

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 地球科學科

團隊合作獎

030503

「立」挽狂瀾-坡地崩塌現象及防治研究

學校名稱：臺南市立下營國民中學

作者： 國二 王咨翔 國二 陳楷洋 國二 顏士程	指導老師： 楊孟勳 周育信
---	-----------------------------

關鍵詞：短延時強降雨、崩塌、防災

摘要

本研究主要探討短延時強降雨下，坡地崩塌現象及尋求防治崩塌的解決策略。

首先，探討降雨對於坡地崩塌的影響，發現當雨滴粒徑越大、雨滴速度越大(亦即降雨強度越大)，坡面崩塌體積越大，崩塌時間則越短。

其次，就坡地角度與組成之砂石粒徑進行探討，發現在短延時強降雨情況下，坡地角度變大時，崩塌體積較大、崩塌時間變短；而砂石粒徑越大時崩塌現象較不易發生，至於分層混合粒徑時趨於粒徑越大砂石越在上方現象，但當砂石間縫隙充滿水後，均極易因細微的擾動而造成大規模崩塌與滑動，其中粒徑越大砂石崩塌現象越明顯。

最後，探討在坡面植樹及加裝立柱均有助於減緩崩塌現象，在立柱加裝收集器進行雨水收集與排水，更能有效減少崩塌及裸露現象。

壹、研究動機

一、極端天氣事件-強降雨發生頻率及強度逐年增加

常常聽到長輩們說現在的天氣跟他們小時候大大不同，現在一下雨就會突然下很大、很多，造成以前從不淹水的地方現在也會突然淹起大水；根據國家災害防救科技中心分析台灣的短延時（1、2、3、6 小時）之累積雨量特性，發現近年短延時強降雨事件的發生日數及時雨量的確存在上升趨勢。

二、崩塌現象造成災害，損失嚴重

劇烈的降雨所引發的坡地崩塌與土石流等災害，常導致人命財產的極大損失(如表 1-1)，分析這些災害發生原因，多是因「短延時雨量過強」，超過當地防洪設計或土地承受能力造成。

表 1-1 歷年短延時強降雨造成之崩塌災情

	
<p>2015 年 8 月蘇迪勒颱風造成烏來及山區多處崩塌與土石流災害。 (資料來源:蘋果日報)</p>	<p>2016 年 9 月阿里山森林鐵路因豪雨造成邊坡坍塌，造成隧道及鐵軌損壞。 (資料來源:ETtoday 新聞雲)</p>
	
<p>2017 年 6 月基隆市湖海路邊坡因暴雨及颱風帶來大雨，造成多處山坡石塊滑落。 (資料來源:自由時報)</p>	<p>2021 年 3 月新竹市一處社區因下雨，房屋邊坡坍塌，臨時施作擋土牆亦發生崩塌。 (資料來源:聯合新聞網)</p>

從以上兩方面的了解，發現雖然極端天氣與氣候事件發生日數少，但造成的集中型災害其強度往往超過原有工程防護的安全標準門檻值，故一旦發生，便常常造成嚴重災害，因此，這次的科學研究試圖藉由實驗了解短延時強降雨造成之崩塌現象，並尋求可行的調適方法。

貳、研究目的

- 一、了解不同降雨強度造成坡地崩塌的情形。
- 二、了解不同角度坡地在強降雨下崩塌的情形。
- 三、了解不同粒徑坡地在強降雨下崩塌的情形。
- 四、設計出兼具防止坡地崩塌、洩洪、警戒的裝置。

參、研究設備及器材

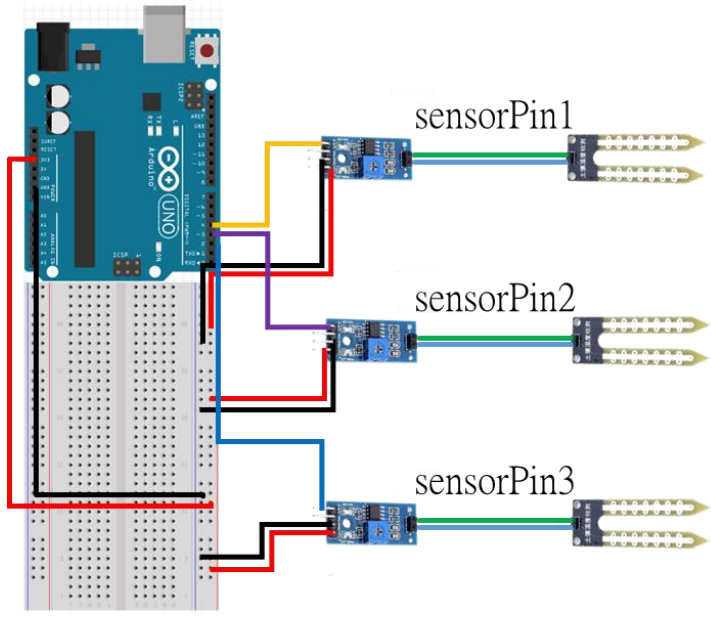
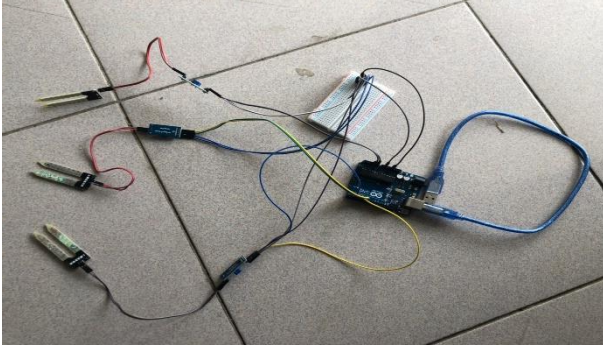
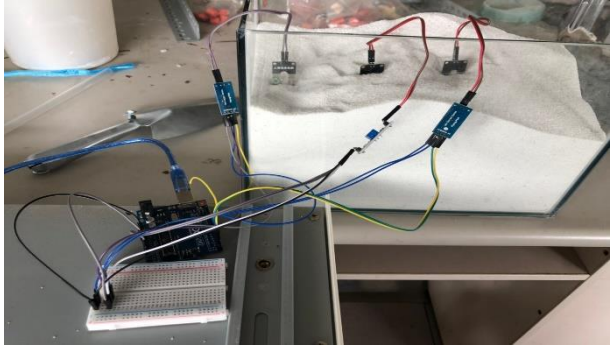
一、研究器材 (如表 3-1、實驗器材一覽表)

細沙 40 目(0.05 - 0.1 公分)	宜蘭石 1.2 分(0.5 - 0.8 公分)	宜蘭石 3 分(1 - 2 公分)
宜蘭石 5 分(2 - 3 公分)	熱熔膠槍與熱熔膠	磅秤(秤量砂石質量用)

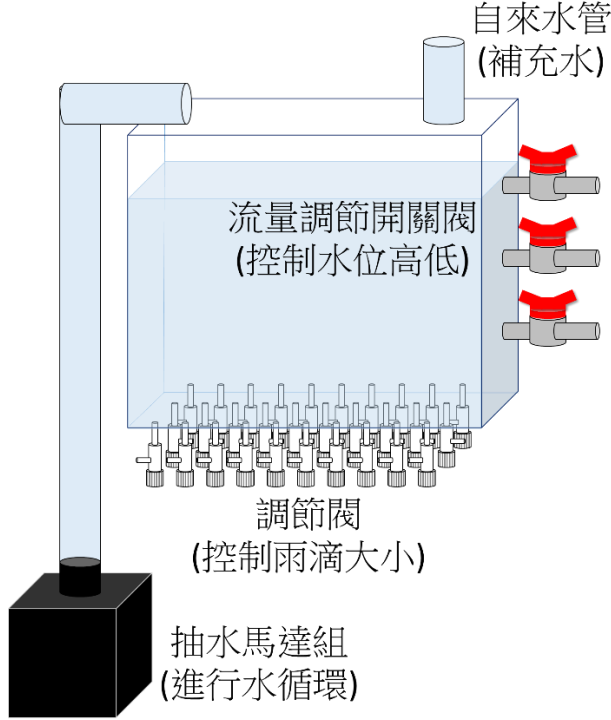


二、實驗設備 (如表 3-2、實驗設備一覽表)

自製溼度感測裝置(註一)	自製降雨模擬裝置(註二)	自製坡地裝置(註三)
自製崩塌測量裝置(註四)	烘碗機(烘乾土壤用)	3D 印表機(印製實驗裝置用)
電腦(數據分析用)	手機(拍攝照片與計時用)	Arduino Uno 板及相關裝置

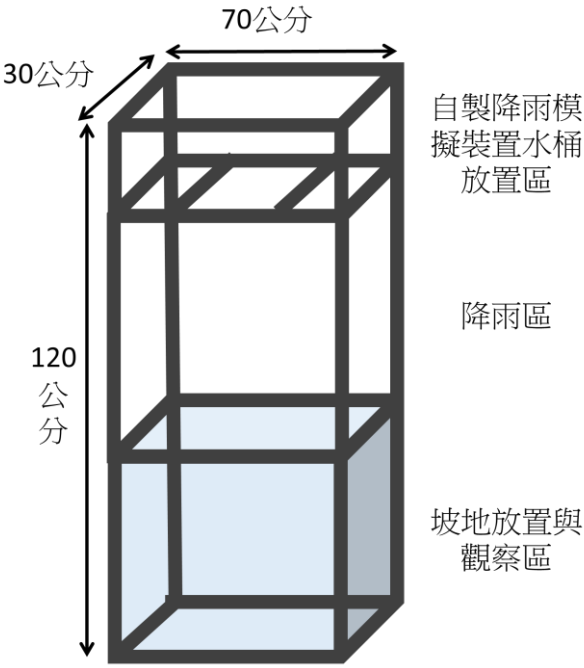
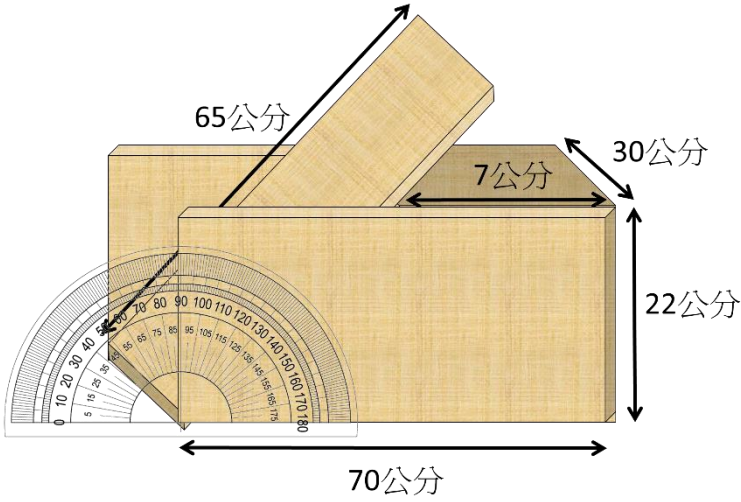


註一：自製溼度感測裝置說明

材料	arduino uno R3 板(1 片)、土壤濕度檢測模組 YL-38(3 組)、杜邦線、麵包板、電腦	
裝置圖 與 程式 語法		<pre>const int sensorPin1=2; const int sensorPin2=3; const int sensorPin3=4; void setup(){ pinMode(sensorPin1,INPUT); pinMode(sensorPin2,INPUT); pinMode(sensorPin3,INPUT); Serial.begin(9600); } void loop(){ int moist1; int moist2; int moist3; moist1= analogRead(sensorPin1); moist2= analogRead(sensorPin2); moist3= analogRead(sensorPin3); Serial.println(moist1); Serial.println(moist2); Serial.println(moist3); delay(1000); }</pre>
		

