



國立臺灣大學工學院土木工程學系
碩士論文

Department of Civil Engineering
College of Engineering
National Taiwan University
Master's Thesis

以超微細水泥－奈米二氧化矽溶膠灌漿材料改良砂土之強度
Strength Improvement of Sand Through Microfine
Cement-colloidal Silica Grouting

劉品秀
Pin-Hsiu Liu

指導教授：葛宇甯 博士
Advisor: Louis Ge, Ph. D.

中華民國 113 年 7 月
July 2024

誌謝



謝謝葛宇甯 教授在兩年的諄諄教誨，讓我變得更加獨立。謝謝卓雨璇 博士，在研究過程的協助。

感謝周周在實驗室的陪伴，特別是在漫漫研究中克服了許多困難，並在這兩年多來的悉心指導下，讓我累積了豐富的實驗經驗，也體會到耐心與細心是成功的關鍵，希望周周要健康的呷百二，早日恢復游泳日常！感謝郭郭為實驗室瞻前顧後，提醒實驗安全的重要，並包容我們的吵鬧日常，讓我們在實驗室總是能很自在。感謝楊老闆的幫助，不論多麼天馬行空的要求，總能超額達標，沒有楊老闆真的不能如期畢業。

感謝土力室夥伴：思涵、Ula、昉容和鄭滢為枯燥乏味的實驗室增添色彩，在我的研究生生活帶來光亮；感謝同儕：佳榮、桂瑛、馨白、政恩（何博）、柏辰、威方，在課業上的救援，以及平時給予的關心，在沒有座位的 112 室，還是擁有溫暖；感謝學弟妹：琮涓、詒茹、靜穎、筱丰、均侑、志穎跟宥安，總是很貼心跟體諒，讓我能在舒適圈內做自己，並且看見付出的價值。感謝在研究所途中遇見的教授、貴人、學長姐及朋友，默默地提供幫助，或是在迷惘的時刻給予信心與鼓勵，由衷的感謝你們支撐我走下去。

感謝育良，不僅陪伴我度過研究所的兩年時光，即使在路途中磕磕碰碰，也依然靜靜地在觸手可及的地方等待，陪我度過這艱苦的一年。辛苦了。感謝我的好朋友們，在我最不自信的時刻，能堅定且溫柔地找出我的光芒。感謝我的家人們，讓我能任性地做任何決定，無論是否達成目標，總是以我為榮，作為我最溫暖的後盾。

在土木工程這門學科即將迎來第十年。研究所的生涯忽然展開，如今要匆匆結束。每天被截止日期追趕，剛踏入研究所的那天恍如昨日。在過程中不斷修正理想，如同潮汐，時而穩定，時而暗潮洶湧，如今終於到達了終點。度過黑暗漫長夜晚之後，堅持下去總會迎來清晨。

摘要



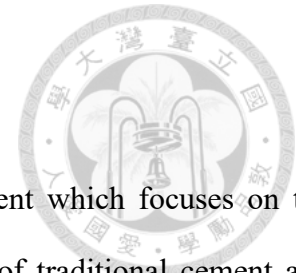
本研究旨在探討灌漿材料地盤改良領域中的應用，尤其是材料的選擇對工程性能的影響。其動機係基於傳統水泥和矽酸鈉的局限性，由於傳統水泥的濾層效應、阻塞現象以及矽酸鈉的不穩定性限制了其在改良材料上的應用。本研究提出以水泥-矽酸鈉為發展的力學材料，其係以超微細水泥—奈米二氧化矽溶膠作為新型改良材料，以提升地盤改良的效果及穩定性。

首先進行超微細水泥—奈米二氧化矽溶膠之配比試驗，包括凝固試驗、泌水試驗與黏滯度試驗，當水灰比為 2 時，固定加入 1% 減水劑的條件下，添加 5、10、15 和 20% 的奈米二氧化矽溶膠；100% 之奈米二氧化矽溶膠於配比試驗之結果顯示，提升奈米二氧化矽溶膠的含量可以有效降低凝固時間與泌水率。而製作超微細水泥時，建議採用高速攪拌器，且其攪拌轉速應超過 1000 rpm，而本研究使用 1500 rpm 攪拌 5 分鐘。

在無圍壓縮強度、動態三軸與變水頭滲透之試驗中，選擇相對密度為 50% 之渥太華 20—30 級配標準砂作為基材，選擇三種不同的配比製成改良漿液，分別為水灰比為 2，添加 1% 減水劑；同樣水灰比和減水劑含量，添加為 20% 奈米二氧化矽溶膠；100% 奈米二氧化矽溶膠加入 12% 之氯化鈉溶液使之促凝劑的漿液。於無圍壓縮強度試驗之結果顯示，超微細水泥漿液添加 20% 奈米二氧化矽溶膠在灌漿後經過 28 天養護，提升抗壓強度至將近 3 MPa；動態三軸試驗中，含有超微細水泥之改良試體，超額孔隙水壓激發過程較為緩慢；變水頭試驗中，砂土之滲透係數為 7.121×10^{-2} cm/sec，經改良後其滲透係數範圍降低 10^{-6} 至 10^{-7} cm/sec。總結本研究改良材料之結果，證實能改善其土壤力學性質與穩定性，顯示其在地盤改良的潛力。

關鍵字：超微細水泥、奈米二氧化矽溶膠、動態三軸試驗、無圍壓縮強度試驗、變水頭滲透試驗

Abstract



This research investigates the application of a grouting improvement which focuses on the impact of grout material selection. The study addresses the limitations of traditional cement and sodium silicate grouts, such as the filtration and clogging phenomena associated with cement and the instability of sodium silicate. To overcome these challenges, the research introduces microfine cement and colloidal silica as the grouting materials.

Experimental grouting materials tests, which included setting, bleeding, and viscosity tests, used a water-cement ratio equal to 2 with incremental additions of 5%, 10 %, 15 %, and 20 % colloidal silica, as well as a pure colloidal silica solution. These tests demonstrated that increasing the colloidal silica content effectively reduced setting time and bleeding rates. For optimal performance, high-speed mixing at speeds exceeding 1000 rpm is recommended; in this study, a speed of 1500 rpm was employed for a duration of five minutes.

Advanced tests were also conducted using Ottawa 20-30 graded standard sand with a relative density of 50%. These tests included cyclic triaxial tests, unconfined compressive stress tests, and falling head permeability tests. The paste formulations tested were pure microfine cement, microfine cement with 20 % colloidal silica and pure colloidal silica paste. The results showed that grouts containing 20 % colloidal silica in microfine cement paste significantly increased compressive strength after 28 days of curing and decreased permeability, without inducing an increase in the pore pressure ratio, demonstrating the potential of this new grout formulation for enhancing ground improvement.

Keywords : Microfine cement, Colloidal silica , Cyclic triaxial test, Unconfined compressive stress test, Falling head permeability test

目次



誌謝.....	i
摘要.....	ii
Abstract.....	iii
目次.....	iv
表次.....	vii
圖次.....	viii
第 1 章 緒論.....	1
1.1 研究動機與目的.....	1
1.2 研究方法.....	1
1.3 研究架構.....	2
第 2 章 文獻回顧.....	3
2.1 現有地盤改良灌漿技術.....	3
2.2 超微細水泥介紹與應用.....	4
2.3 奈米二氧化矽溶膠介紹與應用.....	11
2.4 綜合討論.....	15
第 3 章 灌漿材料與試驗方法.....	16
3.1 試驗材料.....	16
3.1.1 砂土.....	16
3.1.2 超微細水泥.....	17
3.1.3 奈米二氧化矽溶膠.....	18
3.2 試驗儀器與步驟.....	20
3.2.1 砂土基本物理性試驗儀器與步驟.....	20
3.2.2 改良材料基本試驗與步驟.....	22



3.3 改良試體製作與設備開發.....	33
3.3.1 紙筒製作改良試體.....	33
3.3.2 滲透灌漿設備與步驟.....	36
3.4 力學試驗與步驟.....	39
3.4.1 無圍壓縮強度試驗與步驟.....	39
3.4.2 動態三軸試驗與步驟.....	44
3.4.3 變水頭試驗與步驟.....	55
3.5 試驗規劃.....	57
第 4 章 試驗結果與討論.....	61
4.1 改良漿液配比試驗.....	61
4.1.1 凝固時間試驗.....	62
4.1.2 泌水率試驗.....	63
4.1.3 黏滯度試驗.....	64
4.2 無圍壓縮強度試驗.....	66
4.2.1 試體軸向加載速率之準則.....	66
4.2.2 無圍壓縮強度試驗結果.....	67
4.2.3 改良試體力學性質.....	67
4.3 動態三軸試驗.....	73
4.3.1 動態三軸試驗之參數定義.....	73
4.3.2 試體液化判定準則.....	74
4.3.3 砂土動態三軸試驗結果.....	74
4.3.4 改良試體動態三軸結果.....	78
4.4 變水頭試驗.....	82
第 5 章 結論與建議.....	85
5.1 結論.....	85

5.2 建議.....	87
參考文獻.....	88



表次



表 2.1、穩定性、凝固時間與黏滯度試驗之結果 (Mollamahmutoglu & Avcı, 2015).....	7
表 3.1、超微細水泥 SikaGrout®-01 Ultra fine 之化學成分與物理性質	18
表 3.2、奈米二氧化矽溶膠 Sikafume100 CS 的成分與基本性質	20
表 3.3、相對密度與緊密程度之關係 (Das & Sobhan, 2014).....	22
表 3.4、砂土基本物理性試驗結果.....	22
表 3.5、超微細水泥—奈米二氧化矽溶膠材料試驗配比.....	23
表 3.6、F2—100B 中型攪拌機詳細資料.....	24
表 3.7、HA 系列黏度計之轉速與相對應黏度因數	31
表 3.8、紙筒製作改良試體的配比表.....	34
表 3.9、滲透灌漿試驗之試體配比表.....	37
表 3.10、HUMBOLDT 530 三軸壓縮試驗機型細資料	43
表 3.11、力學試驗試體編號.....	60
表 4.1、改良材料配比試驗結果.....	61
表 4.2、無圍壓縮強度試驗結果.....	67
表 4.3、純砂土試體動態三軸之結果.....	75
表 4.4、各改良試體經過動態三軸試驗之結果.....	78
表 4.5、飽和條件下之典型土壤水利傳導係數 (Das & Sobhan, 2014).....	83
表 4.6、變水頭試驗之數據.....	83

圖次



圖 2.1、水泥之水化過程與 C-S-H 膠體產生並填充孔隙過程(Thomas et al., 2009).....	5
圖 2.2、水泥與土壤顆粒膠結過程(Khajeh et al., 2020).....	6
圖 2.3、水泥滲透，漿液滯留在土壤中，以及在土壤上方形成水泥濾層的發展.....	6
圖 2.4、不同水灰比對強度之影響 (Avci & Mollamahmutoglu, 2016).....	8
圖 2.5、細砂含量對無圍壓縮強度試驗在養護齡期為 150 天之影響 (Avci & Mollamahmutoglu, 2016)	9
圖 2.6、土壤顆粒水力傳導係數對滲透灌漿應用範圍 (Liu et al., 2023).....	10
圖 2.7、掃描式電子顯微鏡 (SEM) 影像 (a) C-S-P (b)水泥漿液膠結情形.....	10
圖 2.8、改良試體在無圍壓縮強度隨養護天數之表現 (a) 無添加劑 (b) 1%矽酸鈉 (c) 3% 矽酸鈉 (d) 5%矽酸鈉 (Avci et al., 2021).....	11
圖 2.9、奈米二氧化矽溶膠體灌漿之無圍壓縮強度 (Liao et al., 2003).....	13
圖 2.10、奈米二氧化矽溶膠在砂土中含量對強度影響 (Gallagher & Mitchell, 2002).....	13
圖 2.11、奈米二氧化矽溶膠體灌漿之無圍壓縮強度 (Axelsson, 2006)	14
圖 2.12、奈米二氧化矽溶膠含量與循環荷載在 CSR 為 0.4 之行為 (Gallagher & Mitchell, 2002)	14
圖 3.1、材料粒徑分布曲線.....	17
圖 3.2、二氧化矽四面體.....	19
圖 3.3、比重試驗之步驟.....	21
圖 3.4、日本法相對密度試驗儀 JSF (T26-81T)	21
圖 3.5、超微細水泥基底漿液的所有材料.....	26
圖 3.6、F2-100B 中型攪拌機與改良漿液拌合.....	26
圖 3.7、奈米二氧化矽溶膠漿液準備.....	27
圖 3.8、HUMBOLDT 費開氏儀器與試驗過程.....	28



圖 3.9、量測凝固時間試驗之漿液.....	29
圖 3.10、泌水率試驗過程.....	30
圖 3.11、黏滯度試驗.....	32
圖 3.12、原廠所附之轉針.....	32
圖 3.13、轉針凹槽處.....	33
圖 3.14、鑾牌讀數.....	33
圖 3.15、改良漿液與砂土混合.....	35
圖 3.16、紙筒改良之外觀與效果.....	35
圖 3.17、改良試體養護於水中.....	35
圖 3.18、灌漿設備.....	38
圖 3.19、氣壓系統與試體前置飽和設備.....	38
圖 3.20、滲透灌漿之過程與試體經養護後的結果.....	39
圖 3.21、無圍壓縮強度試驗.....	42
圖 3.22、荷重元與 LVDT 設備.....	42
圖 3.23、使用石膏將試體蓋平.....	43
圖 3.24、動態三軸試驗設備.....	45
圖 3.25、氣壓控制器與數據採集器.....	46
圖 3.26、壓力體積控制系統.....	46
圖 3.27、壓力計.....	47
圖 3.28、驅動器.....	47
圖 3.29、絕緣膏.....	48
圖 3.30、三軸室.....	48
圖 3.31、砂土層之間表面刮花.....	53
圖 3.32、利用延伸環避免土壤滿出.....	53
圖 3.33、塑膠帽蓋戴於頂蓋.....	54



圖 3.34、壓力轉換.....	54
圖 3.35、變水頭試驗室.....	57
圖 3.36、滲透試驗儀.....	57
圖 3.37、研究流程圖.....	59
圖 4.1、凝固時間與奈米二氧化矽溶膠含量之關係.....	62
圖 4.2、泌水率與奈米二氧化矽溶膠含量之關係.....	64
圖 4.3、漿體正規化與奈米二氧化矽溶膠含量之時間關係.....	64
圖 4.4、黏滯度與超微細水泥-奈米二氧化矽溶膠含量之關係	65
圖 4.5、奈米二氧化矽溶膠的黏滯度與時間之關係.....	65
圖 4.6、無圍壓縮強度與養護齡期之關係圖.....	68
圖 4.7、PCS 試體於各養護齡期之應力應變曲線.....	68
圖 4.8、PWC2 試體於各養護齡期之應力應變曲線.....	69
圖 4.9、WC2-CS20 試體於各養護齡期之應力應變曲線.....	69
圖 4.10、各改良試體於不同養護齡期之尖峰強度增幅比例.....	70
圖 4.11、 E_{sec50} 定義示意.....	71
圖 4.12、 E_{sec50} 與養護齡期之關係	71
圖 4.13、各改良漿液之試體與養護齡期的脆性指數.....	72
圖 4.14、動態強度試驗軟體設定.....	75
圖 4.15、PS-0.325 試體：(a)軸向應變-應力反覆作用次數曲線 (b)軸向應力-應力反覆作用次數曲線 (c)遲滯迴圈	76
圖 4.16、PS-0.338 試體：(a)軸向應變-應力反覆作用次數曲線 (b)軸向應力-應力反覆作用次數曲線 (c)遲滯迴圈	76
圖 4.17、PS-0.340 試體：(a)軸向應變-循環剪切下數曲線 (b)軸向應力-循環剪切下數曲線 (c)遲滯迴圈.....	76
圖 4.18、PS 試體之循環剪切應力比曲線	77

圖 4.19、PS 試體經動態試驗後之液化情形	77
圖 4.20、PWC2、試體在養護 7、14、28 天之軸向應變行為	79
圖 4.21、WC2-CS20 試體在養護 7、14、28 天之軸向應變行為	79
圖 4.22、PCS 試體在養護 7、14、28 天之軸向應變行為	80
圖 4.23、PWC2 試體在養護 7、14、28 天之孔隙水壓比曲線	80
圖 4.24、WC2-CS20 試體在養護 7、14、28 天之孔隙水壓比激發曲線	81
圖 4.25、PCS 試體在養護 7、14、28 天之孔隙水壓比發曲線	81
圖 4.26、PWC2 試體在養護 7、14、28 天之遲滯迴圈曲線	82
圖 4.27、WC2-CS20 試體在養護 7、14、28 天之遲滯迴圈曲線	82
圖 4.28、PCS 試體在養護 7、14、28 天之遲滯迴圈曲線	82

第 1 章 緒論



1.1 研究動機與目的

地盤改良技術在臺灣的土木工程中為十分重要的角色，由於臺灣位於地震頻繁的環太平洋地震帶之上，並且地質狀況多為年輕沉積層廣泛分布於西部，主要由沉積平原組成，使得砂土和粉土淺層在頻繁的地震活動時容易發生土壤液化。臺灣地形為多山狀況，使東部主要由山脈組成的崎嶇山地，而這些山脈不僅地勢陡峭，於隧道與地下設施工程時常遇到斷層與破碎岩層，增加施工的難度。因此地盤改良的有效性和穩定性顯得尤為重要。

傳統灌漿材料如水泥和矽酸鈉（又稱水玻璃）已經被廣泛發展與應用，雖然在一定程度上能改善地盤軟弱的問題，但各自存在局限性，例如水泥的濾層效應及阻塞現象和矽酸鈉的化學不穩定性。本研究的動機是針對上述傳統灌漿材料的限制，尋找新的灌漿材料以提高地盤改良效果。本研究提出以超微細水泥—奈米二氧化矽溶膠作為新型灌漿材料，為了克服傳統水泥灌漿不穩定性，藉由物理方式將水泥研磨成超微細水泥，使水泥顆粒達到微米等級，降低濾層及阻塞現象，並提高灌漿的有效性。矽酸鈉則存在不穩定性問題，灌漿改良後殘留鈉離子與土壤含量中的水分持續反應，破壞已經成形的膠體，導致改良效果降低，影響改良土壤的耐久性，而奈米二氧化矽溶膠可以提高化學穩定性，於地盤改良中能展現出更優異的性能。

1.2 研究方法

本研究通過實驗室之試驗探討超微細水泥—奈米二氧化矽溶膠在改良砂土的力學行為，主要分為以下幾個步驟：

- (1) 材料準備與配比試驗：針對超微細水泥—奈米二氧化矽溶膠，進行不同配比的凝固試驗、泌水試驗和黏滯度試驗。在水灰比為 2，固定加入 1 % 的減水劑之下，添加 5 %、10 %、15 % 和 20 % 的奈米二氧化矽溶膠。



- (2) 配比試驗結果分析：分析超微細水泥添加奈米二氧化矽溶膠含量對凝固時間、泌水率和黏滯度的影響，後續試驗將以純超微細水泥漿、純奈米二氧化矽溶膠與超微細水泥—20 % 奈米二氧化矽溶膠漿液進行分析。
- (3) 力學試驗：選擇渥太華 20–30 級配標準砂作為基材，試驗純奈米二氧化矽溶膠漿液、水灰比為 2，固定加入 1 % 減水劑的純超微細水泥漿與再添加 20 % 奈米二氧化矽溶膠之灌漿配比，總共三種配比，進行無圍壓縮強度試驗、動態三軸試驗和變水頭試驗，測試不同改良漿液的改良效果。
- (4) 數據分析與比較：對試驗結果進行統計分析，與三種灌漿配比之結果進行比較。

1.3 研究架構

本研究的架構分為六章，第一章為緒論，介紹研究背景、動機、目的以及研究方法與架構。第二章為文獻回顧，整理和分析與灌漿技術及材料相關的文獻，並介紹超微細水泥和奈米二氧化矽溶膠的特性及應用。第三章為灌漿材料與試驗方法，詳細描述實驗中使用的材料、配比試驗的方法及步驟，以及力學試驗的設計。第四章為試驗結果與討論，呈現和討論實驗數據，包括凝固時間、泌水率、黏滯度、無圍壓縮強度、動態三軸試驗與變水頭試驗的結果。第五章為結論與建議，對試驗結果提出結論，並針對其提出改善及建議；最後為本研究之參考文獻。

第 2 章文獻回顧



2.1 現有地盤改良灌漿技術

目前現有的地盤改良灌漿技術，已在眾多建設項目中廣泛被應用。而其技術的主要優勢在於其極高的靈活性，能夠適用於多種土壤和岩石類型。該技術可根據特定需求及目的進行調整，提供高度定制的地盤改良解決方案。儘管傳統灌漿技術具有廣泛的應用和諸多優點，仍存在一些限制和挑戰，這些問題需要在應用過程中仔細考慮。

目前常見的地盤改良灌漿技術有噴射灌漿 (Jet Grouting)、擠壓灌漿 (Compaction Grouting)、劈裂灌漿 (Fracturing Grouting) 及滲透灌漿 (Permeation Grouting) 等四種。其中適用大多數土層之工法為噴射灌漿，Choi (2005) 研究指出，噴射注漿技術利用高壓噴射漿液，將土壤切割或攪拌至預定深度。在此過程中，被切割的土壤與漿液混合後硬化，或是將土壤排出並由漿液取代。此技術的特點是可以深入改造土壤結構，但其缺點在於操作中可能產生的噪音和振動，若處理不當，將對環境造成顯著影響。而噴射注漿需要較為複雜的機械設備以及高壓力輸送漿料，這些因素都需要技術人員具備高度的技術技能和精確的控制能力，因此成本相對較高。

擠壓注漿技術，將低坍度與高稠度之漿液灌注入土層內形成漿液，以排擠、壓實周圍之土壤或形成樁體。擠壓注漿技術在操作上相較簡單，且可有效地提高土壤的承载力。然而此技術對不同地盤狀況有適用性的議題，尤其此種工法不適用於砂土和黏土層，較適用於砂礫石層，因為漿液難以替代砂土和黏土顆粒，因而在擠壓注漿時，容易導致地表隆起或對原有結構造成損壞。

Cheng et al. (2020) 研究表明劈裂灌漿系將漿液灌注入土層中，可以是水泥或其他化學漿液，以高壓的方式將水泥混合漿液注入土壤或岩石結構中的裂縫或空隙。隨著漿料的注入，現有的裂縫會擴大，新的裂縫亦會形成，使漿料得以滲透並填充這些空間。此過程固化了裂縫區域，提高了地盤的強度與承載能力。而在實際應用中面臨的挑戰主要為灌漿壓力通常無法達到設計值，且由於岩體的不均勻性與複雜性，實際所需的灌漿壓力可能遠超預期，要使漿液

在岩體中均勻地擴散及滲透具有一定程度的困難性，需要進行壓力調整和控制，因此會影響劈裂灌漿的效率，進而增加工程成本並且可能會降低地層或岩石結構的穩定性。基於上述的議題突顯設計和實施劈裂灌漿工法時，需要更精確地評估地質條件和材料性能。

Celik (2019) 研究指出，滲透灌漿是一種在不明顯改變土壤結構及體積狀況下，將漿液注入土壤或岩石的空隙之間。此技術需視土層的滲透性而選用不同的漿材。此方法有效地以漿液填充土壤顆粒之間的孔隙，並以穩定的速率進行灌注，進而增強地盤結構的穩定性，其主要用途包括降低地盤滲透性、控制地下水的流動性、增強及加勁地盤的強度，且此工法在滲透性較高的土壤中改良效果較佳，如淨砂和礫石。滲透灌漿不僅能增強土壤的強度和承載能力，還能降低土壤液化的風險。此灌漿技術在改良過程中對現有土壤顆粒的結構干擾較小，且能靈活應對局部或更廣泛的改良土體範圍。

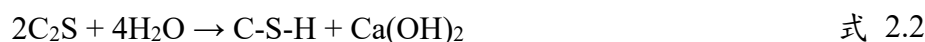
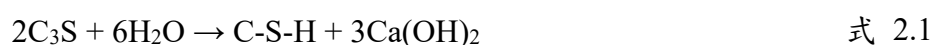
2.2 超微細水泥介紹與應用

Halstead (1961) 提及現代水泥在 1824 年發明，在水泥與水進行化學反應後，一旦開始凝固，其水泥的抗壓強度隨時間推移而增加，搭配適當的維護之下，其耐久性可長達數十年。由於其流動性，能經由不同的灌漿技術填充進土壤顆粒間或岩石裂縫，良好的膠結能力在經過凝固硬化後，提高地盤穩定性，因此水泥十分適合作為灌漿材料，除此之外，此材料容易獲取與備製，依照需求添加不同添加劑後能有效的改善性能，並具有良好的耐水性和抗化學性，能在不同環境下保持漿液穩定，可廣泛應用於建築和土木工程領域。

水泥的化學成分包括以下幾個主要成分：氧化鈣 (CaO)、二氧化矽 (SiO_2)、三氧化二鋁 (Al_2O_3)、三氧化二鐵 (Fe_2O_3) 和氧化鎂 (MgO)。這些成分共同決定了水泥的水化特性、強度發展和耐久性。氧化鈣主要影響水泥的基本構造和強度；二氧化矽和三氧化二鋁有助於提升水泥的硬化和抗壓強度；三氧化二鐵則可以有效地提升水泥的耐久性和抗侵蝕能力；氧化鎂則會影響水泥的耐火性與穩定性。經過熟料燒成後，水泥熟料的主要礦物成分是硅酸三鈣 ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2, \text{C}_3\text{S}$) 和硅酸二鈣 ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2, \text{C}_2\text{S}$)。其中， C_3S 在水化反應中快速生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$

和 C-S-H 膠體，主要提供水泥的早期強度；而 C₂S 反應較慢，主要生成 C-S-H 膠體，貢獻水泥的長期強度。式 2.1 與式 2.2 表示水泥的水化反應通過生成 C-S-H 膠體來增強材料強度。

Thomas et al. (2009) 表示當水泥與水接觸時，C₃S 和 C₂S 同時溶解，釋放鈣、矽酸鹽和氫氧化物離子，這些離子形成 C-S-H 膠體逐漸發展並填補水泥漿體中的孔隙（圖 2.1），形成互鎖結構。而水灰比、養護條件和輔助膠凝材料也會影響在土壤顆粒中的水化作用。



Khajeh et al. (2020) 表示水泥水化過程減少了土壤顆粒間原始的孔隙率，因此提升了土壤的強度以及耐久性，且利用 C-S-H 膠體並包覆土壤顆粒，能有效地填充土壤孔隙，於土壤顆粒之間形成鍵結，從而達到地盤改良之目的（圖 2.2）。

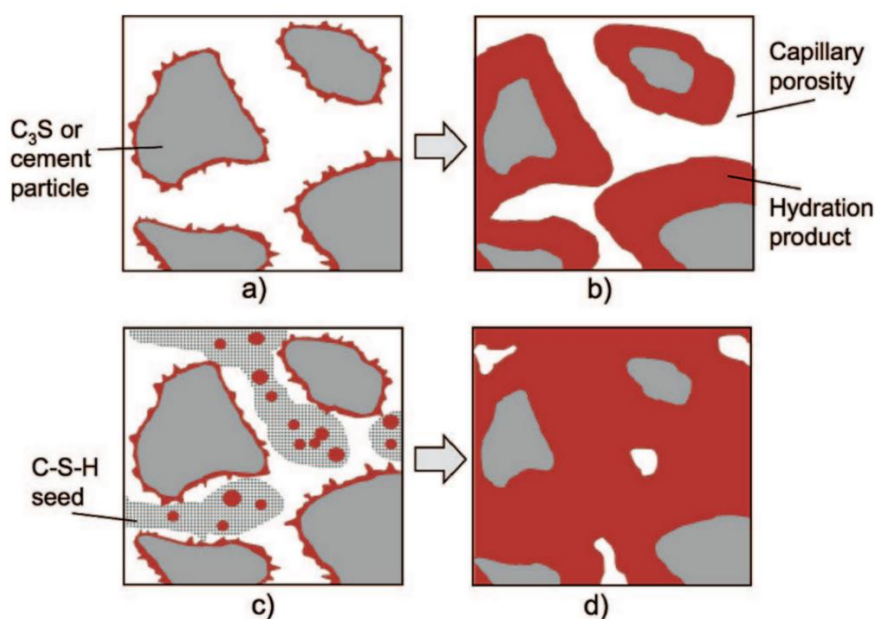


圖 2.1、水泥之水化過程與 C-S-H 膠體產生並填充孔隙過程(Thomas et al., 2009)

