

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 地球科學科

040508

震震有池？

震動能量.頻率與砂土性質對土壤液化的影響

學校名稱：國立鳳山高級中學

作者： 高二 陳宇翔 高二 王禹傑 高二 張家豪	指導老師： 陳國峯
---	------------------

關鍵詞：土壤液化、地震、地質

壹、摘要

大地震發生時，經常伴隨著土壤液化(soil liquefaction)的發生。土壤液化是在地震過程中，震動讓砂土重新排列、減小期間的空隙，使地下水被擠壓而出，導致水土混雜、呈現泥漿的狀態，造成建築物沉陷、傾斜，地表噴砂、噴泥等災情，改變土壤結構以及其所包含的一些成分，讓土質不穩定。

經實驗發現，當消防沙的體積為 5000 cm^3 時，發生土壤液化的臨界水量是 2000 cm^3 。土壤液化的出現，不同的砂土會有不同的最短發生時間，消防沙需要 20 秒，紅土需要 30 秒。其中各種砂土液化情形不同，消防沙出水現象較明顯；紅土液化後出水不明顯，呈現膠狀；培養土則較不容易、甚至是完全不會發生液化。希望後續的研究，可以找出防治土壤液化的方法。

貳、研究動機

上地球科學課時，老師曾經在課堂上播放了一個實驗影片：飽含水分的砂土在持續震盪下，在某個瞬間，沙土變成如同泥漿一樣，原本放在砂土上方的房屋模型就陷入泥漿當中，老師說這是土壤液化，當時我們覺得這個現象很有興趣，開始上網查詢有關的資料。資料顯示，大地震來臨時，許多嚴重的災害不全是因為震動而使房屋倒塌，而是土壤液化讓地基不穩所造成的，我們覺得這個現象很值得深入研究，於是在和老師討論後，開始設計實驗，並試著找出影響土壤液化的各種因素，最終希望可以發現防治此類災害的方法。

參、研究目的

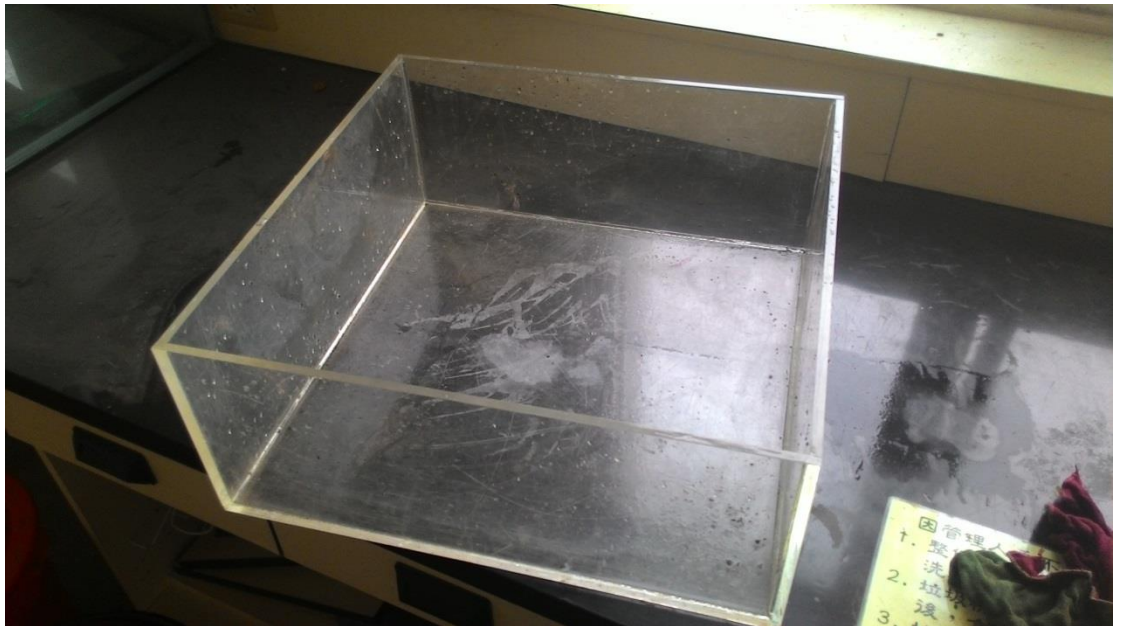
- 一、 找出固定砂土體積的條件下，發生土壤液化所需的臨界水量。
- 二、 探討以不同震動能量、相同頻率時，砂土發生土壤液化的時間長短及房屋下陷深度的大小。
- 三、 測量以不同震動頻率、相同能量下，砂土發生土壤液化的時間長短及房屋下陷深度的大小。
- 四、 比較以不同砂土在相同能量、頻率的震動下，土壤液化的時間長短及房屋下陷深度的大小。
- 五、 比較在相同震動能量、頻率和砂土的情況下，砂土上有房子和沒有房子時，土壤液化的情況與差異。

