

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 地球科學科

030508

晃地自「陷」-地層下陷與土壤液化的變因探討

學校名稱：新竹縣立成功國民中學

| | |
|---|-----------------------------|
| 作者： 國二 黃丞廷 國二 胡博硯 國二 陳長湟 | 指導老師： 莊麗頤 康文耀 |
|---|-----------------------------|

關鍵詞：地層下陷、土壤液化、震度

晃地自「陷」-地層下陷與土壤液化的變因探討

摘 要

日前，竹北發生天坑事件，讓我們想探討影響地層下陷和土壤液化的變因。於是我們設計了水量、地質、地層分布、震度、地樁長度和不同建物等變因的實驗。研究發現，地質種類是影響地層下陷與土壤液化的最關鍵因素。粗砂層最容易地層下陷與土壤液化；上層是細砂的地層也較易液化。水位與震度越高影響越大，但二者也會交互影響，低水位要震度 6 級以上才會發生下陷；粗砂層則在中水位、震度 4 級以上就會下陷與液化。礫石層則只在 7 級以上才會下陷但不會液化。地樁較長者，房屋傾斜角度較小。竹北地質層易受強震而產生地層下陷、掏空及土壤液化，且軟腳蝦大樓在此地層中遇 7 級震度時，一震就倒，故地樁長度與避免形成軟弱層結構是建築安全最重要的考量。

壹、研究動機

2023 年 04 月 27 日，據聯合新聞網記載，竹北一處建案旁的路面突然發生塌陷，導致停在車格內的一輛特斯拉直接掉進坑洞；同年 10 月 17 日晚間又再次發生天坑塌陷事件，不禁令人產生疑問，為何路面會發生塌陷，產生天坑呢？此問題引起我們想進行專題研究的動機，老師要我們先查閱資料，從地科課本中得知，沉積岩依照沉積物顆粒大小，由粗粒至細粒可以區分為礫岩、砂岩及頁岩，因此我們猜測天坑出現可能和竹北的地層結構有關。從竹北市公所網站可知，竹北市土壤地質屬於第四紀沖積土質地，主要為砂質、盆土、壤質砂土等，而地層上方多為棕黃色沉泥質細砂及灰色沉泥質粘土，地層之下則多為卵礫石層。

綜合新聞資料發現，有學者指出，地質軟鬆，容易出現塌陷問題；土地含水量很高，更進一步加劇了地基穩定性的問題。土木結構技師拱祥生表示，竹北發生的第 3 次崩塌，是基地內水位不斷上升，又進一步將上層土壤浸泡鬆軟後，才導致地層塌陷(2023 年 10 月 18 日，聯合新聞網)。更有新聞表示，天坑不僅是工程施作不慎，更顯現了土壤液化高度潛勢區的危機(2023 年 5 月 19 日，Yahoo/新聞)。土壤液化是指類似砂質顆粒浮在水中的現象，使砂質土壤失去承載建築物重量的力量，導致建築物下陷或傾斜。因此，我們決定研究不同變因對地層下陷與土壤液化的影響，以避免地層下陷等天坑事件再次重演。

貳、研究目的

- 一、探討不同水量多寡對地層下陷與土壤液化的影響
- 二、探討不同地質對地層下陷與土壤液化的影響
- 三、探討不同地層分布對地層下陷與土壤液化的影響
- 四、探討不同震度下，對地層下陷與土壤液化的影響
- 五、探討獨棟房屋在不同地樁長度下，對建物傾斜的影響
- 六、探討軟腳蝦大樓在不同地樁長度下，對建物傾斜的影響
- 七、模擬兩種建物蓋在竹北地層結構中，遇到強震時對建物的影響

參、研究設備及器材

一、實驗材料

本研究之實驗材料是購自建材行的細砂 90 公斤、粗砂 90 公斤及一分石 30 公斤（如圖 1），做為模擬地層實驗用。

(一)細砂：平均粒徑 0.125mm~0.25mm

(二)粗砂：平均粒徑 0.5mm~1.0mm

(三)一分石：粒徑範圍為 10~30mm



圖 1 細砂(左)、粗砂(中)與一分石(右)
(研究者自行拍攝)

二、實驗器材

本研究之實驗器材如下表所示。

表 1 實驗器材一覽表

| 器材名稱 | 數量 | 器材名稱 | 數量 | 器材名稱 | 數量 |
|-----------|-----|-----------|-----|---------------------------|-----|
| 50ml 量筒 | 5 支 | F 型夾 | 4 支 | 方形塑膠盒 (26*16.5*11.5cm) | 5 個 |
| 100ml 量筒 | 3 支 | 鏟子 | 2 把 | 大型方盆 | 6 個 |
| 50ml 燒杯 | 1 個 | 計時器 | 1 台 | 黑晶爐 | 1 個 |
| 500ml 燒杯 | 2 個 | 量角器 | 2 支 | 加熱攪拌器 | 1 個 |
| 1000ml 燒杯 | 2 個 | 塑膠尺(15cm) | 1 把 | 吹風機 | 1 台 |
| 滴管 | 1 支 | 鐵尺(30cm) | 2 把 | 不鏽鋼鍋 | 2 個 |
| 60 目篩網 | 1 個 | 熱風機 | 1 台 | | |

三、研究設備與儀器

(一) 透明實驗箱

為了符合地震模擬器的大小，我們採用的是尺寸為 長 26cm×寬 16.5cm×高 11.5cm 的塑膠透明方形收納箱做為實驗箱，並於箱上畫上土壤裝載高度 7cm 及 10cm 的標示線。

(二) 地震模擬器

我們聯絡了學校附近的自造中心，借用了兩台能夠精準控制震度的地震模擬器，可以藉由轉動數值控制震度大小，再自製實驗箱固定底座，讓可以裝載不同砂土的塑膠盆放在上面來進行試驗。

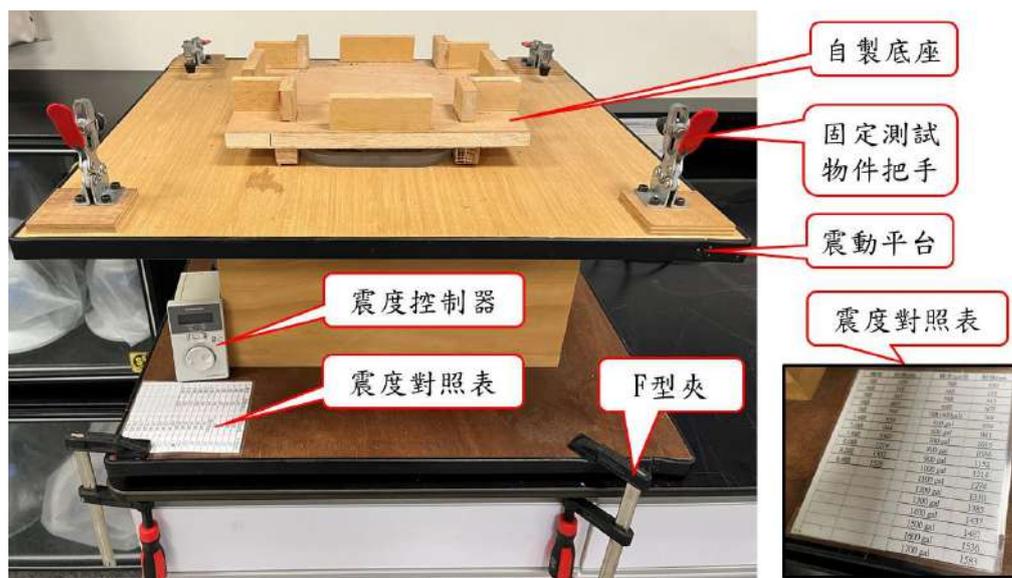


圖 2 加入自製底座的地震模擬器 (研究者自行拍攝繪製)

(三) 自製實驗箱固定底座

為了將我們實驗用的容器固定在地震模擬器上，我們使用 Tinkercad 建模 (圖 3~5)，再到生科教室製作了一個能夠將容器橫、豎固定在地震模擬器上方的底座 (圖 6~8)。

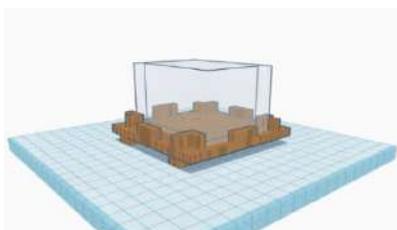


圖 3 自製固定底座設計圖



圖 4 自製固定底座設計圖

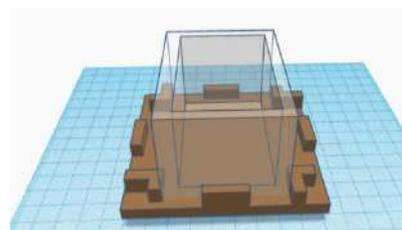


圖 5 自製固定底座設計圖

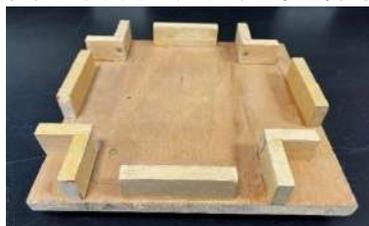


圖 6 底座完成成品俯視照



圖 7 底座完成成品側視照



圖 8 底座加實驗箱成品
(圖 3~8 皆由研究者自行繪製、拍攝)

(四) 自製房屋與地樁模型

為了模擬房屋在不同震度與不同地層結構下的影響，我們使用 Tinkercad 建模（圖 9~圖 12）並使用 3D 列印機製作了獨棟房屋與軟腳蝦大樓兩種模型，並裝上不同高度的木棍當作地樁進行實驗。