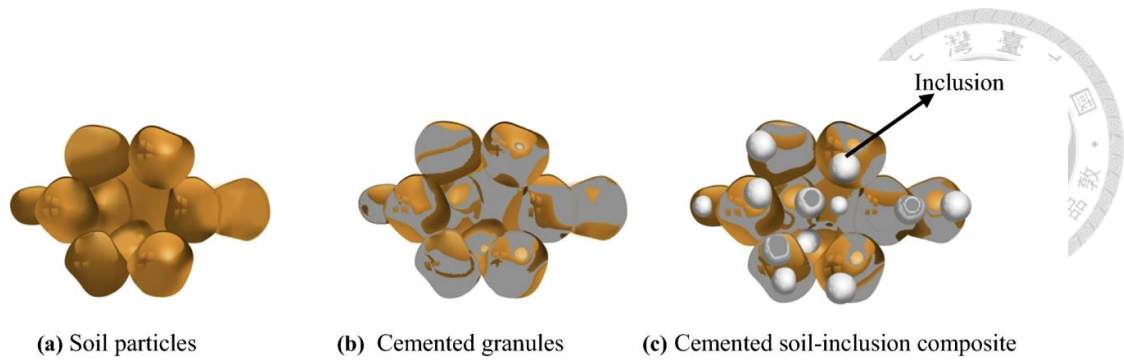


圖 2.2、水泥與土壤顆粒膠結過程(Khajeh et al., 2020)

Zhu et al. (2021); Xu et al. (2022) 指出水泥灌漿的應用相當廣泛，然而其在地層條件下，水泥顆粒的尺寸大小會影響灌漿過程產生的過濾 (Filtration) 及阻塞 (Blockage) 之現象，較粗的水泥顆粒尺寸較容易產生過濾層，使滲透性明顯降低，因此導致水泥灌漿材料形成濾層後水泥漿液析離出水的現象 (圖 2.3)。

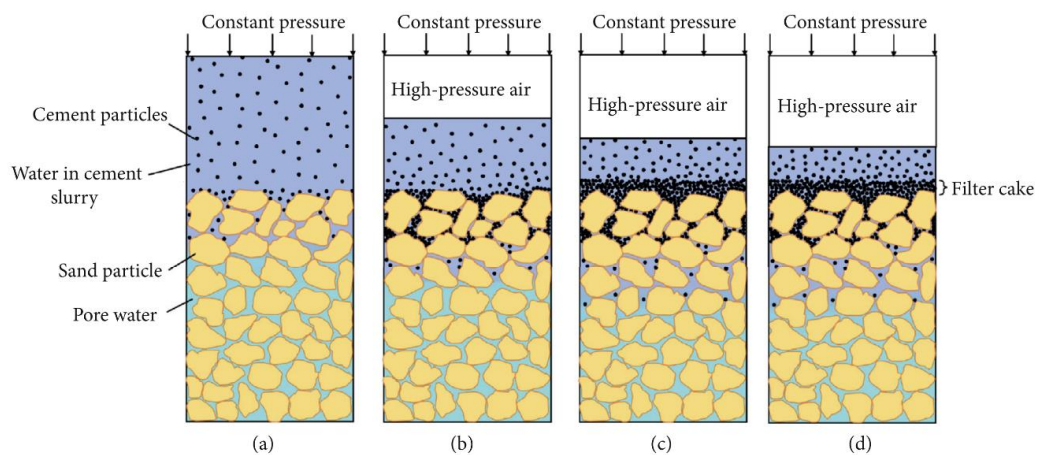


圖 2.3、水泥滲透，漿液滯留在土壤中，以及在土壤上方形成水泥濾層的發展
(Xu et al., 2022)

近年來，超微細水泥逐漸受到重視，其主要目的是提高水泥灌漿的可灌性。透過將傳統水泥研磨細化至最大粒徑小於 20 微米 (相較傳統常用水泥粒徑的 40 微米)，明顯增加比表面積，因此提高了水泥漿體的流動性。而超微細水泥顆粒能更好地填充土壤之間的微小孔隙，

並增強灌漿密實性，能有效地改善土壤強度和穩定性。其水化過程與傳統水泥相同，但更細顆粒結構使其力學性質更好。當使用超微細水泥作為灌漿材料時，通常會藉由改變水灰比（Water - Cement Ratio, W/C）、添加減水劑（Plasticizer）或化學添加劑（Chemical Additives）來控制其流動性及強度。為了更好地瞭解改良漿液的特性，藉由凝固時間（Setting Time）、泌水率（Bleeding Ratio）及黏滯度（Viscosity）等相關試驗了解水泥材料的基本性質。

Mollamahmutoglu and Avci (2015) 藉由試驗不同水灰比的條件下，超微細水泥在其影響下的性質。根據表 2.1，當水灰比增加時，凝固時間與泌水率隨之增加，反之其黏滯度降低，顯示其具有高流動性，同時會延長凝固時間及漿液之穩定性。儘管超微細水泥的成本通常是傳統水泥的 3 到 4 倍，但仍可以透過調整水灰比或添加化學添加劑來降低其材料成本。

表 2.1、穩定性、凝固時間與黏滯度試驗之結果 (Mollamahmutoglu & Avci, 2015)

W/C Ratio	Bleeding	Initial / Final Setting Time	Flow Time	Viscosity
(-)	(%)	(min.)	(sec.)	(cPs)
0.8	0.00	360/440	52	45.05
1.0	0.00	370/467	41	24.50
1.2	1.33	433/693	37	15.99
1.5	2.67	455/930	34	8.33
*2.0	8.15	680/4058	33	2.61
*2.5	23.15	1625/22290	33	2.26
*3.0	29.17	2080/end of test	32	1.14
*3.5	35.44	8505/end of test	32	1.08
*4.0	40.00	9700/end of test	31	1.02
Specification	ASTM C940-98a	ASTM C191-04b	ASTM C939-02	

*由於懸浮漿液中的水泥量減少，導致凝固時間延長

Guo et al. (2021) 在執行多種土壤顆粒大小之灌漿試驗，在 D_{15} 範圍超過 0.723 公釐，且水灰比為 2 時，灌漿砂土目標相對密度 0、25、50、75 及 100 % 的灌漿皆能達到試體模具高度的 10 公分。

Avci and Mollamahmutoglu (2016) 使用無圍壓縮強度試驗對不同細砂含量、相對密度及水灰比的灌漿改良評估。圖 2.4 顯示，在不同水灰比和養護天數下，隨著水灰比每增加 0.5，7 至 28 天的養護期內強度上升的幅度逐漸趨緩。養護至 56 天後，強度幾乎完全發展。在養護 150 天時，細砂含量和土壤相對密度的影響趨勢穩定，並且可在細砂含量達 60 % 時，可以測得最高的強度（圖 2.5）。

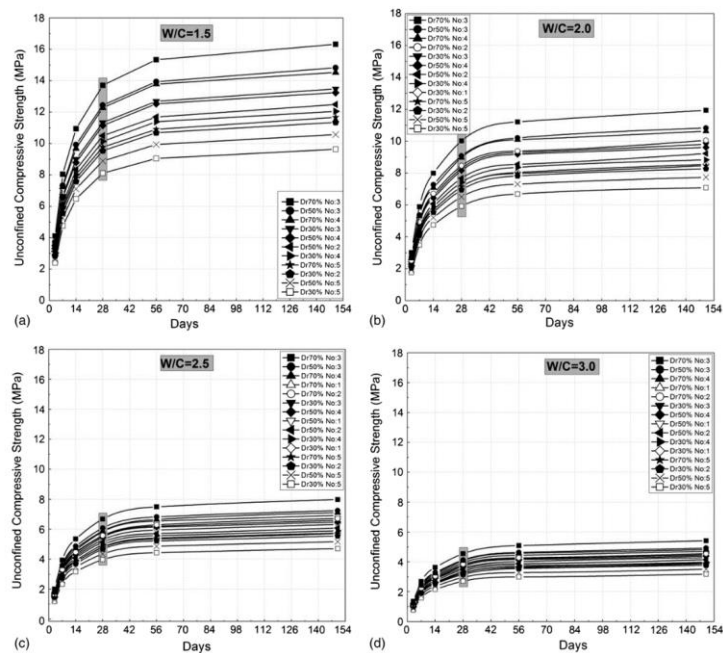


圖 2.4、不同水灰比對強度之影響 (Avci & Mollamahmutoglu, 2016)

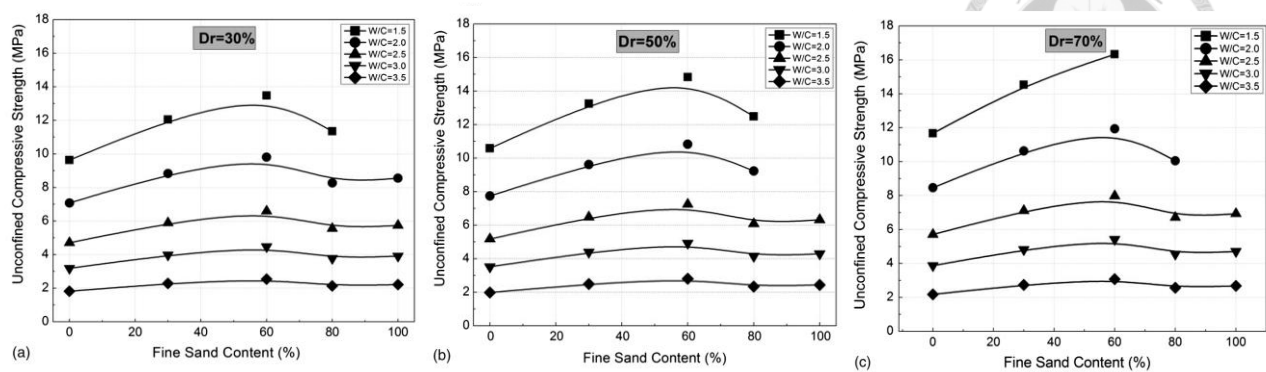


圖 2.5、細砂含量對無圍壓縮強度試驗在養護齡期為 150 天之影響 (Avci & Mollamahmutoglu, 2016)

Liu et al. (2023) 研究提出，使用低壓滲透灌漿需考慮土壤本身的滲透係數與改良漿液對於土壤之適用性，如圖 2.6 顯示超微細水泥所能應用之土壤範圍為礫石至細砂（土壤之滲透係數為 $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ m/s}$ ）；奈米二氧化矽溶膠則為中等砂土至粉土（土壤之滲透係數為 $10^{-3} \sim 10^{-6} \text{ m/s}$ ），相比傳統水泥與矽酸鈉之灌漿應用皆能滲透進土壤顆粒更細小的範圍。Zhang et al. (2019) 說明水泥-矽酸鈉-聚乙二醇（Cement-Sodium silicate - PEG, C-S-P）在土壤中的形成三維網片狀均勻散佈，相比水泥形成二維柱狀結構，C-S-P 改良漿液成達到更好的穩定性與抗壓強度（圖 2.7）。

Avci et al. (2021) 在無圍壓縮試驗中，以不同水灰比添加矽酸鈉評估其強度，如圖 2.8 所示，水灰比為 1，並且無添加矽酸鈉之改良試體在養護 85 天的抗壓強度為 16 MPa，當矽酸鈉含量提升，其改良試體之抗壓強度隨之發展更高，矽酸鈉添加量達到 5% 時，在相同養護天數其抗壓強度到達 20 MPa。表示矽酸鈉添加於超微細水泥基底之改良漿液有助於增加土壤抗壓強度。

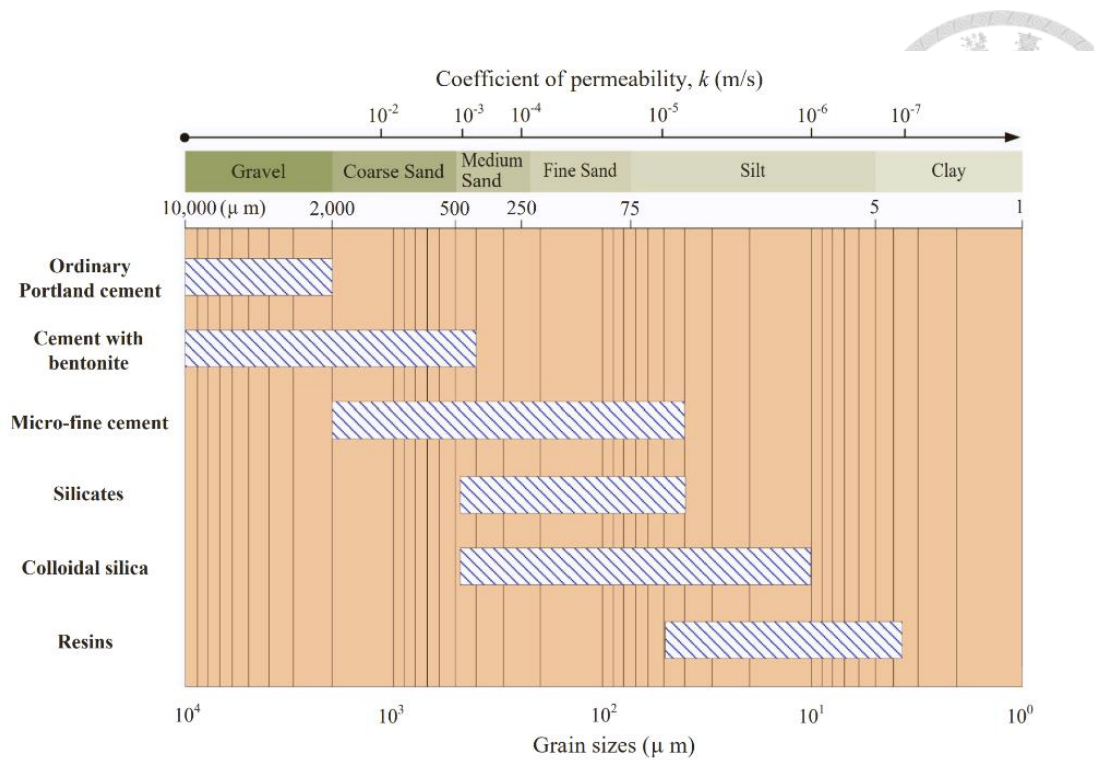


圖 2.6、土壤顆粒水力傳導係數對滲透灌漿應用範圍 (Liu et al., 2023)

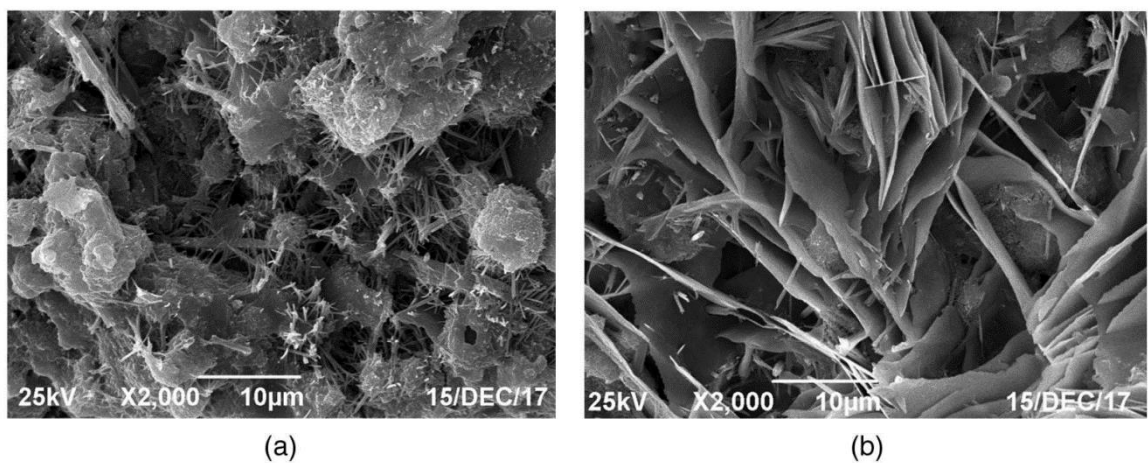


圖 2.7、掃描式電子顯微鏡 (SEM) 影像 (a) C-S-P (b)水泥漿液膠結情形

Zhang et al. (2019)

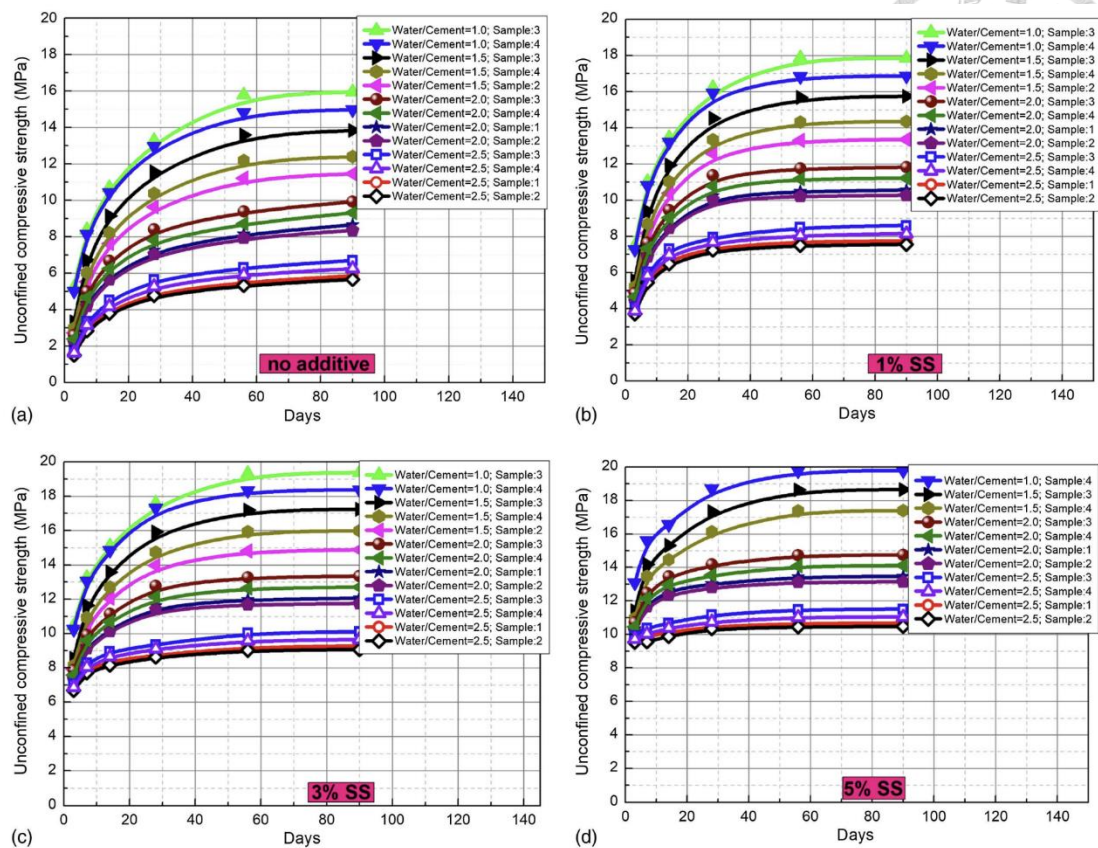


圖 2.8、改良試體在無圍壓縮強度隨養護天數之表現 (a) 無添加劑 (b) 1%矽酸鈉 (c) 3% 矽酸鈉 (d) 5%矽酸鈉 (Avci et al., 2021)

2.3 奈米二氧化矽溶膠介紹與應用

Xue (2018) 研究化學灌漿中，所使用的濃縮型矽酸鈉最早發明於 1886 年，由於矽酸鈉可藉由酸鹼中和反應能靈活地控制凝結時間，成為當時最常見的化學灌漿材料。而在工程領域的發展下，矽酸鈉作為改良材料注入地層，被廣泛應用於解決軟弱地層、地下工程和隧道工程止水與補強問題。現今的工程多數使用三號水玻璃(矽酸鈉)，由於矽酸鈉所含鈉離子(Na^+)，即使在添加硬化劑之後，無法完全置換水玻璃中的鈉離子，導致膠凝後殘留的鈉離子與水分子反應，形成強鹼的氫氧化鈉 (NaOH)，破壞已經成型的膠體，使得膠體隨時間溶解，因此認為水玻璃作為改良材料不具有耐久性。

為了解決矽酸鈉耐久性不佳的問題，開始注意到奈米二氧化矽溶膠 (Colloidal Silica)。矽

酸鈉與奈米二氧化矽溶膠的主要差異在於二氧化矽 (SiO_2) 和氧化鈉 (Na_2O) 的含量。通過二氧化矽與氧化鈉之比值，瞭解矽酸鈉的比值大約為 3 至 4，而奈米二氧化矽溶膠則通常超過 50。在對比奈米二氧化矽溶膠與矽酸鈉時，奈米二氧化矽溶膠，因為經過離子交換將鈉離子去除，再加入少量氫氧化鉀 (KOH)，促使離子間產生微弱排斥，使其能存於溶液中（通常是水）。藉由此奈米二氧化矽溶膠能提供最佳的長期穩定性和耐用性。

基於奈米二氧化矽溶膠達到奈米之尺寸，能有更好的滲透性，從而在細小裂縫中達到更有效的封堵。相較於傳統的基於有機分子的灌漿材料如矽酸鈉，奈米二氧化矽溶膠被認為具有較低的毒性，特別是在敏感地質應用中 (Sogaard et al., 2018)。而具體應用的性能和使用年限將取決於工程的要求和地層條件，如土壤的顆粒結構和濕潤-乾燥的反覆循環 (Xue, 2018)。

Liao et al. (2003) 在無圍壓縮強度中，奈米二氧化矽溶膠灌漿之試體經養護 7 天之後，其無圍壓縮強度為 113 kPa，而養護 28 天後，上升至 141 kPa（圖 2.9）。(Gallagher & Mitchell, 2002) 在砂土中添加其重量比的 5 至 20% 的奈米二氧化矽溶膠，由圖 2.10 之試驗結果，最高強度 36 psi (248kPa) 發生在奈米二氧化矽溶膠含量為 20% 時，表示當奈米二氧化矽溶膠填入土壤中的含量越多，其強度隨之增加。(Axelsson, 2006) 奈米二氧化矽溶膠灌漿至結晶岩在相對濕度 75% 時，其剪切強度會持續增加，並在六個月內持續上升，而其呈現比矽酸鈉更好的耐久性，而養護環境溫度及相對溼度，也為影響強度之因素（圖 2.9）。

(Gallagher & Mitchell, 2002) 在有效圍壓 100kPa 對奈米二氧化矽溶膠改良試體進行動態三軸試驗，將反覆剪應力比 (CSR) 設為 0.4，10 % 的奈米二氧化矽溶膠在 100 至 500 個循環剪切後，其應變量範圍為 2.5 % 至 4.5 %；15 % 與 20 % 之奈米二氧化矽溶膠含量，在 1000 個循環剪切後，應變僅在 1 % 的範圍變化，顯示奈米二氧化矽溶膠的改良減少土壤在循環荷載造成的變形量。

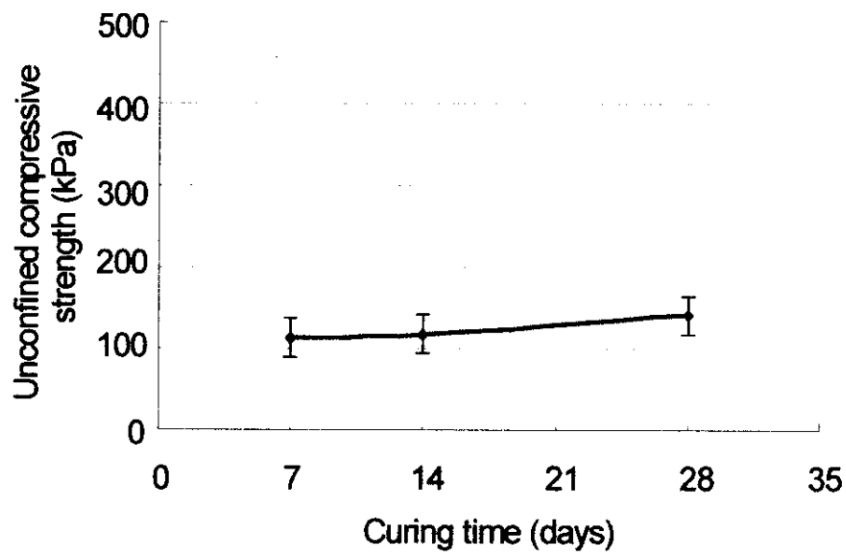


圖 2.9、奈米二氧化矽溶膠體灌漿之無圍壓縮強度 (Liao et al., 2003)

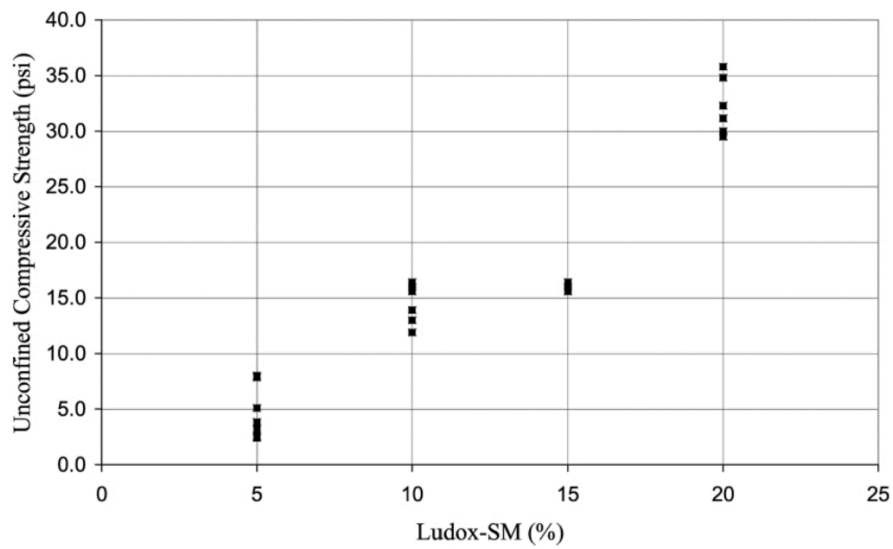


圖 2.10、奈米二氧化矽溶膠在砂土中含量對強度影響 (Gallagher & Mitchell, 2002)

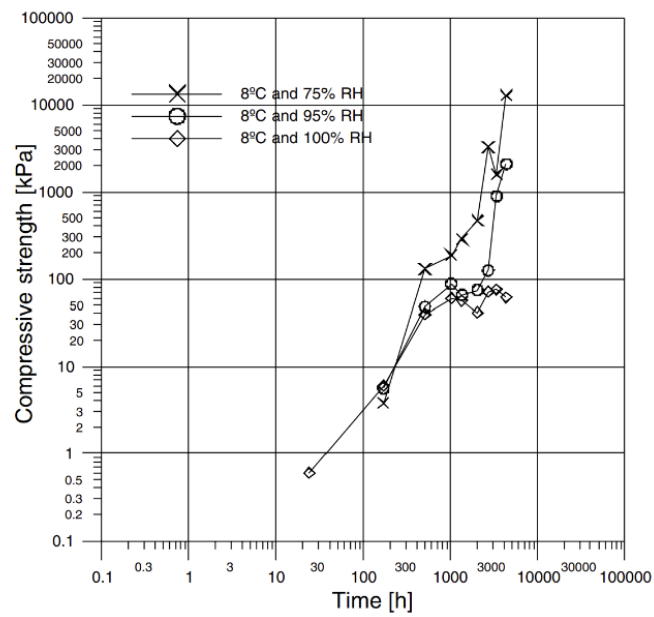


圖 2.11、奈米二氧化矽溶膠體灌漿之無圍壓縮強度 (Axelsson, 2006)