肆、實驗器材與設備

- 一、 1000ml 燒杯 2 個。
- 二、 80 x 80 x 80 cm³ 底座(上有 4 個彈簧)。



- 三、 50 x 50 x 50 cm³ 壓克力箱(無蓋)。



四、各 5000 cm³的消防沙、培養土、紅土。



五、 840.5g 模擬房屋一個



六、 1kg 重錘數個



七、 15cm 標準量尺一把

八、 0.2 X 0.2 cm² 孔徑篩網



伍、 研究過程與方法

- 一、 排除變因： 為了測試能量與液化程度的關係，因此我們固定了房屋重量、沙土的體積為 5000 cm^3 、水的體積 2000 cm^3 ，以及測試時間為 2 分鐘，還有重捶固定為 1 次丟 1kg，確保沙土能夠在固定時間吸收固定的能量。
- 二、 實驗方法：
 - 1、 將 5000 cm^3 的土及 2000 cm^3 的水倒入壓克力箱中。(如圖 1)
 - 2、 均勻攪拌使水能夠均勻分布在土的縫隙中。(如圖 2)
 - 3、 接著放上模擬房屋並確保它不會因為搖晃而發生位移導致實驗結果有偏差。(如圖 3)
 - 4、 將重捶分別依每 5 秒、10 秒、15 秒等不同的頻率丟入，持續 2 分鐘。
 - 5、 觀察土壤液化的情形和測量房屋下陷的深度。