圖 9 電腦設計模型

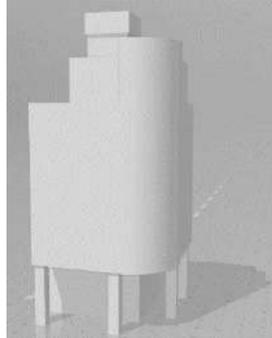


圖 10 軟腳蝦大樓 1

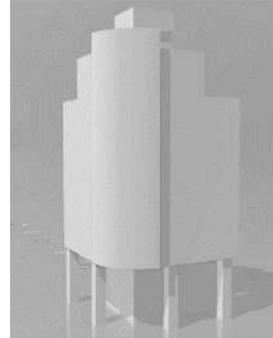


圖 11 軟腳蝦大樓 2

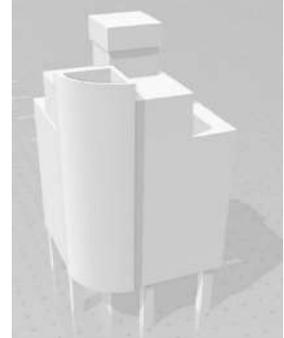


圖 12 軟腳蝦大樓 3

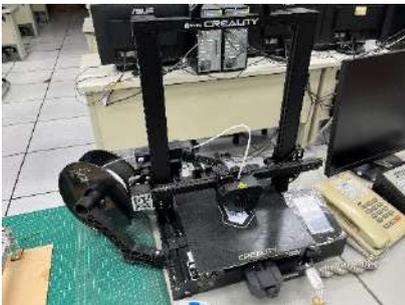


圖 13 啟動 3D 列印

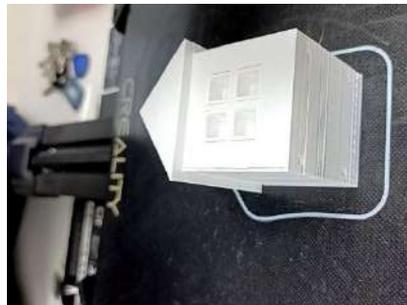


圖 14 列印獨棟房屋成品

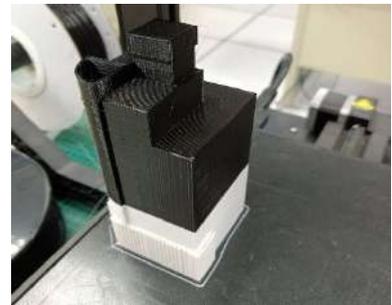


圖 15 列印軟腳蝦大樓



圖 16 加工製作成模型 1



圖 17 進行實驗過程 1



圖 18 進行實驗過程 2

(圖 9~18 皆由研究者自行繪製拍攝)

肆、研究過程或方法

一、文獻回顧

(一) 土壤液化

根據土壤液化潛勢查詢系統網站（2023）指出，土壤液化是指土壤在地震影響下，土壤性質轉變為類似液體的狀態。這樣的現象會使土壤的強度大幅下降，可能引發建物損壞等災害。

土壤液化是因為「砂質土壤」結合「高地下水位」的狀況，遇到一定強度的地震搖晃，導致類似砂質顆粒浮在水中的現象，因而使砂質土壤失去承載建築物重量的力量，造成建築物下陷或傾斜（取自：土壤液化潛勢查詢系統網站）。

產生土壤液化的三個條件包含：疏鬆的砂質土壤、高的地下水位以及夠大的地震。基於砂質土壤與地下水是構成土壤液化的其中兩項要件，故土壤液化較容易出現在河川下游的沖積平原及砂質海岸（取自：土壤液化潛勢查詢系統網站）。

地震震度到底要多大才會發生土壤液化呢？根據臺北市政府土壤液化潛勢查詢系統網站（2018）指出，實際發生的地震大小接近或超過設計地震力時（臺北市約為 5 級地震），才有土壤液化的可能。

（二）地震震度

本研究所使用的地震模擬器，已經過測試校正，並附上震度與震動頻率的數值對照表（如表 2），故本研究的震度設定，均按照模擬器上所呈現的對照表來調整數值進行實驗。

此外，新制地震分級四級以下採用PGA（加速度做區分）；四級以上採用PGV（加速度+持續時間做區分）我們的實驗模擬時，震動平台是一直持續搖晃，所以，我們的實驗仍採用舊制比較有對照參考的價值。

表 2 地震震度表與震動頻率對照表

| 震度 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7.4 | 7.6 | 7.8 | 8 | 8.2 | 8.4 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| rpm | 109 | 192 | 343 | 607 | 768 | 859 | 964 | 1082 | 1214 | 1362 | 1528 |

（三）竹北地層結構

根據網路論壇裡（2023 年 05 月 14 日）刊出的從環保署公開資料取得的竹北地區的大學段地質採樣圖，即本次出現天坑地段的地質採樣圖（圖 19）所示，這些地質層，都是 1~3m 地表覆土加上 8~12m 卵礫石夾砂土，再往下就是硬砂岩、泥岩了。

（四）軟腳蝦大樓

當建築物某一層樓相較於其他樓層結構較軟弱，形成軟弱層，再發生地震時，能量易集中在該層樓，造成該層樓的傾斜、倒塌，進而導致其他層樓塌陷的大樓建築，稱為軟腳蝦大樓（圖 20）。若大樓有某一樓層過度挑高卻沒有支撐、支撐牆被破壞或是內牆面不當拆除、頂樓加蓋、設計不良的騎樓等情形，都容易發生軟弱層而形成軟腳蝦大樓。

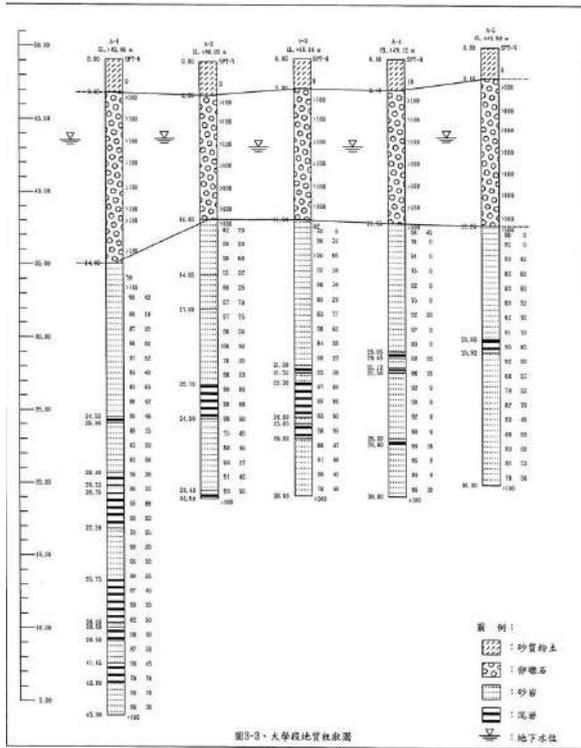


圖 19 竹北大學段地質採樣圖

(資料來源: 關於竹北的地質 (2023 年 05 月 14 日)。
Mobile01 討論群組。)

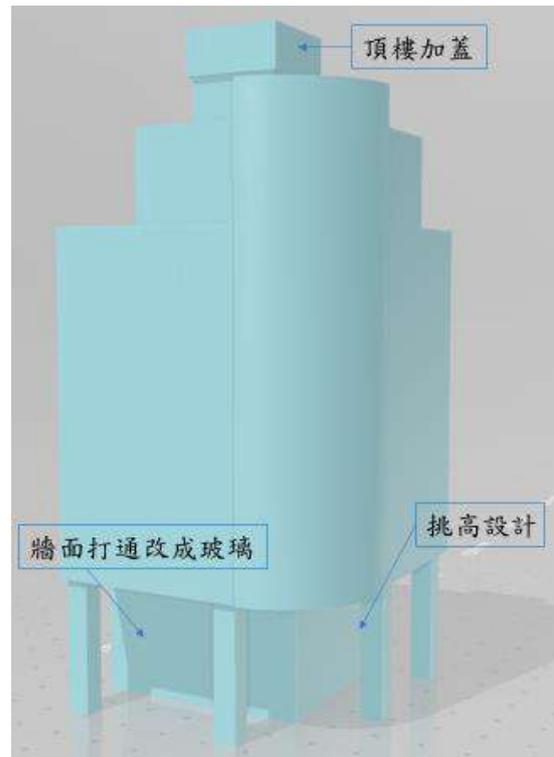


圖 20 軟腳蝦大樓示意圖 (研究者自行繪製)

二、研究方法

(一) **砂土量**部分，由於實驗箱的大小為長26cm×寬16.5cm×高11.5cm，因此我們把倒入砂土的量設定為3000 cm³、7cm高。我們採用細砂模擬細砂層 (圖21)、粗砂模擬粗砂層 (圖22) 及一分石模擬礫石層 (圖23)。

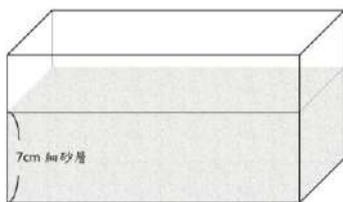


圖21 模擬的細砂層
(研究者自行繪製)

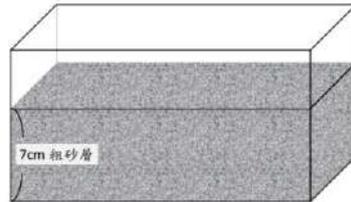


圖22 模擬的粗砂層
(研究者自行繪製)



圖23 模擬的礫石層
(研究者自行繪製)

(二) 為了模擬**兩種地質結構**組成的地層部分，則將兩種地層各設置成3.5cm高，以模擬不同地層分布的情形 (如圖24~圖26)。



圖24 上層細砂下層粗砂
(研究者自行繪製)

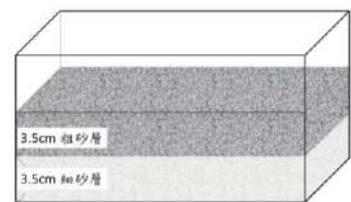


圖25 上層粗砂下層細砂
(研究者自行繪製)



