

# 生物礦化工法防治邊坡 土壤滑動可行性探討(1)

FEASIBILITY OF SHALLOW LAYER LANDSLIDES PREVENTION  
AND CONTROL USING BIOLOGICAL MINERALIZATION METHOD(1)

計畫主持人：陳豪吉 教授  
計畫執行機關：國立中興大學 土木工程學系  
簡報日期：107/08/21

# 簡報內容

---

1. 緒論
2. 文獻回顧
3. 研究方法及步驟
4. 成果說明與討論
5. 結論



# 緒論

# 計畫背景及動機

---

- 近年來因全球氣候變遷所造成之災害與時俱增，其中自然邊坡土石滑動災害，普遍屬於**大範圍災害**。
- 對於自然邊坡穩定之工作，常用土**釘工法**、**止滑樁**、**灌漿工法**、**化學穩定工法**、**離子交換工法**等工程技術，進行邊坡土壤之改良、加勁等工作，達防治土石滑動之效果。
- 由於上述治理工法多為物理性、化學性、或機械性工法，但基於對環境友善，以**生物科技作為改善工法**，近年已在各類工程領域受到廣泛重視與研究。

# 計畫目的

---

- 本研究計畫為以**生物礦化 MICP**(Microbial-induced calcium carbonate precipitation)工法，即微生物誘導碳酸鈣結晶，應用作為土壤滑動防治之工法。
- MICP工法應用於土壤滑動防治工作，可使鬆散的土**體結構膠結**成具有力學性質的土體，也可保有土體原有的不擾動性。

# 計畫目標

---

- 本年度研究目標主要為MICP工法對土壤固結效果與防止邊坡滑動效益初步評估。研究項目分述如下：
  - 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如細菌及營養液濃度等。
  - 以砂土管柱進行MICP研究，模擬一個滴灌方式之生物灌漿法，進行MICP試驗。初步確定MICP是否為土壤穩固之原動力。



# 文獻回顧

# 微生物性誘導碳酸鈣沉積(MICP)作用

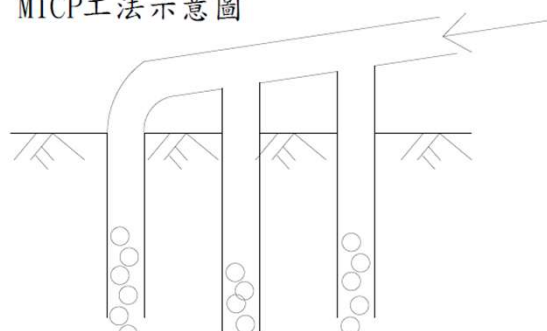
- MICP是利用微生物反應過程來產生碳酸鈣。此類微生物中，針對 *Bacillus pasteurii* 的研究最為深入。
- *Bacillus pasteurii* 菌（或稱為 *Sporosarcina pasteurii* DSM33），為革蘭氏陽性好氧細菌，普遍存在於土壤與水中，能產生大量的細胞內尿素酶，尿素酶可催化尿素之水解，產生氨離子與碳酸根離子，形成碳酸鈣。
- MICP工法之反應方程式：
  - $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{CO}_3^{2-}$
  - $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow$



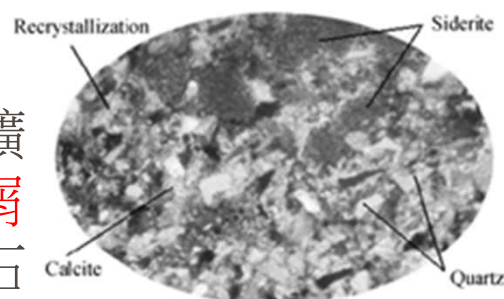
# 微生物誘導碳酸鈣沉澱之應用

- 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)
  - 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**
  - 古建築文物的**修復**研究

