
集水區坡地土砂沖蝕動態評估研究
Dynamic Assessment of Soil Erosion in
Watersheds

執行單位：國立中興大學水土保持學系

執行期間：107 年 2 月 9 日至 107 年 12 月 31 日

計畫主持人：王咏潔 助理教授

共同主持人：洪啟耀 助理教授

行政院農業委員會水土保持局 編印

中華民國 107 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）

集水區坡地土砂沖蝕動態評估研究

摘要

在豪雨事件中，高強度降雨使短延時之累積雨量快速增加，造成集水區坡地土砂沖蝕，增加致災風險。使用 USLE 等公式進行量化推估，雖可獲得年平均土壤流失量作為長延時之平均參考值，卻無法考量暴雨事件中，不同延時之土砂運移量變化。本研究計畫以土壤物理實驗、沖蝕啟動應力實驗，和人工降雨實驗，探討坡面土壤沖蝕之物理過程，提出相關參數，作為土壤沖蝕物理模型之輸入參考，進行土壤沖蝕和流失量隨降雨延時之變化模擬。由實驗結果建立雷射地形掃描獲得之地形體積變化(V , m^3)與土砂沖蝕量體(SL_m , kg)之關係式為 $SL_m = 968.55V$ ($R^2 = 0.80$)，研討遙測技術於集水區土砂量體評估之應用。再以高雄市荖濃溪集水區內崩塌產生之裸露地為現地試區，進行土砂沖蝕量體評估：總土壤沖蝕量之模擬平均誤差為-11.3%；且與水流動力相關之參數對沖蝕量之影響明顯高於土壤本身之抗沖蝕特性。本計畫研究成果可提供降雨事件中集水區坡地土砂沖蝕量體之時間變化初步評估，作為災害風險評估與治理對策之參據。

關鍵詞：土壤流失量評估、坡地土壤沖蝕、雷射地形掃描、系統動力模型

Dynamic Assessment of Soil Erosion in Watersheds

Abstract

During extreme rainfall events, the high rainfall intensity increases the cumulative precipitation within a short duration, and leads to significant overland flow that causes a major soil loss from slopeland in a watershed and increases disaster risks. The application of USLE in soil loss estimation in a watershed can obtain an annual mass of soil loss as an average value at a yearly time scale. However, the time-variate soil loss and transported sediments during an extreme rainfall event cannot be precisely quantified by USLE. In this research project, we apply laboratory experiments, including geotechnical tests, flume experiments for critical shear stress, and artificial rainfall simulator experiments to assess the physical processes of soil erosion, and to provide physical parameters for the input of the processed-based soil erosion system dynamics model for a time-variate soil loss simulation. From the laboratory experiments, we propose an equation to estimate soil erosion mass (SL_m , kg) from volume difference of laser-scanned topography (V , m^3) as $SL_m = 968.55V$ ($R^2 = 0.80$), and show the applicability of remote sensing technique in soil loss assessment in a watershed. Then the model is applied to assess the soil loss in a field study plot, located in the Laonong River watershed in Kaohsiung City. The simulation results show an average error of -11.3% between the simulated and measured total soil loss; and the parameters related to hydrodynamic properties are more sensitive compared to those

related to the physical and mechanical properties of soil. The results of this project can provide a preliminary assessment for event-based, time-variate soil erosion quantification during rainfall events, and provide the references for risk assessment, warning analysis, and remediation strategies evaluation in potential slopeland disasters.

Keywords: Soil loss assessment, Soil erosion on slopeland, Laser scanned topography, System dynamics model

目次

摘要.....	II
Abstract.....	III
第一章 緒論	1
第一節 擬解決問題	1-1
第二節 計畫目標	1-2
第二章 工作執行方法與步驟	2-1
第一節 工作執行方法	2-1
一、 土壤基本物理性質實驗	2-2
二、 土壤力學實驗	2-2
三、 沖蝕啟動應力	2-10
四、 沖蝕啟動應力實驗	2-13
五、 人工降雨沖蝕實驗	2-15
六、 坡地土砂沖蝕系統動力模型	2-20
第二節 工作執行步驟	2-23
第三章 工作進度與交付項目	3-1
第一節 計畫甘特圖	3-1
第二節 計畫交付項目	3-4
一、 工作項目	3-4
二、 計畫成果	3-5
第四章 計畫成果	4-1
第一節 相關文獻回顧	4-1

一、	土壤沖蝕室內實驗	4-1
二、	土壤沖蝕現地調查與試區實驗	4-6
三、	土壤沖蝕模型	4-8
第二節	實驗成果-土壤物理特性	4-11
一、	土壤水分係數(MF).....	4-13
二、	土壤顆粒密度與平均比重	4-15
三、	土壤粒徑分佈與質地	4-16
四、	塑性限度與液性限度	4-19
五、	團粒穩定分析	4-30
第三節	實驗成果-人工降雨沖蝕實驗	4-34
一、	人工降雨機率定	4-34
二、	人工降雨機實驗-青灰泥	4-38
三、	人工降雨機實驗-壤質砂土	4-45
第四節	實驗成果-沖蝕啟動應力實驗	4-51
一、	渠道流況率定	4-51
二、	沖蝕啟動應力實驗-青灰泥	4-52
三、	沖蝕啟動應力實驗-壤質砂土	4-56
第五節	案例分析-土壤沖蝕模擬	4-59
一、	研究試區地理位置	4-59
二、	環境基本資料	4-61

三、 地形變化及土壤流失分析	4-63
第五章 結論及建議	5-1
第一節 結論	5-1
第二節 建議	5-3
參考文獻.....	參-1
附錄.....	附-1
附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附-1
附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附-8
附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形	附-10

表次

表 2-1 近年使用臨界剪應力概念之相關沖蝕模型及研究	2-13
表 3-1 計畫甘特圖	3-3
表 4-1 本計畫各實驗項目與組數	4-12
表 4-2 各種試驗土壤水分係數	4-14
表 4-3 各種試驗土壤顆粒密度	4-15
表 4-4 各種試驗土壤質地(砂、粉、黏百分比)	4-16
表 4-5 青灰泥-液性限度結果	4-19
表 4-6 青灰泥-塑性限度結果	4-22
表 4-7 青灰泥塑性指數 PI(Ip)	4-24
表 4-8 紅土-液性限度結果	4-25
表 4-9 紅土-塑性限度結果	4-27
表 4-10 紅土塑性指數 PI(Ip)	4-29
表 4-11 紅土過篩百分比	4-31
表 4-12 紅土累積百分比之對數粒徑與對數標準偏差	4-32
表 4-13 人工降雨機降雨強度率定資料	4-34
表 4-14 人工降雨機降雨均勻度率定資料	4-35
表 4-15 人工降雨機雨滴粒徑與降下速度率定資料	4-36
表 4-16 青灰泥人工降雨沖蝕實驗累積土砂產量 (資源來源：WANG AND LAI, 2018)	4-39
表 4-17 青灰泥人工降雨沖蝕實驗累積體積變化沖蝕量 (資源來源： WANG AND LAI, 2018)	4-39
表 4-18 距下游出口處不同距離分區之土壤流失百分比，以 30°地形 坡度青灰泥降雨沖蝕結果為例(資料來源：WANG AND LAI, 2018)	4-44

表 4- 19 壤質砂土人工降雨沖蝕實驗累積土砂產量	4-45
表 4- 20 壤質砂土人工降雨沖蝕實驗累積體積變化沖蝕量	4-46
表 4- 21 青灰泥沖蝕啟動應力實驗結果	4-56
表 4- 22 壤質砂土沖蝕啟動應力實驗結果	4-58
表 4- 23 梅山(2)雨量站歷年雨量記錄 (資料來源：經濟部水利署， 2012)	4-61
表 4- 24 土壤沖蝕模擬區塊地形和土砂量體變化資料	4-65
表 4- 25 土壤沖蝕模擬降雨輸入資料	4-67
表 4- 26 現地試區總土壤沖蝕量模擬結果與誤差	4-68
表 4- 27 現地試區模擬參數文獻值和優化結果 A	4-69

圖次

圖 2-1 研究流程圖	2-1
圖 2-2 摩爾庫倫破壞包絡線圖	2-3
圖 2-3 土壤直接剪力測定儀	2-4
圖 2-4 直剪試驗受力圖	2-5
圖 2-5 三軸壓縮試驗管線裝置圖	2-6
圖 2-6 三軸試驗作用壓力圖	2-7
圖 2-7 三軸試驗流程圖	2-9
圖 2-8 當水流剪應力(A)小於(B)大於土壤顆粒之臨界剪應力之沖蝕 過程； D_{rd} = 土粒受雨滴衝擊之分離與重新分布率， D_{rd-d} = 雨滴造成之土粒剝離原有土體率， D_{rd-rd} = 雨滴造成之沉積 層土粒剝離率， D_{fd-d} = 逕流造成之原土體土粒剝離/沉降比 例， D_{fd-e} = 逕流造成之沉積層土粒剝離/沉降比例 (資料來 源：NORD AND ESTEVES, 2005)。	2-12
圖 2-9 土砂沖蝕啟動實驗設備整體側視照片	2-14
圖 2-10 以 40% 高嶺土樣為例，試驗沖蝕率(EROSION RATE)與底床 剪應力(BED SHEAR STRESS)散布圖與非線性擬合結果(資料 來源：WANG AND STURM, 2016)。	2-15
圖 2-11 人工降雨沖蝕實驗配置圖 (資料來源：WANG AND LAI, 2018)	2-16
圖 2-12 人工降雨沖蝕實驗設備-沖蝕平台	2-17
圖 2-13 流量計與壓力計配置圖(資料來源：KIBET ET AL., 2014).	2-18
圖 2-14 線性雷射滑軌	2-19
圖 2-15 雷射曲線反應於地形資料	2-20

圖 2- 16 坡地土砂沖蝕系統動力學模型系統概念圖	2-22
圖 4- 1 逕流沖蝕設備 (資料來源：ZHANG ET AL., 2014).....	4-2
圖 4- 2 降雨沖蝕設備 (資料來源：AKSOY ET AL., 2012)	4-2
圖 4- 3 JOMAA ET AL. (2010)的沖蝕槽設置(資料來源：JOMAA ET AL., 2010)	4-5
圖 4- 4 NCHIZAH AND WAKINDIKI (2014)使用之沖蝕土槽(資料來源： NCHIZAH AND WAKINDIKI, 2014).....	4-6
圖 4- 5 青灰泥粒徑分佈	4-17
圖 4- 6 壤質砂土粒徑分佈	4-18
圖 4- 7 紅土粒徑分佈	4-18
圖 4- 8 青灰泥-塑性圖	4-24
圖 4- 9 紅土-塑性圖	4-30
圖 4- 10 紅土對數-百分比統計圖	4-34
圖 4- 11 人工降雨機雨滴粒徑分布圖：(A)降雨強度 75MM/HR；(B)降 雨強度 100MM/HR.....	4-37
圖 4- 12 青灰泥實測土壤流失量(A)、估計土壤流失量(B)與降雨延之 關係圖(資源來源：WANG AND LAI, 2018).....	4-41
圖 4- 13 地形坡度 30°之青灰泥人工降雨沖蝕雷射掃描 DEM：(A)初 始地形、(B)5 分鐘降雨延時地形、(C) 10 分鐘降雨延時地 形、(D) 15 分鐘降雨延時地形、(E) 20 分鐘降雨延時地形、 (F)25 分鐘降雨延時地形，(G)30 分鐘降雨延時地形(資源來 源：WANG AND LAI, 2018)。	4-44
圖 4- 14 壤質砂土(75MM/HR)實測土壤流失量(A)、估計土壤流失量 (B)與降雨延之關係圖.....	4-48
圖 4- 15 壤質砂土(100MM/HR)實測土壤流失量(A)、估計土壤流失量 (B)與降雨延之關係圖.....	4-49

圖 4- 16 電射掃瞄之地形變化體積與實測土壤流失量關係圖	4-50
圖 4- 17 三角堰流量率定曲線	4-51
圖 4- 18 置入土樣處流速剖面	4-52
圖 4- 19 置入土樣推進(沖蝕)深度時間變化	4-54
圖 4- 20 青灰泥土壤試體於不同流況下之平均沖蝕率：(A) 24 小時； (B) 48 小時；(C) 72 小時壓密之試體	4-55
圖 4- 21 壤質砂土試體於不同流況下之平均沖蝕率：(A) 24 小時； (B) 48 小時；(C) 72 小時壓密之試體	4-57
圖 4- 22 SHIELDS DIAGRAM：本計畫實驗結果與前人研究之比較	4-59
圖 4- 23 現地試區地理位置示意圖	4-60
圖 4- 24 布唐布那斯流域等高線圖 (資料來源：經濟部水利署， 2012)	4-62
圖 4- 25 布唐布那斯流域立體網格圖 (資料來源：經濟部水利署， 2012)	4-63
圖 4- 26 研究試區土壤流失量模擬區塊劃分	4-64
圖 4- 27 研究試區氣象測站點位圖	4-66

第一章 緒論

第一節 擬解決問題

台灣山區近年受到地質破碎及氣候變遷影響，坡地土砂災害問題更加複雜與嚴峻；強降雨事件中，集水區坡地的土壤流失、土砂運移和堆積及產砂量體等問題，遂成為坡地災害風險管理之重要評估項目。國內目前研究與水保、水利單位現行計畫中，針對集水區坡地土砂沖蝕量體之估算，多以通用土壤流失公式(USLE、RUSLE、MUSLE)為主之經驗關係式，搭配統計分析或特定區域之參數條件進行計算，未考慮水文頻率年及氣候變遷等影響下降雨型態之改變及日趨頻繁之極端事件。

在極端事件中，短延時、強降雨沖蝕造成之集水區坡面土砂流失量體可觀，成災風險高，但以 USLE 等公式推估年平均土砂流失量為長延時之平均值，為考量暴雨事件下，短時間內土砂量體運移之變化。因此，以經驗公式推估土壤沖蝕量雖操作便利，但其結果之準確度難以評估且不確定性高。為掌握強降雨事件中坡地土砂快速流失之量體，實需採用具物理意義之沖蝕模型，提供豪雨期間集水區坡地土砂沖蝕量體之動態模擬，作為極端事件中災害風險評估與治理對策之參據。本研究計畫之擬解決問題具體說明如下：

1. 本計畫擬解決豪雨事件中，集水區坡地的土壤流失、土砂運移和堆積及產砂量體等量化評估需求，以即時回饋於災害風險評估及預警系統之問題。
2. 本計畫擬解決現行集水區坡地土砂流失量以 USLE 等公式進行量化推估為主流，僅獲得年平均土砂流失量，作為長延時之平均參

考值，無法考量暴雨事件下，短時間內土砂量體運移及變化之問題。

第二節 計畫目標

本研究計畫之目標為：

1. 進行土壤特性、土壤力學、沖蝕啟動應力，以及人工降雨沖蝕等實驗，建立土砂物理、力學特性對土砂抗沖蝕強度之量化影響關係，並建立雷射地形掃描與沖蝕土砂量體之關係式，研討雷射掃描技術於集水區土砂量體評估之應用價值。
2. 以前述實驗資料完成坡地土砂沖蝕系統動力學模型之參數率定，提出參數敏感度分析，以進行模型驗證。
3. 以現地試區之氣象監測、坡地土砂物理及力學特性，和土壤流失量體調查資料，進行坡面土壤沖蝕模擬，開發豪雨期間集水區坡地土砂沖蝕量體評估方式。

第二章 工作執行方法與步驟

第一節 工作執行方法

本研究計畫擬以一年為期，進行坡地土砂沖蝕之系統動力物理模型建立之研究；研究流程圖詳見圖 2-1。主要研究方法敘述如下：

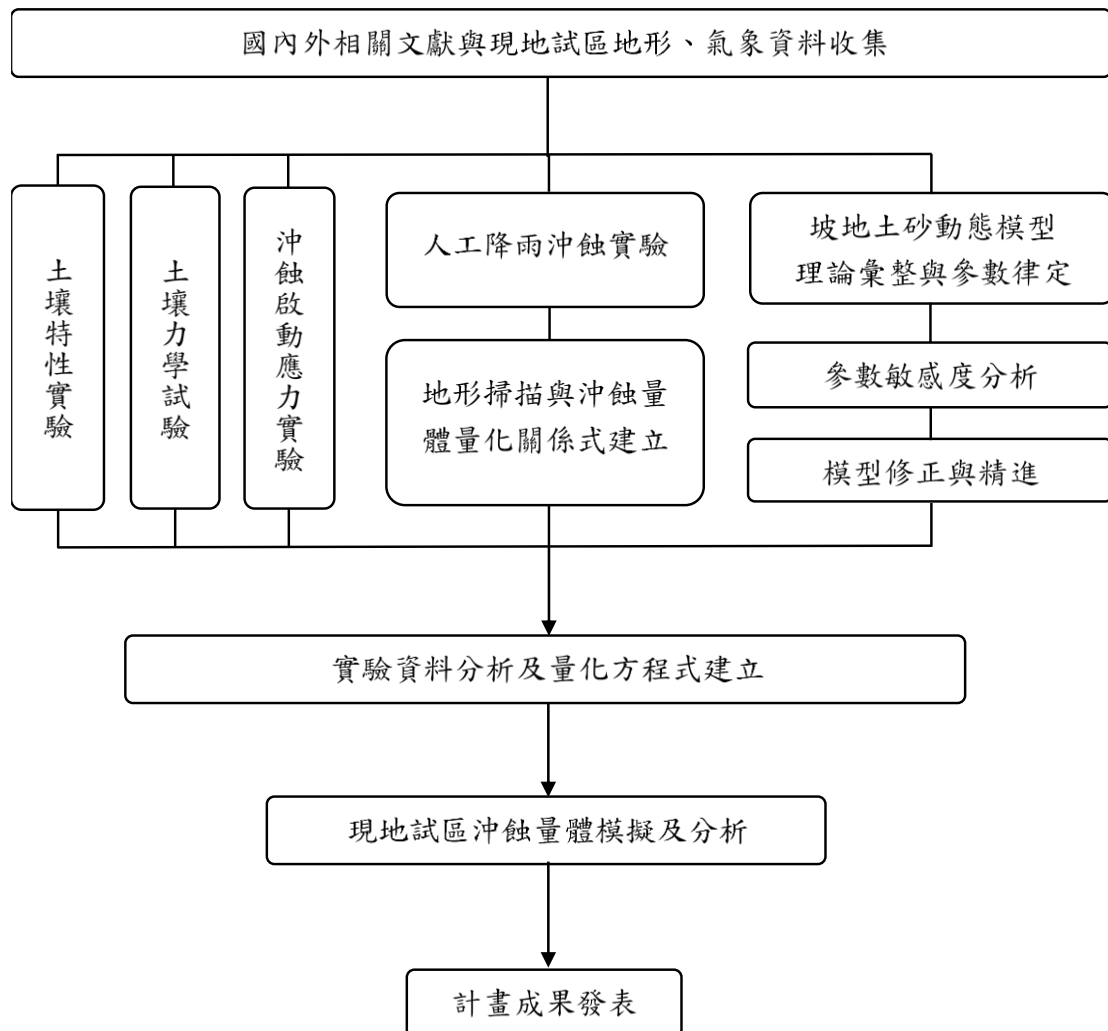


圖 2-1 研究流程圖

一、土壤基本物理性質實驗

為瞭解土砂之基礎特性，將進行土壤基本性質測量；測量項目包含含水量及有機質含量、乾密度及容積密度、比重、粒徑分布曲線(篩分析和比重計法)、和塑性與液性限度等特性試驗。土壤含水量試驗依美國材料和試驗協會 ASTM 標準 D2216-05 進行；有機質含量依 ASTM 標準 D2974-00 進行。測得含水量後，依土體之孔隙比計算空氣體積，獲得試驗土樣之總體積並計算其乾密度和容積密度。

比重測量使用比重瓶並依 ASTM 標準 D854-06 試驗程序測量，且採用試驗程序的方法 B—烘乾土樣法進行。土壤顆粒之粒徑分布曲線分析擬以篩分析和比重計試驗進行。阿太堡限度依據不同土壤含水量訂定並描述土壤狀態與物理行為，其中，塑性與液性限度分別為土壤呈塑性狀態的含水量下限和黏滯流的含水量下限。在土壤受力行為相關研究中，阿太堡限度常用以表示土壤中固、液態成份的交互作用，進而將土壤依其力學特性分類，本計畫依 ASTM 標準 D4318-05 進行試驗土樣之塑性與液性限度試驗，並計算塑性指數。

二、土壤力學實驗

土壤的強度與許多因素有關，包括圍束應力、土壤孔隙比、含水量的多寡等因素，土壤之剪力強度常以”正向應力”與”剪應力”作圖來表示其大小，即使用摩爾庫倫破壞包絡線來定義，如圖 2-2 所示。

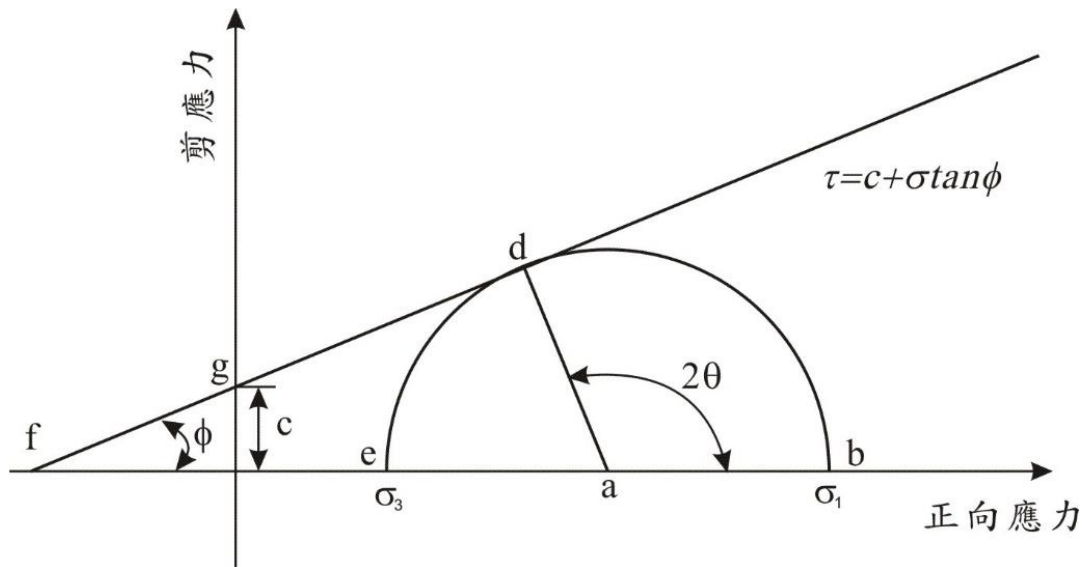


圖 2-2 摩爾庫倫破壞包絡線圖

為求得土壤之剪力強度，須從現地採取土樣後在實驗室中進行試驗，試驗的選擇必須要考量土壤之類型或是與現地狀況之相似度，考量諸多因素後方能選定試驗種類，並得到其土壤剪力強度。以下介紹兩種最常使用之實驗類型。

1. 直接剪力強度實驗(Direct shear test)

將土體修整後(一般為圓柱型或方盒型)，將土壤試體放入剪力盒中，將剪力盒架設於直接剪力儀上進行試驗(圖 2-3)。



圖 2-3 土壤直接剪力測定儀

直接剪力試驗可細分為：

A.不壓密快剪試驗(Q Test)

適合工程剛完成之土層短期穩定分析之用。可得 c 及 ϕ 值。

B.壓密快剪試驗(Qc Test)

適合工程已完成一段時間之土層水位急速洩降穩定分析之用。

可得 c 值及 ϕ 值。

C.壓密慢剪試驗(S Test)

適合工程已完成一段時間之土層長期穩定分析之用。可得 c' 及

ϕ' 值。

一般試驗將採用三組試體，在三種不同的正向應力下進行實驗，透過三種不同正向應力與求得之剪應力大小資料點，在直剪試驗中可求得兩組凝聚力與摩擦角，分別出現於最大強度及殘餘強度，進行回歸分析可求得該土體之破壞包絡線，根據破壞包絡線之定義可求得土體之凝聚力(Cohesion)與內摩擦角(Friction angle)。

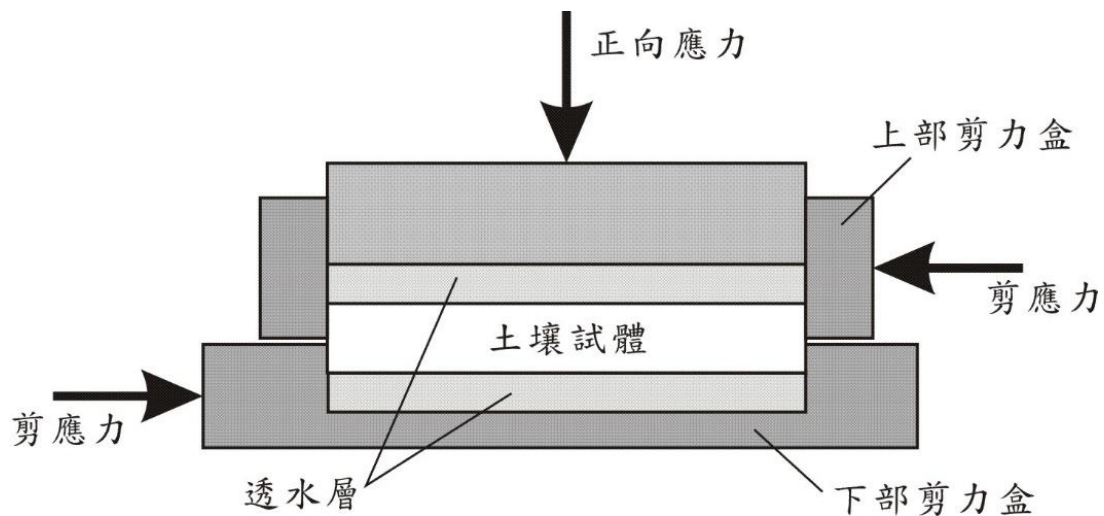


圖 2-4 直剪試驗受力圖

直剪試驗主要適用於求砂土之剪力強度，由於在進行直剪試驗時不易控制其土體之含水量及排水狀況，而對於細顆粒土壤之土壤剪力強度，含水量為其強度之重要因素，因此較不適用於求細顆粒土壤之剪力強度。

2. 三軸試驗(Method of Test for Triaxial Compression of Soils)

三軸試驗可較精確的求出土壤在不同狀況下之剪力強度，將土體修整為一圓柱試體，以不透水的橡皮膜包覆之，將其置於可加液壓的密閉桶中，並施以軸向壓力，該壓力經由一長棒加於試體頂蓋上，用以控制軸向應力差。

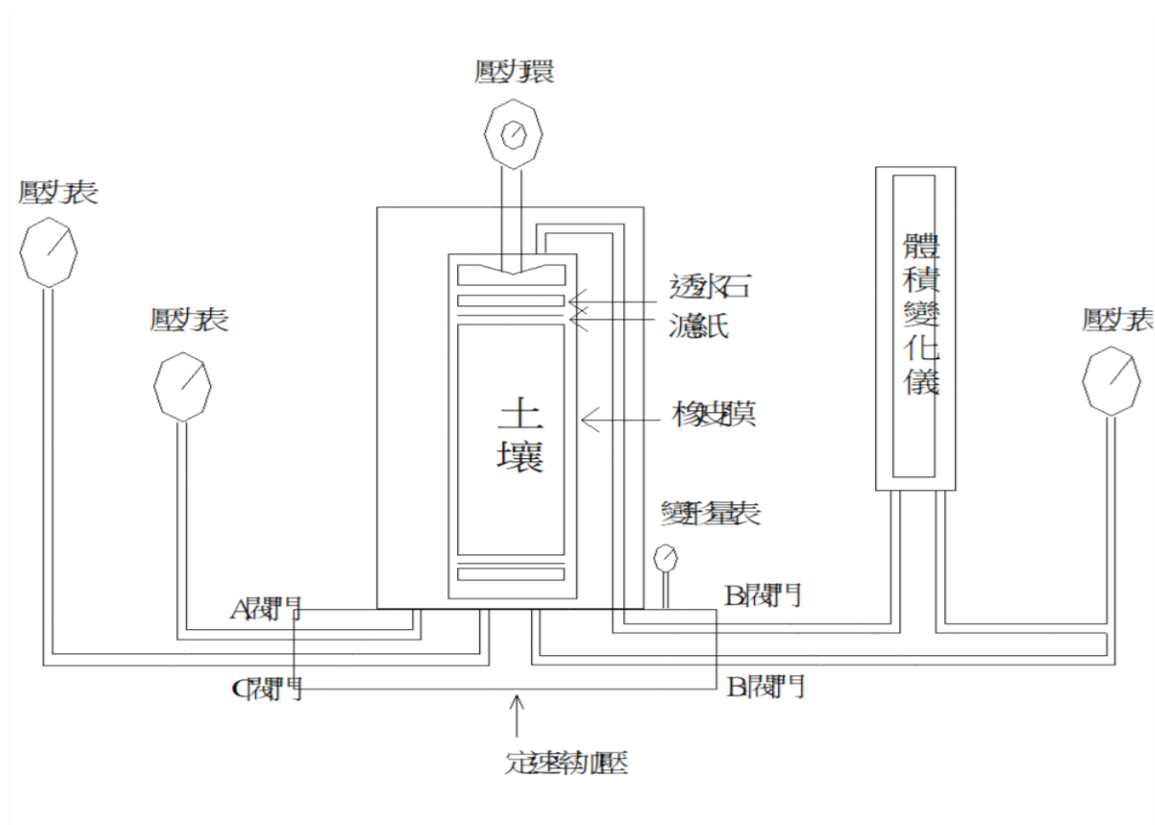


圖 2- 5 三軸壓縮試驗管線裝置圖

試驗時，作用壓力是分兩階段加上，首先，整個試體的三個軸向都受至液壓 σ_3 的作用，所以液壓 σ_3 又稱為包圍壓力(Confined Pressure)，然後，再加上軸差應力(Deviator Stress)，至試體剪壞為止。

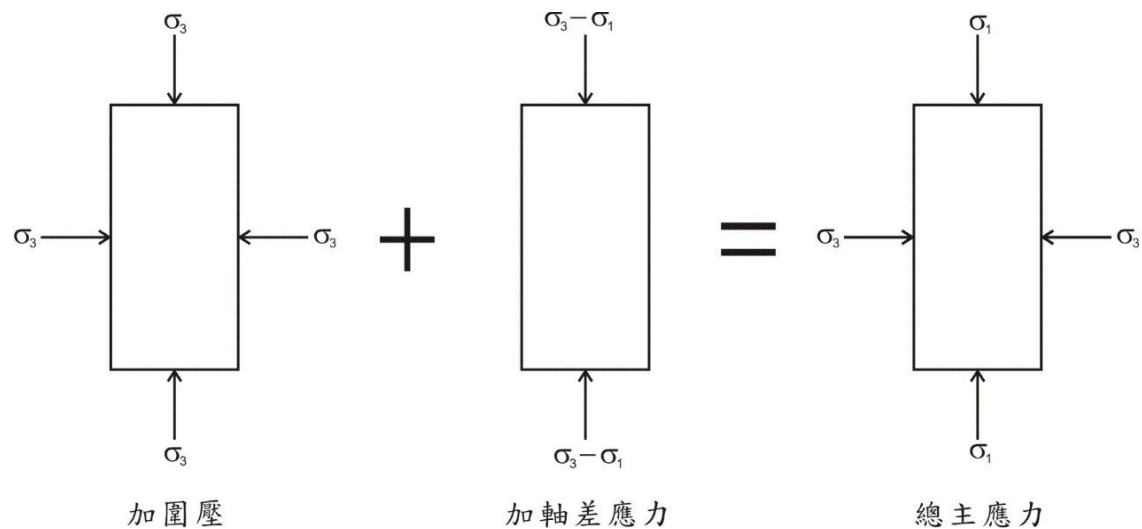


圖 2-6 三軸試驗作用壓力圖

三軸試驗根據壓密及排水狀況可區分出三種不同的實驗，其中排水與壓密的定義分別指在進行試驗時是否容許試體因為體積變化導致排水或是吸水，以及試體在剪動前是否經過壓密作用達到一定的應力與孔隙率。試驗種類列於下：

A. 不壓密不排水(Unconsolidated Undrained, UU)

在加圍壓與軸差應力作用時，皆不許孔隙內之水排除。若試體為飽和土樣時，則稱為飽和不壓密不排水三軸試驗(SUU Triaxial Test)。若試體為不飽和土樣，則稱為不飽和不壓密不排水三軸試驗(UUU Triaxial Test)。此種試驗考量土壤承受的壓密以及應力變化較為快速時，在這種狀況下土壤中的水份無法快速排出，所以在本類實驗過程中不改變土壤試體的含水狀況。

B. 壓密不排水(Consolidated Undraind, CU)

在圍壓作用時，使試體充份排水，超額孔隙水壓力為 0，在軸差應力作用時，不許孔隙內之水份排出。在本類實驗中，在預定的圍壓下讓土體有充分的時間進行壓密作用，然而在不排水情況下，剪動的速度較快，不給予土體排水的時間。