圖26 上層細砂下層礫石
(研究者自行繪製)

(三) **水量**部分，由於 3000cm^3 的砂土加到 800ml 的水時，土壤的含水量會達到飽和狀態，及土壤表層不需搖晃便會直接溢出水，故水量實驗設定為 200ml (0.8cm 高)、 400ml (1.25cm 高)、 600ml (1.7cm 高)，共三種水量來進行實驗（如圖27～圖29，研究者自行繪製）。



圖27 200ml水量的水位
(研究者自行繪製)

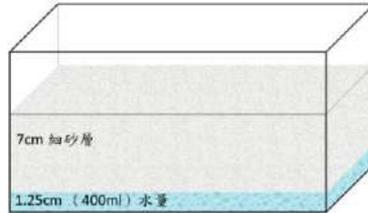


圖28 400ml水量的水位
(研究者自行繪製)



圖29 600ml水量的水位
(研究者自行繪製)

(四) **震度**部分，根據交通部中央氣象局地震震度分級表的資料：「震度4級的屋內情形房屋搖晃劇烈；屋外情形則少數建築物牆磚可能剝落，小範圍山區可能發生落石」，可見震度4級以上才會對房屋以及屋外的地貌變化有影響，因此我們實驗的震度依序為震度4、震度5、震度6和震度7共四種震度。由於地震時間很難長達2分鐘，故**震動搖晃時間**則統一設定為**2分鐘**。

(五) **砂土含水量**控制部分，每次實驗前，必須確保倒入實驗箱的砂土為全乾的砂土，因此會將砂土倒入不鏽鋼鍋中，放置加熱攪拌器或黑晶爐上攪拌並**持續加熱直至砂土全乾**，才倒入實驗箱進行實驗。

(六) 按等比例**模擬竹北大學段地層**方式：為模擬竹北發生天坑之地段之地質來進行實驗，我們利用竹北大學段地柱狀圖（圖19）的各地層與水位的高度比例換算成實驗箱的比例後，再進行實驗。

1. 首先算出5樣區砂質土與礫石層的平均高度比例，再換算成總高度為 10cm 的比例：

$$\text{砂質土 } (2.25+2.3+2+2.1+2.1)/5=2.15 \quad ; \quad \text{卵礫石 } (11.75+8.55+9.01+9.15+10.16)/5=9.72$$
$$2.15 : 9.72 = 215 : 972 = 1:4.52 = \mathbf{1.82:8.18}$$

2. 最後計算水位高度的比例：

$$\text{水位高度 } (7.5+4.35+4.51+4.75+5.75)/5=26.86/5=5.372$$
$$2.15:5.37=1:2.5=1.82:\mathbf{4.55}$$

故實驗箱中，上層細砂填 1.8cm、下層礫石填 8.2cm，水位 4.6cm 高，來進行實驗。

(七) **地樁**長度部分，配合兩種地質結構高度設計成**短地樁3.5cm**和**長地樁7.0cm**高。但模擬等比例的竹北地層實驗中，為避免受到地層介面的影響，故將兩種建物**地樁設定為5cm**。

三、研究架構圖

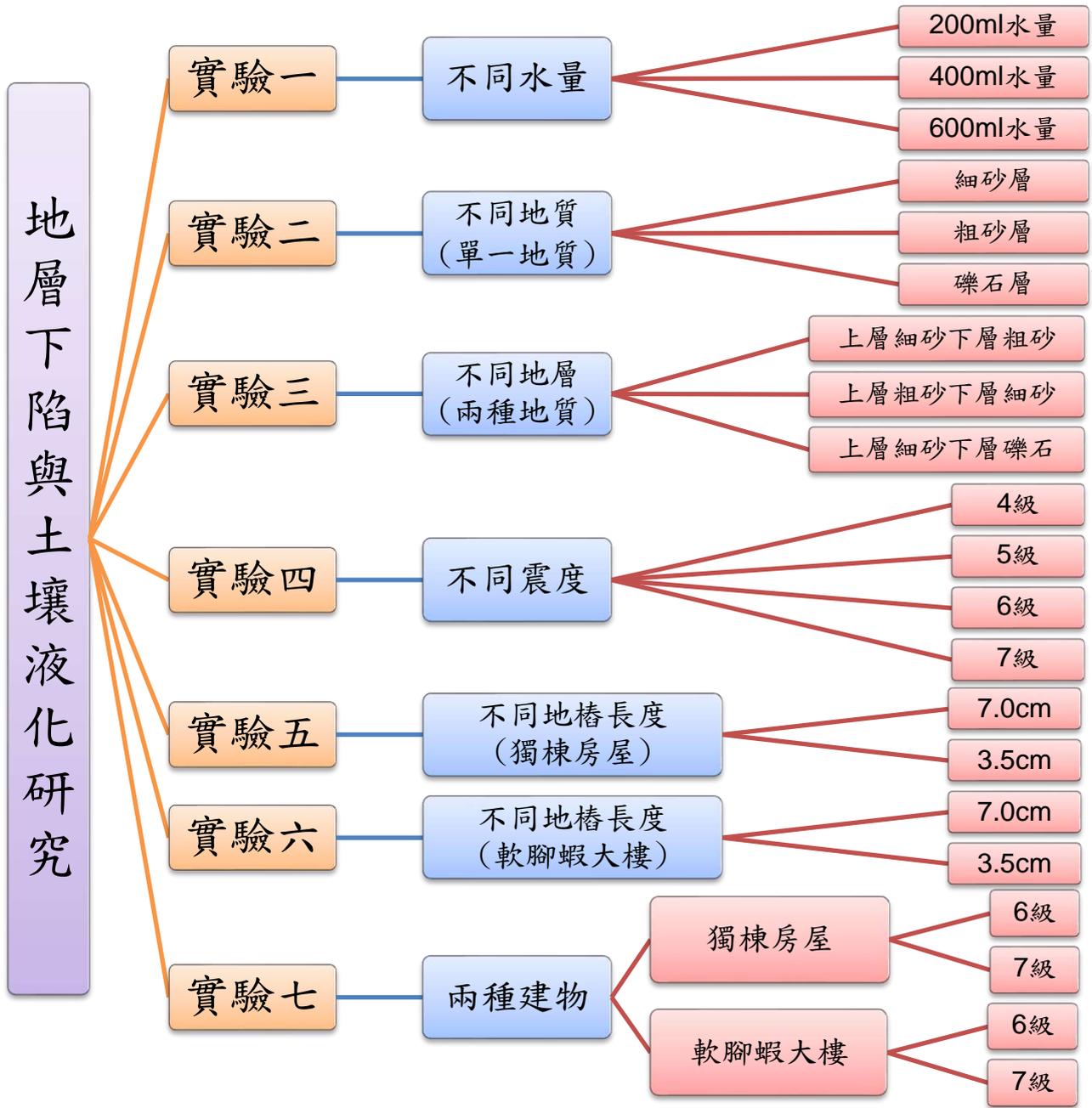


圖 30 研究架構圖 (研究者自行繪製)

四、實驗設計

(一) 探討不同水量多寡對地層下陷與土壤液化的影響

操縱變因：水量，分為 200ml(0.8cm 高)、400ml(1.25cm 高)、600ml(1.7cm 高)。

(二) 探討不同地質下，對地層下陷與土壤液化的影響

操縱變因：不同地質，分為粗砂、細砂、礫石。

(三) 探討不同地層分布對地層下陷與土壤液化的影響

操縱變因：不同地層，上細砂+下粗砂、上粗砂+下細砂、上細砂+下礫石等結構。

(四) 探討不同震度下，對地層下陷與土壤液化的影響

操縱變因：震度(4 級、5 級、6 級、7 級)

(五) 探討獨棟房屋在不同地樁長度下，對建物傾斜的影響

操縱變因：地樁的長度 (7.0cm、3.5cm)

(六) 探討軟腳蝦大樓在不同地樁長度下，對建物傾斜的影響

操縱變因：地樁的長度 (7.0cm、3.5cm)

(七) 模擬兩種建物蓋在竹北地層結構中，遇到強震時對建物的影響

操縱變因：不同建物 (獨棟房屋及軟腳蝦大樓) 及地震震度 (6 級、7 級)

四、實驗步驟：

(一) 實驗一～實驗四的實驗步驟如下：

1. 分別將 200ml(0.8cm 高)、400ml(1.3cm 高)、600ml(1.7cm 高)水量倒入實驗盒中。
2. 將全乾的砂土均勻倒入盒中，直至 7cm 高(3000 立方公分)，壓實壓平整後備用。
3. 將震度分別調整至 4 級、5 級、6 級、7 級備用。
4. 將置備好水位及地層類型的實驗盒放在地震模擬器上，計時搖晃 2 分鐘後停止。
5. 量測水位上升高度、土壤最低與最高高度變化、記錄地層是否下陷、土壤是否液化。

(二) 實驗五～實驗六的實驗步驟如下：

1. 步驟如實驗一～四的實驗步驟 1～步驟 4，唯在步驟 2 時，分別插入 7cm 及 3.5cm 地樁的獨棟房屋及軟腳蝦大樓，再將砂土增加並壓實壓平整至 7cm 高備用。
2. 步驟 5，量測水位變化、土壤高度變化、房屋傾斜角度、地層下陷及土壤液化情形。

(三) 實驗七的實驗步驟如下：

1. 設置上層細砂 1.8cm、下層礫石 8.2cm，水位 4.6cm 高的等比例竹北地層備用。
3. 分別插入地樁 5cm 的獨棟房屋及軟腳蝦大樓備用。
4. 將震度分別調整至 6 級、7 級，計時搖晃 2 分鐘後停止。
5. 量測水位變化、土壤高度變化、地層下陷、房屋傾斜角度與倒塌情形。

