

計畫編號：111 保發-8.1-保-01-06-001(30)

土壤添加劑應用於侵蝕控制之可行性研究
Feasibility Study of Soil Additives Applied
in Erosion Control

成果報告書

執行單位：中原大學

執行期間：111 年 01 月 18 日至 111 年 12 月 31 日

計畫主持人：黃奉琦 博士

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 111 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 Feasibility Study of Soil Additives Applied in Erosion Control

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減緩土壤沖蝕量，初步規劃以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，預計完成「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」、「裸露坡面滲流水汙染性質」。

本研究試驗項目及規畫，完成現有試驗設備調整及組裝，同時，擇定以桃園紅土為試驗土壤，將以單位重及土壤含水量為回填試體控制條件。另外，依據土壤改良添加劑與改良土壤工程性質之關聯性試驗，以及試驗中之變異因素例如坡度變化以 1~3 級坡為試驗項目，流速變異則以符合水土保持技術規範之最大容許流速為試驗依據。

經試驗結果進行比對，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，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，但卻不影響土壤的凝聚力性質，在小流速沖刷下粒料間的顆粒效應產生剪力強度提高了抗沖刷性質。

關鍵詞：土壤穩定、土壤沖蝕量、室內試驗、地表逕流

Feasibility Study of Soil Additives Applied in Erosion Control

Abstract

The challenges of climate change and the policy of promoting rational land use, in addition to strengthening the countermeasures of land management, we should seek ways to slow down soil erosion to enhance national security. This study to use soil improvement methods to slow down the amount of soil erosion. This study expects to use soil improvement methods to slow down the amount of soil erosion. It is initially planned to simulate surface runoff with laboratory experiments, and to explore the optimal ratio of stabilized soil and additives. It is expected to complete the 「optimal ratio design of soil and additives」, 「land slope with optimum erosion resistance after soil stabilization」, and 「seepage water pollution properties on slopes」.

In this research project and plan, the adjustment and assembly of the existing test equipment are completed. At the same time, Taoyuan laterite is selected as the test soil, and the unit weight and soil water content will be used as the control conditions for backfilling the test body. In addition, according to the correlation test between soil improvement additives and improved soil engineering properties, as well as the variation factors in the test, such as the slope change, the 1~3 grade slope is used as the test item, and the flow rate variation is based on the maximum allowable flow rate that conforms to the technical specifications for water and soil conservation. in accordance with.

The test results were compared, and under the same flow rate, the scour amount showed a trend of increasing gradually with the increase of the slope. The scour amount of the slope on the high-angle slope decreases, and it is inferred that the proportion of clay particles in the test soil

decreases due to the mixing of recycled pellets, but it does not affect the cohesion properties of the soil. The effect produces shear strength that improves scour resistance.

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

目次

摘要.....	I
Abstract.....	II
目次.....	IV
表次.....	V
圖次.....	VI
第一章 緒論	1
第一節 年度目標	1
一、 完成土壤與添加劑之最佳配比設計	1
二、 完成改良土壤坡面抗侵蝕之最適坡度	1
三、 探討改良土壤裸露坡面滲流水汙染性質	1
第二章 執行方法與步驟	2
第二節 執行方法	3
一、 文獻回顧	3
1.土壤抗侵蝕特性	3
2.土壤穩定添加劑使用準則	8
3.土壤沖蝕量測方法	13
第三節 室內試驗	16
一、 研究方法說明	16
二、 試驗裝置架設及配置簡述	16
三、 試驗規劃	17
第三章 研究進度與成果	20
第一節 研究進度規劃	20
第二節 試驗條件說明	21
一、 土壤添加劑配比試驗	21
二、 砂箱模型試驗設備調整說明	24
三、 室內試驗流程說明	24

第三節 試驗結果分析	31
一、 篩分析試驗	31
二、 阿太堡試驗	32
三、 邊坡沖刷試驗分析	34
第四章 結論與建議	42
第一節 結論	42
第二節 建議	43
參考文獻.....	44
附錄一、計畫經費編列與內容修正建議暨回覆辦理情形	46
附錄二、期初審查委員審查意見暨回覆表	48
附錄三、期中審查委員審查意見暨回覆表	51
附錄四、期末審查委員審查意見暨回覆表	54

表次

表一 USLE 各項參數簡介.....	4
表二 土壤參數對照表 (摘自水土保持手冊，2005).....	5
表三 C 值對照表 (摘自水土保持手冊，2005)	7
表四 各廠焚化再生粒料主要化學成分對照表	13
表五 試驗模擬坡度變異對照表.....	18
表六 土壤添加再生粒料配比與改良土壤性質對照表	22
表七 液性試驗數據彙整表.....	32
表八 塑性試驗數據彙整表.....	33
表九 原狀土壤沖刷試驗結果彙整表	34

表十 原狀土壤沖刷試驗出水口集水區水質檢測彙整表	34
表十一 改良土壤沖刷試驗結果彙整表	37
表十二 改良土壤沖刷試驗出水口集水區水質檢測彙整表	39
(以下略)	

圖次

圖一 研究計畫執行流程圖.....	2
圖二 細顆粒土壤顆粒表面吸附陽離子及水分子示意圖	8
圖三 黏土顆粒溶蝕與環境 PH 關係示意圖.....	9
圖四 沖蝕針配置示意圖 (摘自水保局， 2010).....	15
圖五 地表逕流沖蝕試驗室內砂箱模型設備示意圖.....	18
圖六 預定工作進度甘特圖.....	21
圖七 石灰添加劑與環境 PH 值變化關係圖.....	22
圖八 飛灰添加劑與環境 PH 值變化關係圖.....	23
圖九 再生粒料添加劑與環境 PH 值變化關係圖.....	23
圖十 設備組裝完成立面圖.....	27
圖十一 砂箱尺寸及配置示意圖	28
圖十二 設備側面圖暨配置說明示意.....	28
圖十三 室內試驗流程圖.....	29
圖十四 坡面沖蝕針布設示意圖	30
圖十五 篩分析試驗結果.....	31
圖十六 阿太堡液性限度流性曲線示意圖.....	33
圖十七 原狀土壤坡度變化影響沖刷量示意圖.....	35
圖十八 原狀土壤沖刷水量變化影響沖刷量示意圖.....	35

圖十九 改良土壤坡度變化影響沖刷量示意圖.....	38
圖二十 改良土壤沖刷水量變化影響沖刷量示意圖.....	38
圖二十一 原狀土壤及飛灰改良土壤比對示意圖.....	40
圖二十二 原狀土壤及石灰改良土壤比對示意圖.....	40
圖二十三 原狀土壤及再生粒料改良土壤比對示意圖	41
(以下略)	

第一章 緒論

根據行政院農業委員會水土保持局統計，山坡地超限用，加上森被伐除後，土壤失將增加 100 倍、每公頃將失 160 噸土石，再加上氣候變遷，雨季、旱季豐枯期變化更加劇烈致災害頻繁，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，更應尋求減緩土壤流失的方法加強國土安全，促進水土資源保育及維護民生命財產安全。

第一節 年度目標

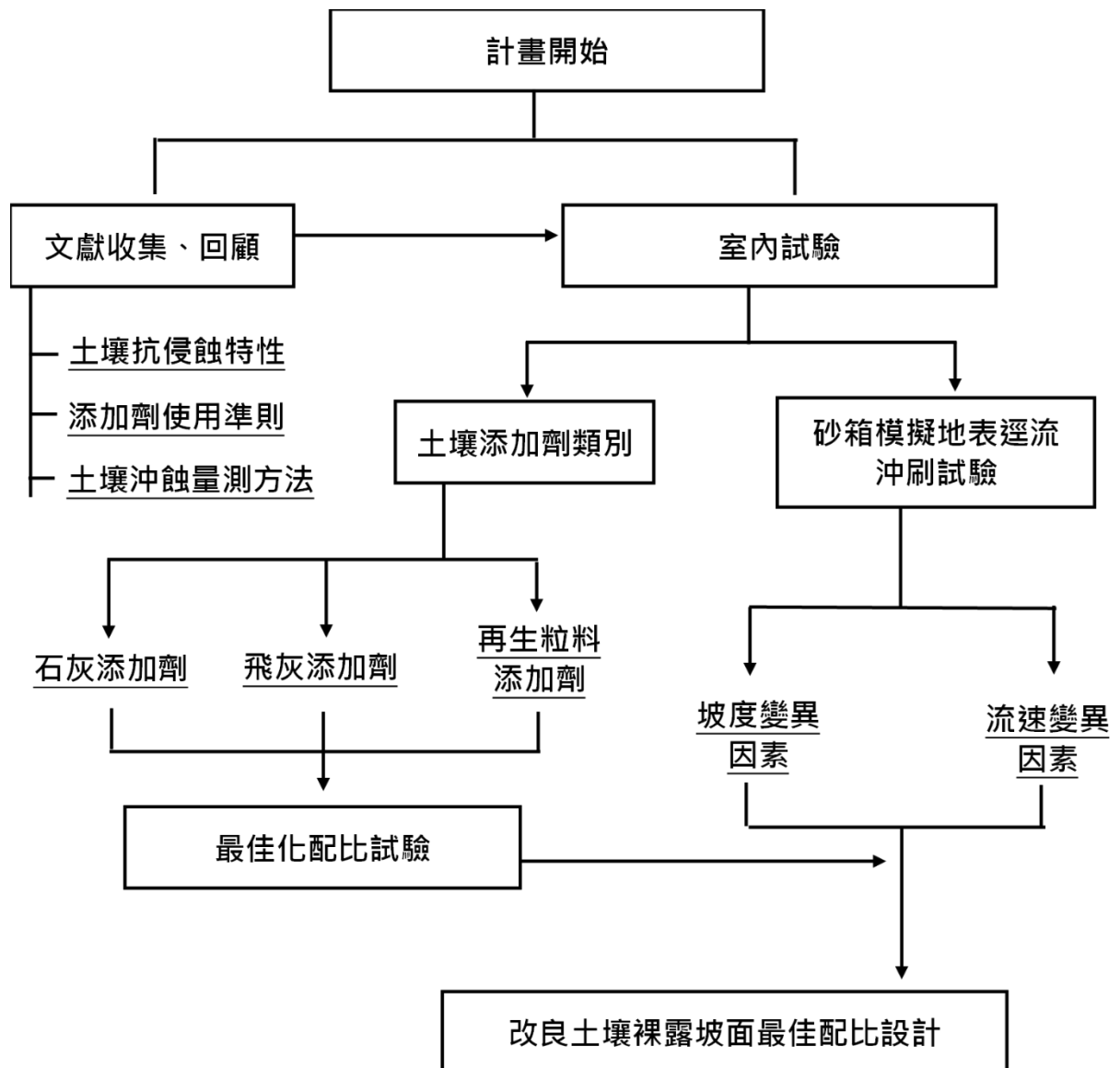
本年度規劃試驗土壤將依不同配比拌合添加劑，而達到「改善坡面理化性質」，藉以提升土壤抗分散及搬運的能力，進而增加抵抗土壤侵蝕的內營力。因此預計使用添加劑包含：石灰、飛灰及再生粒料等進行配比設計，並考慮坡度變化為試驗變數，藉此探討改良土壤坡面坡度與抗侵蝕特性間的關係。

年度計畫完成目標：

- 一、完成土壤與添加劑之最佳配比設計
- 二、完成改良土壤坡面抗侵蝕之最適坡度
- 三、探討改良土壤裸露坡面滲流水污染性質

第二章 執行方法與步驟

土壤侵蝕中的水力侵蝕其主要的誘導因子為「水的分散及搬運作用」，而影響土壤侵蝕速率的因子很多，包括氣候、地形、植被、土壤性質與人為保育措施等，研究規劃執行流程如圖一所示。



