

計畫編號：109 保發-11.1-保-01-06-001(13)

陡坡崩塌地無人飛行載具 UAV 噴植工法之
精進研究

**A study of aerial hydroseeding
improvement by unmanned aerial vehicle
on steep slope landslides
(期末報告)**

執行單位：社團法人臺灣環境綠化協會

執行期間：109 年 2 月 6 日至 109 年 12 月 31 日

計畫主持人：林政侑 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)

陡坡崩塌地無人飛行載具(UAV)噴植工法作業與驗證

摘要

水土保持局及林務局對於交通不易到達之崩塌地，因無保全對象，一般採自然復育之治理手段，然隨著長年土砂遞移，卻造成水庫嚴重淤積，為此，水土保持局及林務局開始積極著手崩塌地復育工作。過往對於交通不易抵達之崩塌地常採航空噴植，但航空器使用費高昂且施工需精準專業技術，以致無法廣泛推廣，現今無人飛行載具應用於航空植生已蓬勃發展。本團隊去年度採用之濕式噴頭雖可成功完成噴植作業，但噴植距離僅 5 公尺，本年度改以氣動式噴頭及冰球粒劑，有效提升噴植距離及降低 UAV 酬載能力，且因氣動式強大壓力，使其可適用於陡峭邊坡，而冰球粒劑黏著劑濃度及冰凍日數對種子發芽影響不大，因此考量冰球粒劑之融化速度及強度下，建議可將濃度調升至 20%，冰凍日數可達 5 天。

關鍵詞：陡坡崩塌地、無人飛行載具、航空噴植

A project of aerial hydroseeding and acceptance for unmanned aerial vehicle on steep slope landslides

Abstract

For Soil and Water Conservation Bureau (SWCB) and Forestry Bureau (FB), the treatment of nature conservation is used to unreachable landslide without protection target. However, the sediment will deposit seriously in the reservoir due to terrestrial materials transportation from the landslide area. Therefore, the vegetation recovery on the landslide is a crucial work for SWCB and FB. In the past, the vegetation recovery by aerial hydroseeding was applied on unreachable landslide. Because the aerial vehicle is expensive and with high technique on construction, the aerial hydroseeding cannot be widely applied. Now, unmanned aerial vehicle (UAV) is widely development on aerial vegetation but how to aerial hydroseeding precisely on steep slope landslides is a difficult technique. In last year, the wet nozzle was successfully applied on hydroseeding but the hydroseeding distance was only five meters. In this year, the pneumatic nozzle and frozen-pellet were applied on hydroseeding to increase hydroseeding distance and reduce loading of UAV. Besides, the pneumatic nozzle was applied to steep slope due to high pressure. Under consideration of melting speed and strength of frozen-pellet, the concentration of cohesive agent can increase to 20% and the frozen-day can until five days because the germination of frozen-pellet will not be affected by the concentration of cohesive agent and frozen-day.

Keywords: Steep slope landslides, Unmanned aerial vehicle, Aerial hydroseeding

目次

摘要.....	I
Abstract.....	I
目次.....	I
表次.....	III
圖次.....	V
第一章 緒論.....	1
第一節 前言.....	1
第二節 工作項目與內容.....	2
第三節 計畫預定進度.....	3
第二章 崩塌地無人飛行載具噴植前置作業申請與植生區位規劃流程.....	5
第一節 無人飛機系統.....	5
第二節 擬定無人載具航空植生作業程序.....	6
第三節 適宜噴植時機.....	9
第四節 適宜噴植區位.....	13
第三章 大型無人飛行載具(15 公斤級以上)植生噴植系統之設計研發.....	25
第一節 無人飛行載具(15 公斤級以上)優選評估.....	25
第二節 傳統航空噴植方式回顧.....	28
第三節 UAV 噴植方式回顧.....	30
第四節 不同 UAV 載具及噴植設計之比較.....	31
第五節 前期研究成果.....	33
第四章 陡坡崩塌地微氣象觀測.....	43
第一節 微氣象站.....	43

第二節 微氣象站現場架設及感測器規格	44
第三節 溫溼度計	45
第四節 太陽能供電模組	46
第五節 土壤溫溼度計	46
第五章 崩塌地應用大型無人飛行載具(UAV)噴植實作與驗證	49
第一節 植生粒劑先期試驗	49
第二節 噴頭先期試驗	57
第六章 崩塌地應用無人飛行載具(UAV)植生成效之監測與評估	67
第一節 噴植實作現地試驗	67
第二節 植生成效評估	75
第七章 結論與建議	77
參考文獻.....	79
附件一、期初查意見回覆	81
附件二、期中查意見回覆	85

表次

表 1-1 工作進度時程表	4
表 1-2 計畫執行檢核表	4
表 2-1 水土保持局土壤分類對應之 SCS 土壤分類.....	12
表 2-2 SCS 法曲線值之土地利用與土壤類別對照表.....	13
表 2-3 本計畫自有開發建置無人機設備	15
表 2-4 Rigel VZ-1000 雷射掃描儀.....	15
表 3-1 本團隊無人飛行載具特色比對說明表	27
表 3-2 不同 UAV 噴植形式比較.....	33
表 3-3 壓縮動力水泵規格參數	35
表 4-1 微氣象站資訊感測器之規格	45
表 4-2 2020 年 11 月第 1 周微氣站觀測數據	47
表 5-1 不同黏著劑比例之發芽率	53
表 5-2 不同冰凍日數之發芽率	55
表 5-3 5~15 米地面噴植試驗之噴植點紀錄結果.....	60
表 5-4 5~15 米地面噴植試驗之準確度與精確度計算結果.....	61
表 5-5 氣動式噴頭成本分析表	65
表 6-1 崩塌地調查評估表	70
表 6-2 噴植實作步驟與應注意事項	73
表 6-3 噴植作業時程規劃	74

圖次

圖 1-1 計畫流程	2
圖 2-1 UAS 系統相關應用技術發展與成果示意	6
圖 2-2 交通部民航局民用航空法－無人機管理架構	7
圖 2-3 航空飛行禁航區範圍與申請條件	8
圖 2-4 無人駕駛航空器系統(UAS)拍攝申請流程圖與文件示意	8
圖 2-5 全台主要測站之適宜噴植月份	11
圖 2-6 UAS 空拍與地面 Lidar 整合作業流程圖	14
圖 2-7 崩塌邊坡三維點雲成果展示示意	16
圖 2-8 DEM 假色影像套疊展示畫面	17
圖 2-9 崩塌邊坡三維空間地貌模型線上瀏覽畫面	17
圖 2-10 崩塌邊坡三維空間量測與地形網格特性	17
圖 2-11 3×3 移動視窗示意圖	18
圖 2-12 坡度萃取結果案例	19
圖 2-13 坡度之適宜噴植區位	19
圖 2-14 地形濕度指標萃取結果案例	20
圖 2-15 地形濕度指標之適宜噴植區位	20
圖 2-16 圓形視窗之網格示意圖	20
圖 2-17 地形粗糙度萃取結果案例	22
圖 2-18 地形粗糙度之適宜噴植區位	22
圖 2-19 OHI 萃取結果案例	22
圖 2-20 OHI 之適宜噴植區位	23
圖 3-1 國內、外常見商用型 UAV 樣態	25
圖 3-2 無人飛行載具續航、拍攝、酬載能力比對說明圖	26

圖 3-3 UAV/S 系統特性、運用特性及使用限制比對圖	27
圖 3-4 本計畫採用 UAV/S 系統特性說明圖	28
圖 3-5 不同類型航空植生機具施工示意圖	30
圖 3-6 UAS 系統航空植噴或撒播作業示意圖	31
圖 3-7 UAV/S 噴植系統可行性評估	32
圖 3-8 本計畫採用之載具及腹掛濕式噴頭	33
圖 3-9 作動裝置	34
圖 3-10 16L 植生資材材料桶	34
圖 3-11 壓縮動力水泵	35
圖 3-12 噴射系統	36
圖 3-13 乾濕分離式噴頭	37
圖 3-14 定點噴植距離測試	37
圖 3-15 草籽可有效從攪拌裝置射出	38
圖 3-16 噴植槍管	39
圖 3-17 氣動式噴植裝置	39
圖 3-18 種子混合液態資材	40
圖 3-19 冰球粒劑	40
圖 3-20 噴植距離初估	41
圖 3-21 冰球碎裂後種子附著於岩石之情形	41
圖 4-1 微氣象站概念示意圖	43
圖 4-2 微氣象站觀測站	44
圖 4-3 微氣象站觀測站之儀器種類	44
圖 4-4 本計畫採用之溫溼度感測器	45
圖 4-5 本計畫採用之太陽能供電模組	46
圖 4-6 ST-1-PT-100 土壤溫濕度感測器	46

圖 5-1 實作過程側錄	49
圖 5-2 不同黏著劑比例之融化速度試驗	51
圖 5-3 不同黏著劑比例之融化速度試驗結果	51
圖 5-4 不同黏著劑比例之發芽試驗(第一天)	52
圖 5-5 不同黏著劑比例之發芽試驗(第一周)	52
圖 5-6 不同黏著劑比例之發芽試驗(第二周)	53
圖 5-7 不同冰凍日數之發芽試驗(第一天)	54
圖 5-8 不同冰凍日數之發芽試驗(第一周)	54
圖 5-9 不同冰凍日數之發芽試驗(第二周)	55
圖 5-10 不同草種之冰球粒劑發芽試驗(第一天)	56
圖 5-11 不同草種之冰球粒劑發芽試驗(第十天)	56
圖 5-12 噴植距離之實驗地點	57
圖 5-13 噴植距離之實驗相對位置概況	58
圖 5-14 精確度和準確度之示意圖	59
圖 5-15 噴植標靶尺寸及群體座標系統	60
圖 5-16 5~15 米地面噴植試驗結果	60
圖 5-17 垂直牆壁之噴植結果	61
圖 5-18 天然土坡試驗地	62
圖 5-19 天然土坡噴植試驗結果(第 10 天)	63
圖 5-20 天然土坡噴植試驗結果(兩個月)	63
圖 5-21 天然土坡噴植試驗結果(五個月)	64
圖 6-1 無人噴植設備檢查及資材準備	67
圖 6-2 現地空中噴植作業	67
圖 6-3 噴植預定地之地理位置	68
圖 6-4 秀巒試區正射影像圖	69

圖 6-5 秀巒地區植生覆蓋情形	69
圖 6-6 噴植實作流程	71
圖 6-7 施工前影像拍攝	71
圖 6-8 3D 地形建模	71
圖 6-9 環境指標萃取	72
圖 6-10 植生基材準備	72
圖 6-11 航線規劃軟體作業畫面	72
圖 6-12 植生噴植作業	72
圖 6-13 施工前、後之多光譜拍攝	72
圖 6-20 裸地率推估之流程圖	76

第一章 緒論

第一節 前言

集水區上游較偏遠地區，因颱風、豪雨、地震等天然災害所造成崩塌災害，常由於其交通可及性極低，致無法以工程手段加以復育，少數屬人力勉強可達者，則採輕軟性「人工植生」方法，包括種子撒播、栽植造林、覆蓋稻草蓆、打樁編柵及坡面截導排水等方式穩定坡面，以加速植生覆蓋及生態演替，其餘位處交通不可及且無保全對象之崩塌地，僅能以自然復育方式，運用森林環境密集天然下種的更新機制，隨時間緩慢逐步從崩塌地恢復為自然森林林相。然近年來受極端降雨影響，災害型態多為複合型災害，崩塌深且廣，大面積裸露自然復育緩慢，易發生次生災害，造成崩塌持續擴大或土砂下移情形，這些位於集水區上游偏遠地區崩塌地，如何加速復育以減緩坡面沖蝕與土砂產出，為當前應研究並予克服之課題。

過去運用之航空植生多以直升機等航空機具，航空器使用費高昂且施工需精準專業技術致無法廣泛推廣，鑒於今日無人飛行載具技術層次及其應用，已有大幅發展，當可利用其不受空間限制之優勢。本計畫期透過具有高機動性、高解像力、即時性及一定酬載能力等條件之無人飛行載具，開發無人飛行載具航空植生系統，並架設微氣象觀測站，建立無人飛行載具航空植生成果評估模式，並據以檢討，供未來交通不可及之陡坡崩塌地，運用無人飛行載具航空植生處理之參據。

本計畫首先針對航空噴植作業、UAV 機具及噴頭、噴植資材進行文獻回顧，在前置作業流程部分將確立飛行申請、噴植區位及時機；UAV 機具及噴頭、微氣象觀測部分，則檢視 108 年度開發之優缺點，

設計適宜方法進行先期試驗，最後透過現地崩塌地進行試驗，評估其噴植成效與提出驗收流程，另現地實驗過程將採影像側錄進行記錄(圖 1-1)。

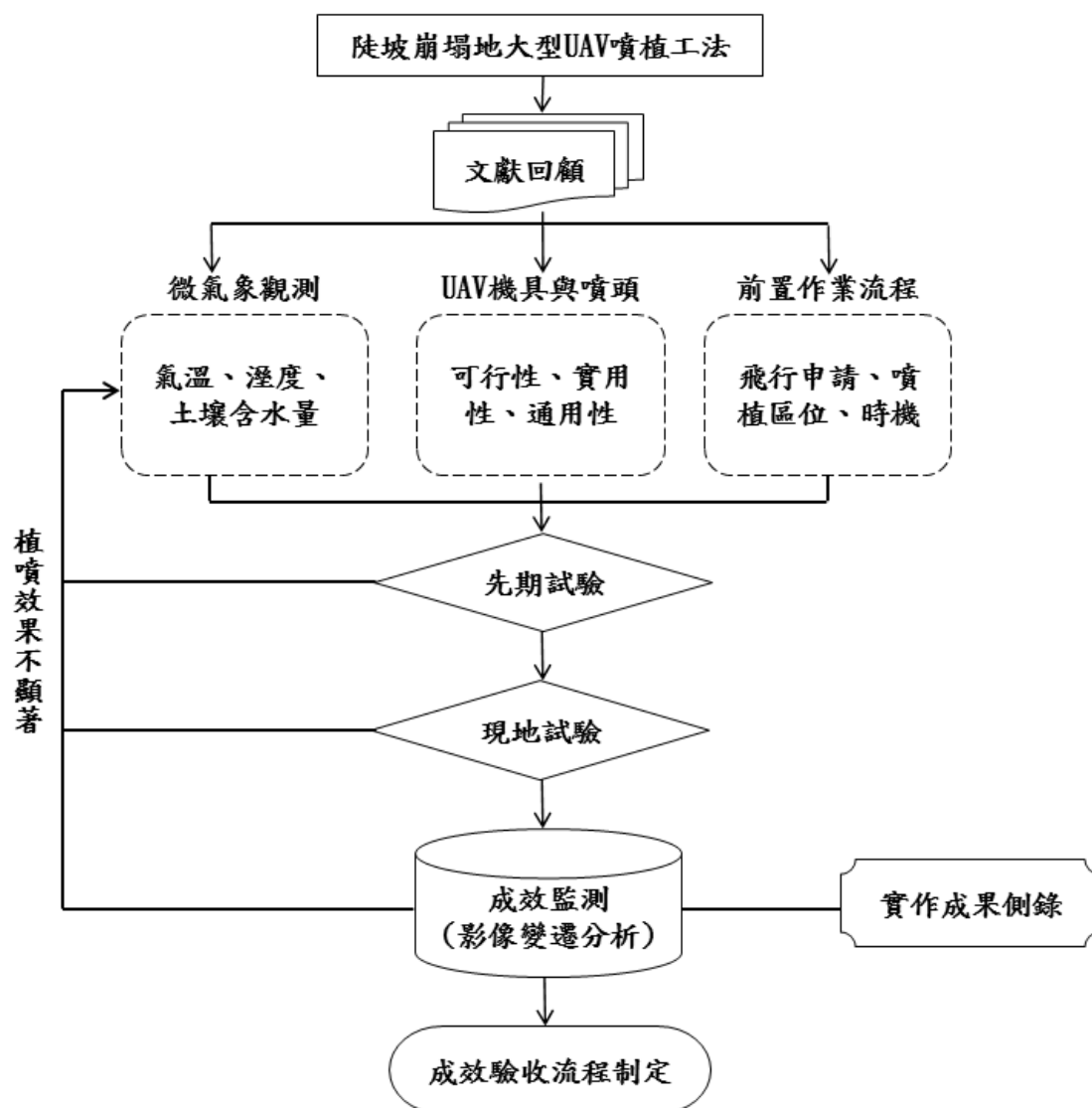


圖 1-1 計畫流程

第二節 工作項目與內容

一、崩塌地無人飛行載具噴植前置作業申請與植生區位規劃流程

回顧相關法規擬定無人載具航空植生作業申請程序及飛航許可，利用 UAV 初步巡拍圖資及鄰近氣象資料，篩選適宜噴植之點

位及時機，據以建立崩塌地 UAV 噴植前置作業之流程。

二、大型無人飛行載具(15 公斤級以上)植生噴植系統之設計研發

集水區上游較偏遠地區之崩塌地，部份地形過於陡峭，以垂直投放效果不佳，因此研製噴植的植生噴植設備，給予噴植材料水平移動之動能，並有效提高附著於陡坡之機率，提高復育植生之成效。

三、陡坡崩塌地微氣象觀測

於試驗崩塌地架設微氣象觀測站，藉以觀測噴植作業於崩塌地樣區後之近坡面之氣溫、溼度、土壤含水量等氣象要素，將蒐集數據進行相關分析，以了解植生噴植作於導入崩塌地坡面後之生長與微氣象變化之關聯。

四、崩塌地應用大型無人飛行載具(UAV)噴植實作

依水保局提供或本團隊提出之現地試區，進行現場 UAV 噴植實作，並以小型 UAV 進行實作過程側錄，以作為噴植驗證之用。

五、崩塌地應用無人飛行載具(UAV)植生成效之監測與評估

噴植完成後，利用 UAV 拍攝多光譜之正射影像，進行植生覆蓋之變遷分析，監測樣區之植生成效，並提出裸地率進行成效評估。

第三節 計畫預定進度

本計畫之工作進度與工作進度時程，自 109/2/6 起至 109/12/31 止完成，據此擬定工作進度表 1-1，並依契約規定建立查核管制點，本計畫團隊將確實管控品質與進度，圓滿達成本計畫內容。本計畫以社團法人台灣環境綠化協會之林政侑研究員為計畫主持人，並邀請陶

林數值測量工程有限公司作為協力廠商。陶林數值測量工程有限公司於 2010 年開始投入研發 UAS，至今已完成多款 UAS 產品及應用，且分別投入於河川監測、航空攝影、正射影像、3D 建模、360 度 VR 等領域，有助於 UAV 航空噴植載具及噴頭之設計。

表 1-1 工作進度時程表

計畫內容	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1.崩塌地無人飛行載具噴植前置作業申請與植生區位規劃流程											
2.大型無人飛行載具(15公斤級以上)植生噴植系統之設計研發											
3.陡坡崩塌地微氣象觀測											
4.崩塌地應用大型無人飛行載具(UAV)噴植實作											
5.崩塌地應用無人飛行載具(UAV)植生成效之監測與評估											
報告撰寫											
期初考評											
期中考評											
期末考評											
成果報告											
預計進度累計百分比(%)	5	15	25	35	40	60	70	80	90	95	100
查核點	預定完成時間										
期初簡報	109/4										
期中簡報	109/8										
期末簡報	109/11										

表 1-2 計畫執行檢核表

項次	工作項目	對應章節及頁碼	總計畫進度
壹	崩塌地無人飛行載具噴植前置作業申請與植生區位規劃流程	第二章(P.5~P.22)	100%
貳	大型無人飛行載具(15 公斤級以上)植生噴植系統之設計研發	第三章(P.23~P.40)	100%
參	陡坡崩塌地微氣象觀測	第四章(P.41~P.43)	100%
肆	崩塌地應用大型無人飛行載具(UAV)噴植實作	第五章(P.45~P.67)	100%
伍	崩塌地應用無人飛行載具(UAV)植生成效之監測與評估	第六章(P.69~P.73)	100%

第二章 崩塌地無人飛行載具噴植前置作業申請與植生區位規劃流程

第一節 無人飛機系統

無人飛行系統(Unmanned Aircraft System, UAS)為整合無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)、全球導航衛星系統(Global Navigation Satellite System, GNSS)、慣性導航系統(Inertial Measurement Unit, IMU)與地面控制站(Ground Control System, GCS)等整合服務總稱。UAS 系統主要通訊方式可為 Wi-Fi 或無線電，以 UAV 上的飛控系統為 UAS 的核心，同時主導飛航及感測器控制、衛星定位與導航訊息記錄，透過高頻無線通訊系統可即時監控 UAS 飛行姿態，可更有效率進行空間資料蒐集，快速建構大量空間資料庫。

近年 UAS 系統具備高機動性、多酬載能力等特性，已廣泛結合遙感探測(Remote Sensing)與移動測繪製圖(Mobile Mapping)等不同領域之整合運用技術，近年已趨成熟且持續快速發展。相關運用特別在於國土保安、環境變遷偵測、災害監控應變以及空間基本資料調查等領域(如數值高程模型、真正射影像、仿真三維建模，如圖 2-1 所示)，均為 UAS 技術應用發展的重要課題。依無人飛行載具之飛行特性、滯空時間及酬載能力等特性可將其區分為定翼型、單旋(軸)翼型及多旋(軸)翼型等類型 UAS 系統。



