

花蓮縣第 64 屆國民中小學科學展覽會

作品說明書



科別：生活與應用科學科(三)

組別：國中組

作品名稱：水落石出—探討不同狀態下砂土崩塌的特性

關鍵詞：土石流、安息角、木瓜溪砂

編號：

目 錄

摘要.....	1
壹、研究動機.....	1
貳、研究目的.....	1
參、研究設備及器材.....	2
肆、研究過程與方法.....	4
一、研究架構.....	4
二、研究原理.....	4
三、名詞定義.....	5
四、實驗方法.....	6
伍、研究結果與討論.....	8
實驗 1：不同重量的培養土與崩落角關係之探討.....	8
實驗 2：不同底面積的培養土與崩落角間關係之探討.....	11
實驗 3－1：不同含水量的培養土與崩落角間關係之探討.....	13
實驗 3－2：不同含水量的雪白細砂與崩落角度間關係之探討.....	14
實驗 4：不同砂的安息角之探究.....	16
實驗 5：不同種類的砂在不同水量沖刷後破壞狀況之探究.....	17
實驗 6：不同角度時木瓜溪砂下滑之狀況.....	20
實驗 7－1：木瓜溪砂加入不同水量時崩落角變化之探討.....	23
實驗 7－2：緩慢將水滴入土堆發生徑流水與滑動觀察.....	24
陸、結論.....	26
柒：參考文獻資料.....	28

摘要

砂土崩塌是一種常見的自然災害，本研究透過一系列實驗，探究不同狀態下砂土崩塌的特性。實驗設計包括測試不同重量、底面積、含水量對培養土和雪白細砂崩落角的影響；測量不同砂種安息角並比較其差異；觀察不同水量沖刷下砂土的破壞情形；以及探究木瓜溪砂在不同坡度和含水量下的滑落情況。實驗結果發現，重心位置和水分含量是影響崩落角的主要變因，而非重量和底面積。不同砂種在相同水量沖刷下破壞程度相近，當坡度達 20 度且木瓜溪砂吸水飽和時，較小水流沖刷即可整體滑落。根據數據歸納提出一坡度區分模型，解釋在何種條件下會發生砂土崩落、土石流等災害。本研究對瞭解影響砂土崩塌的關鍵因素及其發生機制具參考價值。

壹、研究動機

組員家中有從事礦物業的親人，常常要控制水土方面的問題，而土石流也包括在內，土石流牽涉到土質、摩擦力、傾斜角度等種種因素，而其中角度（坡度）是一大因素，我們上網查了資料此角度稱為安息角。於是我們不禁好奇，不同的土是否會有不同的安息角？而土又會因為什麼，角度而有所改變？水分多寡是否影響破壞狀況？

貳、研究目的

研究一目的：培養土崩落狀態之探討

實驗 1：不同重量的培養土與崩落角關係之探討

實驗 2：不同底面積的培養土與崩落角間關係之探討

實驗 3 - 1：不同含水量的培養土與崩落角間關係之探討

實驗 3 - 2：不同含水量的雪白細砂與崩落角度間關係之探討

研究二目的：不同種類泥砂安息角之探討

實驗 4：不同砂在乾燥時的安息角之探究

研究三目的：不同水量對不同土的破壞狀況以及不同土的性質影響之探究

實驗 5：不同種類的砂在不同水量沖刷後破壞狀況之探究

研究四目的：木瓜溪砂滑落情形之探究

實驗 6：觀察不同角度時木瓜溪砂被水沖刷的狀況

實驗 7 - 1：加入不同水量時木瓜溪砂滑落的崩落角

實驗 7 - 2：緩慢將水滴入土堆發生徑流水與滑動之觀察

參、研究設備及器材

[裝置一] 用於崩落角實驗、沖刷實驗

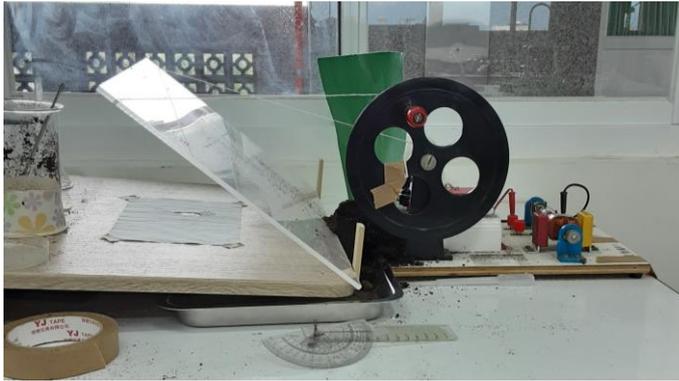


圖 1、測崩落角和沖刷實驗裝置

於是我們使用拉線器，透過棉線與壓克力板的連結，將壓克力板拉起，直到土滑落或坍塌，並測量板子與桌面的距離以及角度，不過因拉線器在壓克力板貼平底板時，無法將其拉起。於是我們在實驗室中找到類似輪軸的裝置，測試之後發現可以將其穩定向上拉起，最後就以此裝置作為測量崩落角的工具。

[裝置二]：板子 (120cm × 15cm × 15cm)用於木瓜溪砂沖刷實驗和木瓜溪砂崩落角實驗



圖 2、木瓜溪砂沖刷實驗和木瓜溪砂崩落角實驗

是由兩片 240cm 的木板，裁切成四片 120cm 的木板，再把三片木板用釘子釘成 U 字形軌道，並在底部貼上止滑墊，可以讓板子在高角度時不易向前滑動，對之後實驗有幫助，它可以固定在一定的角度，板子不會一直晃或是改變角度，也不會軟掉，是個好用的器材，斜面頂端放置容器，容器底部鑽多孔，可讓水由孔洞流下流入斜面。

其他裝置：

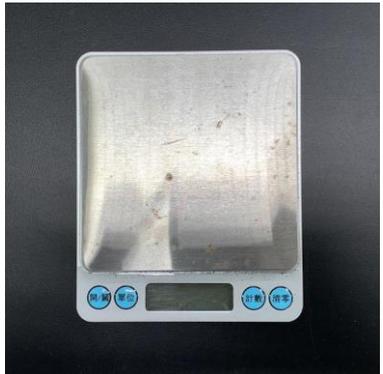
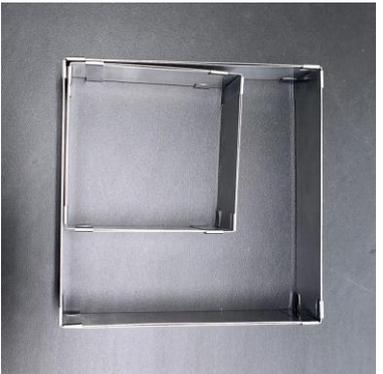
		
<p>電子秤</p>	<p>正方形模具</p>	<p>尺</p>
		
<p>不同顆粒大小的砂石 (雪白細砂0.5mm、黃金角砂2~8mm、原生川藏溪流砂6~25mm、美國矽砂2~3mm、混色雨花石35~40mm、熱帶雨林砂0.1~0.3mm)</p>	<p>培養土 原料：水苔泥炭、椰殼纖維、碳化稻殼、白雲石粉 登記成分：有機質80.4%、全氮0.9%、全磷酐0.3%、全氧化鉀0.3%</p>	<p>圓柱形模型 崩落角實驗中拿來塑型 (直徑7.5cm、高5cm)</p>
<p>phyphox</p>	<p>ImageJ</p>	
		