圖一 研究計畫執行流程圖

第二節 執行方法

一、文獻回顧

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，亦可影響 USLE 公式中的覆蓋與管理因子 (covermanagement 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，因此，針對這些影響因子改土壤性質，應可顯著提升土壤抗侵蝕特性。

由於經驗模式可被廣泛的應用於各地土壤沖蝕初步評估，且經統計方法所推導出的驗公式通常較為簡單也比物理模型較為快速，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-years 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 等，

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

$A=R_m \times K_m \times LS \times C \times P$		
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。
R _m	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。
K _m	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。最複雜且難定義。
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等。

表中之 LS、C 和 P 因子，為任何組配條件下之土壤流失量與標準單位試區 土壤流失量之比值為無因次因子說明如下。

(1) 降雨沖蝕指數(R_m)

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程度，美國自 1930 年起開始對 23 種主要的指標土壤作田間試驗；1961 年起採用大型田間人工模擬降雨機，於標準試區下模擬降雨試驗。經由田間自然降雨、模擬降雨及室內資料分析的結果發現，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參數由表二所示：

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 等五參數值後，再以下列公式估算地點之 Km 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。在坡長之度因子的使用上，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)， θ =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)

覆蓋及處理因子定義為「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 值之估算相當不易。相關 C 值對照表如表三。

(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，在相同降雨、土壤特性、地形地勢、但採上下行耕犁處理之土壤流失量間之比值」該因子最大值為 1.0，表示該地無任何水土保持處理、或棄土場、或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，但即使使用相同的施工方法，在不同的地質條件及坡度下成效也不盡相同。

表三 C 值對照表 (摘自水土保持手冊，2005)

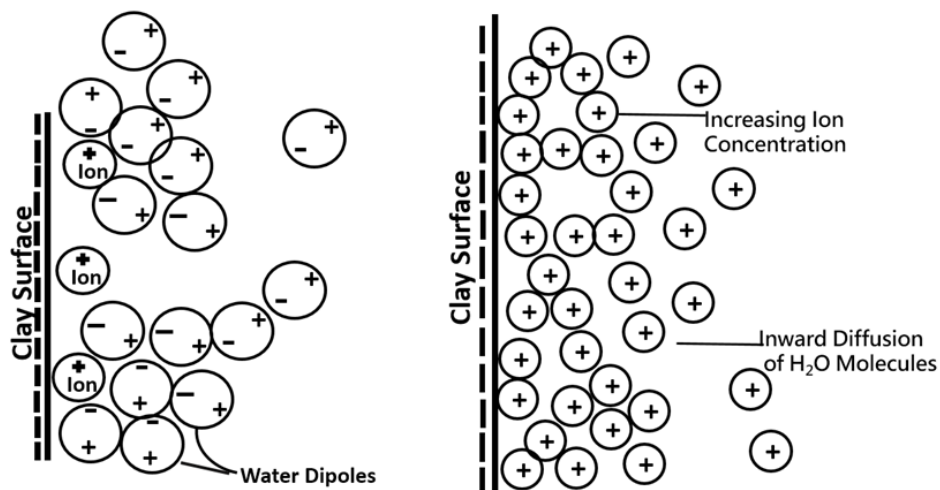
台灣不同地表及植被狀況之覆蓋及處理因子(C 值)			
地表及植被狀況	C 值	地表及植被狀況	C 值
百喜草	0.01	裸露地	1
水稻	0.1	水泥地	0
雜作	0.25	瀝青地	0
果樹	0.2	雜石地	0.01
香蕉	0.14	水體	0
鳳梨	0.2	建屋用地	0.01
林地(針葉、闊葉、竹類)	0.01	牧草地	0.15
蔬菜類	0.39	高爾夫球場植草地	0.01
茶	0.15	雜草地	0.05
特用作物	0.2	墓地	0.01
檳榔	0.1		

2. 土壤穩定添加劑使用準則

(1) 石灰穩定土壤準則

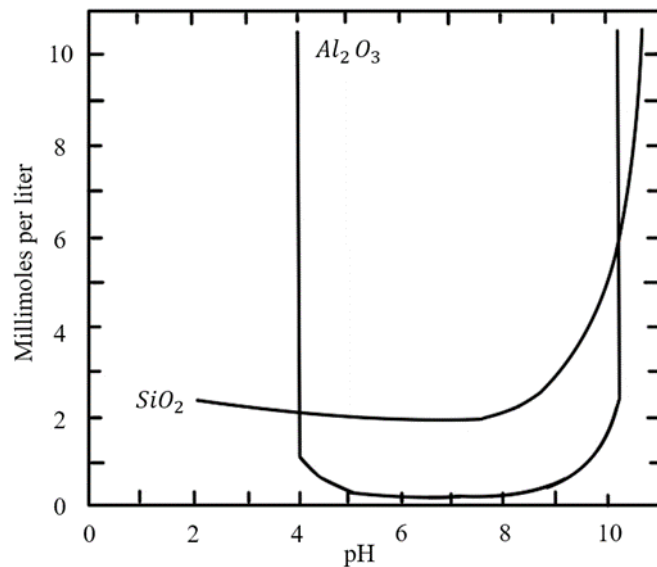
石灰穩定的機制為密簇-絮凝作用（Flocculation-agglomeration）改善土壤之行為，其原理係利用含鈣離子之穩定劑與水溶解後，其兩價鈣離子（ Ca^{2+} ）會取代黏土顆粒表面雙水層（Double Layer）之大部分一價氫離子（ H^+ ），降低土壤吸水能力，使黏土顆粒間排斥力減小，結合成為較大尺寸的粒料。

添加石灰後的反應主要為黏土顆粒表面帶負電，可以吸引自由陽離子（帶正電的離子）和水（圖二），當加入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。如圖三所示，黏土材料之 SiO_2 、 Al_2O_3 在 pH 值增加至 10.5 以上的環境時將會發生溶蝕現象。



圖二 細顆粒土壤顆粒表面吸附陽離子及水分子示意圖

(Petry,2019)



圖三 黏土顆粒溶蝕與環境 pH 關係示意圖

(Petry,2019)

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 Al^{3+} 與 Si^{4+} ，將會產生三種化合物如下列所示：

- a. 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。
- b. 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。
- c. 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，其組成的微小玻璃質球體（Tiny Glassy Spheres），而台灣之飛灰 CaO 含量約 3% 以下，二氧化矽含量一般約 50% 以上。飛灰的組成中，玻璃狀球體的粒徑大約在 1-50 microns 之間，平均的粒徑多分布在 $8\mu\text{m}$ 左右。飛灰的顏色受到化學組成影響，氧化鈣含量高的飛灰成淡灰色。燃無煙煤或煙煤所產生的飛灰則受到鐵化物與碳的影響而成灰色。飛灰的比重大約分布在 2.1—2.6 間，乾密度在 70—90pcf 間，無論比重或乾密度較一般土壤輕。一般情況下，飛灰分類的原則是依據不同層次工程判斷的需要，以簡化分類試驗的程序。當飛灰氧化鈣成份含量高，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；除了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，故常於其中添加石灰，以增進其改良穩定土壤之效果。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，敘述如下：

- a、煤之種類與來源為飛灰組成成分差異性主因。
- b、燃燒所用之煤細度越小，則所產出之飛灰細度越小。
- c、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。
- d、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。
- e、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。

飛灰中氧化鈣含量並不高，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。

然而，石灰對於塑性土壤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，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穩定土壤的效果，其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

再生粒料是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而產生，為經焚化燃燒後所產生之不可燃物。由於各縣市之垃圾廢棄物成分與焚化再生粒料處理廠的處理程序不盡相同，焚化再生粒料的組成來源仍有些許差異存在。因焚化再生粒料為多種一般廢棄物來源所產出，故其在化學組成方面相當複雜，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。依據相關研究成果所示，各焚化廠再生粒料化學成分中，氧化鈣含量均約在 20—30%，二氧化矽雖佔 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。然而，焚化再生粒料須注意的要點之一，為其重金屬成分是否有確實穩定化處理，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」，其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了明確的檢測標準。

因再生粒料為多種一般廢棄物來源所產出，故其在化學組成方面相當複雜，大部分由 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Cl 等氧化物所組成，且以 SiO_2 、 CaO 佔最大部分，以相關研究成果所示，表一，各焚化廠再生粒料化學成分中， CaO 含量均約在 20-30%， SiO_2 雖佔 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 CaO 含量大於 20% 能發揮與石灰穩定（Lime Stabilization）相同的化學穩定機制。

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

3. 土壤沖蝕量測方法

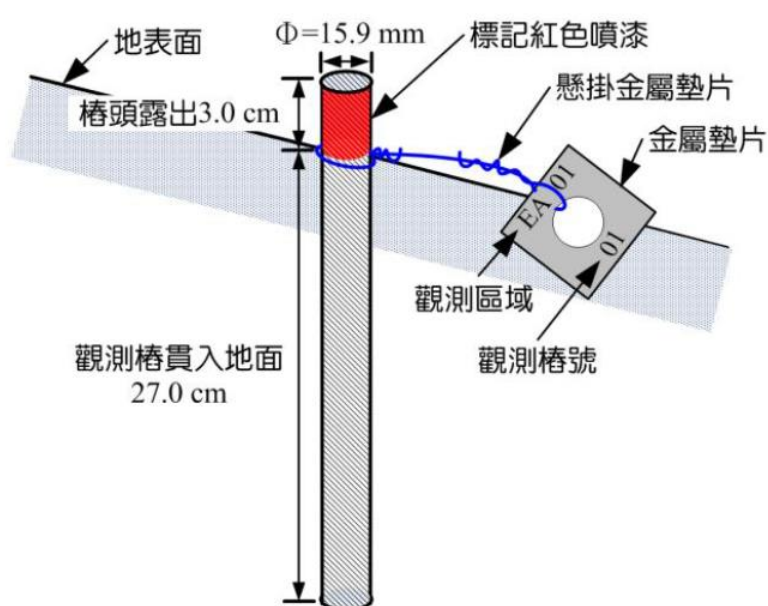
量測土壤沖蝕的方法分為直接量測法、間接量測方法及沖蝕預估模式等三大類，李建堂（1997）。直接量測法係指於出口處，直接收集逕流及沖積物來量測沖蝕量，常使用於實驗區法（plot studies）及集水區輸砂量法（sediment yield）。間接量測的方法大致可分成量測地表起伏變化法、湖泊、水庫沉積量法（sedimentation）及追蹤法（tracer）三類。其中沖蝕針（erosion pins）、微地形起伏計（micro-relief meters）及剖面量測計（profilometers）等，較適合應用於小範圍之研究，相對於一般測量儀器的實地調查，大範圍的研究方法主要有土壤剖面法、樹根暴露法（exposed tree roots）及照片量測法（photogrammetric

methods)等。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。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，近年更衍生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。

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)曾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一種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(eosion 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四所示，沖蝕針本身為長 27.0cm，直徑 15.9mm 的金屬棒。



圖四 沖蝕針配置示意圖 (摘自水保局， 2010)

Schumm (1956)年首先使用木樁(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)曾利用長達 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。

