
**生物礦化工法應用於地表土壤沖刷防治之
可行性探討(2)**

**Feasibility of Soil Layer Erosion
Prevention and Control Using Biological
Mineralization Method (2)
(成果報告書)**

執行單位：中興大學

執行期間：107 年 02 月 09 日至 107 年 12 月 31 日

計畫主持人：陳豪吉 教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 107 年 12 月

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

生物礦化工法應用於地表土壤沖刷防治之可行性探討

(2)

摘要

臺灣位處地殼變動劇烈之地區且存在有地質敏感區，易發生地質災害威脅人民安全，每年颱風過後，常伴隨山崩、地滑、土石流等災害，如 2009 年八八水災對台灣造成莫大傷害，更衝擊國家經濟發展。本研究採用目前正在研發的冷結新技術，利用土壤中自然界的微生物代謝，以微生物誘導碳酸鹽沉澱(Microbial-induced carbonate precipitation, MICP)，讓土壤的物理性質改變進而改善土壤力學性質，以提升邊坡淺層土壤的工程力學特性（如剪力強度、滲透性、壓密性）。

本研究計畫即以 MICP 工法為題，進行地表土壤沖刷防治之應用研究，經過文獻收集與分析以及實驗結果之證明，在 MICP 反應過程中之實驗發現，*Bacillus pasteurii* 菌確實對於鈣離子轉換具有相當效率，確實可於砂土顆粒之間長成碳酸鈣晶體進行填塞作用。經 MICP 作用後，無凝聚力之標準砂試體可以被固結成具有直立性之小圓柱，且 MICP 施作天數越長的試體，其整體固結狀況越佳，其抗壓強度隨之增加，試驗結果顯示標準砂試體抗壓強度值可由鬆散砂之零強度強化提升到 3 至 12kPa 左右。土壤重模試體之強度更可提升至 250kPa 左右。

試驗結果顯示，MICP 作用後之標準砂試體及土壤重模試體，因為土體中碳酸鈣之堆積與膠結作用，導致其抗壓試體強度將大幅提升，此結果可證明 MICP 工法對土壤固結與防止邊坡滑動確實有

相當之功效顯現。藉由模擬降雨事件侵蝕地表土壤造成沖刷之物理模型試驗，在 MICP 作用下，比較控制組與試驗組之抵抗土壤沖刷反應能力，確實驗證 MICP 工法應用在地表土壤沖刷防治之可行性。

關鍵字：微生物誘導碳酸鹽沉澱、土壤沖刷、力學性質

Feasibility of Soil Layer Erosion Prevention and Control Using Biological Mineralization Method (2)

Abstract

Taiwan is located in Orogenic belts where a geologically sensitive area is. Therefore, the geological disasters happen easily and also threaten people's life. Typhoon, the nature disaster in Taiwan, hits Taiwan every year, and it is often accompanied by landslides and other disasters. For instance, Typhoon Morakot made landfall just before midnight in August 8, 2009, and it not only brought catastrophic damage but impacted the economic development in Taiwan. This study uses the new cold bonding technology, Microbial-induced calcium carbonate precipitation (MICP), to strengthen soil mechanism for soil layer erosion prevention and control. The technology uses bacterial metabolism to change the physical properties of soil and then improve the mechanical properties of the soil (such as shear strength, permeability, and consolidation).

According to the test results of last year, *Bacillus pasteurii* was found to be quite efficient for convert calcium ions to calcium carbonate and indeed calcium carbonate fill the pores that exist between the sand grains. After the action of MICP, the non-cohesive standard sand sample can be bonded into a chunk. The longer the MICP is applied, the better the overall aggregation is. The compressive strength test results show that the compressive strength of the standard sand specimen can be improved from the zero strength of loose sand to about 3 to 12 kPa. Furthermore, the strength of soil remolded specimens can be further enhanced to about 250kPa. The test results show that the MICP method applied to loose sand and soil remolded specimens can highly increase the compressive strength

because of accumulation and cementation of calcium carbonate in soil.

This study simulates the physical model test of erosion caused by rainfall events eroding surface soils. The results demonstrate that the MICP method does benefit on solidifying soil and shallow layer landslides prevention. It is indeed verified that the application of the MICP method to the surface soil erosion control is feasible.

Key words : MICP, soil layer erosion, mechanical properties

目次

摘要.....	I
ABSTRACT	III
目次.....	V
表次.....	VII
圖次.....	VIII
第一章 緒論	1-1
第一節 研究背景.....	1-1
第二節 研究目的.....	1-4
第二章 文獻分析	2-1
第一節 微生物誘導碳酸鈣沉積	2-1
第二節 人工降雨實驗	2-6
第三節 MICP 工法應用及研究案例.....	2-8
第三章 工作執行方法與步驟.....	3-1
第一節 工作執行方法.....	3-1
第二節 降雨實驗設備.....	3-2
第三節 試驗規劃與實驗步驟	3-11
第四章 試驗結果與分析.....	4-1
第一節 不同含水量(烘乾時間)下試體抗沖蝕能力分析.....	4-1
第二節 不同相對密度下試體抗沖蝕能力分析.....	4-7
第三節 不同坡度下試體抗沖蝕能力分析.....	4-12
第四節 土壤試體抗壓強度分析.....	4-17
第五章 結論	5-1
參考文獻	參-1
附錄.....	附-1

附錄一、期初審查會議記錄暨回覆辦理情形	附-1
附錄二、期中審查會議記錄暨回覆辦理情形	附-4
附錄三、期末審查會議記錄暨回覆辦理情形	附-6

表次

表 3-1 降雨強度之定值	3-8
表 3-2 試體於不同含水量(烘乾時間) 下之抗沖蝕能力試驗規劃 .	3-13
表 3-3 試體於不同相對密度下之抗沖蝕能力試驗規劃.....	3-13
表 3-4 試體於不同坡度下之抗沖蝕能力試驗規劃	3-13
表 4-1 不同烘乾時間(含水量)抗沖蝕率 (I=41mm/hr)	4-4
表 4-2 不同烘乾時間(含水量)抗沖蝕率 (I=66mm/hr)	4-7
表 4-3 不同相對密度下試體抗沖蝕率 (I=41mm/hr)	4-10
表 4-4 不同相對密度下試體抗沖蝕率 (I=66mm/hr)	4-12
表 4-5 不同坡度試體抗沖蝕率 (I=41mm/hr)	4-15
表 4-6 不同坡度試體抗沖蝕率 (I=66mm/hr)	4-17

圖次

圖 2-1	Schaevitz 離心機	2-9
圖 2-2	透過 SEM 觀察土壤的微觀結構 (a)改善前(b)改善後	2-10
圖 2-3	實驗裝置圖	2-11
圖 2-4	大規模砂粒膠結試驗	2-12
圖 2-5	生物修復技術進行沙灘之固灘及防蝕	2-13
圖 2-6	生物修復技術進行沙灘之固灘及防蝕結果	2-13
圖 2-7	在施作 HDD 之前、現地施作生物礦化之過程	2-14
圖 3-1	循環水槽與降雨器實驗系統圖	3-2
圖 3-2	針管型降雨器圖	3-3
圖 3-3	倒 U 型塑膠管配合針管系統	3-3
圖 3-4	空氣壓縮機	3-3
圖 3-5	高速攝影機-Phantom Miro ex4	3-5
圖 3-6	Nikon 定焦鏡頭 (左 50mm)	3-5
圖 3-7	本實驗雷射光源系統	3-5
圖 3-8	三維移動台車	3-6
圖 3-9	試驗水槽流量率定曲線圖	3-7
圖 3-10	降雨均勻度相對誤差	3-9
圖 3-11	高速攝影機拍攝雨滴落下之情形 (圖上小白點為雨滴)	3-10
圖 3-12	終端速度理論與實驗值之比較	3-11
圖 3-13	實驗配置圖	3-14
圖 4-1	不同含水量(烘乾時間)下試體沖蝕之情形 ($I=41\text{mm/hr}$)	4-2
圖 4-2	不同含水量試體沖刷後高程差($I=41\text{mm/hr}$)	4-3
圖 4-3	不同含水量(烘乾時間)試體沖蝕之情形 ($I=66\text{mm/hr}$)	4-5
圖 4-4	不同含水量試體沖刷後表面高程差 ($I=66\text{mm/hr}$)	4-6

圖 4-5 不同相對密度下試體之沖蝕破壞情形 ($I=41\text{mm/hr}$)	4-8
圖 4-6 不同相對密度試體沖刷後表面高程差 ($I=41\text{mm/hr}$)	4-9
圖 4-7 不同相對密度下試體之沖蝕破壞情形 ($I=66\text{mm/hr}$)	4-10
圖 4-8 不同相對密度試體沖刷後表面高程差 ($I=66\text{mm/hr}$)	4-11
圖 4-9 不同坡度試體之沖蝕破壞情形 ($I=41\text{mm/hr}$)	4-13
圖 4-10 不同坡度試體沖蝕後高程差 ($I=41\text{mm/hr}$)	4-14
圖 4-11 不同坡度試體之沖蝕破壞情形 ($I=66\text{mm/hr}$)	4-15
圖 4-12 不同坡度試體沖蝕後高程差 ($I=66\text{mm/hr}$)	4-16

第一章 緒論

第一節 研究背景

近年隨著全球氣候變遷及地質不穩定時期之到來，如 2004 年南亞大海嘯、2011 年日本 311 地震等巨型災害於地球每一角落仍頻發生，奪去大量生命與財產，人類為此付出慘痛代價。為因應此惡劣自然條件，唯有真誠面對大自然，更加理解環境變遷之原因，嚴謹預測其變遷趨勢，提出有效解決方法，為有待吾輩積極參之刻不容緩之嚴肅課題。

相對於世界險峻之自然條件，我國自是無法僥倖排除於外，1999 年之 921 震災、2001 年桃芝、納莉等風災，乃至 2015 年初之台南地震等災害，均奪走眾多寶貴國人的生命與財產。

在多種之災害類型中，以自然邊坡土石滑動災害最引人注意，主要係該災害一旦發生，普遍均屬大範圍之災害規模，受影響層面極廣，除民眾生命財產受到威脅、結構物損毀、維生路線中斷，集水區生態環境損毀之外，近年如 2015 年蘇迪勒風災重創南勢溪流域之案例，更發現因大量土砂滑入溪流，使原水質濁度急速飆升，造成下游淨水廠工作無法負荷，因此民生自來水無法正常提供等問題，引致民怨四起，政府施政效能受到民眾高度存疑，如南勢溪流域供應大台北市數百萬人重要水源區內之自然邊坡穩定工作，更屬嚴峻與困難，為水土保持工程專業人員刻不容緩並須處以有效整治重要工作。

當一自然邊坡受到豪大雨侵襲，因邊坡表層逕流水入滲土壤，累積一定時間之後，土壤飽和度上升，使邊坡土體剪力強度降低，同時逕流水體因位能轉換成相當可觀之衝量(momentent)，引致土砂產生沖蝕現象，在兩者現象交互作用及自然地型、地質條件下，邊

坡土體存在一臨界坡角與臨界坡高，小於該臨界值邊坡能維持穩定狀態，一旦超出臨界值，土體將產生拉力裂縫並造成各類型態之滑動、滾動運動現象，該運動變形程度，一旦超出自然生態環境所能容忍範圍，即構成災害發生。

截至目前，國內外有許多學者提出關於邊坡淺層土壤滑動或地表土壤沖刷現象之分析預測模式，同時有相當多樣之工法被採行應用於邊坡整治工作，尤其 921 震災之後發展之近自然工法，均已能發揮設計功能，使國內水土保持技術與工作成果，居於世界領導地位，受到廣大民眾好評。也由此可知，國人對具有安全性之生態性自然環境需求更加殷切，因此在以更精益求精，更自然生態需求層面做一價值工程檢視，可發現這些傳統工法中仍有進步空間。經檢視一些傳統工程共通問題，發現對自然環境之友善性條件普遍不足、施工條件受限制、工程生命週期不足，又所使用之材料在製造過程、施工機具與動力能源、人力資源等均對自然環境造成輕重不一之衝擊，故尋求一真正貼近自然之生態性工程，得以改善這些問題，具有實際需求性。

利用微生物誘導碳酸鈣結晶(microbial induce calium carbonate participation、MICP)工法，因主要工項為將極低黏滯係數之菌液及膠結溶液藉由重力作用滲入土體內，使形成一自然成岩作用之環境條件，過程不需製造有機、無機之固體材料與構件、亦不需使用到大型機具，不需耗費大量人力，尤其對於極為陡峭險峻之地形條件，並不太須仰賴假設工程(包含施工便道、施工平台架設等)之輔助，只要溶液材料輸送管線可到達之處，即可順利施工，故相對於傳統水土保持工法，顯然更能節能減碳，可符合維護自然生態環境之重要條件。

另 MICP 工法所具優勢，首有一旦完工之後，其對邊坡淺層土砂滑動或地表土壤沖刷之穩定效果，係隨時間而持續增加，相對於傳統水土保持工法，需克服耐久性之問題，更加顯示 MICP 工法優越性；其次該工法可與自然植生工法具相輔相成之效果，地表須植生範圍之土壤質地仍具有透氣性、保有自然肥力之條件，使植被作物順利成長。另外原已有天然植被且存有微細拉力裂縫之具有表土沖刷潛勢之自然邊坡條件下，MICP 工法可在完全不損及既有天然植被之條件下，順利施工，使達到一種抵抗地表土壤沖刷之穩定效果。

由於 MICP 具有相當優勢，因此、目前先進國家，競相深入研究中，例如與我國自然環境類似之常瀝坡地土砂災害之日本，更是積極投入研究。為此 98 年間與本校之生物所孟教授及土壤科學系教授及中正大學陳教授共組研究團隊，執行水利署之「細菌應用於混凝土修復及淤泥固結之開發研究」，研究中發現確實可以採用細菌生物技術來進行淤泥膠結及土壤之固化。本研究團隊延續前述成果繼續進行國科會委託研究(99-2221-E-005-086-MY3)，利用大自然中本來就存在之生物活動，即酵素酶生物技術來進行淤泥膠結及土壤之固化，已經尋找到本土之合適菌珠及直接以化學合成方式產製酵素酶之技術，故期望將現有開發之技術應用於水土保持功能上而研提此計畫。又由於 MICP 工法研究課題直接涉及地球物理、化學、地質、微生物、工程材料、水土保持等學科領域，為一跨專業領域之題目，因此本研究案結合國內大學從事各該領域研究之學者偕同研究，邀請中正大學地球科學系陳建易教授協助生物礦化機理研究及中興大學土木工程學系石棟鑫副教授協助自然邊坡表土沖刷相關研究工作。

第二節 研究目的

本研究計畫係延續第一年計畫，以 MICP 工法應用作為自然邊坡地表土壤沖刷防治之創新工法，首先進行一系列基礎研究，最後藉由模擬強大降雨侵蝕土壤邊坡造成表土沖刷之物理模型試驗，經由與數據分析計算，比較控制組與試驗組之反應結果，期能準確評估 MICP 工法應用在自然邊坡地表土壤沖刷防治工作，提出初步整體可行性評估報告以作為後續深入應用研究之參考。

第二章 文獻分析

第一年研究已經完成 MICP 機理之探討及如何使用此新技術來增強土壤之力學性質。本年度研究將於試驗室內進行 MICP 之模型試驗，藉由模擬強大降雨侵蝕土壤邊坡造成表土沖刷之物理模型試驗，進行試體之觀察與力學分析，比較控制組與試驗組之反應結果，期能準確評估 MICP 工法應用在自然邊坡地表土壤沖刷防治之可行性。以下針對微生物誘導碳酸鈣沉積之機理及人工降雨試驗原理及設備，作一文獻探討。

第一節 微生物誘導碳酸鈣沉積

以微生物誘導碳酸鈣沉積(microbial induce calium carbonate participation, MICP)工法，進行邊坡土壤性質改質研究，此方法是利用天然無害之真實微生物在新陳代謝過程中，產生尿素酶，此尿素酶可順利水解尿素產生碳酸根離子，當環境中鈣源充足時，鈣離子和碳酸根離子將迅速發生反應形成碳酸鈣沉澱，如該反應過程發生在土壤孔細空間，則將起架橋連結作用，使小顆粒膠結成大顆粒，如應用在邊坡土體固結作用，其所可獲得之主要效果有下列 3 項：

(一)、可直接增加土壤剪力強度，進而提升邊坡土壤抵抗受剪切作用產生位移之能力，達到控制邊坡淺層土壤滑動災害之目的。

(二)、降低土體滲透係數，以減少雨水入滲土體之水量，維持邊坡原有土壤飽和度，使不增加邊坡土體滑動潛勢。

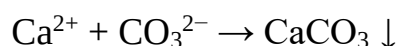
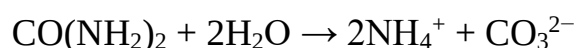
(三)、因邊坡表層土壤膠結作用，將可降低逕流水對邊坡沖蝕作用之潛勢。

自 1973 年 E. Boquet 等發現土壤細菌誘導碳酸鈣晶體沉積現象以來，碳酸鹽生物礦化沉積之機理及應用研究一直備受關注。微生

物的礦化是自然界廣泛發生的一種作用，它與地質上的礦化作用明顯不同的是無機相的結晶受生物分泌有機質的控制，其中不可水溶的有機質(IM)佔絕大部分，通常為一些幾丁質及絲蛋白等厭水分子。可水溶的有機質(SM)含量較少，常為酸性的蛋白質或糖蛋白、磷蛋白等，乃是微生物礦化作用的主要控制者和調節者。