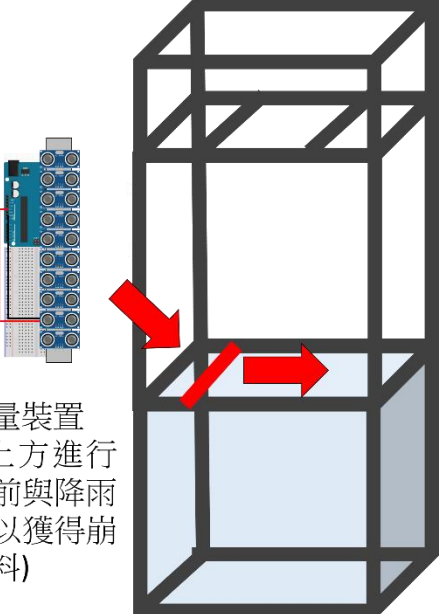

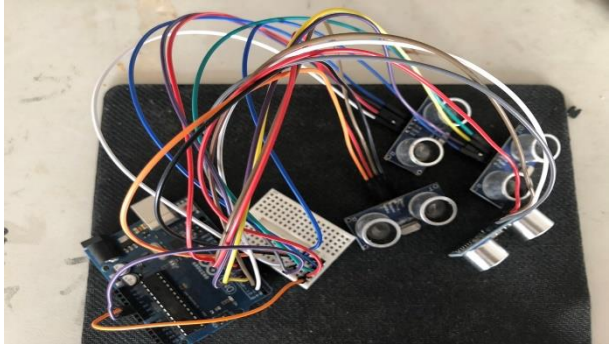
註二：自製降雨模擬裝置說明

<p>材料</p>	<p>雙象牌手提水桶 20L(1 個)、調節閥(32 個)、流量調節開關閥(3 個)、抽水馬達組(1 組)、自來水管、熱熔膠槍、熱熔膠條</p>
<p>裝置圖</p>	
<p>說明</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1.調節閥：利用調節閥轉鈕控制雨滴流出的粒徑。 2.流量調節開關閥：流量調節開關閥一次只開啟一個，高於開啟之流量調節開關閥的水將排出，藉此控制水桶內水位的高低，當水位越高時，底部水壓力越大，雨滴落下的速度越快。 3.抽水馬達組：利用抽水馬達於雨滴落下後進行抽水，將雨滴水抽回水桶內，以節省實驗用水。 4.水管：利用自來水補充水，以維持水桶內水位高度。 5.其他：藉由控制整體水桶裝置高度，可改變雨低落至實驗裝置的速度，以達到與短延時強降雨相似之模擬降雨情境。
 <p>第一版裝置設計 採底部戳洞方式降雨</p>	 <p>第二版裝置設計 採控制調節閥方式降雨</p>

註三：自製坡地裝置說明

<p>材料</p>	<p>角鋼、角鋼用螺絲、透明壓克力板、密集板 0.5 公分厚、密集板 2 公分厚、尖頭螺絲釘、矽利康膠、熱熔膠槍、熱熔膠條、磅秤</p>
<p>坡地觀察 裝置</p>	
<p>坡地夯實 裝置</p>	
	

註四：自製崩塌測量裝置說明（如圖 3-4）

<p>材料</p>	<p>arduino uno R3 板、超聲波感測器 HC-SR04 (8-10 個)、麵包板、杜邦線、角鋼</p>		
<p>裝置圖</p>	<div style="text-align: center;">  <p>自製崩塌測量裝置 (置放於坡地上方進行測距，將降雨前與降雨後距離相減，以獲得崩塌情形數據資料)</p> </div>		
<p>程式語法</p>	<pre> int trigPin1=2; int echoPin1=3; int trigPin2=4; int echoPin2=5; int trigPin3=6; int echoPin3=7; int trigPin4=8; int echoPin4=9; int trigPin5=10; int echoPin5=11; long duration1, cm1, duration2, cm2, duration3, cm3, duration4, cm4, duration5, cm5; void setup() { Serial.begin (9600); pinMode(trigPin1, OUTPUT); pinMode(echoPin1, INPUT); pinMode(trigPin2, OUTPUT); pinMode(echoPin2, INPUT); pinMode(trigPin3, OUTPUT); pinMode(echoPin3, INPUT); pinMode(trigPin4, OUTPUT); pinMode(echoPin4, INPUT); pinMode(trigPin5, OUTPUT); pinMode(echoPin5, INPUT); } void loop(){ digitalWrite(trigPin1, LOW); delayMicroseconds(5); digitalWrite(trigPin1, HIGH); delayMicroseconds(10); digitalWrite(trigPin1, LOW); duration1 = pulseIn(echoPin1, HIGH); cm1 = (duration1/2) / 29.1; Serial.print(cm1,); Serial.println(); delay(250); digitalWrite(trigPin2, LOW); delayMicroseconds(5); digitalWrite(trigPin2, HIGH); delayMicroseconds(10); digitalWrite(trigPin2, LOW); duration2 = pulseIn(echoPin2, HIGH); cm2 = (duration2/2) / 29.1; Serial.print(cm2,); Serial.println(); delay(250); digitalWrite(trigPin3, LOW); delayMicroseconds(5); digitalWrite(trigPin3, HIGH); delayMicroseconds(10); digitalWrite(trigPin3, LOW); duration3 = pulseIn(echoPin3, HIGH); cm3 = (duration3/2) / 29.1; Serial.print(cm3,); Serial.println(); delay(250); digitalWrite(trigPin4, LOW); delayMicroseconds(5); digitalWrite(trigPin4, HIGH); delayMicroseconds(10); digitalWrite(trigPin4, LOW); duration4 = pulseIn(echoPin4, HIGH); cm4 = (duration4/2) / 29.1; Serial.print(cm4,); Serial.println(); delay(250); digitalWrite(trigPin5, LOW); delayMicroseconds(5); digitalWrite(trigPin5, HIGH); delayMicroseconds(10); digitalWrite(trigPin5, LOW); duration5 = pulseIn(echoPin5, HIGH); cm5 = (duration5/2) / 29.1; Serial.print(cm5,); Serial.println(); delay(250); } </pre>		
			

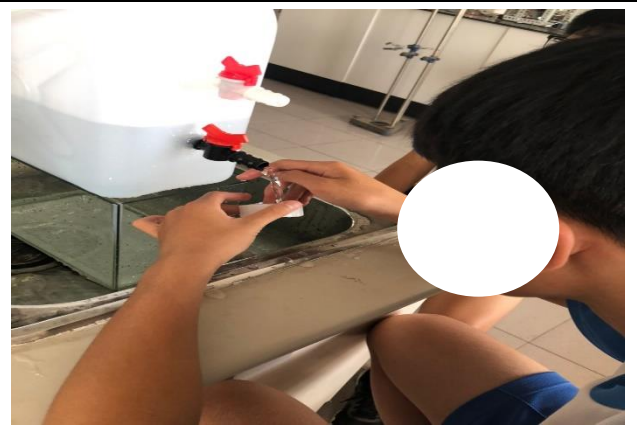
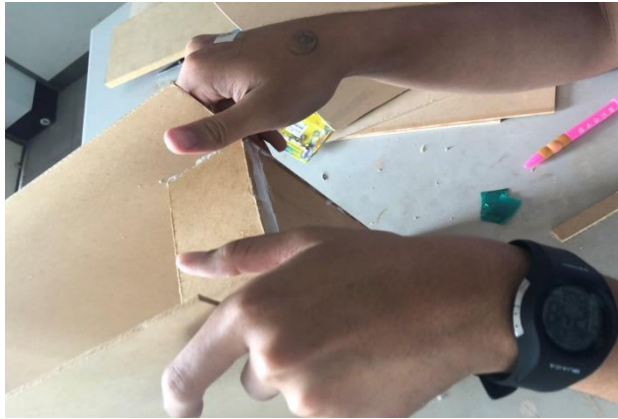
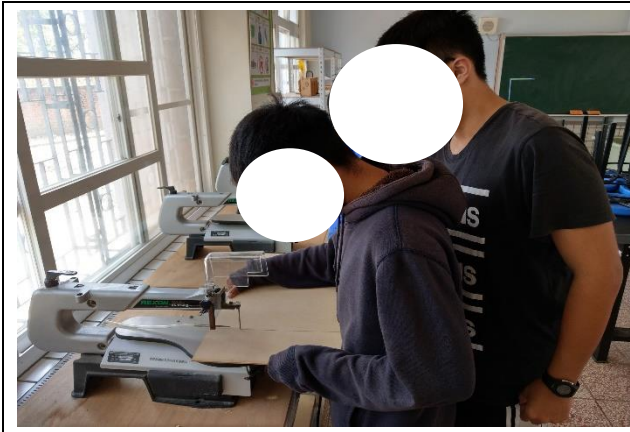


圖 3-1、自製實驗裝置組裝過程

肆、研究過程或方法

- 一、發展研究架構
- 二、文獻探討
- 三、不同降雨強度造成坡地崩塌情形分析
- 四、不同角度坡地在強降雨下崩塌情形分析
- 五、不同粒徑坡地在強降雨下崩塌情形分析
- 六、兼具防止坡地崩塌、洩洪、警戒裝置設計

伍、研究結果與討論

一、建立研究架構

經過一連串的资料查詢後，我們開始設計本次研究的基本架構，並且隨著實驗討論的進行隨時修正架構，以下是我們這次研究的整體研究架構。



圖 5-1-1、研究架構圖

二、文獻探討

(一) 降雨研究

1. 短延時強降雨：

簡單來說就是在短時間內降下大量暴雨，交通部中央氣象局豪雨特報自 109 年 3 月 1 日起為強化短延時強降雨現象之災防預警、反映短延時強降雨之致災性，對於豪雨中之大豪雨再增列「3 小時累積雨量達 200 毫米以上」之雨量標準，如下表所示。

表 5-2-1、豪(大)雨雨量分級定義修正對照表

特報種類	雨量分級	修正定義	原定義
大雨特報	大雨		24小時累積雨量達80毫米以上， <u>或1小時雨量達40毫米以上</u> 之降雨現象。
豪雨特報	豪雨		24小時累積雨量達200毫米以上， <u>或3小時累積雨量達100毫米以上</u> 之降雨現象。
	大豪雨	24小時累積雨量達350毫米以上， <u>或3小時累積雨量達200毫米以上</u> 之降雨現象。	24小時累積雨量達350毫米以上之降雨現象。
	超大豪雨		24小時累積雨量達500毫米以上之降雨現象。

(資料來源：中央災害防救辦公室)

2. 降雨強度：

(1) 定義：

是指單位時間內的降雨量，亦即一場雨的降雨強度等於降雨總量除以降雨歷時；降雨強度對環境的影響非常大，通常降雨強度愈大，其動能也愈大，因而導致土壤流失愈多，造成的環境災害也愈嚴重，根據北美洲的觀測，

發現日降雨強度超過 130 公厘，易產生坑溝沖蝕。

(2) 降雨強度與雨滴粒徑的關係：

降雨強度大通常是由大的雨滴造成的，而與雨滴的數量多寡關係較小；根據文獻探討，曾發現每小時的降雨強度為 1、13 和 102mm 時，最常見的雨滴直徑分別為 1、2 和 3mm，雨滴粒徑幾乎均在 8mm 以內，各降雨強度之中值粒徑約介於 1.25mm 至 4mm 間，雨滴粒徑與降雨強度成乘冪的相關性。

(3) 降雨強度與雨滴速度的關係：

根據文獻探討，發現雨滴速度均在 10m/s 以下，雨滴速度與降雨強度成乘冪的相關性。

(二) 坡地崩塌

1. 定義：

依據水土保持手冊(2005)定義，邊坡材料因受重力作用，發生向下滑動或崩落之塊體運動之現象稱之為崩塌(landslide)，其中包括山崩、落石、崩塌、地滑等名詞。

2. 分類：

崩塌依運動方式、材料及移動速度等有許多分類，依誘發因素可分為五類：

- (1) 豪雨型：崩塌面積小，深度淺而崩塌個數多，常見於下坡面及複合坡面之谷地凹面，外觀形狀呈現樹枝狀及掌狀，為本次科學研究主要研究的崩塌現象。
- (2) 地震型：崩塌坡度以 45~50°及 10~20°兩型坡面為其顯著特徵，常發生在上升或直線坡面。
- (3) 地下水型：由地下水之異常變化而引起之山崩，由地下水湧出處開始崩壞並擴及下方與側方使支持消失而導致上部土體崩落。
- (4) 雪崩型：積雪量及雪移動為崩塌考慮之因子。
- (5) 溪流型：因溪流淘刷、搬運而導致之崩塌。


