

計畫編號：112 保發-5.1-保-01-06-001(35)

---

**土壤添加劑應用於侵蝕控制之可行性研究  
(Ⅱ)  
Feasibility Study of Soil Additives Applied  
in Erosion Control (Ⅱ)  
成果報告書**

---

執行單位：中原大學

執行期間：112 年 02 月 08 日至 112 年 12 月 31 日

計畫主持人：黃奉琦 博士

**農業部農村發展及水土保持署 編印**

**中華民國 112 年 12 月**

(本報告書內容及建議純屬執行單位意見，僅供本局施政參考)

# 土壤添加劑應用於侵蝕控制之可行性研究 (Ⅱ)

## Feasibility Study of Soil Additives Applied in Erosion Control (Ⅱ)

### 摘要

面對氣候變遷的挑戰及促進土地合理利用的方針，除強化土地管用之對策外，應尋求減緩土壤流失的方法加強國土安全，本研究期望運用土壤改良方式改善塑性土壤組成結構，初步規劃以桃園紅土為原型土壤經改良後進行室內試驗模擬地表逕流，探討被穩定土壤與添加劑之最佳配比，前期計畫已完成「土壤與添加劑之最佳配比設計」、「土壤改良後抗侵蝕性最適之土地坡度」、「裸露坡面滲流水污染性質」。

未經改良的邊坡在不擾動下其不易沖刷，這也表示該土壤於自然狀態結構較緊密、不易透水及不透氣，故不利植物生長，無法抵抗地表逕流及降雨沖刷。經過改良後的土壤，因添加改良劑使土壤結構產生改變而趨於鬆散，但是加入添加劑使土壤 pH 值增加，故本年度計畫將針對改良後土壤之植物適應性進行探討。

**關鍵詞：**土壤穩定、土壤沖蝕量、室內試驗、植生

# **Feasibility Study of Soil Additives Applied in Erosion Control**

## **Abstract**

In the face of the challenge of climate change and the policy of promoting rational land use, in addition to strengthening the countermeasures of land use, we should seek ways to slow down soil loss and strengthen national security. This study hopes to use soil improvement methods to improve the composition of plastic soil. The preliminary plan is Taoyuan Red soil is the prototype soil and after improvement, indoor experiments are carried out to simulate surface runoff to explore the optimal ratio of stabilized soil and additives. The previous project has completed the "optimum ratio design of soil and additives", "erosion resistance after soil improvement Optimum land slope", "Nature of seepage water pollution on bare slope".

Unimproved slopes are not easy to scour without disturbance, which also means that the soil structure in the natural state is relatively tight, impermeable and airtight, so it is not conducive to plant growth, and cannot resist surface runoff and rainfall erosion. The improved soil tends to be loose due to the change of the soil structure due to the addition of amendments, but the addition of additives increases the pH of the soil. Therefore, this year's plan will discuss the plant adaptability of the improved soil.

**Keywords: Soil Stabilization, Soil Erosion Amount, Laboratory Test, Vegetation**

# 目次

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 摘要 .....                      | II        |
| Abstract.....                 | III       |
| 目次 .....                      | IV        |
| 表次 .....                      | V         |
| 圖次 .....                      | V         |
| <b>第一章 緒論 .....</b>           | <b>1</b>  |
| 第一節 前期研究成果與討論 .....           | 1         |
| 第二節 本年度規劃完成目標 .....           | 2         |
| <b>第二章 執行方法與步驟 .....</b>      | <b>4</b>  |
| 第一節 執行方法 .....                | 5         |
| 1.1 文獻回顧 .....                | 5         |
| 1.1.1 土壤抗侵蝕特性 .....           | 5         |
| 1.1.2 土壤添加劑使用準則 .....         | 11        |
| 1.1.3 土壤沖蝕量測方法 .....          | 17        |
| 1.1.4 植物生長介質與土壤特性之關係 .....    | 20        |
| 1.1.5 植生覆蓋影響土壤理化性質 .....      | 23        |
| 1.1.6 水土保持植生作物簡介 .....        | 24        |
| 1.1.7 人工降雨設備的應用 .....         | 26        |
| 第二節 室內試驗 .....                | 27        |
| 2.1 研究方法說明 .....              | 27        |
| 2.2 試驗裝置架設及配置簡述 .....         | 28        |
| 2.3 試驗規劃 .....                | 29        |
| <b>第三章 研究進度與成果 .....</b>      | <b>34</b> |
| 第一節 研究預定進度 .....              | 34        |
| 第二節 研究成果 .....                | 35        |
| 3.2.1 改良後土壤 pH 值評估植物適應性 ..... | 35        |
| 3.2.2 改良土壤植生覆蓋率評估 .....       | 38        |
| 3.2.3 改良土壤植物復育試驗 .....        | 42        |
| 3.2.4 植生覆蓋對坡面沖刷的影響 .....      | 55        |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第四章 結論與建議.....             | 58 |
| 第一節 結論 .....               | 58 |
| 第二節 建議 .....               | 59 |
| 參考文獻 .....                 | 61 |
| 附錄一 植生應用於改良土壤配比拌合歷程記錄..... | 63 |
| 附錄二 植生試驗影像辨識分析結果彙整 .....   | 73 |
| 附錄三 期中審查意見回覆.....          | 85 |
| 附件四 期末審查意見回覆.....          | 87 |

## 表次

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 表一 USLE 各項參數簡介 .....             | 6  |
| 表二 土壤參數對照表 (摘自水土保持手冊，2005).....  | 8  |
| 表三 C 值對照表 (摘自水土保持手冊，2005).....   | 10 |
| 表四 各廠焚化再生粒料主要化學成分對照表 .....       | 17 |
| 表五 試驗模擬坡度變異對照表 .....             | 30 |
| 表六 改良土壤沖刷試驗出水口集水區水質檢測彙整表 .....   | 37 |
| 表七 2022 年桃園地區歷史相對濕度全年紀錄彙整表 ..... | 39 |
| 表八 植生試驗土樣 PH 值測試彙整表.....         | 40 |
| 表九 覆蓋草類之播種量計算表 .....             | 41 |
| 表十 改良土壤植物復育試驗組別編號彙整表 .....       | 42 |
| (以下略)                            |    |

## 圖次

|                      |   |
|----------------------|---|
| 圖一 第一年室內試驗執行流程圖..... | 3 |
|----------------------|---|

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 圖二 研究計畫執行流程圖.....                   | 4  |
| 圖三 細顆粒土壤顆粒表面吸附陽離子及水分子示意圖 .....      | 12 |
| 圖四 黏土顆粒溶蝕與環境 pH 關係示意圖 .....         | 12 |
| 圖五 沖蝕針配置示意圖 (摘自水保局，2010).....       | 19 |
| 圖六 土壤中常見微量元素之有效性與 pH 值的關係示意圖 .....  | 22 |
| 圖七 沖蝕試驗室內砂箱模型設備示意圖 .....            | 31 |
| 圖八 坡面沖蝕針布設示意圖 .....                 | 32 |
| 圖九 預定工作進度甘特圖.....                   | 35 |
| 圖十 石灰添加劑與環境 pH 值變化關係圖 .....         | 36 |
| 圖十一 飛灰添加劑與環境 pH 值變化關係圖 .....        | 36 |
| 圖十二 再生粒料添加劑與環境 pH 值變化關係圖.....       | 37 |
| 圖十三 2022 年桃園地區歷史溫度全年紀錄彙整圖.....      | 39 |
| 圖十四 植生覆蓋率評估影像分析示意圖 .....            | 41 |
| 圖十五 改良土壤植生試驗取樣靜置養護示意圖.....          | 43 |
| 圖十六 植物復育試驗操作流程示意圖 .....             | 43 |
| 圖十七 改良土壤植生試驗 15~28 天覆蓋面積彙整示意圖 ..... | 45 |
| 圖十八 改良土壤植生試驗 28~42 天覆蓋面積彙整示意圖 ..... | 46 |
| 圖十九 改良土壤植生試驗 42~60 天覆蓋面積彙整示意圖 ..... | 47 |
| 圖二十 改良土壤植生試驗 60~78 天室內常溫養護示意圖 ..... | 48 |
| 圖二十一 改良土壤植生試驗第 80 天植物根系發展及剖面示意圖     | 50 |
| 圖二十二 改良土壤植生試驗 15~28 天覆蓋率彙整示意圖 ..... | 51 |
| 圖二十三 改良土壤植生試驗 28~42 天覆蓋率彙整示意圖 ..... | 52 |
| 圖二十四 改良土壤植生試驗 42~60 天覆蓋率彙整示意圖 ..... | 54 |
| 圖二十五 植生覆蓋率對流速的影響示意圖 .....           | 56 |
| (以下略)                               |    |

# 第一章 緒論

本研究期望運用添加土壤添加劑的方式提高植生成功率以減緩土壤沖蝕量，利用室內試驗模擬地表逕流及降雨，探討被改良土壤與添加劑之最佳配比，於前期計畫已初步完成「土壤與添加劑之配比設計」、「土壤改良後抗侵蝕性坡度探討」、「裸露坡面滲流水污染性質探討」，本年度計畫則著重於「改良後土壤之植生適應性」及「改良後植生覆蓋率影響土壤流失之評估」。

## 第一節 前期研究成果與討論

前期研究藉由室內模擬試驗進行沖刷試驗共執行 17 組試驗（圖一），經結果比對得到在流速相同的條件下，沖刷量隨著坡度增加而呈現逐漸增加的趨勢，其中添加飛灰及石灰的試驗邊坡沖刷行為與原狀土壤相近，而添加再生粒料的邊坡於高角度邊坡沖刷量反於下降，推論因拌合再生粒料使黏土顆粒所佔試驗土壤的比例下降，卻不影響土壤的凝聚力性質，因此，在小流速沖刷下粒料間產生剪力強度提高了抗沖刷性質。

一、原狀土壤試驗結果（未改良），在流速相同的條件，沖刷量隨著坡度增加而呈現逐漸增加之趨勢。當在相同坡度的條件下，沖刷量隨著沖刷水量(流速)增加而呈現逐漸增加的趨勢。

二、原狀土壤與改良土壤邊坡試驗結果進行比對，在流速相同的條件下，沖刷量隨著坡度增加而呈現逐漸增加的趨勢，其中添加飛灰及石灰的試驗邊坡沖刷行為與原狀土壤相近，而添加再生粒料的邊坡於高角度邊坡沖刷量反於下降，因試驗邊坡內黏土

顆粒比例下降，在小流速下粒料間的剪力強度提供邊坡部分的抗沖刷強度。

三、在相同坡度的試驗條件，沖刷量隨著沖刷水量(流速)增加而呈現逐漸增加的趨勢，添加飛灰及再生粒料的邊坡沖刷行為與原狀土壤相近，再生粒料邊坡於大水量沖刷時其沖蝕量反於下降，同樣可推論因為顆粒效應而產生剪力強度。另外，經試驗結果顯示添加石灰的邊坡，無論是水量變化因素或坡度變化因素其抗沖蝕的能力最差。

四、原狀土壤（桃園紅土）邊坡之逕流水 pH 值在 7.5~8.5 之間屬中性至弱鹼性，以添加劑拌合量為 5%時之逕流水 pH 值在 8.5~12.5 之間屬弱鹼至鹼性且證實不因沖刷水量而產生稀釋現象。

## 第二節 本年度規劃完成目標

本研究以桃園紅土為試驗土樣，該土壤中黏土或粉土顆粒含量高，原狀土壤邊坡未經外力擾動於小水量時不易被沖刷，這表示該土壤於自然的狀態較緊密、不易透水亦不透氣，因此不利植物生長。然於大水量(流速快)則容易發生土壤結構崩解產生大量的土壤流失進而衍生崩塌。經過改良後的土壤，因添加改良劑使土壤結構產生改變而趨於鬆散，提高該土壤孔隙率，同時也改變土壤的酸鹼值。

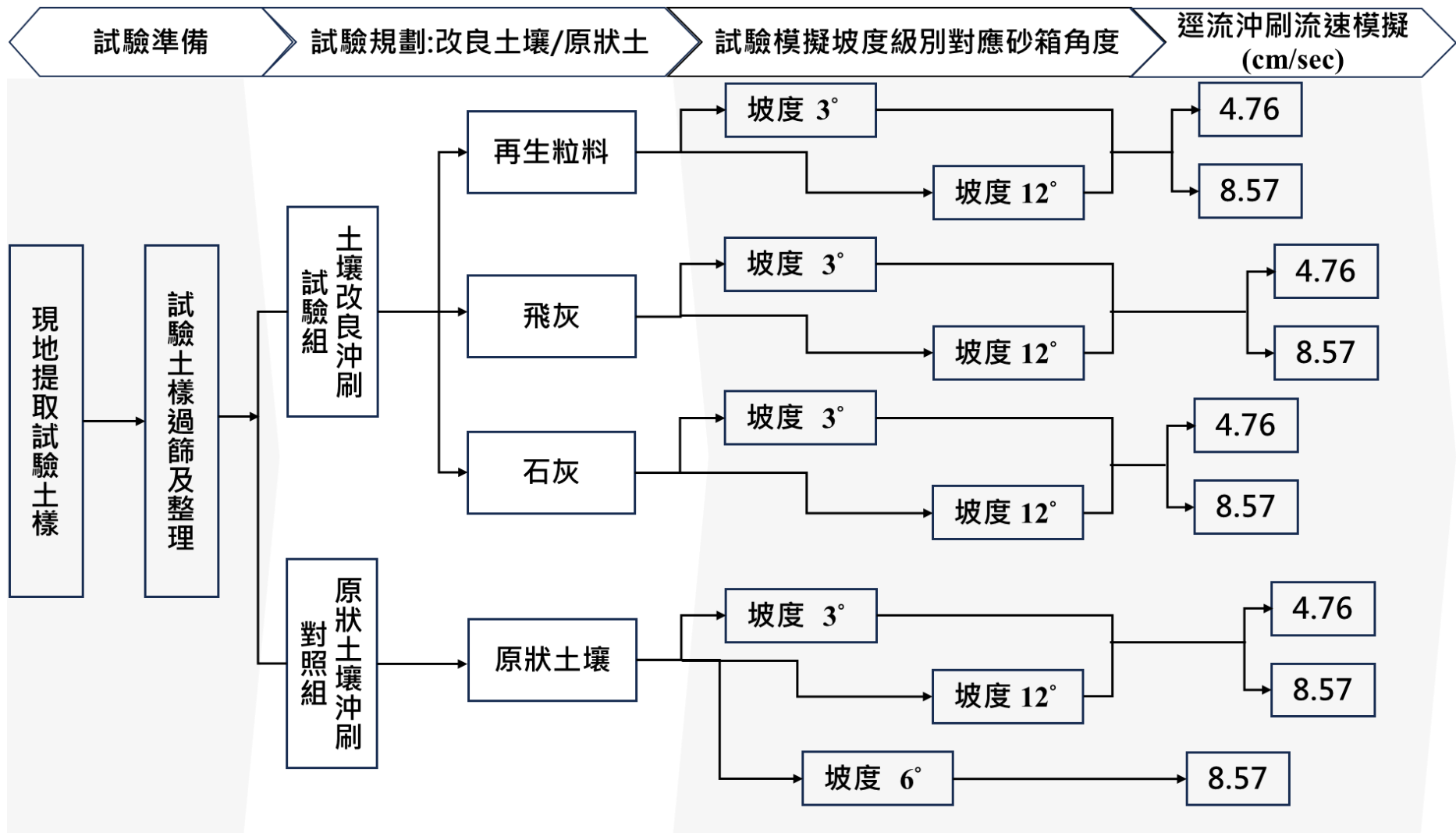
因此，本年度計畫則著重於「改良後土壤之植生適應性」及「改良後植生覆蓋率影響土壤流失之評估」。本年度規劃完成之研究目標：

五、探討改良土壤之植生適應性

考慮以植物發芽率、覆蓋率及根系發展為評估依據。

六、完成改良土壤邊坡降雨及逕流侵蝕性分析

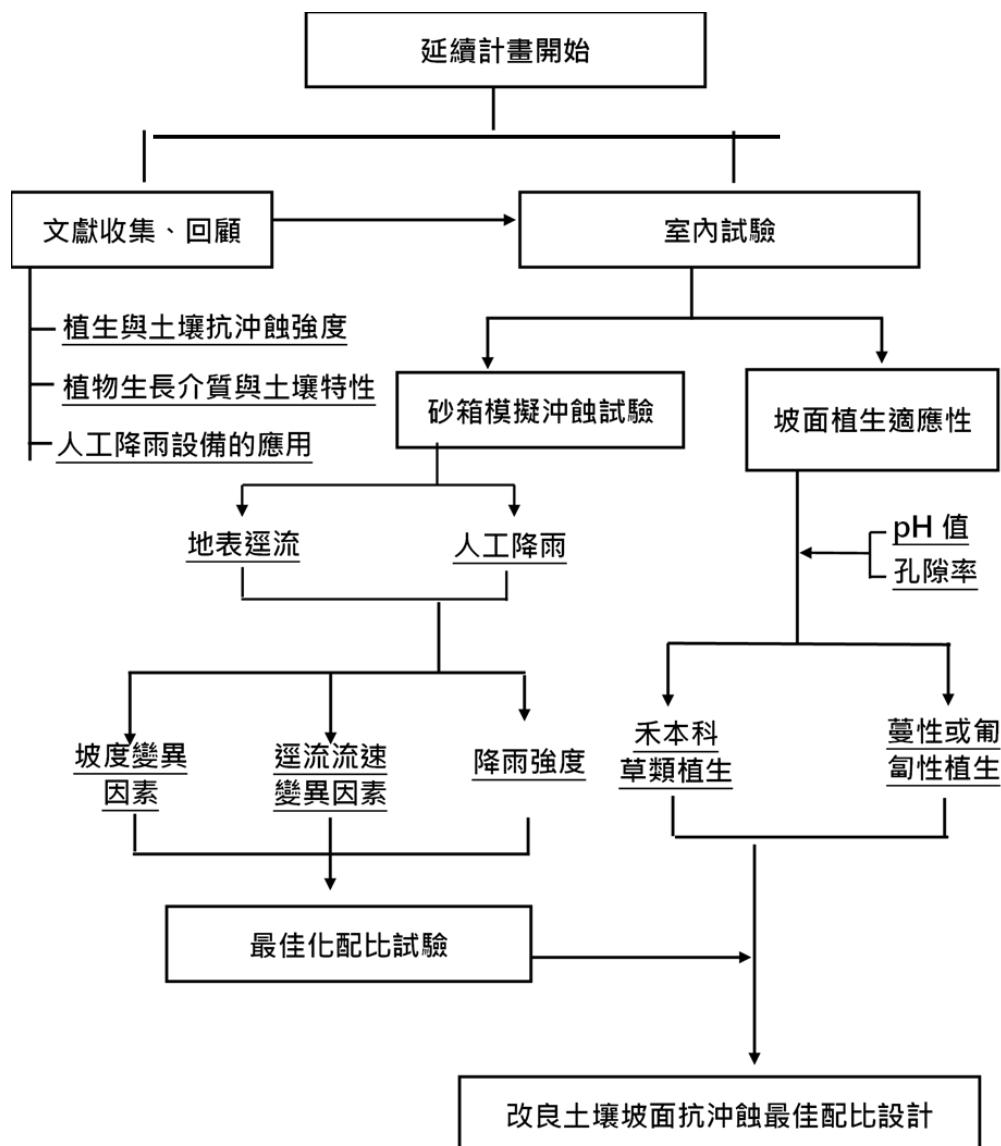
考慮以改良土壤植生覆蓋後進行沖刷試驗，評估影響土壤流失量。



圖一 第一年室內試驗執行流程圖

## 第二章 執行方法與步驟

土壤侵蝕中的水力侵蝕為主要的誘導因子，其「水的分散及搬運作用」影響甚鉅，關於侵蝕速率考慮的因素，包括氣候、地形、植被、土壤性質與人為保育措施等，本研究以降雨條件為氣候因子、改良後土壤為試驗土壤性質、人工植生模擬植被條件，進行室內模擬試驗相關規劃流程如圖二所示。



圖二 研究計畫執行流程圖

## 第一節 執行方法

### 1.1 文獻回顧

#### 1.1.1 土壤抗侵蝕特性

土壤侵蝕 (Soil Erosion) 通常與土壤特性有密切關係，根據 Wischmeier and Smith (1978) 所提出之通用土壤流失公式 (Universal Soil Loss Equation, USLE)，土壤侵蝕性指數 (soil erodibility factor,  $K_m$ ) 為土壤抵抗侵蝕、分離及搬運作用的量化指標，係由土壤質地、有機質含量、土壤構造及土壤滲透性所決定，而這些因素為影響土壤沖蝕的主要因子。針對影響  $K_m$  值之土壤性質進行改善，土壤沖蝕現象應可獲得有效的改善。另外，因為降低土壤沖蝕，能促使土壤化學性質獲得改善或提升，進而促使植物的生長與擴展，進而可影響 USLE 公式中的覆蓋與管理因子 (cover management factor, C-factor)。自 1980 開始，國內已有許多學者針對  $K_m$  值與土壤性質間的關係進行相關的探討 (萬鑫森和黃俊義，1983、林俐玲等人，2001)。後續仍有學者持續用 USLE 模式，推估山坡地  $K_m$  值及土壤流失間的關係，並認為土壤中有機質含量、團粒穩定與飽和導水係數為影響  $K_m$  值之土壤性質，故針對這些影響因子改善土壤性質，應可顯著提升土壤抗侵蝕特性。

經驗模式可被廣泛的應用在各地土壤沖蝕初步評估，經統計方法

所推導出的驗公式通常較為簡單且較物理模型為快速，其中 USLE 為經驗模式中典型的代表例子（李建堂，1997）。此模式由 Smith and Wischmeier 1950 年於美國 21 個州 36 個地區蒐集超過 7500 標準 Standard unit plot-yers 及 500 處 Watershed-years 的沖蝕數據，重新評估土壤沖蝕的各項影響因子包括 R、K、LS、C 及 P，主要用於預估某一特定坡段的年平均土壤流失量。提出現今最廣為使用通沖蝕公式 (Universal Soil Loss Equation，USLE)。其公式可整理如表一，