圖 2-1 UAS 系統相關應用技術發展與成果示意

第二節 擬定無人載具航空植生作業程序

為避免遙控無人機活動影響飛航安全，立法院業於民國一〇七年四月三日三讀修正通過《民用航空法部分條文修正案》，爰增訂專章予以律定管理細則。該修正案明定政府機關(構)、學校或法人所有遙控無人機最大起飛重量二百五十公克以上；以及民航局認定具一定功能之無人機皆須登記列管，無人機操作者亦須取得民航局核發操作許可(修正條文第九十九條之十、十一)。遙控無人機之設計、製造、改裝，應向民航局申請檢驗取得合格證辦理註冊。前項遙控無人機之檢驗基準由民航局定之(第九十九條之十一)。另遙控無人機其航攝距地表高度不得逾四百呎、且不得以遙控無人機投擲或噴灑任何物件，公務機關或法人經檢具有關文書向民航局申請核准者得不受前項規定

之限制(修正條文第九十九條之十四)。有鑑於此，無人載具航空植生作業申請流程包含(1)無人機載具登記列管、(2)載具檢驗註冊、(3)操作限制豁免等階段，無人機管理條文重點摘錄如圖 2-2 所示。

由於 UAV 植生主要為政府機關發包，因此施工及操作之申請較不受限制，但政府機關宜要求施工廠商需出示 UAV 登記及載具檢驗註冊證明。

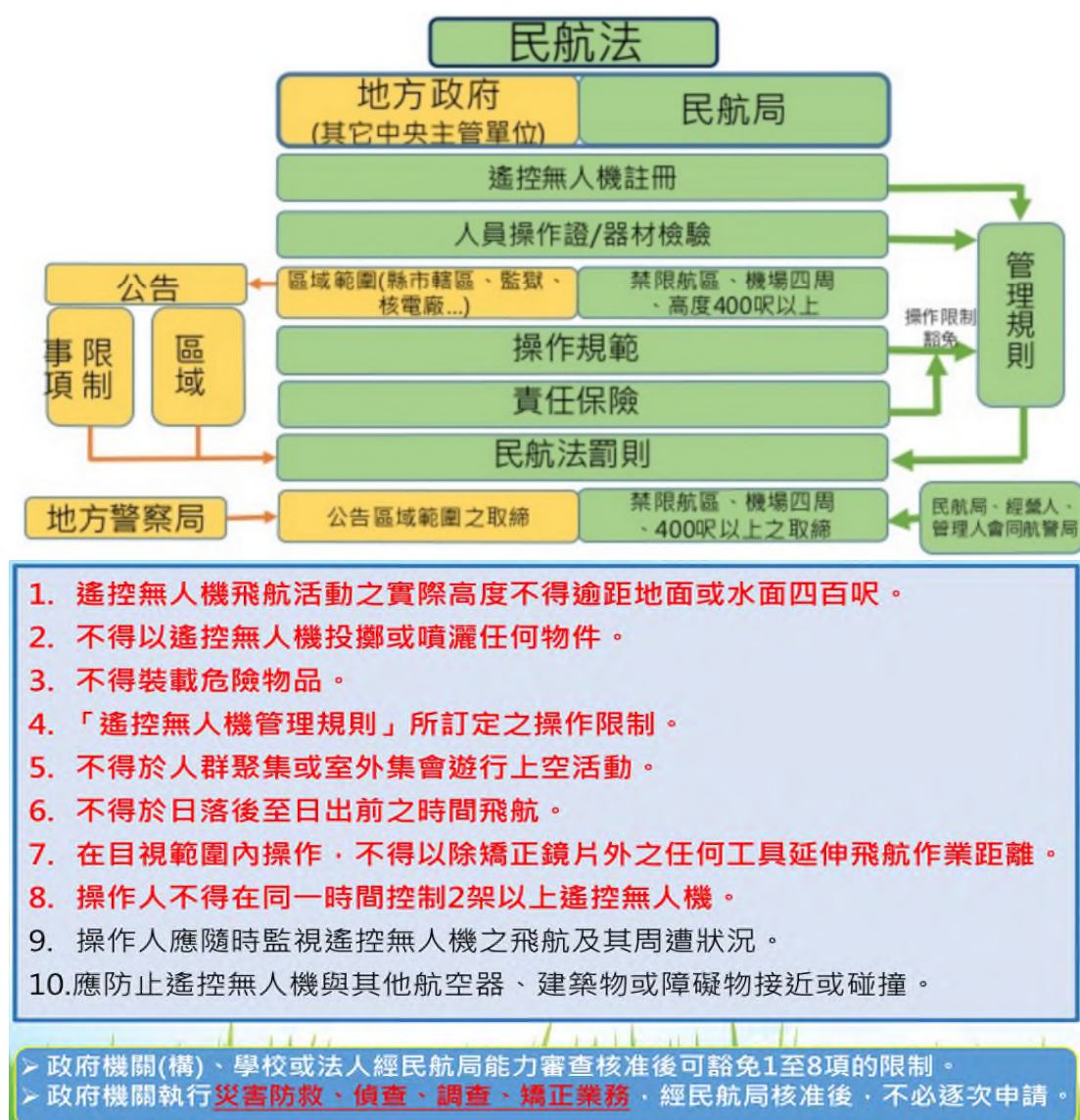


圖 2-2 交通部民航局民用航空法—無人機管理架構(民航局，2017)

以無人駕駛航空器系統(UAS)進行航拍作業得依規定於任務執行前 15 日提出空域申請(圖 2-3)，並視天候許可下方可執行任務。另依

「無人駕駛航空器系統在臺北飛航情報區之作業」(民航局，2012)飛航情報相關 AIC 公告 (AIC04/2012) 與「民用航空法」第 34 條以及「交通部民用航空局對機場四周禁止施放有礙飛航安全物體實施要點」等規定進行申請作業(圖 2-4)。



圖 2-3 航空飛行禁航區範圍與申請條件

附件一 無人航空系統（UAS）作業申請表					
作業名稱	國立臺南藝術大學門牌文化資產資料庫建置所需無人航空攝影計畫				
作業地點	台南-飛行觀景系統				
委託單位					
申請單位	臺南市政府文化局				
申請單位承辦人	姓名	劉明	電話號碼	●●●●●●●●	
作業總負責人	姓名	蔡明	行動電話	●●●●●●●●	
駕駛人員	姓名	郭聖	行動電話	●●●●●●●●	
飛航人員	姓名	林○	行動電話	●●●●●●●●	
作業日期及時間 （2 小時制）	第 102 年 5 月 5 日 起至	第 102 年 11 月 7 日止			
	第 07 時 30 分 起至	第 17 時 00 分止			
空域範圍各邊境 線(WGS-84)或經 電報網如欄位	北緯 25 度 2 分 56.2 秒	東經 121 度 30 分 59 秒			
	北緯 25 度 2 分 53.9 秒	東經 121 度 30 分 47.9 秒			
	北緯 25 度 2 分 46.2 秒	東經 121 度 30 分 32.2 秒			
	北緯 25 度 2 分 59.9 秒	東經 121 度 30 分 37.5 秒			
作業高度	300 公尺至 240 英尺 (AGSL, Above Mean Sea Level) 實際高度(仰光山高度) 300 英尺以下 (AGL, Above Ground Level)				
UAS/PAS 起降/ 降落地點名稱與座 標(WGS-84)	起降/降落地點名稱	臺南市府前門路海濱公園室內直升機坪			
	北緯 25 度 2 分 31.8 秒	東經 121 度 30 分 46.0 秒			
作業範圍中點座 標(WGS-84)	北緯 25 度 2 分 51.7 秒	東經 121 度 30 分 40.29 秒			
作業半径(公里)	300 公尺				
作業說明	本計畫為臺南市政府文化資產數位化資料庫建置(國定古蹟臺南草仔寮古堡、新開宮等)所需拍攝臺北府城內文化財產之影像以輔助民間保存研究，緣以該區空域複雜且敏感屬特殊情形，以保障飛行安全及維護國防利益之基礎。				
備註	1.本申請案獲准執行，須自行設置適當空域禁限。 2.時刻安排上，如有不脫敏需求，請向AGAS/空管中心提報核准作業申請書，並呈送警政、消防暨有關機關同意。另，應於執行前向空管中心提出申請，由空管中心核發許可證後方可執行； 3.實施空域管制期間，凡實施空域管制區域內之所有民用航空器均應停止飛行，而實施空域管制區域外，凡實施空域管制區域鄰近之所有民用航空器亦應停止飛行，以確保空域管制效果。 4.本計畫係屬非營利性質，不得將計畫內容商業化或作其他不當利用行為，已完稅和歸還空域限制，作業範圍不得更改及私自變更空域限制，如人員資料有誤差者，應迅速通知空管中心，以便修正。故軍事航空及軍方相關單位請勿擅自修改任何資訊，倘因違反規定者，願負法律責任。 中華民國 105 年 5 月 27 號				

圖 2-4 無人駕駛航空器系統(UAS)拍攝申請流程圖與文件示意

第三節 適宜噴植時機

本計畫之植生精神講求「自然復育」為主，即噴植後減少植生維護之工作，因此最佳噴植時機宜在春天來臨後的第一場雨後，馬上進行噴植作業，現地所保有的高含水量除可供噴植後種自生長外，雨季來臨可確保崩塌地不斷有水源供應。

為確實找出噴植地之乾濕季，本計畫利用降雨量及蒸發散量等氣象資料，採桑士緯(Thornthwaite)氣象分類法推估水收支情形；另利用SCS-CN法計算不同土壤質地下，崩塌區之最大蓄水量，據以作為每年春雨後最佳噴植時機之參考。

一、水收之分析

美國氣候學家 Thornthwaite 以蒸發量及缺水、剩水等因素為區分的指標，將氣候類型予以分類，在 1931 年的第一次分類中，桑士緯提出有效水分指數(precipitation efficiency index, P-E index)與有效溫度指數(thermal efficiency index, T-E index)作為氣候分類的指標，前者是月雨量／月蒸散量的比值，並因蒸發散實為氣溫的函數，故由月雨量與月均溫的經驗關係式所取代；後者則純為年中月均溫累加後的經驗指數。於 1948 年的第二次分類中，支持植物生長的有效溫度(thermal efficiency)，乃改以「可能蒸散量」(potential evapotranspiration)此一參數來估計，故有效溫度(TE)指數即為可能蒸發散量(單位為公厘)。

由於濕潤指數(moisture index)是植生復育之重要指標，利用中央氣象局主要測站之氣象資料，分析台灣地區各主要測站之月平均輻射量、氣溫、相對濕度、降水量、蒸發量、風速等資料，再依據 Thornthwaite and Mather(1955)之氣候分類法，分析各地區之氣候型。Thornthwaite and Mather 定義濕潤指數(I_m)如下：

$$I_m = I_h - I_d \quad , \quad I_h = 100 \frac{R}{P_e} \quad , \quad I_d = 100 \frac{D}{P_e}$$

式中： I_h 為濕度指數(humidity index)； I_d 為乾旱指數(aridity index)； R 為剩水量($R=P-A_e$)； D 為缺水量 ($D=P_e-A_e$)， P 是降水量， A_e 是實際蒸發散量(actual evapotranspiration)， P_e 是潛在蒸發散量(potential evapotranspiration, Penman, 1963)。

而計算過程中，剩水量(R)乃任一地區降雨量與蒸發散量的水收支概念，當降雨量大於蒸發散量時，土壤含水量不易因蒸發散作用而消散，因此噴植後種子容易存活，施作噴植工法時，亦可適量降低噴植資材中水的比例，借以提升 UAV 之酬載能力。

因濕潤指數需由降雨量及蒸發散量推估，當中蒸發散量僅全台主要測站有紀錄，故本計畫由中央氣象局之觀測資料查詢網頁(<https://e-service.cwb.gov.tw/HistoryDataQuery/index.jsp>)，下載 2005~2019 年之降雨量及蒸發散量，計算主要測站之各月份剩水量，若剩水量大於零，即表示降雨量大於蒸發散量，透過徐昇式法可劃分各測站於全台之控制面積範圍(圖 2-5)，據此空間分布可供相關噴植作業於噴植時機選定之參考。結果顯示，大台北、宜蘭及阿里山地區全年皆適宜施工；花蓮、臺東則適合於 5、6 月以後；臺中到恆春等西部地區之施工期僅是於 6~9 月。

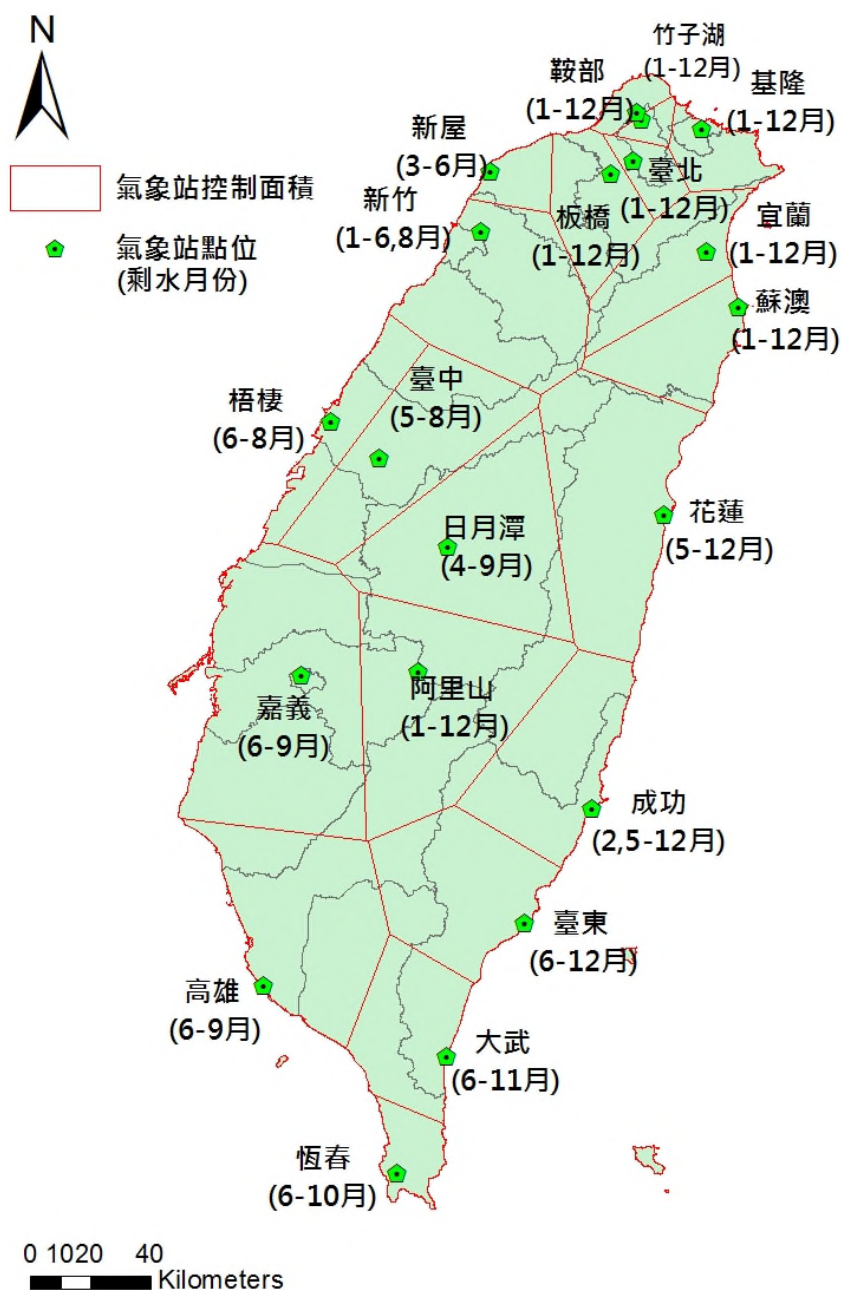


圖 2-5 全台主要測站之適宜噴植月份

二、最大蓄水量推估

雖透過濕潤指數可初步推估適宜噴植之剩水月份，但亦須考量該年第一場降雨若能大於最大蓄水量，表示降雨完後土壤達到飽和，噴植後，種子可吸收土壤水份發芽，遂此，本計畫利用 SCS-CN 法，根據水土保持局提供之土壤質地(表 2-1)，查表得知裸地之曲線值

(curve number)(表 2-2)，進而推估最大蓄水量(S)，依超滲逕流(P_e)之推估公式，若降雨量(P)大於 0.2S，則開始產生超滲逕流，意即第一場雨若大於 0.2S 時，則該場雨後，宜馬上進行噴植作業，以利種子發芽。

依前述方法可知，崩塌區位於表 2-4 可視為荒地，對應 A~D 類土壤，其 CN 值依序為 77、86、91、94，轉換為最大蓄水量 S 值則分別為 75.87、41.35、25.12、16.21mm，因此第一場雨若大於 15.17、8.27、5.02、3.24mm，則可進行噴植作業。

$$S_{(mm)} = \frac{25400}{CN} - 254$$

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}, \quad (P > 0.2S)$$

表 2-1 水土保持局土壤分類對應之 SCS 土壤分類

分類	土壤質地	SCS 土壤分類
0	粗砂土、砂土	A
1	細砂土、壤質砂土、壤質粗砂土	
2	壤質細砂土、粗砂質壤土、砂質壤土、細砂質壤土	
3	極細砂土、壤質極細砂土、極細砂質壤土	B
4	粉質壤土、粉土	
5	壤土	
6	砂質黏壤土	C
7	黏質壤土、粉質黏壤土	D
8	粉質黏土、砂質黏土	
9	黏土	

資料來源：陳俊叡(2013)

表 2-2 SCS 法曲線值之土地利用與土壤類別對照表

土地使用的 土壤水文特性	A B C D			
	A	B	C	D
針葉林	25	55	70	77
闊葉林	36	60	73	79
其他林地	38	62	74	80
公園(或墓地)	39	62	74	80
果園	45	66	77	83
旱田	62	71	78	81
水田	70	79	84	88
建地	74	84	90	92
荒地	77	86	91	94
濕地	92	93	94	95
地表水	94	93	95	96

資料來源：Dunne and Leopold(1978)

第四節 適宜噴植區位

UAV 噴植工法受限於 UAV 之飛航時間較短，若要針對整個崩塌地進行噴植，其耗費人力、物力較高，若能在噴植前事先了解崩塌地適宜噴植區位，即植生資材易附著於坡面之區位，則可提高噴植之效率，因此規劃運用 UAV/S 及地面 LiDAR 等科技設備建立崩塌地區域正射影像、數值高程模型資訊，即可分析崩塌坡體地形變異(堆積、凹陷或位移)，進而可利用邊坡坡度分級、地形粗糙指數、地形濕度指數等環境指標，套疊而得最適噴植區位指標，萃取適宜噴植區位。

一、UAS/地面 Lidar 整合作業

(一)整體作業流程

由於本計畫作業範圍可能受限於地形過於陡峭與持續有落石情形之危險性，故崩塌邊坡資料萃取作業係以無人飛行載具進行空中照片拍攝，少部分受地形與植被遮蔽影響無法作業區則評

估改採地面 Lidar 雷射掃描儀獲取點雲資料，後續透過影像處理中點雲密匹配技術產製點雲作為補足點雲與增加成果完整性，無人飛行系統整合地面現地 Lidar 雷射掃描作業流程圖 2-6 所示。

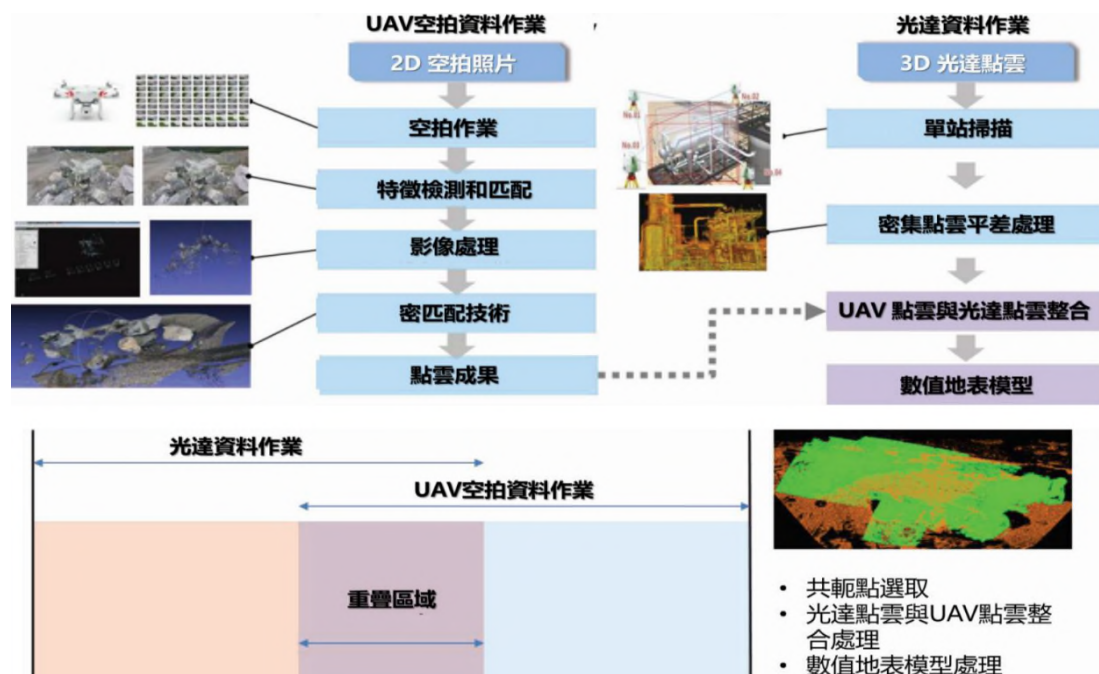


圖 2-6 UAS 空拍與地面 Lidar 整合作業流程圖

(二)UAS/地面 Lidar 作業

航拍作業於作業前需先向內政部進行飛航申請作業，飛航作業許可後始能進行航拍作業，航拍作業包含現場航標點佈設、控制測量、空中三角測量及成果產製，執行步驟與流程說明如下：

