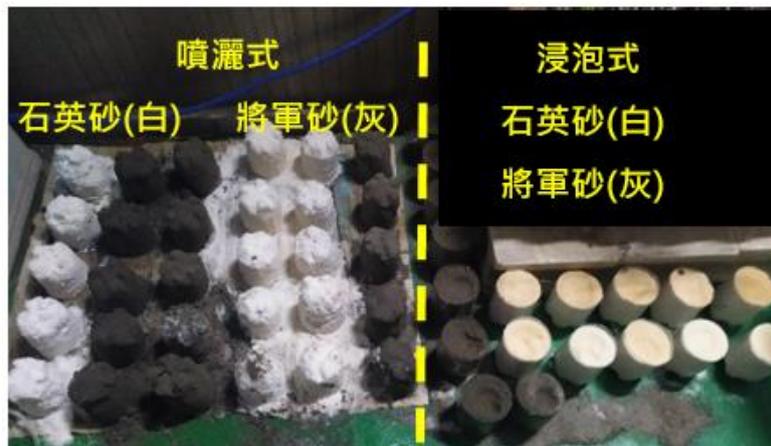


# 111 年度高級中等學校綠色化學創意競賽 成果報告書

組別（編號）：普通型高級中等學校組（**H067**）

作品名稱：生物礦化技術應用於沙雕製作之可行性研究

關鍵詞：**Bacillus pasteurii** (巴氏芽胞桿菌)、生物礦化工法 (MICP)、沙雕、PVAc



# 目錄

摘要.....	1
壹、研究動機.....	1
貳、研究目的.....	2
參、研究設備及器材.....	2
肆、研究過程或方法.....	3
伍、研究結果.....	7
陸、討論.....	13
柒、結論.....	15
捌、參考資料及其他.....	16

## 圖目錄

圖(一) 浸泡式與噴灑式簡易沙雕雛型製作流程示意圖.....	5
圖(二) 抗風雨能力檢測示意圖.....	6
圖(三) 鈣化物沉積情況.....	7
圖(四) 沙雕實驗成果.....	8
圖(五) 噴灑式生物礦化工法沙雕耐雨能力比較圖.....	10
圖(六) 浸泡式生物礦化工法沙雕耐雨能力比較圖.....	10
圖(七) 傳統沙雕製作工法沙雕耐雨能力比較圖.....	11
圖(八) 噴灑式生物礦化工法沙雕抗風雨能力比較圖.....	12
圖(九) 浸泡式生物礦化工法沙雕抗風雨能力比較圖.....	12
圖(十) 傳統沙雕製作工法沙雕抗風雨能力比較圖.....	13
圖(十一) 菌液濃度變化曲線圖.....	13
圖(十二) 不同製作工法耐雨能力比較圖.....	14
圖(十三) 不同製作工法抗風雨能力比較圖.....	14

## 表目錄

(表一) 不同方法沙雕抗風能力檢測結果.....	9
(表二) 不同方法沙雕耐雨能力檢測結果.....	9
(表三) 不同方法沙雕抗風雨能力檢測結果 (11.25m/s 六級風).....	12

## 摘要

本研究主要利用生物礦化工法來進行實驗，其主要原理是利用巴氏芽孢桿菌在進行尿素水解過程時，會產生二氧化碳分子，而此二氧化碳分子再與環境中的鈣離子結合，形成碳酸鈣沉澱，本研究得到的實驗結果有以下幾點：

1. 進行抗風能力測試時，大部分的實驗組皆可通過 4~6 級風的檢測，但利用浸泡方式培養 3 天的沙雕在 6 級風的檢測時，出現些微裂縫。
2. 進行耐雨能力測試時，石英砂所製成的沙雕可承受降水強度較將軍砂得佳；利用噴灑式培養的沙雕與傳統的沙雕可承受降水強度接近，且遠比浸泡式來得好。
3. 進行抗風雨能力測試時，整體結果與耐雨能力測試時接近，但受到風的影響，其可承受的降水強度略有下降。
4. 噴灑式較有可能取代傳統的沙雕製程方式。

## 壹、研究動機

2018 年福隆國際沙雕節時，一項環境汙染問題浮上檯面。

『不要讓自己的創作，成為海洋污染的推手！』

原來是沙雕創造過程中，會利用接著劑-南寶樹脂 NP300 來將沙雕固化，此接著劑是否無毒？對自然環境、人體是否有害？是否環保？是否可生物分解？等等議題引起大眾的注意。有民眾在活動結束後，發現沙灘上殘留者許多具有黏性的沙子，且經國外沙雕團體以目測判斷，亦認為此次沙雕展所使用之接著劑，即我們俗稱的白膠並非生物可分解的。因此我們在想，是否有能夠取代接著劑的沙雕創作方式，且對環境是更友善的呢？

某次課堂上，生物老師跟我們分享到了近年來在土木工程及環境工程領域非常熱門的新技術-微生物誘導碳酸鈣沉澱(Microbial-induced carbonate precipitation, 簡稱 MICP)技術，此技術是利用微生物加速成岩作用，進而使砂土結晶固化的一種新技術，目前此技術已應用於混凝土的裂縫修復領域、土壤液化防治領域等，而我們同時也在網路上有看到部分學者認為此技術也具有安定沙塵之能力，因此我們推斷此微生物亦具有將沙雕膠結固化之能力，所以決定進行此項實驗，以研究利用 MICP 工法製作沙雕取代利用 PVAc 製作沙雕的可行性。

## 貳、研究目的

本研究主要運用微生物誘導碳酸鈣沉澱法 (MICP)，將 *Bacillus pasteurii* (巴氏芽胞桿菌) 進行了對砂子膠結固化的研究，主要進行四大研究，分別為鈣化生成能力之觀察、與砂混合進行生物礦化實驗、比較沙雕抗風與能力與菌種於過程中的生長情形。