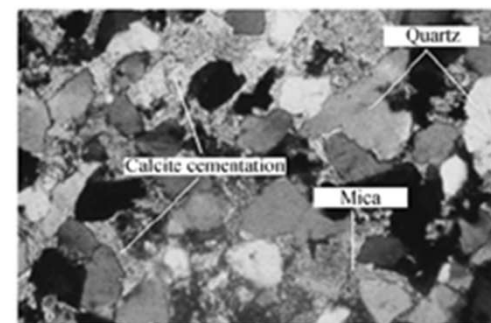
MICP工法示意圖



自然界中微生物礦化方解石**膠結**碎屑物質而形成的岩石



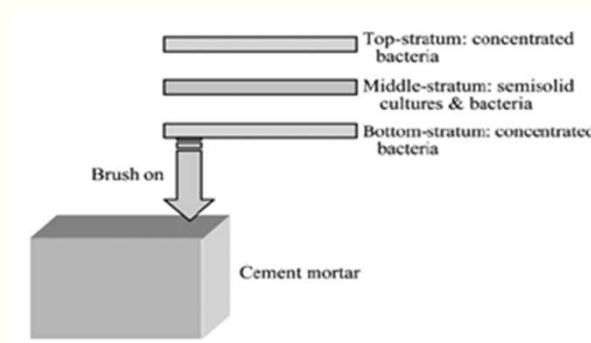
(a)



(b)

# 微生物誘導碳酸鈣沉澱之應用

- 降低材料之滲透性
  - 文獻(Ruixing et al., 2010) , 將具有一定黏度的細菌塗抹於水泥砂漿試體表面上, 再進行吸水率試驗。
  - 文獻(Hill et al., 2002) , 將微生物及培養基接種到砂土等高滲透性材料中, 可因礦化沉積而導致其滲透係數下降。



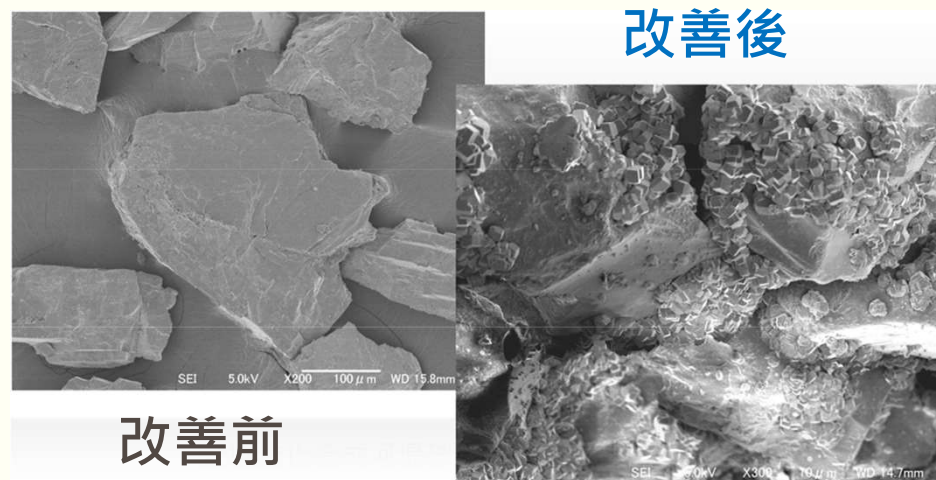
# MICP工法應用在邊坡土體固結作用

---

- 可直接**增加土壤剪力強度**，達到控制邊坡淺層土壤滑動災害之目的。
- 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。
- 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。