1.UAV/S 航拍規劃作業

以無人駕駛航空器系統(UAS)進行航拍作業需於任務執行前 15 日提出空域申請作業，並視天候許可下方可執行任務(圖 2-4)。依航拍區域範圍、地面解析度 GSD、相機鏡頭焦距、飛航空速、影像重疊率等需求計算航線、拍照航點產出飛行計畫，經檢視修正即可上傳至 UAV 飛控系統待命執行航拍任務。計畫將依崩塌邊坡現況地貌(高程變化)評估選取不同 UAV 設備

因應，本計畫自有無人機設備與自行建置設備如表 2-3 所示。

表 2-3 本計畫自有開發建置無人機設備

型號	TL-3700A	TL-M6-AG	TL-M6	TL_VTOL
機身空重	<20 kg	20 kg	4 kg(含電池)	1kg
動力來源	120 c.c. 雙缸	22000mAh Li-Po電池x2	10000 mAh Li-Po電池 x2	16000mAh Li-Po電池
滯空時間	6-10 hr	10-15 min	>20 min	60 min
適用情況	高山區地區、大面積 長距離環境監測	飛行高度低、 農業噴灑作業	機動性高 多鏡頭配掛、傾斜 攝影、環場	高山地區、大面積長 距離及環境監測
照片				

2.地面 Lidar 掃瞄作業

地面 Lidar 雷射掃描器係利用大量之雷射測距點進行地形地物之掃描量測作業，儀器可以進行水平 360 度以及垂直方向 100 度的掃描，掃描的準確度則可以達到 8 毫米(表 2-4)。因此 Lidar 雷射掃描儀掃描設站方式依現地情形約每間隔 50~80 公尺擺設方式進行全區之掃描作業，並針對重點區域採無遮蔽補站加強方式進行掃描作業，此方式能精準掃描、完整覆蓋之作業完成全區域之掃描作業。

表 2-4 Rigel VZ-1000 雷射掃描儀

地面雷射掃描儀 RIEGL VZ-1000					
	Laser PRR (Peak)	70 kHz	100 kHz	150 kHz	300 kHz
	雷射速度	29,000點/秒	42,000點/秒	62,000點/秒	122,000點/秒
	最遠測距				
	目標反射率 $\rho \geq 90\%$	1,400 m	1,200 m	950 m	450 m
	目標反射率 $\rho \geq 20\%$	700 m	600 m	500 m	350 m
	準確度	8 mm			
	精密度	5 mm			
	最近測距	2.5 m			
	雷射等級	一級雷射			

3.空中三角測量與解算

採用 Bentley Context Capture 或 Photoscan 進行空中三角測量平差計算，將原始影像、影像拍攝原始方位資訊、相機參數及控制點資料匯入軟體後進行，空中三角測量主要包含控制點影像量測、影像連結點自動匹配及空三平差計算。

(三)航測數值圖資

經空中三角平差計算處理後，以密匹配技術產製崩塌地區域影像密點雲重建高解析度影像三維地貌資訊(圖 2-7)，透過點雲成果進行網格組建並內插產製數值地表模型成果與全域正射影像(圖 2-8)，即可產製 3D 實景建模成果，透過線上或單機瀏覽展示崩塌邊坡三維空間地貌模型，具備縮放旋轉導覽、距離高差量測等服務(圖 2-9 及圖 2-10)，後續可進行坡度、地形濕度指數及地形粗糙度等植生資材容易附著區位之分析評估作業。



圖 2-7 崩塌邊坡三維點雲成果展示示意

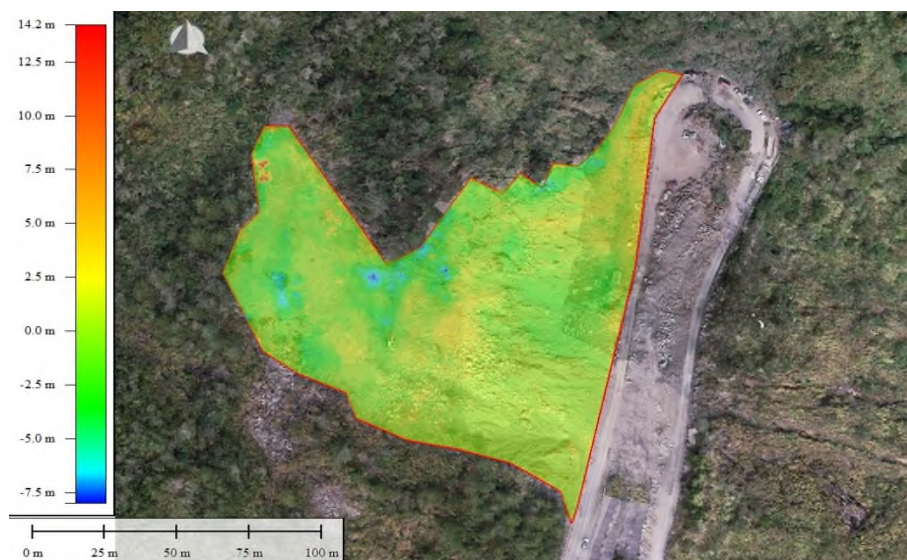


圖 2-8 DEM 假色影像套疊展示畫面

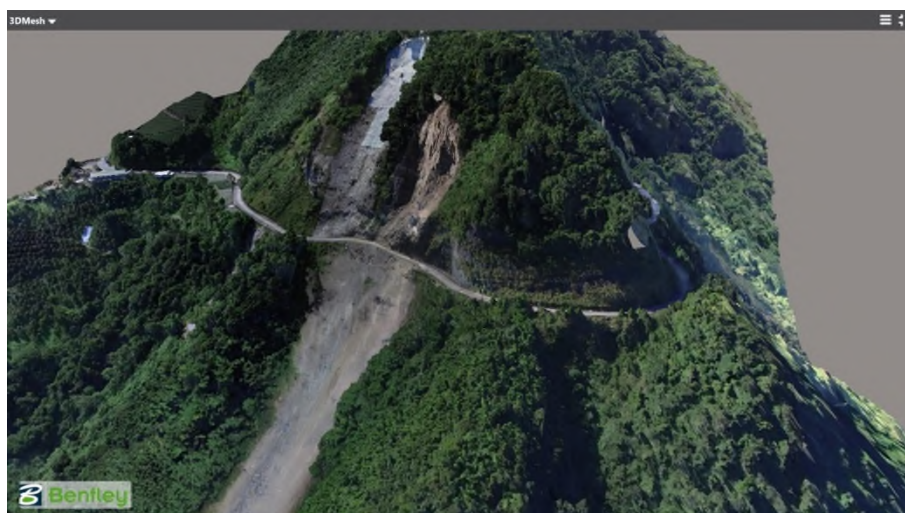


圖 2-9 崩塌邊坡三維空間地貌模型線上瀏覽畫面



圖 2-10 崩塌邊坡三維空間量測與地形網格特性

二、坡度分析

本研究將 DEM 利用 ArcGIS 10.3 軟體之 3D Analyst Tools 模組，計算數值高程模型每一規則網格之坡度，對 3×3 網格式資料而言(圖 2-11)，其中， h_1 和 h_2 分別為 x 軸與 y 軸間距，因此可以得到中心點 Z_5 之坡度 θ 如下 (Wilson and Gallant, 2000；莊智瑋，2010)，一般撒播坡度宜小於土壤安息角，因此取未達六級坡(55%)為適宜噴植區位(圖 2-12 及圖 2-13)。

$$\begin{cases} Z_{x1} = \frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{Z_3 - Z_1}{2h_1} \\ Z_{x2} = \frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{Z_6 - Z_4}{2h_1} \\ Z_{x3} = \frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{Z_9 - Z_7}{2h_1} \end{cases} \quad \begin{cases} Z_{y1} = \frac{\partial z}{\partial y} \approx \frac{Z_1 - Z_7}{2h_2} \\ Z_{y2} = \frac{\partial z}{\partial y} \approx \frac{Z_2 - Z_8}{2h_2} \\ Z_{y3} = \frac{\partial z}{\partial y} \approx \frac{Z_3 - Z_9}{2h_2} \end{cases}$$

$$\bar{x} = \frac{(Z_{x1} + Z_{x2} + Z_{x3})}{3} \quad \bar{y} = \frac{(Z_{y1} + Z_{y2} + Z_{y3})}{3}$$

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2}$$

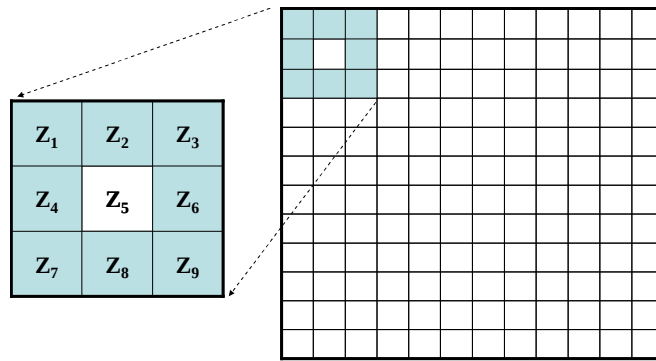


圖 2-11 3×3 移動視窗示意圖(莊智瑋，2010)

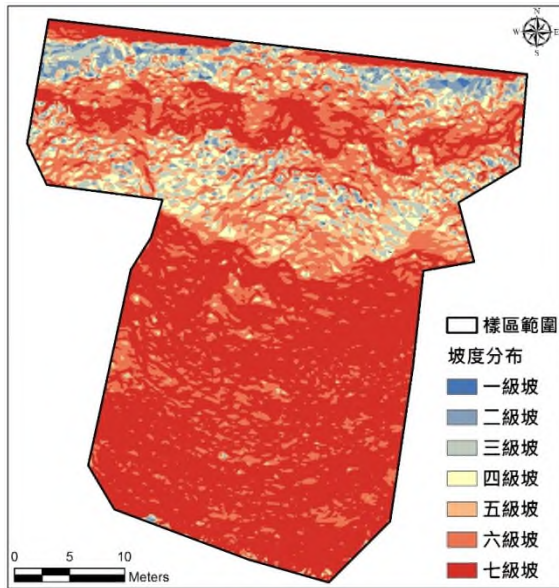


圖 2-12 坡度萃取結果案例

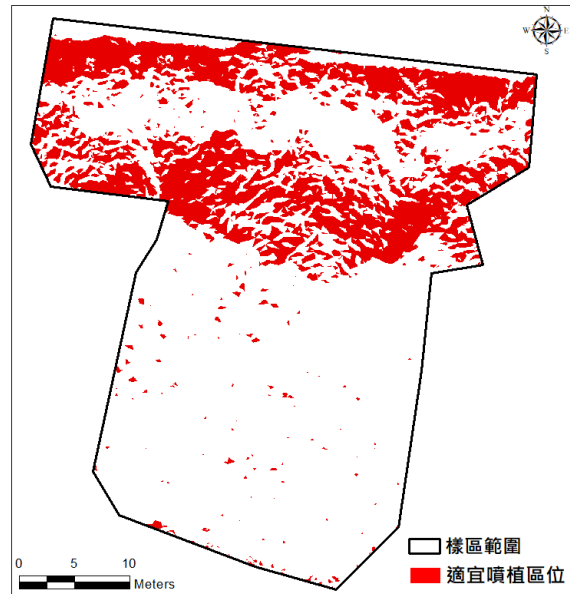


圖 2-13 坡度之適宜噴植區位

三、地形濕度指標

地形濕度指標(topographic wetness index, TWI)最早為 Beven and Kirkby (1979)所提出，為水文模式 TOPMODEL (a topography based hydrological MODEL)主要概念模式之一。Beven and Kirkby (1979)認為當坡度較陡時，逕流流速較快，使得入滲量變低，降低土壤中含水量；而於低平的地方時，由於坡度趨於平緩，使逕流於地表時間拉長而逐漸入滲，因此土壤中含水量相對較高，換言之，若坡度較緩、集水區面積較大土壤化育及堆積亦較多，其土壤有效深度亦較深(圖 2-14 及圖 2-15)。地形濕度指標的公式如下，式中， A_s = 單位寬度集流面積； θ = 網格坡度。

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \theta}\right)$$

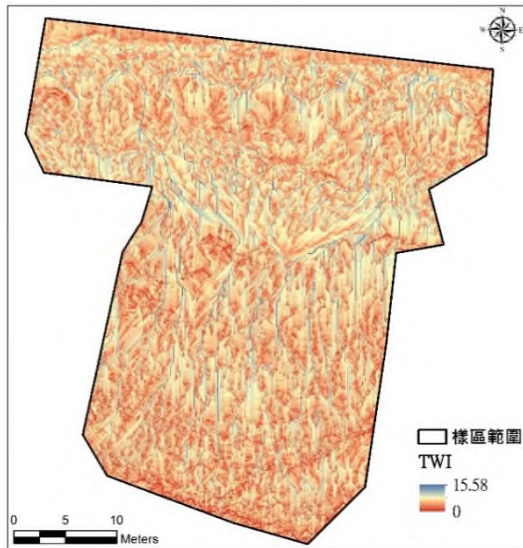


圖 2-14 地形濕度指標萃取結果案例

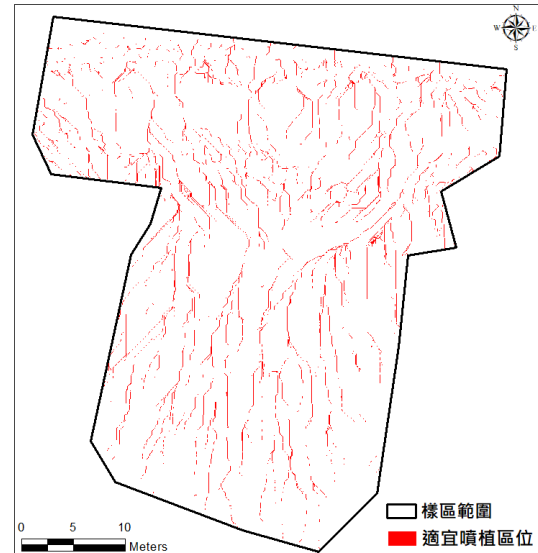


圖 2-15 地形濕度指標之適宜噴植區位

四、地形粗糙度

粗糙度定義為描述一區域地形高度起伏程度。Wilson 和 Gallant(2000)指出以圓形的視窗內所求得的標高標準差可做為高度變化程度之量測，而它對特定半徑視窗之區域地形起伏的量測具有指標意義。圓形視窗範圍如圖 2-16 所示，計算落入圓內的各網格中心點之標準差，即為視窗中心點(圓心)之地形粗糙度值。標準差 S 之計算如下：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i (z_i - \bar{z})^2}{n_c - 1}}$$

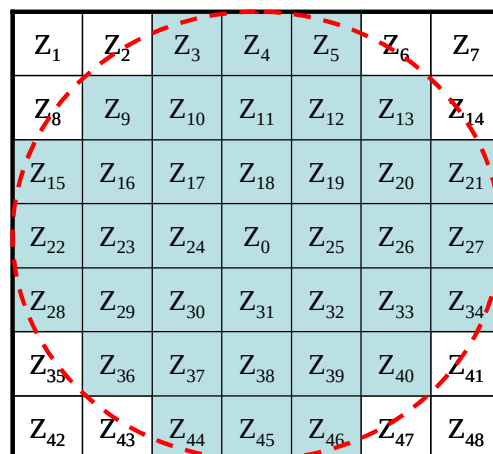


圖 2-16 圓形視窗之網格示意圖

其中， n_c 為視窗範圍內之點數； z_i 為各點之高度值； $\bar{z}$ 為視窗範圍內各點高度之平均值。由於視窗大小不同所反映的空間尺度亦不同，小視窗往往反應小尺度現象，如蝕溝、表土侵蝕等，而大視窗往往反應區域性構造等大尺度現象。本計畫為反映地形局部特性，避免移動視窗過大而稀釋地表特性，故地形指標均以 3×3 為網格移動視窗大小進行運算，計算 9 個網格內之標高標準差，以其作為中心點的地形粗糙度值。

粗糙度除可反映崩塌地區位微地形之溝谷外，由於植生粒劑或相關噴植資材易附著在樹島區位，因此利用 DSM 進行地形粗糙度萃取，可使崩塌地已存在之樹島被劃定出來(圖 2-17 及圖 2-18)。

五、最適噴植區位指標

為萃取最適噴植點位，本計畫將前述之地形濕度指數及地形粗糙度等指標，正規化為 0~1，坡度則越緩越佳，因此為反向正規化至 0~1，並將三個指標相加，並定義為最適噴植區位指標(Optimum hydroseeding index, OHI)，若該值越高，則表示為噴植時植生資材越易附著，且越易發芽、生長之區位(圖 2-19 及圖 2-20)。

$$\text{正規化公式} = \frac{(A - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} ; \quad \text{反向正規化公式} = 1 - \frac{(A - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}$$