C. 壓密排水(Consolidated Drained, CD)

在圍壓及軸差應力作用階段，皆允許孔隙內之水份充分排出，每一階段均使孔隙水壓充分消散，以迄試驗破壞。在本類試驗中，土壤有充分的時間進行壓密，在預先給定的圍壓下進行壓密，由於要確定土體能完全的排水，因此剪動的速度必須相當緩慢，給予土體充分的時間進行排水。

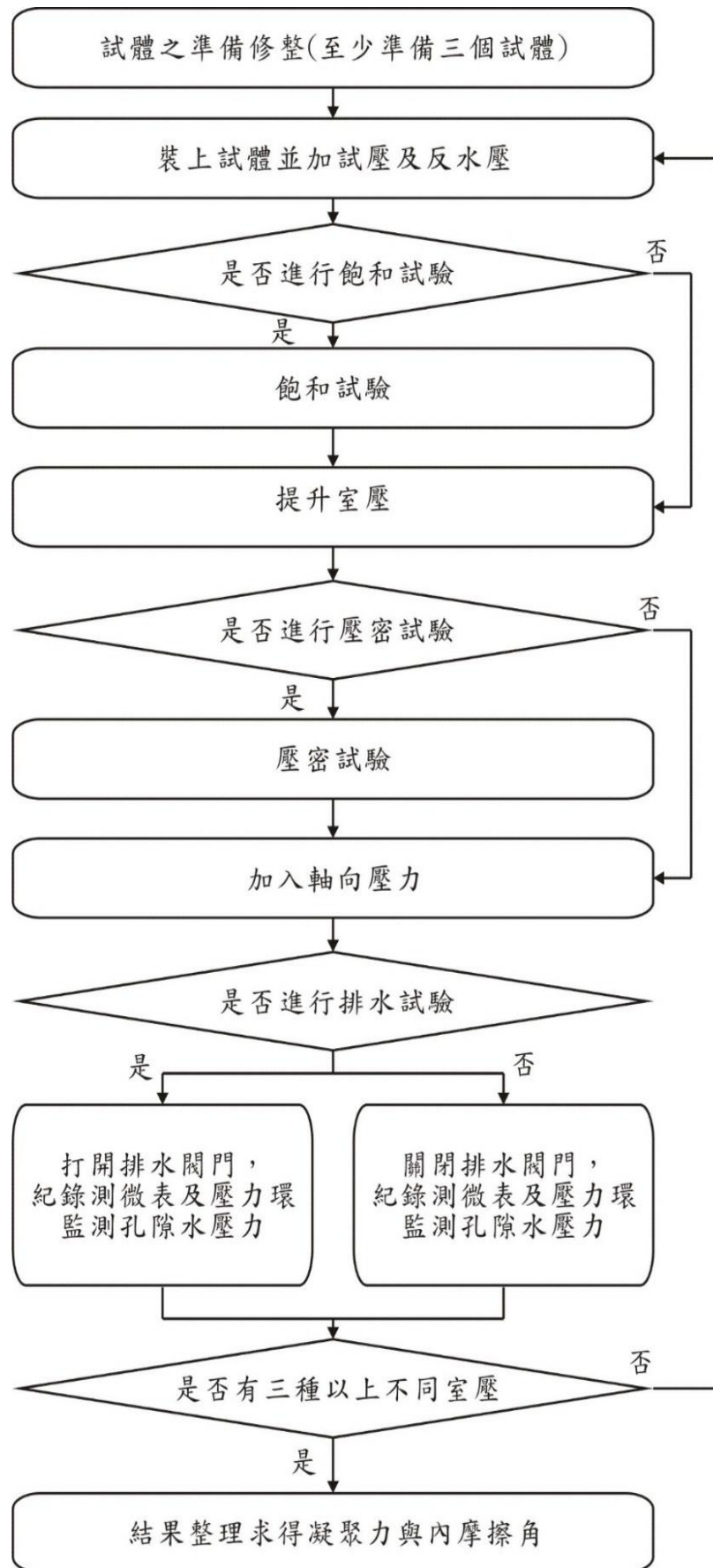


圖 2-7 三軸試驗流程圖

三、沖蝕啟動應力

1. 理論基礎

從力平衡之觀點，當水流作用土壤顆粒之運移能力大於土壤本身抵抗移動之抗沖蝕力時，平衡狀態受到破壞，使土壤顆粒/團粒脫離周圍土體開始移動，即發生沖蝕和土砂運移。在明渠流和坡面流中，前人研究分別以力平衡觀念，提出土壤沖蝕率或分散能力($\text{kg/m}^2/\text{s}$)與水土交界面造成的摩擦剪力(τ)關係式(Lick, 1982; Nearing et al., 1989)：

$$\text{明渠流： } E = M(\tau - \tau_c)^n$$

E = 土壤沖蝕率($\text{kg/m}^2/\text{s}$)， τ_c = 土壤沖刷臨界剪應力，表土壤之抗沖蝕能力(Pa)， M, n = 率定常數。

$$\text{坡面流： } D_c = K(\tau - \tau_c)$$

D_c = 土壤分離率($\text{kg/m}^2/\text{s}$)， τ_c = 土壤沖蝕臨界剪應力，表土壤之抗沖蝕能力(Pa)， K = 土壤可蝕性係數。上述兩公式皆從水流作用剪應力與土壤抗沖蝕力之抗衡作用推導沖蝕現象之發生，並推估沖蝕率(或土壤分離率)，唯因明渠及坡面流之流況及水力條件不同，其正向關係亦有差異。

在土砂傳輸中，土壤沖刷臨界剪應力(τ_c)為眾多計算河床載(推移載, bed load)與懸浮載(suspended load)之重要參數，前人研究雖已指出粗顆粒非黏性土砂之 τ_c 可由土砂代表粒徑計算，但土體之細顆粒含量與含水量則對非礫床為主土體之 τ_c 具影響力(Ravisangar et al., 2001; 2005; Wang and Sturm, 2016)，無法單由代

表粒徑估算。Nord and Esteves (2005) 提出 Plot Soil Erosion Model 2D (PSEM 2D)，考量入滲-逕流-沖蝕等三大物理過程，並發展坡面沖蝕物理模型；其沖蝕過程包括由降雨及坡面漫地流造成之土壤初次分離與再剝蝕，以及水層流動對非黏粒之鬆散層造成之土砂捲入與沉降等。

此模型可模擬非均勻微地形在降雨時之 Hortonian 漫地流、入滲與沖蝕情形並考慮土砂運移與地形變化之回饋關係；入滲模組使用 Green and Ampt 模型、漫地流模組使用平均水深之二維非穩定流方程式(Saint-Venant equations)，沖蝕模組結合懸浮載質量守恆與逕流分離-搬運等次模組，並以 Darcy-Weisbach 粗糙係數量化土體表面粗糙度。在沖蝕模組中，分別討論水流剪應力大於或小於土壤沖蝕臨界剪應力(τ_c)時之沖蝕情況(如圖 2-8 所示)，並計算其土砂沖蝕與運移量。因此，土壤沖蝕臨界剪應力為土砂顆粒在坡面漫地流與河川渠道流中土壤抗蝕能力之量化力學參數，可作為坡面沖蝕及土砂運移物理模型之重要考量因子，近年使用臨界剪應力概念之相關沖蝕模型及研究整理如表 2-1。

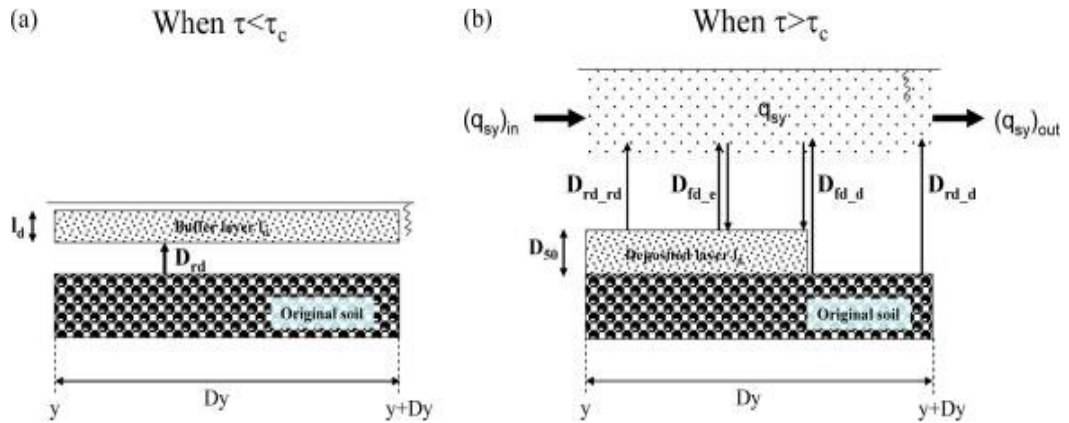


圖 2-8 當水流剪應力(a)小於(b)大於土壤顆粒之臨界剪應力之沖蝕過程；

D_{rd} = 土粒受雨滴衝擊之分離與重新分布率， D_{rd_d} = 雨滴造成之

土粒剝離原有土體率， D_{rd_rd} = 雨滴造成之沉積層土粒剝離率，

D_{fd_d} = 逕流造成之原土體土粒剝離/沉降比例， D_{fd_e} = 逕流造成之沉

積層土粒剝離/沉降比例 (資料來源：Nord and Esteves, 2005)。

表 2-1 近年使用臨界剪應力概念之相關沖蝕模型及研究

文獻	公式
Nord and Esteves, 2005; 2010 Plot Soil Erosion Model 2D (PSEM 2D)	$D_{fd_e} = K_r(\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{q_s}{T_c}\right) \varepsilon$
Romero et al., 2007	$D_c = K_r(\tau - \tau_c)$ $\tau_c = 2.65 + 6.5 \text{ clay} - 5.8 \text{ vfs}$
Zhang et al., 2008	$D_r = K_r(\tau - \tau_c) \left(1 - \frac{qc}{T_c}\right)$
Wang et al., 2013	$\tau_{cb} = 2.67 + 6.5 \text{ clay} - 5.8 \text{ vfs}$
Wang and Sturm, 2016	$E = M(\tau - \tau_c)^n$ $\hat{\tau}_c^* = 8.46 - 27.76w + 73.69\text{CSF} + 83.22(w \times \text{CSF})$

四、沖蝕啟動應力實驗

土砂沖蝕啟應力實驗擬以循環式矩型水工渠槽進行：渠槽長 10 公尺、寬 0.4 公尺、深 0.4 公尺，具可調式坡降螺桿，調整坡度範圍為 0%~5%；渠底為不鏽鋼材質，邊壁以強化玻離施作；於頭水箱整流板後 5 公尺之渠底設置圓型孔洞及油壓土樣推進器，並配有拉線式位移記錄器；設備照片如圖 2-9 所示。土砂沖蝕啟動實驗設備之流況參數率定，首先於槽底以 3.5mm 粒徑之礫石鋪面，增加槽底粗糙度，產生完全發展之紊流；再進行蓄水槽三角堰之堰口水深與流量之率定關係式；參考 Ravisangar (2001)和 Hobson (2008)進行礫石渠槽邊壁效應對粗糙係數影響之討論，並使用曼寧公式，經迭代法找出不同流量及底床坡度之正常水深，

擬定產生不同水流平均剪應力之坡度-流量-水深組合，作為實驗參考依據。



圖 2-9 土砂沖蝕啟動實驗設備整體側視照片

試驗開始前，將裝有土樣之鋼管插入槽底，並以土樣推進器將土面調整與周圍槽底齊平，放置保護蓋，調整流況。流況穩定後，打開保護蓋，將土樣上推 1 -2 mm 並開始試驗，操作者觀察土面之沖蝕情形，當土面與周圍槽底齊平時，即上推土樣，連接之電位訊號設備同時記錄土樣隨時間之變化位置，直至土樣完全被沖蝕或操作者無法清楚觀察沖蝕情形，即終止單場試驗。試驗時間依土樣抗蝕特性而異，延時範圍自 30 秒至幾小時不等。每場試驗記錄之資料包括：土樣之沖蝕深度、不同土層之含水量以換算土樣密度，以及隨時間變化之沖蝕率 E ($\text{kg/m}^2/\text{s}$)。

當不同設計流況之沖蝕試驗完成，將不同沖蝕力與測得之沖蝕

率 E 繪製資料散布圖，並以 MATLAB 程式撰寫之非線性最小方差優化技巧，高斯-牛頓演算法，進行資料擬合，獲得臨界剪應力(τ_c)及試驗參數(M, n)值，如圖 2-10 所示(Wang and Sturm, 2016)。

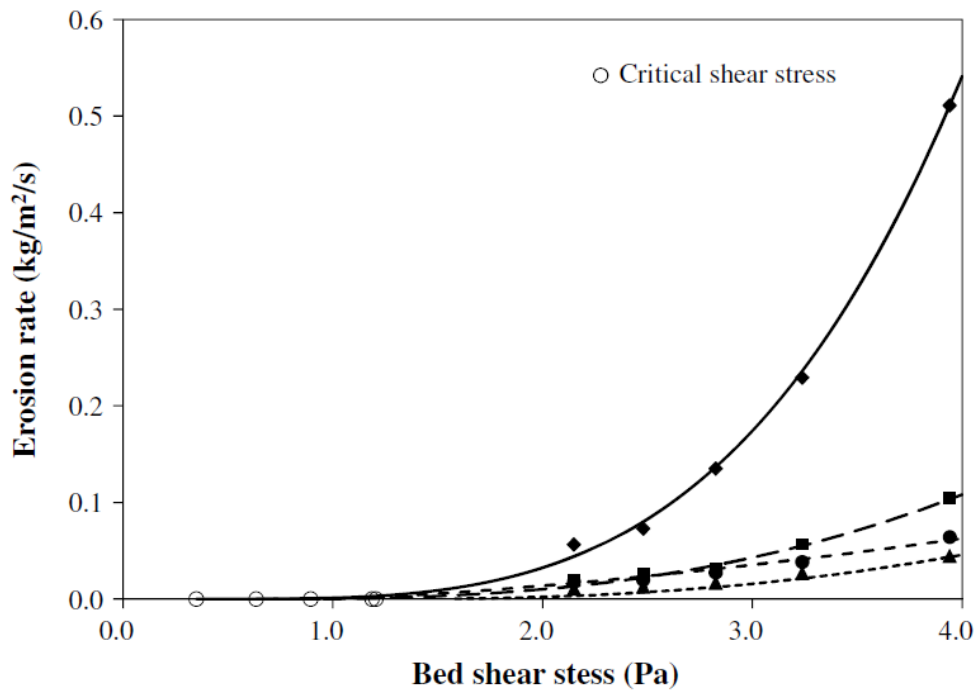


圖 2-10 以 40%高嶺土樣為例，試驗沖蝕率(Erosion rate)與底床剪應力(Bed shear stress)散布圖與非線性擬合結果(資料來源：Wang and Sturm, 2016)。

五、人工降雨沖蝕實驗

本研究預計進行降人工降雨沖蝕實驗，了解沖蝕量體與地形變化之關係，並且透過降雨延時及強度之調整，驗證模型所預測出來的沖蝕量之時間變異性。實驗設備由人工降雨降雨機、可變坡度土壤沖蝕平台，及雷射掃瞄裝置組成，如圖 2-11 所示。在降雨設備方面，初步實驗以 Eijkelkamp Agrisearch Equipment 所出產之針管式

人工降雨機，此模擬器所能涵蓋的試驗範圍為 30cmx30cm，其含有 49 個針頭，產生的降雨強度為 3mm/min，降雨延時為 3min，雨滴直徑為 5.9mm。為增加降雨延時，加設一固定水頭高之蓄水箱，並以水管連接儀器，使其降雨延時可以達到 30 分鐘。可變坡度土壤沖蝕平台如圖 2-12 所示，長 150 cm、寬 50 cm(分為各 25 cm 之雙槽體)、深 25 cm，其坡度調整範圍由為 0°至 30°；沖蝕槽體出口處及底部下方皆設置水砂收集箱，分別收集降雨沖蝕實驗坡面下游出口處及入滲之水砂。

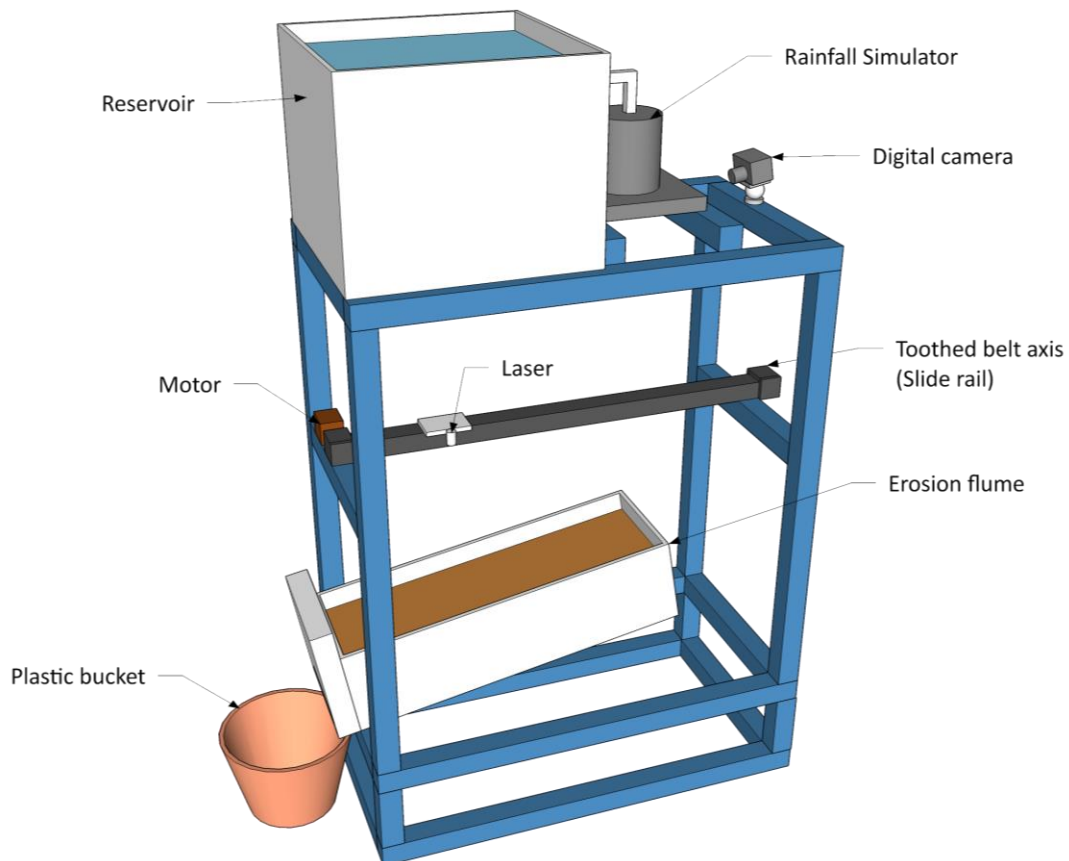


圖 2-11 人工降雨沖蝕實驗配置圖

(資料來源：Wang and Lai, 2018)



圖 2- 12 人工降雨沖蝕實驗設備-沖蝕平台

為獲得不同降雨強度之降雨情境，本研究將參考 Kibet et al. (2014) 之規劃流程進行建置，以壓力噴頭及抽水馬達製作人工降雨設備，流量計與壓力計之配置參考如圖 2- 13 所示。人工降雨機由壓力噴頭、蓄水箱、抽水馬達及管路組成，並在分流管路中設計不同尺寸球閥，

調節主流管流量，進而表現出 3 種不同降雨強度。使用之噴頭型號為美國 SPRAYING SYSTEMS 公司噴頭 50WSQ (2 顆)、馬達型號為大川抽水馬達(TP325 1HP)、噴頭高度為距地 290 公分、降雨強度率定組數為 3 組。人工降雨機之率定將考量雨滴粒徑分布、終端速度及降雨強度等項目。為在小尺度實驗重現現地之降雨情況，計算降雨強度與降雨均勻度指數(CuC)，評估降雨空間分布是否合理；並利用濾紙法測量雨滴粒徑分佈，以白努力方程式和連續方程式計算雨滴落下速率，進而透過動能公式計算雨滴落下動能，從中選擇適宜降雨強度大小作為本計畫之沖蝕降雨強度。

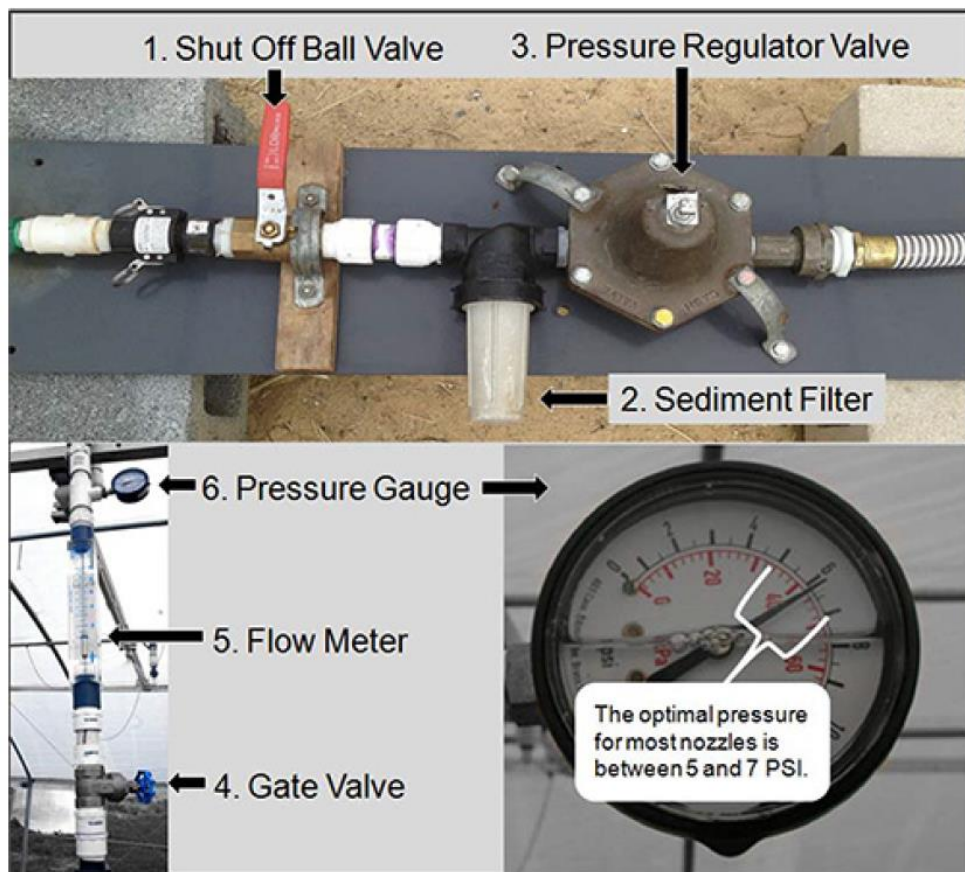


圖 2- 13 流量計與壓力計配置圖(資料來源：Kibet et al., 2014)

在沖蝕量之量測方面，本試驗將透過雷射地形掃描系統與攝影測量技術進行掃描，並且透過攝影機的觀測將會量測表面漫地流表面流速，最後於出流端收集沖蝕土樣進行土壤分析，了解遭沖蝕土壤之粒徑分布與預填於沖蝕盒內的土樣粒徑分布差異。在地形掃描的部分，本研究將會使用線性滑軌(圖 2-14)搭配雷射線移動，並且使用高解析度攝影機進行紀錄。透過拍攝掃描影片紀錄雷射線在地形上形成之曲線(圖 2-15)，進行影像的座標轉換將平面的影像資料轉換成地形高程資料，最後透過內差即可以得到數值地形資料。透過使用雷射掃描的技術可產出相當高精度(>1 mm)的地形資料，利用高精度的數值地形資料便可以詳細的紀錄所有因為沖蝕造成的土壤流失狀況。

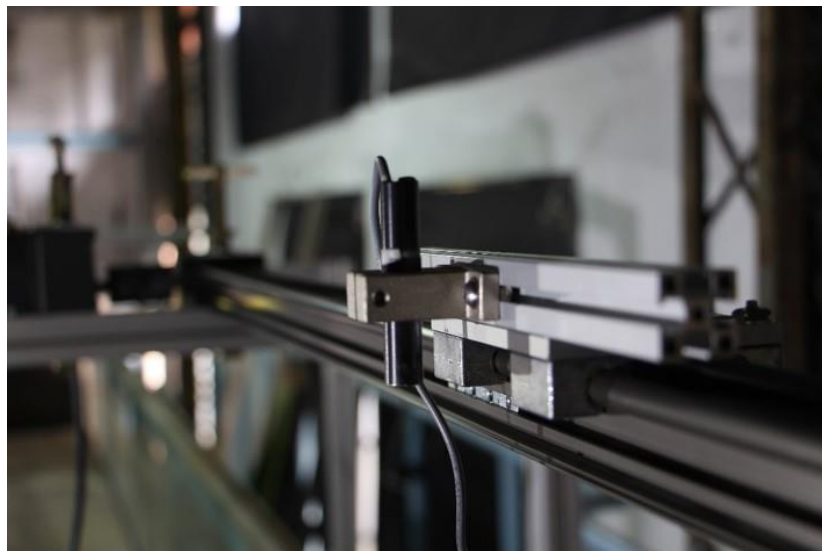


圖 2-14 線性雷射滑軌

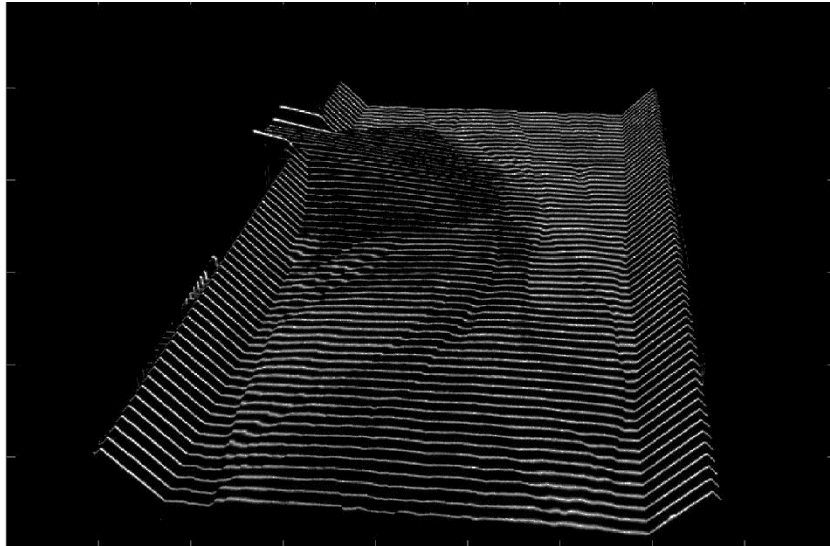


圖 2- 15 雷射曲線反應於地形資料

六、坡地土砂沖蝕系統動力模型

本計畫使用以系統動力學為基礎，建立之坡地土砂沖蝕模型，進行集水區坡地土砂沖蝕量體時變性動態評估。參考前人研究，以 WEPP model 和 Hairsine Rose model 之理論為基礎，考量坡面流之土砂沖蝕；上模型主要探討紋溝間(片/層流)沖蝕以及紋溝沖蝕兩大現象，考量降雨及坡面漫地流造成之土砂初次分離與再剝蝕，以及水層流動對原土砂表面和沉降之鬆散層造成的土砂捲入與沉降等過程，建立物理方程式並以系統動力學理論聯結各存量(土砂)與變量(沖蝕、沉積量)，進行動態評估；其基礎假設包括：

1. 將估算單元視為一均質空間，土層深度、質地、基礎物理及力學等特性皆相同。
2. 紋溝間與紋溝之水理方程式，以質量平衡及動量平衡為主，考慮之水量變化因素為降雨及入滲，其差值則為逕流量；動量平衡式中假設底床/表面坡度與能量坡降相同。

3. 將水流及土砂之時間變化納入考量，為不穩態(unsteady state)/動態(dynamic)模型。
4. 紋溝發生於均質土砂表面，且紋溝互相平行，且其形狀皆可能被歸類為梯形、三角形或四方形其中一者。
5. 單場降雨事件中，紋溝密度以單位寬度之平均值代表。
6. 單場降雨事件中，假設紋溝網絡之變化可忽略，不考慮紋溝之發展進程及紋溝形貌之變化。
7. 將被沖蝕之土砂分為自原土砂表面(具黏性)及沖蝕後沉積形成之鬆散層(不具黏性)。
8. 降雨與逕流造成之土砂分離、捲入、沉積等過程，亦分為原土砂表面及鬆散層兩方部分討論。

此模型之主要控制方程式分為水理及坡地土砂運移方程式。水理方程式以 Saint-Venant 方程式之質量平衡式進行簡化，不考慮水深及流速之橫向(y 方向)變化，轉為一維，但考量降雨及入滲之變化；並將動量方程式中底床/表面坡度與能量坡降設為相等，如下式：

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = R - I$$

$$S_0 = S_f$$

其中， h = 水深(m)； R = 降雨強度(ms^{-1})； I = 入滲率(ms^{-1})； u = x 方向(縱向)流速(ms^{-1})； t = 時間(s)。上式中， $q = uh$ ，若降雨強度及入滲率相等，則該式化為運動波方程式。

坡地土砂運移方程式中，採用 Foster 公式與 Hairsine-Rose 公式中之土砂載量 q_s ，並令 $q_s = C_s q$ ，以土砂(重量)總濃度 $C_s(\text{kg m}^{-3})$ 為變量，則為 Hairsine-Rose 公式之左項 $\frac{\partial(C_s h)}{\partial t} + \frac{\partial(C_s q)}{\partial x}$ ，將發生於紋溝及紋

溝間之雨滴土砂分散、再分散，逕流土砂運輸率、再運輸，與沉積率等現象分別討論，以下式描述，作為坡地土砂沖蝕模型之主要控制方程式：

$$\frac{\partial(C_s h)}{\partial t} + \frac{\partial(C_s q)}{\partial x} = D_r + D_i = D_s + D_{ds} + D_f + D_{df} - D_p$$

其中， D_s = 紋溝與紋溝間雨滴土砂分散率($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)； D_{ds} = 紋溝與紋溝間雨滴土砂再分散率($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)； D_f = 紋溝與紋溝間逕流土砂運輸率($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)； D_{df} = 紋溝與紋溝間逕流土砂再運輸率($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)； D_p = 紋溝與紋溝間沉積率($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。

將上述方程式以系統動力學理論及其建模軟體，聯結各沖蝕過程及其物理方程式，建置之坡地土砂沖蝕系統動力學模型如所示，以實驗資料進行模型參數率定及驗試，並使用現地試區調查資料，進行案例分析，進行裸露坡面土砂沖蝕之模擬與評估。

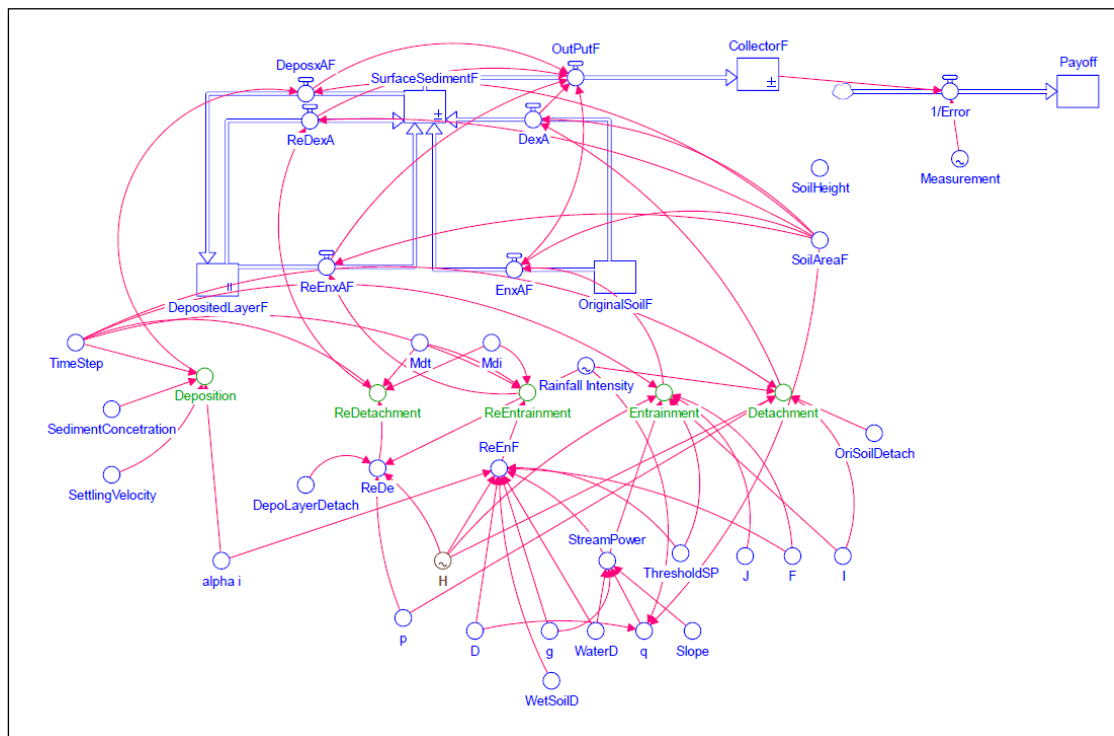


圖 2- 16 坡地土砂沖蝕系統動力學模型系統概念圖

第二節 工作執行步驟

本研究計畫進行步驟如下：

1. 國內外相關文獻與現地試區地形、氣象資料收集
2. 土壤物理特性實驗分析，包含物理特性及力學特性
3. 土壤沖蝕啟動應力實驗
4. 人工降雨設備建置及人工降雨沖蝕實驗
5. 沖蝕地形掃描與沖蝕量量化關係式建立
6. 坡地土砂沖蝕系統動力模型建立、參數率定與驗證
7. 現地試區坡面沖蝕模擬與評估
8. 提出本計畫成果之應用及貢獻，撰寫並發表學術論文及研究計畫成果報告書

第三章 工作進度與交付項目

第一節 計畫甘特圖

本計畫設定工作期限為自 107 年 2 月 9 日起至民國 107 年 12 月 31 日止，重要工項目列述如下，預定工作進度與執行進度如表 3-1 所示：

1. 文獻收集和實驗設計，完成度 100%。
2. 土壤特性實驗，完成度 100%。
 - (1) 物理特性實驗，分項完成度 100%。
 - (2) 力學特性實驗，分項完成度 100%。
3. 沖蝕實驗及量化關係建立，完成度 100%。
 - (1) 沖蝕啟動應力實驗，分項完成度 100%。
 - (2) 人工降雨沖蝕實驗，分項完成度 100%。
 - (3) 地形掃描與沖蝕量體量化關係式建立，分項完成度 100%。
4. 土砂沖蝕系統動力模型參數率定與驗證，完成度 100%。
5. 現地試區案例分析及應用，完成度 100%。
 - (1) 現地試區環境、地形變化、氣象監測等資料調查與收集，分項完成度 100%。
 - (2) 現地試區坡面沖蝕模擬與評估，分項完成度 100%。

6. 計畫成果彙整、計畫成果報告書與期刊論文撰寫與發表，完成度 100%。

說明：研究成果之發表包括：

(1) 國際研討會海報展出 1 篇

Yunh-Chieh Wang and Ming-Che Liu*, 2018, Evaluation of bed shear stress for cohesive sediments erosion- comparison between the Reach-averaged method and the “Law of the wall” method, *Japan Geoscience Union Meeting 2018 20th~24th May*, Makuhari Messe, Chiba, Japan.