- 一、將 *Bacillus pasteurii* (巴氏芽胞桿菌) 置於含有其所需養分的培養基內，並給予生物礦化工法所需之鈣液，觀察其產生鈣化生成物之能力。
- 二、運用 *Bacillus pasteurii* (巴氏芽胞桿菌) 具有使砂子膠結固化的能力，將巴氏芽胞桿菌與砂混合，並進行生物礦化實驗，同時預期能做出一座穩固的沙雕。
- 三、比較利用微生物誘導碳酸鈣沉澱法 (MICP) 及利用聚醋酸乙烯酯 (PVAc) 所製成的沙雕的抗風雨能力，並評估使用 MICP 取代 PVAc 的可行性。
- 四、研究 *Bacillus pasteurii* (巴氏芽胞桿菌) 菌液在此實驗進行過程中的濃度變化。

## 參、研究設備及器材

### 一、研究設備

(一) 風模擬實驗	風扇、風速計(Tenmars TM4001)
(二) 雨模擬實驗	灑水器、雨量筒(恆準科技 MIT-RG16022)
(三) 微生物相關實驗	分光光度計、微量吸管、微量吸管尖、恆溫培養箱
(四) 其他設備	試管、試管架、注射器、噴霧罐、pH meter、醫用手套

### 二、研究材料

(一) 菌種	<i>Bacillus pasteurii</i> (巴氏芽胞桿菌)
(二) 砂土	石英砂、七股將軍地區沿岸砂
(三) 培養基 (每公升)	Beef extract 3g、Peptone 5g、Urea 50g
(四) 鈣源、PVAc 來源	0.1M 氯化鈣水溶液、南寶樹脂 NP3670



分光光度計 (INESA 722N)



恆溫培養箱



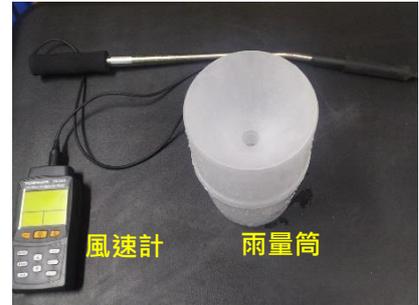
風雨實驗裝置圖



培養設備



其他實驗設備



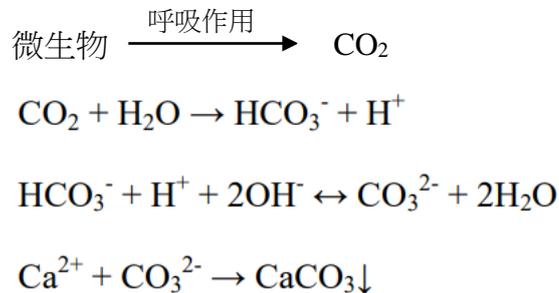
風速計及雨量筒

## 肆、研究過程或方法

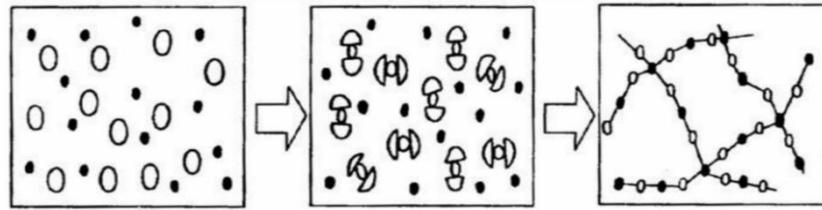
### 一、文獻探討

微生物誘導碳酸鈣沉澱法(MICP)是一種根據微生物的活性，在其進行呼吸作用時產生CO<sub>2</sub>，進而轉變成為碳酸根離子，然後在Ca<sup>2+</sup>充足的環境條件下，自然而然發生碳酸鈣沉澱。

其主要的化學反應式如下：



這碳酸鈣沉澱，若是運用在有縫隙的混凝土中，可以像是模仿生物組織對受創傷部位自動分泌某種物質，而使創傷部位得到癒合的機能。其機制示意如下圖所示。此方法稱為仿生自癒合法，是常見的對環境友善的裂縫修補方法之一。



2007 年荷蘭的微生物學家(Hendrik Marius Jonkers)發明了「可自我修復的水泥(self-healing concrete)」。Jonkers 發現在石灰石內存在著嗜鹼芽孢桿菌(*Bacillus pseudofirmus*)和巴氏芽孢桿菌(*Sporosarcina pasteurii*)，將菌種和牠們的食物(乳酸鈣 Calcium lactate)和水泥混合後，發現不僅有自癒的效果且可以存活約 200 年之久。

商業化的產品「Basilisk 自癒水泥」，是由台夫特理工大學研發，其自我修復功能是源自於一種會產生石灰石的細菌。當這種細菌接觸到水和氧氣時，就會將這些養分轉化為碳酸鈣(石灰石)並修補裂縫。其修復過程的步驟如下：



圖片截至荷蘭 Basilisk 自我修復混凝土-修復過程示意動畫 <https://youtu.be/6KsU9eBBaX4>

MICP 主要是利用微生物加速成岩作用，進而使砂、土結晶固化的一種新興技術。例如使用微生物巴斯德孢子菌(*Sporosarcina pasteurii*)，可以應用於抑制海岸侵蝕；使用 *Sporosarcina pasteurii* 細菌，黑糖水作為培養基，可用來防治河砂揚塵；使用 *Bacillus pasteurii* 細菌，其為土壤中常見的無害的革蘭氏陽性好氧細菌，能產生高量的細胞內尿素酶(urease)。尿素酶催化尿素之水解，產生二氧化碳、氨離子、與氫氧根離子，進而與環境中的鈣離子結合形成碳酸鈣，可運用於邊坡淺層土壤滑動防治。

而台灣近幾年在海灘的砂雕展示，創作者一般普遍使用大量合成聚合物聚醋酸乙烯酯(Polyvinyl acetate, PVAc)，其最後殘留在沙灘中可能無法自然分解，對於海洋環境是不友善的。

綜合一些文獻探討，因此我們採用 *Bacillus pasteurii* (巴氏芽孢桿菌)，與石英砂、家鄉附近七股將軍地區沿岸砂來進行 MICP 工法，研究對於自製簡易砂雕雛型的固化作用，希望可以取代現行使用之 PVAc。

