
**利用生物礦化工法進行邊坡淺層土壤滑動
防治可行性探討(1)**

**Feasibility of Shallow Layer Landslides
Prevention and Control Using Biological
Mineralization Method (1)**

執行單位：國立中興大學

執行期間：106 年 02 月 20 日至 106 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 106 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)

利用生物礦化工法進行邊坡淺層土壤滑動防治可行性 探討

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，進行自然邊坡淺層滑動防治之應用研究，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。

經本年度試驗結果顯示，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。

關鍵字：微生物誘導碳酸鹽沉澱、邊坡滑動防治、力學性質

Feasibility of Shallow Layer Landslides Prevention and Control Using Biological Mineralization Method

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 shallow layer landslides prevention. 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).

During the MICP experiment, *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.

According to the test results which 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. The results demonstrate that the MICP method does benefit on solidifying soil and shallow layer landslides prevention.

Key words : MICP, layer landslides prevention, mechanical properties

目次

摘要.....	I
Abstract.....	III
目次.....	V
表次.....	VII
圖次.....	VIII
照片次.....	IX
第一章 緒論.....	1-1
第一節 計畫動機	1-1
第二節 計畫目的	1-3
第三節 計畫目標	1-4
第四節 本研究預期研究成果	1-5
第二章 文獻回顧	2-1
第三章 研究方法與步驟	3-1
第四章 成果說明與討論	4-1
第一節 文獻資料蒐集、整理及分析	4-1
第二節 砂土管柱 MICP 實驗.....	4-12
第三節 土壤 MICP 實驗結果與討論	4-25
第四節 MICP 對土壤固結與防止邊坡滑動效益的評估	4-31
第五章 結論.....	5-1
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、期中審查會議記錄暨回覆辦理情形	附錄-1

附錄二、期末審查會議記錄暨回覆辦理情形 附錄-3

表次

表 4-1 有關微觀沉積物發展之過程機制、顆粒排列及時間範圍.....	4-4
表 4-2 MICP 砂柱實驗步驟	4-15

圖次

圖 4-1 微生物尺寸與土壤粒徑比較圖	4-4
圖 4-2 自然界中微生物礦化方解石膠結碎屑物質而形成的岩石	4-5
圖 4-3 實驗裝置圖	4-9
圖 4-4 前 300ml 砂柱流出液 OD 及尿素酶活性檢測圖	4-19
圖 4-5 後 300ml 砂柱流出液 OD 及尿素酶活性檢測圖	4-20
圖 4-6 流出液銨離子濃度變化圖	4-21
圖 4-7 流出液鈣離子濃度變化圖	4-22
圖 4-8 MICP 反應之 SEM 之觀測結果.....	4-23
圖 4-9 XRD 試驗之觀測結果	4-24
圖 4-10 標準砂重模試體經 MICP 工法後之抗壓強度結果.....	4-30
圖 4-11 土壤重模試體經 MICP 作用之抗壓強度結果	4-31

照片次

照片 4-1	Schaevitz 離心機.....	4-7
照片 4-2	透過 SEM 觀察土壤的微觀結構 (a)改善前(b)改善後	4-8
照片 4-3	大規模砂粒膠結試驗	4-9
照片 4-4	生物修復技術進行沙灘之固灘及防蝕.....	4-10
照片 4-5	生物修復技術進行沙灘之固灘及防蝕結果.....	4-11
照片 4-6	在施作 HDD 前之現地生物礦化過程.....	4-12
照片 4-7	紫外光/可見光分光光譜儀.....	4-15
照片 4-8	手提式微電腦電導率測定儀.....	4-16
照片 4-9	發射掃描式電子顯微鏡.....	4-17
照片 4-10	X 射線繞射分析儀圖	4-18
照片 4-11	抗壓試體所用之模具	4-26
照片 4-12	抗壓用之重模試體 MICP 滴灌圖	4-26
照片 4-13	MICP 作用後重模試體抗壓試驗	4-27
照片 4-14	標準砂重模試體經 MICP 作用 3 天後之試體	4-29
照片 4-15	標準砂抗壓試體 5 天齡期之抗壓試驗.....	4-30

第一章 緒論

第一節 計畫動機

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。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。

國內外有許多學者提出關於邊坡淺層土壤滑動現象之分析預測模式，同時有相當多樣之工法被應用於邊坡整治工作，尤其 921 震災之後發展之近自然工法，如自由框梁、打樁編柵、掛網植生……等，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。但也由此可知，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之想法，對邊坡穩定工作與自然生態需求等層面做一價值工程檢視，以突破現況，使邊坡穩定技術更為前端，達到對自然環境更為友善、施工條件更為自由、工程生命週期更為永續，施工成本更為降低，達尋求一更為貼近自然之生態性工程。近年來工程材料科學領域所提出運用自然微生物工程達土體安定化之技術，此工法利用微生物誘導碳酸鈣結晶(microbial induce calcium carbonate participation)，一般簡稱為 MICP 工法，即為本研究擬探討及採用之邊坡土壤滑動防治工法。

任一工法之工程安全性分析技術，不外乎進行驅動力(Driving force)與抵抗力(Resistant force)之計算與比較，例如對於一般建築物基礎承載能力分析，經常會進行土壤地質改良手段，普遍係以化學灌漿方法，藉以提升土壤基礎承載力，而使安全係數達一定要求。對於自然邊坡穩定之工作，亦是如此，水土保持工程師普遍以各類型材料與工法進行邊坡土壤之改良、加勁、貫入等作用以達到邊坡穩定安全之目的，例如土釘工法、止滑樁、灌漿工法、化學穩定工法、離子交換工法等，上述工法分屬為機械性、物理性及化學性等為本質之工程技術，近年在國內水土保持工程領域之產、官、學界先進努力下，均有良好之防制效果。惟基於人類對自然環境生態友善性要求聲浪日亦升高，並實已成為世界潮流之重要趨勢，因此，改以生物科技為本質之應用科學，近年已在各類工程領域受到廣泛重視與研究。

由於過去對山林自然邊坡穩定工作所提出之治理工法，不外乎依循於化學性、物理性與機械性等領域基礎知識所發展而成，較常受到忽略的部份是以生物性為本質的方法。然而在地球科學領域中，遠在

60 年代，美國生物地質學家 E. Boquet 教授等人即發現一種普遍存在土壤中對人類無害之細菌(一般為芽孢桿菌)，其在某種自然環境條件下，生長代謝過程卻是一種將鬆散土壤進行礦化固結成岩之過程，一旦固結之後，顯然能大幅提升土體對自然環境侵襲之抵抗能力，自此推翻了生物性作用並非只是造成岩層風化作用之論證，反之它在適當條件下也可以是一可逆的成岩作用。

藉由 E. Boquet 教授對此一細菌礦化土壤自然現象之發現，除在地球科學領域持續進行基礎研究之外，在水域工程、生態工程、大地工程、環境保護工程、混凝土工程、古蹟修護、石油鑽探、碳儲存、岩石裂縫修補等各工程領域進行應用型之研究工作相當蓬勃，至今，各工程科學領域普遍將該技術稱之為 MICP 工法，即為以利用微生物誘導碳酸鈣結晶，並已獲取大量成果(Whiffin et al., 2005; Van Meurs et al., 2006; Ivanov Chu, 2008, and DeJong et al, 2008)。

第二節 計畫目的

本研究計畫即以 MICP 工法為題，將本人試驗室過去數年來對 MICP 應用於水庫淤泥固化、混凝土修復、混凝土自癒等研究工作所累積成果與經驗，嘗試以該工法進行對自然邊坡淺層滑動防治之應用研究，將進行一系列基礎研究，第二年計畫將藉由模擬強大降雨事件侵蝕自然邊坡造成淺層土壤滑動之物理模型試驗驗證之，並設定 MICP 各重要參變數，將所獲取之試驗數據進行嚴謹分析，以期能準確評估 MICP 工法應用在自然邊坡淺層土壤滑動防治工作之可行性，第三年則直接進行現地試驗以確認 MICP 工法應用在土壤滑動防治之可行性。

第三節 計畫目標

本計畫共規劃為三個年度，本(106)年度目標主要為進行 MICP 工法對土壤固結效果與防止邊坡滑動效益初步評估。根據第一年成果，預計於第二年度規劃邊坡淺層土壤滑動之實驗室內物理模型試驗，以綜合評估 MICP 工法應用於自然邊坡淺層滑動防治效果及可行性。預計研究項目如下：

- 一. 採集具有自然邊坡滑動潛勢土壤作為試驗土樣及基本物理參數測定。
- 二. 物理模型試驗建置(頭水箱、濾層、土砂箱、尾檻、降雨器)。
- 三. 於土砂箱進行 MICP 土砂固結試驗。
- 四. 於坡地沖蝕水槽中擬定逕流水及設定降雨強度，並放流進行邊坡土層滑動試驗。
- 五. 觀測不同試驗組與對照組之邊坡土壤滑動變位量及總體積量。
- 六. 觀測數據分析計算
- 七. 綜合評估 MICP 工法應用於自然邊坡淺層滑動防治效果及可行性。

第三年度將進行現場實地之邊坡 MICP 實驗，研擬最經濟之方法大量培養細菌後，於具滑動潛勢之自然邊坡現地進行滴灌之 MICP 實驗，經 MICP 強化後之土壤，將現場取樣進行土壤相關力學性質測試，以了解並驗證 MICP 工法於自然邊坡淺層滑動防治之功效。

第四節 本研究預期研究成果

本研究預期完成的整體成果如下：

- 一. 建立 MICP 應用於自然邊坡淺層土壤滑動防治最主要的控制參數。
- 二. 以砂土管柱 MICP 研究，模擬一個單點注射之生物灌漿，進行觀察與分析土壤力學性質。初步確定 MICP 是否為土壤穩固之原動力。
- 三. 確立大型砂箱 MICP 之實現性，並獲得控制成本之實施材料與方法。
- 四. 建立以生物製劑之小型試驗場，對自然邊坡淺層土壤滑動現場，進行實際應用。

第二章 文獻回顧

以微生物誘導碳酸鈣沉積(microbial induce calcium 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三項：