表一 USLE 各項參數簡介

| $A=Rm \times Km \times LS \times C \times P$ |        |                                                          |
|----------------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------|
| 代號                                           | 代號名稱   | 備註                                                       |
| A                                            | 土壤流失量  | 土壤流失量，其單位為公噸/公頃-年。                                       |
| Rm                                           | 降雨沖蝕指數 | 量化降雨和逕流的侵蝕力。為三十分鐘降雨強度和降雨動能兩個的乘積，其單位為106焦耳-毫米/公頃-小時-年。    |
| Km                                           | 土壤沖蝕指數 | 表層土壤被侵蝕的難易程度和土壤種類及其有機物含量有關，其單位為公噸-公頃-小時-年/106焦耳-毫米-公頃-年。 |

|    |          |                                    |
|----|----------|------------------------------------|
| LS | 地形因子     | 與邊坡的坡長、坡形及坡度有關，坡度影響流速提升河流的搬運能力。    |
| C  | 覆蓋及管理因子  | 此因子考慮邊坡植生的密度和種類，及考量管理措施包括施肥、耕作及灌溉。 |
| P  | 水土保持措施因子 | 包括:等高植生、草地水稻等水土保持措施等。              |

表中之 LS、C 和 P 因子，為任何組合條件下之土壤流失量與標準單位試區土壤流失量之比值且為無因次因子，各項說明如下。

#### 1. 降雨沖蝕指數(Rm)

在 USLE 公式中，降雨沖蝕指數的大小代表降雨及逕流所造成土壤沖蝕程度的高低。Wischmeier and Smith(1958)及經由 35 個水土保持試驗站的 8250 個實測土壤流失資料分析，發現土壤流失量與降雨總動能(E)及最大 30 分鐘降雨強度( $I_{30}$ )之乘積成正相關，並將  $E \cdot I_{30}$  定義為降雨沖蝕指數，用以量化降雨能量對土壤流失之能力。

#### 2. 土壤沖蝕性指數(Km)

土壤沖蝕性指標代表土壤抵抗沖蝕能力之高低，美國自 1930

年起開始對 23 種主要的指標土壤作田間試驗；於 1961 年起採用大型田間人工模擬降雨機，在標準試區進行降雨試驗。經由田間自然降雨、模擬降雨及室內資料分析結果發現，土壤沖蝕性指數可用(a)有機質含量百分比、(b)土壤結構參數、(c)土壤透水性參數、(d)粉土與極細砂(粒徑 0.001 至 0.1 公釐)含量之百分比、(e)土壤粗砂(粒徑 0.1 至 2 公釐)含量之百分比來表示，其中土壤結構參數及土壤滲透性參數如表二所示：

表二 土壤參數對照表 (摘自水土保持手冊，2005)

| 土壤結構參數  |           |              |
|---------|-----------|--------------|
| 參數值     | 土壤        | 顆粒大小         |
| 1       | 極細顆粒      | < 1.0 mm     |
| 2       | 細顆粒       | 1 - 2 mm     |
| 3       | 中或粗顆粒     | 2 - 10 mm    |
| 4       | 塊狀、片狀或粗顆粒 | < 10 mm      |
| 土壤滲透性參數 |           |              |
| 參數值     | 滲透速度      | (mm/hr)      |
| 6       | 極慢        | < 1.25       |
| 5       | 慢         | 1.25 - 5.0   |
| 4       | 中等慢       | 5.0 - 20.0   |
| 3       | 中等        | 20.0 - 62.5  |
| 2       | 快         | 62.5 - 125.0 |
| 1       | 極快        | > 125.0      |

由土壤調查與分析可求得上列 a、b、c、d、e 等五項參數值，再以下列公式估算地點之  $K_m$  值。

$$K_m = 0.1317 \cdot \frac{2.1[d(d+e)^{1.14}](10^{-4})(12-a)+3.25(b-2)+2.5(c-3)}{100}$$

國內方面相關研究有萬鑫森，黃俊義(1981,1983)，估算台灣

西北部及南部坡地土壤沖蝕指數和土壤流失量，將 K 值分成三個等級：低蝕性土壤 ( $K < 0.2$ )、蝕性土壤 ( $K = 0.2 \sim 0.4$ )及高蝕性土壤 ( $K > 0.4$ )。

### 3. 地形因子 (LS)

當坡長與坡度改變，地表逕流流速及輸送土壤之容量亦隨之增減，其結果導致土壤流失量變化。在地形因子的使用上大多採 Wischmeier and Smith (1978) 所推導出的公式：

$$LS = \left(\frac{X}{22.13}\right)^m \cdot (0.065 + 0.045\theta + 0.0065\theta^2)$$

其中 X=坡長的水平投影距離(公尺)， $\theta$ =坡度，m 為冪數項值，Wischmeier 及 Smith (1978) 建議 m 值之選用可依坡度大小分級：

當坡度小於 1%， $m=0.2$

當坡度介於 1% ~ 3%， $m=0.3$

當坡度介於 3% ~ 5%， $m=0.4$

當坡度大於 5%， $m=0.5$

### 4. 覆蓋及管理因子(C)

覆蓋及管理因子定義為「種植某種作物的耕地之土壤流失量與相同降雨、土壤、地形與地勢之連續休耕地之土壤流失量之比值」。此一因子包括植生種類、密度、植生序列、產量水準、生

長季節、耕作方式、殘株經營與對應降雨分佈之相互效應，因此

C 值之估算甚是不易，相關 C 值對照表如表三。

表三 C 值對照表 (摘自水土保持手冊，2005)

| 台灣不同地表及植被狀況之覆蓋及處理因子 (C 值) |      |          |      |
|---------------------------|------|----------|------|
| 地表及植被狀況                   | C 值  | 地表及植被狀況  | C 值  |
| 百喜草                       | 0.01 | 裸露地      | 1    |
| 水稻                        | 0.1  | 水泥地      | 0    |
| 雜作                        | 0.25 | 瀝青地      | 0    |
| 果樹                        | 0.2  | 雜石地      | 0.01 |
| 香蕉                        | 0.14 | 水體       | 0    |
| 鳳梨                        | 0.2  | 建屋用地     | 0.01 |
| 林地(針葉、闊葉、竹類)              | 0.01 | 牧草地      | 0.15 |
| 蔬菜類                       | 0.39 | 高爾夫球場植草地 | 0.01 |
| 茶                         | 0.15 | 雜草地      | 0.05 |
| 特用作物                      | 0.2  | 墓地       | 0.01 |
| 檳榔                        | 0.1  |          |      |

## 5. 水土保持措施因子(P)

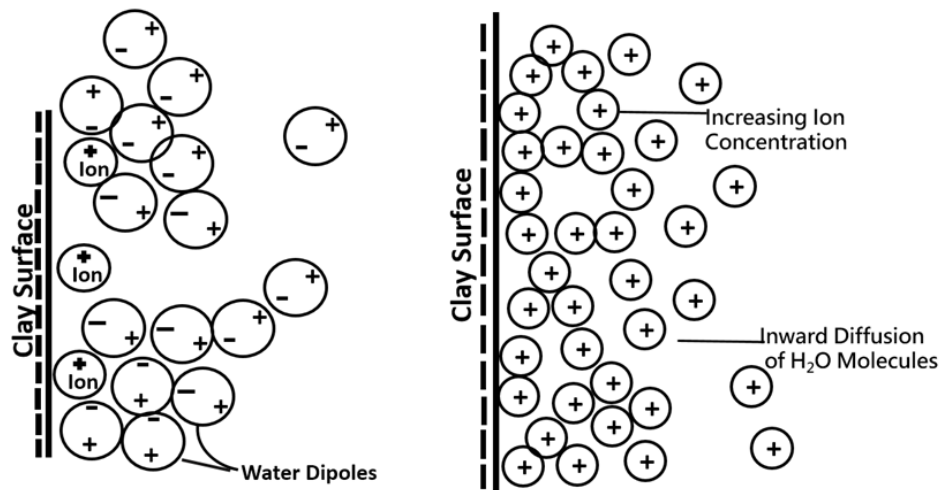
Smith (1941) 定義水土保持處理因子為「某特定水土保持處理下之土壤流失量與相同降雨、土壤特性、地形地勢，採用上下耕犁處理之土壤流失量間的比值」該因子最大值為 1.0，表示該地區無任何水土保持處理、棄土場、陸砂及農地砂石開採處。水土保持措施雖能有效控制土壤沖蝕量，但即使用相同的施工方法，在不同的地質條件及坡度，成效也不盡相同。

### 1.1.2 土壤添加劑使用準則

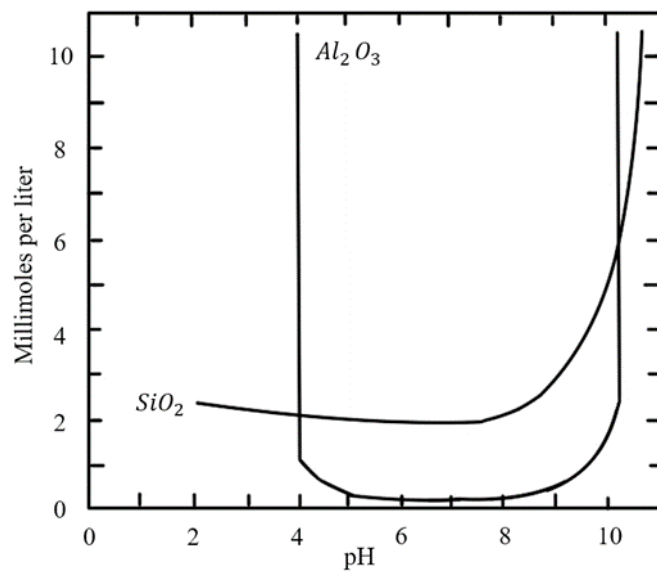
#### 1. 石灰添加劑土壤準則

石灰穩定的機制為密簇-絮凝作用（Flocculation-agglomeration）改善土壤之行為，其原理係利用含鈣離子之穩定劑與水溶解後，其兩價鈣離子（ $\text{Ca}^{2+}$ ）會取代黏土顆粒表面雙水層（Double Layer）之大部分一價氫離子（ $\text{H}^+$ ），降低土壤吸水能力，使黏土顆粒間排斥力減小，結合成為較大尺寸的粒料顆粒。

添加石灰後的土壤的化學反應主要為黏土顆粒表面帶負電，可吸引自由陽離子（帶正電的離子）和水（圖三），當拌合石灰時遇水則產生多種反應，包含陽離子交換（Cation Exchange）、密簇-絮凝、陽離子擠塞作用（Cation Crowding）、卜作嵐效應（Pozzolanic Reaction）、碳化作用（Carbonation）等，若添加足量的石灰和水時將使土壤的 pH 值增加。如圖四所示，黏土材料之  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  在 pH 值增加至 10.5 以上的環境時將會發生溶蝕現象。



圖三 細顆粒土壤顆粒表面吸附陽離子及水分子示意圖



圖四 黏土顆粒溶蝕與環境 pH 關係示意圖

當土壤中的游離氧化鈣因 pH 值提高而溶蝕黏土顆粒表面鍵結，並釋放出  $\text{Al}^{3+}$  與  $\text{Si}^{4+}$ ，將會產生三種化合物如下列所示：

- (1) 膠狀鋁酸鈣水合物 (Gelatinous Calcium Aluminate Hydrates, CAH)，產生非常快速 (24 小時)、強度低，難作為早期或長期強度。
- (2) 低階結晶水化矽酸鈣 (Low Order Crystalline Calcium Silicate Hydrates, CSH I)，快速形成 (7~10 天)，產生早期強度，但不會影響長期強度的增量。
- (3) 高階結晶水化矽酸鈣 (High Order Crystalline Calcium Silicate Hydrates, CSH II)，緩慢地持續發生 (10 天~3 年) 從 CSH I 和更多  $Al^{3+}$ 、 $Si^{4+}$  作用以產生高的長期強度。

CSH 和 CAH 是類似於卜作嵐作用中形成的膠結產品，其形成有助於石灰穩定土壤強度的基質。當此基質形成時，土壤性質轉變為較堅硬且相對滲透性低，並具有顯著承載能力的特性。該過程在數小時內開始，並且可以在設計合理的前提中持續反應數年，期間所形成的基質是永久性的，可成為堅固又柔韌的結構層。

## 2. 飛灰穩定穩定土壤的準則

飛灰的化學成分因煤礦源不同而有所差異，飛灰主要是由二氧化矽及氧化鋁成分組成，呈現微小玻璃質球體狀 (Tiny Glassy Spheres)，台灣的飛灰 CaO 含量約 3% 以下，二氧化矽含量一般約 50% 以上，而玻璃狀球體的粒徑大約在 1-50 microns 之間，平均的粒徑大多分布在  $8\mu m$  左右。飛灰的顏色多受到化學組成影

響，氧化鈣含量高成淡灰色，而燃燒無煙煤或煙煤所產生的飛灰則受到鐵化物與碳的影響成現灰色。飛灰比重大約分布在 2.1~2.6 間，乾密度在 70~90 pcf 間，無論比重或乾密度均較一般土壤輕。因此，常見的飛灰分類原則是依據不同層次工程判斷，以簡化分類試驗的程序。當氧化鈣成份含量高，具有明顯的膠結性質，可直接應用於土壤穩定上，其工程性質亦與水泥系材料相似；對黏土可產生部份的陽離子交換效果以抑制膨脹外，其穩定土壤的原理主要考慮的效應為陽離子交換、填充效應、膠結效應、火山灰（卜作嵐）效應等。目前台灣電力公司火力發電廠生產之飛灰均屬 F 類，氧化鈣含量低，鋁離子亦不易分解，故於土壤拌合時常添加部分比例石灰，以增進其改良效果。

此外，影響飛灰之性質及成分因素包括：飛灰之組成成分差異，煤源、煤之細度、燃燒控制條件、集塵系統型式與儲存方式五項因素，相關敘述如下：

- (1) 煤之種類與來源為飛灰組成成分差異性主因。
- (2) 燃燒所用之煤細度越小，則所產出之飛灰細度越小。
- (3) 燃燒控制條件：煤粉倒入鍋爐中之速率影響煤燃燒完全度，速率越慢則所產出之煤品質越高。

(4) 集塵系統型式：可分機械式與靜電式，舊式之機械式所收集之飛灰顆粒較大，而新式之靜電式可沿煙道收集粗至細之飛灰顆粒。

(5) 儲存方式：分為乾式與濕式儲存法，乾式主要將飛灰儲存於倉庫或密閉之儲藏室中，濕式則為飛灰經少量水處理後再行儲存。

因為飛灰中氧化鈣含量不高，所能提供之穩定效果有限，故常和其他添加物（如石灰）互相混合，以發揮穩定作用。此類反應，所形成的矽鈣膠結體和鋁鈣膠結體，具有膠結硬化的作用，當膠結體填充於顆粒間的孔隙時，使其產生互相連結的效果。然石灰對於塑性土壤（黏土顆粒含量高）性質的改善，包含祛水、改善強度、降低塑性、顆粒質地粗糙化、長期卜作嵐反應等，其中除了卜作嵐反應會持續發生外，其他的改善性質能快速的發生達到改善土壤的效果，對於粗顆粒土壤的改善性質與塑性土壤一致。另外，針對「飛灰摻合石灰」添加劑所適用的土壤種類及改善性質均與石灰添加劑相同。

### 3. 再生粒料穩定土壤準則

再生粒料的定義為一般廢棄物經焚化處理後，經由「焚化底渣再利用機構」再次處理後之產物，其組成為焚化燃燒後之不可燃物質。各縣市之垃圾廢棄物組成與焚化再生粒料的處理程序不

盡相同，故組成成份仍存有些許差異，其中在化學組成大部分由二氧化矽、氧化鈣、氧化鋁、氧化鐵等氧化物所組成，且以二氧化矽、氧化鈣佔最大部分。依據研究成果所示（表四），各焚化廠再生粒料化學成分彙整，氧化鈣含量均約在 20~30%，二氧化矽佔 25~30%（屬砂土基本成分），其中氧化鈣含量大於 20% 能發揮與石灰穩定（Lime Stabilization）相同的化學穩定機制及特性。然使用焚化再生粒料須注意的要點，為其重金屬成分是否有確實處理，依據行政院環境保護署 106 年公告「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」中定義焚化再生粒料為指底渣經再利用處理程序後之產出物，且為焚化再生粒料訂定明確的檢測標準。

再生粒料為多種一般廢棄物燃燒後產出，其化學組成成分約略可分為  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cl}$  等氧化物，且以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$  佔最大部分，以表四所述，各焚化廠再生粒料化學成分中， $\text{CaO}$  含量均約在 20~30%， $\text{SiO}_2$  佔 25~30%（屬砂土基本成分），但同時存在的環境中，兩者不會互相作用且處於穩定狀態，其中當  $\text{CaO}$  含量大於 20% 能發揮與石灰穩定（Lime Stabilization）相同的化學機制。

表四 各廠焚化再生粒料主要化學成分對照表

| 檢驗項目                           | 桃園市焚化底渣<br>ROT 處理場 | 高雄市焚化廠 | 新店焚化廠  | 樹林焚化廠  |
|--------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|
| SiO <sub>2</sub>               | 33.12%             | 29.35% | 25.49% | 28.22% |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.64%              | 8.30%  | 6.04%  | 3.57%  |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.73%              | 2.69%  | -      | -      |
| K <sub>2</sub> O               | 1.02%              | 1.60%  | -      | -      |
| MgO                            | 1.86%              | 1.91%  | -      | -      |
| CaO                            | 21.03%             | 30.93% | 19.79% | 21.39% |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.19%              | -      | -      | -      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.71%              | 7.72%  | 6.48%  | 7.46%  |
| SO <sub>3</sub>                | 2.19%              | -      | -      | -      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 4.5%               | -      | -      | -      |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.24%              | -      | -      | -      |
| Cl                             | 1.75%              | -      | 1.70%  | 3.53%  |
| Total                          | 86.96%             | 82.5%  | 59.5%  | 64.17% |

### 1.1.3 土壤沖蝕量測方法

量測土壤沖蝕的方法分為直接量測法、間接量測方法及沖蝕預估模式等三大類，李建堂（1997）。

1. 直接量測法係指於出口處，直接收集逕流及沖積物來量測沖蝕量，常使用於實驗區法（plot studies）及集水區輸砂量法（sediment yield）。
2. 間接量測的方法大致可分成量測地表起伏變化法、湖泊、水庫沉積量法（sedimentation）及追蹤法（tracer）三類。其中，沖蝕針（erosion pins）、微地形起伏計（micro-relief meters）及剖面量測計（profilometers）等，適合應用於小範圍之研究，相對於一般測量儀器的實地調查，大範圍的研究方法主要有

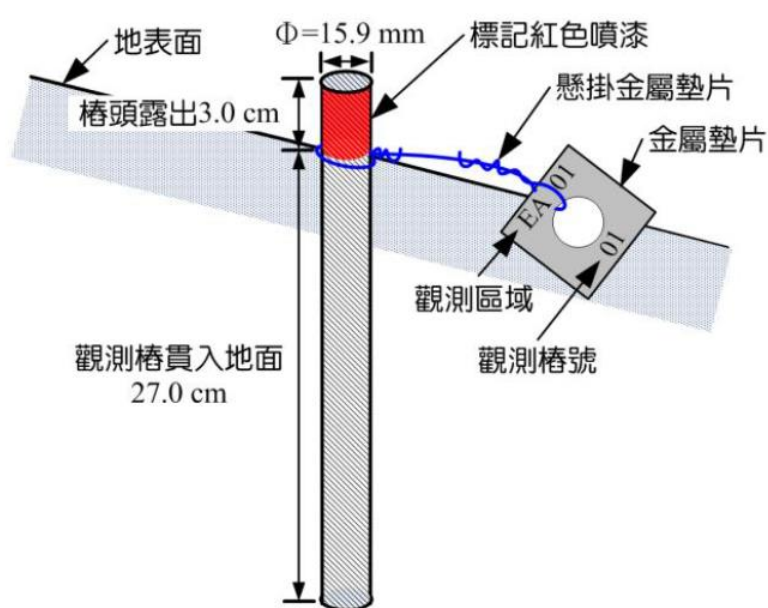
土壤剖面法、樹根暴露法(exposed tree roots)及照片量測法(photogrammetric methods)等。

3. 沉積法為於湖泊或水庫底鑽洞取測法(photogrammetric methods)，其為於湖泊或水庫底鑽洞取樣分析其沉積層，利用不同期間的沉積量來估計上游集水區長期平均的土壤沖蝕量，而追蹤劑法為任何具獨特的化學或物理性質的物質，均可應用於土壤沖蝕之研究，以放射性同位素最常被用為追蹤劑，確認沖積物的來源或預估土壤沖蝕量。
4. 經驗歸納評估土壤沖蝕的方法，此方法根據現地調查及植生狀況、土壤性質，經統計歸納後建立土壤沖蝕估算經驗模式，以美國農業部(United State Department of Agriculture, USDA)之發展最為多元，如廣為使用之通用土壤流失公式(USLE)，但此公式雖可做為特定地區水土保持方法之決策工具，但在應用此公式時如超出此公式之設定條件，則可能誤用或做出錯誤之結論(林俐玲，2010)；國內學者陳樹群等人(1998)為改善 USLE 於台灣地區之適用性，故發展土壤沖蝕指標 SEIM(Soil Erosion Index Model)模式，將 USLE 影響參數轉換成指數方式，並以指數總值配合迴歸公式求取土壤沖蝕量。