## 二、實驗基本操作步驟

### (一) 鈣化物沉積實驗

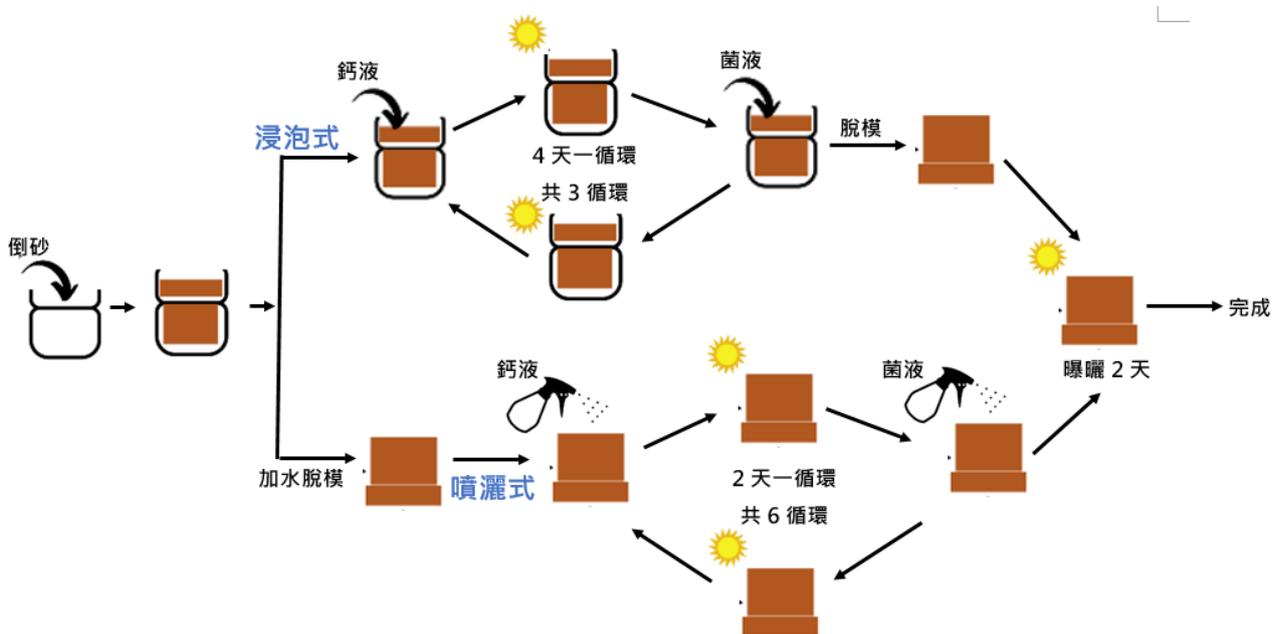
1. 在一試管內置入少許砂石作為鈣化物附著源。注入菌液。
2. 將此試管置於恆溫培養箱中，並觀察。

### (二) 浸泡式生物礦化工法製作沙雕實驗

1. 在寶特瓶模具中裝滿石英砂或將軍砂，用杯子底部壓平。
2. 依照以下順序在模具中輪流浸泡氯化鈣液以及菌液：
  - (1) 倒入 25mL 鈣液，使砂子浸泡在氯化鈣液中。自然晾乾一天。
  - (2) 再倒入 25 mL 菌液，使砂子浸泡在菌液中。自然晾乾一天。
3. 4 天一循環，共做 3 個循環，於第 3 次循環浸泡後靜置於陰影處，進行後續實驗。

### (三) 噴灑式生物礦化工法製作沙雕實驗

1. 在寶特瓶模具中裝滿石英砂或將軍砂，用杯子底部壓平，注入 25 mL 自來水。
2. 等待水自然流入模具瓶底，約 1-2 分鐘，即可將模具倒放脫模，即為砂雕雛型。
3. 依照以下順序在脫磨砂雕雛型，輪流噴灑氯化鈣液以及菌液：
  - (1) 用噴霧器按壓 3 次，噴灑 10 mL 氯化鈣液。自然晾乾半天。
  - (2) 再用噴霧器按壓 3 次，噴灑 10 mL 菌液。自然晾乾半天。
4. 2 天一循環，共做 6 個循環，於第 6 次循環培養後靜置於陰影處，進行後續實驗。



圖(一) 浸泡式與噴灑式簡易沙雕雛型製作流程示意圖

#### (四) 傳統沙雕製作工法製作沙雕實驗

1. 將 300g 石英砂或將軍砂與 250g PVAc 以攪拌棒攪拌 3 分鐘，使其充分混合。
2. 將此混合物置入模具中，使其重力沉澱，靜置 1 小時。
3. 用刀片將模具割開，脫模後並靜置於空氣中 12 小時，並等待進行後續實驗。

#### (五) 抗風雨能力檢測

##### 1. 抗風能力實驗

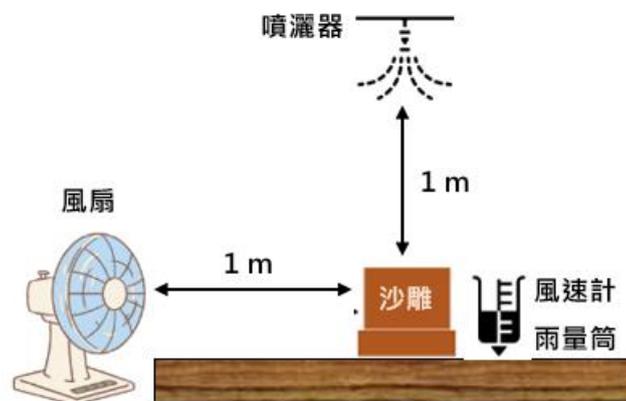
- (1) 將沙雕置於距離風扇 1 公尺的水平位置上。於沙雕旁放置風速計。
- (2) 進行 3 種不同風速的風速檢測各 120 秒。
- (3) 於風速檢測的過程中觀察沙雕的變化並記錄。

