

計畫編號：109 保發-11.1-保-01-06-001(34)

生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕試驗計畫
**Application of Biological Soil Crust in
Preventing Soil Erosion**

成果報告書

執行單位：財團法人成大研究發展基金會

執行期間：109 年 2 月 6 日至 109 年 12 月 31 日

計畫主持人：賴文基 副研究員

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 109 年 11 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)

目次

目次.....	I
表次.....	III
圖次.....	V
第一章 緒論.....	1-1
第一節 生物土壤技術	1-3
第二節 土壤沖蝕減緩	1-5
第三節 BSC 工法的推動現況與討論.....	1-9
第二章 工作執行方法與執行結果	2-1
第一節 工作執行方法	2-1
第二節 工作執行步驟	2-6
第三節 初步結果	2-8
第三章 工作進度與交付項目	3-1
第一節 計畫甘特圖	3-1
第二節 計畫交付項目	3-3
第四章 執行成果及後續建議	4-1
第一節 執行成果	4-1
第二節 後續建議	4-4
參考文獻.....	R-1
附錄.....	附錄-1
附錄一、服務建議書審查意見暨回覆辦理情形 ..附	
錄-1	
附錄二、工作計畫書審查意見暨回覆辦理情形 ..附	
錄-3	

附錄三、期中報告書審查意見暨回覆辦理情形 ..附
錄-7

附錄四、期末報告書審查意見暨回覆辦理情形 ..附
錄-9

附錄五、BSC 技術合作備忘錄..... 附錄-12

表次

表 2-1 BSC 技術合作備忘錄作業彙整表.....	2-8
表 2-2 BSC 技術合作備忘錄組成架構(中譯).....	2-9
表 2-3 依據表土流出量的治理工法排序	2-21
表 2-4 不同環境中成功培養的微生物比例評估	2-33
表 2-5 緩坡試驗區規格	2-45
表 2-6 BSC 降雨試驗土壤含水量試驗結果表.....	2-56
表 2-7 BSC 降雨試驗土壤沖蝕量試驗結果表.....	2-57
表 2-8 BSC 降雨試驗土壤逕流量試驗結果表.....	2-58
表 3-1 計畫進度及執行項目規劃表	3-2
表 3-2 計畫交付項目及執行進度表	3-3

圖次

圖 1-1 生物土壤(BSC)內生物相的組成示意圖.....	1-1
圖 1-2 BSC 技術方法的施作概念與發展階段.....	1-2
圖 1-3 生物土壤的主要組成-微藻顯微照片	1-4
圖 1-4 BSC 可以在最初期形成先驅植物提供植生基礎	1-4
圖 1-5 沖繩縣 BSC 施作案例地點.....	1-9
圖 1-6 施作地點後續崩塌效果比較	1-9
圖 2-1 降雨器模擬降雨強度與自然降雨強度之關係圖	2-3
圖 2-2 養治驗期間擺放位置	2-4
圖 2-3 模擬降雨過程.....	2-4
圖 2-4 計畫工作流程圖.....	2-7
圖 2-5 BSC 內土壤藻的分佈模式圖	2-12
圖 2-6 BSC 對生態系統的影響關係圖.....	2-13
圖 2-7 BSC 藻絲與土壤顆粒間的膠結示意圖.....	2-14
圖 2-8 生物土壤(BSC)基本研究歷程.....	2-17
圖 2-9 石垣島現地沖蝕觀測試驗及結果	2-20
圖 2-10 沖繩縣紅土流失的現象及影響	2-22
圖 2-11 『紅土等流出防止條例』實施前後流失量比較	2-23
圖 2-12 石垣島藻類生產基地 BSC 製作情形	2-24
圖 2-13 BSC 坡面噴植施工作業情形.....	2-25
圖 2-14 BSC 坡面植生復育技術 NEITS 登錄資料 ...	2-26
圖 2-15 BSC 技術專利登錄資料.....	2-27

圖 2-16 臺灣中部研究樣區常見的土壤藍綠菌和矽藻.	2-
30	
圖 2-17 臺灣中部研究樣區常見的土壤綠藻	2-31
圖 2-18 臺灣中部坡面成功分離培養的土壤藻	2-31
圖 2-19 首批乾燥微藻樣品送抵情形	2-35
圖 2-20 實驗室以絲狀藍綠菌進行 BSC 的建立圖...	2-39
圖 2-21 屏科大水保系緩坡試驗區全景及試驗示意圖.	2-
45	
圖 2-22 屏東科技大學土壤沖蝕觀測試區現況與規劃.	2-
46	
圖 2-23 屏東科技大學不同觀測試區情形	2-47
圖 2-24 降雨試驗流程圖	2-50
圖 2-25 試驗箱外觀	2-52
圖 2-26 藻類覆蓋及無藻類覆蓋樣本外觀	2-52
圖 2-27 沉水式抽水馬達與水槽	2-52
圖 2-28 檢查降雨機針頭穩定	2-53
圖 2-29 確認管線均連接妥當	2-53
圖 2-30 調整試體箱坡度	2-53
圖 2-31 將試體箱移至降雨機下方	2-53
圖 2-32 試驗開始狀態	2-54
圖 2-33 更換收集桶後秤重	2-54
圖 2-34 TDR 量測土壤水分含量	2-54
圖 2-35 沖蝕土洗入容器	2-55
圖 2-36 沖蝕土放入 105°C 烘箱	2-55
圖 2-37 BSC 降雨試驗土壤水分含量試驗結果圖	2-56
圖 2-38 BSC 降雨試驗土壤沖蝕量試驗結果圖	2-57

圖 2-39 BSC 降雨試驗土壤逕流量試驗結果圖..... 2-58

第一章 緒論

台灣地處歐亞板塊與菲律賓海板塊交界，地質脆弱破碎，而近年氣候變遷使短延時強降雨變得更加頻繁，再加上坡地過度開發與超限使用，土壤沖蝕與土砂災害變得日益嚴重。除土壤流失外，失去了地表植被後將減少表土之附著強度，容易發生後續崩塌事件，而這些泥砂更可能沿著河道進入水庫，使得庫容急遽減少，進而導致水資源短缺之問題。為避免造成人民生命或財產損失，坡地保育與水土保持為目前當務之急。

生物土壤(Biological soil crusts, BSC) 最早由 Fritzsche 於 1907 年提出，為一種主要由生物組成的有機複合物，其內含多種細菌、放線菌、藍綠菌、藻類、真菌、地衣、蘚苔和原生動物等，在表土形成數公釐到數公分的集結團(Belnap et al., 2001) (圖 1-1)。這些生物繁殖快且數量大

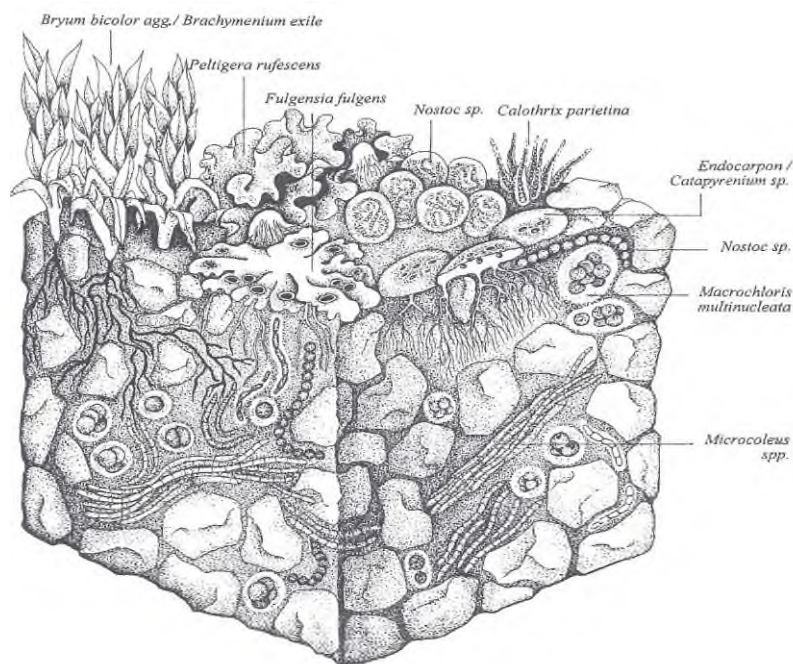


圖 1-1 生物土壤(BSC)內生物相的組成示意圖(Belnap et al., 2001)

日本工營研發中心(Nippon Koei Research & Development Center)日前研發出一新型技術，係利用微藻將土壤粒子連結成一體，於地表形成一保護層(Biological Soil Crust, BSC)，降低地表逕流造成之土壤沖蝕，使表土免於甫經生成即流失，使得先驅物種得以在此發展，進而演替出灌木、甚至是森林等植被演替世代(圖 1-2)。日本工營研發中心於氣候、降雨與台灣相似的日本沖繩進行現地試驗，相較於裸露地 1038 公克/平方公尺的土壤流失，實行 BSC 技術後土壤流失量降為 22 公克/平方公尺，僅有原先之 2%，可見 BSC 技術具減緩土壤沖蝕之成效。

若能將該技術引進臺灣並確切可行，不但能減緩土壤沖蝕、達到坡地保育等目標，更能減緩水庫淤積、避免洪水災害，以達永續發展之目標。本計畫將與日本工營研發中心洽談 BSC 技術授權並引進進至臺灣，評估該技術於臺灣之可行性及減緩土壤沖蝕之能力，以期日後做為坡地保育策略之一。

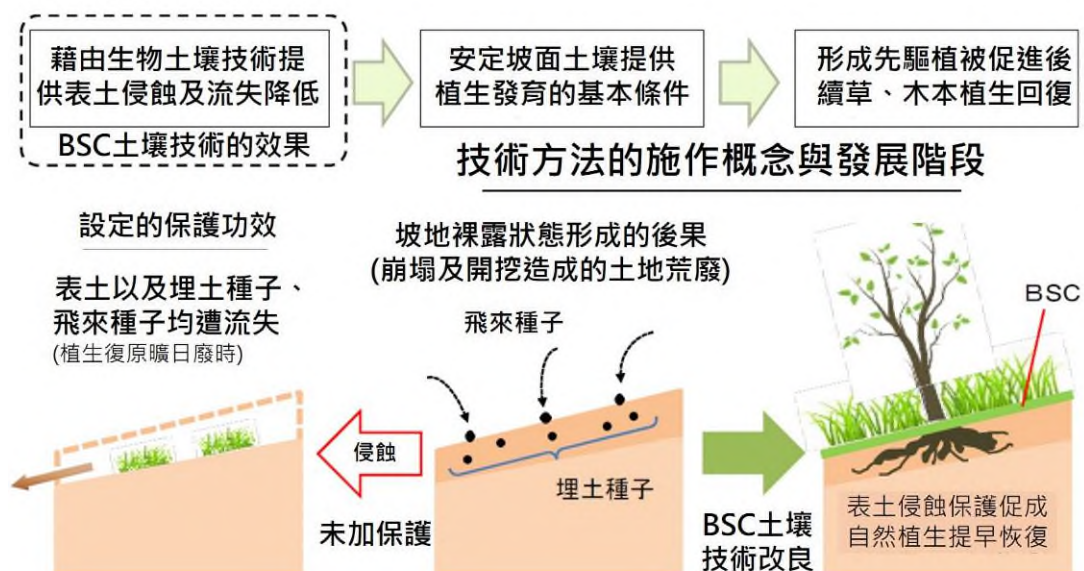


圖 1 -2 BSC 技術方法的施作概念與發展階段

(修改自日本工營 2018)

第一節 生物土壤技術 (Biological Soil Crust, BSC)

在日本南部離島地區，因為屬於高溫潮濕氣候，因為降雨所造成的表土侵蝕，將細微土壤藉由逕流沖蝕，造成大量的濁水流出（粘土等流出），同時也造成河川和沿岸地區的生態系、漁業、觀光資源等損失，更嚴重的造成環境退化問題。因此日本國立研究開發法人土木研究所和日本工營等技術研發單位，長期透過地表植生及生物土壤改良等方式，透過微藻類形成土壤保護的方式，進行對策工法的研究。

BSC 主要由系狀菌類、土壤藻類、地衣等苔蘚類包覆於地表土粒或土塊等組成（圖 1-3），由於地表土壤受到覆蓋，能防止地表土壤的侵蝕與流失。也由於土壤表面受到菌類及藻類的覆蓋，能夠讓土壤環境受到改善，崩塌後的坡面草本植物能接續生長，並接續木本植物生長，整課被破壞的植被環境能夠逐漸的獲得改善（圖 1-4）。經過長期的室內及室外監測分析，佐證土壤流出量降低至 $1/10 \sim 1/20$ 左右。

這些工業產製的藻類，依據現場施工的需求，縮短至從 2 星期到 1 個月的培植期，作為後續植生發展的先驅性植被，透過長期的技術演進與變遷，BSC 施工方法於 2009 年取得專利，正式投入現地施工並引進於日本各式植生保護及坡地沖刷保護的技術指引中。

與過去使用樹脂作為膠結劑，以及和原有的各種草仔噴植的施工方法相比，新的 BSC 工法以土壤藻類為主要資材，一方面能適用於各式各樣的地區生態系，二方面有容易施工且價格低廉的通用性，獲得現場施作單位的高評價，亦被國土交通省的新技術活用系統 (NETIS) 登錄為次世代的整治發展技術。該工法由日本國立研究開發法人土木研究所、日本工營以及藻類培養技術的日健總合公司共同發

展，進行推展為各項土木工法資材的量產製品，後續在各項土木水保領域的治水・治山工作進行活用、於農業領域及環境領域的應用也進行研討。

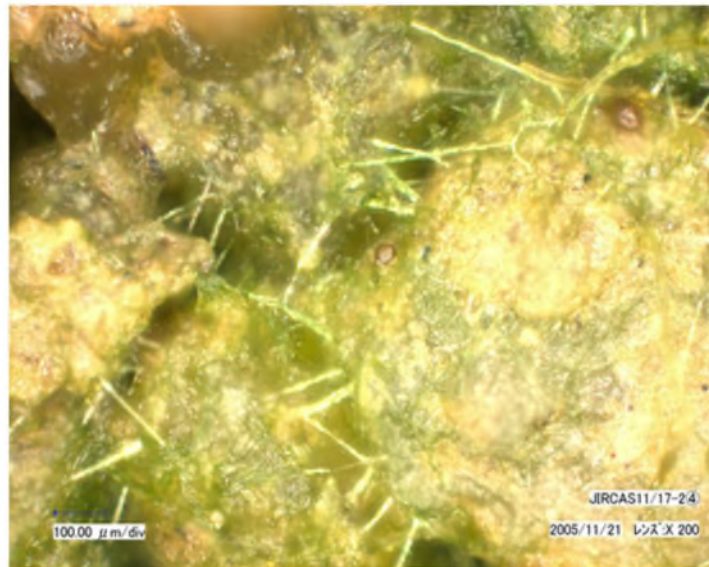


圖 1-3 生物土壤的主要組成-微藻顯微照片 (日本工營提供)

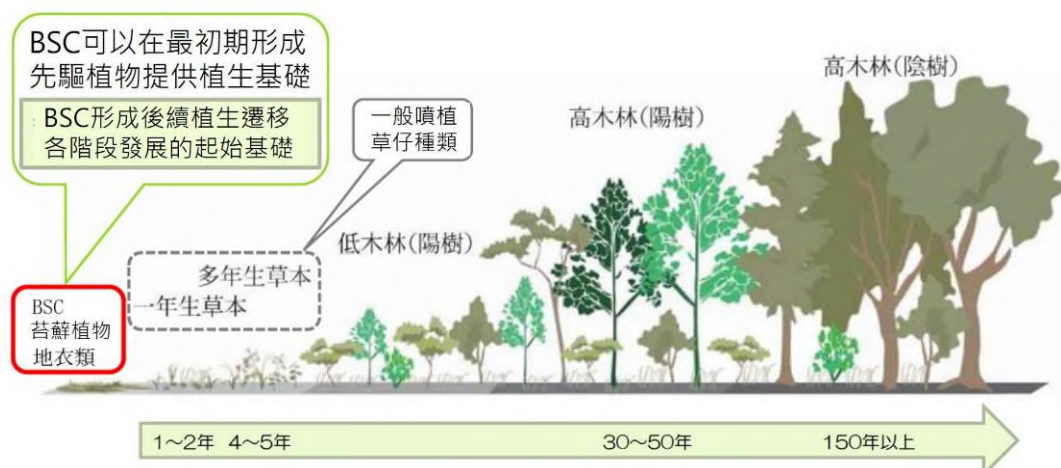


圖 1-4 BSC 可以在最初期形成先驅植物提供植生基礎

(修改自日本工營 2018)

第二節 土壤沖蝕減緩

土壤侵蝕是全球最重要的土地退化 (land degradation) 問題之一 (Mohammad and Adam, 2010)。目前全世界約 2500 萬平方公里的土地正遭受土壤侵蝕威脅，占了陸地總面積的 16.7 %，每年流失土壤 260 億噸，全球 83 % 的土地退化是由土壤侵蝕引起的 (García- Ruiz, 2010)。臺灣水土資源不足，而水土資源時空分佈又不均勻，可利用的後備資源缺乏，土壤侵蝕導致土地退化、土地質量下降將更加劇水土資源的匱乏。因此，土壤侵蝕議題不僅是臺灣水土保持研究的重要內容，也是全球關注土地退化問題的核心之一。根據農委會水土保持局統計，山坡地超限利用，加上森林被伐除後，土壤流失率將增加 100 倍、每公頃將流失 160 噸土石。氣候變遷所引起的極端氣候事件增加，超過百年洪峰量的降雨事件顯著較以往頻繁；近年幾起極端降雨事件已造成臺灣地區多起嚴重土石流失災害，嚴重危害民眾生命安全。因此，改善土壤流失的方法或推估流失量則成為加強國土安全、土地管理利用、水土資源保育及維護人民生命財產之重要研究課題。

近十幾年間，臺灣西南部泥岩裸化面積有迅速增加之趨勢。航照調查資料顯示，泥岩裸化面積由 1967 年的 2,532 公頃增加到 1997 年的 11,179 公頃(周，1997)，30 幾年間迅速增加 5 倍之多，顯示泥岩裸露面積擴大有急速惡化之情形。此外，1999 年 921 大地震後，中北部更有大量之泥岩出露於地表，至 2001 年已更擴大為 15,539 公頃，幾為 30 年前的 6 倍以上。李德河等人(1994)指出，泥岩之特性為遇水易崩解、亦易風化、沖蝕率大，而土壤強度隨著含水量的增加而降低。此表示，泥岩如遇極端降雨事件，將引起表土大量流失或崩塌，而造成集水區含砂量激增、環境污染及土地劣化之農業生產損失等問題。