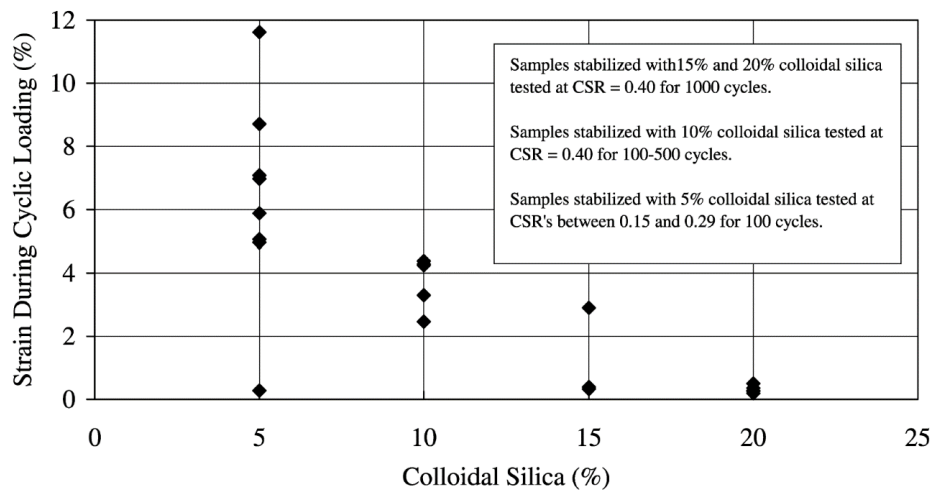


圖 2.12、奈米二氧化矽溶膠含量與循環荷載在 CSR 為 0.4 之行為 (Gallagher & Mitchell, 2002)



2.4 綜合討論

根據目前的文獻針對改良材料對於地盤改良之影響，可區分為三個變因，分別是改良材料之顆粒尺度、水灰比與化學添加劑含量與改良土壤之粒徑範圍。

超微細水泥可以改善其灌漿範圍與過濾現象引致的灌漿不均勻性。(Mollamahmutoglu & Avci, 2015) 與 (Avci & Mollamahmutoglu, 2016) 表示當水灰比上升時，凝固時間與泌水率皆會有增加之現象，而黏滯度與無圍壓縮強度則會有下降之趨勢；(Zhang et al., 2019) 與 (Avci et al., 2021) 之研究顯示在以超微細水泥為基底的溶液中加入化學添加劑，有助於在土壤顆粒之間建立更緻密的鍵結，使改良試體的抗壓強度提升。同時 (Björnström et al., 2004) 的研究指出添加奈米二氧化矽溶膠能在水泥水化反應時，加速其 C_3S 的化學反應，並促進 C-S-H 膠體產生。

對於改良試體，常見的力學性質評估為無圍壓縮強度試驗，而 (Gallagher & Mitchell, 2002) 使用動態三軸試驗分析奈米二氧化矽溶膠對循環荷載下的軸向應變改善，其結果顯示奈米二氧化矽溶膠添加砂土之含量越多，抵抗循環剪切引致的變形能力越好。



第 3 章灌漿材料與試驗方法

本章將介紹試驗材料、試驗儀器與步驟、土壤改良系統設備與開發與改良試體的試驗與步驟，其中包無圍壓縮強度試驗、動態三軸試驗、變水頭試驗儀器與步驟。

3.1 試驗材料

本研究所使用的材料包含砂土、超微細水泥與奈米二氧化矽溶膠，本節將分別介紹這三種材料。

3.1.1 砂土

本研究使用渥太華 20–30 級配標準砂 (ASTM Ottawa 20 - 30 Graded Sand)，根據 ASTM D6913，通過將土壤樣本放置於標準篩網中，並通過搖篩機振動使顆粒通過篩網，有效分離出不同粒徑的顆粒。其土壤粒徑大小在 2.00 至 0.075 公釐之間，由粒徑分布曲線圖 (圖 3.1) 可得出 D_{60} 、 D_{50} 、 D_{30} 及 D_{10} 分別為 0.746 公釐、0.719、0.665 公釐及 0.611 公釐，且均勻係數 C_u 為 1.83、曲率係數 C_d 為 0.66 (式 3.1 式 3.2)，因此本研究使用之渥太華標準砂為均勻級配，依照統一土壤分類法 (USCS) 屬於不良級配之砂土 (SP)。並且此標準砂歸類於中等砂顆粒土壤。

$$C_u = \frac{D_{30}}{D_{10}} \quad \text{式 3.1}$$

$$C_c = \frac{(D_{60})^2}{D_{30} \times D_{10}} \quad \text{式 3.2}$$

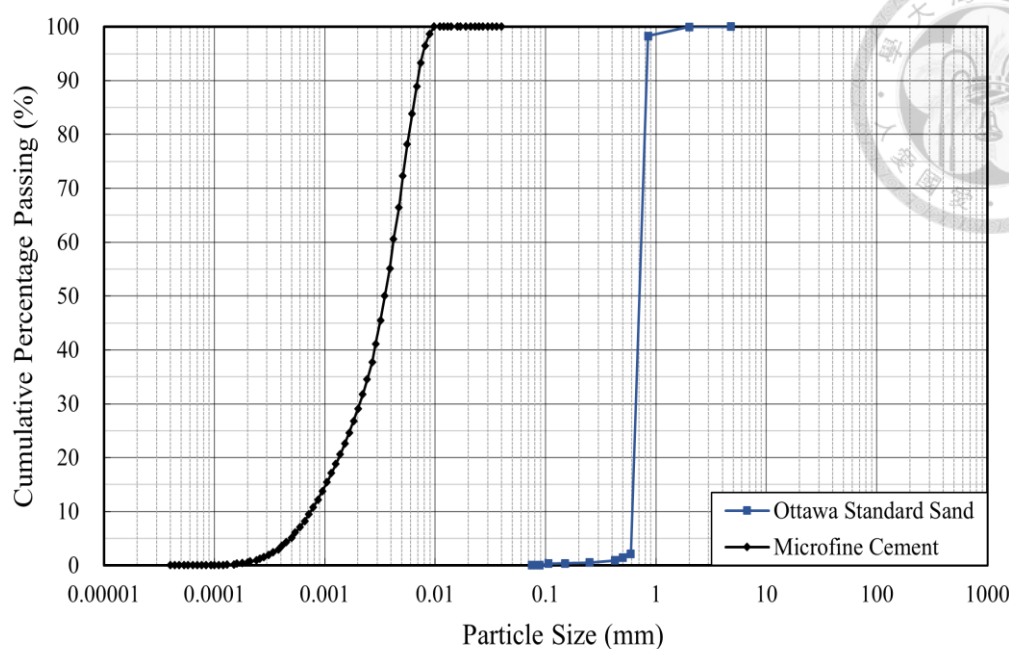


圖 3.1、材料粒徑分布曲線

3.1.2 超微細水泥

本研究所使用的超微細水泥 SikaGrout®-01 Ultra fine，由台灣西卡股份有限公司所提供。其材料成分如表 3.1，其原料為矽酸鹽熟料及煅燒油頁岩，摻配超細小之石灰石粉製作而成，由極微細的顆粒之級配所組成，因此容易拌和及泵送，具有優秀的流動。在水化過程中，水化反應中釋出氫氧化鈣提供鹼性的環境並保護金屬不受到侵蝕。超微細水泥亦適用於改良砂質土壤，並可用以填充破碎岩盤的細微裂縫。

超微細水泥粒徑分布由雷射光繞射粒徑分析獲得，由圖 3.1 粒徑分布曲線圖可得出 D_{95} 、 D_{85} 分別為 7.77 微米、6.34 微米。如表 3.1 所示，比表面積大於 $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，這些特性使其在高水灰比狀況下，仍能保持良好的滲透性和漿液穩定性。滲透灌漿在超微細水泥的應用，能有效填充岩盤間的孔隙，提升岩盤的承載力和改良漿液在灌漿時的滲透性質。灌注過程中，超微細水泥漿液能取代土壤中的孔隙和水，從而提升軟岩的強度。

表 3.1、超微細水泥 SikaGrout®-01 Ultra fine 之化學成分與物理性質

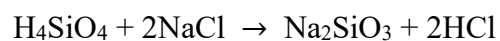
化學成分	含量	物理性質	數值與描述
氧化鈣 (CaO)	65%	密度 (kg/dm ³)	3 ± 0.15
二氧化矽 (SiO ₂)	12%	容積密度 (kg/dm ³)	1 ± 0.1
二氧化矽 (SiO ₂)	12%	比表面積 (cm ² /g)	> 8,000
石膏 (CaSO ₄ · H ₂ O)	7%	D ₉₅ (μm)	7.77
三氧化硫 (SO ₃)	3%	D ₉₀ (μm)	6.95
三氧化二鐵 (Fe ₂ O ₃)	3%	D ₈₅ (μm)	6.34
鋁酸鈉 (NaAlO ₂)	3%	D ₅₀ (μm)	2.13
氧化鋁 (Al ₂ O ₃)	2%	pH	7.7
二氧化鈦 (TiO ₂)	2%	水溶性 (%)	0.15 ~ 1.0
氧化鎂 (MgO)	1%	外觀和氣味	灰色粉末且無味
硫代硫酸鈉 (Na ₂ S ₂ O ₃)	1%		
三乙醇胺 ((HOCH ₂ CH ₂) ₃ N)	1%		

3.1.3 奈米二氧化矽溶膠

本研究所使用的奈米二氧化矽溶膠 Sikafume100 CS 是由台灣西卡股份有限公司提供。其成分如表 3.2 所示，其中固成分 (Solid Content) 占 30 之重量百分比 (wt%)。其組成為原硅酸 (H₄SiO₄) 與水，原硅酸由 Si 原子與 O 原子建構 SiO₄ 四面體單元 (圖 3.2)，元素單元之間相鄰的 Si 離子以矽氧烷鍵 (Si - O - Si) 鍵結。當奈米二氧化矽溶膠在水溶液中，因離子之間的電荷，能有效地分散於水中，致使元素間形成強大排斥力，粒子不易聚集且容易於儲存水中。

為使奈米尺度 (範圍為 2 ~ 100 nm) 下的二氧化矽凝聚成較大的膠體，需添加促凝劑產生膠凝機制，此機制屬於物理反應，促凝劑並不參與二氧化矽鍵結轉換，僅造成群體電荷不平衡，進而引發膠凝反應，其中促凝劑屬無機鹽，常見的有氯化鈉 (NaCl)、氯化鈣 (CaCl₂)、

氯化鎂 (MgCl_2) 和氯化鋇 (BaCl_2)。其中，本研究採用氯化鈉 (NaCl) 為促凝劑，其與原硅酸 (H_4SiO_4) 的化學反應式如式 3.3 所示：



式 3.3

奈米二氧化矽溶膠含有少量鈉離子 (Na^+)，奈米二氧化矽在某臨界鹽濃度 (Critical Salt Concentration)，因粒子之間的電荷，能有效的分散於水中，其粒子之間的距離約 7~22 奈米之間，而奈米顆粒的粒徑範圍為 2~100 nm 形成。此狀態下，奈米二氧化矽溶膠的黏滯度大約為 15~20 cPs，而純水的黏滯度約為 10 cPs (Gallagher et al., 2007)。

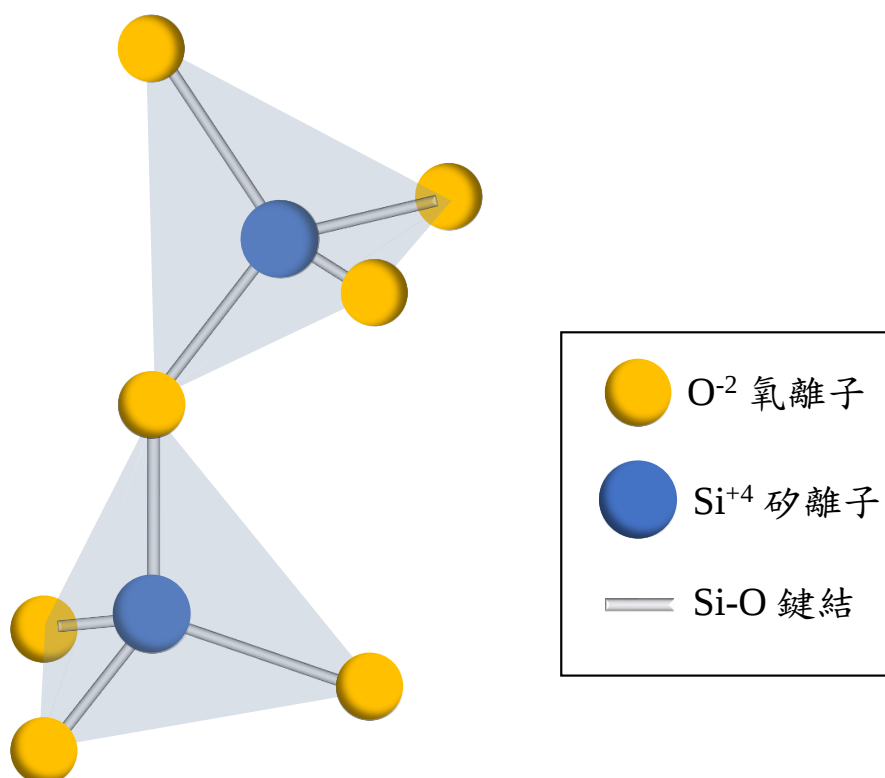


圖 3.2、二氧化矽四面體

表 3.2、奈米二氧化矽溶膠 Sikafume100 CS 的成分與基本性質

化學成分	固體成分 (wt%)	物理性質	數值與描述
二氧化矽 SiO ₂	30	粒徑 (nm)	7 ~ 22
水 H ₂ O	70	相對密度 (g/cm ³)	1.2 ± 0.1
		pH	9.5 ~ 9.8
		水溶性描述	可分散的
		外觀與顏色	輕微乳白色

3.2 試驗儀器與步驟

本章節將分別討論砂土之物理性試驗，包含前述所提及的篩分析試驗，比重試驗與相對密度試驗將由 3.2.1 節詳細介紹。改良漿液之基本材料性質試驗，將介紹凝固時間、泌水率與黏滯度試驗之設備與試驗步驟，於 3.2.2 節描述。

3.2.1 砂土基本物理性試驗儀器與步驟

比重 (Specific Gravity, G_s)，其定義為材料的單位體積重量與水單位體積重量之比值，有助於確定材料的密度、孔隙率等基本物理性質，石英砂的比重在 2.64 ~ 2.66 之間。根據 ASTM D0854 – 022 對渥太華 20—30 級配標準砂進行試驗。ASTM D0854 – 02 所使用之步驟由圖 3.3 所示 (a) 量秤比重空瓶和瓶栓、(b) 加入 50 公克之土樣，加入去離子水至瓶身 1/2 處，並使用加熱設備將水煮沸持續 30 分鐘後、(c) 將比重瓶加至滿水位，秤其冷卻後的總 (瓶 + 土 + 水 + 瓶栓) 重量、(d) 量秤 (瓶 + 滿水 + 瓶栓) 之重量。試驗結果顯示，經過溫度修正後比重為 2.653。

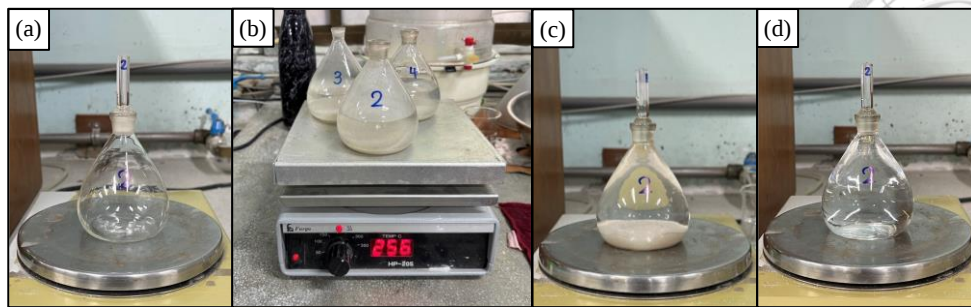


圖 3.3、比重試驗之步驟

相對密度 (Relative Density, D_r) 是用來表示土壤顆粒緊密程度的一個指標，如式 3.7 計算其相對密度，為獲取本研究所使用的渥太華砂之最大密度與最小密度，本研究選擇日本法 JSF (T26-81T) 以進行試驗。使用到的工具由圖 3.4 所示，由左至右 (a) 刮板、(b) 漏斗、(c) 2882.5 公克載重塊、(d) 試體模具延伸環、(e) 內徑 88.6 公釐及內高 45.3 公釐之試體模具、(f) 兩支橡皮槌。可得渥太華標準 20-30 級配砂之最大孔隙比為 0.742，最小孔隙比為 0.495，砂土的相對密度和緊密程度可由表 3.3 判斷，由於本研究選擇相對密度為 50%，作為力學試驗於砂土改良前後的評估，其指標為鬆散至中等緊密狀態。由式 3.4 與式 3.5 計算在目標相對密度之下，孔隙比 (e_{50}) 為 0.618 與孔隙率 (n_{50}) 之數值為 0.382。

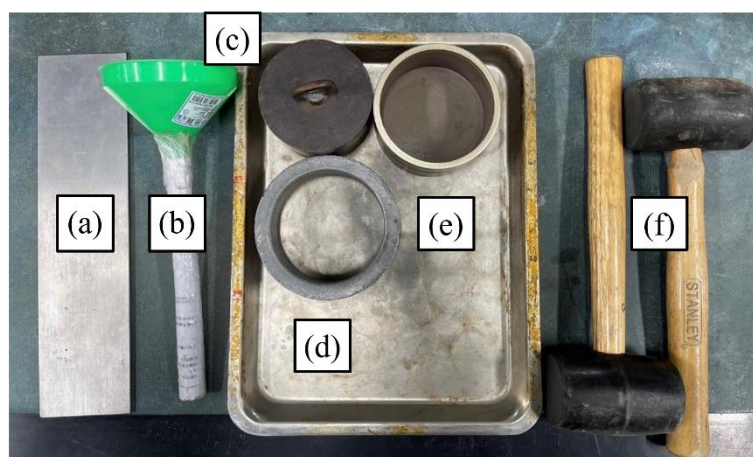


圖 3.4、日本法相對密度試驗儀 JSF (T26-81T)

表 3.3、相對密度與緊密程度之關係 (Das & Sobhan, 2014)

相對密度 D_r (%)	緊密程度
0 ~ 15	非常疏鬆
15 ~ 50	疏鬆
50 ~ 70	中等緊密
70 ~ 85	緊密
85 ~ 100	非常緊密



$$D_r (\%) = \frac{e_{\max} - e_{\text{current}}}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 \quad \text{式 3.4}$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad \text{式 3.5}$$

表 3.4、砂土基本物理性試驗結果

試驗名稱	物理性質	數值	試驗名稱	物理性質	數值
篩分析試驗	D_{60} (mm)	0.746	比重試驗	G_s	2.653
	D_{50} (mm)	0.719		$\gamma_{d,\max}$ (g/cm ³)	1.773
	D_{30} (mm)	0.665	相對密度試驗	$\gamma_{d,\min}$ (g/cm ³)	1.521
	D_{15} (mm)	0.625		$e_{\max}$	0.742
	D_{10} (mm)	0.611		$e_{\min}$	0.495
	C_u	1.221		e_{50}	0.619
	C_c	0.970		n_{50}	0.382

3.2.2 改良材料基本試驗與步驟

本小節將說明超微細水泥－奈米二氧化矽溶膠材料改良漿液之基本材料試驗與步驟，其詳細的試驗規劃如表 3.5 所示。



表 3.5、超微細水泥－奈米二氧化矽溶膠材料試驗配比

編號	水灰比	減水劑 (%)	奈米二氧化矽溶膠 (%)	氯化鈉溶液 (%)
WC2-PS1-CS0	2	1	0	0
WC2-PS1-CS5	2	1	5	0
WC2-PS1-CS10	2	1	10	0
WC2-PS1-CS15	2	1	15	0
WC2-PS1-CS20	2	1	20	0
WC0-PS0-CS100	0	0	100	12

由於水灰比將影響水泥材料之特性，須考慮奈米二氧化矽溶膠中 70 wt% 的水（表 3.2），欲確保水灰比固定為 2 的狀況下，在計算拌合水量時應考慮奈米二氧化矽溶膠中所含的水量，因此漿液計算舉例如下：

1. 編號 WC2-PS1-CS0

水灰比 = 2；總水量: 2000 g；超微細水泥: 1000 g

減水劑: $1000 \times 1\% = 10 \text{ g}$

2. 編號 WC2-PS1-CS20

水灰比 = 2；總水量: 2000 g；超微細水泥: 1000 g

減水劑: $1000 \times 1\% = 10 \text{ g}$

奈米二氧化矽溶膠 = $1000 \times 20\% = 200 \text{ g}$

→ 奈米二氧化矽溶膠含水量 70% = $200 \times 70\% = 140 \text{ g}$

實際稱水量 = $2000 - 140 = 1860 \text{ g}$

3. 編號 WC0-PS0-CS100

10 % 濃度之氯化鈉溶液



奈米二氧化矽溶膠添加 12 % NaCl₂ 溶液

奈米二氧化矽溶膠: 2000 g

氯化鈉溶液: $2000 \times 12 \% = 240 \text{ g}$

→ 10%氯化鈉溶液製作

→ 溶質/(溶質+溶液)=10 % =(240×10 %)/(24+216)=24/240

→取 24 g 鈉鹽加入 216 g 之蒸餾水製作成 10 % 氯化鈉溶液

改良漿液拌合儀器與步驟：

本研究所使用超微細水泥比表面積 $> 8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ，而比表面積越大，所需拌合水量越多，因為比表面積越大的水泥顆粒需要更多水來潤濕和進行水化反應，以確保均勻拌合和生成水化物。較高的比表面積會減少水泥漿料的流動性，適當調整水灰比對漿液和性能至關要。林任峰 (2005) 研究建議超微細水泥在攪拌時，攪拌機轉速應以高速或大於 1500 rpm 之速度拌合漿液。而本研究使用 F2—100B 中型攪拌機，以下為描述其規格儀器設備（表 3.6）、配比實驗流程及數據計算的依據。奈米二氧化矽溶膠漿液之準備，則是要注意與促凝劑混合過程是否造成結塊。

表 3.6、F2—100B 中型攪拌機詳細資料

設備零件	規格
電源/馬達	AC100V/140W
可變速範圍	200 ~ 3000 rpm
振動扭力	3 kgf.cm
尺寸	395 450 850 mm
攪拌棒與葉片	SUS304，8@500mm，渦輪葉片



超微細水泥基底漿液準備：

- (1) 材料備置：準備所須的足量材料，其詳細計算如 3.2.1 節說明。
- (2) 慢速拌合：以攪拌機運轉 500 rpm，逐漸加入拌合水的 2/3 水量，緩和倒入所有水泥，以低速攪拌的方式防止結塊。
- (3) 初步高速拌合：轉速調整至 1500 rpm，攪拌 2.5 分鐘，初步以高速攪拌，將超微細水泥顆粒潤濕。
- (4) 添加劑混合：轉速再次調整至 500 rpm，加入化學添加劑（如減水劑與奈米二氧化矽溶膠）及剩餘的 1/3 水量。
- (5) 高速攪拌：再次將攪拌機調至 1500 rpm，進行最後 2.5 分鐘的攪拌，確保改良材料均勻分布在漿液中。
- (6) 漿液完成：改良漿液完成，進行改良材料基本試驗（凝固時間、泌水率與黏滯度試驗），分配所須的漿液量以供測試。

奈米二氧化矽溶膠漿液準備：

- (1) 材料備置：準備所須的足量材料，其詳細計算如 3.2.1 節說明。
- (2) 材料混合：將奈米二氧化矽溶膠加入促凝劑中，添加過程中邊晃動裝著促凝劑之容器，避免產生不均勻之膠體結塊。
- (3) 漿液完成：改良漿液完成，進行改良材料基本試驗（凝固時間與黏滯度試驗），分配所須的漿液量以供測試。

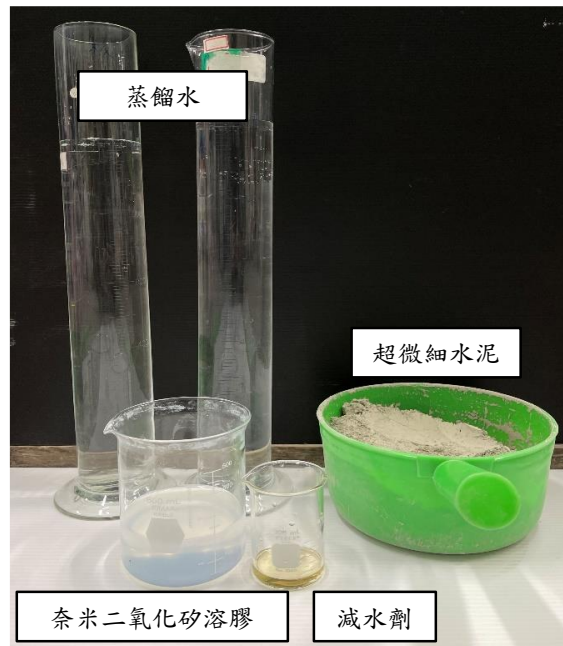


圖 3.5、超微細水泥基底漿液的所有材料

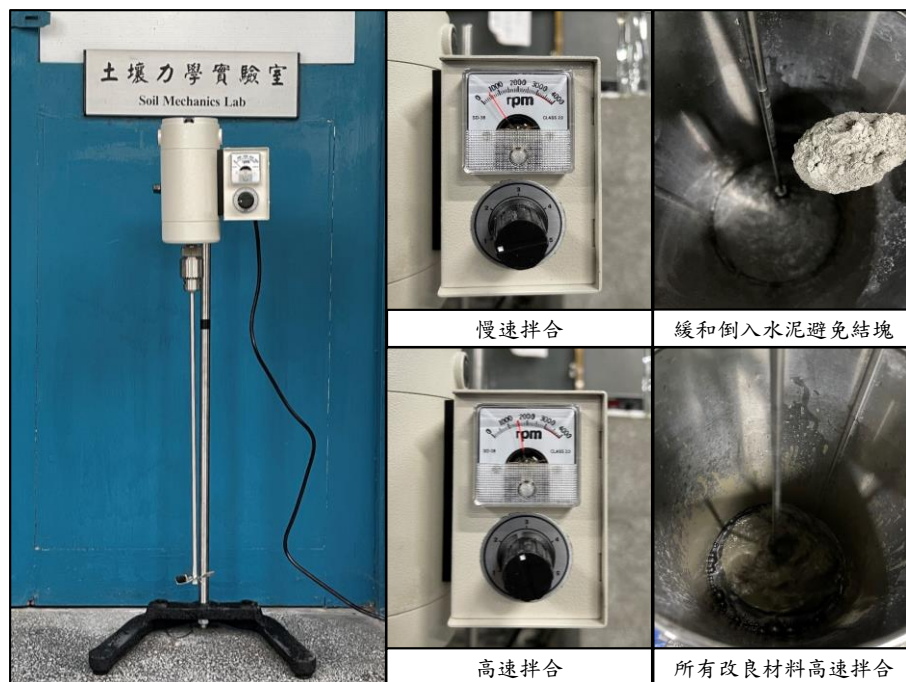


圖 3.6、F2-100B 中型攪拌機與改良漿液拌合

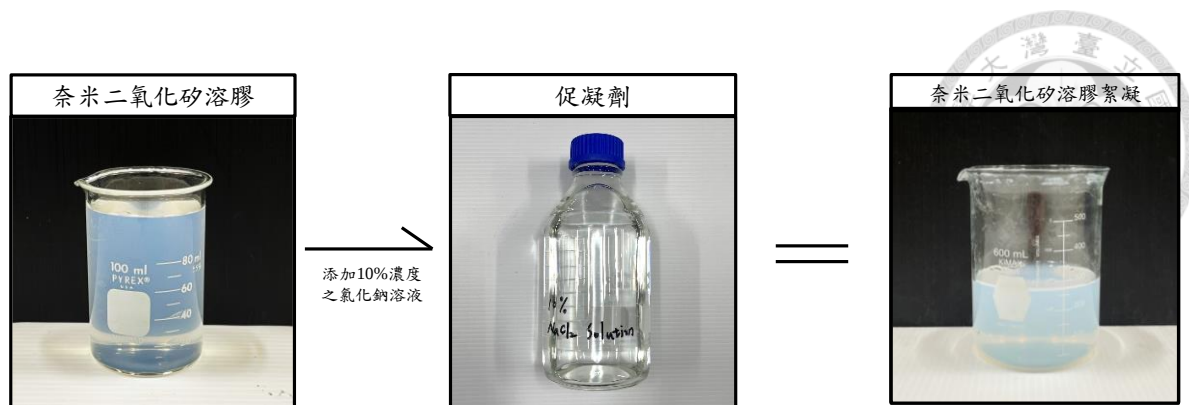


圖 3.7、奈米二氧化矽溶膠漿液準備

費開針氏儀器與步驟：

凝固時間試驗 (Setting Time Test) 測量水泥漿的初凝和終凝時間，確保實驗過程包括攪拌、灌漿和成型在初凝前完成，並在終凝後進行強度測試。Christodoulou et al. (2009) 研究說明，使用超微細水泥需要較高的水灰比以提升流動性。本研究使用水灰比為 2 之配比，相應調整試驗設備配置，為了能測定在高水灰比條件下的凝結時間，並遵循 BS EN 196-03 作為水泥凝結時間之參考規範，而本研究使用 HUMBOLDT 費開氏儀器、費開針型號為 H-3050，其規格儀器設備、配比實驗流程及數據計算的依據，以下為描述：