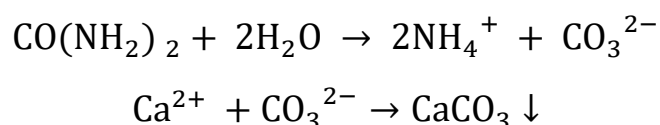
- 一. 可直接增加土壤剪力強度，進而提升邊坡土壤抵抗受剪切作用產生位移之能力，達到控制邊坡淺層土壤滑動災害之目的。
- 二. 降低土體滲透係數，以減少雨水入滲土體之水量，維持邊坡原有土壤飽和度，使不增加邊坡土體滑動潛勢。
- 三. 因邊坡表層土壤膠結作用，將可降低逕流水對邊坡沖蝕作用之潛勢。

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積工法，主要受到下列二反應方程式控制



這個研究理論基礎，是由尿素溶液和氯化鈣一起水解並產生碳酸鈣。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(Le Metayer-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。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。

由於MICP整個反應是藉由既有之地球上生物與生俱來之能力，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，因此若應用於自然邊坡淺層土壤滑動災害防治工作，其防制作用機理可期望獲得合理有效論證。

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，每克土壤存在著超過 10^9 數量的微生物細胞，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 10^6 數量的細胞存在著。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。

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/cm^2 ，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 確實可以解決化學性灌漿的難題。本計畫預計先從土壤中採取好氧微生物並在實驗室培養，用含有尿酸的溶液及提供鈣源供給，藉由滴灌模式注入土壤中使形成 MICP 作用 (Paassen et al, 2008) 而達成土壤的穩定性。

第三章 研究方法與步驟

本計畫將進行文獻資料蒐集以充分了解 MICP 工法在土砂中生物固結之機理，及目前國外發展情形及相關實施案例，並評估 MICP 工法應用在固結土壤之可行性。首先在試驗室內以標準管柱試驗確認管柱中之 MICP 反應，同時建立生物反應過程中各重要相關物理化學參數，並初步評估 MICP 應用於土壤滑動防治之可行性。第二、三年計畫將實際進行自然邊坡土壤 MICP 實驗。本計畫將是我國首次將 MICP 工法應用於自然邊坡穩定之研究工作，本年度實驗結果，將可做為後續 MICP 實施過程相關參數設定之依據。研究方法與步驟分述如下：

一. 文獻資料蒐集、整理及分析

為有效瞭解 MICP 機理及如何使用此新技術增強土壤之力學性質，將針對欲研究使用之生物菌種及邊坡土壤基本特性進行文獻收集分析，以及現有國內外曾探討 MICP 應用之相關文獻進行整理分析。期望以前人之研究成果，儘速進入研究核心，以研發合適之 MICP 技術應用於現場土壤固結以防止邊坡滑動。

二. 砂土管柱 MICP 實驗

為了評估 MICP 在土壤中之成效，首先進行標準狀態下之砂土管柱 MICP 實驗，以了解生物固化或固結土壤作用之機理。砂土管柱是透明玻璃管柱以標準砂填充並預設圓柱內砂土孔隙率。砂土管柱設置完成後，先行調製 MICP 試驗用之基質濃度及營養液濃度等。MICP 試驗過程中則定期採樣測量樣本的硝酸鹽、菌液濃度及尿素酶活性等，並且分析 MICP 作用產生之碳酸鈣晶型。另外亦取砂柱內部的樣本以 XL30 ESEM 搭載 EDAX X-射線微量分析設備進行礦化生成物種之分析。由以上分析及碳酸鈣含量和試驗結果的相關性來探討生物固化或固結土壤作用之可行性。

三. 初步土壤 MICP 實驗

將標準砂及採自邊坡的土壤試體放入圓筒狀之透明壓克力管，進行菌體與營養液體滴灌之微生物誘導碳酸鈣實驗，誘導完成的試體依實驗室變數不同進行抗壓強度試驗，以了解並分析 MICP 固化土壤之功效。其中主要變數為滴灌時間及其滴灌後試體之力學特性。其中抗壓強度試驗是依照 CNS1010 抗壓檢測的方法進行，以 0.5mm/min 的速度進行加載至試體破壞為止。

四. MICP 工法對土壤固結效果與防止邊坡滑動效益的評估

根據文獻資料蒐集、整理及分析結果，砂土管柱 MICP 實驗成果以及標準砂及土壤重模試體之抗壓試驗結果綜合分析後，提出 MICP 對土壤固結效果與 MICP 工法防止邊坡滑動效益的評估。

第四章 成果說明與討論

第一節 文獻資料蒐集、整理及分析

土木材料與環境工程之研究專家，利用微生物代謝作用所產生之碳酸鈣沉澱，在試驗室中曾初步的嘗試將砂質土壤固化並強化地盤承載力(Paassen et al, 2008)。研究焦點在於如何利用自然生物成長過程，於短時間內將土壤顆粒固結，使其可應用於土壤液化防治工程中並獲得工程效益。自然界中的部分微生物種藉由接觸到含有正電荷離子的可溶性物質後，正電荷離子將受到微生物末端的負電荷吸引而吸附在微生物上，後續與物質因微生物分解而產生的碳酸根離子起化學反應使碳酸鹽類在微生物周圍沉澱，此種生物碳酸鹽材料具有膠結的(cementitious)效果，可用來填充孔隙及加強周圍物質的固結效果，但因自然作用的過程與時間太過緩慢，研究人員在實驗室內將可加速促成微生物誘導碳酸鹽類沉澱的過程，並且此生物生成材料可增加土壤顆粒之間的堆積及握裹效果。此種利用生物菌種反應生成碳酸鹽沉澱的生物礦化原理，科學界稱之為 MICP(Microbial-induced carbonate precipitation)工法。

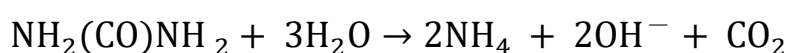
一. 微生物性誘導碳酸鈣沉積(MICP)作用

目前正在研發的冷結新技術 (Whiffin et al., 2005; Van Meurs et al., 2006; Ivanov and Chu, 2008)，係使用土壤中自然

界的微生物代謝，讓土壤的化學、物理及生物化學性質改變進而改善土壤力學性質。這是利用微生物反應過程來固化提升土壤層的工程力學特性。其原理為利用生物菌種反應生成碳酸鹽沉澱的 Microbial-induced carbonate precipitation (MICP)。它結合微生物學、地球化學、土木工程等相關領域之研究，用以改進地質敏感區土壤為極具潛力之新工法(De Jong et al, 2008)。此類微生物中，針對 *Bacillus pasteurii* 的研究最為深入。

二. *Bacillus pasteurii* 菌種

Bacillus pasteurii 為革蘭氏陽性好氧細菌，為普遍存在於土壤中之無害細菌，能產生高量的細胞內尿素酶 (urease)，而常被使用於 MICP 作用。尿素酶催化尿素之水解，產生二氧化碳、氫離子、與氫氧根離子，反應方程式如下：



隨著氫氧根離子的釋出，pH 值逐漸上升，二氧化碳轉變成碳酸根離子，進而與環境中的鈣離子結合形成碳酸鈣 (Bang et al., 2001; Bachmeier et al., 2002)。文獻指出在 *Bacillus pasteurii*、尿素、氯化鈣共存的條件下能誘導出碳酸鈣沉積，用以修補混凝土裂縫 (Day et al., 2003)。然而，微生物性誘導碳酸鈣沉積作用亦可增強砂質土壤在含水狀況下對剪力 (shear

force) 的抵抗力 (DeJong et al., 2006), 也被認為是一種修復石材古蹟建物的方法 (Fernandes, 2006)。此外, 與 *Bacillus pasteurii* 同屬芽孢桿菌的 *Bacillus subtilis* 也曾被研究出具有誘導碳酸鈣沉積的能力 (Perito and Mastromei, 2003)。由於使用微生物誘導產生碳酸鈣沉積的過程仿如自然界的發生過程, 不會向外界釋放有毒物質, 惟速度加快了許多, 因此可被認為是一種符合環保的工程方法。因此, 本計畫擬利用會產出尿素酶的微生物 (*Bacillus pasteurii*), 在尿素與氯化鈣存在下注入土壤, 進行培養反應, 冀望受誘導產生之碳酸鈣能膠著所注入之土體內之顆粒, 達強化土壤結構之目標。

Bacillus pasteurii 為具有黏接作用的微生物, 可分解尿素釋放出氨離子與二氧化碳, 再與氯化鈣作用誘導方解石沉澱, 可將砂土黏合在一起, 將流砂變成砂岩。*Bacillus pasteurii* 之形狀接近於圓桿狀或螺旋狀, 其細胞直徑大約介於 $0.5\sim 3\mu\text{m}$, 某些菌種之直徑可小至 $0.2\mu\text{m}$, Mitchell (2005) 之研究指出 *bacillus* 菌種較適合於於空隙粒徑大於 $6\mu\text{m}$ 之土壤環境生存, 一般較適合於砂性土壤環境生長, 而粘土質土壤環境宜尋找其他更小直徑之菌種, 有關於土壤粒徑與菌種比較如圖 4-1 所示。此外, Bennett (1991) 等人認為細菌固化土壤之研究必須考慮