文獻指出，將土壤試體浸泡於菌株培養液中，菌株在生長繁殖過程中不斷持續分解培養液中的營養源，生成 CO_3^{2-} 和 NH_4^+ ，同時使環境 pH 值升高，菌株細胞膜介面處帶負電荷的 SM (可溶水有機質) 不斷螯合 Ca^{2+} ，誘導出局部的晶體離子 CO_3^{2-} 濃度逐漸增加，從而吸引更多的 Ca^{2+} ，直到晶體離子濃度增大到利於核化發生時，礦化作用將逐漸發生而導致 CaCO_3 沉澱。

微生物誘導碳酸鈣沉澱，主要受到下列二反應方程式控制[1]



這個研究理論基礎，是由尿素溶液和氯化鈣一起水解所產生碳酸鈣。純的尿素酶或整個細菌細胞，因為含有高濃度的酶，可以催化尿素水解，產生氨根離子和碳酸根離子(LeMetayer-Levrel et al., 1999; Nemati and Voordouw, 2003; DeJong et al., 2006; Whiffin et al., 2007)。

因為尿素水解反應速率低，因此科學家想到利用具本身具有水解尿素之活性酶之細菌來參與反應，以加速反應之進行，細菌在以尿素為食物(獲取氮源)，在切斷 CO 與 $(\text{NH}_2)_2$ 鍵結後，使尿素產生

銨離子及碳酸根離子。分解出的碳酸根離子再與土壤中的鈣離子發生反應，產生碳酸鈣沉澱，即為微生物誘導碳酸鈣沉積之結果。

如前述、由於 MICP 整個反應是藉由既有之地球上生物與生具有之能力，不添加有害物質，也不需仰賴大型施工機具，因此它可說是一種環境友好型之生態工程。以如此生態工程之手段達到使原本鬆散的土體結構，膠結成具有力學性質的土體，不僅土體強度增強，也保有土體原有的不擾動性，因此、如應用於自然邊坡淺層土壤滑動災害防治工作，其防制作用機理，獲得合理有效論證。

所以 MICP 是一種新的土壤強固方法，其原理是根據微生物引起的碳酸鈣沉澱，而且產生碳酸鈣具有岩石般之性質。當微生物族群注入淤泥土壤裡，微生物中的尿素酶轉換尿素成銨和碳酸離子，結合土壤基質，在選定地質敏感區的位置裡，將無機物質的碳酸鈣沉澱被誘導出來 (Whiffin, 2004; DeJong et al., 2006; Ivanov and Chu, 2008)。這些碳酸鈣礦物結合現有的土壤粒子(soil particle)，形成粒子之間的橋樑，進而增加土壤物質的力學強度。這些產物跟自然界的砂岩有相同的物理特性，並且保有滲透性，可以使用在大規模的基礎建設應用上。

MICP 提供反應溶液及生物活性。必須控制和管理生物化學反應的時間、速度和空間分佈，因為它的碳酸鈣產品產生的時間、速度和空間分佈，影響改善的土壤性質。當生物代謝作用運作時，有機物分解、無機物沉澱、氣體生成的化學過程，可以分別進行生物礦化作用 (biomineralization)、生物膜 (biofilm) 的形成、生物氣體 (biogas) 的生成。在土壤最上層表面的幾公尺內，每克土壤存在著超過 10^9 的微生物細胞，而其數量濃度會隨著深度增加而減少。在 30 米的深度，是大部分土壤改良工程應用的下限，微生物濃度仍有

約每克土壤中 10^6 細胞存在著。這樣的微生物數目可以利用的生物代謝作用很多，儘管他們個體是非常小的(Whitman et al., 1998)。但一旦微生物產生生物礦化時，這些晶體足夠改善土壤性質。

在土壤中，細菌尿素酶分解尿素的效率及碳酸鈣沉澱的晶形、樣貌皆受到環境因素的影響，主要的外在環境因素有土壤 pH 值、環境溫度、菌液濃度及土壤顆粒大小等，以下將逐一探討這些因素對土壤中細菌沉澱碳酸鈣反應之影響。

(一) pH 值之影響

在 MICP 反應進行的過程中，尿素經尿素酶催化水解後產生的氨會進一步與水發生水解反應產生氫氧根，導致酸鹼值不斷上升，故當尿素酶的活性越強其生成的氨越多，該環境的酸鹼值會越高，而酸鹼值的高低則直接影響了碳酸鈣結晶沉澱的效率及型態，也會對細菌細胞的生理機能、尿素酶的活性造成影響，進而使 MICP 反應發生不同的變化。

MICP 技術是藉由碳酸根與鈣離子結合產生之碳酸鈣結晶對土壤顆粒進行固結；當二氧化碳溶於水後產生之水中溶解無機炭(dissolved inorganic carbon)會以 H_2CO_3 、 HCO_3^- 及 CO_3^{2-} 三種形態存在，依據環境 pH 不同各個形態存在的比例也會不同，以化學誘導碳酸鈣沉澱的原理判斷，當酸鹼值較低時，無機炭以 H_2CO_3 、 HCO_3^- 形式存在，較不易與鈣離子發生沉澱，當酸鹼值提高時， CO_3^{2-} 的濃度會隨之升高，故沉澱量會隨酸鹼值提高而增加。

(二) 環境溫度之影響

環境溫度會對自然界中的各種細菌活動造成影響，尿素酶對尿素水解的催化作用速率也與溫度相關，大多數尿素酶的最佳反應溫度範圍為 20 至 37°C，酶反應的最佳範圍取決於環境條件和系統中反應物的濃度。若將環境溫度從 10°C 提高至 15°C，尿素酶活性約提升兩倍，若將環境

溫度從 10°C 提高至 20°C，則尿素酶活性約可提升十倍，文獻研究 (Navdeep Kaur Dharmi 等) 指出尿素酶在 35°C 時最為穩定，但當環境溫度逐漸升高至 40、45、50、55°C 時，尿素酶活性會漸漸衰減至 92、85、62、53%；由前述試驗可知溫度為影響尿素酶活性的重要因素，將試驗環境控制在適當的溫度可使 MICP 反應效率增加。

(三) 菌液濃度之影響

Bacillus pasteurii 在 MICP 反應中扮演十分重要的角色，其主要的功能為生產尿素酶及作為碳酸鈣結晶之核點，因此 MICP 工法固結土壤的效果很大程度上取決於 *Bacillus pasteurii* 菌液的品質，常見用以判定菌液品質的標準為單位溶液中的有效活菌數，即為菌液濃度。

高濃度的細菌細胞溶液可增加環境中的尿素酶濃度，細菌濃度較高可以更迅速的將溶液酸鹼值提升至 pH9，也就是 MICP 反應的平衡酸鹼值，實驗亦觀察到較高的細菌濃度可提升尿素水解效率及碳酸鈣的沉澱量，尿素水解與細菌細胞濃度有直接關係，較高的菌液濃度有利於 MICP 反應進行。

再回顧目前工程師慣用並與 MICP 具競合立場之傳統化學性的灌漿 (chemical grouting techniques) 工法，其中低壓灌漿為常用地盤改良工法之一，該工法所採用之灌漿壓力一般小於 10kg/cm²，將化學灌漿液緩慢灌注滲透進入土壤空隙間，進而置換土壤孔隙水以固結土壤，已達到止水、強化及穩定地盤之目的 (毛子文，2005)。該工法在國內常運用在土石壩、深開挖、下水道、及捷運等土木工程施工上。低壓化學灌漿漿液依凝固快慢可分為瞬凝「水玻璃係」及慢凝「水泥係」兩種。瞬凝漿液在離開灌漿口後，瞬間（數秒至數分鐘）即開始凝固，此時漿液成均勻球狀滲透，球狀漿液外殼首先開始凝固時，及停止滲透前進，後灌之未凝固漿液將先前凝固之漿液衝破而積聚凝固在殼外，而後來再灌漿之漿液亦是如此，而呈現

出瘤狀。且不具瞬凝特性之漿液，施灌時沿著土壤孔隙及裂縫前進直到漿液初凝或阻力過大而停止。後來注入之漿液在土層中另闢一新的前進路線，因此此類漿液凝固後在土層中呈現層面或脈狀（樹枝狀）分佈（胡邵敏等, 1999）。

由於傳統化學性的灌漿 (chemical grouting techniques) 工法所注射液體的高黏性或快速硬化的速率，化學性灌漿技術通常比較昂貴，並且需要較多的注射槽來處理較大體積的土體。除此之外，這方法明顯減少強化土壤的滲透性，阻礙了地下水流及限制了較長距離的水流注入，造成大規模的處理障礙，又有由於各類化學物質與自然環境之相容性一直受到生態工程領域學者相當程度之質疑，因此，近年水土保持工程師，對該工法之設計採用有所怯步。由以上論述，MICP 似乎可以解決化學性灌漿的難題。

第二節 人工降雨實驗

關於人工降雨實驗之部分，為進一步控制降雨所造成之逕流沖刷條件，本研究欲進行實驗室降雨試驗，因為人工降雨器 (rainfall simulator) 具有較高之實驗控制性，能夠進行重複性試驗與模擬事件之特徵降雨等能力 (Pall et al. 1983)。目前約有超過 40 種不同之人工降雨器已被廣泛使用於沖蝕相關研究中，其中 80% 人工降雨器的差異為噴嘴類型與其他變化 (Grismer, 2011)。現場實驗常用之肯塔基人工降雨器 (Kentucky rainfall simulator)，即為一簡單小型具有 6 英吋直徑降雨面積的設備 (Bhardwaj and Singh, 1992)；

(Moore et al. 1983)，而單滴式人工降雨器主要用於評估特定雨滴性質所引起的土壤沖蝕基本過程 (Al-Durrah and Bradford, 1982；Bradford et al., 1986；Mouzai and Bouhadeh, 2003)；多滴式人工降雨器則是可用於實驗室及現地尺度，常透過地表逕流評估雨滴脫離與

運動過程 (Armstrong and Quinton, 2009)，可更進一步分成加壓式和針頭式人工降雨器兩種類型，加壓式人工降雨器是通過泵浦改變壓力來模擬降雨強度，相關研究如比較降雨特徵 (Williams et al., 1998; Yu et al., 2003)、現地試驗 (Esteves et al., 2000)、觀察沖積物濃度之影響 (Armstrong and Quinton, 2009)；(Grismer, 2012)；(Iserloh et al., 2013)。

而針頭式人工降雨器則是透過針頭讓雨滴因重力下降，降雨強度依流量或水頭而改變 (Foster et al., 2000)，前人研究有利用針頭式降雨器求出泥砂影響流速之大小 Kinnell (2005)、評估土壤沖蝕力 (Abd Elbasit et al., 2010)；(Abd Elbasit et al., 2011)、分析入滲沖刷及逕流之間的關係 (Dunkerly, 2012)。將人工降雨器應用於現地時，則需考量其空間、時間等各種尺度，於不同自然條件下其干擾都應當納入考量 (García-Ruiz et al., 2010)，但若欲將現地情況複製回室內實驗室，則需要簡化實驗條件，因此可能會簡化諸多問題。(Kinnell 2005, 2006)發現實驗室裏頭的概念模型不能充分觀察裸土沖蝕，所以人工降雨模擬出的結果對應於自然事件中，是需要長時間與重複實驗的比較 (Meyer, 1988)。對於土壤沖蝕而言，雨滴速度與動能被視為土壤沖蝕的主要原因 (Bisal, 1960)；

(Ellison, 1947)，即暴雨的總能量正比於土壤沖蝕率

(Lal, 1988)，雖說動能為造成沖蝕主要原因，但卻不足描述沖蝕量，因此明確定義沖蝕是有困難性的 (Agassi and Bradford, 1999)。

而水滴於不同的高度下落的速度，則被認為是影響模擬降雨侵蝕力的另一個因素 (Epema and Riezebos, 1983)。(Van Dijk et al., 2002)回顧了雨滴粒徑、強度與動能之間的研究，認為降雨動能可分為單位時間的動能與單位體積的動能，在不同自然降雨下，降

雨強度與單位體積動能基本上呈現正相關指數、對數之關係

(Sanchez-Moreno et al.,2012)，而利用人工降雨器所作之降雨強度與單位體積動能之實驗中也發現，其可以表現出明顯之關聯性

(Armstrong and Quinton,2009)，說明人工降雨器產生的降雨特性可代表自然降雨之趨勢。人工降雨器主要之功能為模擬自然降雨，自然降雨之形成包含降雨強度、延時、粒徑之分佈、雨滴降落速度等特性，以利土壤沖蝕、極端降雨之研究，人工降雨器亦可製造均勻降雨。

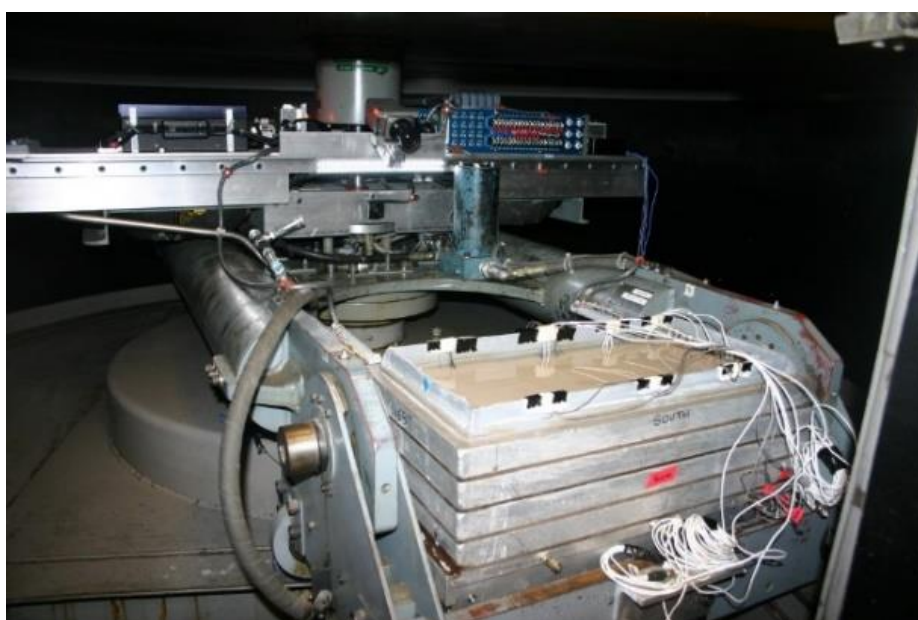
根據 (Meyer,1979)，理想之人工降雨器，應俱下列特性：

(1) 雨滴粒徑分佈應與自然降雨相似；(2) 雨滴降落地面速度應接近終端速度；(3) 製造出高強度降雨，足已使地表逕流和土壤沖蝕達到相當的量；(4) 所選定的降雨強度、延時，和雨滴形成有其重覆性 (Reproducibility) 與連續性 (continuity)；(5) 大部分雨滴從高空中降落，其撞擊地面方向時應垂直降落；(6) 粒徑分佈與降雨強度具有空間之均勻性，並足以代表該研究之場地；(7) 在模擬人工降雨動能方面應與自然降雨動能相似。人工降雨模擬器大致可分為室內與室外，Chow (1965) 於室內實測時，忽略風的浮力、剪應力、水滴降落過程中因變形所產生的擺動，並假設雨滴為剛體且為圓球，此時雨滴之重力等於空氣阻力，本實驗室即為針頭式人工降雨器。

第三節 MICP 工法應用及研究案例

近年來，國際間對 MICP 應用於土壤液化防治研究逐漸重視，Montoya(2013)利用動態離心模型 (如圖 2-1) 測試生物礦化後沙堆之土壤液化防治效果，試驗過程分為三種不同等級，分別為輕度生

物礦化，代表鬆散沙，中度生物礦化，代表膠結砂，重度生物礦化，代表砂岩級材料。其結論指出，MICP 處理後的砂提供了較高的強度與勁度使其足以抵抗液化，在動態負載下與未處理的飽和鬆散砂相比，MICP 處理的土壤在所有水平震動下所減少的沉陷量與降低的孔隙水壓力均比未處理得來的多。MICP 處理後可減少產生孔隙水壓力和震動誘導沉陷量，改善在動態負荷下土壤的行為，但也增加了的表面的最大加速度，此結果在考慮使用 MICP 處理時為



重要指標，因此在設計 MICP 處理時，應考慮抗液化性與地表面加速的之間的變化。

圖 2-1 Schaevitz 離心機

2011 年日本東北大地震，統計超過 2000 條河堤遭到破壞，根據調查結果，問題出在防洪堤本身地基土壤液化為最大損害。近年來，以生物礦化技術作為防止土壤液化之工法，在學研界不斷地被提出討論與研究。日本目前正著手研究一種新型灌漿技術，以生物礦化技術引導碳酸鈣沉澱，達防止土壤液化之目的。日本愛媛大學

土環系教授岡村未対（Mitsu Okamura）與副教授安原英明（Hideaki Yasuhara），針對土壤強化，提出新型 MICP 灌漿技術。他們利用生物酵素酶的作用造成的碳酸鈣沉澱作為膠結料來改善土壤之結構，其膠結前後效果如圖 2-2。在實驗室證實了尿素酶型的灌漿技術，確實可以改善土壤的物理與力學性能。