除此之外，臺灣西南部泥岩地區由於近四十年來受到大量之山區產業道路之開闢與擾動破壞、坡地果園之不當經營與化學藥劑管理不當與河岸邊之養殖等土地不合理利用，已加速泥岩地區土地之荒漠化；同時，亦使得植生擴展困難與人工植生之不易。臺灣西南部泥岩地區，由於地力消耗與區域氣候型態之間的因果循環，在水土保持與景觀上形成不易植生綠化的地區及特殊之月世界地形，其特性為粉砂含量略比粘土多，砂之含量極少。此外，泥岩之 pH 值高、交換性鈉(Na^+)含量多，質地細、有機質少、N 及 P 含量低而 K 含量高，易引起分解作用。其次，由於泥岩土壤膠結不良，遇水迅速崩解，受過度壓密作用，當壓力消除或受雨水洗淋時，雨水向土塊內部迅速滲入，使岩質軟化而使得容易造成土壤沖蝕及崩塌。張(1982)認為泥岩浸水時溶化呈泥漿狀態，易於流動；乾燥時堅硬如石，土壤構造多呈塊狀結構，下雨時逕流旺盛，土壤易受沖蝕。此外，泥岩土壤因含有多量之交換性鈉，易起分散作用，使土壤膠體易隨逕流水流失，因而造成所謂「淘空現象」，而此為構成嚴重沖蝕溝與崩塌之主因。又由於泥岩滲透性極低，若遇豪雨或久雨，易造成大量逕流進而淘刷坡腳，或雨水沿土壤裂縫滲入土體而降低抗剪強度，而導致崩坍。邱與陳(1996)指出，泥岩之抗蝕性弱，裸露地面之年沖蝕深度可達 6~8 公分，年表土流失量約為 140 t/ha-yr，逕流係數在 0.83 至 0.87 之間，屬臺灣地區最易沖蝕之土壤之一；而泥岩沖蝕之種類分為有剝落、層狀沖蝕、指狀沖蝕、溝谷沖蝕、崩落及崩塌等類型，該些災害常危害下游之農、住家之安全。

邱創益（1985）提出，泥岩土壤中有效性磷及有效性氮不足，且鈉離子易對鉀離子產生拮抗作用，造成植物生長障礙。顏富士等人（1985）於台灣西南部主要泥岩坡地所含黏土之物化特性研究指出，

因鈉離子遇水造成黏土礦物膠結力降低，且滲透率降低，坡面易滑動。黃國禎 (2007)、陳時祖 (1994) 及簡士濠等人 (2015) 皆提出，台南泥岩之基本性質酸鹼度偏高 (8.23-8.90)、陽離子交換能力偏低 (4.3-7.1 cmol(+)/kg)、電導度偏高 (6.31 dS/m)、水力傳導度偏低 (1.80 cm/hr)、有機質含量偏低 (0.92%)、全氮量不足 (0.02-0.06%) 及有效磷含量不足 (0.04%) 其基本性質皆屬不易於植物生長。

土壤沖蝕潛勢通常與土壤特性有密切之關係；根據 Wischmeier and Smith (1978) 所提出之通用土壤流失公式 (Universal Soil Loss Equation, USLE) 中，土壤可蝕性因子 (soilerodibility factor, K 值) 係由土壤質地、有機質含量、土壤構造及土壤滲透性所決定，而這些因子為影響土壤沖蝕量的主要因子。利用生物炭高含碳量與高比表面積之特性，將之添加至土以上。針對影響 K 值之土壤性質做直接的改善，土壤沖蝕潛勢應可立即獲得改善。此外，由於土壤沖蝕量降低，土壤物理化學性質獲得改善，進而促使植生迅速擴展，亦可影響 USLE 公式中的地表覆蓋因子 (C 值)，於是更進一步的降低土壤沖蝕量。自 1980 年開始，國內已有許多學者針對 K 值與土壤性質間的關係進行相關的探討 (范，1997；萬與黃，1981；1983；1989)。黃與萬 (1994) 和黃 (1986) 持續利用 USLE 模式，推估山坡地 K 值及土壤流失量，並認為土壤有機質含量、團粒穩定度與飽和導水度為影響 K 值最重要之土壤性質。針對該些因子著手改良土壤性質，可顯著降低土壤可蝕性。此外，國外亦有許多研究針對有機質含量進行研究，評估該性質對 K 值的影響 (Imeson and Vis, 1984; Barthès and Roose, 2002)。Boix-Fayos et al. (2004) 指出當林地或草生地轉變為農耕地時，有機質含量顯著減少而導致土壤沖蝕性增加。此外，Rodríguez et al. (2006) 以火山

灰土壤為研究對象，指出土壤團粒穩定度與土壤中的次生礦物(鋁英石)為影響火山灰土壤可沖蝕性的主要因子。張(2003)指出，改良泥岩土壤之首先應考慮增加有機質含量，將之形成較為穩固之團粒，改善泥岩土壤構造；同時增加陽離子交換容量，降低鹽分含量，進以增加植生機會。Tejada and Gonzalez (2007)以碎棉花籽堆肥、橄欖油萃取過程之副產物、都市民生廢棄物與下水污泥作為鹽土改良劑，結果發現，農業廢棄物可大幅提升團粒穩定性，並有效減少總體密度與土壤沖蝕量，主要原因為農業廢棄物含大量之腐植酸(humic acids)。

第三節 BSC 工法的推動現況與討論

近幾年，BSC 工法廣泛的施作於日本各地，尤以颱風災害最為頻繁的沖繩地區，以及雪害最為嚴重的北海道地區，都利用 BSC 技術進行了各項的現地研究。

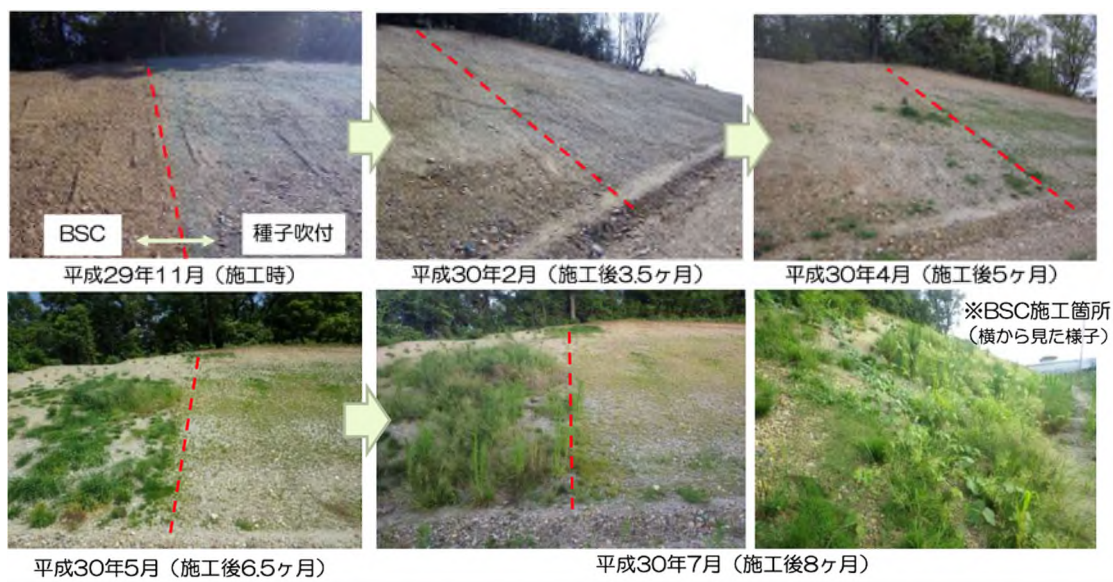


圖 1-5 沖繩縣 BSC 施作案例地點 (富坂峰人，2019)



圖 1-6 施作地點後續崩塌效果比較 (富坂峰人，2019)

經過近十年的試驗與實際施作，相關的成效追蹤與討論歸納了以下的要點：

一、BSC是屬於植被形成的先驅植物，由土壤藻類等帶來的BSC 形成之後，後續的草本及木本植物較容易穩定的發展。

二、BSC 有防止表土侵蝕的效果

在裸露表土所進行的 BSC 實驗，其實驗結果顯著的增加了土壤流失的速率與量體。 所以，如果能及早形成 BSC 的效果，可以減緩或防止表土流失的現象，成為後續防範表土侵蝕的對策工法。

採用 BSC 工法還有以下優點：

1. 利用存在於各地，選擇當地形成 BSC 的土壤藻類也可以避免對原有品種等的環境影響（包括避免基因複製及基因擾亂的問題）。



圖 1-7 可資利用的 BSC 土壤藻類全球分布調查初步結果

(富坂峰人，2019)

2. 可透過藻類製造廠的合作，提供工業用大量培養及資材化的活用種仔。
3. 亦可利用將將種仔加上肥料、膠結料及黏著劑等，透過噴植的方法進行大面積施做。



圖 1-8 採用噴植方法施工的 BSC 土壤改良案例

(富坂峰人，2019)

三、與其他植生的工法具有施工簡易與成本較低的優勢

由於基本上屬於藻類・苔癬等植物是具有吸附功能，生長的環境儘管是斜坡，亦可以發育於 1: 0.5(60 °) 以下的斜坡，但土壤硬度需小於 30 mm(道路土木工程、災修工程及坡面穩定工程方針)。

四、可以施作於氣候嚴酷的條件

第二章 工作執行方法與執行結果

第一節 工作執行方法

近年來臺灣水土保持之研究日益興盛，其中不乏許多新型水土保持策略，但各策略皆有其適用性之問題。BSC 技術係由日本工營研究中心所開發，而日本與臺灣氣候、土壤特性不同，各種因素皆可能影響其微藻之生長情況。本計畫將以現地試驗之方式，引進 BSC 技術至臺灣，並以臺灣之氣候條件，搭配不同土壤特性檢視其生長狀況，並測試其減緩土壤沖蝕之成效。計畫執行方法分述如下：

(一) 與日本工營研發中心洽談BSC技術授權並將該技術引進至臺灣。

日本工營株式會社創業於 1946 年。經歷了 70 餘年，為日本國內規模最龐大的綜合型工程技術顧問公司，長年支援國際合作的各項重大開發計畫，擁有豐富的發展技術與工程實績。以總公司（東京）為首在全日本擁有 9 家支店、1 個中央研究所、7 個事務所、34 個營業所、及其他 9 家海外事務所，員工人數近 8 千人，公司之年營業額約 200 億元台幣，在海外承辦許多國際合作研究計畫，該公司無論在技術研發及推動的廣度及深度方面，都有許多值得借鏡之處。國立成功大學防災研究中心於 2013 與日本工營株式會社的中央研究所簽訂了合作備忘錄，並於 2019 年選訂 BSC 技術作為雙方未來三年合作研究的主要項目，並預計

每年定期辦理技術討論及成果發表等相關技術合作。

(二) 生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕發展現況蒐集與彙整

土壤有微生物生長發育所需要的一切營養物質與各項條件，直接或間接參與了環境中所有生物和理化反應，因此土壤可算是地球上生物多樣性最高的棲息地之一，又有「微生物的天然培養基」之稱(Anthony and Haik, 1999)。土壤中微生物的生物量高，據估計每公頃表土層中約有超過 1 公噸重的微生物存在；在每公克土壤中，則約有 10⁹ 個微生物。在這些土壤微生物中，又以藍綠菌和綠藻為其中最重要的初級生產者與裸地的先趨拓殖者。藍綠菌和綠藻中單細胞個體和絲狀藻體形態最為常見，常分泌胞外多醣體(exopolysaccharides, EPS)形成錯綜複雜的網狀結構，聚集成肉眼可見的群體，形成生物土壤的重要單元。

由於藻類及苔癬應用於土壤沖蝕，尚屬新穎的課題，本計畫將先廣泛收集國外、內相關文獻及技術報告，針對生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕相關之基礎討論、案例研究及工法評估等不同面向，進行彙整與分析，提供後續分析各種應用於台灣本土環境時遭遇課題，及其可能的解決方法。

(三) 選擇適當場址施行BSC技術，檢視微藻之生長情況並測量其土壤沖蝕量，完成BSC技術之現地試驗。

由於考慮到所採用之降雨器高度明顯不足且雨滴粒徑及終端速度皆會影響其雨滴動能，進而影響降雨強度，因此本研究與屏東科技大學水土保持系李明熹副教授合作，於模擬降雨試驗前，利用位於屏東科技大學之緩坡試驗區內的 OTT Parsivel 雷射雨滴譜儀，於降雨器所模擬的各降雨強度下進行雨滴粒徑 (D) 及速度 (V) 量測，並累加為一分鐘降雨動能，再將降雨延時內每分鐘降雨動能累加後，推算該場降雨之降雨動能 (E)，，利用此方式推算降雨器模擬在降雨強度 30–100 mm hr⁻¹ 下自然降雨強度，以除去降雨高度不足之誤差。因考慮到雨滴譜偵測雨滴位置離地約 50 cm，因此在模擬降雨前會將降雨機底部架高至與其偵測位高度同高。

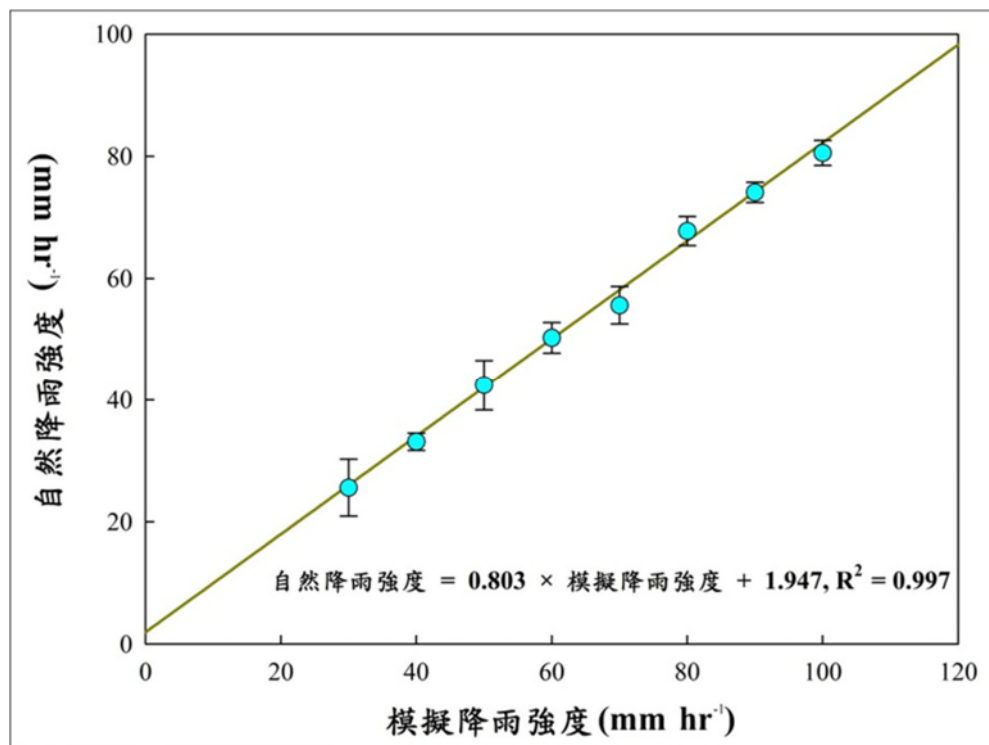


圖 2-1 降雨器模擬降雨強度與自然降雨強度之關係圖



圖 2-2 養治驗期間擺放位置
降雨模擬試驗步驟



圖 2-3 模擬降雨過程

- (1)於水泥空地上組裝降雨機，並將水閥之通水量調至最高量，檢查針頭有否不穩，確認後再將水閥關閉；
- (2)將水槽放置於水槽架上，並將其儲滿水，而水源需要持續供應(以防止模擬降雨過程耗水過快，造成水壓過低，進而使模擬降雨強度改變)；
- (3)於試驗樣本上方鋪設一層不透水帆布(以防止降雨機於降雨律定過程的雨水影響土壤樣本)；
- (4)於樣本架周圍架設降雨機的架子，再將降雨機移至架子上方；

- (5)將降雨機之通水量調至 59.8 mm hr⁻¹ 的降雨強度，以進行降雨律定(以確保降雨範圍之降雨強度皆相等，並可達到設定之降雨強度)；
- (6)等待至雨滴穩定後，迅速將帆布移開並放置逕流收集桶及滲漏收集桶後，即為降雨試驗開始；
- (7)於降雨試驗開始後之 5、10、20、30、60 及 120 min 進行以下步驟：
- i. 於該時段，以 TDR 進行測定土壤之含水量(每次需隨機選取三處以上測定)，同時，將逕流收集桶及滲漏水收集桶更換；
 - ii. 逕流收集桶需秤其總重(逕流+泥砂+桶重)後，將桶內的溶液進行攪拌，再以小白瓶裝取 100 mL 之逕流水並存放於 4°C 以下的冰箱以供後續養分分析，並以紙杯裝滿逕流水，移至 105 °C 烘箱中。
 - iii. (逕流收集桶及滲漏水收集桶皆需事先秤其空桶重)
 - iv. 將剩餘之逕流水倒除後，再秤其總重(土壤+土壤內部的水+桶重)，挖取一部分土壤於鋁盒中，進行測定土壤含水量；
 - v. (將測定出來的含水量扣除田間容水量，再加上已倒除的逕流水，即為逕流量)(將飽和的泥砂除上水分係數，即為沖蝕土重)
 - vi. 將滲漏收集桶秤重(滲漏水+收集桶重)，以小白瓶裝取 100 mL 滲漏液，以供後續養分分析
- (四) 施行BSC技術後，比較土壤樣區之成效並與現有之水土保持措施進行對照，評估BSC技術減緩土壤沖蝕之效益與可行性。

第二節 工作執行步驟

本計畫執行流程圖如圖 2-4，計畫執行的順序依照 (1)合作洽談與技術引進、(2)文獻蒐集並進行問題分析、(3)研究構想及試驗設計、(4)取得資材樣本及培養觀察、(5)進行降雨模擬試驗瞭解微藻特性、(6)進行現地沖蝕試驗瞭解減緩沖蝕效果、(7)歸納討論提供後續建議等步驟，主要工作項目的執行重點如下：

- 一、與日本工營研發中心洽談BSC技術授權並將該技術引進至臺灣
- 二、生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕發展現況蒐集與彙整
- 三、選擇適當場址施行BSC技術，檢視並記錄微藻之生長情況。
- 四、於自然降雨或人工降雨期間，於實驗區之出流口定時測量逕流量及含砂量，推算該場降雨之土壤沖蝕量，並於不同樣區之成果與對照組(未實施BSC技術)進行比較。
- 五、施行BSC技術後，比較土壤樣區之成效並與現有之水土保持措施進行對照，評估BSC技術減緩土壤沖蝕之效益與可行性。