圖 1

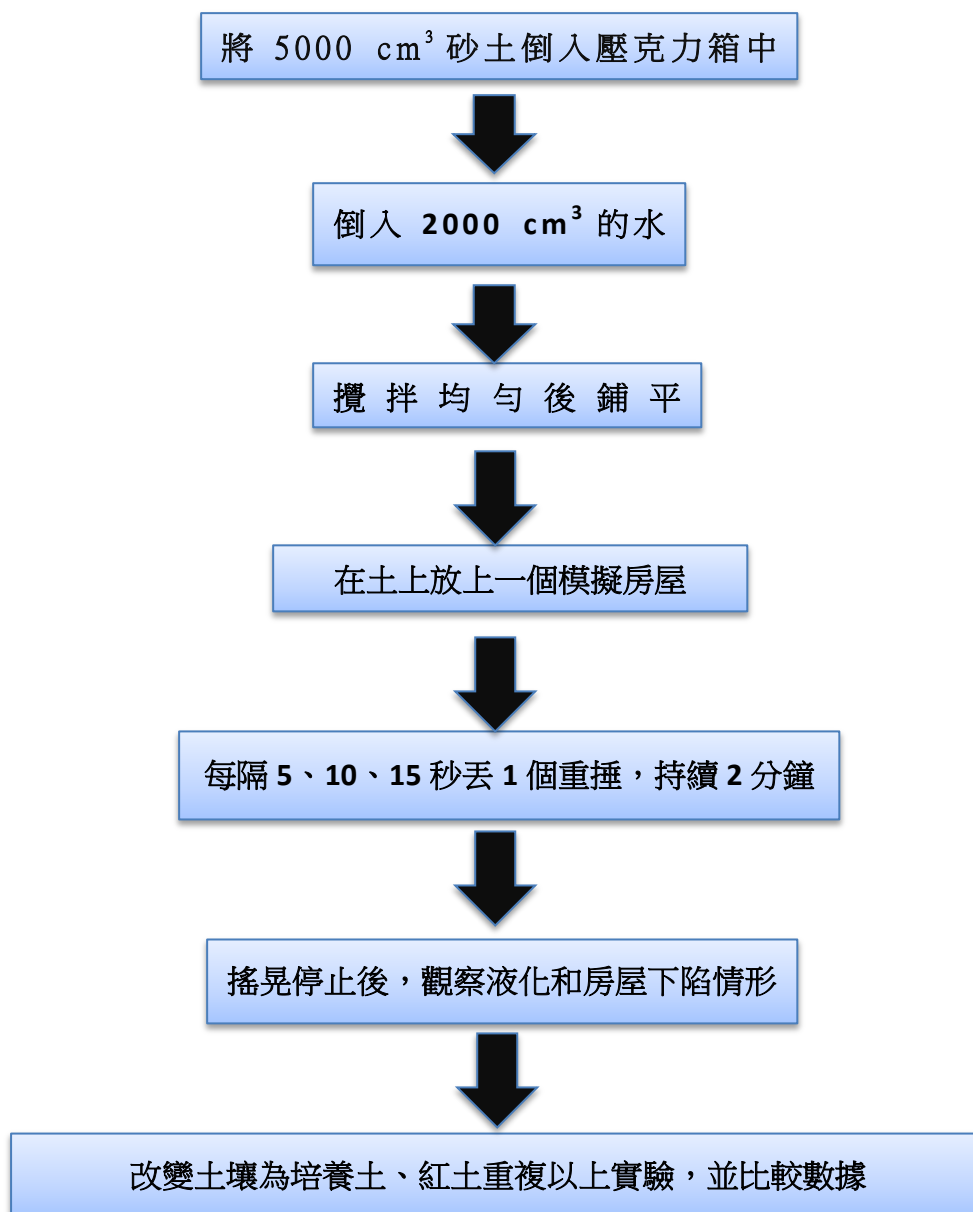


圖 2



圖 3

三、實驗流程圖



陸、研究結果分析

- 一、 由於我們不確定要多少的水+砂土才能造成土壤液化，因此我們先固定消防砂的體積為 5000 cm^3 ，加入 1000 cm^3 的水，不論我們怎麼搖晃皆不會造成土壤液化，於是我們開始增加水的量(每次增加 100 cm^3)，在 2000 cm^3 時始開始發生液化，但在 2100 cm^3 土壤則呈現了沼澤狀(即代表水太多)，因此當消防砂的體積為 5000 cm^3 時，發生土壤液化的臨界水量是 2000 cm^3 ，以下實驗也都以此為砂土與水的用量。

	是否發生液化
土壤體積 5000 cm^3 ，水 1000 cm^3	未液化
土壤體積 5000 cm^3 ，水 1100 cm^3	未液化
土壤體積 5000 cm^3 ，水 1200 cm^3	未液化
土壤體積 5000 cm^3 ，水 1300 cm^3	未液化
土壤體積 5000 cm^3 ，水 1400 cm^3	未液化
土壤體積 5000 cm^3 ，水 1500 cm^3	未液化
土壤體積 5000 cm^3 ，水 1600 cm^3	未液化
土壤體積 5000 cm^3 ，水 1700 cm^3	未液化
土壤體積 5000 cm^3 ，水 1800 cm^3	未液化
土壤體積 5000 cm^3 ，水 1900 cm^3	未液化
土壤體積 5000 cm^3 ，水 2000 cm^3	發生液化
土壤體積 5000 cm^3 ，水 2100 cm^3	實驗開始前已呈現沼澤狀，無法實驗

(表一)定量的消防沙與不同量的水是否土壤液化一覽表

- 二、 我們將 5000 cm^3 的消防沙，混入 2000 cm^3 的水並均勻攪拌，固定其他變因，僅改變丟重物的頻率(5 秒、10 秒及 15 秒)。如表二

	重物總提供的能量	房屋下陷深度	液化所需時間
每 5 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 80cm	188.16 焦耳	1.23cm	22 秒
每 10 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 80 cm	94.08 焦耳	0.95cm	35 秒
每 15 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 80 cm	62.72 焦耳	0.50cm	49 秒