(2) 學術 SCI 期刊 1 篇

Yung-Chieh Wang*, Chun-Chen Lai, 2018 (July), Evaluating the Erosion Process from a Single-Stripe Laser-Scanned Topography: A Laboratory Case Study, 10(7), 956, *Water (SCI)*. doi:10.3390/w10070956

(3) 國際學術雜誌報導專訪 1 篇

Wang, Yung-Chieh, 2018 (Nov.) Construction of a Process-Based Physical Model for Soil Erosion on Slope land, including follow up project funded by Soil and Water Conservation Bureau. *Impact*, Volume 2018, Number 8, November 2018, pp. 72-74(3). Publisher: Science Impact Ltd. DOI: <https://doi.org/10.21820/23987073.2018.8.72>

表 3-1 計畫甘特圖

工作項目	工作 比重	年 月	2018年											
			2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
文獻收集和實驗設計	10%	計畫進度												完成度： 100%
		實際進度												
土壤特性實驗	10%	計畫進度												100%
		實際進度												
沖蝕實驗及量化關係建立	25%	計畫進度												100%
		實際進度												
模型率定、驗證及精進	20%	計畫進度												100%
		實際進度												
現地案例分析及應用	20%	計畫進度												100%
		實際進度												
計畫成果彙整展示	15%	計畫進度												100%
		實際進度												

第二節 計畫交付項目

一、工作項目

(一)土壤特性、土壤力學、沖蝕啟動應力、和人工降雨沖蝕等室內實驗：

1. 收集國內外相關實驗文獻，設計室內實驗模型。
2. 土壤特性實驗：粒徑分析、比重、塑性限度和液性限度。
3. 土壤力學實驗：直剪試驗、三軸應力試驗。
4. 沖蝕啟動應力實驗：以明渠水槽進行採樣土體不同含水狀態(或密度)之沖蝕啟動臨界值，作為沖蝕動態模型重要輸入參數。
5. 人工降雨沖蝕實驗：以人工降雨設備和沖蝕平台搭配不同坡度與土壤，模擬集水區不同坡面性質，進行土砂沖蝕實驗，配合雷射地形掃描分析沖蝕地形起伏變化與沖蝕量體關係，並且分析各因子與沖蝕量時間上之變化關係，用以驗證模型。

(二)坡地土砂沖蝕系統動力學模型參數率定與精進：

1. 彙整理論模型結果，透過室內實驗資料率定模型所需參數。
2. 進行模型參數敏感度分析。
3. 建立地形掃描與沖蝕量體之量化關係式。
4. 以實驗之量化關係式進行模型修正與精進。

(三)案例分析與應用-集水區土砂沖蝕量體動態評估：

1. 收集現地集水區之氣象監測、坡地土砂物理及力學特性等調查資料。
2. 進行集水區土砂沖蝕動態模擬，並與歷史豪雨事件所引起之土壤流失量體與文獻值進行比較分析。
3. 研析動態模擬結果，開發豪雨期間集水區坡地土砂沖蝕量體評估方式。
4. 彙整計畫成果，撰寫計畫成果報告書，並發表期刊論文。

二、計畫成果

(一)產生之學術成就包括：

1. 完成土壤特性、土壤力學、沖蝕啟動應力、和人工降雨沖蝕等實驗，獲得實驗結果資料。
2. 完成坡地土砂沖蝕系統動力學模型參數率定。
3. 完成模型參數敏感度分析。
4. 提出地形掃描與沖蝕量體之量化關係式。
5. 完成坡地土砂沖蝕系統動力學模型修正與精進。
6. 完成集水區土砂沖蝕量體動態評估之案例分析與應用。
7. 完成豪雨期間集水區坡地土砂沖蝕量體動態評估方式之開發。
8. 完成「集水區坡地土砂沖蝕量體動態評估研究」之計畫成果報告。

9. 完成國內/國際相關學術研討會論文至少 1 篇。

10. 完成相關學術期刊論文至少 1 篇。

(二)產生之科技創新為：

1. 以系統動力學理論開發豪雨期間集水區坡地土砂沖蝕量體動態評估方式。

(三)產生之社會制度效益為：

1. 提出豪雨期間集水區坡地土砂沖蝕量體之動態評估方式，以推估短時間內土砂量體運移之變化，未來可回饋於災害風險評估及預警系統，作為應變對策擬定之參考依據，提升國民災害防範及安全評估能力。

第四章 計畫成果

第一節 相關文獻回顧

一、土壤沖蝕室內實驗

土壤沖蝕實驗，依其沖蝕驅動力可分為逕流和降雨兩大類型。以逕流進行土壤沖蝕實驗者如 Zhang et al. (2014)和 Shen et al. (2015)，實驗配置如圖 4-1 所示；其實驗藉由馬達將水由上方引入沖蝕槽中，進行土壤沖蝕實驗，沖蝕流量由水管閥門調控。降雨之土壤沖蝕實驗在現地中以觀察天然降雨造成之土壤流失情形為主，但因天然降雨時間隨機難以觀測，且各項變因難以人為控制；前人研究多採用人工降雨模擬機，將現地條件單純化，並改為室內沖蝕模擬實驗，透過人工降雨機可對實驗的各項參數進行調整。人工降雨模擬機按其雨滴形成方式分為四種類型，即噴頭式、噴灑式、懸線式、和針頭式(代肖等人，2012)，最常見為噴頭式和針頭式。噴頭式降雨由噴頭將水流分散成大小不同之水滴，可藉由不同壓力施予和噴頭類型改變降雨強度，如 Aksoy et al. (2012)所建置之設備(圖 4-2)，由馬達將加壓的水流導入噴頭中，使水流分散成噴霧狀形成降雨，並同時使用數個噴頭以達到均勻降雨。針頭式降雨則為水滴透過針頭末端自由降落，初始降落速度為零。

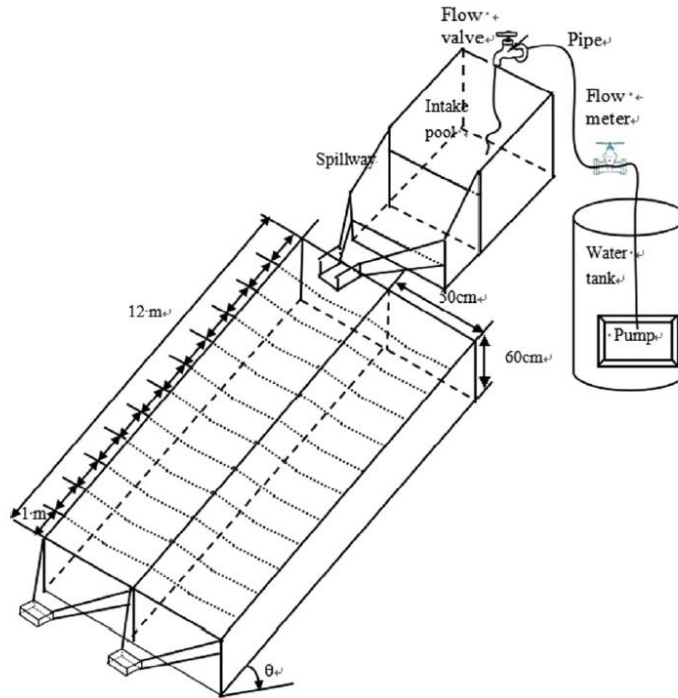


圖 4- 1 逕流沖蝕設備 (資料來源：Zhang et al., 2014)

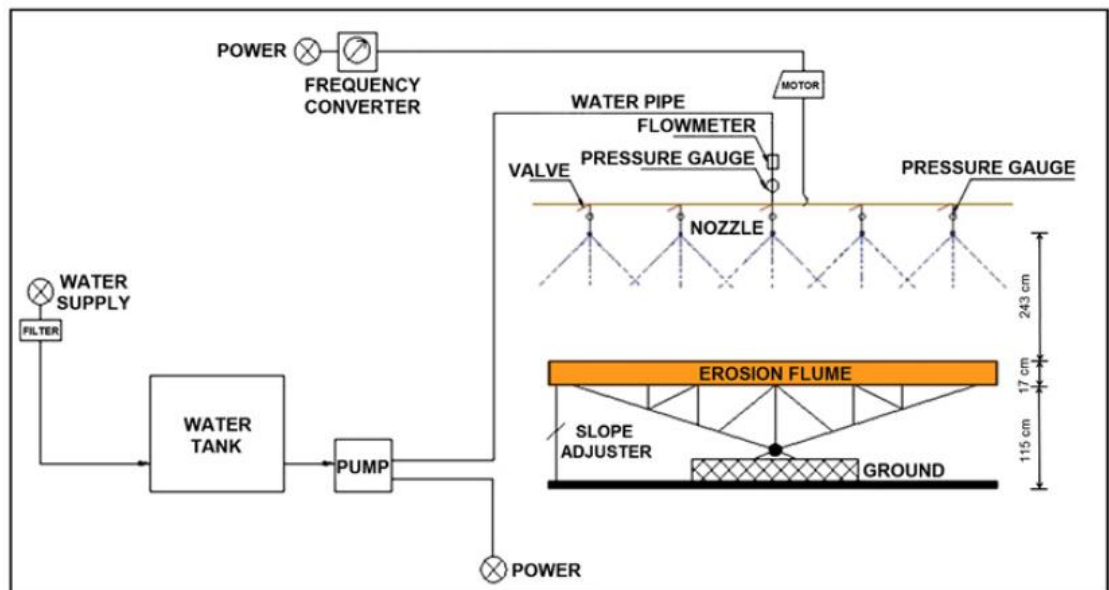


圖 4- 2 降雨沖蝕設備 (資料來源：Aksoy et al., 2012)

在前人研究中，沖蝕槽尺寸大小不一，從最大的 12 公尺長(Zhang et al., 2014)到最小的 1 公尺長(Berger et al., 2010)皆有。其中，實驗使用之沖蝕土槽多可調整坡度(一維方向)，以便地形坡度變因之調控；

而二維方向之坡度調整土槽在 Aksoy et al. (2012)的研究中使用。土槽的設計，若需要模擬自然環境之排水特性，則在底部開小孔，以利入滲流出(Shen et al., 2016)。沖蝕槽內土壤的填充多採分層填入方式，填入固定厚度之土壤，進行壓密，以維持土體密度之均勻性；在著重於紋溝沖蝕之實驗中，靠近沖蝕槽邊壁之土層則略高於槽體中間，以利水流向中央線匯集，並降低邊壁效應(Chen et al., 2016)。為維持土壤臨前含水量之均質條件，前人研究中，可將土壤從下方的排水系統毛細作用吸水濕潤(Mahmoodabadi et al., 2014b)，或將土壤由降雨模擬機，進行一較小強度的預先降雨，靜至一天後，作為沖蝕實驗之起始條件(Chen et al., 2016)。

在天然降雨中，雨滴降落到地表時皆達其終端速度，而雨滴速度影響降雨動能，即土壤沖蝕之驅動力。故在人工降雨機之設計中，降雨高度為影響雨滴掉落在土壤表面之衝擊速度的重要參數，並直接影響人工降雨產生之降雨動能及沖蝕驅動力；前人文獻中，降雨高度之設計從 21 m (Zhang et al., 2016)到 1.2 m (Nolan et al., 1997)者皆有。因降雨高度需配合上雨滴初始速度才可判斷雨滴是否達到終端速度，為彌補降雨高度之不足，多數實驗室之人工降雨機以加壓噴頭之方式增加雨滴初始速度。

人工降雨機之建置與參數率定在 Aksoy et al. (2012)的研究中詳細討論，此研究說明實驗室內建置人工降雨模擬機，以便進行降雨造成之入滲及土壤流失現象之模擬，提出人工降雨機具與自然降雨之相似特性且具降雨事件之重現性，使降雨參數可作為實驗之控制變因。在此研究中，以降雨強度與地形坡度為變因，將降雨強度分為 45、65、85 和 105 mm/hr 進行研究；每一降雨強度使用不同型號之噴頭與排列間距獲得，以控制每場降雨皆產生相同之均勻度，搭配縱向及橫向

之坡度變化(共十種坡度組合)，共進行四十種降雨強度-坡度組合之實驗。然 Aksoy et al. (2012)研究之主要目標為討論所建置之降雨模擬器對自然降雨之重現能力，從降雨均勻度、雨滴粒徑、終端速度以及降雨動能等四個面向與前人文獻值進行比較，提出其降雨模擬器之結果與天然降雨相符，以作為後續沖蝕實驗使用。

Shen et al. (2016)之研究探討降雨強度和坡度對坡面上紋溝沖蝕過程的影響，與各項水理變因與沖蝕之關係。此研究以室內實驗進行，使用底部設直徑 2cm 排水孔之沖蝕土槽，土樣之裝填分為三層，最下層填入 5cm 之砂粒使其自由排水，再填入密度較高(1.35 g/cm^3)之犁底層，最後在土表填入密度低(1.10 g/cm^3)之耕作層，以模擬現地坡地農田。沖蝕實驗前先以 30mmhr^{-1} 強度之降雨進行預濕，直到坡面產生逕流為止，預降雨時間約為 25 min，以控制相同之土壤臨前含水量作為每次實驗之初始條件。Shen et al. (2016)之研究結果指出降雨強度對土壤沖蝕和紋溝沖蝕的影響比坡度大，紋溝流速和河川功率為與紋溝沖蝕最相關之參數。

Jomaa et al. (2010)之研究以沖蝕槽實驗配置探討雨濺沖蝕和土槽橫向(相對於逕流流向)寬度之影響，並藉由實驗結果評估一維 Hairsine-Rose model (H-R model)的精確度；其沖蝕槽設計如圖 4-3 所示，有不同槽體寬度作為變因，且 Flume 4 的收集處略偏離中心線，以評估邊界效應之影響。Jomaa et al. (2010)之研究指出 H-R model 可有效預測總土砂濃度，也可預測細顆粒和中等粒徑之土砂濃度，但對於較為狹窄之沖蝕槽(閥值與飛濺長度有關)，無法有效應用；且本實驗中的四種沖蝕槽中大粒徑之預測皆不理想。雨濺沖蝕為逕流剛產生之短延時內的主要主導因素，流場之不平衡對大粒徑土砂造成顯著的影響。

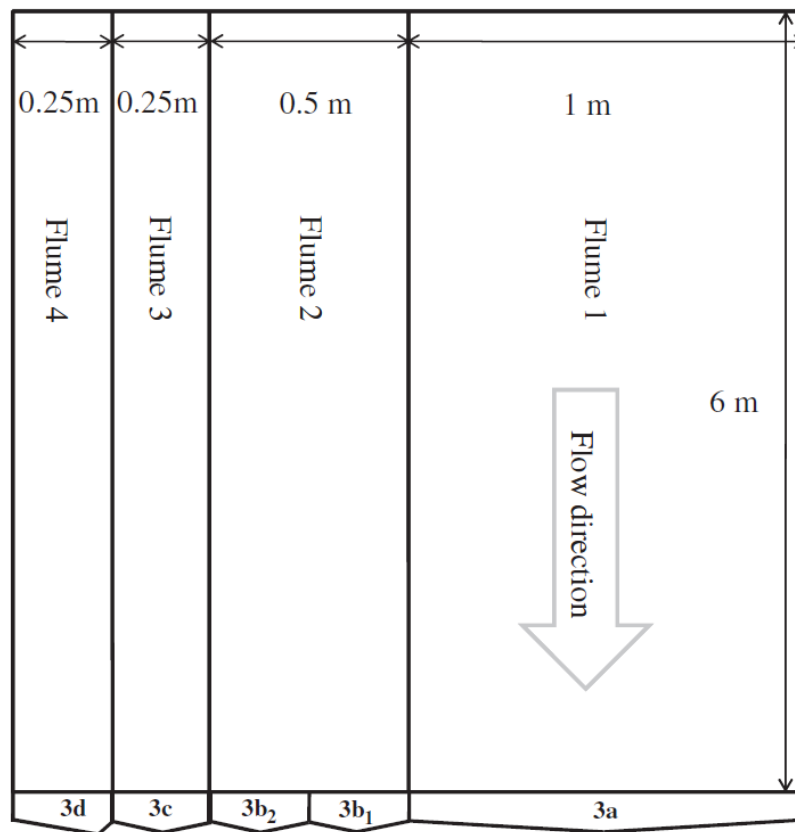


圖 4- 3 Jomaa et al. (2010)的沖蝕槽設置(資料來源：Jomaa et al., 2010)

Nciizah and Wakindiki (2014)之研究探討降雨模型對表土結殼強度、穩態時之入滲率，與土壤沖蝕之關係。其沖蝕土槽之設計如圖 4-4 所示，降雨模擬機使用 Eijkelkamp Equipment (Giesbeck, Netherlands) 公司生產之 LUW 6987 ZG 型人工降雨機，實驗結果顯示間歇性暴雨會導致較高的結殼強度，降雨模型、土壤質地與礦物對土壤沖蝕之影響不顯著。穩態時之入滲率受石英等主要礦物的影響而降低，而黏土和高嶺土則使結殼減少並增加穩態時之入滲率。

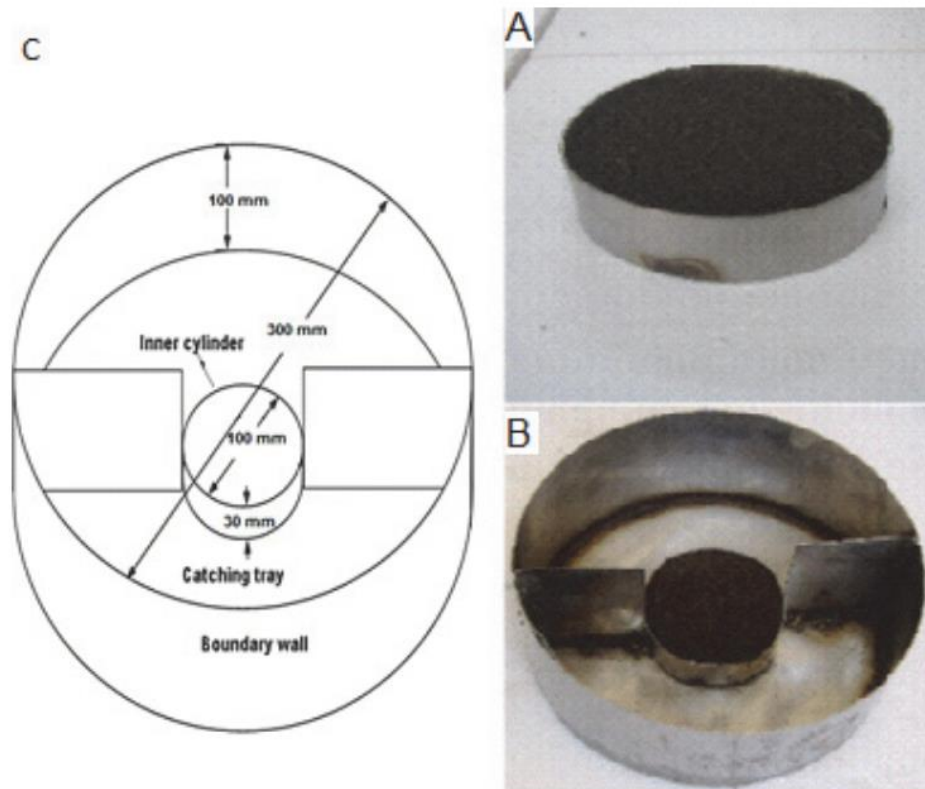


圖 4- 4 Nciizah and Wakindiki (2014)使用之沖蝕土槽(資料來源：
Nciizah and Wakindiki, 2014)

二、土壤沖蝕現地調查與試區實驗

土壤沖蝕之現地調查與試區實驗之相關研究眾多，包含觀察自然降雨及逕流之沖蝕現象及現地試區之人工降雨沖蝕測量等研究。Brathès et al. (2000)之研究對貝寧、喀麥隆、墨西哥等三個熱帶地區，進行現地規模的逕流對表土沖蝕之影響，比較在自然降雨下，表層土壤(0-10 cm)的團粒穩定性與逕流地區(約 100-1000 m²)之沖蝕情形。在貝寧、喀麥隆和墨西哥等地區規劃十四研究樣區，測量三年的逕流和土壤流失量；所有樣區均為草本植被、坡度適中，但在氣候條件(年降水量為 400 mm-1600 mm)、土壤類型(砂質黏壤土 Nitosol、壤土砂 Ferralsol、壤土 Regosol)和管理措施(從熱帶草原到長時間的板犁)等皆不同。樣區土壤採回後以通過 2 mm 篩網之風乾土樣浸入水中進行濕

篩，測量團粒穩定性。測量結果指出，當耕作時間和強度增加，與土壤表層覆蓋度下降時，平均年逕流量和土壤流失量普遍增加，而穩定的大團聚體(> 0.2 mm)比例下降。十四樣區中，逕流和土壤流失與團粒穩定性密切相關；除團粒穩定性外，另考量坡度和氣候對土壤沖蝕之相關性。Brathès et al. (2000)在研究中指出，泥化為乾燥土壤浸泡時發生之現象，是團粒崩解的主要機制，對逕流和沖蝕有具顯著影響。因此表層土壤團聚體的穩定性可作為是適當坡度、草地植被之土壤流失和沖蝕情形之指標。此外，長期耕地中逕流造成之土壤流失通常大於短期耕地或未耕地，且單作耕地之土壤流失量比混合作物耕地者大；施加礦物肥料之地區，因植被覆蓋度較高，逕流及土壤流失一般比沒有施肥的地區要小。

Eltner et al. (2013) 之研究以無人機(UAV)圖像數據和地面雷射掃描(TLS)進行非侵入性的現場測量，以探討土壤沖蝕的複雜過程。該研究選定兩個研究區域(西班牙塞維利亞附近的安達盧西亞泥灰岩地區和靠近德國 öbeln 的薩克森黃土地區)，使用整合 GPS、慣性測量單元(IMU)，和常規小型攝像機等裝置之無人機，測量範圍為 500 m² 之土壤表面的高精度數字地形模型(DTM)。為比較不同時間的土壤表面，並對無人機和 TLS 數據進行座標校正，利用全測站建立符合當地適用的座標系統與參考座標。該研究使用兩個圖像處理軟體將無人機拍攝之圖像生成 DTM，並與 TLS 獲得之相對 DTM 比較。點雲之差距最小為 6 mm，符合 TLS 之精度範圍。研究分析多時間之 DTM 比較，觀察土壤表面變化，結果指出，無人機和高分辨率 TLS 數據可應用於大範圍區域之土壤沖蝕定量測量。

在楊啟見等人(2016)之研究中，探討泥岩風化層的水力沖蝕過程；利用樣區採集之土樣，模擬地表逕流沖蝕，配合地面三維雷射儀繪製

隨時間變化之沖蝕過程並測量沖蝕量。該研究之土樣分為兩類：有泥裂(當水分受到蒸發作用離開黏土孔隙時，泥岩表層會因為乾燥脫水而收縮形成泥裂)與無泥裂；目的在於比較泥岩邊坡微地形對於土壤沖蝕及其速率的影響。研究結果顯示，泥岩風化層水力沖蝕現象依照沖蝕型態與沖蝕量變化可分為四個階段，即片狀沖蝕期、紋溝沖蝕期、崩塌期和穩定期。片狀沖蝕前期的體積流失並非由逕流造成，而是泥岩吸水崩解所致，泥裂在沖蝕前期即是薄膜流匯集和水分下滲的通道，並逐漸形成紋溝，故不能忽視泥裂或地表微地形在土壤沖蝕過程的重要性。

Prosdociami et al. (2017)進行現地試區之人工降雨機沖蝕研究，應用運動回復結構(Structure from Motion, SfM)攝影技術測量分析地中海葡萄園中的土壤沖蝕。此研究之目標為模擬量化暴雨造成的土壤流失，以人工降雨機模擬降雨事件，使用 SfM 建立之數值高程模型(DEM)進行分析。實驗位於西班牙東部典型地中海葡萄園，SfM 數據由反射式攝像機和智慧型手機內置攝像機取得；並比較從反射照相機和智慧型手機獲得相片，再以 SfM 技術換算出之 DEM，在估計土壤流失量的準確性及應用性。研究結果指出用基於地表高程變化之方法估算土壤流失量需考慮研究區域內之沉積物連通性，以提高土壤流失量估算之準確度；智慧型手機內置相機可產生與反射式相機相同的效果，提供 SfM 之應用價值。在此研究中，SfM 被證實是量化農地土地地形變化的有用方法，提供足夠精細的尺度，故栽種者(農民)可使用智慧型手機拍攝照片，回傳給研究人員進行分析，使其簡單監測耕地表土之變化。

三、土壤沖蝕模型

根據模型建置之原理與方式，土壤沖蝕模型可概分為經驗式模型

和物理式模型，目前台灣水土保持應用上之土壤侵蝕預測模型以經驗模型，如 Wischmeier and Smith 提出之通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)(Wischmeier and Smith, 1965)和其修正公式為主流。USLE 由標準試區發展而來，每個小試區條件為長 22.13m，坡度 9%之斜坡，其坡面上保持連續二年以上休耕和裸露，而且採上下耕犁方式來量測土壤流失量(林俐玲和林文英, 2008)。根據紋溝間沖蝕和紋溝沖蝕之原理及泥沙遞移的動力機制建立之修正通用土壤流失公式(Reversed Universal Soil Loss Equation, RUSL)，在林俐玲和陳品岡(2010)提到：「相較於通用土壤流失公式，各個因數不再是各自獨立，而是互相關聯且彼此影響的，也因此需將各種資料輸入資料庫中，如城市(City Database)、作物(Crop Database)和田間操作(Operation Database)等資料庫，再使用電腦軟體進行運算。」。

物理模型如美國農業部(U.S. Department of Agriculture, USDA)所發展的土壤沖蝕推估模型，WEPP(Water Erosion Prediction Project)模型，其具有物理之理論基礎，相關的計算公式都已經建置於程式中，當使用模型所輸入的參數值即導入程式運算。WEPP 模型將坡面沖蝕分為細溝和細溝間土壤沖蝕兩部分，且可以模擬單場暴雨或是連續暴雨所產生的土壤沖蝕量。前人研究中，進行 USLE 類型之模型與 WEPP 模型對土壤沖蝕評估效能之研究，如 Tiwari et al. (2000)和 Kinnell (2017)。Tiwari et al. (2000)之研究提出 WEPP 模型依據自然物理過程所設計，包含水力、自然植物、土壤物理和沖蝕機械動能等，使此模型具適應地形、土壤性質、種植和管理、沉積物分離和沈積的空間和時間變異性的優點，WEPP 模型之效率雖稍低於 USLE 和 RUSLE，但可歸因於實證模型的再修正和站點的輸入參數的校正。在此研究中，WEPP 與 USLE 和 RUSLE 之比較利用美國二十個自然逕

流地區，超過 1600 筆資料進行，選定之區域在土壤、坡長、坡度、氣候和管理措施上具顯著差異。結果指出 WEPP 模型在平均土壤流失量高的地區擁有較高的模型效率；經適當之參數率定後，WEPP 模型可提供更明確的土壤沖蝕時間和地點，使土砂保護措施設計更加精確。Kinnell (2017)進行 USLE-M、RUSLE2，和 WEPP 模型在裸露邊坡土壤流失評估之應用比較，提出三種模型對於單一事件土壤流失量推估之效能與限制。

以 Hairsine-Rose model 方程式為基礎之 GUEST 模型亦屬物理模型，其主要特點為降雨和逕流造成之沖蝕沉積作用會同時交互影響。在 GUEST 模型中，將土壤沖蝕過程分為降雨分散(rainfall detachment)、降雨重新分散(rainfall re-detachment)、逕流捲起(flow entrainment)、逕流重新捲起(flow entrainment)、土砂沉澱(sediment deposition)等五個參數進行分析。

Mahmoodabadi et al. (2014b)之研究中，藉由紋溝型態之量測提供一近似方法求得土砂傳輸能力 T_c (Sediment transport capacity)，並評估 WEPP 和 GUEST model 對土砂傳輸能力之預測。其沖蝕土槽設置為 1m 寬、6m 長，並預先挖好梯形橫斷面之溝，其計算 T_c 的方法為量取每一段之溝橫斷面之前後變化，相比較得出沖蝕所造成之體積變化，並求得沿紋溝長度之輸砂量，再根據公式求取 T_c 。此研究之結果顯示在有入滲之情況下，不管是 WEPP 和 GUEST ($F=0.1$) 模型都會低估 T_c ，但是當使用 $F=0.15$ 時可以顯著提升 GUEST 模型之預估準確度。Mahmoodabadi et al. (2014a)之研究目標為建立一更精確決定 H-R model 中之 H、F、J 等參數的方法。H 主要分為兩種情況， $H<1$ 時稱為源頭極限(source limit)、 $H=1$ 時稱為運輸極限(transport limit)，而 H 可表示為 c/c_t (c 為土砂濃度、 c_t 為運輸極限時之土砂

濃度)。藉由 Mahmoodabadi et al. (2014b)提到之方法求取 T_c 並換算得 c_t ，之後可以得到 H 再解算 F ，最後即可算出 J 之數值。其結果顯示當土壤顆粒較大時，其 F 值則會越大。

第二節 實驗成果-土壤物理特性

本計畫選用青灰泥(採集自阿公店水庫集水區)、壤質砂土，以及紅土等三種土壤進行土壤物理特性分析。土壤之選用系考量土壤質地、農業用土與地理分布範圍，因台灣西南部沖蝕嚴重地區多屬泥岩地區，故採現地取樣之青灰泥岩淤積土；砂質壤土與紅土為農業常規用土，作為坡面表土沖蝕研究之對象。以下就三種土壤之物理特性實驗結果，含土壤水分係數、土壤顆粒密度及比重、土壤粒徑分佈與質地、塑性限度與液性限度，以及團粒穩定分析分。

本模式對沖蝕量體之模擬，主要輸入之土壤相關參數為土砂中值粒徑與沖蝕物理參數(如沖蝕啟動臨界剪應力、可侵性係數等)。因青灰泥岩之理化性質特殊，其沖蝕物理參數無法由傳統明渠輸砂之 Shields 關係圖準確推估，故需以試驗求得。同時，本計畫採用壤質砂土作為試驗材料，試驗結果指出，以非黏粒為主之土砂材料其沖蝕物理參數可由 Shields 關係圖求得。故此，採用青灰泥與壤質砂土作為人工降雨與渠道沖蝕試驗之材料，進行比較討論。其結果分別說明如本章第三節之第二、三小節，與本章第四節之第二、三小節。

因坡面上之泥岩採集需向相關主管機關申請，且可開採之量體有限，恐不足本研計畫中試驗土砂量體之需求，故採集由阿公店庫區清淤產生之沖積泥岩代之。兩者之理化性質雖不完全相同，但經粒徑分析結果與前人對該地區上游坡面泥岩材料之粒徑分析結果比對，其分布範圍及中值粒徑接近。且由本計畫之人工降雨及渠道沖蝕試驗觀察