以下是實驗步驟示意圖 (如圖 31~36)：



圖 31 步驟 1 設置水量



圖 32 步驟 2 設置地層



圖 33 步驟 3 插入房屋



圖 34 步驟 4 調整震度

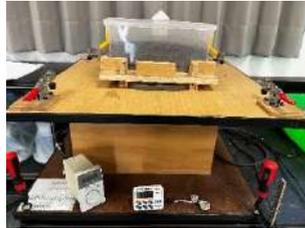


圖 35 步驟 5 搖晃 2 分鐘



圖 36 步驟 6 測量與記錄
(圖 31~36 由研究者自行拍攝)

伍、研究結果

一、探討不同水量多寡對地層下陷與土壤液化的影響

(一) 細砂層在不同水量下的實驗記錄

表 3 細砂層在震度為 4~7 級搖晃 2 分鐘的不同水量實驗記錄表(N=3)

| 地質 | 震度 | 水量 (ml) | 水位變化 (cm) | 標準差 | 土壤高度變化 (cm) | 標準差 | 土壤是否凹陷 | 是否土壤液化 |
|-----|-------|---------|-----------|-------|-------------|-----|--------|--------|
| 細砂層 | 4 級 | 200ml | 0.47 | 0.377 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 1.77 | 0.386 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 3.22 | 0.283 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | 5 級 | 200ml | 2.70 | 0.216 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 2.53 | 0.205 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 4.34 | 0.125 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | 6 級 | 200ml | 3.20 | 0.852 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 3.43 | 0.478 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 5.17 | 0.189 | 0.00 | 0 | 否 | 67%液化 |
| 7 級 | 200ml | 2.37 | 0.125 | -0.50 | 0.082 | 是 | 否 | |
| | 400ml | 3.63 | 0.591 | -1.30 | 0.648 | 是 | 否 | |
| | 600ml | 5.30 | 0 | -0.60 | 0.450 | 是 | 100%液化 | |

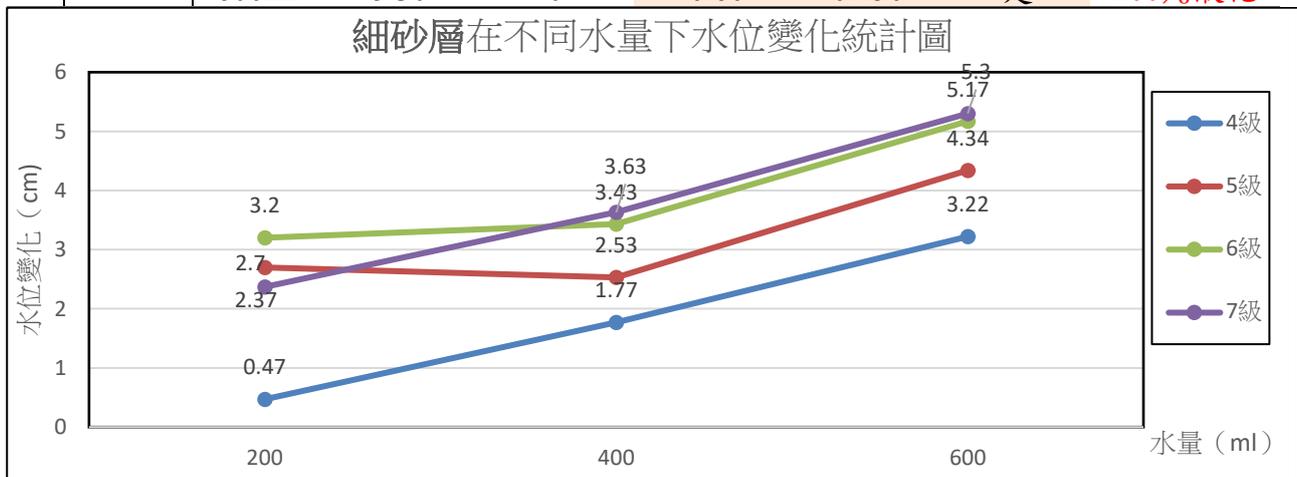


圖 37 細砂層在不同水量下水位變化統計圖

(二) 細砂層在不同水量下的實驗結果

1. 地質為細砂層、震度為 4 級搖晃 2 分鐘的組別：

(1) 水量 0.8cm 高時，水位上升 0.47cm；1.25cm 高時上升 1.77cm；1.7cm 高時上升 3.22cm。

(2) 三種高度水位的地層未下陷，土壤也未液化。

2. 地質為細砂層、震度為 5 級搖晃 2 分鐘的組別：

(1) 三種高度水位，實驗後水位平均上升 2.70cm、2.53cm 和 4.34cm。

(2) 三種高度水位，實驗後，土壤皆未發生液化，地層也未下陷。

3. 地質為細砂層、震度為 6 級搖晃 2 分鐘的組別：

(1) 0.8cm 和 1.25 cm 高的水量，地層未下陷，土壤也未發生液化。

(2) 1.7cm 高的水量，土壤液化機率 67%，地層未下陷，水位平均上升 5.17cm。

4. 地質為細砂層、震度為 7 級搖晃 2 分鐘的組別：

(1) 0.8cm 高的水量，水位上升 2.37cm，地層下陷 0.5cm，土壤未液化。

(2) 1.25 cm 高的水量，水位上升 3.63cm，地層下陷 1.3cm，土壤未液化。

(3) 1.7cm 高的水量，水位上升 5.3cm，地層下陷 0.6cm，土壤液化機率 100%。

小結：

由此可知，細砂層含水量越多，地下水位越高時，地震後的地下水位的變化也越大。產生地層下陷的現象必需是震度 7 時，才會出現。細砂層則在含水量為 20% (600ml/3000cm³)，震度 6 級時，有 67% 的機率發生土壤液化；在震度 7 級時，土壤液化的機率為 100%。

(三)粗砂層在不同水量下的實驗記錄

表 4 粗砂層在震度為 4~7 級搖晃 2 分鐘的不同水量實驗記錄表(N=3)

| 地質 | 震度 | 水量 (ml) | 水位變化 (cm) | 標準差 | 土壤高度變化 (cm) | 標準差 | 土壤是否凹陷 | 是否土壤液化 |
|-----|-----|---------|-----------|-------|-------------|-------|--------|--------|
| 粗砂層 | 4 級 | 200ml | 3.53 | 1.297 | 0.00 | 0.573 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 5.63 | 0.047 | -0.33 | 0.000 | 是 | 33%液化 |
| | | 600ml | 4.77 | 0.411 | -0.67 | 0.471 | 是 | 67%液化 |
| | 5 級 | 200ml | 2.93 | 1.181 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 5.50 | 0.283 | -1.47 | 0.340 | 是 | 100%液化 |
| | | 600ml | 5.30 | 0.000 | -0.47 | 0.205 | 是 | 100%液化 |
| | 6 級 | 200ml | 5.77 | 0.340 | -0.23 | 0.450 | 是 | 67%液化 |
| | | 400ml | 5.30 | 0.294 | -0.57 | 0.330 | 是 | 100%液化 |
| | | 600ml | 5.30 | 0.000 | -1.07 | 0.205 | 是 | 100%液化 |
| | 7 級 | 200ml | 1.87 | 0.330 | -1.20 | 0.163 | 是 | 否 |
| | | 400ml | 4.10 | 0.993 | -2.00 | 0.163 | 是 | 33%液化 |
| | | 600ml | 5.30 | 0.000 | -0.83 | 0.713 | 是 | 100%液化 |

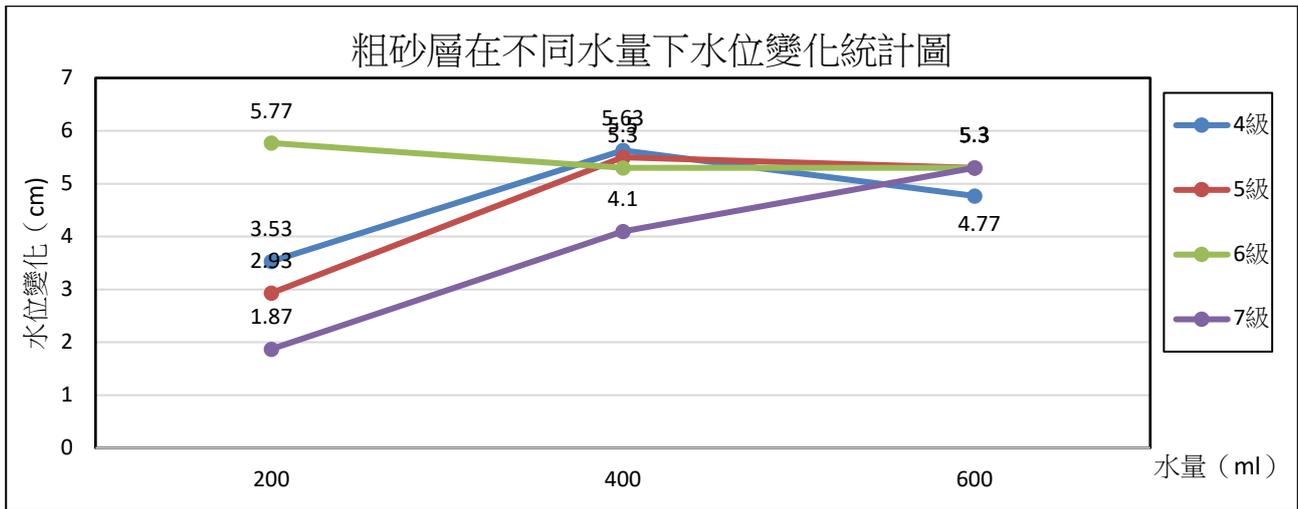


圖 38 粗砂層在不同水量下水位變化統計圖

(四) 粗砂層在不同水量下的實驗結果

1. 地質為粗砂層、震度為 4 級搖晃 2 分鐘的組別：

- (1) 水量 0.8cm 高，土壤皆未液化，地層未下陷，水位平均上升 3.53cm。
- (2) 水量 1.25 cm 高，土壤液化機率 33%，地層下陷 0.33cm，水位平均上升 5.63cm。
- (3) 水量 1.7cm 高，土壤液化機率 67%，地層下陷 0.67cm，水位平均上升 4.77cm。