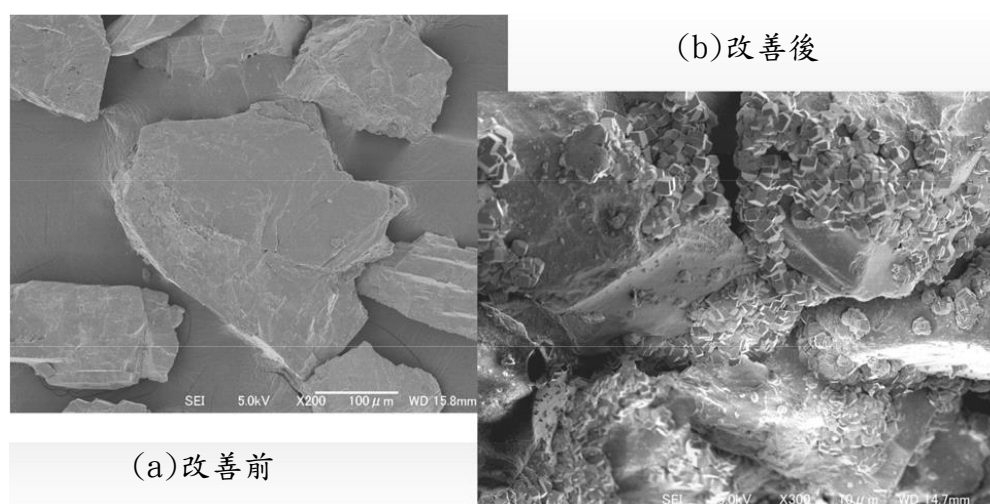


圖 2-2 透過 SEM 觀察土壤的微觀結構 (a)改善前(b)改善後

Leon A. van Paassen et al. (2010) 在實驗室進行大規模的砂粒固結試驗，實驗裝置是先將25cm厚的砂粒鋪在 $8.0\text{m} \times 5.6\text{m} \times 2.5\text{m}$ 之混凝土製容器中，並於砂粒中裝置 48 個數據接收器，接著再將 2.25m 厚、平均乾密度為 1560 kg/m^3 、取自於德國的砂石場之砂粒填充至容器中。最後將六個 PVC 管裝置在容器中，並於其中一端裝置幫浦，使得容易可以在砂粒中行程可流動之狀態，如圖 2-3 所示。

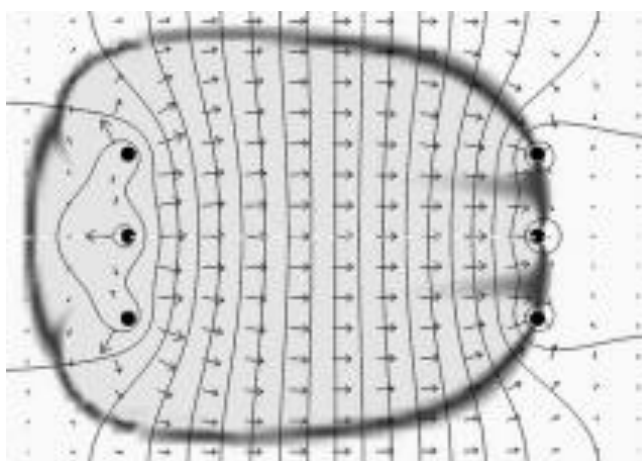


圖 2-3 實驗裝置圖

實驗流程首先將 5m^3 的 B.P 菌注入砂粒中，接著將 5m^3 、 0.05mole 的氯化鈣注入砂粒中，最後將 96m^3 的 0.05mole 碳酸鈣及 1mole 的尿素分 10 次在 16 天內注入砂粒內。16 天後可以發現砂粒成功的膠結成塊，如圖 2-4 所示。



圖 2-4 大規模砂粒膠結試驗

Christopher Hunt (2014)等人亦曾經於加拿大 Key Lake 湖岸沙灘，應用生物修復技術進行沙灘之固灘及防蝕(Bio-mediated Soil Improvement Field Study for Erosion Control and Site Restoration)，以三種不同濃度之菌液分別滴灌入沙灘中(如圖 2-5 所示)，並與控制組做比較，發現 MICP 工法確實可強化沙灘達固灘及防蝕之目的(如圖 2-6 所示)。

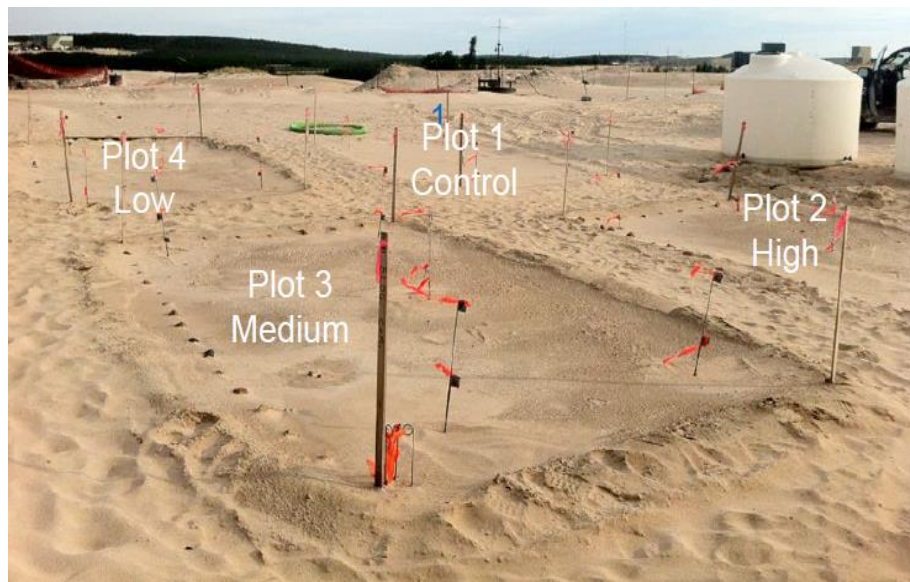


圖 2-5 生物修復技術進行沙灘之固灘及防蝕



圖 2-6 生物修復技術進行沙灘之固灘及防蝕結果

W.R.L. van der Star et al. (2011)因荷蘭欲利用水平導向鑽孔技術(horizontal directional drilling, HDD)施作一天然氣管道，但因天然氣管道會經過礫石層，故 W.R.L. van der Star 選擇在此礫石層實施現地之生物礦化技術，進而提高礫石之穩定性，如此一來 HDD 得以施作在堅硬之地盤上。施作範圍從羅羅寧根(Groningen)到馬斯垂克(Maastricht)約 1000 m^3 。實驗步驟根據 Leon A. van Paassen et al. (2010)所做出之結果，在現地首先先將氯化鈣及尿素溶液用混凝土攪拌機現場攪拌後注入土壤中，接著再將菌液注入土壤中，溶液在土層中之停留時間總計為 7 天。施作過程如圖 2-7 所示。最終成功將地盤固化，HDD 得以進行。

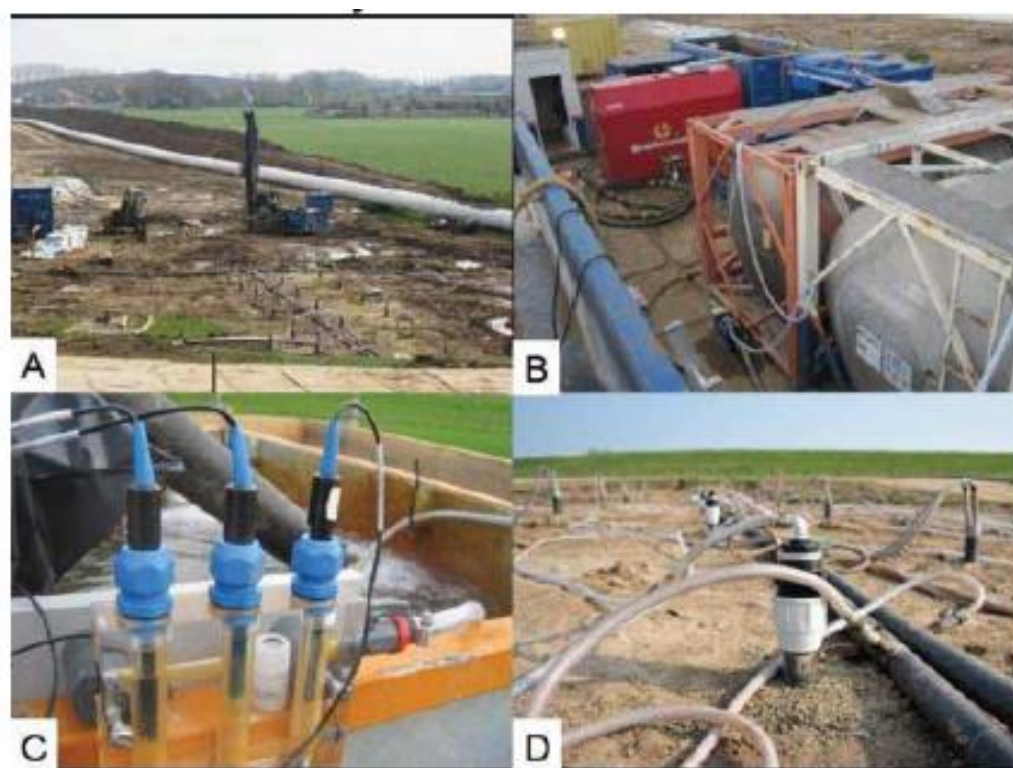


圖 2-7 在施作 HDD 之前、現地施作生物礦化之過程

- A) 注射井及取出溶液之井 B) 氯化鈣及尿素現地攪拌器
C) 再送到汙水處理廠之前的廢水監測系統 D) 注射及監測井

第三章 工作執行方法與步驟

第一節 工作執行方法

本研究為延續計畫，第一年已經完成文獻資料蒐集及初步土壤 MICP 實驗。經過文獻收集與分析以及實驗結果之證明，*Bacillus pasteurii* 菌對於鈣離子轉換具有相當效率，確實可於砂土顆粒之間長成碳酸鈣晶體進行填塞作用。經 MICP 作用後，無凝聚力之標準砂試體可以被固結成具有直立性之小圓柱，且 MICP 施作天數越長的試體，其整體固結狀況越佳，其抗壓強度隨之增加，試驗結果顯示標準砂試體抗壓強度值可由鬆散砂之零強度強化提升到 3 至 12kPa 左右。土壤重模試體之強度更可提升至 250kPa 左右。第一年度試驗結果顯示，MICP 作用後之標準砂試體及土壤重模試體，因為土體中碳酸鈣之堆積與膠結作用，導致其抗壓試體強度將大幅提升，此結果可證明 MICP 工法對土壤固結與防止邊坡滑動確實有相當之功效顯現。

本年度研究於試驗室內進行 MICP 試驗，就實施 MICP 實驗 7 天之組別與未施行 MICP 之控制組進行試驗結果比較，藉由模擬固定雨型(採用中央集中式雨型)(peak at center)，比較不同降雨強度（41mm/hr、66mm/hr）下之降雨測試，探討試驗變數在土壤相對密度不同（ $Dr=60$ 、70、80%）、土壤含水率不同（烘乾時間 0hr、6hr、12hr、24hr）及坡度不同（5%、10%、20%）之間的關係，並分析在何種配置下試體之抗沖蝕率最佳，進而提供未來現地試驗之參考。另外亦針對土壤在相對密度 $Dr=60\%$ 組別，在 MICP 試驗後進行抗壓試驗以比較參考之。

第二節 降雨實驗設備

本實驗位於本於中興大學人工降雨雷射試驗室進行，其設備包括人工降雨器、可變量流循環式水槽、質點影像測速儀（PIV）量測系統、及其他相關附屬設備如圖 3-1 所示，詳細規格如圖中說明。

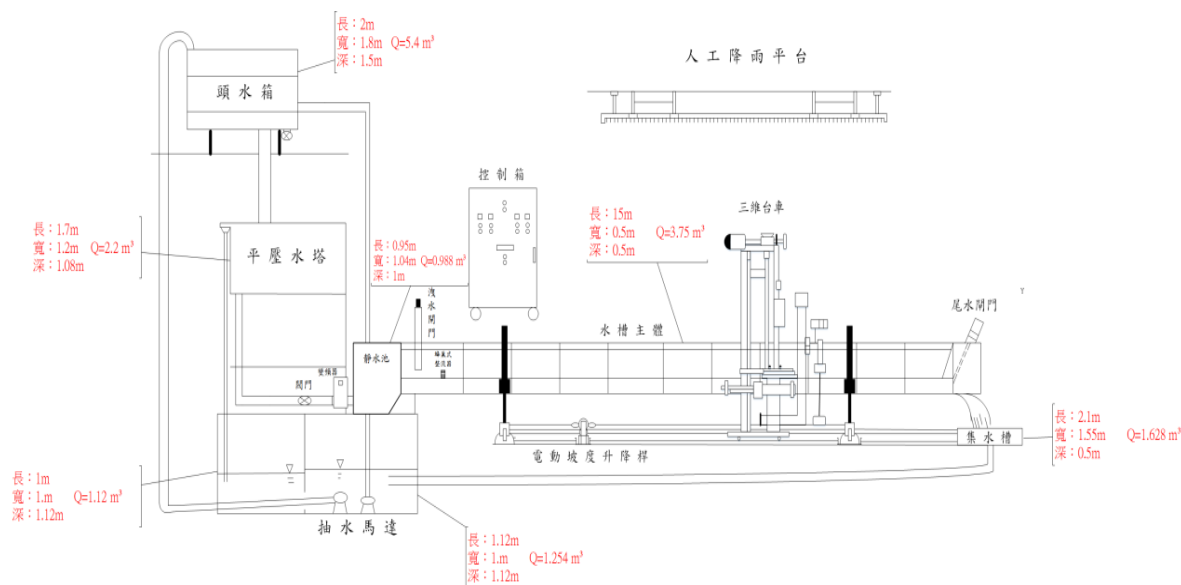


圖 3-1 循環水槽與降雨器實驗系統圖

一、人工降雨設備

本實驗所採用之人工降雨器係為針管型降雨器如圖 3-2 所示，由針孔至地面之距離約為 9m，針孔至渠槽液面之有效高度約為 8.5m，如圖所示。本實驗人工降雨器有四種內徑，可產生四種中徑之雨滴，本實驗則採用內徑 0.9mm，外徑 1.4mm 之降雨針頭進行實驗，此外，該降雨器與馬達相接，利用馬達迴轉頻率之改變，可使用其來調節雨滴粒徑大小與均勻度，使本實驗降雨器達到最均勻狀態之降雨。降雨系統，倒 U 型塑膠管配合針管系統如圖 3-3、降雨器之材質為角鋼，有效降雨面積為 1.0m*4.0m 然而有效降雨高度為 9m。利用空氣壓縮機(如圖 3-4 所示)，使降雨器達到定水頭之狀態。

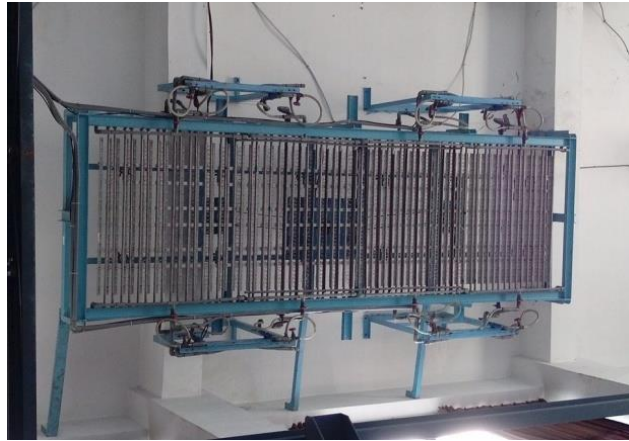


圖 3-2 針管型降雨器圖



圖 3-3 倒 U 型塑膠管配合針管系統



圖 3-4 空氣壓縮機

二、質點影像測速儀 (Particle Image Velocimetry, PIV)

質點影像測速儀系統，主要分為攝影機部分、雷射光源部分與三軸移動台車部分。本質點影像測速儀 (Particle Image Velocimetry, 以下簡稱 PIV) 量測實驗所使用之攝影機為美國 Vision Research 公司所製之 Phantom Miro ex4 高速攝影機如圖 3-5 所示，其最高影像解析度為 800x600 像素 (pixel)。本攝影機係以 CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) 成像之高速攝影機取代傳統 CCD 攝影機，CMOS 系統具備優點為成像快速，實驗時可達到快速取樣目的。攝影機內建 2G 記憶體，最高拍攝頻率可達 1265Hz，該條件一次可拍攝照片為 4412 張，曝光時間範圍為 2 到 788^{μs}，並可針對不同實驗條件之需求調整拍攝頻率、曝光時間、解析度，以配合可視化實驗及流場觀測。拍攝完畢之影像資料藉由高速網路傳輸線將影像資料傳送至電腦及隨身硬碟儲存。攝影機所使用之鏡頭為日本 Nikon 公司所製之定焦鏡頭，其可確保實驗於空間中之精度。

本實驗高速攝影機應用於終端速度之量測，所使用之鏡頭為焦距 50mm 如圖 3-6 所示。關於雷射光源，本實驗所採用之雷射光源為 UTOPIA 公司所製雷射光源系統如圖 3-7，其最大輸出功率約 1W，光源為綠光 (波長=532nm)，為其詳細了解拍攝段渠道內之流場分佈及雨滴降落之動態進而量測降落速度，經實驗水槽底部透明玻璃入射至量測區內，以利於觀察流場變化與雨滴降落速度之量測。PIV 實驗使用之三軸台車如圖 3-8，設有移動平台、三組精密光學尺及三組位移顯示器，可獨立控制平台三維方向之位移量，其顯示器經度達 1/1000nm，可針對渠道內流場與人工降雨器落下之雨滴拍攝位置進行精密定位。