土壤與細菌間之生成過程、反應機制、微觀土壤顆粒排列、尺寸大小、時間因子等因素，如表 4-1 所示。

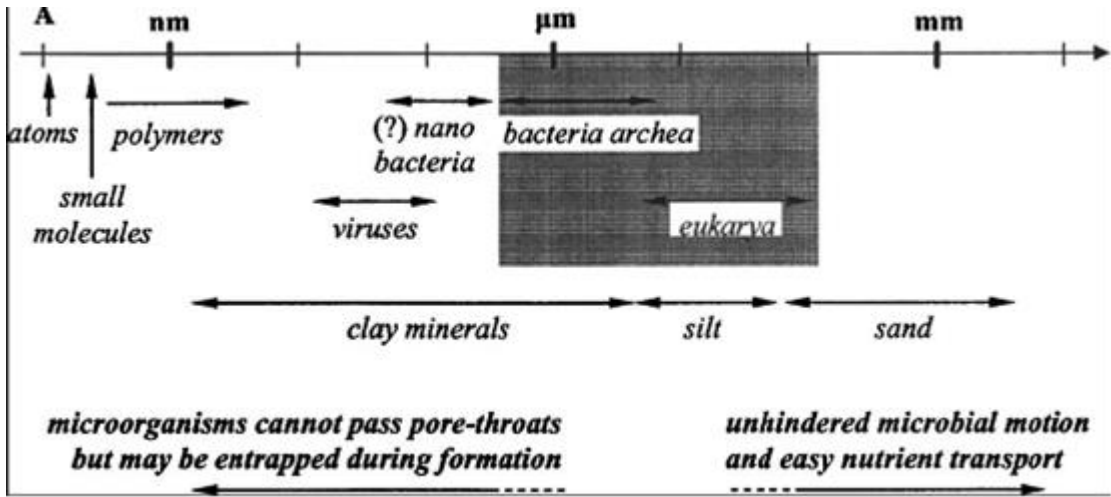


圖 4-1 微生物尺寸與土壤粒徑比較圖

表 4-1 有關微觀沉積物發展之過程機制、顆粒排列及時間範圍

Processes	Mechanisms	Predominant particle arrangements*	Size scales	Time scale	Remarks
Physical	Sedimentation	Single to multigrain	μm to mm	s to years	Soil particle types and size and the sedimentary environment determine initial microstructure (see Mitchell 1993)
	Eletromechanical	E-F	Atomic and molecular to ~4 μm	μs to ms	Some particles may rotate to F-F association
Physicochemical	Thermomechanical	F-F (some E-F)	Molecular to ≥0.2 μm	ms to min	Initial contracts E-F then rotation to F-F: common in selective environments
	Interface dynamics	F-F and E-F	μm to ~≥0.5 mm	s	some large compound particles may form at high salt and particle concentrations
	Biomechanical	E-F	~0.5 mm to >2.0 mm	s to min	Some F-F possible during boturbation
Biologically influenced (bioorganic)	Biophysical	E-E and F-F	μm to mm	s to min	Some very large clay organic complexes possible
	Biochemical	Largely arrangement independent	μm to mm	h to year	New chemicals formed, some altered. Mediating bacteria influence reaction rates
Burial and diagenesis	Mass gravity	F-F localized swirl	cm to km	years	Can operate over large physical scales
	Diagenesis cementation	Arrangement independent	Molecular reactants	years	Altered and new minerals formed, changes in morphology

*For platy particles: E-F =edge-to-face; E-E =edge-to-edge; and F-F =face-to-face

這種自然自然界中微生物通過其自身的生命活動，與周圍環境介質之間不斷發生著酶化作用，逐漸礦化形成似方解石結構物（如圖 4-2 所示）。如何將此種反應直接應用在工程界上，一

直是眾多研究者們致力突破的研究方向(Muyncket al., 2007)。

目前，少數國外研究機構已經陸續開始嘗試利用碳酸鹽的礦化作用(MICP)，進行砂柱的膠結、土壤組織的強化、混凝土裂縫的修補、混凝土表面的覆膜防護及古建築文物的修復等研究探討(Stockset al., 1999; Nematiet al., 2003; Rodriguezet al., 2003; Dicket al., 2006)。

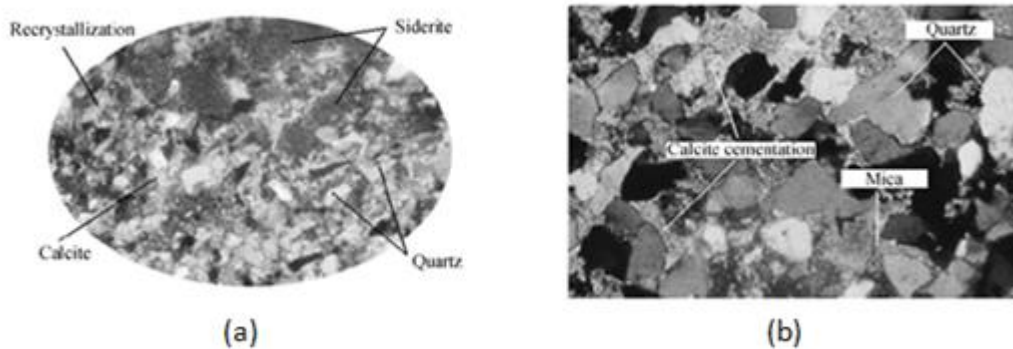
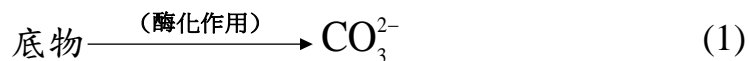


圖 4-2 自然界中微生物礦化方解石膠結碎屑物質而形成的岩石

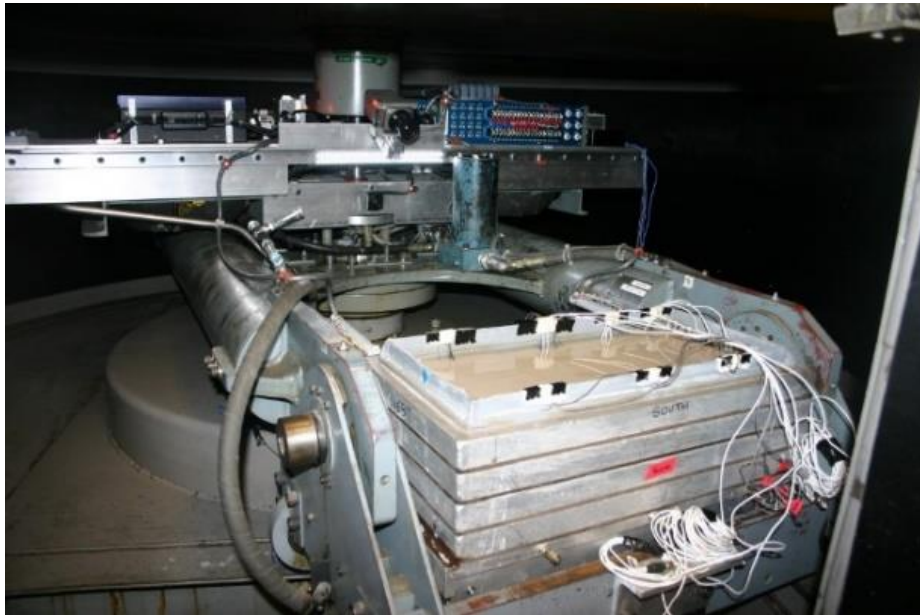
另文獻(Ruixing et al., 2010)指出，將土壤試體長期浸泡於菌株培養液中，菌株在生長繁殖過程中不斷持續分解培養液中的營養源，生成 CaCO_3 和 NH_4^+ ，同時使環境 pH 值升高，菌株細胞膜介面處帶負電荷的 SM(可溶水有機質)不斷螯合 Ca^{2+} ，誘導出局部的晶體離子(CaCO_3)濃度逐漸增加，從而吸引更多的 Ca^{2+} ，直到晶體離子濃度增大到利於核化發生時，礦化作用將逐漸發生而導致 CaCO_3 沉澱。這些沉澱的 CaCO_3 會附著膠

結於混凝土表面，或膠結其他基材填補於混凝土裂縫中，達到修復防護的效果。其反應式如式(1)~(3)所示：



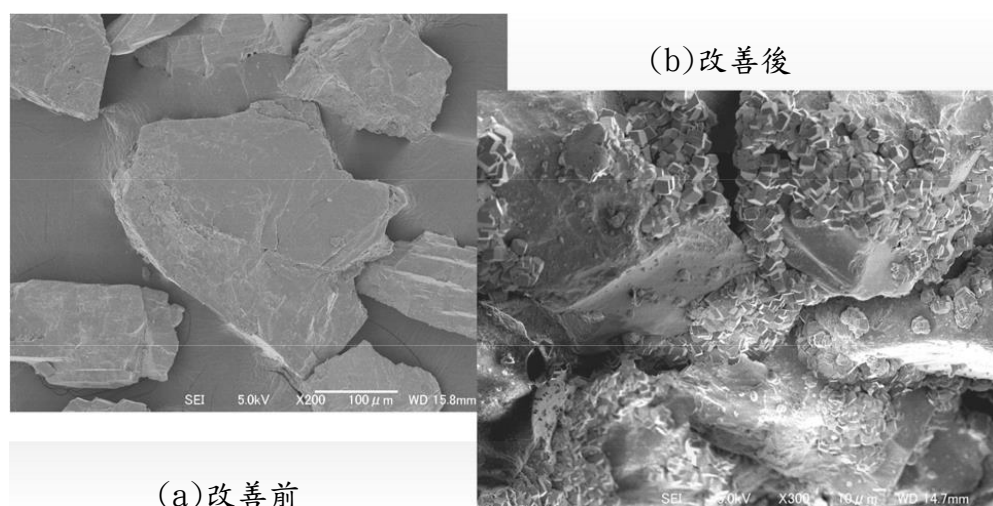
三. 微生物性誘導碳酸鈣沉積(MICP)國外施工案例

國內外對 MICP 應用於土壤強化之研究逐漸重視，Montoya 教授在 2013 年間曾利用動態離心模型（如照片 4-1）測試生物礦化後沙堆之強化效果，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，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。



照片 4-1 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，達強化土壤之目的。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，其膠結前後效果如照片 4-2。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。



照片 4-2 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 8.0m×5.6m×2.5m 之混凝土製容器中，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，使得溶液可以在砂粒中形成可流動之狀態，如圖 4-3 所示。