2. 地質為粗砂層、震度為 5 級搖晃 2 分鐘的組別：

- (1) 水量 0.8cm 高，土壤皆未液化，地層未下陷，水位平均上升 2.93cm。
- (2) 水量 1.25 cm 高，土壤液化機率 100%，地層下陷 1.47cm，水位平均上升 5.5cm。
- (3) 水量 1.7cm 高，土壤液化機率 100%，地層下陷 0.47cm，水位平均上升 5.3cm。

3. 地質為粗砂層、震度為 6 級搖晃 2 分鐘的組別：

- (1) 水量 0.8cm 高，有 67%的機率土壤液化，地層下陷 0.23cm，水位上升 5.77cm。
- (2) 水量 1.25 cm 高，土壤液化機率 100%，地層下陷 0.57cm，水位上升 5.3cm。
- (3) 水量 1.7cm 高，土壤液化機率 100%，地層下陷 1.07cm，水位上升 5.3cm。

4. 地質為粗砂層、震度為 7 級搖晃 2 分鐘的組別：

- (1) 水量 0.8cm 高，土壤皆未液化，地層未下陷，水位平均上升 1.87cm。
- (2) 水量 1.25 cm 高，土壤液化機率 33%，地層下陷 2cm，水位上升 4.1cm。
- (3) 水量 1.7cm 高，土壤液化機率 100%，地層下陷 1.87cm，水位上升 5.3cm。

小結：

由此可知，粗砂層含水量越多，地下水水位越高時，地震後的地下水位的變化也越大。產

生地層下陷的現象是在震度 5 時開始出現，且粗砂層含水量為 20% (600ml/3000cm³)、震度 4 級時，土壤液化機率為 67%；震度 5 級以上時，液化機率為 100%，整體而言，粗砂層比細砂層更易液化。

(五) 礫石層在不同水量下的實驗記錄

表 5 礫石層在震度為 4~7 級搖晃 2 分鐘的不同水量實驗記錄表(N=3)

| 地質 | 震度 | 水量 (ml) | 水位變化 (cm) | 標準差 | 土壤高度變化(cm) | 標準差 | 土壤是否凹陷 | 是否土壤液化 |
|-----|-----|---------|-----------|-------|------------|-------|--------|--------|
| 礫石層 | 4 級 | 200ml | 0.93 | 0.094 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 1.00 | 0.082 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 0.90 | 0.141 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | 5 級 | 200ml | 0.70 | 0.141 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 0.70 | 0.216 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 0.80 | 0.000 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | 6 級 | 200ml | 1.00 | 0.082 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 1.00 | 0.141 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 2.07 | 0.450 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | 7 級 | 200ml | 1.50 | 0.245 | -1.57 | 0.330 | 是 | 否 |
| | | 400ml | 1.80 | 0.082 | -0.57 | 0.634 | 兩側凹陷 | 否 |
| | | 600ml | 1.77 | 0.340 | -0.73 | 0.573 | 兩側凹陷 | 否 |

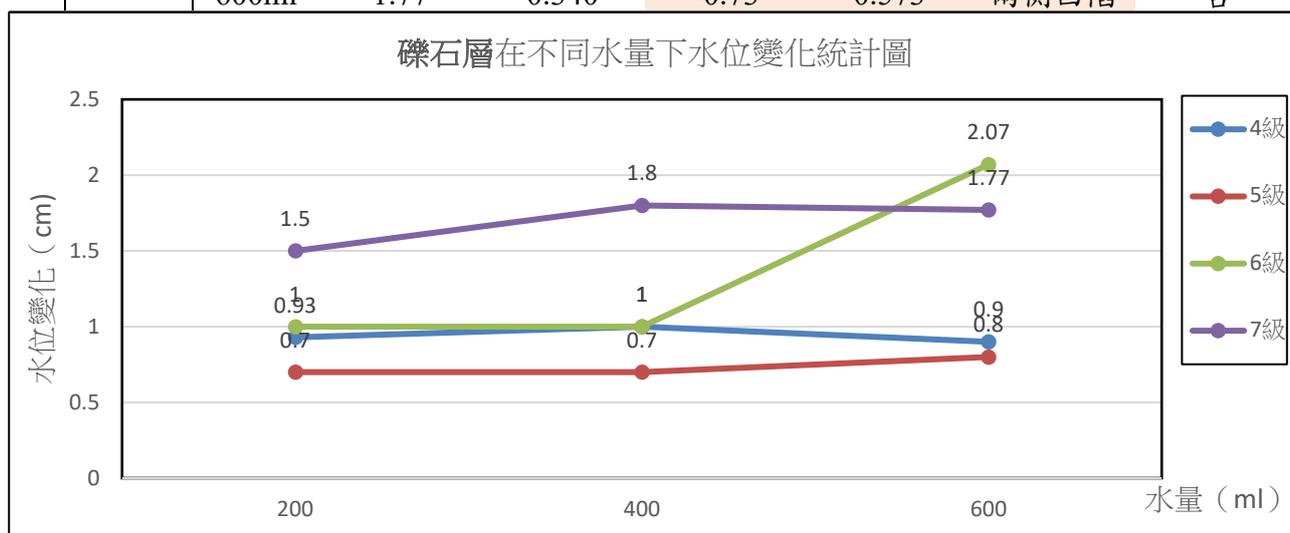


圖 39 礫石層在不同水量下水位變化統計圖

(六) 礫石層在不同水量下的實驗結果

由上表可知，礫石層的水量需在 1.7cm 高，震度 6 級以上，水位才有明顯變化。而無論水量多寡都不會造成礫石層液化；但震度七級時，地層會下陷 0.73cm，水位上升 0.93cm。