式中，A 為任一網格指標值； $X_{\min}$ 為任一指標之最小值； $X_{\max}$ 為任一指標之最大值。

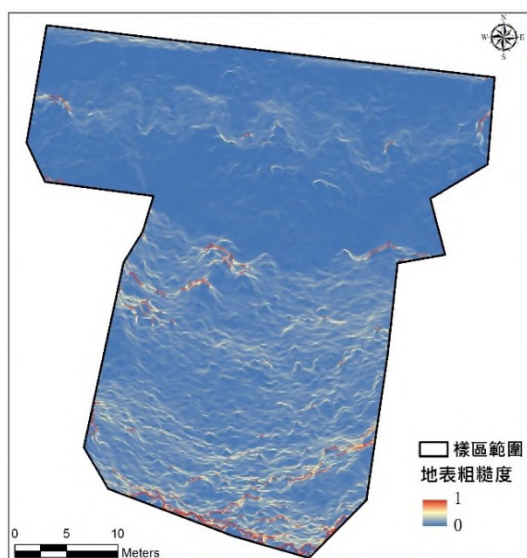


圖 2-17 地形粗糙度萃取結果案例

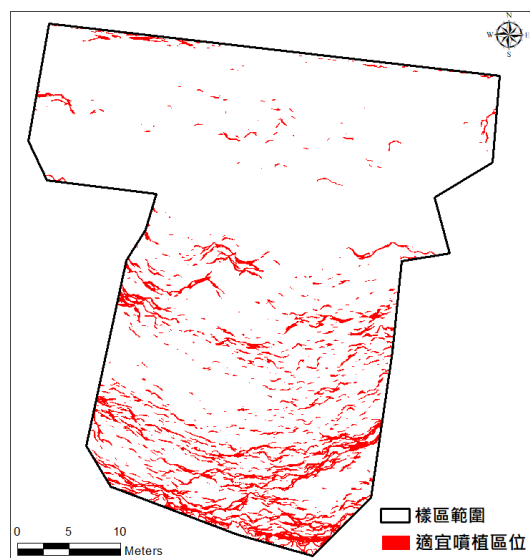


圖 2-18 地形粗糙度之適宜噴植區位

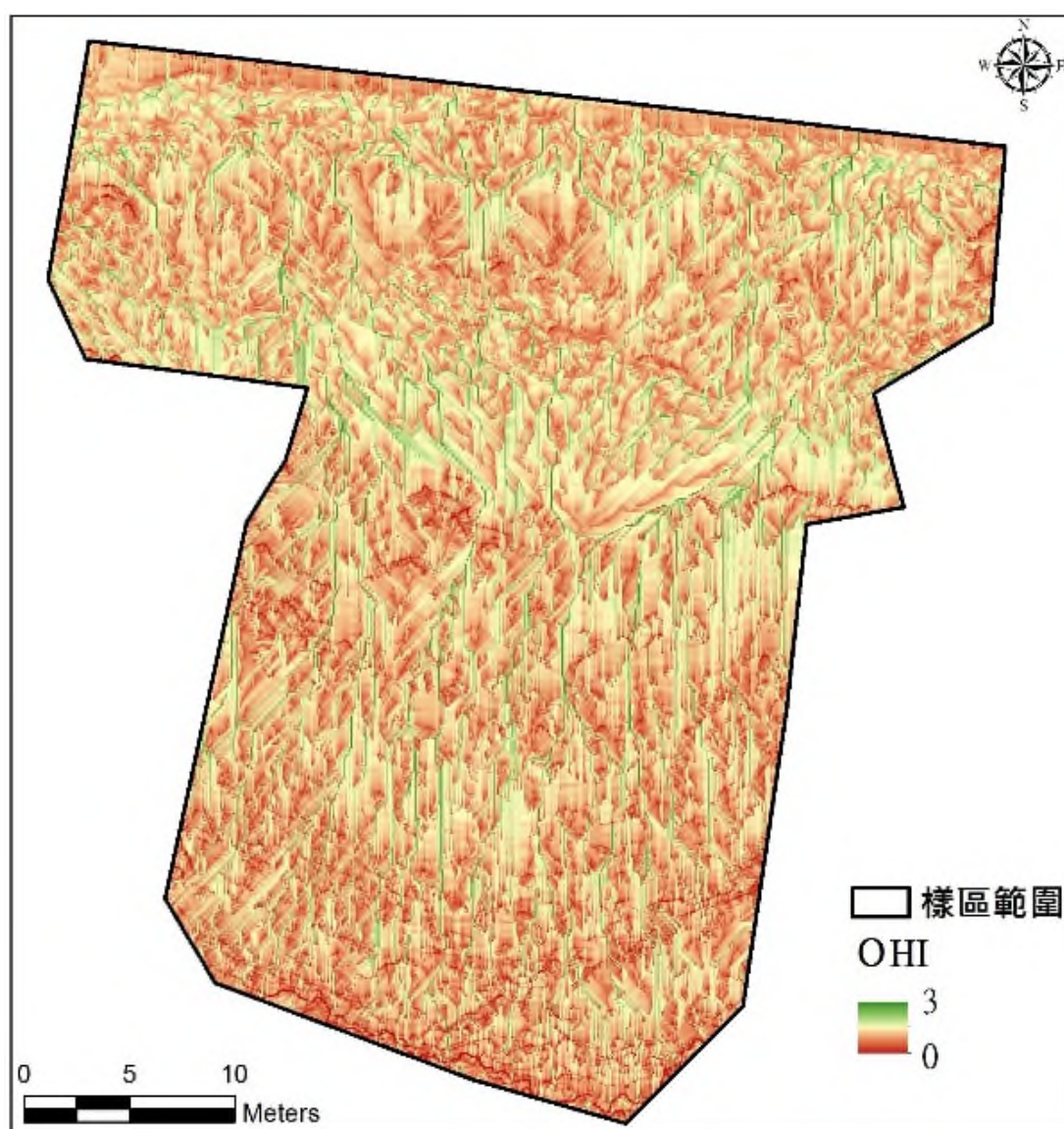


圖 2-19 OHI 萃取結果案例

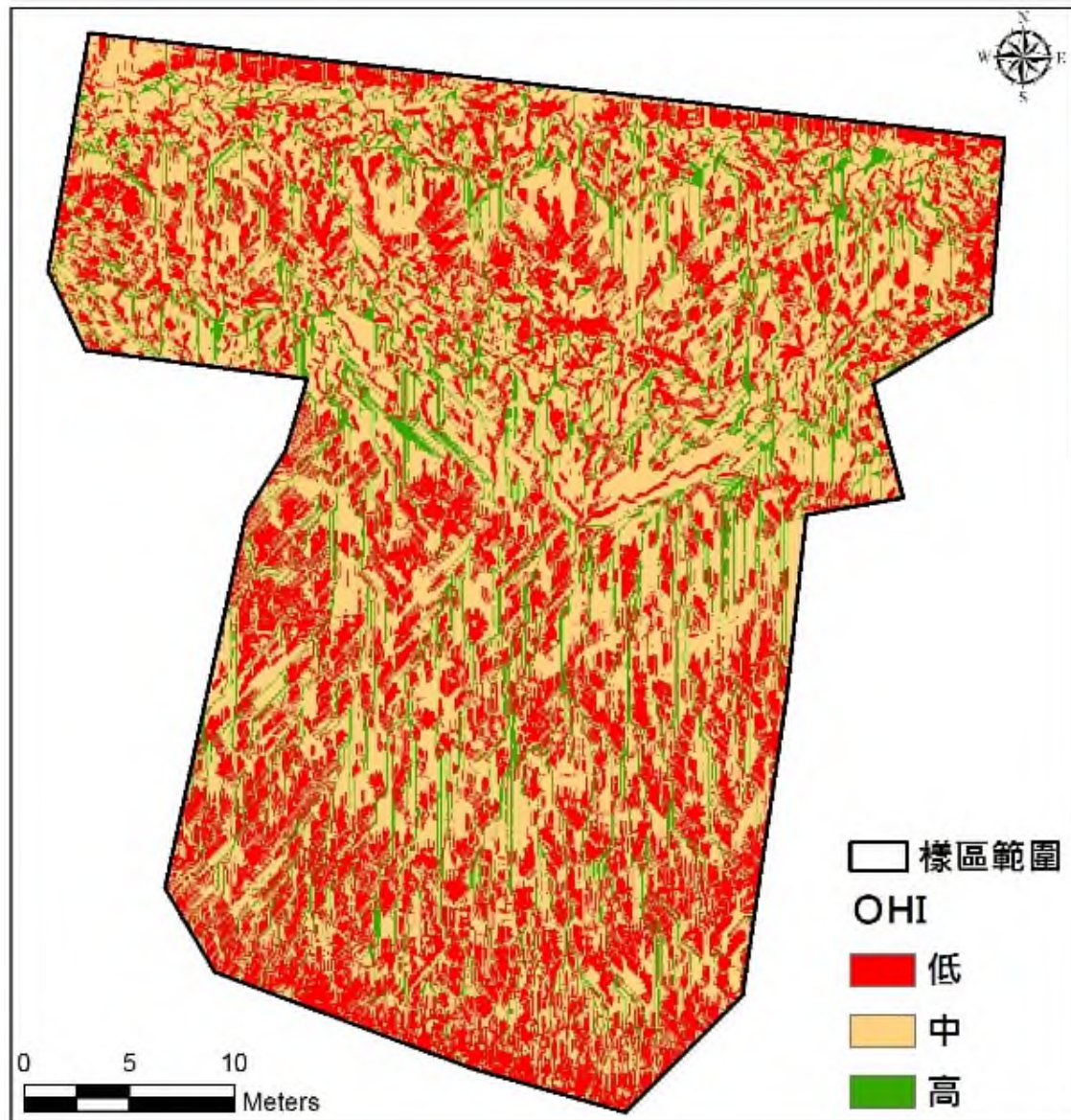


圖 2-20 OHI 之適宜噴植區位

第三章 大型無人飛行載具(15 公斤級以上)植生噴植系統之設計研發

本計畫以水平噴植為研發目標下，依可行性、實用性、通用性及價格等，探討適宜之 UAV 機具類型，據以設計研發適宜之大型 UAV 之噴頭。

第一節 無人飛行載具(15 公斤級以上)優選評估

UAS 系統依飛行特性可分定翼型(Fixed-wing)與旋翼型(Rotary-wing)兩種類型，旋翼型可再分為單旋(軸)翼型及多旋(軸)翼型。其中定翼型因具備飛行速度快、飛行穩定性高等優點，使其適合進行大範圍測區之特性；旋翼型則具備懸停拍攝與定位追蹤等綜合之優勢，並且單旋(軸)翼系統靈活性優於其他兩類型。國內、外常見各載具特性、抗風能力(圖 3-1 及圖 3-2)、優劣評估說明分述如下：

定翼型				
	Trimble UX5	Sensfly eBee	UAVER Avian-P	Geosat Sky Arrow
旋翼型				
	Trimble ZX5	Sensfly Albris	Microdrone D4-1000	DJI Phantom 4

圖 3-1 國內、外常見商用型 UAV 樣態

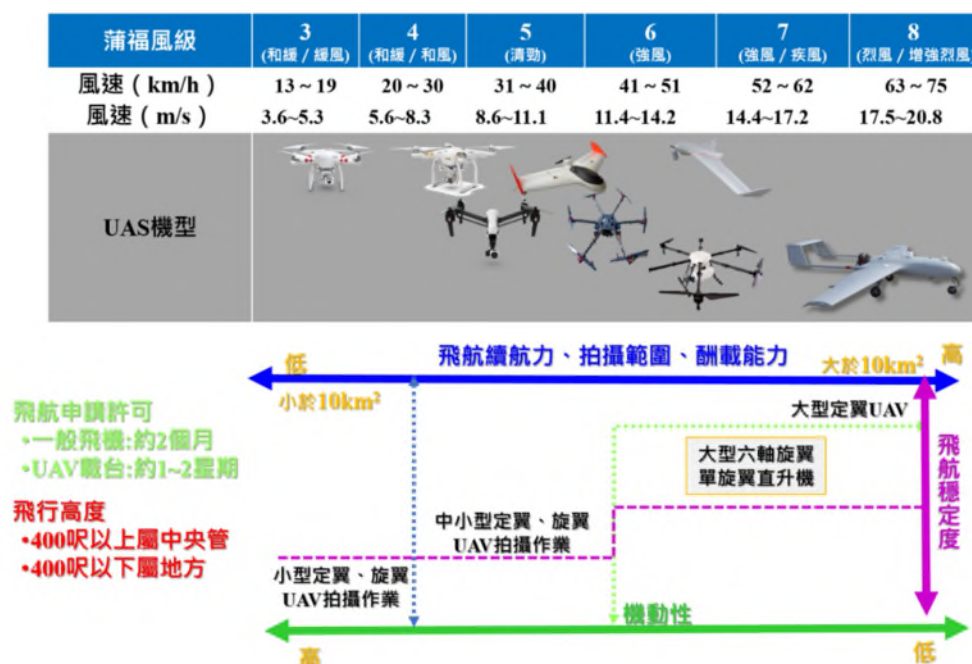


圖 3-2 無人飛行載具續航、拍攝、酬載能力比對說明圖

- 一、定翼型 UAS 系統：因具備高展弦比設計，使得該機種具備高飛行效率、飛行穩定性高，適用於長距離越野拍攝。而其使用限制為每次飛航皆須進行空域申請以及需飛行跑道(無法垂直起降)可進行航拍任務。
- 二、單旋(軸)翼型 UAS 系統：由一個或者兩個主旋翼提供升力的垂直起降功能，因具備完整驅動系統可自由調整姿態，故操控技術含量最高；另因載臺酬載與滯空能力皆可客製化開發，故適合用於中長範圍與地形變化複雜之監控任務。
- 三、多旋(軸)翼型 UAS 系統：由多旋翼動力組成亦具備垂直起降機功能，因其操控簡單、成本較低且機械可靠性較高。依載臺酬載與滯空能力可分為小型(4 軸)與大型(6 軸)兩種型態，適合短程小範圍之監控任務。

本團隊具備自主開發與市面商用 UAV 設備整合能力，相關載具飛行特性、滯空時間及酬載能力說明如表 3-1 及圖 3-3 所示。評估本計畫 UAS 系統需具備高蓄航與酬載能力、長距離通訊方案、崩塌地植生噴灑、附載系統設計等研發測試作業需求，將採用本團隊研發 TL-M62 系統執行本計畫相關測試任務與航空植生無人載具附掛系統之載具(圖 3-4)。

表 3-1 本團隊無人飛行載具特色比對說明表

型號	TL-3700A	TL-1000A	TL-M6	DJI-P3P	TL-M62
機身空重	<20 kg	1.3 kg	4 kg(含電池)	1.280 kg(含電池)	8kg
動力來源	120 c.c. 雙缸	3000 mAh Li-Po電池	10000 mAh Li-Po電池 x2	4000 mAh Li-Po電池	22000mAh Li-Po電池
滯空時間	6-10 hr	40-50 min	>20 min	<23 min	≥ 40 min
適用情況	高山區地區、大面積長距離環境監測	飛行高度低、解析度高、機動性高	機動性高 多鏡頭配掛、傾斜攝影、環場	解析度高、機動性高、攜帶方便	高山地區、大面積長距離、機動性高環境監測
照片					

UAV載具優選評估



圖 3-3 UAV/S 系統特性、運用特性及使用限制比對圖



圖 3-4 本計畫採用 UAV/S 系統特性說明圖

第二節 傳統航空噴植方式回顧

噴植技術起源於 1950 年間英國研發之土壤改良劑問世，1958 年日本引進開發噴植「瀝青乳劑覆蓋膜養生綠化技術」並實施機械化施工、後續引進高壓設備將基材分散噴植至坡面建構噴植綠化技術(種子撒布法)，以及開發濕式噴植機利用小型夾板式噴頭建構植物生育基盤，演變為今日所謂的客土噴植工法。臺灣直到 1970 年代方引進使用，搭配客土運用強力空壓噴植機進行噴植，為目前現在為軟質土、填方坡面綠化的主流。臺灣航空噴植於 1994~2004 年間分別於南投縣中寮鄉、台中縣東勢鎮、花蓮縣等地區崩塌地及台南縣泥岩地區進行試驗工程(吳建德，2015)。而噴植工法的研究與發展，包括噴植機械研發、噴植基材配方的改良、再生材料之利用與特殊作業技術之精進等。機械的研發可增加噴植之效率，基材適用性為影響噴植草、樹種生長之關鍵(何怡增，2001)。其發展集中在配方研發、施工工藝的革新和機械設備的發明(葉建軍，2004)。

航空噴植廣義定義指運用直昇機等航空機具進行植生施作之工法。舉凡人員之運輸、空中勘查、配合之地面基礎工程(如截排水工程、打樁編柵、鋪肥料袋包等生育基盤營造工程以及坡腳穩定工程)、

資材機具搬運，以及實際的植生資材撒佈作業等，均屬其範疇；狹義定義指利用航空器將種子、肥料、沖蝕防止劑、土壤改良材、植生基材等均勻撒佈或噴佈於坡面之工法(林信輝，2013)。

航空噴植主要適用地區與時機有以下六點：1.深山或偏遠地區、地形陡峻等條件不佳之地點，使用其它植生工法較困難時。2.施工地點多、零星分布或面積廣大地區。3.崩塌地、火災跡地等急需快速植生綠化地區。4.勞力不足或偏遠地區施工地勞工不易取得時。5.依經費、施工地條件及預期植生結果之綜合判斷，以航空植生較有利時。6.依技術觀點，使用航空器植生較別的工法施工快速，可掌握季節與時效，但航空器之使用費可能佔全部施工費用之 40%~50%，施工時需注意精準之專業技術與資材投擲效率，以及考慮可能受氣候影響(林信輝，2013)。若依裝備與適用特性可分為以下四類(林信輝，2013)：

一、橫抱式：植生基材裝料漏斗配置於直昇機兩側者。本型主要用於藥劑與肥料「噴撒」，亦可行一般種子「撒佈」。適用於大面積之平原，河海灘地、沙洲及坡度緩於 45° 之坡面植生與養護(圖 3-5(1))。

二、懸吊式：植生基材裝料漏斗懸吊於機腹下方者。本型可將全部植生材料混合，進行濕式或乾式之植生「撒佈」，比橫抱式更容易進行植生材料混合，投擲與施工效率較高。為目前坡地航空植生之主要裝備，適用於坡度緩於 30° 之坡面植生(圖 3-5 (2))。

三、噴佈式：在岩面或極陡坡地區，上述兩種方式撒佈植生材料固著困難時，航空植生工作不易進行。此法於機身裝置材料

桶、壓縮機及噴槍等裝備，於空中施行高壓種子噴植、生育基盤營造工法 (圖 3-5 (3))。

四、腹掛式：裝料桶懸掛於機腹下方，可由下方投料(圖 3-5 (4))。



圖 3-5 不同類型航空植生機具施工示意圖

第三節 UAV 噴植方式回顧

美、日等國以往航空噴植載具多以直升機為主，其具備完整驅動系統，其透過精密複雜機械結構可快速修正飛行姿態，其特點具備可垂直起降(無需跑道)、地形適應能力強，具備高度酬載能力與運用性，因此航空攝影、農業植保及電力巡線等方面仍以直升機為主要應用載具。

近期因無人飛行載具技術及其應層次與研究日益受到重視，因具有高機動性、高解像力、即時性及一定酬載能力等條件，美、日等國已開展大田作物、果樹和蔬菜的病蟲害防治等航空噴灑研究，從而實現合理施肥和農作物品質管理(張毅，1997)。特別適宜於種植規模較小、地形複雜低等施作條件(賈志成等，2011)。如美國橋水州立大學

學者 Fortes(2017)考量多旋(軸)翼型 UAS 系統操控簡單、成本較低且機械可靠性較高等因素，即可透過 UAS 系統設計定點航線結合 GPS 定位進行植生基材撒灑作業，其技術整合成效顯著。多旋(軸)翼型 UAS 系統進行農業撒播或航空噴植施作案例如圖 3-6 所示，因受限 UAV 載具酬載及通訊能力，多為平坦坡面或農地區域施作紀錄。



圖 3-6 UAS 系統航空植噴或撒播作業示意圖

第四節 不同 UAV 載具及噴植設計之比較

參照國內、外航空植噴附掛系統設計概念，評估大型旋翼無人載具 UAV/S 系統具備完整驅動系統，且可垂直起降(無需跑道)、地形適應能力強、高度酬載能力等特點(圖 3-7)，因此本計畫規劃採腹掛式方式進行無人載具植噴系統設計。

目前水保局及林務局等相關單位之崩塌地 UAV 植生作業，多採用灑播為主，透過投放式灑播，以重力作為噴植動力，因此可搭載較多種子量，所需 UAV 機體較小，惟 UAV 飛行高度高，灑播之精確度較低，與過去人工或航空噴植相比，仍屬於灑播工法而非噴植工法(表

3-2)。

而水平式噴植系統一般具有特定噴頭，透過空氣或水等動力噴出可縮小噴植區位，搭配微地形之適宜噴植點位萃取，可望提高植生復育率，並減少無效植生資材的使用，以降低植生資材成本，但噴植作業距崩塌地較近，須有較高之操作技術(表 3-2)，另採用水作為噴植動力，UAV 酬載量大，而以空氣動力之噴植方式則為今年預計研發之目的。



圖 3-7 UAV/S 噴植系統可行性評估

表 3-2 不同 UAV 噴植形式比較

比較項目	垂直灑播	水平噴植
動力	重力	空氣、水
可酬載資材量	多	少
資材成本	高	低
UAV 所需機體大小	小	大
UAV 距坡面需求高度	高	低
噴植適宜坡度	緩	陡
噴植精準度	低	高
操作技術	低	高

第五節 前期研究成果

本計畫於前期研究採水為動力之噴頭發成果說明如下：

一、作動裝置

可以獨立系統遙控器獨立操作或以組裝機擴充一通道連結操作觸發馬達噴射開關(圖 3-9)。



圖 3-8 本計畫採用之載具及腹掛濕式噴頭



圖 3-9 作動裝置

二、噴植容器設計

(一)機腹附掛輕質容器且採傾斜設計，可降低植生資材殘留。

(二)設計目標宜掛載 16L 植生資材材料桶(圖 3-10)，結合地面導控站(GCS)設計定點航線，將種子、黏著劑、肥料、其他添加物及適當水分充分混和之系統。

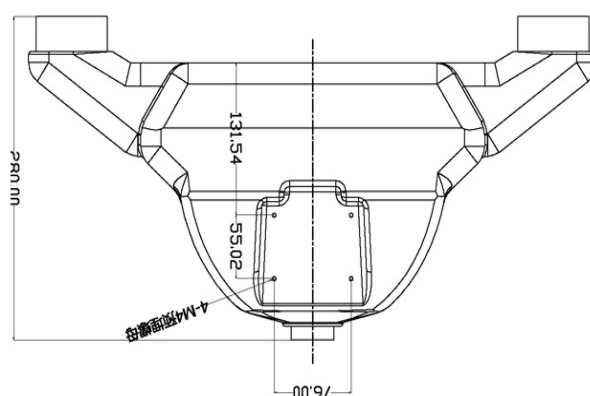


圖 3-10 16L 植生資材材料桶

三、加壓馬達

藉由馬達加壓將液態材料噴出，故不宜選用壓力及流量太小的系統。透過壓縮動力將酬載複合植生資材(溼式)經由流量控制閥、動力噴嘴導管進行空中規劃航線進行噴撒作業。動力噴嘴導管採大功率壓縮動力水泵，可提升無人機噴植安全距離(圖 3-11 及表 3-3)。

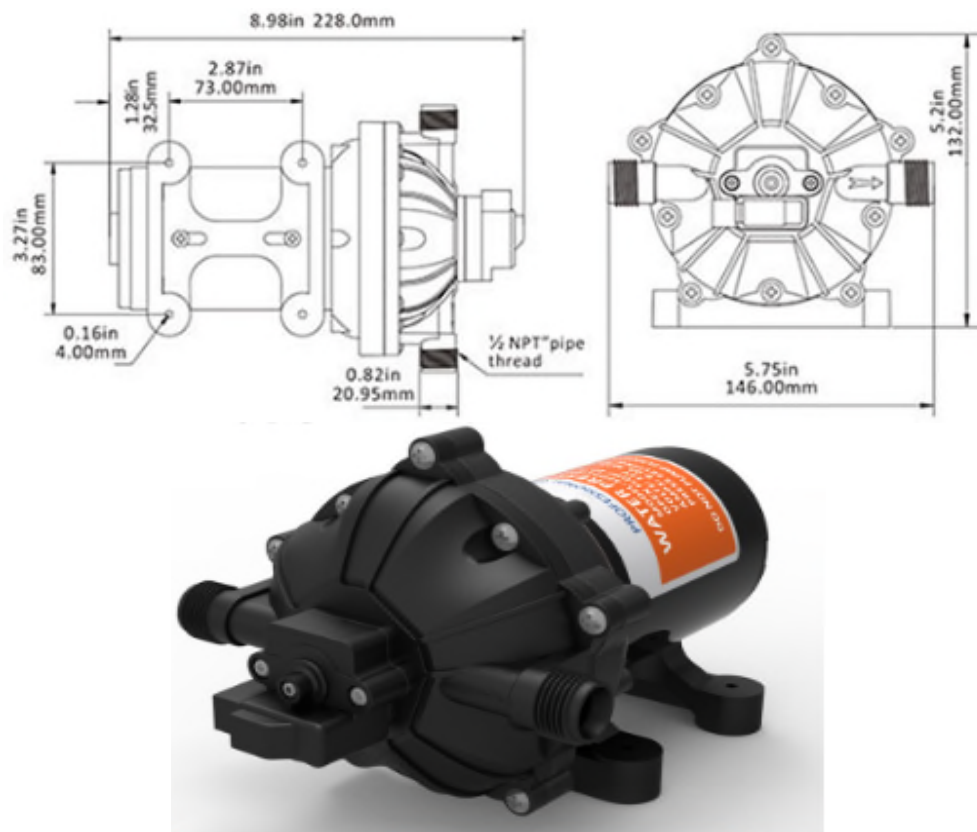


圖 3-11 壓縮動力水泵

表 3-3 壓縮動力水泵規格參數

工作電壓	DC 12 V
功率	180W
最大壓力	70 PSI
電流	15 A
流量	18 L/min
可承受液體溫度	60°

四、噴頭設計

(一)濕式噴頭

噴植設計之重點須能將植生資材，透過加壓噴植於坡面，因此除加壓馬達外，透過縮小噴頭孔徑，能增加噴植壓力，以利於陡坡崩塌地進行噴植作業，然此種設計易使種子卡於出口，但若加強馬達，需增加電池容量，惟 UAV 酬載能力有限，因此電池容量無法再增加，且噴植壓力過大可能影響機體穩定性(圖 3-12)。