(表二)消防沙頻率與液化的關係

由表可知，當頻率加快時，即等於在 2 分鐘內提供的總能量增加(等同於地震規模較大)，房屋下陷較深，且液化所需時間較短。

三、 改變重物掉落的高度，分別降低了 10cm(掉落高度 70 cm)和 20cm(掉落高度 60 cm)。如表三

	重物總提供的能量	房屋下陷深度	液化所需時間
每 5 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 70cm	164.64 焦耳	0.84cm	29 秒
每 10 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 70 cm	82.32 焦耳	0.60cm	53 秒
每 15 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 70 cm	54.88 焦耳	0.50cm	60 秒
每 5 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 60cm	141.12 焦耳	1.00cm	23 秒
每 10 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 60 cm	70.56 焦耳	0.60cm	100 秒
每 15 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 60 cm	47.04 焦耳	0.10cm	110 秒

(表三) 改變重物高度，消防沙發生土壤液化之情形

1. 實驗證明，重物掉落高度與房屋下陷深度為正相關，也就是說提供能量增加房屋也會隨之下陷越深。
2. 然而液化所需時間卻並未完全與能量大小有關連性，當給予土壤能量較小時，有些時候液化時間會加快，有時則會減慢。





四、 我們測試紅土，在不改變其它因素的情況下，用與上述一樣的情況(砂土 5000 cm^3 、水 2000 cm^3)，依序做一樣的實驗。

	重物總提供的能量	房屋下陷深度	完全液化所需時間
每 5 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 80cm	188.16 焦耳	1.33cm	20 秒
每 10 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 80cm	94.08 焦耳	0.95cm	60 秒
每 15 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 80cm	62.72 焦耳	0.45cm	80 秒
每 5 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 70cm	164.64 焦耳	1.8cm	23 秒
每 10 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 70cm	82.32 焦耳	0.8cm	70 秒
每 15 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 70cm	54.88 焦耳	0.5cm	75 秒
每 5 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 60cm	141.12 焦耳	1.5cm	26 秒
每 10 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 60cm	70.56 焦耳	0.9cm	70 秒
每 15 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 60cm	47.04 焦耳	0.5cm	90 秒

(表四)紅土 頻率 / 重物高度 與液化的關係圖



我們發現，紅土在給予相同能量的情況下，房屋下陷的深度較深，液化的情況也較明顯，尤其砂土呈現了膠狀狀態。

五、 測試培養土的土壤液化情形，結果如下表↓

	重物總提供的能量	是否發生液化	土壤變化
每 5 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 80cm	188.16 焦耳	否	無異狀
每 10 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 80 cm	94.08 焦耳	否	無異狀
每 15 秒丟 1kg 重物 持續 2 分鐘，高度 80 cm	62.72 焦耳	否	無異狀

(表五)培養土與液化關係圖

起初我們是測試了 5000 cm³ 的培養土以及 2000 cm³ 的水，但在實驗開始之前砂土即呈現泥沼狀，在實驗結束後亦沒有任何改變甚至是有關液化的情形發生，於是我們再做了另一個實驗——改變水的含量，試圖找出能讓培養土液化的比例，我們從 1000 cm³ 的水量不斷的往上加，然而砂土完全沒有液化發生；在 2000 cm³ 的水量時，砂土在還未實驗前即呈現泥沼狀，因此無法進行進一步的實驗。

六、 觀察當砂土上無房屋時，土壤液化的情況。





比較先前的實驗，房屋附近的砂土會較快液化變成泥沼甚至膠狀，之後再慢慢地擴散出去直至整片砂土皆液化。根據理論應為房屋具有重量且擠壓到下方的砂土，在地震搖晃的過程中這些砂土的結構較其他未受壓的砂土容易被改變，水分也較容易被擠壓至表層，因此液化速度相對較快較明顯。

沒有模擬房子的液化實驗，實驗結果雖然也有發生液化，但較不明顯，且它是均勻地發生液化，原因可能是能量被均勻地被分散在四周砂土中。

分析：

由於紅土跟消防沙的密度(即顆粒大小)不一樣，紅土多是黏土(粒徑小於 1/256 mm)，消防沙多是砂(粒徑：2~1/256 mm)，兩者在顆粒間的保水量會不同，顆粒越大，液化發生的機率越高也越明顯。由實驗結果來看，紅土完全液化時是呈現膠狀狀態，消防沙則是大量出水變成沼澤，由此可推想密度比較大的砂土在地震時可以保住較多的的水分在砂土裡造成膠狀狀態。