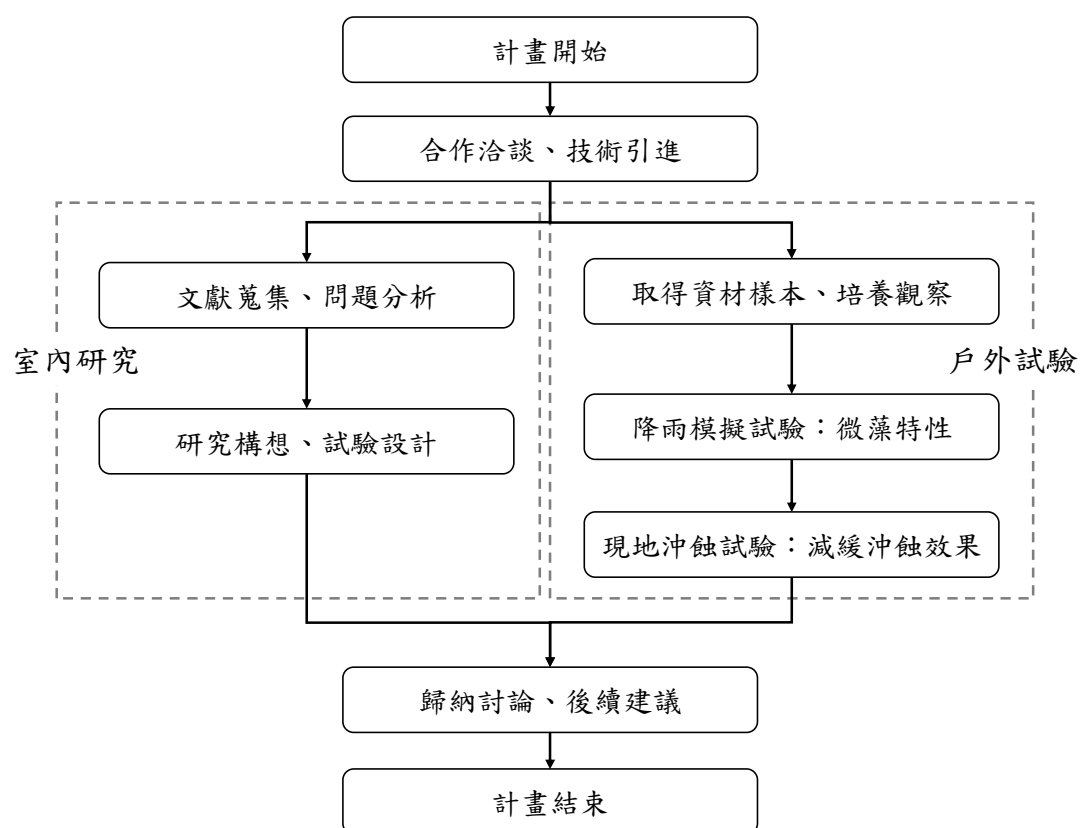


圖 2-4 計畫工作流程圖

第三節 初步結果

一、與日本工營洽談 BSC 技術授權並將該技術引進至臺灣

針對 BSC 技術授權及國際合作，本計畫於 2019 年拜會本工營中央研究所期間，開始展開技術合作的討論，本年度計畫開始啟動後，持續與日本工營株式會社與日健總本社討論與修正合作備忘錄項目與細節，並於 2020 年 4 月 8 日加入印尼日惹大學及馬來西亞科技大學，成為跨越日本、臺灣、印尼及馬來西亞等 4 國 5 個代表單位的跨國合作計畫，相關討論作業的時間、BSC 合作備忘錄版本及主要異動整理如表 2-1。

表 2-1 BSC 技術合作備忘錄作業彙整表

討論日期	BSC 合作備忘錄版本	主要異動
2019/10/8	191008-Collaborative Research Agreement_R01	由日本工營、日健總研及成大防災中心會議後擬訂
2020/4/8	200408-Collaborative Research Agreement_R06	簽署增加印尼日惹大學及馬來西亞科技大學
2020/4/16	200416-Collaborative Research Agreement_R07	文字修正
2020/4/26	200426-Collaborative Research Agreement_R08	確認各單位檢視內容及項目初步意見

2020/5/8	200408-Collaborative Research Agreement_R09	確認各單位簽屬人員及 見證代表
2020/5/20	200408-Collaborative Research Agreement_R10	文字修正
2020/5/26	200408-Collaborative Research Agreement_R11	文字修正
2020/6/4	200526-Collaborative Research Agreement_R12	完成初稿擬訂，進行簽署 準備

BSCC 技術合作備忘錄內容如附錄四，架構整理如表 2-2：

表 2-2 BSC 技術合作備忘錄組成架構(中譯)

零、概要	0.1 前言 0.2 敘述
壹、定義	1.1 專利 1.2 技術資訊 1.3 智慧財產 1.4 BSC 1.5 研究合作 1.6 不可抗力 1.7 研究成果
貳、實施	2.1 研究主題 2.2 研究活動
參、期程	3.1 年限 3.2 申請延長
肆、成本	由各自負擔
伍、著作權	5.1 著作權使用 5.2 前期智財權 5.3 允許使用權

陸、技術資訊的移轉及 BSC 材料的使用	6.1 使用範圍 6.2 使用限制 6.3 回收處理
柒、其他智財權	7.1 研發成果 7.2 成果告知 7.3 發表告知
捌、專利	8.1 告知與徵詢 8.2 拒絕與爭議 8.3 申請區域與範疇
玖、改良	9.1 改良依據 9.2 附加條例 9.3 規定延長(閉鎖期)
拾、報告	提供定期成果報告
拾壹、保密	11.1 保密資訊 11.2 使用限制 11.3 權利與義務 11.4 爭端處理

表 2-2 BSC 技術合作備忘錄組成架構(中譯，續)

拾貳、發表	12.1 非商業使用 12.2 同意徵求
拾參、其他合作活動	鼓勵單位間互相合作
拾肆、終止及續存	14.1 中止提出 14.2 終止提出 14.3 條文規定的沿用
拾伍、代理指定	

拾陸、保證	16.1 許可保證	16.3 除責保證
	16.2 許可適用	16.4 不可究責事項
拾柒、糾紛調解		
拾捌、條文補充		
拾玖、契約的執行	19.1 合約的簽署	19.2 合約的保存
簽署人及簽屬單位		

BSC 技術合作備忘錄的前期作業已於 2020 年 6 月 4 日完成，並於 2020 年 9 月 20 日完成所有單位的審視及簽署，正式啟動兩年期 (2020/10/1~2022/9/30) 四國五個代表單位的跨國合作計畫。

二、生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕發展現況蒐集與彙整

(一) 生物土壤(BSC)的組成及特性 (整理自林敬舒，2014)

土壤為藻類最重要的非水生棲地，當土壤表面經藻類生長而形成塊狀物時，此時亦可稱之為藻殼或藻結皮(algal crust)。土壤藻的分佈以表土 1-2 公釐內密度最高(Liu and Ley, 1989; Evans and Johansen, 1999; Garcia-Pichel et al., 2003)，但 Metting (1981) 和 Lukešová (1993)分別在土深 30 公分和 52 公分處發現土壤藻的分佈。以葉綠素 a (Chl-a)代表土壤藻的生物量而言，表土 2 公釐內的 Chl-a 濃度為底層土壤的 100-300 倍(Garcia-Pichel et al., 2003)。顯微鏡觀察的結果也顯示，78%的土壤藻集中在表土

深度 0-0.1 公釐內，而 96%分佈在 0-1.0 公釐內，生物量由表土向下銳減(Garcia-Pichel et al., 2003; 胡等，1999)。以微觀的土壤垂直剖面分析，藻類在土壤中的分佈可區分為 3 層(圖 2-5) (Lan et al., 2012b; 胡&劉，2003)：

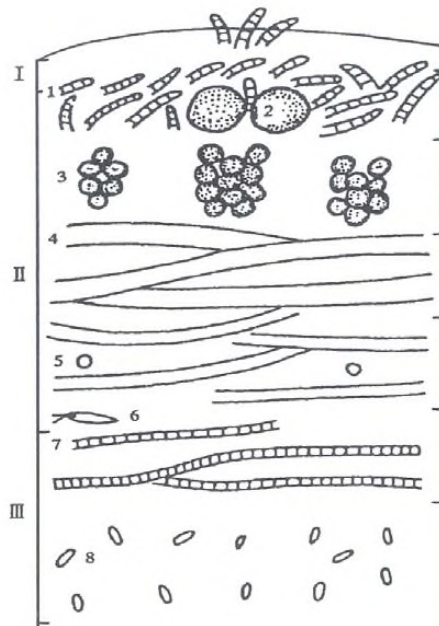


圖 2-5 BSC 內土壤藻的分佈模式圖(Lan et al., 2012b;胡&劉，2003)

I：無機層；II：富藻層；III：疏藻層

生物土壤(BSC)僅占地表厚度約 1-3 公釐，但其在生態上扮演許多重要的角色 (圖 2-6)，透過 BSC 的光合作用、固氮作用與多醣體分泌等，直接或間接對大氣、水份與營養源的含量造成影響。實線為該物質的獲得，虛線為該物質的流失，因此 Pointing and Belnap (2012)稱 BSC 為地球的關鍵區域(Earth's critical zone)。

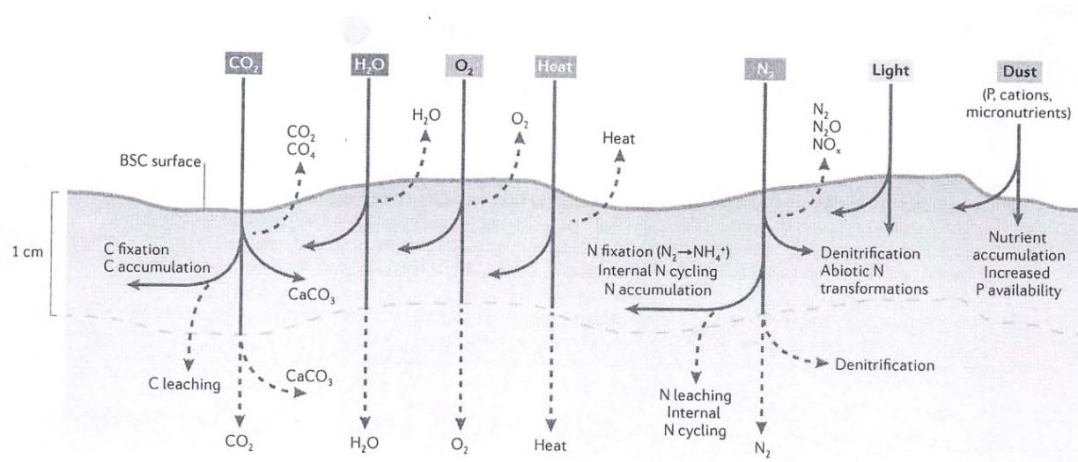


圖 2-6 BSC 對生態系統的影響關係圖(Pointing and Belnap, 2012)

由生物土壤(BSC)所產生的胞外多醣體(exopolysaccharides, EPS)，可將微生物細胞和土壤顆粒黏著於土壤表層，形成異質團(heterogeneous mass) (Mazor et al., 1996; Stal, 2000)。EPS 除了本身可當成營養物，也是一層天然的保護設備，可直接幫助細胞黏附在土壤表面、保持水分以渡乾旱時期、改變細胞表面電位或親疏水性、形成緩衝層以抵抗逆境、和避免營養源流失等。初期之藍綠菌和藻類的絲狀藻體，與中後期之地衣、真菌和蘚苔的假根等，會纏繞周圍的土壤顆粒(Schulten, 1985; Belnap et al., 2001; Xie et al., 2007)(圖 2-7)。EPS 的累積可進一步穩固 BSCs 結構，且其含量隨演替的發展而增加，進而形成穩定的生物膜，初期 0-3 年階段，藍綠菌拓殖而入占據表面棲地；中期 3-10 年階段，藍綠菌形成厚質膠鞘黏附土粒；10 年後，待藍綠菌穩定土質後，

地衣、蘚苔、真菌即開始於表土增生。故 EPS 的產生影響了土壤的水文狀況，如入滲、吸收與保水性等，對穩定土質、促進演替、提供營養、保持溼度等都發揮了重大的功用(Eldridge et al., 2000; Hu et al., 2002ab; Mager and Thomas, 2011)。

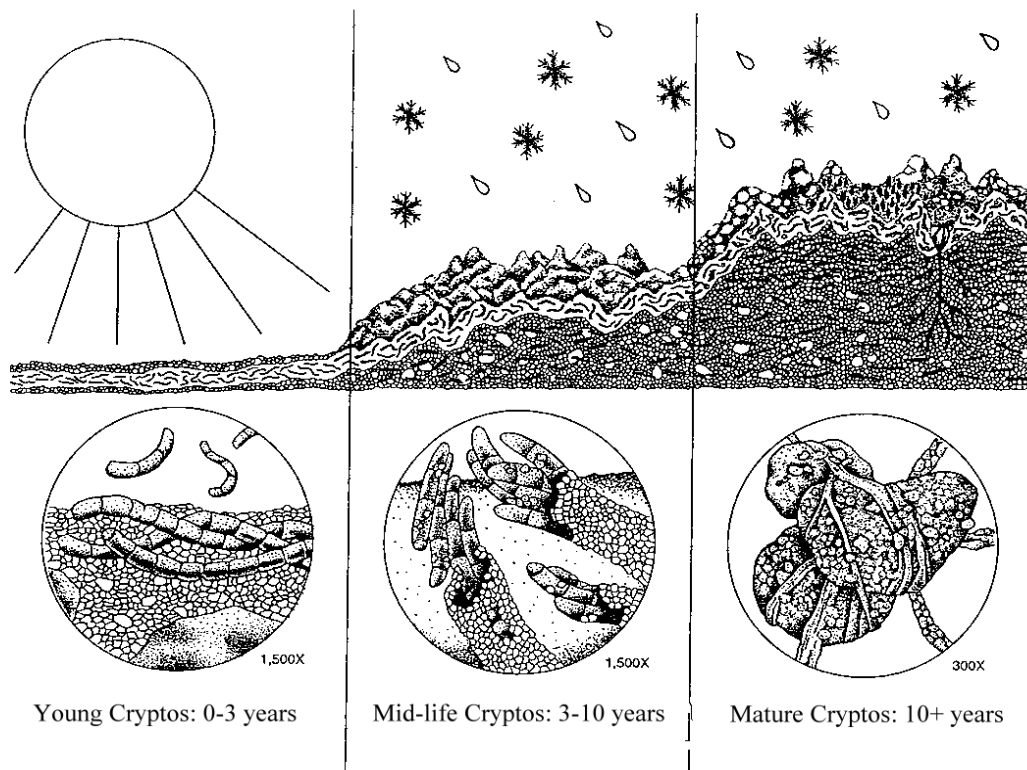


圖 2-7 BSC 藻絲與土壤顆粒間的膠結示意圖(Belnap et al., 2001)

大致上而言，土壤藻多為適水性(poikilohydric)物種，細胞內的含水量會被動隨環境溼度而調節，較不需要主動控制水分的吸收或流失。在乾旱環境中，適水性物種則必需具有能抵抗脫水、暫停呼吸作用、快速恢復光合作用等能力。早期研究即發現土壤中的藍綠菌能充分利用短期降雨所得之水源，當土壤含水量低於12%時，細胞會暫停生長直到再次降雨時(Tchan and Whitehouse,

1953)。降雨現象的改變對 BSC 有重大的影響。由於 BSCs 會改變土壤質地的物化特性，BSC 有助於延長表土保水能力，在小降雨狀況時，BSC 能有效提升土壤對水分的吸收；而降雨強度過大、或持續時間太久，則可能出現反效果，即 BSCs 吸水達飽和所需的時間比降雨的時間長短更為關鍵。生物土壤(BSC)的覆蓋度也會影響土壤孔隙的數量與孔隙的大小，是影響土壤滲率差異的重要因素之一。隨 BSC 的發展，表土的粗糙度會明顯增加，其起伏程度可能達 10 公釐，此時水分在表土的滯留時間明顯延長，入滲率也跟著提升。因為 BSCs 會產生多醣體(EPS)、菌絲或假根等結構，有利於土壤顆粒和有機質的糾結，形成穩定的團聚體，提高土壤的孔隙度、持水性和導水能力，因此增加了入滲量。同時，一旦 BSCs 形成之後，相對抑制了易阻塞土壤孔隙之形成，故入滲效果也可間接提升。

生物土壤(BSC)內的絲狀藍綠菌可提升土壤的凝聚力，並隨 BSC 的發展與 EPS 的增加，能更有效地對抗風和水的侵蝕 (McKenna-Neuman et al., 1996; Thomas and Dougill, 2007; Xie et al., 2007)。即 BSC 的抗蝕能力與其生物量成正比，演替愈後期保護能力愈強(Belnap and Gillette, 1997, 1998; Hu et al., 2002a)。粗糙的 BSCs 表面有利於水分的貯存、減緩逕流也可增加土壤微

粒沉澱的時間，故可避免土壤的流失(Alexander and Calvo, 1990; Ladyman and Muldavin, 1996)。BSC 的覆蓋度與水流分佈的關係研究結果顯示，在連續 1 小時的 50-55 mm /hr 模擬降雨下，具 BSC 覆蓋表土的逕流係數(runoff coefficients)約在 11-72%間；而在自然降雨狀況下，則為 0-71% (Solé-Benet et al., 1997; Cantón et al., 2001)。然而，具 BSC 或植被覆蓋的土壤，其土壤侵蝕率顯著較低，在強烈模擬降雨下，侵蝕率約在 5-150 g/ m² (Calvo-Cases et al., 1991)。就某程度來說，入滲率、逕流與降雨量、土壤含水量間常具有線性關係。降雨強度愈大，對土壤的破壞愈強，逕流攜帶的土壤顆粒會堵塞地表土壤孔隙而形成物理土壤(PSC)，降低入滲率，進而增加了地表逕流和土壤侵蝕的機會(Levy et al., 1997; Mamedov et al., 2001; Maestre et al., 2011)。

(二) 日本生物土壤(BSC)的研究歷程

日本工營與當時隸屬於國土交通省的土木研究所，於 1990 開始針對生物土壤應用於裸露邊坡的植生復育，進行研究開發。

於初期的基礎研究時期，進行各項生物學及工程學的探討(圖 2-8)。



圖 2-8 生物土壤(BSC)基本研究歷程 (土木研究所，2015)

利用藻類-菌類(生物土壤 BSC 前身)於沖繩縣進行的紅土侵蝕防治工法，一般用地樣區減少 35%紅土流失，開發事業樣區減少 75%，農地樣區減少 8%(對策費用負擔及勞動力不足)，美軍基地樣區(未實施，對照組)減少約 1%，顯示工法有效性 (石塚，2014)。舉例來說，位於沖繩縣東村鳳梨田的試驗樣區，BSC 實施前後，單位面積沖蝕量有大幅的降低 ($1038\text{g/m}^2 \rightarrow 22\text{g/m}^2$)。

BSC 是由絲狀菌類、土壤藻類、地衣類及苔癬等於地表結合土粒，組合成土塊所組成的土壤微生物團粒。BSC 具有保水養生功能，即使乾燥數年後，遇到水份 14 日後就可以再生繁茂，土壤藻類以綠藻類為主，對於土砂流出防止機制是以菌類及藻類對土粒產生拘束力，增加黏著力，增強抗沖蝕。而 BSC 增加土壤抗沖的能力來自：(1)土壤微生物的纖維體產生的抵抗力、(2)剪斷黏著力及(3)伸張的黏著力(石塚，2014)。BSC 工法適用的對象包括：

1. 瀝青及蒙脫土無法覆蓋的農地
2. 不適合進行噴漿或有景觀顧慮的開挖或填土面
3. 工程開挖暫時的棄土或填土暫置場
4. 已進行植栽但植生定著需要兩個月以上，期間進行的前置做法

2011~2012 年九州大學荒木功平等(荒木等，2012)於沖繩縣設置樣區，在自然降雨情況下進行現地試驗場各種工法沖蝕量的比較，與其他的各樣工法相比較，BSC 在沖繩縣紅土沖蝕防治工法的比較上，僅次於培地茅(後因造成外來種侵入問題，未被採用)屬於成效較佳的方法(表 2-3)，土木研究所與日本工營另於於沖繩縣農地進行的小型實測試驗(圖 2-9)，將藻類散佈於地表，形成 BSC(配合農地一般施肥即可) 地點位於縣營農試驗苗圃場(JIRCAS:石垣島，2.5*10m，5 度)，觀測期間為一年，有 BSC 的試驗場，沖蝕量約降低至 1/20~1/10 (17.1 噸/公頃->1.3 噸/公頃，28.6 噸/公頃->1.3 噸/公頃)。經過進而決定正式的推廣，並與藻類的生產廠商日健總本社開始進行研究如何進行資材化及工業化生產。