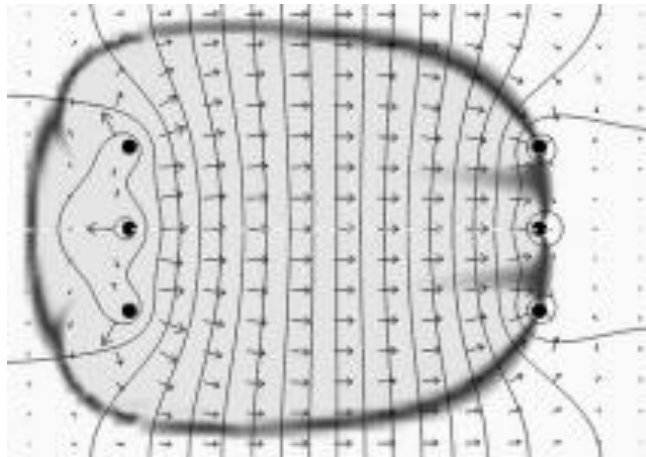


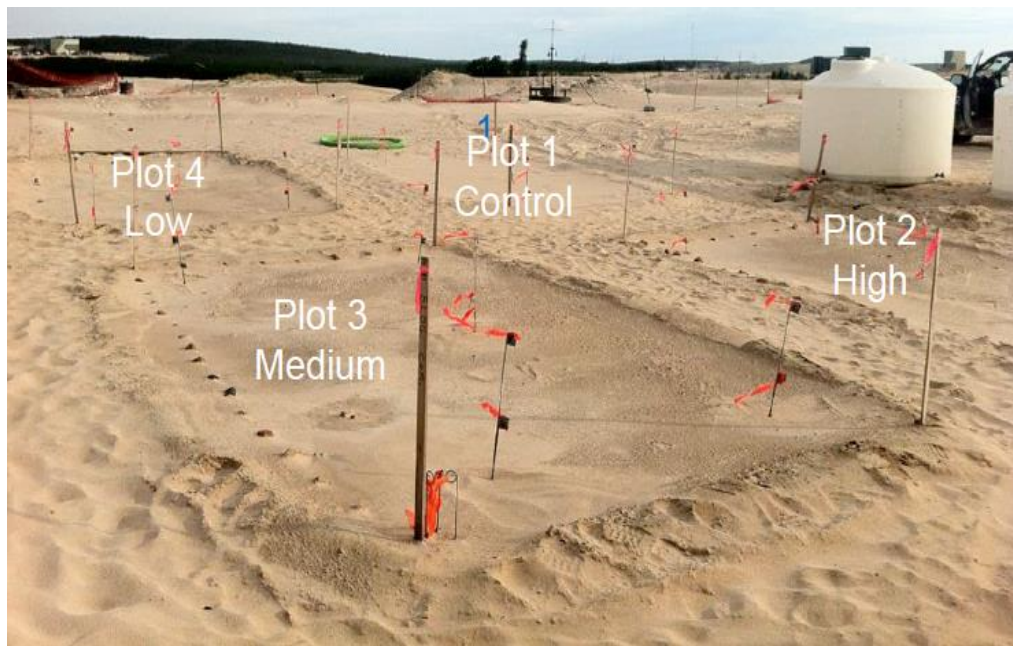
圖 4-3 實驗裝置圖

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，如照片4-3所示。



照片 4-3 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(如照片 4-4 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照片 4-5 所示)。

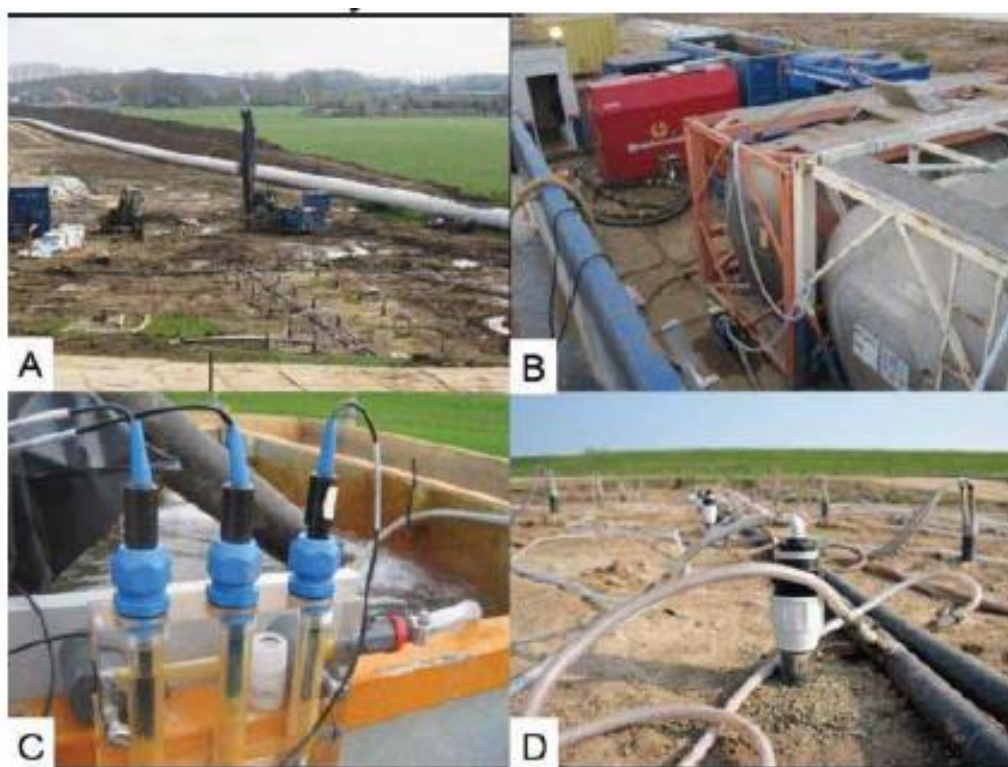


照片 4-4 生物修復技術進行沙灘之固灘及防蝕



照片 4-5 生物修復技術進行沙灘之固灘及防蝕結果

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 於 2011 年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。施作過程如照片 4-6 所示。最終成功將地盤固化，HDD 得以進行。



照片 4-6 在施作 HDD 前之現地生物礦化過程

A) 注射井及取出溶液之井 B)氯化鈣及尿素現地攪拌器

C)廢水監測系統 D)注射及監測井

第二節 砂土管柱 MICP 實驗

一. 菌株培養

本實驗目的係探討細菌在碳酸鈣結晶作用之效能，本研究採用 *Bacillus pasteurii* 菌進行試驗，首先進行菌株培養，培養基每公升含 1 g 氯化銨、3 磷酸鉀、6 g 磷酸鈉、5 g 氯化鈉, 1 毫莫爾硫酸鎂及 0.1 毫莫爾氯化鈣，並將 PH 值控制在 7，在

好養環境下儲存在 4°C 進行 48 小時培養。

(一)、砂柱裝置

砂柱採用自行製作之玻璃管，高度 22cm、內徑 7cm。

考量砂柱管若為水平設置時，在非壓力流條件下，可能導致

滲流線集中於管內下半部，造成礦化不均勻現象，故本實驗

砂柱管採直立方式設置。沙柱管兩端均填置濾層，使得滴灌

液體可以均勻地散布在試體中，濾層採 2 層設計，外層為

Scotch Brite 牌之菜瓜布，內層則為標稱直徑為 2cm 之輕質

骨材。管柱中填充標準砂，在填注過程中予以適當壓密，以

避免過大之氣室產生，孔隙含量控制在 36% 左右(約 300ml)。

另採用滴灌設備連置於砂柱管上方，作為灌注實驗溶液之用，

固定滴灌流量為 0.2l/hr。

(二)、砂柱滲流實驗

1. 開始前先以自來水進行砂柱之飽和及滲流洗淨。

2. 準備已知菌液濃度(依前導研究結果取 OD 值 4.1)及尿素酶
活性之菌液。

3. 先以菌液 *Bacillus pasteurii* 300 ml 進行滴灌充滿孔隙以植
入菌株，靜置一小時後洩流並收集之。

4. 再注入 0.05M CaCl_2 溶液 300 ml 至砂柱中，以製造環境增

加固化效果，靜置一小時後洩流並收集之。

5. 靜置 24 小時後，以 1.1M 之 Urea 和 CaCl_2 反應液注入，以進行 MICP 反應，反應液共準備 4.8 公升，固定滴灌流量為 0.2l/hr，以 24 小時為一循環，共滴灌三循環共 72 小時。
6. 滲流過程中，每隔一固定時間(24 小時)即採集流出溶液，並立即經以離心方式並抽取上清液至乾淨之試管中，存放於 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱以待後續光密度 (OD_{600})、pH 值、脲酶活性及銨離子濃度之測試。
7. 以上測試過程維持在 25°C 之恆溫條件。
8. 完成砂柱滲流後，挖取管中砂柱材料，經烘乾後，進行 SEM 及 X-ray 檢測。
9. 以上整體實驗步驟與反應時間，經整理成表，如表 4-2。

表 4-2 MICP 砂柱實驗步驟

Phase	Description		Duration (h)	Effluent Flow rate (L/h)	Details
Rinse	Water flush		3	0.2	Tap water
Immobilization of bacteria by two-phase injection	Bacterial injection	<i>S. pasteurii</i>	1.5	0.2	OD ₆₀₀ : 4.1
	CaCl ₂ injection	CaCl ₂	1.5	0.2	0.05M CaCl ₂
Cementation	Reaction fluid injection		24	No flow for 24 h- after 24 h, with 0.2 L/h flow rate	1.1M Urea and CaCl ₂

二. 檢測項目與方法

(一) 菌液濃度之吸光密度檢測 (Optical density , OD₆₀₀)

使用分光光度計(spectrophotometer)(如照片 4-7)，光譜

波長設為 600 nm，進行菌液濃度之觀測。



照片 4-7 紫外光/可見光分光光譜儀

(二) 尿素酶活性(Urease Activity)

尿素酶活性以電導度方法(conductivity method)(如照片 4-8)及銨根離子濃度二種方法進行測試，並相互比較，以求準確性。



照片 4-8 手提式微電腦電導率測定儀

(三)銨根離子濃度測試(Ammonium Concentration)

採用 Greenburg et al. 等學者所提 modified Nessler method。首先樣品先以去離子水(deionized water)稀釋至 0~0.5 mM，再以吸管吸取 2ml 並加入 100 μ l Nessler reagent (Merck, USA)於試管混合並進行 1 分鐘反應，隨後將該試管溶液置於吸光計進行測試。測試前，分光計需先以數個 NH_4Cl 標準品進行儀器校正，測試時，採 425 nm 波長進行之吸收光譜，並紀錄吸光度數值，確認銨離子濃度。

(四)鈣離子濃度 (Calcium concentration)

採用 Peaslee 學者所提比色法(colorimetric method)進行測試。

(五)碳酸鈣生成量測試(Calcium carbonate Content)

採用 Loeppert 所提方法，將乾燥後之砂柱，設 10 個等分點，每一等分點位置刮取 3 個試樣，最後再將所取得之試樣充分混合以代表整體砂柱之材料，接續進行 SEM 及 XRD 測試，以分析沉澱於砂柱之晶體性質及辨識其礦物種類，SEM 儀使用 TOPCON 公司之 FE-SEM ABT-150S(如圖照片 4-9)，另 XRD 使用 Shimadzu 之 XRD-600 Shimadzu。(如照片 4-10)