圖 3-12 噴射系統

(二)乾式噴頭

由於種子、水、黏著劑混合後，易阻塞於噴頭及資材桶口，因此本團隊提出將固體種子與液體資材分離方式進行噴植，為配合此種噴植方式，亦重新設計乾濕分離式噴頭(圖 3-13)，其裝置主要於原噴頭上方加裝漏斗型容器，將種子裝於容器後加蓋，漏斗中間加裝螺旋葉片，透過容器上方之馬達驅動，將種子推出，最後以資材桶中的異狀資材為動力，將種子帶出進行噴植，而帶出過程種子亦可包附黏著劑，以利附著於崩塌地，防止沖蝕及鳥食。

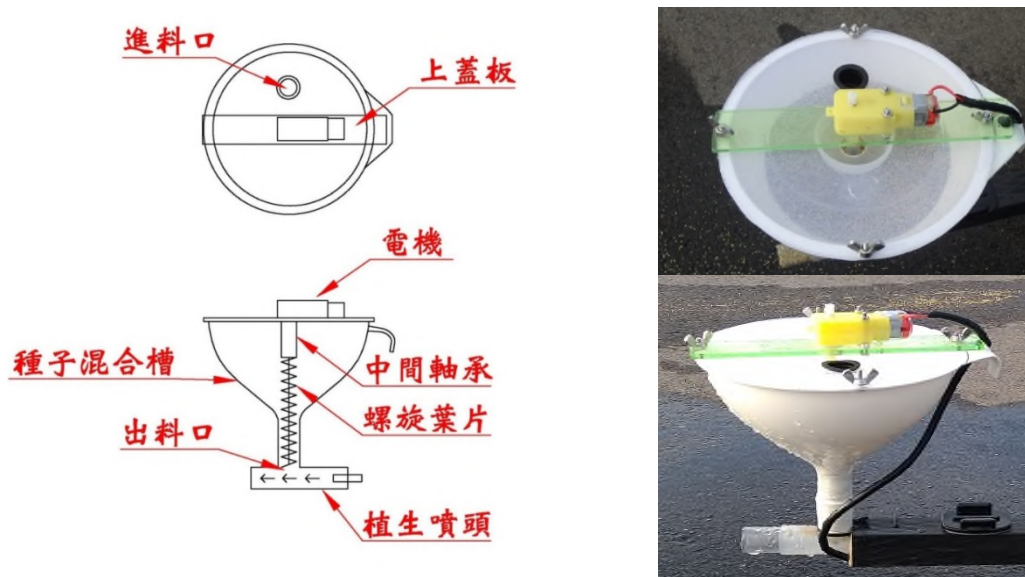


圖 3-13 乾濕分離式噴頭

為測試修正後之噴頭是否降低噴植距離，從定點噴植測試發現，經過此種修正後，噴植距離從 10 尺降為 5 公尺(圖 3-14)，但草籽確可有效帶出(圖 3-15)，可見此種噴頭可大幅改善噴頭阻塞問題，雖漏斗型種子攪拌器可有效帶出圓形種子材料，但採用狹長形種子材料則可能受限攪拌器空間，而有阻塞情形，若預先加水，亦可能增加摩擦力，增加阻塞可能性，因此建議採用圓形乾燥種子，搭配資材桶中之液體資材(水及黏著劑)作為動力帶出草籽。



圖 3-14 定點噴植距離測試



圖 3-15 草籽可有效從攪拌裝置射出

(三)氣動式噴頭

108 年度初期研究使用加壓馬達將水加壓並透過縮小孔徑之噴頭射出，以利於陡坡崩塌地進行噴植作業，然此種設計易使種子卡於出口，因此 108 年度後期研究將噴頭改良，改採將固體種子與液體資材分離方式進行噴植，主要於原噴頭上方加裝漏斗型容器，將種子裝於容器加蓋，漏斗中間加裝螺旋葉片，透過容器上方之馬達驅動，將種子推出，最後以資材桶中的液狀資材為動力，將種子帶出進行噴植。

改良後的乾溼分離噴頭有效解決草籽卡於出口的問題，惟仍需要大量的水當作噴植動力來源，考量 UAV 酬載能力有限，因此本團隊今年度提出新的噴植方法，以高壓氣瓶為噴植動力來源，如此，可減少水及加壓馬達的重量，大大減輕噴植設備的負載，噴頭今年度預計採用氣動式噴頭(圖 3-16 及圖 3-17)，透過高壓空氣為輔助推力將槍管中的固態種子單顆擊發，使材料能水平射出落於目標區。

噴植粒劑因今年度改成氣動式噴植裝置，所以預計改成彈丸

式種子粒劑，將種子混合液態資材(圖 3-18)，放入冷凍庫製成圓型且相同直徑(約 1.7 公分)的冰球粒劑(圖 3-19)，並搭配氣動式噴植裝置使用。



圖 3-16 噴植槍管



圖 3-17 氣動式噴植裝置

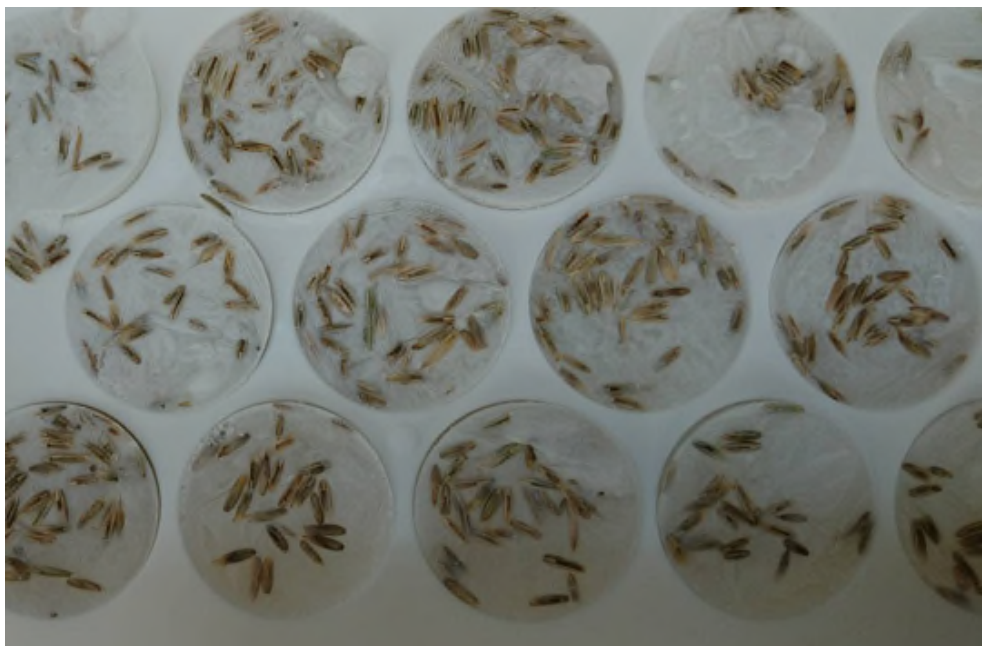


圖 3-18 種子混合液態資材



圖 3-19 冰球粒劑

本計畫初步針對氣動式噴頭進行飛行及射擊測試發現，噴植距離約可達 30 公尺(圖 3-20)；冰球粒劑射出並撞擊岩石、坡面時，會發生碎裂情形，且因粒劑含有黏著劑，因此可附著於岩石

上(圖 3-21)；射擊過程，粒劑於彈斗到槍管有卡彈情形，透過搖晃 UAV 機體可改善其情形；整體噴植過程，UAV 並未受到氣體動力之後坐力影響機身安全，在進行現地實噴前，本團隊預計於期中前完成此噴植系統之資材、噴植距離、坡度及坡面材質等變因試驗，以探討此噴植系統之限制。



圖 3-20 噴植距離初估



圖 3-21 冰球碎裂後種子附著於岩石之情形

第四章 陡坡崩塌地微氣象觀測

於試驗崩塌地架設微氣象觀測站，藉以觀測噴植作業於崩塌地樣區後之近坡面之氣溫、溼度、土壤含水量等氣象要素，將蒐集數據進行相關分析，以了解植生噴植作於導入崩塌地坡面後之生長與微氣象變化之關聯。

第一節 微氣象站

應用在現地之微氣象站設備概念示意如圖 4-1，由圖可知：監測模組設備包含：氣溫監測設備(用來監測試區溫度，進而了解當地溫度變化)、溼度監測設備(用以瞭解試區溼度，是否利於植物生長)、土壤含水量(用以瞭解該局部區域之土壤含水量，是否足夠種子發芽之使用)。

電力模組設備：監測設備主要電力來源為太陽能系統，包括太陽能板及備用之蓄電池。現場採用太陽能板提供電力供運轉使用，另外接深度循環蓄電池，電力蓄滿狀態能夠維持系統至少連續運作 3 日。

傳輸設備：依據崩塌地試區鄰近之基地台位置，選擇使用 NB-IoT 或 4G 傳輸設備，配合資料收集器於無遮斷情況下將試區微氣象感測資訊上傳遠端資料中心，以便提供現地管理人員參考。

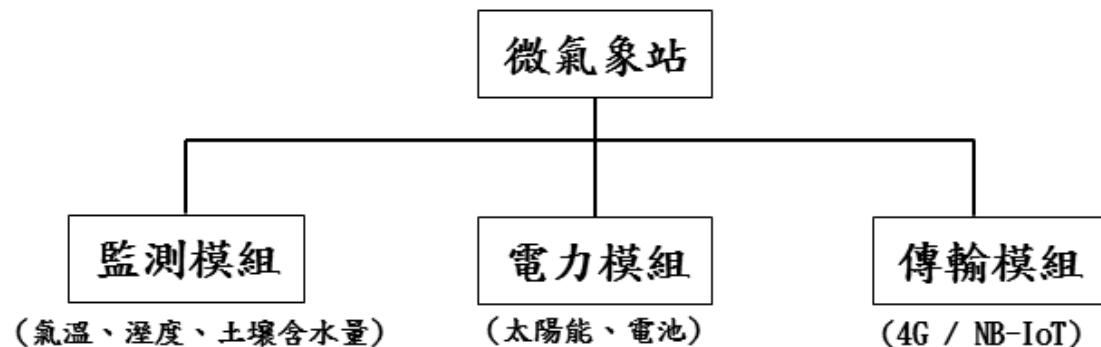


圖 4-1 微氣象站概念示意圖

第二節 微氣象站現場架設及感測器規格

為了解植生粒劑噴植於崩塌地坡面後之生長與近地表之微氣象變化之關聯，此次計畫架設一組微氣象站觀測站(圖 4-2 及圖 4-3)進行試驗，藉以觀測蒐集氣溫、相對溼度、地溫、土壤溼度等數據，期能提供日後植生粒劑噴植作業之參考。



圖 4-2 微氣象站觀測站



圖 4-3 微氣象站觀測站之儀器種類

微氣象調查站設置之位置考量收集現地氣象資訊，因此設置方式並不需依標準氣象站設置，以就近收集現地資訊為主要設置考量，各量測規格示如表 4-1，相關說明示如下：

表 4-1 微氣象站資訊感測器之規格

溫度測量範圍	-40～120℃
溫度測量精確性	± 0.5℃
相對濕度測量範圍	0～100% RH
相對濕度測量精確性	± 3% RH
土壤溫度計測量範圍	-40～120℃
溫度測量精確性	± 0.2℃
土壤溼度計測量範圍	0～100%
溫度測量精確性	± 2%

第三節 溫溼度計

可測量環境溫度、相對溼度並具有即時顯示溫度、濕度之功能，內部採用進口 IC 式溫濕度感測器(圖 4-4)，各主要元件均採用工業級高精度、高品質之產品，出廠時結合高精密溫濕度校驗儀器，保證了儀器的高精度、高可靠性、高穩定性。連續且長期的觀測可了解試區內導入植生粒劑生長與微氣象變化之關聯。



圖 4-4 本計畫採用之溫溼度感測器

第四節 太陽能供電模組

太陽能模組單晶 50W(1 片)、電池容量 12V/20AH 電池充飽於陰天條件下，感測器含 4G 傳輸可運轉 7.4 天(圖 4-5)。

第五節 土壤溫溼度計

土壤溫溼度感測計將土壤水分和土壤溫度感測器集中於一體，具有密封，高精度、高靈敏度等優點，適用所有土壤類型，設計原理係通過量測土壤的介電常數，能直接穩定地反應各種土壤的真實水份含量(容積含水率)，是目前國際上常用的土壤水份測量方法，當土壤變乾，較低的感測器讀數顯示土壤狀態趨向乾燥，較高的讀數顯示土壤狀態相對趨向濕潤(圖 4-6)。綜合上述儀器，本計畫於 11 月 1 日起施測，目前已監測 7 日，整體而前，變化趨勢不大(表 4-2)。



圖 4-5 本計畫採用之太陽能供電模組



圖 4-6 ST-1-PT-100 土壤溫濕度感測器

表 4-2 2020 年 11 月第 1 周微氣站觀測數據

觀測日期	氣溫(°C)	相對溼度(%)	土壤溫度(°C)	土壤溼度(%)
2020/11/1 7:00	29.75	54.1	29.4	8.47
2020/11/1 19:00	20.36	82.5	21.4	8.18
2020/11/2 7:00	30.63	49.1	35.0	8.17
2020/11/2 19:00	20.91	75.9	22.2	7.58
2020/11/3 7:00	29.37	41.1	36.4	7.47
2020/11/3 19:00	20.13	70.7	22.4	6.89
2020/11/4 7:00	29.86	41.1	36.2	6.97
2020/11/4 19:00	20.53	72.5	22.4	6.59
2020/11/5 7:00	32.50	42.5	38.6	7.07
2020/11/5 19:00	21.26	80.1	23.2	6.58
2020/11/6 7:00	33.09	54.7	35.4	7.02
2020/11/6 19:00	26.35	77.1	27.2	6.78
2020/11/7 7:00	28.51	70.9	28.4	7.07
2020/11/7 19:00	21.69	81.7	22.6	6.98

第五章 崩塌地應用大型無人飛行載具(UAV)噴植實作與驗證

為進行本計畫採用無人飛行載具(15 公斤級以上)及植生噴植系統進行驗證，將噴植實作分為先期及現地試驗兩部分，並以相機、錄影機與小型 UAV 進行實作過程側錄(圖 5-1)，以作為噴植實作驗證與展示之用。

在進行現地試驗前，將依據前述章節所採用之大型 UAV 載具、施作噴頭及資材所組成之 UAS，於適宜地點設計資材、噴植距離、坡度及坡面材質等變因，進行先期試驗，探討氣動式噴植系統優缺點，另於每一次變因試驗後，紀錄發射成功率及種子之發芽情形等。



圖 5-1 實作過程側錄

第一節 植生粒劑先期試驗

本計畫為配合氣動式噴頭，需先將植生資材製成團粒化之粒劑，為避免氣體壓力使粒劑碎裂，嘗試將植生資材預先冷凍為冰球，為探討冰球對種子發芽是否有影響，本計畫於噴植前預先針對不同黏著劑比例、冰凍日數及草種進行發芽試驗。

本計畫粒劑大小約 1.7 公分，參照 UAV 播種植生工法手冊之比

例約 200 顆種子，種子除了與水混和製成冰球粒劑外，亦須加入 C-710 黏著劑，其目的為噴植時，資材容易附著於坡面，亦可防止鳥食或螞蟻搬運，此外，黏著劑可防止冰球粒劑結冰後，球體互相黏著之現象發生，遂此，將針對冰球粒劑之黏著劑比例，依 0%、10%、20% 進行試驗，據此選擇最佳黏著劑濃度。

壹、變因設計—不同黏著劑比例

本團隊於製作冰球粒劑時發現，加入黏著劑與否影響融化時間，由於冰球粒劑需置於冰箱保存，一旦離開冰箱需越快噴植完成越佳，因此冰球粒劑融化速度宜越慢越好，本計畫於 0%、10%、20% 等不同黏著劑比例之試驗，除發芽程度外，亦將針對融化速度進行試驗(圖 5-2)。

結果顯示(圖 5-3)，未加入黏著劑之冰球粒劑融化速度較快，約 20 分鐘便已完全融化，而加入 10% 及 20% 黏著劑之冰球粒劑，可將融化時間延長至 50 分鐘，增加粒劑噴植的室外作業時間，且因黏著劑有黏著效果，融化後之植生資材不易分散，雖加入黏著劑可拉長作業時間，但仍不建議過長，避免冰球粒劑因融化而硬度不足，於噴植槍管中膛炸，降低噴植之成功率。

針對不同黏著劑比例是否影響發芽之試驗結果顯示(圖 5-4~圖 5-6 及表 5-1)，各黏著劑比例下之冰球粒劑皆可發芽，日本製造黏著劑廠商曾實驗 5% 及 7% 之黏著劑，皆不會影響發芽，而本計畫將濃度提升至 20% 發現，發芽率較 0% 下降約 10%，可見黏著劑增加太多可能影響發芽率，但影響程度不大，因此本計畫建議，在考量冰球硬度及融化速度下，可提升黏著劑濃度至 10% 到 20%。



圖 5-2 不同黏著劑比例之融化速度試驗



圖 5-3 不同黏著劑比例之融化速度試驗結果

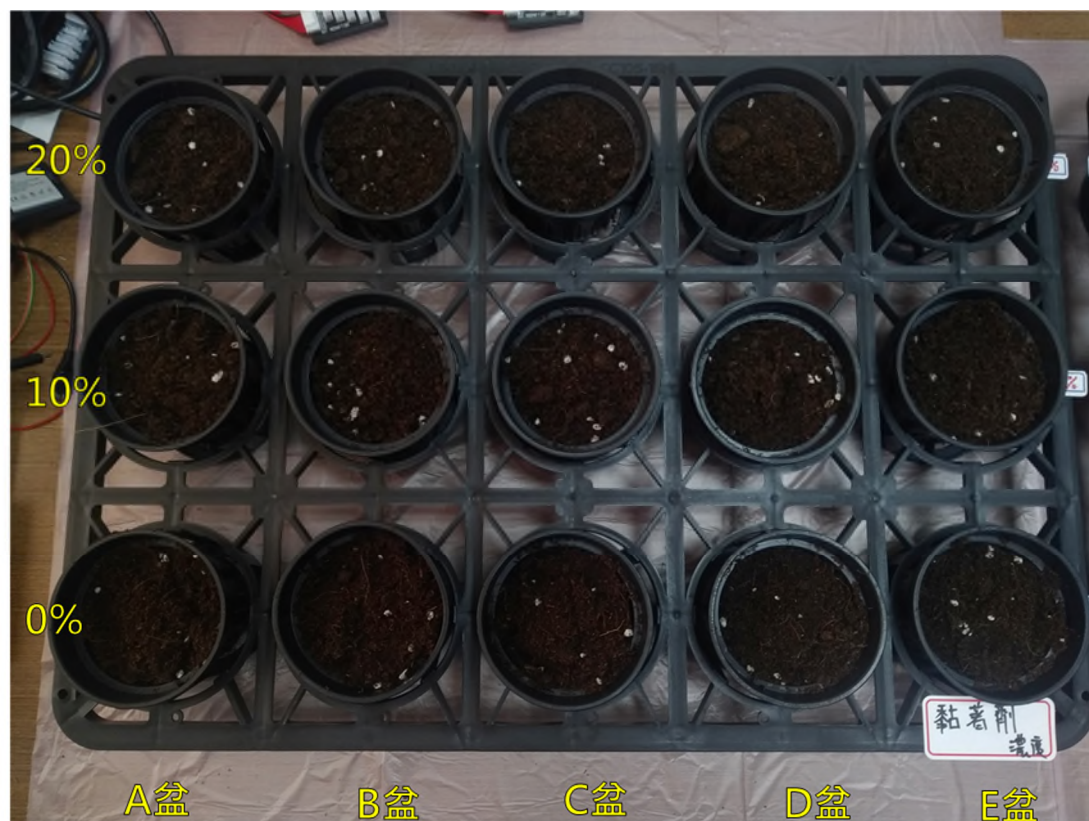


圖 5-4 不同黏著劑比例之發芽試驗(第一天)

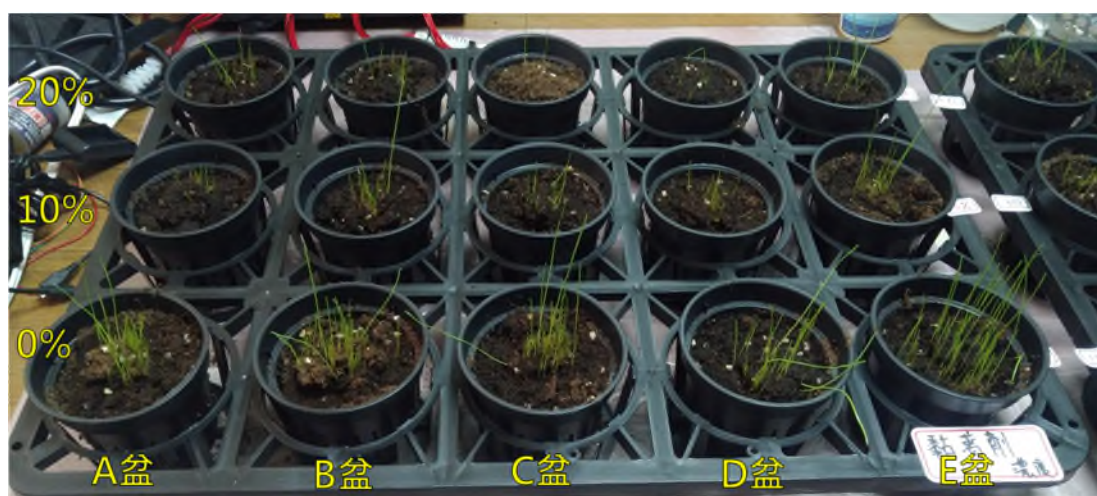


圖 5-5 不同黏著劑比例之發芽試驗(第一周)