第三節 室內試驗

一、研究方法說明

1. 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，對於改良土壤之添加劑規劃則使用石灰、飛灰及再生粒料，利用添加劑摻拌土壤的比例進行配比拌合試驗。
2. 試驗土壤以桃園紅土為例，進行不同拌合配比之改良土壤沖刷試驗，由試驗結果進行坡面沖刷深度、沖刷類型、坡面流失土砂量等成果進行比較，評估添加劑最佳配比設計及最適用添加劑類別。
3. 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，以未拌合添加劑之原始土壤為對造組，比對改良土壤坡面沖刷試驗後，採集土壤及水質化學特性變化量。

二、試驗裝置架設及配置簡述

1. 砂箱模型出流集水區：
收集坡面沖刷土壤中之細顆粒及懸浮顆粒，並經沉積後採取地表逕流水及土壤顆粒進行 pH 值檢測、沉積土砂經烘乾後重，並量化各組試驗數據。
2. 坡底沖積沉降模擬：
收集較大顆粒的土壤進行顆粒篩分析試驗，評估坡面沖刷度。
3. 試驗坡面：
規劃使用石灰、飛灰、再生粒料或其他穩定土壤添加劑進行土壤拌合，以相同配比、試驗坡度、滲流流速及不同類別添加劑

進行沖刷試驗。

4. 模擬地表逕流沖刷：

控制沖刷試驗外力因素為坡度變化及流速，在不同試驗組別納入外力變化因素，評估不同條件下添加劑穩定土壤的適用性。

5. 蓄水槽：

模型地表逕流試驗水源，為避免影響出流水質故將採用過濾水注入水槽，以控制體積流量的方式達到控制流速的結果。

6. 進水控制閥：

控制注入水質、流量及流速。

7. 坡度變化：

利用坡度變化模擬山坡地坡度分級 1~3 級坡，評估地形因素改變時添加劑穩定土壤的適用性。

8. 影像擷取：

試驗過程進行全程錄影，預設後續加值應用。

三、試驗規劃

1. 砂箱模擬地表逕流沖刷試驗

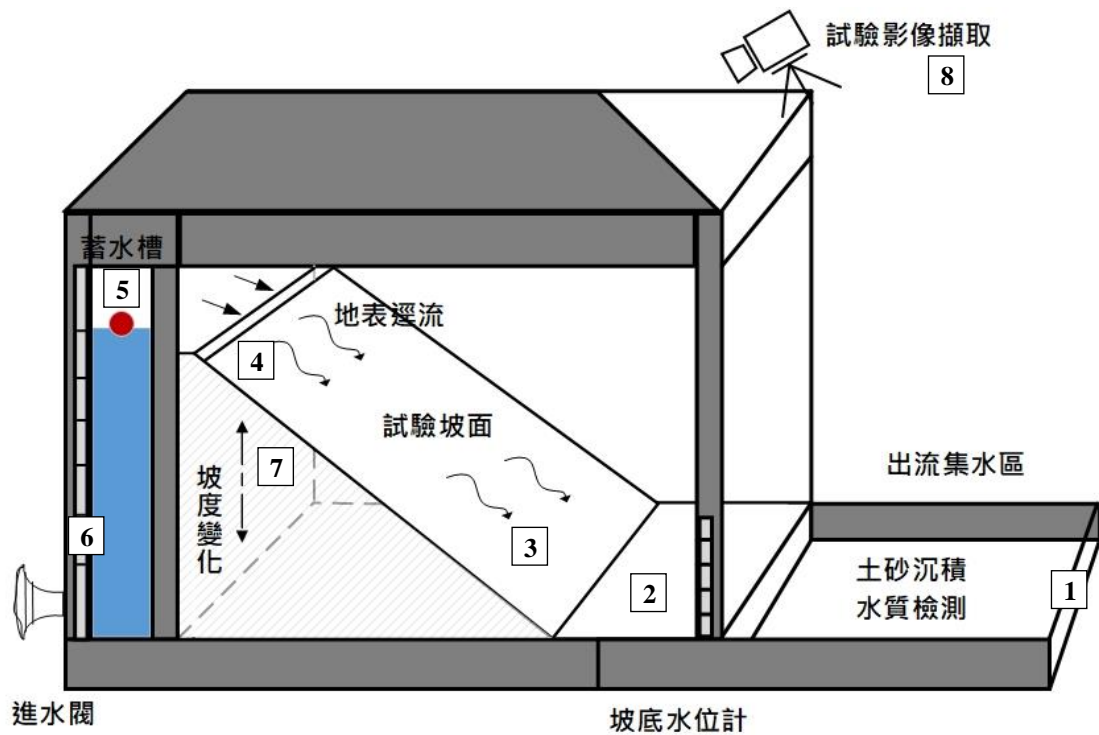
(1) 坡度變異因素

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，調整坡趾角度以對應模擬試驗坡度分級，相關對應分述如下：

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



圖五 地表逕流沖蝕試驗室內砂箱模型設備示意圖

(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，因此，率定給水設備為本試驗重要的工作項目之一，並且應符合水土保持技術規範 85 條最大容許流速。

(3) 試驗土壤特性

- a、試驗土壤為桃園紅土，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)。

(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。

第三章 研究進度與成果

第一節 研究進度規劃

目前工作進度如下圖六所示：

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	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>				100%
	實際	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div></div>	<div><div></div></div>					
土壤穩定添加劑使用準則	預期	<div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>										100%
	實際	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>										
土壤沖蝕量測方法	預期	<div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div></div>				100%	
	實際	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div></div>					
土壤添加劑配比試驗															
石灰配比試驗	預期	<div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>										100%	
	實際	<div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>											
飛灰配比試驗	預期				<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>							100%	
	實際				<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>								
再生粒料配比試驗	預期							<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>				100%	
	實際							<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>					
添加劑配比綜合評估	預期									<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>		100%	
	實際									<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>			
砂箱模擬地表逕流沖刷試驗															
模型試驗設備調整	預期	<div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>										100%	
	實際	<div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>								
模擬沖刷試驗坡度變異因素	預期				<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>				100%	
	實際				<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>					
模擬沖刷試驗流速變異因素	預期						<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>		100%	
	實際						<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div></div>			
試驗結果綜合評	預期										<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	<div><div></div><div></div><div></div></div>	100%	

估	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								■ ■				■ ■	99%
	實際								■ ■			■ ■		
預計累積總進度百分比		25%			56%			84%			100%			

圖六 預定工作進度甘特圖

第二節 試驗條件說明

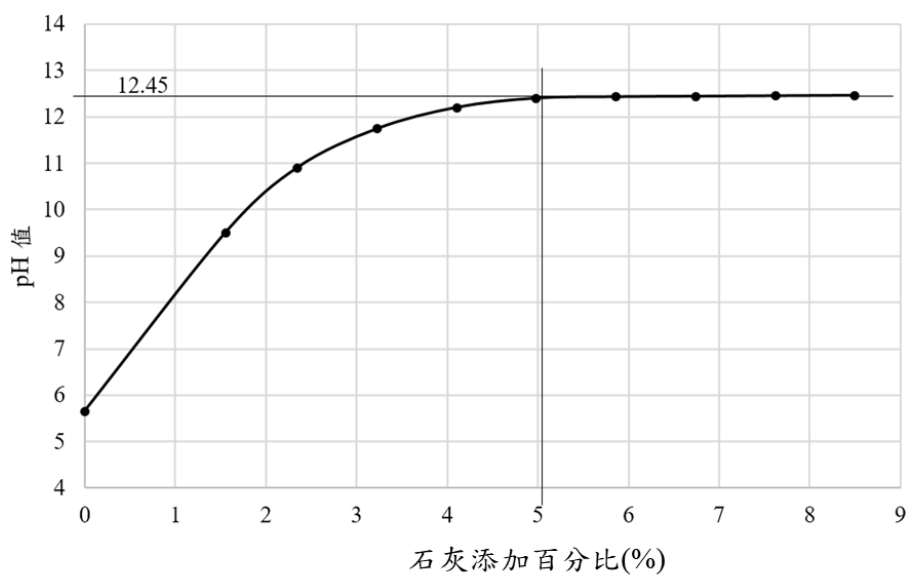
一、土壤添加劑配比試驗

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。決定添加劑的拌合比例，主要還是取決於土壤中的氧化鈣 CaO 含量如圖七、圖八、圖九分別為石灰添加百分比、飛灰添加百分比及再生粒料添加百分比對環境 pH 值影響示意圖，如圖所示，添加劑含量增加影響環境 pH 值的範圍，由原土 pH 值約 5.2 增加至 12.45 後即不再上升，但是考量影響動、植物生長環境，因此必須調製適當添加拌合比例避免造成環境汙染。

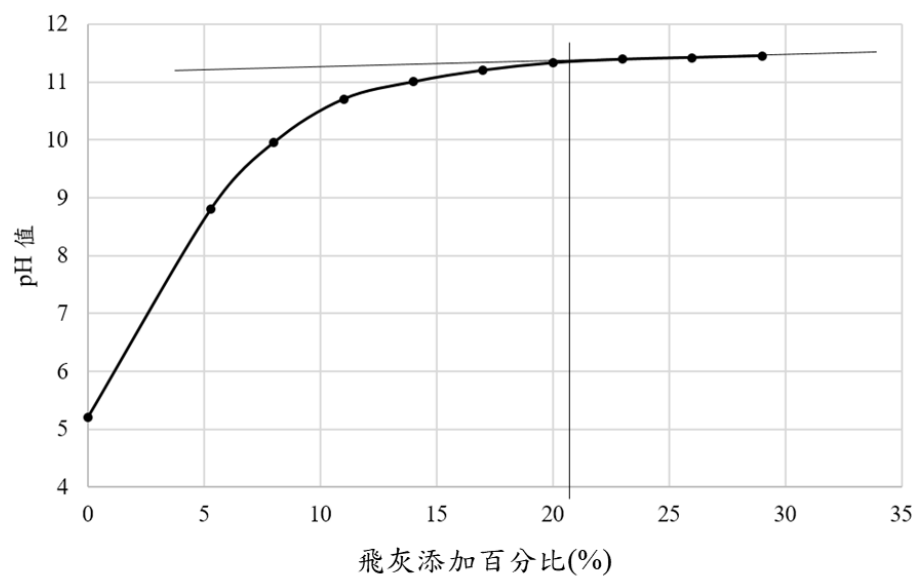
以再生粒料為添加劑進行改良土壤試拌合而言，探討土壤性質與拌合配比間的關係，由表六所示，添加劑比例為重量與現地土壤濕土重量的比值(0.1:1)，如表所示改良土壤之無圍壓縮強度隨著添加劑比例而增加，當配比增大時，黏土顆粒所佔試驗土壤的比例也隨之下降，但是卻不影響土壤的凝聚力性質。