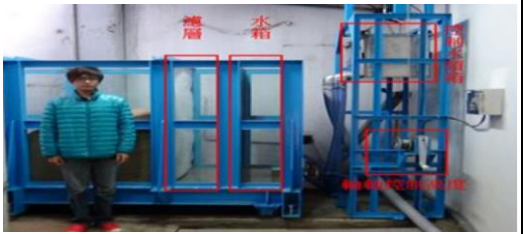
3. 土壤分類與土壤滲透性：

表 5-2-2、土壤分類與土壤滲透性表

符號	土壤型式	土壤滲透性(cm/sec)
G	中等至粗礫石	大於 10^{-1}
S	粗至細砂	10^{-3} 至 10^{-1}
M	細砂，粉質砂	10^{-5} 至 10^{-3}
C	粉土，粘質粉土，粉質粘土	10^{-6} 至 10^{-4}
O	粘土	10^{-7} 或更小

4. 崩塌實驗設計：

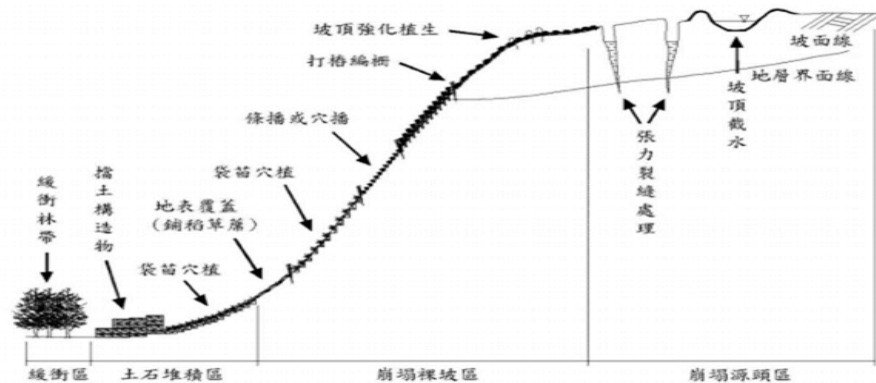
表 5-2-3、崩塌實驗設計類型

無限邊坡(大部分研究採用)	有限邊坡(本次研究採用)
	

(資料來源：國立中興大學水土保持學系網站)

5. 防止坡地崩塌主要處理工法：

- (1)加強截排水系統之設置，避免地表逕流集中。
- (2)加強山腹工(如階段面之設置)打樁編柵等之設施，避免土砂向下游移動。
- (3)填平蝕溝，適當地點構築護岸、節制壩等，以防止蝕溝繼續發展。
- (4)適當地點構築梳子壩，以攔阻、篩分土石或土砂流向下游。
- (5)採用適當植生工法覆蓋坡面，防止雨滴直接打擊，以發揮植生護坡之功效。



(摘自行政院農業委員會水土保持局·土石流及崩塌地源頭水土保持處理工作手冊)

圖 5-2-1、崩塌裸坡面處理工法示意圖

(三) 歷屆科學展覽相關研究

翻查並整理近十年全國科學展覽會中關於崩塌之相關研究，如下表 5-2-4 所示，發現相關研究可分為兩種方向，一為研究各種造成坍塌變因，另一種則追求改善崩塌方式，因此，**本次科學研究企圖結合兩方面之研究，並研發出與歷屆研究不同的改善崩塌方法。**

表 5-2-4、歷年科學展覽會相關研究彙整

變因	改善方式	研究主題	研究內容
土壤含水量 土壤孔隙 土壤粒徑	無	坍與不坍－崩塌地之土粒研究	發現土壤含水比約為 38.5%、孔隙比 88.3%~245.6% 以及土壤粒子多為 $\geq 1.2\text{mm}$ ，三者增量交互作用時，易形成崩塌地。
土質	無	紅色警戒	研究發現礫石型土石吸水性差，激發此類型土石流的主因是瞬間的豪雨快速滙集河道產生強烈推力而非含水量；一般型土石流具吸水性，當含水量達到飽和時會出現土體下滑現象；泥石流型土石流有最大的吸水性及飽和含水量，因土體間隙較密水分下滲較慢。
土壤含水量	無	水土比一比	模擬「降雨時產生之水流」觀測土壤含水量與水流侵蝕土石量之關係，發現當含水量達飽和時，土壤黏土性越高較不易因水流而沖刷，較不易崩落與滑動。但土壤含水量超過飽和，大量崩塌滑落的發生部坡度快速下降，造成土石流。
坡度 降水量	擋土牆 防砂壩	坡地土石災難成因的探討－以特富野和觸口為例	瞭解坡度、降水量與崩塌量有關係土，並提出改善建議-擋土牆可以減少雨水沖蝕，還有在崩塌較嚴重河道建造防砂壩可減少土石災難。
河流走向	防砂壩	Hold 住啊，不要崩潰！	探討地形走向使得防砂壩因承受不住強大的水流而被沖走，最後，提出避免防砂壩被沖走的施工方法，並經模擬實驗證明，可以有效防制地形對水流的導向集中作用。
無	梳子壩	會呼吸的梳子壩？！	研究梳子壩防治工法與輸砂的盲點，並推理縫隙模型，藉著降低壩體運作模式，以清空壩前土石。
無	擋土牆 排水管	牆要 double L 邊坡防護更 OK~	探究擋土牆的形式以及排水管兩部分對護坡效益的影響並自行設計的新式 double L 雙層懸臂式擋土牆，比現行之單面 L 型懸臂式擋土牆防護邊坡效果更佳。

三、不同降雨強度造成坡地崩塌情形分析

本研究試圖利用自製降雨模擬裝置進行降雨模擬實驗，以了解雨滴粒徑、水壓力造成之雨滴速度、重力造成之雨滴速度對於坡地崩塌情形之影響，並找出最適合模擬短延時強降雨之模擬條件。

(一) 雨滴粒徑實驗

1. 提出問題：雨滴粒徑越大會造成怎樣的崩塌現象？

2. 定義：

(1) 雨滴粒徑(raindrop size, RS)：指雨滴直徑大小(本實驗假設雨滴為圓球形)，單位為 mm。

(2) 崩塌體積(volume of landslide, VL)：指坡地發生砂石移動後產生的空間(不包含雨滴落下造成坡面凹陷的空間)，單位為 cm^3 。

(3) 崩塌時間(time of landslide, TL)：指坡地上方開始降雨至發生砂石移動的時間，單位為秒。

3. 研究步驟：

(1) 依據文獻探討，發現各降雨強度之雨滴粒徑中值粒徑約介於 1.25mm 至 4mm 間，幾乎均在 8mm 以內，雨滴粒徑與降雨強度成正相關。由於本次研究希望了解短延時強降雨所造成之影響，因此，將實驗雨滴粒徑分別設置為 4、8、10、12mm，並利用球體公式(體積 = $\frac{4}{3}\pi \times \text{半徑}^3$)計算 1 滴雨滴體積，並計算出 100 滴雨滴體積及質量(本實驗假設水的密度為 $1\text{g}/\text{cm}^3$)。

表 5-3-1、雨滴粒徑與雨滴質量推算表

雨滴粒徑 RS(mm)	4	8	12	16
1 滴雨滴體積(mm^3)	34	268	905	2145
100 滴雨滴質量(g)	3.4	26.8	90.5	214.5

(2) 將自製降雨模擬裝置置於角鋼架上 120 公分處，開啟自來水管注水，開啟模擬裝置側邊最上方之流量調節閥以維持模擬裝置內水位為高水位(水深 30cm)，將量筒與電子秤置於模擬裝置下方之調節閥下方，調整調節閥開關，使 100 滴水

滴質量為 3.4g，使雨滴粒徑 RS 為 4mm。

(3)坡地角度為 20 度之細沙斜坡，由坡底開始高度每 7 公分處插入一土壤濕度檢測模組 YL-38，共插入 3 只，進行土壤濕度檢測(如圖 5-3-1)，接著於上方進行降雨，觀察並紀錄崩塌體積(VL)與崩塌時間(TL)。

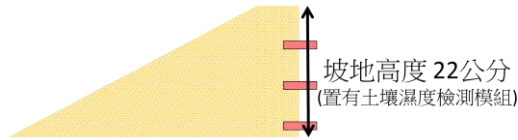


圖 5-3-1、坡地裝置示意圖

(4)重複進行步驟(2)與步驟(3)數次以取得平均數值，並依序更改雨滴粒徑為 8、12、16mm，重複步驟(2)至步驟(4)。

(5)繪製成長條圖以觀察崩塌體積(VL)與崩塌時間(TL)分布情形。

4.研究結果：如圖 5-3-2、圖 5-3-3 所示。

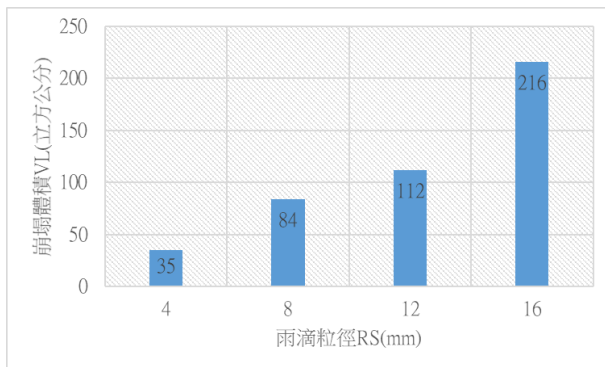


圖 5-3-2、雨滴粒徑 RS 與崩塌體積 VL 圖

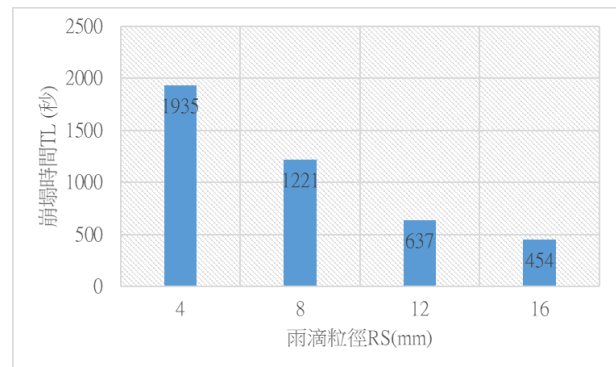


圖 5-3-3、雨滴粒徑 RS 與崩塌時間 TL 圖

5.研究討論：

(1)研究過程觀察發現雨滴落下時，先是擊打坡面，使坡面凹陷，利用自製溼度感測裝置讀取濕度，發現雨滴粒徑 RS 較大時，細沙變濕較快，土壤濕度檢測值由 1023 開始下降，當三只檢測數值達 379 至 370 時，接著就發生崩塌現象。

(2)研究結果發現當雨滴粒徑 RS 變大時，崩塌時間 TL 變短，而崩塌體積 VL 也較大，但是並未呈現線性關係，其中是否有特殊的關係，值得進行進一步探討。

(3)根據以上實驗與觀察結果，由能量守恆角度進行分析：

A.崩塌前

雨滴落至坡面時所具有的動能於落至坡面後轉變成土壤因夯實形狀改變的位能及雨水滲入坡面後的動能；隨著土壤夯實至某一程度後，持續落下的雨滴落至坡面時所具有的動能變成雨水滲入坡面後的動能(但此時隨著土壤濕度增加，能滲入的雨水變少，滲入速度也變慢)。

B.土壤濕度檢測數值達 379 至 370，開始崩塌

持續落下的雨滴落至坡面時所具有的動能變成雨水滲入坡面後的動能(極少)及崩塌土壤與雨水的動能。

C.崩塌停止

崩塌土壤與雨水的動能因摩擦力做負功而停止崩塌。

(4)因此，當雨滴粒徑 RS 變大時(即質量較大)，由於在相同時間內提供較大質量的雨水，使得坡面達到夯實與土壤濕度達臨界之時間變短，亦即崩塌時間 TL 變短；而持續落下的雨滴落至坡面時所具有的動能變大，導致崩塌體積 VL 也較大。