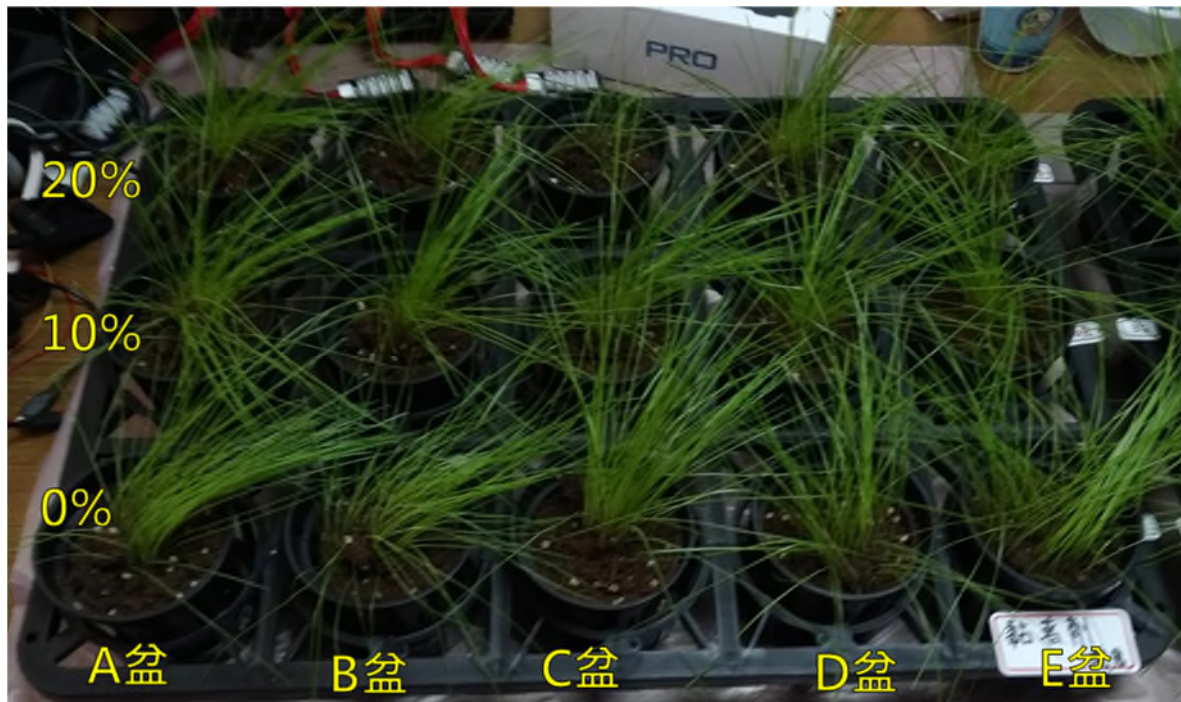


圖 5-6 不同黏著劑比例之發芽試驗(第二周)

表 5-1 不同黏著劑比例之發芽率

比例	0%	10%	20%
A 盆	194/200=97%	142/200=71%	148/200=74%
B 盆	144/200=72%	155/200=75%	149/200=74%
C 盆	172/200=86%	175/200=87%	154/200=77%
D 盆	172/200=86%	156/200=78%	137/200=68%
E 盆	164/200=82%	174/200=87%	180/200=90%
平均值	84.6%	79.6%	76.6%
標準差	8.98%	7.19%	8.17%

貳、變因設計—不同冰凍日數

冰球粒劑之冰凍日數越長，可提升冰球強度，避免從氣動式噴頭射出時，因氣壓強度過長而提前破裂，為探討冰凍日數使否影響種子發芽，本計畫將冰球粒劑冰凍 1、3、5 日進行發芽試驗(圖 5-7)，結果顯示，A~E 盆之發芽結果良好(圖 5-8、圖 5-9、表 5-2)，從平均發芽率來看，冰凍五日後的發芽率僅下降 5%，可見冰凍日數對於種

子發芽影響不大，推測原因乃本計畫採用黑麥草，黑麥草較為耐寒，因此冰凍對發芽影響不大。

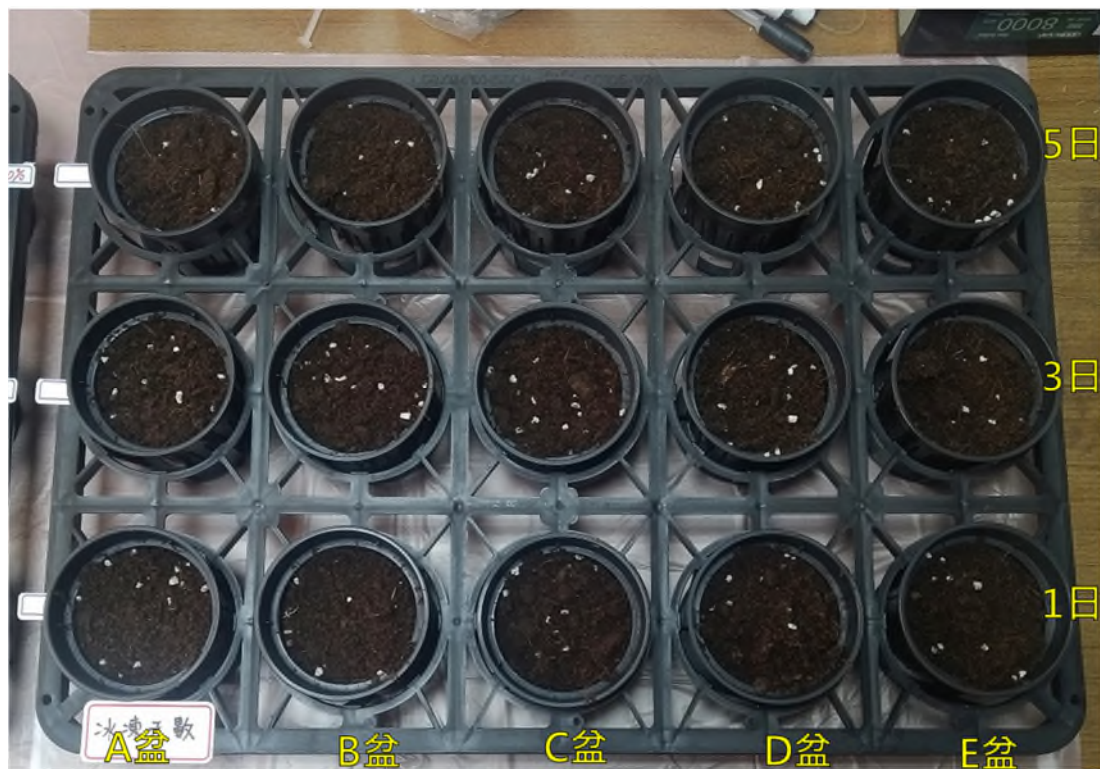


圖 5-7 不同冰凍日數之發芽試驗(第一天)

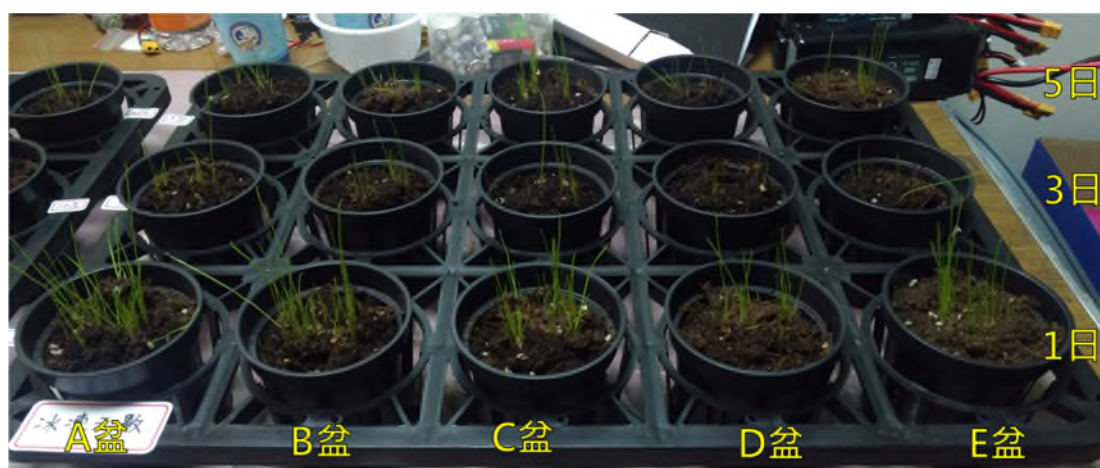


圖 5-8 不同冰凍日數之發芽試驗(第一周)

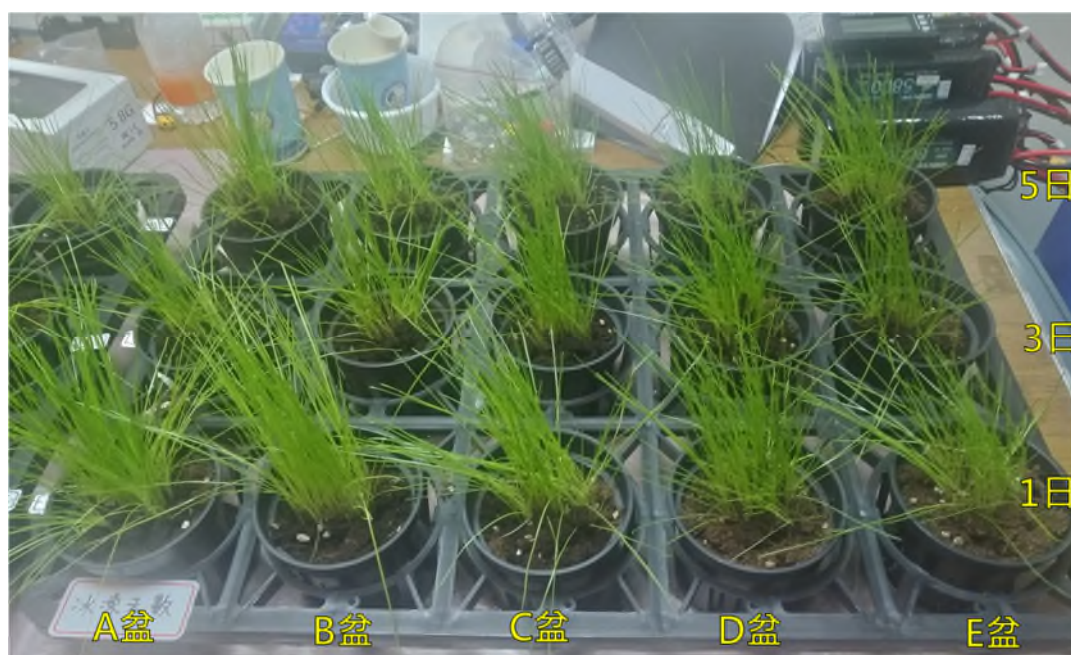


圖 5-9 不同冰凍日數之發芽試驗(第二周)

表 5-2 不同冰凍日數之發芽率

比例	一日	三日	五日
A 盆	163/200=81%	168/200=84%	162/200=81%
B 盆	198/200=99%	200/200=100%	159/200=79%
C 盆	179/200=89%	193/200=96%	194/200=97%
D 盆	199/200=99%	200/200=100%	174/200=87%
E 盆	200/200=100%	153/200=76%	200/200=100%
平均值	93%	91%	88%
標準差	8.35%	10.73%	9.39%

參、變因設計—不同草種

由於不同草種有其可適應之環境，而不同的發芽前處理亦會影響種子發芽，因此製作成冰球粒劑時，可能影響種子發芽能力，遂此，本計畫選擇律柏草、速率草、黑麥草及百喜草等草種進行發芽試驗，結果顯示，黑麥草因屬於耐寒植物，冰凍過後反而有助於其發芽，其餘草種之發芽情形則較不佳，由於本次試驗放置於戶外，播種後即不灑水，以模擬現地邊坡情形，結果顯示(圖 5-10 及圖 5-11)，黑麥草

雖有順利發芽，但因無雨水補充，因此幾天後皆已枯死，可見噴植時間點是否為雨季時期極為重要。

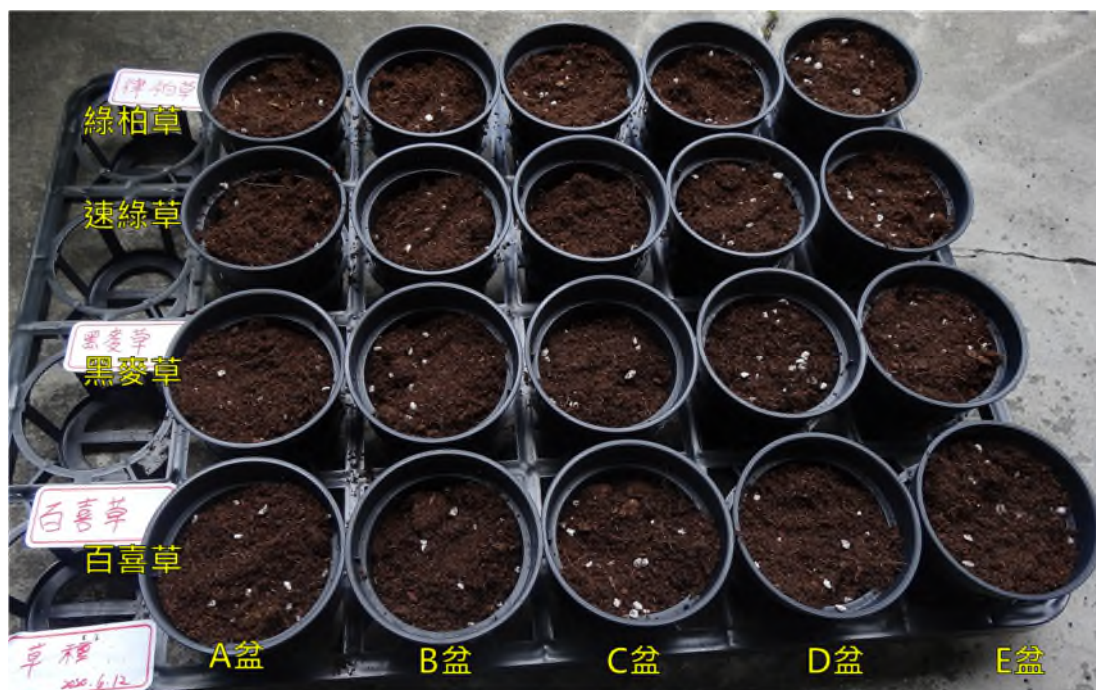


圖 5-10 不同草種之冰球粒劑發芽試驗(第一天)



圖 5-11 不同草種之冰球粒劑發芽試驗(第十天)

第二節 噴頭先期試驗

壹、變因設計—噴植距離

一、試驗內容說明

為避免 UAV 因噴植距離距坡面太近而有失事之風險，噴植距離宜越遠越好，本計畫採用之氣動式噴頭可達 30 公尺，惟考量噴頭射程及噴植精確度，應有其噴植之最佳距離，但考量本計畫實驗地點大小，因此，本計畫僅針對 5、10、15 米之噴植距離進行試驗(圖 5-12 及圖 5-13)。

本計畫於此次試驗變因皆採種子數(200 顆)、黏著劑(10%)、坡度(100%)、坡面材質(土壤)等基準，每次試驗皆發射 10 顆冰球粒劑，並以相機進行攝影，並以精確度(Precision)和準確度(Accuracy)做為評估指標，探討氣動式噴投之最適噴植距離。



圖 5-12 噴植距離之實驗地點



圖 5-13 噴植距離之實驗相對位置概況

準確度(Accuracy)是一個統計學上的概念，指在每一次獨立的測量之間，其平均值與已知數據真值之間的差距。若多次測量其平均值接近於已知的數據真值(理論值或期望值)，即可相信數據「準確」，或是數據具有「高準確度」。反之，若多次測量其平均值與已知的數據真值差距較大，表示實驗數據不準確，或準確度不高(張育唐、陳藹然，2011)。

精確度(Precision)同樣是一個統計學上的概念，指各次獨立實驗數據之分佈的「集中程度」。通常多次測量值的彼此之間的差距小，顯示精確度高；反之，若多次測量值彼此之間的差距較大，則此系列實驗不夠精確，即精確度低(張育唐、陳藹然，2011)。

準確度與精確度以不同的面向來描述數據的不確定性或者可確定的程度，雖然兩者的定義明顯不同，為清楚說明兩者，在此以「打靶」為例：如圖 5-14(1)，當子彈(即實驗數據)全數命中紅心(極

接近理論值)，顯示精確度高、準確度高。但如下圖 5-14(3)所示，即使彈孔集中於某一區域，具有高精確度，由於此集中區域偏離靶心，所以準確度低，這是在測量時比較常見的結果。至於圖 5-14(2)，彈孔均勻分布於靶紙上，表示精確度很低時，雖然所有測量值的平均值相當接近於真值，卻不是真的「準確」(張育唐、陳藹然，2011)。



圖 5-14 精確度和準確度之示意圖(張育唐、陳藹然，2011)

準確度與精確度之計算式分別為， $(M-X)/(T/2)$ 及 $T/(6\sigma)$ ，式中， M 為圖 5-14 之紅心位置； X 為群體中心之平均值； T 為標靶之直徑； σ 為群體位置之標準差，一般準確度小於 12.5%，而精確度大於 1.33 屬於良好等級。

二、試驗成果紀錄

本次試驗之標靶尺寸為 60X60cm，以標靶中心座標(0,0)為紅心位置(圖 5-15)，每次噴植點皆紀錄其座標(圖 5-16 及表 5-3)，並計算準確度與精確度(表 5-4)，結果顯示，噴植距離於 5 米時，擁有較佳之準確度及精確度，隨著噴植距離增加，準確度及精確度等級則有變差之趨勢，且當噴植距離達 15 米時，僅有 5 發命中標靶，可見，噴植距離越短，能較準確命中標的區，惟考量 UAV 距離山壁越近，失事風險越高，因此目前建議以 10 尺為較佳之噴植距離。

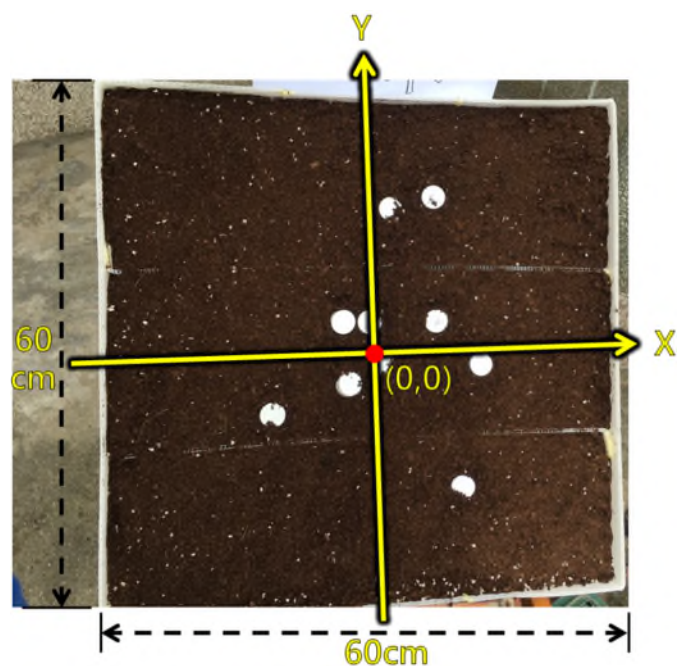


圖 5-15 噴植標靶尺寸及群體座標系統

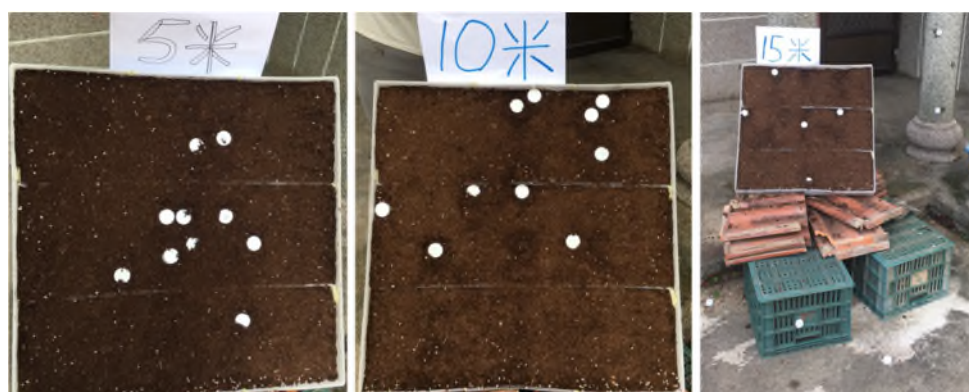


圖 5-16 5~15 米地面噴植試驗結果

表 5-3 5~15 米地面噴植試驗之噴植點紀錄結果

噴植點 編號	5 米		10 米		15 米	
	X	Y	X	Y	X	Y
1	5	30	2	30	-13	30
2	2	27	-1	27	-30	10
3	-5	5	13	28	15	10
4	-2	5	12	26	0	2
5	8	5	13	16	0	-28
6	0	0	-10	10	-2	-90
7	12	0	0	10	-40	-85
8	-4	-2	30	5	35	-95
9	-12	-8	10	0	60	10
10	10	-16	-15	-1	60	45