##### 2. 耐雨能力實驗

- (1) 將沙雕置於灑水器下方 1 公尺的位置上。於沙雕旁放置雨量筒。
- (2) 進行降雨測試。
- (3) 於檢測的結束後紀錄沙雕於幾秒時被完全摧毀，並記錄當下雨量筒所測得的水量。

##### 3. 抗風雨能力實驗

- (1) 將沙雕置於同時具有風扇及灑水器的位置上。在沙雕旁放置雨量筒及風速計。
- (2) 進行抗風雨能力測試。
- (3) 於檢測的結束後紀錄沙雕於幾秒時被完全摧毀，並記錄當下雨量級風速。



圖(二) 抗風雨能力檢測示意圖

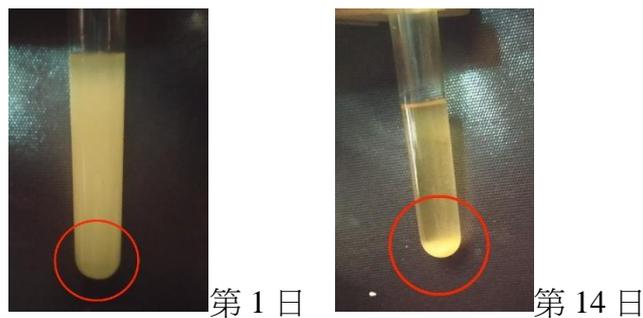
#### (六) 菌液濃度變化觀察實驗

1. 於每日同一時間自水槽中取出菌液，倒入試管密封，再放入冰箱冷凍保存，留做 OD600 實驗。
2. 於沙雕製作結束時，運用分光光度計做 OD600 分析實驗。

## 伍、研究結果

### 一、鈣化物沉積實驗

本實驗項目的主要目的為驗證此菌株具有能夠產生鈣化反應，因此我們在試管中加入了菌液及鈣液並放入了部分砂石作為固化附著源，由圖(三)鈣化物沉積情形，在實驗一開始時，我們可以看到菌液是相對混濁(圖(三)左)，且底部僅有我們提供的砂石附著源，而在實驗進行 14 天後(圖(三)右)，我們可以看到底部具有少部分的白色沉澱物，根據文獻中所述，我們斷定此為碳酸鈣沉積，因此本實驗驗證成功。



圖(三) 鈣化物沉積情況

### 二、各工法製作沙雕實驗

#### (一) 浸泡式生物礦化工法製作沙雕實驗

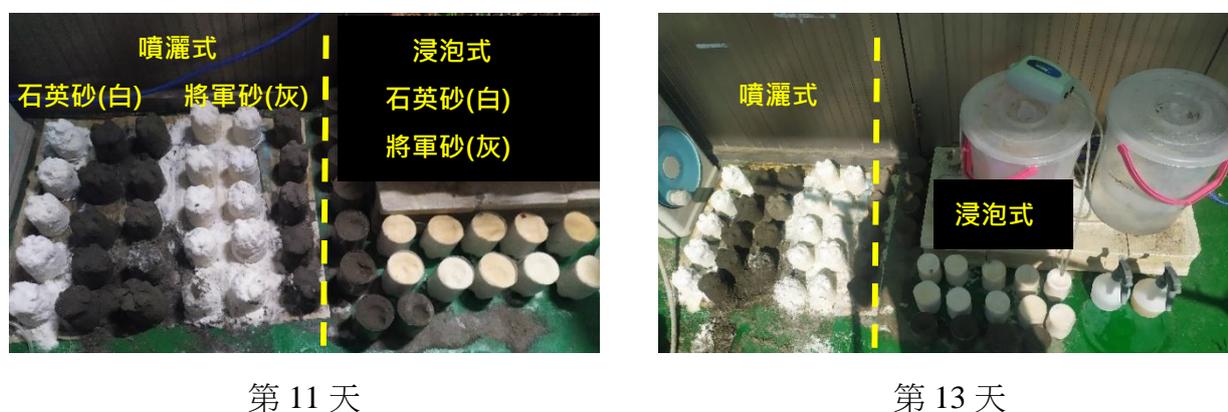
在此實驗項目中，我們並未事先將砂土取出模具，而是直接與模具中輪流注入鈣液及菌液，也因此本實驗的液體注入後所需的曬乾時間也較長，實驗循環週期也較長，但在實驗結束後，我們發現按照推測中，此方法所產生的生物礦化作用應該較佳，但結果為因為其長期浸泡於液體中，因此就算曝曬 2 天，還是無法將其曝曬乾，所以在實驗結束後，其亦是處於一個濕潤的狀態，也因此較為軟而不堅固。

#### (二) 噴灑式生物礦化工法製作沙雕實驗

在本實驗項目中，我們是先將砂土置入模具中，於模具中加入水後，使砂土間的附著力增加，方便我們先進行脫模。脫模後，我們使用噴灑器輪流噴灑鈣液與菌液，由於本實驗是暴露於陽光下進行，因此沙雕曬乾比較快完成，因此實驗循環週期比較短，才能讓本實驗的沙雕能夠處於濕潤的狀態，以達到有在進行生物礦化作用的狀態。而在實驗結束後，我們發現此方法所得之結果，表面鈣化作用痕跡明顯，且亦較為堅固。

### (三) 傳統沙雕製作工法製作沙雕實驗

在此實驗項目中，我們先將砂土與 PVAc 充分混合後，再置入模具中定型，但我們發現，如果只將此混合物放置於模具中是無法定型的，因此我們將此系列的沙雕，取出後置於環境中進行固化，而實驗結果為其表面會產生一層膜，而此層膜也是使其堅固的原因，而在此層膜下，依舊是十分的軟爛。



