 3.47: 350 kPa 加壓染色水於乾砂中發生砂湧 (紅色)

3. 噴漿壓力與染色範圍測試:

為改善上述問題，於以下幾點分別進行檢討與修正:

(a) 澆灌管身之摩擦力不足:

重新設計了一組澆灌管線，其中澆灌管從塑膠材質改成不銹鋼材質，以增加澆灌管剛性而不易變形，並於該不銹鋼澆灌管表面套上數枚 O 形環 (O-rings) 以增加其管身摩擦力，如圖3.48所示。

(b) 上部負載不夠服貼:

考慮到金屬材料具有較強之剛性，本次修正將不再使用金屬板作為上部加載，改以具有柔性與流動性之砂袋作為新版上部負載方式，然而，若同時疊放過多砂袋，砂袋中之空氣若排放不完全，也會導致不夠服貼之情況，故本測試是先於砂體頂部鋪上塑膠袋並於四周以不透水膠布黏貼，接著於塑膠袋上均勻倒入厚度 8 cm 、約 20 kg 重之石英砂，適度壓實，即完成相當服貼之上部加載，如圖3.49所示。需要注意此時因上部已封閉，氣體無法流通，故需將下部之三排水閥打開，以保持氣壓流通，否則加壓灌漿會有壓力不平衡之情形。

(c) 澆灌管線之適當位置調整:

若沿用原先之不銹鋼 L 型勾來束制澆灌管線，依然會有過於靠近砂箱

壁光滑面之疑慮，故將灌漿管線改成箱外束制。該束制方式可以調整澆灌管線距離砂箱壁之距離，本測試使用距砂箱壁 3 cm 處進行加壓滲透測試。

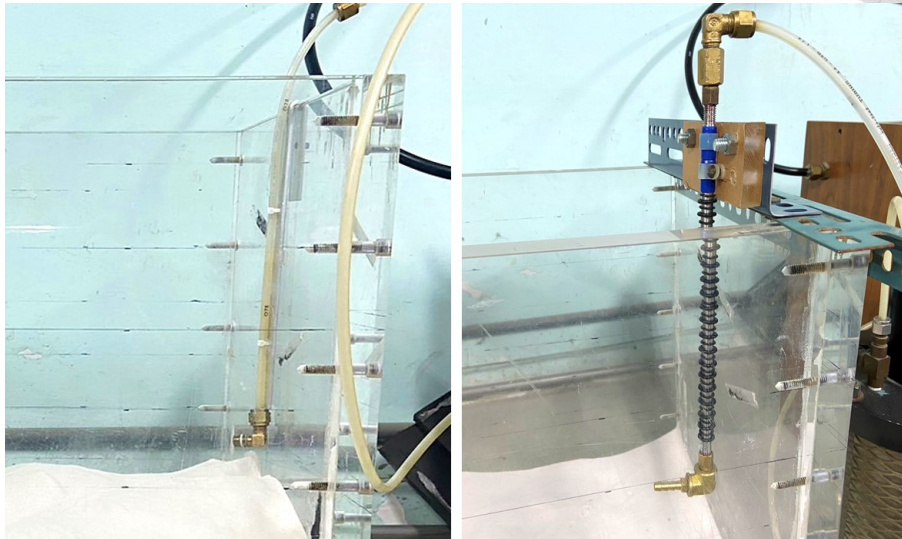


Figure 3.48: 澆灌管設計更新

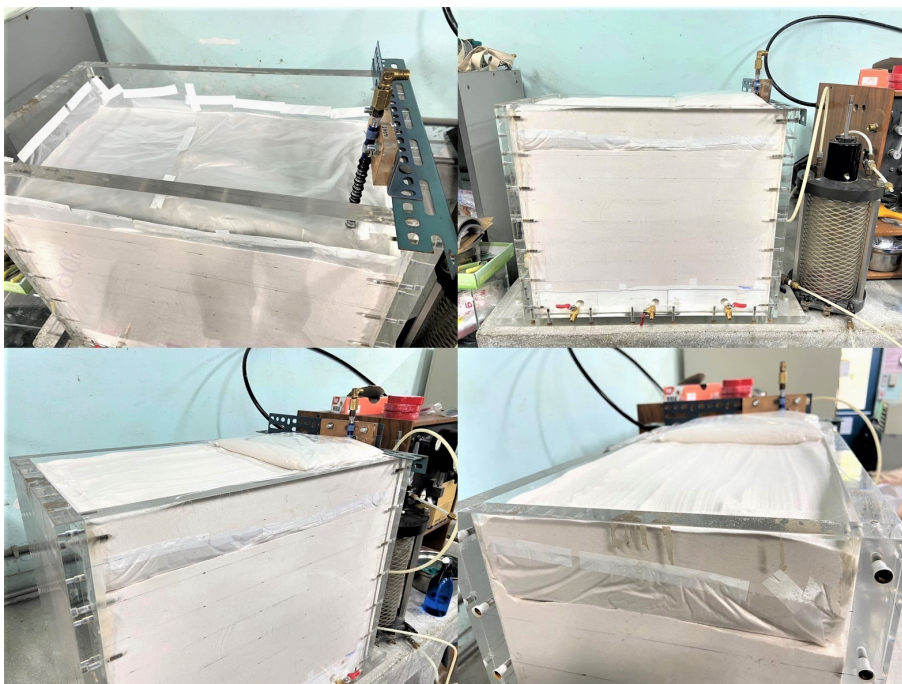


Figure 3.49: 服貼之上部乾砂負載

修正上述問題後，接著進行噴漿壓力與染色範圍測試。

先於砂箱中填入 50% 相對密度、長寬高分別為 56 cm × 30 cm × 30 cm 之實驗石英砂，鋪上塑膠袋並填黏貼四周，均勻倒入厚度 8 cm、約 20 kg 重之

石英砂作為上部負載，適度壓實，再於壓克力澆灌容器中分別加入染色水，以不同顏色染料代表不同壓力大小，紅色代表 200 kPa 之壓力、黃色代表 300 kPa 之壓力，藍色代表 400 kPa 之壓力，每種壓力條件均灌入 3 L 染色水進砂體中，於砂箱外表僅能呈現第一澆入之顏色，其他顏色需於開挖後才得以觀察，如圖3.50所示。本次測試結果無太大問題，可以接著進行 MICP 側向壓力滲透試驗。

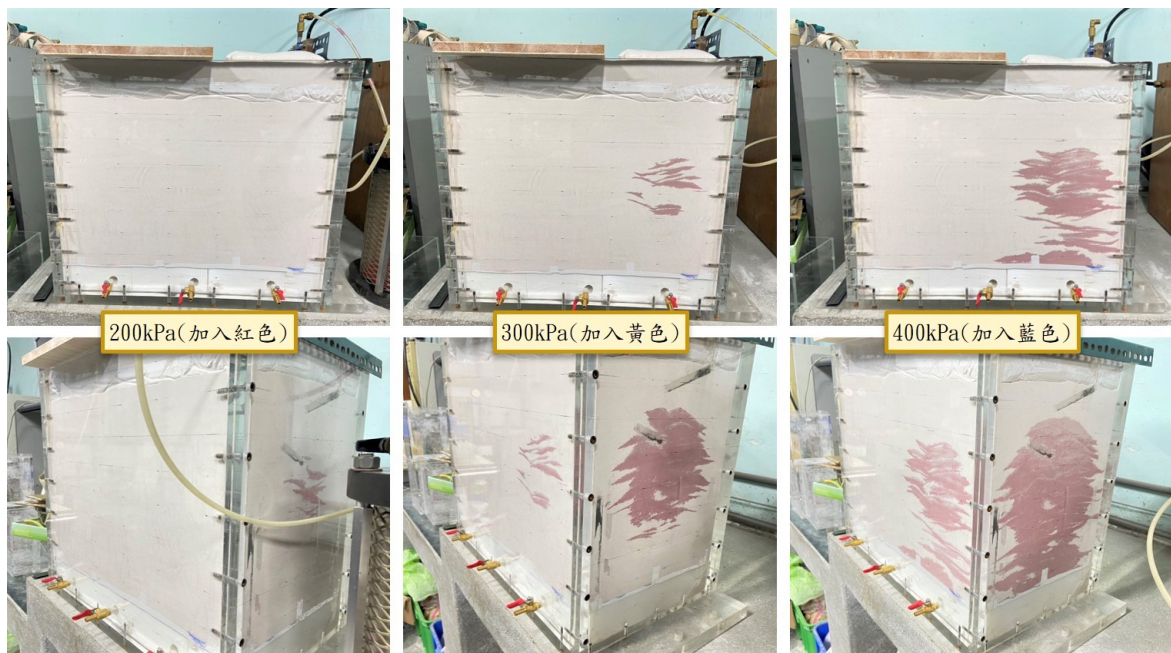


Figure 3.50: 不同壓力下之染色範圍測試

3.4.5.3 側向加壓滲透之中型砂箱試驗流程

本試驗之試驗流程如下：

1. 將可拆式排水緩衝池、不鏽鋼洞洞板及濾紙依序放入砂箱底部，此時三黃銅排水閥保持常開，以維持氣壓流通，如圖3.51所示。
2. 欲填砂之範圍其長寬高分別為 $56\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 35\text{ cm}$ ，在平均相對密度為 50% 之情況下，計算平均乾單位重為 1.527 gw/cm^3 時所需之石英砂重量。



3. 將石英砂以自由落體方式進行填置，其中砂土分七層且每層高度 5 cm 依序填置。
4. 整平每層填置完之砂土，並確保有在指定高度上。
5. 填至砂土高度為 10 cm 時，將取樣器 B 插入砂體中，如圖3.52所示。
6. 直到填完最後一層砂土後，將表面稍整平，即完成填砂步驟。
7. 鋪上塑膠袋並以不透水膠布填黏貼四周，均勻倒入厚度 8 cm 、約 20 kg 重之石英砂作為上部負載，適度壓實。
8. 計算在相對密度 50% 之情況下，使試體達到約 50% 飽和度所需之 MICP 改良液量，本試驗取 10 L 。
9. 將 10 L 之 MICP 菌液依序與 0.5 M 尿素、 0.5 M 氯化鈣混合成 0.5 M 之 $\text{Urea} - \text{CaCl}_2$ 之 MICP 改良液，如圖3.53所示。
10. 壓克力澆灌容器接上抽氣機，因澆灌容器最適容量僅 3 L ，故將 3 L 之 MICP 改良液接上抽液管線，開啟抽氣機進行抽氣，使 MICP 改良液充分儲存於澆灌容器中，關閉抽氣機，打開澆灌容器出氣閥，使其回一大氣壓狀態後關閉。
11. 開啟氣壓開關，調整氣體加壓控制器至 50 kPa ，進行初始加壓，接著慢慢調整至 200 kPa ，即為第一階段加壓。
12. MICP 改良液澆灌完畢，關閉壓力進氣閥，開啟澆灌容器出氣閥，使其回一大氣壓狀態後接上抽氣機，再進行一次 MICP 改良液抽液步驟。側向加壓滲透之中型砂箱試驗配置示意圖，如圖3.55及圖3.54所示。
13. 加壓步驟每階段均從上一階段壓力開始慢慢加壓至目標壓力，第一階段從 50 kPa 慢慢加壓至 200 kPa ，共澆灌 3 L ，流速 37.5 mL/s ；第二階段從

200 kPa 慢慢加壓至 300 kPa ，共澆灌 3 L ，流速 46.88 mL/s ；第三階段從 300 kPa 慢慢加壓至 400 kPa ，分成兩次 2 L 澆灌，共澆灌 4 L ，流速分別為 47.29 mL/s 及 47.62 mL/s 。



14. 待所有 10 L 之 MICP 改良液均澆灌完畢，且無發現砂湧現象，如圖3.56所示，即可放置進行七日養護。
15. 七日養護完畢後，進行改良試體開挖及取樣，本試驗之改良試體後續將進行酸洗試驗。

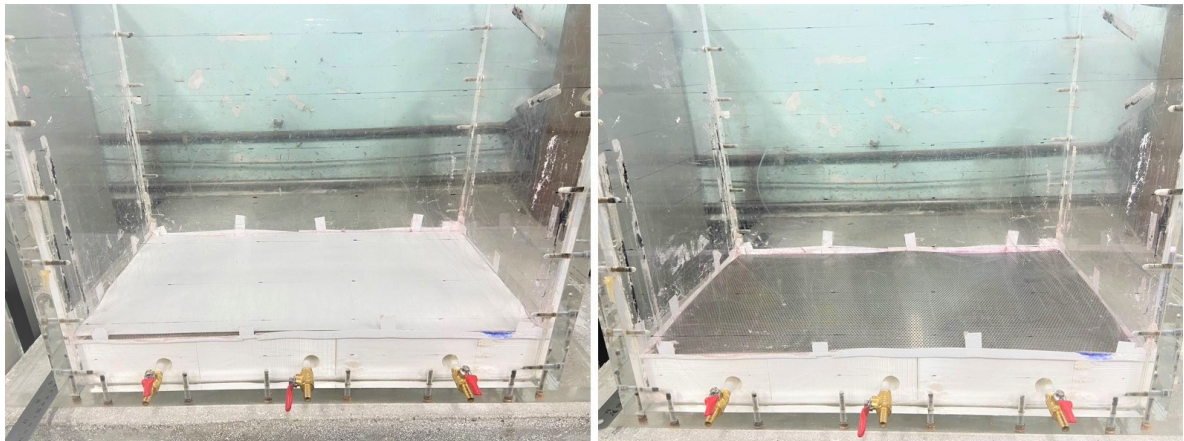


Figure 3.51: 砂箱底部排水系統準備

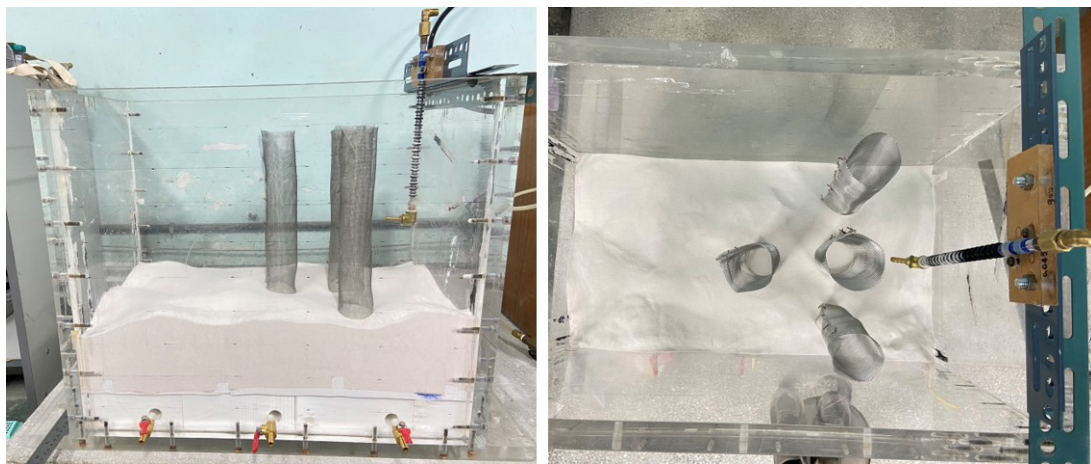


Figure 3.52: 放入取樣器 B



Figure 3.53: MICP 改良液配製材料



Figure 3.54: 側向加壓滲透之中型砂箱試驗配置

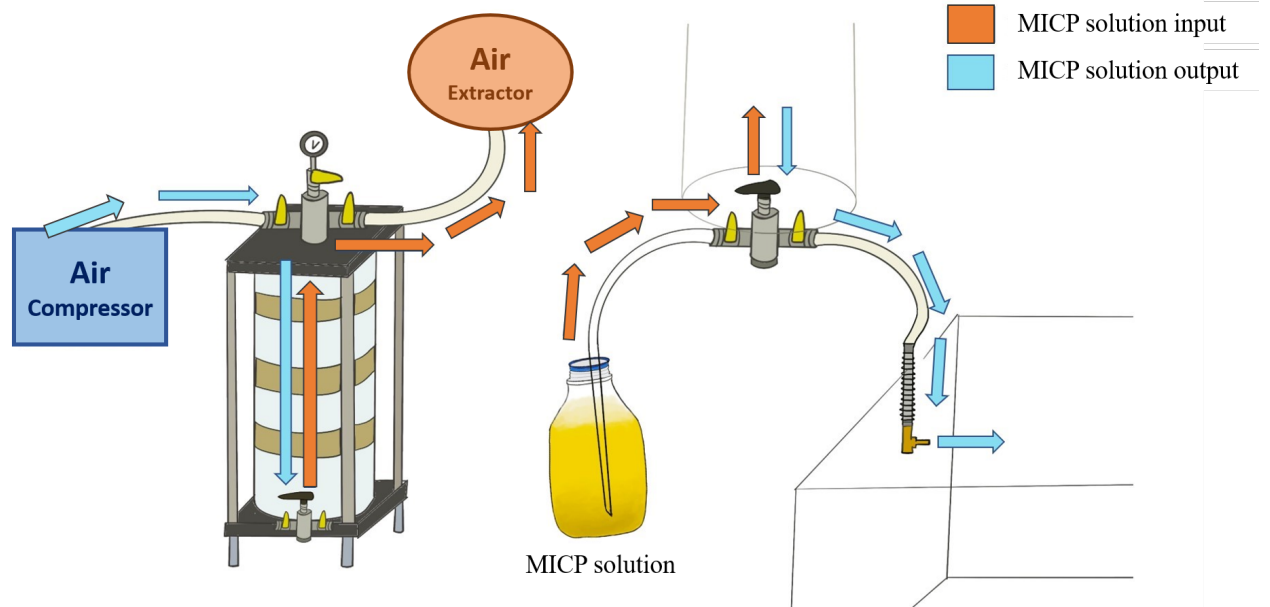


Figure 3.55: 側向加壓滲透之中型砂箱試驗示意圖



Figure 3.56: MICP 改良液澆灌完畢



3.4.6 側向加壓滲透之現地試驗

本研究欲探討 MICP 改良液在實驗室外模擬如灌漿之情形，在現地挖一試坑進行側向壓力滲透試驗。本研究試坑位於台大土木研究大樓左後方之閒置空地，如圖3.57所示，因怪手開挖相對小尺度試坑精度有限，本試坑尺寸為頂長 175 cm、頂寬 60 cm；底長 160 cm、底寬 40 cm；高 100 cm 之雙梯形試坑，總體積約 836550 cm³。



Figure 3.57: 試坑位置

3.4.6.1 試驗規劃

本研究設計一套相對輕便且極易於操作之簡易澆灌系統，為使澆灌過程中改良液不發生沿弱面砂湧之情形，於試坑表面鋪鑽有兩開孔之木板以承受外加载重，且每次澆灌均控制壓力由 0.5 kg/cm² 開始緩慢加壓，最高不超過 2 kg/cm²。澆灌階段分四區域進行噴液，且每次皆為雙向式噴液，為使澆灌過程不因壓力導致管線位移，故設計兩組澆灌管線輔助壓克力基座，除維持管線位置，也兼具噴液口定位功能。

