

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 地球科學科

佳作

030508

土壤中的水精靈

—探討捷運大安森林公園站的土壤液化防治

學校名稱：臺北市立中正國民中學

| | |
|-------------------------|--------------|
| 作者： 國一 江宜昕 國一 林紘安 | 指導老師： 吳思賢 |
|-------------------------|--------------|

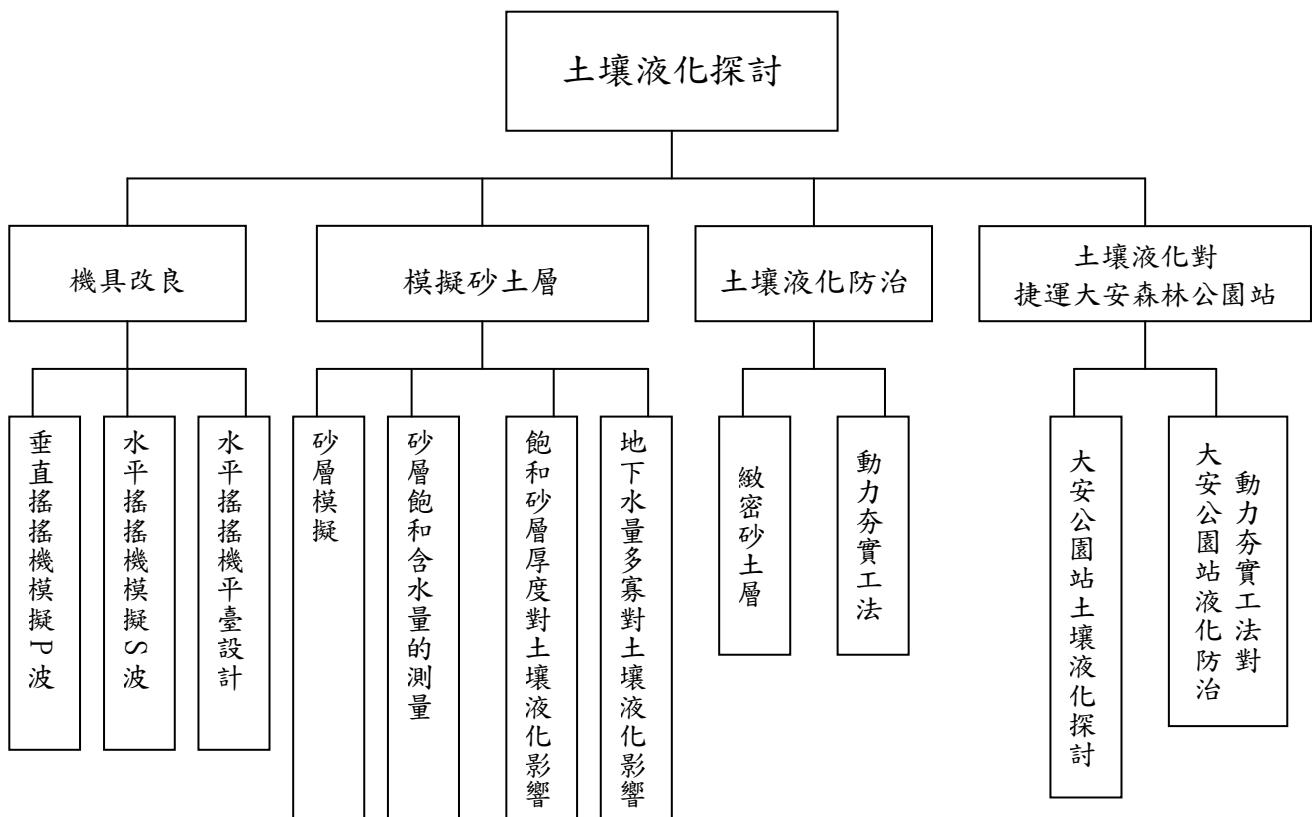
關鍵詞：土壤液化、動力夯實工法、臺北捷運工程

摘要

本研究在於模擬臺北捷運大安森林公園站土壤液化現象並探討動力夯實工法防治效果。本研究分兩部份；一、預備實驗；二、實驗研究。預備實驗為設計沉積土層箱和捷運站砂土箱，並模擬土壤液化現象。實驗研究主要為了探討動力夯實工法對臺北捷運大安森林公園站砂層的效果。由預備實驗，我們設定 1500mL 水量、砂土深度 10cm、砂層中未有緻密岩層，進行臺北捷運大安森林公園站砂層模擬，可以發現施作動力夯實工法砂層可以有效防治土壤液化，並從實驗中我們發覺經地盤改良的砂層在地震後會有地表濕潤現象，因此我們建議施作動力夯實工法後的砂層上方可以鋪設植草磚或連鎖磚，利於行人走動。

壹、研究動機

有一次我們在整理舊報紙時，驀然看到一篇報導：北市中心暗藏十六處土壤液化潛能區。其中報導寫道：十六處潛能區大多位於人口活動密集，或甚至位在市中心，若真因地震發生土壤液化，導致屋塌地陷，傷亡將非常慘重。且去年日本東京大地震造成東京迪士尼土壤液化，跟同處地震帶的台灣有類似的問題。這使我們注意到土壤液化防治的重要性，尤其我們居住在北市高度液化潛能區—大安森林公園北側附近。因此我們想探討如何防治捷運大安森林公園站液化情形？讓我們對土壤液化，有了更深一層的認識。



貳、研究目的

- 一、設計沉積土層箱和捷運站砂土箱模擬土壤液化之現象
- 二、探討土壤液化防治工程對捷運土層的關係

參、研究器材與設備

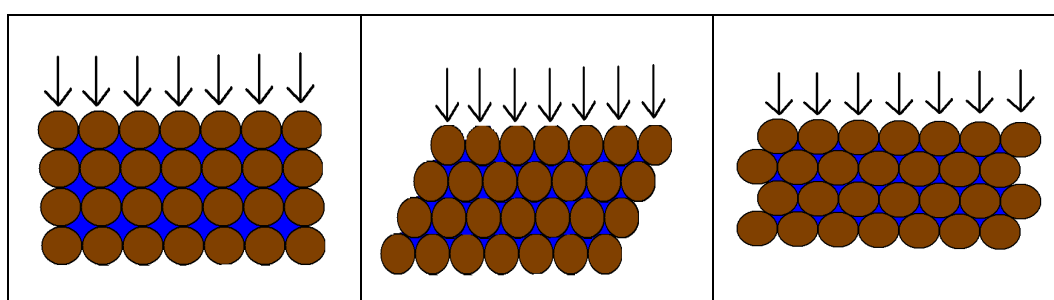
垂直搖搖機、平行搖搖機、砂土、沉積土層箱、電鑽、有孔盒子、BB 彈、黏土、彈珠、蓋玻片、PVC 管、捷運站砂土箱、寶特瓶、濾紙、鐵鎚、縫衣針

肆、研究過程或方法

一、研究原理：

(一) 土壤液化原理

當排列疏鬆且地下水位偏高的飽和砂質土壤受到地震激烈搖晃後，土壤顆粒排列緊密而擠壓孔隙水，造成孔隙水壓增高，砂土的重力和孔隙水的壓力抵銷，所以砂質土壤呈懸浮狀態。土壤液化示意圖如下：



(二) 土壤特性

1. 顆粒分布均勻的細砂或含粉土質的細砂最容易液化，土壤顆粒形狀為圓球狀，較容易發生液化現象。
2. 越緊密的砂因孔隙較小，當地震來時，顆粒砂不容易鬆動，所以較不容易發生液化現象。
3. 因深層土壤壓的比較緊密，顆粒間的孔隙較淺層土壤的孔隙還小，所以淺層土壤較深層土壤易發生液化。(土壤液化大多發生在地表下 0~20 公尺)
4. 若黏性土壤填充在粗顆粒間的孔隙中，因為土壤黏性較高，所以地震來時，砂土不易鬆動，而且孔隙水較不易向上滲流，所以較不易發生液化的現象。