圖 3-5 高速攝影機-Phantom Miro ex4



圖 3-6 Nikon 定焦鏡頭（左 50mm）

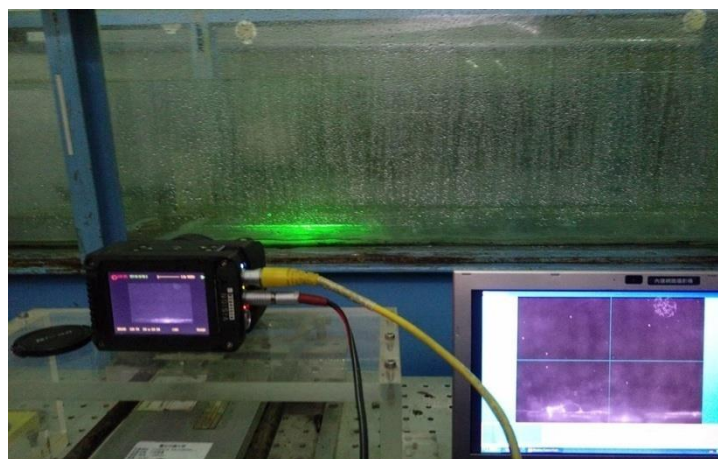


圖 3-7 本實驗雷射光源系統



圖 3-8 三維移動台車

三、循環水槽

本實驗之循環水槽內容包括平壓水塔、水槽主體及尾水箱等三部分，如圖所示。平壓水塔高為 3m，設溢流裝置以穩定水頭，槽頂以鐵蓋蓋覆，以防止外物落塵進入。水槽主體長 12m、寬 0.25m、高 0.9m，坡度可調範圍為 0%~10%，底床及兩側為厚度 1cm 之透明玻璃，以利雷射實驗進行，流量可藉由微調閘門開度進行控制，實驗水底使用 5 μ m 之濾心過濾，以保證水體中之自然懸浮顆粒粒徑小於 5 μ m。為加強訊號接收，加入二氧化鈦 (Ti^{O₂}) 粉末作為懸浮粒子 (Seeding particles)。二氧化鈦顆粒之平均粒徑為 1 μ m，比重 4.28，於水中之沉降速度約為 2.32 μ m/s，遠小於水體速度，故下降效應可忽略不計，故將二氧化鈦顆粒之瞬間速度視為流體速度。本實驗循環水槽之尾水乃以跌水方式流入蓄水池，於蓄水池中之水經抽水馬達抽送至戶外頂樓之尾水箱，再以重力方式流至平壓水塔，

重複完成整個循環系統。本研究為調整流量控制閥之開度配合體積法（流量=體積/時間），率定實驗水槽之流量 Q 與控制閥開度 F 之關係。以 240 公升之塑膠桶於水槽出流口跌水處接水，並記錄所需之時間，重覆 5 組取其平均值，即可求得流量 Q 與開度 F 之關係。如圖 3-9 所示。

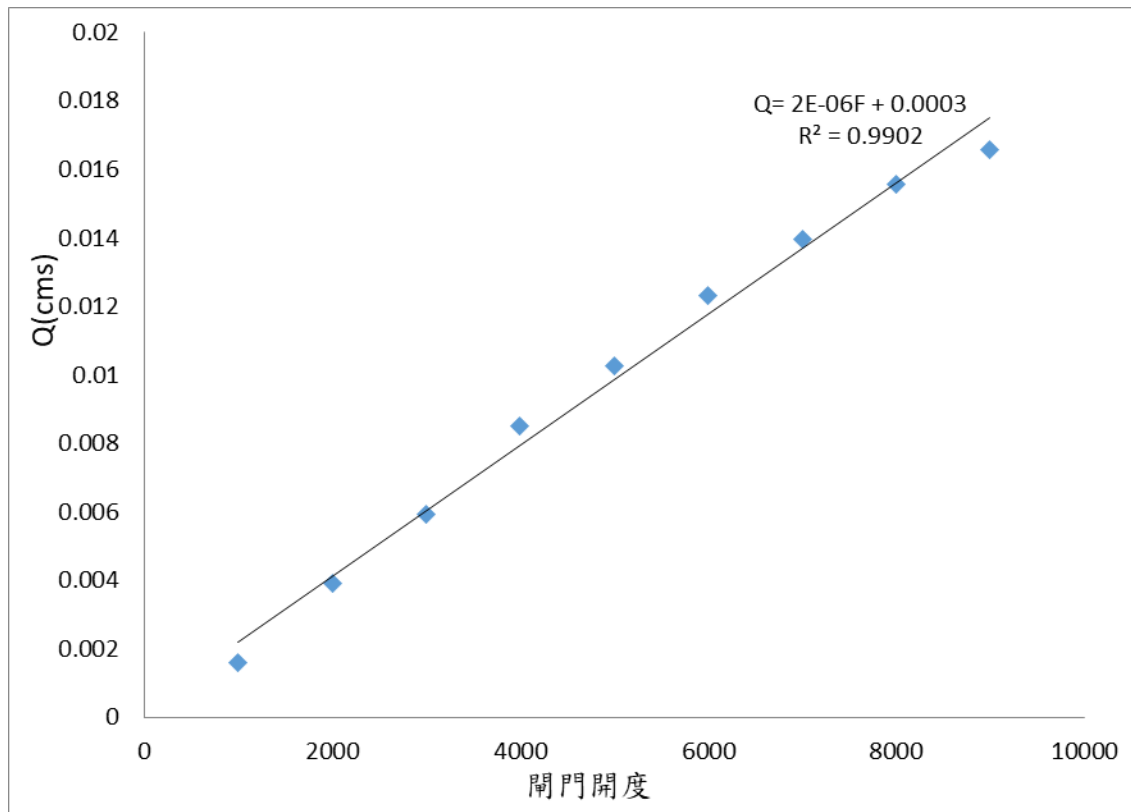


圖 3-9 試驗水槽流量率定曲線圖

四、降雨強度之率定

為得知本實驗之人工降雨模擬器之降雨強度與降雨器之降雨均勻性，故本實驗之率定同時檢定降雨強度與均勻度，找出不同馬達轉速下之雨滴均勻度之相對誤差進而定義其降雨強度之定值。進行試驗前，首先啟動電源、打開流量控制閥，觀察其流量之讀數是否依試驗所需，在本實驗之降雨器有效降雨面積內，安置 6 個劃有刻度之雨量收集筒並記下安置之位置，降雨強度之決定為在流量閱讀數 0.3、0.5、1.0、1.5、2.0 (l/min) 測試其在馬達轉數 400、600、

800、1000rpm 之降雨均勻度，以便分析降雨強度與均勻度，本率定實驗採用定心定平之電子磅秤（精準度達 0.01g），量得降雨體積即可計算降雨強度與降雨均勻度。選擇其相對誤差最小之組次作算術平均，即可定義降雨強度，本實驗之降雨均勻度決定降雨強度，流量閥讀數 0.3 (l/min)、0.5 (l/min)、1.0 (l/min)、1.5 (l/min) 均於馬達 600rpm 之轉速下相對誤差最小，代表其為最均勻，流量閥讀數到達 2.0 (l/min) 時，則於 800rpm 轉速下相對均勻。均勻度實驗誤差最小之組次即為本實驗之降雨強度定值。馬達轉速 600rpm 時，其均勻度平均誤差最小約為 15%(如圖 3-10)。

表 3-1 為不同流量閥讀數下，其對應之降雨強度定值，本論文之實驗採用流量 0.5 與 1 (L/min) 兩種降雨強度進行固化試體之沖蝕實驗，此時計算所得降雨強度為 41 (mm/hr) 與 66 (mm/hr)。

表 3-1 降雨強度之定值

流量 (L/min)	0.3	0.5	1	1.5	2
降雨強度 (mm/hr)	21	41	66	118	147

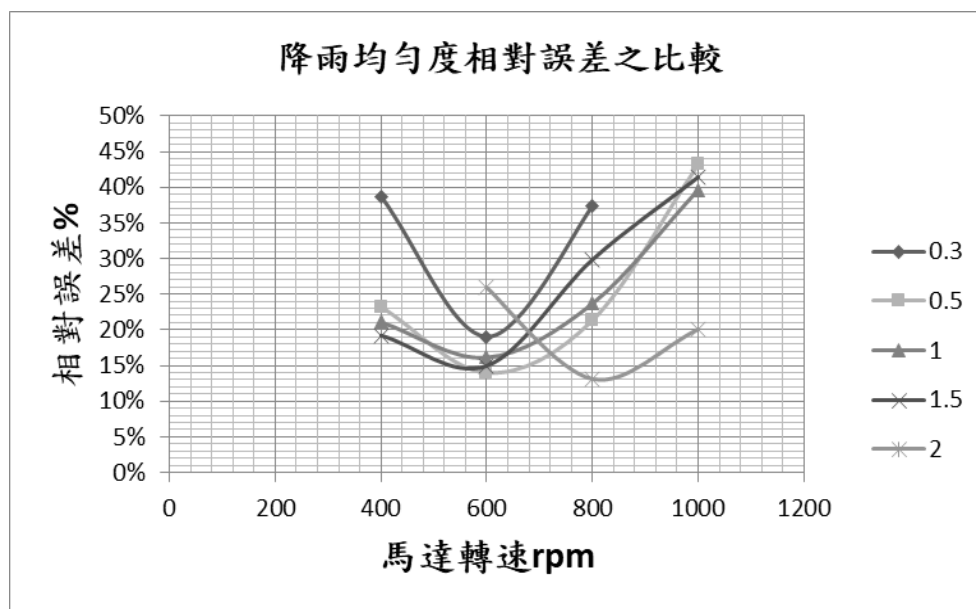


圖 3-10 降雨均勻度相對誤差

五、終端速度之檢測

本實驗室之人工降雨器，儀器高度為 9 公尺，有效降雨高度為 8.5 公尺，本試驗利用沖蝕試驗之降雨針管（內徑 1.4mm）內徑進行降雨實驗，故採用本實驗之針管檢測其所製造出之雨滴是否達到終端速度。

終端速度檢測實驗所採用方法為高速攝影機法，其採用 Phantom Miro ex4 之高速攝影機再搭配 Nikon 50mm 定焦鏡頭以三軸台車定位進行拍攝實驗，本實驗使用參數之設定為每秒拍攝（sample rate）600 張，總共拍攝 883 張照片，雨滴降落之軌跡在相片上呈現數顆明亮小圓點如圖 3-11 所示，且雨滴末端無擾動及拉長之現象所以容易量測，本終端速度檢測實驗考慮實驗場地之限制及爾後相關研究比較時之便利，降落高度採用 8.2 公尺進行此次檢測實驗，取 5 張照片找出同一點之雨滴，由相片之刻劃尺讀出雨滴於相片之位移量，再除於時間間距，即可得到雨滴落速，高速攝影機拍攝之終端速度以下稱為實驗值，由雨滴粒徑代入終端速度公式得

知之值稱為理論值，將實驗值與理論值相比較。觀測其誤差值並觀測其是否達到終端速度，理論值之公式如下： V_t =終端速度

(L/T)， ρ_s =剛體圓球密度 (FT²/L⁴)， ρ_a =空氣密度 (FT²/L⁴)， g =重力加速度 (L/T²)， d =剛體圓球直徑 (L)， C_d =拖曳力係數 (無因次)

$$V_t = \sqrt{\frac{4 g d \rho_s - \rho}{3 C_d \rho_a}} \quad (3-1)$$

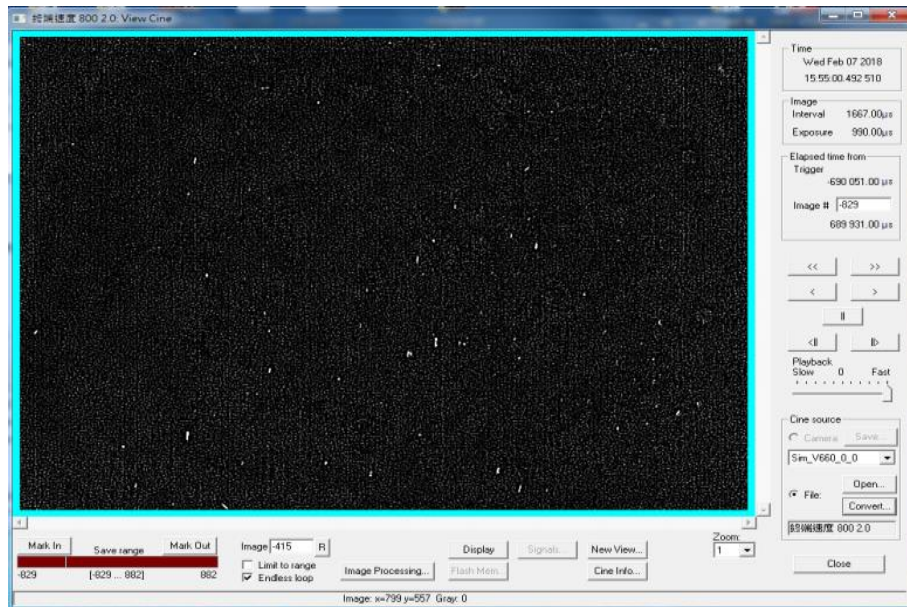


圖 3-11 高速攝影機拍攝雨滴落下之情形（圖上小白點為雨滴）

本實驗室使用之人工降雨器，終端速度檢測結果如圖 3-12，理論值落在 8.15 到 8.32 (m/s) 之間，實驗值則落在 7.87 到 9.00 之間，實驗值與理論值比較之結果顯示，兩值之誤差均小於 10%，因此可確定本實驗室之人工降雨器確實可以達到終端速度。

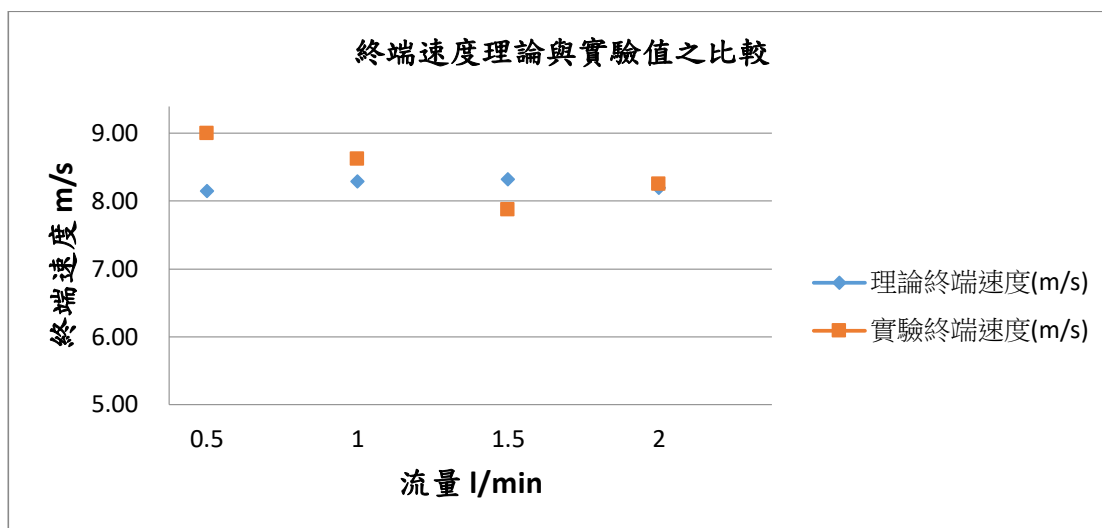


圖 3-12 終端速度理論與實驗值之比較

第三節 試驗規劃與實驗步驟

本研究係利用生物礦化 (MICP) 作用，使土壤試體內部產生碳酸鈣結晶以填充孔隙及膠結土壤顆粒，提升土壤抗沖蝕能力。再藉由模擬強大降雨事件侵蝕地表土壤造成沖刷之物理模型試驗，比較控制組與試驗組之抵抗土壤沖刷反應能力，以完成 MICP 工法應用於地表土壤沖刷防治效果及可行性評估。

一、降雨沖刷試驗規劃與實驗步驟

本實驗之獨立變數為降雨強度及地表坡度，土壤試體製作時取相對密度 $Dr=60$ 、 70 、 80% 、土壤含水率不同以烘乾時間 $0hr$ 、 $6hr$ 、 $12hr$ 、 $24hr$ 控制之，固定試體尺寸 $15*15*5\text{ cm}$ ，詳細製作步驟如下所示：

(一)為使試體均勻，將採集之土樣過 16#篩備用。

(二)依照規劃之相對密度，秤取所需之土樣。

(三)將秤取好之材料至於拌合碗中，以每分鐘 $140\pm 5\text{ rmp}$ 之轉速拌合均勻。

(四)將拌合完成之材料依指定重量分三層壓入試體模內完成試體製作。

(五)將試體脫模後每日噴撒 5c.c.氯化鈣反應溶液(氯化鈣 1.1M、尿素 1.1M)直到指定齡期，依規劃時間烘乾並進行試驗。

一般文獻認為 MICP 固化反應 7 天已經足夠，故生物礦化 (MICP) 作用齡期 7 天，降雨延時取 1 小時。試體分為控制組(未進行 MICP 固化)與試驗組(MICP 固化)，固化組為試體內含有菌液及反應液經過齡期 7 天之 MICP 養護，未固化試體內僅給予反應液而無菌液。本實驗設計分成三組討論，實驗一為比較試體於不同含水量(烘乾時間) 下之抗沖蝕能力，其變數規劃如表 3-2。實驗二為比較試體於不同相對密度下之抗沖蝕能力，其變數規劃如表 3-3。實驗三為比較試體於不同坡度下之抗沖蝕能力，其變數規劃如表 3-4。

表 3-2 試體於不同含水量(烘乾時間) 下之抗沖蝕能力試驗規劃

實驗一	試驗規劃參數		
降雨強度 (mm/hr)	41 (mm/hr) 66 (mm/hr)		
烘乾時間	6hr	12hr	24hr
相對密度 Dr	80%		
坡度	5%		
試體尺寸	15*15*5cm		