其中本試驗所使用之 MICP 改良液總量約為 100 L，所需菌液量約 15 L，因總量

龐大，無法全數於實驗室內進行配製，應以現地拌合為佳。故各階段菌液與最終 MICP 改良液配製手法稍作修改，其中 85 L 不含尿素之液態培養基以濃縮液型式在實驗室預先準備，再於現地補足所需之溶劑量，其他材料則是採用現場拌合。

3.4.6.2 試驗設備

1. 用電設備：

(a) 發電機

(b) 空壓機

2. 填土設備：

(a) 鏟子 ×2

(b) 開孔木板

(c) 土袋負載

3. MICP 改良液拌合設備：

(a) 35 L 水龍頭儲水桶 ×2

(b) 攪拌棒

(c) 1 L 量杯

4. 澆灌設備：

(a) 加壓澆灌儲液容器 (容量 6 L)

(b) 塑膠水管 (管內徑 10 mm): 100 cm × 2、150 cm × 2

(c) 黃銅三通閥 (孔內徑 10 mm) × 4

(d) 澆灌管線輔助壓克力基座



5. 取樣器:

- (a) 取樣器 $A \times 4$

6. 化學藥品:

- (a) 不含尿素之濃縮液態培養基: $700 \text{ mL} \times 4$

- (b) 尿素: 3.003 kg

- (c) 氯化鈣: 5.555 kg

7. 菌液:

- (a) 菌液 $S2$: $3850 \text{ mL} \times 4$

3.4.6.3 澆灌系統配置

本試驗欲嘗試使用 MICP 改良液以低壓滲透方式模擬灌漿機制，進行小範圍土壤改良測試，使用之灌注壓力由 0.5 kg/cm^2 開始緩慢加壓，最高不超過 2 kg/cm^2 ，故設計一套簡易操作之澆灌系統。該澆灌系統主要由三部分構成：加壓澆灌儲液容器、澆灌管線、澆灌管線輔助壓克力基座，以下針對澆灌系統各部分做詳細描述：

1. 加壓澆灌儲液容器:

因本試驗之澆灌壓力介於 $0.5 \text{ kg/cm}^2 \sim 2.0 \text{ kg/cm}^2$ ，為得較精確之壓力讀數，於空壓機與加壓澆灌儲液容器之間外加一壓力錶頭（最大壓力為 8.0 kg/cm^2 ），以利於每階段加壓時可以精準地由 0.5 kg/cm^2 開始慢慢微幅增加。本加壓容器搭配一補液用漏斗形容器，如圖3.58所示，欲進行 MICP 改良液補充時，將右側旋鈕逆時針轉鬆，即可進行補漿作業。反之，欲進行

澆灌加壓動作時，將左側旋鈕順時鐘轉緊，開啟空壓機設備之進氣閥，即可進行澆灌作業，其中改良液補充/澆灌調整閥，如圖3.59所示。



Figure 3.58: 補充 MICP 改良液之漏斗形容器



Figure 3.59: 改良液補充/澆灌調整閥

2. 澆灌管線:

本試驗使用之澆灌管線為內徑 10 mm 之透明塑膠管線，因試驗規劃澆灌階段分四區域進行噴漿，澆灌高度為試坑地表向下 33 cm 與 66 cm 處，出漿口位置距離試坑左右邊界各 55 cm 處，故需要四條獨立之澆灌管線分別進行澆灌作業，且出漿口採用 180° 雙向噴漿，故於出漿側之澆灌管線接上內徑 10 mm 之黃銅三通閥，如圖3.60所示。

3. 澆灌管線輔助壓克力基座:

為使澆灌過程不因壓力導致管線位移，故設計兩組澆灌管線輔助壓克力基

座，除維持管線位置，也兼具噴漿口定位功能。壓克力板總高 120.5 cm 、長 4 cm 、厚 1.5 cm 及底部 $8\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ 之長方形底板。該壓克力基座在板中間設計直徑 1.4 cm 、內推 0.3 cm 之雙面弧形管線導溝，且於垂直方向每 5 cm 處鑽一直徑 11 mm 之小孔，以供束線帶通過，將前後兩管線以束線帶綁緊。此外，由板頂部向下 50 cm 、 83 cm 處均挖 $4\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ 之長方形凹槽，供黃銅三通閥鑲嵌於壓克力板上不易浮動，該設計之成品，如圖3.61所示。



Figure 3.60: 可進行雙向澆灌之黃銅三通閥

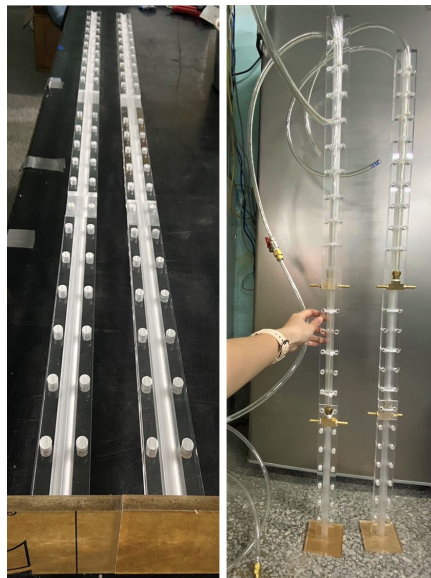
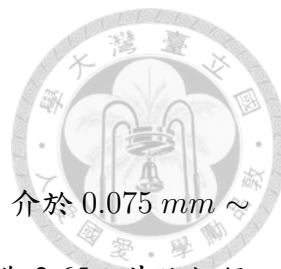


Figure 3.61: 澆灌管線輔助壓克力基座之成品



3.4.6.4 回填土物性試驗

本試驗使用之回填土為越南砂，該粒徑分布如圖3.62所示，介於 $0.075\text{ mm} \sim 0.425\text{ mm}$ 。其均勻係數 C_u 為 1.53；曲率係數 C_c 為 0.02；比重為 2.65。其他粒徑參數： $D_{10} = 0.131\text{ mm}$ ； $D_{30} = 0.169\text{ mm}$ ； $D_{50} = 0.194\text{ mm}$ ； $D_{60} = 0.20\text{ mm}$ 。最大及最小土壤乾密度分別為 1.670 g/cm^3 及 1.349 g/cm^3 。根據統一土壤分類法，該越南砂被分類為不良級配。(UCUS；ASTM2006)

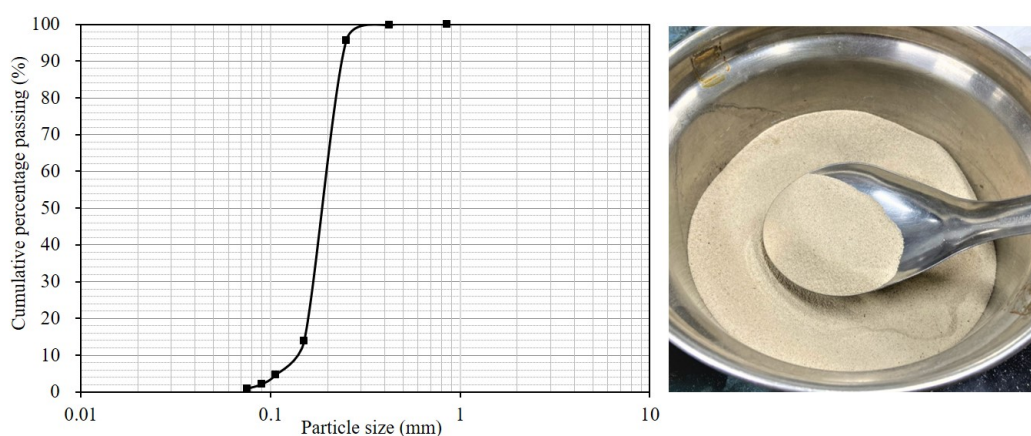


Figure 3.62: 回填土用之越南砂粒徑分布

3.4.6.5 MICP 改良液配製

本試驗所使用之 MICP 改良液總量約為 100 L ，所需菌液量約 15 L ，因總量龐大，故各階段菌液與最終 MICP 改良液配製手法稍作修改，其配製流程如下：

1. 第一階段配製：菌液 S_1

在無菌操作台中，將 1 mL 在 -80°C 冷凍保存之 *Bacillus pasteurii* 凍菌以微量吸管加入 55 mL 含尿素之液態培養基，置於水平震盪機上以 100 RPM 之轉速在室溫下進行 24 小時之培養，待菌液 S_1 顏色由清澈轉混濁後進行 OD_{600} 及 pH 值量測。 S_1 量測之 $OD_{600} = 1.309$ 、 $pH = 9.55$ 。

2. 第二階段配製：菌液 $S_{1\text{MAX}}$

此步驟為第一階段菌液 $S1$ 之等比例放大版，用以配製足量後續步驟之菌液。在無菌操作台中，將 7 mL 之 $S1$ 與已滅菌之攪拌子加入 350 mL 含尿素之液態培養基，置於磁石攪拌機上以 360 RPM 之轉速在室溫下進行 24 小時之培養，待菌液 $S1_{MAX}$ 顏色由清澈轉混濁後進行 OD_{600} 及 pH 值量測。 $S1_{MAX}$ 量測之 $OD_{600} = 0.879$ 、 $pH = 9.59$ 。

3. 第三階段配製: 菌液 $S2$

在無菌操作台中，將 350 mL 之 $S1_{MAX}$ 與已滅菌之攪拌子加入 3500 mL 不含尿素之液態培養基，置於磁石攪拌機上以 360 RPM 之轉速在室溫下進行 24 小時之培養，如圖3.63所示，待菌液 $S2$ 顏色由清澈轉混濁後進行 OD_{600} 及 pH 值量測。 $S2$ 量測之 $OD_{600} = 0.376$ 、 $pH = 9.29$ 。

4. 第四階段配製: 濃縮液態培養基

本試驗共需要 85 L 不含尿素之液態培養基，因體積龐大，故先於實驗室內配製已滅菌之不含尿素之濃縮液態培養基，再帶至現地補足所需之溶劑量(水量) 20.3 L 進行培養基配製。其中已滅菌之濃縮不含尿素液態培養基共分成四瓶進行預配製，如圖3.64所示，每瓶皆添加 63.45 g Yeast Extract、 105.75 g Peptone 及 850 mL 之去離子水。

5. 第五階段配製: 改良液基底

本試驗需 100 L 之 MICP 改良液，分成四個大水桶進行改良液拌合，每水桶均配製 25 L 之改良液。於每水桶依序加入 20.3 L 之溶劑水、 0.751 kg 尿素、 1.389 kg 氯化鈣拌合均勻。

6. 第六階段配製: MICP 改良液

為確保菌液之 pH 值足夠低以抑制鈣離子與碳酸根離子不會過快結合於澆灌表面，將 15% 體積濃度之菌液 $S2$ 與 MICP 改良液基底混和，即每水桶依

序將 850 mL 不含尿素之濃縮液態培養基、3850 mL 之 S2 加入第五階段之改良液基底中，徒手搖動使菌液與培養基均勻混和，因已添加氯化鈣與尿素，故即完成最終之 MICP 改良液配製。每水桶所需之 MICP 改良液材料，如圖3.65所示。



Figure 3.63: 以磁石攪拌機培養菌液 (轉速 360 RPM，進行 24 小時)



Figure 3.64: 濃縮液態培養基



Figure 3.65: 每水桶所需之 MICP 改良液材料

3.4.6.6 側向加壓滲透之現地試驗流程

1. 怪手開挖試坑，試坑尺寸為頂長 175 cm 、頂寬 60 cm ；底長 160 cm 、底寬 40 cm ；高 100 cm 之雙梯形試坑，總體積約 836550 cm^3 ，如圖3.66所示。
2. 將兩條耐壓塑膠澆灌管線分別放置於澆灌管線輔助壓克力基座之凹槽正反面，正反兩面之噴漿口設計位置不同，正面位於地表下 66 cm ，反面則是位於地表下 33 cm ，因此將長管 (150 cm) 置於正面凹槽，短管 (100 cm) 至於反面凹槽，以束線帶將正反面之管線進行束制，即完成一組現地澆灌佈線安裝，共需兩組，如圖3.61所示。
3. 填砂前分別將兩澆灌管線輔助壓克力基座置於 X 座標 $X_1 = 63\text{ cm}$ 、 $X_2 = 123\text{ cm}$ 處 (由右側算起)，其中兩基座之間距離為 60 cm ，如圖3.67所示。
4. 開始回填實驗砂，因試坑並非相當精準之長方體坑，故本試坑較難控制精確之相對密度，以大約目標相對密度 40% 進行砂土回填，每填入 10 cm 進行一次高度量測。

5. 填至深度 60 cm 處，將 4 個取樣器 A 分別置於 X 座標 $X_3 = 48\text{ cm}$ 、 $X_4 = 78\text{ cm}$ 、 $X_5 = 108\text{ cm}$ 、 $X_6 = 138\text{ cm}$ 處 (由右側算起)，如圖 3.68 所示。
6. 直到填土完畢後，裁切適當大小之木板作為承壓板，取試坑附近之現地土每 25 kg 裝袋，放置於承壓板上作為上部負載，共 1000 kg，如圖 3.69 所示。
7. 將已配製完畢之 MICP 改良液，分次倒入加壓澆灌儲液容器中，每次裝約 5 L，如圖 3.70 所示。
8. 將發電機及空壓機就緒，加壓澆灌儲液容器兩端分別接上空壓機及澆灌管線。
9. 開始進行加壓澆灌。分成四個範圍進行澆灌，分別是 $X_1 = 63\text{ cm}$ 處之深度 33 cm 及深度 66 cm、 $X_2 = 123\text{ cm}$ 處之深度 33 cm 及深度 66 cm，每個範圍均澆灌 25 L，澆灌壓力以 50 kPa 開始緩緩增加，因現地不可控因素較多，擔心加壓過大會造成上部負載不足發生砂湧現象，故本試驗加壓最多不超過 200 kPa。側向加壓滲透之現地試驗配置，如圖 3.72 及圖 3.73 所示。
10. 待四範圍皆澆灌完畢，即可放置進行七日養護。
11. 七日養護完畢後，進行改良試體開挖及取樣，如圖 3.71 所示，本試驗之改良試體後續將進行靜態三軸壓密排水剪切試驗及酸洗試驗。



Figure 3.66: 怪手開挖試坑



Figure 3.67: 放置澆灌管線輔助壓克力基座



Figure 3.68: 放置取樣器 A

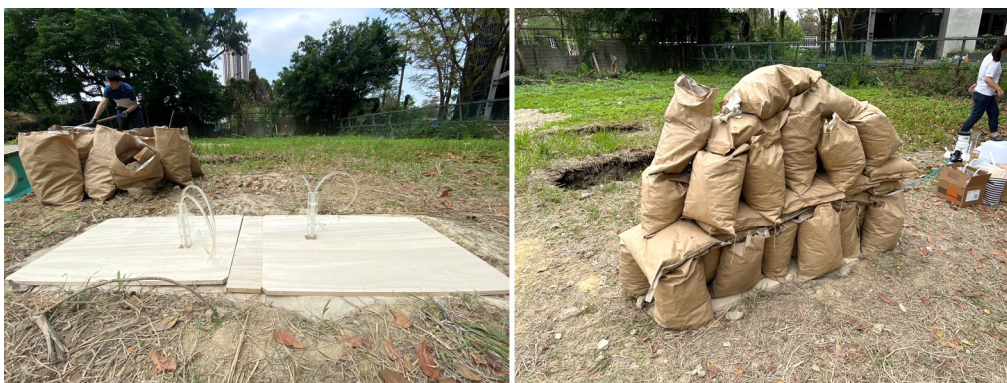


Figure 3.69: 承壓板及上部負載



Figure 3.70: 裝取 MICP 改良液



Figure 3.71: 改良試體開挖及取樣



1. 手拉式發電機
2. 空氣壓縮機
3. 澆灌塑膠管線
4. 澆灌儲液容器
5. 補液漏斗容器
6. MICP改良液桶
7. 上部砂石負載

Figure 3.72: 側向加壓滲透之現地試驗配置圖

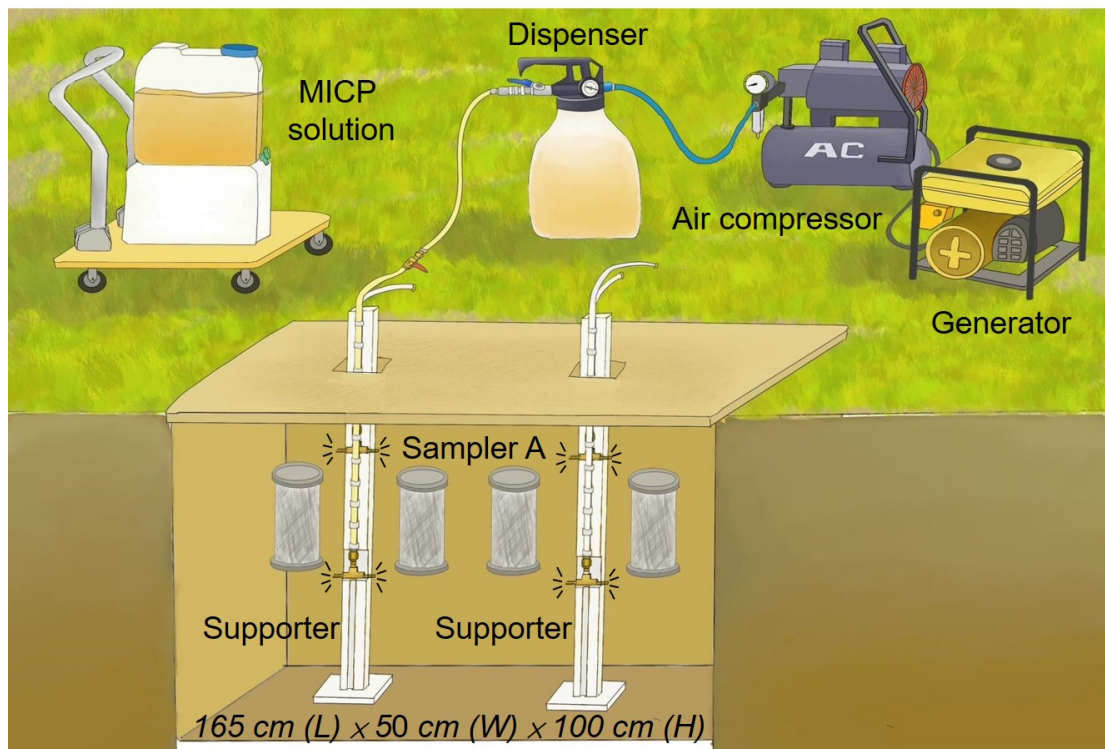


Figure 3.73: 側向加壓滲透之現地試驗示意圖





第四章 結果與討論

4.1 壓力鍋試驗

壓力鍋試驗常用於求取土壤之土水特徵曲線 (Soil Water Characteristic Curve , 簡稱 SWCC), 該試驗將試體置於封閉之壓力鍋當中, 以施加壓力方式來模擬土壤中之毛細吸力。試體由飽和狀態開始慢慢加壓迫使試體排水, 於此過程中, 藉由量測試體之排水量及加壓大小, 可以繪製出該土壤試體之 SWCC。其中 SWCC 代表試體之飽和度與毛細吸力之間之關係, 可以了解該土壤試體之基質吸力、保水能力等工程性質。