圖(四) 沙雕實驗成果

### 三、抗風雨能力檢測

#### (一) 抗風能力實驗

沙雕在三種不同製作方法與在不同級風速的抗風能力整理於(表一)，V 代表通過風速測試。我們可以得知，噴灑式的沙雕模型，其抗風能力皆具有可抵抗 6 級風的能力，其抗風能力是十分優良的；而由下表(5.2)的實驗數據中我們可以得知，浸泡式的沙雕模型，於 14 天的模型中，其抗風能力可達到抵抗 6 級的能力，而在 7 天的模型中，其抗風能力在 5 級前皆優良，但在抵抗 6 級風的測試中，兩組模型皆產生了少許裂縫，但依舊是在可接受範圍內；最後由下表(5.3)的實驗數據中我們可以得知，傳統工法的沙雕模型，其抗風能力能夠達到 6 級，與噴灑式的沙雕模型相當。

(表一) 不同方法沙雕抗風能力檢測結果

沙雕製作方法	天數	砂種	7.65m/s (四級風)	9.35m/s (五級風)	11.25m/s (六級風)
噴灑式 生物礦化工法	3天	石英砂	V	V	V
		將軍砂	V	V	V
	7天	石英砂	V	V	V
		將軍砂	V	V	V
	14天	石英砂	V	V	V
		將軍砂	V	V	V
浸泡式 生物礦化工法	7天	石英砂	V	V	V(些微裂縫)
		將軍砂	V	V	V(些微裂縫)
	14天	石英砂	V	V	V
		將軍砂	V	V	V
傳統 製作工法	石英砂		V	V	V
	將軍砂		V	V	V

## (二) 耐雨能力實驗

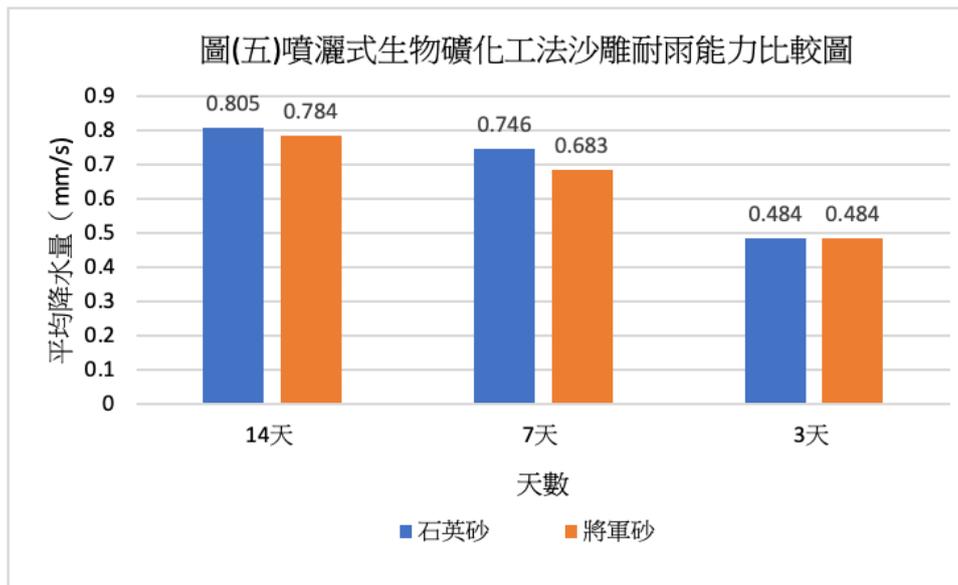
沙雕在三種不同製作方法耐雨能力整理於(表二)。不同天數下的沙雕製作方式其每秒降水量的關係圖整理於圖(五)~圖(七)。

(表二) 不同方法沙雕耐雨能力檢測結果

沙雕製作方法	天數	砂種	坍塌時秒數 (s)	累積降水量 (mm)	每秒降水量 (mm/s)
噴灑式 生物礦化工法	3天	石英砂	31	15	0.484
		將軍砂	27	13	0.484
	7天	石英砂	67	50	0.746
		將軍砂	63	53	0.683
	14天	石英砂	77	62	0.805
		將軍砂	51	40	0.784
浸泡式 生物礦化工法	7天	石英砂	9	4	0.445
		將軍砂	6	2	0.333
	14天	石英砂	10	4	0.484
		將軍砂	7	3	0.483
傳統 製作工法	石英砂		78	65	0.833
	將軍砂		60	45	0.75

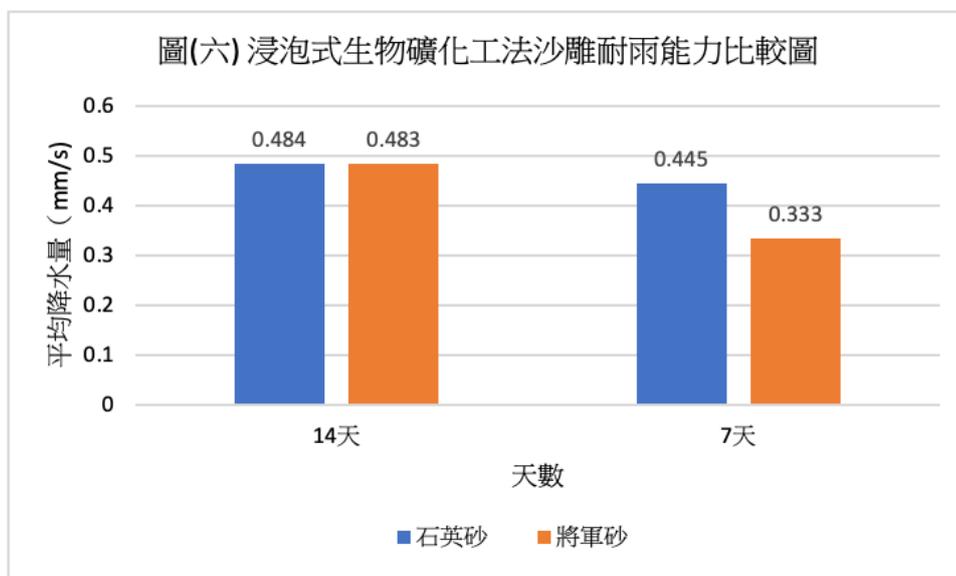
表中的累積降水量由雨量筒讀取，經由沙雕坍塌的時間計算出沙雕可以耐雨的每秒降水量。採分則說明：