(三) 土層特性

土層地下水位上升以及飽和度高容易發生液化現象。若土層壓密較不容易發生液化現象。

(四) 噴水冒砂

當砂質土壤經過地震後，地下水壓大於地面，便會從地面裂縫或鬆軟處，連砂帶水一同噴出，就是所謂的噴水冒砂現象。

(五) 地表沉陷

飽和砂土受到地震力作用而發生土壤液化後，砂質土壤呈懸浮狀態。地震過後孔隙水壓減少，砂土因重力下沉，形成地表沉陷。

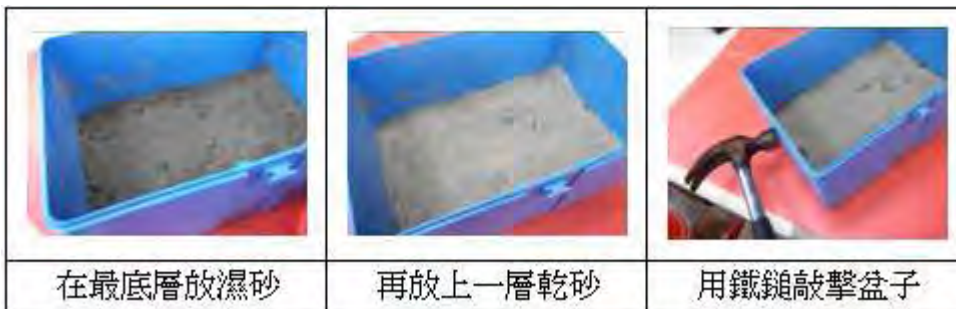
二、 機具設計

我們原本以手搖方式初步探究，爲了以更精準的計算地震頻率，因此改成以鐵鎚敲擊盒子方式呈現地震波。但地震頻率還是不精準，所以從第三代機具以搖搖機模擬地震頻率。第四代沉積土層箱原本沉積土層箱是以一般的實驗箱拿到搖搖機上搖，但因盒子不能固定在搖搖機上，因此我們把沉積土層箱改裝成將兩個一模一樣的盒子，一個開口朝上一個開口朝下，兩盒子用螺絲釘栓緊後，這樣實驗過程比較能順利進行。第四代沉積土層箱在搖的過程中，盒子還是會傾斜，所以將第四代沉積土層箱下面放一個跟平行搖搖機平台長度及寬度大小相同的小洞盒子，將其固定在平行搖搖機上(用繩子穿入小孔，使其固定)，最後把第四代沉積土層箱跟小洞盒子拴住，這樣沉積土層箱就不會像前幾代的箱子在搖動時傾斜。

(一) 第一代手搖製作土壤液化的過程



(二) 第二代用鐵鎚敲擊製作土壤液化的過程



(三) 第三代平行搖搖機的製作過程



(四) 第四代沉積土層箱的製作過程

1. 用一般的實驗箱

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 實驗箱 | 裝砂土 | 拿到垂直搖搖機搖 |

2. 用兩個實驗箱合在一起，上面的箱子裝土，下面的箱子安裝在平行搖搖機下當平台用

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 將兩個一樣的盒子一個開口朝上一個朝下 | 盒子四個角鑽洞 | 兩盒子用螺絲釘栓緊 | 拿到平行搖搖機上搖 |

(五) 第五代沉積土層箱的製作過程

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 將一個跟平行搖搖機平台長度以及寬度大小相同的有小洞盒子固定在平行搖搖機上(用繩子穿入小孔，使其固定住) | 再把第四代沉積土層箱合起來的盒子拆掉 | 把上個步驟所用的盒子跟第四代沉積土層箱栓在一起，使其固定住 | 最後再把要實驗的盒子放進第五代沉積土層箱內，把多餘的空隙用書本塞住，使其固定 |



三、研究一實驗步驟—初步製作土壤液化過程

研究目的：本研究初步探討土壤液化的現象，在之後研究七的土壤液化對捷運大安森林公園站影響中，對土壤液化現象有進一步的認識。



實驗器具：桶子、砂土、水、垂直搖搖機。

| 水量多寡 | 砂土的厚度 | 搖的頻率 |
|--------|--------------------|----------------------|
| 1000mL | 濕砂土：1cm 乾砂土：1cm | 垂直搖搖機的最大頻率(1 秒大約搖三下) |

實驗步驟：

| | |
|---|---|
|  |  |
| 最底層放濕砂，上面鋪一層乾砂土，最後加水 | 拿去垂直搖搖機上搖 |

實驗結果：

| | |
|---|---|
|  |  |
| 水從砂土中滲出來了 | 水及砂土噴出來 |




四、研究二實驗步驟—砂層飽和含水量的測量

研究目的：本研究是探討砂層飽和含水量的多寡，我們的想法是將水加入砂層中，砂層無法吸入的水便從盒子戳好的洞排出，直到洞沒有再排出水，這樣砂層中的含水量就是砂層飽和的含水量。此實驗可應用於之後的實驗到底要加入多少水才不會使砂層過度飽和或不飽和，且可應用於研究六、七中土壤液化防治實驗的水量多寡。

實驗器具：五個大小相同的盒子、五個大小相同的大盒子、砂土、水、燒杯、濾紙

| 變因 | 項目 |
|------|--|
| 操作變因 | (1)砂土的厚度：1、2、3、4、5cm (2)水量多寡：1cm：600mL、2cm：700mL、3cm：1000mL、4cm：1100mL、5cm：1100mL |
| 控制變因 | (1)漏水時間：24 小時 (2)盒子大小：長：32cm、寬：25cm (3)每個盒子都有戳洞、且洞的大小也大略一致 |
| 應變變因 | 水飽和、單位面積、單位體積的多寡不同 |

實驗步驟：

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 先在盒子底部戳洞 | 貼上濾紙，可使砂土不會跟著水流出來 | 重複以上動作製作五個戳洞盒子，接著五個盒子分別放入 1、2、3、4、5cm 砂土 | 把水裝到盒子裡，盒子部分水會從洞排出，最後可測量砂層飽和含水量 |

實驗結果：

| 厚度 項目 | 1cm 乾砂 | 2cm 乾砂 | 3cm 乾砂 | 4cm 乾砂 | 5cm 乾砂 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 可負荷水量 | 600mL | 700mL | 1000mL | 1100mL | 1100mL |
| 排出水量 | 84mL | 47mL | 55mL | 91mL | 38mL |

五、 研究三實驗步驟－飽和砂層厚度對土壤液化影響





(一) 研究 3-1：乾砂厚度 2cm－飽和砂層厚度對土壤液化影響

研究目的：本研究想探討乾砂固定 2cm，濕砂厚度不同對土壤液化的影響。此實驗可了解到若捷運大安森林公園站附近地下水位較高(濕砂厚度高)、表層較少(乾砂厚度低)便較容易發生液化的現象。

實驗器具：實驗箱(第五代沉積土層箱)、砂土、水、平行搖搖機、漏斗、尺。

| 變因 | 項目 |
|------|---|
| 操作變因 | 濕砂厚度不同(1、2、3、4、5cm) |
| 控制變因 | (1)乾砂的厚度：2cm (2)搖的頻率：平行搖搖機的最大頻率(1 秒搖 3 下) (3)盒子大小：長：31cm、寬：25cm |
| 應變變因 | 液化速度快慢 |

實驗步驟：

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 先把乾砂鋪在下層 | 將水倒入砂土中 | 將乾砂鋪上去 | 拿去搖搖機上搖動 |

實驗結果：

※水量：

| 濕砂厚度 水量 | 厚度 1cm | 厚度 2cm | 厚度 3cm | 厚度 4cm | 厚度 5cm |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 水量 | 516mL | 653mL | 845mL | 1009mL | 1062mL |

※結果：

1. 濕砂厚度 1cm

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 80 秒局部液化 | 145 秒表層龜裂 | 160 秒表面液化 |

2. 濕砂厚度 2cm

| | | |
|--|--|---|
|  |  |  |
| 60 秒局部液化 | 110 秒表層龜裂 | 130 秒表面液化 |

3. 濕砂厚度 3cm

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 40 秒局部液化 | 70 秒表層龜裂 | 80 秒表面液化 |

4. 濕砂厚度 4cm

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 10 秒局部液化 | 25 秒表層龜裂 | 30 秒表面液化 |

5. 濕砂厚度 5cm



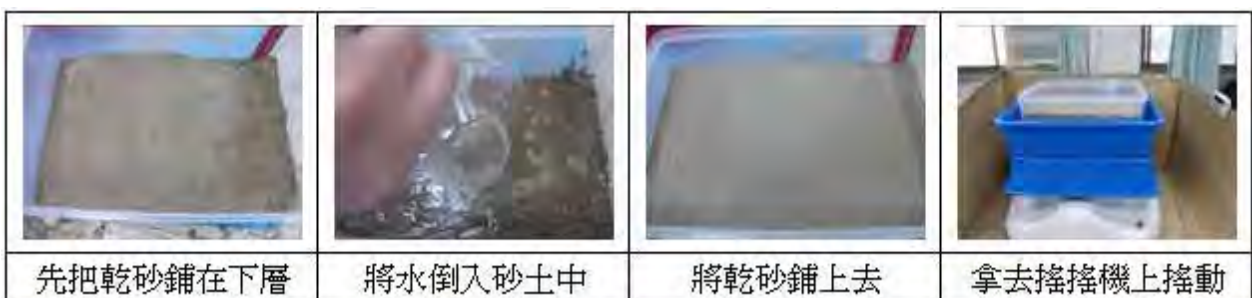
(二) 研究 3-2：乾砂厚度 4cm-地下水層水量的多寡對土壤液化的影響

研究目的：本研究想探討乾砂固定 4cm，濕砂厚度不同對土壤液化的影響。本研究與研究 3-1 的想法相同，只是乾砂厚度增為 4cm，但因兩實驗總重量不同，導致表面液化厚度比的不同，因此兩實驗無法交相比較。(詳見討論 二)

實驗器具：實驗箱(第五代沉積土層箱)、砂土、水、平行搖搖機、漏斗、尺。

| 變因 | 項目 |
|------|---|
| 操作變因 | 濕砂厚度不同(1、2、3、4、5cm) |
| 控制變因 | (1)乾砂的厚度：4cm (2)搖的頻率：平行搖搖機的最大頻率(1 秒搖 3 下) (3)盒子大小：長：31cm、寬：25cm |
| 應變變因 | 液化速度快慢 |