(二) 雨滴初速度實驗

1.提出問題：雨滴初速度越大會造成怎樣的崩塌現象？

2.定義：

(1)水深(water depth, WD)：指自製降雨模擬裝置側邊之流量調節閥(維持模擬裝置內水位)距離裝置底部之深度，當水位深度越深，則水由孔洞噴出之初速度越大，因此，以水深 WD 作為雨滴初速度之研究變因，單位為 cm。

(2)崩塌體積(volume of landslide, VL)：指坡地發生砂石移動後產生的空間(不包含雨滴落下造成坡面凹陷的空間)，單位為 cm^3 。

(3)崩塌時間(time of landslide, TL)：指坡地上方開始降雨至發生砂石移動的時間，單位為秒。

3.研究步驟：

(1)將自製降雨模擬裝置置於角鋼架上 120 公分處，開啟自來水管注水，開啟模擬裝置側邊最上方之流量調節閥以維持模擬裝置內水位為高水位(水深 30cm)，將

量筒與電子秤置於模擬裝置下方之調節閥下方，調整調節閥開關，使雨滴粒徑 RS 為 12mm。

(2)置於坡地角度為 20 度之細沙斜坡上方進行降雨與土壤濕度的監測，觀察並紀錄崩塌體積(VL)與崩塌時間(TL)。

(3)重複進行步驟(1)與步驟(2)數次以取得平均數值，並依序更改水深為 20、10cm，重複步驟(1)至步驟(3)。

(4)繪製成長條圖以觀察崩塌體積(VL)與崩塌時間(TL)分布情形。

4.研究結果：如圖 5-3-4、圖 5-3-5 所示。

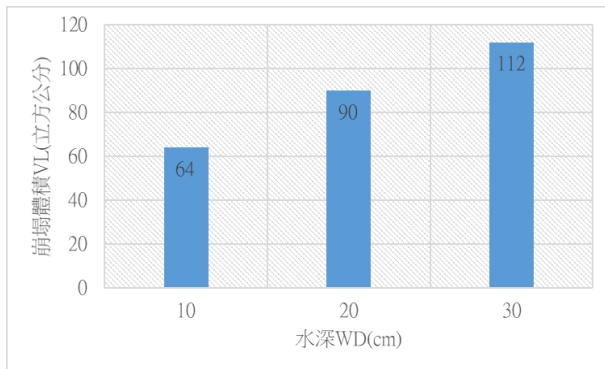


圖 5-3-4、水深 WD 與崩塌體積 VL 圖

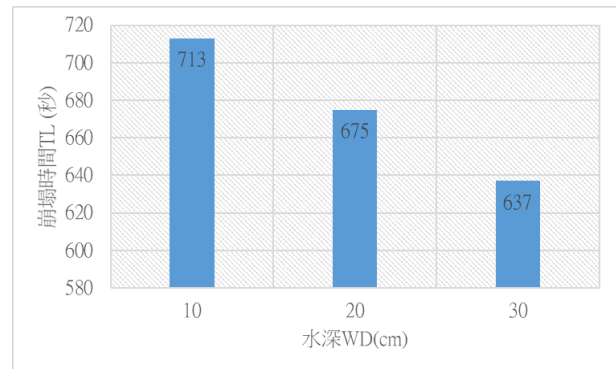


圖 5-3-5、水深 WD 與崩塌時間 TL 圖

5.研究討論：

(1)研究過程觀察發現水深 WD 較大時，細沙變濕較快，土壤濕度檢測值由 1023 開始下降，當三只檢測數值達 378 至 369 時，接著發生崩塌現象。

(2)研究結果發現當水深 WD 較大時，崩塌時間 TL 較短，而崩塌體積 VL 也較大。

(3)根據白努力定律： $P + \frac{1}{2}dv^2 + dgh = \text{定值}$

(其中 P 為該處的外界氣壓、d 為液體密度、v 為水柱速度、h 為距離地面高度)。

假設地面至降雨模擬裝置底部之高度為 H、水深為 h、水面速度 v_0 、雨滴離開降雨模擬裝置底部之速度為 v，得到

$$P + \frac{1}{2}dv_0^2 + dg(H + h) = P + \frac{1}{2}dv^2 + dgH$$

假設外界壓力均為 1 大氣壓，得到 $\frac{1}{2}dv_0^2 + dg(H + h) = \frac{1}{2}dv^2 + dgH$

由於 v_0 位於水面，故假設 v_0 為 0m/s，得到 $dg(H + h) = \frac{1}{2}dv^2 + dgH$

整理上式，可得 $v = \sqrt{2gh}$ (式 5-3-1)，亦即當雨滴自水深越深之降雨模擬裝置離開時，初速度越大。

(4)根據牛頓第二運動定律，當雨滴自水深越深之降雨模擬裝置離開後僅受重力作用，以重力加速度 g 作等加速度運動。

假設雨滴落至坡面速度 v_1 ，得到 $v_1^2 = v^2 + 2gH$

代入式 5-3-1，得到 $v_1^2 = 2gh + 2gH = 2g(h + H)$

整理上式，可得 $v_1 = \sqrt{2g(h + H)}$ (式 5-3-2)，亦即當雨滴自水深越深之降雨模擬裝置離開時，落至坡面時的速度越大。

(5)因此，當雨滴落至坡面時的速度變大時，由於在相同時間內較快速的補充雨水，使得坡面達到夯實與土壤濕度達臨界之時間變短，亦即崩塌時間 TL 變短；而持續落下的雨滴落至坡面時所具有的動能變大，導致崩塌體積 VL 也較大。

(三) 雨滴末速度實驗

1.提出問題：雨滴末速度越大會造成怎樣的崩塌現象？

2.定義：

(1)高度(height, H)：指自製降雨模擬裝置距離地面之高度，當高度越高，則由於重力作用，雨滴抵達坡面時之末速度越大，因此，以高度 H 作為雨滴末速度之研究變因，單位為 cm。

(2)崩塌體積(volume of landslide, VL)：指坡地發生砂石移動後產生的空間(不包含雨滴落下造成坡面凹陷的空間)，單位為 cm^3 。

(3)崩塌時間(time of landslide, TL)：指坡地上方開始降雨至發生砂石移動的時間，單位為秒。

3.研究步驟：

(1)將自製降雨模擬裝置置於角鋼架上 120 公分處，開啟自來水管注水，開啟模擬裝置側邊最上方之流量調節閥以維持模擬裝置內水位為高水位(水深 30cm)，將量筒與電子秤置於模擬裝置下方之調節閥下方，調整調節閥開關，使雨滴粒徑

RS 為 12mm。

(2)於坡地角度 20 度之細沙斜坡上降雨與土壤濕度的監測，觀察並紀錄崩塌體積 (VL)與崩塌時間(TL)。

(3)重複進行步驟(1)與步驟(2)數次以取得平均數值，並依序更改角鋼架高度 H 為 90、60 公分處，重複步驟(1)至步驟(3)。

(4)繪製成長條圖以觀察崩塌體積(VL)與崩塌時間(TL)分布情形。

4.研究結果：如圖 5-3-6、圖 5-3-7 所示。

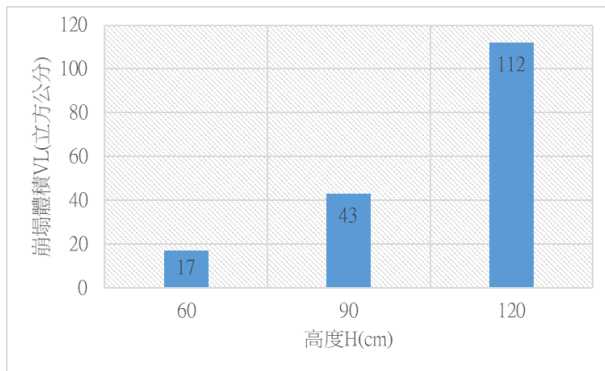


圖 5-3-6、高度 H 與崩塌體積 VL 圖

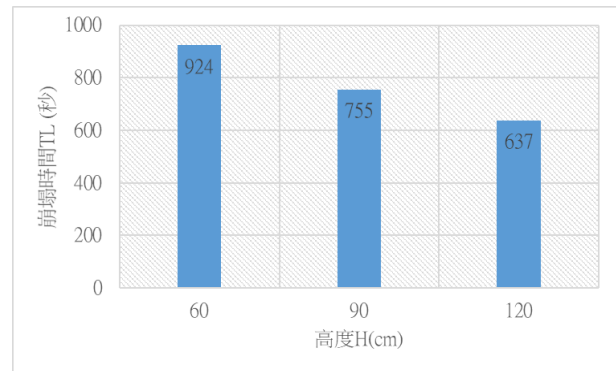


圖 5-3-7、高度 H 與崩塌時間 TL 圖

5.研究討論：

(1)研究過程觀察發現高度 H 較大時，細沙變濕較快，土壤濕度檢測值由 1023 開始下降，當三只檢測數值達 381 至 364 時，接著發生崩塌現象。

(2)研究結果發現當高度 H 較大時，崩塌時間 TL 較短，而崩塌體積 VL 也較大。

(3)根據 $v_1 = \sqrt{2g(h + H)}$ (式 5-3-2)，當水深 h 相同時，降雨模擬裝置離地面高度 H 越大，因為重力關係，會造成雨滴落至坡面時的速度 v_1 越大。

(4)因此，當高度 H 越大時，落下的雨滴落至坡面時速度變大，使得坡面達到夯實與土壤濕度達臨界之時間變短，亦即崩塌時間 TL 變短；此外，當崩塌開始發生時，由於持續落下的雨滴落至坡面時所具有的動能變大，導致崩塌體積 VL 也較大。

(5)根據 $v_1 = \sqrt{2g(h + H)}$ (式 5-3-2)，將實驗二與實驗三之數據進行整合，如圖 5-3-8、圖 5-3-9 所示，發現水深+高度(h+H) 與崩塌體積 VL 的數據點連線與趨勢

線均呈現左下右高現象；而水深+高度(h+H)與崩塌時間 TL 的趨勢線與數據點則顯現出差異，表示兩者關係可能非線性關係，需要再進一步討論。

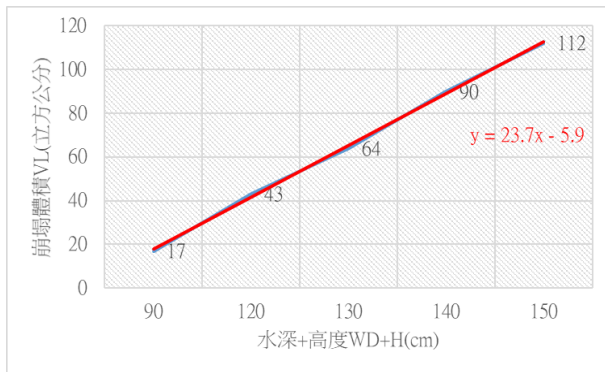


圖 5-3-8、(水深+高度)與崩塌體積 VL 圖

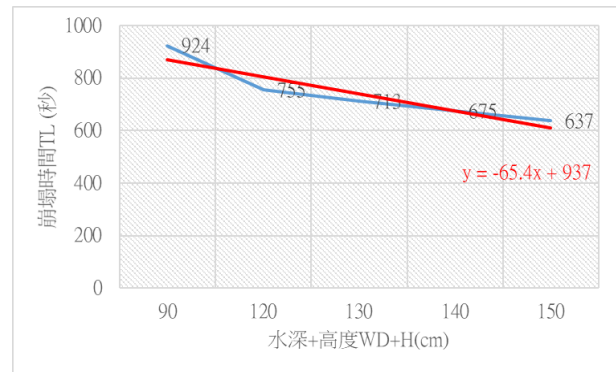


圖 5-3-9、(水深+高度)與崩塌時間 TL 圖

根據以上研究，發現自製降雨模擬裝置由調節閥控制之雨滴粒徑、由流量調節閥控制之水位高低(雨滴初速度)及降雨模擬裝置放置之高度(雨滴末速度)對於崩塌現象均有影響，其中雨滴粒徑越大、水位越高(雨滴初速度越大)及降雨模擬裝置放置之高度越高(雨滴末速度越大)則造成的降雨強度越大，崩塌體積越大，崩塌時間則越短，亦呼應短延時強降雨將造成短時間、大體積的崩塌現象。