## 1. 噴灑式生物礦化工法沙雕耐雨能力檢測結果



由實驗數據中我們可以得知，噴灑式的沙雕模型，其耐雨能力受到培養天數的影響，逐漸地銳減，而在將軍砂及石英砂兩種不同砂種的結果中，我們可以發現石英砂所製成的沙雕的耐雨能力，皆較將軍砂所製成的沙雕的耐雨能力佳，而在 3 天的模型中，非常恰好的兩實驗組所受到的每秒降雨量皆為 0.484mm/s，而得到的結果為石英砂未坍塌的時間較久，此結果也再次佐證了石英砂沙雕的耐雨能力較將軍砂的佳。

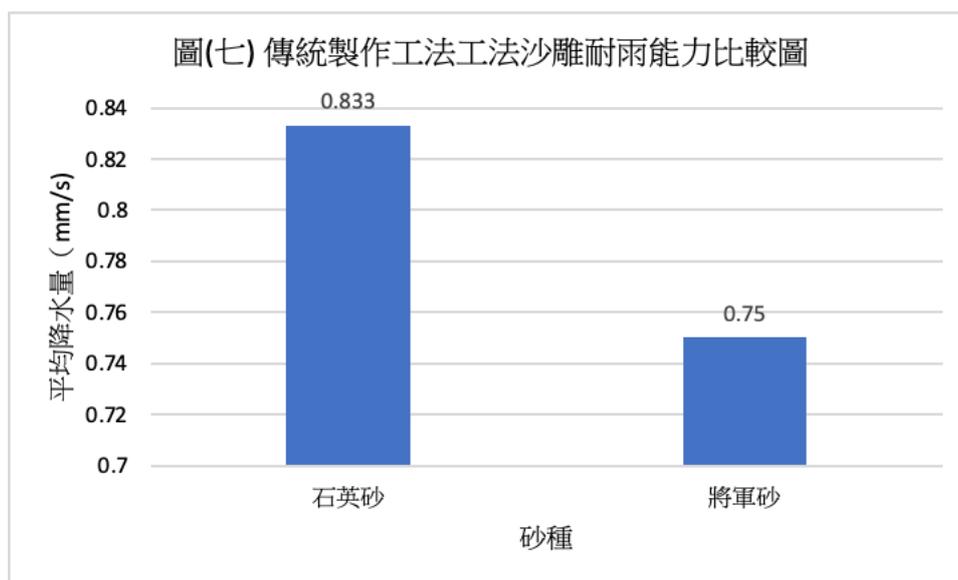
## 2. 浸泡式生物礦化工法沙雕耐雨能力檢測結果



由實驗數據中我們可以得知，浸泡式的沙雕模型，其耐雨能力亦受到培養天數的影響而逐漸銳減，而也因為先前提過的其沙雕較為軟爛，因此耐雨能力極差。最好的沙雕模型為培

養 14 天的石英砂模型，可以耐雨 10 秒，所受的降水量為 4mm，每秒降水量 0.484mm/s，而最差的沙雕模型 6 秒，所受的降雨量為 2mm，每秒降水量 0.333mm/s。

### 3. 傳統製作工法沙雕耐雨能力檢測結果



由實驗數據我們可以得知，依傳統工法所製作的沙雕模型，其耐雨能力受到 PVAc 膠在其表層凝固產生的透明膜的影響，耐雨能力十分優良，不過其透明模下的砂土並未因此而凝固，導致其耐雨能力並未特別地突出。

#### (三) 抗風雨能力實驗

沙雕在三種不同製作方法抗風雨能力整理於(表三)。不同天數下的沙雕製作方式其每秒降水量的關係圖整理於圖(五)~圖(七)。

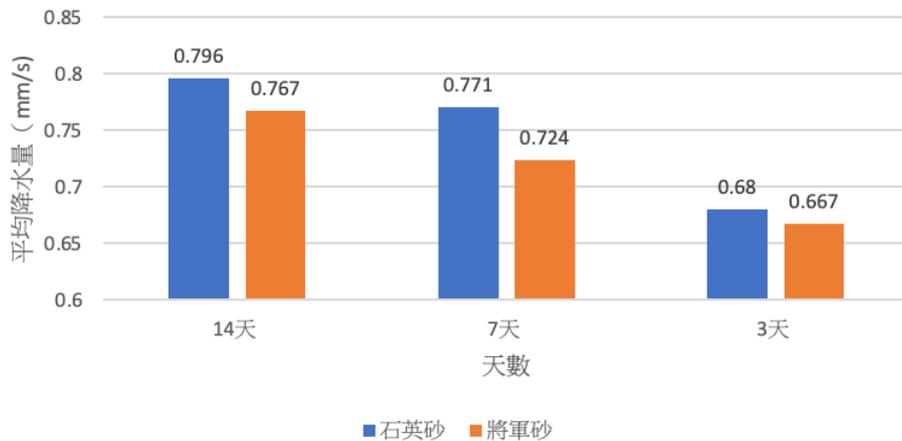
抗風雨實驗，顧名思義是同時進行抗風與耐雨的實驗。在此實驗中，由於在抗風試驗中，我們發現在六級風時才會對模型產生少部分影響，因此我們直接使用六級風來作為此項實驗的風速。沙雕在在六級風下三種不同製作方法抗風雨能力整理於(表三)。不同天數，每秒降水量的關係圖整理於圖(八)~圖(十)。

從實驗數據中，我們得到的結果是所有風雨實驗組坍塌的時間皆較純耐雨的實驗組短，且所受到的降雨量皆較少；但是相同的是石英砂所展現出的抗風雨能力皆較佳；而整體的抗風雨能力是噴灑式 > 傳統工法 > 浸泡式。