表 1、其他實驗器材和應用軟體

肆、研究過程與方法

一、研究架構

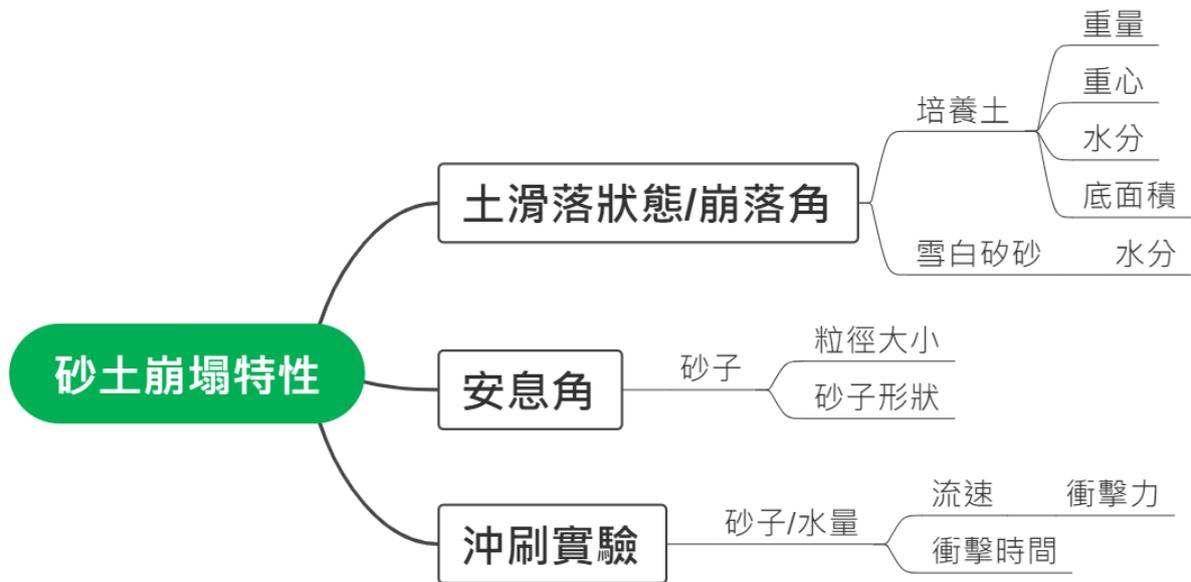


圖 3、實驗架構圖

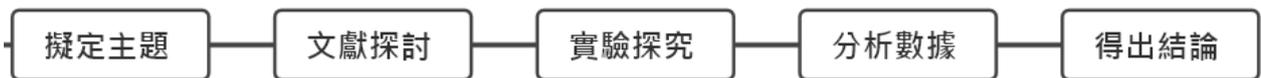


圖 4、實驗流程圖

二、研究原理

根據水土保持學會對土石流之定義,土石流為泥、砂、礫及巨石等物質與水之混合物,受重力作用後所產生的流動體。台灣的土石流大多於豪雨期間發生在山坡地或山谷之中。而連續雨量達 $60mm$,不論長、短時間降雨皆具有使土石流發生之危險性。

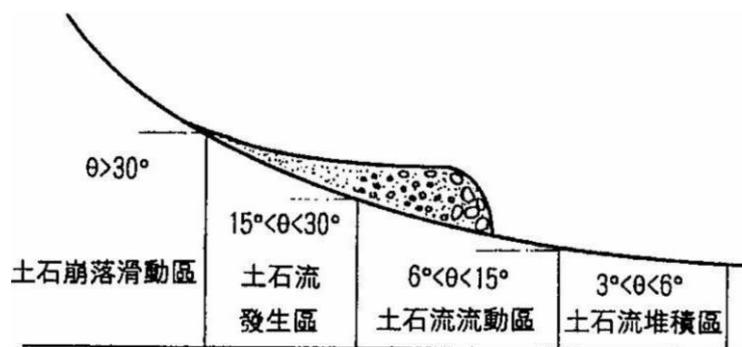


圖 5、土石流發生過程坡度示意圖

三、名詞定義

(一)安息角：

安息角又稱為休止角、止息角，是物體開始滑落的傾斜角度，此安息角所牽涉到的變因有土質、顆粒大小、重量、底板材質、土的密度、形狀、含水量等變因，要同時控制許多變因是我們的一大挑戰，且我們也要確認數據是否符合土石流發生時的因素；另外，測量安息角的方式有排出法、落下堆積法、注入法以及傾斜法。

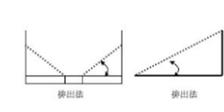
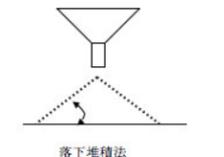
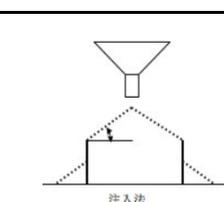
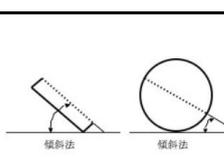
	示意圖	優點	缺點	不適用於
排出法		適合粉體砂石	需要找到透明容器且可以打洞	大顆粒土種
落下堆積法		適合粉體砂石，且有兩側可測量	如果土堆不平整，將無法準確測量	大顆粒土種
注入法		適合粉體砂石，且有四個測量點可測量	如果土堆不平整，將無法準確測量，但因有四個測量點，誤差較小	大顆粒土種
傾斜法		適合大顆粒土種，可固定放置時形狀	使用小顆粒砂石測量將無法固定其形狀造成誤差	過於鬆散而無法固定形狀的砂

表 2、測量安息角方法

(二)崩落角：

崩落角是指土或砂石，在到達一定角度之後，產生滑落或坍塌的現象，此角稱為崩落角，影響崩落角的變因有：重心位置、砂石重量、摩擦力、水分等，崩落角容易與安息角產生誤會，安息角是使土自然滑落並與水平間的夾角。而崩落角則是抬升斜面，使土或砂石滑落之角度。

(三)含水量測量方法：

在燒杯內裝入**250g**的土，加入少許的水，直到土全吸滿水，不能再吸水時，將上方多餘的水倒掉，測量土加上水的重量，將土體加水的重量減去土的重量就是土所吸掉水的重量，稱含水量，而含水量除以原本的土質量就是每**100g**的土可含的水量。

$$\text{含水量} = \frac{(\text{土重} + \text{水重}) - \text{原來土重}}{\text{土的重量}}$$

四、實驗方法

(一)測崩落角實驗：

取定量的土，到在板子中間的圓錐狀模型裡	轉動輪軸，抬升版子，直到土坍塌或滑落	觀察並紀錄此角度
		

表 3、測崩落角實驗

(二)測量安息角：

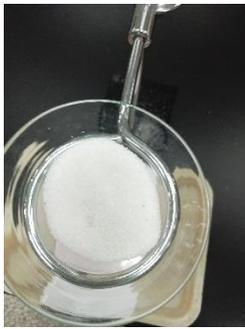
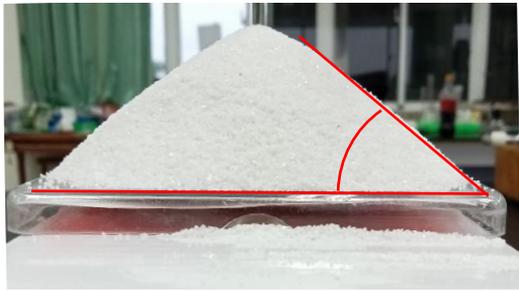
漏斗固定於一高度	砂土倒入	自然落下堆積、測量角度
		

表 4、測量安息角

(三)粒徑大小：

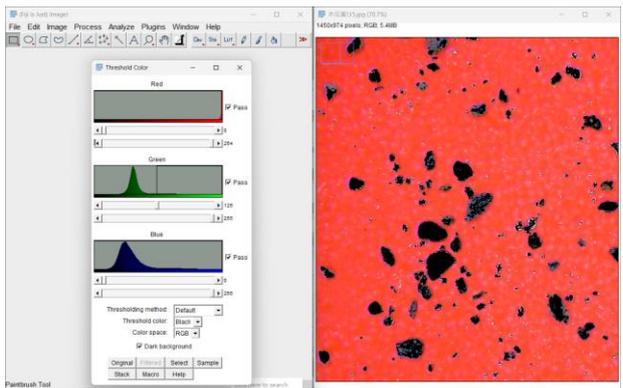
解剖顯微鏡拍攝砂土	Image J 計算粒徑大小
	

表 5、測量粒徑大小

(四)沖刷實驗：

<p>取一百公克的土，使其自然堆積，再將板子提升至 20 度</p>	<p>用滴管將漏斗堵住，拔開滴管，使水流下沖刷土堆</p>	<p>觀察並紀錄流到盤子裡砂和水的重量</p>
		

表 6、沖刷實驗

(五)含水量計算：

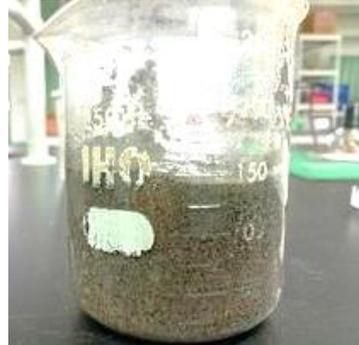
<p>取250g的土，加水，直到土無法再吸收</p>	<p>倒掉水測量其重量，再減去原本250g的土重，得出含水量，再除上原本的土重，得出含水土度。</p>
	