表 5-4 5~15 米地面噴植試驗之準確度與精確度計算結果

噴植距離	5 米	10 米	15 米
紅心位置 (X,Y)	0 (0,0)	0 (0,0)	0 (0,0)
標靶直徑	60	60	60
群體中心 之平均值 (X,Y)	4.81 (1.4,4.6)	16.04 (5.4,15.1)	20.91 (8.5,-19.1)
群體位置 之標準差 (X,Y)	15.24 (7.12, 13.48)	16.77 (12.33, 11.36)	59.43 (32.56, 49.71)
準確度	0.160	0.535	0.697
精確度	0.656	0.596	0.168

貳、變因設計—邊坡坡度及地表材質

由於水平式噴植工法相較於灑播式，期望能克服陡坡崩塌地之植生作業，且陡坡崩塌地常為裸露岩盤，因此，本次試驗於試驗地點旁取 90 度之垂直牆壁，表面為抵石子之硬質地，噴植距離約 10 米，噴植結果顯示，冰球粒劑之黏著劑加上強大之氣動式壓力，使粒劑附著於 90 度且硬質地之牆壁，可見，本團隊提出之氣動式噴頭，應可施作於陡峭之岩盤邊坡，雖岩盤無土壤可供種子發芽，但下雨後逕流能將植生資材帶到邊坡之蝕溝，亦可增加草種發芽機會(圖 5-17)。



圖 5-17 垂直牆壁之噴植結果

參、人造土坡試驗

本次先期試驗之試驗地旁有一人造土坡，該土坡高約 1 米，後方磚牆高亦約 1 米，總高 2 米，土坡坡度約 50~55%間，表面為礫石及土壤，初步將土坡植生拔除，以模擬天然崩塌地，噴植距離約 8 米(圖 5-18)，噴植結果顯示，植生粒劑主要附著於下邊坡，經過 10 天後再次觀察發現，黑麥草有順利發芽(圖 5-19)，經紀錄 10 天降雨發現，噴植隔天有降雨發生，可見適時給予水分對種子發芽極為重要，然經過數月後觀察發現(圖 5-20 及圖 5-21)，黑麥草雖有順利生長，但其他原生植物生長更加良好，推測於人工土坡堆置時，原有物種已於原土壤留下草籽，因此一起發芽生長，而黑麥草一旦被其他物種遮陰後則易死亡。



圖 5-18 天然土坡試驗地



圖 5-19 天然土坡噴植試驗結果(第 10 天)



圖 5-20 天然土坡噴植試驗結果(兩個月)



圖 5-21 天然土坡噴植試驗結果(五個月)

壹、小結

彙整前述變因試驗結果，氣動式噴植工法可適用於幾近垂直之陡峭且岩盤邊坡，雖岩盤無土壤可供種子發芽，但下雨後逕流能將植生資材帶到邊坡之蝕溝，增加草種發芽機會，考量噴植距離之限制，仍建議於視距內操作 UAV，或於訊號良好處可採用自動飛行，而冰球粒劑考量強度及融化程度下，可採用冰凍 5 天且黏著劑濃度達 20%。

影響 UAV 噴植施工作業之外部影響因子包括崩塌環境(地形複雜度)、均勻噴射粒子，飛行速度，噴射距離、坡度變化、風速等因素，其中飛行速度與均勻噴射粒子因素是可以控制，UAV 噴植施工作業時為定點噴植，所以 UAV 飛至定點時其飛行速度為零，待 UAV 穩定時，開始以每 2 至 3 秒的擊發一顆冰球粒劑的頻率進行作業。另外如果崩塌環境地形較為複雜時或坡度較為陡峭時(五級坡以上)，UAV 施

工噴射距離應增加以提供 UAV 安全的作業空間，風速小於 2 級時，噴植作業影響不大，風速介於 2 級至 4 級時，可視崩塌地環境縮短噴射距離以增加準確度，大於 4 級蒲福風級時，應暫停 UAV 噴植作業。

經實驗測試一個彈斗可以容量 200 顆冰球粒劑，每顆冰球內含約 200 顆草本種子，如果使用噴植氣動槍連續擊發彈斗內的 200 顆冰球粒劑，約一分鐘內即可全數擊發完畢，一瓶高壓氣瓶大概可以提供 3 個彈斗的噴射動力來源，使用高壓打氣機填充一瓶高壓氣瓶至 3000PSI，大概需時約 10 至 15 分鐘，如需大規模噴植，建議施作時一架無人機裝設二把噴植氣動槍管搭配二個彈斗，高壓氣瓶可準備 4 瓶輪流使用及充填，以達最大轉換使用效率。

表 5-5 氣動式噴頭成本分析表

項目	單位	單價(元)	規格
噴植氣動槍管	1 把	2,500	機械式半自動板機
高壓氣瓶	1 瓶	2,000	48CI/0.77L/ 3000PSI
彈斗	1 個	200	塑膠材質，0.3kg
高壓打氣機	1 台	12,500	最大輸出壓力值 300Mpa / 4500Psi

第六章 崩塌地應用無人飛行載具(UAV)植生成效之 監測與評估

第一節 噴植實作現地試驗

依前述所完成之先期試驗成果，於本團隊選擇之適當樣區進行現地試驗，抵達試驗場時，應對 UAV 無人噴植設備進行檢查，完成噴植資材的準備(圖 6-1)，並於地面完成噴灑測試後，再進行空中噴植作業(圖 6-2)，作業過程輔以相機、錄影機與小型空拍機進行實作過程側錄，以作為噴植實作驗證與展示之用。



圖 6-1 無人噴植設備檢查及資材準備



圖 6-2 現地空中噴植作業

為配合水土保持局執行之「UAV 播種植生實作驗證與應用技術精進研發」計畫，該計畫期望透過各種噴植方式，於水庫集水區完成預定面積之植生噴植工作，本計畫已於 8 月 20 日在石門水庫集水區之秀巒村執行噴植作業。

秀巒村位於新竹縣尖石鄉(圖 6-3)，民國 105 年 10 月 1 日受前期梅姬颱風間接影響，秀巒國小對岸邊坡(白石溪右岸)發生崩塌，崩落之土砂堆積於白石溪，佔據約三分之一河道寬度，曾於 106 年度進行白石溪溪岸崩塌坡頂截排水處理工程。此崩塌地面積共約 5.1 公頃，現地平均坡度約 70%，海拔約 850~1,200 公尺，坡向約略城西北向，土壤屬於石質土，經現勘瞭解，該試區仍屬不穩定區域，崩塌地中間蝕溝有持續刷深的現象，噴植成果仍持續監測中。

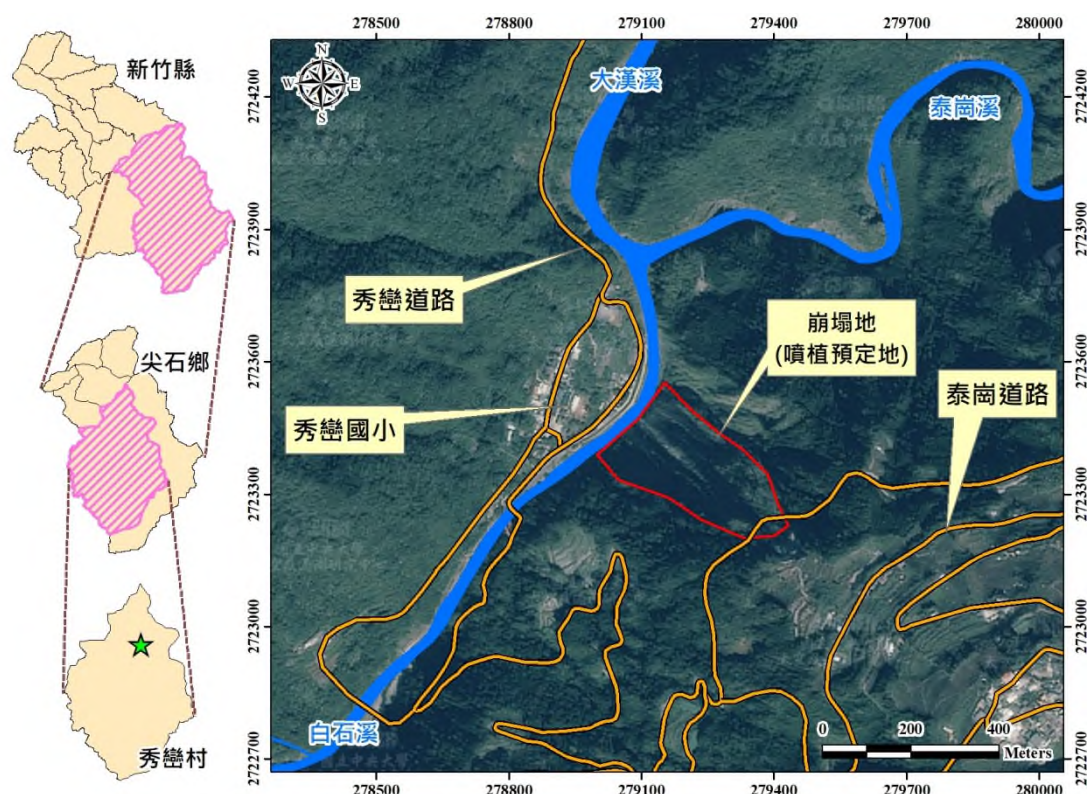


圖 6-3 噴植預定地之地理位置

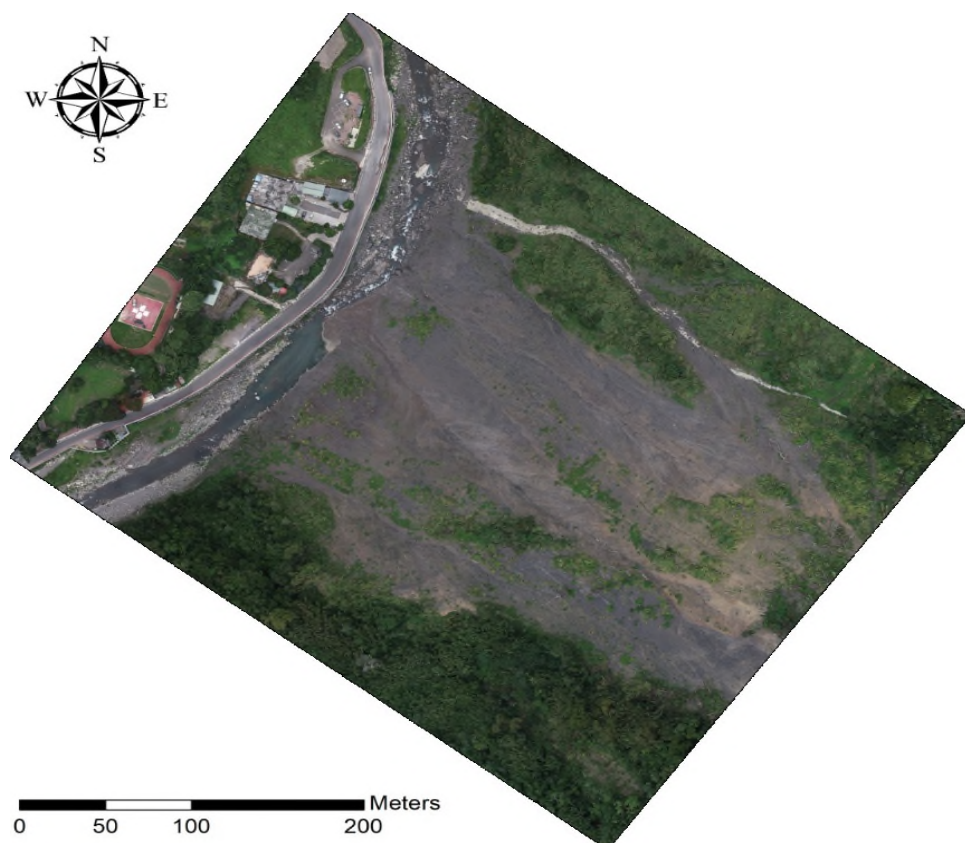


圖 6-4 秀巒試區正射影像圖

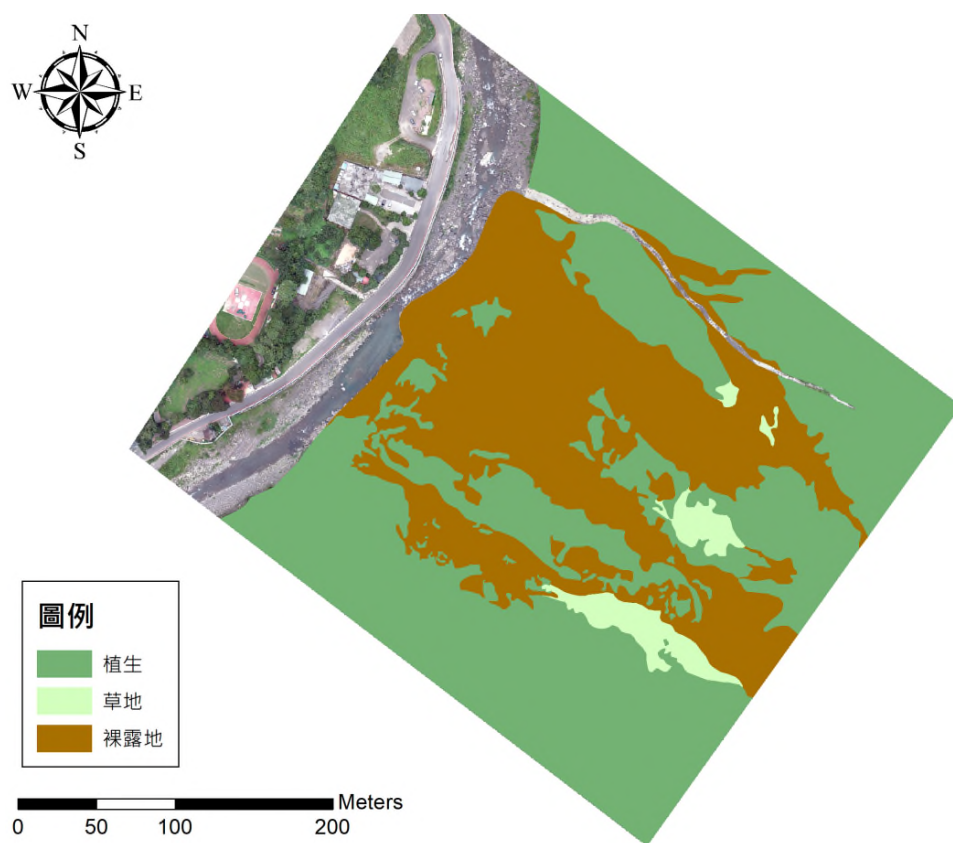


圖 6-5 秀巒地區植生覆蓋情形

壹、噴植實作流程

本計畫之噴植實作流程包含基地環境調查、施工前影像拍攝、劃定適宜噴植地點、航線規劃、噴植作業、施工後影像拍攝、成效評估及維護管理等(圖 6-6)。以下將針對各步驟進行相關說明：

基地環境調查主要針對環境植被調查、崩塌類型評估及相關立地條件調查，其調查項目如表 6-1，據以作為未來工法及草種採用之參考。在基地調查同時，亦透過 UAV 進行施工前影像拍攝(圖 6-7)，借以拍攝航照、多光譜影像及建置 DEM(圖 6-8)，進而萃取坡度、地形粗糙度及地形溼度指數等指標(圖 6-9)，劃定適宜噴植點位。

在確認適宜噴植點位後，利用航線規劃軟體(圖 6-11)設定測區範圍、噴植密度及飛行速度等參數，產生半自動或全自動導航飛行航線，再透過地面導控站與無線通訊系統將任務上傳至無人飛行載具，無人飛行載具會根據上傳之飛行計畫自動執行飛行任務，即自動飛行至目標區進行噴植作業(圖 6-12)，任務結束後自動返航、降落。

在實際噴植作業後，即進行多光譜影像拍攝(圖 6-13)，作為成效評估之值生指標基準期，往後則取固定時間持續拍攝多光譜影像，以利植生復育程度之評估。

表 6-1 崩塌地調查評估表

調查位置		行政區					
		空間座標	TWD97 二度分帶座標 X:		Y:		
地形地貌	邊坡類型	□土層邊坡 □岩層邊坡 □礫石層邊坡					
	邊坡參數	坡高(m)		坡度(%)		面積(ha)	
	各級坡度百分比 (網格資料)	一級坡		二級坡		三級坡	
		四級坡		五級坡		六、七級坡	
	邊坡滲水情況	□乾燥 □濕潤 □表面水 □湧水					
	植生覆蓋百分比 (多光譜影像)						
UAV 播種植生適宜性 評估		□否					
		□是:適用機型與播種方式：					

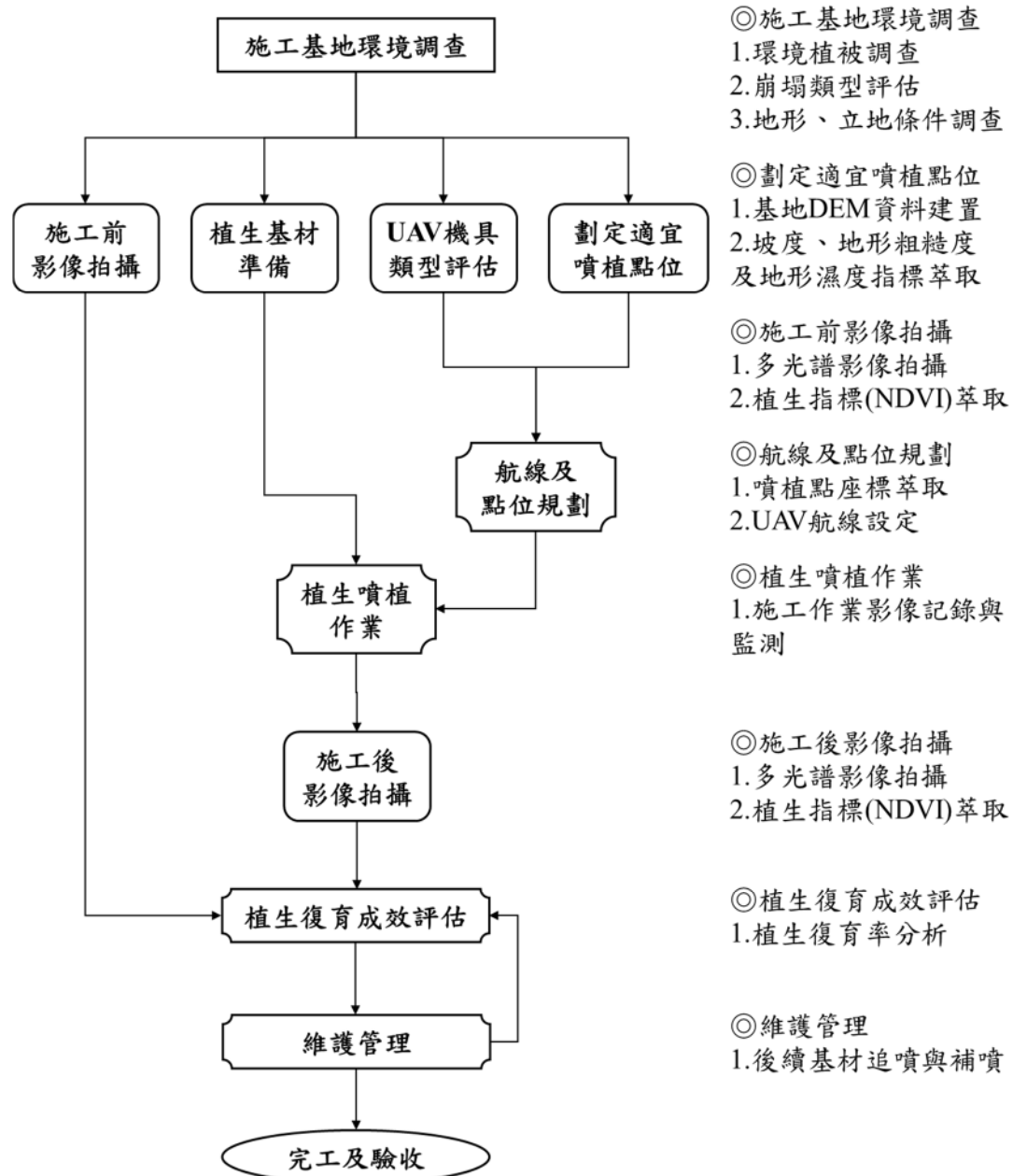


圖 6-6 噴植實作流程



圖 6-7 施工前影像拍攝

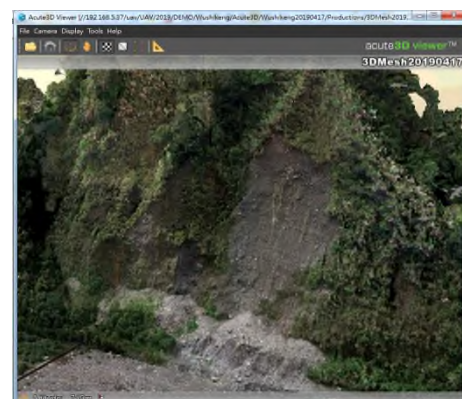


圖 6-8 3D 地形建模

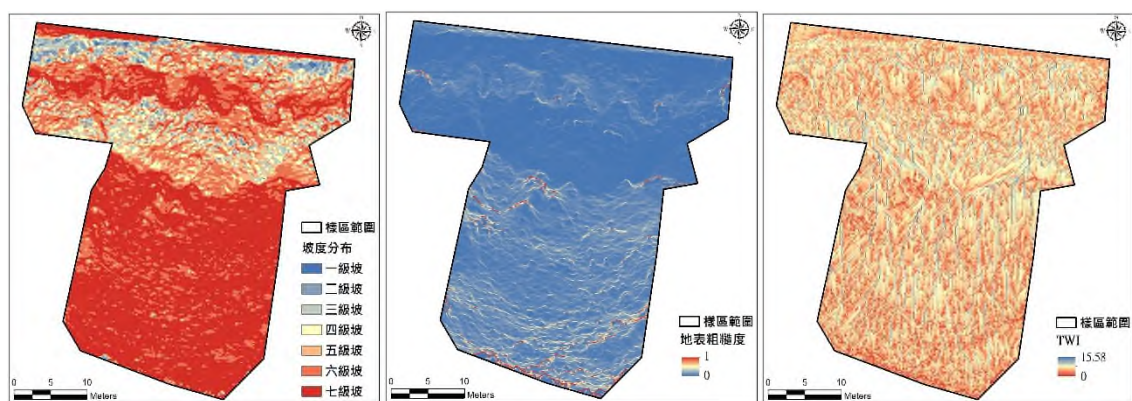


圖 6-9 環境指標萃取



圖 6-10 植生基材準備

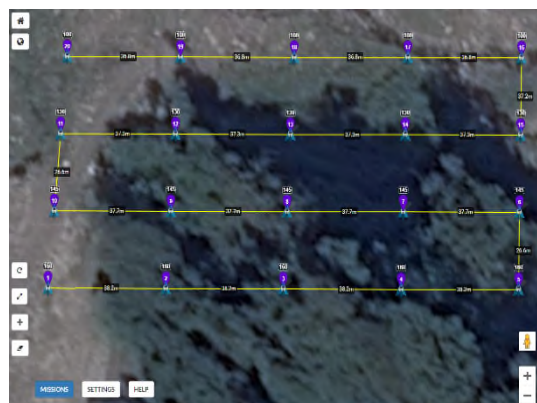


圖 6-11 航線規劃軟體作業畫面



圖 6-12 植生噴植作業



圖 6-13 施工前、後之多光譜拍攝

針對氣動式噴植作業施工過程可能產生之問題，本計畫亦羅列於表 6-2，在施工前之準備部份，宜注意噴植點位及面積推估，該推估結果與坡度、地形粗糙度及地形濕度指標萃取有關，另需先完成相關航線規劃及飛行申請。