每種量測方法適合於不同時、空尺度的運用，因此有更多學者投入相關研究，隨著研究成果的累積。Stroosnijder (2005) 經文獻回顧指出於野外土壤沖蝕量測時，就調查項目及對對象，應需先釐清相關議題，包括「時空間離散性大」、「量測資料準確性」、「由小尺度區域量測資料外插至較大尺度區域應用之衍生問題」以及「不同領域之

沖蝕計量單位轉換」等四大項，應用於坡面尺度的量測可採用沖蝕針量測地表起伏變化，適用於瞭解表層土壤沖蝕受降雨、逕流影響之侵蝕面及堆積層變動程度。

李建堂 (1997) 回顧土壤沖蝕現地量測方法相關研究，並進行一系列問題評析，研究顯示沖蝕針試驗係需長期性觀測土壤沖蝕量之方法且需耗費大量時間及人力，以進行土壤沖蝕資料的建立、採集及整理，此為目前唯一可確實掌握依時性表土層沖蝕深度較為可行及可信的方法。沖蝕針 (erosion pins) 觀測法用於觀測邊坡的沖蝕狀態，並可用以推測邊坡後退速率，其原始基本設計如圖五所示，沖蝕針本身為長 600mm，直徑 5mm 的金屬棒。



圖五 沖蝕針配置示意圖 (摘自水保局，2010)

Schumm (1956) 首先使用木樁(wooden stakes)打入地面以直接量測邊坡物質的沖蝕，隨後改良成金屬樁 (metal stakes)，因樁徑更細相較木樁對坡面的破壞為小且較能抗腐蝕。Crouch (1987) 利用長達 1.5m 沖蝕針進行蝕溝沖蝕監測。林俊全 (1995) 採用沖蝕針研究臺灣不同泥岩邊坡發育特性，量化地表逕流作用下邊坡沖蝕後退率。

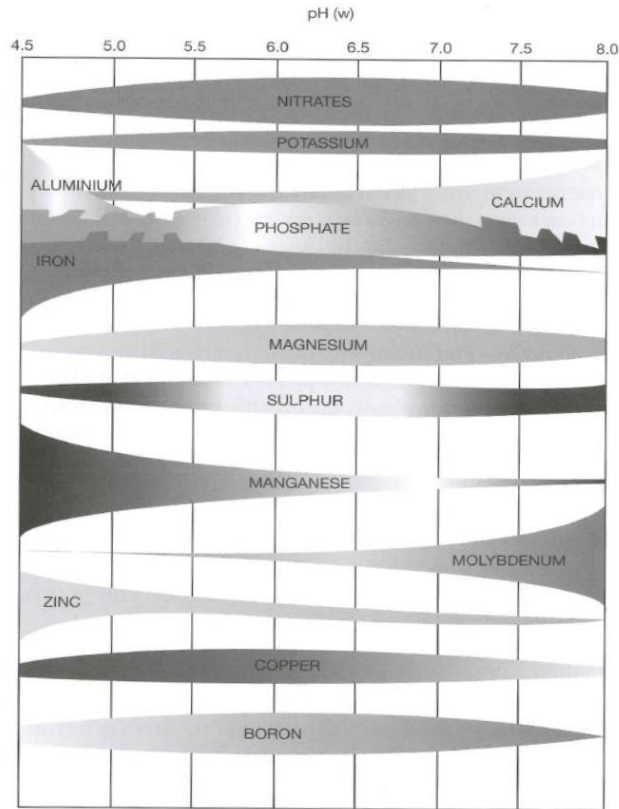
#### 1.1.4 植物生長介質與土壤特性之關係

土壤酸性、中性及鹼性等性質被稱為土壤反應 (Soil reaction)，此種性質以 pH 表示 (郭魁士，1986)。當 pH 值趨近於 7 ( $\text{pH} \approx 7$ ) 屬於中性土，pH 值小於 7 ( $\text{pH} < 7$ ) 屬於酸性土；若 pH 值大於 7 ( $\text{pH} > 7$ ) 屬於鹼性土。一般土壤的 pH 值範圍常介於 4~10 之間 (郭魁士，1986)。自然條件下影響土壤 pH 值的因素包括雨量、母岩性質、水文特性、交換性陽離子的種類等，同時土壤 pH 值與農業作物或植物生長有密切關係，每一種作物都有其適合生長的 pH 值範圍，當  $\text{pH} < 3$  或  $> 9$  時大多的草本植物能生存 (孫儒泳等，1995)，也就是說草生植物對於環境適應性較高。

植物覆蓋為水土保持方法重要項目之一，臺灣水土保持常用之禾草種類植物大多來自國外，不同的草生類植物對立地適應性及水土保持效益有所不同，張雙滿 (1972) 利用戀風草、百喜草、營多藤等植

物，測試不同土壤 pH 值對其生長及產量的影響，其研究成果為戀風草及百喜草對土壤 pH 值之適應力較廣，在 pH 值 5.5~8.9 範圍內之土壤均能正常生長且差異不大。百喜草在微酸性土壤生育有較佳的趨勢，至於營多藤對於土壤 pH 值之反應相當敏感，當 pH 值在 6.4~7.9 時生長最佳，即酸性（pH 值 5.5）或鹼性（pH 值 8.9）均不適其生長且結果具明顯差異性。

土壤反應也會影響土壤中各種植物養分的有效性，例如酸性土壤因 pH 值低而缺乏磷、鈣、鎂等元素，但是土壤中錳、鐵、鋁等元素含量過多則不利於作物根系生長，常以適量施用石灰質材料，提升土壤 pH 值、增加土壤中有效性磷、鈣及鎂的含量，減輕鐵、錳、鋁對作物根系生長的毒害作用（劉廣泉、廖乾華，2002）。另外，植物生長所需之養分及微量元素與土壤酸鹼度之關係如圖六所示，常見的微量元素為硝酸鹽（Nitrates）、鉀（Potassium）、鋁（Aluminum）、鈣（Calcium）、磷酸鹽（Phosphate）、鐵（Iron）、鎂（Magnesium）、硫（Sulphur）、錳（Manganese）、鉬（Molybdenum）、鋅（Zinc）銅（Copper）、硼（Boron）等，由圖中所示，pH 值為 4.5~8.0，元素的縱軸範圍愈寬表示相對的活性或養分有效性愈大，通常建議透過土壤改良提高土壤 pH 值增加植物對養分的利用率。



圖六 土壤中常見微量元素之有效性與 pH 值的關係示意圖

(Hall, 2008)

另外，就農作物相關耕作土壤性質的研究，蔬菜或旱作施用肥料之效應無論是酸性或鹼性土壤常有優於水稻之特殊效果，而石灰之施用為改良酸性土壤最有效的方法(黃祥慶等人，1989)。植物生長及種子發芽率與土壤介質 pH 值、EC 值(導電度)及孔隙度有關(黃泮宮、廖清玲)，其中孔隙大小決定土壤介質的通氣性，當土壤中的孔隙充滿空氣或水分，由於重力和毛細管現象，大孔隙在排水後充滿空氣，小孔隙則仍充滿水分，此時空氣所佔的空間稱為「充氣孔隙度」，充滿水分的空間則常稱為「含水量」，當充氣孔隙度及含水量兩者相加則

稱為孔隙度，一般認為充氣孔隙度應在 25~40% 的環境較有利於植物育苗及生長。

#### 1.1.5 植生覆蓋影響土壤理化性質

鄭慶生(1979)指出，百喜草覆蓋能有效改善土壤假比重、分散率、孔隙率、滲透率、飽和導水度及硬度等土壤物理性之功效，並能提高土壤有機質含量，加上生長勢強，地面莖葉茂密，覆蓋率亦佳，能有效控制土壤流失。盧惠生等人(1979)在 20 度坡地進行杉木、百喜草及裸露區之土壤滲透率測定，指出土壤水分最初滲透率及最終滲透率均以百喜草最高。陳慶雄(1981)指出，百喜草覆蓋能達到改善土壤理化性質，諸如增加土壤孔隙度，提高有機質、氮及交換性鉀等之含量，進而促使土壤團粒更趨於穩定，且達到增加養分之目的。廖綿濬(1985)指出，百喜草在抑制水土流失效能上較優於內斜式平台階段，而且在果園經營管理的應用上，亦有增加土壤有機質、改善土壤理化性質、提高農產品品質等多方面的優異效果。林俐伶(1998)指出，影響土壤有效水分之主要因子為土壤團粒之大小，其次為有機質含量和假比重，而與土壤質地相關性較小。邱勝範(2004)指出，百喜草覆蓋處理能有效抑制逕流和土壤沖蝕之產生，且能改善土壤理化性質。

### 1.1.6 水土保持植生作物簡介

植物覆蓋作為水土保持方法重要項目之一，若配合山邊溝處理等水保設施能有效控制坡地水土流失，且能維持或增進地力。由相關研究結果應證，坡地密集植生能有效的阻截雨點衝擊地面，防止水土流失，維持或增加土壤有機質，改良土壤理化性，保蓄水份及調節土壤溫度，並且減少除草及中耕作業，以下針對常用之植物屬性進行說明。

#### 1. 百喜草 (*Paspalum notatum* Flugge / Bahia grass)，大葉品系

原產拉丁美洲，多年叢生或匍匐性禾草，具粗壯之匍匐莖，節間短，莖基帶赤紫色，地下莖亦發達，根系量多，垂直分布可達地面下 100 公分。葉色為深綠，光滑並稍呈光澤，長 20~30 公分，寬 0.6~1.2 公分。為臺灣目前最主要推廣之果園、邊坡之覆蓋草類，亦可做為草帶法之草種，根系強韌，坡面覆蓋育土效果佳，耐蔭性略高於小葉品系百喜草。主要於水土保持上之用途為草帶、草溝、果園覆蓋用草種。

#### 2. 百喜草 (*Paspalum notatum* Flugge / Bahia grass)，小葉品系

原產拉丁美洲，與大葉品系百喜草略同，但其分蘖較少，葉片較小，葉色淡綠，長 15~25cm，寬 0.2~0.5cm。另由葉片解剖構造觀察，小葉百喜草葉片之泡狀細胞較發達，乾旱時葉片捲縮較顯著。為臺灣目前主要推廣之一般邊坡、裸露地及蝕溝控制用草種，匍匐莖與根系強韌，坡地保育效果佳。主要在水土保持用途為果園覆蓋、邊坡穩定、噴植用草種。

3. 假儉草 (*Eremochloa ophiuroides* (Munro) Hack. / Centipede grass)

自然生長於臺灣中、北部山區丘陵地，特別在林口等紅土台地地區，屬本地種，分布於中國大陸東南部、中南半島及菲律賓群島等地。多年生，稈叢立，具紫紅色或綠色橫走之匍匐莖，貼地生長，走莖節間短，匍匐延伸且生長迅速，易形成緊密草皮，株高約 5~15cm。葉色深綠，寬 0.3~0.4 cm，長約 4cm，為目前水土保持植生工程常用草種之一，雖然種子價格昂貴，但配合種子噴植機 (Hydroseeder) 的使用，供一般邊坡噴植草種，在植生工程施工操作上，仍具方便性與實用性。因本種之草坪優美，質感中粗，可較粗放管理，作為農地周邊裸地景觀美化綠化草種。

4. 百慕達草 (*Cynodon dactylon* (L.) Pers. / Bermuda grass)

臺灣本地品系稱狗牙根或鐵線草，分布於平地及丘陵地，群生於向陽之荒地、路邊、河堤、草原及海邊砂地。匍匐狀多年生宿根性禾草，株高 5~40cm，匍匐莖每節生根，著生花之稈直立。可作為草坪草種及牧草草種用途，提供護墊作用 (resilience)，減輕碰撞傷害，如運動場、滑草場，水土保持上應用為一般挖填方坡面、農地道路與台壁植草、土堤坡面及農塘周邊等噴植草種。

5. 地毯草 (*Axonopus compressus* (Sw.) P. Beauv. / Tropical C.Grass)

原產美國南部及中南美洲地區，引進臺灣甚早，現已歸化。多年生，莖背腹扁壓，匍匐蔓延，株高 15~40 公分，較類地毯草直立；稈節具密鬚毛。葉片薄質，短而廣，寬 0.8-1.2 公分，長 8~25 公分。地毯草喜溼潤，耐高溫但耐寒性差，極耐遮蔭、不耐踐踏、耐低割、不耐浸水，可供做果園林下或遮蔭下之地被草類或庭園天然草皮。

#### 1.1.7 人工降雨設備的應用

土壤沖蝕對坡地災害、河川淤積、灌溉排水及農業生產力等都有不良的影響，為了提供水土保持客觀的數據及規範，定量評估土壤沖蝕是必要的條件，然利用自然降雨來研究及觀察土壤沖蝕，相當耗時且費力，尤其以極端氣候條件下，常有偶發之極端降雨，若使用人工降雨設備則能避免自然降雨的費時與不確定性，同時亦可模擬極端降雨下的沖蝕情境。

(范正成、謝宏元，1991)回顧國內外共 134 種人工降雨機進行評估，彙整人工降雨機的各種特性，包括：雨滴形成器，試驗場長度、寬度和面積，雨滴落高，最小和最大降雨強度，出水口噴嘴壓力，操作員人數，降雨機最大適用坡度，最小和最大雨滴粒徑，最小和最大均勻係數，構造成本及操作性等，歸納結果認為 Fan and Lovell (1987) 人工降雨機具有最佳之研究性能，但是構造成本及搬運性較差。因此為了符合國內自然環境需求，相關學者開始著手研發適合臺灣地區使用的人工降雨設備(范正成，吳明峰，1996)參考 Foster et al. (1982)及

Fan and Lovell (1987)之人工降雨機，依國內需要重新研製，其中改善項目包括主結構體中的長槽機體(trough)、出水口噴嘴數量(nozzle)、傾斜角度軸承等，在供水系統(water supply system)中加裝分水閥，可只對運作中的長槽機體供水，避免損壞機體中之進水閥門，延長降雨機壽命。

關於降雨機率定項目包括降雨強度、雨滴粒徑、雨滴落速及單位降雨動能等，此為後續相關研究奠定必要之基礎。其後陸續有學者進行降雨強度對邊坡土壤沖蝕量影響之研究，(簡士濠等人，2013)以防沖蝕網毯覆蓋率探討對邊坡土壤流失量的影響，(周伯原，2020)以不同降雨強度探討邊坡入滲及侵蝕行為，隨著人工降雨之相關研究結果的產生，國內類似之研究已趨於成熟，但是人工降雨與地表逕流的沖蝕模型並無完整研究，因此本研究擬將此分析結果提供國內後續相關研究實施之參考。

## **第二節 室內試驗**

### **2.1研究方法說明**

(一) 利用砂箱模擬地表逕流進行沖刷試驗，以坡度及地表逕流流速為外力控制因素，於前期計畫已使用石灰、飛灰及再生粒料為添加劑改良試驗土壤，並完成配比拌合試驗。本年度與前期的差異為增加人工降雨設備，因此，延續以坡度變化、地表逕

流流速外，再加上降雨強度為外力控制因素，依據拌合添加劑之改良土壤最佳配比為試驗坡面進行室內沖蝕試驗模擬。

(二) 試驗土壤以桃園紅土為基底，因添加改良劑使土壤發生 pH 值的變化，因此在植生適應性分析中，以不同水土保持植生作物及 5% 添加劑之改良土壤進行育苗及植物生長測試，評估各改良土壤與植生的及根系發展的關係。

(三) 關於環境友善的檢測方法，則採用收集坡面流失土壤及滲流水，檢測 PH 值及水質變化，包含土壤泥沙顆粒等汙染物質，以未植生之改良土壤為對造組，植生後的改良土壤為試驗組進行定時定量降雨及地表逕流沖刷試驗，比對植生前後的水質差異，探討植生對改良土壤性質的環境友善提升率。

## 2.2 試驗裝置架設及配置簡述

(一) 砂箱模型出流集水區：

收集坡面沖刷土壤中之細顆粒、懸浮顆粒及出流水，經沉積後採取地表逕流水及土壤顆粒進行 pH 值檢測、沉積土砂經烘乾後秤重，並量化各組試驗數據。

(二) 坡底沖積沉降模擬：

目的在於收集較大顆粒的土壤進行顆粒篩分析試驗，但依據前期試驗操作模式，原狀土壤均進行過篩後上機台或拌合添加劑，因此，大顆粒土壤被沖出的機率不大，為求完善於本年度修改儀器仍保留此部分裝置，作為評估坡面沖刷程度。

### (三) 試驗坡面：

維持原規畫之砂箱尺寸， $0.875\text{m} \times 0.448\text{m} \times 0.17\text{m}$ ，填入相等重量的試驗土壤以此控制砂箱內的土壤緊密度。以相同配比、試驗坡度、滲流流速、降雨強度進行沖刷試驗。

### (四) 地表逕流沖刷：

本階段試驗控制試驗外力因素為坡度變化、流速及降雨強度，其中，流速控制為  $4.76\text{cm/sec}$  及  $8.57\text{cm/sec}$  對應不同坡度，評估改良土壤植生前後的差異性。

### (五) 蓄水槽：

此設備模擬地表逕流及人工降雨試驗的水源處存，為避免影響出流水質及微小雜質阻塞降雨噴頭，故採用過濾水注入蓄水槽。

### (六) 坡度變化：

利用坡度變化模擬山坡地坡度分級 1~3 級坡，於前期試驗中經尺度規模換算後，以 3 度、6 度、12 度對應現實環境坡度進行室內模擬，評估地形因素改變時的差異性。

### (七) 影像擷取：

試驗過程採取全程錄影，於初始設計時砂箱側面為透明可透視玻璃，因此，可擷取俯視與側視影像以為後續加值應用。

## 2.3 試驗規劃

### (一) 砂箱模擬地表逕流沖刷試驗

## 1. 坡度變異因素

- a、試驗坡度設計參考水土保持技術規範 23 條坡度分析規定，以 1~3 級坡為試驗規畫。
- b、依據試驗砂箱設備尺寸 0.875m\*0.448m\*0.17m，將現實坡度經尺度效應換算，對應室內砂箱以調整坡趾角度以模擬坡度分級因子，相關對應分述如表五所述。

表五 試驗模擬坡度變異對照表

| 坡度級別 | 坡度(S)範圍              | 砂箱長度(cm) | 坡趾對應角度(度) |
|------|----------------------|----------|-----------|
| 一級坡  | $S \leq 5\%$         | 93       | 3         |
| 二級坡  | $5\% < S \leq 15\%$  |          | 6         |
| 三級坡  | $15\% < S \leq 30\%$ |          | 12        |

## 2. 流速變異因素

- a、地表逕流的速度因地形之粗糙度變異甚大，依據 Dunne (1978) 推估降雨終止前數分鐘內，地表逕流流速約在 0.3~15cm/sec。
- b、試驗設備設計為固定出水截面積，依據流量與流速的關係式 ( $Q = Av$ ) 當截面積固定時，可控制單位時間通過的流量而得到量化流速的結果，故率定給水設備為本試驗重要的工作項目之一，經由前期試驗測試將流速設定為 4.76cm/sec 及 8.57cm/sec，本年度仍沿用。

## 3. 試驗土壤特性

a、試驗土壤原型為桃園紅土，取樣後去除雜質及植物根系進行氣乾養治。

b、土壤基本物理性質試驗依據 ASTM 相關規範進行基本物理性質試驗，試驗項目有：土壤顆粒粒徑分佈試驗（ASTM D422-63）、阿太堡液塑性限度試驗（ASTM D4318-10）、含水量試驗（ASTM D2216-10）。

砂箱內回填土壤以統體單位重（ $\gamma_m$ ）為控制孔隙比或孔隙率的依據，試驗砂箱內可回填土壤的體積為



圖七 沖蝕試驗室內砂箱模型設備示意圖

c、 $0.875\text{m} \times 0.448\text{m} \times 0.17\text{m}$ ，填入相同的試驗土壤重量。以此控制砂箱內的緊密度。

#### 4. 沖蝕試驗監測設備

a、流失土砂監測將於砂箱出口處設置沉降設備，收集坡面逕流水及被沖蝕的土砂，取樣進行水質及土壤 pH 值試驗，並對沉降設備內的土樣進行篩分析試驗。

b、坡面沖刷流失量監測將於試驗坡面置入沖蝕針進行量化偵測，並配合連續影像收集以評估沖刷變化歷程如圖八所示。



圖八 坡面沖蝕針布設示意圖

#### (二) 改良土壤坡面植生適應性試驗

試驗土壤以桃園紅土為基底，因添加改良劑使土壤發生 pH 值的變化，因此在植生適應性分析中，以水土保持植生種子拌合改良土壤進行育苗及植物生長測試，由發芽率及根系發展型態，評估各改良土壤與植生的及根系發展的關係。

1. 本試驗預計採用二種臺灣常見之水土保持草種，分別為百喜草及百慕達草。

- a、百喜草：叢生或匍匐性多年生禾草。耐高溫，最適宜生長溫度為 28~33℃，於海拔 800m 以下皆能生長良好。在全日照 40%~60%情況下生長最好。

|                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| 種子                                                                                | 全株                                                                                | 根系型態                                                                               |

- b、百慕達草：匍匐狀多年生宿根性禾草，具有 C4 型光合作用解剖構造，屬熱帶型植物，性喜強光、長日照，不耐遮蔭，屬於旱生植物，具有相當優越的耐旱與耐鹽性，雖喜好高濕環境，但不耐浸水。

|                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| 種子                                                                                  | 全株                                                                                   | 根系型態                                                                                  |