表 7、含水量計算

(六)、木瓜溪砂沖刷實驗：

<p>將板子調到固定角度</p>	<p>在板子上倒土，並將水倒入上方牛奶盒內</p>	<p>觀察與紀錄被土堆沖刷狀況</p>
		 <p>此為攝影機</p>

表 8、木瓜溪砂沖刷實驗

伍、研究結果與討論

實驗 1：不同重量的培養土與崩落角關係之探討

一、實驗步驟

(一)取10g的培養土，倒在板子上圓柱形模型內，進行塑型，塑型好後把模型拿掉。

(二)緩慢轉動輪軸抬升斜面，直到培養土滑落或坍塌，再測量壓克力板與底板的角度(崩落角)。

(三)改變土的質量，每次增加10g，重複步驟(一)、(二)。

二、實驗結果

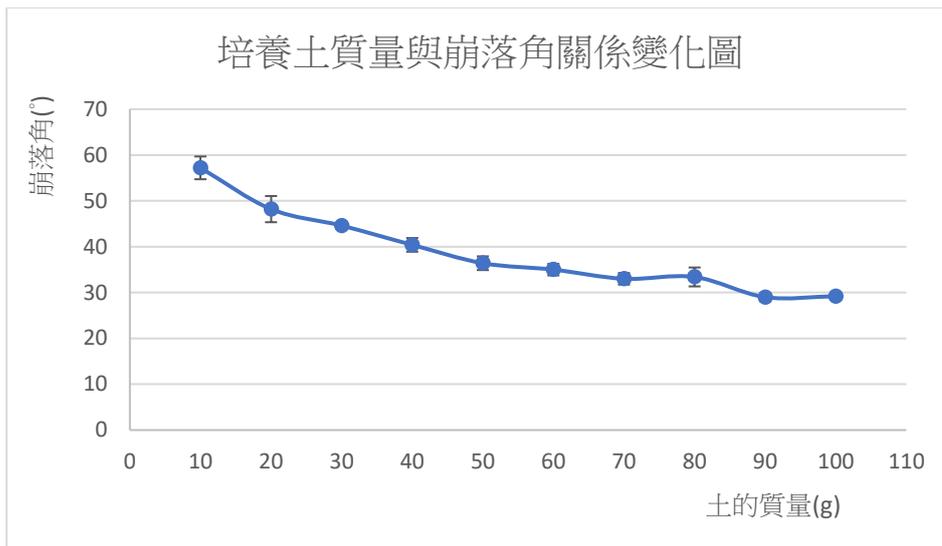


圖 6、培養土質量與崩落角關係圖

土的質量(g)	角度(°)	標準差	崩落方式
10	57.2	2.48	滑落
20	48.2	2.86	滑落
30	44.6	0.49	滑落
40	40.4	1.50	滑落
50	36.4	1.50	滑落
60	35	1.26	滑落
70	33	1.26	崩落
80	33.4	2.06	崩落
90	29	0.89	崩落
100	29.2	0.75	崩落

表 9、不同培養土質量與崩落角及崩落方式

(一)大致上土崩落角隨著土堆變重而變小，只有80g及100g的角度比起前一組有些微上升，但是90g~100g時趨近平緩，大約趨近 29 度。

(二)當培養土達到70g時，此時土高度約3.5cm，觀察發現土的上半部會先坍塌，且隨著重量增加此現象越明顯，初步推測與重心有關。

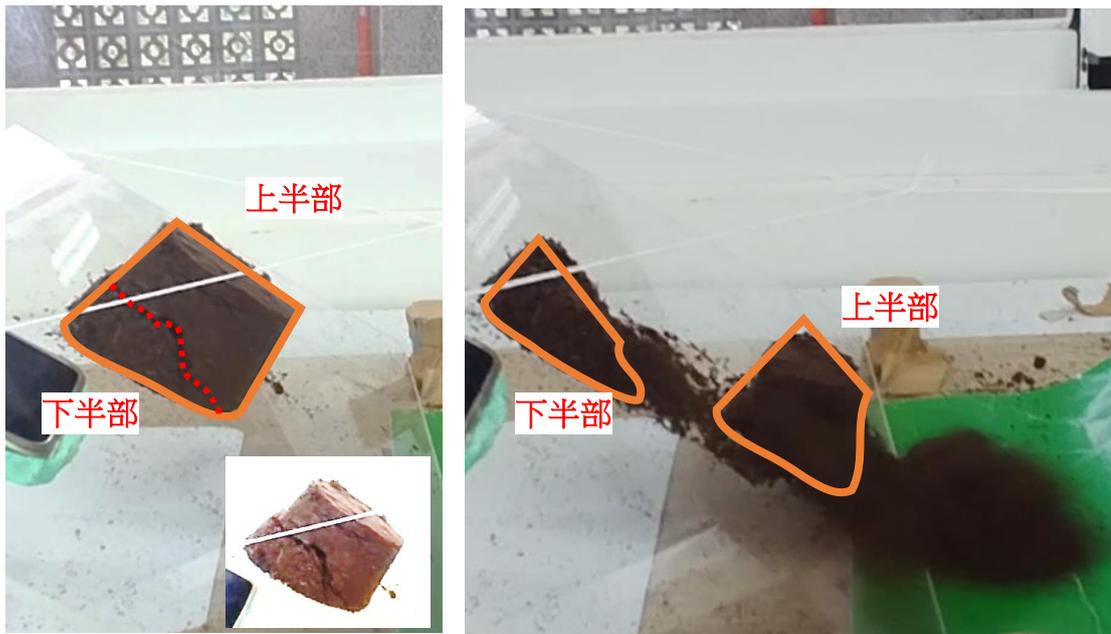


圖 7、圖 8、土堆上半部先坍塌過程示意圖

三、分析討論

(一)培養土重量越大，崩落的角度越小，在觀察實驗時發現，70g(厚度3.5cm)時，土才開始出現坍塌的現象，上部會先坍塌，底部才接著滑落，由此我們推測重心可能也是變因之一，且可能進而影響實驗結果，造成重量為80g和100g反而有微量的增加崩落角度，造成此結果可能是因為重心增高導致土上半部坍塌，而拉動下半部一起滑落，且每一次坍塌的位置不同，影響到實驗數據。

(二)原本認為滑落時的角度為安息角，但與定義不同，故改稱此角度為「崩落角」。

(三)土質量在0~70g間，滑落為整塊下滑，代表土塊與壓克力板間摩擦力不能支撐土重，而滑落。

(四)70~100g間，在滑落前就崩落了，在接近崩落時可以看到上下部土塊有分離狀況，如【圖 7】，接著上半部滑落，下半部仍停在原位，表示在崩落當下壓克力間摩擦力仍足夠支持不下滑，但上半部土塊因傾斜的關係，力矩導致土塊崩成兩部分。



圖 9：重心示意圖(底下紅點處表示為上半部土塊重心位置)

- (五)設計以重心位置為操作變因，但在改變重心位置同時也會改變到土的形狀，我們最初使用模具為圓柱形，改變重心位置需把形狀更改成圓錐或倒三角錐的形狀，但培養土較為鬆散，無法達到理想的形狀，最後下個實驗改成改變底面積大小，但固定重心位置，變動不同底面積再跟此實驗比較與判斷。
- (六)之後在實驗二結果中發現，重量不是崩落角的主要變因，因此造成此實驗結果的變因，有可能就是因為重心影響。

實驗 2：不同底面積的培養土與崩落角間關係之探討

一、實驗步驟

- (一)以正方形模具，改變底面積大小 $8 \times 8\text{cm}^2$ 、 $10 \times 10\text{cm}^2$ 、 $12 \times 12\text{cm}^2$ 、 $15 \times 15\text{cm}^2$ ，培養土填滿模具塑型，固定厚度 5cm 。
- (二)重心(土堆位置正中間)不變，而改變底面積的狀況下，以抬升斜面進行實驗，直到土整塊滑落，並記錄觀察崩落角的變化。

二、實驗結果

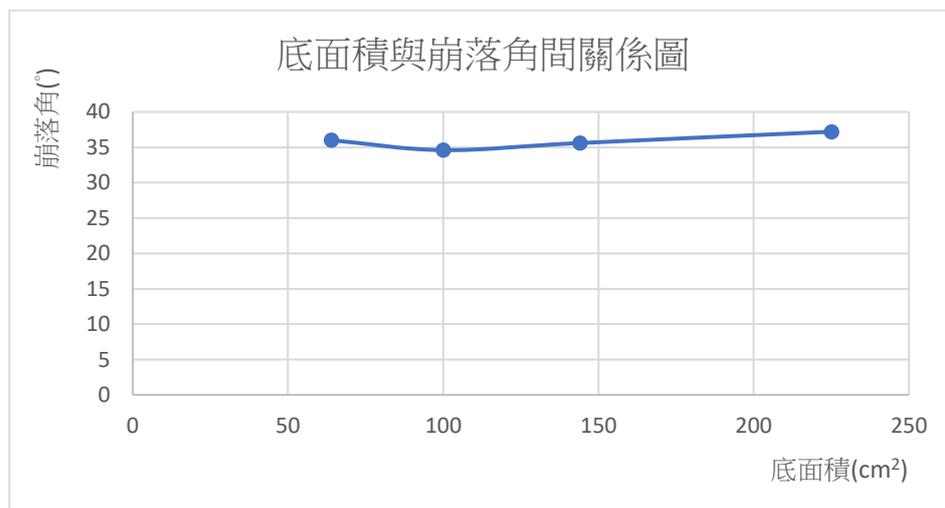


圖 11、底面積與崩落角關係圖

土質量(g)	底面積(cm^2)	崩落角($^\circ$)
142.6	64	36
166.1	100	34.6
268.2	144	35.6
363.1	225	37.2