實驗步驟：

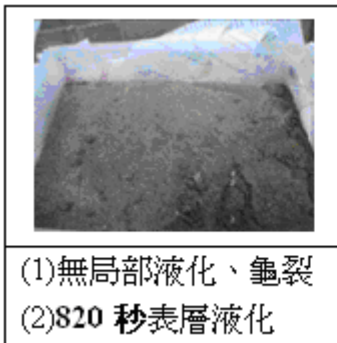


※水量：

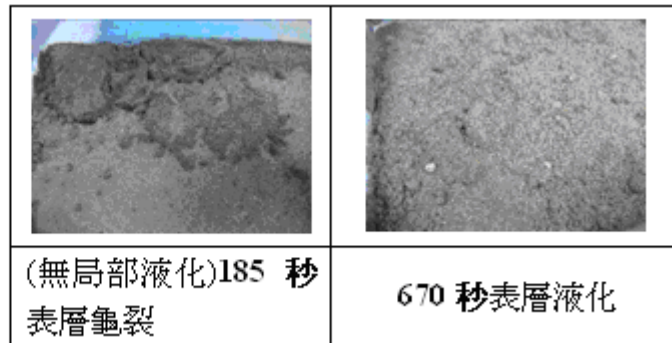
| 濕砂厚度 水量 | 厚度 1cm | 厚度 2cm | 厚度 3cm | 厚度 4cm | 厚度 5cm |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 水量 | 516mL | 653mL | 845mL | 1009mL | 1062mL |

※結果：

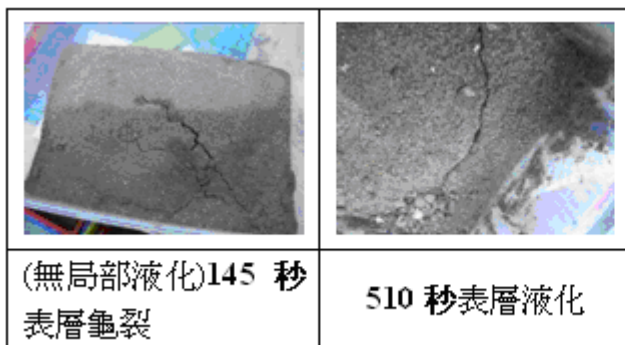
1. 濕砂厚度 1cm



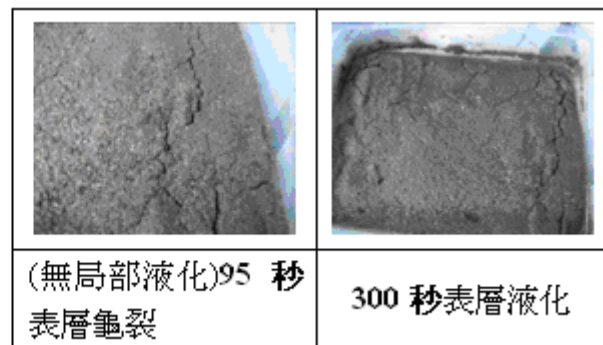
2. 濕砂厚度 2cm



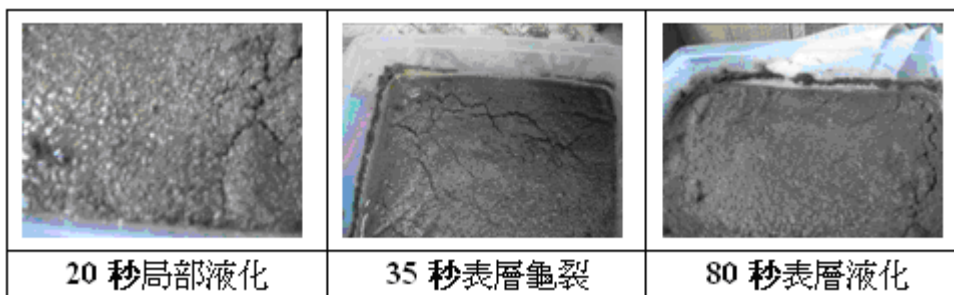
3. 濕砂厚度 3cm



4. 濕砂厚度 4cm



5. 濕砂厚度 5cm







六、 研究四實驗步驟—地下水量多寡對土壤液化影響

研究目的：本研究是討論當雨季來時，地下水位會上升，乾季時地下水位會下降，因此我們由實驗可推論捷運大安森林公園站在雨季後發生的地震，會縮短同一砂層土壤液化的時間。

實驗器具：實驗箱(第五代沉積土層箱)、砂土、水、平行搖搖機、漏斗、尺。

| 變因 | 項目 |
|------|--|
| 操作變因 | 土層水量的不同(1200mL、1500mL、1800mL、2000mL) |
| 控制變因 | (1)砂土的厚度：總厚度 10cm (2)搖的頻率：平行搖搖機的最大頻率(1 秒搖三下) (3)盒子大小：長：31cm、寬：25cm |
| 應變變因 | 液化速度快慢 |

實驗步驟：

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 先把乾砂鋪在下層 | 將水倒入砂土中 | 將乾砂鋪上去 | 拿去搖搖機上搖動 |

實驗結果：

(一) 1200mL 水量

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 60 秒砂土表層龜裂 | 320 秒砂土裂開 | 無土壤液化之現象 |

(二) 1500mL 水量

砂土龜裂



| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 105 秒局部土壤液化 | 170 秒表層表層龜裂 | 300 秒表層砂土從土裡跳出 | 680 秒表層砂土大規模液化 |





(二) 研究 5-2 實驗步驟—不同材質緻密砂土層對土壤液化的影響

| 變因 | 項目 |
|------|---|
| 操作變因 | 濕砂與乾砂之間不同材質緻密砂土層 |
| 控制變因 | (1)水量多寡(1000mL) (2)砂土的厚度：濕砂 4.5cm，乾砂 1cm |
| 應變變因 | 不同材質砂土層對土壤液化的影響 |





1. 中間無緻密的砂土層

實驗器具：實驗箱(已改裝)、砂土、水、平行搖搖機、漏斗。

實驗步驟：

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 將濕砂放置最下層 | 將水倒入砂土中 | 將乾砂鋪在濕土上 | 放到平行搖搖機上搖 |

實驗結果：

| 土壤液化現象 | | |
|---|---|--|
|  | | |
|  |  |  |
| 45 秒砂土龜裂 | 80 秒邊緣砂土陷下 | 150 秒表面土壤液化 |




2. 中間有緻密的砂土層 (以彈珠製成)

實驗器具：水桶、砂土、水桶、水、平行搖搖機、漏斗、彈珠。

實驗步驟：

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 將濕砂放置最下層 並鋪上彈珠 | 上層鋪上一層乾砂 | 拿去平行搖搖機搖 |

實驗結果：

| | | |
|--|--|---|
|  |  |  |
| 70 秒邊緣砂土濕潤 | 115 秒邊緣砂土陷下 | 165 秒水從砂土的裂縫中滲出來 |



3. 中間有緻密的砂土層(以砂土製成)

實驗器具：實驗箱(已改裝)、砂土、水、平行搖搖機、漏斗、尺。

實驗步驟：

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 將濕砂放置最下層 | 再用尺將濕砂切成一塊塊的塊狀(砂土要壓密)並一塊塊的鋪在濕砂上 | |
|  |  | |
| 將水倒入砂土中 | 最後將乾砂鋪上去 | |


實驗結果：

| | |
|---|---|
|  |  |
| 85 秒砂土龜裂，邊緣有砂陷下去 | 170 秒水和砂土塊狀跳出來 |


4. 中間有緻密的砂土層(以 BB 彈製成)

實驗器具：實驗箱(已改裝)、砂土、水、平行搖搖機、漏斗、尺。

實驗步驟：

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 在最底層鋪上乾砂 | 將水倒入砂土中 | 在濕砂上鋪上 BB 彈 | 最後在鋪上乾砂 |

實驗結果：

| | |
|---|---|
|  |  |
| BB 彈之間的孔隙較大，密度也較輕，土層較不緊密且容易發生反轉現象，這與現實土壤液化不同 | |

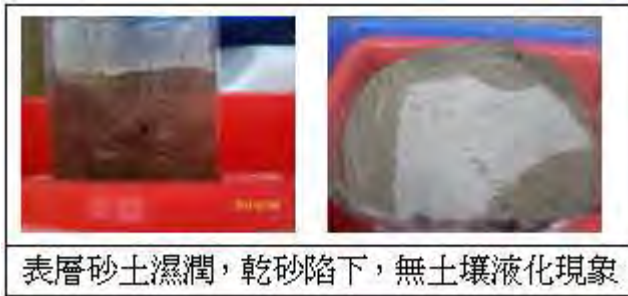
5. 中間有緻密的砂土層(以黏土製成)

實驗器具：實驗箱(已改裝)、砂土、水、平行搖搖機、漏斗、尺。

實驗步驟：

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 在最底層鋪上乾砂 | 將水倒入砂土中 | 在濕砂上鋪上黏土 | 最後再鋪上乾砂 |