2. 將植生育苗試驗箱所需之改良土壤重量分成二等分，取最上層之土壤重量與草種子進行拌合，依序填入試驗土壤進行養護。

### 第三章 研究進度與成果

#### 第一節 研究預定進度

目前工作進度如下圖九所示：

| 工作項目           | 進度說明 | 1月 | 2月  | 3月  | 4月  | 5月  | 6月  | 7月  | 8月  | 9月  | 10月 | 11月 | 12月 | 工作進度 |
|----------------|------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 文獻收集與回顧        |      |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 土壤抗侵蝕特性        | 預期   |    | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
|                | 實際   |    | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 土壤穩定添加劑使用準則    | 預期   |    | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
|                | 實際   |    | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 土壤沖蝕量測方法       | 預期   |    | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |      |
|                | 實際   |    | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■   |     |     |     |     |     |      |
| 植物生長介質與土壤特性之關係 | 預期   |    |     | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |      |
|                | 實際   |    |     | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■   |     |     |     |     |     |      |
| 水土保持植生作物簡介     | 預期   |    | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |     |     |      |
|                | 實際   |    | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |     |     |      |
| 人工降雨設備的應用      | 預期   |    | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |     |      |
|                | 實際   |    | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■   |     |     |     |     |     |      |
| 改良土壤植物適應性      |      |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 石灰改良土壤植生復育     | 預期   |    |     |     | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |      |
|                | 實際   |    |     |     | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■   |     |     |     |     |     |      |
| 飛灰改良土壤植生復育     | 預期   |    |     |     | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |      |
|                | 實際   |    |     |     | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■   |     |     |     |     |     |      |
| 再生粒料改良土壤植生復育   | 預期   |    |     |     | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |      |
|                | 實際   |    |     |     | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■   |     |     |     |     |     |      |
| 植物適應性綜合評估      | 預期   |    |     |     |     |     |     |     |     | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |      |
|                | 實際   |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 砂箱模擬植生土壤沖刷試驗   |      |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| 模型試驗設備調整及維護    | 預期   |    | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
|                | 實際   |    | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |     |     |      |
| 人工降雨設備設置       | 預期   |    |     |     | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ | ■ ■ |     |     |     |     |     |      |

|                |    |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
|----------------|----|-----|--|--|-----|--|--|-----|--|--|------|--|--|--|
| 置              | 實際 |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
| 模擬沖刷試驗流速變異因素   | 預期 |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
|                | 實際 |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
| 模擬沖刷試驗坡度變異因素   | 預期 |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
|                | 實際 |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
| 模擬沖刷試驗降雨強度變異因素 | 預期 |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
|                | 實際 |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
| 試驗結果綜合評估       | 預期 |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
|                | 實際 |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
| 改良土壤坡面最佳配比設計   |    |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
| 添加劑配比綜合評估      | 預期 |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
|                | 實際 |     |  |  |     |  |  |     |  |  |      |  |  |  |
| 預計累積總進度百分比     |    | 14% |  |  | 50% |  |  | 86% |  |  | 100% |  |  |  |

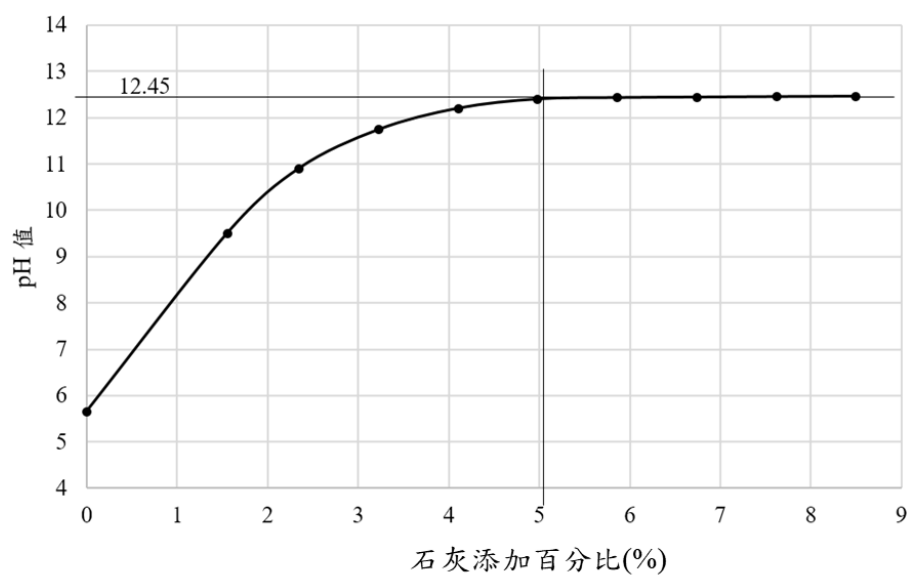
圖九 預定工作進度甘特圖

## 第二節 研究成果

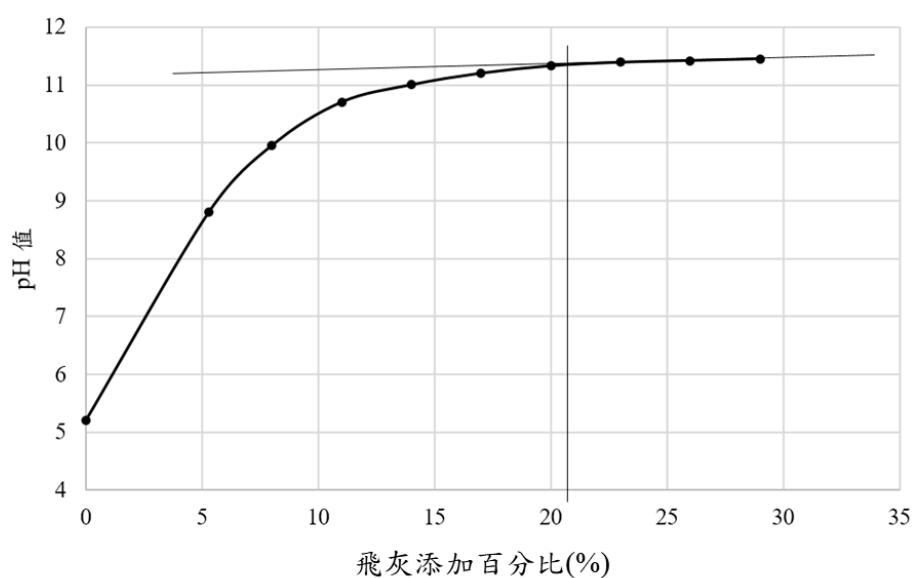
### 3.2.1 改良後土壤 pH 值評估植物適應性

擇定桃園紅土為試驗土壤依不同配比拌合添加劑，而達到「改善坡面理化性質」，藉以提升土壤抗分散及搬運的能力，進而增加抵抗土壤侵蝕的內營力。決定添加記得拌合比例，主要還是取決於土壤中的氧化鈣 CaO 含量，如圖十所示為添加石灰後之土壤 pH 值，隨添加百分比而逐漸上升至 pH=12.45 後停滯所對應之添加百分比為 5%，圖十一為添加飛灰後之土壤 pH 值，由圖中所示 pH=11.3 為高點所對應之添加百分比為 20%，圖十二為添加再生粒料之土壤 pH 值圖中所示 pH=12.1 為高點所對應之添加百分比為 22%，然考量影響動、植物生長及環境友善等因素，選擇將改良劑添加量固定為 5%，同時於表

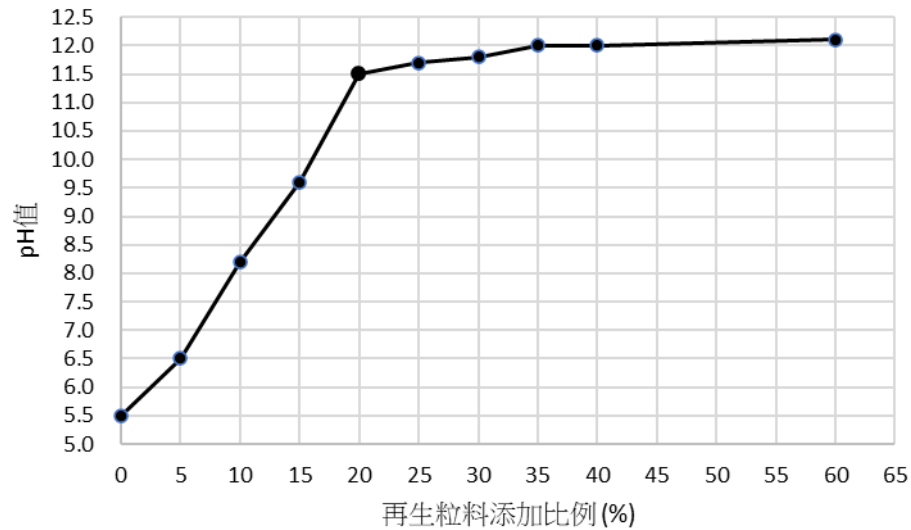
六所示裸露邊坡沖刷後的水質檢測結果，pH 值 8.0~12.0，以作為植物復育後水質變化之比較以作為適應性之評估。



圖十 石灰添加劑與環境 pH 值變化關係圖



圖十一 飛灰添加劑與環境 pH 值變化關係圖



圖十二 再生粒料添加劑與環境 pH 值變化關係圖

表六 改良土壤沖刷試驗出水口集水區水質檢測彙整表

| 試驗組 | 添加土壤改良劑類別 | 添加劑劑量 (%) | 水質檢測(pH) |        |        | 平均值    |        |
|-----|-----------|-----------|----------|--------|--------|--------|--------|
| 1   | 飛灰+紅土     | 5         | 8.658    | 8.590  | 8.530  | 8.593  | 8.633  |
| 2   | 飛灰+紅土     | 5         | 8.451    | 8.284  | 8.363  | 8.366  |        |
| 3   | 飛灰+紅土     | 5         | 8.918    | 8.845  | 8.405  | 8.723  |        |
| 4   | 飛灰+紅土     | 5         | 8.893    | 8.88   | 8.779  | 8.851  |        |
| 5   | 石灰+紅土     | 5         | 12.652   | 12.709 | 12.729 | 12.697 | 12.697 |
| 6   | 石灰+紅土     | 5         | 12.836   | 12.718 | 12.676 | 12.743 |        |
| 7   | 石灰+紅土     | 5         | 12.864   | 12.983 | 12.957 | 12.935 |        |
| 8   | 石灰+紅土     | 5         | 12.443   | 12.545 | 12.252 | 12.413 |        |
| 9   | 再生粒料+紅土   | 5         | 9.323    | 8.845  | 8.862  | 9.01   | 9.191  |
| 10  | 再生粒料+紅土   | 5         | 9.151    | 9.096  | 9.076  | 9.107  |        |
| 11  | 再生粒料+紅土   | 5         | 9.207    | 9.192  | 9.102  | 9.167  |        |
| 12  | 再生粒料+紅土   | 5         | 9.656    | 9.490  | 9.292  | 9.479  |        |

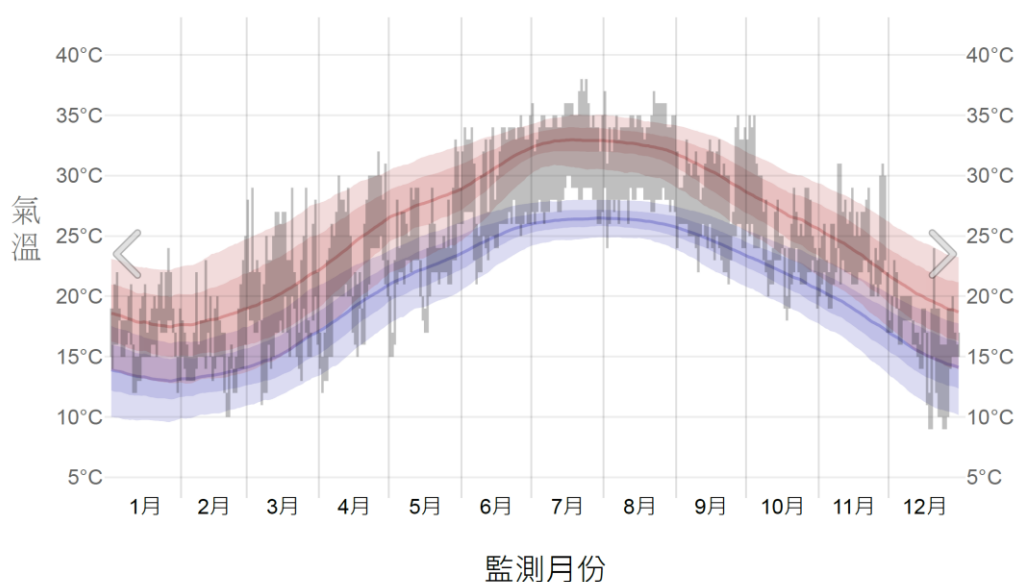
### 3.2.2 改良土壤植生覆蓋率評估

國內以往雖已有對植生與土壤相關研究之基礎，但對於水土保持植物在土壤添加改良劑後的土壤介質育苗及生長無完整研究，故本研究擬將此分析結果提供國內植生保護工程實施之參考。

1. 本研究試驗土壤取自桃園地區紅土，因此以本區域之氣候條件進行室內模擬，如圖十三所示，2022 年逐月氣溫監測數據 9 月份的高溫為  $34^{\circ}\text{C}\sim 32^{\circ}\text{C}$ 、低溫為  $23^{\circ}\text{C}\sim 21^{\circ}\text{C}$ ，平均  $33^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$ ，另外，如表七所示，2022 年逐月相對濕度監測數據為 71%~84%，平均濕度為 78.7%，其中 9 月份的監測值為 73%。
2. 為台灣雨季自五月梅雨至七、八月的颱風暴雨為主要造成土壤沖蝕及土砂災害原因，因此基於保護表層土壤抵抗沖蝕避免災害擴大，所以覆蓋草類植物必須於次年雨季來臨前種植，使其有足夠之時間生長以穩固土壤，如於雨季間種植，則會導致植入之植物種子流失無法達到穩固土壤之效果。因此，本研究將於室內模擬桃園區 9 月氣候條件，利用恆溫恆濕箱控制環境溫度為  $30^{\circ}\text{C}$ 、相對濕度 70%進行植生試驗。
3. 盆栽配置採用長度 27 公分、寬度 23 公分、高度 6.5 公分之植生試驗盆栽，分為 A（再生粒料添加劑）、B（石灰添加劑）、C（飛灰添加劑）、D（無添加劑原土）四類土樣，且依照添加劑比例 1%、3%、5%分為 A1、A3、A5 排序編號，B 類、C 類試驗土樣採用相同的編排方式。另外，D 類土樣為原土對照組故無需編排比例組數。如附錄一所示，各添加

劑拌合歷程，且欲進行植生試驗之各配比土樣亦進行 Ph 值檢測如表八。

4. 規劃四類土樣，9 組添加劑比例試驗組及 1 組員土樣對照組，每盆試驗盆栽內各裝入 5 公斤土樣。採用百喜草及百慕達草 2 種草類，共計執行 20 盆植生試驗。



圖十三 2022 年桃園地區歷史溫度全年紀錄彙整圖

表七 2022 年桃園地區歷史相對濕度全年紀錄彙整表

| 月份                                                               | 一月   | 二月 | 三月 | 四月 | 五月 | 六月 | 七月 | 八月 | 九月 | 十月 | 十一月 | 十二月 |
|------------------------------------------------------------------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| 相對溼度 (%)                                                         | 82   | 87 | 79 | 77 | 87 | 77 | 71 | 72 | 73 | 77 | 82  | 80  |
|                                                                  | 年平均值 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |
|                                                                  | 78.7 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |
| 監測站資訊：農業氣象站測站代碼 A2C560「農工中心」(WGS84 121.2398, 24.985917)，海拔 121m。 |      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |

表八 植生試驗土樣 pH 值測試彙整表

| 土樣添加劑<br>種類 | 拌合比例對應 pH 值 |        |        |
|-------------|-------------|--------|--------|
|             | 5%          | 3%     | 1%     |
| 石灰          | 12.467      | 11.719 | 10.706 |
| 再生粒料        | 9.365       | 8.960  | 8.568  |
| 飛灰          | 9.033       | 8.563  | 8.230  |

5. 依水土保持手冊植生種子播種量之計算，採用以下公式：

$$w = \frac{A}{B \times C \times D \times E \times F}$$

其中：w 為導入植物別的播種量(g/m<sup>2</sup>)。

A 為期待發芽生長株數(株/m<sup>2</sup>)。

B 為不同植物之覆土修正值。

C 為立地條件之修正值。

D 為施工時期之修正期。

E 為種子發芽率(%)。

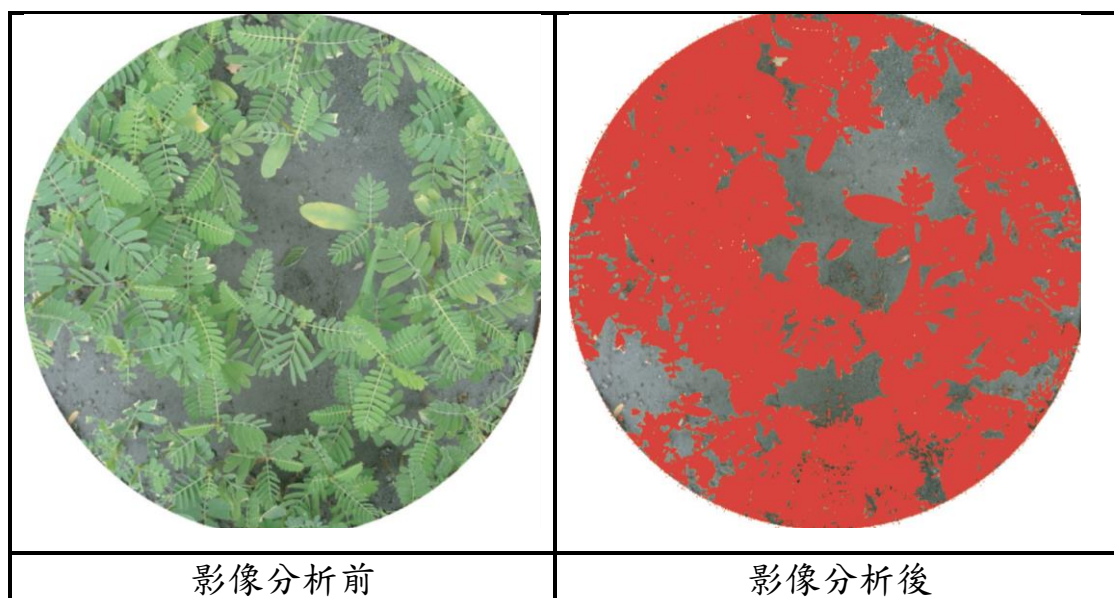
F 為種子之單位粒數(粒/g)。

依據水土保持手冊中，使用草種期待發芽株總數（A）預估期待值約 5000 株/m<sup>2</sup>，覆土修正值（B）與施工時期修正值（D），立地條件修正值（C）均為 1，其試驗單位面積為 0.062 m<sup>2</sup>，以拌合方式播種，推估本試驗不同草類之播種量如表九所示。

表九 覆蓋草類之播種量計算表

| 草類   | 平均發芽率<br>( $E$ , %) | 單位粒數<br>( $F$ , 粒/g) | 播種量<br>( $w$ , g/m <sup>2</sup> ) |
|------|---------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 百喜草  | 80                  | 350                  | 1.107                             |
| 百慕達草 | 50                  | 3800                 | 0.163                             |

6. 覆蓋率的評估，規劃於植生後每週以數位相機固定高度並垂直拍照，再利用軟體 PhotoImpact 及 Image-Pro 排除影像分析干擾物，再利用 SigmaScan Pro 5 軟體進行植生覆蓋率影像分析，此評估方式江介倫等人（2009）曾應用於相關研究之評估。
7. 影像處理的原理是回歸至構成影像最原始像素（pixel），以原影像進行前置處理，選定目標植物像素範圍之色階，重新定義所選定植物色階為另一種不易混淆的色調，並檢查其定義後所呈現之影像（圖十四），再將分析後的像素除以範圍的總像素即為覆蓋率。



圖十四 植生覆蓋率評估影像分析示意圖

江介倫等人（2009）

### 3.2.3 改良土壤植物復育試驗

本試驗利用恆溫恆濕箱設備模擬室外溫度 30°C 及濕度 70% 的氣候條件，進行改良土壤與原土對照的植生試驗。如表十所示，復育草種為百喜草與百慕達草分別取其學名字母 P、C 為代號，另外依據添加劑拌合的配比 1%、3%、5% 帶入試驗組別編號，如表示依序分別為 PA1 至 CC5 及 PD、CD 共計 20 組試驗，以下針對試驗進行簡略說明。