因此，接下來關於坡地崩塌之相關實驗，將設定為雨滴粒徑 12mm、水深 30cm、高度 120cm 作為本次關於短延時強降雨之模擬條件。

四、坡地在強降雨下崩塌情形分析

當短延時強降雨來襲時，不同條件的坡地將有哪些不同的崩塌情形發生呢?因此，本次研究希望藉由實驗能對崩塌現象進行更深一層的了解，主要分成坡地角度與坡地組成砂石粒徑兩個部分三個實驗來討論，為了讓實驗其他變因能更精準受到控制，必須將文獻探討過程理解到大部分歷屆科展作品討論之土壤含水及吸收水分後之變化因素進行排除，因此，坡地組成之實驗樣本排除黏土類土壤，以砂石為主要研究樣本。

(一) 坡地角度實驗

1.提出問題：不同角度的坡地在強降雨下崩塌現象會有差異嗎？

2.定義：

(1)坡地角度(angle, A)：指坡地斜面與地面之夾角(如表 5-4-1)，單位為度。

(2)崩塌體積(volume of landslide, VL)：指坡地發生砂石移動後產生的空間(不包含雨滴落下造成坡面凹陷的空間)，單位為 cm^3 。

(3)崩塌時間(time of landslide, TL)：指坡地上方開始降雨至發生砂石移動的時間，單位為秒。

3.研究步驟：

(1)將雨滴粒徑 1.2mm、水深 30cm、高度 120cm 作為本次實驗模擬之短延時強降雨；設定自製坡地夯實裝置之坡地角度為 20 度，倒入細沙夯實後秤重，獲得質量為 16.00kg，並依據下表 5-4-1，於改變不同坡地角度時加入等比例之細沙夯實，以期維持每一次實驗坡地之細沙密度為定值。

表 5-4-1、不同坡地角度體積與質量推算表

坡地角度 A (度)	20	25	30	35	40
坡地上底(cm)	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
坡地下底(cm)	67.44	54.18	45.11	38.42	33.22
坡地體積(cm^3)	12283.34	10094.56	8597.34	7494.18	6636.07
坡地質量(kg)	16.00	13.15	11.20	9.76	8.64

(2)於細沙斜坡上降雨與進行土壤濕度監測，觀察並紀錄崩塌體積(VL)與崩塌時間(TL)。

(3)重複進行步驟(1)與步驟(2)數次以取得平均數值，並依序更改坡度角度 25、30、35、40 度，重複步驟(1)至步驟(3)。

(4)繪製成長條圖以觀察崩塌體積(VL)與崩塌時間(TL)分布情形。

4.研究結果：如圖 5-4-1、圖 5-4-2 所示。

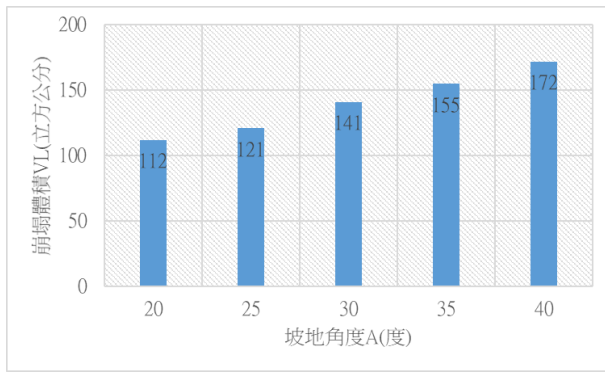


圖 5-4-1、坡地角度 A 與崩塌體積 VL 圖

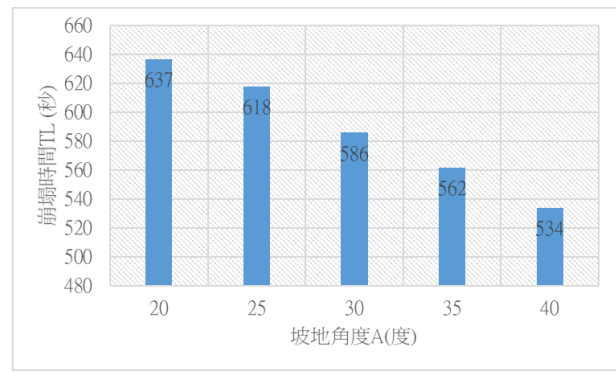


圖 5-4-2、坡地角度 A 與崩塌時間 TL 圖

5.研究討論：

(1)研究結果發現坡地角度 A 變大時，而崩塌時間 TL 變短，崩塌體積 VL 也較大。

(2)針對崩塌時間 TL 進行探討，發現與前三個實驗雷同，烘乾沙土，使土壤濕度檢測值由 1023 開始後，進行降雨，當三只檢測數值下降達 383 至 371 時，不論坡地角度 A 值為何，均開始崩塌，顯示崩塌現象主要與土壤濕度有關；由水量觀

點深入進行討論發現 坡地內水量 = $\frac{\text{降雨量}}{\text{時間}} \times \text{時間} = \frac{\text{含水量}}{\text{乾土量}} \times \text{乾土量}$ 。

由於本次實驗控制變因為 $\frac{\text{降雨量}}{\text{時間}} = \text{定值}$ ，

且根據實驗結果發現 $\frac{\text{含水量}}{\text{乾土量}} = \text{土壤濕度} = \text{定值}$ (崩塌時)，

可得知崩塌時間與乾土量成正比 (式 5-4-1)。

由表 5-4-1 可知，當坡地角度 A 越小，坡地之乾土量(即坡地質量)越大，代入式 5-4-1 討論，發現坡地角度 A 越大，崩塌時間 TL 變短，與實驗結果相符。

(3)此外，針對崩塌體積 VL 進行探討，當三只檢測數值下降達 383 至 371 時，開始崩塌，持續落下的雨滴落至坡面時所具有的動能變成雨水滲入坡面後的動能(極少)及崩塌土壤與雨水的動能；崩塌土壤與雨水的動能因摩擦力做負功而停止崩塌，根據摩擦力相關公式： $F = \mu N$

(其中 F 為摩擦力， μ 為摩擦係數，N 為正向力)

摩擦係數 μ 與接觸面性質有關，本次實驗均為夯實之細沙，故假設 μ 為定值，可得 $F \propto N$ 。

而根據力圖分析，正向力 N 為土壤重量之分力，當坡地角度 A 變大，正向力 N

變小，使得摩擦力 F 變小，導致崩塌體積 VL 變大。

(二) 坡地單一粒徑實驗

1. 提出問題：不同砂石粒徑的坡地在強降雨下崩塌現象會有差異嗎？

2. 定義：

(1) 砂石粒徑 (particle size, PS)：指實驗樣本砂石的粒徑範圍，單位為公分。

(2) 崩塌體積 (volume of landslide, VL)：指坡地發生砂石移動後產生的空間 (不包含雨滴落下造成坡面凹陷的空間)，單位為 cm^3 。

(3) 崩塌時間 (time of landslide, TL)：指坡地上方開始降雨至發生砂石移動的時間，單位為秒。

3. 研究步驟：

(1) 將雨滴粒徑 1.2mm、水深 30cm、高度 120cm 作為本次實驗模擬之短延時強降雨；設定自製坡地夯實裝置之坡地角度為 20 度，倒入細沙夯實後秤重，獲得質量為 16.00kg。

(2) 於細沙斜坡上降雨 30 分鐘，觀察並紀錄崩塌體積 (VL) 與崩塌時間 (TL)。

(3) 重複進行步驟 (1) 與步驟 (2) 數次以取得平均數值，並依序更改實驗樣本，如下表 5-4-2，重複步驟 (1) 至步驟 (3)。

表 5-4-2、不同實驗樣本規格表

項目	1	2	3	4
名稱	細沙 40 目	宜蘭石 1.2 分	宜蘭石 3 分	宜蘭石 5 分
粒徑範圍 (公分)	0.05 - 0.1	0.5 - 0.8	1 - 2	2 - 3

(4) 繪製成長條圖以觀察崩塌體積 (VL) 與崩塌時間 (TL) 分布情形。

4. 研究結果與研究討論：

(1) 研究結果發現細沙經過 30 分鐘降雨後有明顯的崩塌現象；換成 1.2 分的宜蘭石後，發現石頭因雨滴敲擊而有明顯夯實及彈跳移位的現象，降下的雨滴迅速由石頭間的縫隙流走，沒有明顯的崩塌現象發生。此外，當換成較大的宜蘭石時，

石頭遭雨滴敲擊夯實現象越明顯，單一石頭彈跳移位現象越少見，降下的雨滴則更迅速流走。

(2)從能量角度分析，雨滴落至坡面時所具有的動能於落至坡面後轉變成土壤因夯實形狀改變的位能及雨水滲入坡面後的動能；其中由於石頭間縫隙較大，雨水滲入坡面後的動能使得雨水在縫隙間流動、往下滲入，因此並未發生土壤濕度達飽和後而轉換成崩塌土壤與雨水的動能，造成崩塌的現象。

(3)由以上分析，可獲知當坡地組成縫隙較大、排水良好時，崩塌現象較不易發生；此外，為了研究極端現象，嘗試將整個實驗坡地泡在水中，發現當石頭間因水之潤滑，極易因細微的擾動而造成大規模崩塌與滑動，其中顆粒越大的宜蘭石越明顯。

(三) 坡地混合粒徑實驗

1.提出問題：不同砂石粒徑層疊的坡地在強降雨下崩塌現象會有差異嗎？

2.定義：

(1)砂石粒徑(particle size, PS)：指實驗樣本砂石的粒徑範圍，單位為公分。

(2)崩塌體積(volume of landslide, VL)：指坡地發生砂石移動後產生的空間(不包含雨滴落下造成坡面凹陷的空間)，單位為 cm^3 。

(3)崩塌時間(time of landslide, TL)：指坡地上方開始降雨至發生砂石移動的時間，單位為秒。

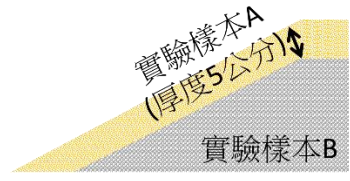
3.研究步驟：

(1)將雨滴粒徑 1.2mm、水深 30cm、高度 120cm 作為本次實驗模擬之短延時強降雨；設定自製坡地夯實裝置之坡地角度為 20 度，分層倒入細沙與各實驗樣本，配置如 5-4-3 所示。

(2)於斜坡上降雨 30 分鐘，觀察並紀錄崩塌情形。

4.研究結果：

表 5-4-3、實驗樣本配置與實驗結果對照表

 <p>實驗樣本A (厚度5公分) 實驗樣本B</p>	實驗樣本 A	1	1	1	2	3	4
	實驗樣本 B	2	3	4	1	1	1
	崩塌現象	降雨後，細沙先隨著雨水流入石頭間的縫隙，不及流入的細沙有崩塌現象，但數量不多。			降雨後，雨水迅速滲入，未發現明顯崩塌現象。		

5.研究討論：

- (1)研究結果發現當粒徑較小的砂石在上方時，降雨後粒徑較小的砂石隨著雨水流動填補粒徑大石頭間的縫隙，坡面狀況逐漸變成粒徑較大砂石在上的現象。
- (2)研究結果發現當粒徑大的砂石在上方時，與單一粒徑實驗結果類似，未發生崩塌現象。
- (3)經由以上兩部分觀察發現實驗坡地經過實驗後均趨於大粒徑砂石在上，小粒徑砂石在下的狀況，為了研究極端現象，嘗試將實驗坡地泡在水中，發現在上方的粒徑較大砂石極易因細微的擾動而造成大規模崩塌與滑動，其中顆粒越大的宜蘭石越明顯。