表 3-3 試體於不同相對密度下之抗沖蝕能力試驗規劃

實驗二	試驗規劃參數		
降雨強度 (mm/hr)	41 (mm/hr) 66 (mm/hr)		
相對密度 Dr	60%	70%	80%
坡度	0%		
試體尺寸	15*15*5cm		
烘乾時間	24hr		

表 3-4 試體於不同坡度下之抗沖蝕能力試驗規劃

實驗三	試驗規劃參數		
降雨強度 (mm/hr)	41 (mm/hr) 66 (mm/hr)		
坡度 (%)	5%	10%	20%
相對密度 Dr	80%		
試體尺寸	15*15*5cm		
烘乾時間	24hr		

本實驗中土壤相對密度之決定，需以標準夯實試驗求出土樣之最大乾密度（Maximum Dry Density）及最小乾密度（Minimum Dry

Density)，進而求出製作相對密度 $Dr=60\%$ 、 $Dr=70\%$ 、 $Dr=80\%$ 試體時所需之乾土量。本實驗試體之尺寸為 $15*15*5\text{cm}$ ，製作試體時為避免夯實不均勻之問題，採用分層夯實法，將土樣均分為三分，分三層夯實入模具以確保夯實均勻。

本實驗開始前先進行試體擺放與攝影機架設，試體配置圖如圖 3-13 所示，由於本設備降雨面積為 $1\text{m}*1\text{m}$ ，沖蝕箱寬為 50cm ，試體大小為 $15*15*5\text{cm}$ 放置於沖蝕箱之左右兩側中央點處，擺放距離為 5cm ，以確保試體可完全在均勻降雨範圍內。實驗時採用兩台固定式攝影機進行攝影，降雨延時 1 小時，採 10 分鐘輸出一次照片，觀察其不同條件下所造成之破壞程度，再使用超音波測距儀測量沖蝕前後每一點高程，在試體尺寸 $15*15\text{cm}$ 平面上，每間隔 1cm 進行一次測量，測量出之數據與拍攝之照片進行比較後，進行沖蝕破壞程度分析，再將其不同條件下沖蝕過後之試體進行土砂流失量之量測，進行土壤之破壞程度與土砂流失量之分析。

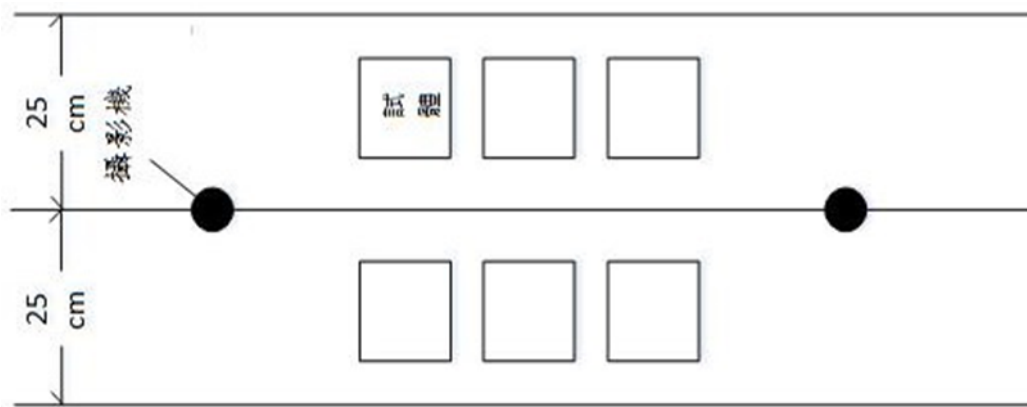


圖 3-13 實驗配置圖

二、土壤試體抗壓強度試驗

本研究選用統一土壤分類為粉質砂土之早溪河岸土樣進行測試；因粉質砂土土樣在灌入過多溶液後會呈現泥漿狀，細微粉粒容易隨多餘灌流材料流失，故養護改以噴灑方式進行。由於本試驗僅作為確認 MICP 工法於降雨沖刷試驗之補充試驗，力學性質部分只進行抗壓試驗，試體由圓柱狀改為 5*5*5cm 立方體試體，相對密度設定為 60%，詳細製作步驟如下所示：

- (一)為使試體均勻，將採集之土樣過 16#篩備用。
- (二)依照規劃之相對密度 60%，秤取所需之土樣。
- (三)將秤取好之材料至於拌合碗中，以每分鐘 140 ± 5 rpm 之轉速拌合均勻。
- (四)將拌合完成之材料依指定重量分三層壓入 5*5*5cm 立方體試體模內完成試體製作。
- (五)將試體脫模後每日噴撒 5c.c.氯化鈣反應溶液(氯化鈣 1.1M、尿素 1.1M)直到指定齡期後烘乾並進行抗壓試驗。

第四章 試驗結果與分析

本研究將實施 MICP 固化實驗 7 天之組別與未施行 MICP 之控制組進行試驗結果比較。降雨沖刷後固化組與未固化之控制組之高程相減得到高程差，再將其繪成圖，若為正值代表表面沖蝕情況控制組大於 MICP 固化組。本實驗抗沖蝕率的定義為，(沖蝕後未固化試體之土壤流失量-固化試體土砂流失量)/未固化試體土砂流失量。試體含水量則定義為試驗前試體之含水狀況，即（部分烘乾後試體濕土重-烘乾試體土重）/烘乾試體土重。得知抗沖蝕率、含水量與試體沖蝕破壞表面高程差後進行綜合比較，即可進行 MICP 固化後試體抗沖蝕能力之分析。

第一節 不同含水量(烘乾時間)下試體抗沖蝕能力分析

由於 MICP 試驗過程有添加菌液及反應液，完成時其試體含水量會增加，故須將試體烘乾至一定程度，以貼近實際土壤含水狀況再進行降雨沖刷試驗。實驗一將降雨強度 $I=41$ (mm/hr)、66

(mm/hr) 與含水量 (MICP 試驗後烘乾時間 0 hr、6 hr、12 hr、24 hr) 作為獨立變數，比較在固定坡度 5% 及固定相對密度 80% 下，變化降雨強度，試體在不同含水量時之破壞程度。

在降雨強度為 41 mm/hr 時，由圖 4-1（上排為固化試驗組，下方為控制組，由左至右烘乾時間為 6hr、12hr、24hr）照片可知，烘乾 6hr 之試體表面沖蝕均嚴重，表面沖蝕情況固化與未固化並無太大之差異，而烘乾時間 24hr 之試體，固化組幾乎可保持完整。此結果顯示，烘乾未達 12hr 以上，試體含水量可能過高，土體太潮濕抗沖蝕能力較差。



圖 4-1 不同含水量(烘乾時間)下試體沖蝕之情形 ($I=41\text{mm/hr}$)

由圖 4-2 固化組與控制組的高程差發現，烘乾時間 0hr、6hr，經過 MICP 固化試體對於表面沖蝕之防治均無明顯之效果，兩者表面沖蝕相似，並無明顯之高程差出現。烘乾時間增加至 12hr 時，開始有效果出現(圖中紅色區域較大)，烘乾時間增加至 24hr 時，固化對於表面沖蝕防治有明顯之效果，其較未固化組高程差多達 1cm 以上(圖中級紅色區域)。所以可得知，當降雨強度為 41 mm/hr 時，烘乾時間為 24hr，MICP 固化效果最顯著。

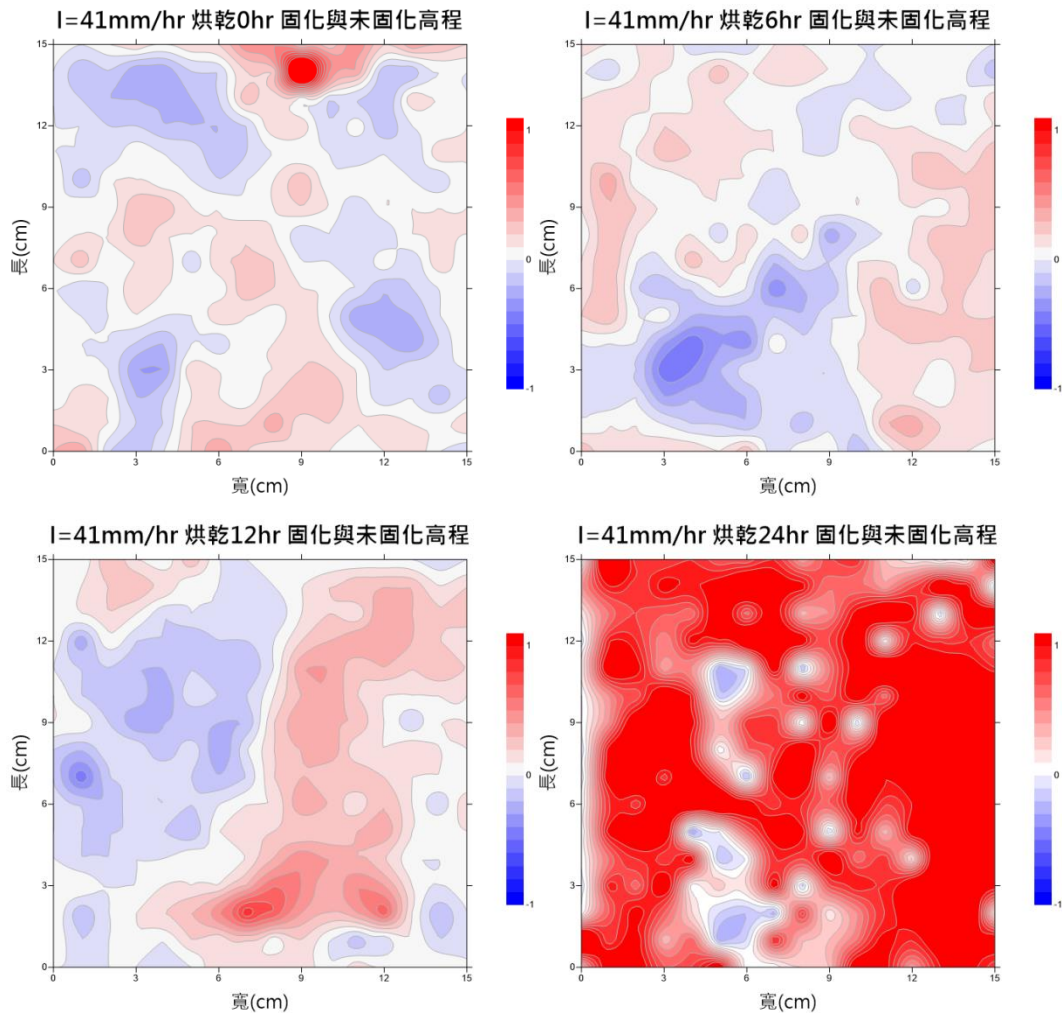


圖 4-2 不同含水量試體沖刷後高程差($I=41\text{mm/hr}$)

由表 4-1 中土壤流失量可計算得知抗沖蝕率，當烘乾時間為 0hr 與 6hr 時，抗沖蝕率分別為-4%與-41%，但由其含水量可知，試驗組烘乾時間 0hr 為 37%，到了烘乾時間 6hr 尚有 36%，皆較控制組高，尤其烘乾 6hr 組，與控制組間含水率達 6%之差異(如表 4-1)，故其抗沖蝕率降低至-41%，其可能原因為試體太潮濕所導致。當烘乾時間提升至 12hr 以上時，其含水率已經低於 25%與一般地表土壤相近，其抗沖蝕率也開始出現正值。表中亦可發現，在降雨強度為 41mm/hr 時，試體烘乾 24hr 可讓 MICP 固化試體抗沖蝕率增加至 53%。

表 4-1 不同烘乾時間(含水量)抗沖蝕率 (I=41mm/hr)

烘乾時間(含水量)		土沙流失 g	試體原重 (g)	抗沖蝕率	含水量
0hr	固化	176.6	1959.0	-4%	37%
	未固化	170.0	1959.0		32%
6hr	固化	127.0	1959.0	-41%	36%
	未固化	90.0	1959.0		30%
12hr	固化	124.0	1959.0	7%	25%
	未固化	134.0	1959.0		24%
24hr	固化	70.0	1959.0	53%	18%
	未固化	148.0	1959.0		16%

降雨強度提升至 66 mm/hr 之實驗結果如圖 4-3，當降雨強度增強，試體表面出現許多小蝕坑，固化試體沖蝕較平均，未固化試體表面沖蝕不平均，產生許多大小不一的沖蝕坑。由此可判定，降雨強度增強後飛濺沖蝕對於未固化之試體影響甚劇。



圖 4-3 不同含水量(烘乾時間)試體沖蝕之情形 ($I=66\text{mm/hr}$)

由圖 4-4 固化組與未固化組的高程差可以發現，當降雨強度提升後，烘乾時間 0hr、6hr 固化組，其表面沖蝕之防治無明顯之效果，烘乾時間增加至 12hr 時，開始有效果出現，烘乾時間增加至 24hr 時，固化對於表面沖蝕防治有明顯之效果，但由於降雨強度增大，固化與未固化試體之高程差值變小。意即當降雨強度增大時，固化組表面沖蝕之防治效果將減低，但還是以試體烘乾時間為 24hr 試體之表面沖蝕防治效果最顯著。

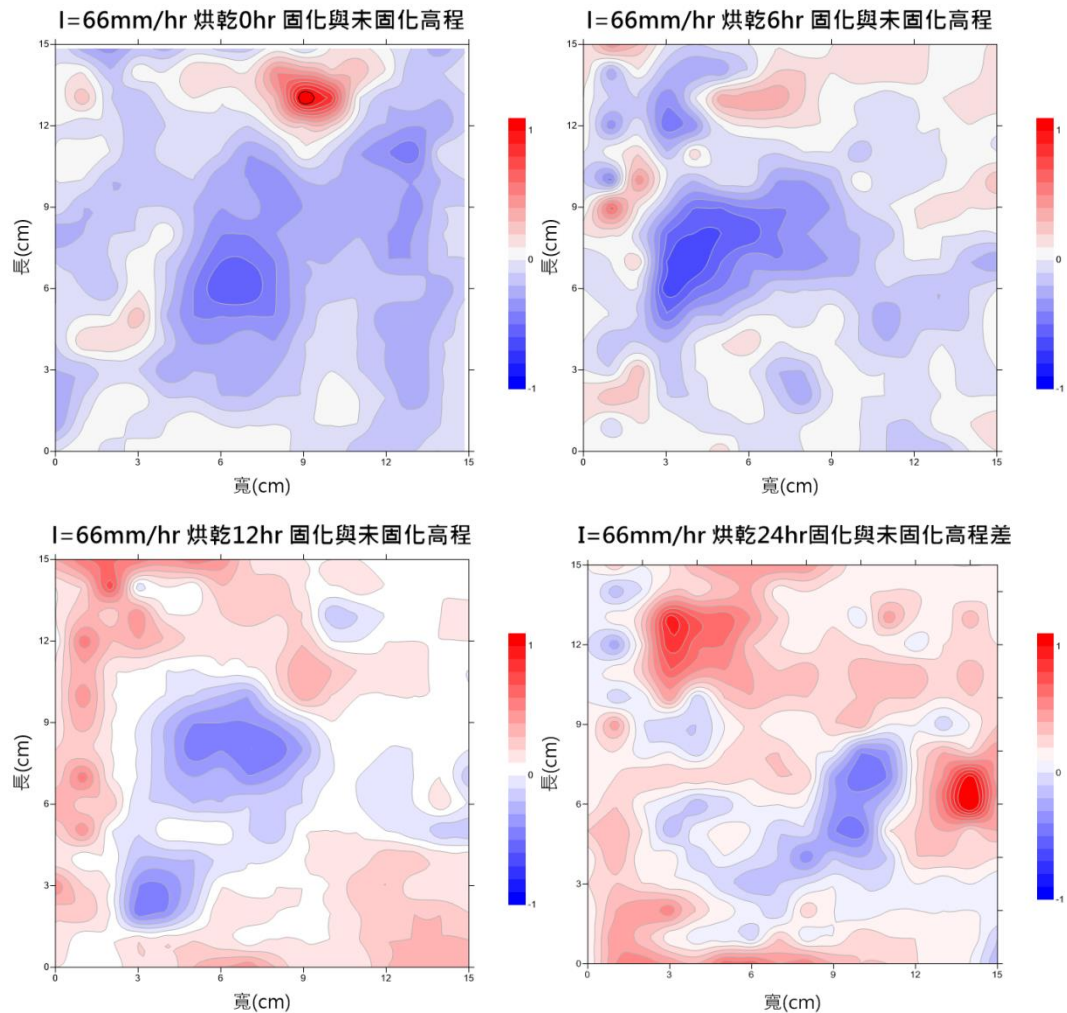


圖 4-4 不同含水量試體沖刷後表面高程差 (I=66mm/hr)

由表 4-2 可得知降雨強度增加至 66mm/hr 時，24hr 組抗沖蝕率從降雨強度 41mm/hr 時之 53%降至 15%。另外烘乾不足之固化組次，試體含水量較未固化組試體高了 5%，代表試體在烘乾不足時，將因 MICP 之菌液與反應液添加導致含水量遽增，進而造成抗沖蝕率為負值之情形。

綜合上述結論，本實驗所需之烘乾時間須達 24hr 以上，或土壤含水率低於 25% 以下，使其與一般地表土壤含水率相近時，試驗結果方有意義。此時 MICP 固化作用確實可提升土壤試體之抗沖刷能力。故後續試驗皆設計烘乾時間為 24hr。

表 4-2 不同烘乾時間(含水量)抗沖蝕率 ($I=66\text{mm/hr}$)