補充：砂土的含水率——

$$\frac{\text{實驗前水量}-\text{實驗後未滲入土中之水量}}{\text{砂土的體積}} \times 100\%$$

將水倒入砂土中，水會流入砂土縫隙內(因為水分子較縫隙小許多)，因此在定量砂土中加上定量的水，然後測量水未滲入砂土的體積，接著再用水量減去未入滲的水量，除以比率，就是含水率(未考慮黏土吸水的性質)。

消防沙的含水率為 $(100\text{cm}^3 - 72\text{cm}^3)/100\text{cm}^3 \times 100\% = 28\%$

紅土的含水率為 $(100\text{cm}^3 - 60\text{cm}^3)/100\text{cm}^3 \times 100\% = 40\%$



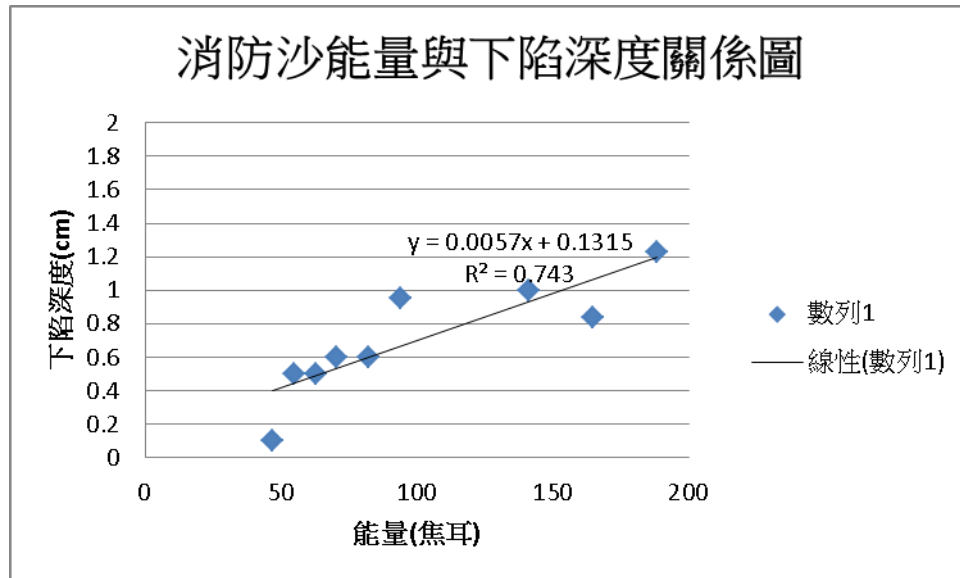