表六 土壤添加再生粒料配比與改良土壤性質對照表

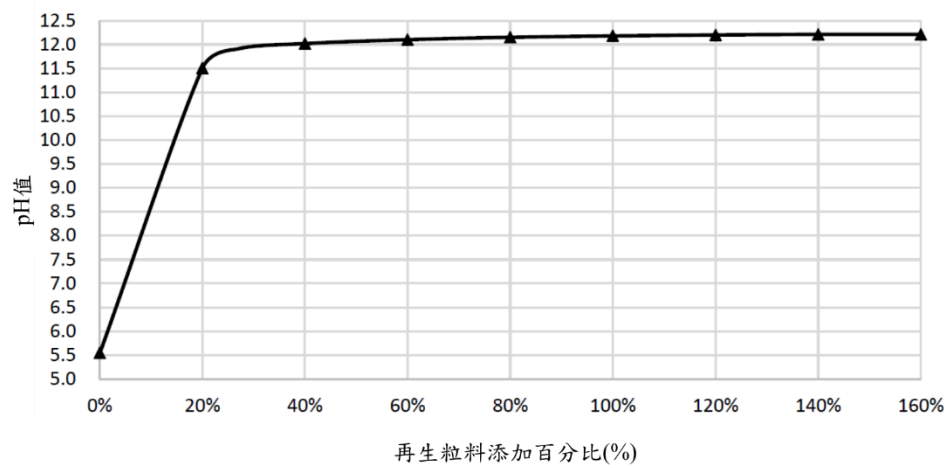
改良土壤性質	再生粒料拌合配比							
	0.0:1	0.1:1	0.2:1	0.3:1	0.4:1	0.6:1	0.8:1	1.0:1
CaO 含量 (%)	0.00	2.08	3.81	5.27	6.53	8.57	10.16	11.43
細顆粒含量 (%)	95.0	86.36	79.17	73.08	67.86	59.38	52.78	47.50
粗顆粒含量 (%)	5.0	13.64	20.83	26.92	32.14	40.63	47.22	52.50
無圍抗壓強度 (kg/cm ²)	1.05	1.65	1.54	1.71	2.03	2.23	1.83	1.90
凝聚力 (kg/cm ²)	1.11	1.91	1.95	2.34	2.99	3.76	3.49	4.0
備註								



圖七 石灰添加劑與環境 pH 值變化關係圖



圖八 飛灰添加劑與環境 pH 值變化關係圖



圖九 再生粒料添加劑與環境 pH 值變化關係圖

二、砂箱模型試驗設備調整說明

本研究為考量試驗的靈活性，故規劃室內砂箱模擬沖刷試驗，將坡度變化納入試驗變數，並利用不同逕流流速探討改良土壤坡面抗侵蝕特性。試驗設備為調整試驗室現有之設備以符合本次研究項目，相關沖刷設備及砂箱說明如下：

1. 試驗設備支撐結構尺寸:長 216cm、寬 70cm、高 240cm，如圖十，儀器底部為儲水槽設備，利用揚水馬達將水泵送至頂部水庫。
2. 砂箱尺寸為長 93cm、寬 47cm、出水口高 17cm，如圖十一所示，砂箱設置軸承以便於調整傾斜角度作為邊坡坡度之模擬，另外側邊為透明可透視玻璃構造可觀察並記錄地表入滲狀態。
3. 儀器設施整體規劃如圖十二所示，底部的水質控制儲水桶與頂部的給水設備採水循環補充方式，因此水頭為固定高度，試驗流速則以等流量注入砂箱的水為控制條件。
4. 利用調整砂箱軸承使砂箱底部與水平面呈現一夾角，如圖十二所示，另外試驗進水口底部與出水口高程一樣。

三、室內試驗流程說明

試驗執行規劃如圖十三所示，說明以下，

1. 試驗土壤

- (1) 土壤來源為桃園地區公共建設開發工地，為避免地表植生或根系影響，試驗土壤採取地面 30cm 以下的開挖土。
- (2) 去除土方內卵礫石等雜質，進行相關土壤物理性試驗包含：液性、塑性、含水量及比重計分析等。

(3)現場取回之原狀土壤進行過篩去除較大顆粒的土塊，篩網的開孔率為 27.9%、孔徑為 9.81mm 直徑圓孔，排列方式為在 1 英寸平方面積內有 3 個篩孔。

(4)過篩後的土樣為試驗用原狀土壤，而改良土壤則以改良添加劑依重量百分比加入原狀土壤進行拌合，而後靜置 6 小時候進行砂箱回填。

2. 地表逕流沖刷試驗

(1) 依據砂箱回填土壤改良與否分為試驗組及對照組，其中改良土壤所使用之改良添加劑為再生粒料、飛灰及石灰，添加用量為原土重量之 5%。

(2) 砂箱內回填土壤以統體單位重 (γ_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 $0.875\text{m} \times 0.448\text{m} \times 0.17\text{m}$ ，填入試驗土壤的重量 60kg 至 80kg。以此控制砂箱內的緊密度。

(3)坡度變異條件中，參照水土保持技術規範 23 條坡度分析規定以 1~3 級坡為試驗規畫，因此以砂箱與水面夾角模擬坡度 3° 、 6° 、 12° 之邊坡。

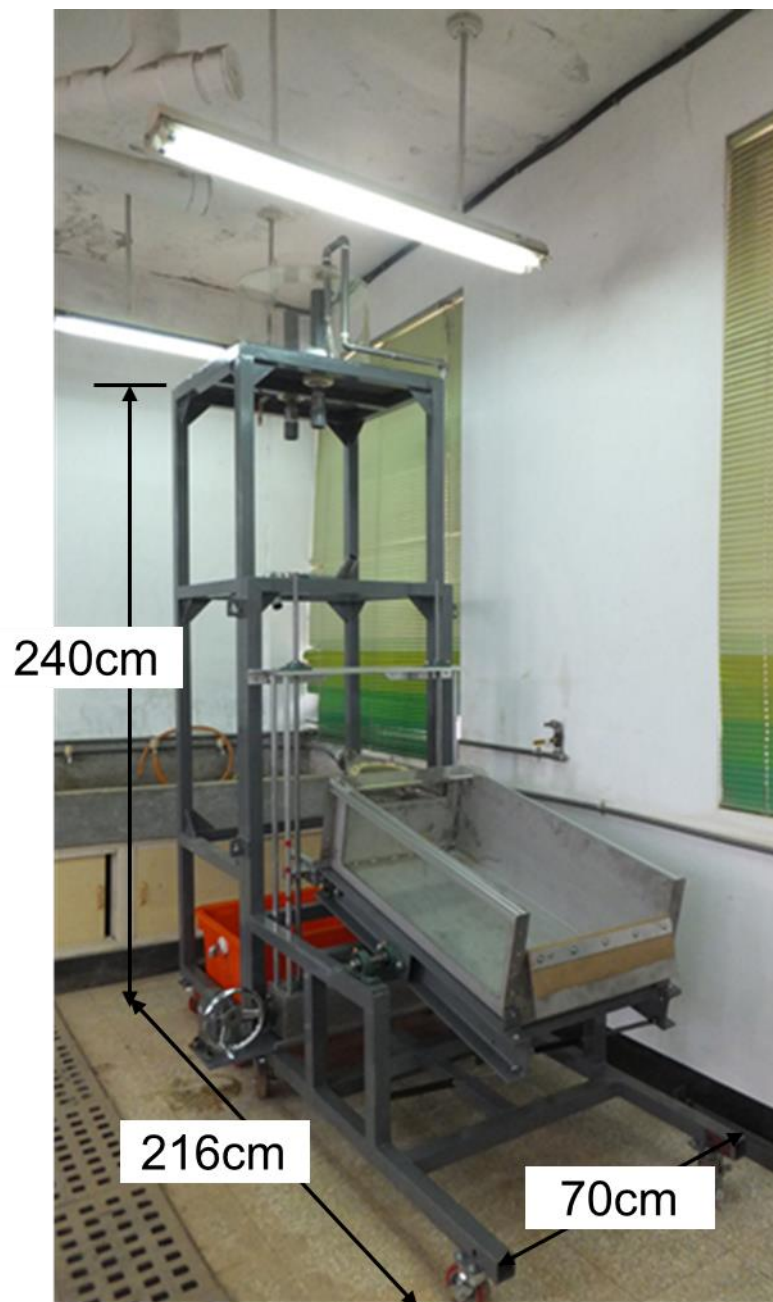
3. 流速變異

(1) 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，故本次試驗流速的控制，以單位時間內體積流量及出水口水位高度推估試驗流速。

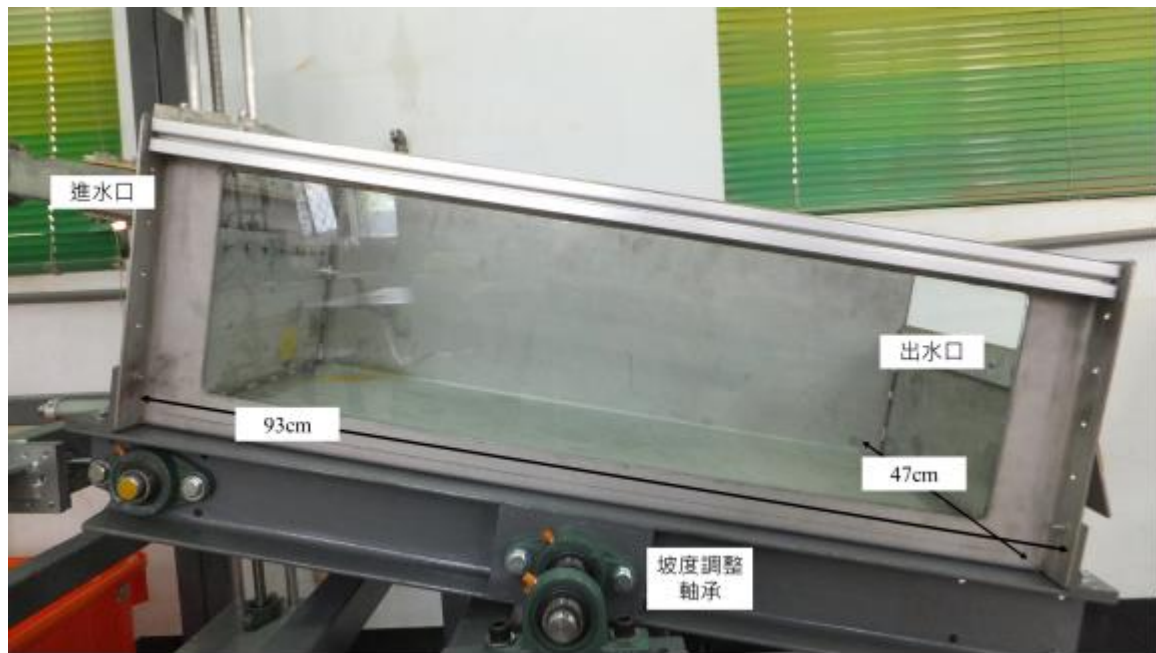
(2) 如圖十三所示，每一坡度變異條件下各對應兩組試驗體積流量，分別為每分鐘 5 公升及 9 公升 (5 l/min、9 l/min)，其所對應的試驗流速為 4.76cm/sec 及 8.57cm/sec。

4. 沖蝕監測設備

- (1) 每一組試驗的時間為 30 分鐘，以 13mm 口徑標準水表率定單位時間內的體積流量，因此各對應 150 公升及 180 公升的試驗用水。
- (2) 沖刷坡面上布設五支沖蝕針(圖十四)，量測坡面沖刷現象，另外於出水口處收集沖刷後出流水，並於試驗時間內每 10 分鐘取水樣 1 次量測水質(pH)。
- (3) 出流集水區內利用靜置沉澱收集沖刷後的土壤顆粒，並求取土壤沖刷比例。