照片 4-9 發射掃描式電子顯微鏡



照片 4-10 X 射線繞射分析儀圖

三. 實驗結果與討論

(一)菌液濃度與尿素酶活性

本實驗目的係要清楚了解細菌在 MICP 作用之機理，其中測試砂柱內之菌液濃度(OD 值分布情形)及尿素酶活性以確定細菌是否存在砂柱中。本試驗在砂柱下端出口收集滲流出之溶液進行分析，因孔隙含量控制約 300ml 左右，故每次滲流總量約 300ml，滴灌反應液體前及 MICP 反應後 24 小時、48 小時及 72 小時皆收集滲流總量約 300ml 進行分析，當每收集 30ml 即進行少量取樣試驗。MICP 滴灌試驗前 600 ml 菌液滲流液體之試驗結果可由圖 4-7 及 4-8 獲知。當砂柱經 300 ml 懸浮菌液滴灌之後，馬上再以 300 ml 之 50 mM CaCl_2 溶液滴灌進行固定作用，可發現此工序可將大比例之

菌液停留在砂柱中，當菌液注入砂柱後之液體滲流出達 120ml 至 240ml 間(圖 4-4)，取樣試驗所得之菌液濃度與尿素酶活性最高，表示此時砂柱中間段有大量之細菌存在於砂柱中及有強烈之尿素酶活性，但砂柱上端及下端段則較少細菌存在，且量測得較低之尿素酶活性。但再取後 300 ml 滲流液體之試驗結果可由圖 4-5 獲知，所流出溶液即未見明顯之活性，此時之尿素酶活性值皆低於 0.005，而且幾乎已經沒有菌液流出，此時之 OD 值皆低於 0.1nm。此結果顯示菌株應該已經停留於砂柱中未再釋出。

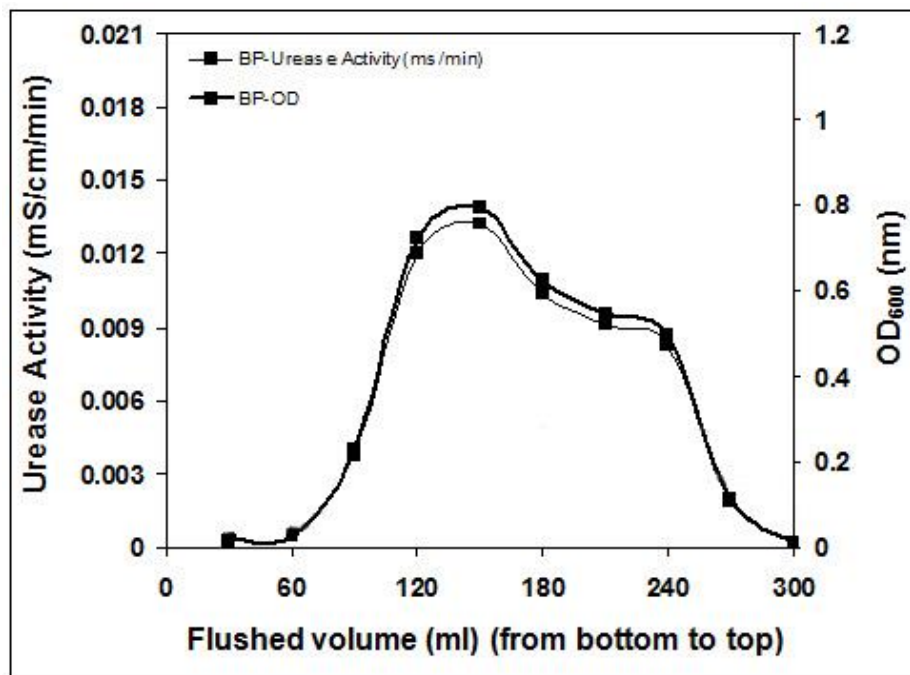


圖 4-4 前 300ml 砂柱流出液 OD 及尿素酶活性檢測圖

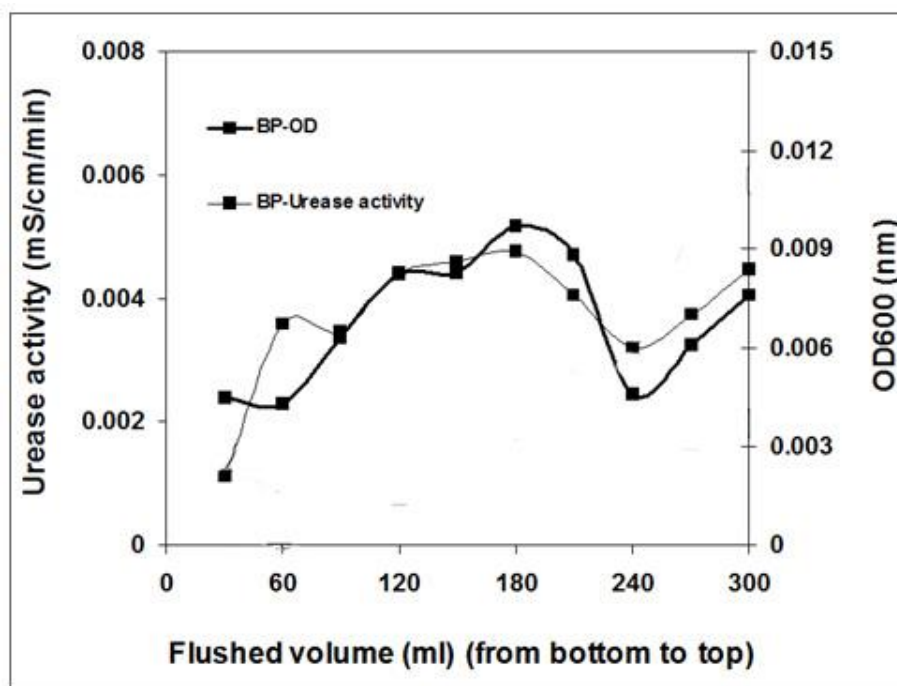


圖 4-5 後 300ml 砂柱流出液 OD 及尿素酶活性檢測圖

(二)尾端滲流液之化學性質

經過靜置 24 小時候，再以 1.1M 之 Urea and CaCl₂ 反應液注入，以進行 MICP 反應。本實驗對於 MICP 流出液進行 pH 值及銨離子 NH₄⁺ 濃度之觀測，以了解細菌進行 MICP 之反應行為。在 PH 值之觀測中，對於第一批流出(24 小時取樣)之膠結溶液之 PH 值為 8.6，接續，第 48 小時取樣至 72 小時取樣之膠結溶液 PH 值約 9.1 及 9.6，這證明砂柱中之 *Bacillus pasteurii* 菌具有極強切斷尿素分子釋出銨離子使溶液 PH 值上升之能力，以準備進行 MICP 反應。

在銨離子濃度測試結果如由圖 4-6 所示，由圖中可知，

在第 24 小時、48 小時、72 小時，隨著尿素水解，銨離子濃度隨時間增加而相應升高。由化學反應式可知，每一莫爾之尿素經水解之後，可產生 2 莫爾之銨離子，因此觀測到一莫爾數值之銨離子濃度，事實上表示，已有其一半之尿素莫爾數已經水解。由圖中結果可進一步知道流出溶液在第 24 小時、48 小時、72 小時，其銨離子 NH_4^+ 之濃度最高分別為 398 mM 、 1160 mM 及 1921 mM，此結果說明當 MICP 反應越久，將消耗越多尿素而使銨離子濃度上升，相對的亦說明了砂柱中之菌株在第 48 小時已顯現出很強之 MICP 反應訊號，在 72 小時更可再成長約 1.65 倍之訊號。

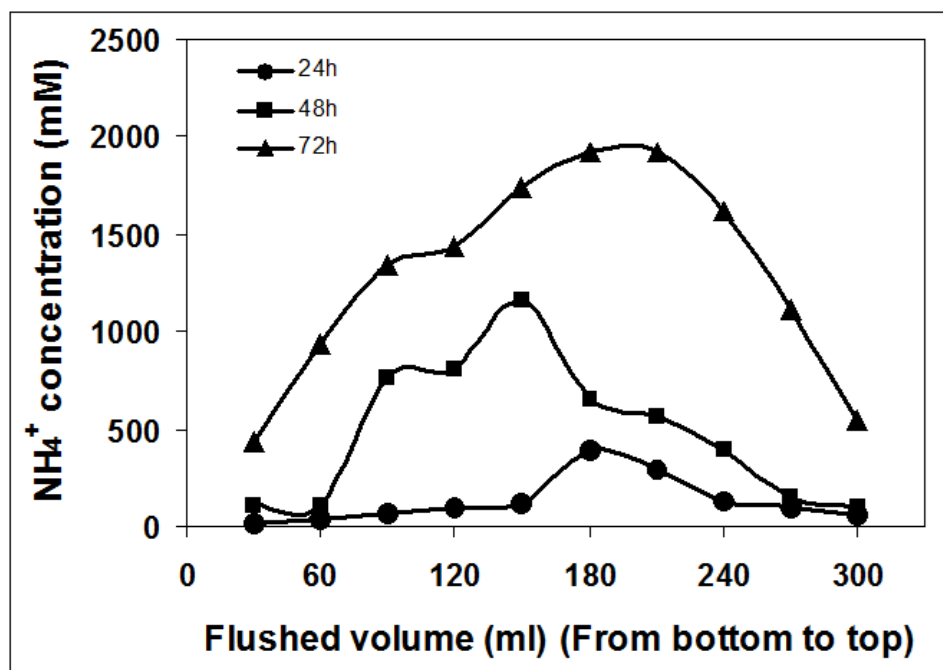


圖 4-6 流出液銨離子濃度變化圖

由圖 4-7 流出液鈣離子濃度變化圖可發現，鈣離子濃度在 MICP 開始反應之 24 小時尚有約 900mM，但在第 72 小時時候所測得之鈣離子濃度僅有 50mM 至 300mM。此結果顯示菌株在第 72 小時確實有大量之 MICP 反應，將鈣離子幾乎全部轉換成 CaCO_3 結晶而大幅降低鈣離子濃度。