二、探討不同地質對地層下陷與土壤液化的影響

(一) 實驗記錄

本實驗之記錄同表 3~表 5 所示。依據實驗記錄所整理之統計圖如下：

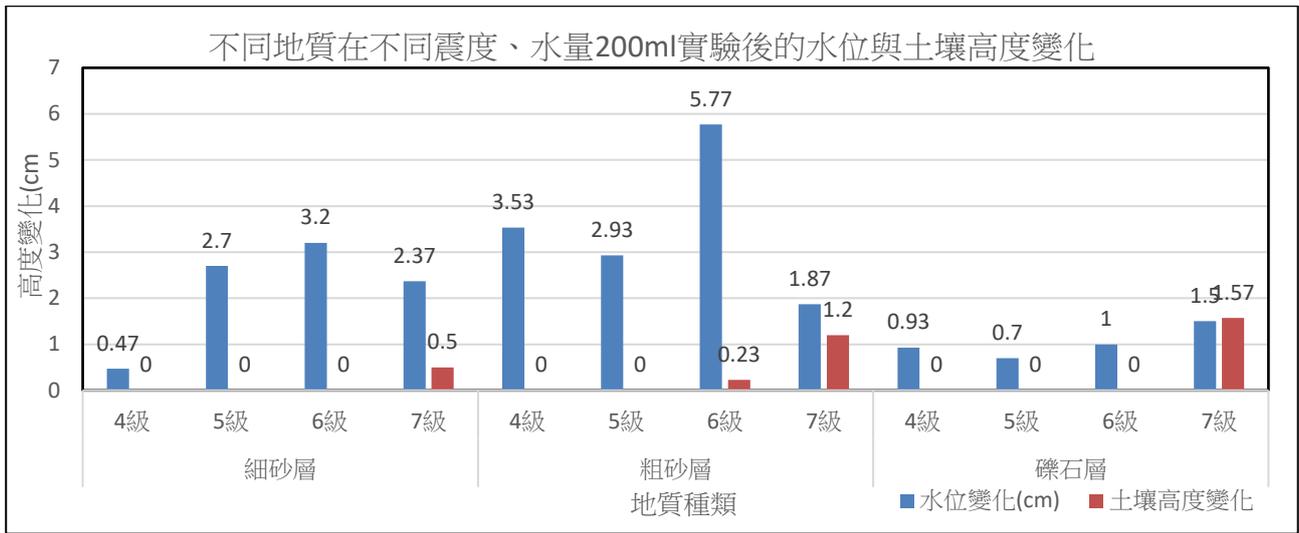


圖 40 不同地質在水量 200ml 實驗後的水位與土壤高度變化統計圖

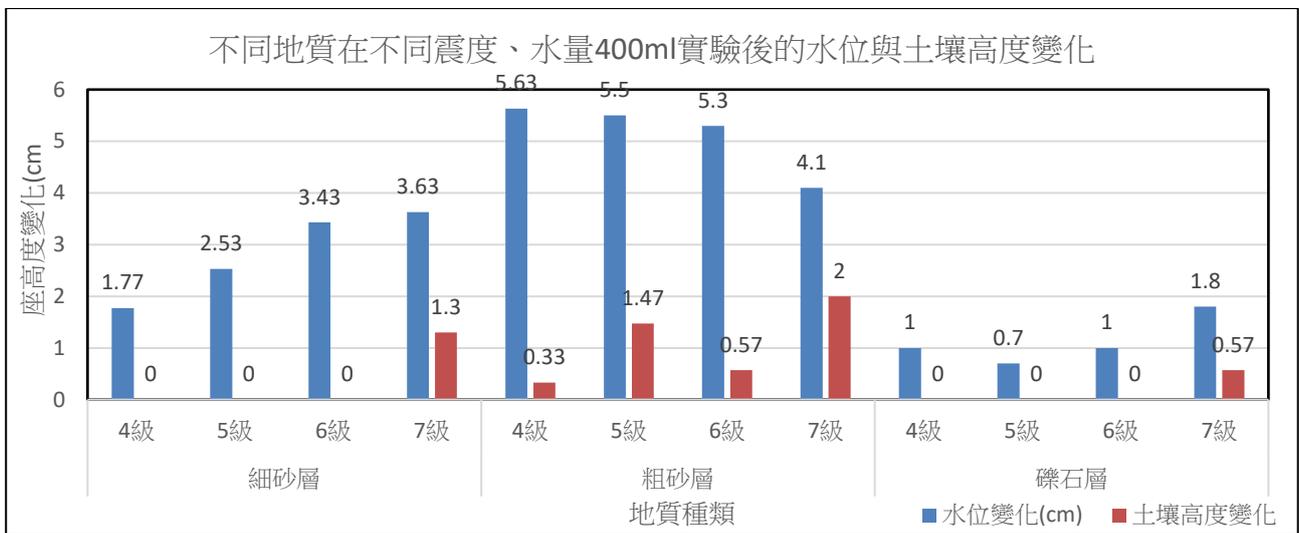


圖 41 不同地質在水量 400ml 實驗後的水位與土壤高度變化統計圖

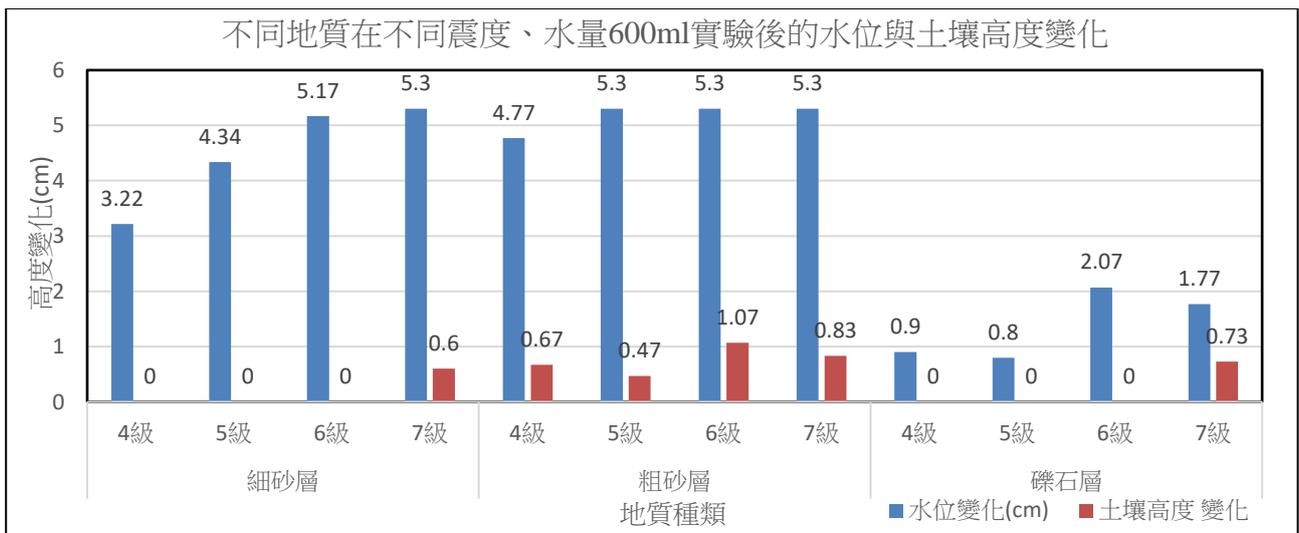


圖 42 不同地質在水量 600ml 實驗後的水位與土壤高度變化統計圖

(二) 實驗結果

1. 粗砂層明顯比細砂層容易產生地層下陷與土壤液化現象；礫石層則完全沒有液化的情形，但震度 7 級時，地層有明顯兩側下陷、中央隆起的情形。
2. 細砂層要到震度 6 級以上且水量達 600ml，才能發生土壤液化現象；而粗砂層在震度 4 時就開始有土壤液化的情形。
3. 震度 7 時，細砂與粗砂層則都會產生地層下陷，土壤液化則是細砂層在水量達 600ml、粗砂在 400ml 會液化。
4. 土壤液化程度：粗砂層>細砂層>礫石層(完全不會液化)。
5. 地層下陷程度：粗砂層>礫石層>細砂層。
6. 水位變化程度：粗砂層>細砂層>礫石層。

三、探討不同地層分布對地層下陷與土壤液化的影響

(一)實驗記錄

表 6 不同地層分布在水量 600ml、震度為 6 級搖晃 2 分鐘的實驗記錄表(N=3)

| 不同地層 | 組別 | 水位變化 (cm) | 標準差 | 土壤高度變化 (cm) | 標準差 | 土壤是否凹陷 | 是否土壤液化 |
|-------------------|-------|-----------|-------|-------------|-------|--------|--------|
| 上層細砂 + 下層粗砂 | 第 1 次 | 5.00 | -- | -1.4 | -- | 是 | 是 |
| | 第 2 次 | 5.40 | -- | -0.8 | -- | 是 | 是 |
| | 第 3 次 | 5.30 | -- | -0.2 | -- | 是 | 是 |
| | 平均 | 5.23 | 0.170 | -0.80 | 0.490 | 是 | 100%液化 |
| 上層粗砂 + 下層細砂 | 第 1 次 | 5.20 | -- | -0.60 | -- | 是 | 是 |
| | 第 2 次 | 3.50 | -- | -1.10 | -- | 是 | 否 |
| | 第 3 次 | 5.10 | -- | -1.80 | -- | 是 | 是 |
| | 平均 | 4.60 | 0.779 | -1.17 | 0.492 | 是 | 67%液化 |
| 上層細砂 + 下層礫石 | 第 1 次 | 5.10 | -- | -1.50 | -- | 是 | 是 |
| | 第 2 次 | 5.30 | -- | -0.10 | -- | 是 | 是 |
| | 第 3 次 | 5.30 | -- | -0.90 | -- | 是 | 是 |
| | 平均 | 5.23 | 0.094 | -1.13 | 0.573 | 是 | 100%液化 |

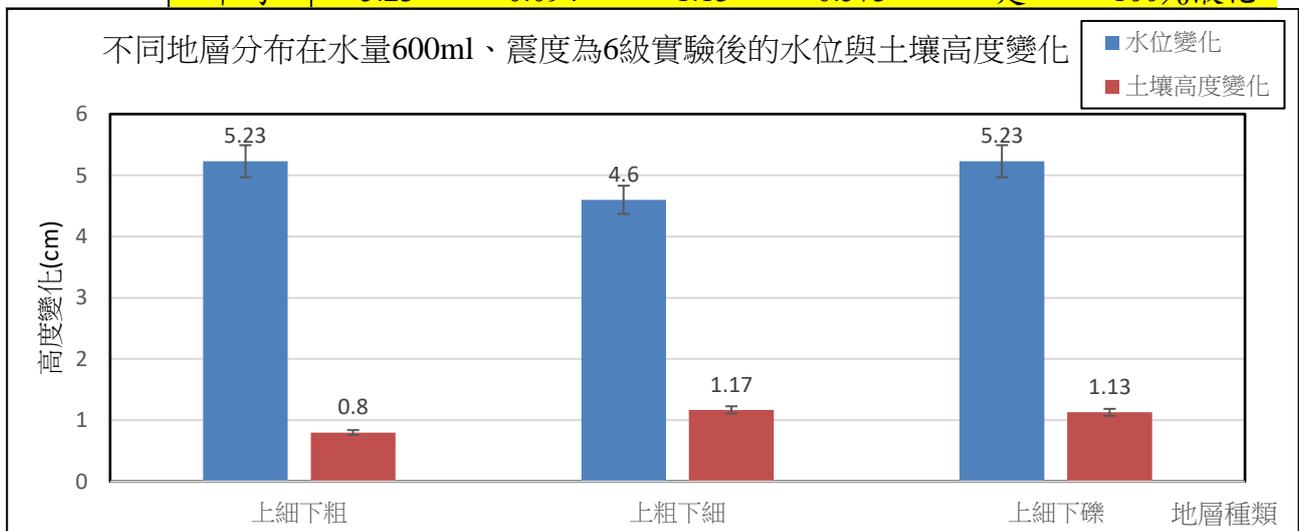


圖 43 不同地層分布在水量 600ml、震度為 6 級實驗後的水位與土壤高度變化統計圖

(二)實驗結果

由上表可知：

1. 不同地質所組成的地層中，上層是細砂的地層比較容易液化。
2. 上層是細砂，則不論下層是粗砂或細砂，震度為 6 級搖晃 2 分鐘的液化機率都是 100%。

四、探討不同震度對地層下陷與土壤液化的影響

(一) 細砂層、粗砂層及礫石層在不同震度下的實驗記錄

表 7 細砂層、粗砂層及礫石層在不同搖晃震度下的實驗記錄表(N=3)