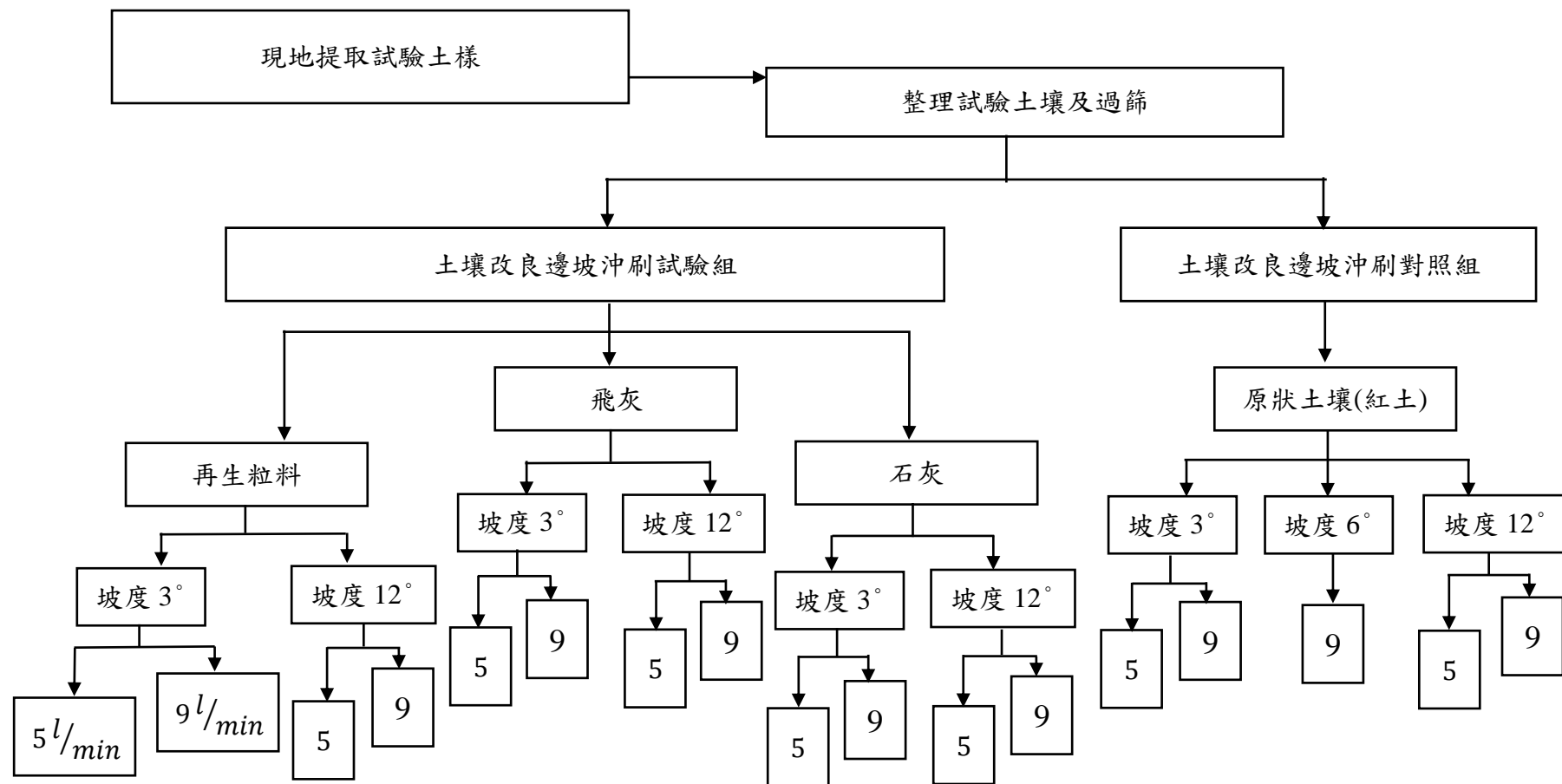
圖十 設備組裝完成立面圖



圖十一 砂箱尺寸及配置示意圖



圖十二 設備側面圖暨配置說明示意



圖十三 室內試驗流程圖

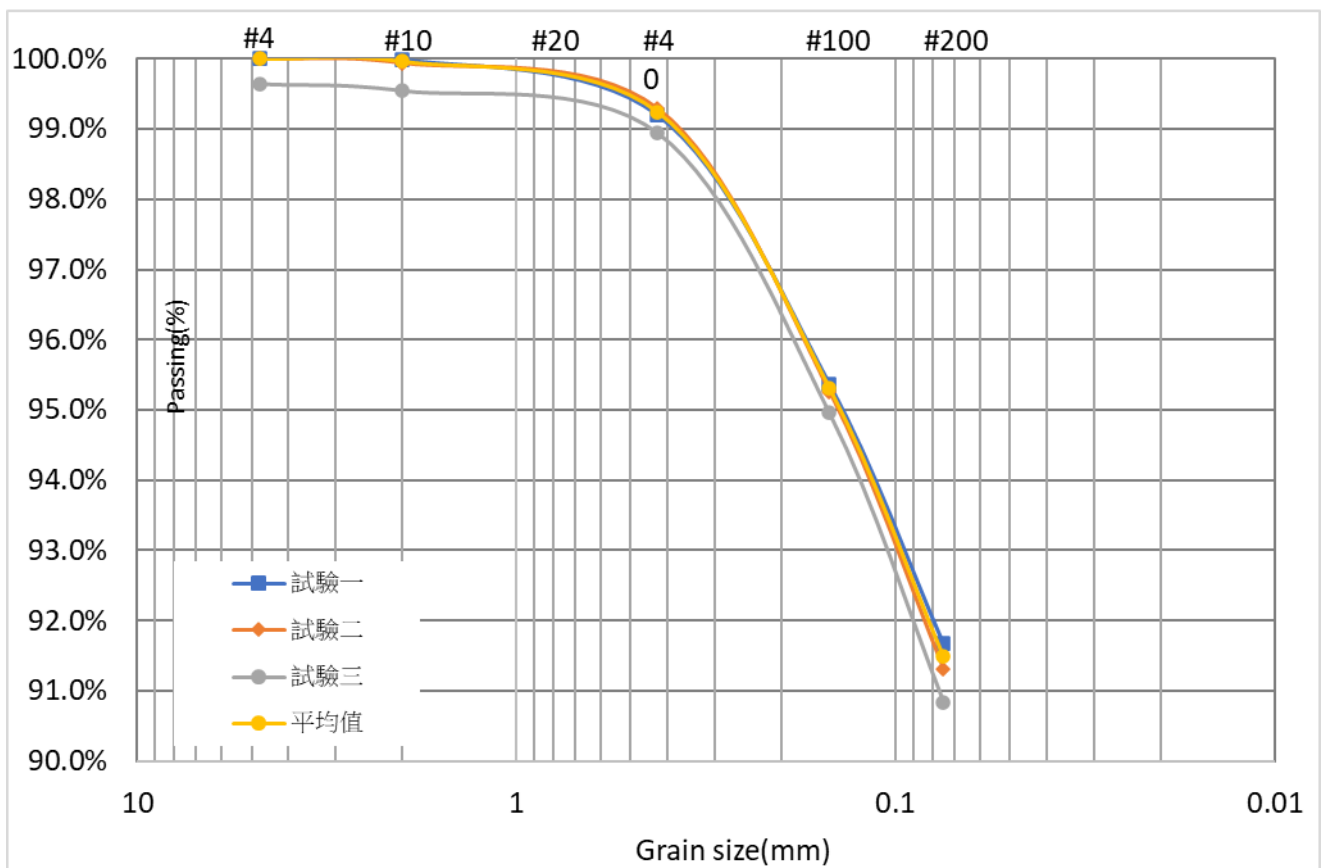


圖十四 坡面沖蝕針布設示意圖

第三節 試驗結果分析

一、篩分析試驗

如圖十五所示，試驗土壤篩分析試驗結果，執行三組試驗其結果為 99% 均通過 4 號篩、95% 通過 100 號篩以及通過 200 號篩的土壤約為 91%，因此由統一土壤分類法該土壤為細顆粒土壤，屬於粉土或黏土質土壤(CL、ML、CH、MH)。



圖十五 篩分析試驗結果

二、阿太堡試驗

依據統一土壤分類法，進行土壤流動性試驗如表七所示，進行五組液性限度試驗，相關打擊次數、試驗歷程數據（乾土重、水重、器皿重量等）彙整如表所述，並將含水量及打擊數以對數座標表示，如圖十六之流性曲線圖，依圖所示打擊數 25 次所對應之含水量百分比為 59.3%，因此土壤的液性限度為 59.3。

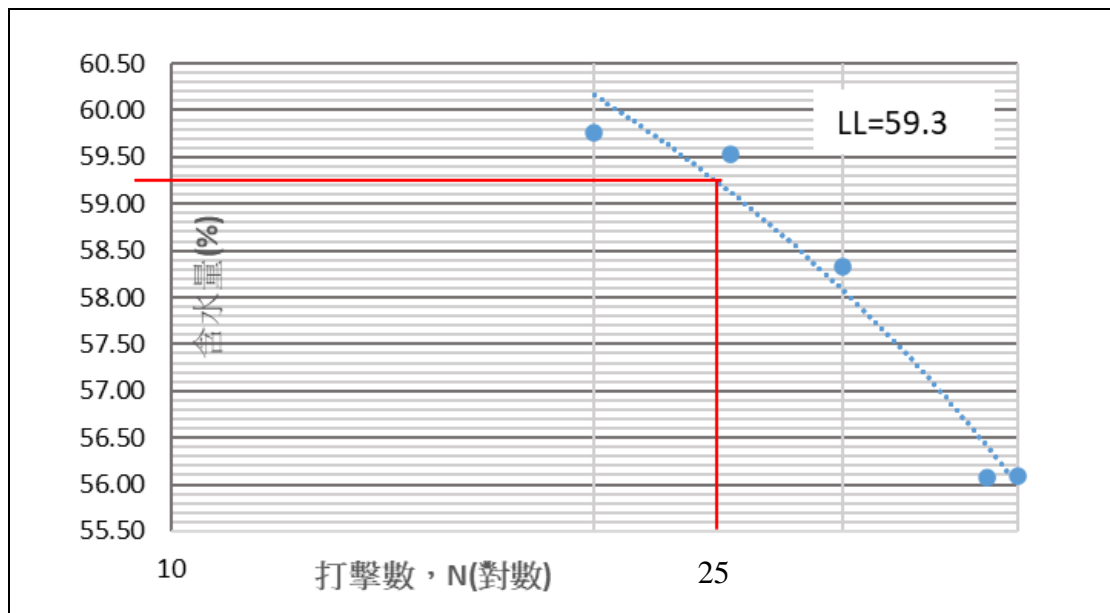
另外依據 ASTM D-4318 試驗標準進行塑性限度試驗，共執行兩組試驗，試驗成果彙整如表八所示，相關試驗歷程數據（乾土重、水重、器皿重量等）彙整如表所述，其中本次試驗所求得之塑性限度為 19.29 至 19.76。因此，可將本試驗土壤再細分為高塑性黏土或高塑性粉土（CH、MH）

表七 液性試驗數據彙整表

試驗組別	1	2	3	4	5
打擊次數 (N)	40	38	30	25	20
濕土+皿重 (g)	56.15	55.7	59.21	55.45	59.81
乾土+皿重 (g)	54.4	54.04	57.53	53.67	57.79
皿重 (g)	51.28	51.08	54.65	50.68	54.41
乾土重 (g)	3.12	2.96	2.88	2.99	3.38
水重 (g)	1.75	1.66	1.68	1.78	2.02
含水量 (%)	56.09	56.08	58.33	59.53	59.76
塑性限度	59.37	59.00	59.63	59.53	58.17

表八 塑性試驗數據彙整表

試驗組別	1	2
濕土+皿重 (g)	64.26	65.16
乾土+皿重 (g)	62.76	63.47
皿重 (g)	55.17	54.71
乾土重 (g)	7.59	8.76
水重 (g)	1.50	1.69
含水量 (%)	19.76	19.29
塑性限度	19.76	19.29