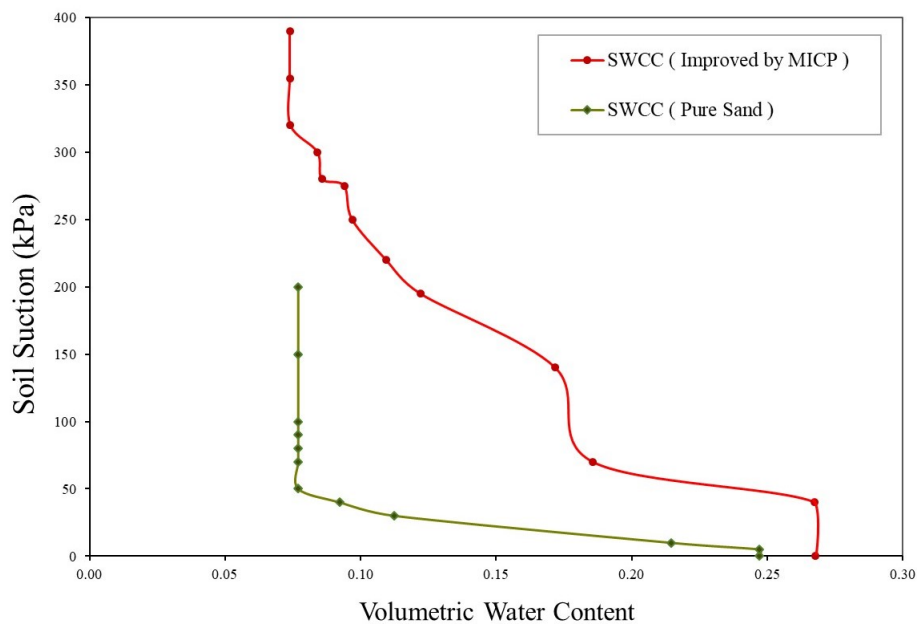


Figure 4.1: 純砂與改良試體之 SWCC (體積含水量 vs 試體基質吸力)

由圖4.1之結果顯示，經過 MICP 改良後之石英砂試體，其 SWCC 曲線明顯比純砂試體往上偏移，表示 MICP 改良後之試體因顆粒間產生膠結，需要更大壓力才得以將試體內部水分排出。顯示其基質吸力、保水性能皆增加；隨著保水能力之提升，其排水性隨之降低，使改良後之工程特性對於液化潛勢高之土層有相當程度之助益。

4.2 表面滲透之小型砂箱試驗

本試驗主要探討以側向通透之取樣器，浸潤於 MICP 改良液中之試體改良成效，是否比紙模試體更具均勻性及更高之剪力強度，故設計與紙模尺寸相近之取樣器 A，置於小型壓克力砂箱中，進行 MICP 改良試體之配製與養護。由酸洗結果顯示，與紙模試體比較，本試驗之設計可以提高 MICP 改良試體之均勻性。由靜態三軸壓密排水剪切試驗結果顯示，與純砂試體比較，本試驗可以同時提高試體凝聚力 C 及摩擦角 ϕ ；而與紙模試體比較，則是提高試體摩擦角 ϕ 。

4.2.1 酸洗試驗結果

圖4.2至圖4.6為五組小砂箱酸洗試驗結果，本試驗分上 (T) 中 (M) 下 (B) 三層取樣，每層再隨機取三份 10 g 之試體，以 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ ； $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ ； $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 表示。由結果可以發現，每層隨機取樣之試體，其碳酸鈣含量相當均勻。而由圖4.7顯示，前三組小砂箱試體之平均碳酸鈣含量高於紙模試體，後兩組略低於紙模試體，因微生物生長特性對於環境變化相當敏感，故每批改良液產生之碳酸鈣含量會略有起伏，但對於試體均勻性之影響不顯著。

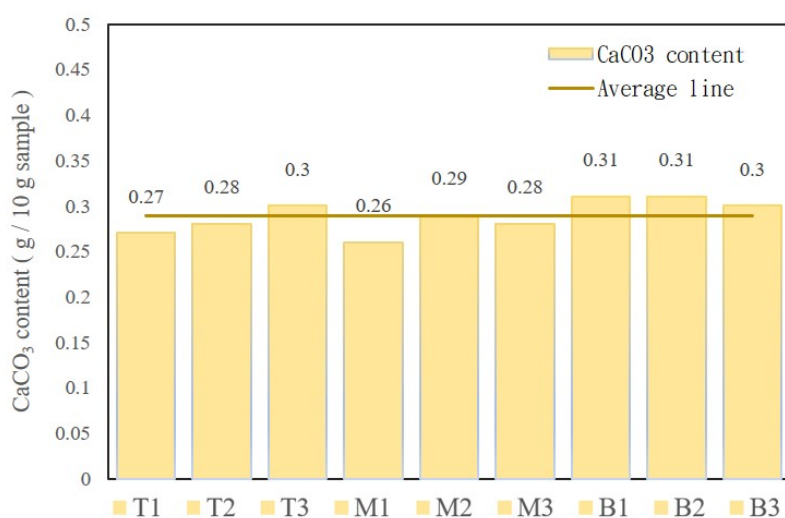


Figure 4.2: 第一組酸洗結果

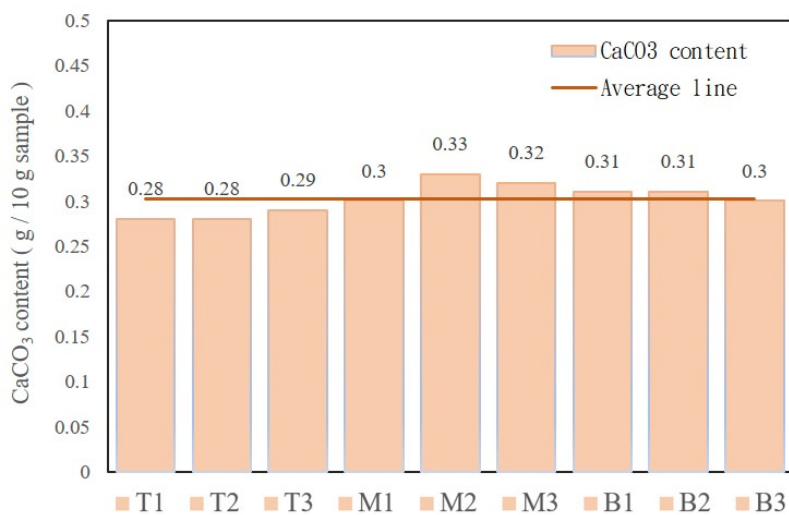


Figure 4.3: 第二組酸洗結果

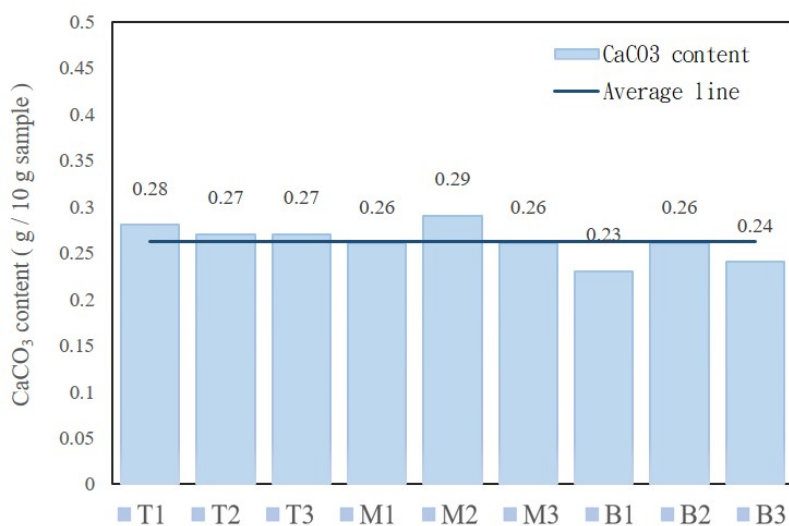


Figure 4.4: 第三組酸洗結果

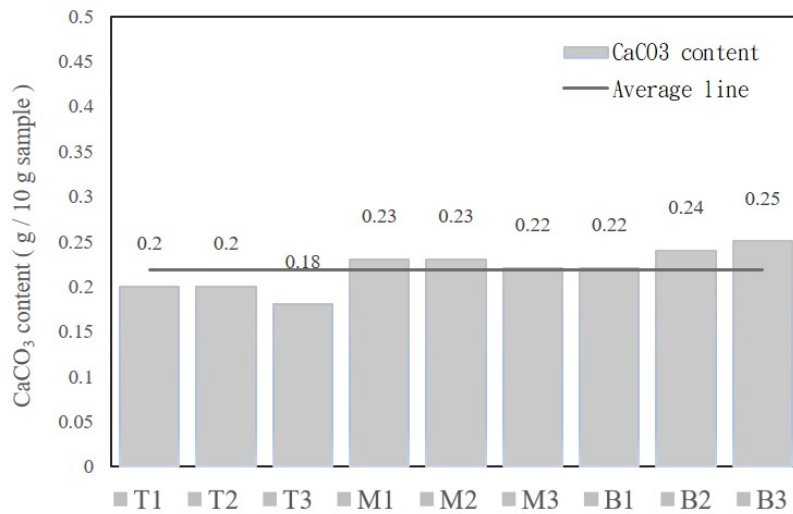


Figure 4.5: 第四組酸洗結果

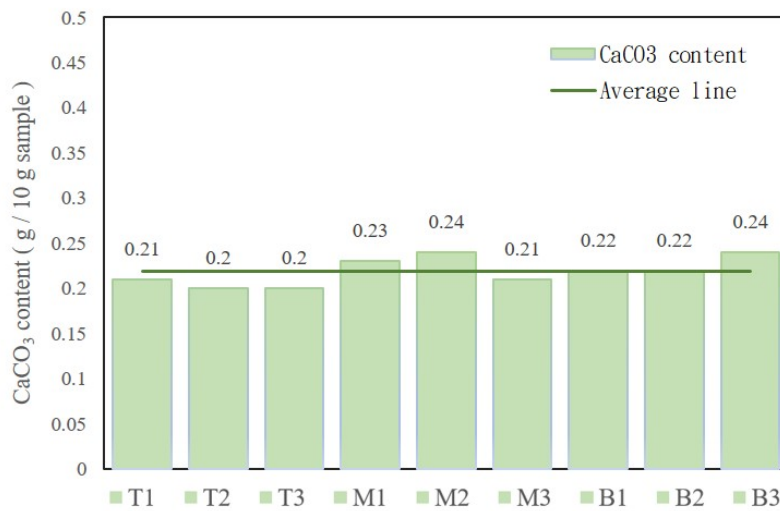


Figure 4.6: 第五組酸洗結果

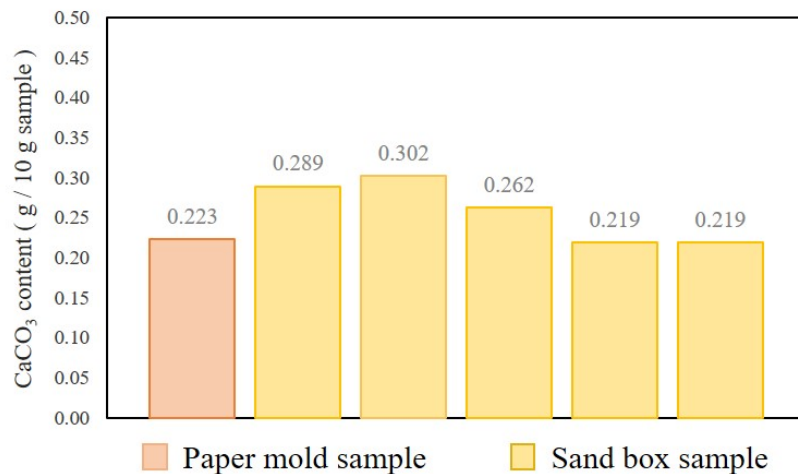


Figure 4.7: 紙模試體與五組小砂箱試體之酸洗結果比較



4.2.2 靜態三軸壓密排水剪切試驗結果與比較

本試驗將小砂箱內之取樣器改良試體，與 (Wong, 2022) 之紙筒模具改良試體以及純砂試體進行比較，分別討論在圍壓為 50 kPa 、 100 kPa 、 200 kPa 下之應力應變曲線、體積應變曲線以及莫爾圓。由圖4.8、圖4.9及圖4.10之結果顯示，試體強度在圍壓為 50 kPa 、 100 kPa 、 200 kPa 時，砂箱試體均具有最大之軸差應力；試體強度在圍壓為 100 kPa 、 200 kPa 時，砂箱試體具有最大之殘餘應力。而由莫爾圓之結果顯示，純砂試體之摩擦角 $\phi = 39.40^\circ$ ；紙模試體之凝聚力 $C = 11.83\text{ kPa}$ ，摩擦角 $\phi = 37.59^\circ$ ；小砂箱試體之凝聚力 $C = 9.48\text{ kPa}$ ，摩擦角 $\phi = 39.69^\circ$ ，與純砂試體相比，小砂箱試體之凝聚力 C 及摩擦角 ϕ 均提高，整理如表4.1及表4.2。

Table 4.1: 不同試體類型之應力應變比較

試體類型	圍壓 (kPa)	軸差應力 (kPa)	軸向應變 (%)
純砂試體	50	193.60	3.69
	100	353.48	4.81
	200	692.04	4.32
紙模試體	50	201.16	6.06
	100	364.13	4.80
	200	671.26	5.89
砂箱試體	50	211.83	4.14
	100	408.20	3.61
	200	750.17	4.69

Table 4.2: 不同試體類型之土壤強度參數比較

試體類型	圍壓 (kPa)	最大主應力 (kPa)	強度參數	
			$c\text{ (kPa)}$	$\phi(^{\circ})$
純砂試體	50	243.62	0	39.40
	100	453.48		
	200	892.04		
紙模試體	50	251.16	11.83	37.59
	100	464.13		
	200	871.26		
砂箱試體	50	261.83	9.48	39.69
	100	508.20		
	200	950.17		

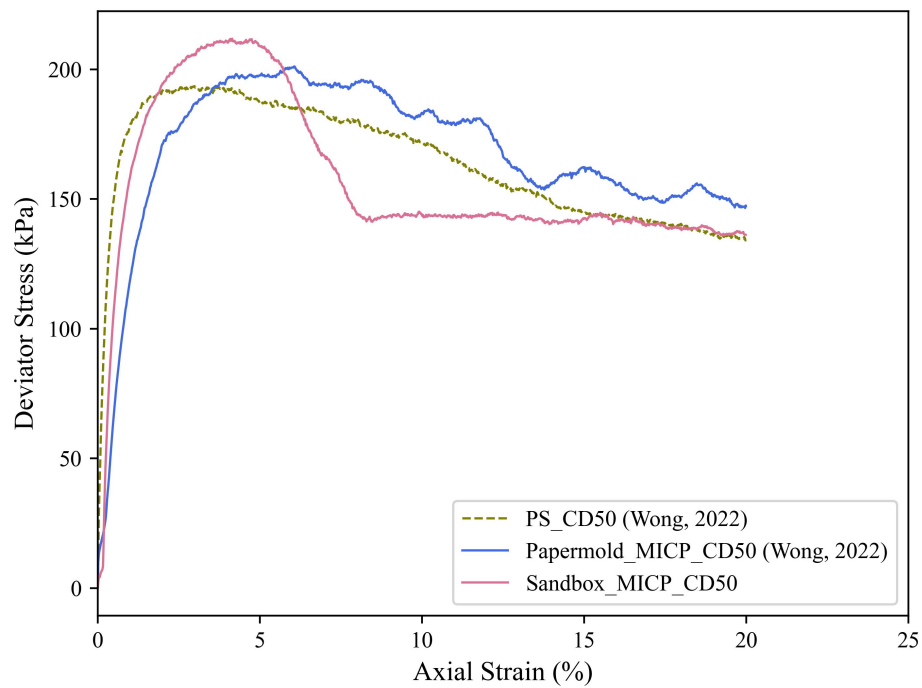


Figure 4.8: 紙模試體與小砂箱試體在圍壓 50 kPa 之應力應變曲線比較
(0.5 M 氯化鈣，養護七日)

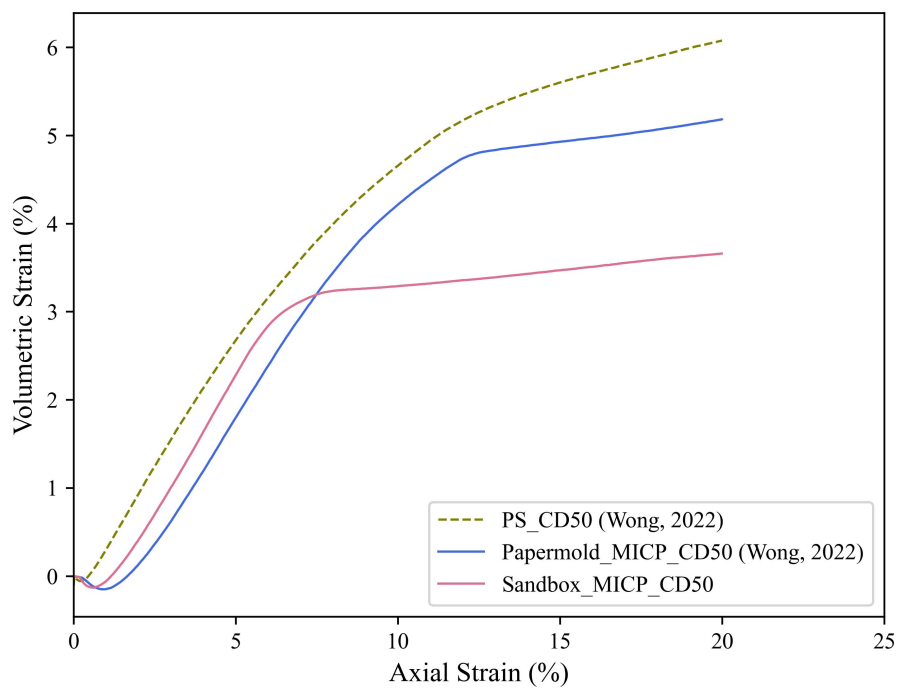


Figure 4.9: 紙模試體與小砂箱試體在圍壓 50 kPa 之體積應變曲線比較
(0.5 M 氯化鈣，養護七日)