實驗結果：



(三) 研究 5-3 實驗步驟—緻密砂土層排列整齊以及不整齊對土壤液化的影響

實驗器具：實驗箱(已改裝)、砂土、水、平行搖搖機、漏斗、尺。

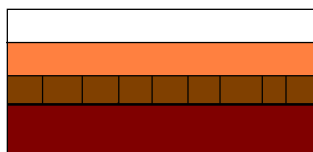
| 變因 | 項目 |
|------|--|
| 操作變因 | 緻密砂土層排放整齊以及不整齊 |
| 控制變因 | (1)水量多寡(1000mL) (2)砂土的厚度：濕砂 4cm，乾砂 1cm，緻密的砂土層 1cm (3)搖的頻率：平行搖搖機的最大頻率(1 秒搖 3 下) |
| 應變變因 | 液化速度快慢 |

1. 排列整齊

實驗步驟：



示意圖：



實驗結果：

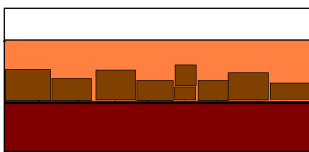


2. 排列不整齊

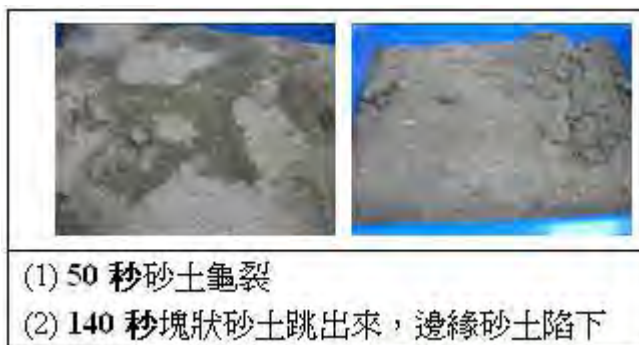
實驗步驟：



示意圖：



實驗結果：



八、研究六實驗步驟—動力夯實工法對土壤液化的影響

研究目的：本研究探討土壤液化防治中動力夯實工法。經過我們的查詢，動力夯實工法可延緩土壤液化的發生，例如台灣雲林台塑麥寮重機械廠以動力夯實工法進行地盤改良設計，並成功完成地盤改良。參考文獻中的動力夯實工法方式，是將夯擊點規劃為棋盤式配置，使各夯擊點間保持相當距離，且分三階段夯擊。(請參照 捌、參考資料 第十四點)本實驗設計也以棋盤式配置夯擊，但因為要將實驗單純化，所以只分成一個階段夯擊。本實驗可應用於對捷運大安森林公園站的地盤改良，達到防治捷運大安森林公園站土壤液化情形。

(一)研究 6-1 實驗步驟—動力夯實工法對土層作用深度

實驗器具：實驗箱、乾砂、水、蓋玻片、不同高度 PVC 管、寶特瓶、尺、縫衣針。

| 變因 | 項目 |
|------|-------------------|
| 操作變因 | PVC 管長度不同、乾砂層厚度不同 |
| 控制變因 | 寶特瓶重量： 600.9 gw |
| 應變變因 | 碎裂深度不同 |

實驗步驟：

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 在沙土箱底部擺放蓋玻片，並在玻片中央下方置放縫衣針 | 蓋上 2 公分砂層，並將 600 公克重物由高度 15 公分落下。 | 清除砂土層，觀察蓋玻片碎裂情形；若碎裂，重複步驟一、二，並依次增高砂土層 2.5、3.0、3.5……公分，直到蓋玻片未碎裂為止，並記錄碎裂深度。 | 重複步驟一～三，改由 600 公克重物依次由 25、35、45 公分高度落下，並紀錄碎裂深度。 |

實驗結果：(○代表蓋玻片有碎裂；×代表蓋玻片沒有碎裂)

| 落下高度 碎裂深度 | 45 公分 | 35 公分 | 25 公分 | 15 公分 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 1.5 公分 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 2.0 公分 | ○ | ○ | ○ | × |
| 2.5 公分 | ○ | × | × | × |
| 3.0 公分 | × | × | × | × |


(二)研究 6-2 實驗步驟—動力夯實工法對土壤液化影響

1.地下水層水量 1200mL—動力夯實工法落下高度不同對土壤液化的影響

實驗器具：實驗箱、砂土、水、不同高度 PVC 管、寶特瓶、尺、平行搖搖機。

| 變因 | 項目 |
|------|---|
| 操作變因 | PVC 管長度不同 |
| 控制變因 | (1) 水量 1200mL (2) 搖的頻率：平行搖搖機的最大頻率(1 秒搖 3 下) (3) 砂土厚度：濕砂、乾砂 5cm (4) 寶特瓶重量： 600.9 gw |
| 應變變因 | 液化速度、樣貌 |

實驗步驟：

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 先把 5 公分乾砂鋪在下層，在將 1200 毫升水倒入，並再緩慢加入 5 公分乾砂 | 將上述砂土層進行土壤液化模擬，觀察紀錄土壤液化現象。 | 重複步驟一，並將 600.9 公克重物由高度 15 公分落下在砂土層上，再進行土壤液化模擬，觀察並紀錄土壤液化現象。 | 重複步驟一，並將 600.9 公克重物由依次由高度 45 公分落下在砂土層上，觀察並紀錄土壤液化現象。 |

實驗結果：

(1)落下高度 15 公分

| |
|--|
|  |
| 40 秒砂土局部濕潤 75 秒局部龜裂 |

(2)落下高度 45 公分

| | |
|---|--|
|  |  |
| 90 秒局部濕潤 140 秒局部龜裂 | 335 秒砂土鬆散 |

2.地下水層水量 1500mL—動力夯實工法落下高度不同對土壤液化的影響

實驗器具：實驗箱、砂土、水、不同高度 PVC 管、寶特瓶、尺、平行搖搖機。

| 變因 | 項目 |
|------|---|
| 操作變因 | PVC 管長度不同 |
| 控制變因 | (1)水量 1500mL (2)搖的頻率：平行搖搖機的最大頻率(1 秒搖 3 下) (3)砂土厚度：濕砂、乾砂 5cm (4)寶特瓶重量： 600.9 gw |
| 應變變因 | 液化速度、樣貌 |

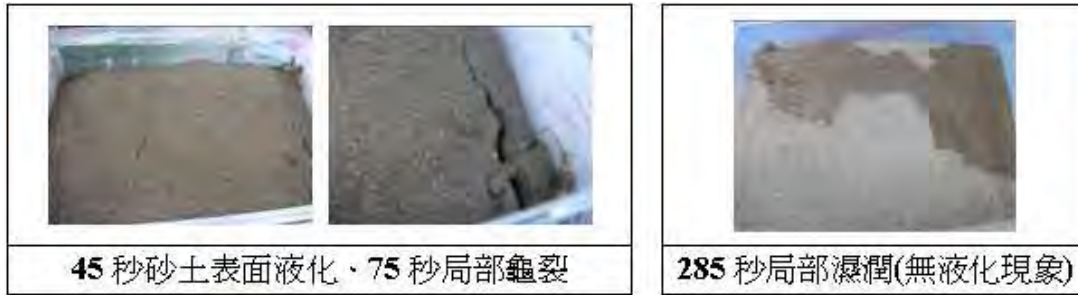
實驗步驟：

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 先把 5 公分乾砂鋪在下層，在將 1500 毫升水倒入，並再緩慢加入 5 公分乾砂 | 將上述砂土層進行土壤液化模擬，觀察紀錄土壤液化現象。 | 重複步驟一，並將 600.9 公克重物由高度 15 公分落下在砂土層上，再進行土壤液化模擬，觀察並紀錄土壤液化現象。 | 重複步驟一，並將 600.9 公克重物由依次由高度 45 公分落下在砂土層上，觀察並紀錄土壤液化現象。 |

實驗結果：

(1) 落下高度 15 公分

(2) 落下高度 45 公分



九、研究七實驗步驟－土壤液化對捷運大安森林公園站影響

研究目的：本研究模擬土壤液化對捷運大安森林公園站影響，實驗設計把 PVC 管與箱子結合，模擬地下捷運隧道。PVC 管模擬捷運隧道、砂土模擬高度液化潛能區，並且比較有使用動力夯實工法和無使用動力夯實工法對土壤液化的影響。本實驗可應用於捷運大安森林公園站的土壤液化防治工程。

(一) 研究 7-1 實驗步驟－大安公園站土壤液化探討

實驗器具：捷運站砂土箱、砂土、水、尺、PVC 管、平行搖搖機。

| 項目 | |
|---|--|
| (1) 水量 1500mL (2) 搖的頻率 (3) 砂土厚度：濕砂、乾砂 5cm | |

實驗步驟：

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| <p>模擬捷運站砂土箱</p> | <p>5 公分乾砂鋪在模擬捷運站砂土箱，再將 1500 水 mL 倒入，並加入 5cm 乾砂。</p> | <p>將上述砂土層進行土壤液化模擬，觀察並紀錄土壤液化現象。</p> |

實驗結果：

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| <p>30 秒 PVC 管右側表面液化、局部龜裂； 70 秒 PVC 管左側表面濕潤</p> | <p>120 秒全部表面液化</p> | |