←消防沙的液化



←紅土的液化

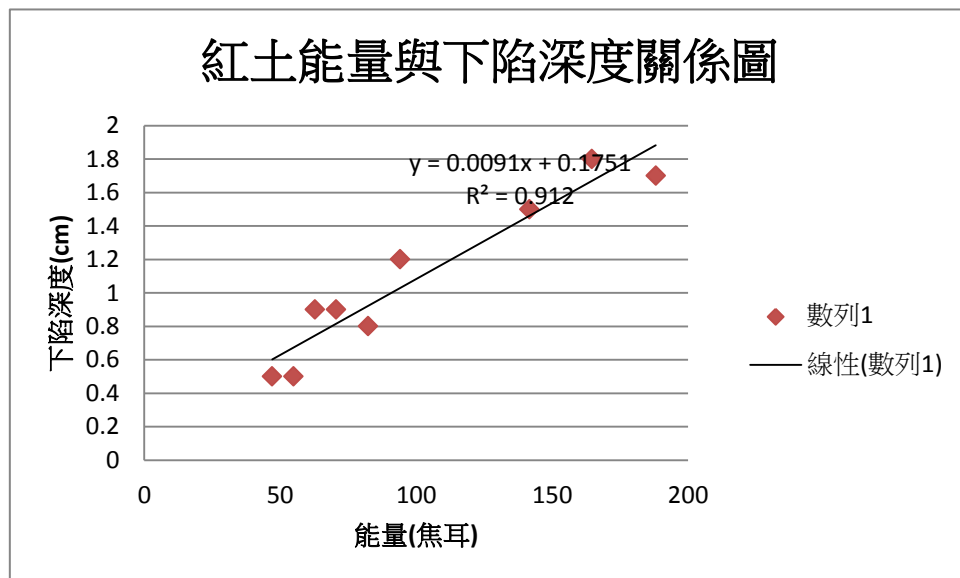
柒、討論

一、 根據實驗資料得知消防沙之提供能量與房屋下陷深度關係圖



(圖一) ↑

紅土之提供能量與房屋下陷深度關係圖

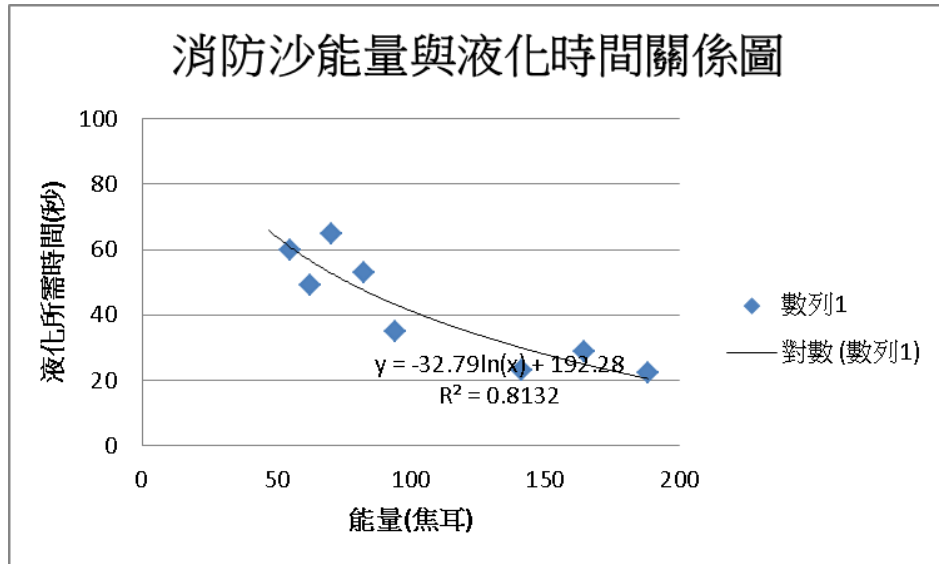


(圖二) ↑

由圖一和圖二可看出能量與房屋下陷深度呈現高(中)度正相關，且紅土又比消防沙來的更明顯，因此給的能量越多時房屋下陷深度即會越深，亦即地震越大時，土壤液化及房屋下陷機率越高且會越嚴重。

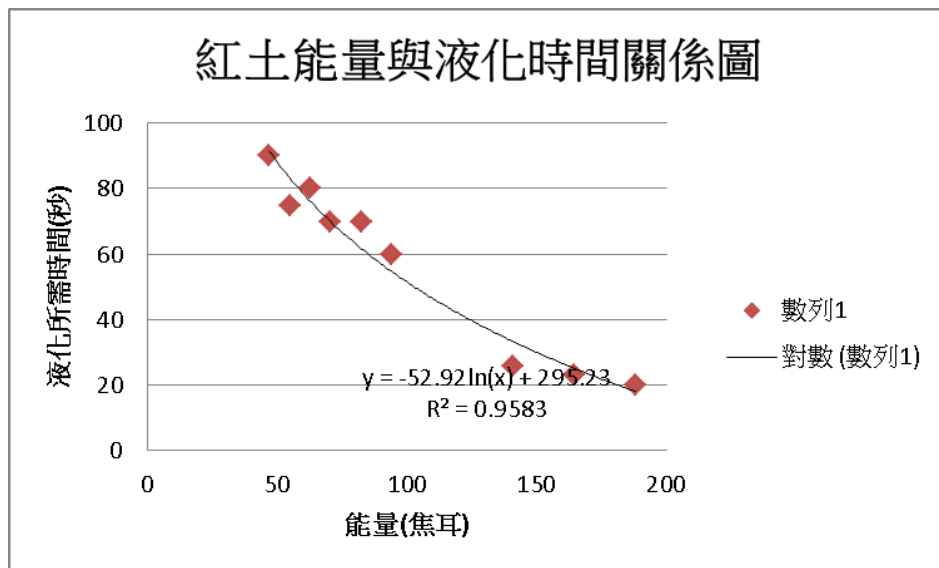
二、土壤上有房屋時，土壤液化較明顯，且房屋附近會先液化；沒房屋時 土壤則會均勻在各處發生液化。