發現，泥岩土砂試體仍具有乾燥時堅硬，遇水則化之現象，故推論其沖蝕情形應可類比。各項實驗組數如表 4- 1 所示，實驗結果分述如下。

表 4- 1 本計畫各實驗項目與組數

土壤物理性質實驗- 共 64 組			
實驗項目	實驗組數		工作進度
土壤水分係數 ^a	青灰泥、壤質砂土：5 組、紅土：10 組		已完成
土壤顆粒密度 ^a	青灰泥、壤質砂土、紅土：6 組		已完成
土壤粒徑分佈	青灰泥、壤質砂土、紅土：5 組		已完成
土壤塑、液限	青灰泥、紅土：5 組、壤質砂土=N/A		已完成
團粒穩定	青灰泥、壤質砂土= N/A、紅土=4 組		已完成
人工降雨土壤沖蝕實驗- 共 24 組			
土壤	坡度	實驗組數 ^b	工作進度
青灰泥	5°	2	已完成
	10°	2	
	15°	2	
	20°	2	
	25°	2	
	30°	2	
砂質壤土	5°	2	已完成
	10°	2	

	15°	2		
	20°	2		
	25°	2		
	30°	2		
沖蝕啟動應力實驗- 共 90 組				
土壤	壓密時間	坡降 ^c	實驗組數 ^d	工作進度
青灰泥	24 hr	0.002-0.006	15	已完成
	48 hr	0.002-0.006	15	
	72 hr	0.002-0.006	15	
砂質壤土	24 hr	0.002-0.006	15	已完成
	48 hr	0.002-0.006	15	
	72 hr	0.002-0.006	15	

^a 實驗結果變異較高，增加實驗組數。

^b 分別作為系統動力模型之率定與驗證使用。

^c 共 5 種坡降

^d 每種坡降進行三重覆實驗

一、土壤水分係數(MF)

土壤水分係數為測量土壤在自然狀態風乾下之土壤重量水分含量；因土壤物理實驗皆以 105°C 烘乾土重為基礎，故計算 MF 值作為其他土壤物理實驗之換算基礎。由實驗結果(表 4- 2)，青灰泥之 MF 值為 0.008~0.013 之間，平均值為 1.010；壤質砂土之 MF 值為 1.011~1.012 之間，平均值為 1.012；紅土之 MF 值為 1.036~1.041 之

間，平均值為 1.039。

表 4-2 各種試驗土壤水分係數

編號	容器重	容器+風乾土	容器+烘乾土	重量水分含量 (%)	MF 值
青灰泥					
1	32.5	48.92	48.76	0.984	1.010
2	33.25	41.93	41.85	0.930	1.009
3	32.57	40.65	40.56	1.126	1.011
4	25.19	36.05	35.96	0.836	1.008
5	32.93	46.7	46.52	1.325	1.013
MF 平均值					1.010
壤質砂土					
1	25.97	35.15	35.05	1.101	1.011
2	25.2	35.06	34.95	1.128	1.011
3	32.61	42.39	42.28	1.138	1.011
4	32.87	42.75	42.63	1.230	1.012
5	28.46	37.59	37.48	1.220	1.012
MF 平均值					1.012
紅土					
1	34.98	40.04	39.84	4.115	1.041
2	26.51	32.85	32.63	3.595	1.036
3	33.69	40	39.77	3.783	1.038
4	34.25	41.28	41.01	3.994	1.040
5	33.29	39.72	39.48	3.877	1.039
6	31.24	38.31	38.05	3.818	1.038
7	32.76	38.9	38.68	3.716	1.037
8	35.02	41.81	41.56	3.823	1.038

9	32.16	39.42	39.16	3.714	1.037
10	32.49	38.83	38.58	4.105	1.041
MF 平均值					1.039

二、土壤顆粒密度與平均比重

土壤之顆粒密度為土體中固體(礦物)部分之密度，意指單位體積之土粒質量(g/cm^3)，而土粒比重為土壤顆粒密度與水密度之比值，為一無因次數。在水密度為 $1(\text{g/cm}^3)$ 之假設下，土壤之顆粒密度與其比重有相同之數值，但比重無單位。由實驗結果(表 4- 3)，青灰泥之土壤顆粒密度為 $2.65\sim 2.73(\text{g/cm}^3)$ 之間，平均值為 $2.69(\text{g/cm}^3)$ ，標準差為 $0.029(\text{g/cm}^3)$ ；壤質砂土之土壤顆粒密度為 $2.68\sim 2.69(\text{g/cm}^3)$ ，平均值為 $2.69(\text{g/cm}^3)$ ，標準差為 $0.006(\text{g/cm}^3)$ ；紅土之土壤顆粒密度為 $2.38\sim 2.80(\text{g/cm}^3)$ 之間，平均值為 $2.62(\text{g/cm}^3)$ ，標準差為 $0.143(\text{g/cm}^3)$ 。比較三者之土壤顆粒密度平均值：青灰泥 > 壤質砂土 > 紅土，且三者中紅土因顆粒細小，黏粒含量高，顆粒密度之變異性亦高。

表 4- 3 各種試驗土壤顆粒密度

土壤種類	編號	顆粒密度 (g/cm^3)	平均顆粒密度 (g/cm^3)	標準差 (g/cm^3)
青灰泥	1	2.73	2.69	0.029
	2	2.70		
	3	2.67		
	4	2.71		
	5	2.65		
壤質砂土	1	2.68	2.69	0.006
	2	2.69		

	3	2.69		
	4	2.68		
	5	2.69		
紅土	1	2.56	2.62	0.143
	2	2.49		
	3	2.38		
	4	2.71		
	5	2.78		
	6	2.80		

三、土壤粒徑分佈與質地

土壤之粒徑分佈是評定土壤質地之正確且量化的方法。在細粒土壤(< 2mm)中，黏粒之存在常使土壤形成大小不一之團粒，故進行顆粒大小分佈實驗時，土粒是否完全分散為影響結果正確性之重要因子。由實驗結果(表 4- 4、圖 4- 5~圖 4- 7)，青灰泥之砂粒、粉粒和黏粒平均百分比為 52.15%、45.75%和 5.91%；壤質砂土之砂粒、粉粒和黏粒平均百分比為 80.93%、13.15%和 5.87%；紅土之砂粒、粉粒和黏粒平均百分比為 7.80%、30.73%和 62.34%。比較三者之粒徑分佈百分比，平均土粒大小排序為砂質壤土 > 青灰泥 > 紅土。

表 4- 4 各種試驗土壤質地(砂、粉、黏百分比)

土壤種類	編號	砂粒含量	粉粒含量	黏粒含量
青灰泥	1	58.15%	36.98%	4.87%
	2	52.17%	42.78%	4.84%
	3	46.13%	45.75%	8.00%
	平均	52.15%	45.75%	5.91%

	標準差	0.049	0.036	0.015
壤質砂土	1	77.86%	16.14%	5.96%
	2	83.29%	10.40%	6.25%
	3	81.65%	12.90%	5.40%
	平均	80.93%	13.15%	5.87%
	標準差	0.023	0.024	0.003
紅土	1	6.02%	33.80%	60.18%
	2	7.21%	31.69%	61.10%
	3	5.22%	31.98%	62.80%
	4	6.91%	27.44%	65.65%
	5	9.27%	28.74%	61.99%
	平均	7.80%	30.73%	62.34%
	標準差	0.014	0.023	0.019

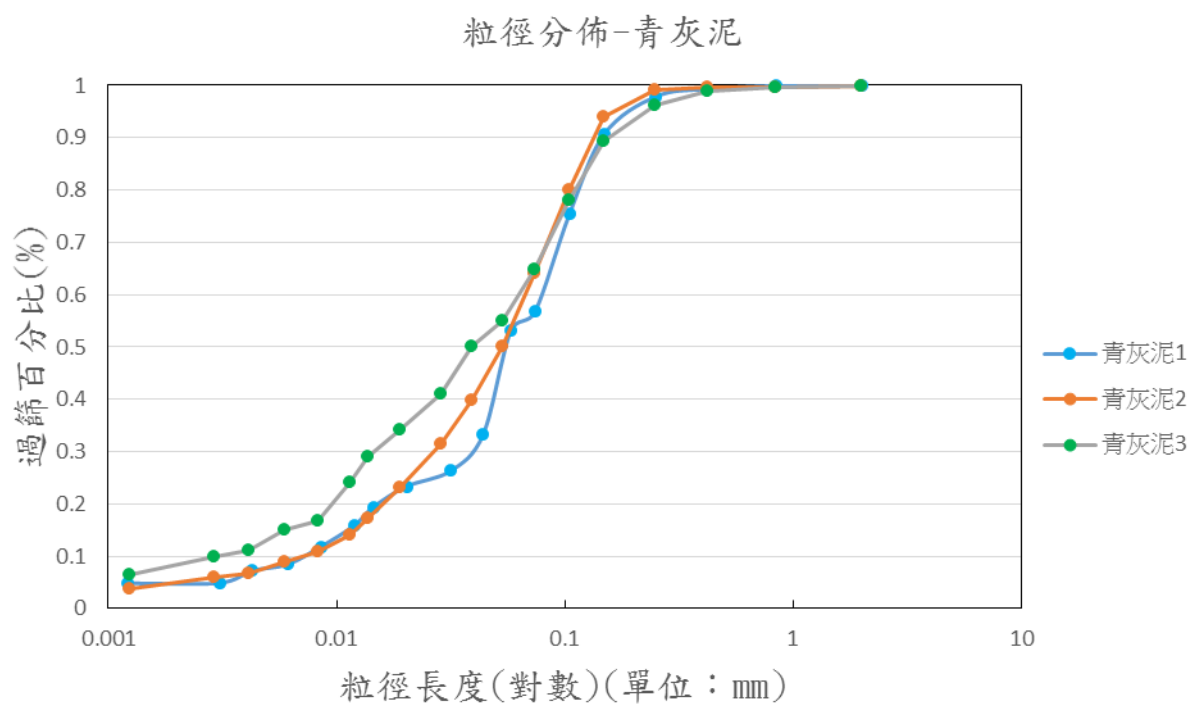


圖 4- 5 青灰泥粒徑分佈

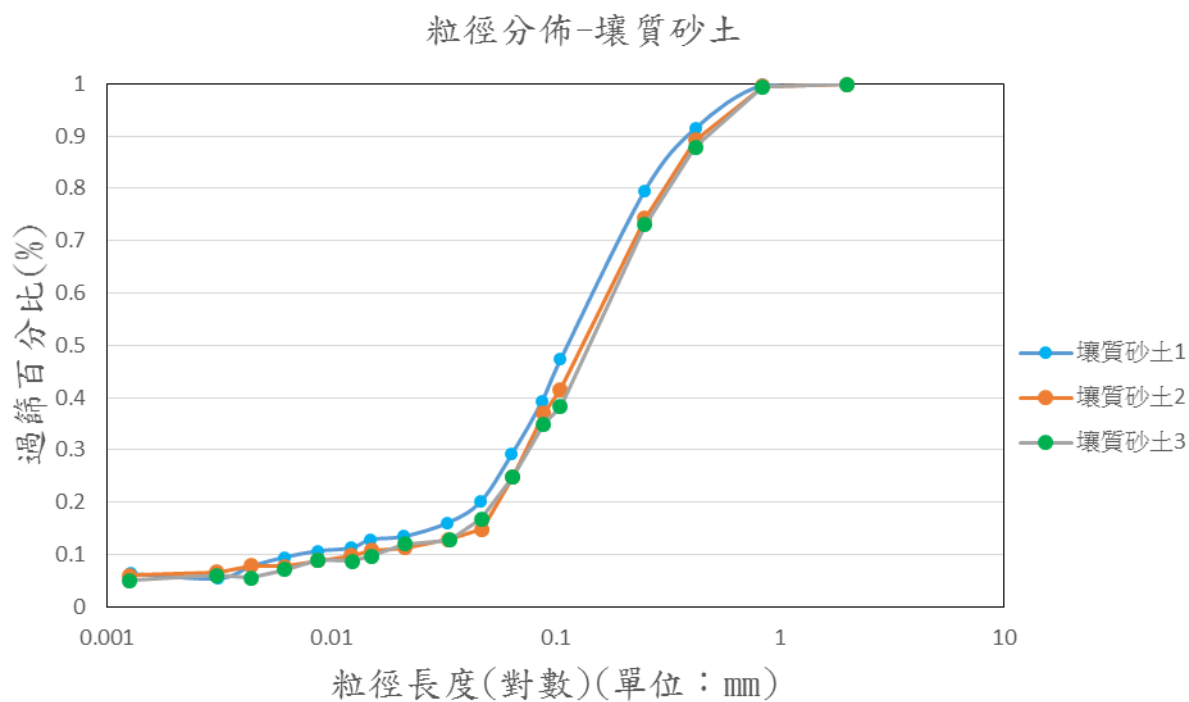


圖 4-6 壤質砂土粒徑分佈

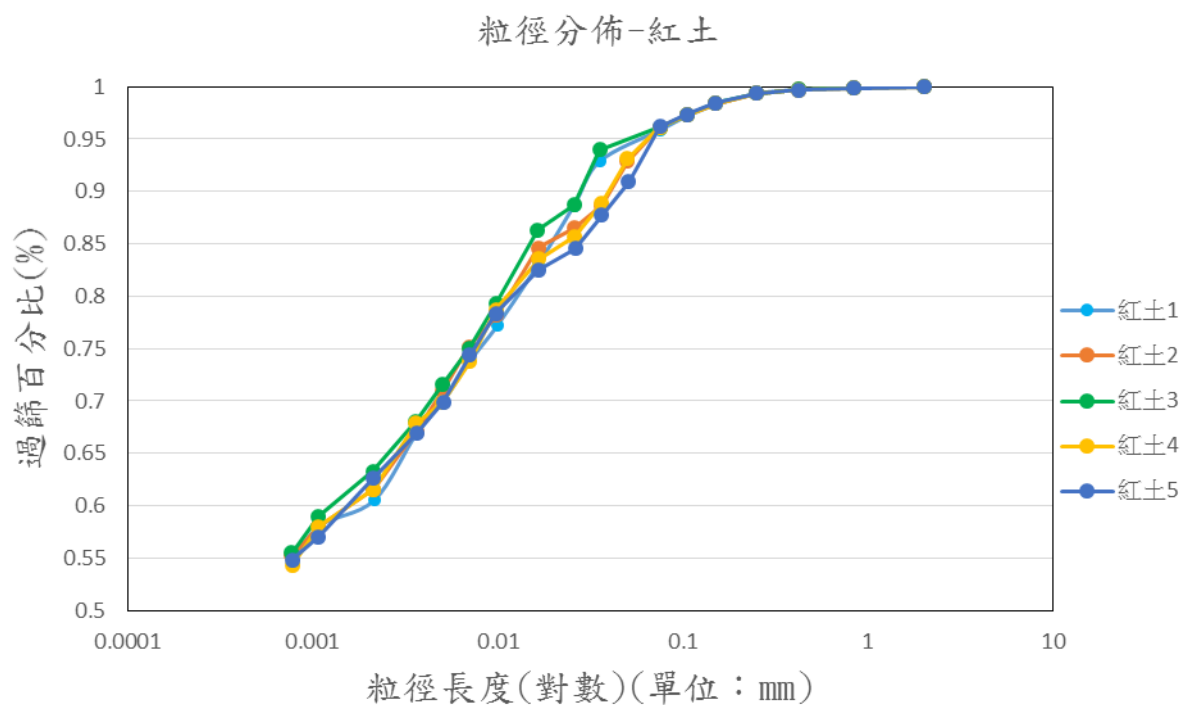


圖 4-7 紅土粒徑分佈

四、塑性限度與液性限度

測定土壤含水比、液限、塑限等數值，用於將土壤(通常為黏土質)來進行分類。細粒土(粒徑小於 0.42mm;通過 40#篩)由於含水率不同，分別處於流動狀態，可塑狀態、半固體狀態和固體狀態。液限是細粒土呈可塑狀態的上限含水比，塑限是細粒土呈可塑狀態的下限含水比。本實驗測定細粒土的液限和塑限含水比，用於計算土的塑性指數，為劃分土的工程類別和確定土的狀態提供依據。由實驗結果(表 4-5 到表 4-10；圖 4-8 到圖 4-9)，青灰泥-平均液限為 21；平均塑限為 19；平均塑性指數 PI 為 2；土壤之分類均為 ML；紅土-平均液限為 52；平均塑限為 35；平均塑性指數 PI 為 17；土壤之分類大部分為 MH(紅土(二)分類為 ML)，比較兩種土壤的塑液限與塑性指數，均為紅土>青灰泥，且二者中紅土因顆粒細小，黏粒含量較高，可塑性亦較高。

表 4-5 青灰泥-液性限度結果

青灰泥(一)- 液性限度				
編號	1	2	3	4
敲擊數	19	26	27	24
皿質量	20.42	18.19	21.62	20.87
(濕土+皿)重	24.04	21.91	25.78	24.01
(乾土+皿)重	23.34	21.25	25.09	23.44
乾土重	2.92	3.06	3.47	2.57
水質量	0.7	0.66	0.69	0.57
含水比	23.97%	21.57%	19.88%	22.18%
		$y = -0.0045x + 0.3268$		

趨勢線公式		R² = 0.8976		
X=25 代入趨勢線公式		液限=21		
青灰泥(二)- 液性限度				
編號	1	2	3	4
敲擊數	18	28	27	22
皿質量	20.67	20.85	33.77	20.4
(濕土+皿)重	24.11	24.69	35.71	23.89
(乾土+皿)重	23.47	24.06	35.39	23.3
乾土重	2.8	3.21	1.62	2.9
水質量	0.64	0.63	0.32	0.59
含水比	22.86%	19.63%	19.75%	20.34%
趨勢線公式		y = -0.003x + 0.2777 R² = 0.8547		
X=25 代入趨勢線公式		液限=20		
青灰泥(三)- 液性限度				
編號	1	2	3	4
敲擊數	27	21	18	31
皿質量	25.62	31.14	33.36	25.16
(濕土+皿)重	27.25	32.76	35.04	27.1
(乾土+皿)重	26.97	32.47	34.73	26.77
乾土重	1.35	1.33	1.37	1.61
水質量	0.28	0.29	0.31	0.33
含水比	20.74%	21.80%	22.63%	20.50%
趨勢線公式		y = -0.0016x + 0.2541 R² = 0.9516		

X=25 代入趨勢線公式		液限=21		
青灰泥(四)- 液性限度				
編號	1	2	3	4
敲擊數	17	15	28	26
皿質量	26.28	33.78	20.65	28.3
(濕土+皿)重	27.39	34.72	24.48	29.46
(乾土+皿)重	27.18	34.54	23.86	29.25
乾土重	0.9	0.76	3.21	0.95
水質量	0.21	0.18	0.62	0.21
含水比	23.33%	23.68%	19.31%	22.11%
趨勢線公式		y = -0.0016x + 0.2541 R ² = 0.9516		
X=25 代入趨勢線公式		液限=21		
青灰泥(五) 液性限度				
編號	1	2	3	4
敲擊數	15	29	32	17
皿質量	32.95	34.16	24.68	27.6
(濕土+皿)重	35.44	37.06	27.06	29.09
(乾土+皿)重	35	36.57	26.67	28.83
乾土重	2.05	2.41	1.99	1.23
水質量	0.44	0.49	0.39	0.26
含水比	21.46%	20.33%	19.60%	21.14%
趨勢線公式		y = -0.001x + 0.2286 R ² = 0.9471		
X=25 代入趨勢線公式		液限=20		

→ 液限平均=20.6，取 21 為青灰泥-液限結果

表 4-6 青灰泥-塑性限度結果

青灰泥(一)- 塑性限度			
編號	1	2	3
皿質量	21.41	20.73	20.11
(濕土+皿)重	26.81	25.48	24.5
(乾土+皿)重	25.96	24.77	23.79
乾土重	4.55	4.04	3.68
水質量	0.85	0.71	0.71
含水比	18.68%	17.57%	19.29%
塑性限度			18
青灰泥(二)- 塑性限度			
編號	1	2	3
皿質量	34.48	27.59	33.27
(濕土+皿)重	35.9	29.9	35.84
(乾土+皿)重	35.67	29.52	35.43
乾土重	1.19	1.93	2.16
水質量	0.23	0.38	0.41
含水比	19.33%	19.69%	18.98%
塑性限度			19
青灰泥(三)- 塑性限度			
編號	1	2	3
皿質量	33.6	32.41	28.03

(濕土+皿)重	34.56	34.07	29.7
(乾土+皿)重	34.4	33.79	29.41
乾土重	0.8	1.38	1.38
水質量	0.16	0.28	0.29
含水比	20.00%	20.29%	21.01%
塑限			20
青灰泥(四)- 塑性限度			
編號	1	2	3
皿質量	32.96	31.58	28.35
(濕土+皿)重	34.53	32.77	28.93
(乾土+皿)重	34.27	32.57	28.84
乾土重	1.31	0.99	0.49
水質量	0.26	0.2	0.09
含水比	19.85%	20.20%	18.37%
塑性限度			20
青灰泥(五)- 塑性限度			
編號	1	2	3
皿質量	26.4	26.07	25.55
(濕土+皿)重	27.95	27.23	26.26
(乾土+皿)重	27.7	27.04	26.15
乾土重	1.3	0.97	0.6
水質量	0.25	0.19	0.11
含水比	19.23%	19.59%	18.33%
塑性限度			19

→ 塑限平均=19，為青灰泥-塑限結果

表 4- 7 青灰泥塑性指數 PI(Ip)

土壤種類	液限(LL)	塑限(PL)	塑性指數 PI(Ip)	土壤分類
青灰泥(一)	21	18	3	ML
青灰泥(二)	20	19	1	ML
青灰泥(三)	21	20	1	ML
青灰泥(四)	21	18	3	ML
青灰泥(五)	20	18	2	ML

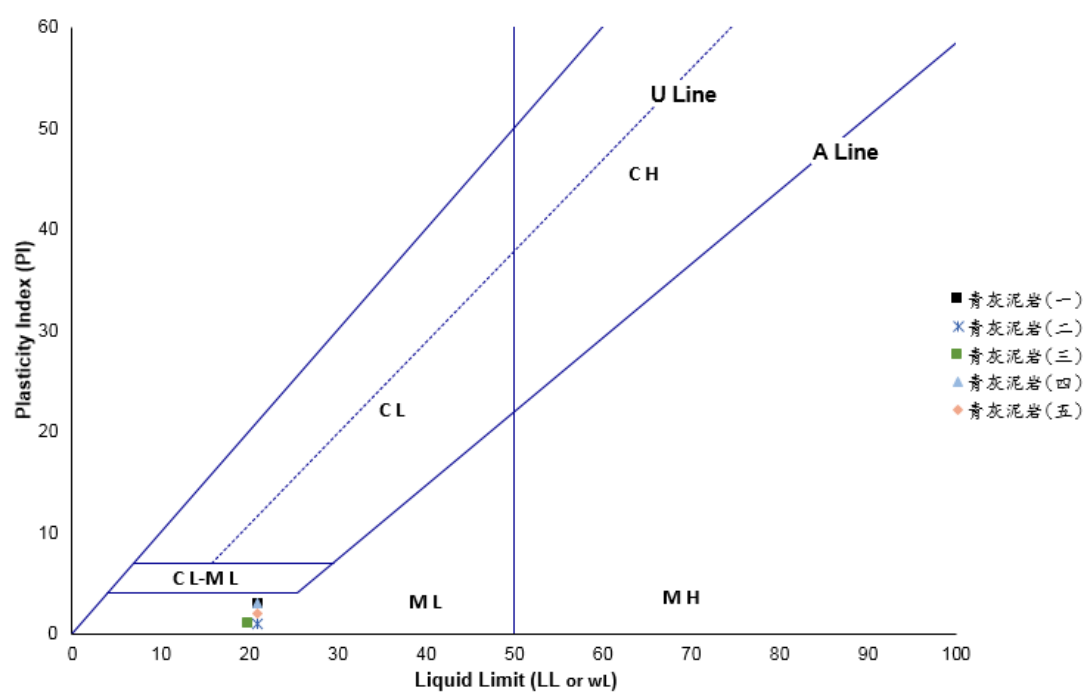


圖 4- 8 青灰泥-塑性圖

表 4-8 紅土-液性限度結果

紅土(一)- 液性限度				
編號	1	2	3	4
敲擊數	15	33	21	34
皿質量	33.67	32.96	31.68	35.02
(濕土+皿)重	38.11	35	32.96	36.16
(乾土+皿)重	36.45	34.26	32.51	35.8
乾土重	2.78	1.3	0.83	0.78
水質量	1.66	0.74	0.45	0.36
含水比	59.71%	56.92%	54.22%	46.15%
趨勢線方程式		y = -0.0041x + 0.648 R ² = 0.4233		
X=25 代入趨勢線方程式		液限=55		
紅土(二)- 液性限度				
編號	1	2	3	4
敲擊數	17	24	32	29
皿質量	32.98	32.27	26.01	24.9
(濕土+皿)重	34.23	33.15	27.57	26.35
(乾土+皿)重	33.79	32.87	27.08	25.89
乾土重	0.81	0.6	1.07	0.99
水質量	0.44	0.28	0.49	0.46
含水比	54.32%	46.67%	45.79%	46.46%
趨勢線方程式		y = -0.0055x + 0.6243 R ² = 0.8146		
X=25 代入趨勢線方程式		液限=49		

紅土(三)- 液性限度				
編號	1	2	3	4
敲擊數	26	29	18	20
皿質量	33.4	35.91	31.69	27.12
(濕土+皿)重	34.83	36.92	33.01	28.74
(乾土+皿)重	34.33	36.6	32.53	28.13
乾土重	0.93	0.69	0.84	1.01
水質量	0.5	0.32	0.48	0.61
含水比	53.76%	46.38%	57.14%	60.40%
趨勢線方程式		y = -0.0104x + 0.7856 R ² = 0.7844		
X=25 代入趨勢線方程式		液限=53		
紅土(四)- 液性限度				
編號	1	2	3	4
敲擊數	18	34	32	15
皿質量	34.19	24.94	25.96	26.11
(濕土+皿)重	35.31	26.79	27.1	27.11
(乾土+皿)重	34.94	26.2	26.75	26.7
乾土重	0.75	1.26	0.79	0.59
水質量	0.37	0.59	0.35	0.41
含水比	49.33%	46.83%	44.30%	69.49%
趨勢線方程式		y = -0.0092x + 0.7524 R ² = 0.5915		
X=25 代入趨勢線方程式		液限=52		
紅土(五)- 液性限度				

編號	1	2	3	4
敲擊數	28	16	21	31
皿質量	25.94	27.97	26.04	33.41
(濕土+皿)重	26.99	29.06	27.42	34.68
(乾土+皿)重	26.65	28.67	26.94	34.26
乾土重	0.71	0.7	0.9	0.85
水質量	0.34	0.39	0.48	0.42
含水比	47.89%	55.71%	53.33%	49.41%
趨勢線方程式	$y = -0.0049x + 0.6346$ $R^2 = 0.8775$			
X=25 代入趨勢線方程式	液限=51			

→ 液限平均=51.85，取 52 為紅土-液限結果

表 4-9 紅土-塑性限度結果

紅土(一)- 塑性限度			
編號	1	2	3
皿質量	31.68	31.61	35.87
(濕土+皿)重	33.63	34.17	38.36
(乾土+皿)重	33.09	33.49	37.7
乾土重	1.41	1.88	1.83
水質量	0.54	0.68	0.66
含水比	38.30%	36.17%	36.07%
塑限			37
紅土(二)- 塑性限度			

編號	1	2	3
皿質量	26.12	32.29	33.26
(濕土+皿)重	28.47	35.52	33.88
(乾土+皿)重	27.86	33.51	33.74
乾土重	1.74	0.92	0.48
水質量	0.61	0.51	0.14
含水比	35.06%	33.70%	29.17%
塑限			32
紅土(三)- 塑性限度			
編號	1	2	3
皿質量	26.02	33.26	30.5
(濕土+皿)重	26.96	34.22	31.53
(乾土+皿)重	26.72	33.96	31.25
乾土重	0.7	0.7	0.75
水質量	0.24	0.26	0.28
含水比	34.29%	37.14%	37.33%
塑限			36
紅土(四)- 塑性限度			
編號	1	2	3
皿質量	26.15	33.25	34.8
(濕土+皿)重	28.48	34.2	35.52
(乾土+皿)重	27.85	33.94	35.34
乾土重	1.7	0.69	0.54
水質量	0.63	0.26	0.18

含水比	37.06%	37.68%	33.33%
塑限			36
紅土(五)- 塑性限度			
編號	1	2	3
皿質量	34.84	32.4	32.85
(濕土+皿)重	35.5	33.6	33.78
(乾土+皿)重	35.32	33.28	33.54
乾土重	0.48	0.88	0.69
水質量	0.18	0.32	0.24
含水比	37.50%	36.36%	34.78%
塑限			36

→ 塑限平均=36，為紅土-塑限結果

表 4- 10 紅土塑性指數 PI(Ip)

土壤種類	液限(LL)	塑限(PL)	塑性指數 PI(Ip)	土壤分類
紅土(一)	55	37	18	MH
紅土(二)	49	32	17	ML
紅土(三)	53	36	17	MH
紅土(四)	52	36	16	MH
紅土(五)	51	36	15	MH

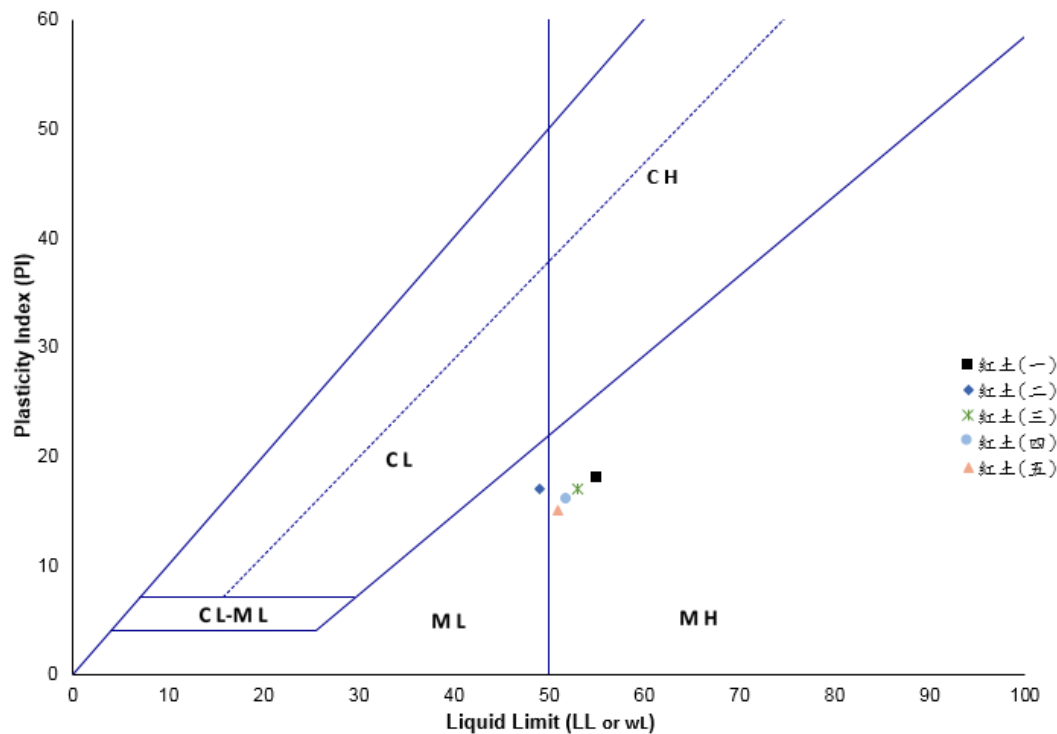


圖 4-9 紅土-塑性圖

五、團粒穩定分析

土壤學家們認為對水分破壞抵抗力大的土壤具有良好的耕性。抵抗水分破壞之能力亦為控制土壤沖蝕之因子。利用將不同土樣團粒經過相同的濕篩方法分析後，將可以比較出哪一種土樣團粒對於水分沖蝕破壞的抵抗力較大，亦即具有較穩定的團粒結構。由實驗結果(表 4-11、表 4-12、圖 4-10)，紅土 1 之 84.1% 累積百分比之對數粒徑為 0.25mm；50% 累積百分比之對數粒徑為 0.41mm；15.9% 累積百分比之對數粒徑為 0.66mm；對數標準偏差為 0.62mm。紅土 2 之 84.1% 累積百分比之對數粒徑為 0.37mm；50% 累積百分比之對數粒徑為 0.58mm；15.9% 累積百分比之對數粒徑為 0.71mm；對數標準偏差為 0.81。紅土 3 之 84.1% 累積百分比之對數粒徑為 0.24mm；50% 累積百分比之對數粒徑為 0.39mm；15.9% 累積百分比之對數粒徑為 0.63mm；對數標準偏差為 0.62。紅土 4 之 84.1% 累積百分比之對數粒徑為 0.24mm；50%