烘乾時間(含水率)		土沙流失 g	試體原重 (g)	抗沖蝕率	含水量
0hr	固化	250.0	1959.0	-20%	37%
	未固化	208.8	1959.0		32%
6hr	固化	206.5	1959.0	-3%	32%
	未固化	199.8	1959.0		27%
12hr	固化	199.5	1959.0	13%	23%
	未固化	228.0	1959.0		23%
24hr	固化	161.0	1959.0	15%	21%
	未固化	190.5	1959.0		20%

第二節 不同相對密度下試體抗沖蝕能力分析

實驗二將降雨強度 $I=41\text{mm/hr}$ 及 66mm/hr 與相對密度 60%、70%、80% 作為獨立變數，比較在不同降雨強度時，試體相對密度變化下，試體固化與未固化組之表面破壞程度分析。

在降雨強度為 41mm/hr ，由圖 4-5（上方為固化，下方為未固化），由左至右相對密度為 60%、70%、80%，由照片得知，相對密度愈小，試體表面沖蝕愈嚴重，固化與未固化均為如此，固化試體均為平均沖蝕較無沖蝕坑，而未固化的試體，表面為大小不一之沖蝕坑。



圖 4-5 不同相對密度下試體之沖蝕破壞情形 ($I=41\text{mm/hr}$)

由圖 4-6 可發現，降雨強度 41mm/hr 時，各組試驗結果差異不明顯，但仔細觀之，相對密度低者，表面沖蝕略顯嚴重，試體相對密度 60% 增加到 80% 時，固化與未固化高程差負值較大的地方，也隨著試體相對密度提升而有從負值轉為正值的現象，而負值也有逐漸變少的趨勢(深紅色增加，深綠色減少)，代表 MICP 固化後防蝕效果愈來愈顯著，即相對密度上升至 80% 時，固化效果較顯著。

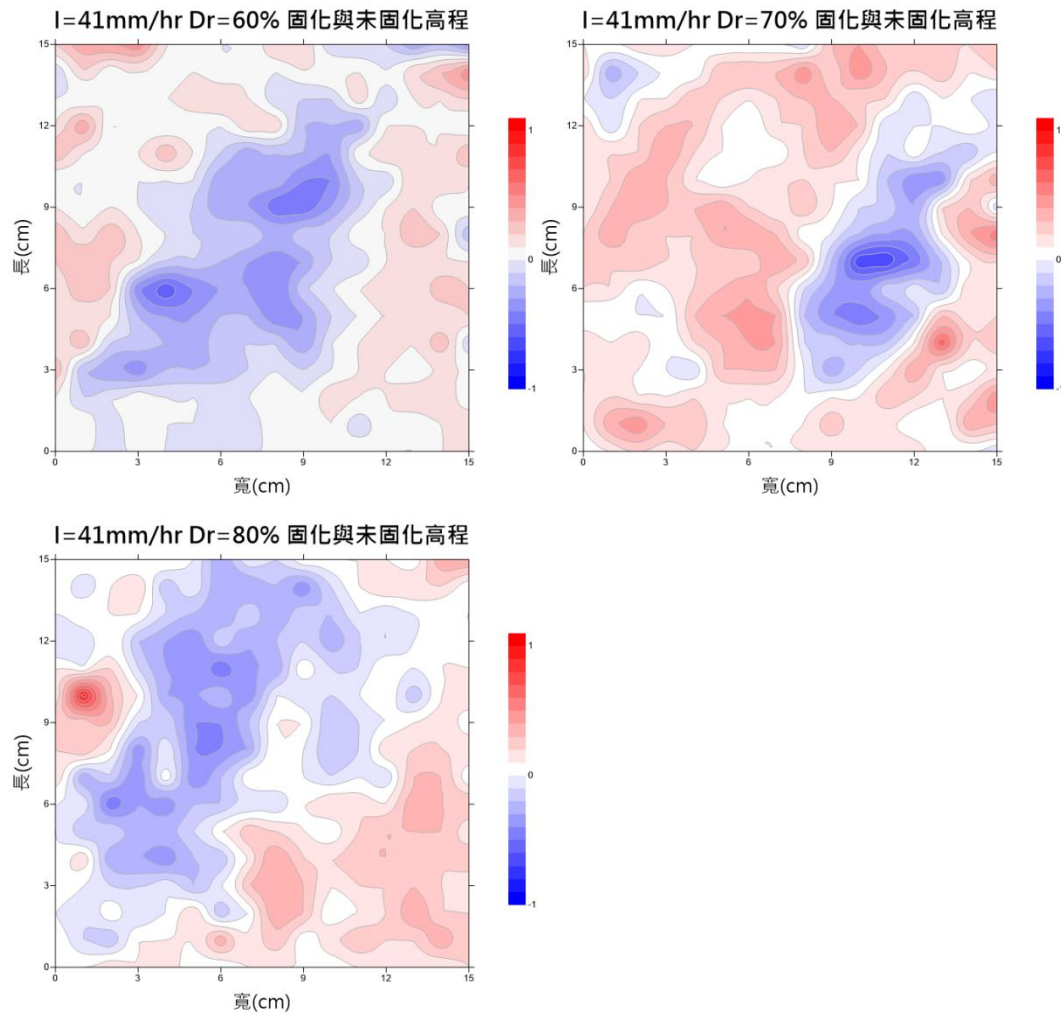


圖 4-6 不同相對密度試體沖刷後表面高程差 ($I=41\text{mm/hr}$)

由表 4-3 可知，降雨強度為 41mm/hr 時，相對密度 60% 試體的抗沖蝕率為 9%、相對密度 70% 的抗沖蝕率為 18%，到達相對密度 80% 時，其抗沖蝕率增加到 41%，此結果亦代表相對密度愈高，試體固化效果愈顯著。

表 4-3 不同相對密度下試體抗沖蝕率 ($I=41\text{mm/hr}$)

相對密度 (%)		土沙流失 g	試體原重 (g)	抗沖蝕率	含水量
60%	固化	100.2	1780.1	9%	19%
	未固化	110.0	1780.1		21%
70%	固化	93.3	1865.2	18%	19%
	未固化	114.0	1865.2		17%
80%	固化	65.0	1959.0	41%	18%
	未固化	110.5	1959.0		17%

在降雨強度為 66mm/hr 時，由圖 4-7（上方為固化，下方為未固化，由左至右相對密度為 60%、70%、80%）照片得知，相對密度愈小，固化試體表面沖蝕愈嚴重，相對密度愈高，固化試體保留愈完整，固化試體均為平均沖蝕較無沖蝕坑，而未固化的試體沖蝕結果較為不穩定，表面為大小不一之沖蝕坑。

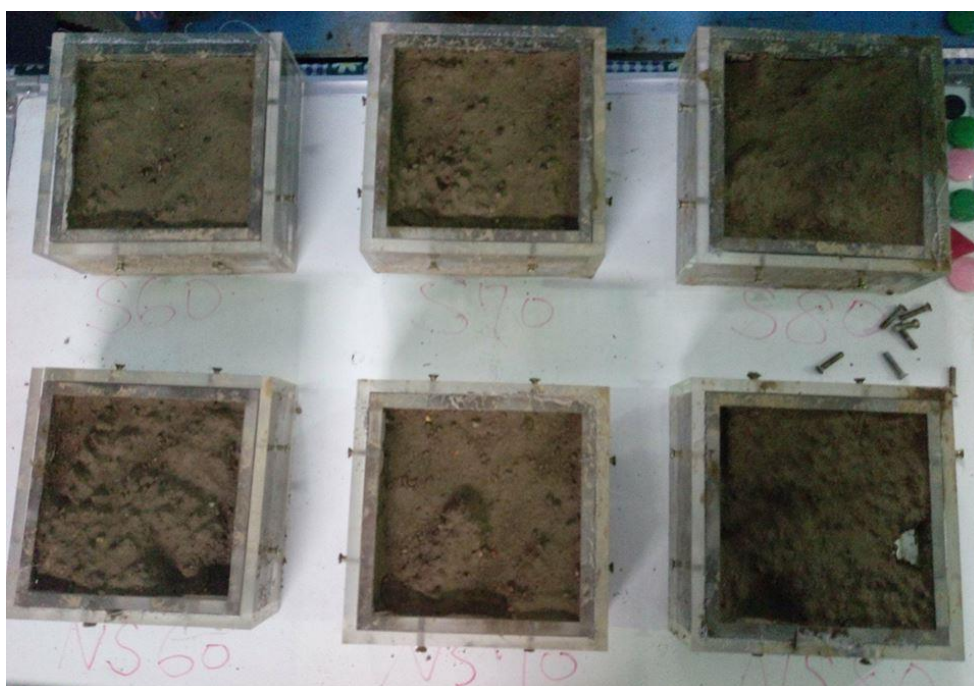


圖 4-7 不同相對密度下試體之沖蝕破壞情形 ($I=66\text{mm/hr}$)

如圖 4-8 試體沖刷後表面高程差結果可知，當降雨強度為 66mm/hr 時，表面沖蝕情況固化組與未固化組皆較為嚴重。無法由圖中表面沖蝕結果來判別固化效果之差異。若以土沙流失量與試體抗沖蝕率分析，結果如表 4-4，可得到降雨強度為 66mm/hr 時，相對密度 60% 的抗沖蝕率為 15%、相對密度 70% 的抗沖蝕率稍降為 14%，到相對密度 80% 的抗沖蝕率可增加到 34%，相對密度 80% 有固化的試體，其抗沖蝕效果相對於 60%、70% 相對密度者較為顯著。

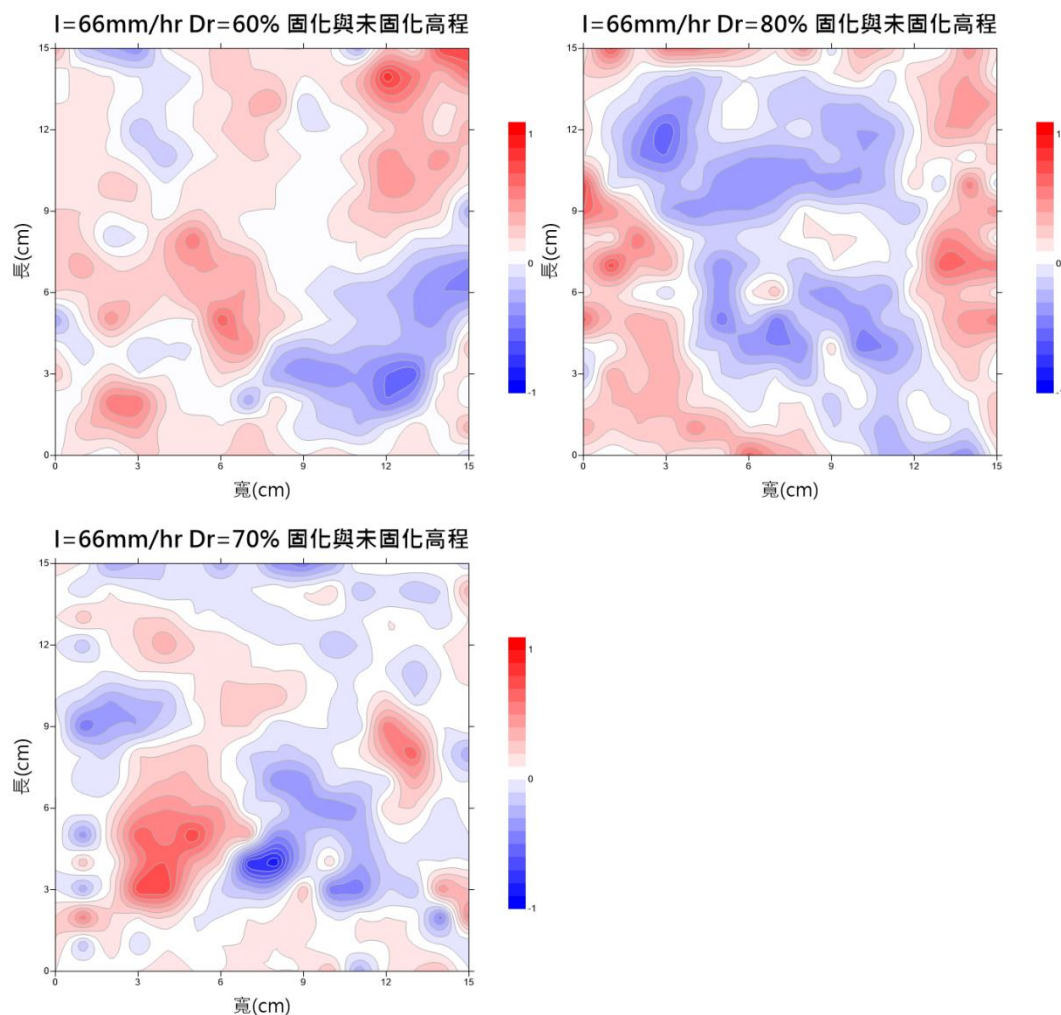


圖 4-8 不同相對密度試體沖刷後表面高程差 (I=66mm/hr)

表 4-4 不同相對密度下試體抗沖蝕率 (I=66mm/hr)

相對密度 (%)		土沙流失 g	試體原重 (g)	抗沖蝕率	含水量
60%	固化	200.0	1780.1	15%	19%
	未固化	235.0	1780.1		21%
70%	固化	195.5	1865.2	14%	19%
	未固化	227.0	1865.2		17%
80%	固化	108.9	1959.0	34%	15%
	未固化	166.0	1959.0		17%

經上述實驗，以不同相對密度試體沖刷後表面高程差及抗沖蝕率結果之分析，其結果顯示，降雨強度愈強固化抗沖蝕效果愈不顯著，但相對密度 80% 的固化抗沖蝕效果仍佳。

第三節 不同坡度下試體抗沖蝕能力分析

本節將固定土壤相對密度，將試體放置於不同坡度（5%、10%、20%）進行降雨實驗，比較在不同降雨強度時，試體放置之坡度變化下之表面破壞程度分析。

圖 4-9 為降雨強度為 41mm/hr 試驗結果（上方為固化，下方為未固化，由左至右坡度為 20%、10%、5%），圖中可發現，隨著坡度上升，試體表面沖蝕型態由雨滴飛濺沖蝕，逐漸轉變為逕流沖蝕，當試體坡度為 5%，未固化試體的雨滴飛濺沖蝕，試體表面出現沖蝕坑，隨著試體坡度增加至 10%，沖蝕坑變少，到了坡度 20% 時轉變為逕流沖蝕，沖蝕坑比坡度 10% 時更少了。MICP 固化組試體在雨滴打擊下均無明顯之沖蝕坑，代表固化組試體受雨滴打擊影響

較小，但由圖中得知，固化組試體坡度為 20%時表面沖蝕較坡度 5%嚴重許多。

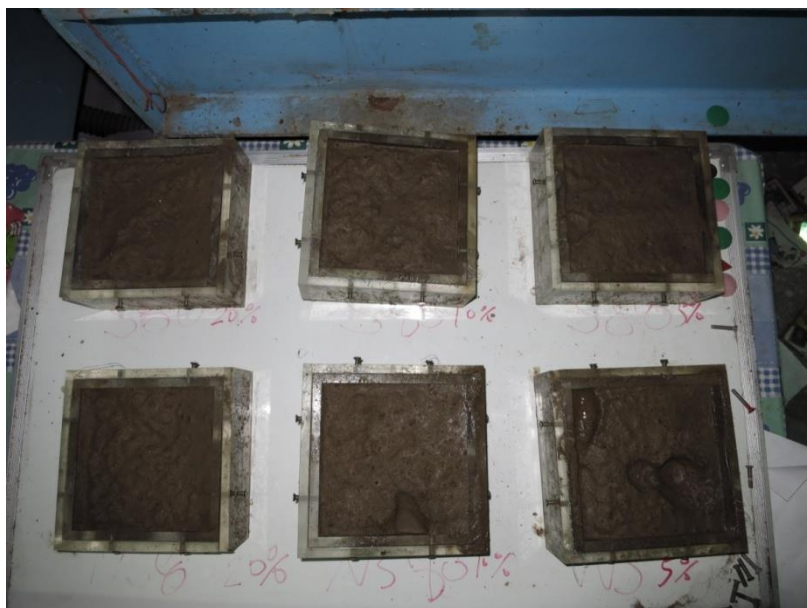


圖 4-9 不同坡度試體之沖蝕破壞情形 ($I=41\text{mm/hr}$)

由圖 4-10 不同坡度試體沖蝕後高程差結果可以發現，當降雨強度為 41mm/hr 時，本實驗試體在坡度 5%時固化後抗沖蝕效果較顯著(深紅色佔大部分)，在坡度 10%時，因同時受到雨滴飛濺與逕流沖蝕之影響，故固化後並無抗沖蝕效果，坡度 20%時逐漸轉變為逕流沖蝕，抗沖蝕效果則介於兩者之間。