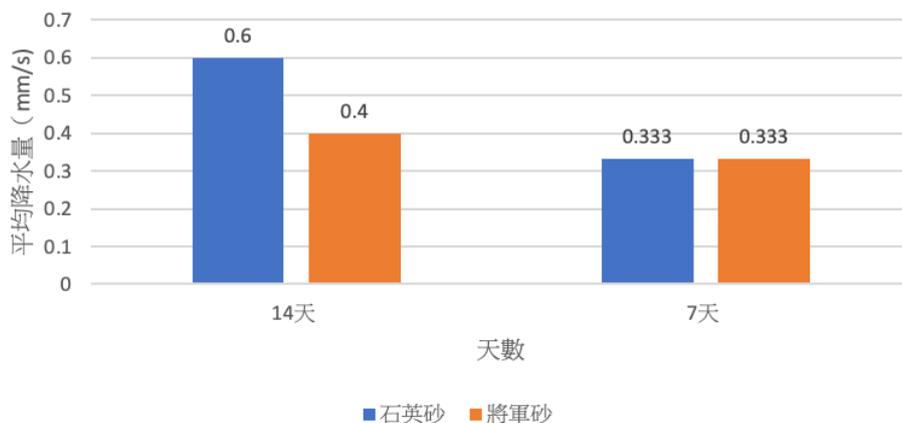
(表三) 不同方法沙雕抗風雨能力檢測結果 (11.25m/s 六級風)

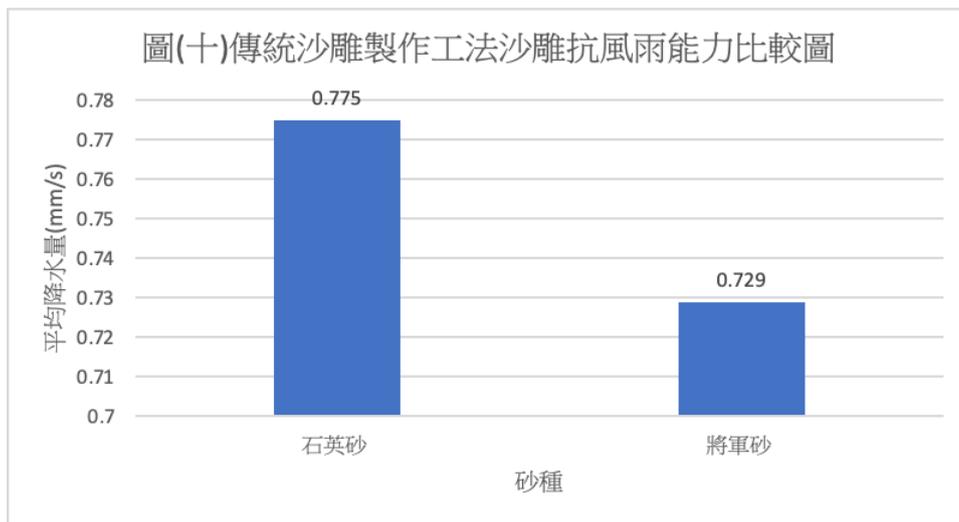
沙雕製作方法	天數	砂種	坍塌時秒數 (s)	累積降水量 (mm)	每秒降水量 (mm/s)
噴灑式 生物礦化工法	3天	石英砂	25	15	0.68
		將軍砂	24	16	0.667
	7天	石英砂	35	27	0.771
		將軍砂	29	21	0.724
	14天	石英砂	37	29	0.796
		將軍砂	30	23	0.767
浸泡式 生物礦化工法	7天	石英砂	3	1	0.333
		將軍砂	3	1	0.333
	14天	石英砂	5	3	0.600
		將軍砂	5	2	0.4
傳統 製作工法	石英砂		40	31	0.775
	將軍砂		37	27	0.729

圖(八)噴灑式生物礦化工法沙雕抗風雨能力比較圖



圖(九)浸泡式生物礦化工法沙雕抗風雨能力比較圖





#### 四、菌液濃度變化觀察實驗

菌液濃度隨時間的變化圖如圖(十一)所示。在此實驗中我們發現，整個製作過程中，菌液濃度的變化是呈現上升的趨勢，而在第 3 天、第 7 天及第 11 天時，菌液濃度有略微下降，但隔天即回升。我們推測造成此現象原因為我們在第 3 天第 7 天於第 11 天時，皆已將菌液中的菌用到一定程度了，我們也於當日加入了營養源，因此使隔天的 OD 值回升；而在第 11 天略微下降後，菌液濃度曲線就趨於平緩，針對此現象，我們認為產生的原因為其已達到飽和，也就是此菌種的最佳培養濃度。