累積百分比之對數粒徑為 0.37mm；15.9%累積百分比之對數粒徑為 0.56mm；對數標準偏差為 0.65。

表 4- 11 紅土過篩百分比

土壤種類	編號	篩網大小(mm)	重量百分比	重量累積百分比
紅土	1	2	26.57%	26.57%
		0.84	19.48%	46.05%
		0.42	28.71%	74.76%
		0.25	8.37%	83.13%
		0.106	5.74%	88.87%
紅土	2	2	20.10%	20.10%
		0.84	23.18%	43.28%
		0.42	26.98%	70.26%
		0.25	11.97%	82.23%
		0.106	7.23%	89.46%
紅土	3	2	24.89%	24.89%
		0.84	20.74%	45.63%
		0.42	28.66%	74.29%
		0.25	8.86%	83.15%
		0.106	5.09%	88.24%
紅土	4	2	20.83%	20.83%
		0.84	18.48%	39.31%
		0.42	28.24%	67.55%
		0.25	15.61%	83.16%
		0.106	7.44%	90.60%

表 4- 12 紅土累積百分比之對數粒徑與對數標準偏差

土壤種類	紅土
編號	1
趨勢線方程式	$y = 0.8306e^{-1.42x}$ $R^2 = 0.9602$
84.1%累積百分比之對數粒徑(mm)	0.25
50%累積百分比之對數粒徑(mm)	0.41
15.9%累積百分比之對數粒徑(mm)	0.66
對數標準偏差	0.62
土壤種類	紅土
編號	2
趨勢線方程式	$y = 0.7079e^{-1.301x}$ $R^2 = 0.9771$
84.1%累積百分比之對數粒徑(mm)	0.37
50%累積百分比之對數粒徑(mm)	0.58
15.9%累積百分比之對數粒徑(mm)	0.71
對數標準偏差	0.81
土壤種類	紅土
編號	3
趨勢線方程式	$y = 0.7911e^{-1.398x}$

	$R^2 = 0.9547$
84.1%累積百分比之對數粒徑(mm)	0.24
50%累積百分比之對數粒徑(mm)	0.39
15.9%累積百分比之對數粒徑(mm)	0.63
對數標準偏差	0.62
土壤種類	紅土
編號	4
趨勢線方程式	$y = 0.6888e^{-1.259x}$ $R^2 = 0.98$
84.1%累積百分比之對數粒徑(mm)	0.24
50%累積百分比之對數粒徑(mm)	0.37
15.9%累積百分比之對數粒徑(mm)	0.56
對數標準偏差	0.65

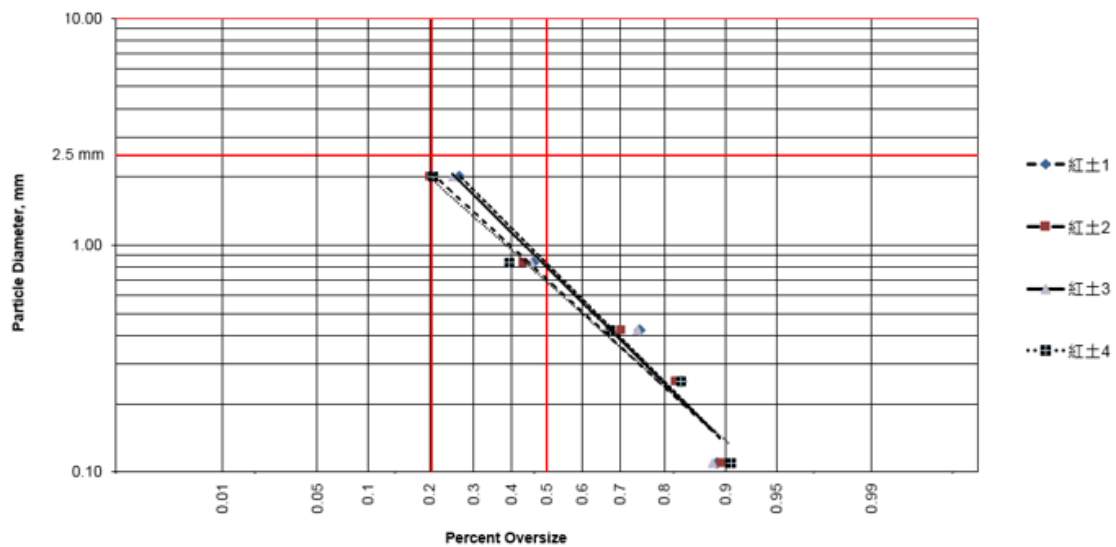


圖 4- 10 紅土對數-百分比統計圖

第三節 實驗成果-人工降雨沖蝕實驗

一、人工降雨機率定

人工降雨機之參數率定包括降雨強度、降雨均勻度、雨滴粒徑分析，和雨滴降下速率等，其率定結果依次說明如下。降雨強度之率定採 75 mm/hr、85 mm/hr、100 mm/hr 等三種強度，分別進行三重覆實驗，測量其降雨強度和降雨均勻度(CuC)，其結果如表 4- 13 和表 4- 14 和所示：三種強度之相對標準偏差皆小於 1.5%，其降雨均勻度皆達 0.92 以上，相對標準偏差 1%。

表 4- 13 人工降雨機降雨強度率定資料

組數	單次降雨強度 (mm/hr)	平均降雨強度 (mm/hr)	標準偏差 (mm/hr)	相對標準偏差
75-1	73.46	74.38	0.97	1.31%
75-2	74.29			
75-3	75.40			

85-1	84.91	85.10	0.24	0.29%
85-2	85.01			
85-3	85.38			
100-1	99.14	99.76	0.91	0.91%
100-2	100.81			
100-3	99.33			

表 4- 14 人工降雨機降雨均勻度率定資料

組數	降雨均勻度 (CuC)	平均 降雨均勻度	CuC 標準偏差	CuC 相對標準 偏差
75-1	0.9535	0.9450	0.0084	0.89%
75-2	0.9366			
75-3	0.9449			
85-1	0.9358	0.9352	0.0024	0.25%
85-2	0.9326			
85-3	0.9372			
100-1	0.9349	0.9303	0.0052	0.56%
100-2	0.9314			
100-3	0.9247			

雨滴落下速度以白努力方程式[4-1]式和連續方程式[4-2]式計算：

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g z_2 \quad [4-1]$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad [4-2]$$

其中， P_1 = 降雨噴頭之壓力； V_1 = 降雨噴頭之雨滴初速度； A_1 = 降雨噴頭之截面積； P_2 = 雨滴落至土面之大氣壓力； V_2 = 雨滴落至土面之本速度； A_2 = 雨滴落至土面面積。雨滴粒徑分析採濾紙法(色斑法)進行，參考前人研究之關係式[4-3]至[4-5]式，以濾紙色斑直徑推得雨滴直徑，相關計算結果如表 4-15 所示；並繪製雨滴粒徑分布曲線，如圖 4- 11 所示。

$$D_i = 0.334d_i^{0.749} \quad (\text{陳振宇等人, 1996}) \quad [4-3]$$

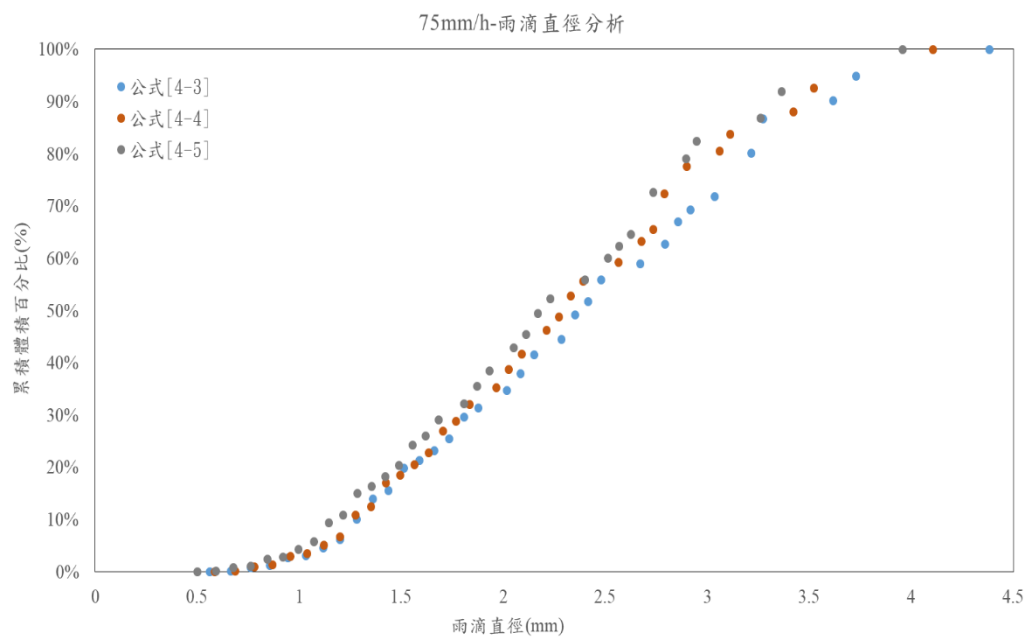
$$D_i = 0.356d_i^{0.712} \quad (\text{竇葆璋和周佩華, 1982}) \quad [4-4]$$

$$D_i = 0.295d_i^{0.756} \quad (\text{徐向舟等人, 2004}) \quad [4-5]$$

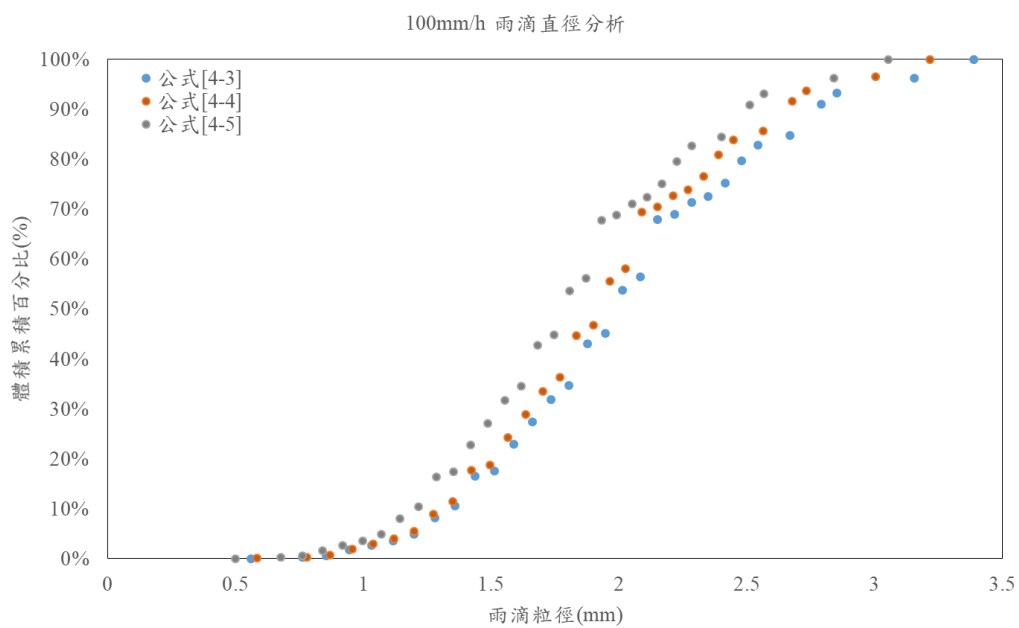
其中， D_i = 雨滴直徑； d_i = 濾紙色斑直徑。

表 4-15 人工降雨機雨滴粒徑與降下速度率定資料

降雨強度	率定資料	公式 [4-3]	公式 [4-4]	公式 [4-5]	平均雨滴 d_{50} (mm)
75mm/hr	雨滴中值粒徑 $d_{50}(\text{mm})$	2.38	2.31	2.23	2.31
	噴出壓力(Pa)	8.24psi			
	噴出初速(m/s)	5.06			
	實際末速(m/s)	6.45	6.40	6.34	
	理論終端速度(m/s)	7.41	7.31	7.18	
	達終端速度之百分比	86.96%	87.62%	88.35%	
100mm/hr	雨滴中值粒徑 $d_{50}(\text{mm})$	2.00	1.92	1.80	1.91
	噴出壓力(Pa)	17psi			
	噴出初速(m/s)	6.78			
	實際末速(m/s)	6.79	6.66	6.44	
	理論終端速度(m/s)	6.79	6.66	6.44	
	達終端速度之百分比	100.00%	100.00%	100.00%	



(a)



(b)

圖 4-11 人工降雨機雨滴粒徑分布圖：(a)降雨強度 75mm/hr；(b)降雨強度 100mm/hr

二、人工降雨機實驗-青灰泥

人工降雨初步實驗以 Eijkelkamp Agrisearch Equipment 所出產之針管式人工降雨機，搭配可調坡度之沖蝕平台進行。本實驗之控制變因為坡度，設計 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 等六種坡度。參考前人研究(Shen et al., 2015; 2016)，於人工降雨實驗前進行土壤預濕程序，以減低雨濺沖蝕機率；土壤試體之製作取 39.375 公斤之烘乾土、1.875 公年之自來水，以 20%含水量以及總體密度 1400kg/m^3 為填入目標，分三層填入，每層 5 公分厚，共計 15 公分。實驗進行步驟為將土壤放置於土槽中後，對初始地形進行雷射掃描，在調整坡度進行降雨模擬；在降雨模擬的過程中，每 5 分鐘中斷一次，將坡度調整回水平後進行雷射掃描，降雨時間總共為 30 分鐘，包含初始地形的掃描，雷射掃描一共七次，即得到隨時間之沖蝕地形變化。此外，另於土槽下游出口收集沖蝕之土壤，烘乾秤重後即獲得不同降雨延時之土壤沖蝕質量。相關之研究成果已於今年七月發表至國際學術期 Wang, Y.-C. and Lai, C.-C. 2018. Evaluating the Erosion Process from a Single-Stripe Laser-Scanned Topography: A Laboratory Case Study. Water, 10, 956.，重要實驗結果摘錄如下。

沖蝕實驗之土壤流失量分別由槽體下游出口及底部箱測得之土砂產量(表 4- 16)，以及由雷射地形掃描體積變化求得之沖蝕量(表 4- 17)表示。如表 4- 16 所示，30 分鐘降雨之土砂產量隨坡度增加，界於 1.288 kg 到 8.300 kg (乾重)；實驗結果指出， 5° 、 10° 、 15° 等坡度較緩之情形下，約有土砂入滲量佔總土砂產量之 18.4%，但在陡坡(20° 、 25° 、 30°)之情形下未收集到入滲土砂。如表 4- 17 所示，由體積變化求得之沖蝕量隨坡度增加，界於 1.833 kg 到 10.755 kg (乾重)；由實

驗過程觀察發現降雨之雨滴擊打造成之表土壓密與紋溝邊避之崩塌應為體積變化沖蝕量高估土砂產量之主因，此現象多發生於降雨啟始之五分鐘內(Wang and Lai, 2018)。

表 4- 16 青灰泥人工降雨沖蝕實驗累積土砂產量

(資源來源：Wang and Lai, 2018)

降雨延時(min) 坡度	累積土砂產量 (kg)					
	5	10	15	20	25	30
30° (1)	1.802	3.335	4.404	5.546	6.923	8.300
30° (2)	1.471	2.815	4.06	5.149	5.948	6.766
25° (1)	1.829	2.98	4.052	4.946	5.714	6.439
25° (2)	2.287	3.422	4.687	5.975	7.382	8.919
20° (1)	1.018	1.937	2.816	3.799	4.484	5.376
20° (2)	0.802	1.604	2.315	3.396	4.289	5.086
15° (1)	0.173	0.695	1.195	1.680	2.099	2.46 0
15° (2)	0.285	0.596	0.836	1.062	1.334	1.646
10° (1)	0.167	0.675	1.108	1.395	1.750	2.071
10° (2)	0.467	1.116	1.678	2.150	2.708	3.100
5° (1)	0.088	0.303	0.504	0.903	1.213	1.507
5° (2)	0.118	0.374	0.646	0.807	1.065	1.228

表 4- 17 青灰泥人工降雨沖蝕實驗累積體積變化沖蝕量

(資源來源：Wang and Lai, 2018)

降雨延時(min) 坡度	累積體積變化沖蝕量 (kg)					
	5	10	15	20	25	30
30° (1)	3.100	5.058	6.087	7.367	8.540	9.518
30° (2)	1.981	4.706	4.990	5.443	6.880	6.992
25° (1)	3.836	5.012	5.820	6.813	7.081	7.725
25° (2)	3.982	6.120	7.407	8.123	9.594	10.775
20° (1)	3.080	4.414	5.074	5.652	6.822	6.798
20° (2)	3.113	3.854	4.397	5.176	6.057	6.593

15° (1)	2.630	3.206	3.553	4.025	4.114	4.552
15° (2)	1.831	1.7	2.418	2.630	2.661	2.917
10° (1)	2.937	3.432	4.097	4.106	4.568	4.740
10° (2)	2.327	3.143	3.471	3.877	4.216	4.403
5° (1)	0.979	1.394	1.374	1.861	2.030	2.082
5° (2)	0.858	1.382	1.520	1.698	1.862	1.833

將累積土產量(Measured soil loss 實測土壤流失量)與體積變化沖蝕量(Estimated soil loss 估計土壤流失量)隨降雨延時作圖，如圖 4- 12 所示。不同坡度之土壤流失量與降雨延時成正相關線性關係，其迴歸趨勢線坡度隨地形坡度自 30°到 5°，由 0.22 減少至 0.04，此變化指出降雨延時(總累積雨量)與土壤流失量之關係受地形坡度之影響。故此，考量不同降雨延時及地形坡度下，造成之土壤流失量可以多變量之複迴歸線性方程式推估。分析結果如下列方程式：

$$SL_m = -0.023t + 0.018S + 0.009(S \times t) \quad R^2 = 0.88,$$

$$SL_e = 0.048t + 0.112S + 0.005(S \times t) \quad R^2 = 0.88,$$

式中， SL_m = 實測土壤流失量(kg); SL_e = 估計土壤流失量(kg); S = 槽體地形坡度 (°); t = 降雨延時 (min)。上式中在坡度與降雨延時乘積項($S \times t$)之迴歸係數為正值，表示相降雨延時產生之土壤流失量隨坡度增加而變大。

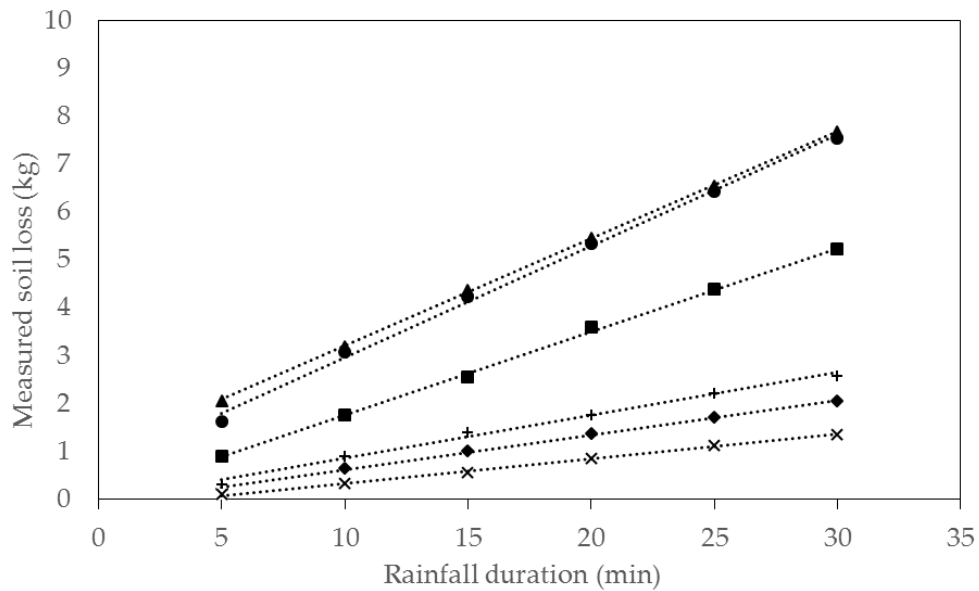
比較估計與實測之土壤流失量，進行簡單線性迴歸如下式：

$$SL_e = 0.98SL_m + 1.73 \quad R^2 = 0.91,$$

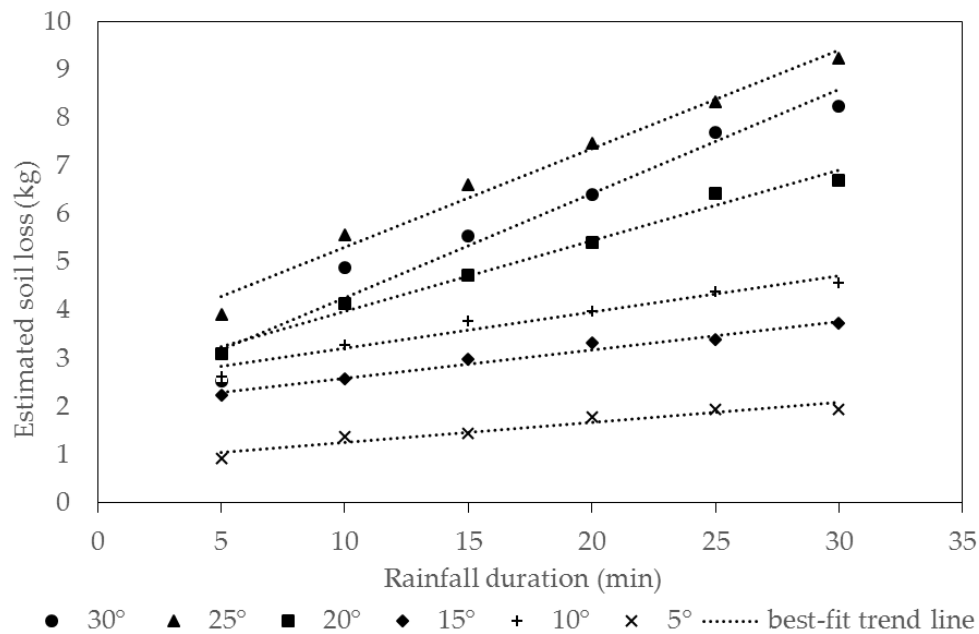
式中之斜率接近 1，截距為大於零之常數，指出估計土壤流失量高估實測土壤流失量之平均值約 1.73 (kg)，可歸因於降雨初期雨滴擊打造成表土鬆散處壓密所增加之體積變化。應用上，將實測土壤流失量(SL_m ，kg)與雷射掃瞄體積變化量(V ， m^3)進行簡單線性迴歸，方程式如下：

$$SL_m = 1281.9V - 1.36 \quad R^2 = 0.91,$$

上式之斜率約為土壤總體密度，截距則可歸因為降雨初期雨滴擊打壓密現象，以及土壤水分時、空間變化造成之誤差(Wang and Lai, 2018)。



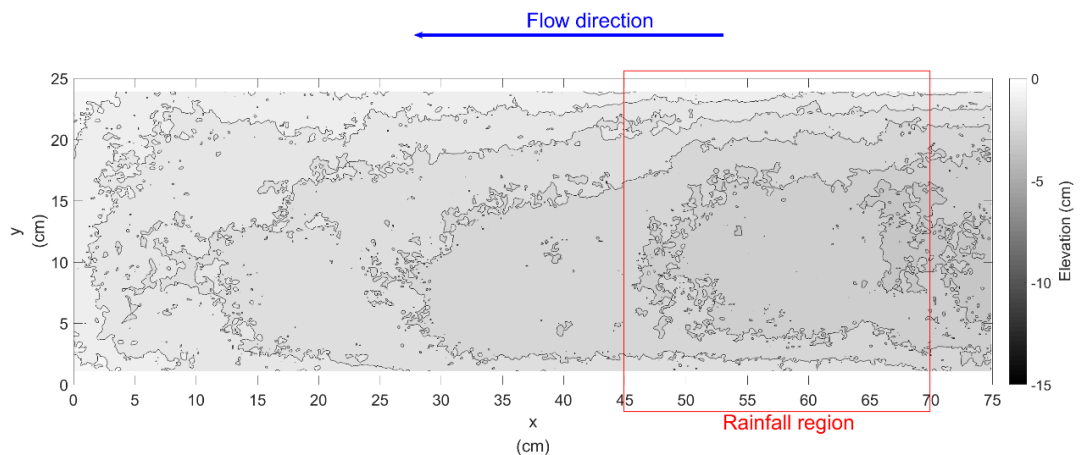
(a)



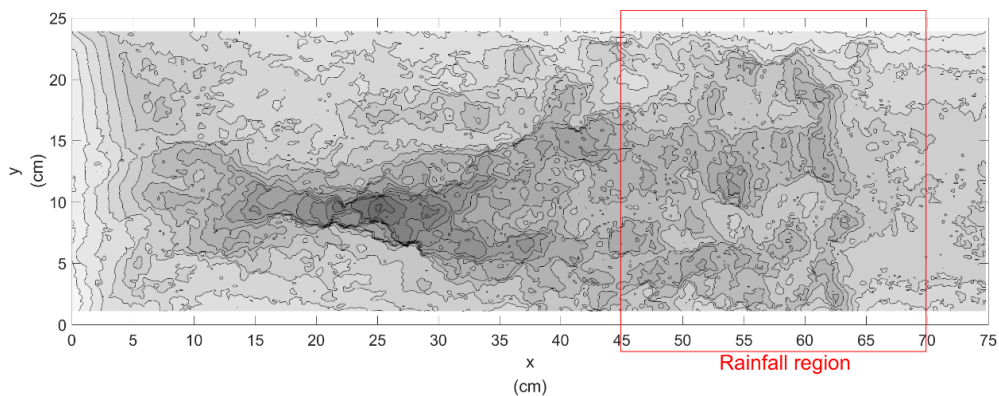
(b)

圖 4- 12 青灰泥實測土壤流失量(a)、估計土壤流失量(b)與降雨延之關係圖(資源來源：Wang and Lai, 2018)

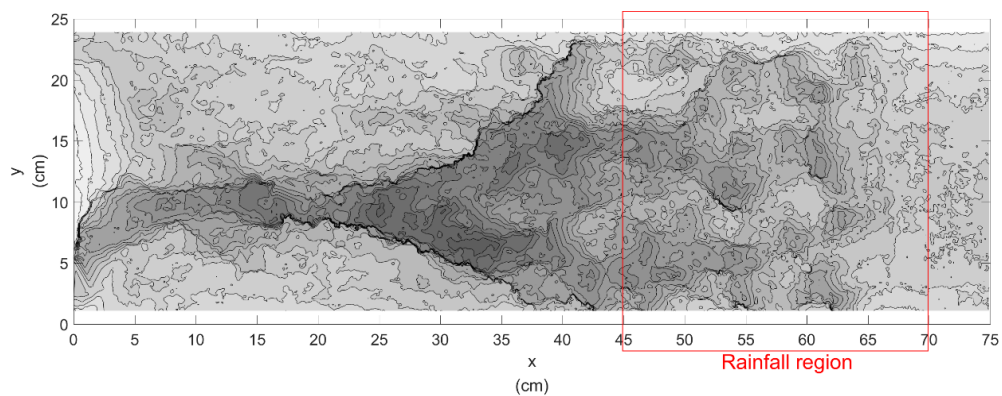
以 30° 地形坡度為例，圖 4- 13 為該組實驗不同降雨延時之雷射地形掃描建立之數值高程模型(DEM)。依 Liu et al. (2004)之研究，將坡地沖蝕分為雨濺沖蝕、片流(紋溝間)沖蝕、紋溝沖蝕和逕流輸砂等類型；本計畫以 30° 地形坡度之 DEM 變化(圖 4- 13)為例，將沖蝕坡面分為距下游出口處 45-70cm(降雨區域)(區域 1)、30-45cm(區域 2)，和 0-30cm(區域 3)等三個區域，進行沖蝕過程演進之分類及分析，並依不同降雨延時之 DEM 求得土壤體積變化及百分比，如表 4- 18 所列。



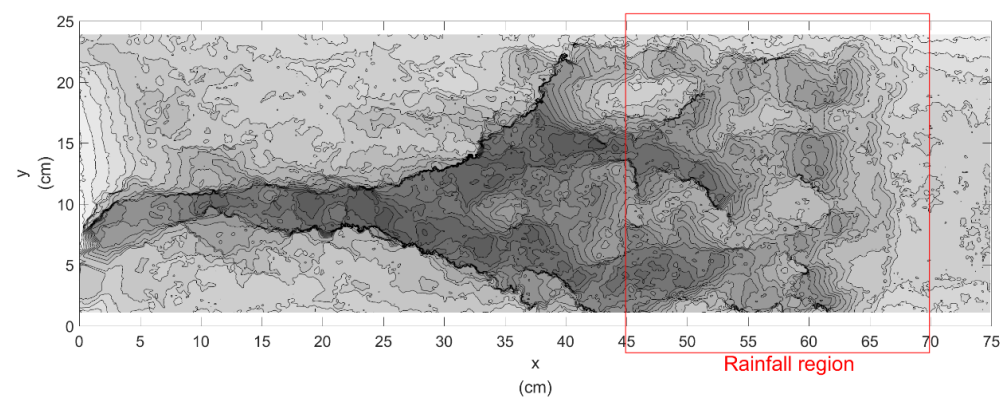
(a)



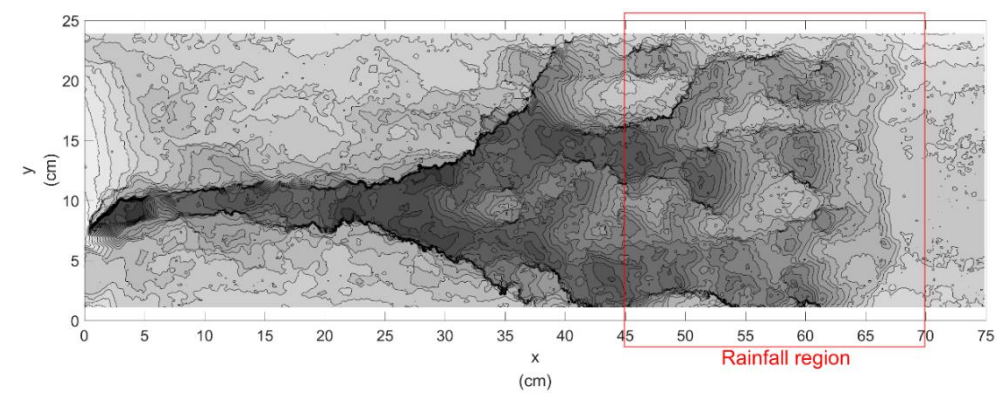
(b)



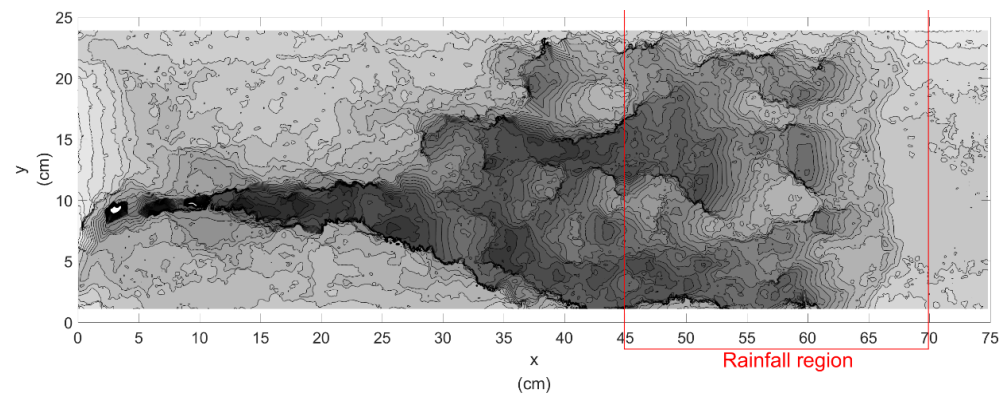
(c)

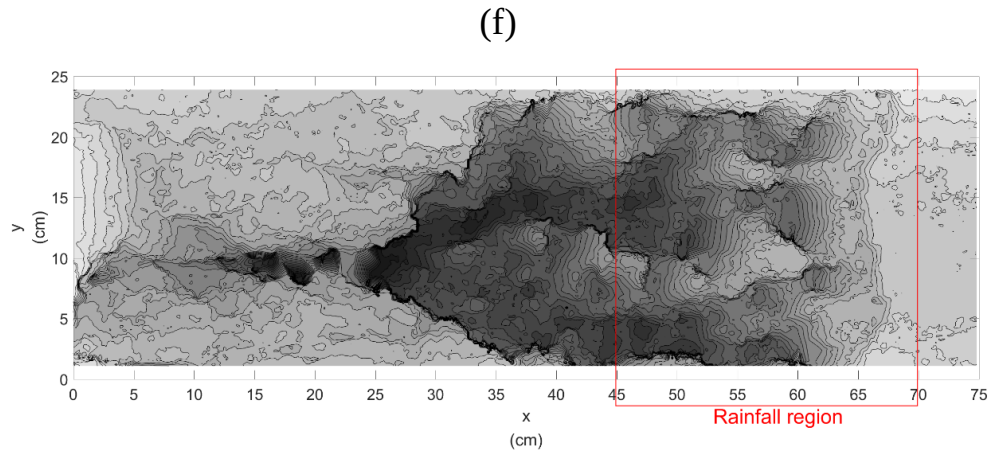


(d)



(e)





(g)