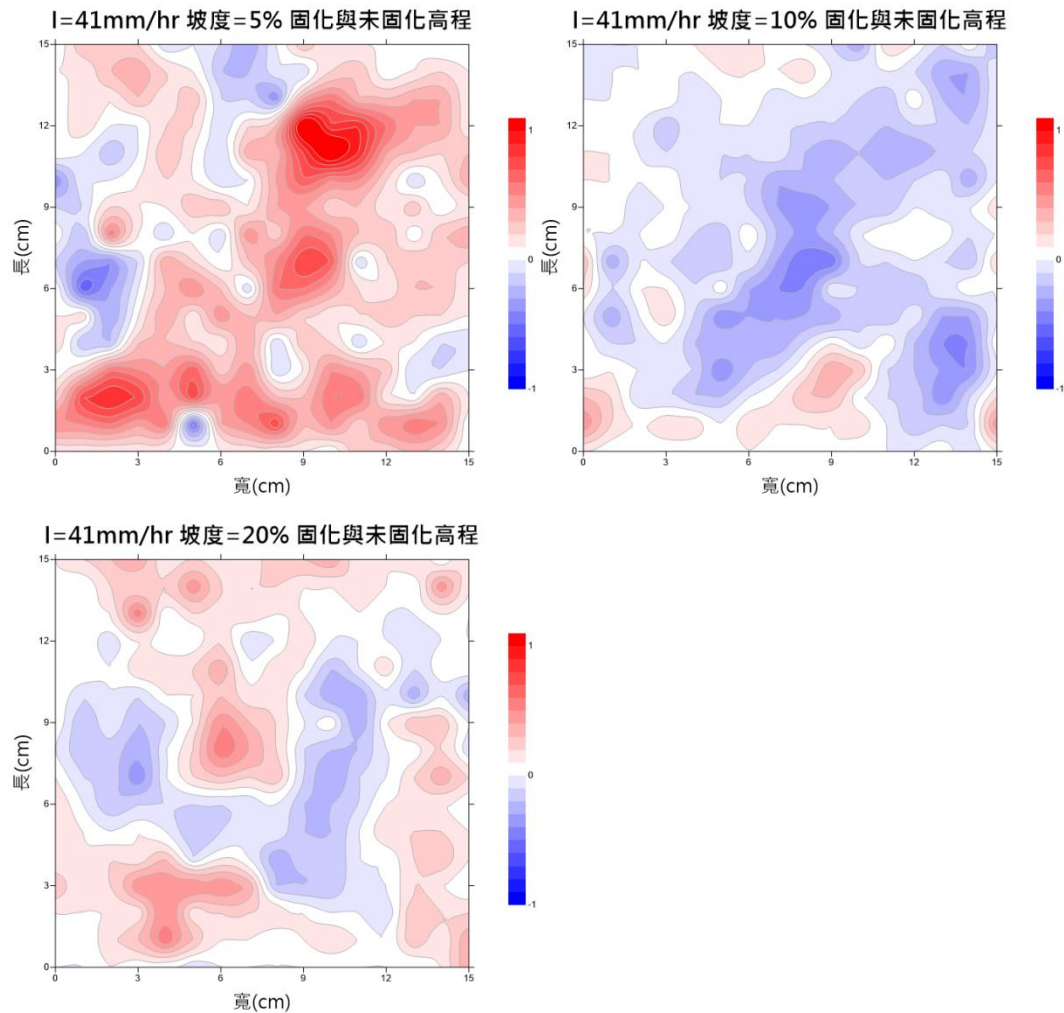


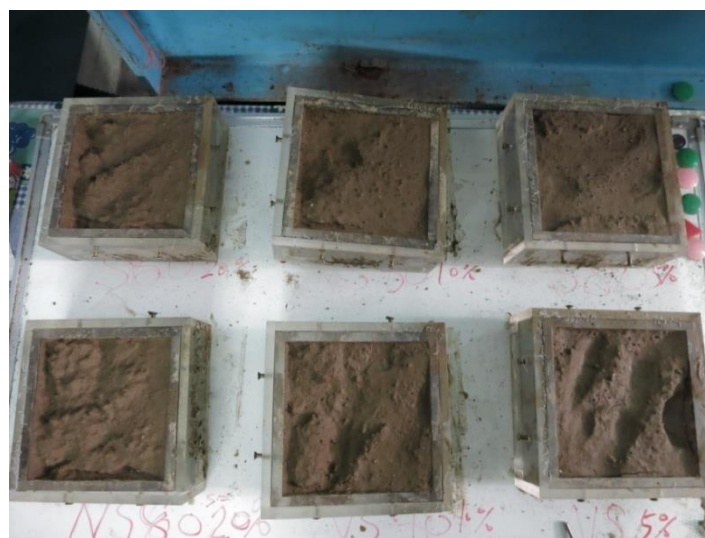
圖 4-10 不同坡度試體沖蝕後高程差 (I=41mm/hr)

由表 4-5 數據計算結果可知，在降雨強度為 41mm/hr 時，坡度 5% 的抗沖蝕率為 55%、坡度 10% 的抗沖蝕率降至 15%，坡度 20% 的抗沖蝕率又提升為 41%。此結果顯示，試體坡度 10% 者抗沖蝕能力最差，此原因可能是降雨強度 41mm/hr 時，坡度愈緩則沖蝕型態為雨滴飛濺沖蝕為主，到了坡度 10% 時為轉變同時受到雨滴飛濺與逕流沖蝕之影響，導致抗沖蝕率下降，坡度為 20% 時沖蝕型態已轉變為逕流沖蝕，故抗沖蝕率又提升。

表 4-5 不同坡度試體抗沖蝕率 ($I=41\text{mm/hr}$)

坡度		土沙流失 g	試體原重 (g)	抗沖蝕率	含水量
5%	固化	44.0	1959.0	55%	17%
	未固化	98.0	1959.0		18%
10%	固化	88.0	1959.0	15%	20%
	未固化	103.0	1959.0		19%
20%	固化	93.0	1959.0	41%	19%
	未固化	157.5	1959.0		17%

降雨強度 66mm/hr 之試驗結果如圖 4-11 (上方為固化，下方為未固化，由左至右坡度為 20%、10%、5%)，未固化試體之沖蝕坑也因降雨強度的提升而更擴大。坡度為 5% 時主要為雨滴飛濺沖蝕，但由於降雨強度增加，也增加了逕流沖蝕之因素，所以沖蝕坑變為 U 型坑，坡度大於 10% 後，因降雨強度較大逕流沖蝕強，所有試體隨著坡度增加，表面沖蝕破壞愈嚴重。

圖 4-11 不同坡度試體之沖蝕破壞情形 ($I=66\text{mm/hr}$)

如圖 4-12 不同坡度試體沖蝕後高程差結果可發現，當降雨強度為 66mm/hr 時，坡度為 5% 時，試體沖蝕後高程差大部分為正值，隨著坡度增加，負值開始增加。此結果顯示，當降雨強度為 66mm/hr 時，仍以坡度 5% 時之試體抗沖蝕效果最為顯著。但由於降雨強度增加，固化後抗沖蝕效果較降雨強度 41mm/hr 時更低。

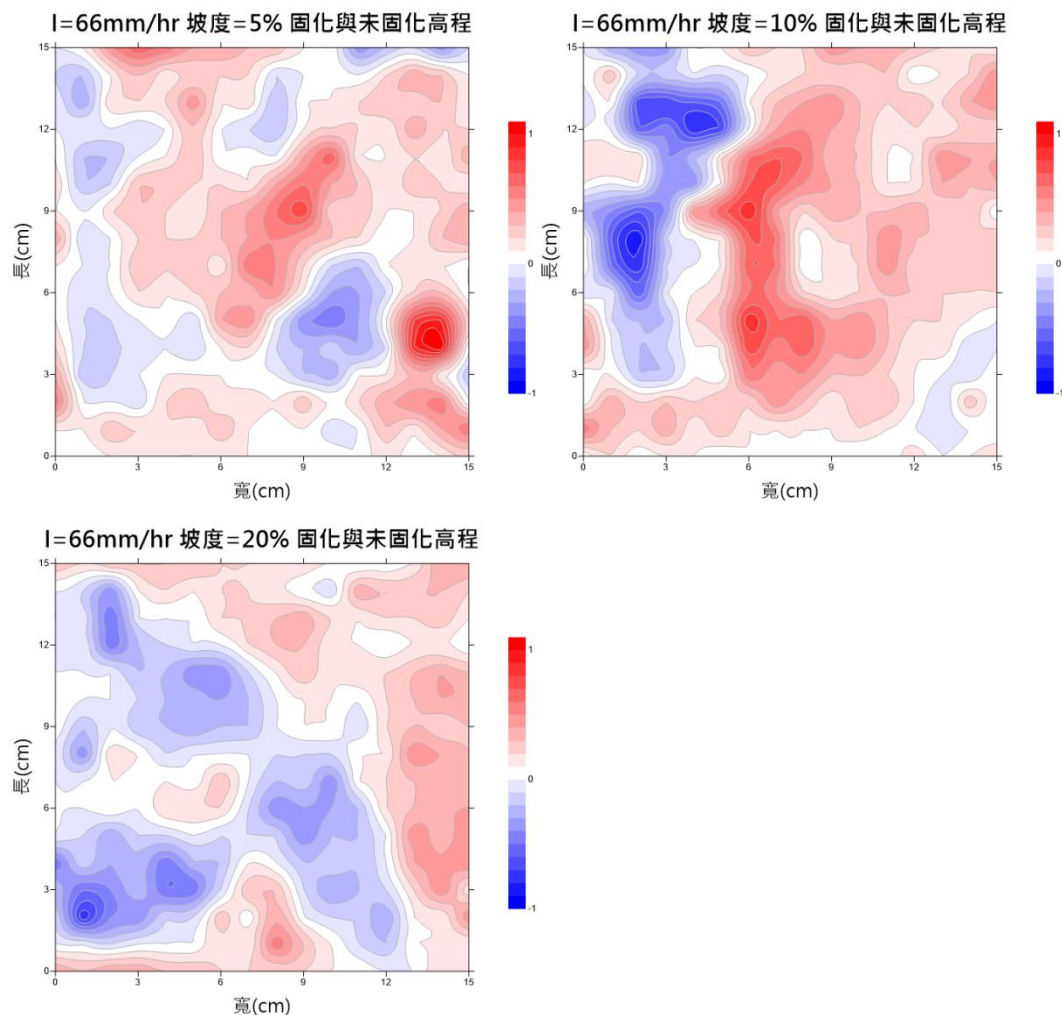


圖 4-12 不同坡度試體沖蝕後高程差 (I=66mm/hr)

降雨強度為 66mm/hr 時，隨著坡度增加，抗沖蝕率皆有下降的現象，但由於降雨強度大，所以抗沖蝕率之值在坡度 5% 時為 32%，坡度 10% 時抗沖蝕率仍可維持 28%，但坡度 20% 時抗沖蝕率

已經降為-8%。此結果意味著，在強降雨時(66mm/hr)，若地表坡度達 20%時，就算以 MICP 作用固化之，土壤表面之抗沖蝕率仍無法提升。

表 4-6 不同坡度試體抗沖蝕率 (I=66mm/hr)

坡度		土沙流失 g	試體原重 (g)	抗沖蝕率	含水量
5%	固化	102.0	1959.0	32%	19%
	未固化	150.0	1959.0		19%
10%	固化	140.0	1959.0	28%	19%
	未固化	195.0	1959.0		19%
20%	固化	188.9	1959.0	-8%	14%
	未固化	175.5	1959.0		19%

第四節 土壤試體抗壓強度分析

本實驗主要欲了解 MICP 工法對砂土改良後強度呈現的效果，實驗選用相對密度 $Dr=60\%$ 進行試驗，MICP 滴灌時間設定為 0、5、15 及 30 天，試驗結果比較不同滴灌時間所造成強度之差異，提供為試體降雨試驗沖蝕破壞試驗結果之比較，並綜合進行 MICP 固化後試體抗沖蝕能力之分析。本試驗製作之抗壓試體如圖 4.13 所示。

由圖中可看出土樣重模試體本身即具有自立性，因土樣本身顆粒十分微小，故試體表面較為緻密，儘管試體表面並未因齡期而發生明顯外觀變化，但隨 MICP 作用時間越長，噴灑菌液及鈣源反應液時可發現溶液較難進入試體的狀況，可以推測是因為 MICP 作用時間越長，B.P 菌與鈣離子作用所產生之碳酸鈣不斷填塞試體表面孔隙造成。

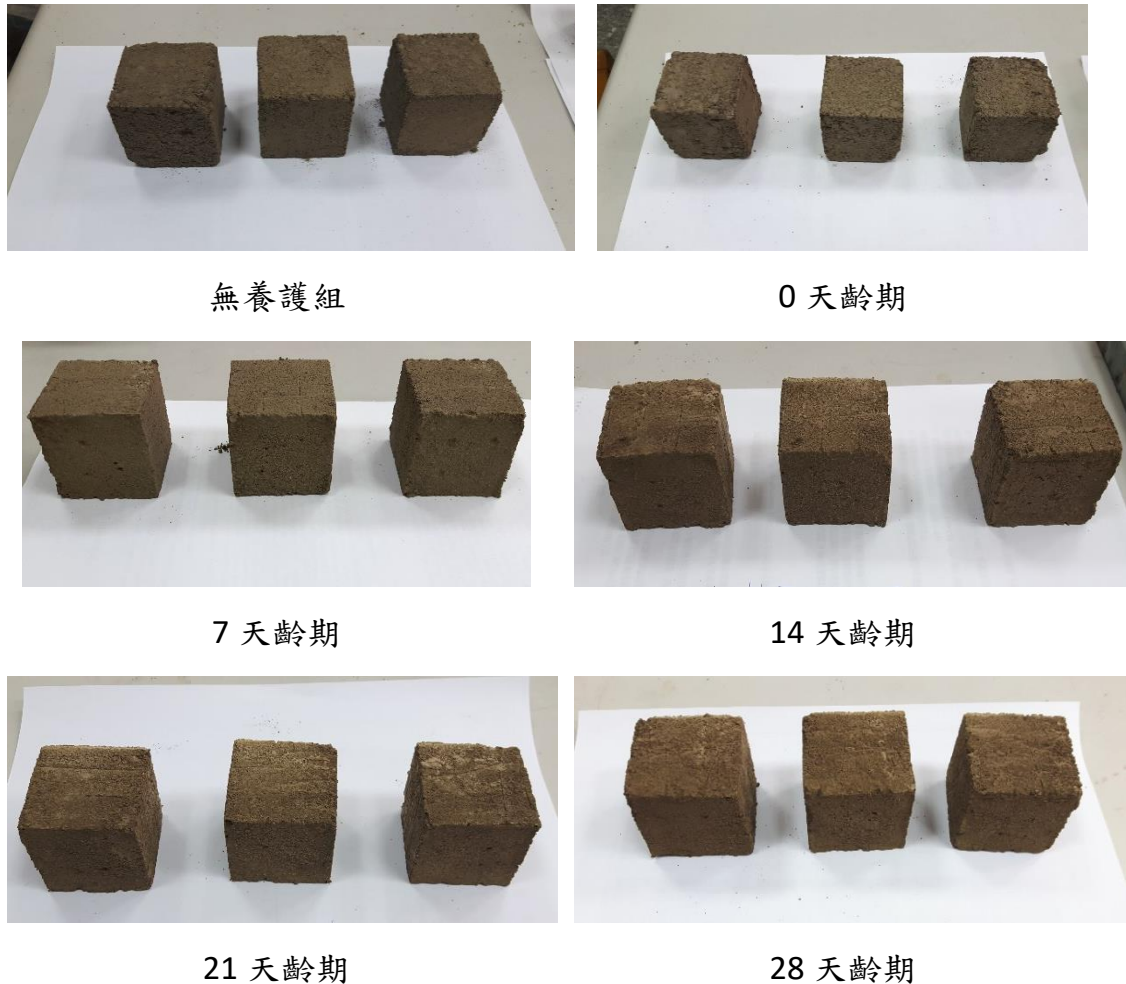


圖 4-13 土樣重模試體外觀

土樣重模試體抗壓試驗結果顯示如圖 4.14，由圖中可以觀察到隨著 MICP 施作天數增加，其抗壓強度隨之增加，滴灌時間 7 天時，試體平均抗壓強度值可達 1000 kpa，滴灌時間達 14 天時，試體平均抗壓強度值可達 2600 kpa，然而後續齡期之試體強度變化較不明顯，齡期 28 天試體平均強度成長至 2800 kpa。本次試驗為了解土壤試體中因為 MICP 作用碳酸鈣生成數量，於抗壓試驗前測量試體烘乾重，重量變化結果顯示如圖 4.15，圖中可觀察到試體重量和抗壓強度變化的數據有明顯的關聯性，隨試體重量上升，抗壓強度亦有所提升。根據此實驗數值推測，齡期 0 天至 14 天碳酸鈣在試體中大量產生填塞試體孔隙，並顯著的提升試體之抗壓強度，後續齡期因試體內部碳酸鈣生成速度

降低，造成試體之強度增長趨緩。若就本項試驗結果檢視降雨沖刷試驗結果，本研究將實施 MICP 固化實驗 7 天之組別與未施行 MICP 之控制組進行降雨沖刷試驗後比較，MICP 固化後試驗組強度尚有成長空間，故前節有關試體抗沖蝕能力分析結果顯然是偏保守的。

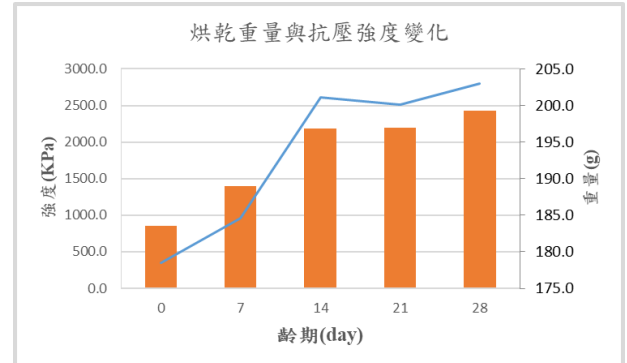
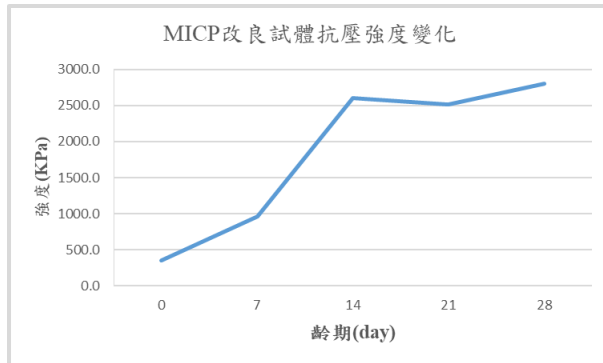