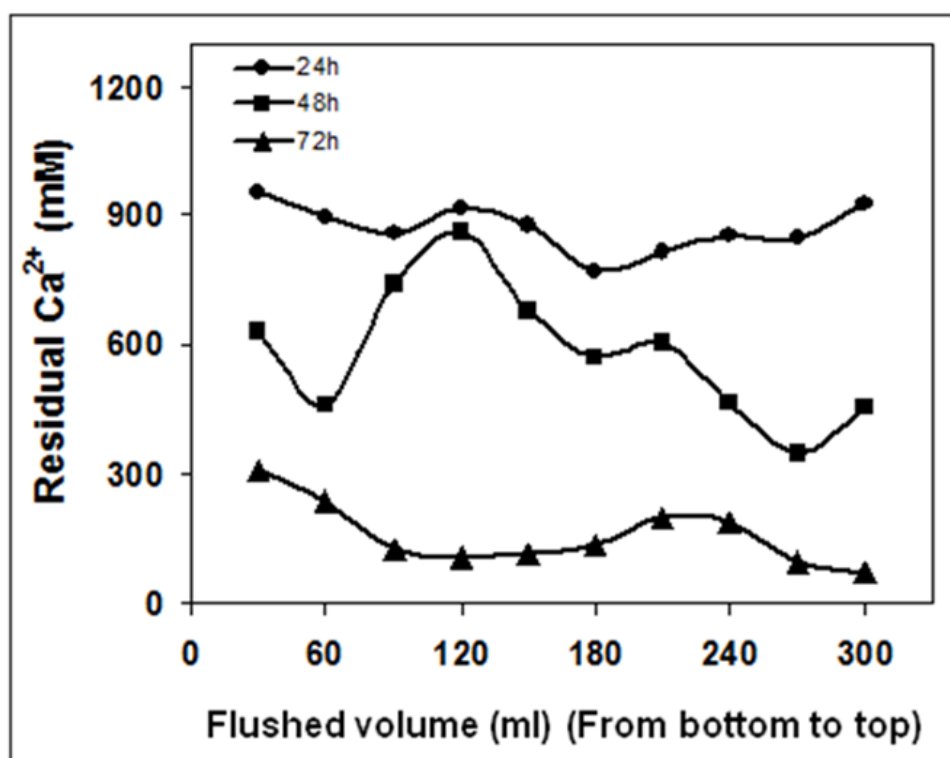
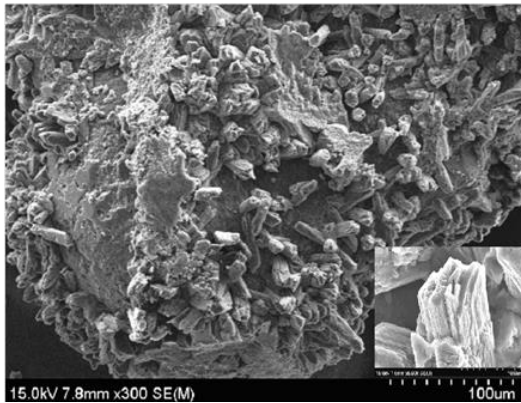


圖 4-7 流出液鈣離子濃度變化圖

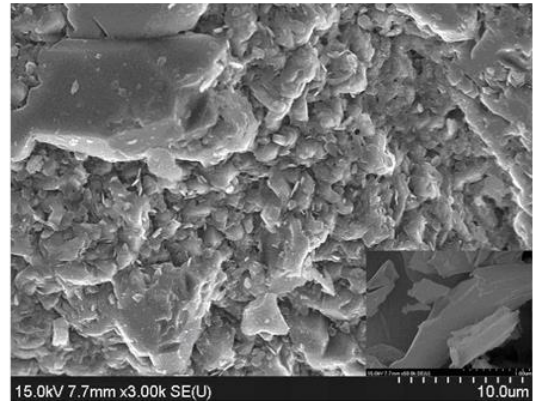
(三)電子顯微鏡 SEM 之觀測結果

由 MICP 所生成之 CaCO_3 ，經 SEM 照射，其晶形如圖 4-8 所示，首先在圖 4-8a 可以發現，砂柱頂端之標準砂粒表面有累積粒徑約為 $100\mu\text{m}$ 菱形方解石，在砂柱中間部分亦

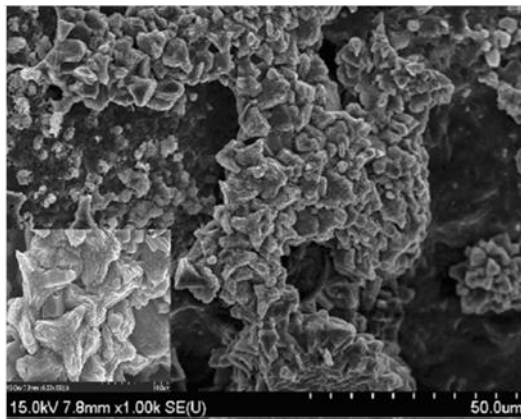
有不規則且無稜角粒徑約為 $10\mu\text{m}$ 之 CaCO_3 結晶如圖 4-8b，基本上整個砂柱之 CaCO_3 結晶有隨著砂柱之深度增加而減少之趨勢(如圖 4-8c、圖 4-8d 所示)，其可能原因為砂柱下端為管線末端，其 MICP 反應沒有砂柱中間或上端顯著之故。



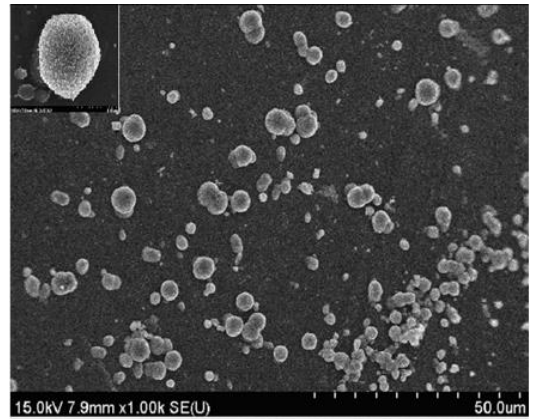
(a) 砂柱頂端累積菱形方解石



(b) 砂柱中間不規則且無稜角結晶



(c) 砂柱頂端之 CaCO_3 結晶



(d) 砂柱底端之 CaCO_3 結晶

圖 4-8 MICP 反應之 SEM 之觀測結果

(四) XRD 試驗之觀測結果

圖 4-9 為 MICP 反應後所得產物 CaCO_3 之 XRD 圖。

由圖可知，*Bacillus pasteurii* 菌所得 CaCO_3 中，主要為方解

石(Calcite, 圖中代號 C 所示), 此外, 亦有少量霰石(Veterite, 圖中代號 V 所示)和極少量之文石(Algonite, 圖中代號 A 所示)。霰石是 CaCO_3 次穩態礦物, 於自然界中少有存在, 因外在室溫潮濕條件下, 能夠快速轉變為方解石或文石, 由本文結果, 細菌和其有機分泌物可能有助於霰石之結晶產生。由上述 XRD 試驗之觀測結果再次證明了 MICP 確實在砂柱中是有作用的。

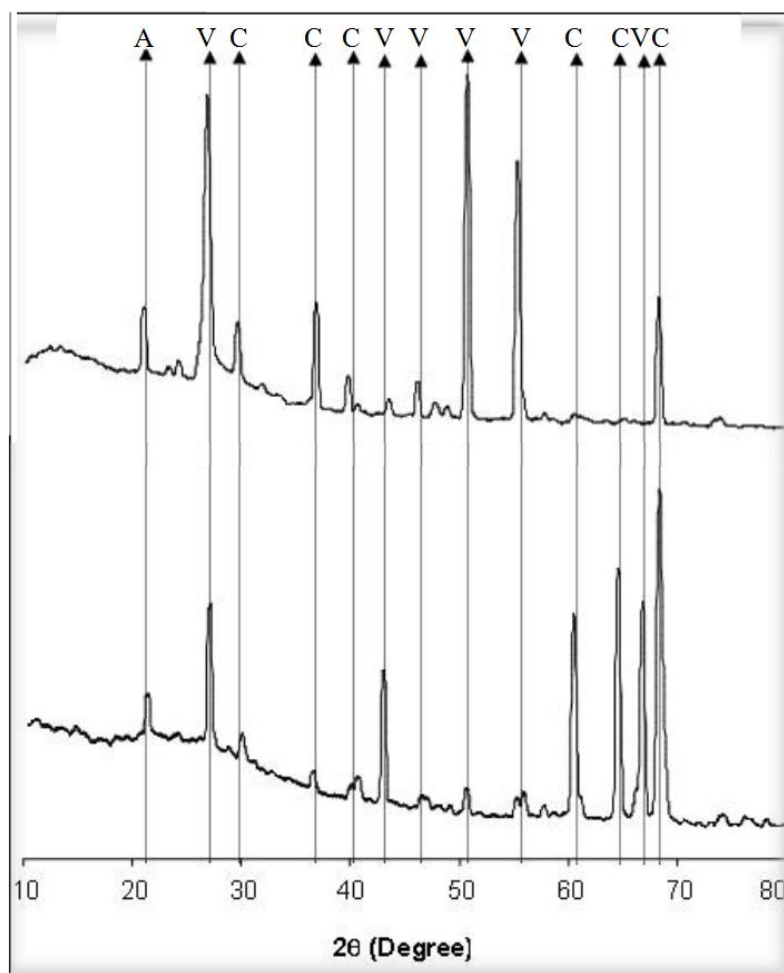


圖 4-9 XRD 試驗之觀測結果

第三節 土壤 MICP 實驗結果與討論

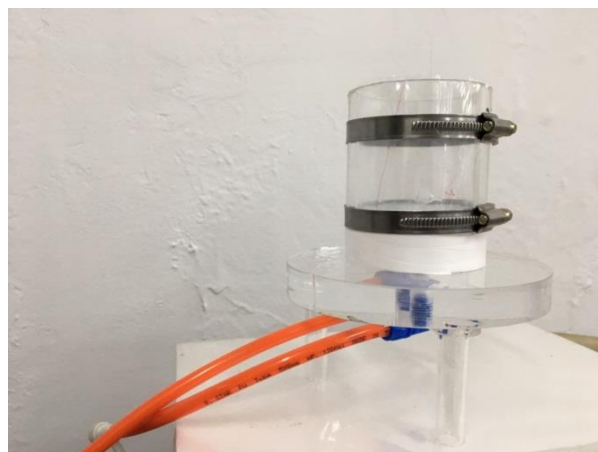
本研究實驗發現在 MICP 反應過程，確實如相關學術文獻所提，*Bacillus pasteurii* 菌對於鈣離子轉換具有相當效率，並成功長成碳酸鈣晶體，故可初步判釋 MICP 在管柱條件下(模擬淺層邊坡土壤)確實能進行礦化反應，並可於砂土顆粒之間長成碳酸鈣晶體，對於所長出之碳酸鈣晶體是否能對土壤顆粒起膠結作用，進而達提升土壤強度之效果，須更進一步以抗壓試驗測試之。