試驗儀器設備：

- (1) 支架：固定量測尺度和調節移動槓桿。
- (2) 移動槓桿：重量在 300 ± 1 公克，要能夠順暢垂直移動，避免過多磨擦。
- (3) 鋼製針：直徑為 1.13 ± 0.05 公釐，長度為 50 ± 1 公釐。
- (4) 塑膠模具：底部直徑 70 ± 1 公釐；上部直徑 60 ± 1 公釐、高度 40 ± 1 公釐之容器。

試驗步驟：

- (1) 費開針設置：將針放在用於測試的基板上，調整刻度到零。
- (2) 漿液備製：參考前述小節之拌合步驟，將漿液填充到塑膠模具中。
- (3) 讀取與紀錄：將裝有漿液的模具，待適當時間後 (圖 3.9)，將模具放置在費開針下，降下針頭，使其輕觸到漿液表面，讓針頭自由落下，觀察漿液的穿透程度，每隔 2 小時進

行一次測量並記錄，在同一試樣上的不同位置重複進行穿透測試，確保每個測試點至少距離模具邊緣或任何先前測試點 10 公釐。

- (4) 初凝時間：記錄針穿透到距離模具底面 4 ± 1 公釐處的時間，作為水泥的初凝時間，並取最接近的 5 分鐘進行四捨五入。
- (5) 終凝時間：重複測量直至費開針首次穿透試體表面 0.5 公釐的時間，此這個深度表示水泥的終凝時間。



圖 3.8、HUMBOLDT 費開氏儀器與試驗過程

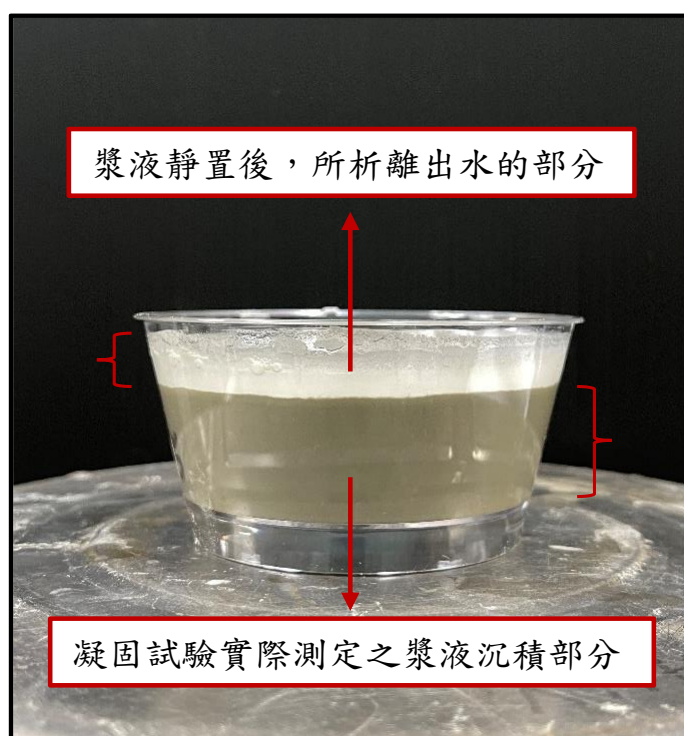


圖 3.9、量測凝固時間試驗之漿液

泌水試驗儀器與步驟：

泌水率試驗 (Bleeding Ratio Test)，由於重力作用，在水泥漿液裡水泥顆粒往下沉澱，較輕的水分子則上浮產生析離現象，導致漿液表面出現過量的水分，這種現象稱為泌水 (圖 3.10)。泌水過多會造成灌漿時漿液水灰比與黏滯度不均勻的狀況，使漿液難以有效地注入地盤中，進而影響灌漿的成效，因此為了提高灌漿的效率，需要盡量避免泌水現象。參照規範 ASTM C940 – 98a，試驗儀器設備、實驗流程及數據計算的依據。

試驗儀器設備：

- (1) 1000 毫升玻璃量筒，可精確至 10 毫升。
- (2) 保鮮膜：避免試過過程中，水分蒸散使測試樣品水灰比改變。

試驗步驟：



- (1) 漿液備製：參考前述小節之拌合步驟，拌合好漿液須在 3 分鐘內開始測量。
- (2) 倒入漿液至玻璃量筒中約 800 ± 10 毫升，玻璃量筒開口須封膜防止水分蒸發，並紀錄試驗開始時間。
- (3) 讀取與紀錄：前一小時，每 15 分鐘要紀錄一次量筒中刻度對應的漿體及泌水量，之後每小時紀錄一次（圖 3.10），直到數值不再變動，根據規範 ASTM C940-98a，試驗後 3 小時之數值應不再改變，視為漿液體積變化停止。

數據計算：

$$\text{Bleeding Ratio (\%)} = \frac{V_{\text{water}}}{V_{\text{all}}} \times 100 \quad \text{式 3.6}$$

V_{all} ：漿液總體積（mL）；

V_{water} ：析出水量（mL）；

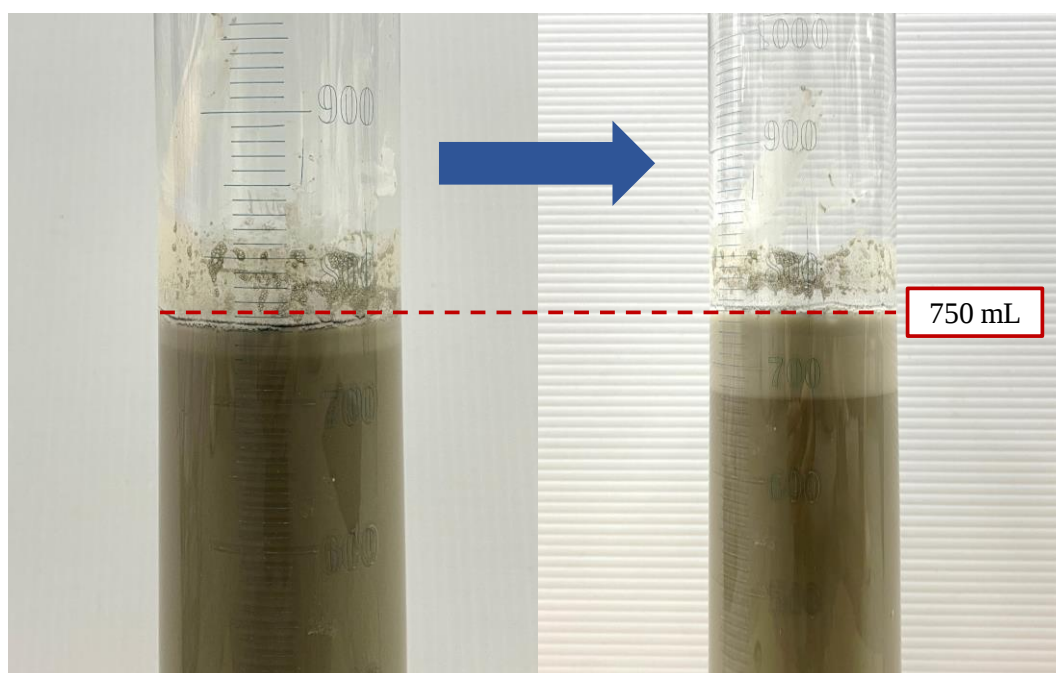


圖 3.10、泌水率試驗過程

黏滯度試驗儀器與步驟：

黏滯度試驗 (Viscosity Test) 用於量測漿液的流動性，在不同配比之下，反應出不同的流體性質。本研究所使用之儀器為 Brookfield Viscometer HAT，此儀器有 8 種轉速及原廠所附 4 轉針。不同的轉速與轉針之搭配對應合適的量測黏度範圍有所不同，，詳細參數的選擇可參考讀數對照表 3.7，其詳細的規格、儀器設備、配比實驗流程及數據計算的依據。

表 3.7、HA 系列黏度計之轉速與相對應黏度因數

轉速 (rpm)	轉針編號對應之黏度因數			
	No. 61	No. 62	No. 63	No. 64
0.3	200	1K	4K	20K
0.6	100	500	2K	10K
1.5	40	200	800	4K
3	20	100	400	2K
6	10	50	200	1K
12	5	25	100	500
30	2	10	40	200
60	1	5	20	100

*K=1000

試驗儀器與設備：

- (1) 旋轉黏度計 (Rotational Viscometer)：須具備驅動馬達、扭矩感測器、傳動軸、旋轉元件及支架 (圖 3.11)。
- (2) 玻璃燒杯 (Glass Beaker)：600 毫升之容量，於測試期間容納漿液，最小容量 500 毫升，最小直徑 85 公釐，最小深度 100 公釐 (圖 3.11)。
- (3) 轉針 (Spindle)：如圖 3.12 為原廠所附之 4 支轉針，型號由左至右為 No. 61、62、

63 及 64 (圖 3.12)，型號所代表轉針所建議適用之黏滯度測定範圍，本研究使用作為測定轉針 No. 61，其黏滯度測定範圍在 15 至 20K cPs。



試驗步驟：

- (1) 漿液備置：參考前述小節之拌合步驟，將漿液倒入 600 毫升之玻璃燒杯中等待 60 分鐘後量測。
- (2) 調整水平：試驗開始前，應利用三角螺旋將儀器調整至水平，再將轉針下降之待量測液體中，而轉針上有一處凹槽（圖 3.13）液體需切齊該處。
- (3) 讀取與紀錄：讀取鑒牌之讀數（圖 3.14），並根據轉速與轉針之選擇，參照與讀數對照表 3.7 取得轉換因子，經式 3.7 計算求得黏滯度。

數值計算：

$$\text{黏滯度 (cPs)} = \text{鑒牌讀數} \times \text{黏度因數} \quad \text{式 3.7}$$



圖 3.11、黏滯度試驗



圖 3.12、原廠所附之轉針

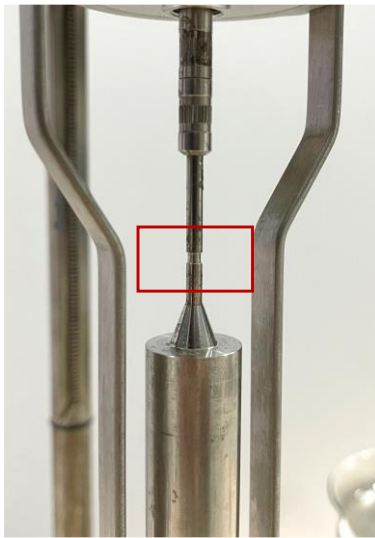


圖 3.13、轉針凹槽處



圖 3.14、鑒牌讀數

3.3 改良試體製作與設備開發

本研究為評估改良漿液對於砂土之改良效果，利用紙筒製作改良試體，經過養護後脫模，其改良試體表面均勻，有利於力學試驗的測試，因此本研究後續之改良試體將以此方法製作。另外本研究在實驗室建立低壓滲透灌漿系統，其中設備包含高速攪拌機、儲漿慢速拌合桶、壓力系統、試體模具與飽和系統，以利評估低壓滲透灌漿系統之效果。

3.3.1 紙筒製作改良試體

本研究砂土之目標相對密度為 50%，根據 3.1.1 中計算其對應的孔隙率為 0.382，三種漿液與砂土混和的用量如表 3.8 所示。而三種漿液配比分別為：純奈米二氧化矽溶膠的試體編號 WC-PS0-CS100，簡稱 PCS；純超微細水泥漿液，添加 1 % 減水劑的試體編號 WC2-PS1-CS0，簡稱 PWC2；添加 20 % 奈米二氧化矽溶膠的 WC2-PS1-CS20 試體，後續簡稱為 WC2-CS20。

試驗儀器與設備：

(1) 紙筒 (Paper Mold)：該紙筒平均內直徑為 73 公釐、高度為 159 公釐。



- (2) 高速攪拌機 (High-speed Mixer)：其詳細介紹於 3.2.2 小節，高速且均勻地混合水泥基底的灌漿材料。

試驗步驟：

- (1) 紙筒準備：以目標高度 150 公釐的尺寸，計算相對密度 50 % 之下所需的材料含量，試體準備資訊如表 3.8，於紙模內側噴上高油性離型劑，以避免脫模時改良材料殘留於紙模上。
- (2) 改良漿液製作：在高速攪拌機中加入所需的灌漿材料，如水泥、水和任何其他添加劑，高速攪拌至改良材料完全均勻混合；奈米二氧化矽溶膠漿液之準備如 3.2.1 節所提及。
- (3) 材料混合：將足量的改良漿液與砂土混合，分五層填入紙筒中，直到每一層到達指定高度（圖 3.15），最後一層將所有混合材料填入紙筒中。避免直接填入所有混合材料，因為重力會引致混合材料析離，導致改良效果不均勻。
- (4) 試體養護：靜置改良試體直至終凝，將紙筒外層小心撕開完成脫模（圖 3.16），然後將改良試體放入水中直至目標養護天數（圖 3.17）。

表 3.8、紙筒製作改良試體的配比表

編號	砂土量 (g)	改良漿液單位重 (g/cm ³)	改良漿液用量 (g)	改良試體目標單位重 (g/cm ³)
PCS	1032.439	1.180	282.814	2.095
PWC2		1.200	287.608	2.103
WC2-CS20		1.290	309.178	2.137

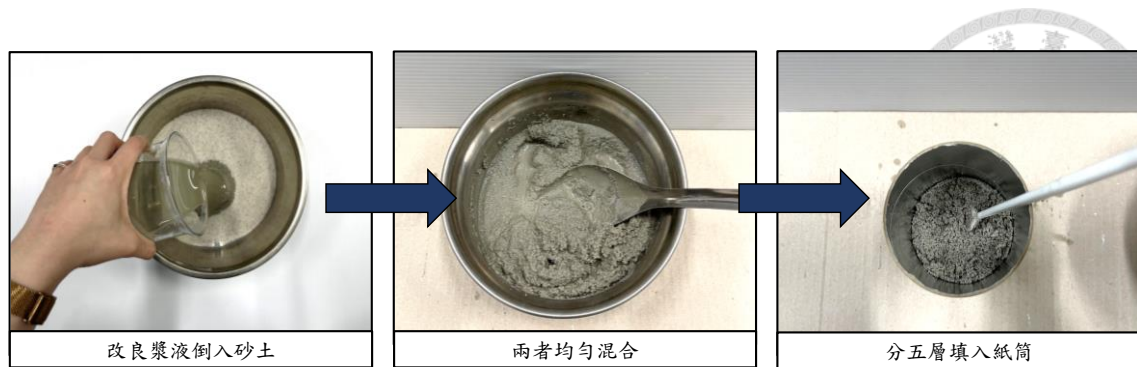


圖 3.15、改良漿液與砂土混合



圖 3.16、紙筒改良之外觀與效果



圖 3.17、改良試體養護於水中



3.3.2 滲透灌漿設備與步驟

本研究為評估低壓滲透灌漿於砂土之效果，開發部分設備，如儲漿慢速拌合桶與試體模具為本研究設計與開發，將在本節詳細說明。改良漿液與砂土用量如所示表 3.9。

試驗儀器與設備：

- (1) 高速攪拌機 (High-speed Mixer)：其詳細介紹於 3.2.2 小節，高速且均勻地混合水泥基底的灌漿材料 (圖 3.18)。
- (2) 儲漿慢速拌合桶 (Low-speed Grout Storage Mixer)：本研究開發之設備，用於存放已混和均勻的漿液 (圖 3.18)，在灌漿期間使用慢速攪拌，確保其均勻性，並且能接上壓力系統，由此設備灌漿至試體中。
- (3) 壓力系統 (Pressure System)：灌漿過程中提供目標壓力值，使改良漿液能有效地滲透到試體內部 (圖 3.19)。
- (4) 試體模具 (Specimen Mold)：用於提供未改良土壤之圍束力，並且模具應具備足夠的剛性，防止試體在灌漿時，因為輸入壓力而發生土體變形，其模具內直徑為 70 公釐、高度 160 公釐，其模具的體積為 615.752 立方公分，將其體積乘上目標孔隙率 0.382，為改良漿液所需替代砂土之孔隙體積，詳細用量如表 3.9。
- (5) 飽和系統 (Saturation System)：確保試體在灌漿前達到飽和狀態，以模擬實際條件下的灌漿效果 (圖 3.19)。

試驗步驟：

- (1) 準備試體：量測試體模具之內徑與高度 (圖 3.18)，填入目標相對密度之砂土重量，如所示，並組裝至模具為完全密合狀態，避免進行灌漿時發生漿液滲漏。
- (2) 飽和系統：使用飽和系統對模具內的砂土通水飽和，飽和系統與模具下端的閥連接，將除氣水通入模具中，保持上端閥打開，使砂土內的空氣能被排出，通水至上端閥的管線無氣泡出現，視為飽和完成，使砂土先飽和之目的是讓灌漿時，砂土顆粒之間的孔隙減少，提高漿液替代孔隙與水的效果。

- (3) 混合改良材料：在高速攪拌機中加入所需的灌漿材料，其詳細的材料備至如表 3.5 所示，高速攪拌至材料完全均勻混合，而試體所需的改良漿液量如表 3.9 所示，為了在灌漿期間避免灌入空氣，將會準備試體所需漿液的 1.5 至 2 倍，並且倒入儲漿慢速拌合桶中。
- (4) 儲存漿液：將改良漿液轉移到儲漿慢速拌合桶中，在慢速拌合桶中持續以 300 rpm 之轉速攪拌，防止漿液沉澱或分層（圖 3.20）。
- (5) 調整灌漿壓力：壓力系統調整至 0.5 kg/cm^2 ，並將壓力系統連接到儲漿慢速拌合桶。讓灌漿材料透過壓力輸送進入試體模具中的試體。
- (6) 灌漿過程：觀察是否有漿料從試體的另一端流出，以確認低壓滲透灌漿（圖 3.20）。
- (7) 完成與清理：灌漿完成後，關閉壓力系統。清理所有設備，特別是模具和儲漿桶，以防止灌漿材料硬化後難以清理。對試體進行後續的養護和試驗，以評估灌漿的效果和試體的性能。

由於超微細水泥終凝過後，改良漿液與金屬模具所產生之鍵結力，難以在脫模時以表面均勻的方式取出（圖 3.20），需要施加壓力取出改良試體，難以評估是否導致力學性質被影響，因此對於灌漿系統改善之建議，將在第五章結論與建議提及。

表 3.9、滲透灌漿試驗之試體配比表

編號	砂土量 (g)	漿液單位重 (g/cm^3)	漿液用量 (g)	改良試體目標單位重 (g/cm^3)
PCS	1012.613	1.180	277.384	2.095
PWC2		1.200	282.085	2.103
WC2-CS20		1.290	303.241	2.137

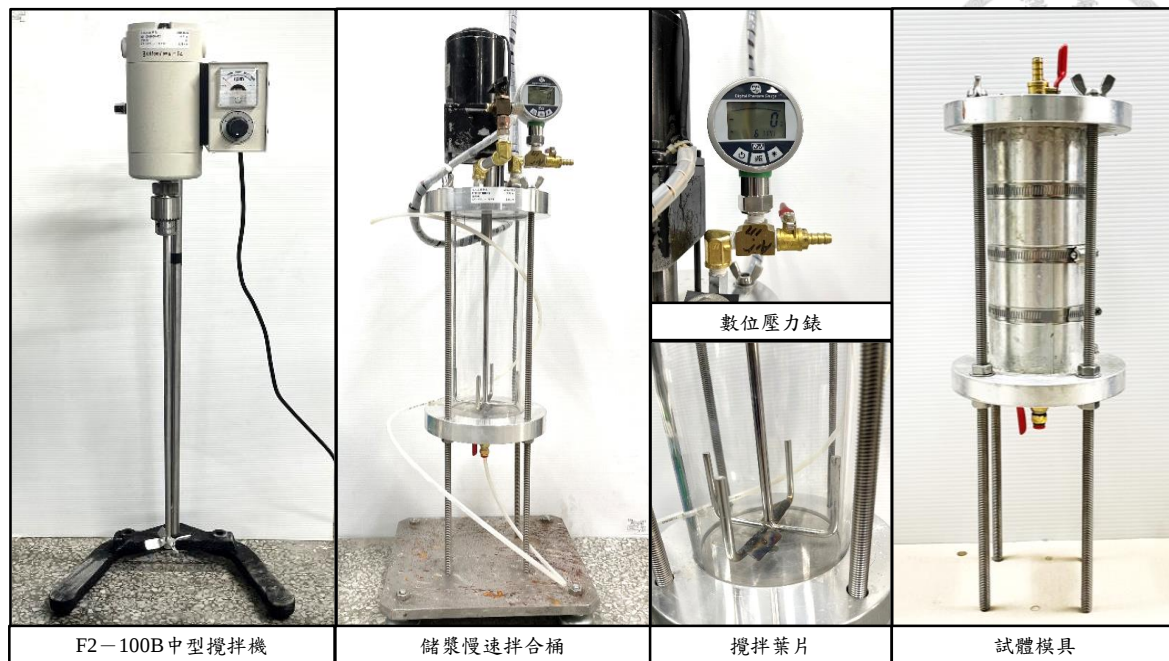


圖 3.18、灌漿設備

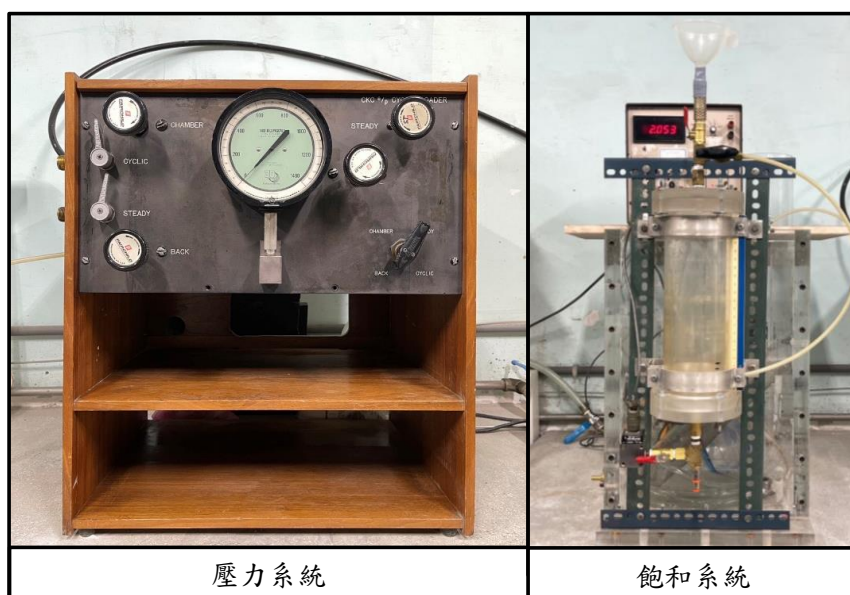


圖 3.19、氣壓系統與試體前置飽和設備



圖 3.20、滲透灌漿之過程與試體經養護後的結果

3.4 力學試驗與步驟

此節將會介紹力學試驗之設備與步驟，其中包含無圍壓縮試驗、動態三軸試驗與變水頭試驗，詳細內容在以下三個小節呈現。純奈米二氧化矽溶膠的試體編號 WC-PS0-CS100，簡稱 PCS；純超微細水泥漿液，添加 1 % 減水劑的試體編號 WC2-PS1-CS0，簡稱 PWC2；添加 20 % 奈米二氧化矽溶膠的 WC2-PS1-CS20 試體，後續簡稱為 WC2-CS20。

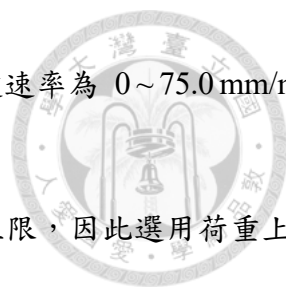
3.4.1 無圍壓縮強度試驗與步驟

無圍單壓試驗儀是一種用於測試材料抗壓強度的儀器，通過施加單軸壓力來評估材料的強度試驗。由於本研究之材料含有超微細水泥及奈米二氧化矽溶膠作為渥太華標準砂的改良材料，因此參照規範 ASTM D2166—06，決定改良試體尺寸、試驗儀器設備、實驗流程及數據計算的依據。

試驗儀器：

- (1) 三軸壓縮試驗機 (Triaxial Load Frame)：使用美國製造的 HUMBOLDT 5030 壓力機 (圖

3.21)，壓力施加上限為 11000 磅 (5 噸)，適用於應變控制，馬達速率為 0~75.0 mm/min，詳細數據如表 3.10

- 
- (2) 荷重元 (Load Cell)：為避免添加水泥的改良土體壓力強度超過上限，因此選用荷重上限為 5 噸的荷重元，如圖 3.22、荷重元與 LVDT 設備圖 3.22
 - (3) 顯示器 (Data Displayer)：顯示實驗中的荷重與 LVDT 數據，如圖 3.9。
 - (4) LVDT (Linear Variable Differential Transformer)：用於量測位移數據，最大位移上限為 50 mm。
 - (5) LVDT 活動板桿 (Transducer Mounting Brackets)：介於荷重元與上端平板之間，用於調整、固定 LVDT 之位置。
 - (6) 上、下端平板 (Upper and Lower Plates)：上端平板裝置於荷重元與 LVDT 活動板桿子之下；下端平板放置於壓力機底盤上，上、下端平板需大於試體。

試體尺寸：

為符合規範裡提及圓柱試體之高度與直徑之比值需介於 2.0~2.5，使用內部直徑 73 mm、內部高度 160 mm、內部亮面鋁箔、外部牛皮與底部封閉之紙筒來製作試體。

試驗步驟：

- (1) 試體尺寸：使用電子秤量測試體的重量，並使用游標卡尺量測試體之高度與直徑各三次後取平均，經計算後以取得試體之實際單位重。
- (2) 試體整平：將試體之上端鋪上石膏（圖 3.23），使試體與平板能平整接觸。
- (3) 試體轉移：待試體上端石膏硬化後，將試體移置壓力機的下端平板上，並控制壓力機將試體抬升至試體之上端與平板接觸，待顯示器上之力量值稍許上升後即可，以免力量值上升過多導致試體提早進入受壓狀態。
- (4) 調整距離：試體放置完成後，為確保 LVDT 能夠完整記錄實驗過程之位移，需藉由 LVDT 活動板桿子來調整其位置以預留實驗所需之位移量。



- (5) 紀錄試體：安置完成後，拍攝試體未受壓前之照片。
- (6) 試體剪切：根據 ASTM-D2166 規範裡規定，試驗過程需在 15 分鐘內完成，將速率設定為 1.27 mm/min，打開電腦裡記錄數據之軟體啟動實驗，紀錄荷重元與 LVDT 數值。

數據計算：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad \text{式 3.8}$$

ε : 試體軸向應變 (%) ;

ΔL : 試體軸向變形位移 (mm) ;

L_0 : 試體初始軸向長度 (mm) ;

$$A = \frac{A_0}{\left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right)} \quad \text{式 3.9}$$

A : 試體平均斷面積 (cm^2) ;

A_0 : 試體初始斷面積 (cm^2) ;

ε : 試體軸向應變 (%) ;

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad \text{式 3.10}$$

σ_c : 壓應力 (kPa) ;

P : 數據機紀錄荷重元測得力量值 (kN) ;

A : 試體平均斷面積 (m^2) ;