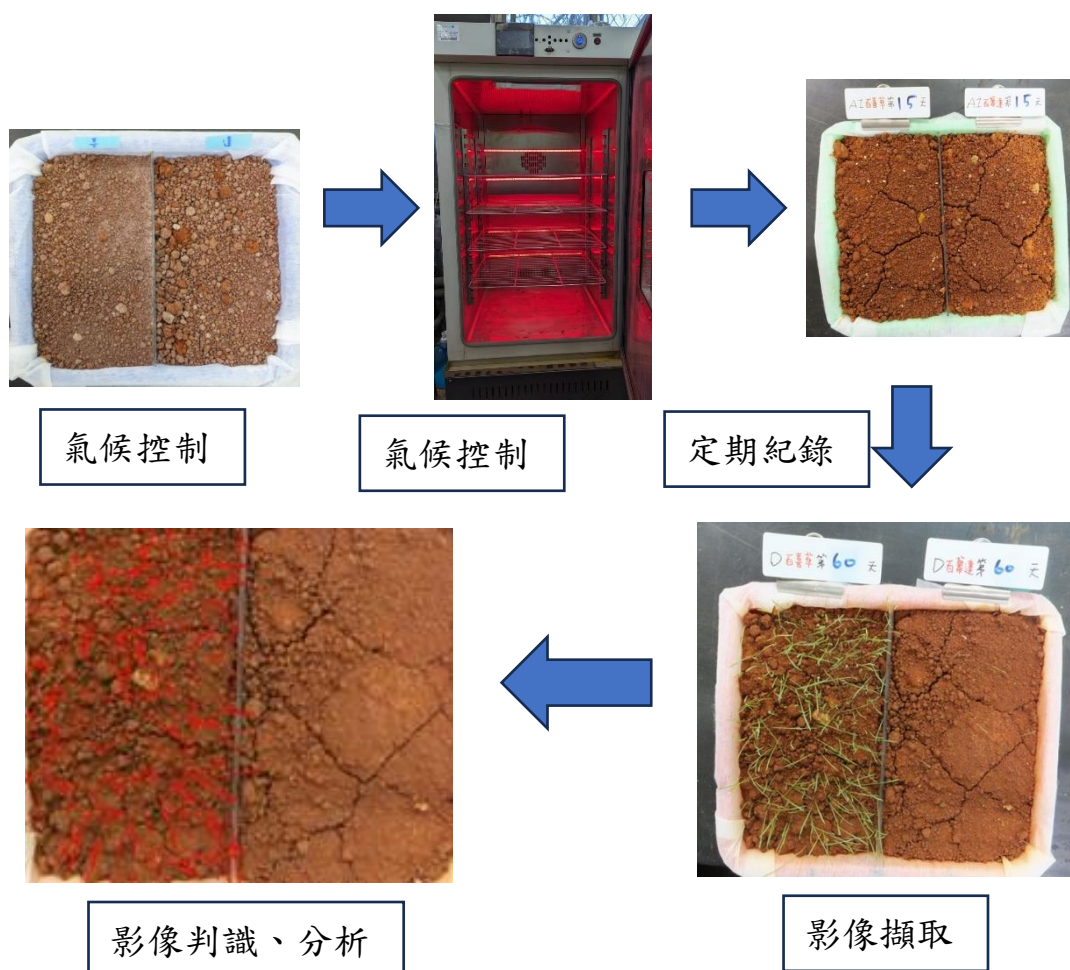
表十 改良土壤植物復育試驗組別編號彙整表

| 試驗草類                         | 土樣添加劑種類及比例          |     |     |       |     |     |       |     |     |
|------------------------------|---------------------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-----|
|                              | 再生粒料(A)             |     |     | 石灰(B) |     |     | 飛灰(C) |     |     |
|                              | 1%                  | 3%  | 5%  | 1%    | 3%  | 5%  | 1%    | 3%  | 5%  |
| 百喜草(Paspalum notatum Flugge) | PA1                 | PA3 | PA5 | PB1   | PB3 | PB5 | PC1   | PC3 | PC5 |
| 百慕達(Cynodon dactylon)        | CA1                 | CA3 | CA5 | CB1   | CB3 | CB5 | CC1   | CC3 | CC5 |
| 備註                           | 原土樣編號 D，原土對照組：PD／CD |     |     |       |     |     |       |     |     |

1. 預計執行植生試驗之改良土壤進行取樣並保持拌合時的含水量及均勻度，故取樣後進行封口、靜置養護如圖十五，預計拌合規範量草種如表九。
2. 分二層回填試驗植生盒，上層拌合草種並將試驗盒分成左右兩側分別種植百喜草與百慕達草進行比對。
3. 將植生盒置入恆溫恆濕箱，在控制氣候的條件下進行植物生長試驗，並連續以 15 天、21 天等時間間隔至 60 天收集生長資訊及擷取影像進行分析，如圖十六所示。



圖十五 改良土壤植生試驗取樣靜置養護示意圖



圖十六 植物復育試驗操作流程示意圖

4. 如圖十六所示，利用影像判識辨別各組試驗盒植物生長情況，將草種生長後葉面面積進行著色處理，以分析植物覆蓋面積，並與植生盒裸露面積進行運算求得覆蓋率。
5. 如圖十七所示，草種開始發芽於試驗開始後第 14 天，第 15 天開始記錄，早期發芽速度以 C 組（添加飛灰）、A 組（添加再生粒料）表現較為優異，其次是 B 組（添加石灰），發芽速度最慢的是 D 組（原土）對照組。
6. 透過持續觀察記錄，發現原土試驗組於第 21 天開始提升發芽速度，至第 28 天該組試驗的覆蓋面積已超越 B 組，再者，三組添加改良劑的土壤植物生長均勻度 A 組相對於較佳。
7. 如圖十八所示，第 28 天之後各試驗盒內的植物開始快速生長，以 C 組最茂盛其次是 A 組，持續監測至第 42 天發現 C3、C5、B5 的生長速度發生萎縮，而 C1 及其他組別呈持續發展葉面覆蓋面積。
8. 如圖十九所示，第 42 天之後各組試驗盒的植物生長發育互有消長，於第 51 天 A1、A5、B3 明顯生長覆蓋面積萎縮，其他組別則仍持續生長發育。
9. 本次試驗初期規劃植生復育情境為 60 天內觀察各試驗組別的復育率，因為在自然條件下，60 日內沒有較大氣溫、濕度波動及顯著的降雨量實屬少見，故於第 60 天後即移出氣候控制箱，在室內常溫下繼續養護如圖二十。



圖十七 改良土壤植生試驗 15~28 天覆蓋面積彙整示意圖

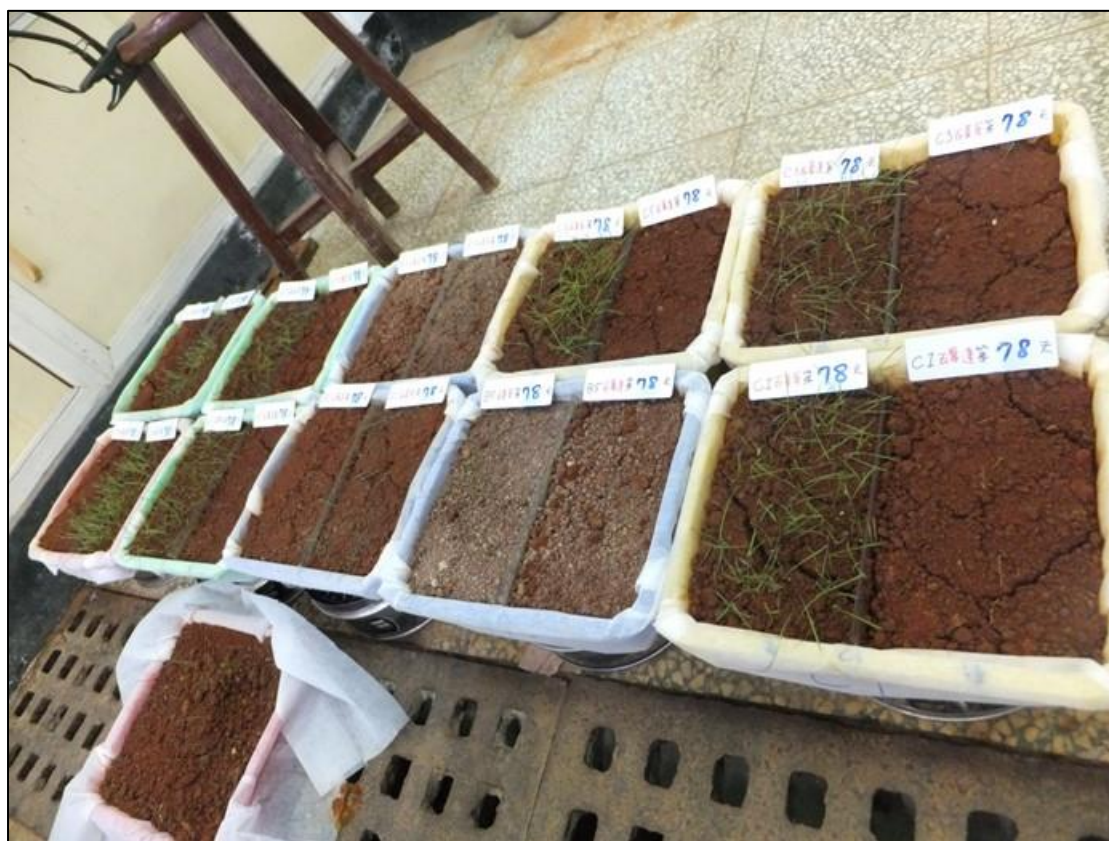


圖十八 改良土壤植生試驗 28~42 天覆蓋面積彙整示意圖



圖十九 改良土壤植生試驗 42~60 天覆蓋面積彙整示意圖

10. 依據第 60 天的紀錄觀察，原土得生長速度已經趨緩幾乎沒有增加，而 B5 試驗組明顯生長面積萎縮，但是其他組別亦持續增加覆蓋面積。
11. 如圖二十所示，第 60~78 天後室內常溫下各組試驗盒養護狀況，室內常態溫度為  $28^{\circ}\text{C}$ ，相對濕度為 63%，養護方式為每日試驗土壤頂部灑水 1min，並提供 8 小時的日照燈其餘時間不提供燈源，至第 80 天記錄結束同時記錄各試驗組根系發展或土壤剖面如圖二十一所示。



圖二十 改良土壤植生試驗 60~78 天室內常溫養護示意圖



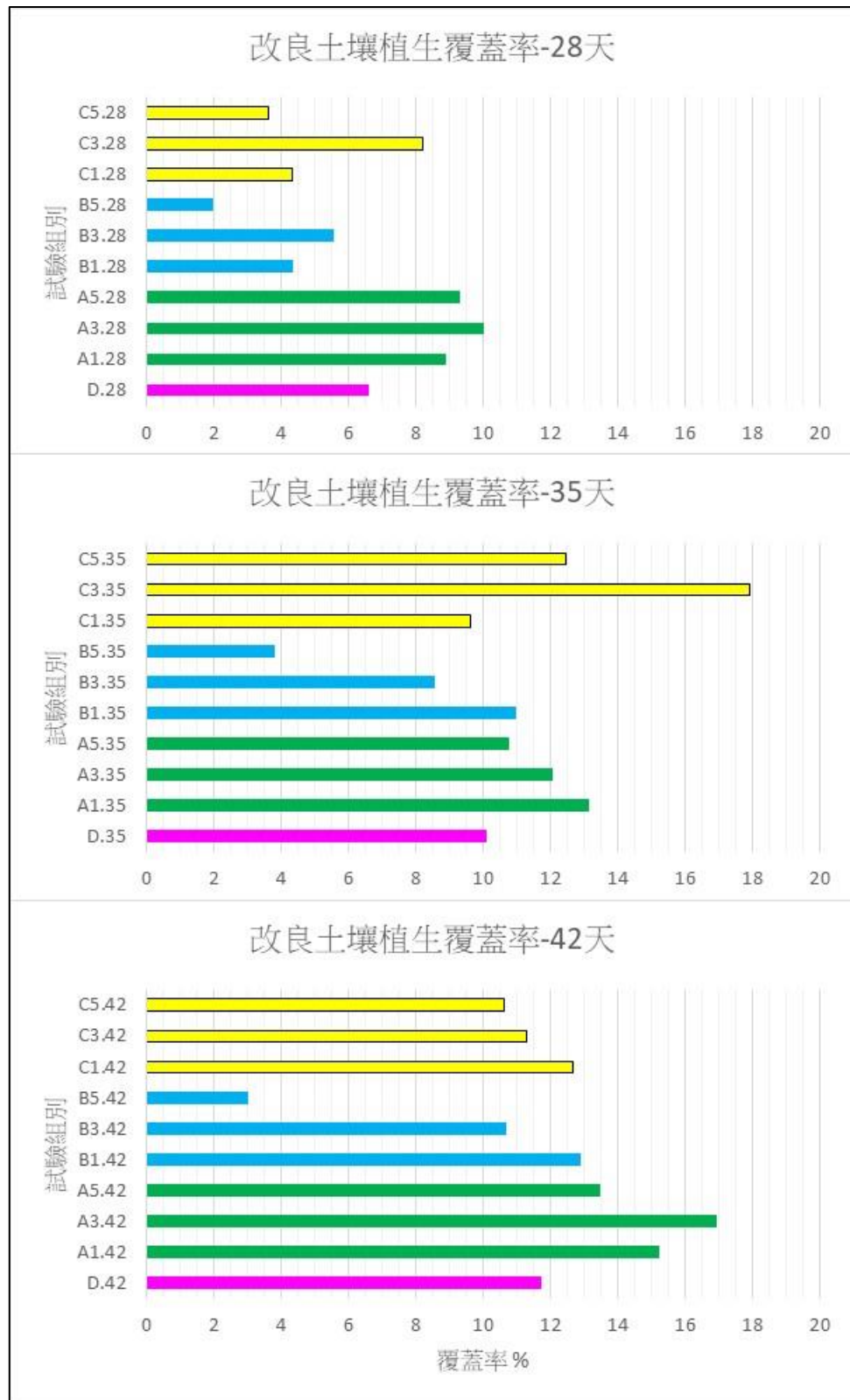


圖二十一 改良土壤植生試驗第 80 天植物根系發展及剖面示意圖

12. 如圖二十所示，百慕達草生長試驗的各組發芽率較差，因此本試驗的植生結果數據均已百喜草試驗組為主，如圖二十一所示，第 80 天各組植物根系發展狀況，D（原土）組土壤剖面相較於其他試驗組緊密且可塑性較高，有明顯的根系發展。A（再生粒料）組土壤剖面明顯較原土鬆散且不具塑性，亦有良好的根系發展現象，B（石灰）組土壤剖面明顯松散且附著石灰粉末，根系發展相較於其他組別較不明顯，C（飛灰）組土壤剖面附著飛灰粉末相較於 A 組較為緊密卻不似 D 組具有塑性，相較於 B 組有明顯根系發展。
13. 依據上述植生覆蓋面積與植生面積比值的百分比得到植生覆蓋率，相關之影像辨識成果詳如附錄二，以下分別說明各組別的試驗結果。如圖二十二所示，所有試驗組別於第 21 天時覆蓋率均在 10% 以下，其中，B、D 組的結果相對於 A、C 組表現較差，至第 28 天的紀錄值，所有的組別均有明顯的增長，尤其以 D（原土）的成長速率最大。

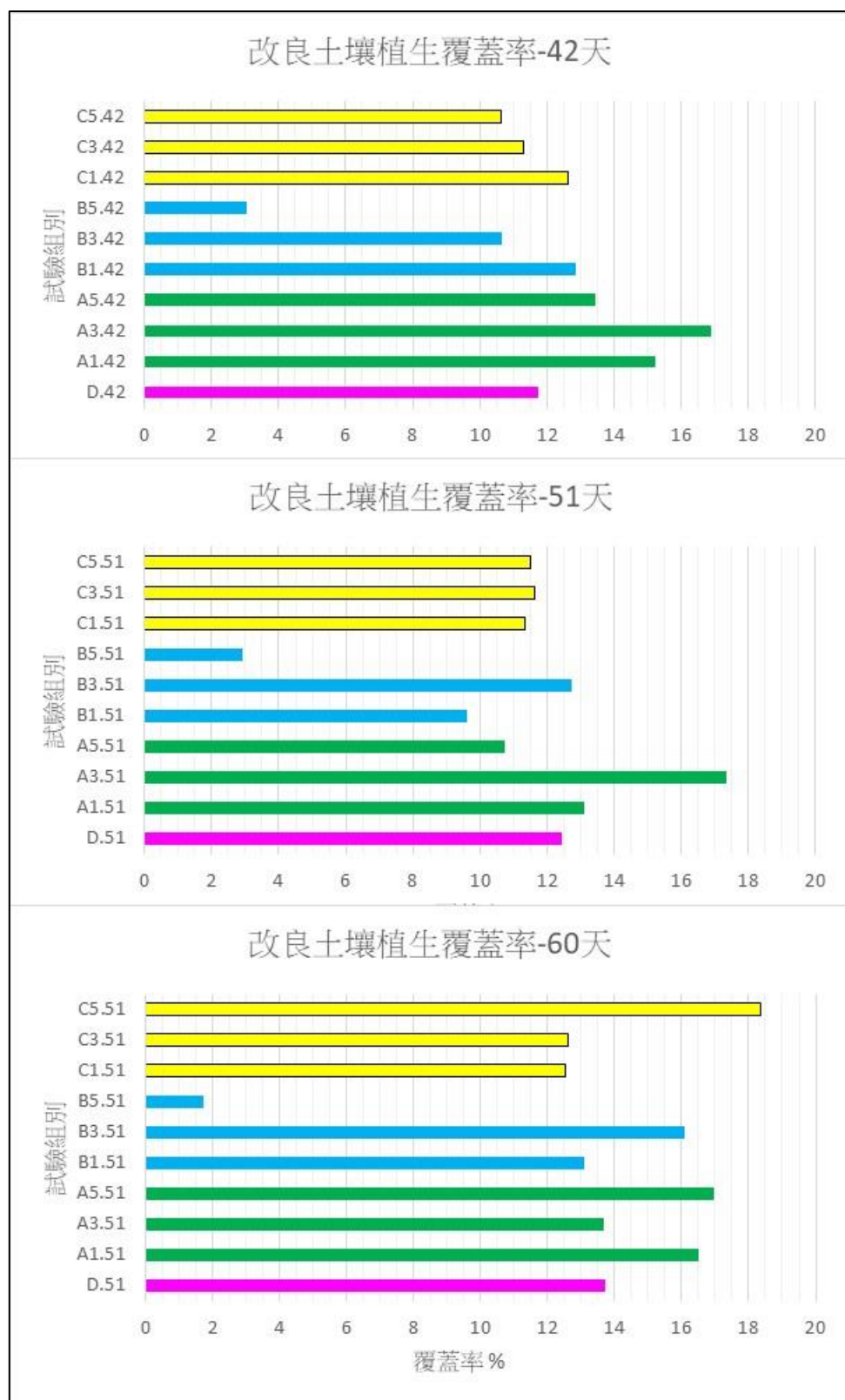


圖二十二 改良土壤植生試驗 15~28 天覆蓋率彙整示意圖



圖二十三 改良土壤植生試驗 28~42 天覆蓋率彙整示意圖

14. 如圖二十三所示，第 28 天之後各組試驗植物生長速度明顯上升，尤其是 C3 組於第 35 天覆蓋率達到 18%，至第 42 天 C3、C5、B5 覆蓋率有萎縮的趨勢，但是，其他的組別仍持續增加，其中 A3 組達到 17% 的覆蓋率。
15. 如圖二十四所示，第 42 天之後各組別的覆蓋率均有消長，其中，第 51 天 A3 的覆蓋率可達到 17.5% 至第 60 天則消退為 13.5%，而 A1、A5 則增長至 16.5%~17%。C 組的覆蓋率殺有消長其中 C5 在第 60 天增長至 18.5%，B5 的覆蓋率明顯消退最多。
16. 綜觀上述植生試驗結果，能歸納出幾類改良土壤植生結果分述如下：(a) 植物生長的必要要素有空氣、水、陽光和土壤，在本次試驗中水及陽光各組試驗均承受相同的條件，惟改變土壤 pH 值及土壤孔隙率（空氣含量），其中可發現各試驗組植物生長的情況。(b) 就發芽速度而言，C 組（飛灰）與 A 組（再生粒料）最先發芽，可以推論為拌合改良劑後紅土相對於原土壤較為鬆散而增加土壤孔隙率，提高空氣含量促進快速發芽，這結果可在第 15~21 天的植生結果得以證實。(c) 對於土壤 pH 值對於植物生長的影響，就植生試驗 60 天的觀察 B5 組一直表現不佳，該組土壤 pH 值為 12.467 屬於鹼性土壤，根據文獻所述植物所需的養分如磷酸和鐵在鹼性土壤中不能溶解，故無法被植物吸收，營養不良的植物會因風害或鹽害而腐爛或枯萎，因此相對於其他組別該組更不容易生長。

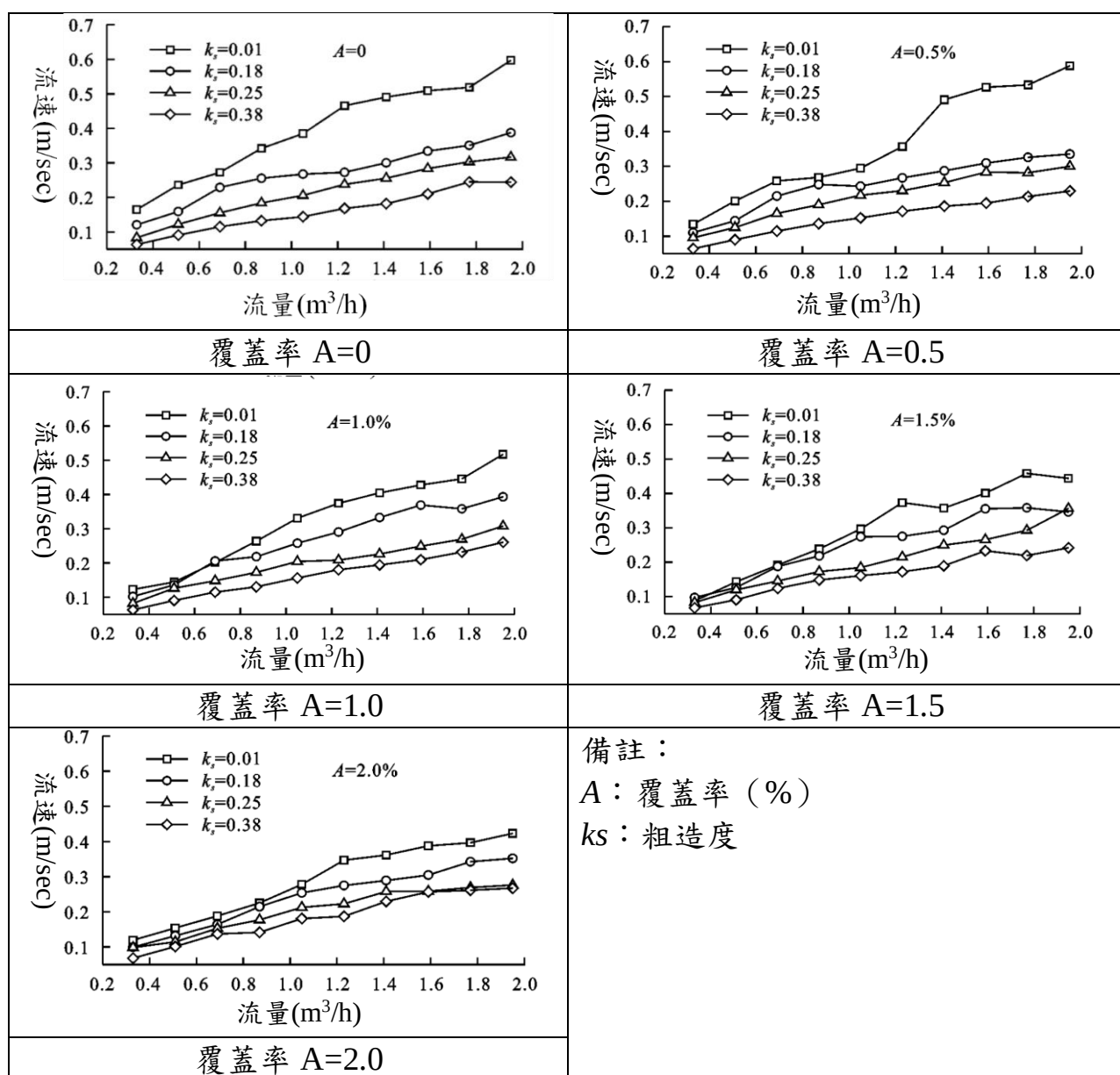


圖二十四 改良土壤植生試驗 42~60 天覆蓋率彙整示意圖

17. 關於 D 組（原土）植物生長紀錄觀察，雖然早期發芽率較其他組別緩慢，但是其生長發育平均且不具消退的現象，至第 80 天植物根系發展相對於其他組別較為強韌且茂密。
18. 植物發育生長的生命過程與肥料吸收率有密切關係，植物的生命過程可約略分成營養生長期、分化期和生殖生長期 3 階段，各階段所需肥料種類和量均有差異，若希望植物正常生長，應配合植物營養生理需求，適時適量施用肥料，而本植生試驗前 60 天為控制氣候條件，且在不施加肥料的狀態下進行，因此在試驗期間各組均有生長消退的跡象，可以歸責於土地肥力不足且土壤鹼性影響微量元素吸收。