一. MICP 實驗抗壓試體準備

抗壓試驗採用標準砂及土壤之重模試體，直徑 7cm、高 7cm 之圓形柱體(重模試體所用之模具如照片 4-11 所示)。各管線配置(如照片 4-12)完畢後，將各相對密度所對應之砂或土壤重填入模具中，使其高度切平於模具。不同相對密度試體之準備乃利用相對密度計算公式推算出不同相對密度之孔隙比，得知各孔隙比後又因重模試體體積固定即可計算出所需之砂或土壤重。

試體製作完成後即可開始製造 MICP 之環境，先將純菌液單獨流入試體中使其飽和並靜置 1 小時，1 小時後接續將硝酸鈣溶液單獨流入試體，使其飽合且靜置 1 小時，完成此兩種溶液單獨飽合，即可將混合菌液和硝酸鈣溶液分別從模具下方灌

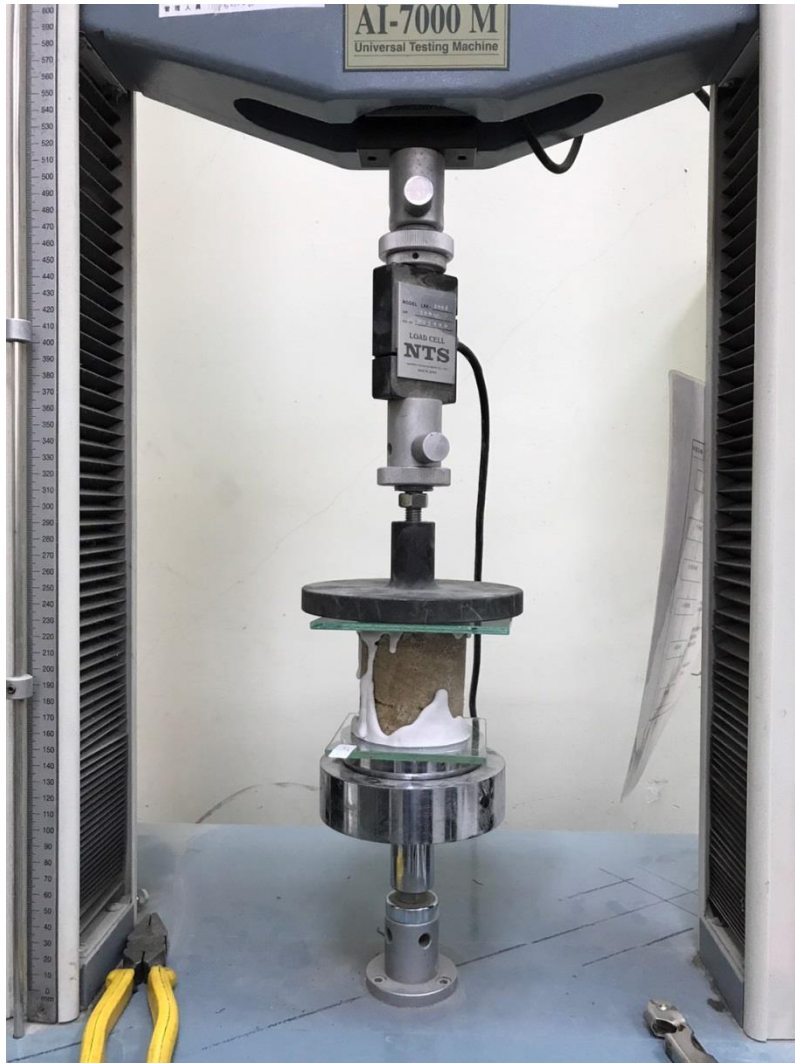
入試體內，本實驗設計灌入之混合溶液在試體內浸泡一天，排乾一天，為避免溶液混合不均，每 12 小時更換流入孔，直至指定抗壓齡期前二日停止滴灌作業，將試體取出後靜置至指定齡期進行抗壓試驗(如照片 4-13)。



照片 4-11 抗壓試體所用之模具



照片 4-12 抗壓用之重模試體 MICP 滴灌圖



照片 4-13 MICP 作用後重模試體抗壓試驗

二. MICP 抗壓試體試驗結果與討論

本實驗主要欲了解經過 MICP 作用後之標準砂或土壤重模試體，其在不同初始孔隙比下試體強度強化之成效。在標準砂部分，本實驗選用三個不同初始孔隙比($Dr=40\%$ 、 60% 、 80%)及五個滴灌時間(0、5、15、30、60 天)之試驗，共 15 組試驗。在土壤重模試體部分，參考標準砂試體之試驗結果，本實驗選

用土壤原有之孔隙比($Dr=28\%$)逕行重模試體製作及設定三個滴灌時間(7、14、28 天)之試驗，此試驗亦設計對照組(無菌液滴灌試體)以為比對，共 6 組試驗。上述試驗結果將比較不同滴灌時間所造成強度之差異，以提供為土壤膠結固化成效之參考。

標準砂抗壓試驗重模試體經 MICP 作用後如照片 4-14 所示，試體抗壓試驗如照片 4-15 所示。由照片可以看出，無凝聚力之標準砂試體經 MICP 工法施作下，可以被固結成具有直立性之小圓柱，在 MICP 施作天數越長的試體，其整體固結狀況越佳，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在砂粒間孔隙沉澱越多，使得試體因固結而越加堅硬；標準砂重模試體抗壓試驗結果顯示如圖 4-10，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，再由試體初始之相對密度方面觀之，可以發現當試體相對密度越高，其抗壓強度亦會跟著增加。在三個不同初始孔隙比($Dr=40\%$ 、 60% 、 80%)下，滴灌時間達 60 天以上時，試驗結果顯示其抗壓強度值可由鬆散砂之零強度經 MICP 作用後強化提升至 3 至 12kPa 左右。根據此實驗數值與照片中試體之固體形態可以得知，利用 MICP 工法確實可以固結完全無凝聚

力之散砂，若將 MICP 工法應用於強化土壤結構，預期其固化效果將遠優於完全無凝聚力之標準砂。故本研究亦進行土壤重模試體之試驗。

土壤抗壓試驗之重模試體經 MICP 作用 7、14 及 28 天後之抗壓試驗結果如圖 4-11 所示，由圖中可以觀察到有 MICP 作用之組別其強度值大幅提升，隨著 MICP 施作天數增加，其抗壓強度值亦隨之增加，在 28 天養護後，其抗壓強度值可高達 250kPa。此結果顯現以 MICP 工法應用於強化土壤結構，確實有預期之固化效果。



相對密度 40%



相對密度 60%



相對密度 80%

照片 4-14 標準砂重模試體經 MICP 作用 3 天後之試體



相對密度 40%



相對密度 60%



相對密度 80%

照片 4-15 標準砂抗壓試體 5 天齡期之抗壓試驗

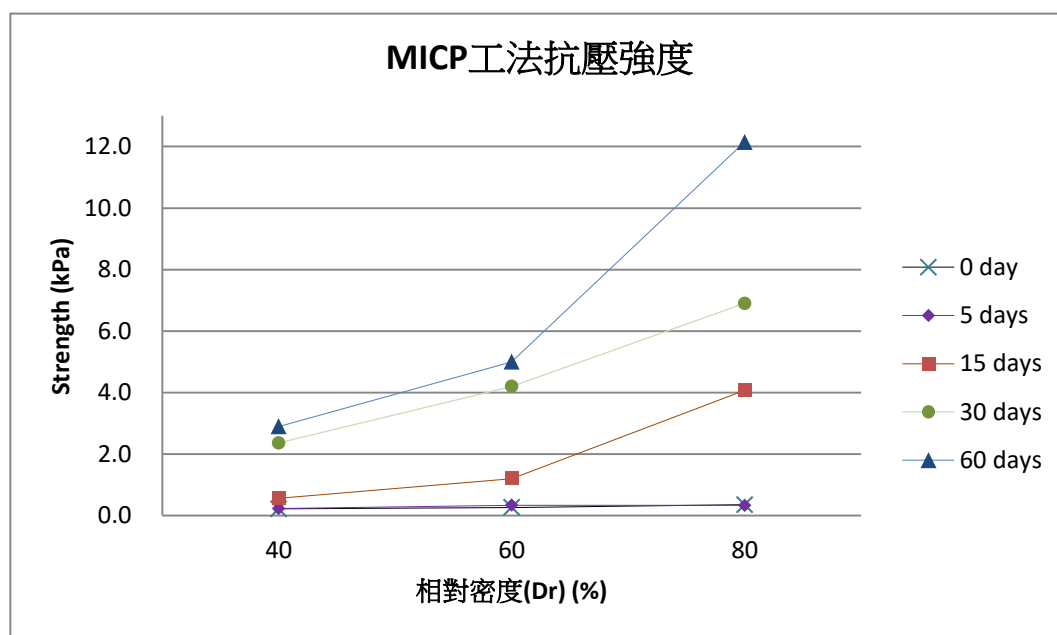


圖 4-10 標準砂重模試體經 MICP 工法後之抗壓強度結果

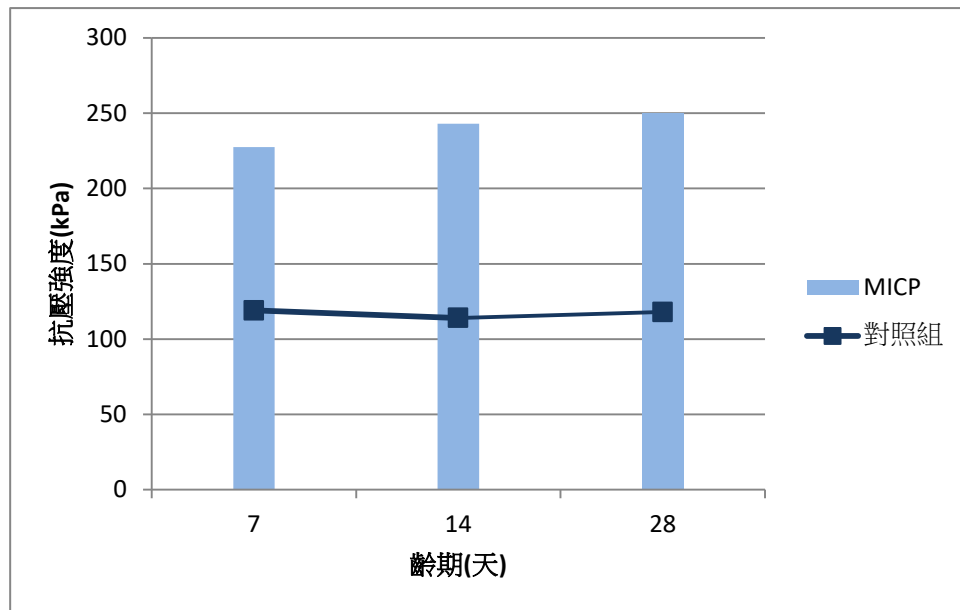


圖 4-11 土壤重模試體經 MICP 作用之抗壓強度結果

第四節 MICP 對土壤固結與防止邊坡滑動效益的評估

根據本研究實驗結果可以得知即使是沒有凝聚性之砂，利用 MICP 亦可以將其固結成型並提供抵抗外力之能力，經試驗結果得知 MICP 工法可適用之土壤為砂質土壤，在改良的實驗過程中發現，因 *Bacillus pasteurii* 是好氧菌，故必須給予空氣其效果更佳，若應用於土壤邊坡強化改良，其改良深度建議為地下水位以上之深度效果最佳。