表 11、不同底面積的培養土重量及崩落角變化

- (一)實驗結果顯示四種不同底面積之角度差距微小
- (二)底面積不是主要變因，但也無法推論重心是否為變因之一。

三、分析討論

- (一)實驗一中， $100g$ 不加水的培養土底面積約為 63.6cm^2 ，重心高度約在 2cm 處。當角度在 33 度時，上方的土堆會發生崩塌的現象。而為了改變重心，我們必須要採用圓錐狀或是倒圓錐狀的形狀做實驗，但是倒圓錐狀的土無法立起來，所以操作變因才改成底面積。但結果顯示底面積不明顯影響安息角，無法確定重心是否為主要變因。我們還發現，在我們改變底面積大小時，也改變了重量，所以我們發現重量並非變因。

- (二)接著實驗使用雪白細砂（粒徑 5mm ），以同樣步驟測量其在底面積 $8 \times 8\text{cm}^2$ 的狀態下以抬升板子的方法測試，但將模具拿起後卻無法固定形狀，反而坍塌，我們發現造成這個現象的原因也與安息角有關，因雪白細砂安息角小於 90 度所以無法將砂堆保持直立狀態，而此坍塌的角度是雪白細砂的安息角。
- (三)然而我們先前測量的培養土堆卻可以在模具拿起後仍然保持直立，也就代表培養土之安息角非常有可能大於 70 度或甚至更多，那在實驗一及實驗二所探討將不是培養土的正確安息角，而是培養土在不同重量及水量因為重心過高，導致土本身滑落的結果。

實驗 3 – 1：不同含水量的培養土與崩落角間關係之探討

一、實驗步驟

- (一)承實驗一的自製裝置設置，取100g的培養土加入5ml的水混和攪拌後，倒至板子上的圓形模型塑型。
- (二)緩慢轉動輪軸，抬升板子直到培養土滑落或坍塌，再測量培養土的崩落角。
- (三)改變加水的量，10ml、15ml、20ml，重複實驗步驟(一)(二)。

二、實驗結果

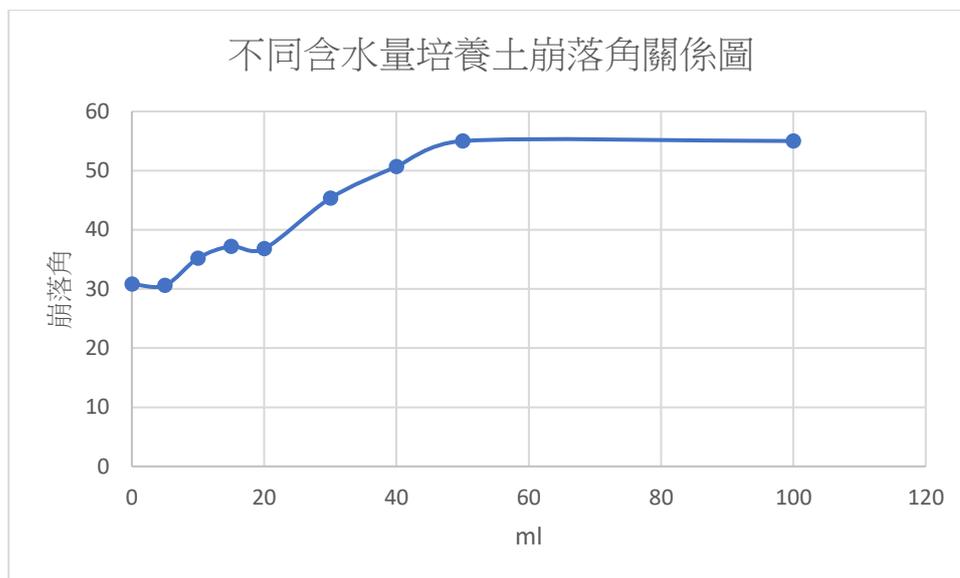


圖 12、不同含水量培養土的崩落角變化圖

水量(ml)	角度(°)	總重量(g)
0	30.8	100
5	30.6	105
10	35.2	110
15	37.2	115
20	36.8	120
30	45.3	130
40	50.7	140
50	55	150
100	55	200

表 12、不同含水量培養土的崩落角

- (一)崩落角角度隨培養土含水量增加遞增，因培養土含水未達飽和狀態的情況下，加越多水黏性越強，以至於崩落角越大。
- (二)加水後的崩落角在10ml~20ml變化幅度趨於平緩，但在30ml以後幅度又增加。
- (三)在觀察實驗時，土是整塊滑落，並不是實驗一的分段坍塌，崩落角度也就不一樣。

三、分析討論

- (一)在實驗前我們預先進行了測試實驗，將100g培養土放在底板上後，再滴入50ml水，測出結果崩落角大於90度，與我們此實驗結果差很多，於是我們探究原因。
- (二)發現原因有可能是因為我們使用滴水的方式，造成水分滲透集中在土接近底板的位置，造成此部分土黏性增加。
- (三)我們測得100g土堆的厚度是5cm，崩落角隨著含水量上升，造成土滑落困難，所有可能是水使土黏性增加，以水越多土滑落的方式更接近是整塊滑落而非實驗一不加水的坍塌。

實驗3-2：不同含水量的雪白細砂與崩落角度間關係之探討

一、實驗步驟

- (一)承實驗一的裝置設置，取雪白細砂100g加水混和攪拌，並用圓柱形模型塑型。
- (二)轉動輪軸抬起斜面直到雪白細砂全部滑下，以 phyphox 軟體測量不同水量雪白細砂之崩落角。
- (三)改變加水的量，5ml、10ml、15ml、25ml，重複實驗步驟(一)(二)。

二、實驗結果

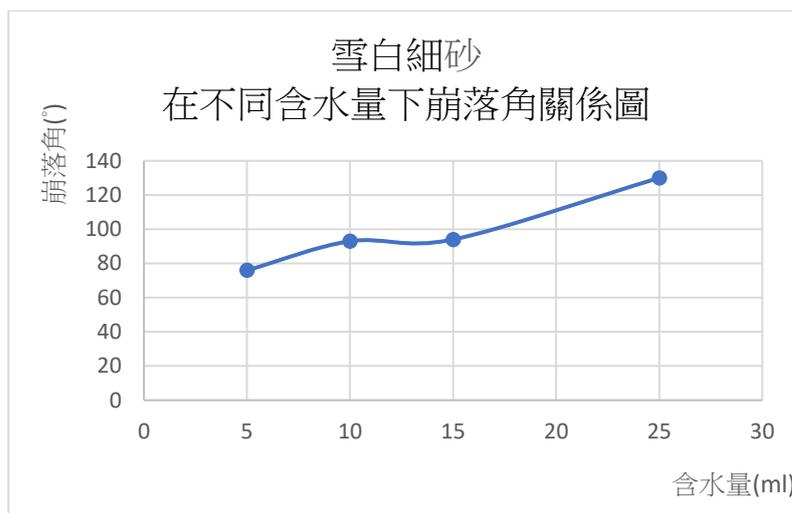


圖 13、雪白細砂在不同含水量下的崩落角變化圖

水量 (ml)	崩落角 角度(°)
5	76
10	93
15	94
25	130

表 13、崩落角數據

- (一)隨著含水量的增加，角度就越來越大，猜測是因為含水量越多時，砂子間的黏性會增加，砂子與斜面間的黏性也增加。
- (二)越接近飽和雪白細砂崩落角就越大，但可以推測出只要一達飽和，崩落角就會變小。