圖 4- 13 地形坡度 30°之青灰泥人工降雨沖蝕雷射掃描 DEM：(a)初始地形、(b)5 分鐘降雨延時地形、(c) 10 分鐘降雨延時地形、(d) 15 分鐘降雨延時地形、(e) 20 分鐘降雨延時地形、(f)25 分鐘降雨延時地形，(g)30 分鐘降雨延時地形(資源來源：Wang and Lai, 2018)。

表 4- 18 距下游出口處不同距離分區之土壤流失百分比，以 30°地形坡度青灰泥降雨沖蝕結果為例(資料來源：Wang and Lai, 2018)

降雨延時 (min)	到出口距離	45–70 cm	30–45 cm	0–30 cm
5		23%	28%	49%
10	區域土壤流失 量佔總土壤流 失量之百分比	25%	32%	43%
15		29%	32%	39%
20		32%	31%	37%
25		33%	31%	36%
30		33%	33%	34%

由表 4- 18，雨滴擊打和雨濺沖蝕主要發生於降雨區域(區域 1)，此區之土壤流失量，隨降雨延時增加，約佔總土壤流失量之 23%到 33%。區域 2 之土壤流失量約佔總土壤流失量之 28%到 33%；經實驗觀察，此區域中主要之沖蝕過程在降雨開始後之前 10 分鐘為漫地流造成之片流和紋溝間沖蝕，爾後隨紋溝之發展而產生紋溝沖蝕。在區

域 3，由紋溝中集中水流產生之土砂捲入及傳輸為主要之沖蝕現象，約佔總土壤流失量之 34%到 49%。上述討論係依距雷射掃瞄之表土地形變化進行描述，尚需後續實驗及研究論證土壤沖蝕過程之進展。

三、人工降雨機實驗-壤質砂土

依前述人工降雨機實驗之備土程序和操作流程，進行壤質砂土之沖蝕實驗，採 2 種降雨強度(75 mm/hr、100 mm/hr)，6 種坡度(5°、10°、15°、20°、25°、30°)進行。實驗結果以不同降雨延時之累積土砂產量和累積體積變化沖蝕量表示，如表 4-19 和表 4-20 所示。如表 4-19 所示，30 分鐘降雨之土砂產量隨坡度增加，界於 1.157 kg 到 7.543 kg (乾重)；在相同坡度下，不同降雨強度造成之總土砂產量差異較不顯著，且土砂入滲量低，隨坡度降低而由 0.014kg 增加到 0.047kg。如表 4-20 所示，由體積變化求得之沖蝕量隨坡度增加，界於 0.641 kg 到 9.005 kg (乾重)；在相同坡度下，不同降雨強度造成之總體積變化沖蝕量差異亦較不顯著。由實驗過程觀察發現降雨之雨滴擊打造成之表土壓密與紋溝邊避之崩塌應為體積變化沖蝕量高估土砂產量之主因，此現象多發生於降雨啟始之五分鐘內。

表 4-19 壤質砂土人工降雨沖蝕實驗累積土砂產量

	累積土砂產量 (kg)					
降雨延時(min) 坡度-降雨強度(mm/hr)	5	10	15	20	25	30
30°-75	0.673	2.069	3.296	4.635	6.232	7.543
30°-100	1.268	1.981	2.724	3.497	4.182	4.924
25°-75	0.984	1.933	2.821	3.61	4.463	5.403
25°-100	0.898	1.414	1.93	2.399	2.849	3.35
20°-75	0.605	1.109	1.688	2.254	2.892	3.558
20°-100	0.879	2.174	2.58	2.922	3.263	3.644

15°-75	0.548	0.897	1.181	1.426	1.669	1.899
15°-100	0.63	1.049	1.398	1.737	2.02	2.309
10°-75	0.575	0.895	1.168	1.413	1.638	1.898
10°-100	0.37	0.622	0.865	1.162	1.569	2.059
5°-75	0.148	0.348	0.554	0.809	0.986	1.379
5°-100	0.168	0.408	0.604	0.77	0.96	1.157

表 4- 20 壤質砂土人工降雨沖蝕實驗累積體積變化沖蝕量

	累積體積變化沖蝕量 (kg)					
降雨延時(min) 坡度-降雨強度(mm/hr)	5	10	15	20	25	30
30°-75	4.408	4.928	5.861	N/A	7.566	9.005
30°-100	2.316	N/A	4.624	5.504	5.580	5.713
25°-75	0.529	1.041	N/A	2.794	4.320	4.272
25°-100	0.940	N/A	1.069	4.130	N/A	4.353
20°-75	N/A	0.465	0.463	1.299	4.345	N/A
20°-100	N/A	3.142	3.317	4.226	N/A	N/A
15°-75	0.191	0.123	0.394	N/A	1.423	1.587
15°-100	0.116	0.275	N/A	1.299	N/A	N/A
10°-75	0.406	0.960	0.871	N/A	N/A	1.999
10°-100	N/A	0.198	N/A	N/A	N/A	N/A
5°-75	0.271	0.308	N/A	0.865	1.155	N/A
5°-100	N/A	N/A	N/A	0.046	0.312	0.641

將累積土產量(Measured soil loss 實測土壤流失量)與體積變化沖蝕量(Estimated soil loss 估計土壤流失量)隨降雨延時作圖，如圖 4- 14 和圖 4- 15 所示。不同坡度之土壤流失量與降雨延時成正相關冪次關係，將土壤流失量取對數值後，與降雨延時和坡度進行相關多變量線性複迴歸分析，結果如下列方程式：

$$\log_{10}(SL_m) = -0.746 + 0.025t + 0.027S \quad R^2 = 0.88,$$

$$\log_{10}(SL_e) = -1.274 + 0.029t + 0.047S \quad R^2 = 0.72,$$

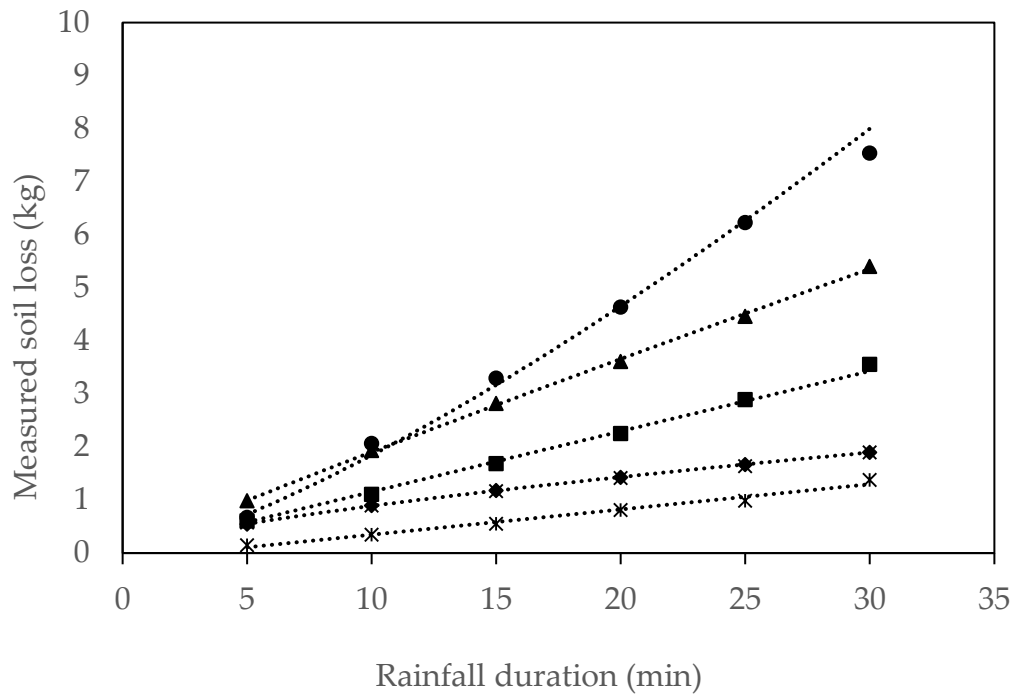
上式中， SL_m = 實測土壤流失量(kg); SL_e = 估計土壤流失量(kg); S = 槽體地形坡度 (°); t = 降雨延時 (min)。由上述迴歸分析，以高強(75mm/hr-100mm/h)降雨對壤質砂土之沖蝕量，與降雨延時和地形坡降關係顯著，但受降雨強度之影響不顯著，後續查找文獻或進行相關試驗持續探討。

比較估計與實測之土壤流失量，進行簡單線性迴歸如下式：

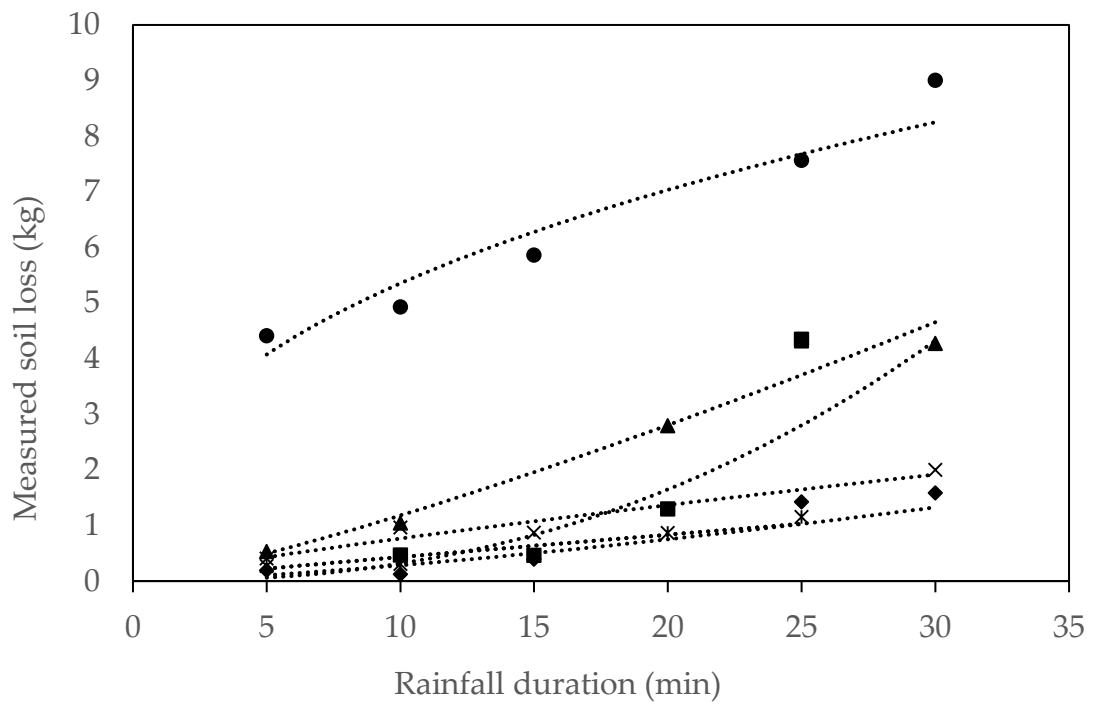
$$SL_e = 1.168SL_m \quad R^2 = 0.77,$$

上式中之斜率略大於 1，指出估計土壤流失量高估實測土壤流失量，可歸因於降雨初期雨滴擊打造成表土鬆散處壓密所增加之體積變化。應用上，將實測土壤流失量(SL_m ，kg)與雷射掃瞄體積變化量(V ， m^3)進行簡單線性迴歸，方程式如下：

$$SL_m = 880.88V + 0.6803 \quad R^2 = 0.77,$$



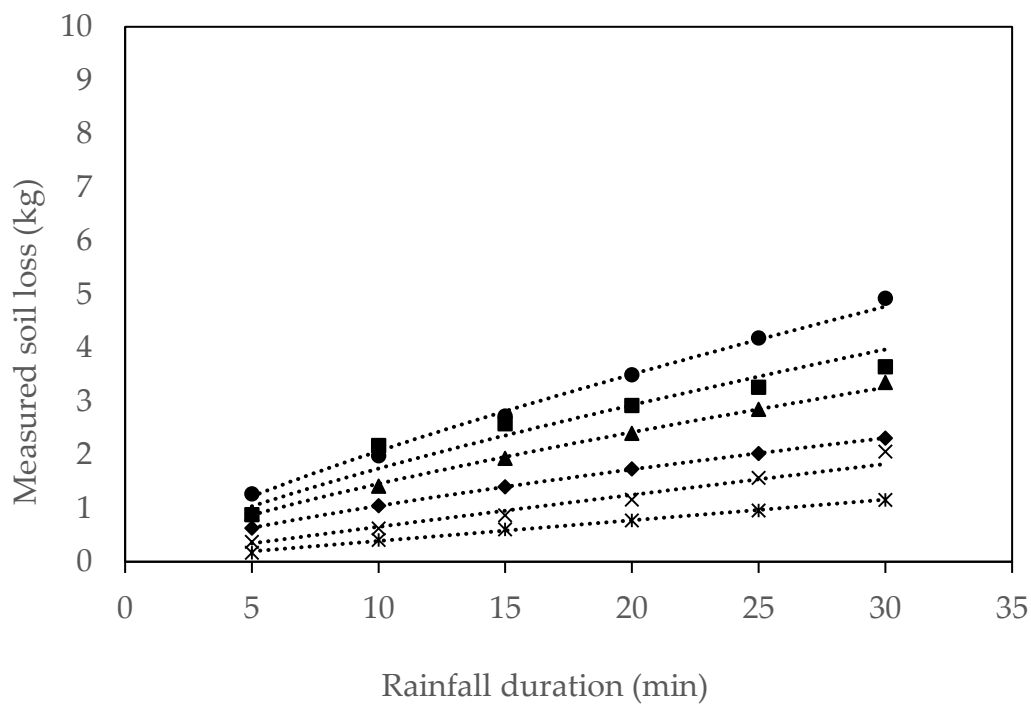
(a)



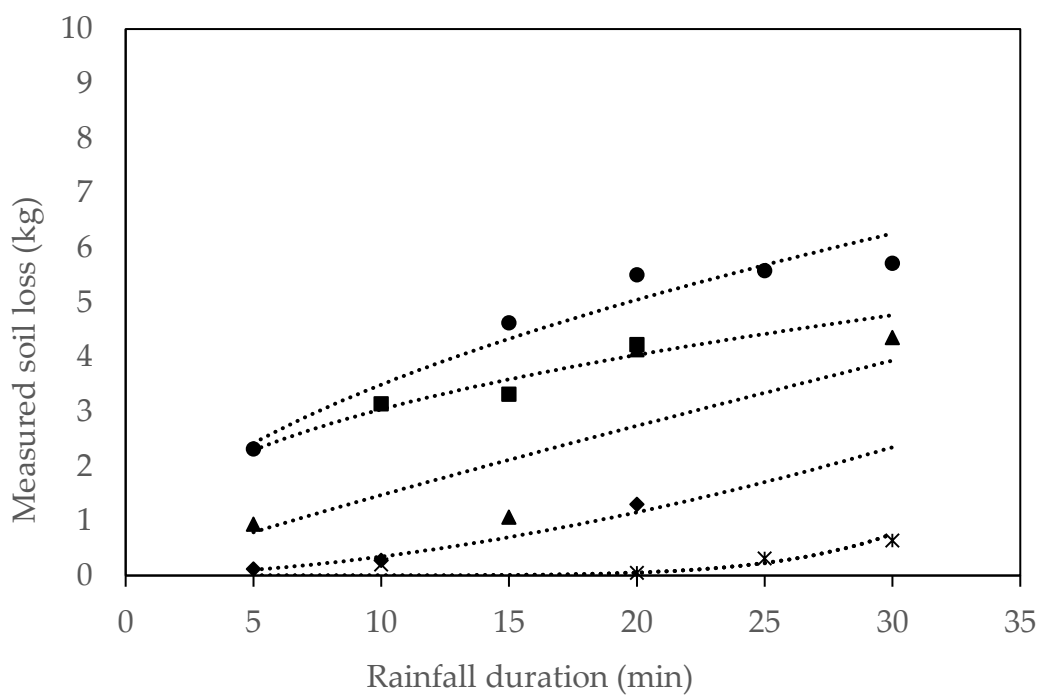
● 30° ▲ 25° ■ 20° ◆ 15° × 10° * 5° best-fit trend line

(b)

圖 4-14 壤質砂土(75mm/hr)實測土壤流失量(a)、估計土壤流失量(b)
與降雨延之關係圖



(a)



(b)

圖 4- 15 壤質砂土(100mm/hr)實測土壤流失量(a)、估計土壤流失量

(b)與降雨延之關係圖

綜合青灰泥和壤質砂土之人工降雨沖蝕實驗成果，將實測土壤流失量(SL_m , kg)與雷射掃瞄體積變化量(V , m^3)進行簡單線性迴歸結果如圖 4- 16 所示，並提出線性方程式，應用於現地試區由地形體積變化量(V)推估土壤流失質量(SL_m)：

$$SL_m = 968.55V$$

$$R^2 = 0.80,$$

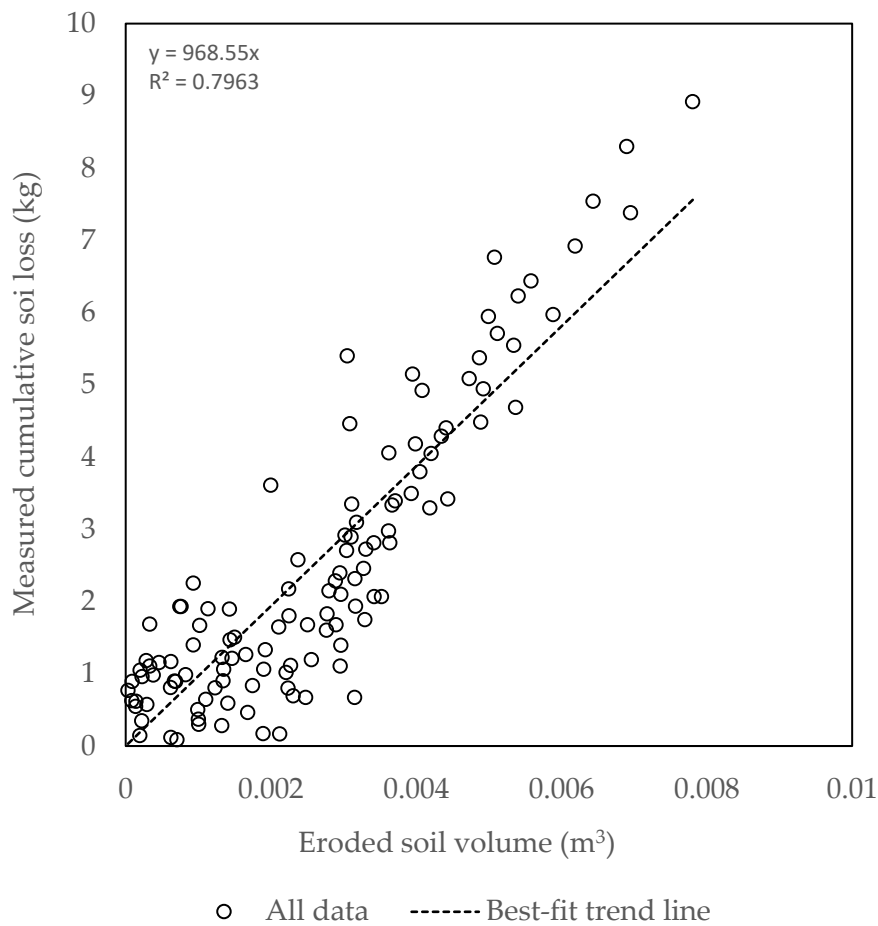


圖 4- 16 雷射掃瞄之地形變化體積與實測土壤流失量關係圖

第四節 實驗成果-沖蝕啟動應力實驗

一、渠道流況率定

沖蝕啟動應力實驗所使用之渠槽為循環式矩型水工渠槽，長 10 公尺、寬 0.4 公尺、深 0.4 公尺，其流量以入水閘門控制，並於下游蓄水箱設計一三角堰計算流量，其公式如下：

$$Q = C \times \frac{8}{15} \times (2g)^{0.5} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \times h^{2.5}$$

其中 Q = 流量； C = 常數； g = 重力加速度； θ = 三角堰開口角度； h = 堰口水深。率定實驗之結果如圖 4- 17 所示。

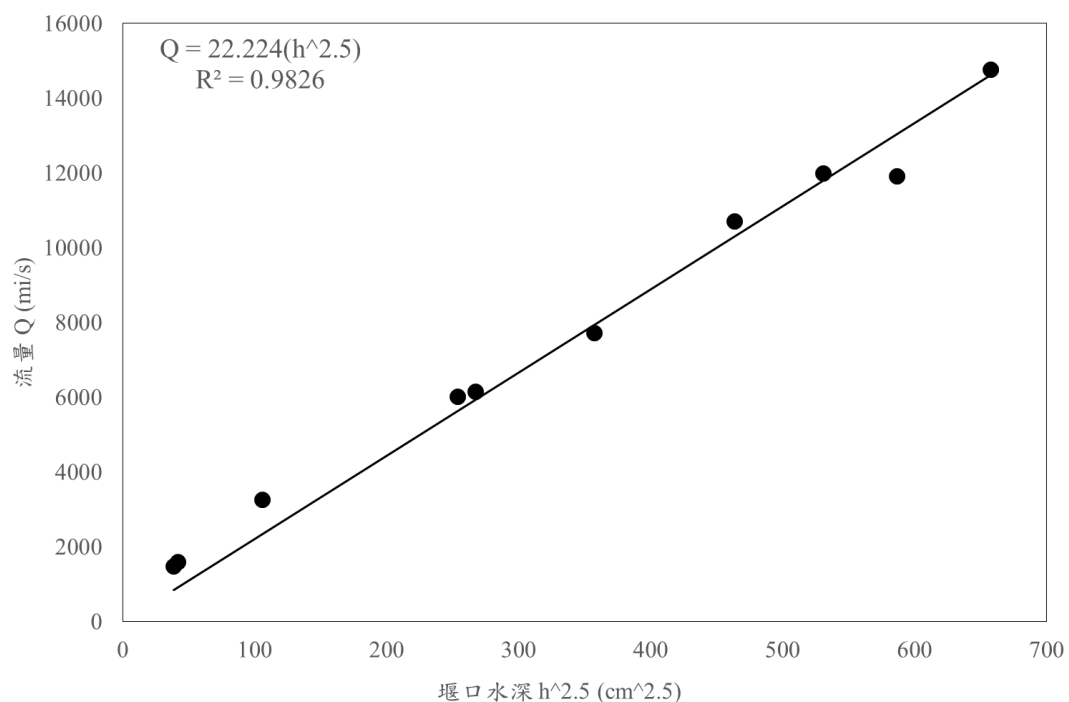


圖 4- 17 三角堰流量率定曲線

為探討渠底置入之土樣與渠底周圍粗糙度不一對水流造成之影響，以都卜勒流速儀(ADV)測量置入土樣中心(center)及上游(up)、下游(down)、左(left)、右(right)四個土樣邊界之時間平均流速剖面，如圖 4- 18 所示，不同點位之流速剖面雖有差異，但時間平均流速皆隨水

深呈指數關係遞增，其空間平均流速界於 0.082 m/s ~0.095 m/s 之間。

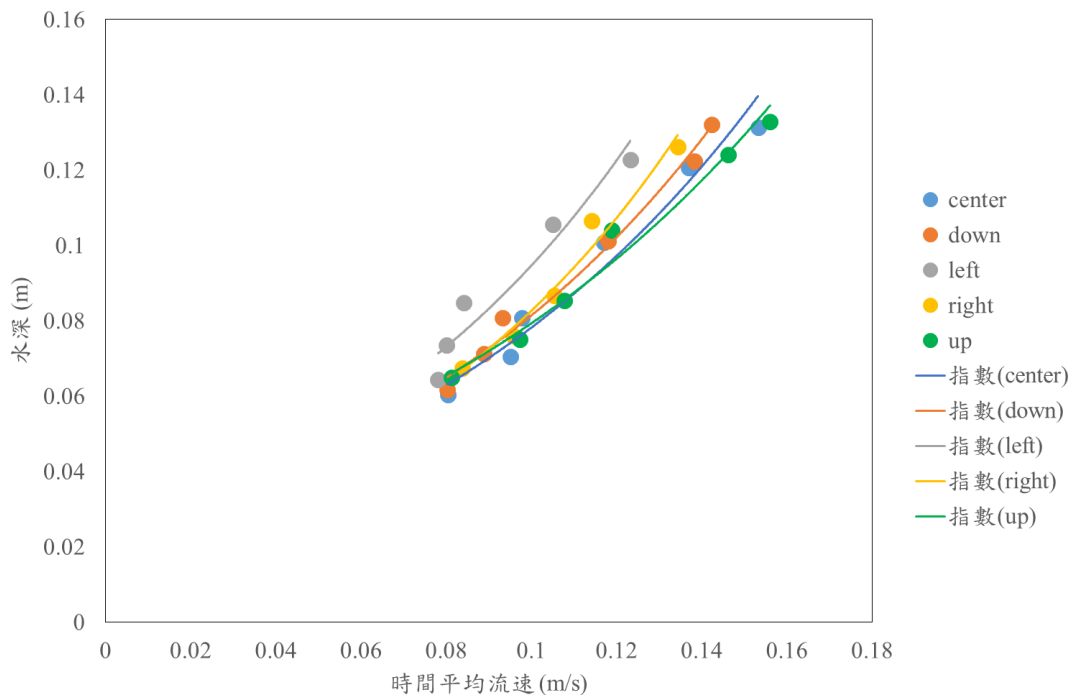
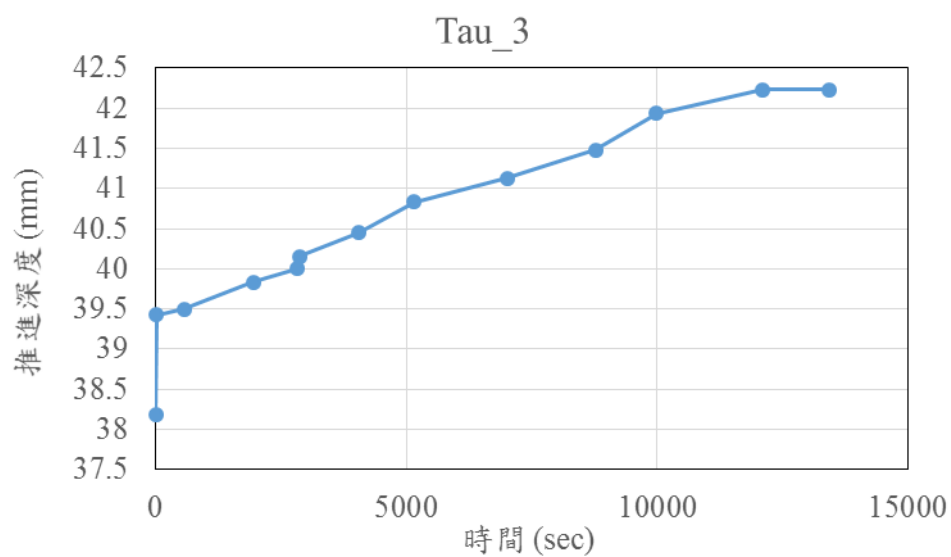
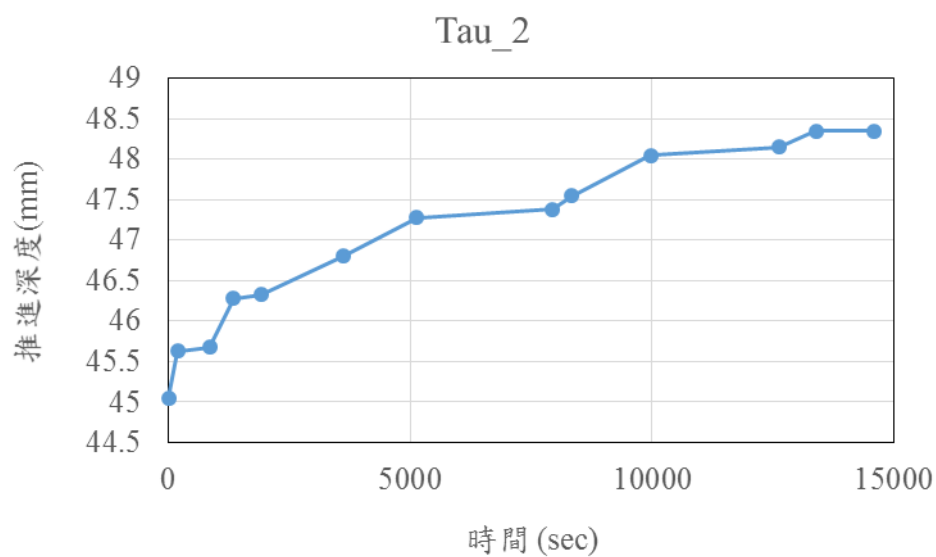
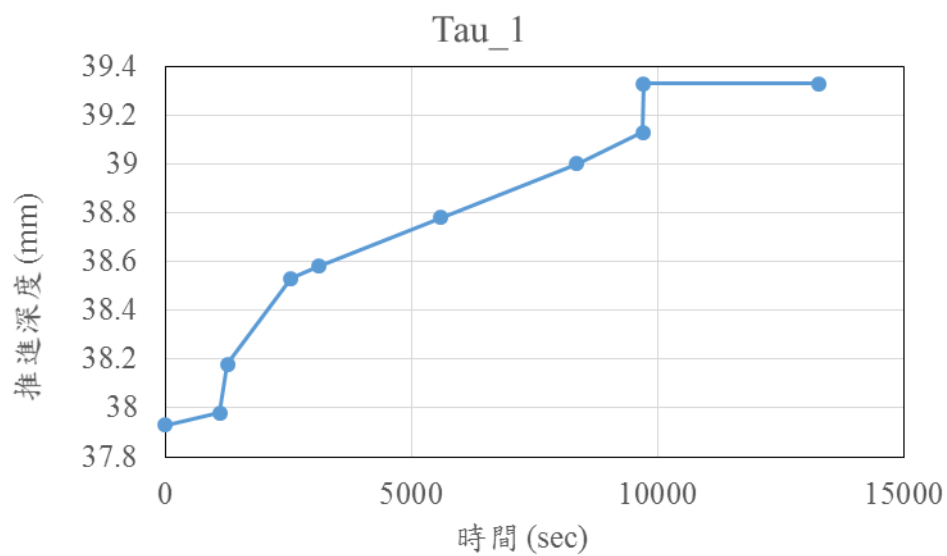


圖 4-18 置入土樣處流速剖面

二、沖蝕啟動應力實驗-青灰泥

沖蝕渠槽實驗首先進行不同壓密程度之青灰泥在不同流況產生之不同底床剪應力之作用下之置入土樣隨時間增加被推進之高度，表不同延時之沖蝕深度(體積)，如圖 4-19 所示，為土樣重製後自然沉降壓密 24 小時之結果：沖蝕深度隨時間增加呈非線性遞增，並於 3.5~4 小時逐漸穩定。經初步試驗後，選定 5 種底床剪應力之流況進行實驗，分別為 1.49 Pa (Tau_1), 2.04 Pa (Tau_2), 2.55 Pa (Tau_3), 3.02 Pa (Tau_4), 3.49 Pa (Tau_5)。土壤試體之不同壓密程度以自然沉降時間達 24、48 和 72 小時控制，將不同壓密程度之試體在 5 種流況之平均質量沖蝕率(三重覆實驗)之結果繪製關係圖，如圖 4-20 所示。