#### 3.2.4 植生覆蓋對坡面沖刷的影響

坡面沖刷水流指的是自然條件下受重力作用，而形成沿著坡面向下流動的水流，對於土壤侵蝕、顆粒運動等沖刷行為是主要的動力。主持人曾透過模擬植生覆蓋和地表粗糙條件下的定床渠槽沖刷試驗，探討流速受植生覆蓋率及地表粗糙的影響，如圖二十五所示， $A$  為覆蓋率、 $k_s$  為粗糙度，覆蓋率由 0~2.0%，試驗粗糙度分別為 0.01、0.18、0.25、0.38 等四組。當覆蓋率  $A$  為 2% 水流流速為 0.06~0.42m/sec，當覆蓋率為 1.5% 水流流速為 0.07~0.46m/sec，當覆蓋率為 1.0% 水流流速為 0.07~0.52m/sec，當覆蓋率為 0.5% 水流流速為 0.07~0.57m/sec，當覆蓋率為 0% 水流流速為 0.06~0.59m/sec。



圖二十五 植生覆蓋率對流速的影響示意圖

如圖所示，隨著覆蓋率增加，水流流速明顯降低。於同一覆蓋條件中，隨著地表粗糙度的增加水流流速降低，此試驗結果說明，流速與覆蓋率及粗糙度呈現反比關係。另外，當覆蓋率從 0 增加至 2.0% 時流速隨著流量增加而降低，其原因為當覆蓋率增加時坡面水流被植生影響，特別是植物周圍的流體與地表粗糙顆粒撞擊越來越劇烈，導

致坡面流體的能量消耗增加，因此出流流速遞減的現象。

綜合上述實驗結果顯示，植生具有其一定之效益，而此效益必須經過科學方法的驗證，如試驗結果，植生前後的流速差異呈現出坡面植生覆蓋的功能及坡面管理與維護的貢獻。另外，植生前後的懸移值差異可以由沉砂量量化其覆蓋率的直接貢獻。

## 第四章 結論與建議

### 第一節 結論

1. 本試驗土壤為桃園紅土，經土壤性質試驗分類該土壤屬於高塑性黏土或高塑性粉土，其工程特性為含水量高、流動性高，因為黏土或粉土顆粒形狀排列因素，造成紅土地層質地緊密，故通氣性及透性不佳，因此不易植生。
2. 植物生長的必要要素有空氣、水、陽光和土壤，在本次試驗中水及陽光各組試驗均承受相同的條件，惟改變土壤 pH 值及土壤孔隙率（空氣含量），其中可發現各試驗組植物生長的情況。
3. 就發芽速度而言，C 組（飛灰）與 A 組（再生粒料）最先發芽，可以推論為拌合改良劑後紅土相對於原土壤較為鬆散而增加土壤孔隙率，提高空氣含量促進快速發芽，這結果可在第 15~21 天的植生結果得以證實。
4. 對於土壤 pH 值對於植物生長的影響，就植生試驗 60 天的觀察 B5 組一直表現不佳，該組土壤 pH 值為 12.467 屬於鹼性土壤，根據文獻所述植物所需的養分如磷酸和鐵在鹼性土壤中不能溶解，故無法被植物吸收，營養不良的植物會因風害或鹽害而腐爛或枯萎，因此相對於其他組別該組

更不容易生長。

5. 關於 D 組（原土）植物生長紀錄觀察，雖然早期發芽率較其他組別緩慢，但是其生長發育平均且不具消退的現象，至第 80 天植物根系發展相對於其他組別較為強韌且茂密。
6. 植物發育生長的生命過程與肥料吸收率有密切關係，植物的生命過程可約略分成營養生長期、分化期和生殖生長期 3 階段，各階段所需肥料種類和量均有差異，若希望植物正常生長，應配合植物營養生理需求，適時適量施用肥料，而本植生試驗前 60 天為控制氣候條件，且在不施加肥料的狀態下進行，因此在試驗期間各組均有生長消退的跡象，可以歸責於土地肥力不足且土壤鹼性影響微量元素吸收。

## 第二節 建議

1. 本研究結果顯示，原狀土壤邊坡於相對的條件下，未經外力夯實其較不易被沖刷，這也表示該土壤於自然的狀態較緊密、不易透水及透氣，因此不利植物生長。然而，經過改良後的土壤，因添加改良劑使土壤結構產生改變而趨於鬆散，因此在未執行夯實下較容易發生沖刷。
2. 本研究假設情境為汛期後產生之崩塌地工作性質不佳，不易進行整治、修繕及施工，利用土壤改良的方式快速怯水

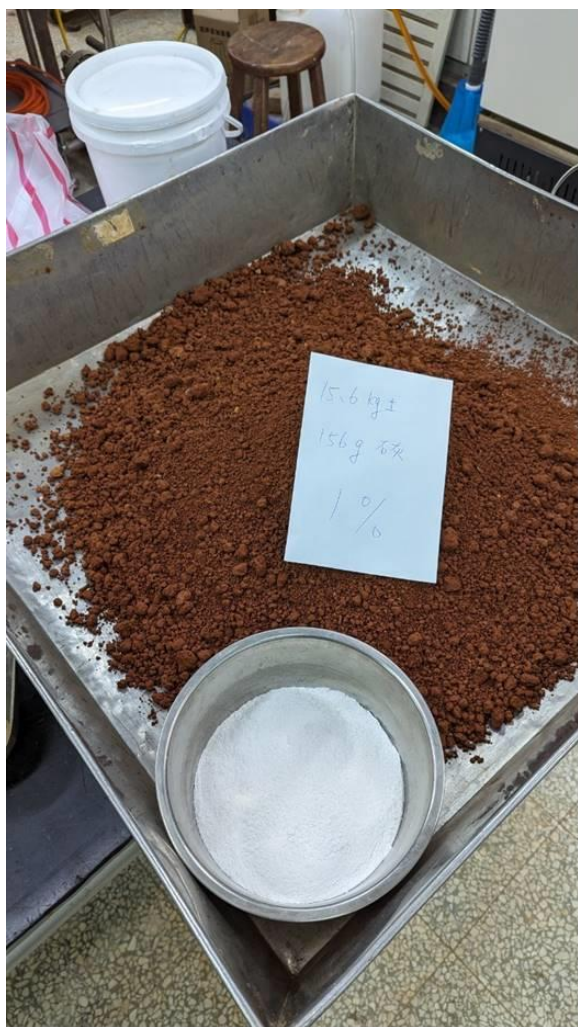
使崩塌地能進駐工程機具或人員，並且就原工址能給予簡單的硬體設施施作，依地形及生態保育為考量以自然復育及保留原貌為主要設計，因此考慮在改良區內進行植物生長復育以保留動植物生物廊道。

## 參考文獻

1. 李建堂(1996)「土壤沖蝕的量測方法」，國立臺灣大學地理學系地理學報，第 23 期，第 89-106 頁
2. 陳樹群、簡如宏、馮智偉、巫仲明(1998)，「本土化土壤沖蝕指標模式之建立」，中華水土保持學報，第 29 期，第 3 卷，第 233~247 頁。
3. 林俐玲(2008)，「土壤沖蝕指數估算公式之研究」，中華水土保持學報，第 39 卷，第 4 期，第 355~366 頁。
4. 林俐玲(2010)，「通用土壤流失公式(USLE)之應用與誤用」，水保技術，第 5 卷，第 2 期，第 119~121 頁。
5. 林韋成(2014)，「石門水庫集水區土壤沖蝕與水文地文影響因子研究」，淡江大學土木工程學系研究所，碩士論文
6. 王詠潔(2016)，「坡地土壤沖蝕力學研究—以紋溝沖蝕為例成果報告」，水土保持局。
7. 賴俊辰、王詠潔(2018)，「小尺度人工降雨試驗侵蝕量模擬研究-Hairsine-Rose 模式應用」，中華水土保持學報，第 50 期，第 2339–2349 頁。
8. Smith, D.D. (1941), "Interpretation of soil conservation data for field use", Agr. Eng. 22:173-175.
9. Dunne, T., L. B. Leopold, "Water in environmental planning." W. H. Freeman and Company, New York, p.255~278., 1978.
10. Terrel, R.D., Epps, J.A, Barenberg, Mitchell, J.K. and Thompson, M.R, "Soil Stabilization in Pavement Structures. A User's Manual, Volume 2, Mixture Design Considerations", FHWA, Washington, D.C., USA, 1979.
11. Carpenter, S.H., Crovetti, K. L., Smith, E., and Wilson, T, "Soil and

- Base Stabilization and Associated Drainage Considerations, Volume II, Mixture Design Considerations”, FHWA, Washington, D.C., USA, 1992.
- 12.Sangüesa, C., Arumí, J., Pizarro, R. and Link, O. (2009),” A rainfall simulator for the in situ study of superficial runoff and soil erosion.” Chilean Journal Of Agricultural Research Vol. 70(1),178-182.
- 13.Petry, T. M., “The State of Art on International Practice on Soil Stabilization Technology for Pavement and Embankment - Regulation Brief on TRB, FHWA, FAA, AASHTO, and PCA” , 桃園市政府國際研討會， 2019.
- 14.邱相禎(2018)，「不同改良劑對污染土壤中重金屬植物有效性之影響」，中央大學環境工程研究所，碩士論文
- 15.梁耀竹、曾喜育、邱清安、曾彥學(2011)，「臺灣西部惡地之植群調查」，林業研究季刊，第 33 卷，第 3 期，第 23~36 頁。
- 16.馮業敬(2014)，「水庫淤泥與水泥噴凝植生敷蓋技術之應用研究」，臺灣大學生物環境系統工程研究所，碩士論文
- 17.范正成、吳明峰(1996)，「臺灣地區田間人工降雨機之研製、操作、率定及分析」，中華水土保持學報，第 27 卷，第 1 期，第 1~13 頁。
- 18.范正成、謝宏元(1991)，「田間人工降雨機之回顧、研究及比較」，中華水土保持學報，第 22 卷，第 1 期，第 9~20 頁。
- 19.行政院農業委員會水土保持局(2014)「農地水土保持方法實例圖冊」，第 110~127 頁。
- 20.HALL, R. 2008. Soil Essentials, Collingwood, VIC, Landlinks Press.

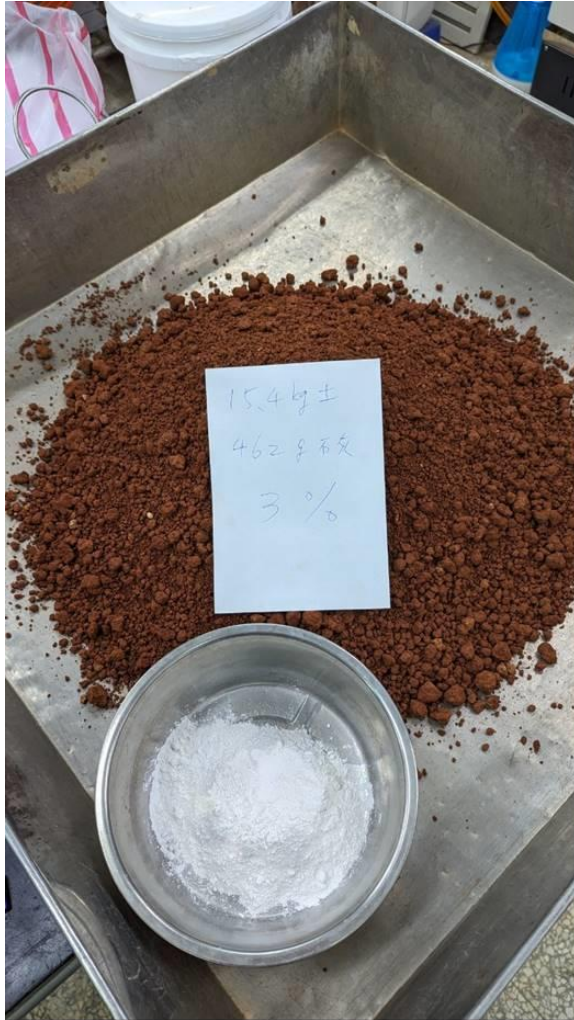
## 附錄一 植生應用於改良土壤配比拌合歷程記錄



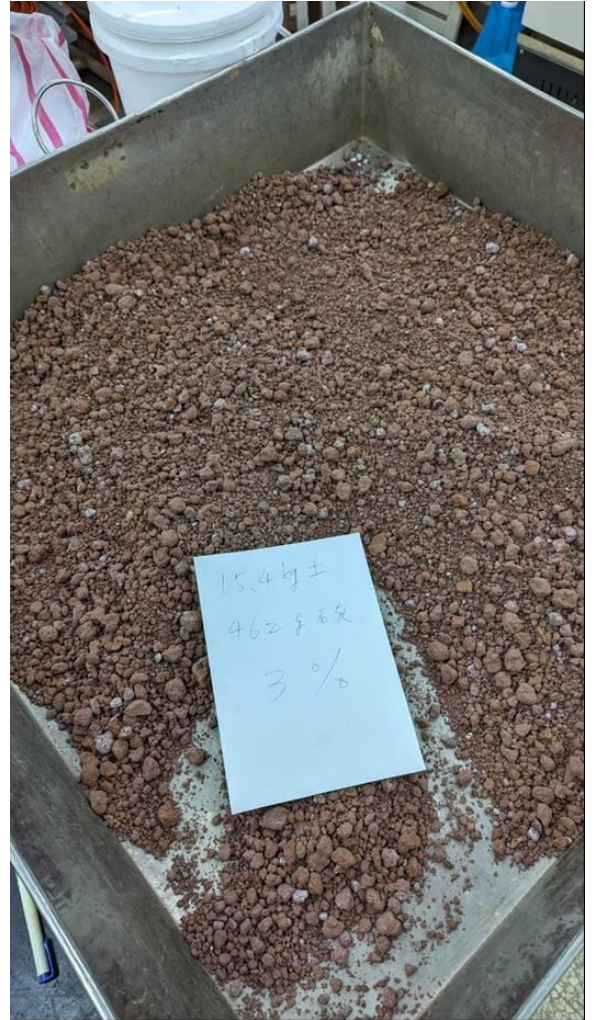
石灰含量 1%拌合前準備



石灰含量 1%拌合後養護



石灰含量 3%拌合前準備



石灰含量 3%拌合後養護



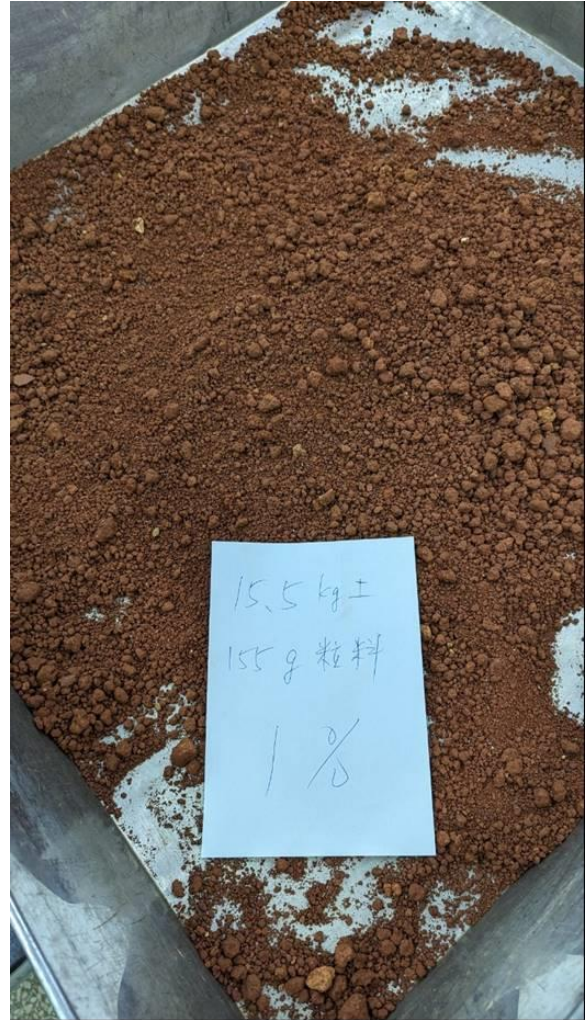
石灰含量 5%拌合前準備



石灰含量 5%拌合後養護



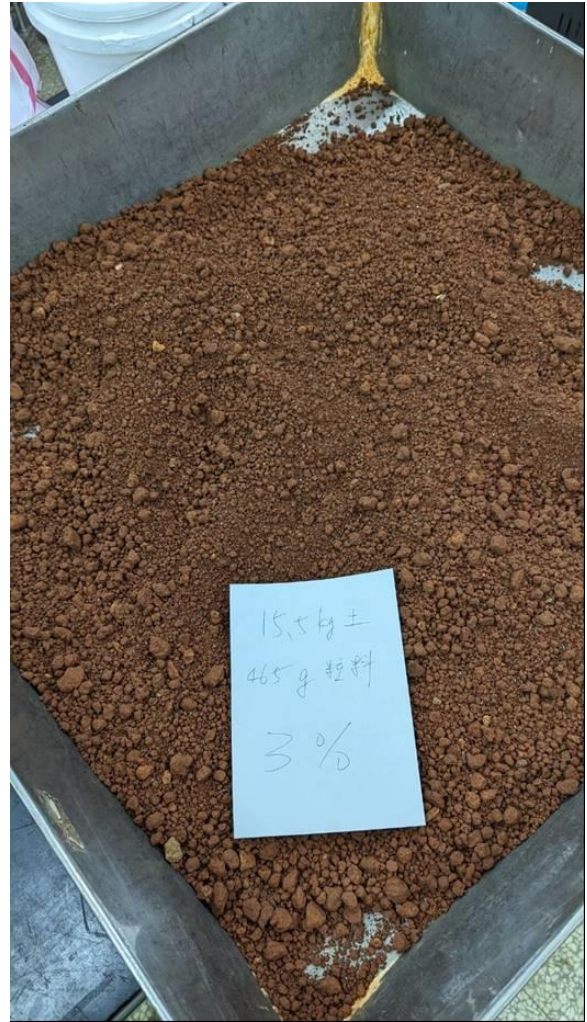
再生粒料含量 1%拌合前準備



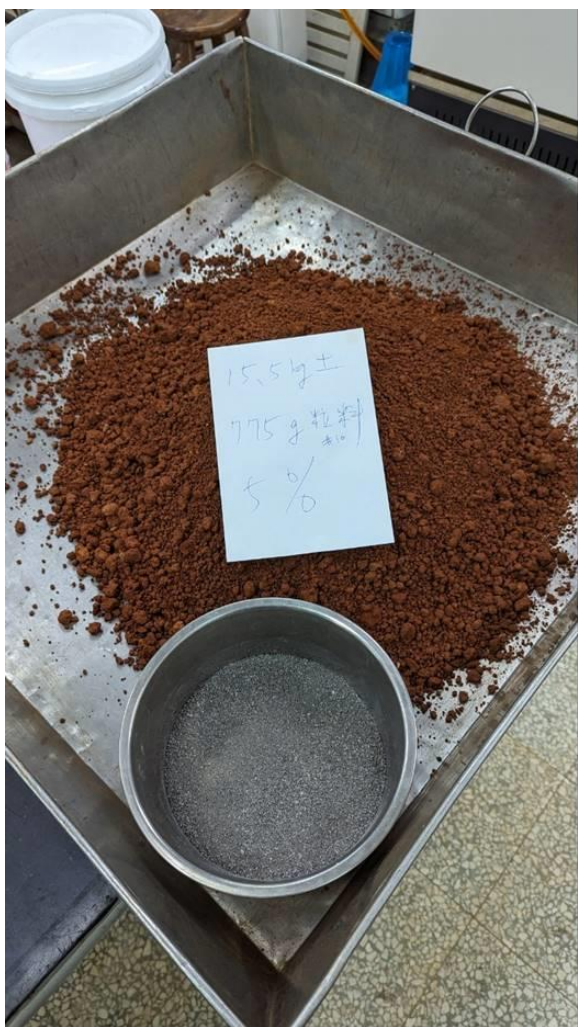
再生粒料含量 1%拌合後養護



再生粒料含量 3%拌合前準備



再生粒料含量 3%拌合後養護



再生粒料含量 5%拌合前準備



再生粒料含量 5%拌合後養護



飛灰含量 1%拌合前準備



飛灰含量 1%拌合後養護



飛灰含量 3%拌合前準備



飛灰含量 3%拌合後養護



飛灰含量 5%拌合前準備



飛灰含量 5%拌合後養護

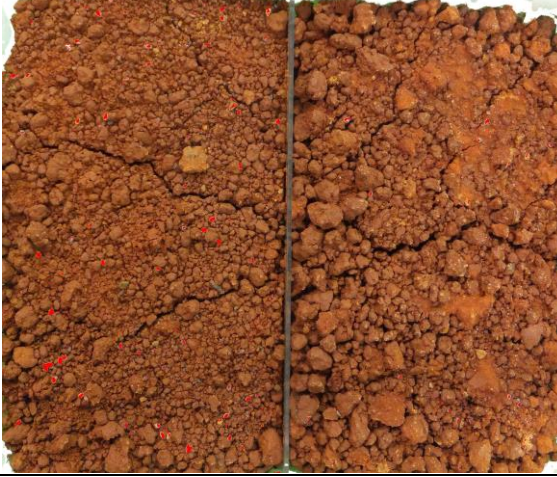
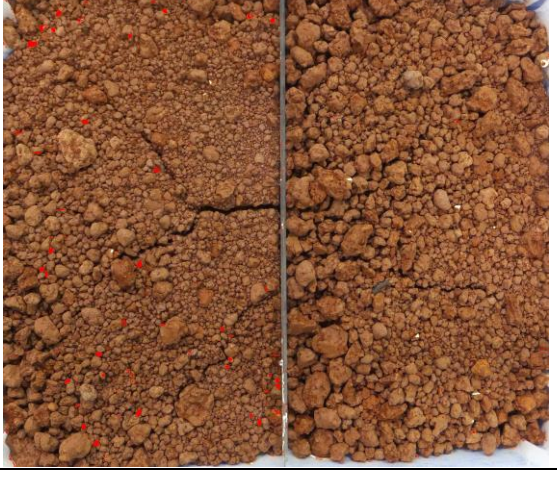