根據以上研究，發現當坡地角度變大時，崩塌體積也較大，而崩塌時間變短；而當砂石粒徑越來越大時，因縫隙較大、排水良好，崩塌現象較不易發生；至於分層混合粒徑時，會發生趨於粒徑越大砂石越在上的現象，但當縫隙充滿水後，均極易因細微的擾動而造成大規模崩塌與滑動，其中粒徑越大的宜蘭石崩塌現象越明顯。

五、兼具防止坡地崩塌、洩洪、警戒裝置設計

根據以上實驗及資料蒐集結果，發現當短延時強降雨造成坡地崩塌時，往往發生十分嚴重，如何防止崩塌現象發生成為我們必須研究的重要課題。

(一) 植樹實驗

1. 提出問題：在容易崩塌的坡地種植樹木，是否有助於減緩崩塌現象？

2. 研究步驟：

(1) 將雨滴粒徑 1.2mm、水深 30cm、高度 120cm 作為本次實驗模擬之短延時強降雨；

設定自製坡地夯實裝置之坡地角度為 20 度，倒入細沙夯實作出坡地。

(2) 利用 3D 列印製樹根模型，將其間隔 3 公分，垂直種入坡地斜面，如圖 5-5-1。

(3) 於斜坡上降雨 30 分鐘，觀察並紀錄崩塌情形。

3. 研究結果：

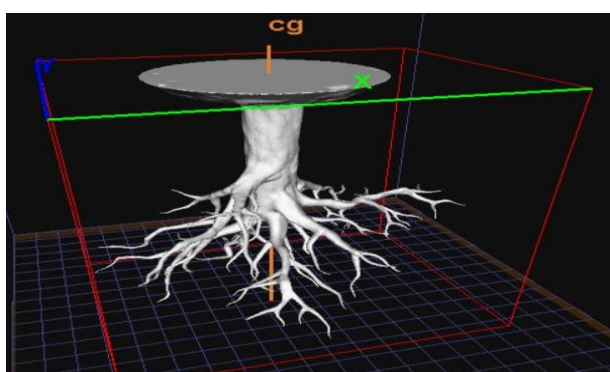


圖 5-5-1、樹根模型之 3D 列印圖

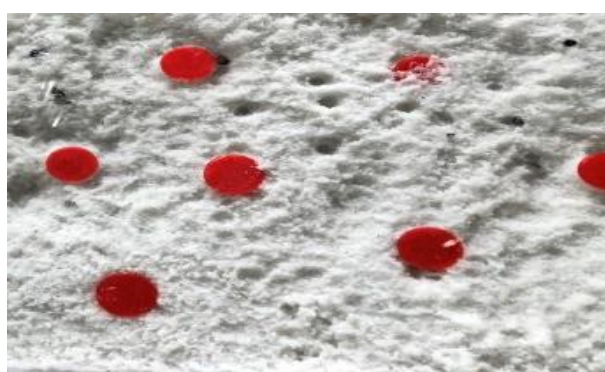


圖 5-5-2、坡地種入樹根，進行降雨

4. 研究討論：

(1) 如圖 5-5-2 所示，植入樹根模型之細沙坡面，僅發生垂直方向之夯實凹陷，並未發生崩塌現象，因此，在易發生崩塌之坡面種植樹木有助於減緩崩塌現象。

(2) 進行受力分析，如圖 5-5-3 所示，發現樹根可能有助於減少 x 方向之分力，因此，我們開始思考當樹木生長緩慢時，設計立柱穿入坡面的可行性。

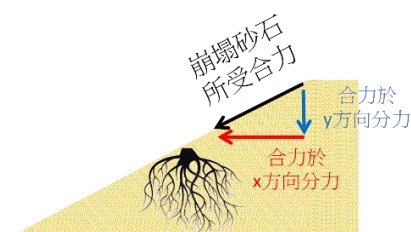


圖 5-5-3、力圖分析

(二) 立柱實驗

1. 提出問題：在容易崩塌的坡地旋入立柱，是否有助於減緩崩塌現象？

2.研究步驟：

- (1)將雨滴粒徑 1.2mm、水深 30cm、高度 120cm 作為本次實驗模擬之短延時強降雨；設定自製坡地夯實裝置之坡地角度為 20 度，倒入細沙夯實作出坡地。
- (2)自行設計立柱模型(為了盡量不破壞坡面，我們設計螺旋形狀之立柱)，並利用 3D 列印製模型，將其間隔 3 公分，垂直種入坡地斜面，如圖 5-5-4。
- (3)於斜坡上降雨，觀察坡面夯實凹陷不再變化後測量坡面情形，接著持續降雨(使總降雨時間為 30 分鐘)後，觀察並測量崩塌情形，計算崩塌體積 VL。

3.研究結果：



圖 5-5-4、3D 列印立柱模型



圖 5-5-5、坡地鑽入立柱降雨結果

4.研究討論：

- (1)研究結果發現旋入立柱模型之細沙坡面，發生垂直方向之凹陷及較小崩塌現象(與完全未加任何裝置之相同坡面比較)，因此，**在易發生崩塌之坡面旋入立柱有助於減緩崩塌現象，但是，與植入樹根之實驗結果比較，效果仍然較差。**
- (2)根據以上結果，開始討論植入樹根的功用可能不只是有助於減少 x 方向之分力，重新審視之前其他相關實驗結果，推測樹根是否有助於排水與含水，使土壤濕度不易達崩塌之臨界，故可以有效減緩崩塌現象。

(三)綜合實驗

1.提出問題：在容易崩塌的坡地植樹並旋入立柱，是否有助於減緩崩塌現象？

2.研究步驟：

- (1)將雨滴粒徑 1.2mm、水深 30cm、高度 120cm 作為本次實驗模擬之短延時強降雨；

設定自製坡地夯實裝置之坡地角度為 20 度，倒入細沙夯實作出坡地。

(2)將立柱與樹根模型均勻分旋入(種入)坡地斜面。

(3)於斜坡上降雨，觀察坡面夯實凹陷不再變化後測量坡面情形，接著持續降雨(使總降雨時間為 30 分鐘)後，觀察並測量崩塌情形，計算崩塌體積 VL。

3.研究結果：



圖 5-5-6、坡地鑽入立柱與樹根降雨後結果

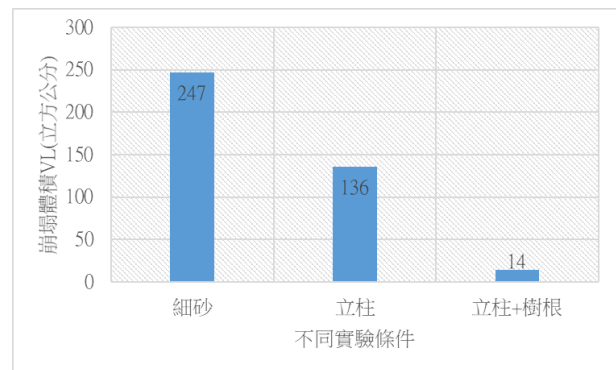


圖 5-5-7、不同條件與崩塌體積 VL 圖

4.研究討論：

(1)研究結果發現旋入立柱與樹根模型之細沙坡面，除發生凹陷，與未外加裝置或僅有立柱相較，減少崩塌現象效果較佳。

(2)根據以上研究結果，顯示除了考慮斜坡受力狀況外，改善斜坡之含水與排水能力亦是減少崩塌現象時之重要考量。

(3)此外，關於降雨擊打坡面造成之坡面凹陷，使得樹根與立柱裸露的現象，可能導致樹木或立柱倒塌，亦是需要留意改善之處。

(四)雨水收集與排水實驗

1.提出問題：在立柱上方加裝雨水收集與排水裝置，是否有助於減緩崩塌現象擊坡面凹陷程度？

2.研究步驟：

(1)將雨滴粒徑 1.2mm、水深 30cm、高度 120cm 作為本次實驗模擬之短延時強降雨；設定自製坡地夯實裝置之坡地角度為 20 度，倒入細沙夯實作出坡地。

(2)自行設計方形漏斗狀模型，並將立柱改中空(以利排水)，利用 3D 列印製模型，

將漏斗狀模型加於立柱上方，並將立柱下方開洞，使收集之雨水能排入坡地底部。

(3)於斜坡上降雨 30 分鐘，觀察並紀錄崩塌情形。

4.研究結果：

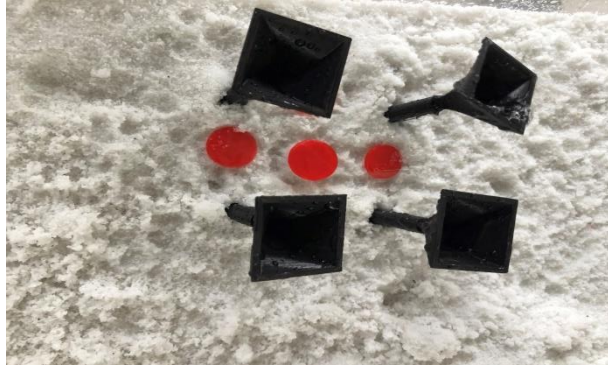


圖 5-5-8、坡地鑽入立柱與樹根並加裝雨水收集器，降雨結果

5.研究討論：

加裝雨水收集器與排水立柱可減少降雨擊打坡面造成之坡面凹陷，並且崩塌現象根據觀察並不顯著。

根據以上研究，發現在易發生崩塌之坡面植樹及加裝立柱均有助於減緩崩塌現象，在立柱上方加上雨水收集器進行雨水收集與排水，更能有效減少崩塌及雨水擊打造成之樹根及立柱裸露現象；此外，進一步思考未來若能在立柱上加裝土壤濕度偵測裝置及立柱傾斜感測裝置，並與物聯網連接，於土壤濕度達飽和數值時即時進行通知預警，並於立柱發生傾斜現象時以手機訊息推播，讓在坡面活動的人提高注意(甚至撤離)，將能有效保護生命安全；而面對台灣目前越來越嚴峻的水情，排出的雨水如何進行有效的儲存與再利用亦是未來可以繼續研究的課題。

陸、結論與建議

一、根據國家災害防救科技中心分析台灣的短延時（1、2、3、6 小時）之累積雨量特性，發現近年短延時強降雨事件的發生日數及時雨量存在上升趨勢。

- 二、短延時強降雨降雨強度過強，往往超過當地防洪設計或土地承受能力，導致人命財產的極大損失。
- 三、研究發現降雨的雨滴粒徑越大、雨滴速度越大(亦即降雨強度越大)，坡面崩塌體積越大，崩塌時間則越短。
- 四、研究發現在短延時強降雨的情況下，當坡地角度變大時，崩塌體積也較大，而崩塌時間變短。
- 五、研究發現當砂石粒徑越來越大時，因縫隙較大、排水良好，崩塌現象較不易發生；至於分層混合粒徑時，會發生趨於粒徑越大砂石越在上的現象，但當縫隙充滿水後，均極易因細微的擾動而造成大規模崩塌與滑動，其中粒徑越大的砂石崩塌現象越明顯。
- 六、研究發現在易發生崩塌之坡面植樹及加裝立柱均有助於減緩崩塌現象，在立柱上方加上雨水收集器進行雨水收集與排水，更能有效減少崩塌及雨水擊打造成樹根及立柱裸露現象。
- 七、研究後建議未來若能在立柱上加裝土壤濕度偵測裝置及立柱傾斜感測裝置，進行監測與預警，將能有效保護生命安全；而面對台灣目前越來越嚴峻的水情，排出的雨水如何進行有效的儲存與再利用是未來可以繼續研究的課題。
- 八、本次實驗設計建議未來可以朝立柱設置的傾斜角度(即斜樁)、立柱設置密度、立柱深度、不同材質土壤之土壤崩塌濕度……等方向繼續進行相關研究。