三、分析討論

- (一)我們測得雪白細砂在100g時厚度約為0.9cm，因為雪白細砂在不加水，也就是0ml水時，拿掉模型之後，砂子就無法跟模型的樣子一樣成圓錐狀，所以實驗從加入5ml開始做。
- (二)而我們也得知100g雪白細砂可吸收的最多水量在28ml~30ml之間，於是我們在此實驗中，我們嘗試了接近飽和水量的數據，結果顯示角度已大於130度仍沒有滑落，造成這樣結果的原因很有可能是因為水增加了砂子的黏性，以至於砂子在接近飽和的時候崩落角 >130 度。
- (三)但我們還可以推測，在超過飽和水量之後，多餘的水會滲透到底板與砂子之間，造成摩擦力減少，進一步造成崩落角變小。

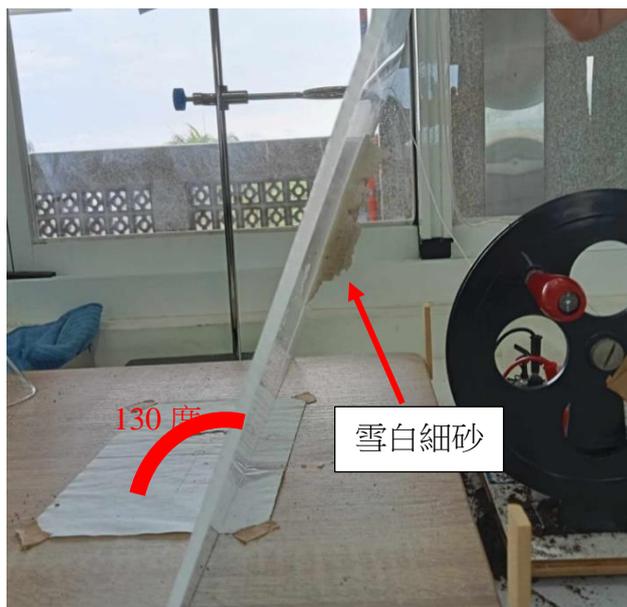


圖 14、雪白細砂加水後崩落角超過 130 度

實驗 4：不同砂的安息角之探究

一、實驗步驟

- (一) 利用自製裝置，將不同砂子倒入漏斗，使砂土自然落下，形成砂堆
- (二) 以落下堆積法測量不同砂子（不同粒徑大小）與安息角之關係

二、實驗結果

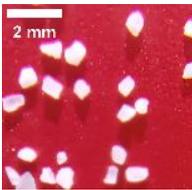
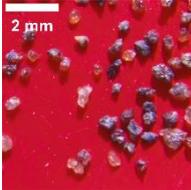
砂子種類	雪白細砂	熱帶雨林砂	美國細砂	黃金角砂	木瓜溪砂
(粒徑大小)	(0.5~0.8mm)	(0.4~0.7mm)	(2~3mm)	(2~8mm)	(0.1~0.3mm)
安息角(°)	31.9	35.5	34.2	40.0	39.5
不同砂子 安息角					
粒徑大小 圖					

表 14、各種砂子安息角以及樣子示意圖

三、分析討論

- (一) 發現安息角隨著粒徑大小增加而減少，有可能是因為砂石間空隙較大，砂石之間的接觸面積較小，造成摩擦力較小，導致安息角較小。另外，因注入法測量時所注入時的重量不影響角度，當土越多時，砂土就從旁邊滑落，並不會堆積於上方或使角度增加，所以我們在此不固定倒下的重量。
- (二) 安息角會影響砂土在斜面上停留的最大角度，可供後續實驗基礎。

實驗 5：不同種類的砂在不同水量沖刷後破壞狀況之探究

一、實驗步驟

- (一)首先在平面上倒入100g的砂土，使其自然堆積，再將平面傾斜 20 度。
- (二)用滴管堵住漏斗口，並置於土堆上方，將沖刷的60ml水倒入漏斗後再將滴管拔起，水沿漏斗流下沖刷土堆，觀察並測量土滑落后盛裝在底下的盤子裡的水量、砂量。
- (三)改加入沖刷水量為70ml、80ml、90ml、100ml，重複步驟(二)。
- (四)換用其他種類的土砂，重複步驟(二)(三)，以同樣的條件測量水量並比較不同土砂的差異。

二、實驗結果

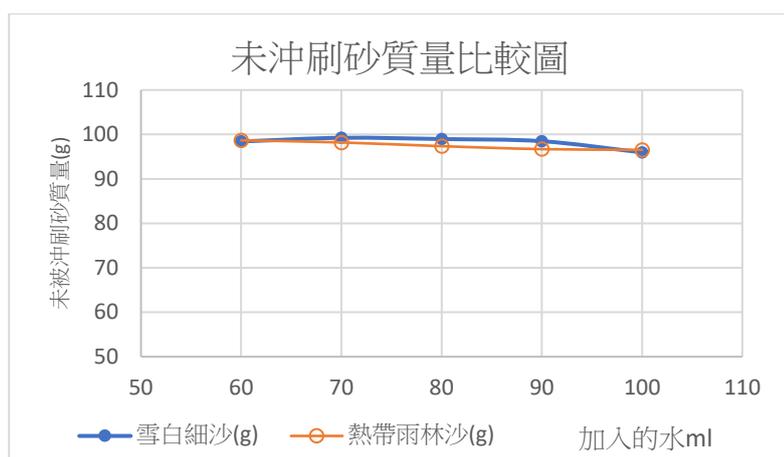


圖 15、兩種砂在不同水量未沖刷砂關係圖

水量 (ml)	未沖落砂(g)	
	雪白細砂	熱帶雨林砂
60	98.42	98.68
70	99.24	98.20
80	98.96	97.36
90	98.48	96.7
100	95.96	96.54

表 15、未沖刷砂質量

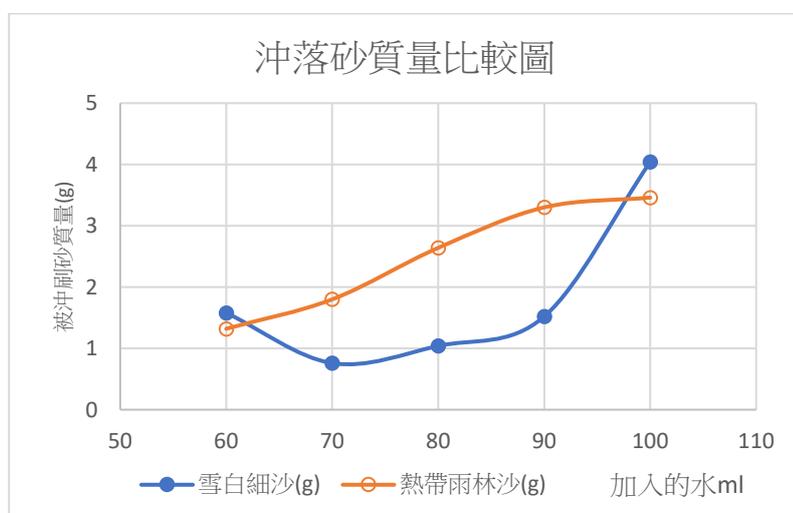


圖 16、兩種砂在不同水量沖落砂關係圖

水量 (ml)	沖落砂(g)	
	雪白細砂	熱帶雨林砂
60	1.58	1.32
70	0.76	1.80
80	1.04	2.64
90	1.52	3.3
100	4.04	3.46

表 16、沖落砂質量

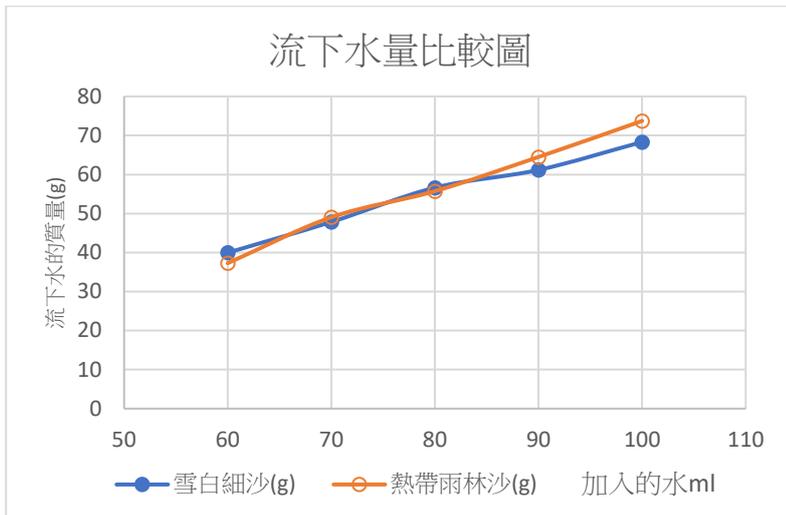


圖 17、兩種砂在不同水量流下水關係圖

水量 (ml)	滯留水(g)	
	雪白細砂	熱帶雨林砂
60	20.04	22.72
70	22.16	20.96
80	23.36	24.26
90	28.82	25.5
100	31.66	26.26