(二)研究 7-2 實驗步驟—動力夯實工法對大安公園站液化防治





實驗器具：捷運站砂土箱、砂土、水、不同高度 PVC 管、寶特瓶、尺、平行搖搖機。

| 變因 | 項目 |
|------|---|
| 操作變因 | PVC 管長度不同 |
| 控制變因 | (1)水量 1500mL (2)搖的頻率 (3)砂土厚度：濕砂、乾砂 5cm (4)寶特瓶重量： 600.9gw |
| 應變變因 | 液化速度、樣貌 |

實驗步驟：

| | | |
|---|---|--|
|  |  |  |
| 先把 5 公分乾砂鋪在模擬捷運站砂土箱下層，在將 1500 毫升水倒入，並再緩慢加入 5 公分乾砂。 | 並將 600.9 公克重物由高度 15 公分落下在砂土層上，再進行土壤液化模擬，觀察並紀錄土壤液化現象。 | 重複步驟一、二，並將 600.9 公克重物由依次由高度 25、35、45 公分落下在砂土層上，再進行土壤液化模擬，觀察並紀錄土壤液化現象。 |

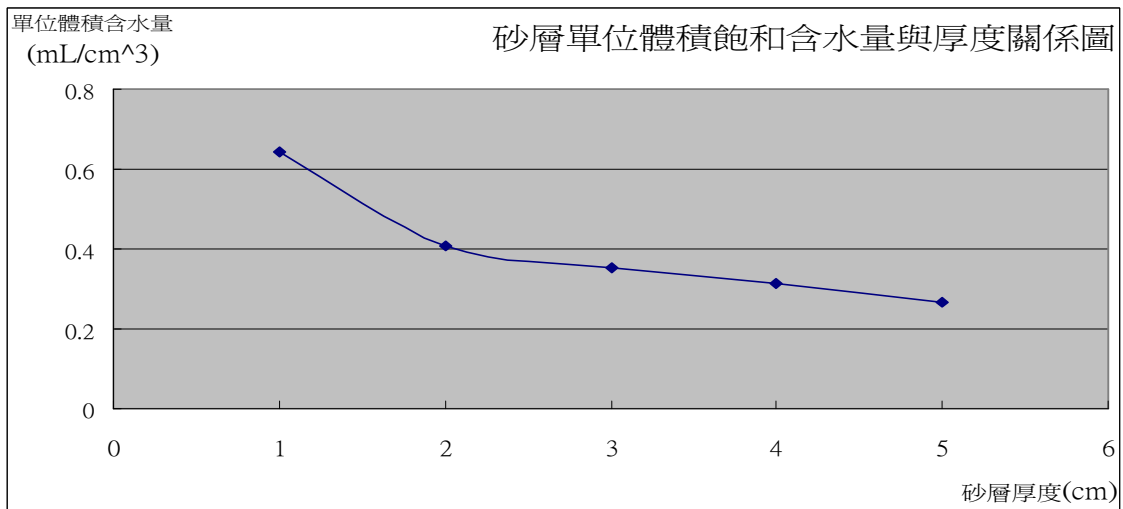
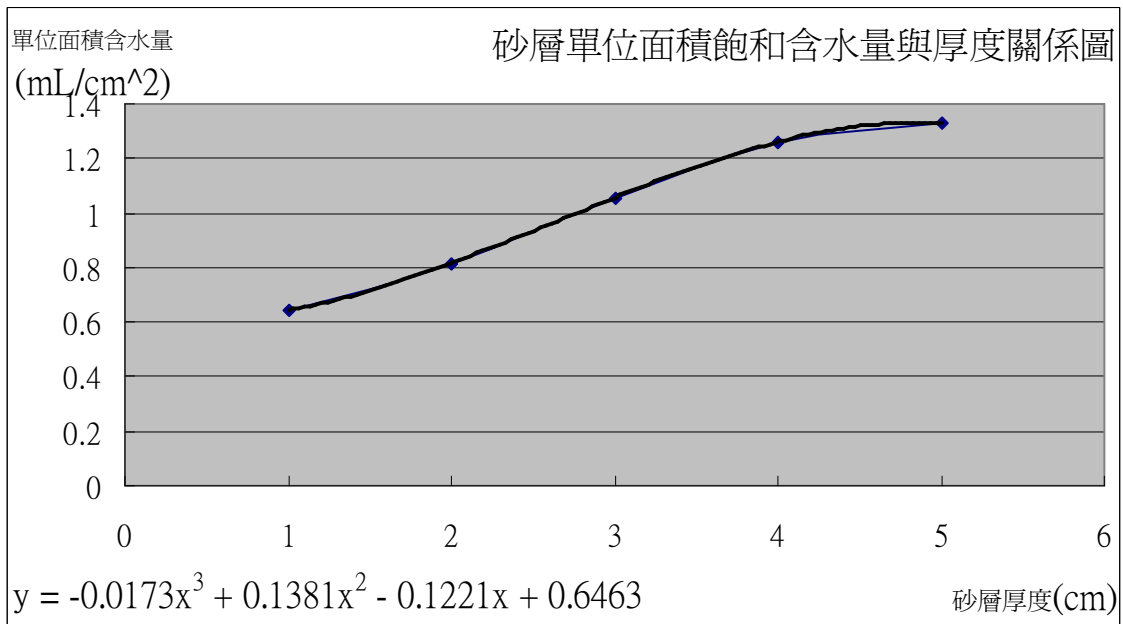
實驗結果：

| 落下高度 15 公分 | 落下高度 25 公分 | 落下高度 35 公分 | 落下高度 45 公分 |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 無土壤液化現象 | 95 秒 PVC 管右側表面濕潤、PVC 管左側上角局部濕潤(無液化現象) | 80 秒 PVC 管右側表面濕潤無土壤液化現象 | 65 秒局部濕潤(無土壤液化現象) |

伍、研究結果

一、研究二—砂層飽和含水量的測量

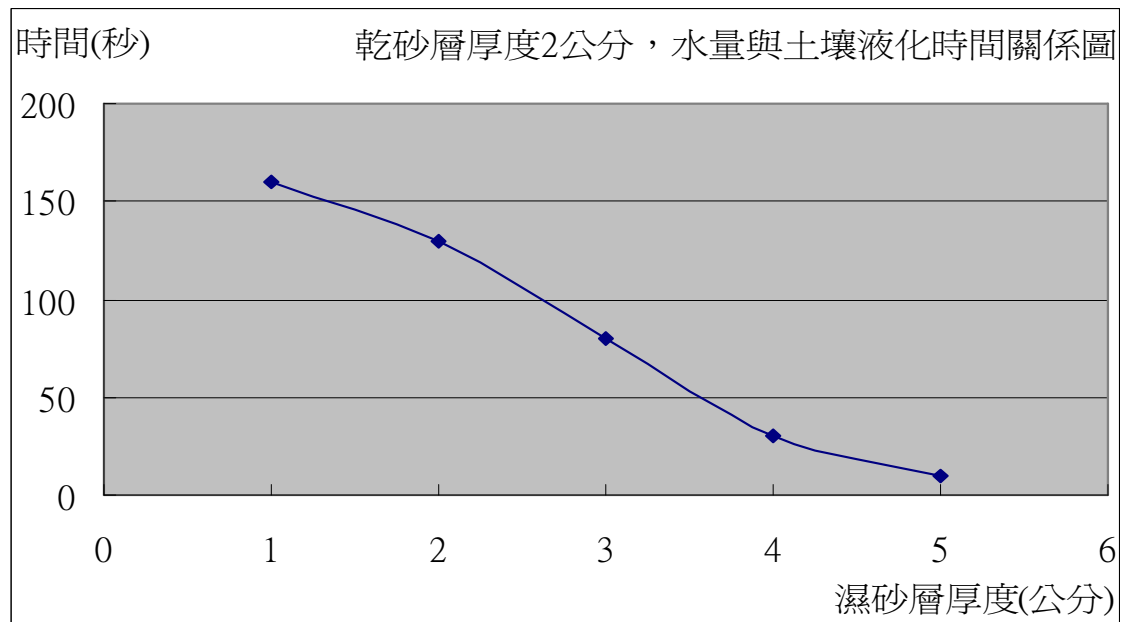
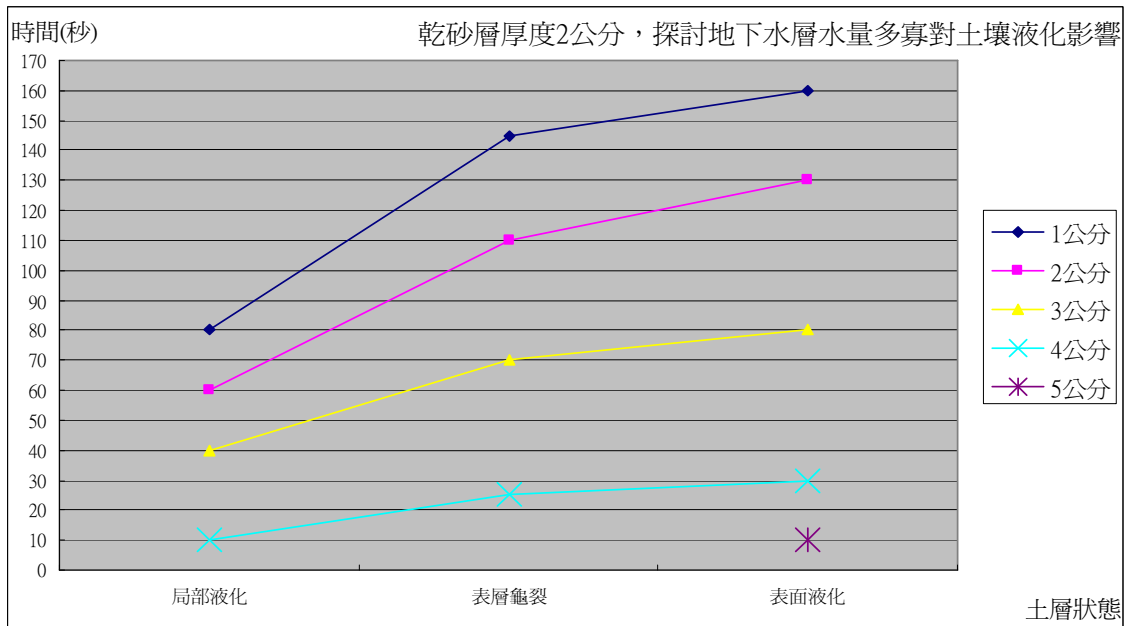
| 厚度 項目 | 1cm 乾砂 | 2cm 乾砂 | 3cm 乾砂 | 4cm 乾砂 | 5cm 乾砂 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 可負荷水量 | 600mL | 700mL | 1000mL | 1100mL | 1100mL |
| 排出水量 | 84mL | 47mL | 55mL | 91mL | 38mL |