圖 4-14 土壤試體不同齡期抗壓強度

圖 4-15 土壤試體抗壓強度與重量變化

第五章 結論

研究已經依工作進度完成，工作項目有文獻資料收集分析、菌種培養測試、降雨試驗整備、MICP 固化試驗及降雨沖刷試驗及試驗資料整理分析。綜合整理結論如下：

- 一、本研究第一年已經完成 MICP 應用於地表土壤沖刷防治最主要的控制參數建立，並以砂土管柱模擬一個單點灌注 MICP 試驗，經觀察與分析土壤力學性質，已經初步確定 MICP 工法可應用為土壤穩固強化之工法。
- 二、本年度研究則已經完成 MICP 工法在坡地降雨沖蝕試驗水槽中之實現性，並初步獲得證明 MICP 工法對受降雨侵襲下之表土沖刷穩定控制之功效。
- 三、試驗結果顯示，土壤試體經 MICP 作用後，因為試體內部含水量提高，土壤抗沖刷能力反而降低，且與一般地表土壤含水量不符合，故試體需烘乾至與一般地表土壤含水量相符時，試驗結果方有意義。本研究建議，經 MICP 作用 7 天後試體，烘乾時間須達 24hr 方可達到與一般地表土壤含水量相當。
- 四、固定土壤試體坡度 5% 及固定相對密度 80% 下，降雨強度 41mm/hr 時，經烘乾時間 24hr，MICP 固化土壤試體抗沖蝕率可達 53%。若為強降雨(降雨強度 66mm/hr)，土壤試體抗沖蝕率將降為 15%。
- 五、試驗結果顯示，土壤試體相對密度愈高，MICP 固化後抗沖蝕效果愈顯著，但試體坡度大於 10%，雖經 MICP 固化但抗沖蝕效果不佳。

- 六、以不同相對密度試體沖刷後表面高程差及抗沖蝕率結果之分析顯示，降雨強度愈強，MICP 固化抗沖蝕效果愈不顯著，但相對密度 80%的固化抗沖蝕效果仍佳。
- 七、本研究將實施 MICP 固化實驗 7 天之組別與未施行 MICP 之控制組進行降雨沖刷試驗後比較，經土樣重模試體抗壓試驗結果證明，MICP 固化後試驗組強度尚有成長空間，故前節有關試體抗沖蝕能力分析結果是偏保守的。
- 八、MICP 研究成果應用於防風定砂或揚塵抑止之可行性相當高，為後續研究之方向。

參考文獻

- [1] 詹勳全、張嘉琪、陳樹群、魏郁軒、王昭堡、李桃生”台灣山區淺層崩塌地特性調查與分析”,*Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 46 (1): 19-28. 2015.
- [2] ”山區道路邊坡崩塌防治工法最佳化研究”，交通部、93年委託財團法人臺灣營建研究院報告
- [3] “降雨滲流對邊坡穩定的影響”，*水土保持學報* 36(2)：135-142 (2004)
- [4] 吳益裕，「人工降雨器及雨點粒徑分佈與落速之試驗研究」，中興大學土木工程學系碩士學位論文（1992）。
- [5] 黃煌輝、黃國書、林呈、王先勤、陳崑霖「以雷射杜普勒流速儀量測波浪水粒子速度之實驗研究」。第四屆水利工程研討會論文集，P.553-568。（1988）
- [6] 戴邦旭，「生物礦化技術應用於混凝土修復之研究」。中興大學土木工程學系博士學位論文。（2017）
- [7] Abd Elbasit, M. A. M., Yasuda, H., Salmi, A., and Anyoji, H. “Characterization of rainfall generated by dripper-type rainfall simulator using piezoelectric transducers and its impact on splash soil erosion.” *Earth Surf. Process. Landforms*, 35(4), 466–475. (2010).
- [8] Abd Elbasit, M. A. M., Yasuda, H., and Salmi, A. (2011). “Application of piezoelectric transducers in simulated rainfall erosivity assessment.” *Hydrol. Sci. J.*, 56(1), 187–194.
- [9] Amu-Mensah, F. K., Yamamoto, T., and Inoue, M. “Investigating rainwater harvesting on highly permeable soil-baseline conditions.” *Int. J. Water Resou. Enviro. Eng.*, 5(7), 426–433. (2013).

- [10] Animesh Sharmaa, Ramkrishnan R.b, "Study on effect of Microbial Induced Calcite Precipitates on strength of fine grained soils", Perspectives in Science, 8, 198—202. 2016.
- [11] Armstrong, A., and Quinton, J. N. "Pumped rainfall simulators: the impact of rain pulses on sediment concentration and size." Earth Surf. Process. Landforms, 34(9), 1310–1314. (2009).
- [12] Bachmeier, K. L., Williams, A. E., Warmington, J. R., and Bang, S. S. Urease activity in microbiologically-induced calcite precipitation. J. Biotech. 93, 171-181. (2002)
- [13] Bang, S. S., Galinat, J. K., and Ramakrishnan, V. Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*. Enzyme and Microb. Technol. 28, 404-409. (2001)
- [14] Castanier, S., Le Metayer-Levrel, G., Perthuisot, J.-P., 1999. Ca-carbonates precipitation and limestone genesis—the microbiogeologist point of view. Sediment. Geol. 126 (1–4), 9.
- [15] Day, J. L., Ramakrishnan, V., and Bang, S. S. Microbiologically induced sealant for concrete crack remediation. Proceedings of the 16th Engineering Mechanics Conference, Seattle, WA. (2003)
- [16] DeJong, J., Mortensen, B., and Martinez, B. "Bio-Soils Interdisciplinary Science and Engineering Initiative", NSF Final Report for Grant #CMS-0628782, pp.85 , 2007.
- [17] DeJong, J.T., Fritzges, M.B., Nusslein, K., "Microbial induced cementation to control sand response to undrained shear". ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng. 132(11), 1381–1392. 2006.
- [18] Fernandes, P. Applied microbiology and biotechnology in the conservation of stone cultural heritage materials. Appl Microbiol. Biotechnol. 73, 291 – 296. (2006)

- [19] Harkes, M.P., Booster, J.L., van Paassen, L.A., van Loosdrecht, M.C.M., "Microbial induced carbonate precipitation as ground improvement method – bacterial fixation and empirical correlation CaCO_3 vs. strength" In: 1st International Conference on Bio-Geo-Civil Engineering, Netherlands, pp. 37–41, June 23-25. 2008.
- [20] Hideaki Yasuhara^{a,n}, Debendra Neupane^a, Kazuyuki Hayashi^b, Mitsu Okamura, "Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation", *Soils and Foundations*; 52(3):539–549, 2012.
- [21] Ivanov, V., Chu, J., Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ". *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 7 (2), 139–153. 2008.
- [22] Kohnhauser, K., "Introduction to Geomicrobiology. Blackwell Publishing, Malden", MA, 425. 2007.
- [23] Liang Cheng, Ralf Cord-Ruwisch, "In situ soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation", *Ecological Engineering* 42, 64–72, 2012.
- [24] Martinez, B.C., DeJong, J.T., "Bio-mediated soil improvement: load transfer mechanisms at the micro- and macro-scales". US – China Workshop on Ground Improvement Technologies, ASCE GSP, 10.
- [25] Mitchell J. K., and Santamarina J. C. "Biological considerations in geotechnical engineering." *ASCE Geotechnical Engineering Journal*, 131 (10) , 1222-1233. (2005) .
- [26] Nemati, M., Voordouw, G., "Modification of porous media permeability using calcium carbonate produced enzymatically in situ". *Enzyme Microb. Tech.* 33 (5), 635–642. 2003.
- [27] Perito B., and Mastromei G Conservation of monumental stones by bacterial biomineralization. *Microbiol. Today* 30, 113 – 114.

(2003)

- [28] Qian Chunxiang, Wang Jianyun, Wang Ruixing, Cheng Liang, Corrosion protection of cement-based building materials by surface deposition of CaCO_3 by *Bacillus pasteurii*, Materials Science and Engineering C 29 1273 – 1280. (2009)
- [29] van Paassen, L.A., Daza, C.M., Stall, M., Sorokin, D.Y., van Loosdrecht, M.C.M., "In situ soil reinforcement by microbial denitrification" In: 1st International Conference on Bio-Geo-Civil Engineering, Netherlands, pp. 124–133, 2008.
- [30] Van Paassen, L.A., Isimite, J.O., Picioreanu, C., van Loosdrecht, M.C.M., "Computational model to study microbial carbonate precipitation in porous media at micro-scale" In: 1st International Conference on Bio-Geo-Civil Engineering, Netherlands, pp.45–50, 2008.
- [31] Van Paassen, L.A., Harkes, M.P. Van Zwieten, G.A., Van der Zon, W.H., Van der Star, W.R.L. Van Loosdrecht, M.C.M., "Scale up of BioGrout: a biological ground reinforcement method", Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, 5-9 oktober, Alexandria, Egypt, 2009.
- [32] Whiffin, V.S., Lambert, J.W.M., Van Ree, C.C.D. "Biogrout and biosealing—porespace engineering with bacteria" Geostrata – Geo Institute for ASCE 5 (5), pp.13–16, 36. 2005.
- [33] Whiffin, V.S. "Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement". Ph.D thesis. Murdoch University, Perth, Western Australia, pp.154, 2004.
- [34] Whiffin, V.S., van Paassen, L.A., Harkes, M.P. "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. Geomicrobiol". J. 25 (5), 417–423. 2007.

- [35] Whitman,W.B., Coleman, D.C., Wiebe,W.J., Prokaryotes: the unseen majority.Nat. Acad. Sci. 95, 6578–6583. 1998.
- [36] Willem De Muyncka,b, Nele De Beliea, Willy Verstraete^{b,1},”Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review”、Ecological Engineering, Ecological Engineering 36 118–136.(2010).
- [37] Willem De Muynck, Dieter Debrouwer, Nele De Belie, Willy Verstraete, Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials, Cement and Concrete Research 38 1005–1014. (2008)

附錄

附錄一、期初審查會議記錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一、	本研究以地表土壤沖刷(蝕)為主，或邊坡變位為主？此兩種狀況是不同的。	本研究以地表土壤沖刷(蝕)為主。
二、	建議應以土壤沖蝕的控制為方向，並探討其降低入滲後可能產生之影響。	目前以土壤沖蝕的防制為研究方向，往後會探討其降低入滲之可能性及影響。
三、	MICP 工法對土壤沖蝕控制效果肯定很好，但問題在於其發揮成效的時間及其可能衍生的衝擊。	依文獻資料，MICP 工法發揮成效的時間要一周以上，而且 MICP 工法會降低土體滲透係數，增加之地表逕流，必然會造成邊坡的其他問題。因目前只有試驗室資料，尚不足評論。
四、	菌株是否有大量生產的能力？	菌株已經可以大量經濟化生產。
五、	應朝實務應用研究，例如如何施工、單位面積需菌量、發揮效用時間、逕流提升的衝擊等方向進行研發。	目前在試驗室階段，現場實務應用研究規劃於第三年。
六、	植物所生長之土體強度應該 $15\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下。因此，為能提	謝謝委員建議，本團隊會於未來計畫中考量。

	供植物生長環境，建議將 MICP 提供之強度在合理範圍內，如 $4\sim6\text{ kg/cm}^2$ ，且強度在空間分布上應盡量均勻。	
七、	若要降低土體內之 PH 值，可用土壤酸化劑(如硫酸或硫酸亞鐵)。	MICP 反應時土體內之 PH 值會稍微提升，但一段時間後會因菌體排泄作用而平衡。
八、	國內應用 MICP 的情形如何？建議整理國內應用此方法之成效，以做為未來擴大使用與否之參考。	MICP 目前國內應用尚在初步研究階段，期末報告中將整理國內外應用此方法之成果文獻。
九、	應用 MICP 工法在應用上的操作方式，如何才能達到防治土壤沖蝕防治之效果。換言之，能否建立應用時之操作步驟。	謝謝委員意見，本團隊於第三年現地試驗後，將評估建立應用時之操作步驟。
十、	微生物礦化的條件是否有適合的土壤性質及有效礦化深度？	文獻中有提及，微生物礦化的條件不適合黏土質土壤，較適合砂土質土壤，有效礦化深度依菌種為好養或厭氧菌及土體含氧量而定。
十一、	土壤礦化是否會造成植生不易，造成裸土，反而形成下游坡面更嚴重的侵蝕。	目前尚在試驗室研究階段，尚未對植生之影響進行探討。
十二、	是否土壤經礦化後會高度引起下層土壤的指狀流。	謝謝委員意見，本研究未對下層土壤的指狀流影響進行探

		討。
十三、	MICP 工法施工簡易，但需一段時間形成固結保護坡面，是否會受天候影響(如降雨、氣溫等)，請說明。	MICP 工法發揮成效的時間約需一周，在地表下土體內反應受天候影響較小。
十四、	本項工法未來推廣可能須考量成本，建議與傳統工法做比較。	第三年現地試驗研究，可進行與傳統工法之比較。
十五、	微生物誘導碳酸鈣沉積(MICP)工法應用於改變土壤性質研究上，由文獻指出會使環境 PH 值升高，是否會對生態有所影響(植生、或者食用植生之動物)?	MICP 反應時土體內之 PH 值會稍微提升，但一段時間後會因菌體排泄作用而平衡，對生態影響很小。
十六、	本(107)年度之計畫所採用之試驗土壤是否與第一年之土壤相同?	本研究採用之試驗土壤與第一年之土壤相同。
十七、	於工作執行步驟中提及將檢測不同區位之滲透係數與土壤剪力強度，實際方法為何?是否與第一年計畫採用之試驗步驟相同?請說明。	原希望在試驗室模型水槽內直接檢測不同區位之滲透係數與土壤剪力強度，但實際試驗碰到困擾，故改成以重模土壤試體檢測抗壓強度。

附錄二、期中審查會議記錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一、	摘要部分應就目前的進度及研發成果提出概略性說明。	依委員意見辦理。
二、	補充說明土壤水分含量及相對密度對土壤侵蝕之影響機制。	已經於第四章探討土壤水分含量及相對密度對抗沖刷之影響。
三、	P3-8：降雨強度選用 41(mm/hr)及 66(mm/hr)兩種之原因，除由實驗儀器律定而來外，是否考慮更高或更低降雨強度進行試驗？請說明。	本研究根據台灣降雨現況並依實驗儀器實際律定所得，選用降雨強度 41(mm/hr) 及 66(mm/hr)兩種。
四、	P3-11： 1.試驗試體是以固定尺寸之方形模型為主，而未符合現地邊坡型態，是否考慮以砂箱模型進行相關降雨試驗？請說明。 2.建議於此章節說明降雨試驗之試驗時間，及模擬降雨之延時(Duration)。	1.為使試驗參數益於分析，故選用固定尺寸之方形模型試體。 2. 依委員意見已經說明於第三章第三節。
五、	P4-1： 1.為何選取 MICP 固化實驗 7 天之試體進行試驗？ 2.建議抗沖蝕率定義，宜採方程式方式表達。	1.一般文獻認為 MICP 固化反應 7 天已經足夠。 2.抗沖蝕率計算公式說明於第四章第一段。
六、	P4-2 中文字說明與圖 4-2 不合。	已經於以補充說明。
七、	P4-15 及 4-17，表 4-5 及表 4-6 抗沖蝕率與坡度變化並不一致，請說明原因？	已經加強說明造成原因於第四章第三節中。
八、	補充說明本項試驗是探討哪種類型的侵蝕？(似乎僅探討	本研究並未對哪種類型的侵蝕進行深入討論。

	雨滴飛濺侵蝕)	
九、	為獲取足以提供後續應用之試驗數據，建議本項研究變數應以 MICP 固化天數、土壤種類、坡度、降雨強度、地表逕流量等因子為主。	謝謝委員建議，MICP 固化天數已經有抗壓強度試驗做參考，坡度及降雨強度已經考慮，土壤種類以相對密度參數取代，地表逕流量則以降雨強度取代，以方便試驗結果分析。
十、	「土壤沖刷」應改為「土壤侵蝕」。	謝謝委員意見，土壤沖刷為第一年度委員建議。

附錄三、期末審查會議記錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一、	MICP 研究成果如何應用於防風定砂(或揚塵抑止)? 如濁水溪、卑南溪揚塵抑止之可行性如何?	MICP 研究成果應用於防風定砂或揚塵抑止之可行性相當高，已經建議於結論中。
二、	本項工法配合 UAV 等無人載具使用之可能性?	本研究並未探討 MICP 工法配合 UAV 等無人載具使用之可能性。
三、	MICP 固化時間需多久，如能縮短固化時間，似可提供軟弱地盤之改良，增加地盤穩定性。另建議提供成本分析資料供參考。	MICP 固化時間約需 7 天，已經說明於報告第三章第三節中。其成本與土壤組成如相對密度等及欲改善之程度有關，目前尚無法提供成本分析資料。
四、	MICP 工法與種植草皮之抗沖蝕比較，建議後續可進行研究。	謝謝委員建議。
五、	MICP 滴灌時間越久，其平均強度越高，若中斷滴灌，其抗壓強度是否會弱化?	MICP 工法若中斷滴灌，其抗壓強度不會弱化，因為生成之碳酸鈣具有岩石般之性質，文中第二章(P2-3)中有述明。
六、	利用 MICP 微生物反應過程固化土壤，增加土壤剪力，方法很好，如成效良好，建議可應用於老舊構造物(防砂壩、擋土牆)之修復。	謝謝委員建議。