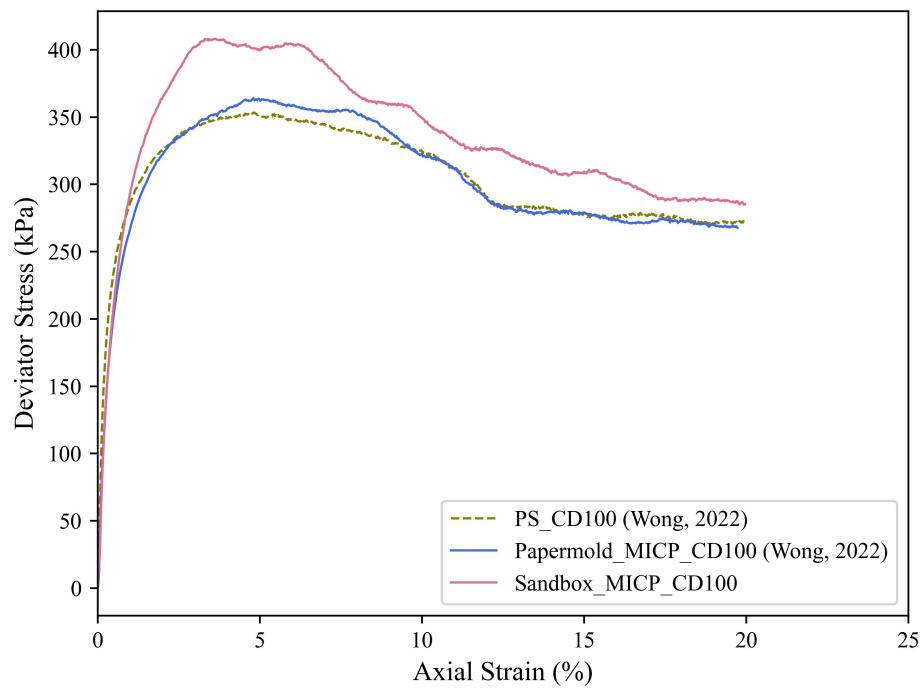


Figure 4.10: 紙模試體與小砂箱試體在圍壓 100 kPa 之應力應變曲線比較
(0.5 M 氯化鈣，養護七日)

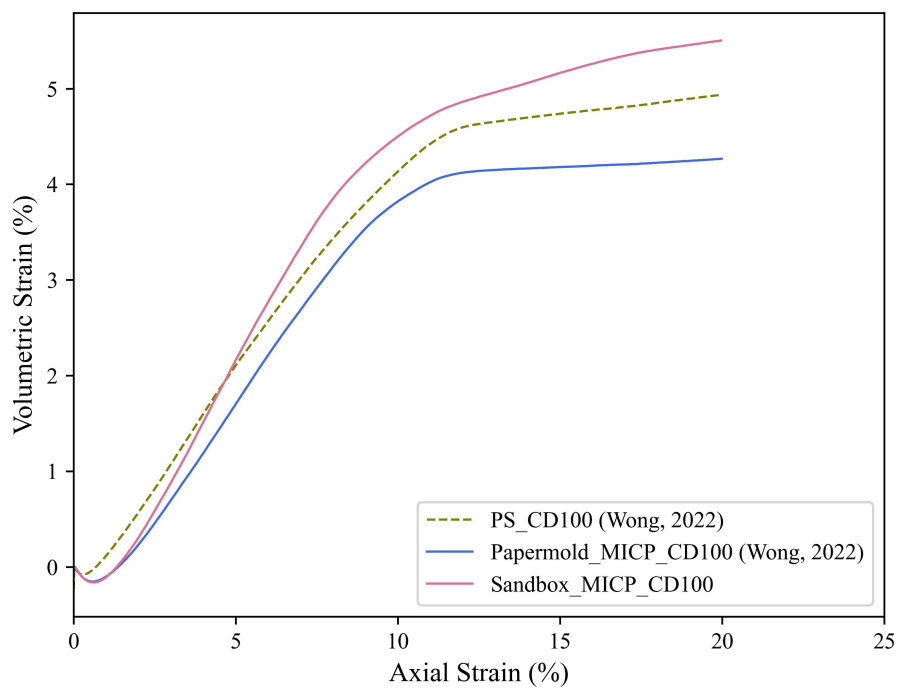


Figure 4.11: 紙模試體與小砂箱試體在圍壓 100 kPa 之體積應變曲線比較
(0.5 M 氯化鈣，養護七日)

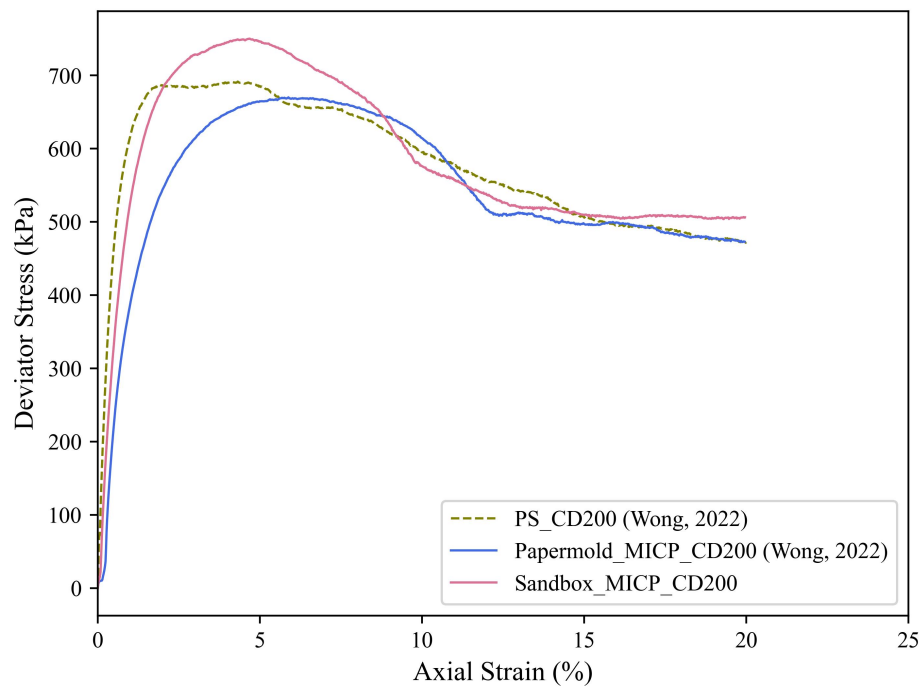


Figure 4.12: 紙模試體與小砂箱試體在圍壓 200 kPa 之應力應變曲線比較
(0.5 M 氯化鈣，養護七日)

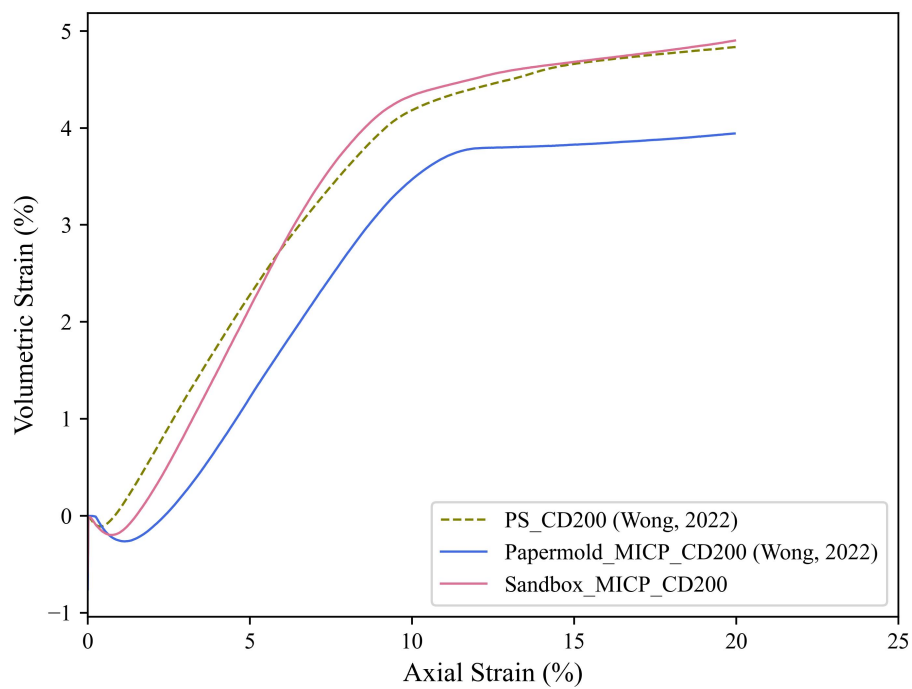


Figure 4.13: 紙模試體與小砂箱試體在圍壓 200 kPa 之體積應變曲線比較
(0.5 M 氯化鈣，養護七日)

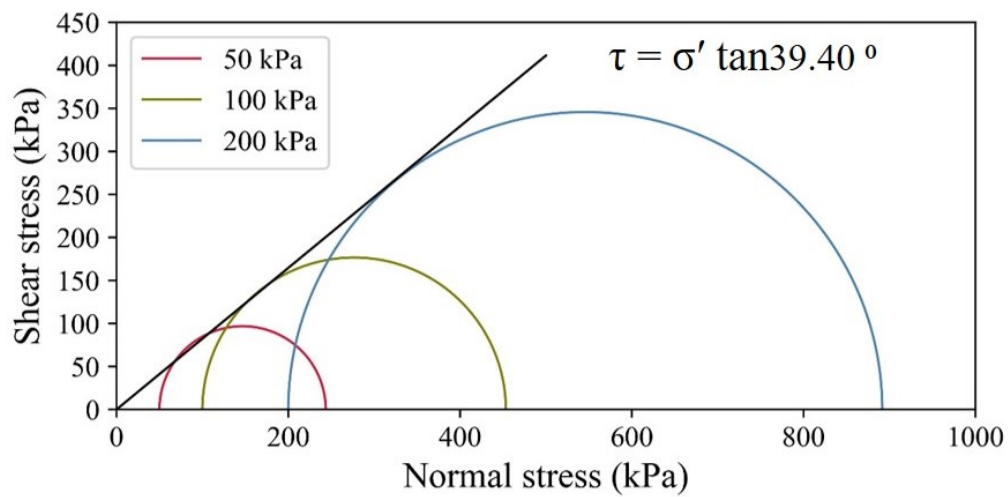


Figure 4.14: 純砂試體在不同圍壓下之莫爾圓 (Wong, 2022)

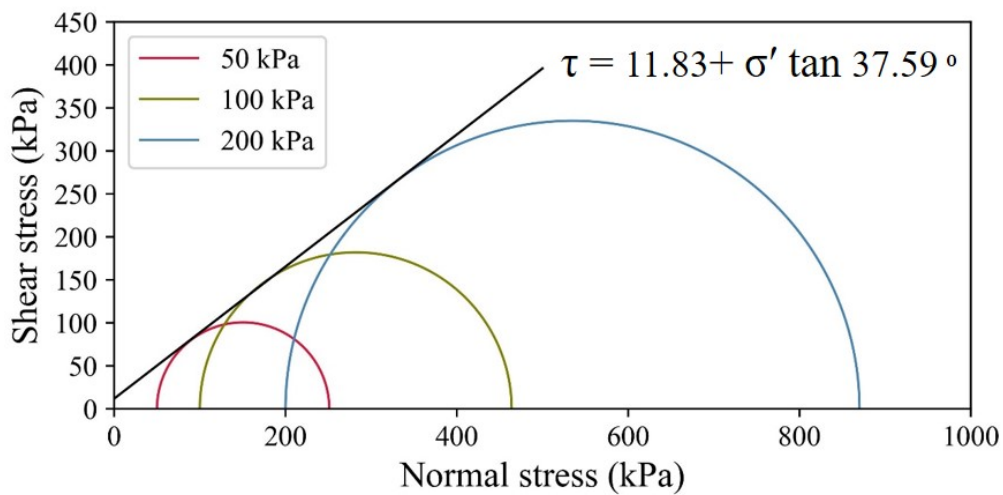


Figure 4.15: 紙模試體在不同圍壓下之莫爾圓 (Wong, 2022)
(0.5 M 氯化鈣，養護七日)

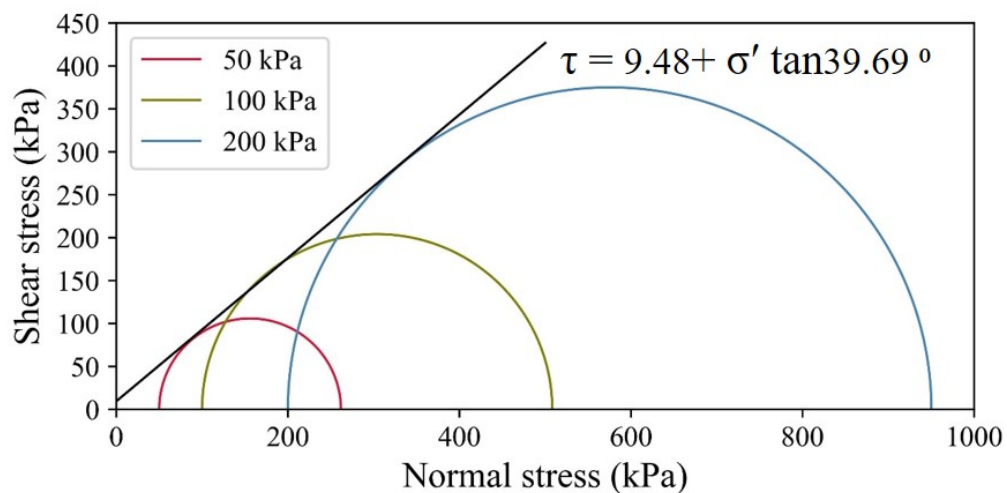


Figure 4.16: 小砂箱試體在不同圍壓下之莫爾圓
(0.5 M 氯化鈣，養護七日)



4.3 側向加壓滲透之中型砂箱試驗

本試驗為探討 MICP 改良液於乾石英砂中之側向滲透情形，以分段加壓方式將 MICP 改良液注入，並於上部添加能有效密合之砂載重，以避免產生砂湧現象導致滲透行為不易解釋。開始進行 MICP 改良液之注入前，先以染色液進行測試，觀察數次滲透行為，待其具一致之趨勢後，即以 MICP 改良液進行加壓滲透。其中本砂箱試驗之總乾砂在達 100% 飽和度所需溶液量約為 20 L，為了明顯觀察改良液滲透趨勢分布，共配製 1/2 總溶液量進行澆灌，即 10 L 之 MICP 改良液。待七日養護畢，進行開挖取樣分析。

4.3.1 噴液有效範圍分布

本試驗於 MICP 改良前，如 3.4.5.2 章所述，進行了 9 L 染色水之分段加壓測試，可以事先觀察到加壓後其染色液之滲透分布，如圖 4.17 所示。其中，本試驗使用之 MICP 改良液，其黏滯性大約與水相同，故不考慮黏滯性因素。本試驗以不同顏色之水性廣告顏料代表不同壓力大小：紅色代表 200 kPa；黃色代表 300 kPa；藍色代表 400 kPa，由染色液測試可以明顯看出不同加壓條件下，染色液之分布情形，由外觀僅能觀察到首先加壓之紅色染料，其他接續滲透之黃色與藍色染料需於開挖後觀察，如圖 4.18。結果顯示，在完全乾砂之情況下，孔隙吸水能力佳，首先於噴口處朝各方向滲流，直到 9 L 染色液皆添加完畢後，才開始沿著底部水平方向滲流。

內部染色液則是呈現類同心圓方式朝各方向滲透，由內而外分別為藍色 (400 kPa)、黃色 (300 kPa)、紅色 (200 kPa)。由圖 4.19 可以發現，染色液流經取樣器 B 仍可以成功染色不被阻擋，而加壓噴液會產生明顯之滲流孔洞。

由染色液測試可以明顯看出在中型砂箱中，側向加壓滲透路徑之趨勢主要為類同心圓擴散，隨著加壓增加擴散範圍越大，待加壓結束，即以水平滲透方式沿著砂箱底部滲流。而後續之 MICP 改良液滲透路徑，如圖4.20，即可以此染色液測試做為對照。

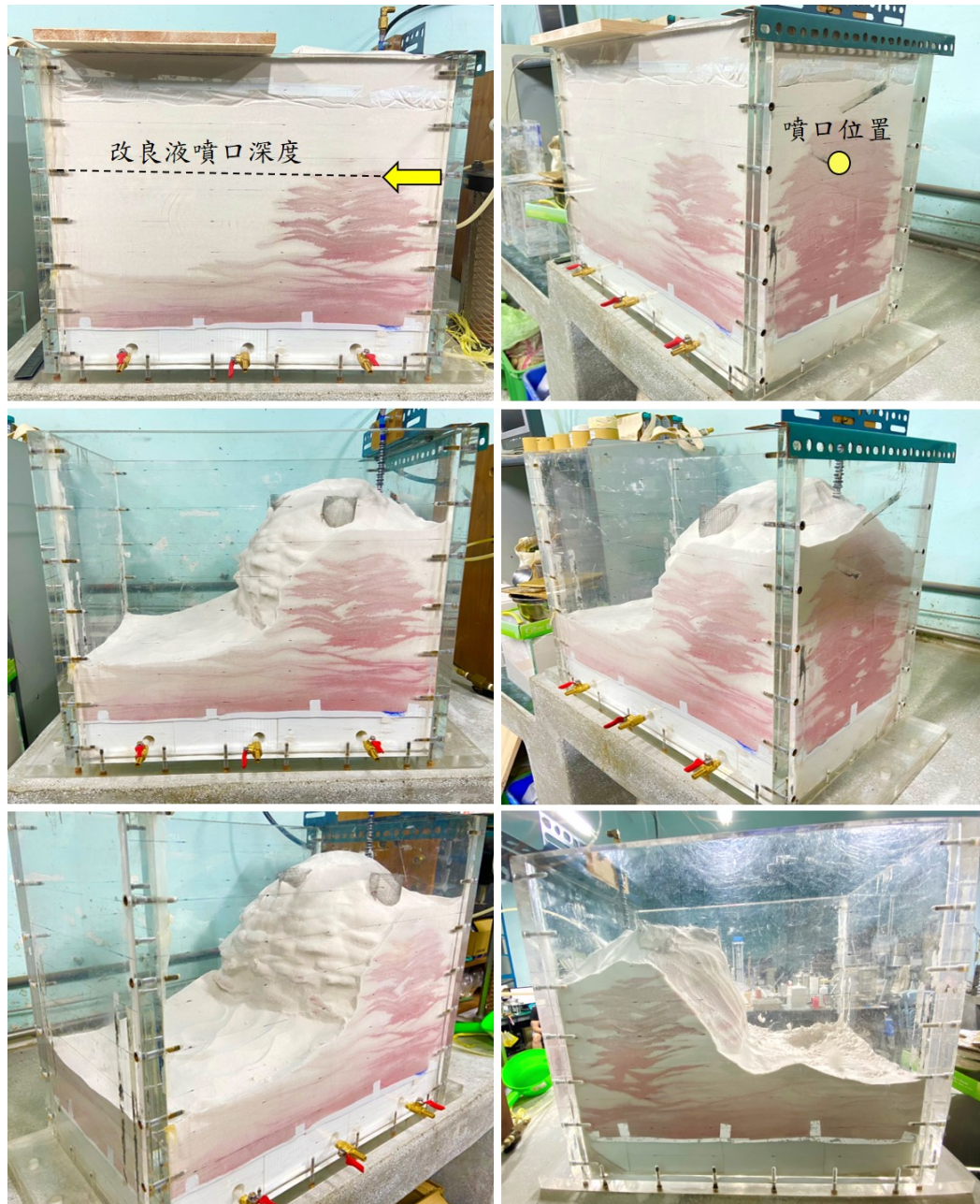


Figure 4.17: 開挖前後不同方向之染色液分布

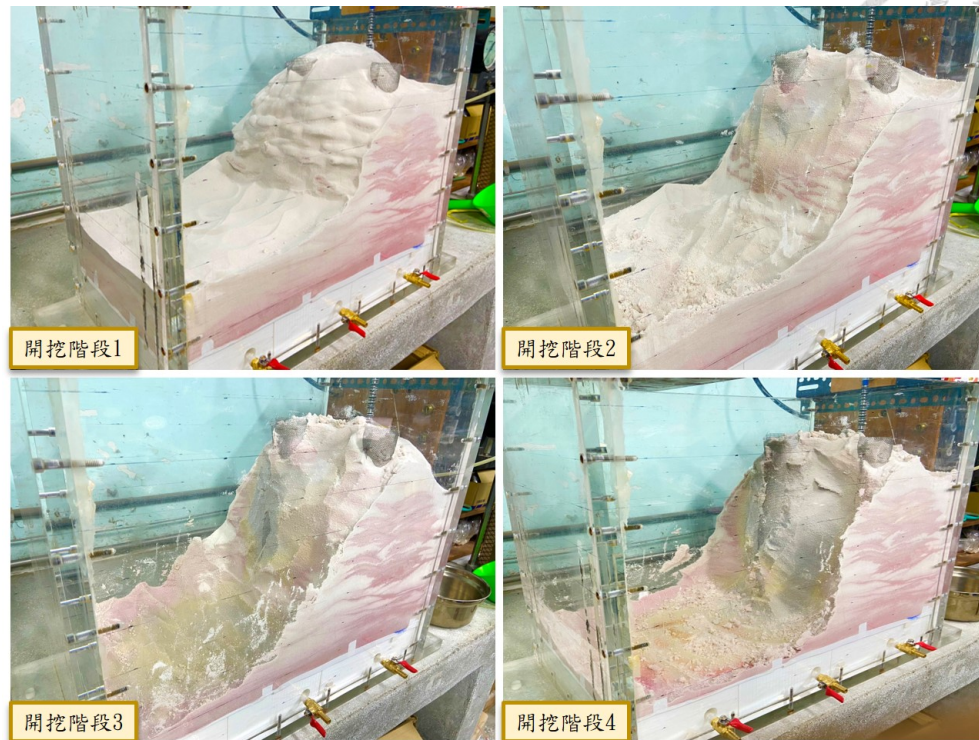


Figure 4.18: 開挖後內部之染色液分布情形



Figure 4.19: 加壓噴液產生滲流孔洞
(A: 噴口處正前方之兩取樣器尚未取出; B: 取出外側之取樣器後; C: 取出內側之取樣器後; D: 滲流孔洞與澆灌噴口放大圖)