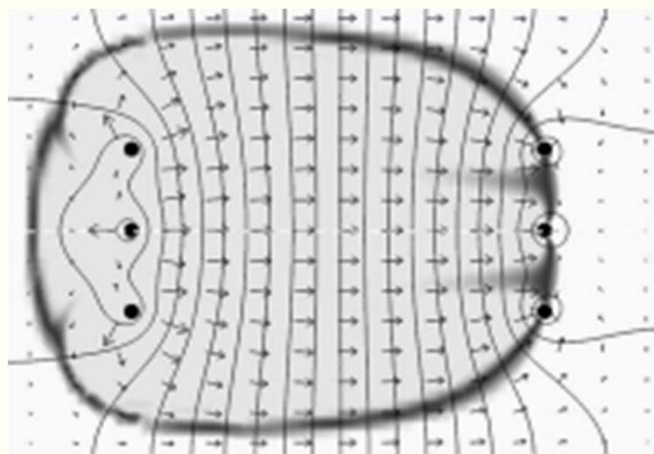
# MICP工法應用實例(1/4)

- 2011日本大地震，統計超過2000條河堤遭到破壞，問題出在防洪堤本身地基土壤液化為最大損害。
- 日本學者岡村未対(Mitsu Okamura)與安原英明(Hideaki Yasuhara)，針對土壤強化，提出新型MICP灌漿技術。
- 費用昂貴(本研究團隊已找出大量且經濟之MICP技術)



## 應用實例(2/4)

- 德國 Leon A. van Paassen et al. (2010) 在實驗室進行大規模 (112立方公尺) 的砂粒固結試驗，由圖中可發現可以發現砂粒成功的膠結成塊。



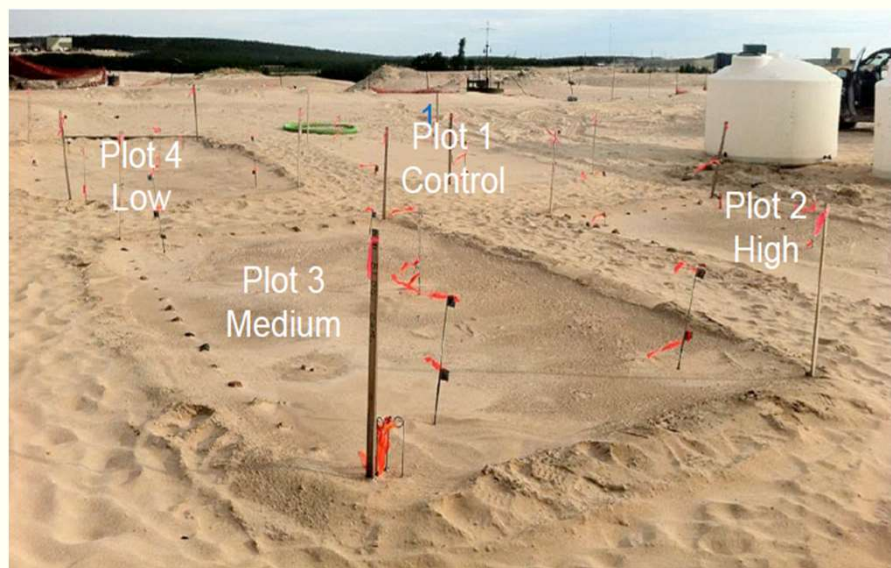
實驗裝置圖





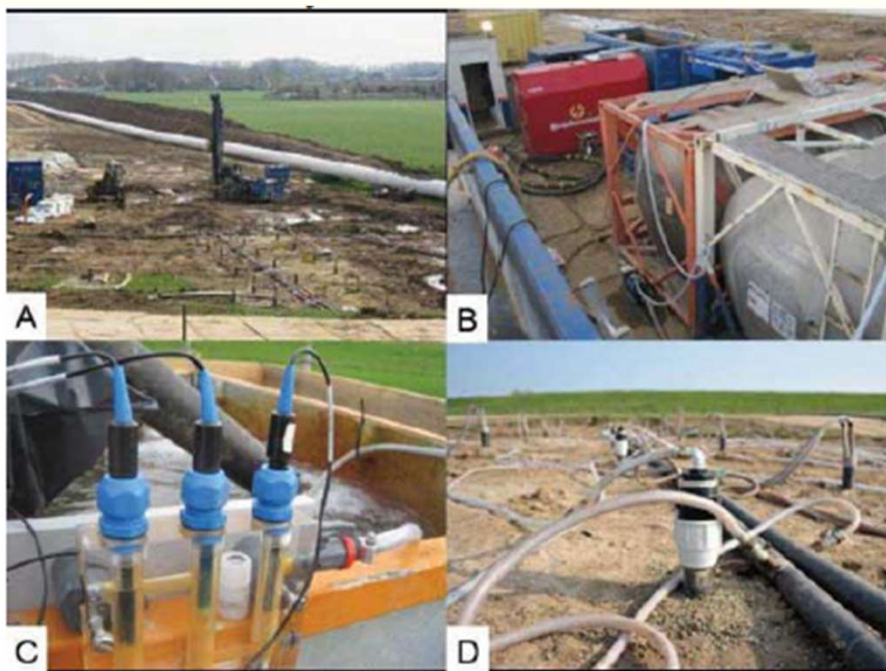
## 應用實例(3/4)