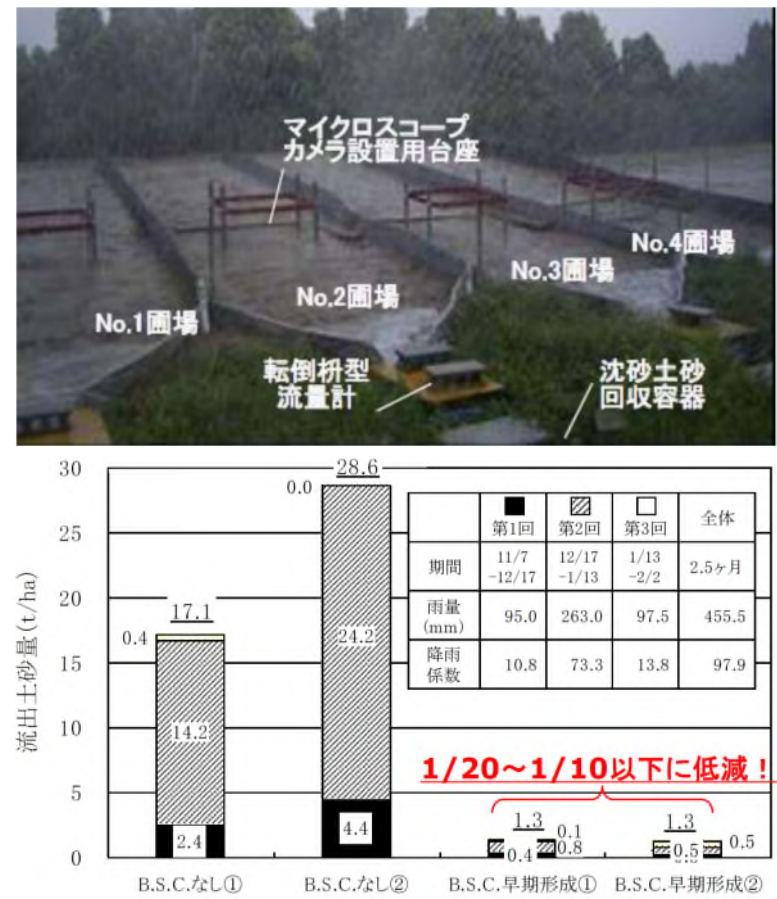


圖 2-9 石垣島現地沖蝕觀測試驗及結果(富坂峰人，2015)

表 2-3 依據表土流出量(g) 的治理工法排序(荒木等，2012)

排序	工法種類	沖蝕量(g/m ²)
1	香根草/培地茅	0.18
2	BSC	0.31
3	堆肥	2.1
4	敷砂	9.5
5	裸地	9.9
6	敷草	16.1
7	放棄地	20.1

(三) 日本生物土壤(BSC)工法的發展

為了防止土壤流失進而造成表土流失、坡面裸露及水質汙染等後續問題，日本工營等三家業者，對於陡崖、坡地的侵蝕防範，開發侵蝕補強相關的技術與資材，加強環境保護及坡地保全。在可能產生沖蝕或崩塌擴大的坡面，藉由微細藻類作為補強的材料，藉由噴植或貼附的植栽方式，加強坡面的穩定性。與過去的工法相比較，在成本的節省上及生態環境的影響上都具有相當大的優勢。目前以沖繩縣的石垣島作為生產基地，持續的進行擴產、販售通路的擴大、爭取海外市場，以及國際專利的取得等進行全面性的推廣。

包含沖繩縣的日本西南諸島常見的紅土，在開發或降雨時常常會受到沖蝕，而流入溪流或海岸，對於海水及農業用水等造成農用用水及海洋環境的汙染(圖 2-10)。沖繩縣於 1995 年訂定『紅土等流出防止條例』，針對造成汙染及破壞的開發業者科以罰責，同時針對農地周圍設置沉沙池等設施，防止農耕時造成的紅土流失。另一方面，針對農地以外的其他用地(美軍基地除外)，也訂定了各種配合措施，目標在能降低原先未管制前紅土流失及水質汙染的三成 (圖 2-11)。



圖 2-10 沖繩縣紅土流失的現象及影響(沖繩縣，2013)

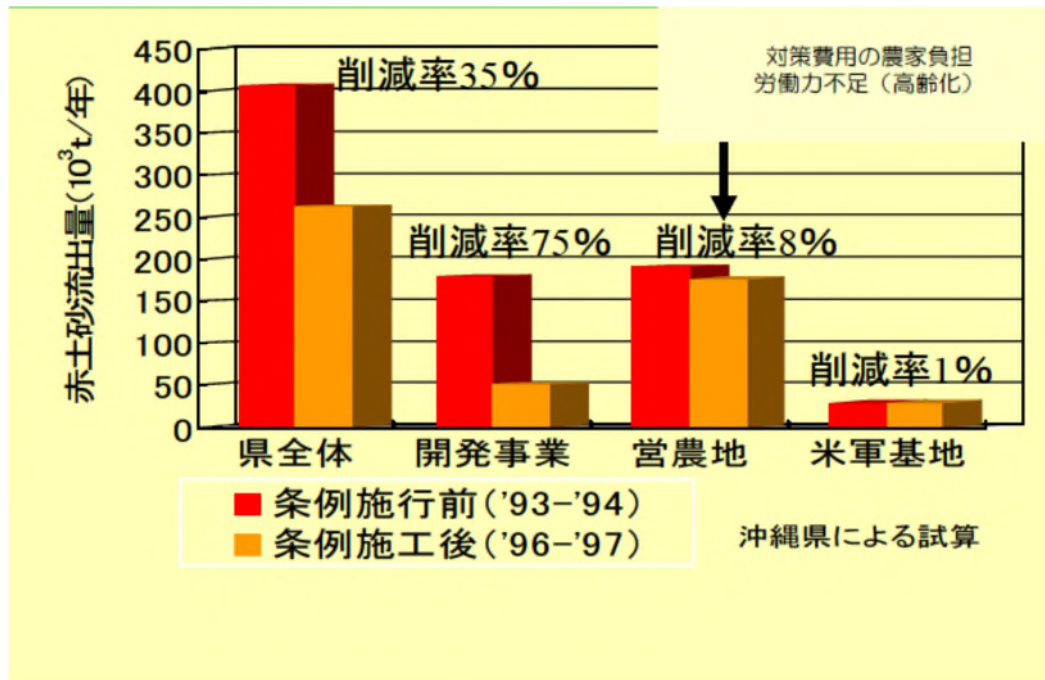


圖 2-11 沖繩縣『紅土等流出防止條例』實施前後紅土流失量比較
(石塚，2014)

鑒於紅土流失抑制的明確目標，日本工營、土木研究所及培養販賣微細藻類的日健總本社共同以「生物土壤技術(BSC)工法」，開發已絲狀菌類及土壤藻類增生，藉由藻類包圍土壤團塊增加抗沖蝕強度的方法降低土壤的沖蝕，達到保護坡面促進植生恢復的目的。

「生物土壤技術(BSC)工法」，是以日健總本社於石垣島的藻類生產基地進行培養及製造。在 6 萬平方公尺的廣大基地中，共有 20~100 噸的藻池 11 座，培養的微細藻類、肥料、水及纖維等，以設定的比例進行養置，BSC 原料的製造並配合石垣島特有的溫度及氣候等，進行乾燥讓微細藻類進入休眠狀態 (圖 2-12)，

加工後的藻類因為脫水而產生渴水狀態，一旦遇到水分或降雨時就會恢復活性，成為先驅的植被。



圖 2-12 日健總本社石垣島藻類生產基地 BSC 製作情形

(資料來源:日刊建設工業新聞，2020/4/21)

完成的生物土壤技術(BSC)坡面，藉由噴植的方式選擇非冬季時間進行，約 2 週~1 個月就會定著於坡面，所以施工期較短。藉由風力、禽鳥等所帶來的本土種植物發芽及擴散，植生穩定後，逐漸讓後續植生穩定，恢復植生與坡面穩定。BSC 工法與植生毯的方式相比，成本及施工價格都較為便宜。



圖 2-13 BSC 坡面噴植施工作業情形 (日本工營，2017)

降雨時，亦會於坡面造成紋溝等雨蝕狀態，BSC 的施作亦能防範或降低這個現象，且由於 BSC 的藻類屬於無性生殖，沒有

雄性雌性體生殖造成基因汙染及擾亂的問題。BSC 工法除了沖繩縣以外，也運用於日本的其他區域，包括鹿兒島縣等九州南部的火山堆積層台地、自然公園裡顧全景觀的裸露地治理等。

日本工營及土木研究所於 2009 年取得 BSC 工法的專利，包括樹脂及配合的藥劑等前置工法，讓後期施工能簡化及加速，獲得參與使用者的高評價，2006 年起就登載於國土交通省新技術情報資訊系統(NEITS，圖 2-14)，並取得相關專利登記(圖 2-15)。

NETIS登録番号	OK-170002-VR		
技術名称	侵食防止及び植生の自然侵入促進をはかる土壤藻類資材		
事後評価	事後評価未実施技術		
受賞等	建設技術審査証明※		
事前審査・事後評価	事前審査 事前審査 活用効果評価		
技術の位置付け (有用な新技術)	推奨技術 準推奨技術 評価促進技術 活用促進技術		
旧実施要領における 技術の位置付け	活用促進技術(旧) 設計比較対象技術 少実績優良技術		
活用効果調査入力様式	-VR 活用効果調査が必要です。		
適用期間等			

比較する従来技術	客土吹付工(種子なし、緑化基礎工あり)		
項目	活用の効果	比較の根拠	
経済性	向上 (8.04%) 同程度 低下	吹付工のみで施工でき、緑化基礎工(繊維ネット張工等)が不要になる。	
工程	短縮 (77.78%) 同程度 増加	吹付工のみで施工でき、緑化基礎工(繊維ネット張工等)が不要になる。	
品質	向上 同程度 低下	土壤藻類自体が植物である。基盤環境を変えないため、その場の特性にあった植生遷移が進む。	
安全性	向上 同程度 低下	法面整形工・緑化基礎工(繊維ネット張工等)等の斜面上の作業が軽減できる。	
施工性	向上 同程度 低下	準備工・仮設工に係る労力・時間が短縮・省略できる。	
周辺環境への影響	向上 同程度 低下	施工に伴う周辺環境の改変(作業路開設、伐採等)が少なく、施工時間も短縮。どこでも在来種として扱え、遺伝子攪乱のリスクもない。	
適用条件	向上 同程度 低下	土壤藻類による被覆(BSC)が侵食を防止する。基本的に藻類・コケ類等の植物が付着・生育する環境であれば、勾配に関わらずどこでもBSCを形成する。	
	向上 同程度 低下		
その他、技術の アピールポイント等	土壤藻類による被覆(バイオロジカル・ソイル・クラスト:BSC)は高い侵食防止効果を発揮する。世界中で生存している汎存種(コスモポリタン)である土壤藻類を利用しており、どこでも在来種となるほか、クローン(無性生殖)で増えることから遺伝子攪乱の問題がない。		

圖 2-14 BSC 坡面植生復育技術 NEITS 登録資料

(國土交通省 NEITS 系統畫面)

現在於日本全國「生物土壤技術(BSC)工法」共有五間公司代理相關資材，由於需求增加，生產端也在增加生產的技術，也正在申請世界專利協力條約(PCT)的國際專利，日健總本社預計既有 50 噸的藻池 6 座轉作生產 BSC 產品，未來還要增設 4 座加入生產，以應付後續各地的需求。

特許番号	特許3718203号
特許	<input checked="" type="button" value="有り"/> 出願中 無し
実施権	<input checked="" type="button" value="通常実施権"/> 専用実施権
特許権者	国立研究開発法人土木研究所、日本工営株式会社
実施権者	株式会社日健総本社
特許料等	製品価格に含む
実施形態	特になし
問合せ先	日本工営株式会社 知財マネジメント室

特許番号	特願2015-077199
特許	有り <input checked="" type="button" value="出願中"/> 無し
実施権	通常実施権 専用実施権
特許権者	日本工営株式会社、株式会社日健総本社
実施権者	特定しない
特許料等	製品価格に含む
実施形態	特になし
問合せ先	株式会社日健総本社 田中記念研究所

圖 2-15 BSC 技術專利登錄資料 (國土交通省 NEITS 系統畫面)

(四) 臺灣生物土壤及土壤藻類的研究

由於臺灣不論是形態分類、基因演化、地理分佈等，關於土壤藻類的資料目前仍相當缺乏。林敬舒(2014)針對臺灣中部植生較差的頭嵙山層礫岩地區(火炎山、大肚台地、大坑山區)進行相關研究，火炎山長期受到風與水的高度侵蝕，不僅土質偏酸、保水能力差、營養源含量也不足，為土壤微生物的逆境生態、初級演替和族群波動研究的良好研究樣區。大肚台地、大坑山區與火炎山在地質學上同屬於頭嵙山層，可藉以比對不同環境間的差別。該研究以多樣化的研究方法：包括培養、顯微鏡觀察、DGGE、基因轉殖庫等步驟，對生長在火炎山、大肚和大坑等環境的土壤藻進行歧異度、豐富度與親緣演化之分析，同時探討環境因子對土壤藻族群的影響。除了瞭解極端環境中的土壤藻族群結構之外，亦希望可尋獲其中的關鍵性物種，以利未來在的生物土壤 (BSC) 建立和土壤復育等工法上有所實際運用價值。

在火炎山各樣區中，顯微鏡的觀察結果共可發現 3 個藍綠菌屬：*Leptolyngbya*、*Nostoc* 和 *Oscillatoria*；7 個綠藻屬：*Bracteacoccus*、*Chlamydomonas*、*Chlorella*、*Coccomyxa*、*Klebsormidium*、*Koliella* 和 *Scenedesmus*；與 4 個矽藻屬：*Amphora*、*Cymbella*、*Fistulifera* 和 *Nitzschia*。就藻細胞數量上而言，綠藻所

占比例最多，尤其是圓球狀的 *Bracteacoccus*、*Chlorella* 和 *Coccomyxa* 等 3 屬最占優勢。藍綠菌數量相對 較少，且以絲狀藻種為主。矽藻分佈比例最少。

在大肚樣區中，顯微鏡的觀察共發現 2 個藍綠菌屬：*Leptolyngbya* 和 *Oscillatoria*；7 個綠藻屬：*Actinotaenium*、*Chlamydomonas*、*Chlorella*、*Cladophora*、*Cosmarium*、*Klebsormidium* 和 *Scenedesmus*；與 2 個矽藻屬：*Encyonema* 和 *Nitzschia*。在數量上，綠藻占相對多數，以 *Klebsormidium* 最多；矽藻出現的頻率最低。

在大坑樣區中，顯微鏡觀察共發現 5 個藍綠菌屬：*Anabaena*、*Aphanocapsa*、*Leptolyngbya*、*Oscillatoria* 和 *Phormidium*；3 個綠藻屬：*Chlorella*、*Klebsormidium* 和 *Ulothrix*；與 6 個矽藻屬：*Amphora*、*Cymbella*、*Fistulifera*、*Navicula*、*Nitzschia* 和 *Pinnularia*。大坑樣區的主要優勢族群為藍綠菌，其中又以 *Leptolyngbya* 族群最常被發現。此樣區間所出現的藍綠菌和矽藻數量明顯高於另外 2 個樣區。

整體而言，在火炎山和大肚樣區中以綠藻較占優勢，而大坑樣區則以藍綠菌為主。在所出現的藻屬中，*Leptolyngbya* (藍綠菌)、*Chlamydomonas*、*Chlorella* 和 *Klebsormidium* (綠藻) 等分佈較廣，

為台灣中部土壤環境中的廣佈種(圖 2-16 及圖 2-17)。該研究成功分離培養出 19 個分離株，其中 6 個來自於大坑、4 個來自於大肚，9 個來自於火炎山。在分類上分屬於 10 個不同的屬，8 個分離株為藍綠菌，11 個為綠藻。就形態上而言，所有藍綠菌分離株皆為絲狀，經鑑定屬於 *Calothrix*、*Leptolyngbya*、*Nostoc* 和 *Plectonema* 等 4 屬。在綠藻中，除了 *Kl. flaccidum* 為絲狀之外，其它分離株皆呈圓至橢圓形，分別屬於 *Asterarcys*、*Bracteacoccus*、*Chlamydomonas*、*Chlorella* 和 *Scenedesmus* 等 5 屬(圖 2-18)。

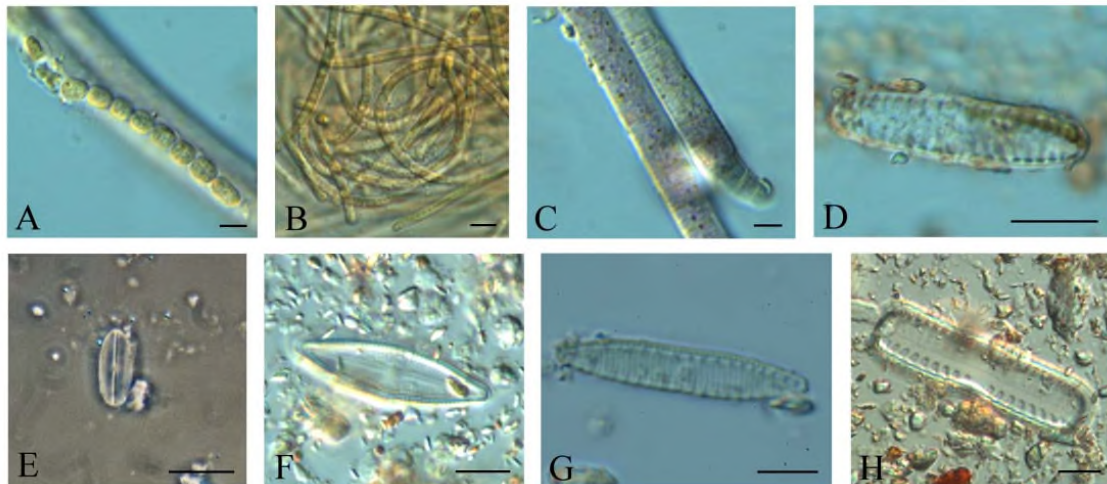


圖 2-16 臺灣中部研究樣區常見的土壤藍綠菌和矽藻 (林敬舒，2014)

A: *Anabaena* sp.、B: *Leptolyngbya* sp.、C: *Oscillatoria irrigua*、
D: *Encyonema leei*、E: *Fistulifera* sp.、F: *Navicula goeppertiana*、
G: *Nitzschia amphibia*、H: *Pinnularia borealis*。Scales bar = 10 μm 。

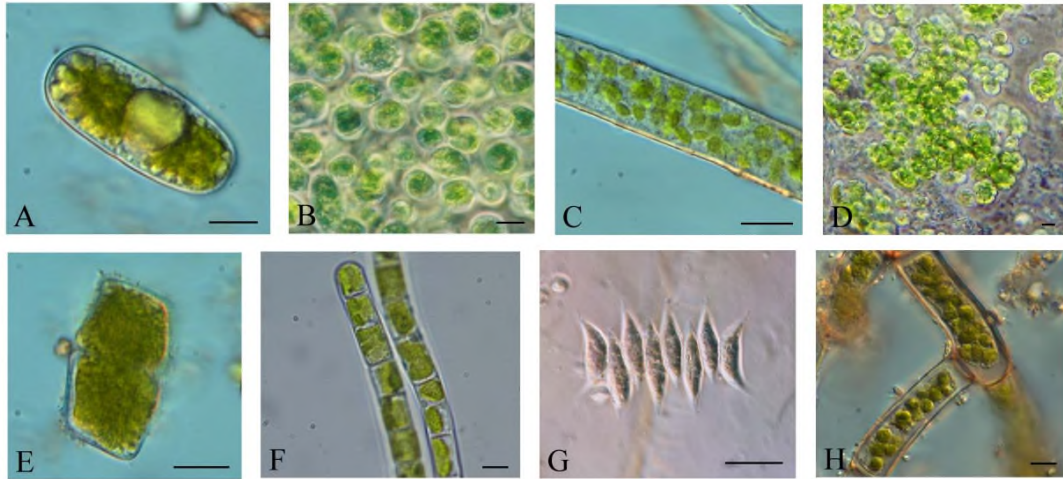


圖 2-17 臺灣中部研究樣區常見的土壤綠藻(林敬舒，2014)