圖十六 阿太堡液性限度流性曲線示意圖

三、邊坡沖刷試驗分析

1. 原狀土壤邊坡

本研究以砂箱試驗模擬原狀土壤邊坡沖刷行為之相關試驗數據彙整如表九所示，共進行 4 組沖刷試驗，以此相關數據為改良土壤邊坡沖刷試驗之對照。如表所示，當回填體積固定時，單位重 γ_m 與試驗土壤重量成正比卻與孔隙比及孔隙率成反比。

依據相關試驗結果進行比對，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，如圖十七所示。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，如圖十八所示

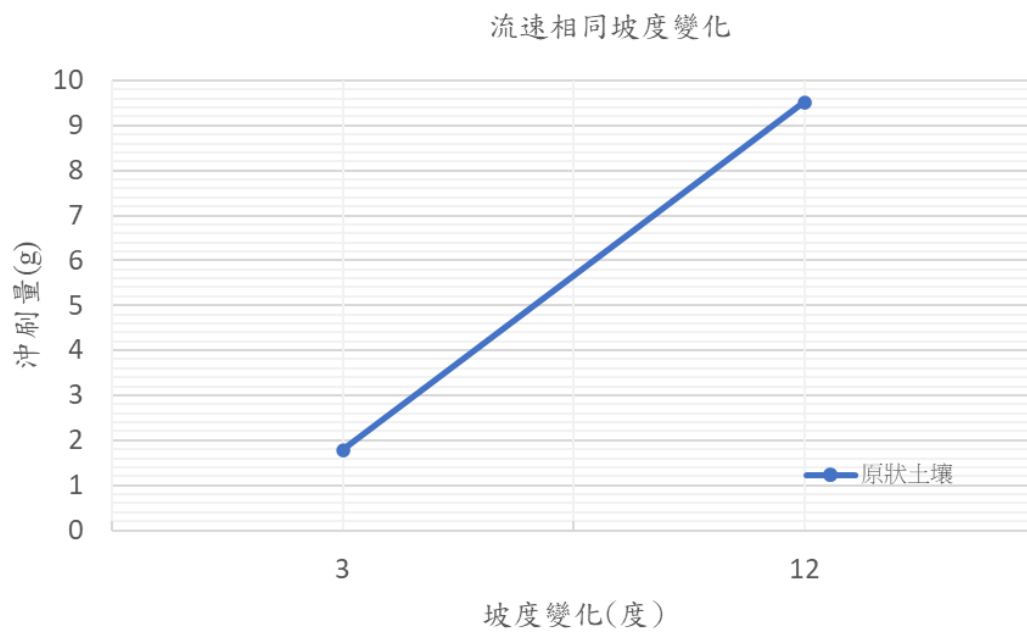
另外，於出水口處設置集水沉降設備，除收集沖蝕之土壤顆粒外，亦每隔 10 分鐘採取水樣進行水質檢測，如表十所示，原狀土壤邊坡之逕流水 pH 值在 7.5~8.5 之間屬中性至弱鹼性。

表九 原狀土壤沖刷試驗結果彙整表

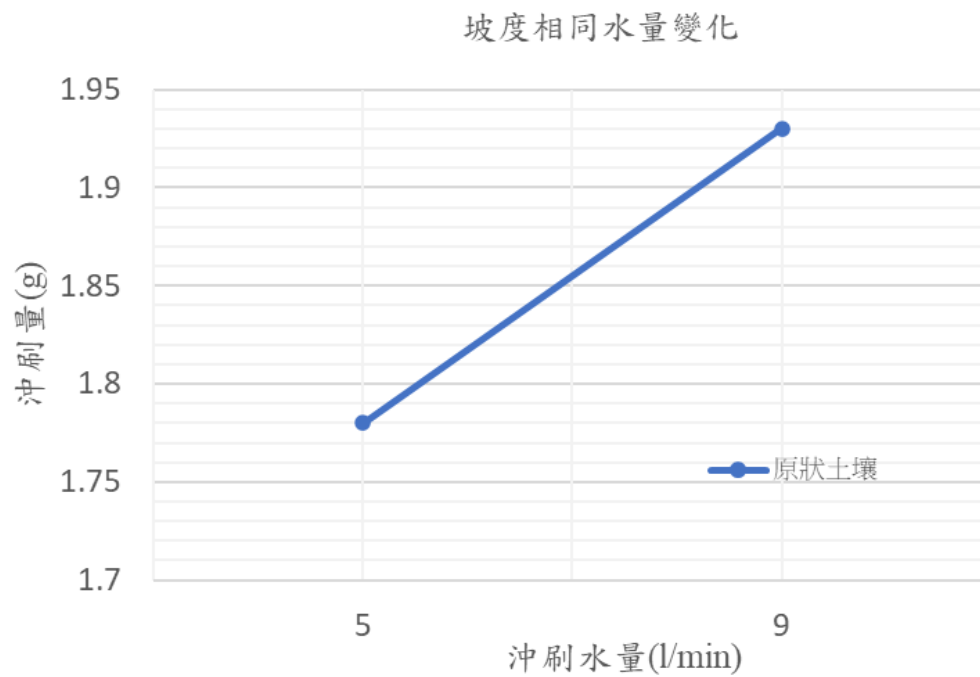
試驗組	坡度(度)	沖刷水量(l/min)	試驗土壤重量(t)	單位重(t/m ³)	土壤比重(Gs)	含水量(%)	孔隙比(e)	孔隙率(n)	沖刷量(g)
1	3°	5	0.061	0.91	2.61	31	2.76	0.73	1.78
2	3°	9	0.059	0.88	2.61	30	2.86	0.74	1.93
3	12°	5	0.062	0.93	2.61	24.8	2.51	0.72	9.51
4	12°	9	0.079	1.18	2.61	27.8	1.826	0.65	2.34

表十 原狀土壤沖刷試驗出水口集水區水質檢測彙整表

試驗組	水質檢測(pH)		
1	8.354	8.252	8.153
2	8.137	8.123	8.137
3	8.180	7.828	7.643
4	7.785	7.844	7.850



圖十七 原狀土壤坡度變化影響沖刷量示意圖



圖十八 原狀土壤沖刷水量變化影響沖刷量示意圖

2. 改良土壤邊坡

關於改良土壤邊坡沖刷試驗相關試驗數據彙整如表十一所示，共進行 12 組沖刷試驗，以此相關數據與原狀土壤邊坡沖刷試驗進行比對。如表所示，當回填體積固定時，單位重 γ_m 與試驗土壤重量成正比卻與孔隙比及孔隙率成反比。

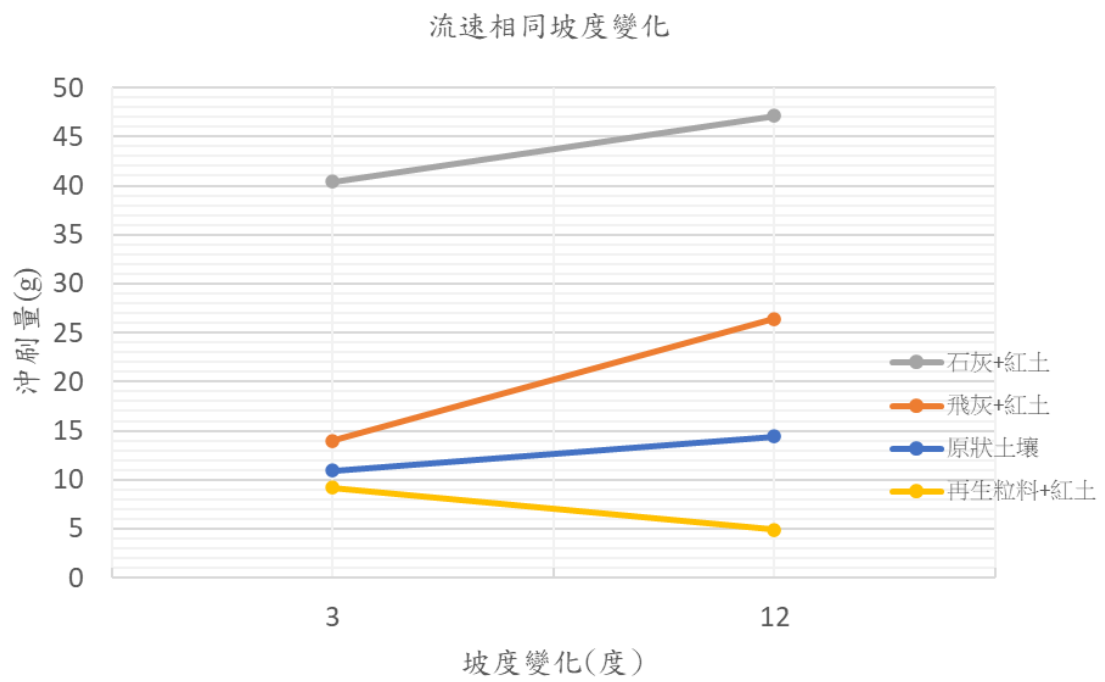
依據相關試驗結果進行比對，在流速相同的條件下，沖刷量隨著坡度增加而呈現逐漸增加的趨勢，如圖十九所示，其中添加飛灰及石灰的試驗邊坡沖刷行為與原狀土壤相近，而添加再生粒料的邊坡於高角度邊坡沖刷量反於下降，如前所述（表六）因拌合再生粒料使黏土顆粒所佔試驗土壤的比例下降，但卻不影響土壤的凝聚力性質，在小流速沖刷下粒料間的顆粒效應產生剪力強度提高了抗沖刷性質。

當在相同坡度條件下，沖刷量隨著沖刷水量(流速)增加而呈現逐漸增加的趨勢，如圖二十所示，添加飛灰及再生粒料的試驗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，在圖表中顯示添加石灰的試驗邊坡，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。

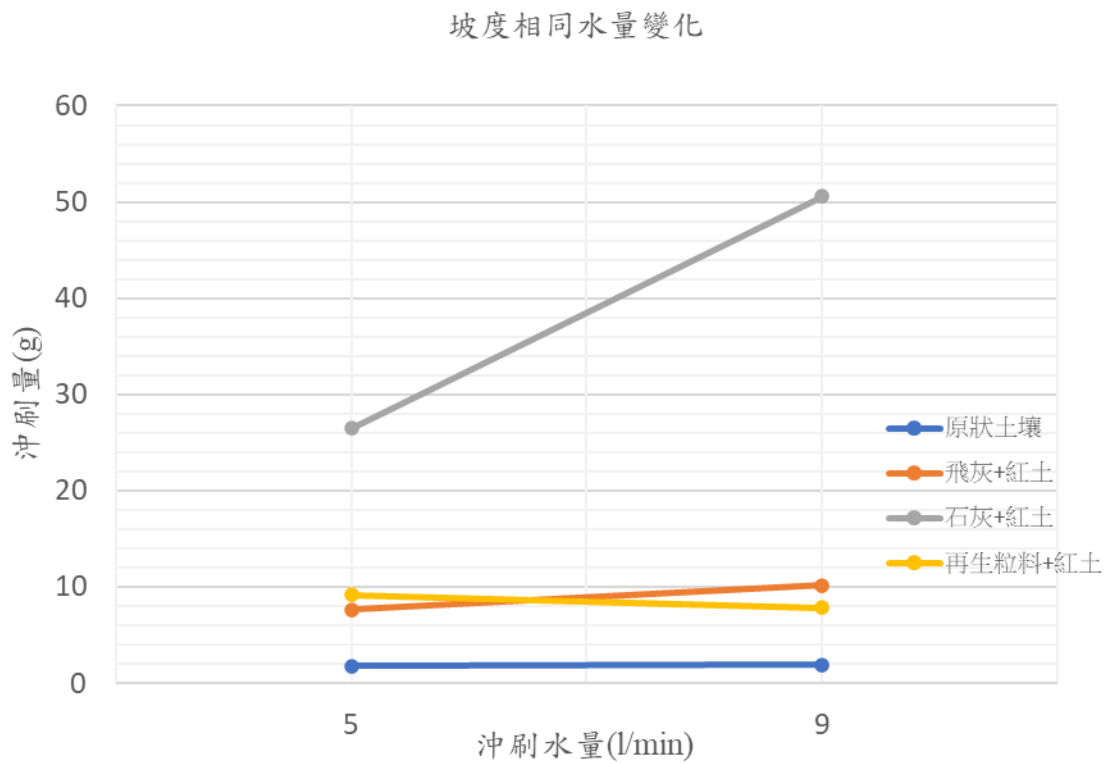
再者，如表十一所示改良土壤邊坡拌合添加劑靜置 6 小時後，含水量均能下降 1%~1.7%，在沒有外力夯實的狀況下，黏土顆粒表面附著石灰、飛灰反而增加沖蝕的行為發生。