噴植作業前需選擇適當草種，施作時宜留意噴植座標設定、基材

準備情形以及 UAV 噴植機具之操作；在噴植成效與養護部份，宜於噴植作業完工後，定期利用多光譜影像、航照圖或現場調查植生生長情形，以進行必要之追噴與補噴作業。

表 6-2 噴植實作步驟與應注意事項

施工流程	使用材料與施工機具	施工要項
1.施工前準備	UAV、地面 LiDAR、多光譜相機	1. 基地環境與噴植面積初估。 2. 噴植點位與作業時機規劃。 3. 適宜噴植點位之研判。 4. 噴植量之計算。 5. 基地 DEM 資料建置。 6. 坡度、地形粗糙度及地形濕度指標萃取 7. 航線規劃與飛行申請。
2.噴植基材選用及調配	植生基材	1. 噴植物種選擇。 2. 依噴植量調配基材數量。
3.噴植作業	植生基材、UAV 與噴植裝置	1. 適宜噴植點位面積評估。 2. 航線及噴植座標點設定。 3. 施工作業流程確立(含分期分區施工作業)。 4. 植生基材之準備 5. UAV 噴植機具之準備與作業操作 6. 噴植作業過程拍攝與監測。
4.噴植成效與養護	植生基材、UAV、噴植裝置與多光譜相機	1. 養護工作應於噴植作業完工後，即日開始至保固期滿為止。 2. 種子發芽與初期生長調查(現地調查)。 3. 追噴與補噴。 4. 植生覆蓋與成果監測(UAV 拍攝影像分析)

貳、噴植作業時程規劃

噴植作業各步驟所需工作天數評估如表 6-3，在施工前之基地調查約可於 1 天完成；後續需進行 DEM 資料建置、相關指標萃取、多光譜影像拍攝等宜有 7~14 天之工作天；在噴植作業前的飛行申請，依相關法規需 15 天左右；噴植作業前 5 天則須完成資材準備，而噴

植機具與儀器檢查約 3 個工作天；現場施工約 5 天完成，後續之植生調查監測與維護管理，則需視保固期之規定，以達驗收之標準。上述相關作業仍需視崩塌地面積與時建天氣狀況調整天數。

表 6-3 噴植作業時程規劃

施工作業要項	工作概述	工作天數
施工環境與基地調查	1. 環境植被調查 2. 崩塌類型評估 3. 地形，立地條件調查評估	1 天 (可依現況增加)
施工前置作業	1. 基地 DEM 資料建置 2. 坡度、地形粗糙度及地形濕度指標萃取 3. 多光譜影像拍攝 4. 植生指標(NDVI)萃取	7-14 天
飛行申請	1. 提出飛行計畫書。	15 天
植生基材準備	1. 適用物種與基材選擇 2. 基材使用量評估	5 天 (可依製作量增減)
UAV 機具與噴植儀器準備	1. 適用 UAV 機型評估 2. UAV 機型與噴植儀器檢查	3 天
現場施工	1. UAV 噴植作業(以 0.1 公頃為例)	5 天 (依實際現況調整)
植生調查監測與維護管理	1. 噴植監測(UAV 影像) 2. 種子發芽生長調查(現地調查) 3. 追噴與補噴 4. 植生成果監測(UAV 影像分析)	執行至達 驗收標準

第二節 植生成效評估

依水土保持技術規範第六十一條之規定，植生工程檢查應依施工地區之立地條件、應用植物種類及植生方法，設計覆蓋率。一般土質坡面噴植或水土保持植生施工後並經維護管理之覆蓋率應達百分之九十以上。地被植物栽植施工後並經維護管理之覆蓋率應達百分之八十以上。崩塌地、泥岩惡地、砂礫岩或其他立地條件不佳的地區，覆蓋率之設計標準得依實際現地狀況調整之。

因此，植生成效驗收可採覆蓋率為主，惟陡坡崩塌地屬特殊立地，且 UAV 噴植工法無法全面噴植，對於覆蓋率之門檻或計算方式應有所調整。遂此，本計畫提出以裸地率作為植生不可生長之指標，扣除該面積後，剩餘區位之覆蓋率則可作為驗收標準，惟覆蓋率之門檻須有更多實作案例，才可明確定訂。

裸地率指去除土木構造物、岩石、浮石、極陡坡地區等植物無法生長之區域，播種植物種子沒有發芽生長之面積比率，亦即植生不易生長之區位，其量化方式恰可與本計畫於第二章提出之最適噴植區位指標(OHI)相反。

OHI 乃利用利用 UAV 空拍作業配合地面 Lidar，可進行噴植地點之航拍及 DSM 製作，進而產製之 DEM，可透過 ArcGIS 之 slope 及 raster calculator 模組，分別萃取平均坡度、地形濕度指數；DSM 則利用 raster calculator 模組萃取地形粗糙度，將前述之地形濕度指數及地形粗糙度等指標，正規化為 0~1，坡度則越緩越佳，因此為反向正規化至 0~1，並將三個指標相加可得 OHI，若該值越高，則表示為噴植時植生資材越易附著，且越易發芽、生長之區位，透過 iso cluster 模組可將崩塌地分成高、中、低三個相對值，OHI 中或低等區位與崩塌地之比例則可定義為裸地率，因此該崩塌地裸地率越高則植生越不容

易(圖 6-14)。反之，在驗收上可針對 OHI 高之區位的覆蓋率進行驗收。

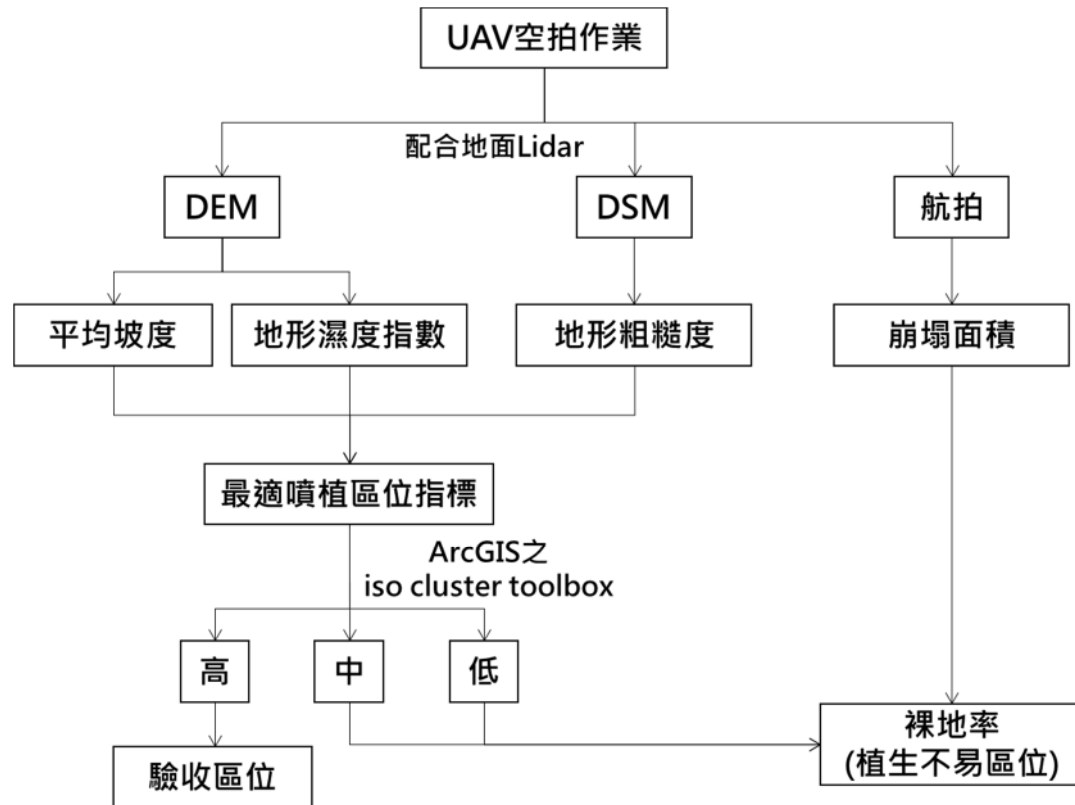


圖 6-14 裸地率推估之流程圖

第七章 結論與建議

- 一、本計畫針對噴植時機及區位等前置作業，提出以剩水量及最大蓄水量，計算全臺適宜噴植時機於北部地區全年皆可施作，臺中及花蓮以南則約 6~10 月
- 二、噴植區位則以平均坡度、地形粗糙度及地形濕度指數套疊而得最適噴植區位指標，透過該指標之萃取可提供未來航空噴植工法於噴植區位設定之參考。
- 三、在飛行載具部分採用六旋翼且可酬載 15 公斤以上之 UAV，噴頭設計則採用氣動式，並將草籽混和黏著劑製成冰球粒劑，可有效降低酬載液態資材之重量，並且噴植距離可從 5 公尺提升至 15 公尺。
- 四、黏著劑濃度及冰凍日數對種子發芽影響不大，因此考量冰球粒劑之融化速度及強度下，建議可將濃度調升至 20%，冰凍日數可達 5 天。
- 五、面對陡坡地且為岩盤之坡面，可透過氣動式之強大動力，將冰球粒劑附著於垂直岩盤上，待降雨時將種子輸送至堆積區使其發芽，藉此改善灑播投擲精確度不高之缺點。

參考文獻

1. 民航局(2012)，無人駕駛航空器系統在臺北飛航情報區之作業。
2. 民航局(2017)，解析「民用航空法」遙控無人機專章。
3. 何怡增(2001)，噴植材料對植物發芽生長影響之探討，國立中興大學水土保持學系研究所碩士論文。
4. 吳建德(2015)，中海拔地區不同基材噴植植生效益評估，國立中興大學水土保持學系碩士論文。
5. 林信輝(2013)，坡地植生工程，五南圖書出版股份有限公司，台北。
6. 張育唐、陳藹然(2011)，準確度和精確度，高瞻自然科學教學資源平台。
7. 張毅(1997)，遙控直升機在農業上的應用，世界農業：49-50。
8. 莊智瑋(2010)，環境指標應用於崩塌地植生復育之研究，國立中興大學水土保持學系博士論文。
9. 陳俊叡(2013)，「蘭陽平原之農地資源評估－以生態系統服務觀點」，臺北大學自然資訊與環境管理研究所學位論文。
10. 葉建軍、周明濤、許文年(2004)，談噴射護坡綠化技術，水土保持研究，(2)：194-197。
11. 賈志成、吳小偉、茹煌(2011)，直升機植保技術研究綜述，中國林業機械協會論文集，北京：國家林業總局。
12. 蘇潘(2017)，利用多期 Landsat 影像軌跡為基礎探討環境干擾之回復力指標，國立中興大學水土保持學系博士論文。
13. Beven, K. J., M. J. Kirkby (1979) "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology." Hydrological Sciences Bulletin, 24(1): 43-69.

14. Dunne, T., L. B. Leopold (1978), "Water in Environment Planning." Freeman, San Francisco.
15. Fortes, E P (2017) Seed Plant Drone for Reforestation. The Graduate Review, 2: 13-26.
16. Jensen, M. E., R. D. Burman, R. G. Allen (eds.) (1990) "Evapotranspiration and irrigation water requirements." ASCE, manuals and reports on engineering practice No.70. New York.
17. Jenson, S. K., J. O. Domingue (1988) "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographical Information System Analysis." Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54(11), 1593- 1600.
18. Penman, H. L., 1963. Vegetation and hydrology. Technical Communication No.53. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England.
19. Rouse, J. W., R. H. Haas Jr., J. A. Schell, D. W. Deering (1974) "Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS." In: NASA SP-351, 3rd ERTS-1 Symposium, Washington.
20. Thornthwaite, C. W. (1948) "An approach toward a rational classification of climate." Geographical Review, 38(1): pp.55-94.
21. Thornthwaite, C. W., J. R. Mather (1955) "The water balance. Publications in climatology." Drexel Institute of Technology Laboratory of Climatology, 8(1): pp.1-76.
22. Wilson, J. L., J. C. Gallant (2000) "Terrain analysis." John Wiley & Son, Inc., Hoboken.

附件一、期初查意見回覆

編號	審查意見	辦理情形
1	本工作執行計畫，尚未有執行成果，摘要內容無意義。	感謝委員指教，摘要將於期末報告時再加入。
2	本執行計畫內容，仍以服務建議書方式描述，與工作執行有落差。	感謝委員指教，本計畫已將初步成果撰寫於期中報告。
3	本工作執行計畫主題以 UAV 噴植工法精進研究，但工作計畫書並未針對前期的計畫所執行的方式檢討，提出精進作為的項目及方法。	感謝委員指教，本計畫已於第三章說明前期研究成果，其成果主要針對乾、濕式噴頭進行試驗，本年度提出之精進作為乃透過氣動式噴頭，提升噴植距離，降低 UAV 失事風險。
4	執行計畫書應針對 UAV 噴植試驗地區之選定評估結果說明，就選定區之面積、地理位置、地形地勢、土壤條件、自然環境等具體說明。	本計畫預定噴植地點為新竹縣尖石鄉秀巒村之秀巒國小對岸崩塌地，已將預定地點之相關基本資料敘述於報告中，請參閱 P.60~P.61。
5	就選定地區，進行相關調查方法及步驟、UAV 噴植系列作業方法說明。	已於第五章第三節補充說明 UAV 噴植前、中、後之作業流程及方法，請參閱 P.62~P.67。
6	UAV 噴植試驗採用機型規格、噴頭形式、種子粒劑類型、草籽種類及配比等，要有明確的說明。	機型規格及噴頭形式之採用於第三章有詳細說明，請參閱 P.26、P.36~P.38，種子粒劑類型、草籽種類及配比等則於第五章有補充說明，請參閱 P.45~P.49。
7	試驗成果調查，應就噴植區一定面積範圍，以逢機選取樣區檢驗，進行分散度、發芽率、成活率等驗證。	由於 UAV 噴植適用於陡坡或交通不便處，因為植生成效亦採用 UAV 拍攝多光譜影像進行監測，較難採用逢機選取方式檢驗，另分散度、發芽率、成活率等則於先期試驗，模擬邊坡進行噴植，

8	P.4 表 1-1 工作進度時程表中期初、期中、期末簡報時間有誤，請修正。	感謝委員指教，已修正，請參閱 P.4。
9	P.12 轉換為最大蓄水量 S 值則分別為 75.87、41.35、25.12、16.21mm，因此第一場雨若大於 37.93、20.68、12.56、8.11mm，則可進行噴植作業。此數值為 0.5S，與前述「第一場雨若大於 0.2S 時，則該場雨後，宜馬上進行噴植作業」不同，請說明原因。	感謝委員指教，文中 0.5S 為誤植，已修正為 0.2S，請參閱 P.12。
10	P.14 本計畫作業範圍可能受限於地形過於陡峭與持續有落石情形之危險性，以無人飛行載具進行空中照片拍攝，但需利用地面 Lidar 雷射掃描儀獲得受地形與植被遮蔽影響之崩塌邊坡資料，建議再評估地面 Lidar 的可行性。	感謝委員指教，為取得先期計畫範圍地形資料，以無人飛行載具拍攝為主，但其地形測製精度較低，在環境許可下，為提升計畫範圍地形測量精確度，以地面 Lidar 進行測量，確保地形資料正確性，作為後續分析之基礎資料。
11	P.39 氣動式噴頭進行飛行及射擊測試發現，噴植距離約可達 30 公尺，請說明冰球粒劑為直線移動或是拋物線移動。	設計實驗發現，冰球粒劑應為直線移動，惟距離越常將呈現拋物線，但在 15 公尺內約可視為直線運動。
12	P.46 冰球粒劑射出並撞擊岩石、坡面時，會發生碎裂情形，因此可附著於岩石上，應確認多少距離內才有足夠撞擊力使得冰球粒劑碎裂，若冰球粒劑未碎裂時，恐不易修留在預期的區位。	於實驗設計中，以噴植距離為實驗變因，分別採 5、10、15 公尺，探討冰球粒劑碎裂情形，請參閱 P.53~P.57。
13	P.52 噴植完成後，本研究擬利用 UAV 拍攝正射影像進行植生覆蓋之變遷分析，監測樣區之植生成效，建議應考量如何排除自然復育造成的植生覆蓋，以準確評估 UAV 噴植工法之植生成效。	感謝委員指教，在執行噴植作業前可進行現場環境調查，記錄監測樣區原生植物物種及點位，日後便可利用此份調查記錄區分噴植生長或自然復育之差異。

14	建置植生區位之規劃以石門、曾文水庫集水區為主，以符合本局政策。	感謝委員指教，本計畫將配合本局之 UAV 播種植生實作驗證與應用技術精進研發計畫，於石門水庫集水區進行實作。
----	---------------------------------	--

附件二、期中查意見回覆

編號	審查意見	辦理情形
1	P12 依據調查說明噴植區土壤分類屬性及其對應 SCS 法曲線值，初步推估 Pe 值，一場大雨之降雨延時，如何界定，考慮噴植基地的土壤特性保水力，不宜太低估。	SCS 法曲線值並無考量降於延時，該方法乃用於假設降雨下到土壤飽和時產生超滲逕流。本計畫除透過降雨量外，易考量水收支，即除雨量大於 0.2S 外，該月份降雨量需大於蒸發散量，表示土壤有多餘水分可供植物生長。
2	P22 圖 2-20 最適噴植區，放大圖面標示選取區塊及面積範圍。	已將圖面放大展示，請參閱 P23。
3	P45 植生粒劑發芽試驗栽培土，應取採類似試區基地的土壤特性，比較分析。	植生粒劑之發芽試驗乃希望透過變因控制，探討不同黏著劑、冰凍日數下對種子發芽影響，且現地土壤成分較不均勻，可能影響試驗變因，因此採用培養土進行試驗。
4	P53 噴頭先期多種變因試驗，定點環境條件易於控制，請延伸推估崩塌環境、均勻噴射粒子、飛行速度、噴射距離、坡度變化、風速等變化因素，如何操控 UAV 最佳操作方式。	已補充說明於內文，請參閱 P64~65。
5	P11 圖 2-5 全台主要測站之適宜噴植月份，僅用水收支分析是否太粗略，例：(一)單一測站控制面積過大如花蓮從太平洋沿岸跨至中央山脈，其地形、地質、海拔等均未考慮。(二)未考慮植生種子種類及特性，其適宜生長季節等。	(一)由於水收支乃利用降雨量及蒸發量進行計算，因此僅能由中央氣象局主要測站取得，因此僅能概略考慮地形，而氣象因子無法考慮地質。 (二)施作噴植單位可依據適宜噴植季節之草種進行施工。
6	P36 氣動式噴頭部分，其使用高壓氣瓶為噴植動力來源，其單價為何，是否具經濟效益？	已補充說明於內文，請參閱 P64~65。

	可否適用於大規模噴植。	
7	球粒劑僅含草本種子，是否可增加木本種子。	UAV 噴植工法以改善粗糙度及肥力等立地環境為主，待立地改善完成，本土喬木、灌木即可自然入侵。