A: *Actinotaenium diplsporum* 、B: *Bracteacoccus* sp. 、C: *Cladophora* sp. 、
D: *Coccomyxa* sp. 、E: *Cosmarium decedens* 、F: *Klebsormidium* sp. 、
G: *Scenedesmus obliquus* 、H: *Ulothrix* sp. ° Scales bar = 10 μ m °

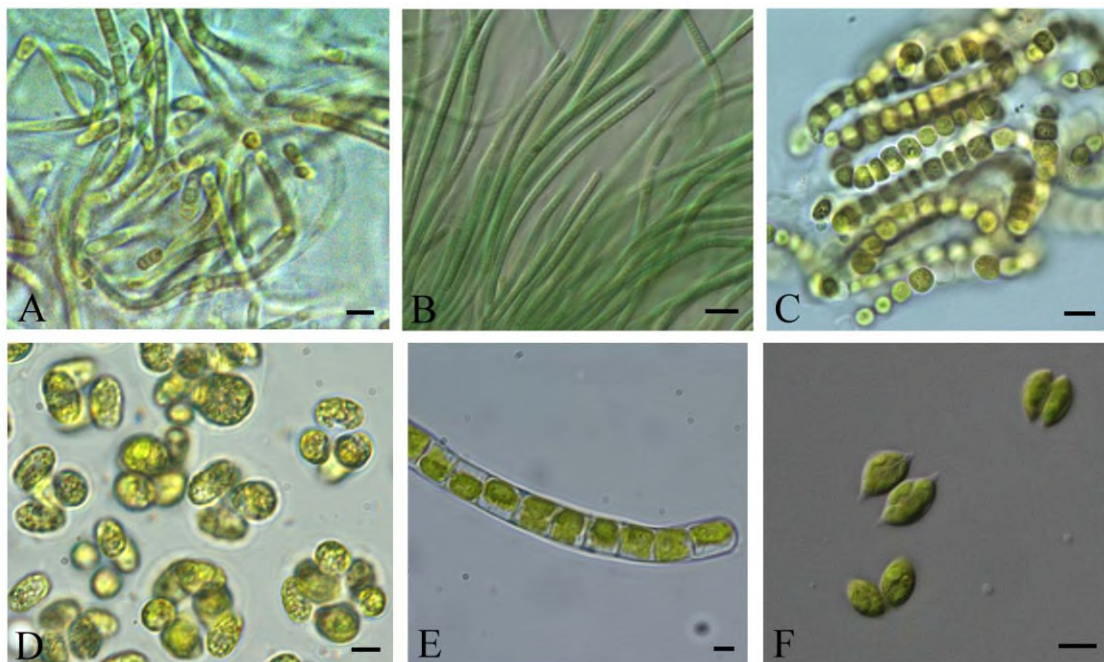


圖 2-18 臺灣中部坡面成功分離培養的土壤藻 (林敬舒，2014)

A: *Leptolyngbya boryana*. 、B: *L. foveolarum* 、C: *Nostoc punctiforme* 、
D: *Chlamydomonas zebra* 、E: *Klebsormidium flaccidum* 、
F: *Scenedesmus obliquus* ° Scales bar = 5 μ m °

生長於極端環境中的生物必須發展出特殊的適應策略用以對抗環境壓力，例如形態、生理或生物化學過程的改變等。行為上的躲避(behavioral avoidance)策略、形態適應(morphological adaptation)、修補受損 DNA、累積可吸收 UV 光的生物酸 (MAAs) 或 色素等，都可能是土壤藻用來對抗有害逆境的保護機制。其中，胞外多醣體(EPS)扮演了相當重要的角色。而該研究推測樣區土壤藻族群的低歧異度主要起因於該生態環境過於嚴峻，表土的土壤藻必需面對過量的輻射、低營養鹽、快速的乾-溼循環(wetting-desiccation)、和經常發生的風化與崩塌等不利條件，造成該環境的土壤藻族群無法穩定成長，亦為土壤藻類的一分佈特性。

三、選擇適當場址施行 BSC 技術，檢視並記錄微藻之生長情況

在微生物族群的研究上，早期依賴直接以顯微鏡觀察或培養的方式，來檢測微生物的形態、生理生化、化學組成差異、生態特性等。但因微生物種類複雜，常有多樣的共生、寄生等關係和特殊的生存條件，且目前對於絕大部分微生物的生理需求與環境的交互作用瞭解相當有限，而微生物培養技術顯然具有嚴重的偏好性問題，因此有高達 80-99%的環境微生物無法在實驗室中成功培養(Amann et al., 1995; Pace, 1997; Torsvik et al., 1998; Ranjard et al., 2000，表 2-4)。

表 2-4 不同環境中成功培養的微生物比例評估(Cowan et al., 2000)

樣區	可成功培養的微生物比例(%)
海水(seawater)	0.001-0.100
淡水(freshwater)	0.25
中度營養湖(mesotrophic lake)	0.1-1.0
乾淨的海口(unpolluted estuarine waters)	0.1-3.0
污泥(activated sludge)	1-15
沉積物(sediments)	0.25
土壤(soil)	0.3

本計畫於年初開始後，隨即連絡日本工營中央研究所，取得生物土壤(BSC)樣品，辦理進口、報關、檢疫及培養等提供試驗用途。然因為一月底中國大陸爆發 COVID-19 疫情，擴散至包括臺灣、日本等地，並造成全球大流行。由於生物土壤(BSC)資材

由日健總本社石垣島的藻類生產基地進行培養及製造，由於交通航班的停駛陷入孤島狀態，日本工營中央研究所所在地的茨城縣由於鄰近疫情最嚴重的東京都，也自三月底宣布除必要人員外均改為居家辦公，造成公務聯絡及樣品取得的困難，原預定 5 月辦理樣品進口的期程，也受到日本全國宣佈緊急事態宣言造成延宕。

由於提供生物土壤(BSC)資材的日健總本社受疫情影響較大，相關聯絡自 2020 年 3 月至 5 月拖延兩個月沒有進展。日本的主要合作單位日本工營中央研究所，聯絡提供前期實驗剩下的乾燥的微藻類樣品(非 BSC 工業資材，但使用藻種相同)提供本計畫先行作業，於 2020 年 5 月 10 日寄達 6 瓶約 120g 的微藻樣品(圖 2-19)，提供前期作業。後續持續與提供生物土壤(BSC)資材的日健總本社聯繫，待恢復生產及運送時，即開始恢復進口、報關、檢疫及培養等作業。由於寄達的乾燥微藻樣品並非已製成工業化資材的產品，遂聯絡熟悉土壤微藻類的林敬舒博士，協助培養並觀察藻類成長狀態。

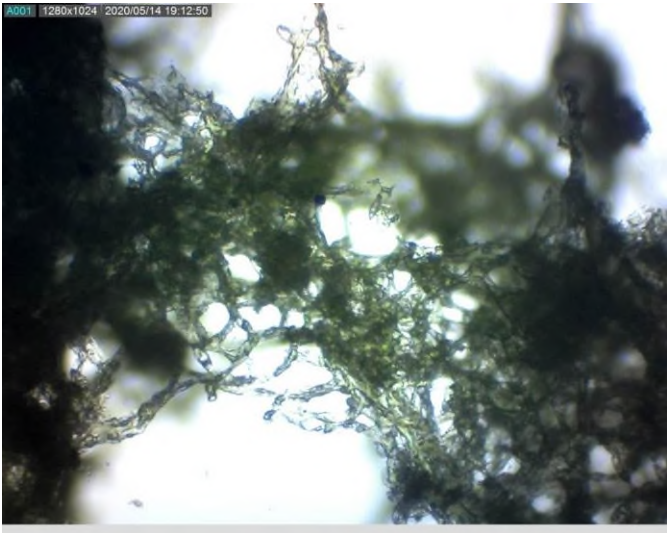
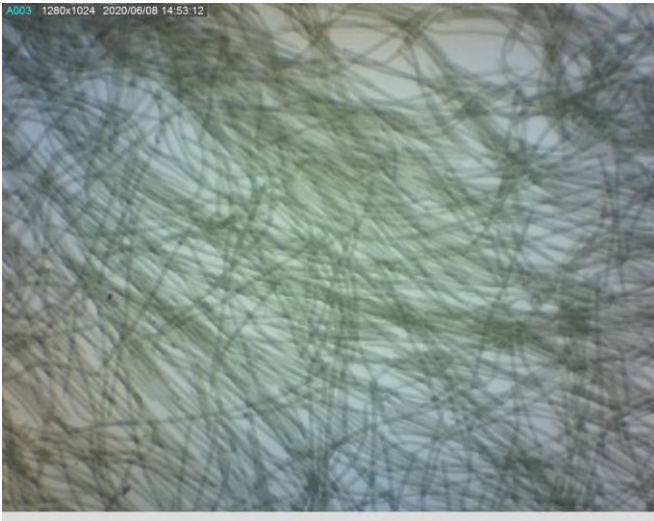


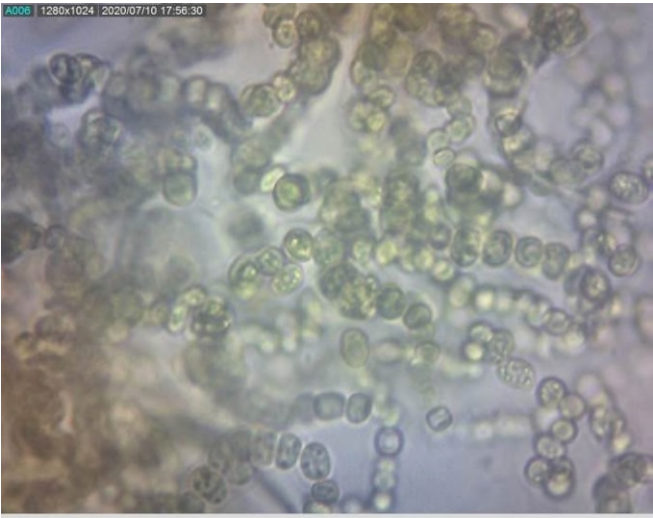
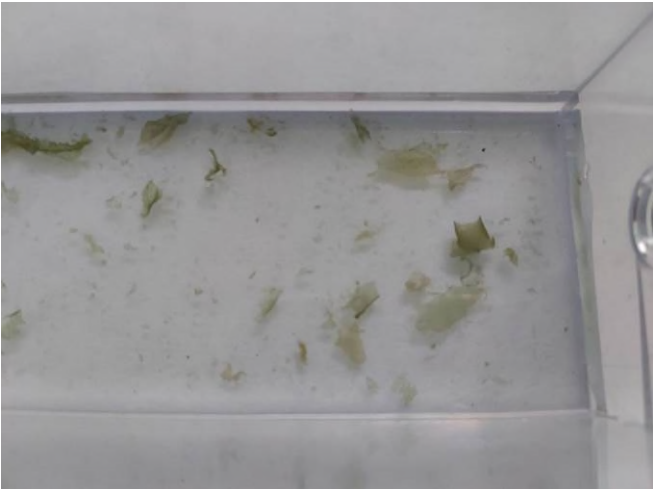
圖 2-19 首批乾燥微藻樣品送抵情形

(一) 藻團培養狀況

日方提供的乾燥微藻樣品，為接近工程施工條件，本次培養未以傳統藻液培養，僅加入清水觀察其變化，經兩個月的培養，完成藻團培養及藻種的辨識。

	2020/05/13 最初狀況 日方所提供的藻團 (algal mat)。此為經乾燥、濃縮過後的培養藻類。
--	---

	2020/05/13 最初狀況 顯微鏡下見此乾燥後的藻團，應為絲狀綠藻。 但此時期的乾燥藻細胞，脫水狀況嚴重，細胞呈變形萎縮狀。
	2020/06/08 一個月後 經純水培養，可見原本不活化、呈休眠狀的絲狀綠藻，已可正常成長，細胞在形態上維持良好狀態。

	2020/07/10 二個月後 除了原本的絲狀綠藻外， 出現另一類優勢藻類-藍綠菌，在水體中呈薄膜狀。
	2020/07/10 二個月後 水體中藍綠菌大量出現。
	2020/07/10 二個月後 肉眼可見膜狀藻團飄浮於水體中。

(二) 直接種植乾燥藻團於表土

直接把最初日方提供的乾燥藻片撒在表土上，藻類無法生存，無法形成 BSC。

	2020/05/25 最初狀況 直接把乾燥藻片撒在表土上，每 2 日加水一次。
	2020/06/08 一個月後 無 BSC 形成
	2020/07/10 二個月後 無 BSC 形成。

對比於林敬舒(2014) 實驗室內，以絲狀藍綠菌 *L. boryana* 進行 BSCs 的建立圖(圖 2-20)日方提供的微藻樣本似乎不適合直接撒播於土壤表面，以清水培養的樣本約 1~2 個月可充分發展，日健總本社的 BSC 資材應包含肥料及其他加強附著及滋養的材料。

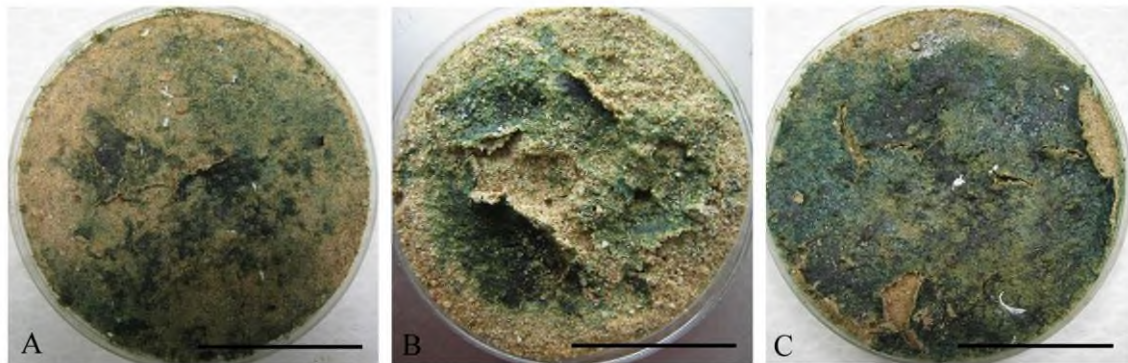


圖 2-20 實驗室以絲狀藍綠菌進行 BSC 的建立圖(林敬舒，2014)

從顯微鏡的觀察結果歸納，日方提供藻團原本就不是無菌狀態，故培養過程也無需保持無菌狀況，因此培養中除了原先最優勢的絲狀綠藻之外，出現其它藻類亦算正常。野外土壤中的主要優勢藻種為綠藻和藍綠菌，即為本次培養出現的兩大類藻群。對生態工法是否成功而言，關鍵不在出現何種藻種，而是出現的該藻種能不能成功於表土成長，進而成功建立 BSC，絲狀藻種的成功機率又顯著大於顆粒狀藻種。

(三)、利用液態培養藻於表土上建立 BSC

除持續聯絡，取得資材化的 BSC 樣本外，本計畫嘗試這些液態培養的藻類移植到表土上，約 1 個月後，生長狀態不明顯，改以兩種

方式(1)液態藻類持續培養及(2)野外採集 BSC 鋪植培養，於兩個月後

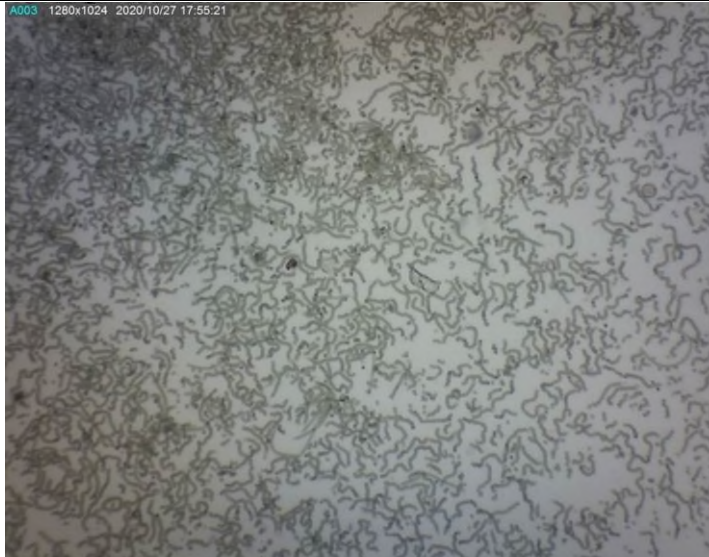
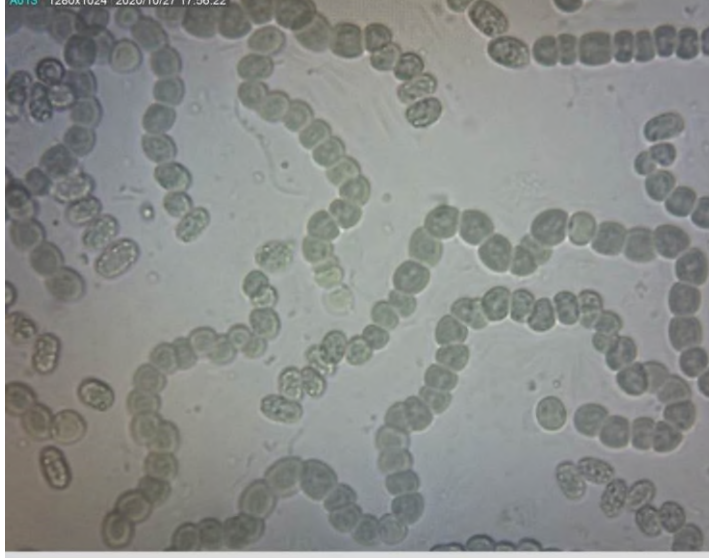
這些藻類在表土拓殖的情況如下圖。

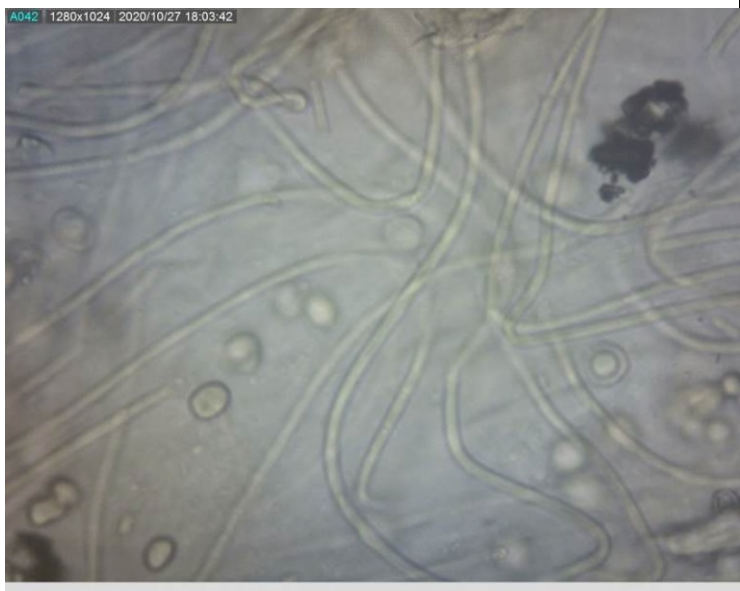
	2020/8/11 以液態培養藻加於裸土表面，一個月後，表土無法長出 BSCs。
	2020/8/11 將液態培養藻中的藻團，直接鋪於裸土表面，1 個月後，這液態培養出的藻類，在表面上拓殖 (比對野生 BSC，如下圖)。藻團成不規則塊狀。