二、研究三實驗步驟－飽和砂層厚度對土壤液化影響

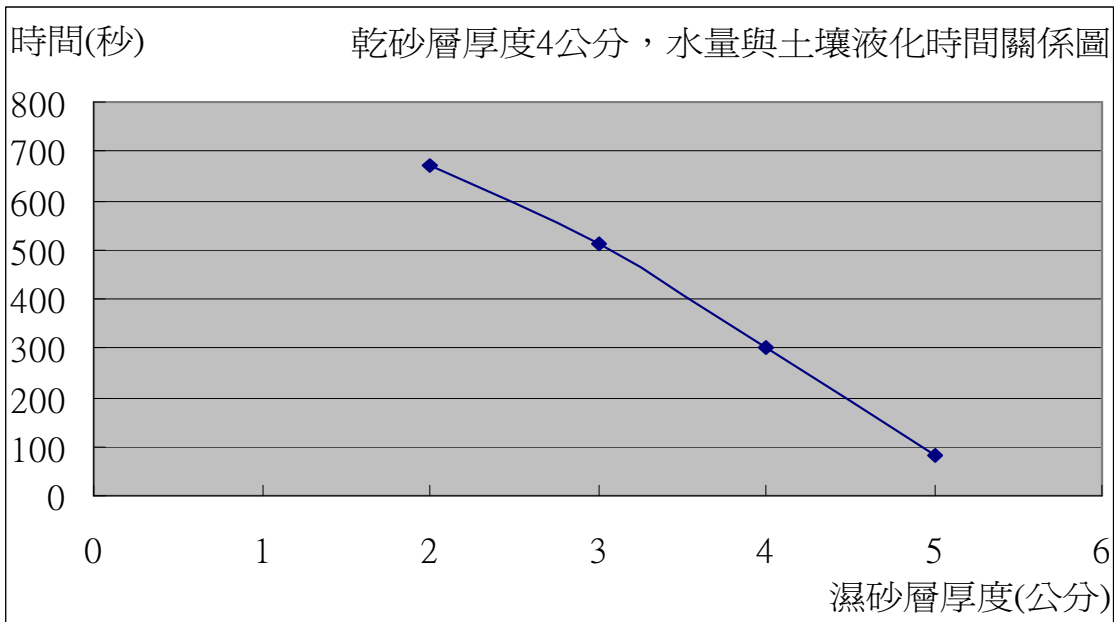
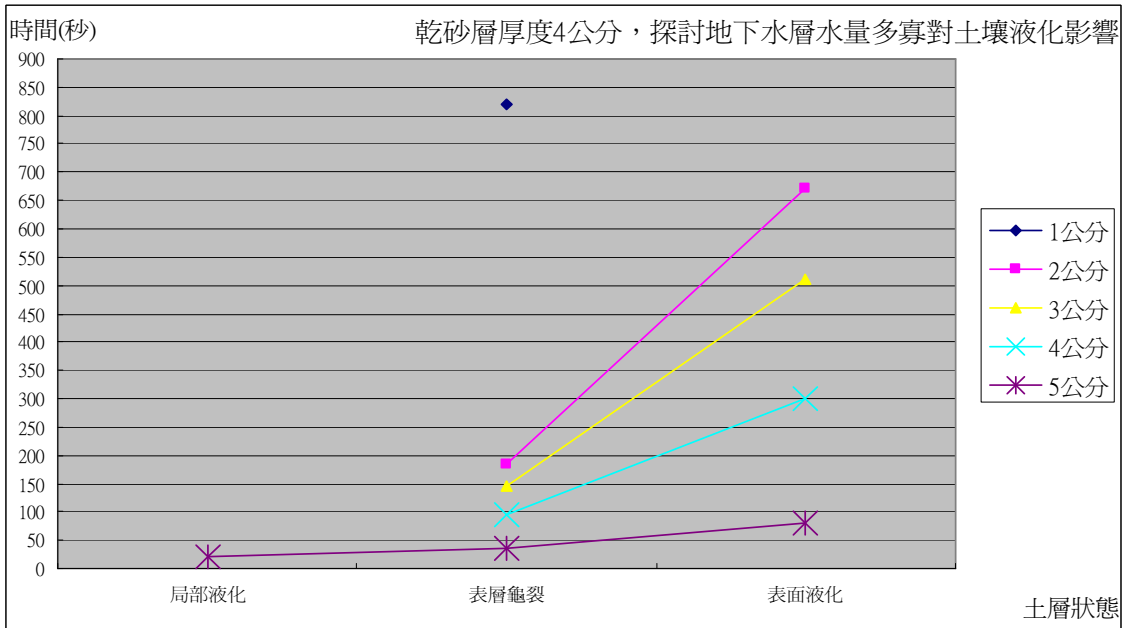
(一)研究 3-1：乾砂厚度 2cm－飽和砂層厚度對土壤液化影響

| 濕砂 厚度 | 1cm | 2cm | 3cm | 4cm | 5cm |
|----------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 水量 | 516mL | 653mL | 845mL | 1009mL | 1062mL |
| 局部液化時間 | 80 秒 | 60 秒 | 40 秒 | 10 秒 | 無 |
| 表層龜裂時間 | 145 秒 | 110 秒 | 70 秒 | 25 秒 | 無 |
| 表層液化時間 | 160 秒 | 130 秒 | 80 秒 | 30 秒 | 10 秒 |



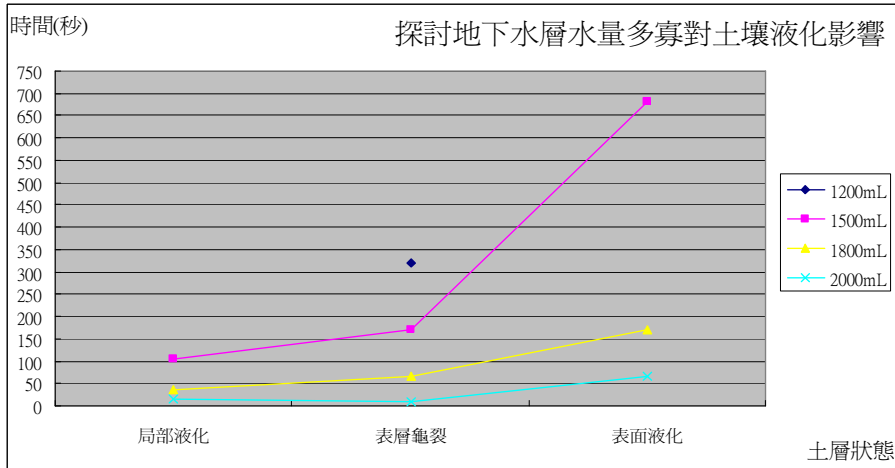
(二) 研究 3-2：乾砂厚度 4cm-地下水層水量的多寡對土壤液化的影響

| 濕砂 厚度 | 1cm | 2cm | 3cm | 4cm | 5cm |
|----------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 水量 | 516mL | 653mL | 845mL | 1009mL | 1062mL |
| 局部液化時間 | 無 | 無 | 無 | 無 | 20 秒 |
| 表層龜裂時間 | 820 秒 | 185 秒 | 145 秒 | 95 秒 | 35 秒 |
| 表層液化時間 | 無 | 670 秒 | 510 秒 | 300 秒 | 80 秒 |