三、消防沙提供能量與液化時間關係圖



(圖三) ↑

紅土提供能量與液化時間關係圖



(圖四) ↑

由圖三和圖四發現，土壤液化所需時間和提供能量低度負相關，不過當能量越高，土壤液化時間有變短的趨勢，而當能量到達一定門檻時，即使繼續提高能量，土壤液化所需的時間也只能到一個最低值。

另外我們發現，將提供能量以及土壤液化所需時間製成自然對數關係圖時，兩者之間的相關係數較高，也就是說，能量與液

化所需的時間應是呈現對數的關係。

關於培養土無法造成土壤液化，我們猜想這種情形可能跟砂土的密度、顆粒大小還有砂土保水量有關。根據測量與計算結果，培養土密度($D=0.425 \text{ g/cm}^3$)較紅土($D=1.94 \text{ g/cm}^3$)消防沙

($D=14 \text{ g/cm}^3$)小很多，在同體積下加等量(2000 cm^3)的水時會變得

像泥巴一樣，我們推想應該是水太多無法全部都滲透到砂土的縫隙裡，加上砂土顆粒太大導致地震時無法改變砂土結構，底層的水也因此沒被擠壓至表層，無法發生土壤液化。

- 四、 紅土與消防沙發生土壤液化之後狀態不太相似，消防沙為泥沼狀，紅土為膠狀，我們猜想這可能是因為紅土的密度較大，砂土間的縫隙較小，因此砂土較容易抓住周圍的水分子，使其受到擠壓時不易互相脫離，因而呈現膠狀。

捌、 結論

- 一、 砂土 5000 cm^3 和水 2000 cm^3 的情況下，紅土與消防沙在搖晃之後會有明顯的液化。
- 二、 提供沙土的能量越高時，房屋下陷的深度會較深(正相關)。
- 三、 提供土壤的能量越高時，土壤液化所需的時間較短(負相關)，但有臨界值(最短所需時間)
- 四、 當土壤上有房屋時，會先從房屋附近開始土壤液化；反之則均勻土壤液化。
- 五、 不同的土壤，土壤液化的情形便不同：消防沙大量出水，紅土出水甚少但呈現膠狀，培養土則未發生土壤液化。

玖、 未來展望

- 一、 在建造房屋之前，希望能夠將地震造成土壤液化的因素一併考慮，事先於防災害發生。
- 二、 由於我們只做了 5000 cm^3 土壤加水之後液化的比例，但無法確定是否當砂土體積改變時，土壤液化所需的水量也能等比例放大或縮小，因此我們希望未來能夠實驗出不同體積的土壤液化所需要的水量。
- 三、 希望能夠取得更多種的砂土進行差異比較，進而評估出每種砂土的土壤液化特性。
- 四、 在實驗中，發現土壤液化所需要的時間有臨界值(最小所需時間)，

我們希望能夠藉由更多的實驗確定其臨界值大小，並且能夠找出土壤液化至少需要一段時間的原因。

拾、參考資料及其他

- 一、 陳正興、陳家漢。2014。地震引致的土壤液化與側潰現象。科學發展，498，第 12-17 頁。
- 二、 莊文星。2000。土壤液化。國立自然科學博物館簡訊，152，第五版
- 三、 陳銘鴻。2002。土壤液化成因、災害與復建。臺灣之活動斷層與地震災害研討會，第 107—123 頁。
- 四、 葉錦勳 謝文彥 羅俊雄。2002。土壤液化潛能分析。國家地震工程研究中心簡訊，42，第 1-3 頁。
- 五、 張國鎮 編。安全耐震的家——認識地震工程。國家地震工程研究中心。第 54-62 頁。

【評語】 040508

1. 研究目標要改善土壤液化，值得嘉許。
2. 地震波的作用和本作品之實驗設計，差異甚大。