表十一 改良土壤沖刷試驗結果彙整表

試驗組	添加土壤改良劑類別	添加劑劑量(%)	坡度(度)	沖刷水量(l/min)	試驗土壤重量(t)	單位重(t/m ³)	土壤比重(Gs)	原土含水量(%)	改良土壤含水量(%)	孔隙比(e)	孔隙率(n)	沖刷量(g)
1	飛灰+紅土	5	3°	5	0.073	1.09	2.61	29.61	27.95	2.07	0.68	7.68
2	飛灰+紅土	5	3°	9	0.071	1.06	2.61	30.71	28.00	2.16	0.69	10.20
3	飛灰+紅土	5	12°	5	0.079	1.18	2.61	26.24	24.82	1.76	0.64	5.65
4	飛灰+紅土	5	12°	9	0.080	1.19	2.61	27.09	26.08	1.77	0.639	13.42
5	石灰+紅土	5	3°	5	0.074	1.11	2.61	29.21	27.49	1.998	0.67	26.47
6	石灰+紅土	5	3°	9	0.075	1.12	2.61	28.18	26.54	1.95	0.66	50.59
7	石灰+紅土	5	12°	5	0.076	1.13	2.61	24.46	24.24	1.87	0.65	20.69
8	石灰+紅土	5	12°	9	0.079	1.18	2.61	24.46	23.49	1.73	0.63	6184.14
9	再生粒料+紅土	5	3°	5	0.072	1.07	2.61	25.49	24.29	2.03	0.67	9.18
10	再生粒料+紅土	5	3°	9	0.073	1.09	2.61	27.58	26.82	2.04	0.67	7.82
11	再生粒料+紅土	5	12°	5	0.067	1.00	2.61	25.49	24.86	2.25	0.69	4.9
12	再生粒料+紅土	5	12°	9	0.070	1.04	2.61	26.99	25.75	2.16	0.68	3.08



圖十九 改良土壤坡度變化影響沖刷量示意圖

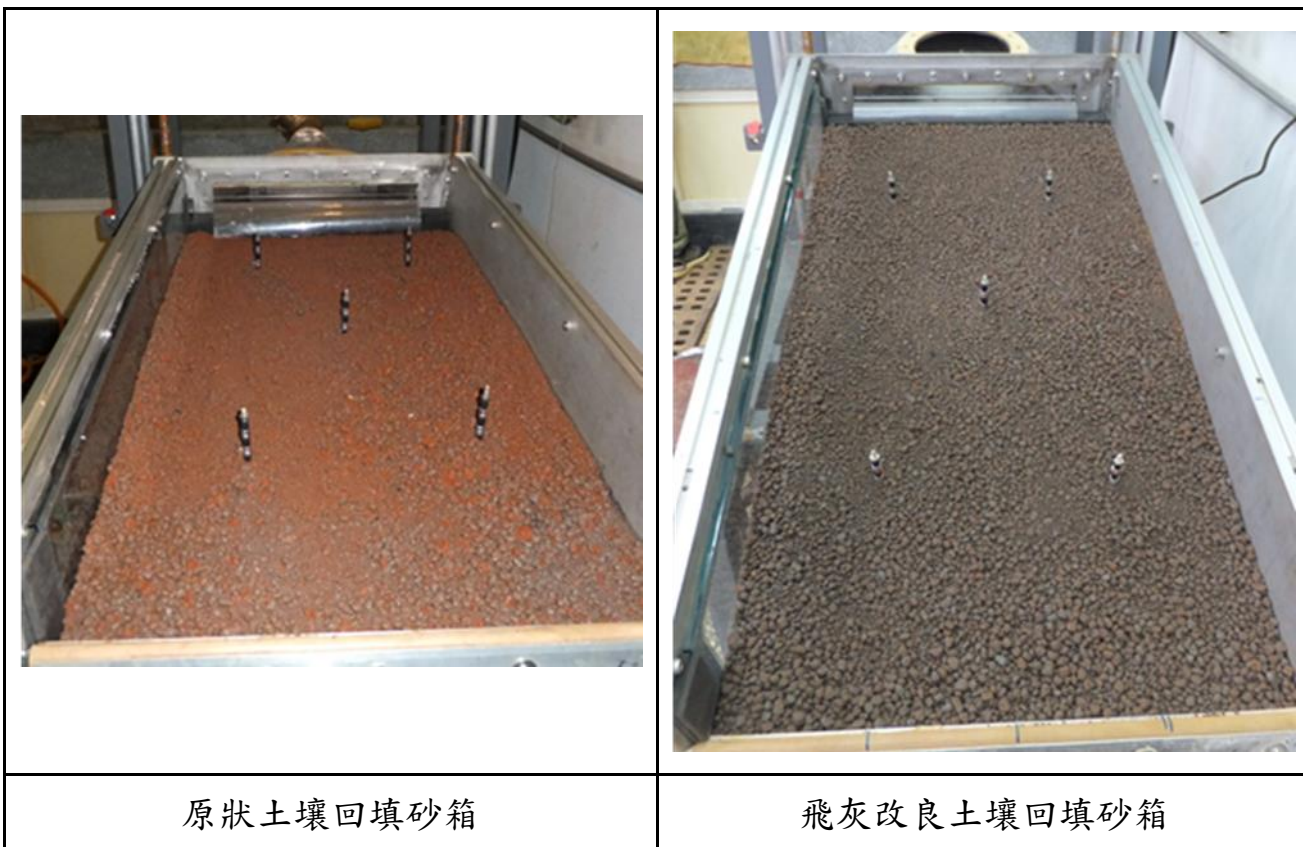


圖二十 改良土壤沖刷水量變化影響沖刷量示意圖

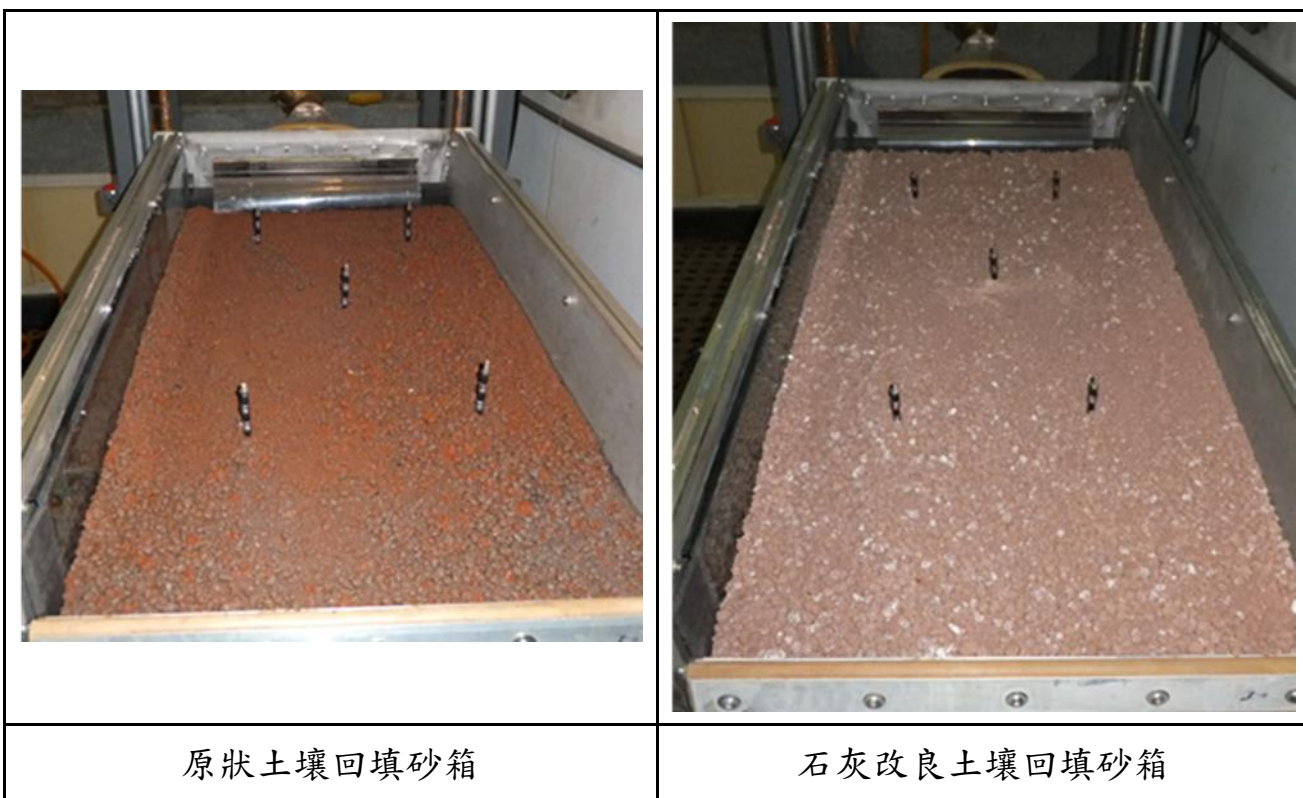
另外，於出水口處設置集水沉降設備，除收集沖蝕之土壤顆粒外，亦每隔 10 分鐘採取水樣進行水質檢測，如表十二所示，改良土壤邊坡之逕流水 pH 值在 8.5~12.5 之間屬弱鹼至鹼性。此試驗成果亦符合之前所述(圖七、圖八、圖九)，當拌含量為 5% 此時的環境 pH 值變化範圍亦落於此範圍，取樣三次不因沖刷水量而產生稀釋現象。

表十二 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)		
			第一次	第二次	第三次
1	飛灰+紅土	5	8.658	8.590	8.530
2	飛灰+紅土	5	8.451	8.284	8.363
3	飛灰+紅土	5	8.918	8.845	8.405
4	飛灰+紅土	5	8.893	8.88	8.779
5	石灰+紅土	5	12.652	12.709	12.729
6	石灰+紅土	5	12.836	12.718	12.676
7	石灰+紅土	5	12.864	12.983	12.957
8	石灰+紅土	5	12.443	12.545	12.252
9	再生粒料+紅土	5	9.323	8.845	8.862
10	再生粒料+紅土	5	9.151	9.096	9.076
11	再生粒料+紅土	5	9.207	9.192	9.102
12	再生粒料+紅土	5	9.656	9.490	9.292



圖二十一 原狀土壤及飛灰改良土壤比對示意圖



圖二十二 原狀土壤及石灰改良土壤比對示意圖



原狀土壤回填砂箱



再生粒料改良土壤回填砂箱

圖二十三 原狀土壤及再生粒料改良土壤比對示意圖

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. 參照相關原狀土壤試驗結果，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。
3. 依據相關原狀土壤邊坡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，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，但卻不影響土壤的凝聚力性質，在小流速沖刷下粒料間的顆粒效應產生剪力強度提高了抗沖刷性質。
4. 在相同坡度的試驗條件下，沖刷量隨著沖刷水量(流速)增加而呈現逐漸增加的趨勢，添加飛灰及再生粒料的試驗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，在圖表中顯示添加石灰的試驗邊坡，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。
5. 原狀土壤邊坡之逕流水 pH 值在 7.5~8.5 之間屬中性至弱鹼性，而改良土壤邊坡之逕流水 pH 值在 8.5~12.5 之間屬弱鹼至鹼

性。此試驗成果亦符合添加劑拌合量為 5% 時的環境 pH 值變化測試範圍，並證實不因沖刷水量而產生稀釋現象。

6. 土壤拌合添加劑靜置 6 小時後，含水量均能下降 1%~1.7%，在沒有外力夯實的狀況下，黏土顆粒表面附著石灰、飛灰反而增加沖蝕的行為發生。

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. 透過添加劑的拌合能改變土壤結構，使之有利於植物生長因此建議延伸本研究成果可增加其他種類之細顆粒土壤，如西南部的泥岩土壤的改良試驗，另外，亦可加入改良後土壤的植物生長適應性等相關研究。

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., Crovetto, 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.