三、研究四實驗步驟—地下水量多寡對土壤液化影響

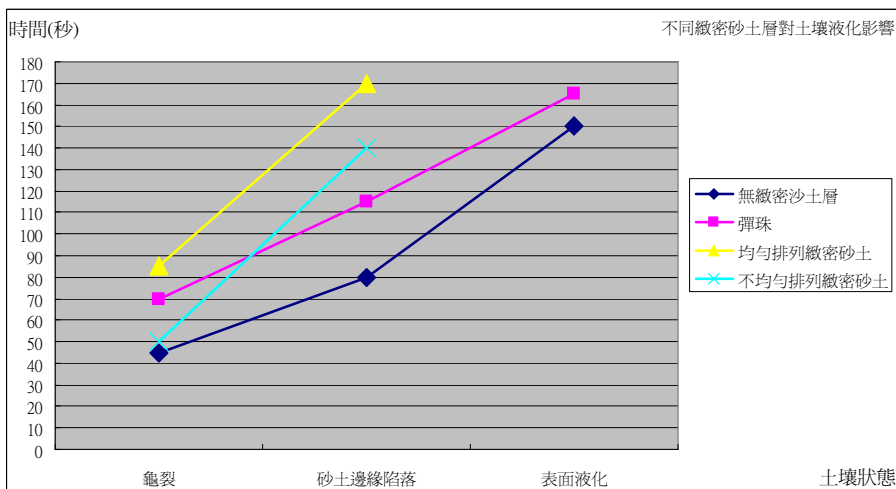
| 項目 \ 水量 | 1200mL | 1500mL | 1800mL | 2000mL |
|---------|---------|--------|--------|--------|
| 局部液化時間 | 無局部液化 | 105 秒 | 35 秒 | 15 秒 |
| 表層龜裂時間 | 60 秒 | 170 秒 | 65 秒 | 10 秒 |
| 表層液化時間 | 無土壤液化現象 | 680 秒 | 170 秒 | 65 秒 |



四、研究五實驗步驟—土層中緻密砂土層對土壤液化的影響

(一) 研究 5-2 實驗步驟—不同材質緻密砂土層對土壤液化的影響

| 項目 \ 變因 | 中間無緻密的砂土層 | 中間有緻密的砂土層(以彈珠製成) | 中間有緻密的砂土層(以砂土製成) |
|---------|--|----------------------|------------------|
| 液化時間 | 150 秒 | 165 秒 | 無土壤液化現象 |
| 液化的樣貌 | 泥漿狀 | 砂土龜裂，但無泥漿狀，但有水和砂土滲出 | 無泥漿狀，但有水和砂土滲出 |
| 項目 \ 變因 | 中間有緻密的砂土層(以 BB 彈製成) | 中間有緻密的砂土層(以黏土製成) | |
| 液化時間 | 無土壤液化現象 | 無土壤液化現象 | |
| 液化的樣貌 | BB 彈間孔隙較大，密度較輕，土層較不緊密且容易發生反轉現象，這與現實土壤液化不同。 | 表層砂土濕潤，乾砂陷下去無土壤液化現象。 | |



(二) 研究 5-3 實驗步驟—緻密砂土層排列整齊以及不整齊對土壤液化的影響

| 變因 項目 | 排列整齊 | 排列不整齊 |
|----------|-------------|------------|
| 液化程度 | 較不會發生土壤液化情形 | 較會發生土壤液化情形 |
| 液化時間 | 170 秒 | 140 秒 |

五、 研究六—動力夯實工法對土壤液化的影響

(一) 研究 6-1—動力夯實工法對土層作用深度

(○代表蓋玻片有碎裂；x代表蓋玻片沒有碎裂)

| 落下高度 碎裂深度 | 45 公分 | 35 公分 | 25 公分 | 15 公分 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| 1.5 公分 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 2.0 公分 | ○ | ○ | ○ | x |
| 2.5 公分 | ○ | x | x | x |
| 3.0 公分 | x | x | x | x |

(二) 研究 6-2—動力夯實工法對土壤液化影響

1.地下水層水量 1200mL—動力夯實工法落下高度不同對土壤液化的影響

乾砂 4 公分、濕砂 6 公分

| 落下高度 項目 | 15 公分 | 45 公分 |
|------------|-------|-------|
| 局部濕潤時間 | 40 秒 | 90 秒 |
| 局部龜裂時間 | 75 秒 | 140 秒 |
| 砂土鬆散時間 | 無 | 335 秒 |

2.地下水層水量 1500mL—動力夯實工法落下高度不同對土壤液化的影響

乾砂 3 公分、濕砂 7 公分

| 落下高度 項目 | 15 公分 | 45 公分 |
|------------|-------|-------|
| 局部濕潤時間 | 45 秒 | 285 秒 |
| 局部龜裂時間 | 75 秒 | 無 |
| 砂土鬆散時間 | 無 | 無 |

六、研究七—土壤液化對捷運大安森林公園站影響

(一) 研究 7-1、2—大安公園站土壤液化探討與動力夯實工法對大安公園站液化防治

乾砂 2.5 公分、濕砂 7.5 公分

| 項目 \ 落下高度 | 尙未進行動力夯實工法 | 15 公分 | 25 公分 | 35 公分 | 45 公分 |
|-----------|------------|-------|-------|-------|-------|
| 局部液化時間 | 30 秒 | 無 | 無 | 無 | 無 |
| 局部濕潤時間 | 70 秒 | 無 | 95 秒 | 80 秒 | 65 秒 |
| 全部液化時間 | 120 秒 | 無 | 無 | 無 | 無 |

陸、討論

一、預備實驗

(一) 砂層飽和含水量的測量

1. 在砂層飽和含水量的實驗中我們可以得知，砂層單位面積飽和含水量隨厚度增加而增加。
2. 由數據中可得知，雖然單位面積的飽和含水量隨厚度漸增，但從關係圖我們可以得知，趨勢線趨近於平緩，因此我們推測，厚度越高，下方砂層受重力影響，砂土空隙變小，所以飽和含水量增加比率漸減。我們由單位體積飽和含水量與厚度關係圖可證明。
3. 實驗中，因重力關係砂土空隙變小，因此我們推測厚度相同時的砂層，距離砂層面越下方砂土單位體積飽和含水量越少，此實驗可應用於捷運大安森林公園站的砂層飽和含水量的多寡。

(二) 飽和砂層厚度對土壤液化影響

1. 乾砂厚度 2cm-飽和砂層厚度對土壤液化影響

- (1) 由乾砂層厚度 2cm，探討地下水層多寡對土壤液化關係圖可知，當濕砂層與乾砂層厚度比 0.5 以上即可發生表面液化，且厚度比越大，土壤液化速度越快。當厚度比達 2.5 時，直接發生表面液化，未有局部液化、表面龜裂現象，且液化速度很快，10 秒即達到土壤液化。
- (2) 由關係圖得知，當濕砂與乾砂層厚度比 0.5~1 土壤液化時間與厚度較平緩，厚度比 1~2 關係線較陡峭且呈線性關係。厚度比 2~2.5 關係線變平緩，但時間還是較厚度比小於 2 砂層短。

2. 乾砂厚度 4cm-飽和砂層厚度對土壤液化影響

- (1) 由乾砂層厚度 4cm，探討地下水層多寡對土壤液化關係圖可以得知，當濕砂層與乾砂層厚度比 1.25 才會發生表面液化。當厚度比只有 0.25 時不會發生土壤液化，只有表層龜裂。當厚度比在 0.5 以上級會發生土壤液化，而且厚度比越大，土壤液化速度越快。
- (2) 由關係圖可以得知，當濕砂層與乾砂層厚度比 0.25 時不會發生表面液化。厚度比 0.5 至 0.75 土壤液化時間與厚度較平緩，厚度比 0.75 至 1.25 關係線較陡峭且呈線性關係。
- (3) 由於只有四個數據，因此未來還需要增加厚度比 1.25 以上的數據，觀察是否有類似研究 4-1 的厚度比大於 2，液化時間與厚度關係線趨於平緩的現象。
- (4) 由乾砂層厚度 2cm 與 4cm 地下水量關係圖交相比對，在 4cm 實驗中濕砂層與乾砂層厚度比達 1.25 才會發生表面液化，但在 2cm 實驗中濕砂層與乾砂層厚度比 0.5 即可表面液化，因此推測兩實驗總重量不同，導致表面液化厚度比的不同，因此兩實驗無法交相比較。本研究可了解到若捷運大安森林公園站附近地下水位較高(濕砂厚度高)、表層較少(乾砂厚度低)便較容易發生液化的現象。

(三)地下水量多寡對土壤液化影響

- 1.由砂層總厚度相同(10cm)的地下水量多寡對土壤液化研究數據得知，在地下水含水量 1200mL 實驗中，我們無法觀察到砂層土壤液化現象，甚至沒有局部液化狀態發生；當水量增加至 1500mL 後，我們可以觀察局部液化與全部液化現象發生，隨著水量增加，土壤液化速度增加，甚至倍增。
- 2.我們資料收集時發現當雨季來臨時，地下水位會上升，乾季時地下水位會下降，因此我們由實驗可推論捷運大安森林公園站在雨季後發生的地震，會縮短同一砂層土壤液化的時間。