## 陸、討論

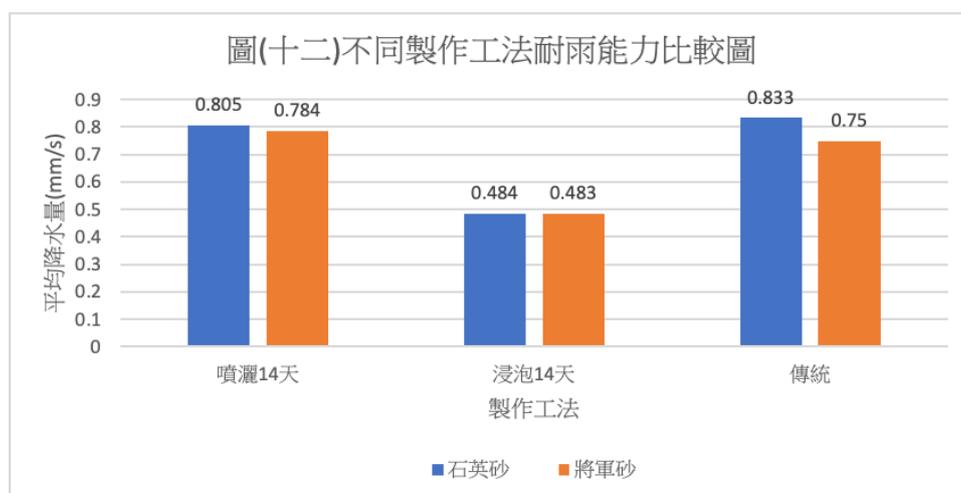
### 一、不同沙雕製作方式抗風雨能力比較

由於在此次實驗中，我們發現各實驗組的抗風能力近乎相當，也就是採用 MICP 工法是可以取代傳統 PVAc 工法。因此我們將著重在耐雨能力及抗風雨能力的探討：

#### (一) 耐雨能力比較

我們可以由圖(十二)中了解到以下幾點：

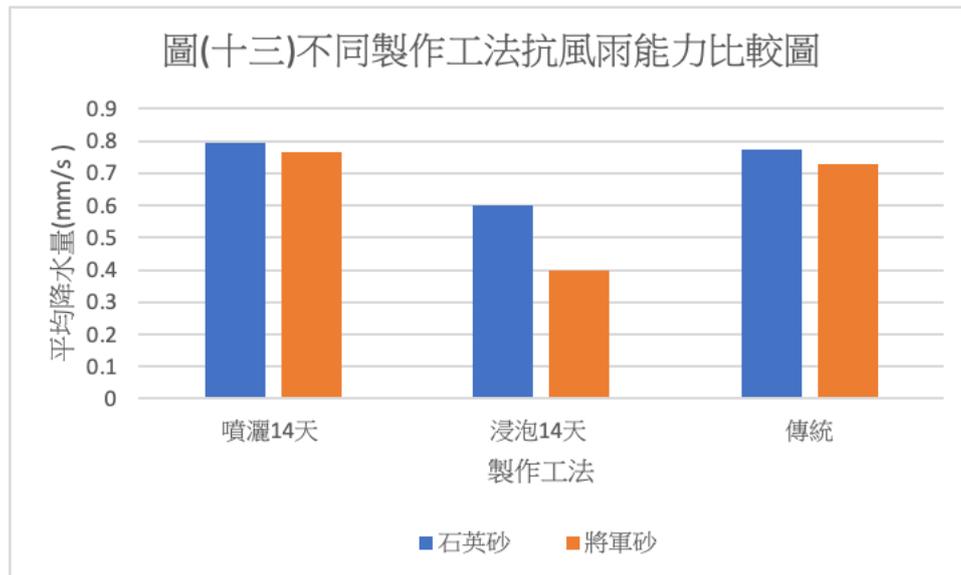
1. 如果我們將天數固定，我們會發現在此實驗中，不論在何種製作方式中，石英砂的具體表現都較將軍砂來的好。我們認為造成此現象的原因，是因為石英砂的顆粒大小為 60 目，較將軍砂 18 目來的小，因此孔隙率也較小，運用 MICP 工法將各沙粒之間膠結固化的效率也較高。
2. 如果我們將砂種固定，我會發現在此實驗中，傳統製作工法及噴灑式製作工法在測試中的具體表現都較浸泡式製作工法好很多，我們認為造成此現象的原因，是因為浸泡是長期泡於液體中，導致孔隙率長期處於較高的狀態，也使得固化作用較無法產生。而噴灑式及傳統製作工法所得之結果相當，但區別為噴灑裡外皆可兼顧，而傳統工法僅有最外層完成固化。



## (二) 抗風雨能力比較

我們可以從圖(十三)中了解到以下幾點：

1. 從結果我們可以得知，石英砂所展現出的抗風雨能力皆較佳，而噴灑式模型與傳統工法模型抗風雨能力相當，較浸泡式模型佳。
2. 從比對中我們可以得知，抗風雨能力測試中各沙雕模型做呈現出來的數據皆較耐雨能力所展現出來的數據差，但在抗風能力測試中，各沙雕模型皆無明顯毀損現象，因此我們推測降水為破壞沙雕的主力，而風成為破壞沙雕的輔助力量。



## 二、有關 *Bacillus pasteurii* (巴氏芽胞桿菌)在此實驗中所造成現象探討

### (一) 鈣化物沉積實驗

在此實驗中，我們主要的結果就是，此菌種在富含營養及鈣源的情況下，會產生白色物質的沉澱，而在根據文獻探討，我們認定此沉澱物為碳酸鈣。

### (二) 菌液濃度變化觀察

在此實驗中，我們發現於培養的前期，菌液濃度都是呈現上升的狀態，而在第 11 天後因為達到飽和而菌液濃度變為趨緩，那在第 4 天及第 7 天時，由於我們已將菌液使用一定的量，因此我們在當天加入新的營養源，也導致了菌液濃度遭到稀釋，不過其也在隔天恢復正常。

## 柒、結論

一、將不同沙雕製成方式及製成結果比對後得到以下結論：

- (一) 固化成效會受到天數的影響，天數越短，固化成效越差。
- (二) 固化成效會受到沙種的影響，石英砂固化成效略佳於將軍砂。
- (三) 不同製成方式的固化排序為噴灑式工法略等於傳統工法優於浸泡式工法。

二、噴灑式較有可能取代傳統的沙雕製程方式。

三、*Bacillus pasteurii* (巴氏芽胞桿菌)在生物礦化工法中所擔任的角色為產生鈣化沉積物的推手，而其的生存條件是受到營養源的影響，營養源越多，菌繁殖量越多，而菌也會在一定時間後，與營養源達到平衡，這時，每隻菌皆可取得等量的營養。

## 捌、參考資料及其他

- 一、鄒敏惠，福隆沙雕定型用白膠 難生物分解疑污染海洋。2018-05-14。環境資訊中心  
<https://e-info.org.tw/node/211351>
- 二、曾耀霆，微生物誘導鈣/矽化合物之沉澱/膠結效應於動/靜態受剪行為之砂性土壤補強暨其聲-光學響應，國立臺灣科技大學營建工程系，碩士論文，2020。
- 三、林家豪，以微生物式鈣/矽化機制行砂/黏性土壤之動-靜態強度改良暨聲-光學檢測之技術研新，國立臺灣科技大學營建工程系，碩士論文，2021。
- 四、陳貽瑱，生物基材自癒混凝土，國立中興大學土木工程系，碩士論文，2016
- 五、卓雨璇，微生物式之碳酸鈣膠結效應對粒狀土壤地質改良之研探，國立臺灣大學工學院土木工程學系，碩士論文，2011。