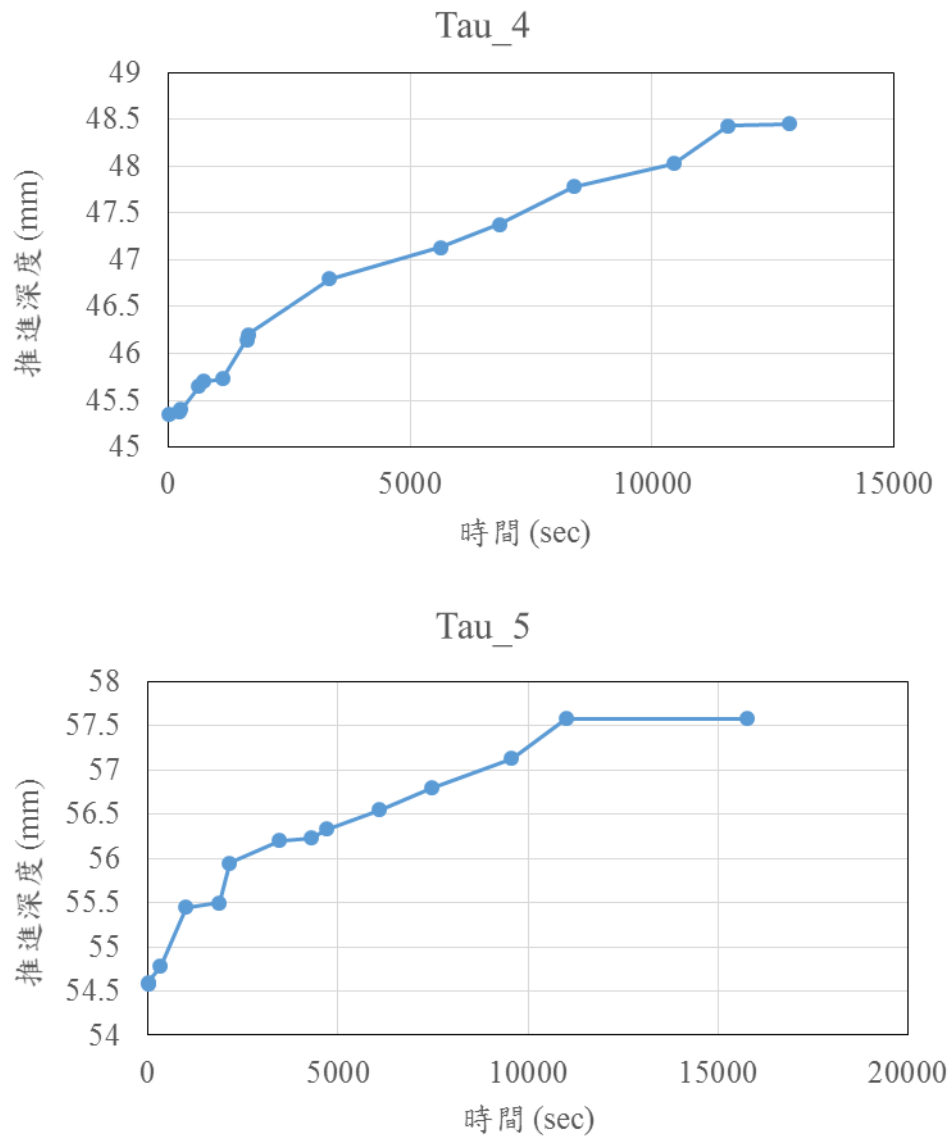
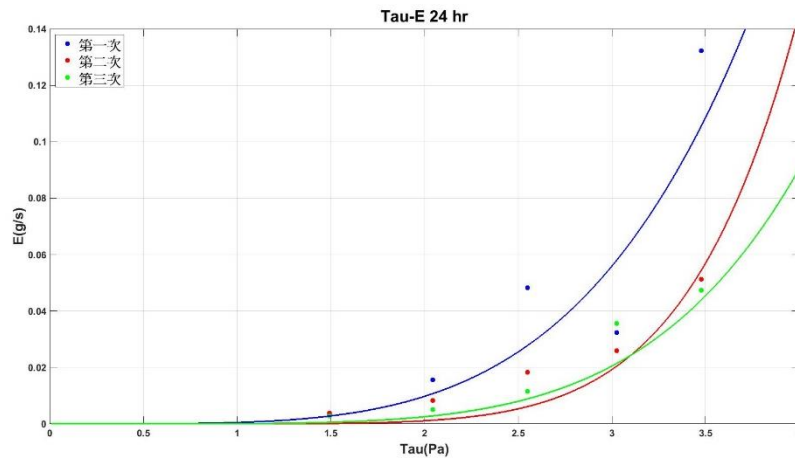
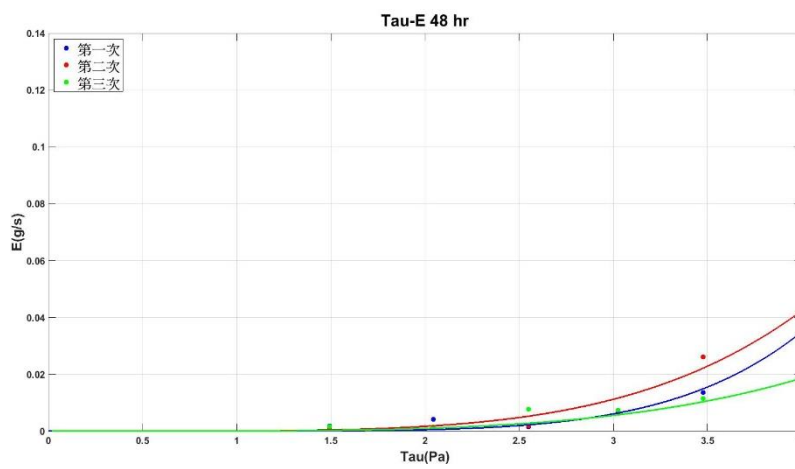


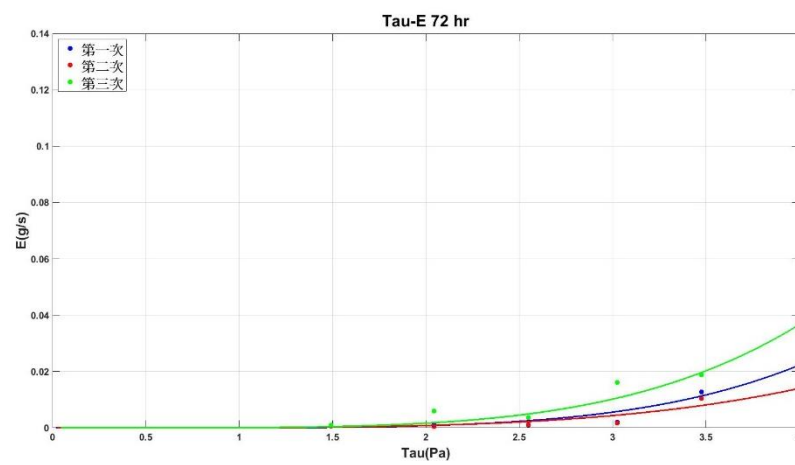
圖 4- 19 置入土樣推進(沖蝕)深度時間變化



(a)



(b)



(c)

圖 4-20 青灰泥土壤試體於不同流況下之平均沖蝕率：(a) 24 小時；

(b) 48 小時；(c) 72 小時壓密之試體

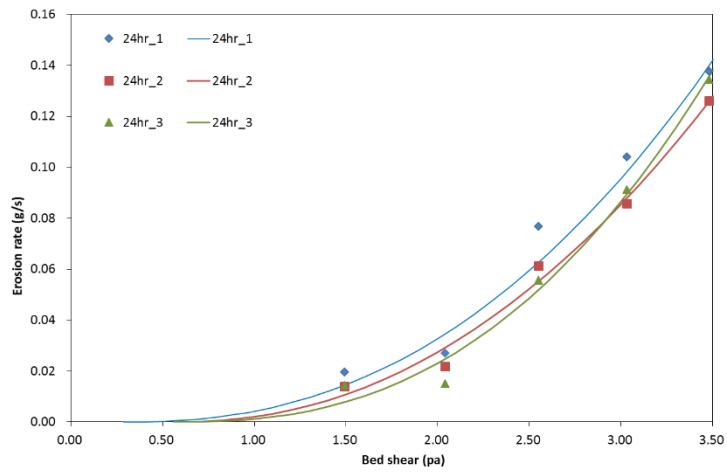
以非線性迴歸分析進行資料擬合，求得不同沉降壓密時間之青灰泥試體之沖蝕啟動臨界剪應力(τ_c)、其無因次式 Shields 參數(τ_c^*)，以及剪力雷諾數(Re^*)如表 4- 21 所示。

表 4- 21 青灰泥沖蝕啟動應力實驗結果

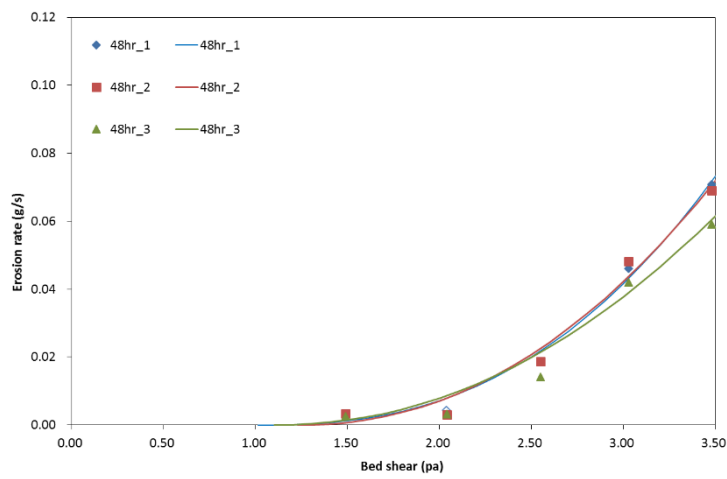
沉降時間 (hr)	總體密度 (kg/m ³)	τ_c (Pa)	τ_c^* (--)	Re^* (--)
24-1	1.836	0.660	0.112	3.221
24-2	1.803	1.375	0.234	4.649
24-3	1.866	1.033	0.176	4.030
48-1	1.878	1.456	0.214	4.783
48-2	1.906	1.023	0.150	4.010
48-3	1.888	1.100	0.161	4.158
72-1	1.914	1.258	0.234	4.446
72-2	1.879	1.124	0.209	4.202
72-3	1.899	1.001	0.187	3.967

三、沖蝕啟動應力實驗-壤質砂土

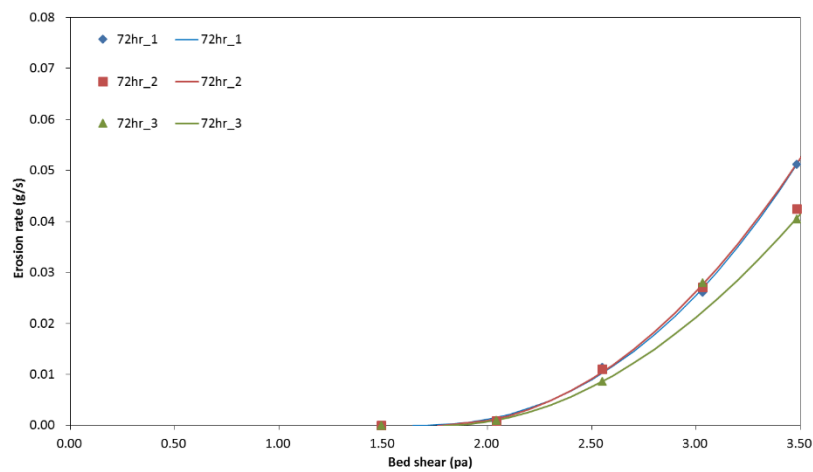
以相同實驗程序，壤質砂土試體在 5 種流況之平均質量沖蝕率(三重覆實驗)之結果如圖 4- 21 所示；其沖蝕啟動臨界剪應力(τ_c)、其無因次式 Shields 參數(τ_c^*)，以及剪力雷諾數(Re^*)如表 4- 22 所示。



(a)



(b)



(c)

圖 4- 21 壤質砂土試體於不同流況下之平均沖蝕率：(a) 24 小時；(b) 48 小時；(c) 72 小時壓密之試體

表 4- 22 壤質砂土沖蝕啟動應力實驗結果

沉降時間 (hr)	總體密度 (kg/m ³)	τ_c (Pa)	τ_c^* (--)	Re^* (--)
24-1	1.931	0.286	0.0104	9.933
24-2	1.947	0.590	0.0204	14.948
24-3	1.948	0.558	0.0195	14.393
48-1	2.001	1.013	0.0364	18.848
48-2	1.996	1.229	0.0425	21.447
48-3	1.998	1.103	0.0383	20.324
72-1	2.012	1.641	0.0593	23.831
72-2	2.009	1.761	0.0645	24.334
72-3	2.011	1.789	0.0651	24.738

將青灰泥和壤質砂土試體之實驗結果，與前人對非黏性土砂沖蝕啟動應力研究，提出之 Shields diagram 進行比較，如圖 4- 22 所示。結果指出，青灰泥之 τ_c^* 值大於相同剪力雷諾數之非黏性土砂者，可歸因為土壤試體中黏粒間之吸引力；壤質砂土之結果則受沉降壓密時間影響，其 τ_c^* 值離散程度高，但平均值落於前人研究之趨勢線，符合非黏性土砂沖蝕啟動應力之變化趨勢。

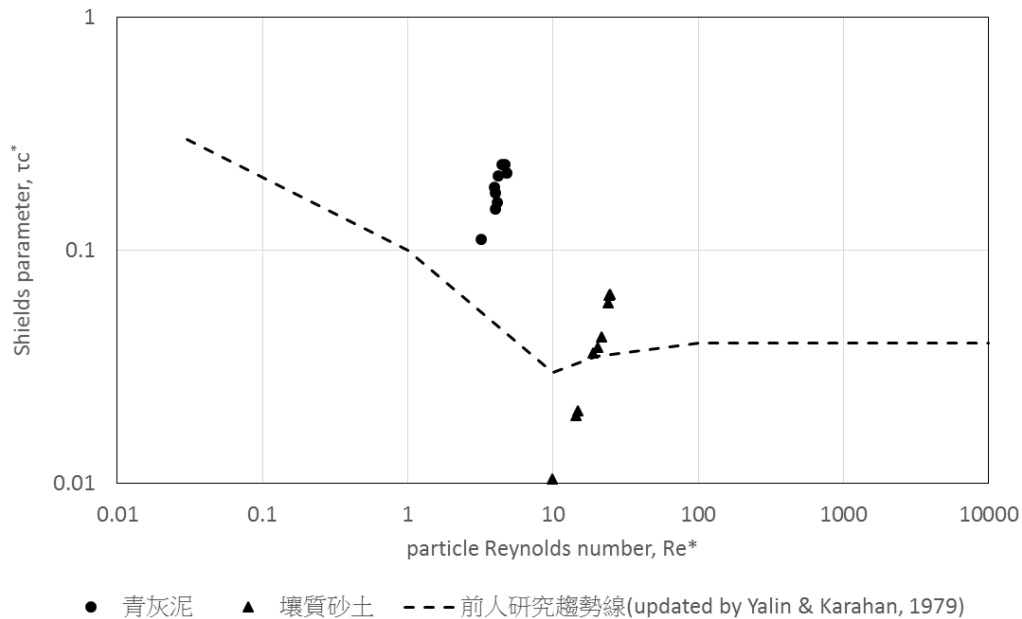


圖 4- 22 Shields diagram：本計畫實驗結果與前人研究之比較

第五節 案例分析-土壤沖蝕模擬

一、研究試區地理位置

本計畫之現地案例分析係考量資料之收集與監測，及環境變因控制等條件，選用地形環境相對單純的崩塌產生之裸露地為現地試區，進行案例應用分析。選定之試區範圍如圖 4- 23 所示，其地理位置自上方荖濃溪起自下方評估保全對象六龜鄉止，全長約 32 公里。荖濃溪復興—勤和河段右側(西岸)有清水溪(布唐薩諾阿爾溪)、布唐布那斯溪二大支流，此二支流上游因山崩土石流情況嚴重，而於主、支流交會口，形成大的沖積扇。當豪大雨來臨時，沖積扇迅速擴張，由主支流交匯口滑移淤塞主河道，而於薩巴阿爾臺—清水臺—濁水臺間，形成布唐布那斯堰塞湖(經濟部水利署，2012)。

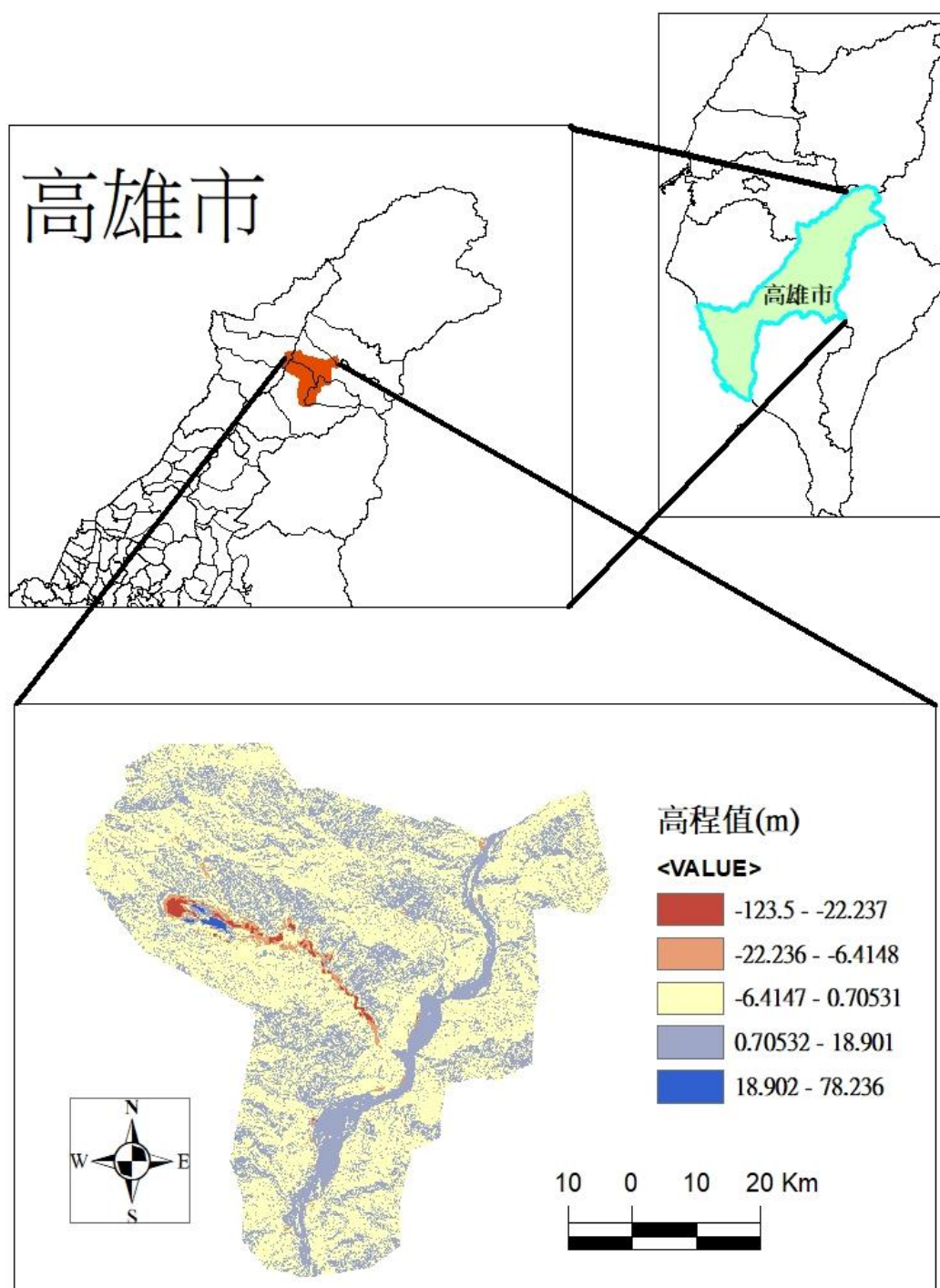


圖 4- 23 現地試區地理位置示意圖

二、環境基本資料

本區荖濃溪上游集水區主要雨量站為梅山(2)雨量站，站號為1730P126(表 4-23)。本區域年均雨量為 2613 毫米，主要降雨集中於四月至九月，歷年最大降雨強度記錄均為 2009 年莫拉克八八風災所創下(經濟部水利署，2012)。

表 4-23 梅山(2)雨量站歷年雨量記錄

(資料來源：經濟部水利署，2012)

測站名稱	歷年平均	歷年最大	歷年最小	一日最大	二日最大	三日最大
梅山(2) 1730P126	2,613.0	4,937.0 (2005)	1,402.0 (2002)	950.0 (2009/08/08)	1,630.0 (2009/08/08)	1,870.0 (2009/08/08)

本區域地質主要由第三紀樟山層與第四紀階地堆積層以及現代的沖積層所組成。梅山、樟山、亞知巴、梅蘭、復興等臺地之基盤岩石全為樟山層低度變質沉積岩所組成。樟山亞知巴臺地基盤岩石裸露，為變質之砂岩、頁岩與砂頁岩互層，或硬頁岩，其劈理與層理面大致平行。梅山布農族原住民部落梅蘭林道入口，小溪旁樟山層硬頁岩風化碎屑呈明顯鉛筆狀構造(經濟部水利署，2012)。

河床粒徑組成主要成為灰色含粉土與砂之級配不良礫石，統一土壤分類法為 GP 或 GP-GM。滲透係數介於 10^{-3} 至 10^{-6} 間，屬中等滲透性土壤。4 號篩以上之卵礫石含量以影像計算法得知其體積含量約 16%，唯該結果只限於表層粒徑分佈情形(經濟部水利署，2012)。

崩塌區資料蒐集：針對上游崩塌地區利用內政部地政司衛星測量中心所提供之航空攝影測量測製成果 100 公尺 DEM 進行地形圖繪製。布唐布那斯流域等高線圖(圖 4-24)，紅線為主要河谷方向，可知其崩塌地最大落差約為 1300 公尺，水平距為 5000 公尺，平均坡度

為 26%。圖 4- 25 為布唐布那斯流域立體網格圖。布唐布那斯溪土石流呈西北－東南流向，長度約 3,950 米，溪流平均坡降約 19%，河床平均寬度在上游河段約 20 米，中游河段約 45 米(經濟部水利署，2012)。

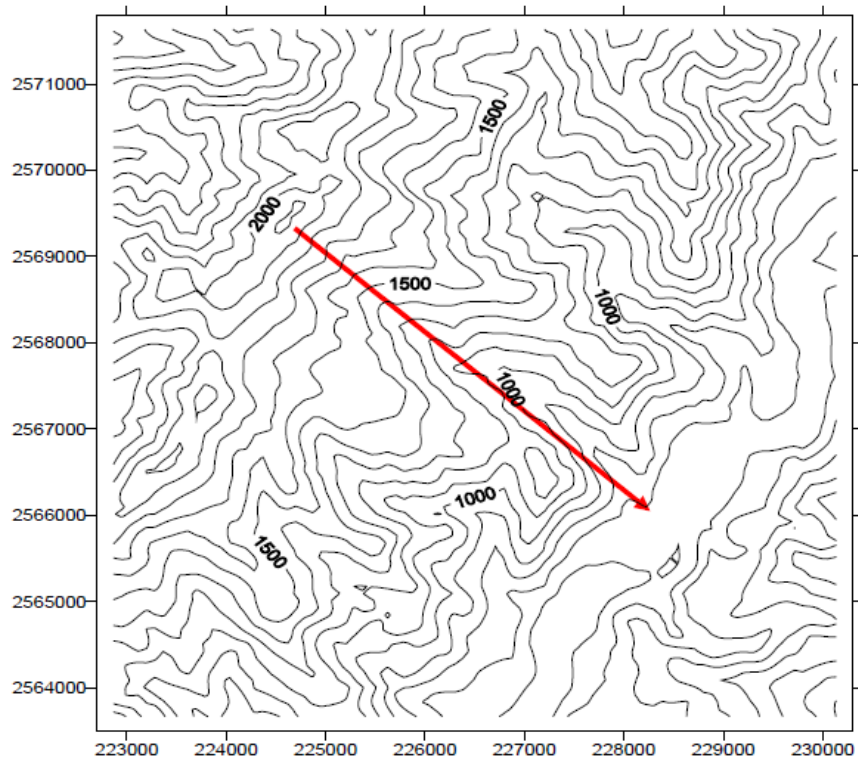


圖 4- 24 布唐布那斯流域等高線圖

(資料來源：經濟部水利署，2012)

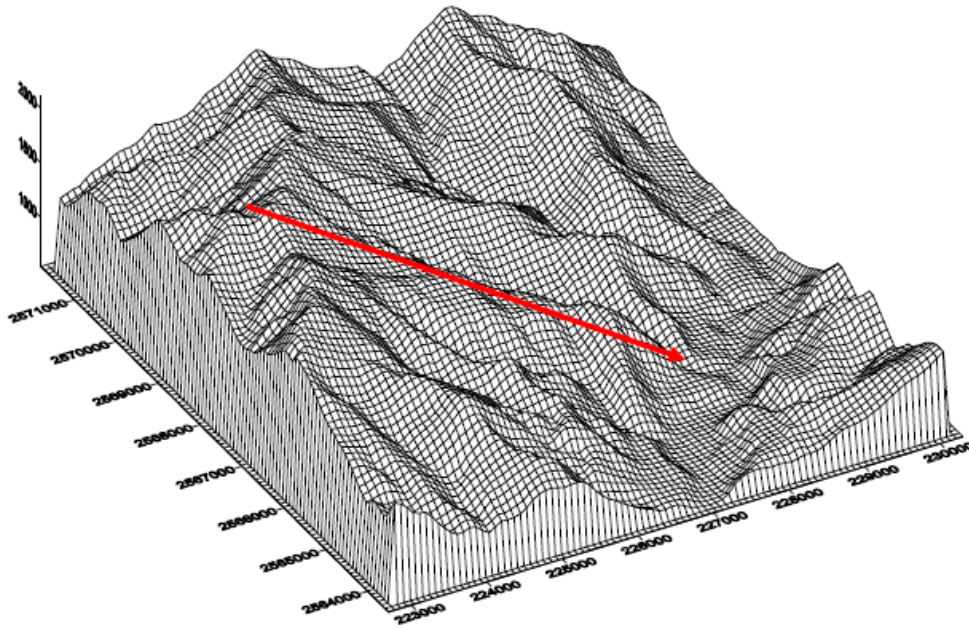


圖 4- 25 布唐布那斯流域立體網格圖

(資料來源：經濟部水利署，2012)

三、地形變化及土壤流失分析

為分析研究試區之地形變化，採用 2017 年 4 月及 2018 年 8 月對研究試區之 Lidar 地形掃描之數值高程模型資料，並進行各點位之高程資料相減，獲得 2017 年 4 月至 2018 年 8 月之地形高程變化，並計算該區域地表之變化體積，作為土砂變化體積（含表土流沖與崩塌）之測量值，再以本研究計畫成果提出之關係式，以地形體積變化量(V ， m^3)推估土壤流失質量(SL_m ， kg)： $SL_m = 1030.4V (R^2 = 0.84)$ 。因本計畫採用之模型主要探討表土沖蝕造成之土壤流失，為避免崩塌造成

地形體積變化影響，並考量分析區域之均質性假設，將研究試區分為十個區塊進行土壤流失量模擬，如圖 4- 26 所示。分別進行十個區塊之面積、高程資料、土壤沖蝕體積、土壤流失量和平均坡降計算，結果如表 4- 24 所示。

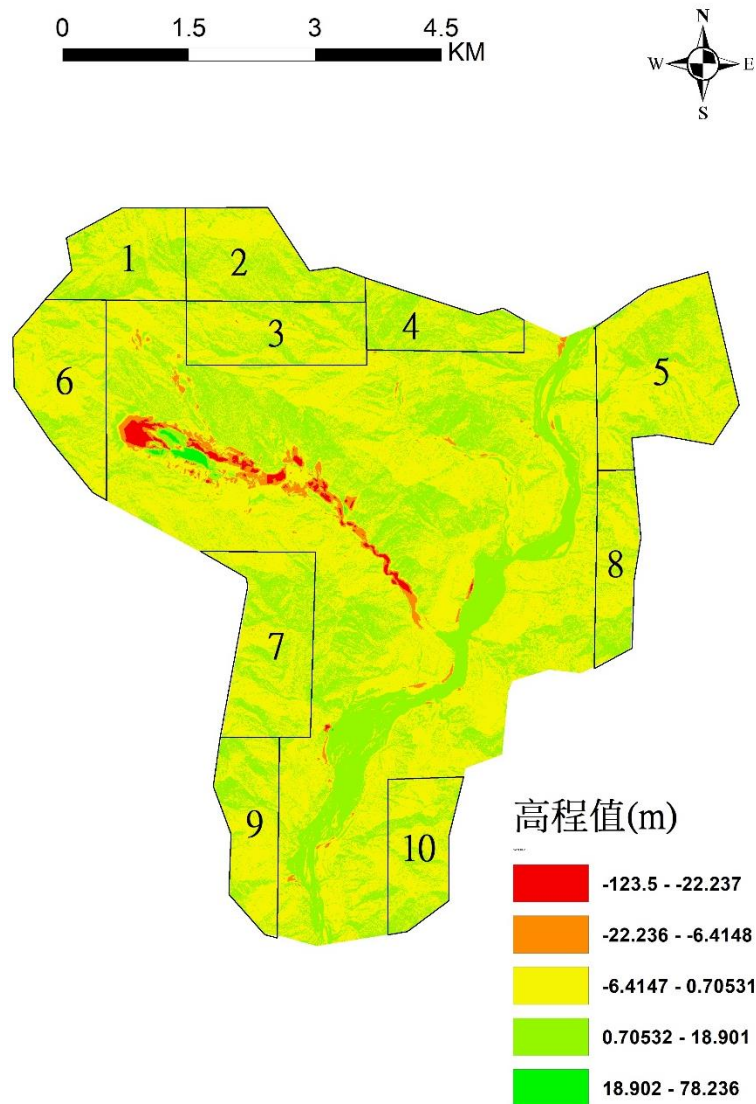


圖 4- 26 研究試區土壤流失量模擬區塊劃分

表 4- 24 土壤沖蝕模擬區塊地形和土砂量體變化資料

編號	面積 (m ²)	最小 高程差 (m)	最大 高程差 (m)	土壤 沖蝕體積 (m ³)	土壤 沖蝕量 (tonne)	平均 坡降 (°)
1	1447886	-23.44	38.43	103553.17	106701.18	40.02
2	1689596	-18.01	31.57	97213.95	100169.25	34.61
3	1611924	-55.78	31.57	212082.97	218530.30	36.95
4	1112775	-10.50	32.23	110564.03	113925.18	39.42
5	2816981	-13.52	16.44	284265.09	292906.75	30.80
6	1873972	-14.91	16.18	139998.29	144254.24	38.17
7	2061366	-27.31	17.23	182797.30	188354.34	37.71
8	1031267	-12.02	14.15	106047.65	109271.50	38.05
9	1394029	-48.44	60.78	86723.94	89360.34	31.75
10	1287867	-10.37	11.30	96607.98	99544.87	33.14

考慮降雨資料之完整性與測站距離，選用氣象局測站復興（站號 C0V210）和小關山（站號 C1V220）自 2017 年 4 月至 2018 年 8 月之月雨量資料，以徐昇法求得研究試區之降雨量，作為模擬模型之降雨輸入值；氣象測站點位如圖 4- 27 所示，降雨輸入資料如表 4- 25 所示。

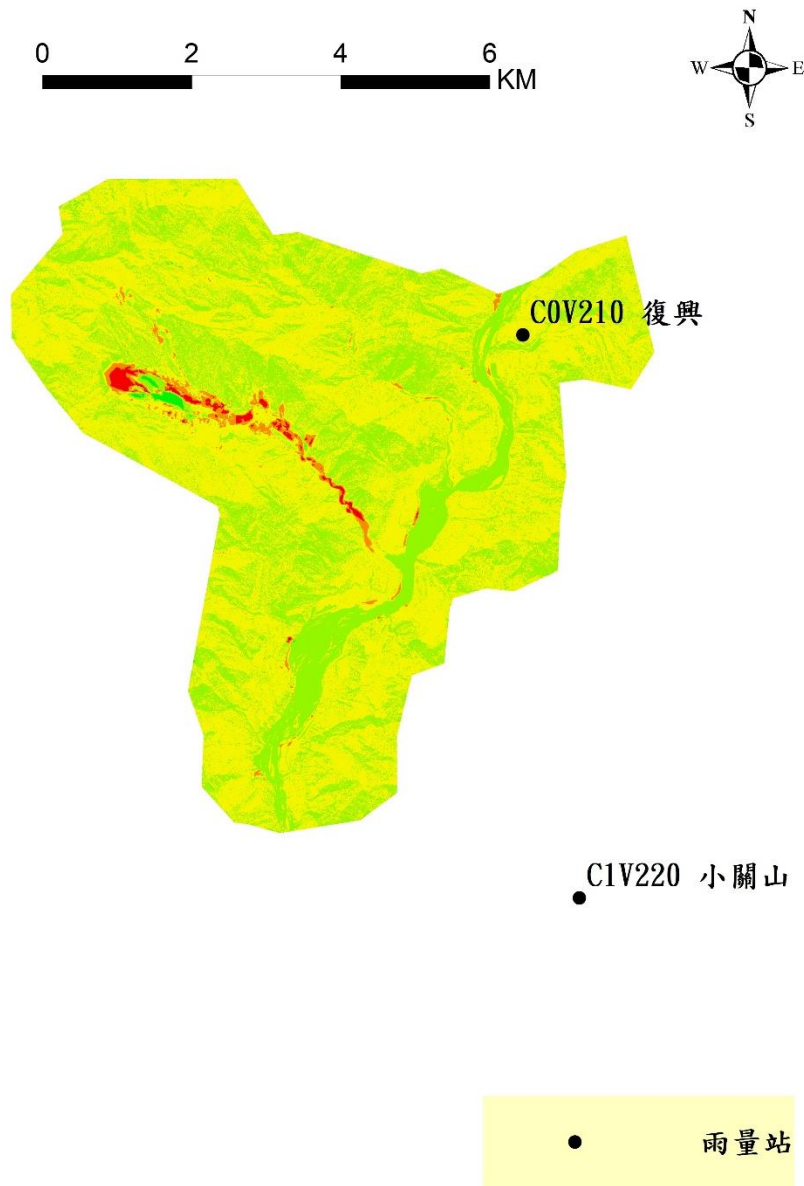


圖 4- 27 研究試區氣象測站點位圖

表 4- 25 土壤沖蝕模擬降雨輸入資料

站號	月份	雨量 (mm)	站號	月份	雨量 (mm)	徐昇法 雨量 (mm)
C0V210	201704	215	C1V220	201704	298.5	284.908
C0V210	201705	275	C1V220	201705	315.5	308.907
C0V210	201706	1260.5	C1V220	201706	1755.5	1674.922
C0V210	201707	700	C1V220	201707	1045	988.840
C0V210	201708	97	C1V220	201708	138	131.326
C0V210	201709	37.5	C1V220	201709	131	115.780
C0V210	201710	169	C1V220	201710	245.5	233.047
C0V210	201711	15.5	C1V220	201711	22.5	21.361
C0V210	201712	9.5	C1V220	201712	16.5	15.361
C0V210	201801	113	C1V220	201801	142	137.279
C0V210	201802	27	C1V220	201802	52.5	48.349
C0V210	201803	77.5	C1V220	201803	47.5	52.383
C0V210	201804	80	C1V220	201804	95.5	92.977
C0V210	201805	106	C1V220	201805	146	139.489
C0V210	201806	496.5	C1V220	201806	631.5	609.524
C0V210	201807	369.5	C1V220	201807	640	595.967
C0V210	201808	80	C1V220	201808	251	223.164

在案例分析中，以坡地土砂沖蝕系統動力模型模擬各區域之月土壤沖蝕量，並以表 4- 24 之土壤沖蝕量（為 2017 年 4 月至 2018 年 8 月 17 個月之總量）作為總土壤沖蝕量之實測值，進行參數優化；其結果如表 4- 26 和表 4- 27 所示。由表 4- 26，總土壤流失量在 10 萬公噸/17 個月左右之區域模擬結果最為準確，十個區域之模擬平均誤差為-11.3%。由表 4- 27，在土壤捲入和再捲入過程中之有效河川功率比

例 (F) 和捲入過程之比能 (J , J/kg) 對模擬結果較為敏感；河川功率閾值 (Ω_0 , W/m²)、沉積層之離散率 (α_d , kg/m³) 和原土層之離散率 (α , kg/m³) 等參數則相對穩定，各組之數值變化小；此果結指出，在此區域中，與水流動力相關之參數對沖蝕量之影響明顯高於土壤本身之抗沖蝕特性，且各區塊之土壤特性差異不大。

表 4- 26 現地試區總土壤沖蝕量模擬結果與誤差

編號	總土壤沖蝕量 實測值 (tonne)	總土壤沖蝕量 模擬值 (tonne)	相對誤差 ^a (%)
1	106701.18	108075.00	1.3%
2	100169.25	106921.00	6.7%
3	218530.30	134456.00	-38.5%
4	113925.18	92963.00	-18.4%
5	292906.75	126203.00	-56.9%
6	144254.24	151422.00	5.0%
7	188354.34	102435.00	-45.6%
8	109271.50	112327.00	2.8%
9	89360.34	125975.00	41.0%
10	99544.87	89316.20	-10.3%
平均誤差 (%)			-11.3%

^a 誤差誤差 = [(模擬值 - 實測值) / 實測值] × 100%

表 4- 27 現地試區模擬參數文獻值和優化結果^a

ID	F	J	Ω_0	α_d	α
文獻值 ^b	0.01-0.15	0.0737-70.6	0.007-0.35	1500-55800	31-1000
1	0.1500	0.3000	0.3500	15000.00	1000.00
2	0.0509	0.2749	0.3498	15000.00	1000.00
3	0.3066	0.2609	0.3220	15000.00	999.99
4	0.2173	0.1217	0.3463	14999.96	1000.00
5	0.2080	0.2538	0.3497	15000.00	1000.00
6	0.0844	0.3343	0.3443	15000.05	1000.00
7	0.1500	0.3000	0.3500	15000.00	1000.00
8	0.1500	0.3000	0.3500	15000.00	1000.00
9	0.1500	0.3000	0.3500	15000.00	1000.00
10	0.3071	0.1518	0.2414	15000.04	999.98

^a 參數定義： F = 在土壤捲入和再捲入過程中之有效河川功率比例； J = 捲入過程之比能（J/kg）； Ω_0 = 河川功率閾值（W/m²）； α_d = 沉積層之離散率（kg/m³）； α = 原土層之離散率（kg/m³）。

^b 參考文獻：Misra and Rose (1996); Sander et al. (1996); Mahmoodabadi et al. (2014); Guo and Yu (2016); Hong et al. (2016); Yu et al. (2017).