由日方提供的乾燥藻類，以純水培養方式，最終呈現兩大類群。一為深綠色的藻團，主要優勢種為藍綠菌的 *Nostoc*。另一為黃綠色藻團，主要優勢種為綠藻中的小球藻與藍綠菌中的鞘絲藻。(見下圖)

實驗結果，未能如預期養出大量的綠藻 *Klebsormidium*，主要原因為未能有適當的培養液或肥料，用以活化這些乾燥細胞。導致這些原本長出的 *Klebsormidium*，僅在約 1-2 個月之後，就被台灣本地的藍綠菌和綠藻所取代，而這些液態中優勢的藻類，又無法在表土成功拓殖成長，因故導致無法在表土上建立 BSC。為培植降雨試驗用 BSC 樣品，以液態培養藻輔以野外採集 BSC 樣本，進行培育，於 8 月 25 日完成試驗樣品培養，提供降雨試驗樣本使用。

	2020/10/27 液態培養中的深綠色藻團
	2020/10/27 藍綠菌 Nostoc 100×
	2020/10/27 藍綠菌 Nostoc 400×

	2020/10/27 液態培養中的黃綠色藻團
	2020/10/27 長條狀為鞘絲藻，分類上屬於藍綠菌。 圓球狀者為小球藻，分類上屬於綠藻。 100×
	藍綠菌 鞘絲藻 400×

生物土壤(BSC)需要長達數年的時間才可能發展完全，但環境因子卻可能在短時間內即改變 BSC 的發展狀況。水分被公認為是影響土壤生產力與生態系的首要關鍵因子(Davey, 1988; Mazor et al., 1996; Lange, 2003a)，林敬舒(2014)指出，除了大坑樣區的含水量可達 10% 之外，大肚和火炎山各樣區的平均含水量皆明顯低於 5%。同時因為沙質土壤的結構鬆散、孔隙度大、易受侵蝕、保水力差，因此有相對較為快速的乾旱-潮溼週期，即短時間內土壤含水量可達到飽和狀態，但水分的流失也較為快速。土壤含水量直接影響了土壤藻的族群結構，矽藻和金黃藻已知對乾旱的忍受力較差，因此多數乾旱區域和本地研究中的礫岩層、砂頁岩互層等地之土壤，多以藍綠菌和綠藻族群較占優勢，暗示此兩類土壤藻比其它藻群能更有效地使用有限的水源。

四、選擇適當場址施行 BSC 技術，測量土壤沖蝕量，進行 BSC 技術現地試驗。

本計畫已於 2020 年 5 月 7 日前往屏東科技大學針對後續生物土壤(BSC)戶外觀測與試驗設置進行討論與規劃(圖 2-21 及圖 2-22)，校區內除了有緩坡試區外，另外針對不同地形條件之中坡及陡坡也進行現勘及討論(圖 2-23)。

緩坡的試區屬於老埤系(Laopi series, Lo)，為屏東代表性之坡地農業土壤之一；樣區條件為坡長 22.13 公尺，坡度 9%。除了

緩坡試區外，另於屏東科技大學水土保持戶外教室，亦設有中坡土壤沖蝕試區(坡度 40%，坡長 30m，每一試區寬 4m，共可設置 8 個試區)及陡坡土壤沖蝕試區(坡度 60%，坡長 22m，每一試區寬 4m，共可設置 6 個試區)，後續如需針對不同坡度及類型進行實驗設計。

表 2-5 緩坡試驗區規格

試驗區	沖蝕試驗區規格			水槽規格		
	長 (m)	寬 (m)	坡度 (%)	長 (m)	寬 (m)	深 (m)
國立屏東科技大學水土保持系緩坡沖蝕試驗區	22.13	4.0	9.0	0.5	1.0	1.0



圖 2-21 屏科大水保系緩坡試驗區全景及試驗示意圖



(a)緩坡試區現況



(b)氣象紀錄儀器



(c)緩坡試區地表近觀



(d)沖蝕量收集與觀測

圖 2-22 屏東科技大學土壤沖蝕觀測試區現況與規劃



(a)中坡試區全觀



(b)中坡試區近觀



(c)陡坡試區全觀



(d)陡坡試區近觀

圖 2-23 屏東科技大學不同觀測試區情形

由於現地實驗規劃試驗面積約 360 平方公尺，持續與日方商討試驗 BSC 資材的進口，依據面積估算約需 4 公斤的 BSC 材料及配合施工資材。已於 2020 年 9 月 15 日向行政院農業委員會動植物防疫檢疫局提出檢疫申請，並於 2020 年 9 月 23 日獲得批准(防檢四字第 1091491413 號函)。並與日方聯繫相關資材進口事宜，但由於伴隨著 BSC 資材尚有培育用的菌種及藻類，10 月 12 日補件申請進口，本年度因為日方資材生產受限，進口時間延至年底。本項工作調整以已培養完成的小量樣本，改以降雨試驗進

行，正式 BSC 現場試驗，改至後期實驗進行。

五、施行 BSC 技術後，比較土壤樣區之成效並與現有之水土保持措施進行對照，評估 BSC 技術減緩土壤沖蝕之效益與可行性。

本試驗之降雨設備採用緯成企業之現地模擬降雨器，其設備包括蓄水箱(5 L)、過濾器、抽水器、流量控制閥。經由抽水器抽上來的水會先經過過濾器過濾後再往噴頭的不鏽鋼的針管流出才形成雨滴，而模擬降雨有效高度為 2 m，有效降雨面積為 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。在正式模擬降雨前需進行降雨率定，於降雨範圍內放置 25 個直徑為 10 cm 的塑膠量筒，調整流量控制閥之流量為試驗之降雨量後，需預先開啟抽水器進行水壓控制 10 min，在降雨 1 hr 後收集累積雨量並記錄，當降雨分布均勻度高於 80%時，即可進行模擬降雨。

由於考慮到所採用之降雨器高度明顯不足且雨滴粒徑及終端速度皆會影響其雨滴動能，進而影響降雨強度，因此本研究於模擬降雨試驗前，利用位於屏東科技大學之緩坡試驗區內的 OTT Parsivel 雷射雨滴譜儀，於降雨器所模擬的各降雨強度下進行雨滴粒徑 (D)及速度 (V)量測，並累加為一分鐘降雨動能，再將降雨延時內每分鐘降雨動能累加後，推算該場降雨之降雨動能 (E)，其動能公式如公式 2-1 所示。根據 Wischmeier and Smith (1958)所推導的降雨動能公式，將推算出來的降雨動能帶入反推該場降雨強度，如公式 2-2 所示，利用此方式推算降雨器模擬在降雨強度 $30\text{--}100\text{ mm hr}^{-1}$ 下自然降雨強度(其相關公式如公式 2-3 所示，圖如 2-1 所示)，以除去降雨高度不足之誤差。因考慮到雨滴譜偵測雨滴位置離地約 50 cm，因此在模擬降雨前會將降雨機底部架高至與其偵測位高度同高。

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

(2-1)

其中： m =質量(kg)；

v =速度(m/s)。

$$e_i = \begin{cases} 0.119 + 0.0873 \log I_i & \text{for } I_i < 76 \text{ mm h}^{-1} \\ 0.283 & \text{for } I_i \geq 76 \text{ mm h}^{-1} \end{cases}$$

(2-2)

其中： e_i =每公頃單位降雨量之降雨動能(MJ ha⁻¹ mm⁻¹)；

I =降雨強度(mm hr⁻¹)。

$$I_N = 0.803 \times I_S + 1.947$$

(2-3)

其中： I_N =自然降雨強度(mm hr⁻¹)；

I_S =模擬降雨強度(mm hr⁻¹)。

(一) 試驗設計

在進行養治作業前將試驗樣本放置於鐵架上，並調整試驗箱傾斜角度，如圖 2-2 所示；在養治 30 天後，組裝人工模擬降雨機於試驗箱上方進行模擬降雨試驗，如圖 2-3 所示，實驗流程如圖 2-24。

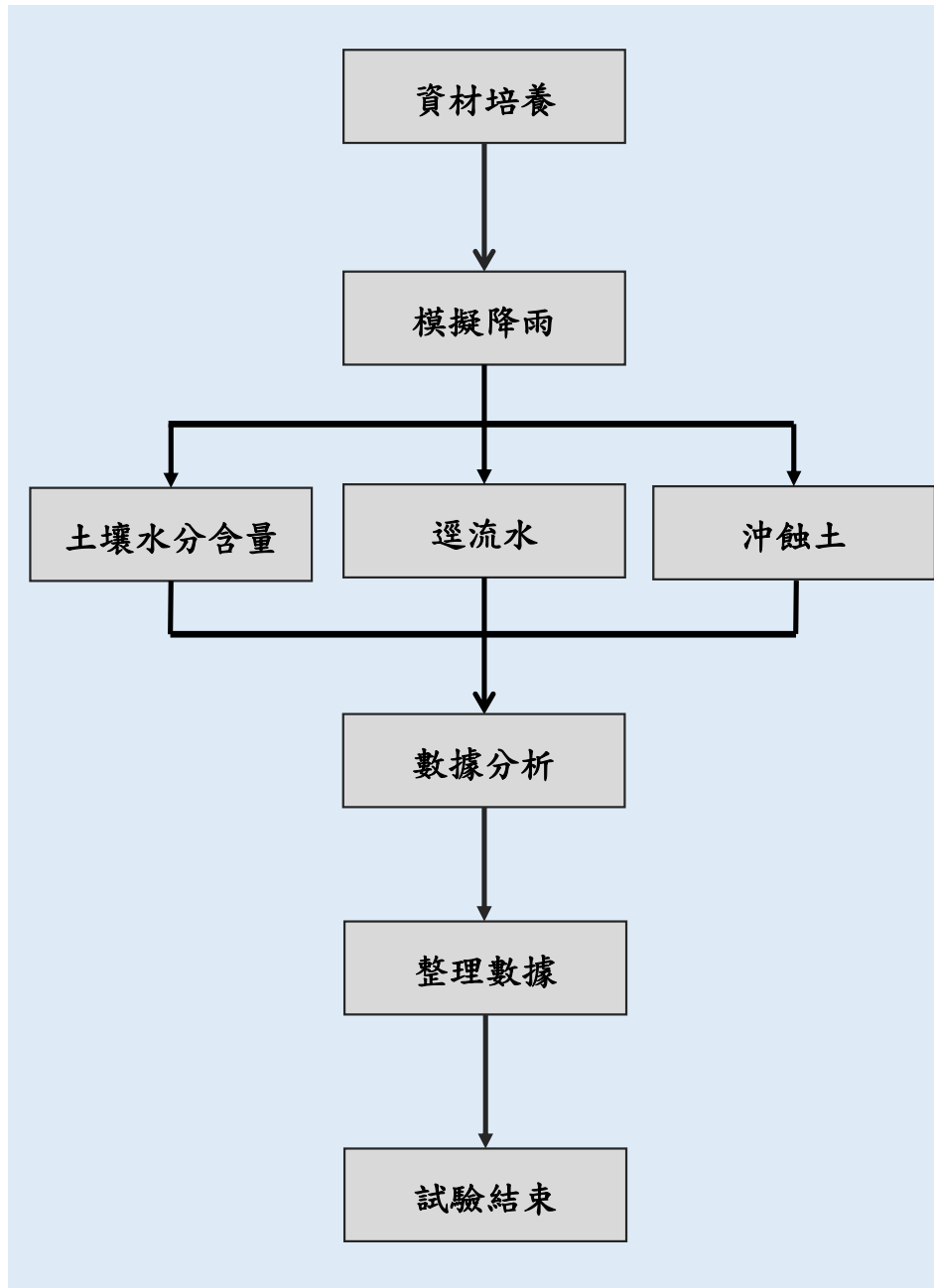


圖 2-24 降雨試驗流程圖

(二) 試驗條件

(1) 研究區域

本計畫試驗時間為 2020 年 9 月 8~9 日，地點位於國立屏東科技大學水土保持系館旁空地，試驗期間環境溫度約為 27.3℃。

(2) 試驗箱

本試驗之試驗箱採用密封的六格儲運箱，其內部規格為長為長 57.5 cm，寬 38.9 cm，深 30 cm，試驗箱的底部每隔 1.5 cm 鑽一孔 (直徑約 2 mm)。首先於試驗箱中間黏一隔板，將其隔為兩個空間，之後於底部鋪一層紗網 (孔徑為 1 mm) 後，再均勻盛裝石英砂 (粒徑為 1-2 mm) 達 5 cm 深，使滲漏下來的溶液可通過並可防止上方的土樣順其孔洞而流失。在每一試驗箱中盛裝約 50 kg 土壤樣本達 25 cm 深 ($BD = 3 \text{ g/cm}^3$)，土壤樣本為覆蓋藻類之土壤(BSC)以及無覆蓋藻類土壤(CK)做對照組。

(3) 試驗坡度

本研究考慮到模擬降雨試驗中需進行地表逕流及滲流的收集，坡度不可太緩亦不可太陡，因此採用二級坡平均值 $10^\circ(17.6\%)$ 作為模擬降雨試驗之坡度。

(4) 降雨強度

根據臺灣降雨事件發生機率統計可發現，超過 99% 的降雨強度皆低於 50 mm hr^{-1} ，因此本次試驗模擬降雨試驗以降雨機降雨強度設定為 59.8 mm hr^{-1} ，以模擬 50 mm hr^{-1} 之自然降雨強度。已於 8 月 25 日取得培養完成之藻種土壤樣本，開始試驗，並依試驗結果，進行比較與分析。

(三) 試驗步驟

- (1) 準備一密封的六格儲運箱將其由長邊分為兩個體積相等的區域，將有藻類覆蓋土壤及無藻類土壤填入箱中並稍微夯實(使兩試體之總體密度均達到 3 g/cm^2)，並將試體加入等量的水當作初始含水量，再以鐵架將試驗箱以鐵架架起，使下方有空間放置收集桶，最後再試驗箱上方覆蓋塑膠布，避免試體被外界干擾；



圖 2-25 試驗箱外觀



圖 2-26 藻類覆蓋(左)及無藻類覆蓋(右)

- (2) 準備一水槽放置於地上供應降雨機用水，並在水槽內放置沉水式抽水馬達與降雨機相連(注意水槽與降雨機之間的高度及水槽水量，避免超出抽水馬達負荷或水量不足，導致水壓過低導致模擬強度改變)；



圖 2-27 沉水式抽水馬達與水槽

- (3) 於平整空地上放置穩定性較佳及符合樣本高度的塑膠箱，在其上方組裝降雨機(有效降雨範圍 1m * 1m)，組裝完畢後調整水平，當結構以及管線架設完畢將通水量設置至最大，檢查降雨機針頭有無不穩，再將其關閉；



圖 2-28 檢查降雨機針頭穩定



圖 2-29 確認管線均連接妥當

- (4) 將降雨機律定至降雨強度 60 mm/hr-1(確保在有效降雨範圍內之降雨強度均可均勻達到設定值)；
- (5) 將覆蓋帆布之試驗箱移動至降雨機下方，調整試體坡度至 10
- (6) 度，並於試驗箱前方放置收集桶(預先以電子秤量好空桶重量)；

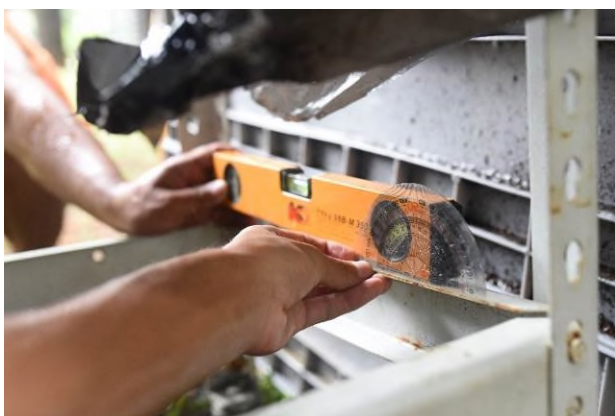


圖 2-30 調整試體箱坡度



圖 2-31 將試體箱移至降雨機下方

- (7) 待雨滴穩定之後，將覆蓋迅速移開即開始試驗；



圖 2-32 試驗開始

(8) 降雨試驗開始後以 5、10、20、30、60 及 120 min 作為時間節點進行下面步驟；

- i. 於該時段以土壤水分測量儀之時域反射法(Time DomBSCin Reflectometer, TDR)的方式測量土壤水分含量(每次隨機取試體三處以上測定)；
- ii. 更換沖蝕土與逕流水收集桶，並將換下之收集桶秤重；



圖 2-33 更換收集桶後秤重



圖 2-34 TDR 量測土壤水分含量

(9) 將收集桶內沖蝕土用水洗入耐高溫的容器內，放入 105°C 烘箱內烘乾，烘乾後秤其重量扣除容器空重可得到沖蝕土重；



圖 2-35 沖蝕土洗入容器



圖 2-36 放入 105°C烘箱

(四) 試驗結果

(1) 土壤含水量

本計畫以隨機選定三處以上位置的方式用 TDR 測定土壤水分含量，其平均值即為土壤水分含量，開始模擬降雨前先測定土壤水分初始含量，並在開始降雨後在 5min、10min、20min、30min、60min 以及 120min 時間節點當下進行土壤水分含量的測定，土壤含水量的變化如表 2-6 及圖 2-37 所示。

在試驗開始前無藻類覆蓋對照組(CK)的初始含水量為 6.5%，有藻類覆蓋處理的土壤(BSC)為 5.9%，在試驗開始 10 分鐘至 20 分鐘為兩處理含水量變化最多的時段，而在 30 分鐘之後兩處理之土壤含水量均趨於飽和成長趨緩，兩者不同的是 CK 土壤含水量開始緩緩下滑，但 BSC 之土壤含水量卻呈現緩慢上升趨勢，在約 80 分鐘時 CK 土壤含水量低於 BSC 的含水量，推測為藻類覆蓋可使雨水暫留於土壤表面，進而達到減緩雨水入滲速度的效果，而無藻類覆蓋的 CK 為裸露地入滲速度較快導致前 20 分鐘含水量快速的上升了 24.3%趨近飽和，且滲漏速度大於入滲速度導致含水量呈現下降趨勢，CK 的土壤含水量

在 20 分鐘時來到最高 30.8%，而 BSC 最高點則是在 2 小時的 31.1%，代表兩個樣本的最大含水量是差不多的，此結果顯示在土壤表面覆蓋生物土殼(BSC)有助於控制土壤的入滲速度。

表 2-6 BSC 降雨試驗土壤含水量試驗結果表

樣本	降雨延時(min)						
	0	5	10	20	30	60	120
	土壤含水量(%)						
CK	6.5±1.2	18.9±1.6	22.3±5.9	30.8±2.5	29.7±5.4	28.8±3	28.6±3.8
A	5.9±0.7	12.3±0.9	15.4±1.5	26.8±5	26.5±2.1	27±4.8	31.1±2.4