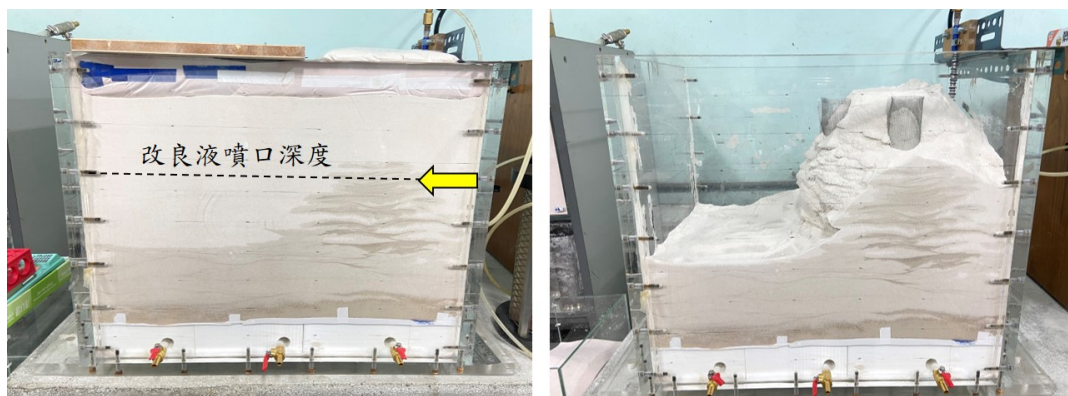


Figure 4.20: 開挖前後之 MICP 改良液分布



4.3.2 含水量分布

由含水量試驗可以觀察 MICP 改良液之滲透情形，但實際之碳酸鈣沉澱量需以酸洗試驗結果為準。本試驗使用之取樣器 B 總長為 35 cm，分成五段，每段 7 cm 進行試體取樣，每段由上而下依序以紅、橙、黃、綠、藍表示之，由含水量分布與碳酸鈣含量分布可以觀察不同位置點之改良成效，含水量試驗結果如圖4.21及圖4.22所示，可以發現含水量與試體深度呈正相關。

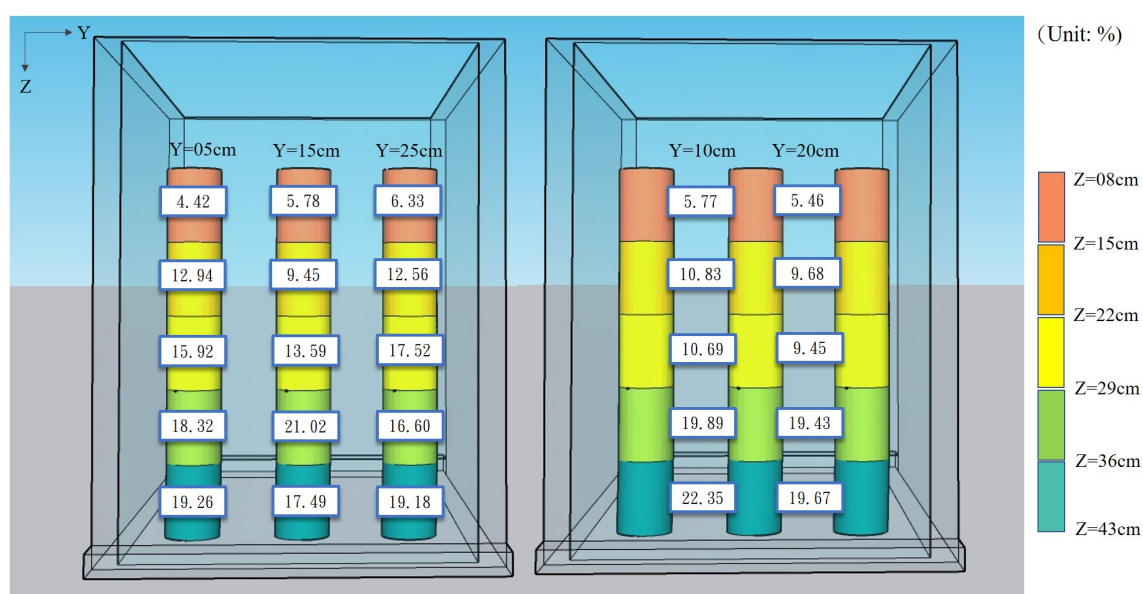


Figure 4.21: 第一排取樣器 B 內外部之含水量分布

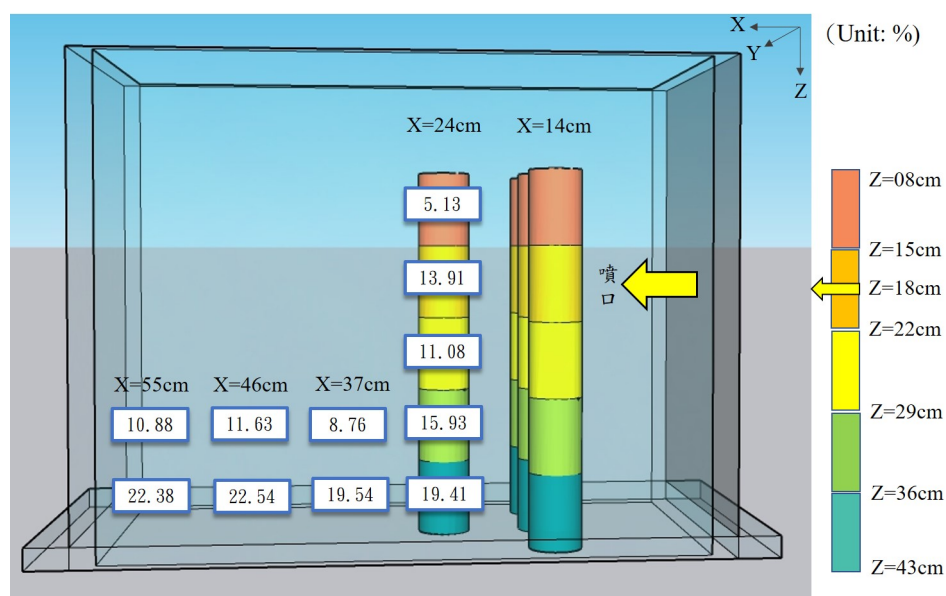


Figure 4.22: 第二排取樣器 B 內部及下層水平延伸處之含水量分布



4.3.3 酸洗試驗結果

為探討於中型砂箱中，側向加壓滲透產生之碳酸鈣分布，本試驗使用之取樣器 B 總長為 35 cm，分成五段，每段 7 cm 進行試體取樣，每段由上而下依序以紅、橙、黃、綠、藍表示之，酸洗試驗結果如圖 4.23 及圖 4.24 所示。結果顯示，第一，碳酸鈣含量不僅與試體深度呈正相關外，於噴口處 ($Z = 18\text{ cm}$) 附近也有明顯增多之現象，噴口位於橘色部分中段，可以明顯發現圖 4.23 之取樣器中間部分 (橘色及黃色區域)，相對於左右兩側其碳酸鈣含量均有暴增情形；第二，在各取樣器下部 (綠色及藍色區域) 之碳酸鈣含量均較上部高，表示當外部加壓結束，滲透路徑受重力影響較為明顯；第三，在第二排取樣器中，中下部分 (黃色、綠色及藍色區域)，每 10 g 試體之碳酸鈣含量均有 0.20 g 以上，與 4.2.1 節之結果相近 (圖 4.7)，表示取樣器 B 對於 MICP 改良液之阻擋效應不高，第二排取樣器內部仍然有相當優異之碳酸鈣生成。

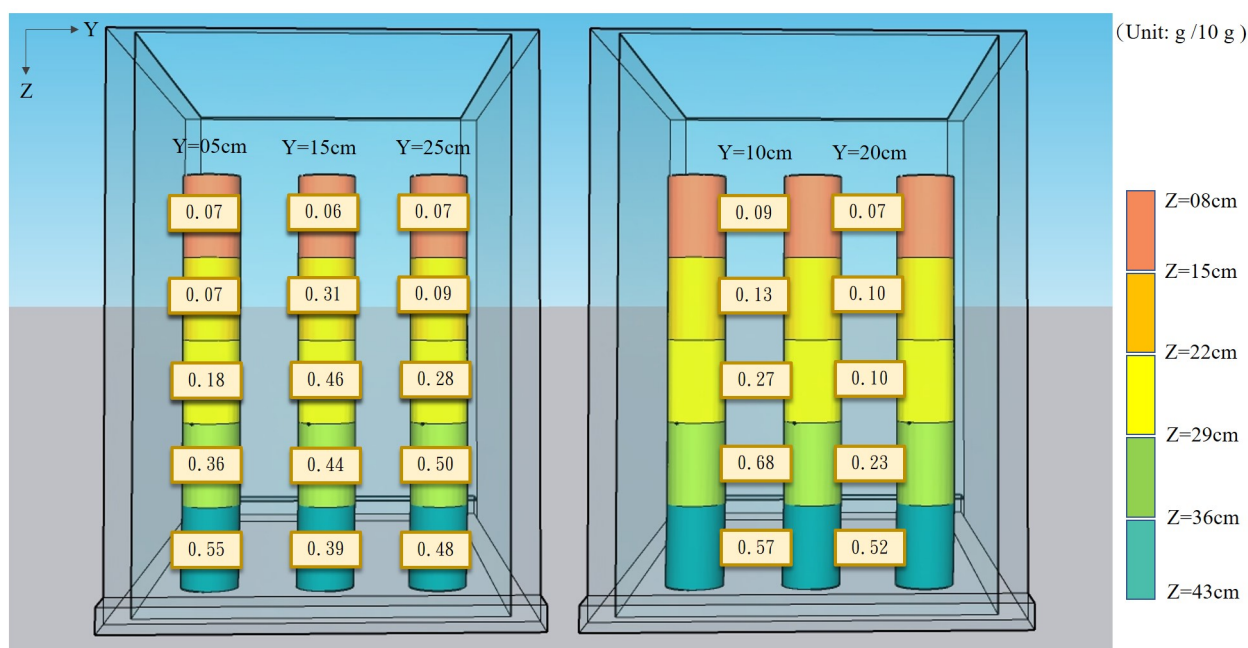


Figure 4.23: 第一排取樣器 B 內外部之碳酸鈣分布

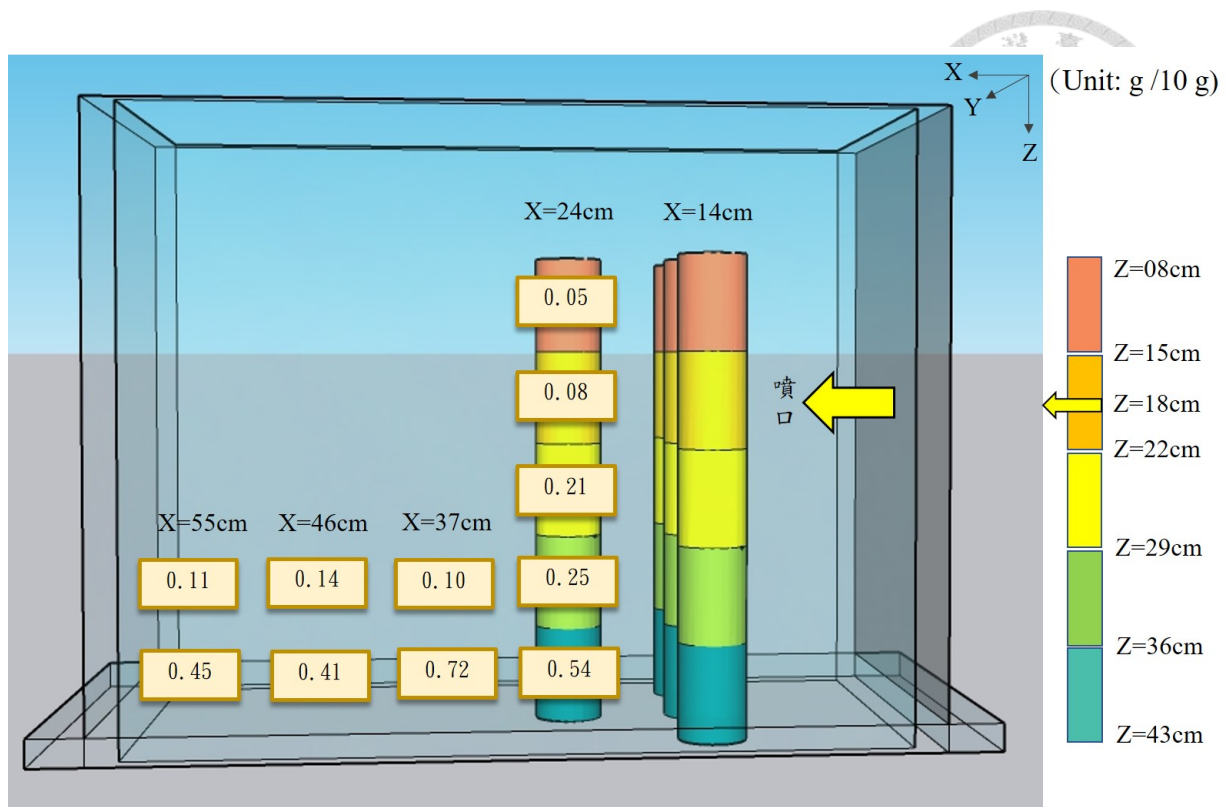


Figure 4.24: 第二排取樣器 B 內部及下層水平延伸處之碳酸鈣含量分布

4.3.3.1 垂直向改良成效

以俯視圖來看，第一排三個取樣器 B 中心置放位置之 (X, Y) 座標分別為 $(14\text{ cm}, 5\text{ cm})$ 、 $(14\text{ cm}, 15\text{ cm})$ 、 $(14\text{ cm}, 25\text{ cm})$ ，而改良液噴口位置之 (X, Y, Z) 座標為 $(6.2\text{ cm}, 15\text{ cm}, 18\text{ cm})$ 。由試驗結果發現，取樣器內外之碳酸鈣含量分布無明顯阻擋趨勢，而是改良液噴口位置及地球重力作用，對碳酸鈣含量之分布才有較顯著之影響，由圖4.25可以發現，以整體趨勢來看，碳酸鈣含量與深度呈正相關，深度越深，平均碳酸鈣含量越多。在深度 $Z=11.5\text{ cm}$ 處也有少許碳酸鈣沉澱，表示初期改良液會向四面八方滲透，接著後期才以向下滲流為主。

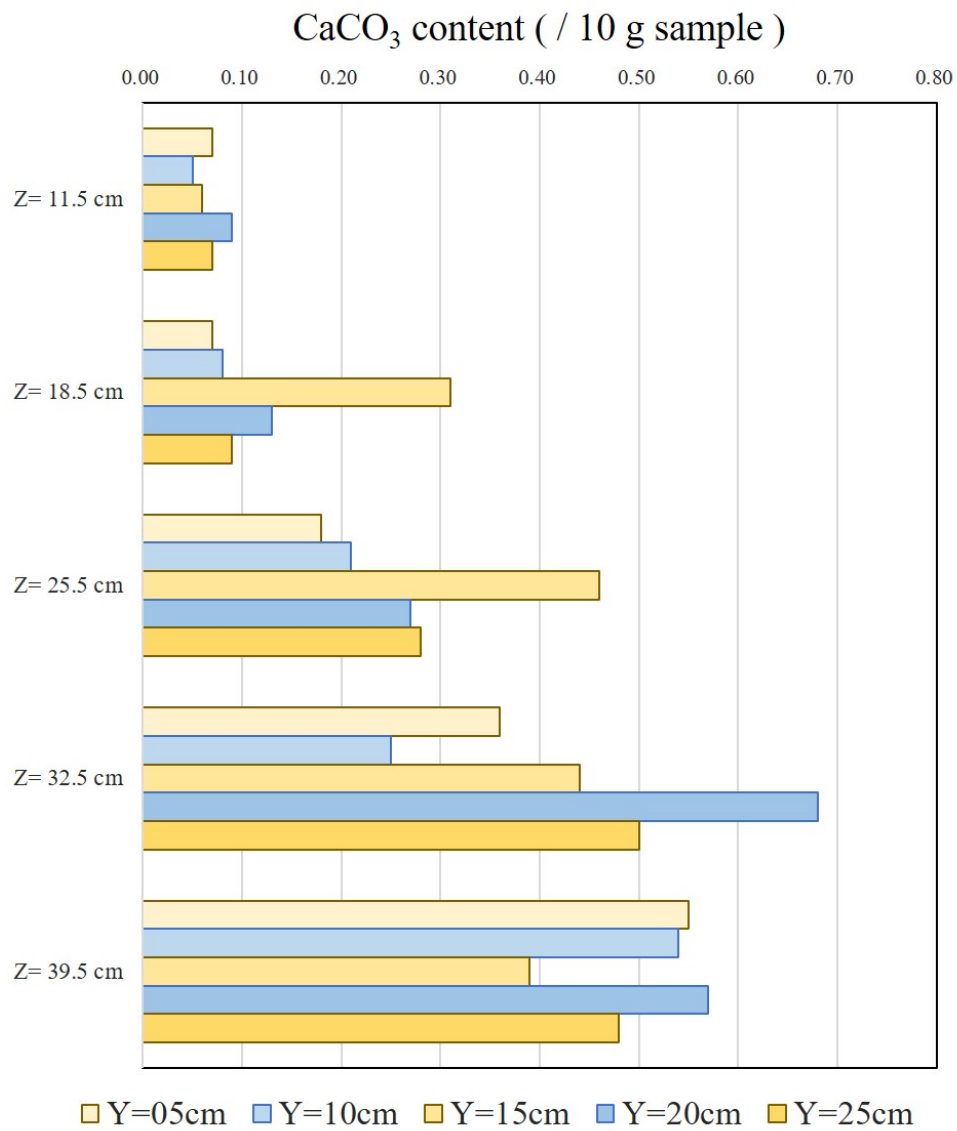


Figure 4.25: 不同 Y 座標位置隨深度變化之碳酸鈣分布



4.3.3.2 水平向改良成效

1. 噴口左右之水平滲透:

為了探討噴口左右之水平滲透情形，取樣固定座標 $X=14\text{ cm}$ 處，依序由座標 $Y=5\text{ cm}$ 、 $Y=10\text{ cm}$ 、 $Y=15\text{ cm}$ 、 $Y=20\text{ cm}$ 、 $Y=25\text{ cm}$ 五處，分別於深度座標 $Z=11.5\text{ cm}$ 、 $Z=18.5\text{ cm}$ 、 $Z=25.5\text{ cm}$ 、 $Z=32.5\text{ cm}$ 、 $Z=39.5\text{ cm}$ 取樣，共取樣 25 點。由圖 4.26 至圖 4.30 可以發現，在深度 $Z=18.5\text{ cm}$ 、 25.5 cm 處，噴口前 (座標 $Y=15\text{ cm}$, $Z=18\text{ cm}$ 處) 之碳酸鈣含量最高；到了深度 $Z=32.5\text{ cm}$ ，以噴口右側碳酸鈣含量較高；最後到了 $Z=39.5\text{ cm}$ 處，隨著改良液漸漸向外擴散，以兩側之碳酸鈣含量較高。

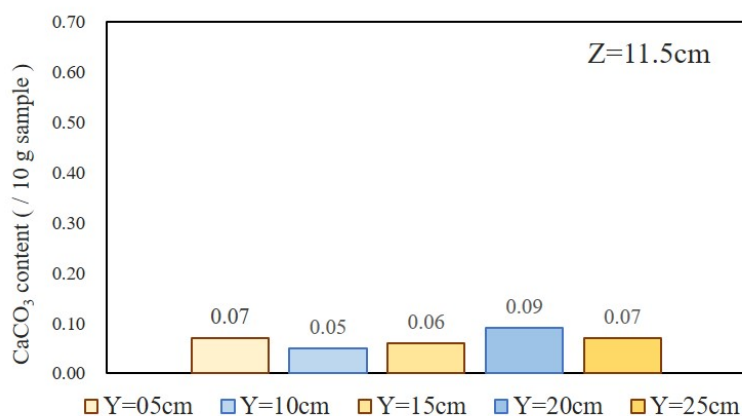


Figure 4.26: 在深度 $Z=11.5\text{ cm}$ 處之碳酸鈣分布

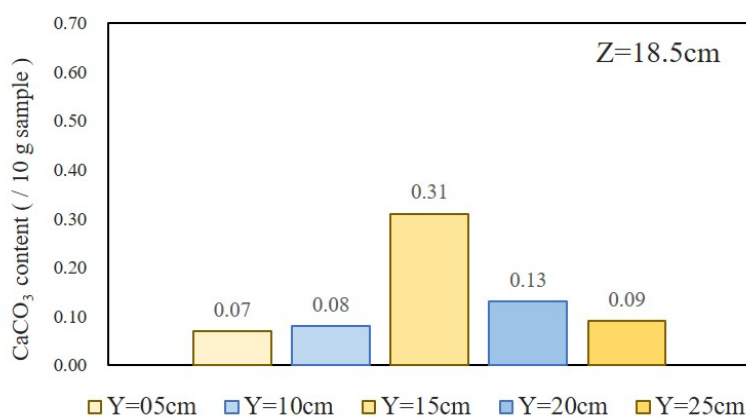


Figure 4.27: 在深度 $Z=18.5\text{ cm}$ 處之碳酸鈣分布

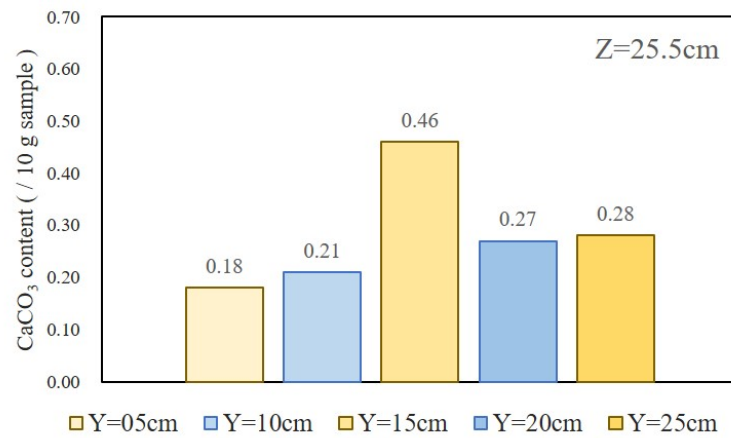


Figure 4.28: 在深度 $Z = 25.5 \text{ cm}$ 處之碳酸鈣分布

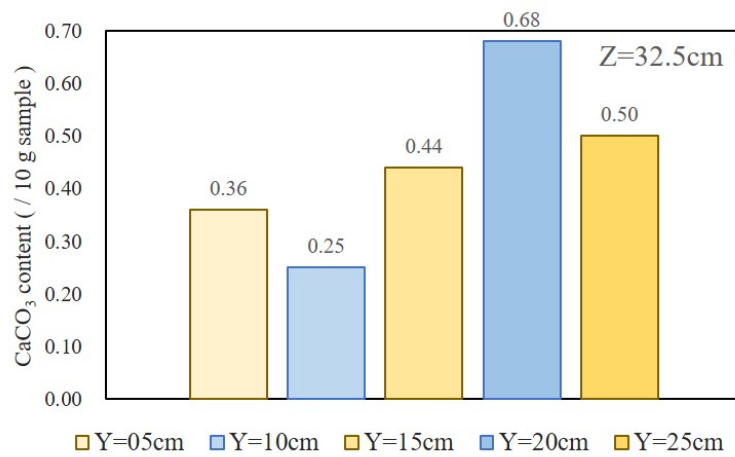


Figure 4.29: 在深度 $Z = 32.5 \text{ cm}$ 處之碳酸鈣分布

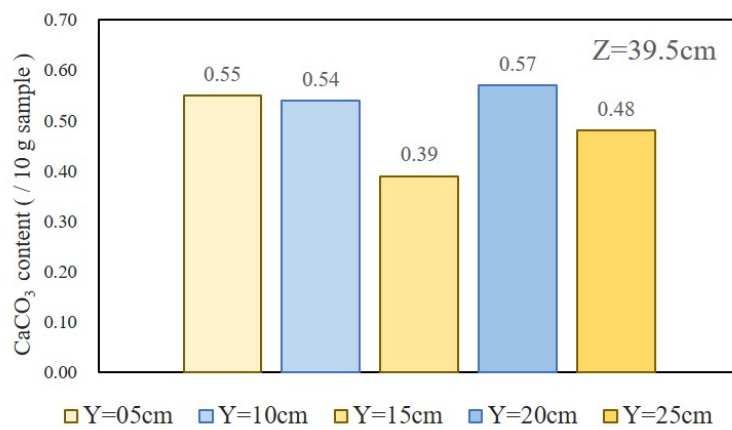


Figure 4.30: 在深度 $Z = 39.5 \text{ cm}$ 處之碳酸鈣分布

2. 噴口前後之水平滲透:

為了探討噴口前後之水平滲透情形，取樣固定座標 $Y=15\text{ cm}$ 處，依序由座標 $X=14\text{ cm}$ 、 $X=24\text{ cm}$ 、 $X=37\text{ cm}$ 、 $X=46\text{ cm}$ 、 $X=55\text{ cm}$ 五處，分別於深度座標 $Z=32.5\text{ cm}$ 、 $Z=39.5\text{ cm}$ 取樣，共取樣 10 點。因本研究規劃本試驗之 MICP 改良液澆灌量為 50% 試體飽和溶液量，一部分仍為全乾砂不需取樣，故只取樣兩深度座標 $Z=32.5\text{ cm}$ 、 $Z=39.5\text{ cm}$ 之試體。由圖 4.31 可以發現，因重力作用，在深度 $Z=39.5\text{ cm}$ 之碳酸鈣含量明顯高於深度 $Z=32.5\text{ cm}$ 。此外，深度 $Z=39.5\text{ cm}$ 隨著水平距離增加，碳酸鈣含量並無明顯降低，表示改良液隨著後期砂體之基質吸力水平擴散，生成之碳酸鈣含量仍相當高。

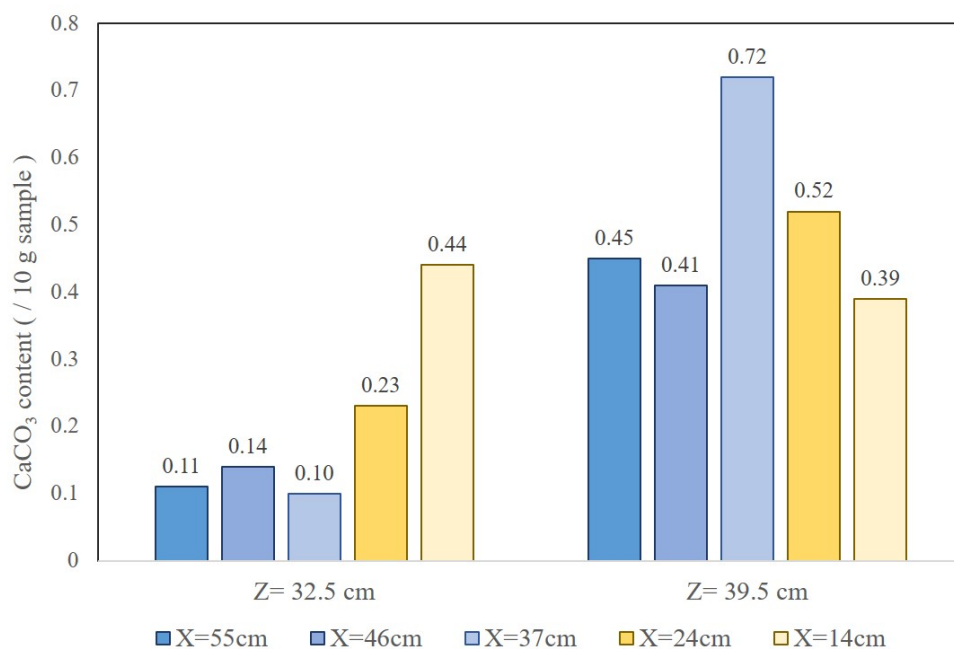


Figure 4.31: 不同 X 座標位置於深度 $Z=32.5\text{ cm}$ 及 $Z=39.5\text{ cm}$ 處之碳酸鈣分布

4.3.3.3 取樣器 B 對改良液滲透之影響

取樣器 A 之設計為使改良液可以透過頂部開口垂直入滲，因此取樣器內外之改良液皆可相當均勻地浸潤於改良液當中，故不擔心對於改良成效之干擾。然而，對於側向加壓之滲透方式，取樣器側壁會產生如屏障般之阻擋效應。為使改良液

滲透範圍增大增遠，勢必需要提高澆灌壓力，但隨著澆灌壓力之提升，根據牛頓第三運動定律，其因阻擋產生之反彈愈明顯，大大改變了滲透路徑，會產生更多難以解釋之不確定性。



本試驗於改良液噴口處正前方兩取樣器 B(座標 $X=14\text{ cm}$ 及 $X=24\text{ cm}$) 進行取樣發現，在後排取樣器 B ($X=24\text{ cm}$) 之中下部分，每 10 g 試體之碳酸鈣含量超過 0.20 g ，表示後排取樣器內部仍然有相當優異之碳酸鈣生成，如圖4.32所示。此外，根據圖4.23可以發現，取樣器內外之碳酸鈣含量並無明顯趨勢，左半邊(座標 $Y=5\text{ cm}$) 之取樣器內部碳酸鈣含量較外部多；而右半邊(座標 $Y=25\text{ cm}$) 之取樣器則是外部碳酸鈣含量較內部多，判斷該差異性之主因為滲流之優勢路徑較為隨機難以預測，故水平向之碳酸鈣含量不如垂直向碳酸鈣含量分布有正相關性。由上述結果顯示，取樣器 B 對於整體中型砂箱之 MICP 改良液滲透之阻擋效應不顯著。

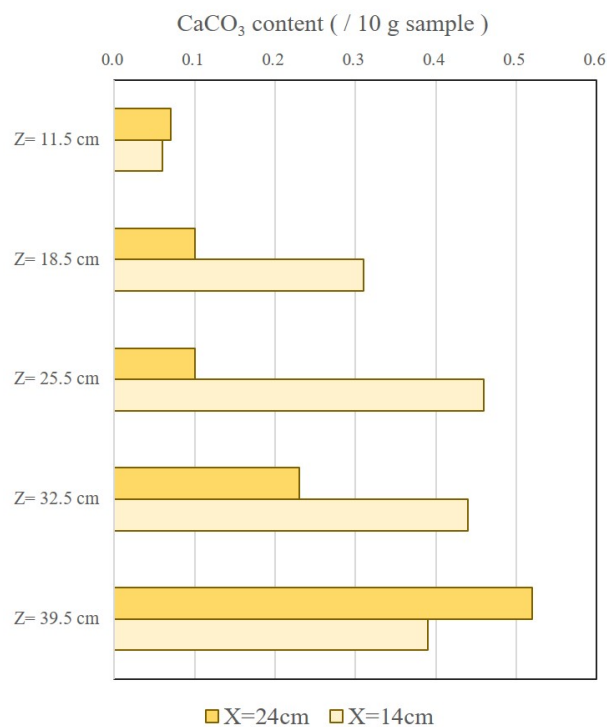


Figure 4.32: 在座標 $X=14\text{ cm}$ 及 $X=24\text{ cm}$ 處隨深度變化之碳酸鈣分布



4.4 側向加壓滲透之現地試驗

現地試驗之取樣點位置如圖4.33所示，由含水量分布結果發現，含水量與深度呈正相關；由酸洗試驗結果發現，碳酸鈣含量除了在深度 $Z=66\text{ cm}$ 處有大幅度暴增現象之外，主要也是與深度呈正相關。

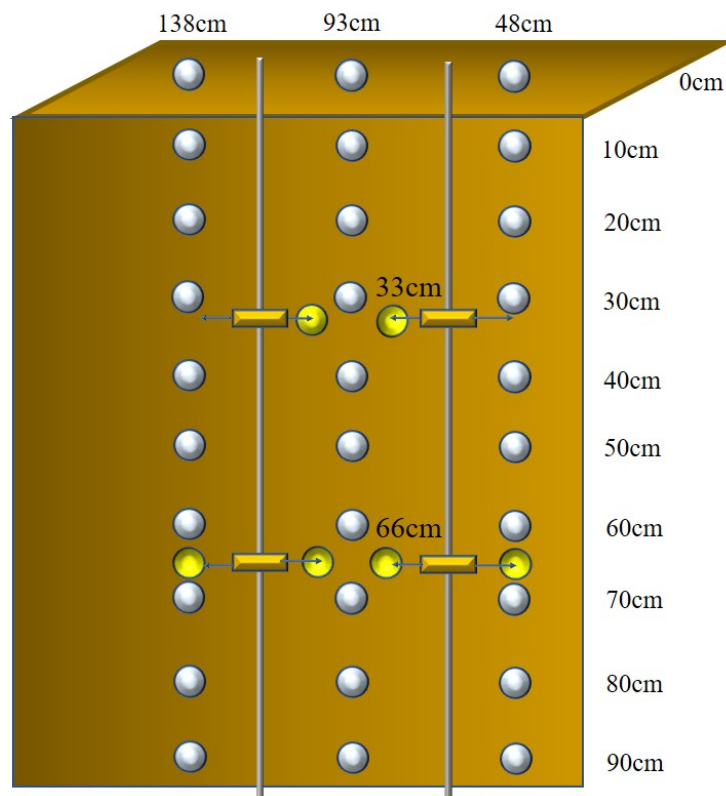


Figure 4.33: 現地取樣點分布如白球及黃球所示
(白球為隨深度定點取樣，黃球為深度 33 cm 及 66 cm 處之水平分布取樣)

4.4.1 含水量分布

由現地含水量試驗結果顯示，如圖4.34，含水量分布與深度呈正相關，在改良液噴口附近(黃色部分)僅有部分取樣點增加，整體含水量分布趨勢仍與深度較為有關。然而，因本試驗設計之澆灌量為總試坑飽和情況下之 25% 改良液量，理應只有四分之一處含水，而開挖後發現深度 $Z=10\text{ cm}$ 以下幾乎為濕土，推測是受

到養護期間之連兩日大雨所影響，然而受到稀釋之改良液則會降低後續碳酸鈣膠結之成效。

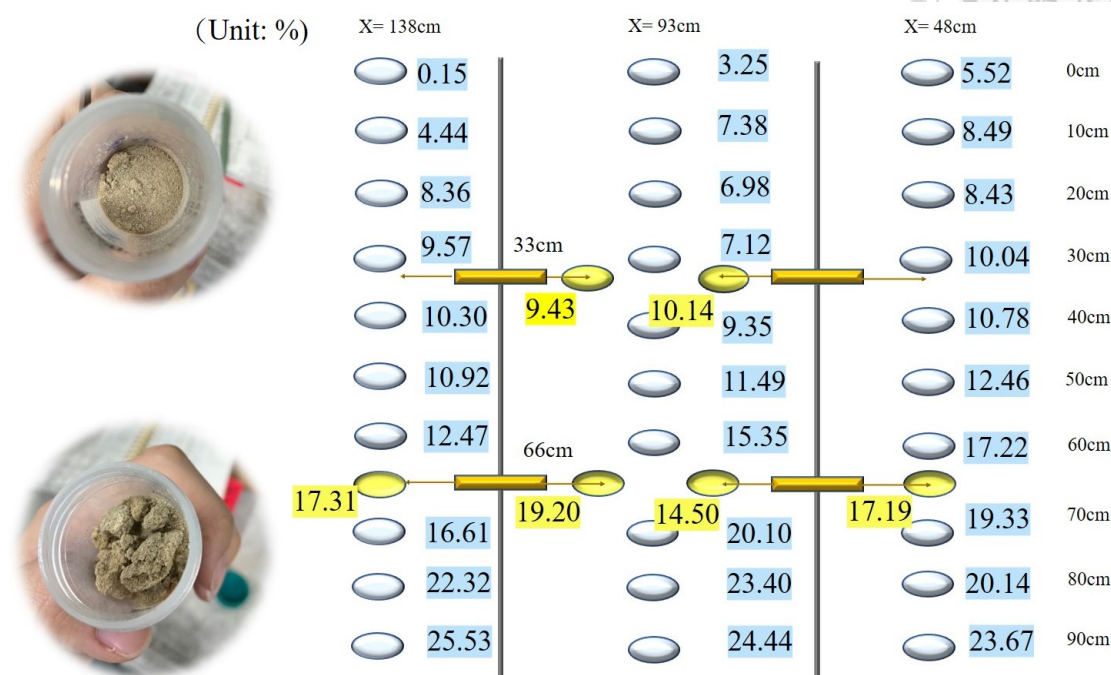


Figure 4.34: 現地各取樣點之含水量分布

4.4.2 酸洗試驗結果

本現地試驗由於進行 MICP 養護期間發生連兩日大雨，尚未膠結之 MICP 改良液可能被稀釋，而已膠結成碳酸鈣晶體之砂顆粒也可能有被沖刷之疑慮，由現地試驗酸洗結果顯示，如圖4.35及圖4.36，除底部及深度 $Z=66\text{ cm}$ 之改良液噴口處附近，大部分碳酸鈣含量均偏低。