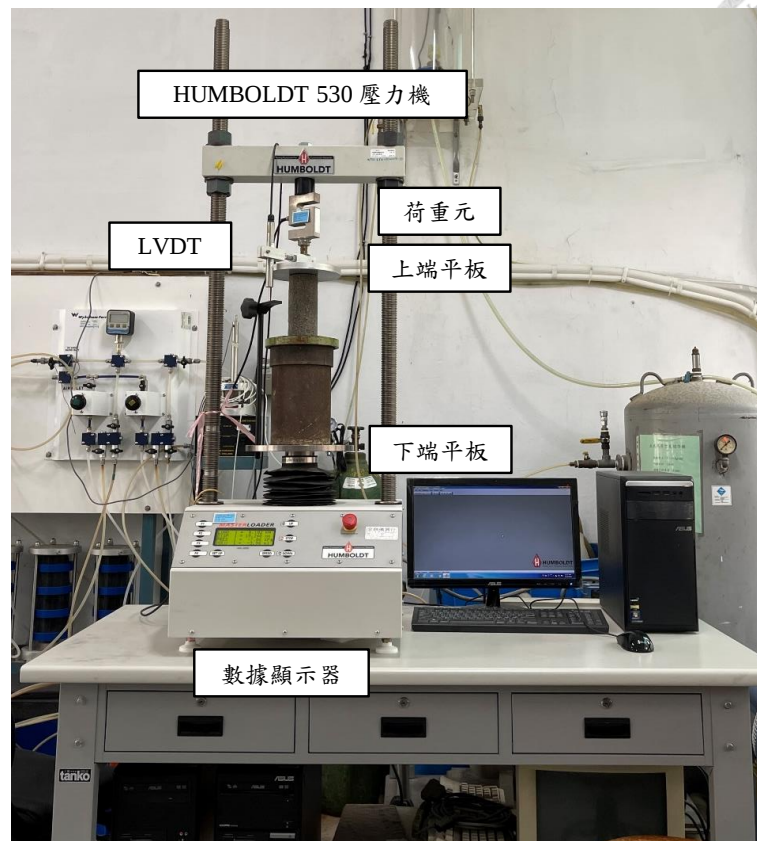


圖 3.21、無圍壓縮強度試驗

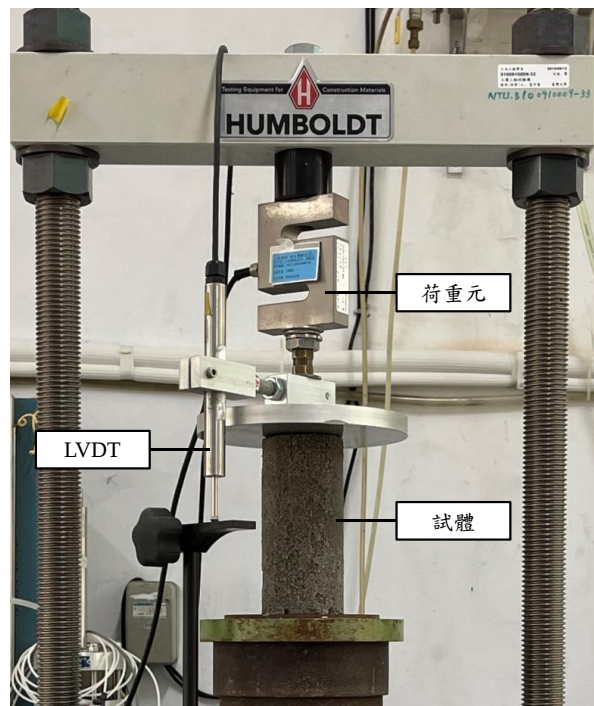


圖 3.22、荷重元與 LVDT 設備



圖 3.23、使用石膏將試體蓋平

表 3.10、HUMBOLDT 530 三軸壓縮試驗機型細資料

設備零件		規格
受力上限		11000 lbf (50kN)
速率		0.05 ~ 2.00000 inch/min (0 ~ 50.800000 mm/min)
資料管道		4
底盤大小		8 inch (203 mm)
資料容量		1000 個試驗, 每個試驗 3000 筆資料
電壓		110/220V, 50/60Hz – 5.0 amps
淨重		300 lbs (136 kg)



3.4.2 動態三軸試驗與步驟

本試驗所使用之動態三軸試驗儀為 Global Digital Systems Ltd (GDS) 所設計與製造，該系統於 2018 年 4 月購入，所使用之系統儀器皆有定期校正及查驗，以下為動態三軸系統的描述。

試驗儀器：

(1) 氣壓控制器 (Pneumatic Controller)：

透過輸出氣壓到三軸室內給予試體圍壓，使其在飽和過程中維持初始孔隙比。圖 3.25 為氣壓控制器之外觀。

(2) 壓力體積控制系統 (Pressure/Volume Controller)：

壓力體積控制系統總容量為 200000 立方公釐且可提供的最大壓力為 1 MPa，而本試驗所需的最大壓力為 700 kPa 小於其上限，符合使用標準。此系統透過水來提供試體反水壓，能夠檢測在飽和與壓密階段時試體中水量體積的變化（圖 3.26）。

(3) 壓力計 (Pressure Transducer)：

壓力計可測量的最大孔隙水壓上限為 1 MPa，該感測器會連接三軸試體的其中一個底閥以量測通過的水壓（圖 3.27）。

(4) 荷重系統 (Load System)：

由荷重傳感器 (Load Cell) 與荷重架 (Load Frame) 所組成。荷重傳感器量測試體軸向荷重值，其上限為 10 kN，荷重架為動態三軸儀之支撐架並且在動態加載時提供反力作用加以平衡。

(5) 驅動器 (Actuator)：

驅動器可透過齒輪轉動來控制動態三軸儀之位移以及加載，其最小位移量為 0.001 公釐，而當齒輪逆時針及順時針旋轉時可進行動態加載，其最高上限為 10 kN 的荷重和 5 Hz 的反覆荷重頻率。外觀如圖 3.28。

(6) 數據採集器 (Acquisition Pad)：

如圖 3.25 所示，此數據採集器提供 4 個資料通道並各擁有 16 位元高解析度資料傳輸量，可接收來自三軸裝置上的感測器及接收器的訊號，分別為氣壓控制器 (Pneumatic Controller)、壓力體積控制系統 (Pressure/Volume Controller)、壓力計 (Pressure Transducer) 以及驅動器 (Actuator)，並且可以藉由電腦中的 GDS 軟體來操控。

(7) 三軸室 (Triaxial Cell)：

本試驗所使用之三軸室，最高可承受 2 MPa 的壓力 (圖 3.30)。

(8) GDS 軟體 (GDSLAB Software)：

GDS 軟體可以藉由電腦控制所有連線的裝置，包含軸向位移、圍壓、反壓以及軸向壓力等等來幫助動態三軸試驗的進行。

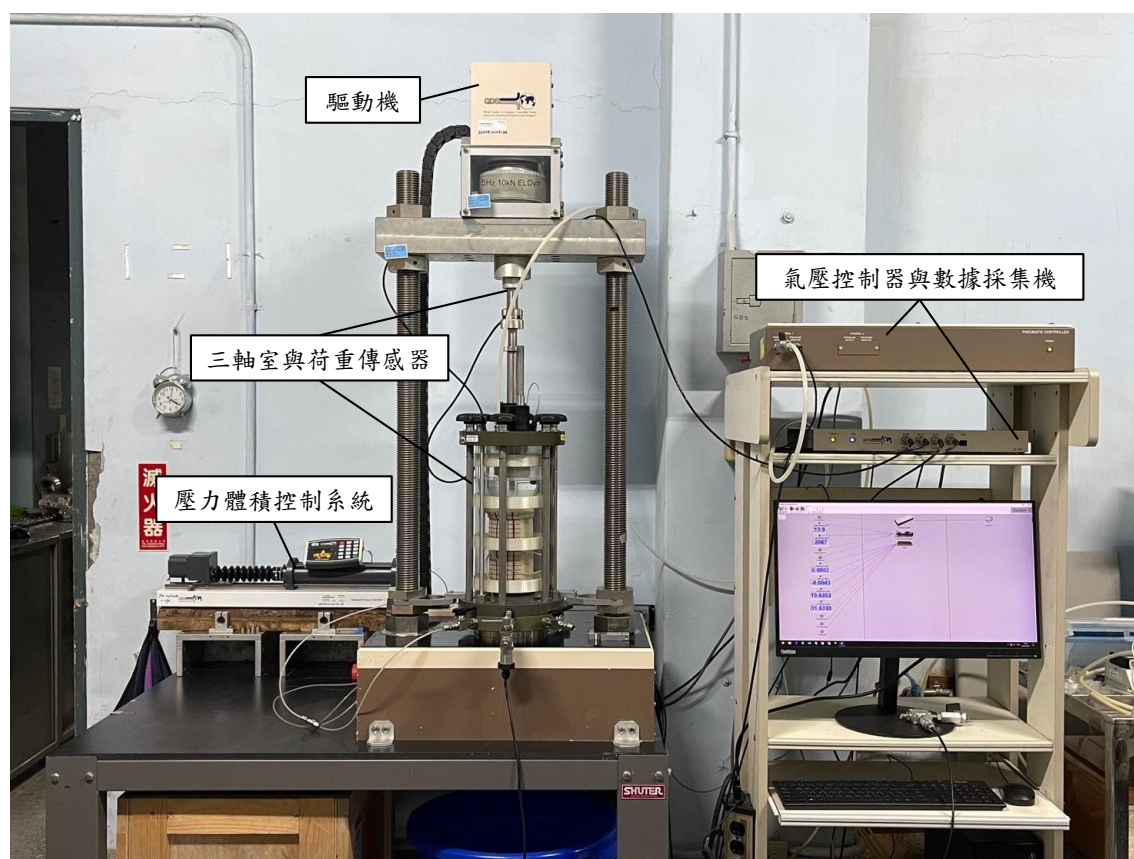


圖 3.24、動態三軸試驗設備



圖 3.25、氣壓控制器與數據採集器



圖 3.26、壓力體積控制系統

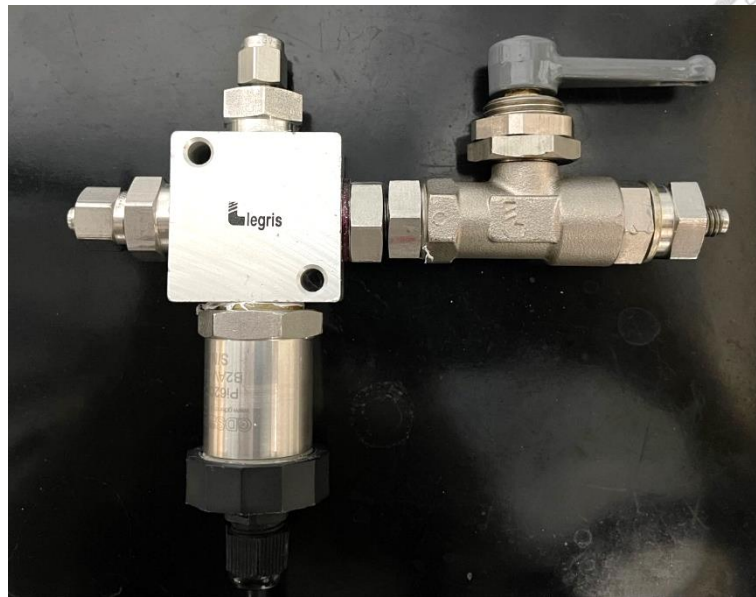


圖 3.27、壓力計



圖 3.28、驅動器



圖 3.29、絕緣膏

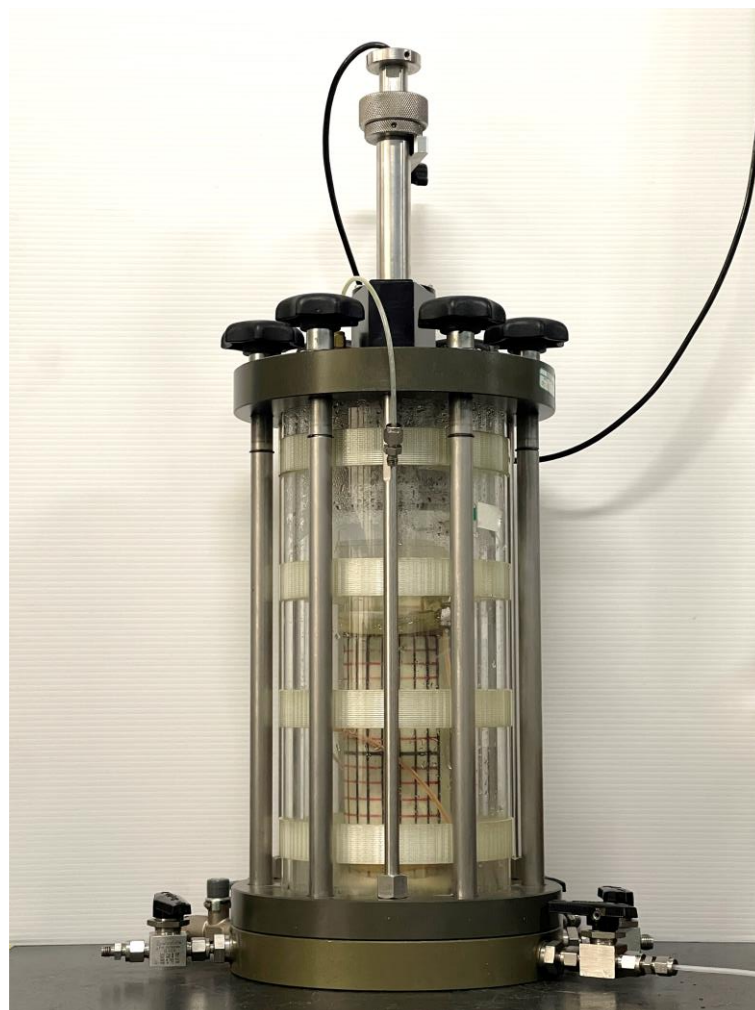


圖 3.30、三軸室



試驗前置作業：

- (1) 製作除氣水：將水加入水庫中並控制水不超過臨界標註記號，開啟真空抽氣機及水庫內馬達使其產生水波動排出水內空氣達到除氣效果過程約 1 小時，除氣完成後將水移至動三試驗儀器之水庫。
- (2) 橡皮膜測漏及厚度：試驗前須確保橡皮膜無破損，否則可能會造成圍壓從縫隙進入試體導致孔隙水壓不斷上升甚至造成試體變形而坍塌。測漏共可分成兩個部分，一為用手撐開橡皮膜於光源底下查看其兩端是否有透光，二為將橡皮膜用水填滿並握住兩端擠壓觀察有無水柱噴出，若有這兩種情況發生則為橡皮膜有破損需更換。並以儀器測量橡皮膜厚度，取其前中後段厚度加以平均。
- (3) 器材潔淨：確保三軸底座、橡皮膜、兩塊透水石、四條束制橡皮筋 O-ring 及兩橡皮帶皆無水無砂，底座以外之器材可清洗後以超音波機震盪進行更深層的清潔，特別是透水石的部分需進行至少兩次的震盪，主要原因為本研究大部分使用的是細顆粒材料因此容易造成透水石堵塞使其透水性下降。

重模試體製作：

- (1) 重模器架設：在三軸底座圓柱體處之外圍用圖 3.29 之絕緣膏塗上薄層，接著放上透水石並套上橡皮膜、兩條一粗一細的束制橡皮筋 O-ring 及一條橡皮帶，確保橡皮膜與底座之間無任何孔隙及土壤卡住的可能性。接著套上重膜器並以三條束制器鎖緊，頂部為避免尖端處割破橡皮膜可使用絕緣膠帶將接合處貼上，將橡皮膜拉緊外翻於重膜器上以抽器機進行抽氣使其貼平於重膜器並放入濾紙，完成架設後即可以測微尺量測重膜器內部高度及直徑獲得所需土壤重量。
- (2) 填置試體：砂土分五層均勻填入，並夯實到每層所需達到的高度，本試驗設定每顆試體高為 150 公釐因此每層高度為 30 公釐，層與層之間需刮花避免有介面不連續及分層明顯等情況（圖 3.31），當試體填至約第四層以後需使用到圖 3.32 之延伸環避免土壤滿出。將五層土壤都填置完成後依序放上濾紙、透水石及頂蓋，將頂蓋周圍塗上絕緣膏並以一



粗一細的束制橡皮筋 O-ring 及一條橡皮帶將橡皮膜與其固定完成重模試體，為減少試體與動三儀之荷重系統因過於歪斜無法順利接觸而使試驗失敗的情況，在上機前將會以水準氣泡儀放置在頂蓋上檢視其水平如圖 3.14 所示。

- (3) 試體自立：使用 20 kPa 的真空吸力使其可維持站立，否則試體將會在飽和階段通水通氣的過程中坍塌導致初始孔隙比改變。使用真空抽氣瓶連接三軸底座之頂閥進行抽氣直至抽氣瓶中無氣泡。確認抽氣完成後即可將重模器拆下，並以 π 尺量測試體上、中、下之直徑取其平均扣除橡皮膜厚度視為試體直徑，再以測微尺量測試體高扣除透水石、濾紙、頂蓋及底座高即為試體高，土重則是將原本裝土之空袋秤重取得袋中殘餘土量反算試體總重，如此便可得到試體真實初始孔隙比以及單位重。
- (4) 壓力轉換：如圖 3.33 所示將塑膠帽蓋戴於頂蓋上後調整其水平，將三軸室放置於底座並以螺旋桿鎖緊，試體移至動三荷重架以除氣水通入試體外圍直至淹沒頂蓋並使塑膠帽蓋中皆為除氣水後即可進行壓力轉換如圖 3.34。將氣壓控制器連接三軸室以每階 10 kPa 階梯式加壓使圍壓上升至 20 kPa，同時也以每階 10 kPa 階梯式洩壓解除真空吸力使真空抽氣瓶回復至大氣壓力。

改良試體上機步驟：

- (1) 試體量測：將改良試體從水缸中取出，量測重量與高度、直徑，取得改良試體實際單位重。
- (2) 轉移試體：底座之通路先充滿水，並且將透水石與濾紙泡置水中，避免過多空氣在通水飽和階段進入試體內。將透水石與濾紙貼在改良試體底部，小心將其放置底座上，再放上另外的透水石與濾紙。使用真空抽氣機吸住橡皮模，將橡皮模套入試體中，緩緩關閉真空抽氣機，使橡皮模與試體貼合。把四條一粗一細的束制橡皮筋 O-ring 及兩條橡皮帶將橡皮膜與其固定完成，最後放上頂蓋，即轉移完成改良試體。
- (3) 試體自立：使用 20 kPa 的真空吸力使其可維持站立，使用真空抽氣瓶連接三軸底座之頂閥進行抽氣直至抽氣瓶中無氣泡。

- (4) 壓力轉換：如圖 3.31 所示將塑膠帽蓋戴於頂蓋上後調整其水平，將三軸室放置於底座並以螺旋桿鎖緊，試體移至動三荷重架以除氣水通入試體外圍直至淹沒頂蓋並使塑膠帽蓋中皆為除氣水後即可進行壓力轉換如圖 3.32。將氣壓控制器連接三軸室以每階 10 kPa 階梯式加壓使圍壓上升至 20 kPa，同時也以每階 10 kPa 階梯式洩壓解除真空吸力使真空抽氣瓶回復至大氣壓力。

試體飽和：

此階段包含以下步驟，通氣、通水、反水壓加壓以及最後的檢測 B 值，並以此確保試體達到目標飽和度即可進入下一階段試體壓密。

- (1) 通氣：由純砂試體底部通入二氧化碳將土壤孔隙中之空氣排除並取代，原理為二氧化碳之比重大於空氣因此在進行此步驟時二氧化碳會沉在空氣之下，此外因為二氧化氮可溶於水因此可幫助試體更加容易達到飽和。固定通氣速率為 30 秒約 50 到 70 個泡泡，過程須注意不可讓孔隙水壓大於 10 kPa 否則恐導致試體變形，此階段建議進行至少 2 小時，其中前半小時將會透過反覆開關兩個底閥使孔隙水壓上升再開頂閥以加速試體內之空氣排出，之後則是將頂閥與底閥皆開啟使其在固定的孔隙水壓下進行通氣。若為改良試體將直接至步驟 (2)。
- (2) 通水：完成通氣後一樣由底部將除氣水以 1 分鐘 8 至 10 毫升的流量通入試體中直至頂閥持續有水流出。兩個底閥以 10 秒的頻率反覆開關配合頂閥使孔隙水壓維持在 10 kPa 以下，幫助除氣水由不同路徑通入試體中確保每個孔隙皆充滿著水，若為改良試體將直接進行通水。
- (3) 反水壓加壓：將頂閥及其中一個底閥連接壓力體積控制系統，連接前先將系統填入 4 顆左右的除氣水並將管線中的氣泡趕出避免空氣進入試體降低飽和度，連接完成後由 GDS 軟體 (GDSLAB Software) 操作給予試體反水壓 (Back Pressure)，首先輸入試體基本參數再設定目標反水壓以及達到目標反水壓的時間，在反水壓上升的同時可藉由設定使圍壓 (Cell Pressure) 同時跟進維持有效圍壓在一開始設定的 20 kPa，過程中可藉由體積控制系

統中的反水壓體積 (Back Volume) 觀察試體吸水速率，若是吸水速率過快恐導致試體受到過多擾動可嘗試拉長達目標反水壓之時間。

- (4) 檢測 B 值：此步驟以 B 值檢測飽和度， B 值為圍壓 (Cell Pressure) 差和孔隙水壓 (Pore Pressure) 差之比值，而當其大於 0.95 時則視為飽和可進入壓密階段。記錄方式為關閉所有三軸閥門並等待孔隙水壓穩定紀錄此時的圍壓及孔隙水壓，之後輸入增量 10 kPa 的圍壓一樣等其穩定再次記錄。

試體壓密：

由 GDS 軟體設定反水壓以及圍壓以此達到目標有效圍壓 100 kPa，同時開啟兩個排水閥使試體在設定中進行壓密直到壓力體積控制系統中的體積不再排水則可視為壓密完成。

動態強度試驗：

完成壓密後關閉閥門等待孔隙水壓穩定再使荷重傳感器 (Load Cell) 與試體接觸 (Docking) 進行動態強度試驗，其中拉長試體壓密時間可有效降低孔隙水壓穩定時間。

- (1) 接觸 (Docking)：藉由增加軸向荷載 (Axial Load) 以及抽取塑膠帽蓋中的圍壓水使荷重傳感器與試體之間呈現真空狀態。軸向荷載以 0.0005 kPa 階梯式增加，過程中孔隙水壓及荷重傳感器位移會隨著與試體間距離縮短而快速上升，為避免試體因過度擾動而影響到最後的結果，若最後軸向荷載超過 0.015 kPa 或是孔隙水壓差超過 10% 有效圍壓時都還未完成對接則視為接觸失敗。
- (2) 壓密：再此開閥壓密將多餘的孔隙水壓壓回原本的數值再關閥。
- (3) 動態強度試驗 (Dynamic Loading Test)：輸入反覆荷重頻率 0.1 Hz 之正弦載重波、振幅、壓密後試體高度及直徑開始進行動態強度試驗，直到有效圍壓為 0 或軸向應變至 10% 時，視為試體液化即停止試驗。



圖 3.31、砂土層之間表面刮花



圖 3.32、利用延伸環避免土壤滿出



圖 3.33、塑膠帽蓋戴於頂蓋



圖 3.34、壓力轉換



試體飽和：

3.4.3 變水頭試驗與步驟

本試驗所使用之變水頭試驗室為圖 3.35 所示之試體模具，滲透試驗儀則根據 ASTM D5084—16a 所建立（圖 3.35）。

試驗儀器：

- (1) 變水頭試驗室（Falling Head Triaxial Cell）：填入欲求得材料之容器，上下端需有控制閥提供滲透試驗執行，其試驗室內直徑為 70 公釐、高度 160 公釐（圖 3.35）。
- (2) 滲透試驗儀（Permeability Equipment）：兩根 1 公尺的玻璃管、水槽、控制閥組如圖 3.36 所示。
- (3) 溫度計（Thermometer）：用於測定試驗中的水溫。

前置作業：

- (1) 材料準備：量測變水頭試驗室內徑、高度與重量，並計算其所需砂土量與改良材料，其詳細計算如表 3.9。
- (2) 裝填材料：將材料分五層裝入變水頭透水試驗室內，每層均需輕輕地擊實，而每層之接觸面以軟刀加以輕劃幾次，加以擾動，填至最後一層時，以修整器或其他方式修整後，放入變水頭透水試驗室內量其總重量，與上述(1)步驟測得的重量之差值為測定材料的實際重量。
- (3) 試體飽和：將變水頭試驗室接於飽和系統（圖 3.19 圖 3.19、氣壓系統與試體前置飽和設備），以真空抽氣機抽出土樣內空氣，打開變水頭試驗室下端控制閥，使除汽水進入土樣內，直至土樣到達飽和情況為止。若為改良試體，待飽和後，放置指定養護天數，再開始接續的試驗步驟。

試驗步驟：

- 
- (1) 量測溫度：以溫度計測定水溫與室溫，以利在數據計算修正溫度造成的誤差。
 - (2) 選擇水頭：以豎立玻璃管刻度上選定 h_0 及 h_2 兩點，中間再取 $h_1 = \sqrt{h_0 h_2}$ 另作記號。
 - (3) 讀取與紀錄：旋開豎立玻璃管之控制閥，當水頭經 h_0 處開始記讀時間，而分別記讀經 h_1 及 h_2 所需時間。比較自 h_0 至 h_1 及自 h_1 至 h_2 所需時間，其時間相差宜在 2 % 或 3 % 之內。紀錄所量質量及時間於紀錄紙上。
 - (4) 消除誤差：選定三種不同起點水頭 h_0 ，重覆上述試驗。

數據計算：

$$k_T = \frac{al}{At} \ln \left[\frac{h_0}{h_2} \right] \quad \text{式 3.11}$$

k_T : 溫度 T °C 之下的滲透性係數 (cm/sec) ;

l : 試體高度 (cm) ;

a : 細管面積 (cm²) ;

A : 試體面積 (cm²) ;

h_0 : 起始水頭高 (cm) ;

h_2 : 最終水頭高 (cm) ;

t : 時間 (sec) ;

$$k_{20^\circ\text{C}} = k_T \frac{\mu_T}{\mu_{20^\circ\text{C}}} \quad \text{式 3.12}$$

$k_{20^\circ\text{C}}$: 溫度 20 °C 之下滲透性係數 (cm/sec) ;

k_T : 溫度 T °C 之下滲透性係數 (cm/sec) ;

μ_T : 溫度 T °C 之黏滯係數 (poise) ;

$\mu_{20^\circ\text{C}}$: 溫度 20 °C 之黏滯係數 (poise) ;