- 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，發現MICP工法確實可強化沙灘達固灘及防蝕之目的。



## 應用實例(4/4)

- W.R.L. van der Star(2011)荷蘭在礫石層實施現地之生物礦化技術，進而提高礫石之穩定性。



- 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

# 工法選擇—MICP工法

---

- 1970年初生物地質學家發現一些無害細菌可礦化土壤，將散沙膠結成岩，其行為如同珊瑚礁的形成，但人工化可將數十年反應於數周內完成，即微生物誘導碳酸鈣結晶(MICP)。
- MICP是近10年來土木材料領域研發最熱門的冷結新技術，為低耗能、友善地球之工法，國際間2005年起應用此工法於改善土壤力學性質之研究。



# 工法選擇—MICP工法

---

## ■ 生態性考量

1. 傳統工法對自然環境之友善性條件不足、施工條件受限制，使用材料在製造過程及施工機具與動力能源等均對自然環境造成輕重不一之衝擊。
2. 本研究研擬一真正貼近自然之生態工法，以改善這些問題。

# 工法選擇—MICP工法

---

## ■ 便利性考量

1. MICP工法，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。
2. 將考慮現場土壤狀況進行機具之佈設及鑽孔，過程不需使用到大型機具，不需耗費大量人力。
3. 對於極為陡峭險峻之地形條件，不須大型假設工程如施工便道、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。

# 工法選擇—MICP工法

---

## ■ 耐久性考量

1. MICP工法對土壤液化防治所需菌液濃度，可隨土壤強化需求條件而定，亦可進行**長時間之滴灌強化土壤**。
2. 碳酸鈣沉積物似岩石般具**極佳耐久性**，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。
3. 地表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**。



# 研究方法及步驟



# MICP砂柱滲流實驗

# 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，首先在生物試驗室進行**菌株培養**。



菌種製作流程→

# 砂柱滲流實驗前置作業

## ■ 砂柱裝置

- 砂柱採用自行製作之玻璃管，高度22cm、內徑7cm，為避免礦化不均勻現象，故本實驗砂柱管採直立方式設置。砂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。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。



# 砂柱滲流實驗檢測項目

---

1. 菌液濃度之吸光密度檢測 (Optical density ,  $OD_{600}$  )
2. 尿素酶活性(Urease Activity)
3. 銨根離子濃度測試(Ammonium Concentration)
4. 鈣離子濃度 (Calcium concentration)
5. 碳酸鈣生成量測試( Calcium carbonate Content)