CK為無藻類覆蓋土壤，A為藻類覆蓋之土壤；

0min 為試驗開始前之初始含水量

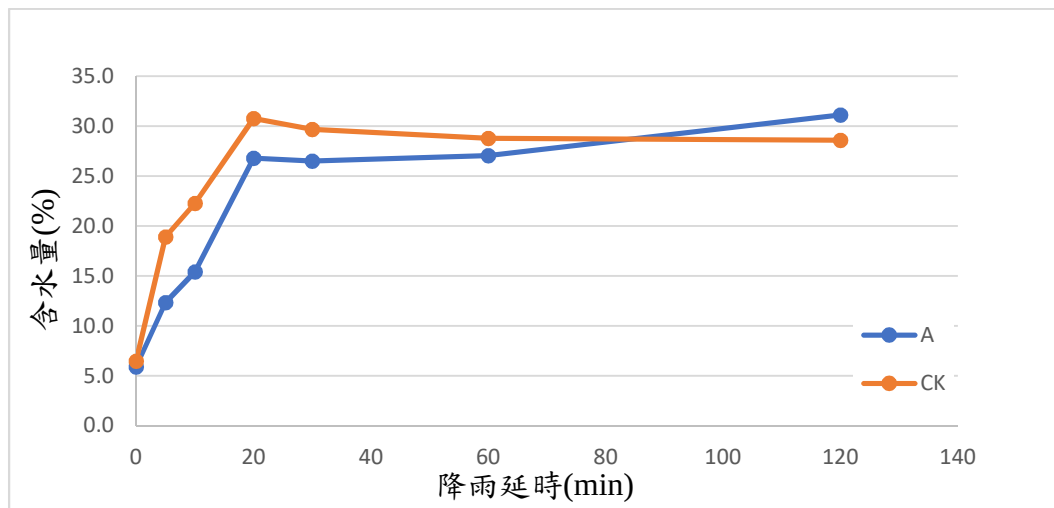


圖 2-37 BSC 降雨試驗土壤水分含量試驗結果圖

(2) 土壤沖蝕量

本計畫在試驗開始前先量秤 5min、10min、20min、30min、60min 以及 120min 時間節點之收集桶空重，在時間節點當下更換下一時間點的收集桶，並量秤換下收集桶的重量，再準備良好空重的耐高溫容器，將桶內沖蝕土淋洗製容器內並放入 105°C 的烘箱內烘乾 24hr，扣除其容器空重即可得到沖蝕土重，累積土壤沖蝕量的變化由表 2-7 及圖 2-38 所示。

在試驗開始的前 10 分鐘收集桶均沒有收集到沖蝕土，直到 20 分鐘開始出現沖蝕土，並在 30 分鐘後兩處理出現顯著的差異，CK 的累積沖蝕土量呈現倍數成長，到兩小時後共沖蝕了 181.2g 的土壤，而 BSC 直至 2 小時只沖蝕了 17.4g 的土壤，推測其結果是因為生物土殼(BSC)覆蓋於地表，使雨水不會直接擊打到土壤表面造成沖蝕，有效的控制住沖蝕現象。

表 2-7 BSC 降雨試驗土壤沖蝕量試驗結果表

樣本	降雨延時(min)					
	5	10	20	30	60	120
	累積土壤沖蝕量(g)					
CK	0	0	1.5	8.1	74	181.2
BSC	0	0	0.1	2.4	4	17.4

CK為無藻類覆蓋土壤，BSC為藻類覆蓋之土壤；

0min 為試驗開始前之初始沖蝕量

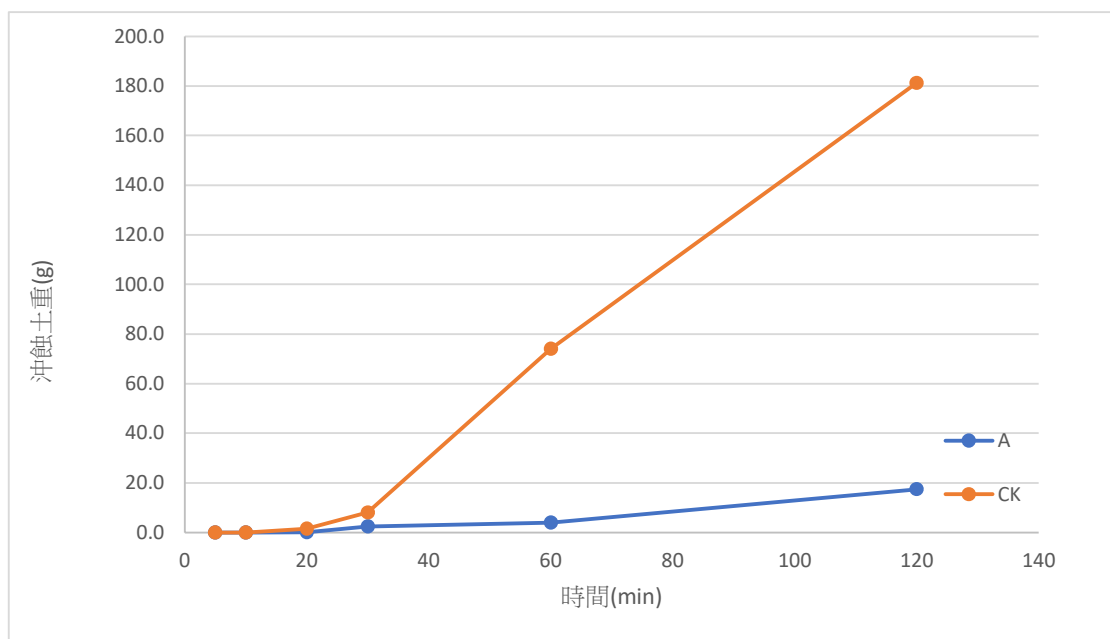


圖 2-38 BSC 降雨試驗土壤沖蝕量試驗結果圖

(3) 土壤逕流量

本計畫在試驗中逕流水與沖蝕土為同時收集，將收集桶的總重扣除沖蝕土及空收集桶的重量後即可得到逕流量，累積逕流量變化可由表 2-8 及圖 2-39 所示。

試驗開始後的前 30 分鐘兩處理的逕流水成長曲線相似，30 分鐘後 CK 的逕流量開始明顯高於 BSC，推測 BSC 有藻類覆蓋使一些雨水滯留在土壤表面，進而減少逕流的產生，所以由結果來看在土壤表面種植生物土殼(BSC)是有助於減少逕流量的。

表 2-8 BSC 降雨試驗土壤逕流量試驗結果表

樣本	降雨延時(min)					
	5	10	20	30	60	120
	累積逕流量(g)					
CK	44.2	45.6	213.9	512.7	2433.6	6988.6
BSC	18.8	30.2	104.5	475.2	2153.8	5763.2

CK為無藻類覆蓋土壤，BSC為藻類覆蓋之土壤；

0min 為試驗開始前之初始逕流量

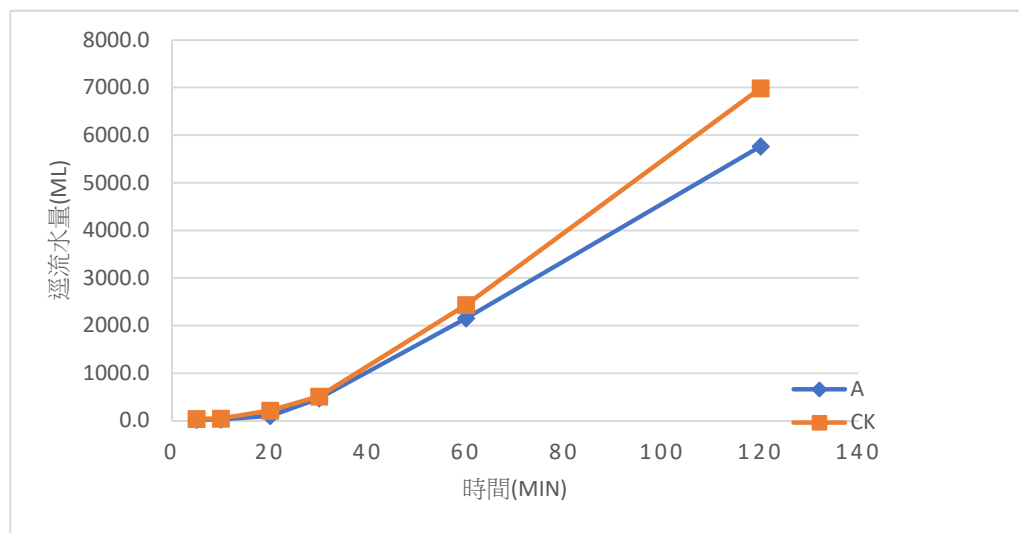


圖 2-39 BSC 降雨試驗土壤逕流量試驗結果圖

從試驗結果中可以得知生物土壤(BSC)對於土壤沖蝕的降低確實提供明顯的效果，經過 15 分鐘的降雨約為 1/15、30 分鐘為 1/4、一個小時約為 1/20 到兩個小時的降雨沖蝕量約減為 1/10，而對於土壤含水量及逕流量的變化生物土壤(BSC)提供跟一般植生效果近似的保護效果，對於植生較困難的泥岩區確實可進行後續試驗，評估其保護效果。

第三章 工作進度與交付項目

第一節 計畫甘特圖

本計畫執行將依水土保持局創研計畫相關規定辦理，預定於 109 年 4 月 14 日繳交期初工作執行計畫書，7 月 31 日繳交期中報告書，11 月 13 日繳交期末報告書，12 月 25 日繳交成果報告書，執行規劃如下表。

表 3-1 計畫進度及執行項目規劃表

重要工作項目	工作比重 %	預定進度	109				備註
			1-3月	4-6月	7-9月	10-12月	
研發基礎資料蒐集 / 調查 / 分析之資料筆數	15	工作量或內容	蒐集相關資料並進行文獻回顧	蒐集相關資料並進行文獻回顧	分析降雨事件之土壤沖蝕量	分析降雨事件之土壤沖蝕量	
		累計百分比	25	50	75	100	
引進生物土壤 (BSC) 技術	15	工作量或內容	與日本工營研發中心洽談技術授權等				
		累計百分比	100	100	100	100	
建立示範區	20	工作量或內容	規劃與設計 BSC 減緩土壤沖蝕之試驗區	建立 BSC 減緩土壤沖蝕之試驗區			
		累計百分比	50	50	100	100	
現地培養及試驗	30	工作量或內容		於現地監測 BSC 之生長情況並測量其土壤沖蝕量	於現地監測 BSC 之生長情況並測量其土壤沖蝕量	於現地監測 BSC 之生長情況並測量其土壤沖蝕量	
		累計百分比	0	33	67	100	
技術報告	20	工作量或內容				綜合評估 BSC 技術於減緩土壤沖蝕之成效，並與其他現有之水土保持措施進行比較	
		累計百分比	0	0	0	100	
累計總進度	百分比		29	42	66	100	

第二節 計畫交付項目

本計畫之執行，預定產出成果包含

1. 研發基礎資料蒐集：預定 1 項，蒐集生物土壤技術相關資料，進行文獻蒐集整理，並收集並分析 38 筆降雨試驗之土壤沖蝕量、土壤含水量及土壤逕流量等相關資料。
2. 引進技術及水土保持管理創新作為：預定引進生物土壤 (BSC) 技術 1 項及建立建立示範區 1 處。
3. 技術報告撰述： 1 篇。

表 3-2 計畫交付項目及執行進度表

重要工作項目	工作數量				預算金額(千元)		實施地點	備註
	單位	全程計畫目標 109 年 02 月至 109 年	至 108 年度止累計	本年度預定目標	水保局經費	其他配合經費		
研發基礎資料蒐集/調查/分析之資料筆數	筆	20	0	20	100	0		蒐集相關資料進行文獻回顧，並預計收集並分析 20 場降雨之土壤沖蝕量
引進生物土壤 (BSC) 技	項	1	0	1	100	0		
建立示範區	區	1	0	1	150	0		
現地培養及試驗	件	1	0	1	300	0		
技術報告	篇	1	0	1	25	0		

第四章 執行成果及後續建議

第一節 執行成果

本年度計畫，主要完成（一）與日本工營洽談 BSC 技術授權並將該技術引進至臺灣；（二）生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕發展現況蒐集與彙整；（三）利用現有之土壤沖蝕試驗場種植 BSC 技術之微藻，並記錄其生長狀況等工作及（四）施行 BSC 技術後，比較土壤樣區之成效並評估 BSC 技術減緩土壤沖蝕之效益與可行性。以下針對本年期計畫完成之主要工作項目進行說明：

（一）與日本工營洽談 BSC 技術授權並將該技術引進至臺灣

自計畫啟動後，持續與日本工營株式會社與日健總本社討論與修正合作備忘錄項目與細節，並於 2020 年 4 月 8 日加入印尼日惹大學及馬來西亞科技大學，成為跨越日本、臺灣、印尼及馬來西亞等 4 國 5 個代表單位的跨國合作計畫。BSC 技術合作備忘錄於 2020 年 6 月 4 日完成擬訂作業，並於 2020 年 9 月 20 日完成所有單位的審視及簽署，正式啟動兩年期（2020/10/1~2022/9/30）四國五個代表單位的跨國合作計畫。完成簽署之合作備忘錄如附錄四。

（二）生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕發展現況蒐集與彙整

針對生物土壤技術相關的文獻及技術報告等，進行廣泛的蒐

集與彙整，並針對工作計畫書中委員建議，增加對臺灣生物土壤相關現況資料進行蒐集。分別針對(1) 生物土壤的組成及特性、(2) 本生物土壤的研究歷程、(3) 日本生物土壤工法的發展及(4) 臺灣生物土壤及土壤藻類的研究進行文獻的回顧與整理。透過文獻資料的彙整，重新架構對生物土壤技術的認識，以及瞭解臺灣生物土壤的研究現況，提供探討日本生物土壤技術於臺灣試用性的重要基礎。

(三) 利用現有之土壤沖蝕試驗場種植 BSC 技術之微藻，並記錄其生長狀況

受限於 COVID-19 疫情的大流行導致取得日本生物土壤資材的延宕，已轉透過日本工營中央研究所，於 5 月 10 日取得試驗用微藻樣品(日健總本社工業化資材的產品持續聯絡取得中)，並藉由熟悉臺灣土壤微藻類的林敬舒博士，協助培養並觀察藻類成長狀態。分別透過(1) 清水藻團培養狀況、(2) 表土種植藻團及(3) 利用液態培養藻於表土上拓殖等三種方式，透過顯微鏡觀察生物土壤的發展過程，並清楚鑑別出藻種與發展環境及型態。

(四) 選擇適當場址進行 BSC 技術現地試驗

已完成屏東科技大學 BSC 技術現地試驗試區(緩坡試區)，進行現場勘查與配置。另於屏東科技大學水土保持戶外教室，亦設

有中坡土壤沖蝕試區(坡度 40%)及陡坡土壤沖蝕試區(坡度 60%)，針對不同坡度及類型進行實驗設計。現地實驗規劃試驗面積約 360 平方公尺，持續與日方商討試驗 BSC 資材的進口，依據面積估算約需 4 公斤的 BSC 材料及配合施工資材。本年度因為日方資材生產受限，進口時間延至年底。本項工作調整以已培養完成的小量樣本，改以降雨試驗進行，正式 BSC 現場試驗，改至後期實驗進行。

(五) 試驗比較 BSC 之成效評估減緩土壤沖蝕之效益與可行性

已於 2020 年 8 月 25 日完成生物土壤(BSC)試驗樣本培養，並於 2020 年 9 月 8~9 日組裝人工模擬降雨機於試驗箱上方進行模擬降雨試驗。並依試驗結果，進行比較與分析。從試驗結果中分析得出生物土壤(BSC)對於土壤沖蝕的降低確實提供明顯的效果，經過 15 分鐘~2 小時的降雨沖蝕量可降低為 $1/4 \sim 1/20$ ，而對於土壤含水量及逕流量的變化生物土壤(BSC)提供跟一般植生效果近似的保護效果，對於植生較困難的泥岩區確實可進行後續試驗，以評估 BSC 技術減緩土壤沖蝕之效益與可行性。

第二節 後續建議

本計畫雖因本年度 COVID-19 疫情關係，影響到原有生物土壤(BSC)試驗資材的進口，改以取得試驗藻種提前進行對生物土壤(BSC)藻種及發展環境及型態的研究，透過生物土壤(BSC)本質的認識，更能掌握後續工業化生產生物土壤(BSC)的運用特性，以下針對本年度計畫執行的經驗提出歸納建議，提供後續相關研究者參考。

(一) 與日本工營洽談 BSC 技術授權並將該技術引進至臺灣

本次引進之生物土壤(BSC)資材與技術，因為事涉研究專利及技術，自計畫啟動後，持續與日本工營株式會社與日健總本社討論與修正牽涉到相當複雜的智慧財產權與商業合作規定。並由於本項合作擴大為四國五個代表單位的跨國合作計畫，透過合作備忘錄的討論及協商，瞭解了國際技術合作的注意要項與利害衝突，專利登記及技術工法登錄，本次 BSC 技術授權並將該技術引進的過程可提供其他相關作業的參考。

(二) 生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕發展現況蒐集與彙整

針對生物土壤技術相關的文獻及技術報告等，日本工營株式會社與日本土木研究所進行了各項基本研究及實務應用，開發歷程考慮周密且在配合的供應廠商上同步培植。從 1995 年沖繩縣紅土沖蝕問題研究到 2009 年專利登記，再從 2015 年開始推展海

外技術輸出及服務，至今年與包括台灣的東南亞頂尖研究單位跨國合作，都有其短、中、長期技術戰略布局的規劃與推進，值得未來台灣水保及防災技術輸出的歷程參考。

(三) 利用現有之土壤沖蝕試驗場種植 BSC 技術之微藻，並記錄其生長狀況

利用本土生物土壤(BSC)的前期研究經驗，針對日方提供的微藻樣本似乎不適合直接撒播於土壤表面，雖然以清水培養的樣本約 1~2 個月可充分發展，但真實應用於坡面工法的 BSC 資材應包含肥料及其他加強附著及滋養的材料。對生物土壤(BSC)是否成功而言，從本年期的培養及觀察經驗，關鍵不在出現何種藻種，而是出現的該藻種能不能成功於表土成長，進而成功建立 BSC，絲狀藻種的成功機率又顯著大於顆粒狀藻種。

(四) 試驗比較 BSC 之成效評估減緩土壤沖蝕之效益與可行性

生物土壤(BSC)的技術，透過降雨試驗成果的觀察：(1)覆蓋於地表，有助於控制土壤入滲速度、(2)覆蓋於地表，使雨水不會直接打擊到表面造成沖蝕、(3)覆蓋於地表，有助於減少逕流速度。這些特性都符合植生保護的特性，如果能夠藉由生物土壤(BSC)資材及工法的輔助，儘速完成生物土壤(BSC)的培植，對於植生較困難的泥岩區確實可進行後續試驗，評估其保護效果。

參考文獻

1. 行政院農業委員會水土保持局，1996，土壤流失量估算手冊，行政院農業委員會水土保持局編印。
2. 李德河、紀雲曜、田坤國，1994，泥岩之基本特性及泥岩邊坡之保護措施，地工技術雜誌，48：35-47。
3. 林俐玲、杜怡德、王仲豪，2001，土壤質地與 K 值相關性及空間變異性之探討—以東勢、國姓區塊為例，水土保持學報 33：105-122。
4. 林昭遠，1997，集水區泥岩裸露邊坡植生復育之研究，水土保持學報，29：169-181。
5. 林信輝，1999，泥岩集水區治理策略之探討，泥岩地區整治與植生綠化研討會論文集，pp2-3。
6. 林敬舒，2014，臺灣中部高侵蝕惡地生物土殼的藻類歧異度與水份逆境之生理效應，臺灣大學生態學與演化生物學研究所學位論文，共 283 頁。
7. 陳時祖，2002，臺灣西南部地區泥岩之地質災害及防治方法，臺灣西南地區地質災害研討會論文集，pp.7-1~7-9。
8. 陳時祖、李元富、劉裕聰，1984，臺灣西南部泥岩坡地沖蝕特性之研究（1），國科會防災報告，73-07 號。
9. 萬鑫森、黃俊義，1983，臺灣南部土壤沖蝕性及流失量之估算，中華水土保持學報，14:21-28。
10. 邱創益，1985，台灣西南部青灰岩（泥岩）裸露地植生復原之研究，屏東農專學報，26（3），pp. 59~86。
11. 邱盈達、黃國禎、吳昌翰，2007，不同草類覆蓋下泥岩土壤與紅壤理化性質之探討，水土保持學報 39 (4)，pp. 355 - 369。
12. 簡士豪、陳俊元、簡廷澍，2015，生物炭添加對泥岩地區非點源污染之改善，土壤及地下水污染整治 2 卷 4 期，pp. 317 - 327。