圖 3.35、變水頭試驗室



圖 3.36、滲透試驗儀

3.5 試驗規劃

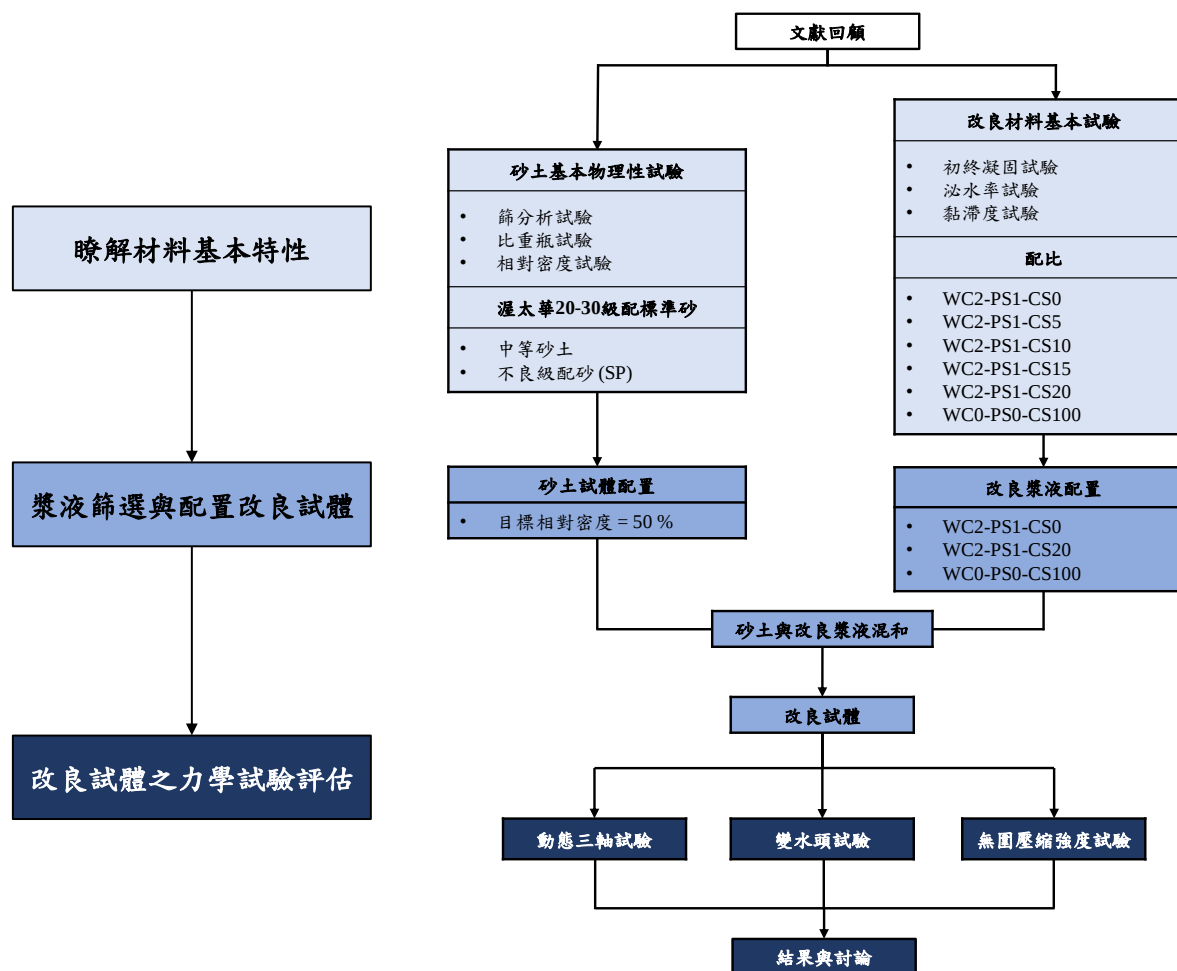
本研究的試驗主要分為三大部分。第一部分為試驗材料的基本材料性質試驗，包括砂土的比重、相對密度及改良材料的凝固時間、泌水率和黏滯度等基本性質的確立。第二部分為灌漿設備之開發與發展，由於本研究為了評估低壓滲透灌漿之改良效果，因此建立本實驗室的灌漿系統，而為了確保改良試體之均勻性及大量製作以提供後續的試驗使用，主要使用了紙筒改良法製作試體。本研究第三部分則進行力學試驗，討論不同改良漿液對砂土進行改良後的力學性質與行為，而試驗選擇無圍壓縮試驗、動態三軸試驗和變水頭試驗。考慮到使用的改良材料屬於近期發展出的新材料，本研究之變因為不同配比之下的改良材料特性，為避免混淆，兩部分基本材料試驗與力學試驗都將討論所選用的配比，並在流程圖中清晰地呈現試驗的計劃和步驟，相關的流程圖如圖 3.37 所示。

基本材料性質試驗包括篩分析、雷射光繞射分析，比重試驗和相對密度試驗，以獲得基本物理性質，如粒徑分佈、土壤分類、比重與最大最小孔隙比等。另外，確立相對密度 50% 時的乾單位重 (γ_{d50})、孔隙比 (e_{50})、孔隙率 (n_{50})。而超微細水泥和奈米二氧化矽溶膠的特

性通過費開氏儀器、旋轉氏黏度試驗儀和泌水試驗來測定。試驗中將純超微細水泥漿液(WC2-PS1-CS0)與添加不同比例(5%、10%、15%、20%)奈米二氧化矽溶膠的漿液(WC2-PS1-CS5、WC2-PS1-CS10、WC2-PS1-CS15、WC2-PS1-CS20)進行比較，並在超微細水泥基底添加 1% 減水劑以提升水泥顆粒的懸浮效率；純奈米二氧化矽溶膠則添加 12% 的氯化鈉溶液作為促凝劑調節 pH 值，因此以上六種配比獲得凝固時間、泌水率和黏滯度的數據。

超微細水泥顆粒為微米級，需要高速攪拌以確保顆粒充分濕潤，避免結塊。本研究開發的慢速拌合桶專用於儲存已混合均勻的灌漿漿液，避免漿液靜置時的不均勻性影響灌漿成效，並作為壓力系統與試體模具間的媒介，能以 0.5 kg/cm^2 (50 kPa) 壓力將漿液灌注到試體模具中。使用紙筒製作的試體表面光滑且相較於灌漿系統所製作之試體脫模成功率更高，有助於大量製作試體並且於後續力學試驗中專注討論改良材料的成效。

力學試驗包含無圍壓縮強度試驗、動態三軸試驗與變水頭試驗，將渥太華標準 20-30 級配砂以固定相對密度為 50% 進行改良，其變因包含純超微細水泥漿液(PWC2)、純奈米二氧化矽溶膠漿液(PCS)與超微細水泥-20%奈米二氧化矽溶膠之漿液(WC2-CS20)。無圍壓縮強度試驗中，將以上述提及的三種改良漿液分別養護 7、14 及 28 天，在軸向加載速率於 1.27 mm/min 的條件下獲得應力-應變曲線、尖峰強度值、尖峰強度值時的應變、尖峰強度增幅比值、脆性指數與尖峰強度之半的割線模數($E_{\text{sec}50}$)。動態三軸試驗之反覆荷重頻率設定為 0.1 Hz，有效圍壓設定為 100 kPa，先對純砂進行反覆剪應力比(CSR)為 0.325、0.338 及 0.340 之試驗，而在改良試體選用 CSR 為 0.338 時進行試驗，在以上的設定當中獲得軸向應變行為、超額孔隙水壓激發行為、遲滯迴圈與剛度評估，其詳細試驗資訊於表 3.11。變水頭試驗試驗與前述力學試驗的準備皆相同，將足量的改良漿液與目標砂土重量充分混和均勻，到入試體中養護 7 天，執行變水頭之試驗步驟，詳細試驗資料於表 3.11。



Water – Cement Ratio, WC：水灰比
 Polycarboxylate Superplasticizer, PS：減水劑
 Colloidal Silica, CS：奈米二氧化矽溶膠

圖 3.37、研究流程圖

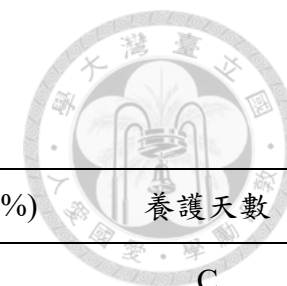


表 3.11、力學試驗試體編號

編號/代號	水灰比	減水劑 (%)	奈米二氧化矽溶膠 (%)	氯化鈉溶液 (%)	養護天數
	WC	PS	CS	NaCl	C
PCS-C7	0	0	100	12	7
PCS-C14	0	0	100	12	14
PCS-C28	0	0	100	12	28
PWC2-C7	2	1	0	0	7
PWC2-C14	2	1	0	0	14
PWC2-C28	2	1	0	0	28
WC2-CS20-C7	2	1	20	0	7
WC2-CS20-C14	2	1	20	0	14
WC2-CS20-C28	2	1	20	0	28

註解：PCS 代表純奈米二氧化矽溶膠漿液；PWC2 代表純超微細水泥漿液；WC2-CS20 代表超微細水泥—20%奈米二氧化矽溶膠漿液



第 4 章試驗結果與討論

4.1 改良漿液配比試驗

在本章節中，將會呈現改良材料配比試驗結果，這些試驗包括凝固時間、泌水率及黏滯度的試驗。由於研究目的用於土壤液化潛勢區與隧道補強工程，需要短時間內有高強度的表現，根據材料配比試驗，於 6 種改良漿液中，選擇凝固時間、泌水率改善最顯著的超微細水泥中添加 20% 奈米二氧化矽溶膠（WC2-PS1-CS20），並且與純超微細水泥（WC2-PS1-CS0）與純奈米二氧化矽溶膠（WC0-PS0-CS100）在力學試驗中比較其改良效果。

表 4.1、改良材料配比試驗結果

編號	奈米二氧化矽含量 (%)	單位重 (g/cm ³)	初凝時間 (hr)	終凝時間 (hr)	泌水率 (%)	黏滯度 (cPs)
WC2-PS1-CS0	0	1.20	20	36	29.31	41.67
WC2-PS1-CS5	5	1.25	16	31	28.97	137.50
WC2-PS1-CS10	10	1.28	13	31	25.00	295.00
WC2-PS1-CS15	15	1.29	11	29	20.37	250.00
WC2-PS1-CS20	20	1.29	9	26	20.11	1680.00
WC0-PS0-CS100	100	1.18	3	3	0.00	19740.00

凝固時間試驗係根據 BS EN 196—3 標準，本研究利用費開氏儀器測量水泥漿的凝固時間，試驗過程包括觀察水泥漿從開始混合到達到初凝和終凝時間的變化。在不同的材料配比下，其初凝時間和終凝時間存在顯著的差異。

泌水率試驗依據 ASTM C940—98a 標準，本研究進行了水泥漿的泌水率測試，將拌合完成的水泥漿放置於量筒中，靜置一段時間後，觀察並記錄泌出的水量。這項試驗可以反映水泥漿的穩定性和均勻性。試驗結果顯示，改良材料配比的水泥漿泌水率顯著降低，這表明其



具有較好的穩定性和均勻性，以提升改良試體的強度和耐久性。

黏滯度試驗按照 ASTM D2196—20 標準，本研究利用旋轉黏度計(如 Brookfield 黏度計)測試了水泥漿的黏滯度。試驗透過測量水泥漿在不同剪切速率下的剪切應力來計算黏滯度。試驗結果表明，改良材料配比的水泥漿黏滯度有所增加，黏滯度的提高可以改善漿液的填充效果。

4.1.1 凝固時間試驗

根據 BS EN 196—3 規範，利用費開氏儀器測量了改良漿液的凝固時間，在不同的材料配比下，水泥漿的初凝時間和終凝時間存在顯著差異。隨著膠體二氧化矽含量的增加，初凝時間從奈米二氧化矽含量為 0% 時的 20 小時，逐漸下降至膠體二氧化矽含量為 20% 時的 8 小時。同樣，終凝時間也呈現下降趨勢，從膠體二氧化矽含量為 0% 時的約 35 小時，逐漸減少至膠體二氧化矽含量為 20% 時的約 28 小時。這表明，增加膠體二氧化矽的含量會顯著加快水泥漿的凝固速度，初凝時間和終凝時間均顯著縮短。這一現象可以歸因於膠體二氧化矽在水泥水化反應中的加速作用。根據 Björnström et al. (2004) 研究，奈米二氧化矽溶膠通過加速水泥含量中的 C_3S (硅酸三鈣) 的溶解和促進 C-S-H 膠體形成以至於加速水化過程。奈米級的二氧化矽溶膠提供單體二氧化矽單元的聚合點，從而加速了水泥的凝固。

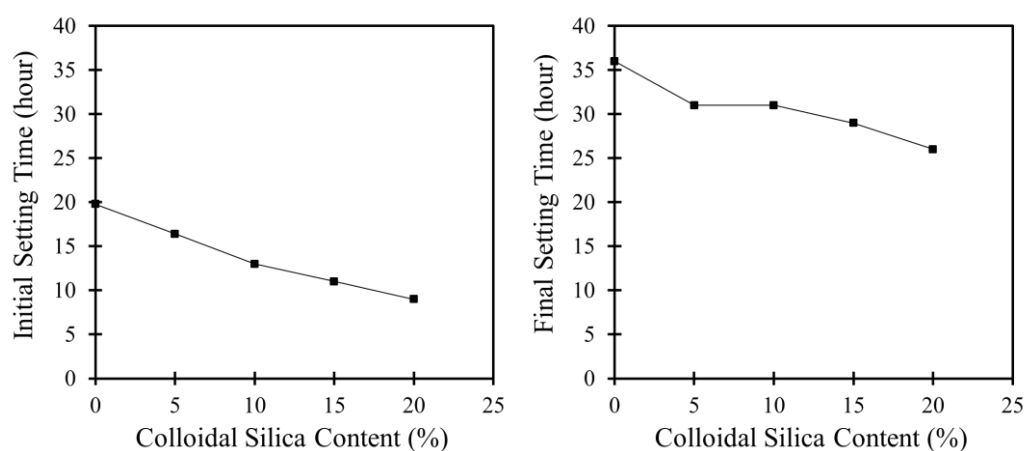


圖 4.1、凝固時間與奈米二氧化矽溶膠含量之關係



4.1.2 泌水率試驗

依據 ASTM C940—98a 規範，進行了超微細水泥基底改良漿液的泌水率測試。完成拌合的漿液被置於玻璃量筒中，依據規範建議的時間間隔靜置後，觀察並記錄泌出的水量。這項試驗可以反映水泥漿的穩定性和均勻性。

由圖 4.2 所示當奈米二氧化矽溶膠含量為 0% 時，泌水率約為 30%；含量為 5%時，泌水率略微降低至約 28%；含量為 10% 時，泌水率進一步下降至約 25%。當奈米二氧化矽溶膠含量為 15%時，泌水率約為 22%；當含量提高至 20%時，泌水率降至約 20%。隨著超微細水泥漿液中奈米二氧化矽溶膠添加量的提高，泌水率顯著降低，表明奈米二氧化矽溶膠能提供具有較好的穩定性，且泌水率的降低可以減少漿液結構中的空隙，提升改良體的強度和耐久性。

為了能比較改良漿液之間的漿液變化量對漿液正規化，對將隨時間變化之漿液體積除以初始漿液體積，圖 4.3 所示。隨著時間的推移，各配比的漿體體積均呈現下降趨勢，表示超微細水泥基底的漿液開始析離出水分，但下降幅度和速度有所不同，將時間區分為三個階段進行分析，在 0~200 分鐘的階段中，所有改良漿液均快速析離出水，其表示在此階段超微細水泥漿液體積的變化最不穩定；於 200~400 分鐘的階段中，體積變化的速度開始減緩，不同配比之下的試體，以 WC2-PS1-CS0 與 WC2-PS1-CS5 而言，在此階段仍有較多的體積變化量，相較於 WC2-PS1-CS10、WC2-PS1-CS15 和 WC2-PS1-CS20 之改良配比漿液則顯示出相對較小的體積變化；並且在 400 分鐘時，此三種配比的體積變化已達到規範所說的穩定狀態；最後 400~600 分鐘階段，除了 WC2-PS1-CS0 有體積變化外，其餘的配比皆已穩定。整體趨勢顯示，無添加任何的奈米二氧化矽溶膠的水泥漿液（WC2-PS1-CS0）與添加 20%的奈米二氧化矽溶膠的水泥，降低泌水率約 8%。因此隨著奈米二氧化矽溶膠含量的增加，水泥漿體積變化與所需達到體積穩定的時間明顯減少，表明奈米二氧化矽溶膠能有效提高水泥漿的穩定性，減少泌水率，改善高水比下，高泌水率的問題。

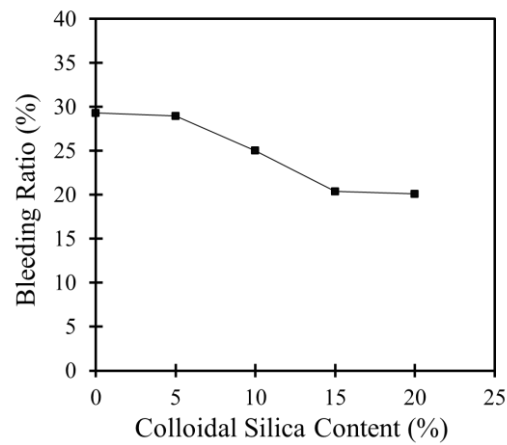


圖 4.2、泌水率與奈米二氧化矽溶膠含量之關係

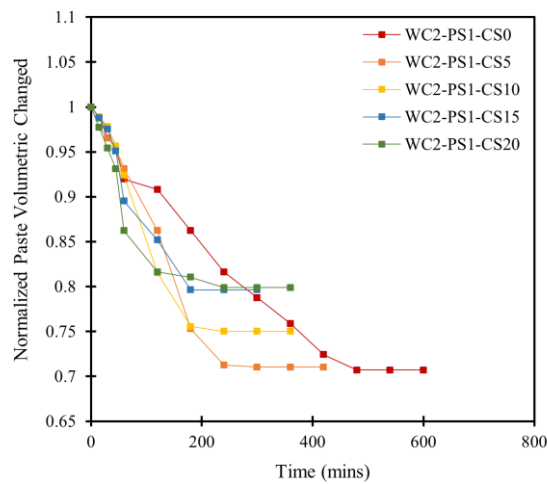


圖 4.3、漿體正規化與奈米二氧化矽溶膠含量之時間關係

4.1.3 黏滯度試驗

按照 ASTM D2196—20 標準，我們利用 Brookfield 旋轉黏度計測試了不同改良配比漿液的黏滯度。隨著奈米二氧化矽溶膠含量含量的提升，改良材料配比的水泥漿黏滯度有所增加，確保漿液在砂土顆粒間的均勻性會分佈的更加良好，並且產生較好的膠結能力。WC2-PS1-CS20 則是到達 1750 cPs，代表此配比的漿液的膠結能力相對更好。

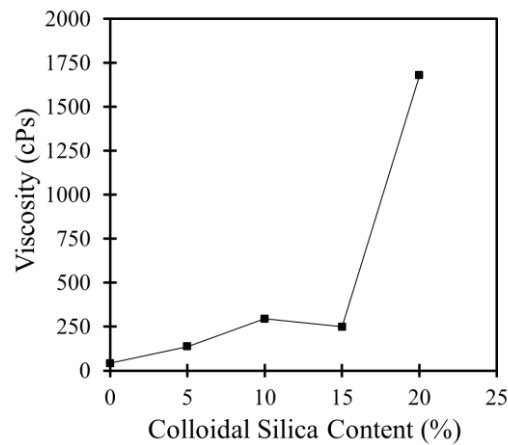


圖 4.4、黏滯度與超微細水泥-奈米二氧化矽溶膠含量之關係

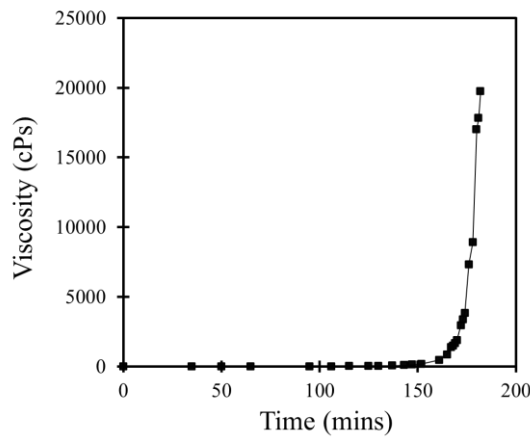


圖 4.5、奈米二氧化矽溶膠的黏滯度與時間之關係

WC0-PS0-CS100 漿液具有低黏滯度和高滲透性，其凝結過程受 pH 值和鹽類濃度的影響，在高 pH 值環境下，奈米二氧化矽溶膠穩定性較高，透過添加 12% 氯化鈉容易，使 pH 值下降時，在 150 分鐘後，黏滯度曲線呈現垂直上升的現象（圖 4.5），達到 1750 cPs，代表此漿液於短時間凝固，可以被應用於止水工程中。

通過凝固時間、泌水率和黏滯度試驗，我們可以全面評估改良材料配比的性質。試驗結果顯示，在超微細水泥中添加奈米二氧化矽溶膠能減少凝固時間與泌水率，但其超微細水泥基底漿液含有 20 % 奈米二氧化矽溶膠之黏滯度，在靜置 1 小時後的黏滯度增加，應用於灌漿時應注意灌注之時間控制。



4.2 無圍壓縮強度試驗

在無圍壓縮強度試驗結果與討論分為三個小結呈現其軸向加載速率準則、結果分析與改良試體之力學性質。砂土目標相對密度 50 % 之下，其乾單位重為 1.645 g/cm^3 所對應之孔隙率 (n_{50}) 為 0.382，計算將孔隙填滿所需之漿液量，各項規劃材料用量實際配比以表 3.8 所示。純奈米二氧化矽溶膠的試體編號 WC-PS0-CS100，簡稱 PCS；純超微細水泥漿液，添加 1 % 減水劑的試體編號 WC2-PS1-CS0，簡稱 PWC2；添加 20 % 奈米二氧化矽溶膠的 WC2-PS1-CS20 試體，後續簡稱為 WC2-CS20。

4.2.1 試體軸向加載速率之準則

本節將詳述無圍壓縮強度試驗相關之參數定義，以及進行加載後其破壞與否之判定標準。控制軸向應變加載速率對於無圍壓縮強度試驗的相當重要。標準化測試條件能確保試驗結果的可重複性和比較性，由於不同的加載速率會影響材料的力學行為，而合適的軸向應變速率可以防止試樣在發展到極限抗壓前即發生過早的破壞，從而提高試驗的準確性和確保實驗數據的正確性。根據 ASTM—D2166—06 施加荷載以產生軸向應變，速率為每分鐘 0.5 到 2 % 的改良試體高度，或繼續加載直到達到 15 % 的應變，加載時間應不超過 15 分鐘。試驗過程中持續記錄加載力量、變形，其時間間隔要足以定義應力-應變曲線。假設試體平均高度為 150 公分，根據式 4.1 計算其軸向加載速率，軸向加載速率介於 0.05~1.50 mm/min。而本研究所使用的軸向應變加載速率為 1.27 mm/min。

$$\text{軸向加載速率 (mm/min)} = \frac{\Delta\delta}{\Delta t} \quad \text{式 4.1}$$

$\Delta\delta$: 軸向應變的增量；

Δt : 時間增量；



4.2.2 無圍壓縮強度試驗結果

根據 3.5 節所提及的試驗規劃，控制變因為不同的改良漿液之配比及養護天數。根據圖 4.6 圖 4.7 圖 4.8 圖 4.9，顯示三種改良漿液皆隨著養護天數增加而提高尖峰強度。

表 4.2、無圍壓縮強度試驗結果

試體編號	養護天數	實際單位重 (g/cm ³)	尖峰強度 (kPa)	尖峰強度 發生時的	E_{sec50} (MPa)	脆性指數 (-)
				應變 (%)		
PCS-C7	7	1.965	34.46	0.83	15.88	0.34
PCS -C14	14	1.961	47.65	0.78	14.98	0.18
PCS -C28	28	1.969	69.15	0.84	23.57	0.20
PWC2-C7	7	2.031	789.88	0.68	123.51	0.12
PWC2-C14	14	2.033	1289.55	1.29	119.94	0.86
PWC2-C28	28	1.980	1610.25	0.73	401.70	0.97
WC2-CS20-C7	7	1.960	1486.85	0.65	457.90	0.95
WC2-CS20-C14	14	1.930	2173.13	0.68	251.08	0.94
WC2-CS20-C28	28	2.004	2930.10	0.44	1644.29	0.98

4.2.3 改良試體力學性質

觀察養護 7、14 及 28 天的改良漿液在無圍壓縮強度與養護齡期之關係圖中，三種漿液配比的尖峰強度皆隨養護齡期增加而提升。如表 4.2 所示，相較於 PWC2 試體，PCS 改良試體的尖峰強度顯示出對砂土的膠結能力較低，不易承受較大的荷載。而在 WC2-CS20 改良試體中，在各養護齡期上相較於 PWC2 系列試體，顯著增加的尖峰強度表明了奈米二氧化矽溶膠與超微細水泥混合後產生的化學作用所形成的鍵結能力優於 PWC2 和 PCS 之改良漿液。

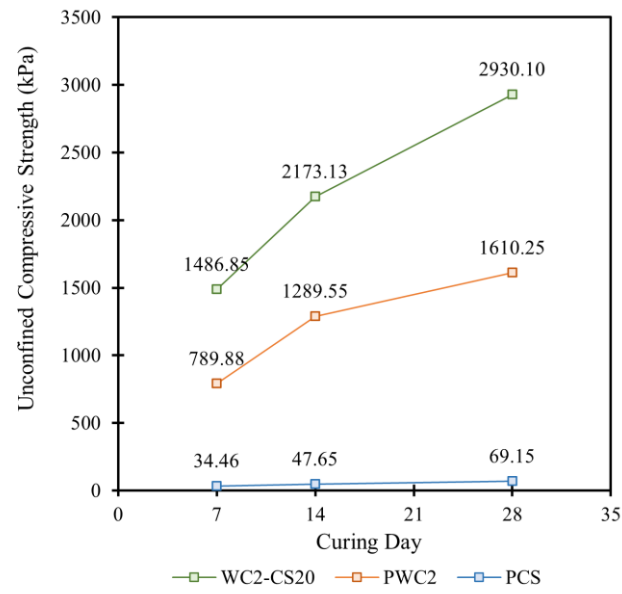


圖 4.6、無圍壓縮強度與養護齡期之關係圖

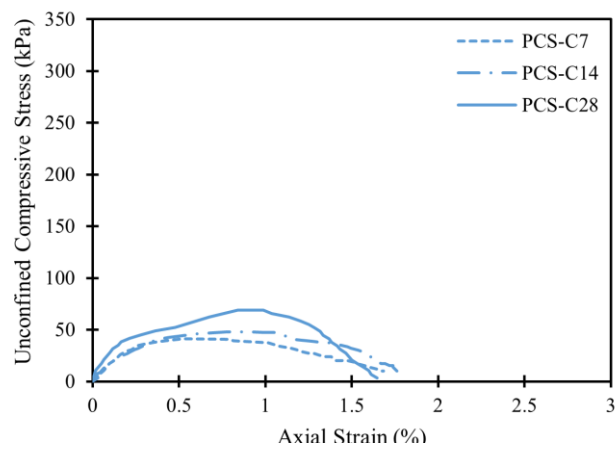


圖 4.7、PCS 試體於各養護齡期之應力應變曲線

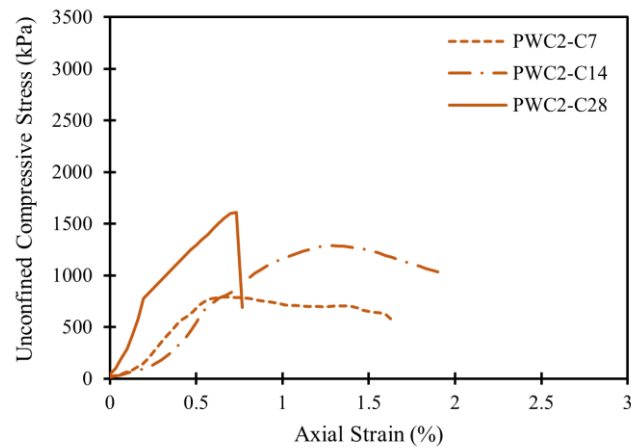


圖 4.8、PWC2 試體於各養護齡期之應力應變曲線

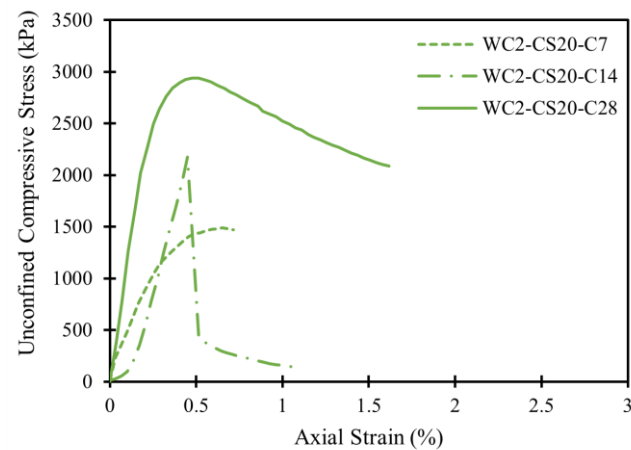


圖 4.9、WC2-CS20 試體於各養護齡期之應力應變曲線

尖峰強度增幅比值 (Improved Peak Strength Ratio, ISR)，顯示養護齡期對於改良試體的尖峰強度比值。在各改良漿液試體在養護齡期為 7 天的試體的情況下，尖峰強度增幅比值如圖 4.10 所示，在養護齡期 14 天時，增幅比值範圍在 1.38~1.63 倍。而在養護 28 天後，增幅比值的範圍到達 1.97~2.04 倍。隨著養護時間的增加，改良試體的尖峰強度增幅比值呈現出穩定的上升趨勢，其表示養護天數對於砂土經改良後的承载力有顯著的提高。