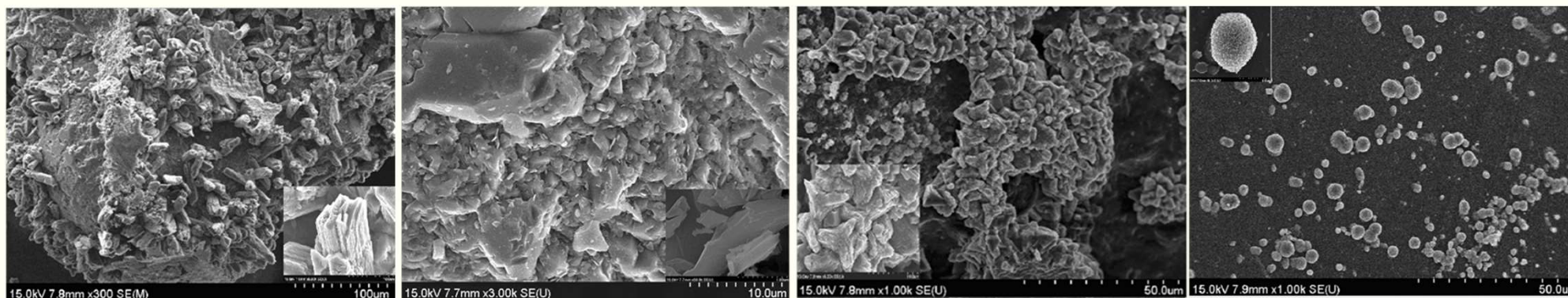


# 菌液濃度與尿素酶活性

---

- 本實驗目的為了解細菌在MICP作用之機理，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。
- 試驗結果顯示，當砂柱經300 ml菌液滴灌後，馬上再以300 ml  $\text{CaCl}_2$  溶液滴灌進行固定作用，發現此工序可將大比例之菌液停留在砂柱中。

# 電子顯微鏡SEM



砂柱頂端

砂柱中間

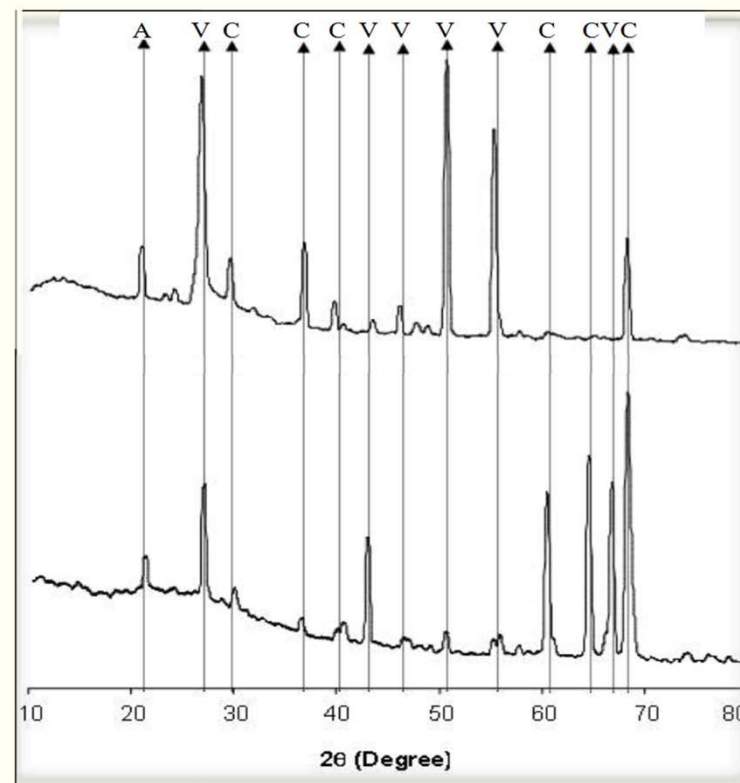
砂柱最頂端

砂柱底端

- 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 $\text{CaCO}_3$ 結晶。基本上整個砂柱之 $\text{CaCO}_3$ 結晶有隨著砂柱之深度增加而減少之趨勢，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。

# XRD試験

- *Bacillus pasteurii*菌所得 $\text{CaCO}_3$ 中，主要為方解石(Calcite)、少量霏石(Veterite)和極少量之文石(Algonite)。霏石是 $\text{CaCO}_3$ 次穩態礦物。
- XRD試驗之觀測結果證明了MICP確實在砂柱中產得 $\text{CaCO}_3$ 。