柒、參考資料及其他

1. 吳宜昭、龔楚嫻、王安翔、于宜強(2016)，台灣地區短延時強降雨事件氣候特性分析，災害防救電子報。
2. 于宜強、吳宜昭、龔楚嫻、黃柏誠、王安翔、李宗融、林冠伶(2016)，2015年台灣地區極端降雨事件彙整與分析，國家災害防救科技中心，新北市。
3. 土石流及崩塌地源頭水土保持處理工作手冊(2006)，行政院農業委員會水土保持局編印。

【評語】 030503

【優點】

1. 研究主題具鄉土性及與環境相關。
2. 研究將構想具體化，完整作出實驗。
3. 詳細整理現有資料，並與相關研究比較。
4. 研究結果具應用價值 (在易發生崩塌之坡面植樹、加裝立柱有助於減緩崩塌)，不但研究崩塌變因，也提供改善方式。
5. 實驗規模須有團隊參與合作才能完成。

【建議】

1. 變項與結論關係可能容易造成誤解。此研究之崩塌時間，是崩塌物質到達某距離所花的時間。然崩塌時間的定義，是崩塌行為維持的時間。大的塊體，所獲得之動量大，應可以滑動較遠的距離，也會產生較長的崩塌時間。
2. 背景資料的準備與問題回答有改進的空間。
3. 濕度儀器的校正與量度的不確定性可以再進一步改進。
4. 結果的呈現缺少量化，應避免純定性的描述(例如只有崩塌與否，缺少崩塌程度區分)。

作品簡報



中華民國第61屆中小學科學展覽會

61st 全國科展
in 嘉義

國中組 地球科學科

「立」挽狂瀾

-坡地崩塌現象及防治研究

前言

壹、研究動機

極端天氣與氣候事件發生日數少，但造成的集中型災害其強度往往超過原有工程防護的安全標準門檻值，一旦發生，常常造成嚴重災害，因此，這次的科學研究試圖藉由實驗了解短延時強降雨造成之崩塌現象，並尋求可行的調適方法。

貳、研究目的

- 一、了解不同降雨強度造成坡地崩塌的情形。
- 二、了解不同角度坡地在強降雨下崩塌的情形。
- 三、了解不同粒徑坡地在強降雨下崩塌的情形。
- 四、設計出兼具防止坡地崩塌、洩洪、警戒的裝置。

前言

參、文獻探討

一、降雨研究

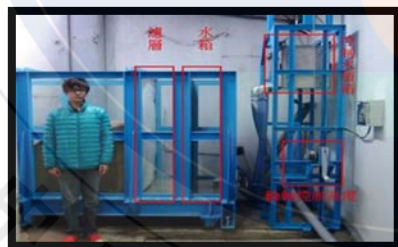
1. 短延時強降雨
2. 降雨強度與雨滴粒徑的關係
3. 降雨強度與雨滴速度的關係

二、坡地崩塌

1. 豪雨型崩塌為本次主要研究的現象
2. 有限邊坡為本次崩塌實驗設計



無限邊坡
(大部分研究採用)



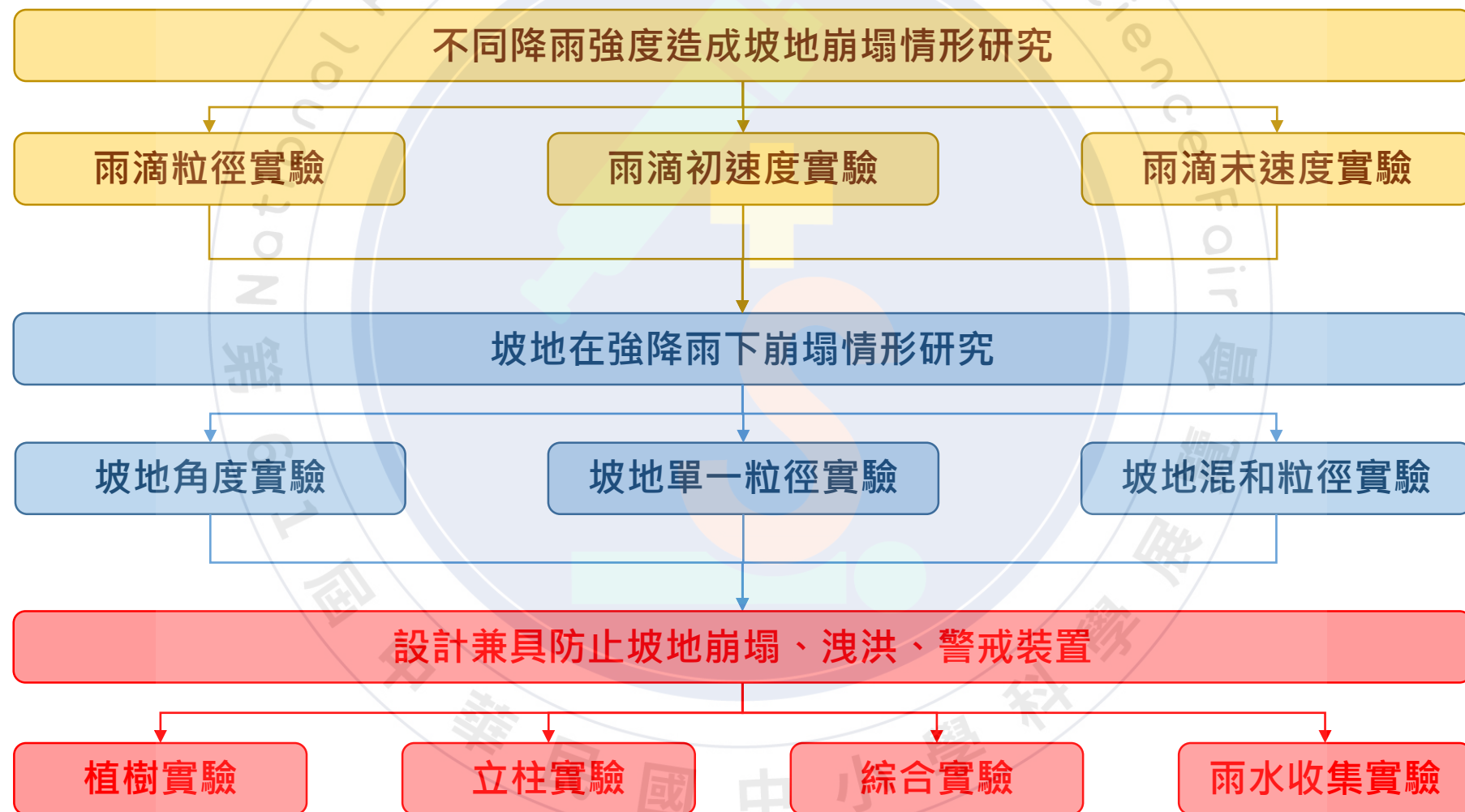
有限邊坡
(本次研究採用)

三、歷屆科學展覽相關研究

操縱變因	改善方式	研究主題
土壤孔隙 土壤粒徑	無	坍與不坍 - 崩塌地之 土粒研究
土質	無	紅色警戒
土壤含水量	無	水土比一比
坡度 降水量	擋土牆 防砂壩	坡地土石災難成因的 探討 - 以特富野和 觸口為例
河流走向	防砂壩	Hold 住啊，不要崩 潰！
無	梳子壩	會呼吸的梳子壩？！
無	擋土牆 排水管	牆要 double L 邊坡 防護更 OK~

研究方法

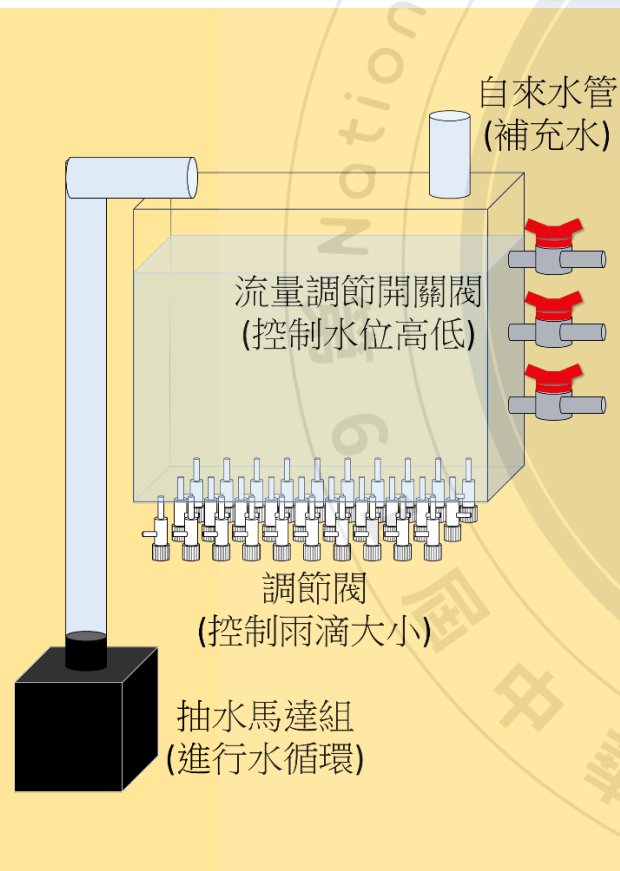
壹、研究架構



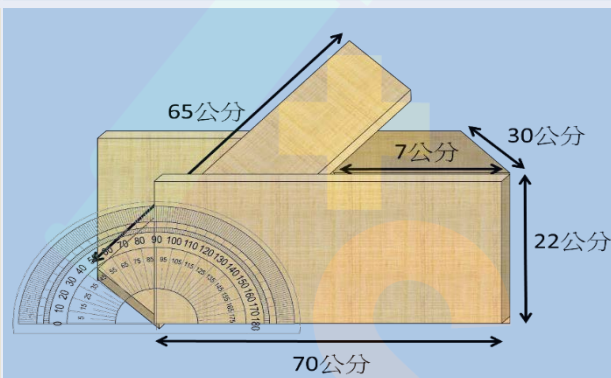
研究方法

貳、研究器材設計

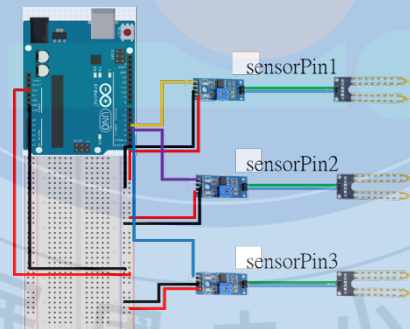
自製降雨模擬裝置



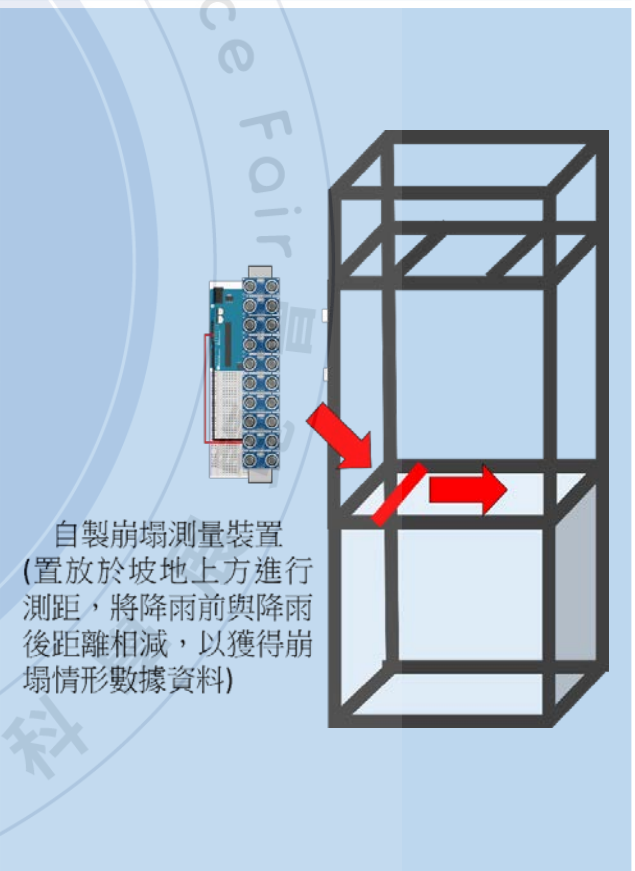
自製坡地裝置



自製土壤溼度感測裝置



自製崩塌測量裝置



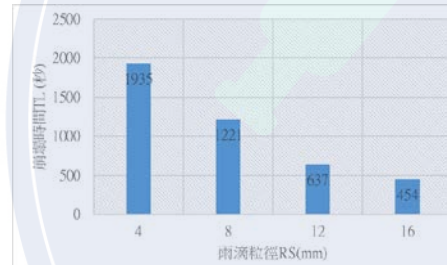
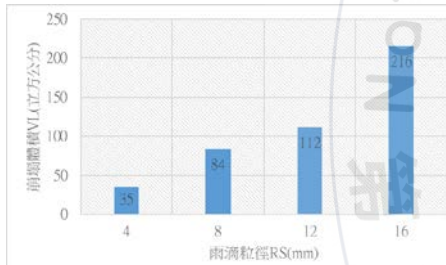
研究結果與解釋