表 17、兩種砂在不同水量流下水

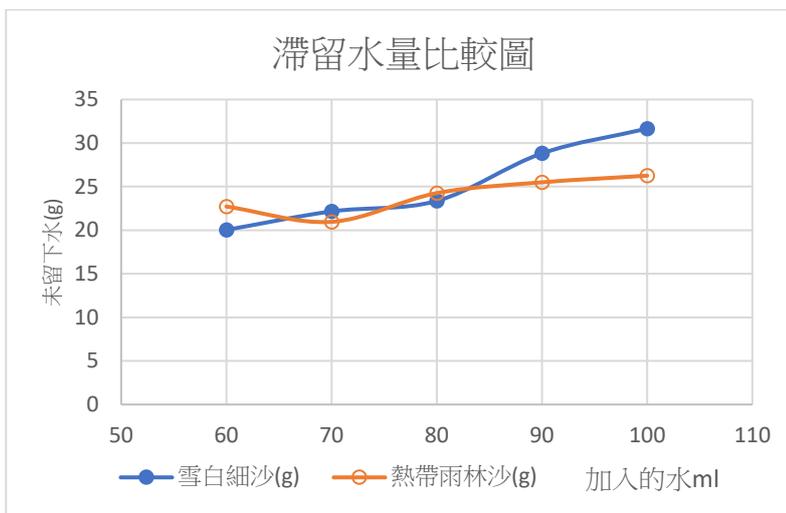


圖 18、兩種砂在不同水量滯留水關係圖

水量 (ml)	流下水(g)	
	雪白細砂	熱帶雨林砂
60	39.96	37.28
70	47.84	49.04
80	56.64	55.74
90	61.18	64.5
100	68.34	73.74

表 18、兩種砂在不同水量滯留水

(一) 雪白細砂：

- 1.剩下的雪白細砂(未沖刷砂)大致隨著沖刷水量增加些微減少，只有60ml時，未被沖刷的雪白細砂較少，造成以上的規律是因為水量多衝擊時間會較長，流速快衝擊力會較大，導致砂子隨著水被沖刷並滑落。
- 2.流下來的雪白細砂(沖落砂)也隨著放入水量而遞增，造成結果也與流速、衝擊時間有關。
- 3.流下來的水量(流下水)隨著放入水量遞增，造成此結果可能是因為雪白細砂在固定流速及水量的狀況下，其所能吸收的水量是固定。
- 4.雪白細砂的吸水量隨著放入的水量增加，可由此知道此雪白細砂可能還未到飽和狀態，可能是因水流速快，在沖刷水量較少(60~80ml)的狀況下、水快速由兩側流過，

導致砂子來不及攔截吸收流過的水，而導致實驗結果測出的水量小於雪白細砂飽和水量，所以雪白細砂所吸收的水(滯留水)的水量小於雪白細砂飽和水量(28ml)。

(二)未沖刷砂質量：雪白細砂大部分比熱帶雨林砂大

(三)沖落砂質量：雪白細砂大部分比熱帶雨林砂大

(四)流下水量：兩種砂子的數據差距不大

(五)滯留水量：在倒下60ml~80ml的水時差距不大，但90ml~100ml雪白細砂比熱帶雨林砂大。

三、分析討論

(一)未沖刷砂數量越多，沖落數量就越少，原因可能和衝擊力及沖刷時間有關，水越多，其衝擊力越大、沖刷時間越長，被沖刷的砂子也就越多。在加入50ml時，流速為27.8ml/s，在加入100ml時，流速為31.25ml/s。

(二)而流下水以及滯留水都是隨著倒入的水量上升，100g雪白細砂能吸收的飽和水量(28ml~30ml)固定，但在此實驗中沙子的吸水量卻不固定，有可能是因為水流速過快，導致砂子來不及吸收多餘水分，造成外圍砂子吸水，但中心砂未吸到水。

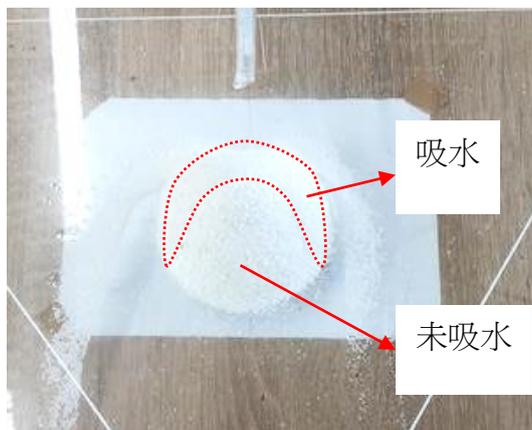


圖 19、雪白細砂在100ml水沖刷結果

(三)兩砂沖刷結果大致相同。

實驗 6：不同角度時木瓜溪砂下滑之狀況

一、實驗步驟

- (一)將斜面調整到 5 度。
- (二)在距離板子頂端20cm處倒入250g的土。
- (三)由土堆上方戳洞的牛奶盒加入500ml的水，進行滴水，並偵測流速。
- (四)最後觀察土滑落的多寡。
- (五)改變角度 10、15、20、25 度，重覆步驟二～四。

二、實驗結果

牛奶盒流速:在 0 到 10 秒時,平均流速為 8.3ml/s 。60 到 70 秒時平均流速為 6.3ml/s 。90 到 100 秒時,平均流速為 3.5ml/s 。110 到 120 秒時,平均流速為 1.3ml/s 。而大約在 40 秒會流掉一半的水。

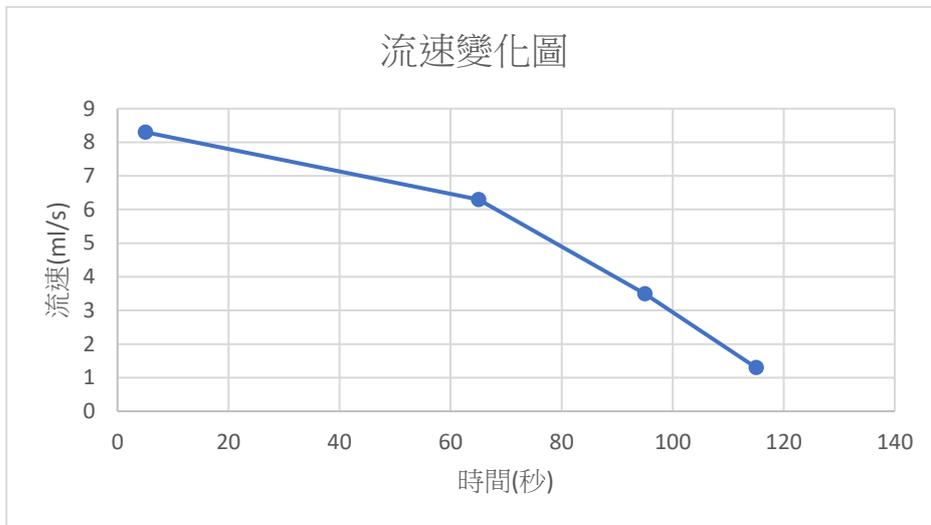


圖 20、木板上方容器流速變化圖



徑流水
此為水從土堆中間的
徑流水畫面

圖 21、土堆中間發生徑流水示意圖

- 5 度：斜面角度為 5 度時，土是最快吸滿水的，但是吸滿了，卻沒有下滑，推測是角度不夠，所以大部分的土是由周圍的土被沖刷掉，但量不多，也是推測因為角度不夠，水才無法將大部分的土帶走。
- 10 度：斜面角度為 10 度時，土吸滿水的速度較 5 度時慢，但也是沒有下滑，徑流水從土堆中間緩緩流出，但流出來的水較 5 度時多，最多還是從兩側流掉，被沖刷掉的土也比 5 度時多，也是推測因為角度不夠高所以水才無法將大部分的土帶走。
- 15 度：斜面角度為 15 度時，土吸滿水的速度比 5 度和 10 度時慢，吸滿之後土堆中間徑流水慢慢地流出來，但是量也不大，水都往兩側沖走，所以主要還是兩側被沖刷掉的土最多，因為土堆還沒下滑，所以推測是角度還不夠大，土的大部分才無法被沖刷掉。
- 20 度：斜面角度為 20 度時，土吸滿水的速度比之前的慢，但是吸滿之後，徑流水並沒有從中間出來，因為土直接向下滑落，只剩下一點點的土殘留於板子上，推測更高的角度土一樣會下滑，但是從開始到下滑的時間會較多。
- 25 度：斜面角度為 25 度時，土倒下去時就為長條狀，面積比之前還大，但高度較矮，土在還沒吸滿水就開始下滑，還沒吸滿水的部分，被其他吸滿水的土往下推後，直到固定在一處，大約十秒之後，也吸滿了水，才開始下滑，這次殘留於板子上的土較 20 度時少，從開始到下滑時用的時間卻比 20 度十久，推測是因為在 25 度時旁邊的土被水沖刷最嚴重，水在板上流速也較快，導致中間的土沒有吸到水，下滑時間也就多了 6 秒。