4.4.2.1 垂直向改良成效

為探討垂直向之改良成效如何，在 $X=93\text{ cm}$ 及 $X=138\text{ cm}$ 兩處分別於深度 $Z=0\text{ cm}$ 、 10 cm 、 20 cm 、 30 cm 、 40 cm 、 50 cm 、 60 cm 、 66 cm 、 70 cm 、 80 cm 、 90 cm 進行酸洗試體取樣，共 22 個取樣點。以 $X=93\text{ cm}$ 代表受到一次改良液影響

之試體(改良液單方向滲透)，以 $X=138\text{ cm}$ 代表受到二次改良液影響之試體(改良液雙向滲透)，觀察在不同條件下，隨深度變化之碳酸鈣含量分布情形，結果如圖4.35所示。結果顯示，在表面完全沒有碳酸鈣沉澱，於深度 $Z=10\text{ cm}$ 處才開始有碳酸鈣結晶，而除了在深度 $Z=66\text{ cm}$ 之噴口處明顯有碳酸鈣暴增之外。整體碳酸鈣含量仍與深度呈正相關。

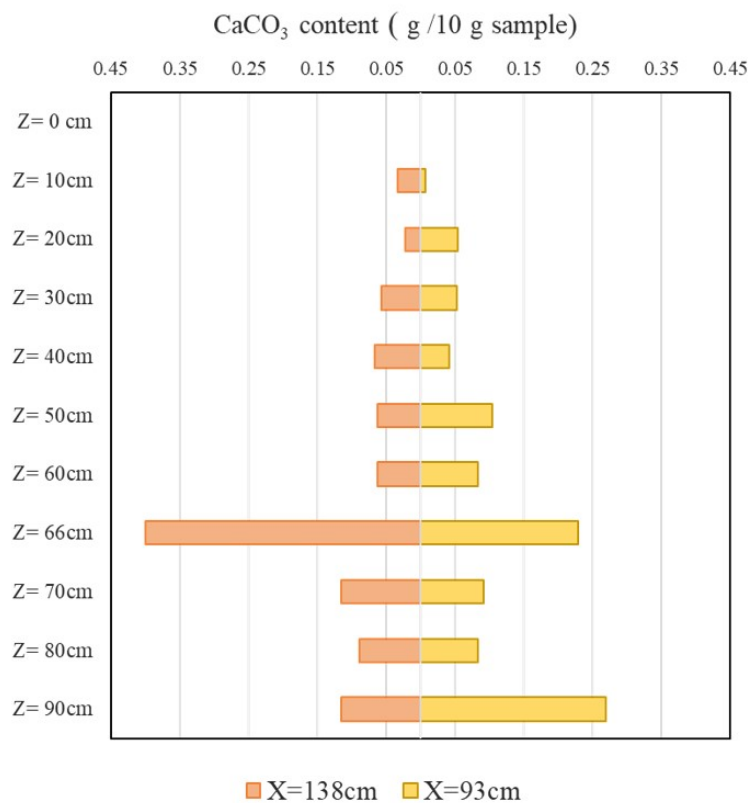


Figure 4.35: 在橫向 $X=138\text{ cm}$ 及 $X=93\text{ cm}$ 兩處之垂直方向碳酸鈣含量分布

4.4.2.2 水平向改良成效

為探討水平向之改良成效如何，在 $X=78\text{ cm}$ 、 108 cm 兩處，於深度 $Z=33\text{ cm}$ 平行於噴口處，進行酸洗試體取樣，也在 $X=48\text{ cm}$ 、 78 cm 、 108 cm 、 138 cm 四處，於深度 $Z=66\text{ cm}$ 平行於噴口處，進行酸洗試體取樣，共 6 個取樣點，觀察在不同澆灌深度條件下，其水平向碳酸鈣含量分布情形，結果如圖4.36所示。由結果顯示，雖然每個澆灌口皆澆灌 25 L 之 MICP 改良液，但現地土滲流之優勢路

徑難以預測，導致澆灌口左右兩側之出液量不相同，進而影響到兩側之碳酸鈣含量，使水平向碳酸鈣含量較不均勻。

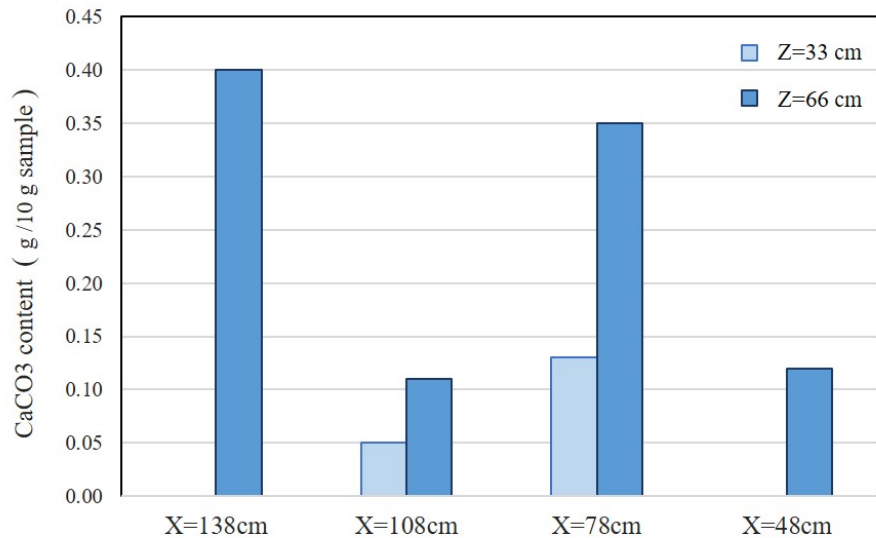


Figure 4.36: 在深度 $Z=33\text{ cm}$ 及 $Z=66\text{ cm}$ 兩處之水平方向碳酸鈣含量分布

4.4.3 靜態三軸壓密排水剪切試驗結果

為探討現地土壤之改良強度，將取樣器置於深度 $Z=40\text{ cm} \sim 60\text{ cm}$ 之間， $X=48\text{ cm}$ 、 78 cm 、 108 cm 、 138 cm 四處，共四個取樣器 A，如圖3.73所示，分別以 A、B、C、D 代表 $X=48\text{ cm}$ 、 78 cm 、 108 cm 、 138 cm 四處之取樣器 A，待養護完畢後取出進行靜態三軸壓密排水剪切試驗。然而，因 A 試體於修整階段因底部不平整導致部分試體崩落，實際上僅 B、C、D 三試體，以及重模之未改良純砂試體，結果如圖4.38及4.39所示。各試體之基本資訊整理如表4.3。由結果顯示：

1. 未改良之純砂試體強度最高，可能之原因為該回填砂並非標準砂，後續將該回填砂進行水洗烘乾後再做一次篩分析發現，其粒徑分布曲線有向左移之現象，如圖4.37所示，表示經過水洗、摩擦等風化行為後，該回填土之顆粒會部分由砂土轉為粉土，導致 MICP 改良後之試體強度不增反減。

2. 若只比較改良試體可以發現，試體 B 之強度最高，試體 D 之強度最弱，根據各試體之基本資訊，試體 B 之實際相對密度為 37.2%，較接近目標之 40% 相對密度，此外，B 試體為雙向改良液澆灌，碳酸鈣膠結效果可能較 D 試體為佳，因此有較高之試體強度。而雖然試體 C 也為雙向改良液澆灌，但實際相對密度僅 19.67%，故試體強度略比試體 B 弱。

Table 4.3: 現地試體資訊

試體代號	B	C	D
試體高 (mm)	148.3	141.6	157.4
試體直徑 (mm)	72.47	72.81	72.87
試體體積 (cm^3)	611.71	589.57	656.44
濕土重 W_t (g)	994.12	936.02	1041.29
乾土重 W_s (g)	888.73	826.56	937.79
水重 W_w (g)	105.39	109.46	103.5
含水量 ω (%)	11.86	13.24	11.04
實際相對密度 D_r (%)	37	19.67	29

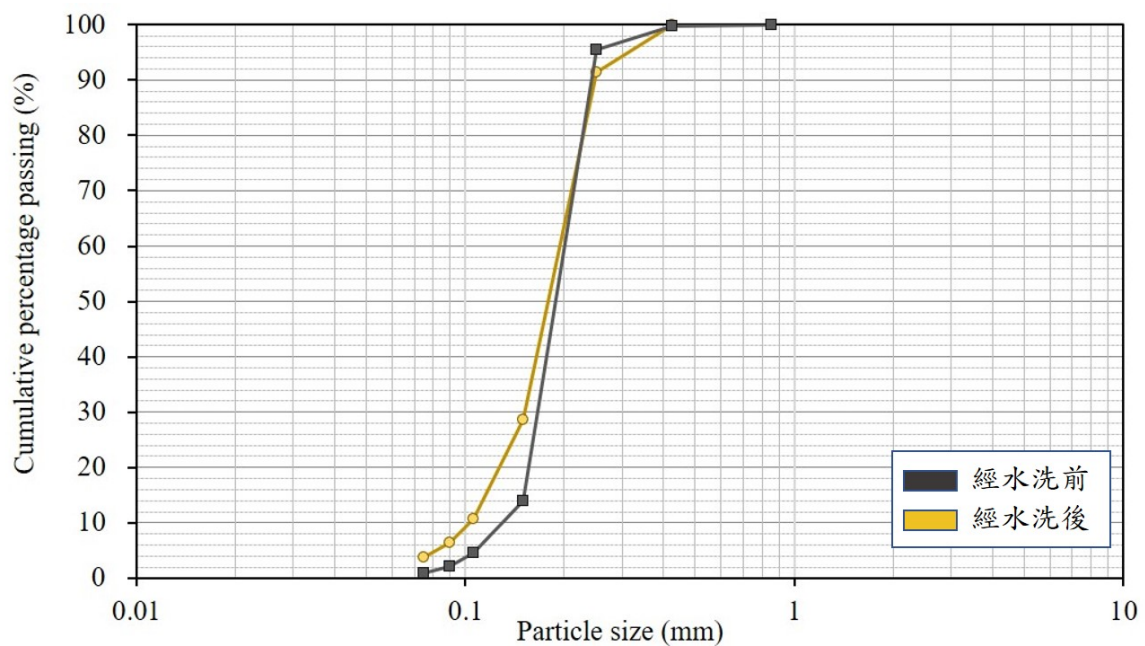


Figure 4.37: 水洗前後之粒徑分布曲線變化

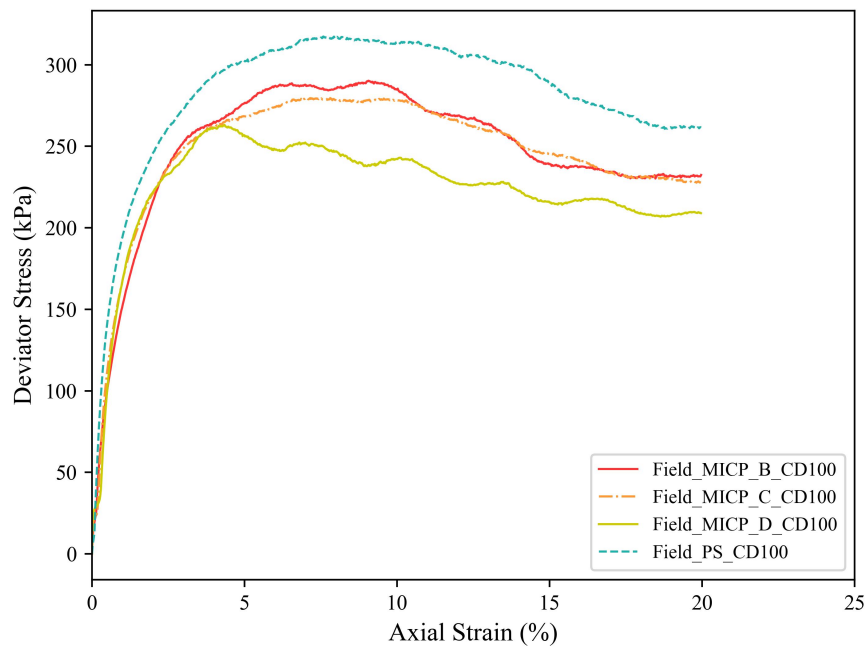


Figure 4.38: 現地改良試體在圍壓 100 kPa 之應力應變曲線
(0.5 M 氯化鈣，養護七日)

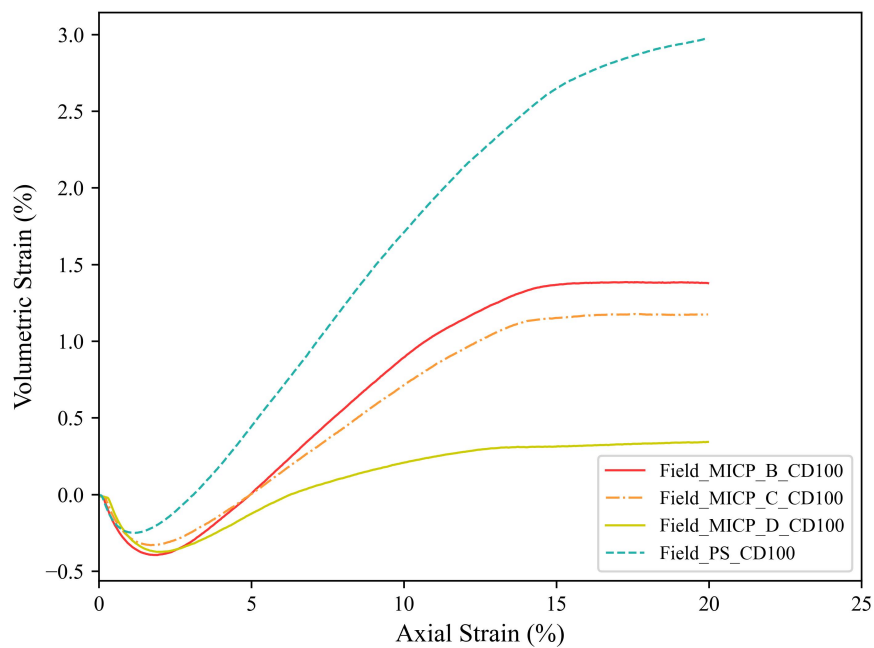


Figure 4.39: 現地改良試體在圍壓 100 kPa 之體積應變曲線
(0.5 M 氯化鈣，養護七日)

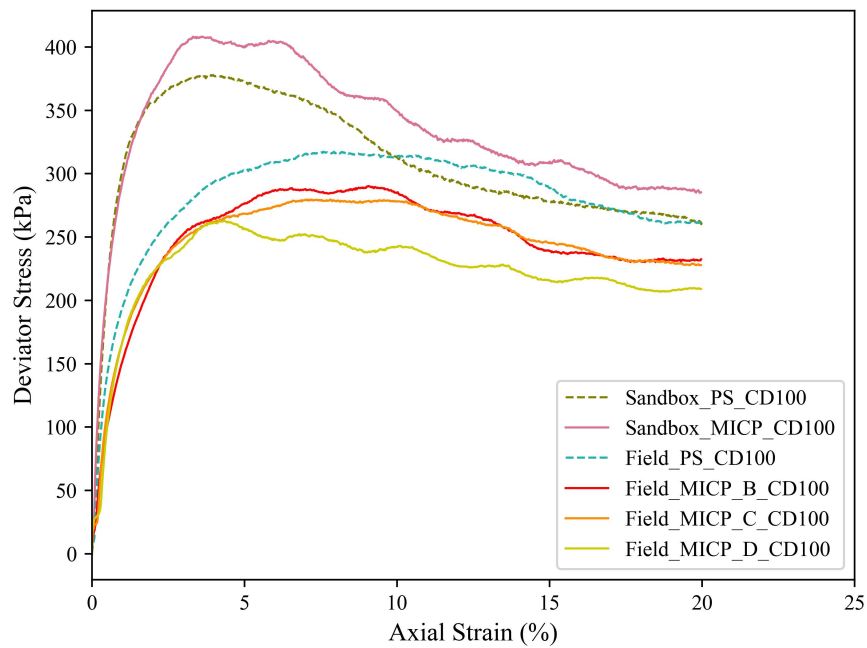


Figure 4.40: 小砂箱試體與現地試體在圍壓 100 kPa 之應力應變曲線比較
(0.5 M 氯化鈣，養護七日)

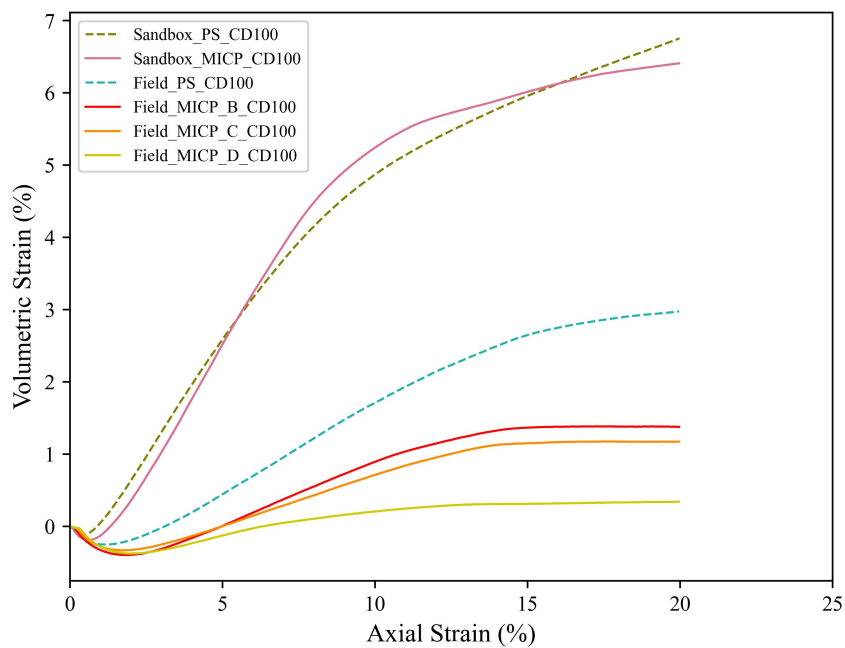


Figure 4.41: 小砂箱試體與現地試體在圍壓 100 kPa 之體積應變曲線比較
(0.5 M 氯化鈣，養護七日)