第五章 結論及建議

第一節 結論

本研究計畫以土壤物理實驗、沖蝕啟動應力實驗，和人工降雨實驗，探討坡面土壤沖蝕之物理過程，提出相關參數，作為土壤沖蝕物理模型之輸入參考，進行土壤沖蝕和流失量隨降雨延時之變化模擬。藉由實驗結果建立雷射地形掃描與沖蝕土砂量體之關係式，研討遙測技術於集水區土砂量體評估之應用；並以位於高雄市荖濃溪集水區內崩塌產生之裸露地為例，作為現地試區，進行 2017 年 4 月至 2018 年 8 月研究試區之土砂沖蝕量體評估，模擬每月之土壤流失量變化，以開發豪雨期間集水區坡地土砂沖蝕量體評估方式。計畫工作項目與執行進度與預期進度符合，具體研究結果分述如下：

1. 國內外相關文獻回顧分為土壤沖蝕室內實驗、土壤沖蝕現地調查與試區實驗和土壤沖蝕模型等三方向，進行相關實驗設備、方法，主要研究結果和模擬模型彙整與評析。
2. 土壤物理實驗進行土壤水分係數（MF 值）、顆粒密度、粒徑分佈、塑性限度與液性限度和團粒穩定分析。考量土壤質地、農業用土與地理分布範圍，選用青灰泥岩淤積土、砂質壤土與紅土等三種土壤，進行相關分析。青灰泥之平均 MF 值為 1.010、壤質砂土者為 1.012、紅土者為 1.039，略高於其他兩種土壤。青灰泥和壤質砂土之土壤顆粒密度平均值皆為 $2.69(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、紅土者為 $2.62(\text{g}/\text{cm}^3)$ ，紅土因顆粒細小，黏粒含量高，顆粒密度之變異性亦高。粒徑分佈結果指出平均土粒大小排序為砂質壤土 > 青灰泥 > 紅土。土壤之可塑性由塑性、液性限度與塑性指數表示，壤質砂土為非黏性土壤，不具有塑性、液性限度，

而紅土因顆粒細小，黏粒含量較高，可塑性較青灰泥高。團粒穩定分析結果指出，因壤質砂土和青灰泥為非黏性和低塑性之土壤，不具團粒特性，唯紅土具有團粒之特性。綜觀而論，壤質砂土、青灰泥、紅土等依序為不具可塑性之非黏性土砂、可塑性低之砂質壤土、可塑性高之黏土。

3. 人工降雨機沖蝕實驗，以不同降雨強度(75 mm/hr、80 mm/hr、100 mm/hr)和坡度(5°、10°、15°、20°、25°、30°)進行青灰泥和壤質砂土之沖蝕實驗，每場降雨延時為 30 分鐘，每 5 分鐘收集土壤流失量並進行雷射地形掃描。實驗結果指出於高強度短延時之降雨事件中，土壤流失量隨降雨延時和地形平均坡度而增加，而降雨強度對土壤流失量之影響並不顯著。經複迴歸分析，實測和估計之土壤流失量皆與降雨延時和平均坡度呈線性或半對數線性關係。由實驗資料獲得一簡單線性迴歸方程式，得使用地形體積變化量(V, m^3)推估土壤流失質量(SL_m, kg)： $SL_m = 968.55V$ ； $R^2 = 0.80$ 。
4. 沖蝕啟動應力實驗，以 5 種沖蝕應力(渠道底床剪應力：1.49 Pa、2.04 Pa、2.55 Pa、3.02 Pa、3.49 Pa)進行 3 種壓密程度(然沉降 24 hr、48 hr、72 hr)之青灰泥和壤質砂土試體之沖蝕實驗，求得不同沖蝕應力流況下之平均沖蝕率，並以非線性擬合求得其沖蝕啟動臨界剪應力(τ_c)及其無因次數(Shields 參數， τ_c^*)。實驗結果指出，不同沉降靜置時間之試體，其含水量和總體密度隨時間略有增加，但無顯著差異；然 τ_c 隨試體之壓密程度而增加，且此情況以壤質砂土較顯著。將青灰泥和壤質砂土試體之實驗結果，與前人提出之 Shields diagram 比較發現，青灰泥之 τ_c^* 值大於相同剪力雷諾數之非黏性土砂者，可歸因為土壤試

體中黏粒間之吸引力；壤質砂土之結果則受沉降壓密時間影響，其 τ_c^* 值離散程度高，但平均值落於前人研究之趨勢線，符合非黏性土砂沖蝕啟動應力之變化趨勢。

5. 土壤沖蝕模擬之試區案例分析以位於高雄市荖濃溪集水區內崩塌產生之裸露地進行總土壤流失量之模擬。結果指出總土壤流失量在 10 萬公噸/17 個月左右之區域模擬結果最為準確，十個區域之模擬平均誤差為-11.3%；在此區域中，與水流動力相關之參數對沖蝕量之影響明顯高於土壤本身之抗沖蝕特性，且各區塊之土壤特性差異不大。

第二節 建議

本計畫之研究成果可作為不同降雨強度、降雨延時之單場或數場降雨事件對坡面造成之土壤沖蝕與表土流失進行不同時距之模擬與土砂量體估計，作為降雨事件中之土砂量體運移及變化評估參考，作為後續災害風險評估與治理對策研擬之參據。為精進本研究計畫之學術貢獻與應用價值，提出後續研究建議說明如下：

1. 本研究計畫採用之土壤沖蝕物理模型以 Hairsine-Rose model 方程式為基礎，同時考量降雨和逕流造成之沖蝕沉積作用及其交互影響，並將被沖蝕之土壤分為原地形土層和沖蝕後沉降之土壤形成之沉積層。將土壤沖蝕過程分為降雨分散、降雨重新分散、逕流捲起、逕流重新捲起、土砂沉降等五大作用進行沖蝕模擬分析。然對於坡度較高和高強度降雨產生之表土壓密作用和崩落及塌陷等重力作用並無考量，此乃造成誤差之主要原因，可作為後續模型精進之參考方向。

2. 建議在模型中增列土壤水分因子或進而考量降雨逕流關係，作為土壤沖蝕機制之影響因子。
3. 本研究採用之土砂沖蝕系統動力模型適用於短延時、事件型之土壤沖蝕模擬與流失量推估。然因現地試區之降雨資料為每月平均雨量，降雨延時資訊不足，造成降雨強度及延時輸入可能與實際情況有異，影響模擬結果。建議在未來應用上，降雨資料之收集以事件形之降雨強度與延時為準，可提供更佳之模擬效能。
4. 在土壤沖蝕模擬過程中，假設沖蝕坡面之土壤及降雨特性皆為均質，以單一控制面積進行一維模擬，未考量空間變異性。建議未來可將本模型之物理方程式與地理資訊系統介面結合，考量空間異質性，進行模擬，增加模型之應用價值。

參考文獻

1. 代肖，張海濤，周大邁，張愛軍，“人工類比降雨裝置及其應用介紹”，中國水土保持，第12卷，52-54頁，2012。
2. 林俐玲，林文英，“土壤流失推估模型之應用與探討”水土保持學報，第03期，第40卷，2008。
3. 林俐玲，陳品岡，“修正版通用土壤流失公式(RUSLE)之簡介”水土保持技術，第5期，第04卷，251-257頁，2010。
4. 徐向舟，張紅武，朱明東，“雨滴粒徑的測量方法及其改進研究”中國水土保持，第02卷，22-24頁，2004。
5. 陳振宇，葉全民，趙美香，“噴霧霧滴濾紙率定法研究初探”，山西農業大學學報，第04期，第16卷，422-425頁，1996。
6. 楊啟見，林俊全，鄭遠昌，“泥岩邊坡紋溝發育過程與機制”，地理學報，第81期，27-42頁，2016。
7. 經濟部水利署，布唐布那斯堰塞湖調查評估及對策研擬期中成果報告書(修正一版)，2012。
8. 竇葆璋，周佩華，“雨滴的觀測和計算方法”，水土保持通報，第01期，第02卷，44-47頁，1982。
9. Aksoy, H., Unal, N. E., Cokgor, S., Gedikli, A., Yoon, J., Koca, K., & Eris, E. “A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume”. Catena, Vol. 98, pp. 63-72, 2012.
10. Berger, C., Schulze, M., Rieke-Zapp, D., & Schlunegger, F. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity. Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 35, No 12, 2010.
11. Brathès, B. Azontonde, A., Boli, B.Z., Prat, C., & Roose, E. European Journal of Soil Science, Vol 51, pp. 485-495, 2000.
12. Chen, X. Y., Zha, Y., Mi, H. X., & Mo, B. “Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method.” Catena, Vol. 136, pp. 135-140, 2016.
13. Eltner, A., Mulsow, C., Maas, H.-G. “Quantitative measurement of soil erosion from TLS and UAV data,” International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XL-1/W2, 2013 UAV-g2013, 4 – 6 September 2013, Rostock, Germany, 2013.

14. Guo, D., & Yu, B., Implementation of the Preissmann scheme to solve the Hairsine-Rose erosion equations: Verification and evaluation. *Journal of Hydrology*, Vol. 541, pp.988-1002, 2016.
15. Hobson, P. M. "Rheologic and flume erosion characteristics of Georgia sediments from bridge foundations," Master Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 2008.
16. Hong, Y., Bonhomme, C., Le, M.-H., & Chebbo, G., A new approach of monitoring and physically-based modelling to investigate urban wash-off process on a road catchment near Paris. *Water Research*, Vol. 102, pp. 96-108, 2016.
17. Jomaa, S., Barry, D. A., Brovelli, A., Sander, G. C., Parlange, J. Y., Heng, B. C. P., & Tromp-van Meerveld, H. J. Effect of raindrop splash and transversal width on soil erosion: Laboratory flume experiments and analysis with the Hairsine–Rose model. *Journal of Hydrology*, Vol. 395, No. 1-2, pp. 117-132, 2010.
18. Kibet, L. C., Saporito, L. S., Allen, A. L., May, E. B., Kleinman, P. J., Hashem, F. M., & Bryant, R. B. A protocol for conducting rainfall simulation to study soil runoff, 2014.
19. Kinnell, P.I.A. A comparison of the abilities of the USLE-M, RUSLE2 and WEPP to model event erosion from bare fallow areas. *Science of the Total Environment*, Vol 596–597, pp. 32–42, 2017
20. Lick, W. Entrainment, deposition, and transport of fine-grained sediments in lakes. In *Sediment/Freshwater Interaction*, pp. 31-40, 1982.
21. Liu, Q.Q., Li, J.C., Chen, L., & Xiang, H. Dynamics of overland flow and soil erosion (II): Soil erosion. *Adv. Mech*, Vol. 34, pp. 493-506, 2004
22. Mahmoodabadi, M., Ghadiri, H., Rose, C., Yu, B., Rafahi, H., & Rouhipour, H. Evaluation of GUEST and WEPP with a new approach for the determination of sediment transport capacity. *Journal of Hydrology*, Vol. 513, pp. 413-421, 2014a.
23. Mahmoodabadi, M., Ghadiri, H., Yu, B., & Rose, C. Morpho-dynamic quantification of flow-driven rill erosion parameters based on physical principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 514, pp. 328-336, 2014b.

24. Misra, R. K., & Rose, C. W., Application and sensitivity analysis of process-based erosion model GUEST. *European Journal of Soil Science*, Vol. 47(4), pp. 593-604, 1996.
25. Nciizah, A. D., & Wakindiki, I. I. C., "Rainfall pattern effects on crusting, infiltration and erodibility in some South African soils with various texture and mineralogy". *Water SA*, Vol. 40, No. 1, 2014.
26. Nearing, M. A., Foster, G. R., Lane, L. J., & Finkner, S. C., "A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology." *Transactions of the ASAE*, Vol. 32, No. 5, pp. 1587-1593, 1989.
27. Nolan, S. C., Vliet, L. J. P. v., Goddard, T. W., & Flesch, T. K., "Estimating storm erosion with a rainfall simulator". *Canadian Journal of Soil Science*, Vol. 77, No. 4, pp. 669-676, 1997.
28. Nord G & Esteves M., "The effect of soil type, meteorological forcing and slope gradient on the simulation of internal erosion processes at the local scale". *Hydrological Processes*, Vol. 24, pp. 1766–1780, 2010.
29. Nord, G., & Esteves, M., "PSEM_2D: A physically based model of erosion processes at the plot scale". *Water resources research*, Vol. 41, No. 8 , 2005.
30. Prosdocimi, M., Burguet, M., Prima S.D., Sofia, G., Terol E., J.R. Comino, Cerdà, A., & Tarolli, P., "Rainfall simulation and Structure-from-Motion photogrammetry for the analysis of soil water erosion in Mediterranean vineyards". *Science of the Total Environment*, Vol. 574, pp. 204–215, 2017.
31. Ravisangar, V., Brouckaert, B.M., Amirtharajah, A., & Sturm, T.W., "The role of solution chemistry in the stability and detachment of cohesive kaolinite particles". In: Ives, K.J., Nozaic, D. (Eds.), *Particle Removal from Reservoirs and Other Surface Waters*, pp. 25–32, 2001.
32. Ravisangar, V., Dennett, K. E., Sturm, T. W., & Amirtharajah, A., "Effect of sediment ph on resuspension of kaolinite sediments." *J. Environ. Eng.*, Vol. 127, No. 6, pp. 531-538, 2001.
33. Ravisangar, V., Sturm, T. W., & Amirtharajah, A., "Influence of sediment structure on erosional strength and density of kaolinite sediment beds." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 5, pp.356-365, 2005.

34. Romero, C.C., Stroosnijder, L., & Gaigorria, G.A., “Interill and rill erodibility in the northern Andean Highlands”. *Catena*, Vol. 70, pp. 105-113, 2007.
35. Sander, G. C., Hairsine, P. B., Rose, C. W., Cassidy, D., Parlange, J. Y., Hogarth, W. L., & Lisle, I. G., Unsteady soil erosion model, analytical solutions and comparison with experimental results. *Journal of Hydrology*, Vol. 178(1-4), pp. 351-367, 1996.
36. Shen, H., Zheng, F., Wen, L., Han, Y., & Hu, W., “Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope”. *Soil and Tillage Research*, Vol. 155, pp. 429-436, 2016.
37. Shen, H., Zheng, F., Wen, L., Lu, J., & Jiang, Y., “An experimental study of rill erosion and morphology”. *Geomorphology*, Vol. 231, pp. 193-201, 2015.
38. Taiwari, A.K., Risse, L.M., & Nearing, M.A., “Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE”. *Transactions of ASAE*, Vol. 43, No. 5, pp. 1129-1135, 2000.
39. Wang, B., Zheng, F., Römken, M.J.M., & Darboux, F., “Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences.” *Geomorphology*, Vol. 187, pp.1-10, 2013.
40. Wang, Y.-C. & Lai, C.-C., “Evaluating the Erosion Process from a Single-Stripe Laser-Scanned Topography: A Laboratory Case Study. *Water*, Vol. 10, 956 Pages, 2018
41. Wang, Y.-C. & T. W. Sturm., “Effects of soil physical properties on erosional and yield strengths of fine-grained sediments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 10, 1061 Pages, 2016
42. Wang, Y.-C., “Effects of physical properties and rheological characteristics on critical shear stress of fine sediments” PhD Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 2013
43. Yu, B., Guo, D., & Rose, C. W., Dynamic flow-driven erosion – An improved approximate solution. *Journal of Hydrology*, Vol. 552, pp. 544-553, 2017.
44. Zhang, K.L., Shu, A.P., Xu, X.L., Yang, Q.K., & Yu, B., “Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China.” *Journal of Arid Environments*, Vol. 72, pp. 1002–1011, 2008.

45. Zhang, P., Tang, H., Yao, W., Zhang, N., & Xizhi, L. V. Experimental investigation of morphological characteristics of rill evolution on loess slope. *Catena*, Vol. 137, pp. 536-544, 2016.
46. Zhang, Q., Dong, Y., Li, F., Zhang, A., & Lei, T., Quantifying detachment rate of eroding rill or ephemeral gully for WEPP with flume experiments. *Journal of Hydrology*, Vol. 519, pp. 2012-2019, 2014.

附錄

附錄一、期初審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形	修改章節及頁碼
報告內容審查意見：			
1	本計畫所選用三種土樣之考量為何？是以某區域土樣或土壤分類？請說明。	土壤之選用系考量土壤質地、農業用土與地理分布範圍，因台灣西南部沖蝕嚴重地區多屬泥岩地區，故採現地取樣之青灰泥岩淤積土；砂質壤土與紅土為農業常規用土，作為坡面表土沖蝕研究之對象。	第四章第一節 4-11 頁
2	各種試驗預計施作組數及方式，建議可列表俾利了解。	感謝委員意見，各種試驗施作方式如第二章第一節所述；各試驗施作組數已增列於表 4-1。	第二章第一節 第四章第一節 4-11 頁—4-13 頁
3	沖蝕試驗之試體製作，會因夯實的緊或疏鬆而影響結果，宜交代製作方式以利於分析。	參考前人研究(Shen et al., 2015；2016)，人工降雨實驗之土壤試體製作，取 39.375 公斤之烘乾土、1.875 公年之自來水，以 20% 含水量以及總體密度 1400kg/m^3 為填入目標，分三層填入，每層 5 公分厚，共計 15 公分。	第四章第一節 4-37 頁

項次	審查意見	回覆辦理情形	修改章節及頁碼
4	建議在實驗中能考量紋溝沖蝕(Rill Erosion)及紋溝間沖蝕(Internal Erosion)之沖蝕量。	感謝委員意見。已查找相關文獻，依紋溝及紋溝間沖蝕特徵，配合實驗過程觀察及雷射掃瞄地形變化進行不同沖蝕過程之分析。後續將參考紋溝沖蝕與紋溝間沖蝕相關文獻，進行探討。	第四章第一節 4-42 頁—4-45 頁
5	人工降雨機之降雨，應考量雨滴粒徑分布、終端速度及降雨強度。	感謝委員意見。人工降雨機之率定將考量雨滴粒徑分布、終端速度及降雨強度等項目：計算降雨強度與降雨均勻度指數，評估降雨空間分布是否合理；並利用濾紙法測量雨滴粒徑分佈，以白努力方程式和連續方程式計算雨滴落下速率，進而透過動能公式計算雨滴落下動能。	第二章第一節 2-18 頁
6	在集水區中集中水流(Concentrated Flow)所造成之沖蝕也不少，在未來應考量。	感謝委員意見。將查找集中水流相關文獻，後續進行探討。	—
7	在台灣之坡地含有相當之石塊(Rock Fragement)，對沖蝕之影響？	感謝委員意見。考量計畫期程，本計畫以均質土壤作為試體進行研究，將查找相關文獻，作為後續建議參考。	—

項次	審查意見	回覆辦理情形	修改章節及頁碼
8	採用歷史沖蝕資料必須慎重，應考量其與室內試驗條件的一致性和相似性，願可以考量選擇室外觀測，取得實測資料為佳。	感謝委員意見。本計畫之案例應用將以現地試區觀測資料作為分析，試區基本資料已於報告中說明。	第四章第一節 4-49 頁—4-53 頁
9	以水流剪應力作為沖蝕啟動條件，因屬間接計算法，是否考量其他直接因子，如水深。	感謝委員意見。依剪應力公式 $\tau = \gamma RS$ ，可將臨界剪應力計算為臨界水深，但考量模型中物理方程式之沖蝕啟動條件以剪應力為主要參數，加上漫地流及紋溝內水深難以測量，故本計畫將表列沖蝕啟動之臨界剪應力與相對應之臨界水深作為後續應用參考。	—
10	人工降雨試驗沖蝕時，如何區隔雨滴飛濺？其與沖蝕啟動條件不同。	感謝委員意見。本計畫之實驗設計已於人工降雨實驗前進行土壤預濕程序，以減低雨濺沖蝕機率；將查找相關文獻，進行討論。	第四章第一節 4-37 頁
11	P2-22紋溝間雨滴土砂分散率及雨分散率如何測得？	感謝委員意見。模型參數值將參考相關文獻值搭配實驗數據，進行參數率定。	—

項次	審查意見	回覆辦理情形	修改章節及頁碼
12	P3-6提及土壤含有多量粉、黏土，其絮凝效應(團粒效應)如何取得？	感謝委員意見。已進行土壤試體沖蝕前後之團粒穩定分析。	第四章第一節 4-33 頁—4-37 頁
13	P3-14~15出口收集沖蝕量均小於matlab，是否對粉、黏土顆粒的收集漏失所致？	感謝委員意見。沖蝕土粒之收集於沖蝕槽底部及下游端出口處放置收集箱，且收集後靜置 24 小時並進行烘乾，以測量土砂產量，並盡可能減少收集漏失。由實驗過程觀察與前人文獻討論，小於 matlab 之差值主要歸因於降雨沖蝕過程之土壤壓密與紋溝邊避塌陷。	第四章第一節 4-40 頁
14	P2-10，土壤沖蝕率與土壤分離率有何不同？	感謝委員意見。土壤沖蝕率與土壤分離率分別為明渠流與坡面流公式之土壤流失率計推估項。上述兩公式皆從水流作用剪應力與土壤抗沖蝕力之抗衡作用推導沖蝕現象之發生，並推估土壤流失率(沖蝕率或分離率)，唯因明渠及坡面流之流況及水力條件不同，其正向關係亦有差異，故在文獻中採用不同名詞加以區別。	第二章第一節 2-10 頁

項次	審查意見	回覆辦理情形	修改章節及頁碼
15	何為土砂沖蝕動態評估？在本研究所指的動態評估之意義為何？	感謝委員意見。土砂沖蝕動態評估可提供坡面土壤之不同降雨延時過程造成的土壤沖蝕量變化，有別於USLE 評估之年平均土壤沖蝕量。	—
16	本研究所指之坡地沖蝕系統動力學模型，是引用現有的或本研究自行開發之成果？	感謝委員意見。本研究是引用現有物理模型(WEPP 模型及 GUEST 模型)之主要方程式作為基礎，並利用系統動態學軟體建模。	第二章第一節 2-20 頁—2-22 頁
17	動態模型模擬結果，如何與歷史沖蝕量進行比較？	感謝委員意見。本計畫之案例應用將以現地試區觀測資料作為分析，試區基本資料已於報告中說明。	第四章第一節 4-49 頁—4-53 頁
18	P3-16，沖蝕量和沖蝕體積之關係式是否合適？宜再評估。當沖蝕體積接近零時，將導致有負的沖蝕量，不合理。	感謝委員意見。關係式中之負數截距可歸因為降雨初期雨滴擊打壓密現象，以至由DEM 資料推求之體積變化高估實際土流失量，以及土壤水分時、空間變化造成之誤差等。將持續進行實驗，作為沖蝕量與體積關係式之修正參考。	第四章第一節 4-40 頁

項次	審查意見	回覆辦理情形	修改章節及頁碼
19	報告中第2-10頁，說明以地表逕流所導致之土壤沖蝕為主，可是為何仍然需要進行人工降雨之沖蝕？	感謝委員意見。本計畫所採用之人工降雨實驗為坡面沖蝕之水源來源，以利觀察並分析自降雨至形成地表逕流之表土沖蝕過程。	—
20	本計畫擬工作之項目很多，但研究時間為一年期，工作項目與研究時間宜再妥善分配。	感謝委員意見。配合計畫期程，進行工作項目及研究時間之檢討與調整。	第三章第一節 3-1 頁—3-2 頁
21	沖蝕量與紋溝尺寸發展之關係如何量化？請補充說明。	感謝委員意見。本計畫以雷射掃描獲得之DEM 資料進行紋溝發展及沖蝕量之定性說明，將參考相關文獻，提出後續研究建議。	第四章第一節 4-42 頁—4-45 頁
22	如何將紋溝特性與土壤沖蝕量的方程式係數建立連結？(參照表2.1 Wang & Stum,2016)	感謝委員意見。Wang & Stum (2016)提出之方程式係說明土壤沖刷啟動臨界剪應力與土壤物理特性之關係；土壤沖刷啟動臨界剪應力之變化影響土壤沖蝕量，故可能影響紋溝之發展。在本計畫中僅將土壤沖刷啟動臨界剪應力作為土壤沖蝕抗力之模型模擬之參據，尚未討論其與紋溝特性之關係。	第二章第一節 2-13 頁

項次	審查意見	回覆辦理情形	修改章節及頁碼
23	建立降雨歷程中，坡地表面沖蝕量及紋溝發展的歷程為何？	感謝委員意見。本計畫以不同降雨延時之雷射地形掃描製作土壤表面之 DEM，作為地表面沖蝕量及紋溝發展之定性描述參考。	第四章第一節 4-42 頁—4-45 頁
24	本計畫從降雨打擊起始，並探討至漫地流所造成的土砂運移，建議須於計畫中審慎區分兩者差異與研究之主軸。	感謝委員意見。本計畫主要探討漫地流所造成之土壤沖蝕與土砂運移；降雨打擊造成之土粒飛濺因相對量體小、發生時間短，僅將降雨打擊視為沖蝕現象發生之源頭。	—
25	雷射地形掃描可獲較精細的地形資料，本計畫改以光學影像拍攝搭配相關測繪軟體，是否仍能如期紀錄到本實驗所探討之沖蝕變化？	感謝委員意見。經初步測試及實驗，本計畫將採雷射地形掃描，以獲得較精細之地形資料探討沖蝕變化。	第二章第一節 2-19 頁—2-20 頁

附錄二、期中審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形	修改章節及頁碼
報告內容審查意見：			
1	本研究進行集水區坡地土砂沖蝕動態評估之研究，工作項目很多，由室內實驗、參數率定到現場案例分析等等。本報告為期中進度報告，在本報告第四章有充分說明目前計畫執行情形及後續工作重點。	感謝委員意見。	--
2	本報告第四章之期中進度報告內容豐富，已經有很好的研究成果，值得肯定。另外建議增加說明預期進度與實際進度之對比，若有落差記明原因。	遵照辦理。預期進度與實際進度之對比與落差說明已新增於本報告書中。	第三章第一節、表 3-1 3-1 頁—3-3 頁
3	本報告的摘要宜修改為完成式或現在進行式，而不是未來式的語氣，因為計畫已經在進行中，而不是在想而已。	遵照辦理。已修改摘要之時態和語氣，以符合計畫執行狀況與期程。	中、英文摘要 II 頁—III 頁
4	本報告宜增加結論，說明計畫執行之重要項目及重要結果，要說明實際工作進度與預期進度是否相符，並說明若有不相符之處如何改善。	遵照辦理。已增加結論與建議之章節，並說明執行狀況、計畫重要結果，提出建議。	第五章第一節、第二節 5-1 頁—5-4 頁

項次	審查意見	回覆辦理情形	修改章節及頁碼
5	為了環保考量，報告之印刷建議採雙面列印，以節省紙張。	遵照辦理。期末報告採雙面列印。	--
6	研究中使用人工降雨機應多留意期雨滴粒徑分析與雨滴終端速度，以利於率定後續研究模型基準。	感謝委員意見。已完成雨滴粒徑分析和雨滴終端速度測量與計算，作為後續研究基礎。	第四章第三節 4-33 頁—4-36 頁

附錄三、期末審查會議紀錄暨回覆辦理情形

項次	審查意見	回覆辦理情形	修改章節及頁碼
報告內容審查意見：			
1	模式如能增列土壤水分因子會更能凸顯土壤沖蝕機制。	感謝委員意見。已在建議中加入土壤水分因子及降雨逕流關係之考量，作為後續研究方向。	第五章第二節 5-4 頁
2	坡地土壤流失量之研究係坡地保育之基礎，建議以後能再增加更多的樣區，做長期的研究。	感謝委員意見。未來將持續投入不同樣區之試驗研究與模型精進工作。	--
3	研究成果降雨強度對土壤流失量的影響並不顯著之原因，建議持續探討。	感謝委員意見。此結果乃依本計畫之室內試驗，以高強(75mm/hr-100mm/h)降雨沖蝕結果，進行迴歸分析之初步討論，後續查找文獻或進行相關試驗持續探討。相關說明已補述於報告中。	第四章第三節 4-47 頁
4	利用 lidar 資料進行驗證，其 lidar 精度為何？在兩期資料間地形偏差是否消除？	由 Lidar 資料的精度為 1 公尺×1 公尺的網絡，所產製之高程精度約為 0.3 公尺以下。兩期資料使用同一個坐標系統，地形偏差的檢查方法為以附近的公路點位作為驗證，兩期資料修正後的位置偏差應該達 0.1 公尺以下。	--

項次	審查意見	回覆辦理情形	修改章節及頁碼
5	青灰泥岩乾燥時硬如石，遇水則軟如泥，室內實驗所採之試體為沖積泥岩，其理化性質已改變，與坡面上的泥岩不同，其沖蝕情形似不相同，請參考。	感謝委員意見。因坡面上之泥岩採集需向相關主管機關申請，且可開採之量體有限，恐不足本研計畫中試驗土砂量體之需求，故採進由阿公店庫區清淤產生之沖積泥岩代之。兩者之理化性質雖不完全相同，但經粒徑分析結果與前人對該地區上游坡面泥岩材料之粒徑分析結果比對，其分布範圍及中值粒徑接近。且由本計畫之人工降雨及渠道沖蝕試驗觀察發現，泥岩土砂試體仍具有乾燥時堅硬，遇水則化之現象，故推論其沖蝕情形應可類比。相關說明已補述於報告中。	第四章第二節 4-11 頁—4-12 頁