斜面角度	土堆下滑時間	砂土流下的情形	土堆中間是否有徑流水	吸飽水時間
5 度	X	左右兩邊被沖刷掉	否	30 秒
10 度	X	左右兩邊被沖刷掉	是	55 秒
15 度	X	左右兩邊被沖刷掉	是	62 秒
20 度	63 秒	土堆原本的結構幾不變，與水一起滑落	徑流水和砂土一起滑落	63 秒
25 度	69 秒	土堆原本的結構幾不變，與水一起滑落	徑流水和砂土一起滑落	81 秒

表 19、木瓜溪砂在不同角度被沖刷狀況比較表

三、分析討論

牛奶盒測量流速的方法是用漏斗在下方接水，使水流入量筒中，取 10 秒看有幾毫升(ml)，再除以 10，算出平均流速。因為前期和後期的流速會不一樣，所以要分時段測量。(計算方式為ml/s)

- (一)實驗中可觀察到兩柱沖刷方式：(1)從兩側沖刷水砂比高；(2)水土一起滑落，水砂比低。
- (二)從實驗中可觀察到下滑的角度要大於 15 度，小於 15 度都是吸飽水，卻沒有下滑，只有周圍被沖刷掉，而 10 和 15 度時，有徑流水，20 和 25 度沒有的原因是因為土堆在吸飽水後，直接開始下滑，而沒有明顯的徑流水的產生。可推知，下滑的條件為：(1)土堆含水量到達飽和；(2)傾斜角須達到 20°。
- (三)土堆吸飽水的時間隨著角度的提升而變久，是因為水在板子上的流速越快，導致土堆無法吸收大部分的水。由 20 和 25 度的實驗中可觀察出，在足夠的角度和一定的水量下，土堆大部分就可以被沖刷掉。

之後猜想顆粒的大小或含水量是否會為變因之一，因為在高角度時，土堆都是吸飽水後才開始下滑，所以下個實驗中做了含水度測量以及不同含水量的崩落角之探討。

實驗 7 - 1：木瓜溪砂加入不同水量時崩落角變化之探討

一、實驗步驟

- (一)測量木瓜溪砂的粒徑大小
- (二)測量木瓜溪砂的含水量
- (三)手機開啟 phyphox 軟體，固定於【裝置二】木瓜溪砂沖刷實驗板上，將250g的木瓜溪砂加入不同水量(0ml、5ml、10ml、15ml、20ml、25ml)再倒在板子上
- (四) 緩慢抬升板子，直到砂土滑落
- (五) 觀察並記錄此角度，且做成圖表加以分析

二、實驗結果



圖 22、木瓜溪砂加上水倒出來畫面示意圖

(一)木瓜溪砂含水量：

我們的方法是取250g的木瓜溪砂裝入燒杯內，從上方持續加水，直到土無法再吸水，也就是土上方會覆蓋一層水，將多餘的水倒掉，就是土加上水的重量，再減去原本250g的土重，就是250g的土可以吸收的水量。

乾土 (g)	土+水 (g)	倒掉水 (g)	含水量 (g)	含水量 (ml/100g土)
250	321.5	303.7	53.5	21.48
250	320.1	300.1	50.1	20.04
250	396.4	301.2	51.2	20.48
250	406.9	299.3	49.3	19.72
250	414.4	302	52	20.80
			51.22	20.50

表 20、木瓜溪砂含水量計算

(二)木瓜溪沙粒徑大小：

我們取 400 顆沙子，以顯微鏡拍照，並用 ImageJ 算出粒徑大小。經測量後，一粒的木瓜溪沙平均面積約為 0.06mm^2 ，粒徑約為 0.24mm ，粒徑 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ 占了40%， $0.2\sim 0.3\text{mm}$ 占了22%。

(三)加入不同水量時木瓜溪砂崩落角的變化：

水量(ml)\崩落角	0	5	10	15	20	25
平均	28.18	33.3	37.62	40.18	42.9	44.76
標準差	0.22	0.27	0.26	0.28	0.34	0.21

表 20、木瓜溪砂加入不同水量時崩落角

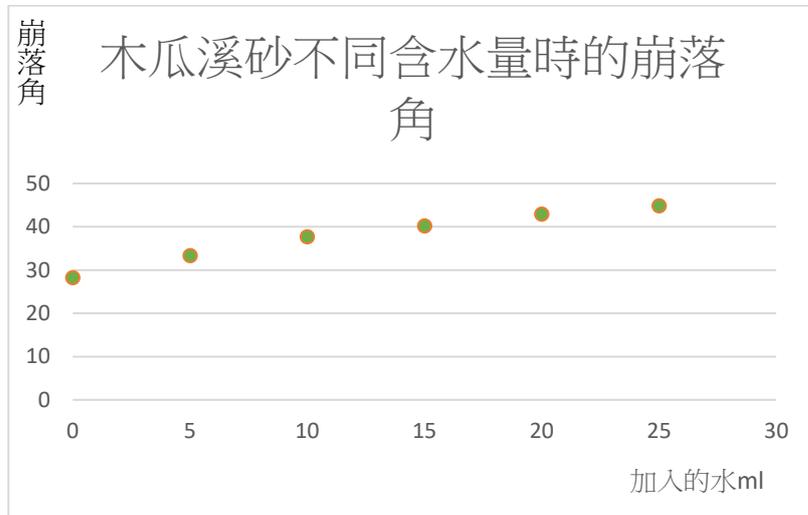


圖 23、木瓜溪砂不同含水量時崩落角

(三)砂土的含水量約為52ml。

(四)水越多黏性越高，角度也就越多。

三、分析討論

崩落角隨著加入越多水量，而明顯提升，但到後面差距就變得比較小了，和之前加水的雪白細沙【實驗 3-1】相比，都是加入越多水，角度越高，不過雪白細沙在10ml時，角度就超過 90 度，木瓜溪砂卻沒有，有可能是受土性質影響。

實驗 7 - 2：緩慢將水滴入土堆發生徑流水與滑動觀察

一、實驗步驟

- (一)將板子固定在 20 度，再取250g的木瓜溪砂用漏斗倒在板子上
- (二)拿滴管滴水緩慢滴在砂堆上，在盡量不改變土形狀的狀態下滴入砂中
- (三)測量開始出現徑流水時加入的水量，之後再加入更多水量，並觀察其狀況。

二、實驗結果

- (一)加入75ml後開始有徑流水的產生，之後如果水一樣是慢慢滴入，則只會出現徑流水，代表砂土能短時間留住的水已經達到飽和，水：砂比為75:250。

(二)如果加快加水速度，則土堆會自己滑落，此時水：砂比為85:250，推測是水砂與斜面間摩擦力因水量增多而減少，造成滑落。

三、分析討論

(一)在沒有流速的時候，土堆就算在可以被沖刷掉的角度吸飽水後也不下滑，只有徑流水的產生，這證明說，除了角度要到達一定的高度以外還要有一定的含水量，之前測過木瓜溪砂含水量約為51ml/250g，代表約有25ml是正在砂中滲流的水，或因砂土形狀不同而保留在孔隙中，此時水：砂比為75:250。