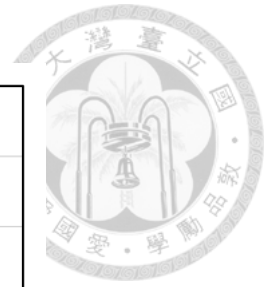
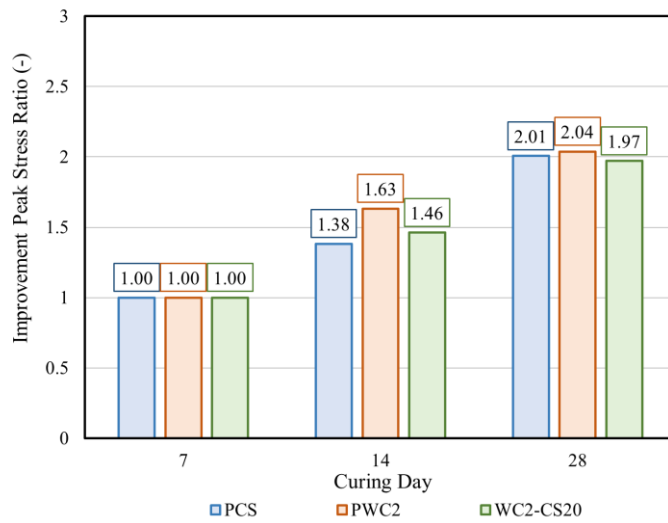


圖 4.10、各改良試體於不同養護齡期之尖峰強度增幅比例

楊氏模數 (Young's Modulus) 通常用於評估材料的剛性強度，其中 E_{sec50} (Secant Modulus at 50% Ultimate Stress) 的定義是指尖峰強度之半所對應之割線模數 (圖 4.11)，常用於評估改良土壤的剛性。WC2-CS20 改良試體在養護 28 天的 E_{sec50} 提升至相同改良配比在養護 7 天的 3.59 倍。而 WC2- CS20 在 7 天養護齡期顯示出比 PWC2 在 28 天養護齡期還高的 E_{sec50} 。結果顯示添加 20%之奈米二氧化矽溶膠在超微細水泥中能提高剛性強度。

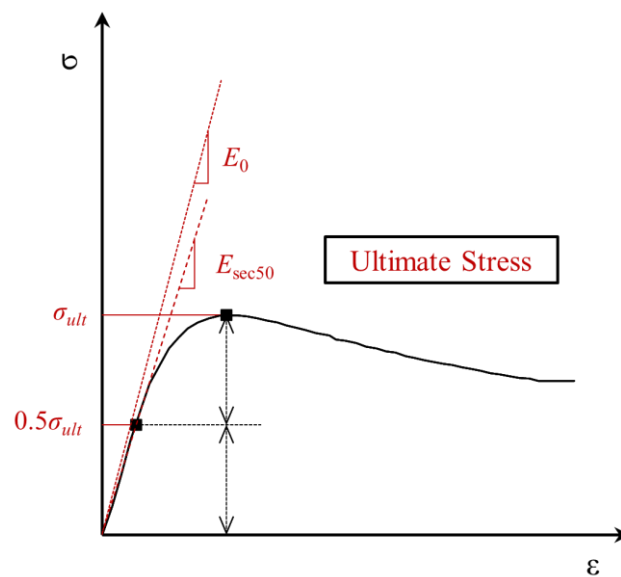


圖 4.11、 E_{sec50} 定義示意

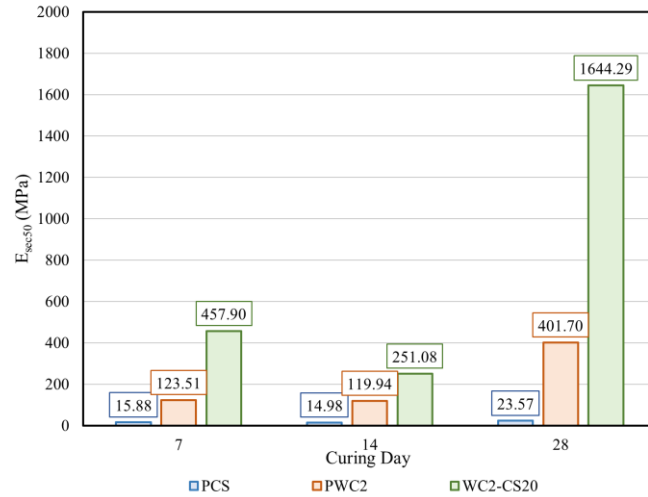


圖 4.12、 E_{sec50} 與養護齡期之關係

脆性指數 (Brittleness Index, BI) 用於表示材料的脆性行為之指標，當受到應力時，在沒有明顯變位或變形之下，即發生斷裂，而不是發生塑性彎曲或變形，表示為脆性材料。Chindaprasirt et al. (2021) 研究指出，當抗壓 (Unconfined Compressive, UC)、抗彎 (Flexural Stress, FS) 及劈裂抗拉 (Splitting Tensile, ST) 試驗中，材料通過尖峰強度後，在應變 ϵ_a 為 5% 或是變形 δ 為 2 公釐時，應力發展低於尖峰強度，並持續發展為殘餘應力或趨於零時，作為脆性指數的計算值，如式 4.2 式 4.3 式 4.4。

$$BI_{UC} = 1 - \frac{q_{u,\epsilon a = 5\%}}{q_u} \quad \text{式 4.2}$$

$$BI_{ST} = 1 - \frac{q_{t,\epsilon a = 5\%}}{q_t} \quad \text{式 4.3}$$

$$BI_{FS} = 1 - \frac{q_{f,\delta = 2mm}}{q_f} \quad \text{式 4.4}$$

本研究進行了抗壓試驗，根據應力應變曲線 (圖 4.7 圖 4.8 圖 4.9)，所有改良漿液試體

在軸向變形未達到 5% 時，試體即加載至破裂，因此本研究將軸向位移設定為 2 公釐時對應的單壓強度視為殘餘應力，如下所示的式 4.5 所描述。從圖 4.13 可以看出各齡期的脆性指數。在不同養護齡期下，PCS 試體的脆性指數較低，且隨著養護天數的增加，從養護 7 天時的 0.34，在養護 14 天時而下降至 0.2，這表明其力學特性偏向塑性，且養護天數增加不會使脆性指數上升。PWC2 試體表現隨著養護齡期的增加，脆性指數顯著地發展和增加，在養護 7 天時，PWC2 試體僅發展到 0.12，到達 14 天時已經達到 0.86，而在養護 28 天時，脆性指數達到 0.97。WC2-CS20 試體在養護 7 天時，脆性指數已達到 0.95，在養護 14 至 28 天期間的表現依然是超過 0.9，顯示 WC2-CS20 改良試體在早期的脆性指數已發展完全。

$$BI_{UC} = 1 - \frac{q_{u,\delta = 2mm}}{q_u} \quad \text{式 4.5}$$

以超微細水泥為基底之試體在終凝後泡入水中養護，在高水灰比未添加奈米二氧化矽溶膠的情況下，容易造成析離，砂土與改良漿液的膠結能力較弱。導致試體中的水泥膠結不均勻，使編號 PWC2-C14 的試體在養護 14 天後，殘餘強度的軸向位移發生在 3.4 公釐。

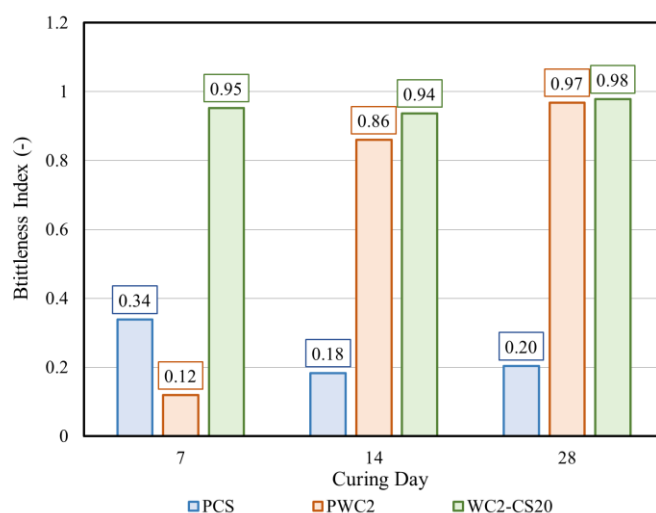


圖 4.13、各改良漿液之試體與養護齡期的脆性指數



4.3 動態三軸試驗

本節將詳述動態三軸試驗相關之參數定義，以及進行動態加載後其液化或破壞與否之判定標準，描述不同改良漿液配比在相同有效圍壓以及反覆剪應力比之下，軸向變形、孔隙水壓與有效應力之變化。

4.3.1 動態三軸試驗之參數定義

- (1) 孔隙水壓比 (Pore Pressure Ratio)：以 γ_u 代稱，為動態加載時試體內部因施加反覆應力所激發之超額孔隙水壓與最初有效圍壓之比值，孔隙水壓比之公式如式 4.6 所示。

$$\gamma_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_c} \quad \text{式 4.6}$$

Δu ：動態加載時試體內部因施加反覆應力所激發之超額孔隙水壓；

σ'_c ：初始有效圍壓；

- (2) 反覆剪應力比 (Cyclic Stress Ratio)：簡稱 CSR ，軸差應力與有效圍壓之比值，當 CSR 越大代表施加於試體之能量越大，其應力反覆作用次數也會越小，反之亦相同。反覆剪應力比之公式如下式 4.7 所示。

$$CSR = \frac{\Delta \sigma_d}{2\sigma'_c} \quad \text{式 4.7}$$

$\Delta \sigma_d$ ：施加於試體之軸差應力；

$2\sigma'_c$ ：兩倍有效圍壓；

- (3) 應力反覆作用次數 (Number of Cycles)：以 N 代稱，進行動態加載時，施加於試體之軸差應力循環作用之次數。

- (4) 單軸向應變 (Single Amplitude Axial Strain)：以 $\varepsilon_{a,SA}$ 代稱，動態加載時施加於試體之反

覆軸差應力又可分為壓力及拉力，單軸向應變指該次應力之拉力或壓力所造成之應變。

- (5) 雙軸向應變 (Double Amplitude Axial Strain)：以 $\varepsilon_{a,DA}$ 代稱，指動態加載時該次施加於試體之軸差應力所造成的拉應變與壓應變之總和。



4.3.2 試體液化判定準則

動態三軸試驗常見之判斷破壞條件可以試體之孔隙水壓比以及軸向應變來加以判定。

- (1) 初始液化：在反覆應力作用下，當試體之孔隙水壓激發至與最初有效圍壓相同時，其孔隙水壓比 γ_u 等於 1，即視為初始液化。
- (2) 軸向應變：動態加載階段時，當試體在反覆應力作用下其單軸向應變達 2.5 % 或是雙軸向應變達 5 % 時，視為破壞已經發生。

本研究之純砂試體在動態加載階段時通常會先達到單軸向應變 ($\varepsilon_{a,SA}$) 2.5 % 才發生 γ_u 為 1 的狀況，因此以單軸向應變 2.5 % 之應力反覆作用次數 ($N_{\varepsilon_{a,SA}}$) 作為試體液化破壞時間依據。

4.3.3 砂土動態三軸試驗結果

根據 3.5 節所提及的試驗規劃，控制變因為改良漿液之配比不同及養護天數。為了評估改良漿液對砂土效能的影響，本研究首先測定了砂土在目標相對密度，有效圍壓為 100 kPa 條件下的循環剪切應力比曲線 (Cyclic Stress Ratio Curve, CSR Curve)。在動態剪切試驗中，純砂 (Pure Sand, PS) 試體在軟體設置剛度為 4，剪切頻率為 0.1 Hz (圖 4.14)。當單振幅應變達到 2.5 % 時，應力反覆作用次數 ($N_{\varepsilon_{a,SA}=2.5\%}$) 顯示出的 N 值比 r_u 達到 1 還早。因此將純砂試體在 2.5 % 軸向應變下的應力反覆作用次數作為液化標準，詳細的試體資訊如表 4.3。

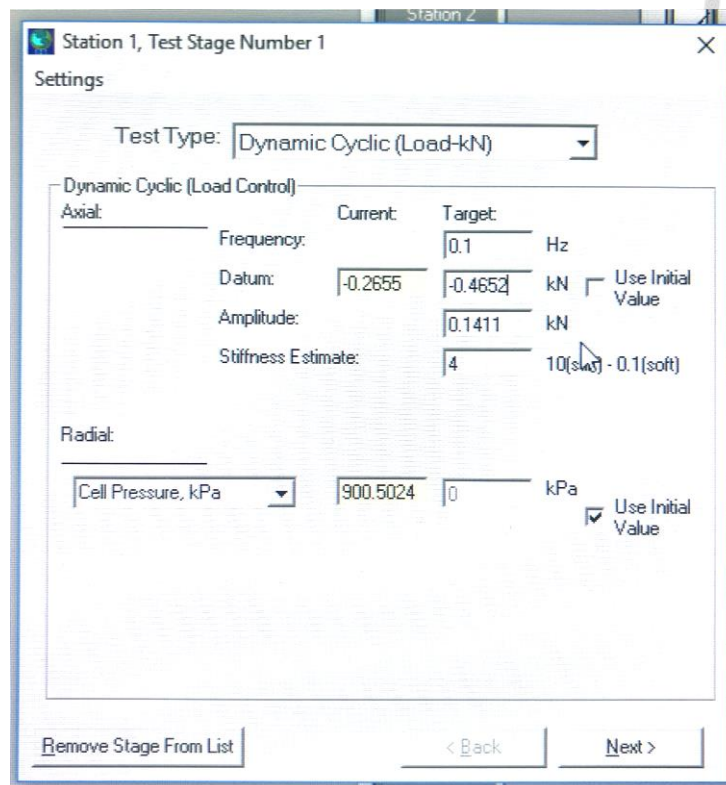


圖 4.14、動態強度試驗軟體設定

表 4.3、純砂土試體動態三軸之結果

試體編號	e	$CSR (-)$	$N_{ca,SA=2.5\%}$	N_{ru}
PS-0.325	0.609	0.325	2.78	-
PS-0.338	0.618	0.338	2.66	16.3
PS-0.340	0.618	0.340	2.64	7.31

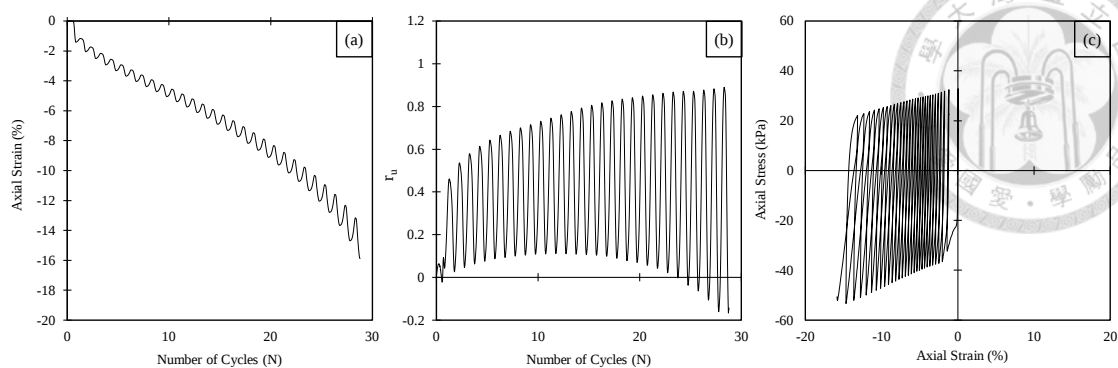


圖 4.15、PS-0.325 試體：(a)軸向應變-應力反覆作用次數曲線 (b)軸向應力-應力反覆作用次數曲線 (c)遲滯迴圈

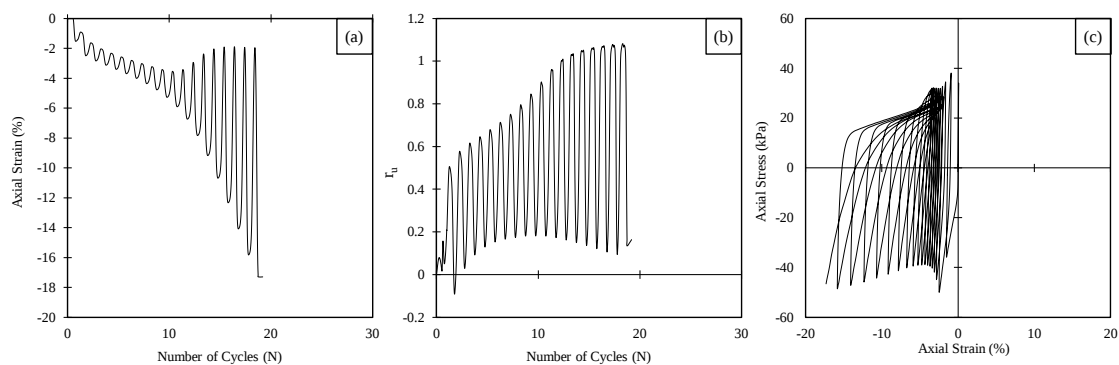


圖 4.16、PS-0.338 試體：(a)軸向應變-應力反覆作用次數曲線 (b)軸向應力-應力反覆作用次數曲線 (c)遲滯迴圈

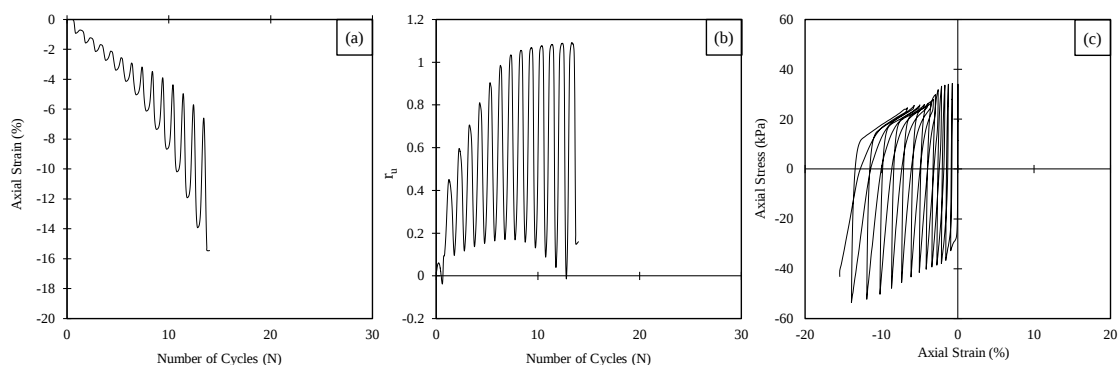


圖 4.17、PS-0.340 試體：(a)軸向應變-循環剪切下數曲線 (b)軸向應力-循環剪切下數曲線 (c)遲滯迴圈

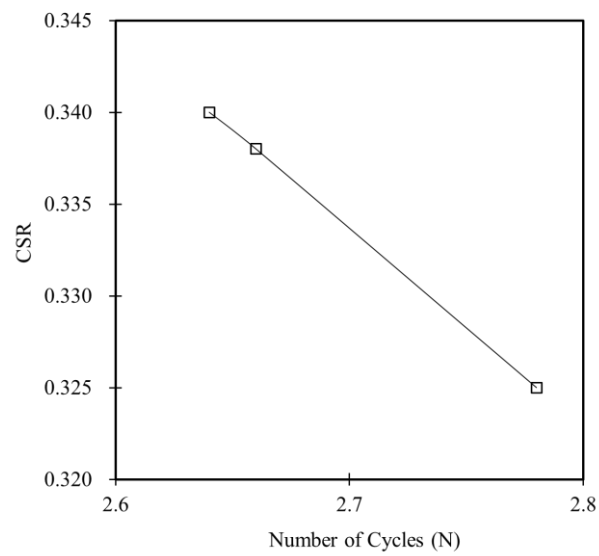


圖 4.18、PS 試體之循環剪切應力比曲線



圖 4.19、PS 試體經動態試驗後之液化情形

在先前進行的三顆不同 CSR 值的純砂試體進行動態三軸試驗中，觀察到當 CSR 為 0.325 時，達到 2.5%單振幅應變的循環次數 (N) 為 2.78；當 CSR 提升至 0.338 時，相應的循環次數減少至 2.66；而在 CSR 進一步增至 0.340 時，循環次數繼續些微減少至 2.64，顯示出渥太



華砂對於 CSR 的增幅相當敏感。渥太華砂對抗拉力相對較弱，導致軸向應變的增長主要集中在單側（圖 4.15 (a) 圖 4.17 (a)）。

4.3.4 改良試體動態三軸結果

在對砂土進行改良後，將試體設定循環剪切應力比（CSR）為 0.338 的條件下進行動態三軸試驗，以此來評估改良漿液對土壤性質的改良效果。考慮到在軟體設置剛度對試驗執行的影響，特別是在超微細水泥基底的改良式體中，若將剛度設定為 4，儀器無法有效執行指令以達到目標的循環剪切頻率與 CSR，因此在 PWC2 和 WC2-CS20 的試體中，無論是在養護 7 天、14 天還是 28 天，剛度均設定為 5；而對於 PCS 的試體，在相同的養護時期內則保持剛度設定為 4。此次試驗的具體試體設定詳情在相關表 4.4 中列出。

將分析改良後的試體在動態荷載作用下的軸向應變變化，以評估所使用改良漿液的有效性。以 PWC2 試體而言，養護 7 天、14 天還是 28 天，試體在經歷 1000 個循環荷載後，軸向應變的變化幅度均維持在接近 0 至 -0.1 % 的範圍內。同樣的，WC2-CS20 試體在相同的養護條件和循環次數下，軸向應變的變化也保持在此範圍內。結果顯示無論是 PWC2 還是 WC2-CS20 的改良漿液對於砂土皆有效地抵抗動態荷載所引起的應變。PCS 配比的試體選用剛度為 4，對於 PCS-C7 試體，軸向應變隨循環次數的增加而迅速下降，並在 N 值到達 341.74 時， $\varepsilon_{a,SA}$ 累積至 -2.5 %， N 值到達 395.77 時，而 $\varepsilon_{a,SA}$ 累積至 -8.12 %。對於 PCS-C14 試體在 N 值到達 1000 時，其軸向應變累積至 0.1 %，表示 PCS-C14，在養護 14 天時，抵抗軸向應變的能力顯著的提高。PCS-C28 試體中，軸向應變在相對較低的循環次數（ N 值為 177.71）中顯示 $\varepsilon_{a,SA}$ 可以增加到達 -8.25 %，當 $\varepsilon_{a,SA}$ 達到 -2.5 % 時，其相對應的 N 值為 71.79。

表 4.4、各改良試體經過動態三軸試驗之結果

試體編號	目標單位重	實際單位重	剛度設置	軸向應變範圍	軸向應力範圍	孔隙水壓範圍	r_{uz} 範圍
------	-------	-------	------	--------	--------	--------	-------------

	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(kPa)	(%)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
PCS-C7		1.974	4	-9 ~ 0	-47 ~ 35	-15 ~ 80	-0.1 ~ 0.9
PCS-C14	2.095	2.004	4	-0.1 ~ 0.06	-35 ~ 34	0 ~ 55	0 ~ 0.55
PCS-C28		1.913	4	-8 ~ 2	-43 ~ 39	-15 ~ 35	-0.15 ~ 0.35
PWC2-C7		2.109	5	-0.03 ~ 0.002	-35 ~ 35	-6 ~ 5	-0.06 ~ 0.04
PWC2-C14	2.103	2.009	5	-0.05 ~ -0.009	-36 ~ 33	-4 ~ 4	-0.04 ~ 0.04
PWC2-C28		1.952	5	-0.16 ~ 0.125	-35 ~ 35	-38 ~ 38	-0.39 ~ 0.38
WC2-CS20-C7		2.032	5	-0.08 ~ 0.055	-34 ~ 34	-39 ~ 39	-0.45 ~ 0.45
WC2-CS20-C14	2.137	2.009	5	-0.025 ~ 0.027	-34 ~ 34	-10 ~ 15	-0.075 ~ 0.075
WC2-CS20-C28		2.004	5	-0.4 ~ -0.75	-35 ~ 35	-30 ~ 30	-0.4 ~ 0.4

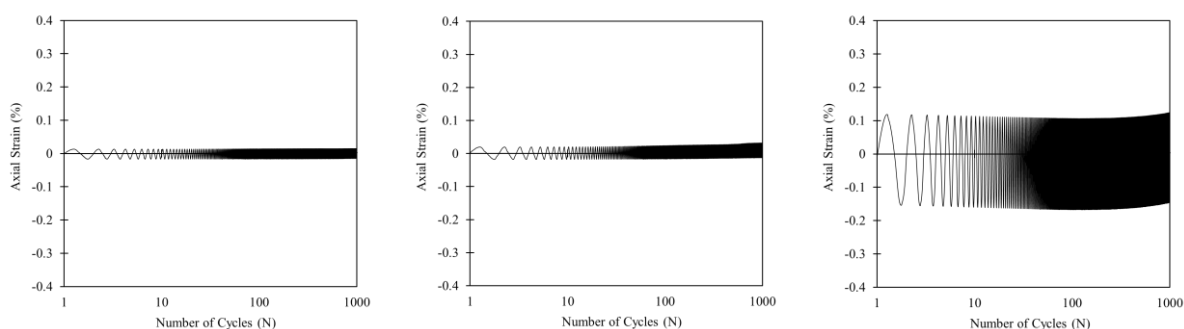


圖 4.20、PWC2、試體在養護 7、14、28 天之軸向應變行為

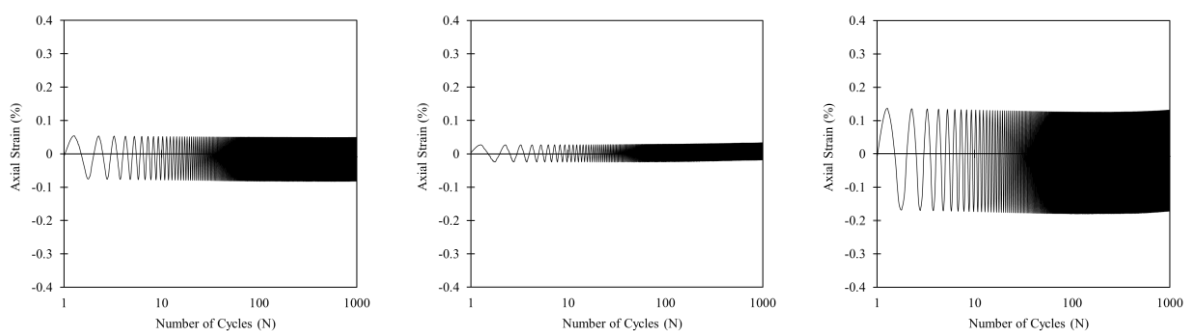


圖 4.21、WC2-CS20 試體在養護 7、14、28 天之軸向應變行為

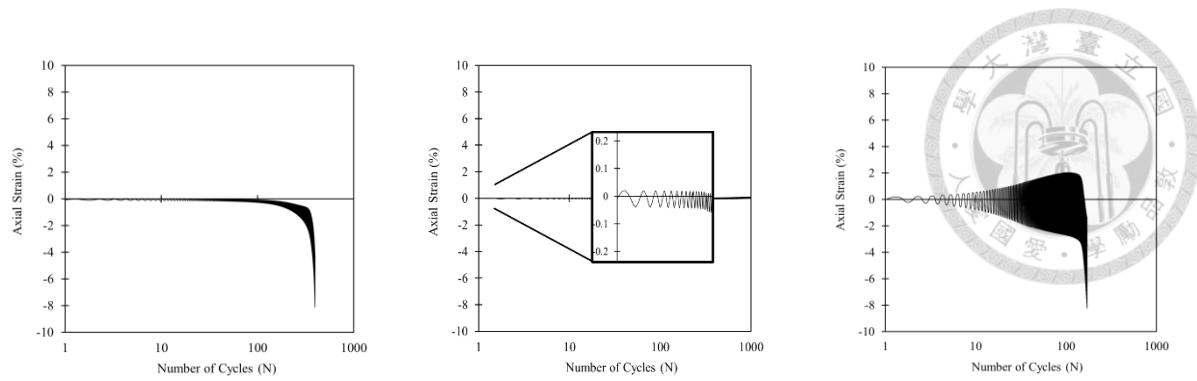


圖 4.22、PCS 試體在養護 7、14、28 天之軸向應變行為

孔隙水壓比 (Pore Pressure Ratio) 行為。對於 PWC2 試體，在 7 天、14 天及 28 天的養護期中，其孔隙水壓變化相對有限， r_u 維持在 ± 0.06 的範圍內。同樣地 WC2-CS20 試體在相同的養護時間和循環荷載條件下也表現出穩定的孔隙水壓反應，其中變化主要集中在 ± 0.4 的範圍內，可以認定是試體的超額孔隙水壓未被激發。然而 PCS 配比的試體在相同的養護期顯示了不同力學的行為，PCS-C7 試體在 N 值達到 395.34 後，其 r_u 值達到了 0.97。對於 14 天養護的試體，在 1000 次循環後，孔隙水壓的上升趨勢相對平緩，超額孔隙水壓最終增加至 0.56。在養護 28 天的試體中， N 值達到 177.71 次時，試驗因軸向應變達到 10% 的停機標準而結束，此時的 r_u 值為 0.34。