| 震度 | 地質 | 水量 | 搖晃後水高(cm) | 水位變化(cm) | 搖晃後土高 | 土壤高度變化 | 土壤是否凹陷 | 是否土壤液化 |
|-----|-----|-------|-----------|----------|-------|--------|--------|--------|
| 4 級 | 細砂層 | 200ml | 1.27 | 0.47 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 3.07 | 1.77 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 4.90 | 3.22 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | 粗砂層 | 200ml | 4.33 | 3.53 | 7.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 6.93 | 5.63 | 6.67 | -0.33 | 是 | 33%液化 |
| | | 600ml | 6.47 | 4.77 | 6.33 | -0.67 | 是 | 67%液化 |
| | 礫石層 | 200ml | 1.73 | 0.93 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 2.30 | 1.00 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 2.60 | 0.90 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| 5 級 | 細砂層 | 200ml | 3.50 | 2.70 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 3.83 | 2.53 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 5.93 | 4.34 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | 粗砂層 | 200ml | 3.73 | 2.93 | 7.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 6.80 | 5.50 | 5.53 | -1.47 | 是 | 100%液化 |
| | | 600ml | 7.00 | 5.30 | 6.53 | -0.47 | 是 | 100%液化 |
| | 礫石層 | 200ml | 1.50 | 0.70 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 2.00 | 0.70 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 2.50 | 0.80 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| 6 級 | 細砂層 | 200ml | 4.00 | 3.20 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 4.73 | 3.43 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 6.87 | 5.17 | 7.00 | 0.00 | 否 | 67%液化 |
| | 粗砂層 | 200ml | 6.57 | 5.77 | 6.77 | -0.23 | 是 | 67%液化 |
| | | 400ml | 6.60 | 5.30 | 6.43 | -0.57 | 是 | 100%液化 |
| | | 600ml | 7.00 | 5.30 | 5.93 | -1.07 | 是 | 100%液化 |
| | 礫石層 | 200ml | 1.80 | 1.00 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 2.30 | 1.00 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 3.77 | 2.07 | 7.00 | 0.00 | 否 | 否 |
| 7 級 | 細砂層 | 200ml | 3.17 | 2.37 | 6.50 | -0.50 | 是 | 否 |
| | | 400ml | 4.97 | 3.63 | 5.70 | -1.30 | 是 | 否 |
| | | 600ml | 7.00 | 5.30 | 6.37 | -0.60 | 是 | 100%液化 |
| | 粗砂層 | 200ml | 2.67 | 1.87 | 5.80 | -1.20 | 是 | 否 |
| | | 400ml | 5.87 | 4.10 | 5.00 | -2.00 | 兩側凹陷 | 33%液化 |
| | | 600ml | 7.00 | 5.30 | 6.17 | -0.83 | 是 | 100%液化 |
| | 礫石層 | 200ml | 2.30 | 1.50 | 5.43 | -1.57 | 是 | 否 |
| | | 400ml | 3.06 | 1.80 | 6.43 | -0.57 | 兩側凹陷 | 否 |
| | | 600ml | 3.47 | 1.77 | 6.27 | -0.73 | 兩側凹陷 | 否 |

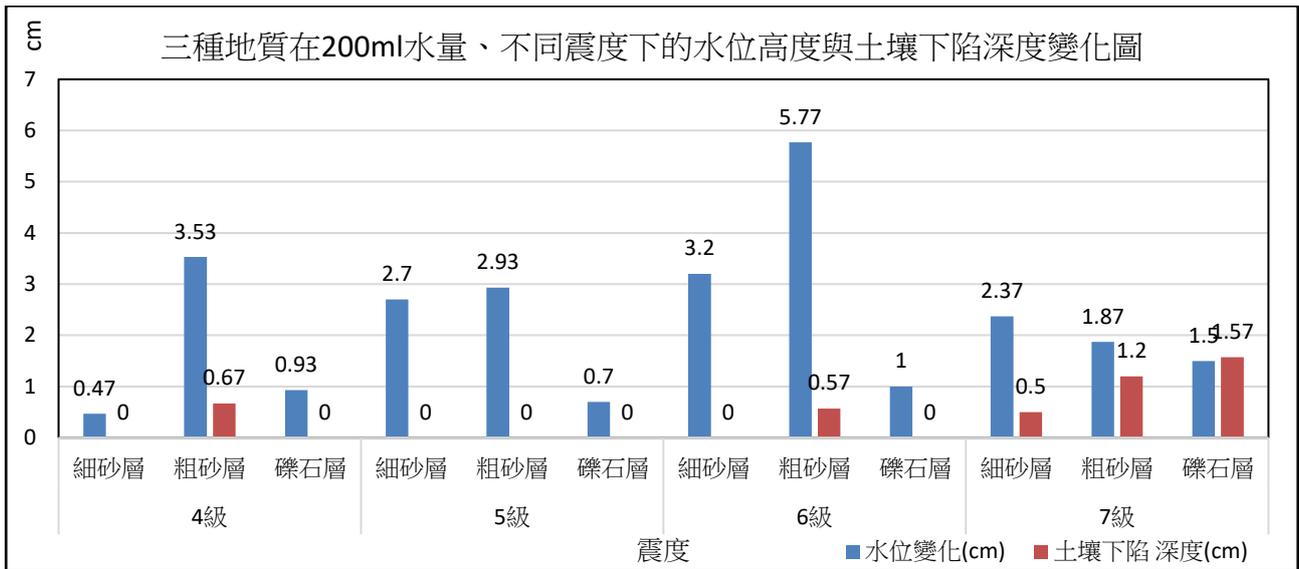


圖 44 三種地質在 200ml 水量、不同震度下的水位高度與土壤下陷深度變化統計圖

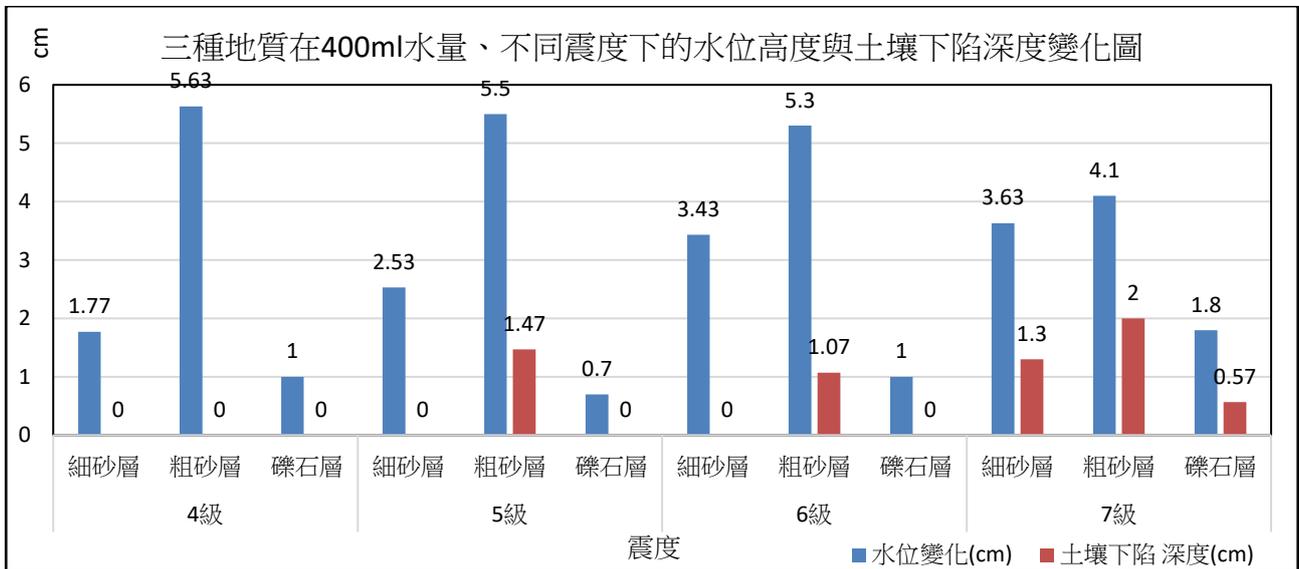


圖 45 三種地質在 400ml 水量、不同震度下的水位高度與土壤下陷深度變化統計圖

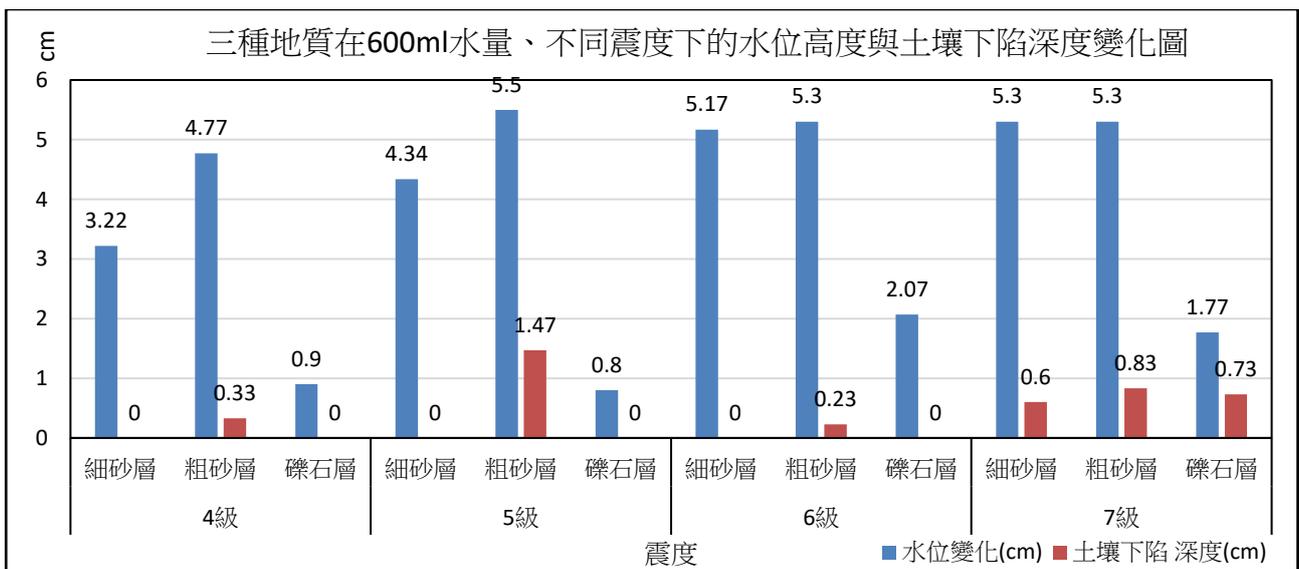


圖 46 三種地質在 600ml 水量、不同震度下的水位高度與土壤下陷深度變化統計圖

(二) 上層細砂下層礫石的地層結構在不同震度下的實驗記錄

表 8 上層細砂下層礫石的地層結構在 600ml 水量、不同搖晃震度下的實驗記錄表

| 地層 | 震度 | 組別 | 水位變化 (cm) | 標準差 | 土壤高度變化 (cm) | 標準差 | 土壤是否凹陷 | 是否土壤液化 |
|-------------------|-----|-------|-----------|-------|-------------|-------|--------|--------|
| 上層細砂 + 下層礫石 | 6 級 | 第 1 次 | 5.10 | -- | -1.50 | -- | 是 | 是 |
| | | 第 2 次 | 5.30 | -- | -0.10 | -- | 是 | 是 |
| | | 第 3 次 | 5.30 | -- | -0.90 | -- | 是 | 是 |
| | | 平均 | 5.23 | 0.094 | -1.13 | 0.573 | 是 | 100%液化 |
| | 7 級 | 第 1 次 | 5.30 | -- | -2.00 | -- | 是、龜裂 | 是 |
| | | 第 2 次 | 5.20 | -- | -1.50 | -- | 是、龜裂 | 是 |
| | | 第 3 次 | 5.30 | -- | -2.92 | -- | 是、龜裂 | 是 |
| 平均 | | 5.27 | 0.047 | -2.14 | 0.588 | 是、龜裂 | 100%液化 | |