第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究以小砂箱觀察 MICP 改良液之表面滲透行為，以中砂箱觀察 MICP 改良液之側向加壓滲透行為，最後規劃了一套澆灌系統以觀察改良液在現地之澆灌情形，藉由酸洗試驗及靜態三軸壓密排水剪切試驗探討其改良成效。綜合各項試驗結果，歸納出以下結論：

1. 試體使用具有通透性之取樣器並浸潤於 100% 飽和度之 MICP 改良液中，可以得到較為均勻之改良試體，而均勻之改良試體對於後續單元試驗之結果較具有可靠性及代表性。
2. 經 MICP 改良後之試體，相較於純砂試體，其基質吸力、保水性能、摩擦角及凝聚力皆增加。
3. 取樣器 A 與頂土器之設計搭配可以取出相當完整之改良試體，但因側壁為不鏽鋼多孔板材質，較適用由頂部進行表面滲透之方式，側向滲透會產生阻擋效應，導致改良液在加壓滲透時產生反彈水花，因此由側向加壓滲透改良需以取樣器 B 之材料類型較為合適。
4. 乾砂進行側向滲透於有加壓之狀態下，由剖面觀察發現，隨加壓大小提高呈

現類同心圓形式向外擴散；由側向觀察可發現，其傾向往水平方向滲流，一旦停止加壓，隨即因重力而向下滲流，而流到底部即使有排水空間，乾砂仍可以透過自身基質吸力先往水平向滲流、在往上滲流，而不會將水分直接滴進排水區域內。

5. 改良液在沒有被稀釋之情況下進行側向加壓滲透，試體含水量與深度呈現正相關，而試體之碳酸鈣含量除了與深度呈正相關外，較靠近改良液噴口處附近明顯有碳酸鈣含量暴增之情形，且停止加壓後，改良液藉由自身基質吸力擴散，仍有部分碳酸鈣含量產生。

5.2 建議

根據本研究之砂箱試驗與現地試驗，提供以下建議：

1. 中型砂箱使用之取樣器 B 對於 MICP 改良液滲透之阻擋效應不大，未來欲設計側向澆灌用之標準靜態三軸壓密排水剪切試驗試體取樣器，可以嘗試以該孔徑之不鏽鋼網作為材料製作。
2. 中型砂箱試驗最高加壓至 400 kPa 進行側向滲透，開挖後發現有明顯之滲流沖刷孔洞，愈靠近噴口愈大，未來欲觀察更大之側向壓力時，需注意沖刷孔洞不宜過大，以免產生過單一之優勢路徑。
3. 現地試驗之回填砂建議使用與實驗室相同之 306 石英砂較為合適，可以減少許多不必要之誤差，若因回填砂量過多需考慮成本，可以先拿樣品進行水洗前後之基本物性試驗，確認顆粒粒徑分布前後是否保持一致。
4. 現地試驗之 MICP 改良液配製量較為龐大，可以尋找其他較適合之配製方法，以免因為實驗室設備有限，導致配製成效有限。

- 
5. 現地試驗未來可以設計排水導溝，以應對養護期間發生連續大雨之可能性，雨水之稀釋會加速改良液向下滲流，導致大部分碳酸鈣結晶沉澱於底部。
6. 不論是砂箱試驗或現地試驗，需使用到金屬材質之澆灌設備零件，應以不鏽鋼材質為主以防遇鹼變質。

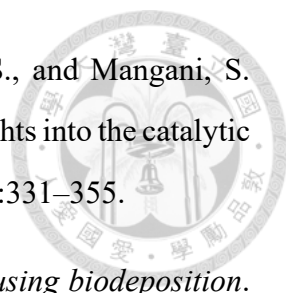




參考文獻

- Achal, V., Mukherjee, A., Basu, P. C., and Reddy, M. S. (2009). Strain improvement of *sporosarcina pasteurii* for enhanced urease and calcite production. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 36(7):981–988.
- Al Qabany, A. (2011). *Microbial carbonate precipitation in soils*. PhD thesis, University of Cambridge, UK.
- Al Qabany, A. and Soga, K. (2013). Effect of chemical treatment used in micp on engineering properties of cemented soils. *Geotechnique*, 63(4):331–339.
- Al Qabany, A., Soga, K., and Santamarina, C. (2012). Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(8):992–1001.
- Al-Salloum, Y., Abbas, H., Sheikh, Q. I., Hadi, S., Alsayed, S., and Almusallam, T. (2017). Effect of some biotic factors on microbially-induced calcite precipitation in cement mortar. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24(2):286–294.
- Al Thawadi S, C.-r. R. (2012). Calcium carbonate crystals formation by ureolytic bacteria isolated from australian soil and sludge. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2(1):12–26.
- Arunachalam, K. D., Sathyanarayanan, K. S., and Darshan, B. S. (2010). Studies on the characterisation of biosealant properties of *bacillus sphaericus*. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(3):270–277.

- 
- Bachmeier, K., Williams, A., Warmington, J., and Bang, S. (2002). Urease activity in microbiologically-induced calcite precipitation. *Journal of Biotechnology*, 93(2):171–181.
- Bang, S. S., Lippert, J. J., Yerra, U., Mulukutla, S., and Ramakrishnan, V. (2010). Microbial calcite, a bio-based smart nanomaterial in concrete remediation. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 1(1):28–39.
- Benini, S., Rypniewski, W. R., Wilson, K. S., Miletti, S., Ciurli, S., and Mangani, S. (1999). A new proposal for urease mechanism based on the crystal structures of the native and inhibited enzyme from bacillus pasteurii: why urea hydrolysis casts two nickels. *Structure*, 7(2):205–216.
- Bird, J. F., Boulanger, R. W., and Idriss, I. M. (2005). Liquefaction. *Engineering Geology*, pages 525–534.
- Bosak, T., Souza-Egipsy, V., Corsetti, F. A., and Newman, D. K. (2004). Micrometer-scale porosity as a biosignature in carbonate crusts. *Geology*, 32(9):781–784.
- Cheng, L., Qian, C. X., Wang, R. X., and Wang, J. Y. (2007). Study on the mechanism of calcium carbonate formation induced by carbonate-mineralization microbe. *Acta Chimica Sinica*, 65(19):2133–2138.
- Cheng, L., Shahin, M., Cord-Ruwisch, R., Addis, M., Hartanto, T., and Elms, C. (2014). *Soil Stabilisation by Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP): Investigation into Some Physical and Environmental Aspects*. 7th International Congress on Environmental Geotechnics, Melbourne, Australia.
- Choi, S.-G., Wu, S., and Chu, J. (2016). Biocementation for sand using an eggshell as calcium source. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(10).
- Chou, C. W., Seagren, E. A., Aydilek, A. H., and Lai, M. (2011). Biocalcification of sand through ureolysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(12):1179–1189.

- 
- Ciurli, S., Benini, S., Rypniewski, W. R., Wilson, K. S., Miletto, S., and Mangani, S. (1999). Structural properties of the nickel ions in urease: novel insights into the catalytic and inhibition mechanisms. *Coordination Chemistry Reviews*, 190:331–355.
- De Belie, N. and De Muynck, W. (2008). *Crack repair in concrete using biodeposition*. Proceedings of ICCRR, Cape Town.
- De Muynck, W., Cox, K., De Belle, N., and Verstraete, W. (2008). Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials*, 22(5):875–885.
- DeJong, J. T., Fritzges, M. B., and Nüsslein, K. (2006). Microbial induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11):1381–1392.
- DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., and Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2, SI):197–210.
- Dejong, J. T., Soga, K., Kavazanjian, E., Burns, S. E., Van Paassen, L. A., Al Qabany, A., Aydilek, A., Bang, S. S., Burbank, M., Caslake, L. F., Chen, C. Y., Cheng, X., Chu, J., Ciurli, S., Esnault-Filet, A., Fauriel, S., Hamdan, N., Hata, T., Inagaki, Y., Jefferis, S., Kuo, M., Laloui, L., Larrahondo, J., Manning, D. A. C., Martinez, B., Montoya, B. M., Nelson, D. C., Palomino, A., Renforth, P., Santamarina, J. C., Seagren, E. A., Tanyu, B., Tsesarsky, M., and Weaver, T. (2013). Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges. *Geotechnique*, 63(4):287–301.
- Dhami, N. K., Reddy, M. S., and Mukherjee, A. (2013). Biomineralization of calcium carbonate polymorphs by the bacterial strains isolated from calcareous sites. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 23(5):707–714.
- Ercole, C., Bozzelli, P., Altieri, F., Cacchio, P., and Del Gallo, M. (2012). Calcium carbonate mineralization: involvement of extracellular polymeric materials isolated from calcifying bacteria. *Microscopy and Microanalysis*, 18(4):829–839.

Ferris, F., Phoenix, V., Fujita, Y., and Smith, R. (2004). Kinetics of calcite precipitation induced by ureolytic bacteria at 10 to 20°C in artificial groundwater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(8):1701–1710.

Ferris, F., Stehmeier, L., Kantzas, A., and Mourits, F. (1996). Bacteriogenic mineral plugging. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 35(8):56–61.

Ferris, F. G., Fyfe, W. S., and Beveridge, T. J. (1987). Bacteria as nucleation sites for authigenic minerals in a metal-contaminated lake sediment. *Chemical Geology*, 63(3-4):225–232.

Gillman, E., Morgan, M. A., and Sherwood, M. (1995). Urease activity in Irish soils at 6°C. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*, 95B(1):19–26.

Gomez, M. G., Martinez, B. C., DeJong, J. T., Hunt, C. E., deVlaming, L. A., Major, D. W., and Dworatzek, S. M. (2015). Field-scale bio-cementation tests to improve sands. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 168(3):206–216.

Gorospe, C. M., Han, S.-H., Kim, S.-G., Park, J.-Y., Kang, C.-H., Jeong, J.-H., and So, J.-S. (2013). Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by *Sporosarcina pasteurii* KCTC 3558. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 18(5):903–908.

Han, J. (2015). *Principles and practice of ground improvement*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.

Huang, Y., Luo, X. G., and Du, F. (2009). Studies on the factors of microbiologically-induced calcite precipitation. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 24(3):87–93.

Kantzas, A., Stehmeier, L., Marentette, D. F., Ferris, F. G., Jha, K. N., and Mourits, F. M. (1992). *A novel method of sand consolidation through bacteriogenic mineral plugging*. CIM Annual Technical Conf., Calgary.

Karol, R. H. (2003). *Chemical grouting and soil stabilization*. Marcel Dekker, New York, NY.

Keykha, H. A., Asadi, A., and Zareian, M. (2017). Environmental factors affecting the compressive strength of microbiologically induced calcite precipitation-treated soil. *Geomicrobiology Journal*, 34(10):889–894.

Kitamura, M., Konno, H., Yasui, A., and Masuoka, H. (2002). Controlling factors and mechanism of reactive crystallization of calcium carbonate polymorphs from calcium hydroxide suspensions. *Journal of Crystal Growth*, 236(1-3):323–332.

Kohnhauser, K. (2007). *Introduction to geomicrobiology*. Blackwell Publishing, Malden, MA.

Kralj, D., Brecevic, L., and Nielsen, A. E. (1994). Vaterite growth and dissolution in aqueous solution .2. kinetics of dissolution. *Journal of Crystal Growth*, 143(3-4):269–276.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall, New Jersey.

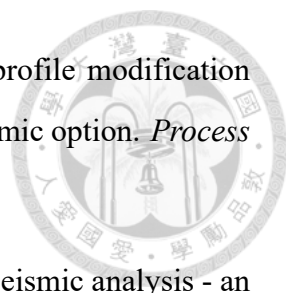
Kramer, S. L. and Seed, H. B. (1988). Initiation of soil liquefaction under static loading conditions. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 114(4):412–430.

Kroll, R. G. (1990). *Microbiology of extreme environments*. McGraw-Hill, New York.

Meldrum, F. C. and Coelfen, H. (2008). Controlling mineral morphologies and structures in biological and synthetic systems. *Chemical Reviews*, 108(11):4332–4432.

Mitchell, J. K. and Santamarina, J. C. (2005). Biological considerations in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(10):1222–1233.

Mortensen, B. M., Haber, M. J., DeJong, J. T., Caslake, L. F., and Nelson, D. C. (2011). Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation. *Journal of Applied Microbiology*, 111(2):338–349.

- 
- Nemati, M., Greene, E., and Voordouw, G. (2005). Permeability profile modification using bacterially formed calcium carbonate: comparison with enzymic option. *Process Biochemistry*, 40(2):925–933.
- Obermeier, S. (1996). Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis - an overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of holocene paleo-earthquakes. *Engineering Geology*, 44(1-4):1–76.
- Okwadha, G. D. O. and Li, J. (2010). Optimum conditions for microbial carbonate precipitation. *Chemosphere*, 81(9):1143–1148.
- Paul, E. A. and Clark, F. E. (1989). *Soil Microbiofogy and Biochemisfry*. Academic Press, San Diego.
- Qian, C., Wang, J., Wang, R., and Cheng, L. (2009). Corrosion protection of cement-based building materials by surface deposition of CaCO_3 by *Bacillus pasteurii*. *Materials Science and Engineering: C Biomimetic and supramolecular systems*, 29(4):1273–1280.
- Rahman, M. M., Hora, R. N., Ahenkorah, I., Beecham, S., Karim, M. R., and Iqbal, A. (2020). State-of-the-art review of microbial-induced calcite precipitation and its sustainability in engineering applications. *Sustainability*, 12(15).
- Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V., and Bang, S. S. (2001). Remediation of concrete using micro-organisms. *ACI Materials Journal*, 98(1):3–9.
- Rivadeneyra, M., Delgado, G., Soriano, M., Ramos-Cormenzana, A., and Delgado, R. (2000). Precipitation of carbonates by *Nesterenkonia halobia* in liquid media. *Chemosphere*, 41(4):617–624.
- Robertson, P. K. (1990). Soil classification using cpt. *Can. Geotech.J.*, 27(1):151–158.
- Roden, E., Leonardo, M., and Ferris, F. (2002). Immobilization of strontium during iron biomineralization coupled to dissimilatory hydrous ferric oxide reduction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(16):2823–2839.

Ryznar-Luty, A., Cibis, E., Krzywonos, M., and Miskiewicz, T. (2015). Efficiency of aerobic biodegradation of beet molasses vinasse under non-controlled pH conditions for betaine removal. *Archives of Environmental Protection*, 41(1):3–14.

Satake, K. and Abe, K. (1983). A fault model for the Niigata, Japan, earthquake of June 16, 1964. *Journal of Physics of the Earth*, 31(3):217–223.

Seed, H. B. (1979). Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 105(2):201–255.

Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 97(9):1249–1273.

Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R. M. (1985). Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 111(12):1425–1445.

Skempton, A. K. (1986). Standard penetration test procedures and their effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging, and overconsolidation. *Geotechnique*, 36(3):425–447.

Soon, N. W., Lee, L. M., Khun, T. C., and Ling, H. S. (2013). Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(4):718–728.

Soon, N. W., Lee, L. M., Khun, T. C., and Ling, H. S. (2014). Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(5).

Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K., and Bang, S. S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil Biology & Biochemistry*, 31(11):1563–1571.

Tang, C.-S., Yin, L.-y., Jiang, N.-j., Zhu, C., Zeng, H., Li, H., and Shi, B. (2020). Factors affecting the performance of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: a review. *Environmental Earth Sciences*, 79(5).

Tobler, D. J., Cuthbert, M. O., Greswell, R. B., Riley, M. S., Renshaw, J. C., Handley-Sidhu, S., and Phoenix, V. R. (2011). Comparison of rates of ureolysis between *Sporosarcina pasteurii* and an indigenous groundwater community under conditions required to precipitate large volumes of calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(11):3290–3301.

Tourney, J. and Ngwenya, B. T. (2009). Bacterial extracellular polymeric substances (EPS) mediate CaCO_3 morphology and polymorphism. *Chemical Geology*, 262(3-4):138–146.

Van Paassen, L. A. (2009). *Biogrout, ground improvement by microbially induced carbonate precipitation*. PhD thesis, Department of Biotechnology, Delft University of Technology, the Netherlands.

Van Paassen, L. A. (2011). Bio-mediated ground improvement: From laboratory experiment to pilot applications. *Proc. GeoFrontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering, Dallas, TX, ASCE Geotechnical Special Publication*, 211:4099–4108.

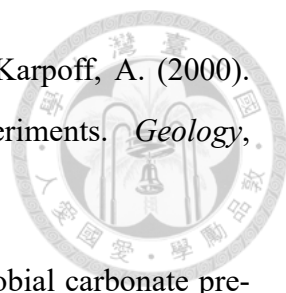
Van Paassen, L. A., Daza, C. M., Staal, M., Sorokin, D. Y., van der Zon, W., and van Loosdrecht, M. C. M. (2010a). Potential soil reinforcement by biological denitrification. *Ecological Engineering*, 36(2, SI):168–175.

Van Paassen, L. A., Ghose, R., van der Linden, T. J. M., van der Star, W. R. L., and van Loosdrecht, M. C. M. (2010b). Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale biogrout experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(12):1721–1728.

Van Veen, J. A., Ladd, J. N., and Frissel, M. J. (1984). Modeling C and N turnover through the microbial biomass in soil. *Plant and Soil*, 76:257–274.

Vijay, K., Murmu, M., and Deo, S. V. (2017). Bacteria based self healing concrete - a review. *Construction and Building Materials*, 152:1008–1014.

Wang, R. X., Qian, C. X., and Wang, J. Y. (2005). Study on microbiological precipitation of CaCO_3 . *Journal of Southeast University. Natural Science Edition*, 35(z1):191–195.

- 
- Warthmann, R., van Lith, Y., Vasconcelos, C., McKenzie, J., and Karpoff, A. (2000). Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments. *Geology*, 28(12):1091–1094.
- Whiffin, V. S., van Paassen, L. A., and Harkes, M. P. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiology Journal*, 24(5):417–423.
- Whifn, V. S. (2004). *Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement*. PhD thesis, Murdoch University, Perth.
- Whitman, W. B., Coleman, D. C., and Wiebe, W. J. (1998). Prokaryotes: The unseen majority. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(12):6578–6583.
- Wiley, W. R. and Stokes, J. L. (1962). Requirement of an alkaline pH and ammonia for substrate oxidation by *Bacillus pasteurii*. *Journal of Bacteriology*, 84(4):730–&.
- Wong, H. E. (2022). Effects of calcium source on sand biocementation. Master's thesis, National Taiwan University, Taipei.
- Xanthakos, P. P., Abramson, L. W., and Bruce, D. A. (1994). *Ground control and improvement*. John Wiley & Sons, New York, NY.
- Yasuhara, H., Neupane, D., Hayashi, K., and Okamura, M. (2012). Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation. *Soils and Foundations*, 52(3):539–549.
- Youd, T. L. (1984). Geologic effects liquefaction and associated ground failure. *Proceedings of the Geological and Hydrologic Hazards Training Program*, pages 210–232.
- Youd, T. L. and Perkins, D. M. (1978). Mapping of liquefaction potential using field performance data. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 104(8):997–1015.
- Zhang, Y., Guo, H. X., and Cheng, X. H. (2014). Influences of calcium sources on microbially induced carbonate precipitation in porous media. *Materials Research Innovations*, 18(2):79–84.