C : Calcite  
V : Veterite  
A : Algonite

# 生物礦化試驗結果分析

---

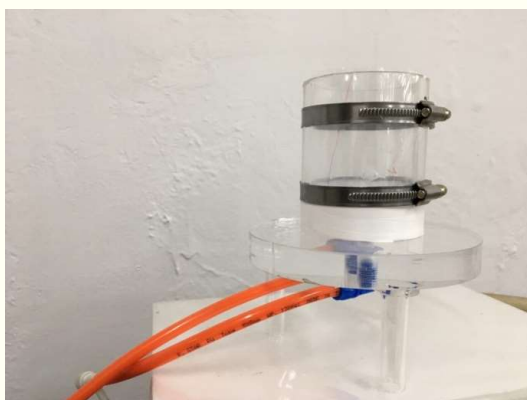
- 本研究實驗發現在MICP反應過程，確實如相關學術文獻所提，**Bacillus pasteurii**菌對於鈣離子轉換具有相當**效率**，並成功長成碳酸鈣晶體，故可初步判釋MICP在管柱條件下(模擬淺層邊坡土壤)**確實能進行礦化反應**，並可於砂土顆粒之間長成碳酸鈣晶體。
- 長出之碳酸鈣晶體是否能對土壤顆粒起膠結作用，達提升土壤剪力強度等重要工程參數，將接續於下一實驗了解之。



# MICP砂、土柱抗壓實驗

# 砂、土柱抗壓實驗前置作業

- 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，將各相對密度所對應之砂或土壤重填入模具中。試體製作完成後即可開始製造MICP之環境，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。





# 抗壓試驗變化參數

| 重模試體土樣 | 孔隙比(%)      | 滴灌時間(天)      |
|--------|-------------|--------------|
| 標準砂    | 40%、60%、80% | 0、5、15、30、60 |
| 高屏溪土壤  | 28%         | 7、14、28      |