附錄一、計畫經費編列與內容修正建議暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形
報告內容審查意見：		
一	1. 第一階段係室內砂箱實驗，理論可行，後續建議仍需建立大型現地試驗作為驗證。	感謝委員建議。 將依據第一階段試驗結果規劃現地試驗，以土壤添加劑穩定不安定土砂的可行性，唯考量第一階段執行時間緊迫，故將規劃於第二階段執行。
	2. 添加劑使用石灰和焚化再生粒料，其pH值恐太高，對植物生長不利。	感謝委員建議。 第二階段將考慮植物生長pH值，以評估土壤穩定區域植生覆蓋率。
二	<p>1.本計畫請以補助經費764仟元調整編列。</p> <p>2.本年度執行期限請修正為自111年1月18日至111年12月31日。(11.5個月)。薪俸、保險、退休離職儲金、主持人費、兼任研究助理，請以計畫執行期限11.5個月內編列。年終獎金亦配合計畫期限比例調整。</p> <p>3.人事費占總經費之比例，以不超過百分之五十為原則。</p> <p>4.行政管理費為0，請刪除此項。</p> <p>5.二代健保補充保險費費率為2.11%。</p> <p>6.出席費之支給，以每次會議新臺幣二千五百元為上限。</p> <p>7.研究主持人費請補「薪俸、研究主持人費明細表」(附表一)。</p>	關於計畫格式及經費的部分，依審查意見逐項修正及刪減。

項次	審查意見	回覆辦理情形
三	1. 租車油料費用請依時價編列並量化。 2. 國內旅費內2人次*2天*趟/月*9月是否為多列，和後公式不符。	主計室審查意見：依審查意見修正如下：量化租車油料費及修正國內旅費。

附錄二、期初審查委員審查意見暨回覆表

序號	審查意見	回覆意見
蘇苗彬委員		
1	土壤本身的特性會決定其可行性，應有試驗用的土壤種類與基本性質，是否有代表性。	感謝委員建議。 研究擬定桃園地區紅土為試驗土壤。
2	只有用砂箱沖蝕改變坡度與流速，涵蓋 USLE 公式中所有的參數，試驗結果是否足以得出結論？	感謝委員建議。 本計畫係由 USLE 公式為發想，藉由試驗探討土壤沖蝕指數(Km)，期望利用工程方式提升土壤抵抗沖蝕能力。
3	土壤擾動對沖蝕影響很大，應先有標準程序來進行試驗，請納入考慮。	感謝委員建議。 對於擾動後的土壤，將以相同之相對密度(Dr=60%)為試驗控制條件進行邊坡填築依據。
陳清田委員		
1	土壤添加劑類別眾多，請說明本研究採用石灰、飛灰及再生粒料等三種添加劑之原則，又其於試驗設計配比為何，並請說明	感謝委員建議。 本研究將提出添加劑應用於桃園紅土改良之配比設計，詳如 p. 27。
2	P. 7 土壤沖蝕量文獻回顧詳細，惟請說明本研究土壤沖蝕量之量測方式，可靠性為何？或準確性。俾供最佳配比設計評析之應用。	感謝委員建議。 試驗將規劃坡面沖蝕監測以沖蝕針為主，並配合連續影像收集(錄影)以量化坡面沖蝕量，對於已流失土砂，經收集後將進行秤重及篩分析試驗。
3	砂箱試驗土壤密度與	感謝委員建議。

	原狀(未擾動)密度之相關性為何? 流量、流速或降雨強度之設計為何?	以擾動土壤為試驗目標, 利用相對密度(Dr)控制試驗品質, 本試驗暫不考慮降雨強度, 逕流流速規劃詳如 p. 22。
4	水質檢驗項目應有試驗前之對照比較, 水質重金屬檢驗項為何?	感謝委員建議。 本研究將以未添加改良劑之土壤為對造, 進行沖刷試驗水質檢測比對依據。
5	最佳配比設計之評估指標為何? 除土壤沖蝕量或穩定性, 是否包括水質及經濟性等項目。	感謝委員建議。 初步規劃僅以沖刷量及穩定性為評估指標, 水質及經濟性暫不納入考量。
王承德委員		
1	本計畫似僅核給第一年之研究經費, 是故, 相關於第二階段之研究構想宜於本計畫期末報告之「建議」項目中提及。	感謝委員建議。 遵照辦理。
2	本工作執行計畫書有諸多的漏字、錯字, 希冀於期中報告能予以改善。	遵照辦理。
3	本工作執行計畫應說明改良土壤添加劑(如石灰、飛灰、再生粒料)之配比規劃(與實驗組數)。	感謝委員建議。 本研究將提出添加劑應用於桃園紅土改良之配比規劃, 詳如 p. 27。 關於試驗組數規劃將以相同流速、相同添加劑比例、相同坡度, 不同土壤添加劑個執行一組試驗組及對照組。
陳振宇委員		
1	石灰及飛灰遇水會產生水化反應並產生強鹼, 因此實驗時土壤	感謝委員建議。 本研究進行室內試驗時, 針對試驗土壤的含水量、添加劑之添加量及

	本身之含水量應予控制，拌合後至進行實驗的時間亦應儘量一致。	試驗時間將於以定量化。
2	未來進行現地施作時，添加劑的施作方式應如何進行，亦請事前考量。	感謝委員建議。 將本項意見納入後續執行考量。
羅委員文俊		
1	室內試驗部分請補充砂箱尺寸、坡度、土壤夯實、土壤物化性質、添加劑配比、流速、流量等試驗料及預計量測哪些數據及得到什麼結果。	感謝委員建議。 遵照辦理
技研小組(詹婉妤)		
1	針對土壤改良應有許多前人研究資料，建議於報告書中補充，以利瞭解本研究與前人研究之成果之差異性。	感謝委員建議。 遵照辦理。
2	研究將依據不同土壤類別進行不同添加劑配比設計，建議以相同坡度進行觀察比較即可，無須將坡度變化納為試驗變數。	感謝委員建議。 遵照辦理。

附錄三、期中審查委員審查意見暨回覆表

序號	審查意見	回覆意見
蘇苗彬委員		
1	本案辦理土壤改良試驗，運用三種添加劑，整體目標極佳，對水土保持工作可以提昇。	感謝委員肯定。
2	報告書已為期中階段，仍存在很多錯字與遺漏，建議加強校訂，摘要可再加強，英文摘要有待改進。	感謝委員建議。 已修正
3	研究流程合適，可達具體之成果，唯對試驗土壤、各式添加劑材料之基本性質應有具體測試與彙整。	感謝委員建議。 已修正
4	P12 起添加劑的描述應有內容引用之出處，很多成果不可直接剪貼，P14 臺電之飛灰均屬 F 類所指為何？P16 再生粒料以相關研究成果所指為何？	感謝委員建議。 已加強說明
5	土壤沖蝕量測方法與本試驗相關性為何？應加強本試驗量測方法的說明。	感謝委員建議。 規劃坡面沖蝕監測以沖蝕針為主，並配合連續影像收集(錄影)以量化坡面沖蝕量，對於已流失土砂，經收集後將進行秤重及篩分析試驗。
6	P24 進度中有許多項目應已完成，報告中不見試驗成果的表	感謝委員建議。 已修正

	列，看不出實際進度。	
8	報告無成果與後續事項的描述，在 P29 應有說明。	感謝委員建議。 已修正
9	參考文獻有缺失，如李 建 堂 1996 或 1997、無萬 1983 等，應改善。	感謝委員建議。 已修正。
羅文俊委員		
1	P5 第一章緒論請補充資料來源。	感謝委員建議。 已修正
2	P28 砂箱模型試驗設備尺寸等資料，宜以文字說明，不宜 僅以圖片表示。	感謝委員建議。 已修正
陳振宇委員		
1	試驗土樣鋪設至砂箱時，是否需經夯實，如是，夯實之操作步驟宜說明。	感謝委員建議。 已補充說明
2	P25，「但是考量影響動、植物生長，因此必須調製適當添加拌合比例如表六所示」，文意似與表六之內容不符，請 確認或補充。	感謝委員建議。 遵照辦理，已修正。
3	P27 表六拌合配比如 0.1，其定義為何？請補充。 承上，如拌合配比 0.4，是指原土重為 1，拌合再生粒料 重為 0.4，如此高比例，是否會影響動植物生長及生態環	感謝委員建議。

	境。	
4	試驗設計採用之地表逕流流速為何？	感謝委員建議。 已補充說明
5	最後一章，宜有目前進度及成果之小結。	已加強說明
6	文字內容修正：P19，圖四沖蝕針之尺寸與內文不同？P20，對「造」組，應為「照」。	感謝委員建議。 已修正
技研小組(詹婉妤)		
1	研究使用石灰、飛灰、再生粒料添加劑進行土壤侵蝕控制，對於配比部分是否有考量該添加劑可能會造成土壤酸鹼值改變，進而造成植物生長限制？	感謝委員建議。 遵照辦理。
2	添加土壤改良劑對於土壤之滲透性及團粒穩定性之影響為何	感謝委員建議。 已補充說明

附錄四、期末審查委員審查意見暨回覆表

序號	審查意見	意見回覆
1	以實驗室數據推出結論，但實務運用上，較難以推動。	相關衍生之研究，將考慮進行現場施作之程序，以作為後續落實研究成果之考量。
2	本研究主體為桃園紅土，相同的添加劑若使用在其他種類土壤，是否也有相同或差異結果？	謝謝委員建議，未來的研究計畫中將規劃相同性質之土壤進行試驗，以擴大本研究成果的應用。
3	本計畫之添加劑加入土壤後，沖刷並沒有減少反而增加，這可能跟地表植生有關係，建議先做植生土箱再做人工降雨沖蝕試驗。	謝謝委員建議，為來的研究計畫中將考量改良土壤與植生的關係及降雨沖蝕的影響。
4	資材拌合後因土壤擾動造成沖蝕加劇，若改良之土壤快速流失對後續植生亦不利，後續應更審慎考量其使用時機與限制。	謝謝委員建議，未來的研究或應用將考量植物生長期以及發育週期，期望克服此疑慮。