陸、結論

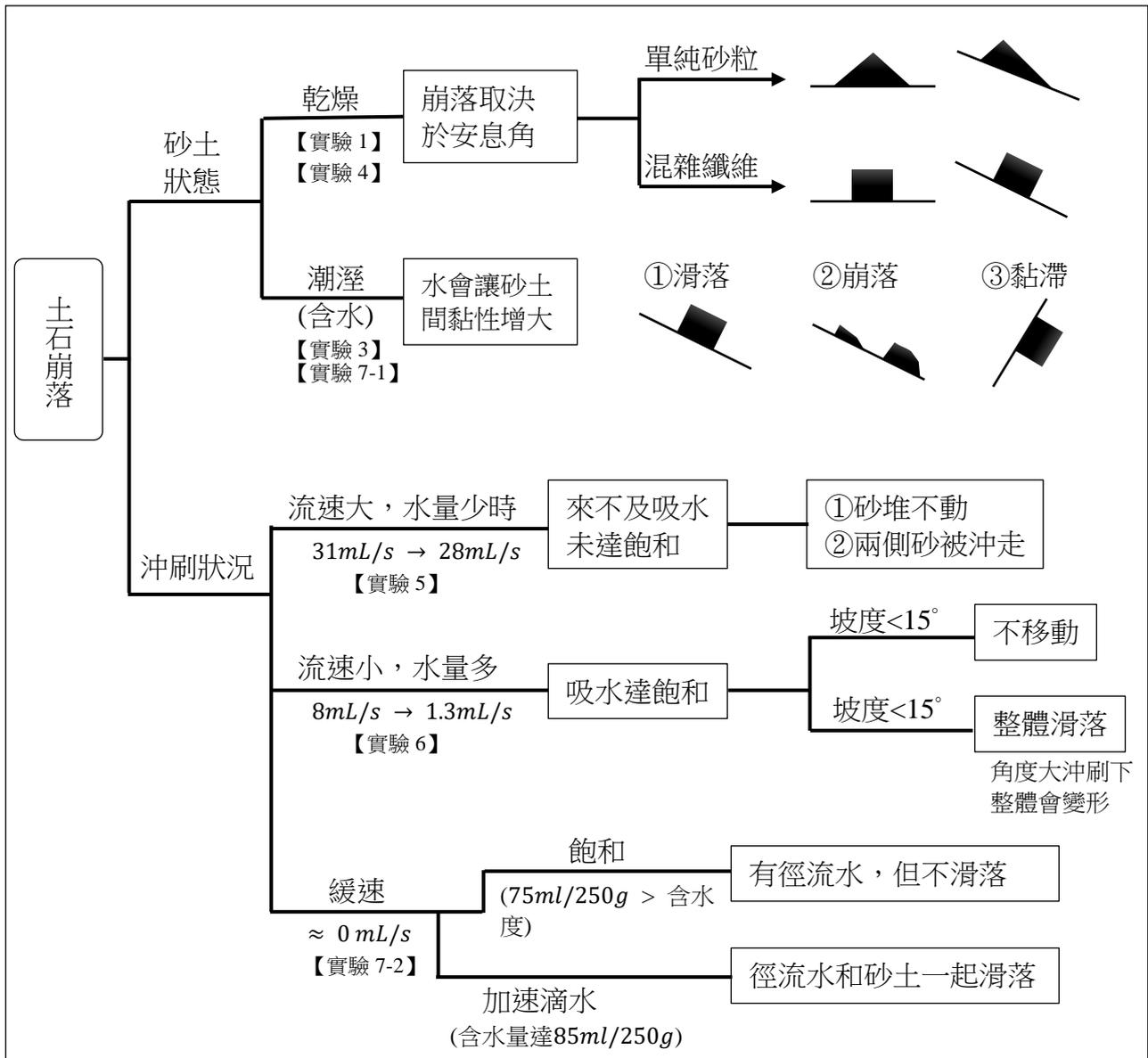


圖 24、實驗分析結論整理

- 一、崩落角主要受到重心以及水分的影響，重心越高崩落角越低，水分越多崩落角越高。重心在超過土能負荷的瞬間，使土崩落，水分則增加土的黏性，提高崩落角。
- 二、底面積及重量不是影響崩落角的主要變因。
- 三、培養土在不加水 70 度時，高度達到 3.5cm，崩落時土堆會坍塌。培養土在加水時，重心不管多高，崩落時都整塊滑落，不會坍塌。
- 四、雪白細砂在含水量為 10ml 時，崩落角就超過 90 度，則在含 25ml 的水時，崩落角大於 130 度。

- 五、測量加水後崩落角實驗中，加水方式不同但加水量相同，也會影響實驗結果。使用先放置於板子上後再滴水的方式崩落角較大，使用先加水後將水分混和均勻後再放置於板子上的方式崩落角會較小。
- 六、粒徑大小不會影響安息角，而是形狀影響安息角較為明顯，砂子形狀越接近圓形，安息角越小。
- 七、水沖刷砂子時，流速（沖刷力）和水量（沖刷時間）不同，破壞力也就不同，未沖落砂、沖落砂、滯留水、流下水的量也就不同，流速越快、水量越多，流下水和沖落砂就越少，滯留水、未沖刷沙就越多，反之亦然。
- 八、在木瓜溪砂的沖刷實驗中，在抬升角度達到 20 度且水量達到100ml以上，木瓜溪砂會因為吸水量達到飽和，而被水沖刷，導致砂堆滑落。
- 九、在沒有流速的時候，即便板子抬升到木瓜溪砂可以滑落的角度，砂堆吸飽水後也不會下滑，只有徑流水產生，所以除了角度要抬升到一定的高度，還要有足夠的水量沖刷，砂堆才會滑落。
- 十、將實驗與土石崩落與土石流比照，大致上以坡度區分，可以分成幾個區域如下圖：
- ①在未含水的砂土狀態，若大於砂土的安息角，則會崩落至坡度較緩的位置，若土中含水，則會增加黏度，讓安息角加大。
 - ②在水與砂土混合的狀況下，當砂土吸飽了水，且坡度大於 20 度時，則有機會引起水與土石一起滑落，水量更多、流速更大則有可能角度小也有可能引起。

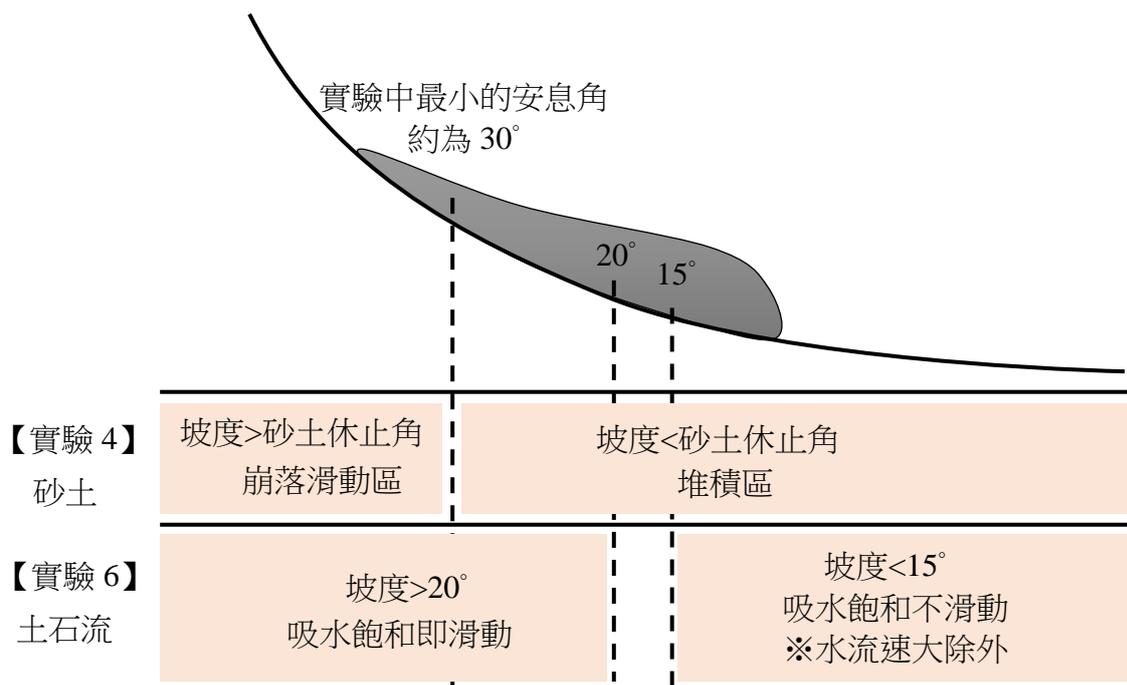


圖 25、發生砂土崩落、土石水流與坡度間關係圖

柒：參考文獻資料

- 一、日本株式會社。(n.d.)。安息角、崩潰角、差角。日本株式會社。
<https://www.eiseiken.co.jp/service/funtai/angle-repose.html>
- 二、牛牛。(2018, November 6)。建築設計重點筆記：重心愈高，穩定性愈差。
<https://episode.cc/read/kylie1121/my.180611.113755/0>
- 三、詹錢登。(2003, February)。豪雨造成的土石流。專題報導-洪水與土石流。
<https://ejournal.stpi.narl.org.tw/sd/download?source=9302/9302-02.pdf&vIId=5DB7DFA1-1CDD-4C99-9D6B-7B019D482D42&nd=0&ds=0>
- 四、陳瑞遠(2016)。不同水砂比及渠道坡度對沖積扇型態之影響〔未出版碩士論文〕。國立中央大學土木工程學系碩士論文。