# MICP砂、土柱抗壓實驗結果



# 抗壓試驗-標準砂重模試體(1/2)

- 由照片可以看出，**無凝聚之標準砂試體**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**



相對密度 40%



相對密度 60%



相對密度 80%

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%

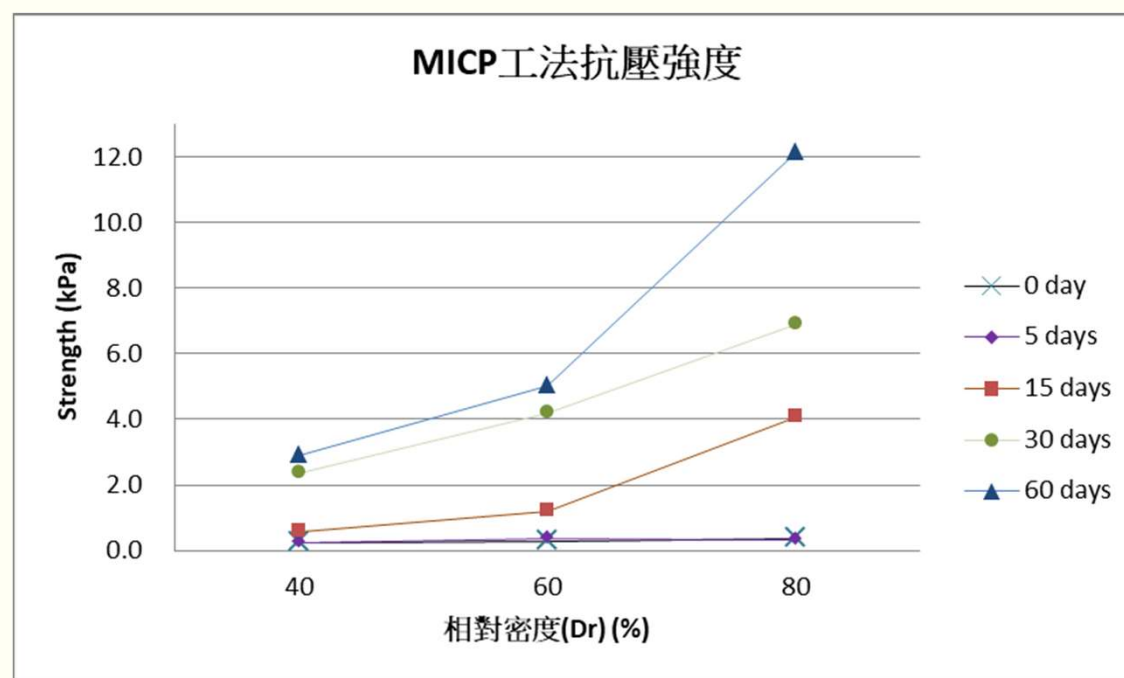


相對密度 80%

標準砂抗壓試體5天齡期之抗壓試驗

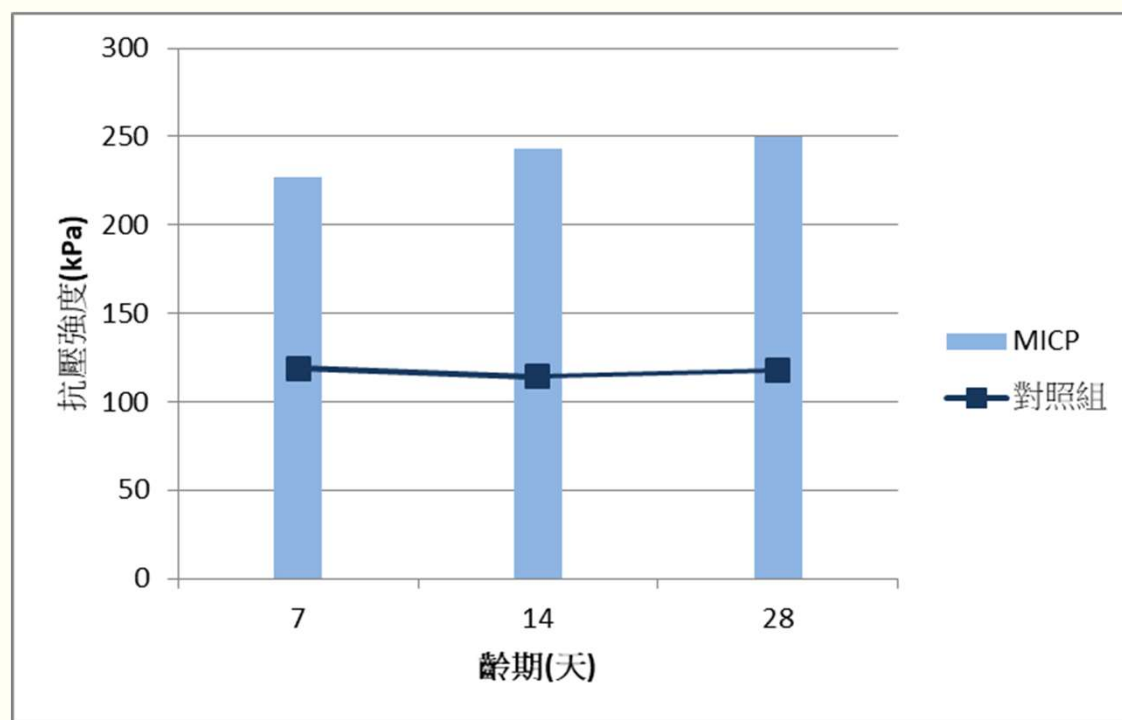
## 抗壓試驗-標準砂重模試體(2/2)

- 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。



## 抗壓試驗-土壤重模試體

- 土壤抗壓試驗之重模試體經MICP作用，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。





# 綜合評估

## 結論(1/2)


---

- 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。
- 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

## 結論(2/2)

---

- 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。**
- 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。**



感謝聆聽  
敬請指教