13. 顏富士、蔡縊輝。1985，台灣西南部主要泥岩坡地所含粘土之物化特性研究，行政院國家科學委員會防災科技研究報告 73-26 號。
14. 陳盟文，2006，土胎植生工法於泥岩護坡成效之研究，成功大學土木工程學系學位論文 pp. 1-124。
15. Baldock, J.A, Smernik, R.J. 2002. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Geochemistry* 33, pp. 1093–1109. doi: 10.1016/S0146-6380(02)00062-1.
16. 小山内信智、田中秀基、桜井亘、下村幸男（2004）：菌類等を利用した侵食対策手法に関する研究、平成 16 年度砂防学会研究発表会、P067、pp.376-377
17. 溝渕綾、中野武登、下村幸男、富坂峰人、長谷川啓介（2004）：ラン藻を利用した土壤微粒子流出防止に関する研究：土木学会第 59 回年次学術講演会、7-157、pp.313-314
18. U.S.D.I. Bureau of Land Management (2001): BIOLOGICAL SOIL CRUST: ECOLOGY AND MANAGEMENT, Technical Reference 1730-2
19. 栗原淳一，田方 智，寺田秀樹，下村幸男，富坂峰人，小林 豊：菌類等による土壤侵食抑制効果，平成 18 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.444～445（2006）
20. 富坂峰人：バイオロジカル・ソイル・クラストを用いた侵食防止対策，農業農村工学会誌 79（1），p.36-37，2011
21. 日本工営株式会社，侵食防止及び植生の自然侵入促進をはかる土壤藻類資材，国土交通省新技術情報提供システム，OK - 170002，2018.
22. 小島壘・大澤和敏・藤澤久子・富坂峰人・松井宏之：藻菌類の土壤被覆による土壤侵食抑制対策の評価、平成 29 年度農業農

- 村工学会大会講演会要旨集、pp.688~689、2017
23. Anthony, O. and G. Heike. 1999. 16S rDNA methods in soil microbiology. *Curr. Opin. Biotech.* 10: 225-229.
 24. Liu, Y. D. and S. H. Ley. 1989. Species composition and vertical distribution of blue-green algae in ricefield soil, Hubei, China. *Nova Hedwigia* 48: 55-67.
 25. Evans, R. D. and J. R. Johansen. 1999. Microbiotic crusts and ecosystem processes. *Crit. Rev. Plant Sci.* 18: 183-225.
 26. Garcia-Pichel, F., S. L. Johnson, D. Youngkin and J. Belnap. 2003. Small-scale vertical distribution of bacterial biomass and diversity in biological soil crusts from arid lands in the Colorado Plateau. *Microbiol. Ecol.* 46: 312-321.
 27. Metting, B. 1981. The systematic and ecology of soil algae. *Bot. Rev.* 47: 195-312.
 28. Lukešová, A. 1993. Soil algae in four secondary successional stages on abandoned fields. *Algol. Stud.* 71: 81-102.
 29. 胡春香、劉永定、宋立榮。1999。寧夏沙坡頭地區の旅類植物及其分佈。水生生物學報 23：443-448。
 30. 胡春香、劉永定。2003。土壤藻生物量及其在荒漠結皮的影響因子。生態學報 23：284-291。
 31. Lan, S., L. Wu, D. Zhang and C. Hu. 2012b. Successional stages of biological soil crusts and their microstructure variability in Shapotou region (China). *Environ. Earth. Sci.* 65: 77-88.
 32. Pointing, S. B. and J. Belnap. 2012. Microbial colonization and controls in dryland systems. *Nat. Rev.* 10: 551-562.
 33. Mazor, G., G. J. Kidron, A. Vonshak and A. Abeliovich. 1996. The role of cyanobacterial exopolysaccharides in structuring desert

- microbial crusts. *FEMS Microbiol. Ecol.* 21: 121-130.
34. Stal, L. J. 2000. Cyanobacterial mat and stromatolites. In: B. A. Whitton and M. Potts (eds.). *The Ecology of cyanobacteria: their diversity in time and space*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 88-90.
 35. Xie, Z., Y. Liu, C. Hu, L. Chen and D. Li. 2007. Relationships between the biomass of algal crusts in fields and their compressive strength. *Soil Biol. Biochem.* 39:567-572.
 36. Belnap, J. 2001. Factors influencing nitrogen fixation and nitrogen release in biological crusts. In: J. Belnap and O. L. Lange (eds.). *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer, Berlin Heidelberg, Germany. pp. 241-261.
 37. Schulten, J. A. 1985. Soil aggregation by cryptogams of a sand prairie. *Am. J. Bot.* 72:1657-1661.
 38. Cowan, D. A. 2000. Microbial genomes - the untapped resource. *Trends Biotechnol.* 18:14-16.
 39. Eldridge, D. J., E. Zaady and M. Shachak. 2000. Infiltration through three contrasting biological soil crusts in patterned landscape in the Negev, Israel. *Catena* 40: 323-336.
 40. Hu, C., Y. Liu, L. Song and D. Zhang. 2002a. Effect of desert soil algae on the stabilization of fine sands. *J. Appl. Phycol.* 14: 281-292.
 41. Hu, C. X., Y. D. Liu, D. L. Zhang, Z. B. Huang and B. S. Paulsen. 2002b. Cementing mechanism of algal crusts from desert area. *Chin. Sci. Bull.* 47: 1361-1368.
 42. Mager, D. M. and A. D. Thomas. 2011. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: a review of their role in dryland soil processes. *J. Arid Environ.* 75: 91-97.

43. Tchan, Y. T. and J. N. A. Whitehouse. 1953. Study of soil algae II. The variation of the soil algal population in sandy soils. *Pro. Linn. Soc. New. South Wales* 78: 160-170.
44. McKenna-Neuman, C., C. Maxwell and J. W. Boulton. 1996. Wind transport of sand surfaces crusted with photoautotrophic microorganisms. *Catena* 27: 229-247.
45. Thomas, A. D. and A. J. Dougill. 2007. Spatial and temporal distribution of cyanobacterial soil crusts in the Kalahari: implications for soil surface properties. *Geomorphology* 85: 17-29.
46. Belnap, J. and D. A. Gillette. 1997. Disturbance of biological soil crusts: impacts on potential wind erodibility of sandy desert soils in southeastern Utah. *Land Degrad. Develop.* 8: 355-362.
47. Belnap, J. and D. A. Gillette. 1998. Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance. *J. Arid Environ.* 39: 133-142.
48. Alexander, R. W. and A. Calvo, 1990. The influence of lichens on slope processes in some Spanish badlands. In: J. B. Thornes (eds.). *Vegetation and Erosion*. John Wiley and Sons, Ltd. Chichester, England. pp. 385-398.
49. Ladyman, J. A. R. and E. Muldavin. 1996. Terrestrial cryptogams of pinyon-juniper woodlands in the southwestern United States: A review. USDAFS General. Technical. Report RM-GTR-280, Fort Collins.
50. Solé-Benet, A., A. Calvo, A. Cerdà, R. Lázaro, R. Pini and J. Barbero. 1997. Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). *Catena* 31:

23-38.

51. Cantón, Y., F. Domingo, A. Solé-Benet and J. Puigdefábregas. 2001. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *J. Hydrol.* 252: 65-84.
52. Calvo-Cases, A., A. M. Harvey, J. Paya-Serrano and R. W. Alexander. 1991. Response of badlands surfaces in South East Spain to simulated rainfall. *Cuater. Geomorphol.* 5:3-14.
53. Levy, G. J., J. Levin and I. Shainberg. 1997. Prewetting rate and aging effect on seal formation and interrill soil erosion. *Soil Sci.* 162: 131-139.
54. Mamedov, A. I., G. J. Levy, I. Shainberg and J. Letey. 2001. Wetting rate and soil texture effect on infiltration rate and runoff. *Aus. J. Soil Res.* 36: 1293-1305.
55. Maestre, F. T., M. A. Bowker, Y. Cantón, A. P. Castillo-Monroy, J. Cortina, C. Escolar, A. Escudero, R. Lázaro and I. Martínez. 2011. Ecology and functional roles of biological soil crusts in semi-arid ecosystems of Spain. *J. Arid Environ.* 75: 1282-1291.

附錄

附錄一、服務建議書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	本案為引進新技術工法，建議需要更深入的背景研究，包含：日本的微藻與台灣微藻種類是否相同，減少土壤沖蝕的效力與微藻在各式環境下存活時間(濕度差異大環境)等等。	已增加工項一生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕發展現況蒐集與彙整，針對背景資料進行蒐集分析
2	於現地進行之試驗，應有具體的試驗處理與重複，宜說明試驗設計方法，以利後續之分析、探討。	現地實驗之具體設計，將於後續報告中具體說明，以利後續分析
3	除針對P值評估外，是否K值也有相關，建議進行探討。	工項4增加與P值以外其它影響沖蝕因子(如K值)進行比較

項次	審查意見	回覆辦理情形
4	BSC技術授權是否有時效性？ 可否利用此一技術，進行台灣 微藻應用於沖蝕防治技術？	BSC技術授權之期限，將於雙方合作協定簽署中註明，本年度引進評估成效後，後續可將台灣微藻納入後續試驗可行性

附錄二、工作執行計畫書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	本計畫擬引進日本工營研發中心所發展出來的一種新型技術，即生物土壤技術(Biological Soil Crust，簡稱BSC)，利用屏東科技大學的試驗區進行試驗，以確保能在台灣施作，期減少台灣的坡地土壤沖蝕，實用性高值得肯定。	謝謝委員意見，誠如後列委員意見，引進國外技術確實有很多課題待釐清及適用性的考慮，會依委員建議分階段進行。
2	引進 BSC 技術在台灣應用，仍有本土特殊的問題需要克服。例如坡度、土壤、天候、植生……等問題。因此，本計畫應對此問題，逐一克服。	日本與台灣在氣候、地質及植生等條件確有不同，固本計畫亦是以其適用性進行討論，希望能掌握及釐清第一階段的適用性問題。
3	南台灣，特別是泥岩分佈地區，更需要考量土壤比較缺乏有效性磷、有效性氮的問題。此外，南台灣一年之中有好幾個月炎熱、乾燥、不下雨，也是本計畫應克服的問題。	由於BSC技術目前僅應用於日本的案例，對於國外包括臺灣的環境特性是否適用，或在施工或後續維護上需要有其他考慮，也希望透過此研究進行探討。

項次	審查意見	回覆辦理情形
4	本計畫選擇在屏東科技大學的緩坡(長度 22.13m，坡度 9%)試驗區作試驗。此坡度相對較緩，因此，所得到的成果，如何應用到坡度較陡的地區，亦是需要克服的問題。	鑑於目前對於BSC技術的基本特性尚無足夠掌握，故本期先以了解BSC的基本特性為設定，屏科大校內尚有中坡及陡坡樣區，後續可在進一步進行探討。
5	本計畫引進之BSC 技術，是日本所研發，未來推廣應用是否能符合政府採購法的規定，請一併釐清。建議未來能以台灣特有的資材，自行研發出類似功用的技術。	本期先以掌握日本BSC工法於臺灣的適用性進行探討，也會取得臺灣類似的藻種進行比較。會以BSC資材化的基礎，因應臺灣坡的特性與需求，進行調整及改善。
6	本計畫擬引進日本微藻技術，有利新技術引進及應用，但宜先蒐集本土微藻種類及特性，俾利新技術工法之建立及後續推廣。	依據委員意見，已尋求本土微藻的研究團隊協力，加強對本土環境及微藻運用的認識，如(四) 臺灣生物土壤及土壤藻類的研究。
7	屏科大現地試驗與實地模型之關聯宜先建立，俾利後續效益評估。	本年度階段目標會以日本BSC微藻於臺灣樣區的基本特性為主，掌握基本特性後再考慮應用於更嚴苛條件的泥岩條件。

項次	審查意見	回覆辦理情形
8	工作執行方法與步驟，請分成室內試驗與室外試驗分別說明，並補充其流程圖。	依照委員意見補繪工作流程圖(區分室內及室外工作)。
9	請補充室外試驗之詳細步驟與試驗週期等。	本年度室外工作可能會受到COVID-19疫情影響，取得的樣品數量可能受限，補充調整的驟與試驗週期。
10	請說明本次使用之微藻種為台灣或日本物種，如為後者，宜說明是否有外來種競爭、排他的疑慮，或其他國家是否有測試之經驗。	從日方取得的BSC資材微藻來自日本，由於藻類是無性生殖，不會有對當地生物產生基因汙染及擾亂；又或在瞭解使用的藻種後，可選擇臺灣相同的藻種進行替代。
11	試驗地選擇於屏東科技大學之緩坡試驗區，該區土壤與計畫緒論所述之泥岩沖刷問題是否有關連性？在緩坡試驗區所進行之試驗是否具代表性？建議可使用不同土壤樣本進行微藻生長試驗。	由於目前對於BSC資材的基本特性確實不瞭解，故本階段先以了解BSC的基本特性為設定，再逐步討論及探討期於其他土壤的適用性。本年度室外工作可能會受到COVID-19疫情影響，取得的樣品數量可能受限，再予以調整加入考慮。

項次	審查意見	回覆辦理情形
12	建議可詳述微藻之生態特性，如適存溫度範圍、生長環境、生長速度(生長至足以抵抗單位面積表土沖蝕之單位時間)等。	依據委員建議，尋求本土微藻的研究團隊協力以及蒐集分析日方提供的研究資料如二、生物土壤技術應用於減緩土壤沖蝕發展現況蒐集與彙整。

附錄三、期中報告書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	本次計畫期程受疫情影響資材送達，如後續工作項目亦可能資材未及時送達影響，宜考慮替代備案。	後期得知除了疫情影響外，亦有考慮NOU簽署問題。已提前取得微藻樣品，並尋求專家培養少部分樣品進行降雨實驗，以為替代。
2	計畫執行，於室內培養條件如何反應現地情形，為未來BSC現地成效之關鍵，如實驗場之濕度、土壤保水等條件，如與現地擬以該技術進行保護之條件差異太大，應討論是否可達成，及技術推動之限制。	前期規劃時，完全依照日方建議及設定，疫情造成自行取得微藻樣品，並進行培養及試驗，方能掌握BSC特性。已改為分期進行，先在試驗條件內充分掌握資材特性，再移轉至現地進行工法測試，分階段逐步調整試驗條件，較有把握。
3	實驗場之坡度及沖蝕實驗之進行，宜適度反應擬推廣之現地坡地狀況。	屏科大試驗場中有緩坡、中坡及陡坡，後期引進足夠之BSC資材後，均會列入測試，以掌握不同特性。
4	本計畫截至期中報告階段尚未取得原規劃之BSC資材，對於後續工作之調整及因應應妥為規劃。	5月已先行取得趕造藻種，並尋求台灣專家協助培養及觀察。8月培養少量樣本，進行降雨實驗，作為本年度替代研究方式。BSC資材完成檢疫申

項次	審查意見	回覆辦理情形
		請，也已掌握相關配合工業資材種類及功用，並延長原先規劃個實驗階段，調整落實本土應用為主要目標。
5	如以P2-29~P2-31所述之乾燥的微藻類樣品進行後續工作，預計尚需多久才能培養至可進行現地實驗階段，請說明，並補充於表3-1甘特圖。	依據本年度經驗，在未施與肥料配合狀況下約需3個月。後續資材包瓜培植的肥料提供養分下，約能縮短至1個月。相關工作，修改培養及觀測作業如圖3-1。
6	表3-1及表3-2所列之「水土保持管理創新作為」似與本研究方向無關，建議調整適合名稱。	確如委員意見，已將「水土保持管理創新作為」修改為「現地培養及試驗」
7	本次先期研究之乾燥微藻樣品為日本工營研發中心提供，文獻回顧亦指出大部分環境微生物無法在實驗室培養成功，想請問若未來進行現地實驗或進一步工程試驗，台灣本土是否可進行生物土壤技術工法之原料製造？	經過與協助之藻類專家討論，由於該類微藻其實普遍存在於本地。但日本工營工法強調的是乾燥儲存及現地施工技術(肥料及配比)，台灣的原料生產及來源沒有問題，但是市場價格及生產成本是主要的考量。

附錄四、期末報告書審查意見暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
1	BSC 降雨試驗之雨量強度為何？國外經驗 BSC 可適用於多大之降雨強度仍具保護能力。	本次實驗雨量設計50mm/hr，BSC的主要功用為前驅植被，2~3個月後就由其它草本及木本植物進駐，保護功效就如同一般植被。
2	BSC 之覆蓋率建議需達到多少，才具有有效的保護能力？	BSC的覆蓋率只會影響到後續植生發展的速度，日方技術文件上註明施工時的條件是40%，植生恢復速度才明顯。
3	藻類是否可適用於台灣各式土壤，建請評估。	台灣的研究中，相似藻種廣泛存在於野外土壤，但以人工施工方式進行，可能有其它須注意及改良的要項。
4	具持續發展研究及實際利用之潛力！	繼續掌握及改良日方技術及落實應用於台灣土壤。
5	台灣目前的雨量是否適用於日本藻類。	與台灣氣候條件類似的沖繩縣有相當多實際施工的案例，台灣現地也有相當多類似藻類。
6	可補充說明適用之條件，以及不同條件下減緩沖蝕之比例。	相關條件，預計於後續計畫列入實驗設計。於日方的技術文件中，施工條件為坡度1:

項次	審查意見	回覆辦理情形
		0.5(60 °) 以下的斜坡，且土壤硬度需小於 30 mm。
7	本計畫係引進日本技術於我國應用之試驗研究，計畫創新性宜加強。	藻類植生普遍存在野外現地，其關鍵技術在資材化生產，會瞭解及掌握相關技術。
8	實驗方法合理可行，但我國土壤環境條件與日本仍有不同，建議加強實驗背景差異性說明，並與日本實驗結果比較。	受限於今年取得的藻種數量，實驗數量有限；後續列入土壤種類差異及與其它背景差異性比較。
9	應包含於 BSC 資材中的加強附著及滋養材料是否可於國內取得，亦或是需再請日方提供呢？	BSC技術研發項目中，同時也商談在國內生產的可行性，技術上可行，但生產規模端視市場需求待評估。
10	此研究顯示 BSC 工法減緩土壤沖蝕之可行性，以本計畫之文獻回顧中日本案例皆為紅土案例，若要運用於貧脊的泥岩地區，可能需要再進一步試驗與評估。	確實如意見指出，西南部泥岩的低透水性及高鹽分等環境條件對植生都相當不利，故分階段掌握BSC特性後，經過調整及改良後才會進行泥岩區的現地實驗。
11	實施 BSC 工法後，藻類若成功形成團塊，在乾裂後仍成為乾燥團塊，對於藻類進駐>形成薄膜>乾燥後乾裂>降雨沖蝕的現地狀況可能須再進行進一步試驗與觀察。	謝謝相當好的建議，過去僅設定單期的過渡時期，若考慮BSC形成初期的退駐及進駐過程，對於後期植生成效的影響，可進一步評估。

附錄五、BSC 技術合作備忘錄