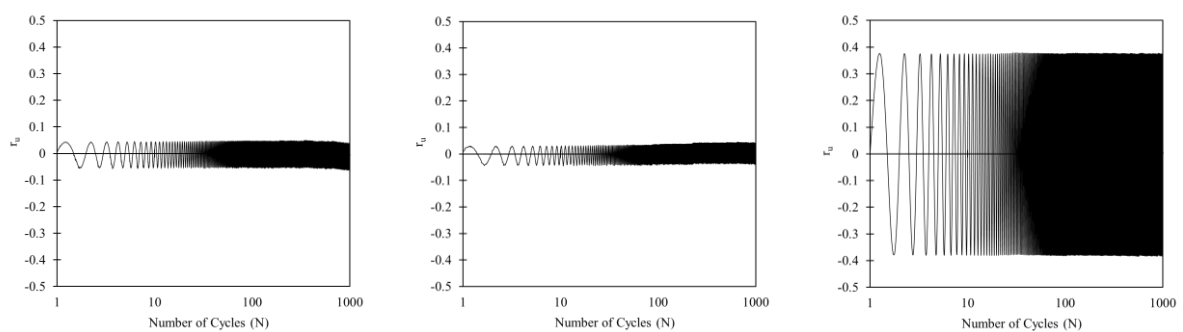


圖 4.23、PWC2 試體在養護 7、14、28 天之孔隙水壓比曲線

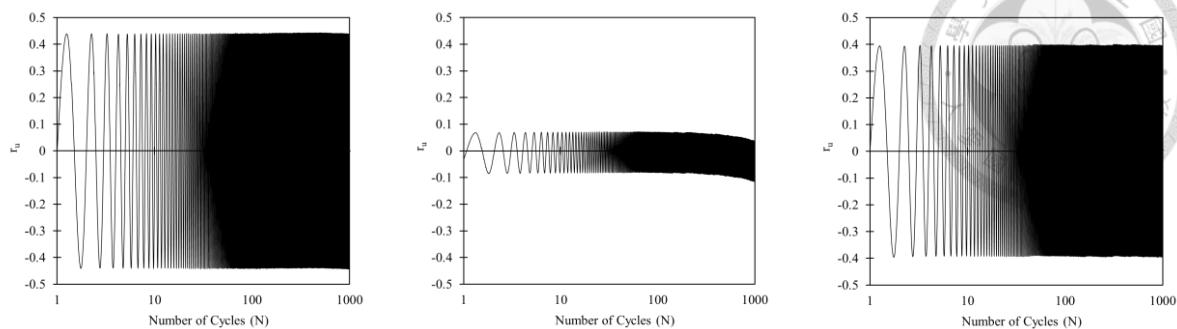


圖 4.24、WC2-CS20 試體在養護 7、14、28 天之孔隙水壓比激發曲線

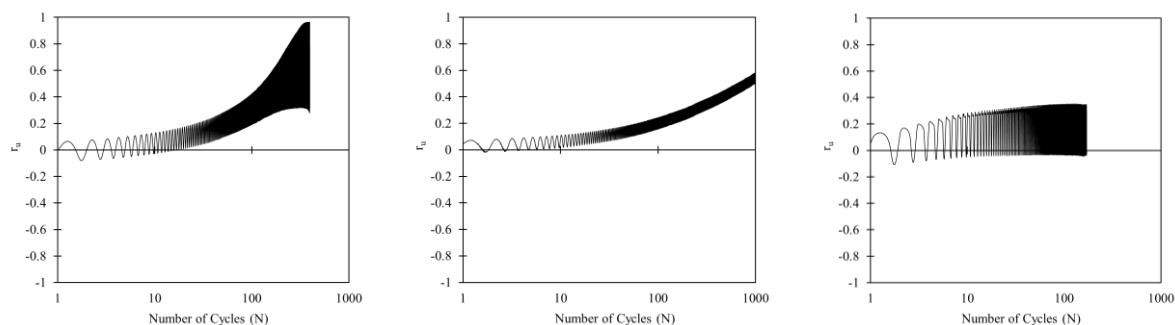


圖 4.25、PCS 試體在養護 7、14、28 天之孔隙水壓比發曲線

遲滯迴圈 (Hysteresis Loop) 在這項研究中用來評估在循環荷載下的力學行為，特別是如
 何反映材料的剛度退化和能量耗散。遲滯迴圈的面積與能量耗散量直接相關，迴圈形狀和寬
 度提供材料在動態荷載下的阻尼和剛度變化的資訊。PWC2 在養護 7、14 及 28 天之試體的遲
 滯迴圈顯示較小的應變範圍約 0.015 ~ 0.15%。WC2-CS20 即使最高的應變只到達 0.05%，迴
 圈形狀同樣緊密，表明 PWC2 與 WC2-CS20 試體具有較高的剛度和較低的能量耗散。而 PCS
 試體在相同的養護期，遲滯迴圈顯示了更大的應變範圍，尤其是 PCS-C28，應變範圍可達 10%。
 迴圈形況較為寬闊，表明在循環荷載下有顯著的能量耗散和較低的剛度。

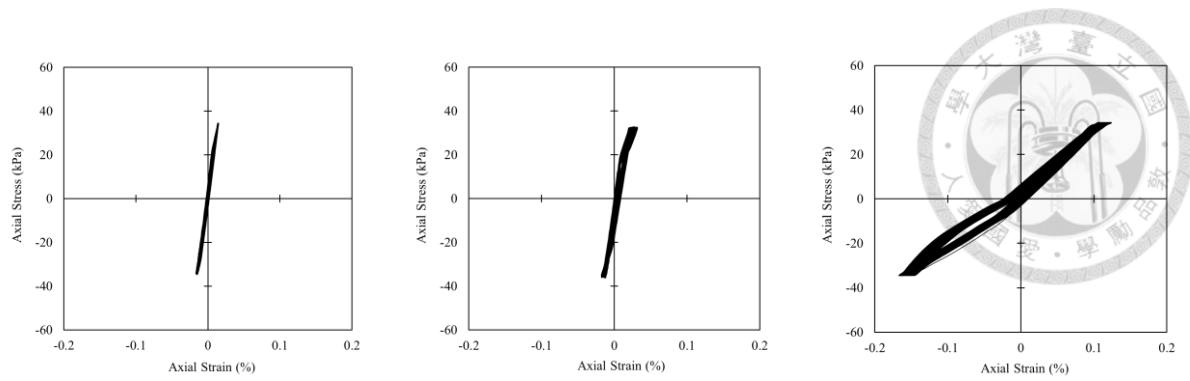


圖 4.26、PWC2 試體在養護 7、14、28 天之遲滯迴圈曲線

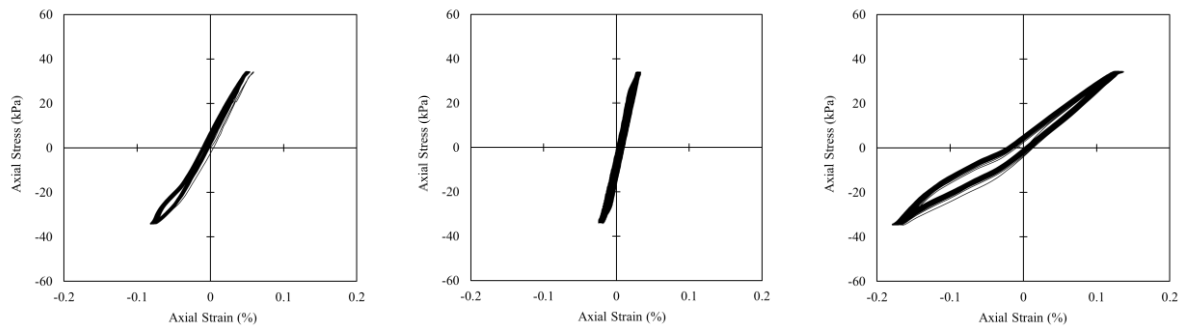


圖 4.27、WC2-CS20 試體在養護 7、14、28 天之遲滯迴圈曲線

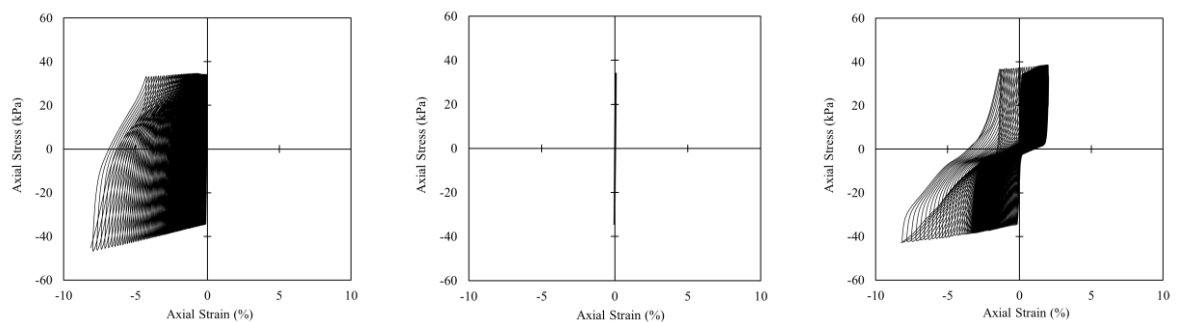


圖 4.28、PCS 試體在養護 7、14、28 天之遲滯迴圈曲線

4.4 變水頭試驗

變水頭試驗在土壤改良和多孔材料的研究中，主要目的是測量改良試體的水力傳導率，以了解其滲透性。通過比較改良前後試體的水力傳導係數，以驗證改良措施對土壤或其他多孔材料滲透性的影響。其試驗適用於具有中低滲透性的土壤，通常適用於滲透係數範圍介於 10^{-5} 至 10^{-9} cm/sec 之中等致極低滲透性質之試體。



表 4.5、飽和條件下之典型土壤水利傳導係數 (Das & Sobhan, 2014)

Soil Type	k (cm/sec)
Clean Gravel	100 ~ 1.0
Coarse Sand	1.0 ~ 0.01
Fine Sand	0.01 ~ 0.001
Silty Clay	0.001 ~ 0.00001
Clay	<0.000001

表 4.6、變水頭試驗之數據

試體編號	養護天數	實際單位重 (g/cm^3)	滲透係數 (cm/sec)
Pure Sand	0	1.645	7.121×10^{-2}
PCS-C7	7	2.095	3.075×10^{-6}
PWC2-C7	7	2.103	1.601×10^{-7}
WC2-CS20-C7	7	2.137	8.727×10^{-7}

根據 3.5 節所提及的試驗規劃，控制變量為改良漿液之配比不同，養護天數皆在 7 天。改良試體的製作與改良漿液量之計算與 5.1 節相同，而其試驗容器使用圖 3.36 作為變水頭試驗之容器。

變水頭試驗用於量測改良後的砂土的滲透係數，從而評估改良材料對砂土滲透性的影響。Takahashi et al. (2021) 研究顯示，砂土在添加水泥改良後，其試體的滲透性顯著降低，有助於提升土壤的穩定性，添加不同量的水泥會使砂土的滲透係數範圍降低為 8.07×10^{-6} 至 2.3×10^{-9} cm/sec，改良砂土的滲透性減少有助於阻止水分和化學物質的擴散，從而提高土壤的長期穩定性。Liu et al. (2023) 研究說明，奈米二氧化矽改良砂土的滲透性試驗旨在評估其在改善土壤力學性質和降低滲透係數。通過低壓滲透灌漿處理，使漿液填充孔隙，並減少土壤變形和液化風險，對於土壤穩定非常重要。

如表 4.5 所示，純砂在相對密度 50% 時，其滲透係數為 7.121×10^{-2} cm/sec 的純砂具有極



高的滲透性。PCS-C7 的滲透係數為 3.075×10^{-6} cm/sec，經過純奈米二氧化矽溶膠的改良後，顯著的降低滲透係數，其中，PWC2-C7 為 1.601×10^{-7} cm/sec；WC2-CS20-C7 為 8.727×10^{-7} cm/sec，以超微細水泥為基底之改良試體的滲透係數下降至 1×10^{-7} cm/sec。顯示出在此三種改良漿液在養護 7 天，即能減少滲透係數，提高土壤的承載力和穩定性，對於土壤抗液化改善為一種指標。

第 5 章結論與建議

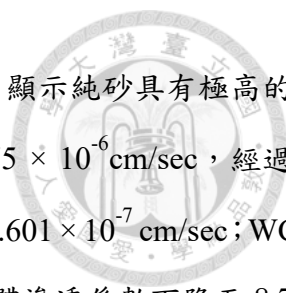


5.1 結論

本研究以配比試驗在水灰比為 2，添加 1 % 減水劑之基底下，添加奈米二氧化矽溶膠含量為 5、10、15 及 20 %，以及純奈米二氧化矽溶膠添加 12 % 之氯化鈉溶液作為促凝劑，施作凝固時間試驗、泌水率試驗、黏滯度試驗之結果所述，列出以下幾點結論：

1. 凝固試驗當中，隨著奈米二氧化矽溶膠的含量提高，初凝時間為 20 小時，額外添加 20 % 奈米二氧化矽溶膠後，凝固時間為 8 小時；終凝時間由 35 小時，約莫一天半的時間達到終凝狀態，改善至終凝時間 28 小時，代表奈米二氧化矽溶膠的添加能有效改善高水灰比之漿液初凝時間的問題，且對於終凝時間有所改善，但其減少幅度未比初凝時間之效果顯著，奈米二氧化矽溶膠對於早期凝固之效果較為有幫助。
2. 泌水率試驗除了觀測在超微細水泥-奈米二氧化矽溶膠之泌水量，藉由從時間與漿液體積變化，發覺當奈米二氧化矽溶膠的添加量提高，縮短漿液體積的穩定時間，並且減少了析出水量，說明奈米二氧化矽溶膠有益於水泥漿液的穩定性。
3. 黏滯度試驗中，在奈米二氧化矽溶膠添加 0 ~ 15 % 時，其黏滯度表現皆在 250 cPs 以下，直到二氧化矽溶膠添加至 20 % 時，黏滯度增加至 1750 cPs，在添加至一定含量後黏滯度快速成長，使得改良漿液形成更緻密的漿液。此外黏滯度試驗測試純奈米二氧化矽溶膠之凝固時間，在固成分 (Solid Content) 為 30 wt % 之下添加 12 % 的氯化鈉溶液，顯示其凝固行為在 150 分鐘後瞬間凝固，純奈米二氧化矽溶膠有助於需要瞬間止水或即時穩固土體之工程。

本研究以力學試驗在水灰比為 2，添加 1 % 減水劑之基底下，純超微細水泥漿液 (PWC2)，與添加奈米二氧化矽溶膠含量為 20 % (WC2-CS20)，以及純奈米二氧化矽溶膠添加 12 % 之氯化鈉溶液 (PCS) 作為促凝劑執行無圍壓縮強度試驗、動態三軸試驗及變水頭試驗之結果所述，列出以下幾點結論：

- 
1. 純砂在相對密度 50 %時，其滲透係數為 7.121×10^{-2} cm/sec，顯示純砂具有極高的滲透性。各改良漿液經過 7 天的養護，PCS 的滲透係數為 3.075×10^{-6} cm/sec，經過純奈米二氧化矽溶膠的改良後，滲透係數顯著降低；PWC2 為 1.601×10^{-7} cm/sec；WC2-CS20 為 8.727×10^{-7} cm/sec。以超微細水泥為基底的改良試體滲透係數下降至 8.727×10^{-7} cm/sec。這顯示出這三種改良漿液在養護 7 天後即能顯著減少滲透係數，從而提高土壤的承載力和穩定性，對於土壤抗液化改善具有指標性意義。
 2. 無圍壓縮試驗觀察養護 7、14 及 28 天的改良漿液在無圍壓縮強度與養護齡期之關係，三種漿液配比的尖峰強度均隨養護齡期增加而提升。純奈米二氧化矽溶膠試體（PCS）膠結能力較低，難以承受較大加載力。純超微細水泥漿液試體（PWC2）強度隨養護穩定增長。超微細水泥—20 % 奈米二氧化矽溶膠的試體（WC2-CS20）在各養護齡期內尖峰強度顯著增加，顯示奈米二氧化矽溶膠與超微細水泥混合後的效果使力學性質表現突出隨養護天數增加，各改良試體的尖峰強度增幅比值（*ISR*）穩定上升，顯示養護時間顯著提升改良試體的承載力。脆性指數（*BI*）顯示，PCS 試體隨養護變得更具塑性，而 PWC2 和 WC2-CS20 試體則展現出更高的脆性。
 3. 動態三軸試驗顯示，純超微細水泥漿液（PWC2）和超微細水泥—20 % 奈米二氧化矽溶膠（WC2-CS20）試體在養護 7、14、28 天後，經 1000 次循環荷載，軸向應變保持在 0 至 -0.1 %，表現出高剛度和抗變形能力。相比之下，純奈米二氧化矽溶膠試體（PCS）試體在相同條件下，軸向應變變化較大，抵抗應變未隨著養護天數增加而減少，在 PCS-C28 試體在 $N_{\varepsilon a, SA=2.5\%}$ 值為 71.79。反倒在養護 14 天時，經歷 1000 個循環荷載後，其軸向應變最終只在 0.1 %。遲滯迴圈分析證實了 PWC2 和 WC2-CS20 的高剛度與低能量耗散，而 PCS 則展示較大應變範圍和能量耗散。
 4. 力學試驗結果顯示，PWC2 和 WC2-CS20 均具有高剛度的力學特性，尤其是 WC2-CS20 改良試體，其超微細水泥與奈米二氧化矽溶膠混合後，在各項試驗中均達到最佳性能。根據 (Björnström et al., 2004) 的研究，添加奈米二氧化矽膠有助於水泥在水化過程中生成 C-S-H 膠體，進而增強水泥的力學性質。超微細水泥與奈米二氧化

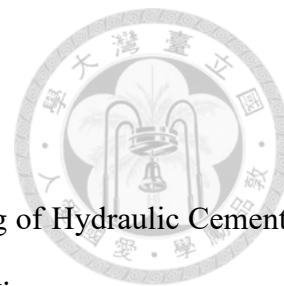
矽溶膠的結合，能顯著縮短高水灰比下的凝固時間，同時減少泌水率問題。應用於潛勢土壤液化區域與隧道補強工程，能提高土壤的穩定性，在短期內達到顯著的改良效果。



5.2 建議

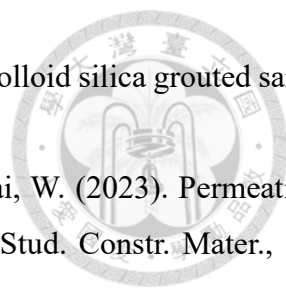
1. 超微細水泥基底的配比隨著奈米二氧化矽溶膠含量的增加而縮短凝固時間。在 20% 奈米二氧化矽溶膠含量下，初凝時間為 9 小時，終凝時間為 26 小時。可以通過增加奈米二氧化矽溶膠含量或降低水灰比來進一步縮短凝固時間。或是在固定漿液總重量的條件下，調整超微細水泥漿液與奈米二氧化矽溶膠的占比。
2. PCS 試體在養護期間持續泡在水中，觀察到改良試體容易塌陷且表面析離出結晶體。Axelsson (2006) 研究指出相對濕度會影響力學強度，如 PCS 試體在養護齡期達到 28 天，在動態三軸試驗的遲滯迴圈呈現低剛度之樣態；Liu et al. (2023) 說明奈米二氧化矽溶膠作為灌漿材料，其二氧化矽的固成分含量與氯化鈉溶液的濃度，將影響改良後土壤對水的耐久性。純奈米二氧化矽溶膠試體的養護環境影響其力學性質應考量入實驗變因中。
3. 低壓灌漿設備之改善，由於金屬與水泥產生之鍵結不易使試體脫模，可使用高分子材料作為模具，用於降低模具與試體間的膠結力。而水泥漿液均勻灌漿的要素有土壤與改良材料顆粒尺寸、水灰比、灌漿壓力，在固定這些因素下，可再藉由控制灌漿量與持續灌漿時間量化數值，比較改良試體的均勻性；由於單一出漿口，使得模具內的土壤中的孔隙水無法被有效排出，導致改良試體出漿處的不均勻，透過在側面增加 1–2 個出漿口，於灌漿時階段性的開閥，增加孔隙水釋放的路徑，進而達到均勻灌漿的目標。

參考文獻



- [1] ASTM C191 - 08. (2008). Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. ASTM International Ed. West Conshohocken, PA, USA.
- [2] ASTM C940 - 98a. (1998). Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory. ASTM International Ed. West Conshohocken, PA, USA.
- [3] ASTM D0854 - 02. (2002). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International Ed. West Conshohocken, PA, USA.
- [4] ASTM D2166 - 00. (2000). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International Ed. West Conshohocken, PA, USA.
- [5] ASTM D2487 - 11. (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System. ASTM International Ed. West Conshohocken, PA, USA.
- [6] ASTM D3999 - 11. (2011). Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus. ASTM International Ed. West Conshohocken, PA, USA.
- [7] ASTM D5084 - 16a. (2016). Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM International Ed. West Conshohocken, PA, USA.
- [8] ASTM D5311 - 11. (2011). Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Strength of Soil. ASTM International Ed. West Conshohocken, PA, USA.
- [9] ASTM D5856 - 95. (2007). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter. ASTM International Ed. West Conshohocken, PA, USA.
- Akbulut, S., & Saglam, A. (2002). Estimating the groutability of granular soils: a new approach. *Tunnelling Underground Space Technol.*, 17(4), 371-380.
- [10] Avci, E., Deveci, E., & Gokce, A. (2021). Effect of sodium silicate on the strength and permeability properties of ultrafine cement grouted sands. *J. Mater. Civ. Eng.*, 33(8), 04021203.
- [11] Avci, E., & Mollamahmutoglu, M. (2016). UCS Properties of Superfine Cement–Grouted Sand. *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(12).
- [12] Axelsson, M. (2006). Mechanical tests on a new non-cementitious grout, silica sol: A laboratory

- study of the material characteristics. *Tunnelling Underground Space Technol.*, 21(5), 554-560.
- [13] Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Börjesson, L., & Panas, I. (2004). Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement. *Chem. Phys. Lett.*, 392(1-3), 242-248.
- [14] Celik, F. (2019). The observation of permeation grouting method as soil improvement technique with different grout flow models. *Geomech. Eng.*, 17(4), 367-374.
- [15] Cheng, H., Liu, X., Lin, J., Zhang, L., Li, M., & Rong, C. (2020). Study on fracturing and diffusion mechanism of nonslab fracturing grouting. *Geofluids*, 2020.
- [16] Chindaprasirt, P., Jamsawang, P., Sukontasukkul, P., Jongpradist, P., & Likitlersuang, S. (2021). Comparative mechanical performances of cement-treated sand reinforced with fiber for road and pavement applications. *Transp. Geotech.*, 30, 100626.
- [17] Choi, R. F. Y. (2005). Review of the jet Grouting Method. Bachelor dissertation, Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Australia.
- [18] Christodoulou, D., Droudakis, A., Pantazopoulos, I., Markou, I., & Atmatzidis, D. (2009). Groutability and effectiveness of microfine cement grouts. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Volumes 1, 2, 3 and 4)*.
- [19] Das, B. M., & Sobhan, K. (2014). *Principles of geotechnical engineering*.
- [20] EN 196 - 03. (2005). *Methods of testing cement. Determination of setting times and soundness*. British Standards Institution.
- [21] Gallagher, P. M., & Mitchell, J. K. (2002). Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand. *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 22(9-12), 1017-1026.
- [22] Gallagher, P. M., Pamuk, A., & Abdoun, T. (2007). Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout. *J. Mater. Civ. Eng.*, 19(1), 33-40.
- [23] Guo, Y., Zhang, Q., Zhang, L., Liu, R., Chen, X., & Liu, Y. (2021). Experimental study on groutability of sand layer concerning permeation grouting. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2021, 1-10.
- [24] Halstead, P. (1961). The early history of Portland cement. *Transactions of the Newcomen Society*, 34(1), 37-54.
- [25] JSF T26-81T. (1979). *Determination of maximum relative density and minimum relative density for sand*. Japanese Geotechnical Society
- [26] Khajeh, A., Jamshidi Chenari, R., & Payan, M. (2020). A simple review of cemented non-conventional materials: soil composites. In *Geotechnical and Geological Engineering (Vol. 38, pp. 1019-1040)*.

- 
- [27] Liao, H., Huang, C., & Chao, B. (2003). Liquefaction resistance of a colloid silica grouted sand. In *Grouting and ground treatment* (pp. 1305-1313).
- [28] Liu, G., Zhao, M., Wang, T., Connolly, D. P., Cai, Y., Jiang, J., & Bai, W. (2023). Permeation grouting of low-permeability silty sands with colloidal silica. *Case Stud. Constr. Mater.*, 19, e02327.
- [29] Mollamahmutoglu, M., & Avci, E. (2015). Effectiveness of microfine Portland cement grouting on the strength and permeability of medium to fine sands. *Period Polytech-Civ.* 59 (3), 319. In.
- [30] Ryoza, Y. (1996). The Developing Process and the New Concepts of Chemical Grout in Japan. Preprint of Special Lectures IS-TOKYO'96, 84-97.
- [31] Sogaard, C., Funehag, J., & Abbas, Z. (2018). Silica sol as grouting material: a physio-chemical analysis. *Nano Convergence*, 5, 1-15.
- [32] Takahashi, H., Omori, S., Asada, H., Fukawa, H., Gotoh, Y., & Morikawa, Y. (2021). Mechanical properties of cement-treated soil mixed with cellulose nanofibre. *Applied Sciences*, 11(14), 6425.
- [33] Thomas, J. J., Jennings, H. M., & Chen, J. J. (2009). Influence of nucleation seeding on the hydration mechanisms of tricalcium silicate and cement. *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(11), 4327-4334.
- [34] Xu, S., Cao, H., Zhu, Y., Sun, H., Lu, J., & Shi, J. (2022). Mechanism of filtration behaviors of cement-based grout in saturated sand under different grouting conditions. *Geofluids*, 2022.
- [35] Xue, B. (2018). A Study on Chemical Grouting of Quartz Sand.
- [36] Zhang, C., Yang, J., Fu, J., Ou, X., Xie, Y., & Liang, X. (2019). Performance evaluation of modified cement-sodium silicate grouting material for prereinforcing loose deposit tunnels. *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(7), 06019003.
- [37] Zhu, G., Zhang, Q., Liu, R., Bai, J., Li, W., & Feng, X. (2021). Experimental and numerical study on the permeation grouting diffusion mechanism considering filtration effects. *Geofluids*, 2021, 1-11.
- [38] 林任峰. (2005). 超細水泥漿液滲透灌漿模式之研究.
- [39] 連琮勛. (2010). 應用禁忌演算法於超微粒水泥漿體滲透灌漿之可灌性研究.
- [40] 廖洪鈞, 林英堂, 陳逸駿, 何泰源, & 余明山. (2004). 建築物基礎構造設計規範修訂之研究-地層改良. 326 頁.