本計畫使用之菌株 *Bacillus pasteurii* 為一種普遍存在土壤中對人類無害之細菌（一般為芽孢桿菌），該菌在特定環境條件下，其生長代謝過程可將鬆散土壤固結；土壤一經固結後便能大幅提升對自然環境侵襲之抵抗能力。土壤改良中生物性作用在適當條件下可以使土壤

進行成岩作用，與傳統化學性及機械性作用相比較，生物性作用應用於土壤較符合現今之友善環境之需求且本計畫所選用之菌株為對人體無害之菌種，在安全性上也較化學性作用佳。

利用 MICP 工法，因主要工項為將極低黏滯係數之菌液及營養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，故相對於傳統土木工法，顯然更能節能減碳，可符合維護自然生態環境之重要條件。MICP 工法所具優勢是當工程一旦完工後，其對土壤液化防治之穩定效果，係隨時間而持續增加，相對於傳統防治工法，需克服耐久性之問題，更加顯示 MICP 工法優越性。

MICP 工法不需要特殊機具及假設工程，亦不需太多人力，僅需菌液及材料輸送管，在經濟性考量上與傳統工法相比，可以大大降低設備費用、設備維修費用以及人力成本等，惟菌液及其營養液購買費用較高，但本計畫掌握了更經濟之養菌技術及研發了新的營養液配方，在菌液成本上更是大幅降低花費，故 MICP 工法可符合降低改良成本之要求。

就以上論述可知，在生態性，安全性及施工便利性上考量，MICP 工法對防止邊坡滑動施工上確實佔有很大優勢，而且經本年度試驗結果顯示，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。

第五章 結論

經過文獻收集與分析以及實驗結果之證明，本研究歸納結論如下：

- 一. 在標準管柱條件下 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，並成功長成碳酸鈣晶體，故可初步判釋 MICP 在土壤中確實能進行礦化反應，並經微觀試驗證明，確實可於砂土顆粒之間長成碳酸鈣晶體進行填塞作用。
- 二. 標準砂及土壤抗壓試驗重模試體經 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。
- 三. 在生態性，安全性及施工便利性上考量，MICP 工法對防止邊坡滑動施工上確實佔有很大優勢，而且經本年度試驗結果顯示，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。

參考文獻

1. 毛子文，”現場低壓灌漿試驗與灌漿土壤動靜態工程特性之初步研究”，國立雲林科技大學營建工程系碩士班，碩士論文，2005.
2. 馮正一，”坡地崩塌災害之數值與試驗模擬”，坡地防災十年策略山坡地防災研討會，2015 台北.
3. 胡邵敏、王崑瑞、慮怡志等“以低壓灌漿工法解決地層下陷問題之案例研究”，第八屆大地工程學術研討會論文集，墾丁，屏東，1999.
4. 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.
5. ”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
6. 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.
7. 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.
8. DeJong, J., Mortensen, B., and Martinez, B.” Bio-Soils Interdisciplinary Science and Engineering Initiative” , NSF Final

Report for Grant #CMS-0628782, pp.85 , 2007.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Kohnhauser, K., "Introduction to Geomicrobiology. Blackwell Publishing, Malden", MA, 425. 2007.
14. Liang Cheng, Ralf Cord-Ruwisch, "In situ soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation", Ecological Engineering 42 64– 72, 2012.
15. 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.

16. Nemati, M., Voordouw, G., “Modification of porous media permeability using calcium carbonate produced enzymatically in situ”. *Enzyme Microb. Tech.* 33 (5), 635–642. 2003.
17. Van Meurs, G.A., Van der Zon, W.H., Lambert, J.W.M., Van Ree, C.C.D., Whiffin, V.S., Molendijk, W.O., “The challenge to adapt soil properties” In: Thomas, H.R. (Ed.), *Proceedings of the 5th International Congress on Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics*. Thomas Telford Ltd., Cardiff, Wales, p.1658. 2006.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.

22. Whiffin, V.S.” Microbial CaCO_3 precipitation for the production of biocement”.Ph.D thesis. Murdoch University, Perth, Western Australia,pp.154,2004.
23. 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.
24. Whitman,W.B., Coleman, D.C., Wiebe,W.J., Prokaryotes: the unseen majority.Nat. Acad. Sci. 95, 6578–6583. 1998.
25. Willem De Muyncka,b, Nele De Beliea, Willy erstraeteb,1,” Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review” 、 Ecological Engineering, Ecological Engineering 36 118 – 136.2010.

附錄

附錄一、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	是否有適用性的問題？例如，土壤種類、坡度。	MICP 工法目前尚在試驗室研究階段，未來將考量土壤種類及坡度之因子。
二	本計畫屬土壤改良，其強化深度為何？	目前尚在試驗室研究階段，土壤改良深度將於第二年度現地試驗後評估。
三	本方法降低土體滲透係數，增加之地表逕流必然造成邊坡的其他問題，如土壤充實，其他區域的崩塌，是否考量其他應用限制或條件。	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	處理面積、深度與費用關係為何？	目前尚在試驗室研究階段，土壤改良深度、面積及其經濟性將於第二年度現地試驗後評估。
五	處理後多久可以發揮效果？	目前在試驗室階段，由研究結果可以發現，B.P 菌在 3 天即可產生碳酸鈣沉澱，而將 MICP 施作在砂柱上，可以發現在 5 天齡期時，即可將無凝聚性之標準砂膠結而產生強度。
六	本計畫初步判釋 MICP 在管柱條件下，能進行礦化反應，並於土壤顆粒間成碳酸鈣晶體，是否考慮實際土壤中之透水層與孔隙之因素。	謝謝委員建議，本團隊會於第二年計畫中考量透水層之影響。
七	何謂高濃度基質？量砂柱管若為水平設置，在非壓力流條件	高濃度基質即為 MICP 反應液屬高濃度，未來進行實際土體

	下，可能導致流線集中於管內下半部，造成礦化不均勻現象，這對未來模擬實際土體可能要考慮縱、橫向流動情形。	MICP 工法時，確實要考慮縱、橫向流動情形。
八	計畫目的在於淺層土壤滑動防治，是否有對淺層滑動之負面影響？是否產生離層或影響表土之透水性而致中間流之產生。	目前尚在試驗室研究階段，尚未對淺層滑動之負面影響及是否產生離層或影響表土之透水性進行探討。
九	MICP 法適用於哪種土壤物化特性，應先界定並就目前坡地土壤之類型加以說明，以預期未來計畫之目的與價值。	謝謝委員意見，本團隊於現地試驗後將評估適用之土壤類性。
十	可能產生淺層之邊坡通常含石量高（石質土），對 MICP 法是否適用？	在文獻回顧中有提到，荷蘭科學家將 MICP 工法實施在礫石層，有良好之效果，故本研究團隊評估可適用在石質土的條件下進行土壤改良。

附錄二、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	本計畫本年度所提為第一年，未來研究方向、發展及應用性，請增列未來建議。	感謝委員意見，已將本計畫未來研究方向補充說明於第一章第三節，並將本計畫預期成果及未來應用新增至第一章第四節中。
二	工法改變其物理及化學性質，對未來植生導入發展之影響性如何？	工法主要改變土壤物理性質，對未來植生影響不大。
三	有關生物礦化工法或菌種培養利用已有成熟之資料及技術，但後續在邊坡淺層滑動之應用上似無明確之說明。	本研究計畫為三年計畫，本年度僅針對工法研擬及菌種培養為主研究，針對現地應用將於第二及第三年研究成果報告中提出。
四	應用於坡面時，是否可能影響土壤透水性、植物根系生長等。	由於生物礦化作用為利用生物代謝作用所產生之碳酸鈣沉澱填補孔隙，故對於透水性勢必會有一定的影響力，本計畫於第二年研究計畫中，將探討生物礦化作用應用於現地之可行性及其對於現地之生態影響。
五	試驗之抗壓增量試驗資料，是否可與一般土壤抗剪力強度比較，以期了解未來之應用價值。	本計畫預期於未來研究中，將試驗室之抗壓、抗剪結果做比較。
六	本研究相當新穎且具實用性。MICP 在邊坡土壤的應用方式，以點注射、攪拌或撒播方式？	本研究規劃現地以點灌方式進行邊坡改良，詳細現地施作方法擬在第二年計畫中呈現。
七	本方法是否有強度劣化問題？	MICP 工法是利用碳酸鈣沉澱進行孔隙填補，碳酸鈣為一般岩石組成物，故對強度而言是正向增加而非劣化。

八	在應用上，如增加表土抗侵蝕性，是否影響其滲透入滲問題？	謝謝委員意見，MICP 作用一定會影響土體滲透，但預估影響不大。
九	應用的可行性？與本研究題目似乎有落差。	本研究目標在於淺層土壤滑動防治，委員建議應改為土層表面沖刷防治較貼切，研究團隊深切認同建議。