試驗土樣物性試驗

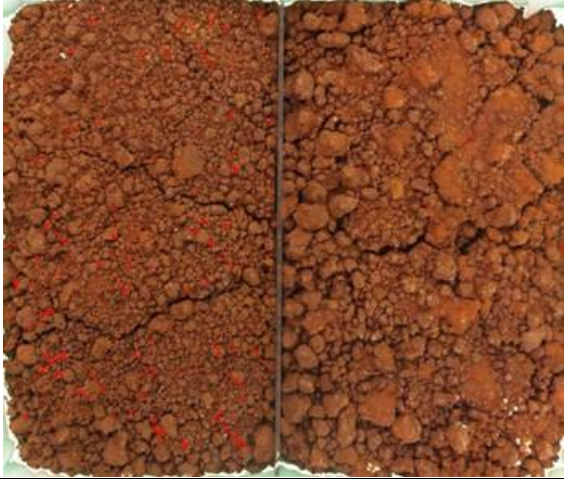
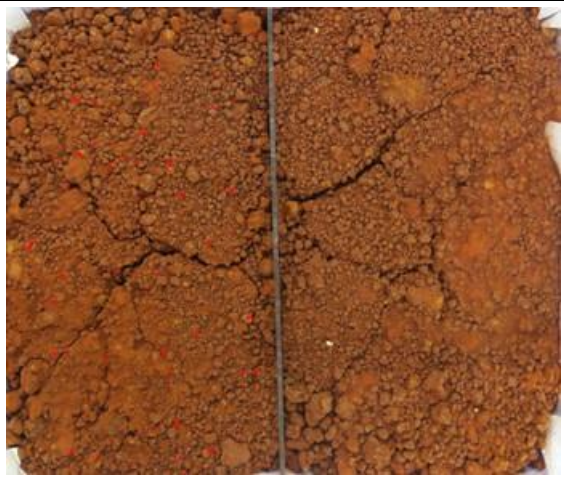
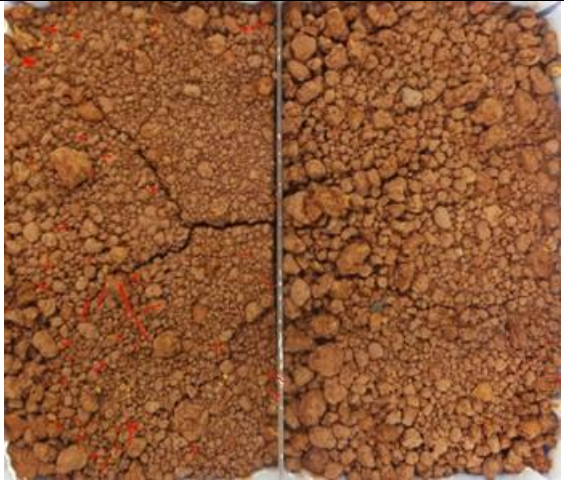


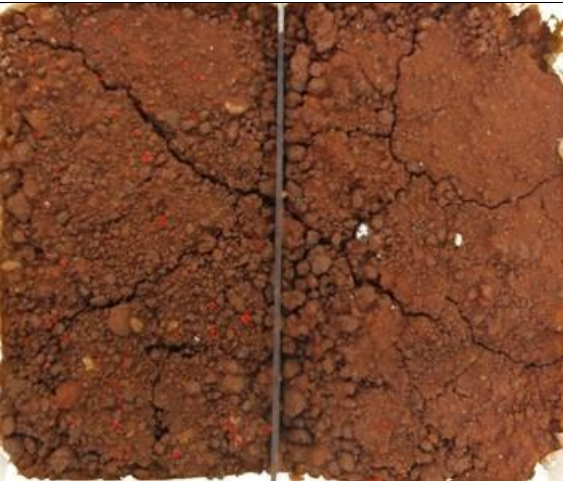
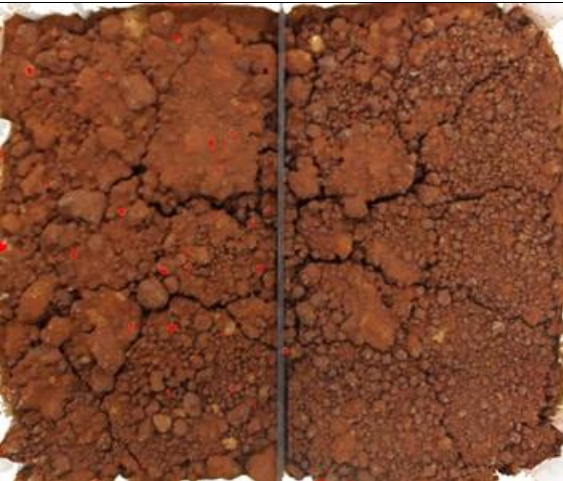
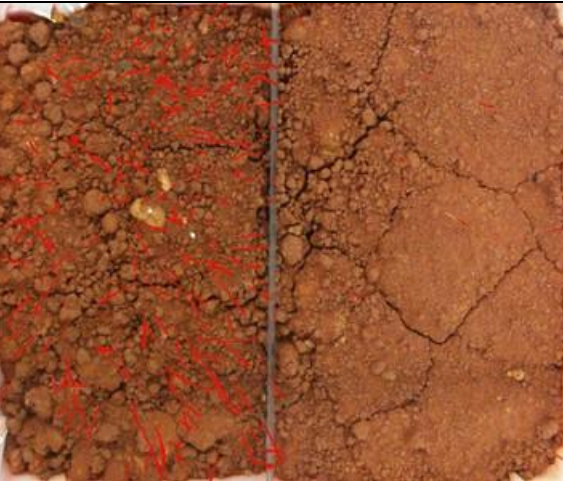
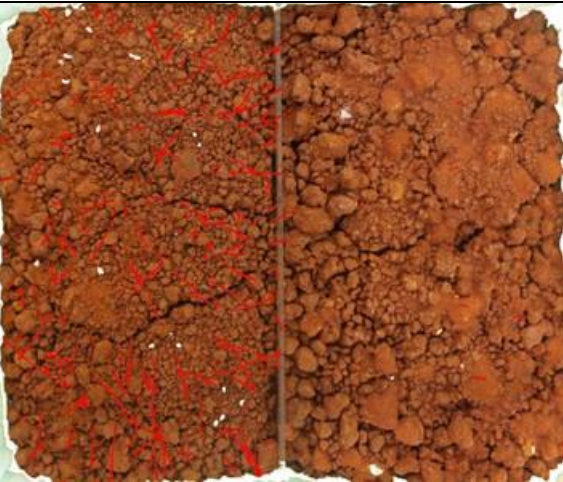
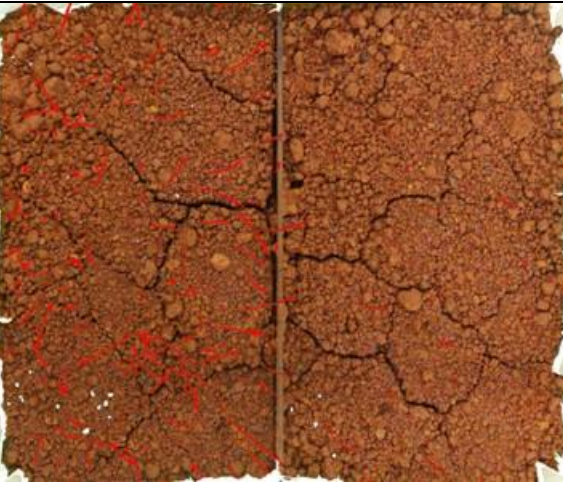
試驗土樣物性試驗

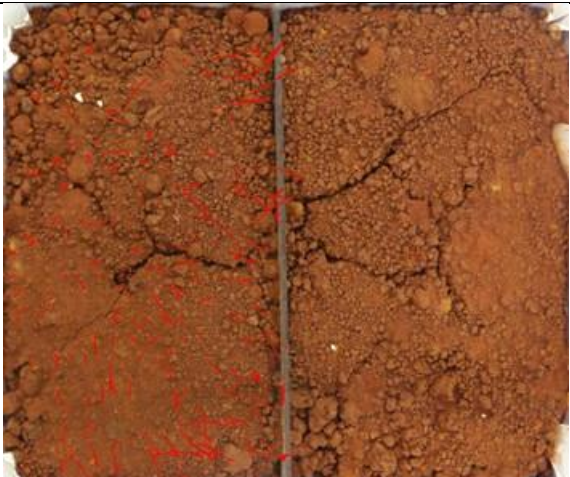
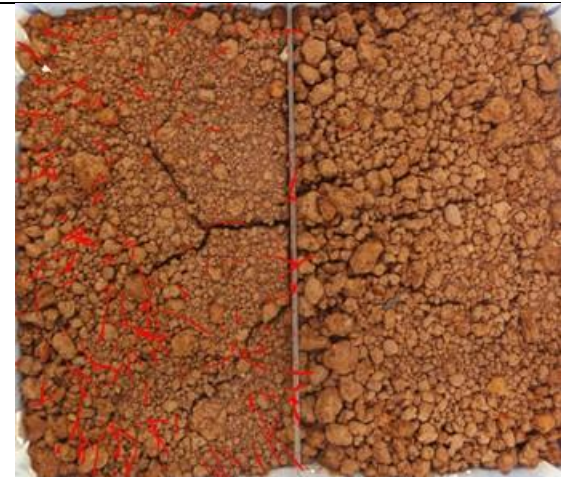
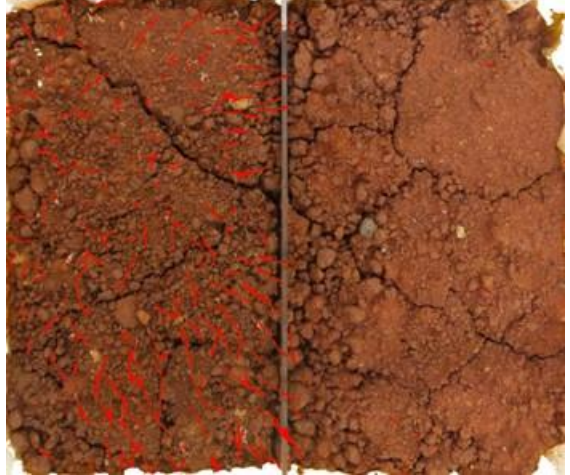
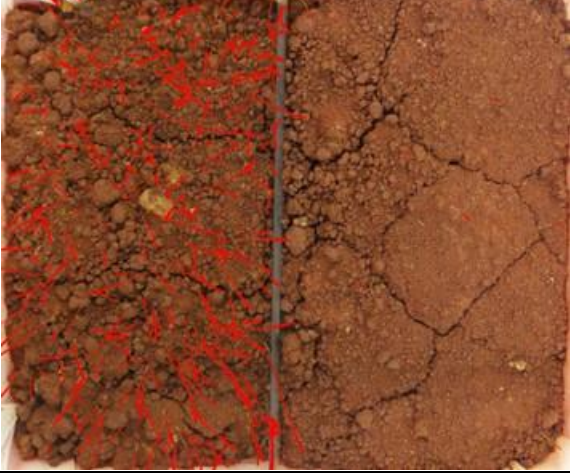
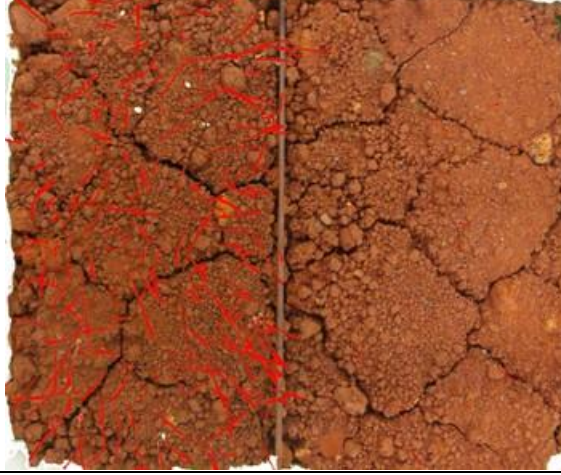
## 附錄二 植生試驗影像辨識分析結果彙整

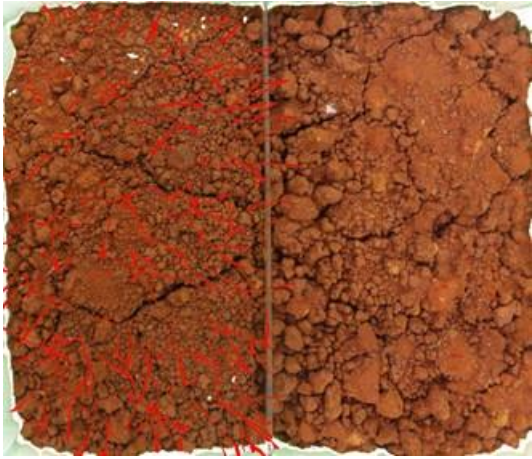
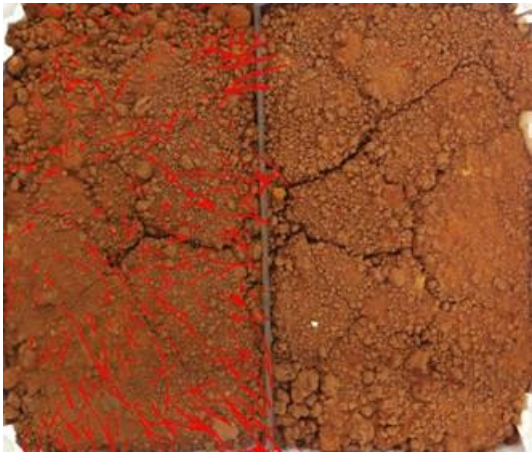
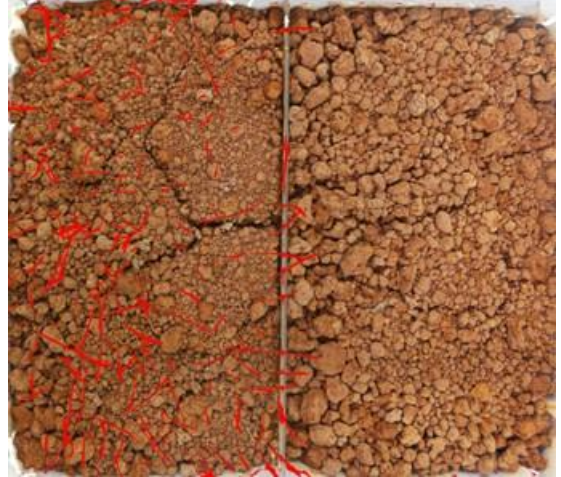
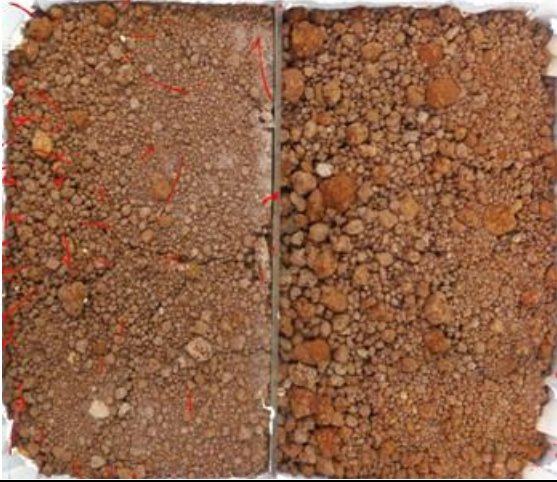
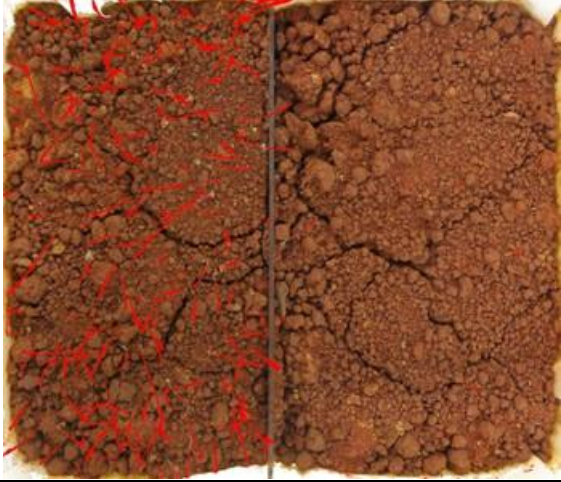
|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| <p><b>D.15 (左:百喜草、右:百慕達草)</b></p>                                                   | <p><b>A1.15 (左:百喜草、右:百慕達草)</b></p>                                                   |
|   |   |
| <p><b>A3.15 (左:百喜草、右:百慕達草)</b></p>                                                  | <p><b>A5.15 (左:百喜草、右:百慕達草)</b></p>                                                   |
|  |  |
| <p><b>B1.15 (左:百喜草、右:百慕達草)</b></p>                                                  | <p><b>B3.15 (左:百喜草、右:百慕達草)</b></p>                                                   |

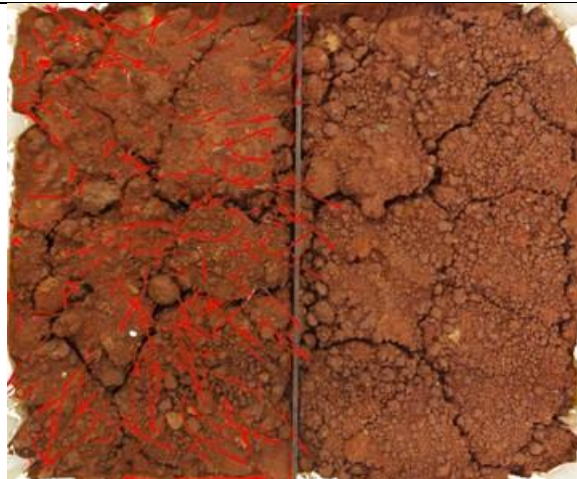
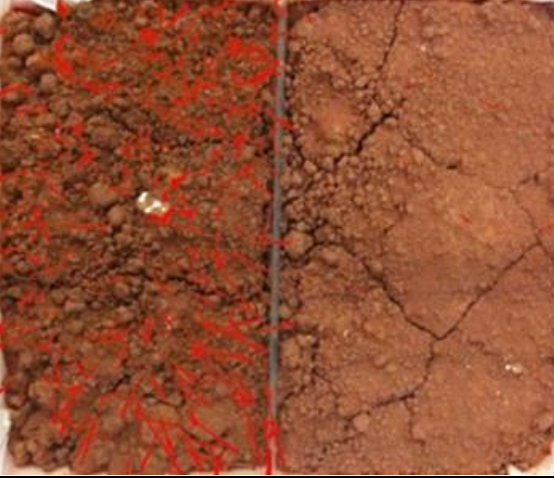
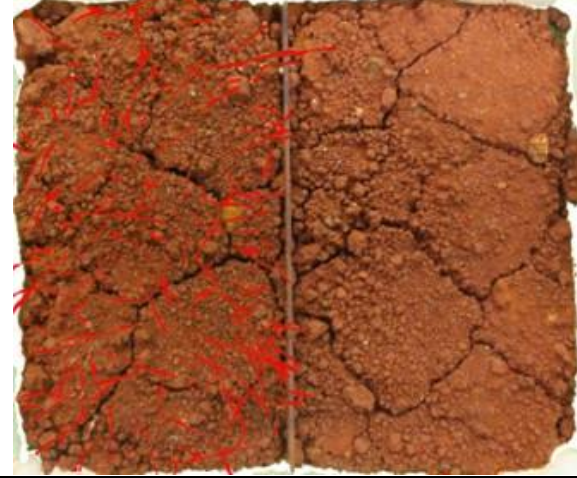
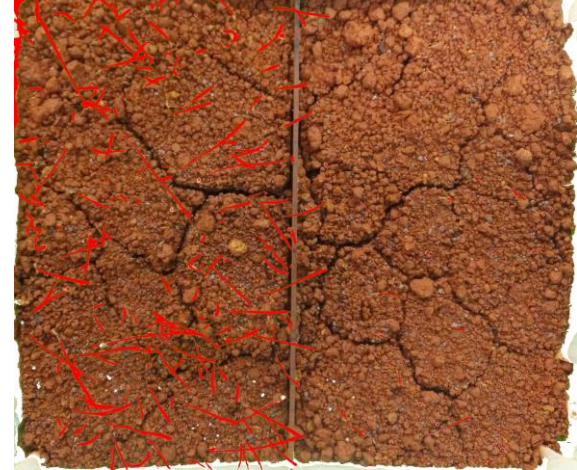
|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| <p>B5.15 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                         | <p>C1.15 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          |
|   |   |
| <p>C3.15 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                         | <p>C5.15 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          |
|  |  |
| <p>D.21 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          | <p>A1.21 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          |