壹、不同降雨強度造成坡地崩塌情形分析

一、雨滴粒徑實驗

1.問題：雨滴粒徑越大的崩塌現象？

2.研究結果：



雨滴粒徑RS與崩塌體積VL圖

雨滴粒徑RS與崩塌時間TL圖

3.研究結果解釋：由能量角度進行分析

A.崩塌前

雨滴動能=土壤因夯實形狀改變的位能

+雨水滲入後動能

B.土壤濕度達379至370，開始崩塌

雨滴動能=雨水滲入後動能(極少)

+崩塌土壤與雨水的動能

C.崩塌停止

因摩擦力做負功而停止崩塌。



(1)雨滴粒徑變大時(即相同時間內提供較大質量的雨水)，使得坡面達到夯實與土壤濕度達臨界之時間變短，亦即崩塌時間變短。

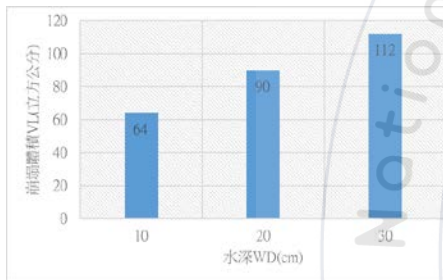
(2)因雨滴落至坡面時所具有的動能變大，導致崩塌體積VL也較大。

研究結果與解釋

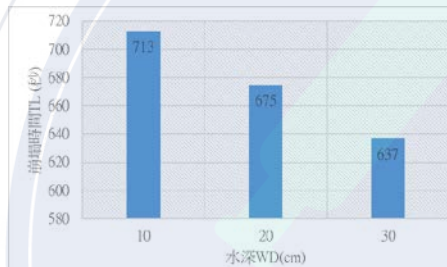
二、雨滴初速度實驗

1.問題：雨滴初速度越大的崩塌現象？

2.研究結果：



水深WD與崩塌體積VL圖

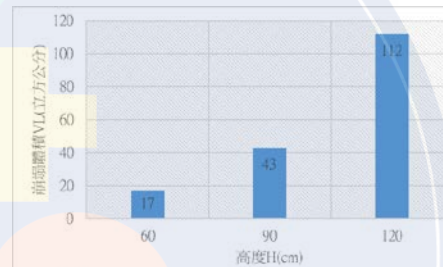


水深WD與崩塌時間TL圖

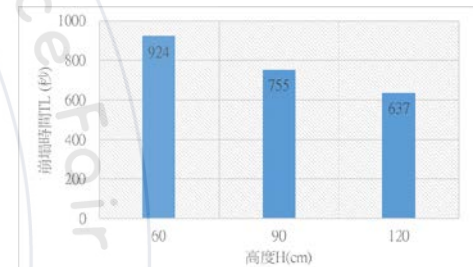
三、雨滴末速度實驗

1.問題：雨滴末速度越大的崩塌現象？

2.研究結果：



高度H與崩塌體積VL圖



高度H與崩塌時間TL圖

3.研究結果解釋：

(1)根據白努力定律，可得 $v = \sqrt{2gh}$ ，亦即水深越深，雨滴初速度越大。

(2)根據牛頓第二運動定律，雨滴自降雨模擬裝置離開後以重力加速度 g 作等加速度運動，

可得 $v_1 = \sqrt{2g(h + H)}$ ，亦即高度越高，雨滴末速度越大。

(3)實驗二與實驗三之數據可進行整合，發現

(水深+高度)與崩塌體積的數據點連線與趨勢線均呈現左下右高現象；

(水深+高度)與崩塌時間的趨勢線與數據點則顯現出差異，需要再進一步討論。

研究結果與解釋

貳、坡地在強降雨下崩塌情形分析

短延時強降雨模擬條件：雨滴粒徑12mm、水深30cm、高度120cm
主要研究樣本：不吸水的砂石

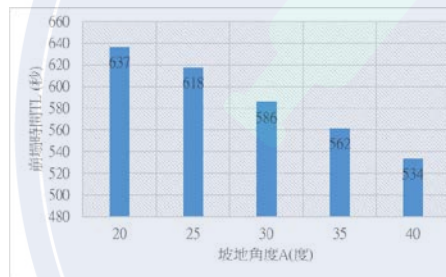
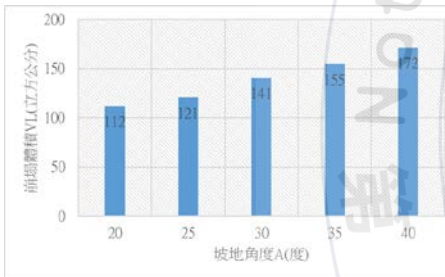
一、坡地角度實驗

1.問題：不同角度坡地強降雨下的崩塌現象？

(2)針對崩塌體積VL進行探討

2.研究結果：

崩塌土壤與雨水的動能因摩擦力做負功而停止崩塌，根據摩擦力公式： $F = \mu N$



坡地角度A與崩塌體積VL圖

坡地角度A與崩塌時間TL圖

3.研究結果解釋：

(1)針對崩塌時間TL進行探討

其中摩擦係數 μ 與接觸面性質有關，本次實驗為夯實之細沙，故假設 μ 為定值，得 $F \propto N$ 。

根據力圖分析，正向力N為土壤重量之分力，當坡地角度A變大，正向力N變小，使得摩擦力F變小，導致崩塌體積VL變大。

根據土壤溼度檢測結果，崩塌現象主要與土壤濕度有關；坡地角度越大，乾土量越小，達土壤溼度時間越短，亦即崩塌時間越短。

研究結果與解釋

二、坡地單一粒徑實驗

1.問題：不同砂石粒徑的坡地強降雨下的崩塌現象？

2.研究結果與解釋：

樣本	研究結果	研究解釋
細沙	降雨後有明顯崩塌現象	雨滴動能=土壤位能+雨水滲入後動能
宜蘭石	有明顯夯實及彈跳移位現象，降雨下的雨滴迅速由石頭間縫隙流走。	雨滴動能=雨水滲入後的動能 實驗坡地泡在水中 ，發現當石頭間因水之潤滑，極易因細微的擾動而造成大規模崩塌與滑動，其中顆粒越大的宜蘭石越明顯。

三、坡地混合粒徑實驗

1.問題：不同砂石粒徑層疊的坡地強降雨下的崩塌現象？

2.研究結果與解釋：

(1)粒徑較小的砂石在上方時，降雨後粒徑較小的砂石隨雨水填補粒徑大石頭間的縫隙，坡面狀況逐漸變成粒徑較大砂石在上的現象。

(2)粒徑較大的砂石在上方時，與單一粒徑實驗結果類似，未發生崩塌現象。

(3)實驗坡地實驗後均趨於大粒徑砂石在上，小粒徑砂石在下的狀況；將**實驗坡地泡在水中**，發現在上方的粒徑較大砂石極易因細微的擾動而造成大規模崩塌與滑動，其中顆粒越大的宜蘭石越明顯。

研究結果與解釋

叁、兼具防止坡地崩塌、洩洪、警戒裝置設計

一、植樹實驗

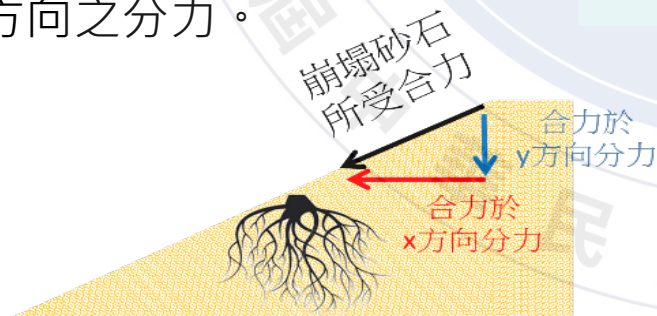
1.問題：

在容易崩塌的坡地**種植樹木**，是否有助於減緩崩塌現象？

2.研究結果與解釋：

(1) 植入樹根模型之細沙坡面，僅發生垂直方向之夯實凹陷，並未發生崩塌現象。

(2) 進行受力分析，發現樹根可能有助於減少x方向之分力。



二、立柱實驗

1.問題：

在容易崩塌的坡地**旋入立柱**，是否有助於減緩崩塌現象？

2.研究結果與解釋：

(1) 在易發生崩塌之坡面旋入立柱有助於減緩崩塌現象，但是，與植入樹根之實驗結果比較，效果較差。

(2) 推測樹根是否有助於排水，使土壤濕度不易達崩塌之臨界，故可以有效減緩崩塌現象。

研究結果與解釋

三、綜合實驗

1.問題：

在容易崩塌的坡地植樹並旋入立柱，是否有助於減緩崩塌現象？

2.研究結果與解釋：

(1)與未外加裝置或僅有立柱相較，減少崩塌現象效果較佳。

(2)除了考慮斜坡受力狀況外，改善斜坡之含水與排水能力亦是減少崩塌現象時之重要考量。

(3)此外，降雨擊打坡面造成之坡面凹陷，使得樹根與立柱裸露的現象，可能導致樹木或立柱倒塌，亦是需要留意改善之處。

四、雨水收集與排水實驗

1.問題：

在立柱上方加裝雨水收集與排水裝置，是否有助於減緩崩塌現象擊坡面凹陷程度？

2.研究結果與解釋：

加裝雨水收集器與排水立柱可減少降雨擊打坡面造成之坡面凹陷，且無明顯崩塌現象。



坡地鑽入立柱與樹根並加裝雨水收集器降雨結果

結論與參考資料

壹、結論

- 一、台灣近年短延時強降雨事件的發生日數及時雨量存在上升趨勢，短延時強降雨降雨強度過強，往往超過當地防洪設計或土地承受能力，導致人命財產的極大損失。
- 二、雨滴粒徑越大、雨滴速度越大、坡地角度變大時，崩塌體積較大，崩塌時間變短。
- 三、砂石粒徑越大時，崩塌現象較不易發生；分層混合粒徑時，會發生砂石粒徑越大越在上現象，但**當縫隙充滿水後，極易因細微擾動而造成大規模崩塌與滑動。**
- 四、在易發生崩塌之坡面植樹、加裝立柱有助於減緩崩塌，在立柱上方加上雨水收集器更能有效減少崩塌及雨水擊打造成之裸露現象，建議若能在立柱上加裝土壤濕度偵測裝置及立柱傾斜感測裝置，進行監測與預警，將能有效保護生命安全；而面對台灣目前越來越嚴峻的水情，排出的雨水如何進行有效的儲存與再利用是未來可以繼續研究的課題。

貳、參考資料

- 1.吳宜昭、龔楚嫻、王安翔、于宜強(2016)，台灣地區短延時強降雨事件氣候特性分析，災害防救電子報。
- 2.于宜強、吳宜昭、龔楚嫻、黃柏誠、王安翔、李宗融、林冠伶(2016)，2015年台灣地區極端降雨事件彙整與分析，國家災害防救科技中心，新北市。
- 3.土石流及崩塌地源頭水土保持處理工作手冊(2006)，行政院農業委員會水土保持局編印。