(四)土層中緻密砂土層對土壤液化的影響

1.不同材質緻密砂土層對土壤液化的影響

- (1) 由研究 5-2 的實驗我們可得知，濕砂層與乾砂層中間未隔緻密砂土層時最容易土壤液化。
- (2) 以彈珠當緻密砂土層，會延緩土壤液化效果，由於彈珠層只有一層，還是會發生土壤液化。
- (3) BB 彈製成的緻密砂層，由於 BB 彈之間的孔隙較大，密度也較輕，土層較不緊密且容易發生反轉現象，這與現實土壤液化不同。
- (4) 以緻密砂土層間隔濕砂與乾砂，則不易土壤液化。
- (5) 利用黏土製成緻密砂土層，沒有土壤液化，但有地層下陷狀況產生。

2.緻密砂土層排列整齊以及不整齊對土壤液化的影響

- (1) 由研究 5-3 緻密砂層排列整齊對土壤液化影響，我們可觀察到排列整齊較不易土壤液化，則排列不整齊較容易土壤液化，且兩者有顯著差異。
- (2) 從這實驗我們可以推論在土壤液化防治工程中，藉由規則排列的強化工程有機會延緩土壤液化發生。
- (3) 本研究討論的是大安捷運站是高度液化潛能區，如果土壤中有黏性較高的土質，能夠防治土壤液化的發生，且探討緻密砂土塊排列整齊和不整齊的差異，初步探討大安公園站土壤液化防治工程。

(五)動力夯實工法對土壤液化的影響

1.動力夯實工法對土層作用深度

- (1) 由此實驗測試中，我們發現蓋玻片下方必須有木板才可折斷，因此實驗設計：動力夯實工法對砂層一次重擊，可貫穿力砂層厚度的測量。若蓋玻片有折斷表示動力夯實工法可貫穿該砂層，若未折斷表示不可貫穿該砂層厚度或因作用力遞減而無法使蓋玻片折斷。
- (2) 由研究 6-1 可知，600.9gw 重物在高度 45cm 作用力可貫穿 2.5cm 砂層、35cm 與 25cm 作用力可貫穿 2.5cm 砂層、15cm 作用力可貫穿 1.5cm 砂層。高度越高則可貫穿砂層厚度越高。由於大安公園站屬於高度液化潛能區，因此上層乾砂厚度小，因此不需要測試重量超過 600gw、高度超過 45cm 的動力夯實工法。

2.動力夯實工法對土壤液化影響

- (1) 第一次預備實驗時，我們利用 13.8 公斤鐵塊進行動力夯實工法，發現到地下水會直接由砂層側邊溢出，因此我們推論進行動力夯實工法施作不可過重、過高，因此實驗改設定 600.9gw、高度由 45、35、25、15cm 依次落下。
- (2) 在此實驗中地下水量 1200mL 的乾砂層 4cm、濕砂層 6cm；地下水量 1500mL 的乾砂層 3cm、濕砂層 7cm，預備實驗前，我們原先預測經由動力夯實工法即可達到土壤液化防治，由實驗可以觀測到四組實驗接可以達到土壤液化效果，但是卻觀察到一組有砂層鬆散，另三組無此現象，我們推論動力夯實工法施作時，必須完全對乾土層作用，若施作未完全貫穿乾砂層，則施作後砂層會分三層：上層以施作動力夯實工法乾砂層、中層未施作動力夯實工法乾砂層、下層含水濕砂層。中層未施作動力

夯實工法因此砂層鬆軟，容易因地震搖晃而使砂層晃動，上層也因中層結構不穩定而產生砂土鬆散現象；但為什麼 600gw、高度 15cm 落下，作用厚度 1.5cm 更薄，卻沒有砂土鬆散現象，我們推測是因為動力夯實工法施作時，600gw、高度 15cm 落下夯實效果較弱，導致地下水滲出量較多，在實驗中我們也確實觀察到砂層表面濕潤現象，因為地下水滲出量較多的現象，所以此兩組沒有砂土鬆散。

| | 1200mL 乾砂 4 公分 | 1500mL 乾砂 3 公分 |
|----------------------------------|----------------|----------------|
| 600gw、高度 15cm 落下 (作用厚度 1.5cm) | 無砂土鬆散 | 無砂土鬆散 |
| 600gw、高度 45cm 落下 (作用厚度 2.5cm) | 335 秒砂土鬆散 | 無砂土鬆散 |

二、實驗：土壤液化對捷運大安公園站影響

(一)捷運大安公園站砂層模擬箱條件設定

由於大安森林公園北邊屬於高度液化潛能區，而且臺北捷運大安公園站恰好通過此區，因此我們選用 1500mL 水量、砂土深度 10cm、砂層中未有緻密岩層，進行臺北捷運大安公園站砂層模擬；600.9gw 重物由高度 45、35、25、15cm 落下，對大安公園站砂層模擬箱進行動力夯實工法。

(二)大安公園站施作動力夯實工法與否對液化防治

- 1.未施作動力夯實工法全部液化時間 120 秒比研究四 10cm 厚砂層、1500mL 水量全部液化時間 680 秒相差 5.67 倍，甚至比 1800mL 水量全部液化時間 170 秒相差 1.42 倍，是由於砂土箱中間捷運地下化工程，佔據的砂層空間，因此相同水量下，大安森林公園站砂層地下水位比尚未地下化砂層高，因此土壤液化發生時間較短。
- 2.在捷運大安森林公園砂層中，乾砂 2.5cm、濕砂 7.5cm，選用高度 15、25、35、45cm 進行動力夯實工法，作用深度為 1.5 ~ 2.5 公分，因此未影響濕砂層。比對未施作動力夯實工法砂層，發現施作後即可達到防治功效。另外施作砂層有局部濕潤現象，推測是由於經由動力夯實工法作用，砂層更緊密，因毛細作用導致水分較快上升而產生濕潤現象。

柒、結論

一、實驗

- (一)砂層飽和含水量隨砂層厚度增加而增加。
- (二)乾濕砂厚度比越小，土壤液化時間越短。
- (三)當雨季來臨時，地下水位會上升，乾季時，地下水位會下降，因此我們由實驗可推論捷運大安森林公園站在雨季後發生的地震，會縮短同一砂層土壤液化的時間。
- (四)砂質土壤中有黏性較高的土質且土壤排列緊密，能夠防治土壤液化的發生。
- (五)動力夯實工法施做效果過深，深達濕土層，水容易溢出。
- (六)動力夯實工法施做效果過淺，砂層分 3 層，則因中乾砂層不緻密，地震後表層砂土鬆軟。
- (七)動力夯實工法在適當條件下可防止土壤液化，表層土壤只有濕潤現象。

二、建議

- (一)施作動力夯實工法前對土層進行地質鑽探，確認土層特性與動力夯實工法施作深度
- (二)地表可鋪設連鎖磚或植草磚，讓施作動力夯實工法土層即使地震後局部濕潤，較易行走。

捌、參考資料及其他

- 一、李政寬，九十六年九月，地震工程科普教材開發九二一地震教育園區地震科學館落成，國家地震工程研究中心，第六十三期，九十六年九月出版。
- 二、洪家輝，地震大解剖，初版，臺北市和平東路二段 107 巷 25-1 號一樓，牛頓出版股份有限公司，p.110~115，民國八十八年十一月五日出版。
- 三、陳正興，地變與對策，財團法人中興工程科技發展基金會，P15-26，民國九十年十二月出版。
- 四、費立沅，臺北盆地的地質與防災，初版，新北市中和區 23568 華新街 109 巷 2 號，經濟部中央地質調查所，p.51.56.57.58，民國一百年十二月。
- 五、詹勳山，第六章動力夯實工法(Dynamic Compaction Method)，
http://civil.csu.edu.tw/aseip_folder/992_地盤改良_ch7_詹勳山老師.pdf
- 六、高雄市第四十屆科展，組別：國小組，作品名稱：地裂噴砂~土壤液化。
- 七、高雄市第四十屆科展，組別：國小組，作品名稱：土壤怎麼變臉了呢?~土壤液化的研究。
- 八、土壤液化實驗參考 1http://content.edu.tw/junior/earth/tn_gz/experment/exp895305c.htm
- 九、土壤液化實驗參考 2http://content.edu.tw/senior/earth/yl_ld/content/1-2/act.htm

【評語】 030508

優點：

實驗紀錄詳實。實驗內容雖多為已知的知識，但自行設計實驗材料與機具仍屬創意。

缺點：

各個實驗項目的來龍去脈沒有具結構性的說明，僅有一張放錯位置的探討架構圖，而且討論相當不易閱讀。

建議改進事項：

1. 研究動機段落內的「土壤液化探討架構圖」毫無相關敘述，應放在「研究過程中」並予以敘述。
2. 應蒐集大安森林公園的地質鑽井資料瞭解當地砂土層特性，再據以設計實驗將更具說服力。
3. 實驗砂土的粒徑大小相當重要，應有說明。
4. 「出現土壤液化」的定義將影響時間的估計，應闡明。
5. 「緻密砂土層」的定義不明，為何彈珠與切塊的濕砂也算？
6. 固定搖搖機振動頻率（3Hz？）雖簡化實驗內容，但失去最大加速度（震度）大小的影響，既然可調頻，應予考慮。
7. 22 及 23 頁圖的抬頭說明錯誤。