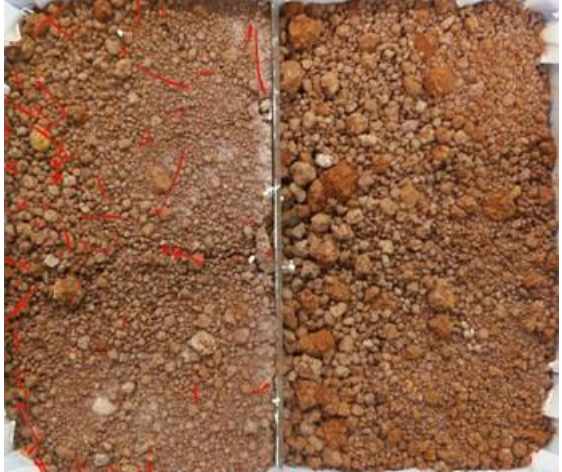
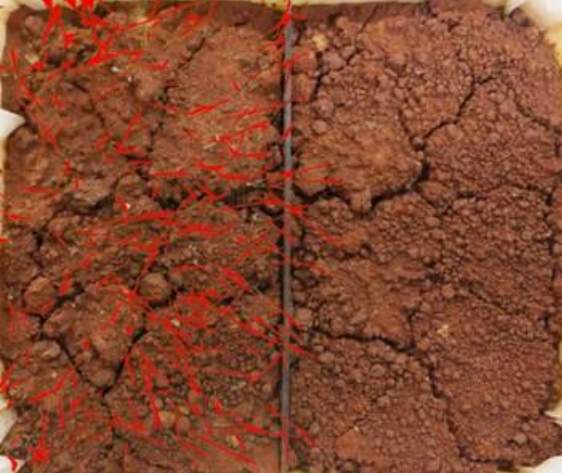
|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| A3.21 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | A5.21 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |
|   |   |
| B1.21 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | B3.21 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |
|  |  |
| B5.21 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | C1.21 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |

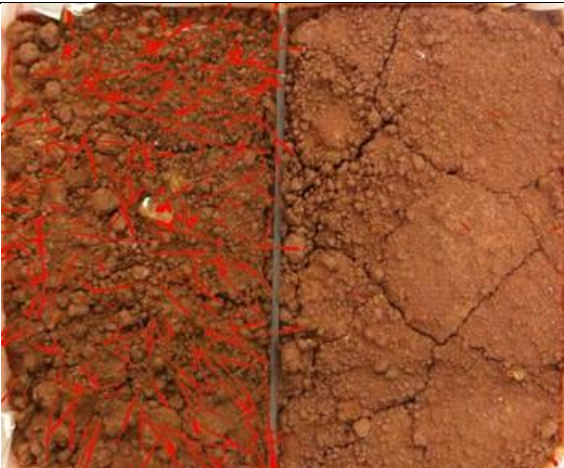
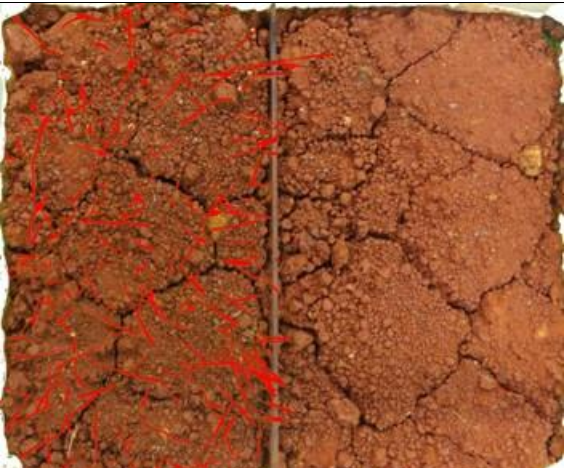
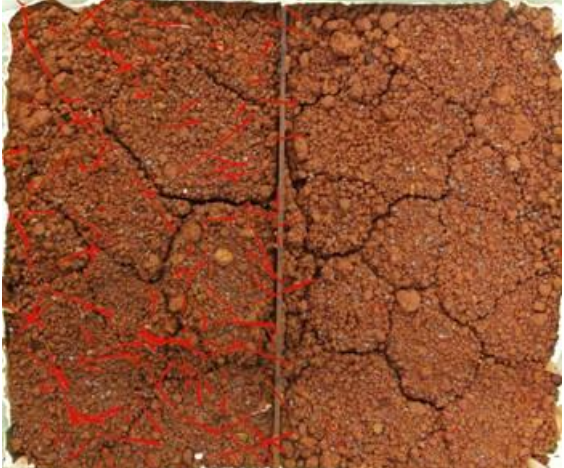
|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| <p>C3.21 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                         | <p>C5.21 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          |
|   |   |
| <p>D.28 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          | <p>A1.28 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          |
|  |  |
| <p>A3.28 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                         | <p>A5.28 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          |

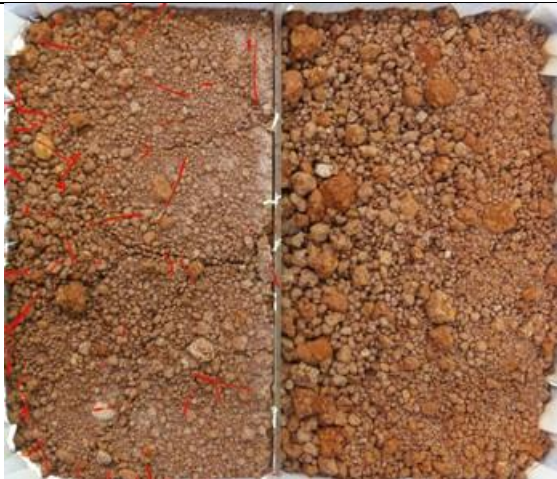
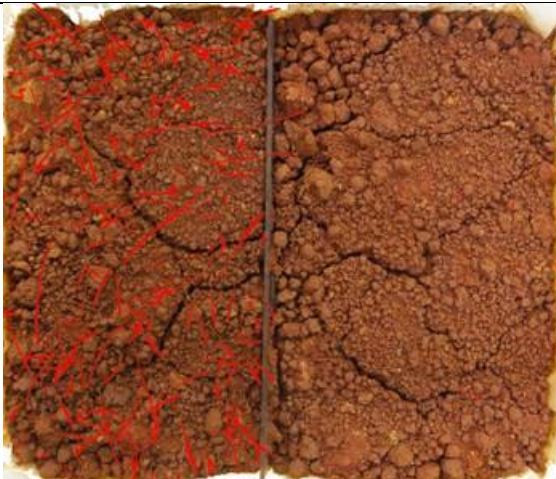
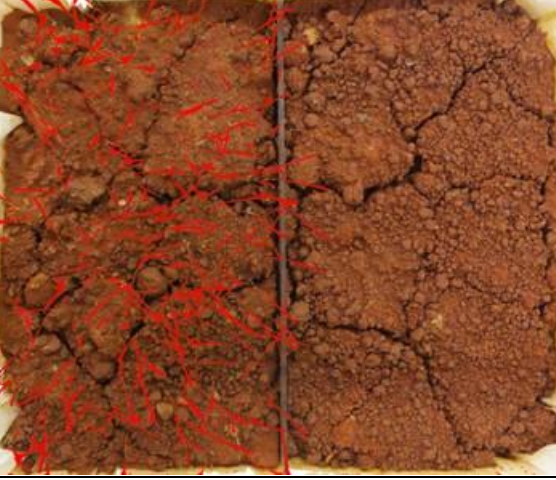
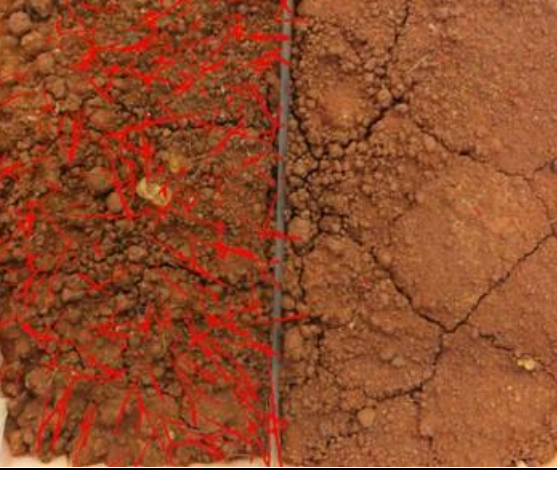
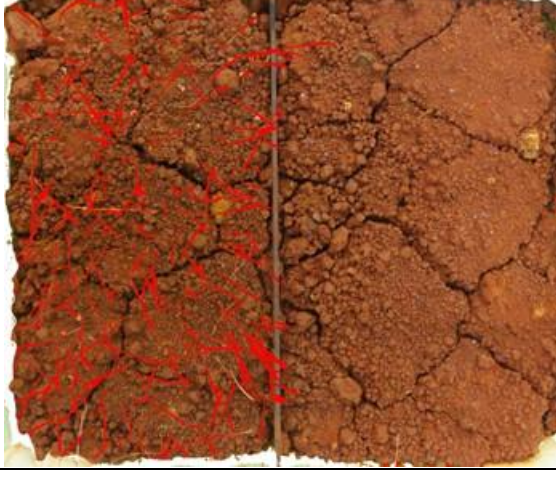
|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| B1.28 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | C1.28 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |
|   |   |
| C3.28 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | C5.28 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |
|  |  |
| D.35 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 | A1.36 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |

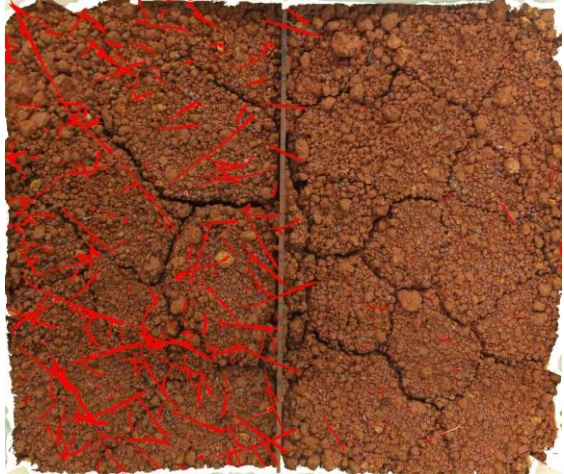
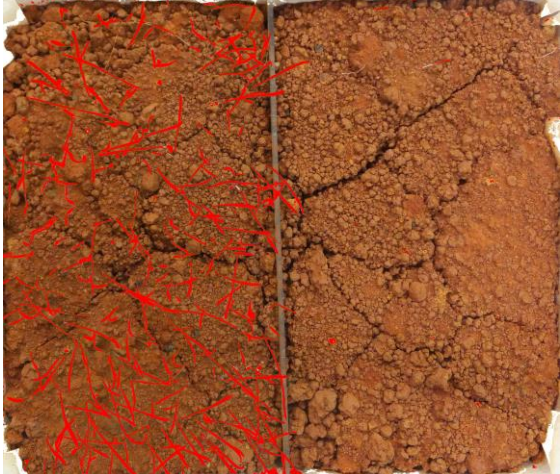
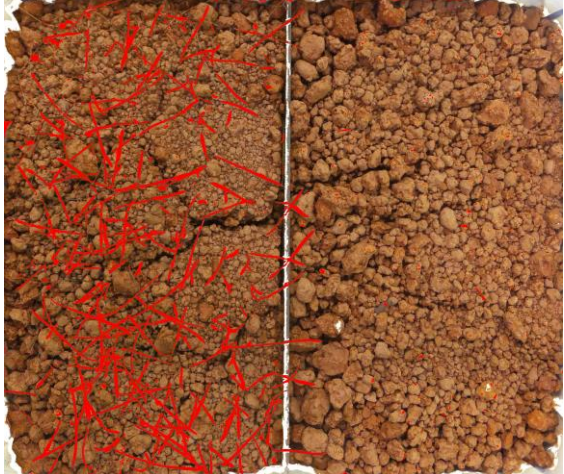
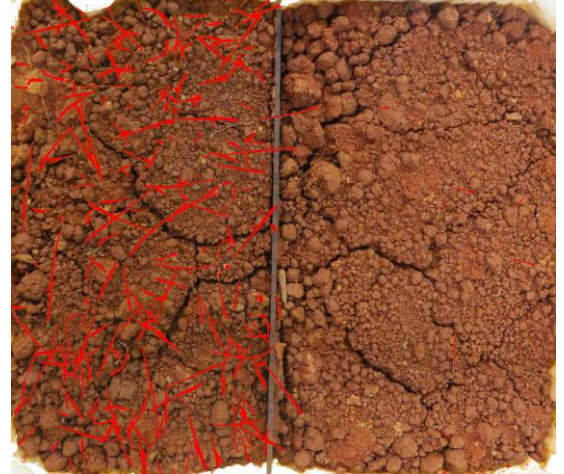
|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| <p>A3.35 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                         | <p>A5.35 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          |
|   |   |
| <p>B1.35 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                         | <p>B3.35 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          |
|  |  |
| <p>B5.35 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                         | <p>C1.35 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          |

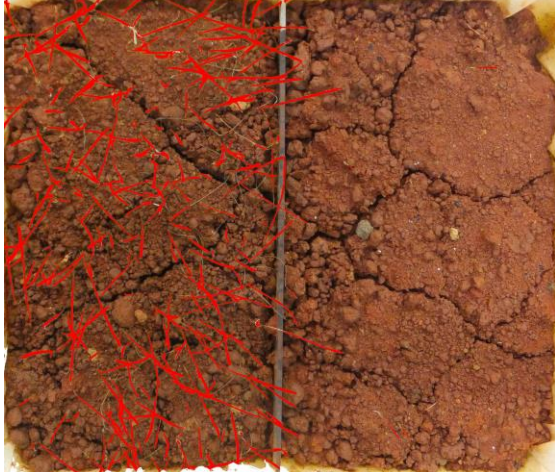
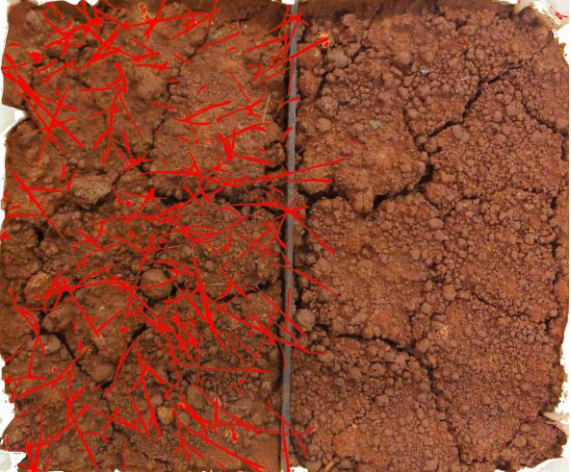
|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| <p>C3.35 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                         | <p>C5.35 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          |
|   |   |
| <p>D.42 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          | <p>A1.42 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          |
|  |  |
| <p>A3.42 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                         | <p>A5.42 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                          |

|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| B1.42 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | B3.42 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |
|   |   |
| B5.42 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | C1.42 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |
|  |  |
| C3.42 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | C5.42 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |

|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| D.51 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 | A1.51 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |
|   |   |
| A3.51 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | A5.51 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |
|  |  |
| B1.51 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | B3.51 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |

|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| B5.51 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | C1.51 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |
|   |   |
| C3.51 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | C5.51 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |
|  |  |
| D.60 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 | A1.60 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |

|                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |
| A3.60 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | A5.60 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |
|   |   |
| B1.60 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | B3.60 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |
|  |  |
| B5.60 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                | C1.60 (左:百喜草、右:百慕達草)                                                                 |

|                                                                                   |                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |
| <p>C3.60 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                       | <p>C5.60 (左:百喜草、右:百慕達草)</p>                                                        |

### 附錄三 期中審查意見回覆

| 項次 | 審查建議                                                                                | 回覆                                         |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1  | 期中報告內容，就研究進度而言，稍嫌落後。唯一可見的具體成果為圖十至圖十二，宜加強進度的管控。                                      | 遵照辦理。                                      |
| 2  | P.38 表六中僅針對添加劑劑量 5%列表，但卻未見其他劑量的實驗結果，請補正。                                            | 依審查建議補正添加劑劑量 1%、3%之 pH 值試驗數據，以作為後續研究結果佐證。  |
| 3  | P.38 圖十二中的再生粒料添加至 160%，是否合理？                                                        | 依審查建議將添加比例修正為 65%以下之合理化試驗數據的呈現。            |
| 4  | 未來的土壤沖刷試驗，擬採用何種添加劑？又添加量為多少？於期中報告中完全未提及，故無法得知沖刷試驗是否可以滿足本計畫「土壤添加劑應用於侵蝕控制之可行性研究」的目的。   | 對於本階段的預期目標，以改良後土壤經過植生復育後發芽率較高者選定為為沖刷試驗之項目。 |
| 5  | 沖刷試驗所考慮的變因包含：流量、坡度、降雨強度，然而卻未考慮添加劑的種類及添加百分比，如何進行結合評估？請再重新審視試驗設計。                     | 遵照辦理。                                      |
| 6  | P.7「考慮以植物發芽率、覆蓋率及根系發展為評估依據」，然而期中報告中卻未見目前進度的陳述，而第三章(P.35)進度表中也未見列入工作項目，請重新檢視並妥為掌控進度。 | 以依審查意見補正如 P.46~P.47。                       |
| 7  | 期末時請檢附各期審查意見回復。                                                                     | 遵照辦理。                                      |
| 8  | 圖一的第一年試驗流程圖請備註說明各數字所代表之意思。                                                          | 以依審查意見補正如 P.8                              |
| 9  | 試驗檢測 pH 值等水質變化                                                                      | 1.測試水質的變化為考慮改良後之                           |

|    |                                                                              |                                                                   |
|----|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|    | 與侵蝕控制之關聯性為何?<br>請說明。                                                         | 地表受雨水沖刷，其中的化學物質消散對環境的影響。<br>2.另外，考慮表面植生後對化學物質消散的影響，例如 pH 值得的下降速度。 |
| 10 | 試驗之砂箱尺寸及坡面長度之設計是基於何種考量而設計?                                                   | 設計概念考量為能滿足沖刷流速且試驗空間所能提供之長寬尺寸。                                     |
| 11 | 為因應機關組織改造，機關名稱修正為「農業部農村發展及水土保持署」，報告書封面及內文等請依本署最新範本格式撰寫，相關範本檔案請至本署電子圖書管理中心下載。 | 遵照辦理。                                                             |

## 附件四 期末審查意見回覆

| 項次 | 審查意見                                                                     | 回覆                                                                  |
|----|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1  | 侵蝕試驗針對不同降雨強度情形下，添加劑的施用方式及最佳劑量對於植物生長及沖蝕之差異如何？                             | 對於植生復育的影響，以添加劑的種類而言，最優是再生粒料，其次依序是飛灰及時石灰。對於植生覆蓋率對坡面沖蝕的影響可參酌 3.2.4 節。 |
| 2  | 添加劑可增育植生，但土壤也會鬆散，一來一往對侵蝕的控制是增加或減少？                                       | 添加劑可改善土壤孔隙率，相對使土層鬆散，因此須儘快進行植生降低坡面沖刷並提高土壤剪力。                         |
| 3  | 添加劑改變了土壤的 pH 值，而影響植物的生長，百喜草最適 pH 為中等至偏酸，建議未來可挑選適應不同 pH 值的物種試驗。           | 感謝委員指導。<br>未來若有機會延續研究計畫，將考慮此項建議。                                    |
| 4  | 臺灣的重大崩塌災害區域主要皆不是以紅土層主導，在越南的崩塌事件較以紅土為主。建議應先盤點及述明臺灣重大崩塌的地層條件，再進行研究的核心目標規劃。 | 感謝委員指導。<br>本研究初期以解決困難植生地層為發想設計，因此以黏土顆粒含量較高之土層為試驗對象。                 |
| 5  | 土壤添加劑對土壤性質之影響有多久？是否可長期穩定？                                                | 對於土層完成植生後，則添加劑即達成其應有之貢獻，於植生後的坡面表層土壤確實具備有長期穩定的功能。                    |
| 6  | 侵蝕控制之效果如何？對植物的影響是否顯著？                                                    | 添加劑改善土壤孔隙率，有利於困難植生土層增加或提升植物覆蓋率或植物生長速度。當水保植物復育完成後既能達到坡面表層土壤侵蝕控制。     |
| 7  | 土壤添加劑是希望可改良土壤，但目前試驗土樣是桃園紅土，復育草種也是以平地草類                                   | 感謝委員指導。                                                             |

|   |                                |                                  |
|---|--------------------------------|----------------------------------|
|   | 為主，建議後續朝向比較能回饋後續坡地保育工作實地推廣。    |                                  |
| 8 | 是否與現有常用噴植工法相互比對，可作為分署實地工程參考依據。 | 感謝委員指導。<br>未來若有機會延續研究計畫，將考慮此項建議。 |