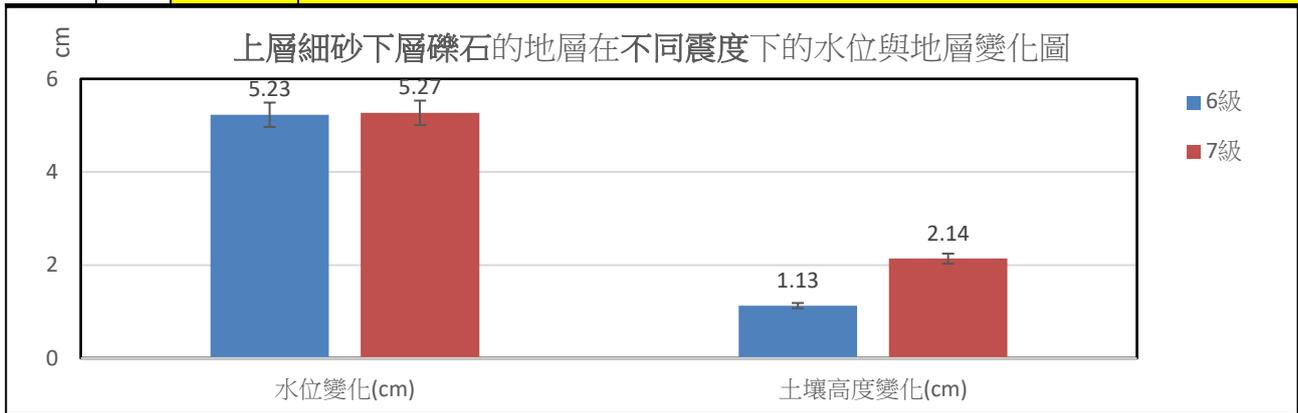


圖 47 上層細砂下層礫石的地層在不同震度下的水位與土壤高度變化統計圖

(三) 不同震度下的實驗結果

1. 震度為 4 級，搖晃 2 分鐘後：

- (1) 細砂層無論在 200ml、400ml、600ml 的水量下，都未發生地層下陷與土壤液化現象。
- (2) 粗砂層在 200ml 的水量下，未發生地層下陷；400ml 的水量下，有 33% 機率發生土壤液化；600ml 水量下，有 67% 機率發生土壤液化且有發生地層下陷。
- (3) 礫石層在三種水量下都未發生地層下陷與土壤液化現象。

2. 震度為 5 級，搖晃 2 分鐘後：

- (1) 細砂層無論在 200ml、400ml、600ml 的水量下，都未發生地層下陷與土壤液化現象。
- (2) 粗砂層在 200ml 的水量下，未發生地層下陷與土壤液化現象；在 400ml 及 600ml 水量下，都 100% 發生土壤液化及地層下陷。
- (3) 礫石層在三種水量下都未發生地層下陷與土壤液化現象。

3. 震度為 6 級，搖晃 2 分鐘後：

- (1) 細砂層僅在 600ml 的水量下，有 67% 機率發生土壤液化，地層未下陷。

- (2) 粗砂層則在 200ml 的水量下，有 67% 機率發生土壤液化及地層下陷；在 400ml 及 600ml 水量下，都 100% 發生土壤液化及地層下陷。
- (3) 礫石層在三種水量下都未發生地層下陷與土壤液化現象。
- (4) 上層細砂下層礫石的地層在 600ml 的水量下，100% 發生土壤液化及地層下陷。

4. 震度為 7 級，搖晃 2 分鐘後：

- (1) 無論細砂層、粗砂層和上層細砂下層礫石的地層都在震度 7、600ml 的水量下，100% 發生土壤液化及地層下陷，只有礫石層僅發生地層下陷，沒有土壤液化現象。
- (2) 7 級強震會造成上層細砂下層礫石的地層嚴重下陷，地表也發生龜裂的情形。



圖 48 細砂礫石層實驗後兩側地層下陷 (研究者自行拍攝)



圖 49 細砂礫石層實驗後地表龜裂 (研究者自行拍攝)

小結：

由此可知，震度越高，越容易發生地層下陷和土壤液化。細砂層在震度 4~5 級時都沒有任何影響，直至震度 6 級時才有 67% 的機率發生土壤液化、震度 7 級時不僅土壤液化機率 100%，也發生土壤下陷的現象。粗砂層則是震度 4~7 級都有土壤液化與地層下陷的情形。上層細砂下層礫石的地層則是震度 6~7 級都有土壤液化與地層下陷的情形。

五、探討獨棟房屋在不同地樁長度下，對建物傾斜的影響

(一) 實驗記錄

1. 不同地樁長度在水量 600ml、震度為 6 級下，搖晃 2 分鐘的實驗記錄

表 9 不同地樁長度的獨棟房屋的實驗記錄表(平均±標準差，N=3)

| 地樁長度 | 地層別 | 組別 | 最低土高 (cm) | 最高土高 (cm) | 搖晃後最高水面高度(cm) | 房屋是否傾斜 | 傾斜角度 |
|---------|-----|-------|-----------|-----------|---------------|--------|------|
| 7.00 cm | 細砂層 | 第 1 次 | 6.60 | 7.00 | 5.95 | 否 | 0.0 |
| | | 第 2 次 | 6.70 | 7.00 | 5.80 | 否 | 0.0 |
| | | 第 3 次 | 6.40 | 7.00 | 6.00 | 是 | 7.0 |
| | | 平均 | 6.57 | 7.00 | 5.92±0.085 | 33% | 2.3 |
| | 粗砂層 | 第 1 次 | 6.80 | 7.50 | 7.50 | 否 | 0.0 |
| | | 第 2 次 | 6.50 | 7.30 | 7.30 | 否 | 0.0 |

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|-------|-------|------------|----------------------|----------------------|-----|-----|
| 3.50 cm | 上層細砂 + 下層粗砂 | 第 3 次 | 6.00 | 7.80 | 7.80 | 否 | 0.0 | |
| | | 平均 | 6.43 | 7.53 | 7.53±0.250 | 0% | 0.0 | |
| | | 第 1 次 | 5.60 | 7.80 | 7.80 | 否 | 0.0 | |
| | | 第 2 次 | 6.20 | 8.00 | 8.00 | 是 | 5.0 | |
| | 上層細砂 + 下層礫石 | 第 3 次 | 6.80 | 7.30 | 7.30 | 是 | 5.0 | |
| | | 平均 | 6.20 | 7.70 | 7.70±0.294 | 67% | 3.3 | |
| | | 第 1 次 | 6.80 | 7.20 | 7.00 | 否 | 0.0 | |
| | | 第 2 次 | 6.50 | 7.20 | 7.00 | 否，但房屋周 圍，下陷 0.5cm | 0.0 | |
| | 上層細砂 + 下層礫石 | 第 3 次 | 6.50 | 7.30 | 7.00 | 否，但房屋周 圍，下陷 0.5cm | 0.0 | |
| | | 平均 | 6.60 | 7.23 | 7.00±0.000 | 0% | 0.0 | |
| | | 細砂層 | 第 1 次 | 5.80 | 7.50 | 5.60 | 否 | 0.0 |
| | | | 第 2 次 | 5.80 | 6.80 | 6.80 | 否 | 0.0 |
| | 第 3 次 | | 5.50 | 7.40 | 5.70 | 否 | 0.0 | |
| | 平均 | | 5.70 | 7.23 | 6.03±0.544 | 0% | 0.0 | |
| | 粗砂層 | 第 1 次 | 5.00 | 8.00 | 5.50 | 是 | 4.0 | |
| 第 2 次 | | 6.00 | 7.40 | 7.40 | 否 | 0.0 | | |
| 第 3 次 | | 6.20 | 7.50 | 7.50 | 否 | 0.0 | | |
| 平均 | | 5.73 | 7.63 | 6.80±0.920 | 33% | 1.3 | | |
| 上層細砂 + 下層粗砂 | 第 1 次 | 6.20 | 7.00 | 7.00 | 是 | 3.0 | | |
| | 第 2 次 | 4.70 | 7.70 | 7.70 | 是 | 6.0 | | |
| | 第 3 次 | 6.00 | 8.00 | 8.00 | 否 | 5.0 | | |
| | 平均 | 5.63 | 7.57 | 7.57±0.419 | 67% | 4.7 | | |
| 上層細砂 + 下層礫石 | 第 1 次 | 6.10 | 7.00 | 7.00 | 否，但房屋周 圍，下陷 0.8cm | 0.0 | | |
| | 第 2 次 | 6.00 | 7.30 | 7.30 | 否 | 0.0 | | |
| | 第 3 次 | 6.20 | 7.10 | 7.00 | 否，但房屋周 圍，下陷 0.5cm | 0.0 | | |
| | 平均 | 6.10 | 7.13 | 7.10±0.141 | 0% | 0.0 | | |

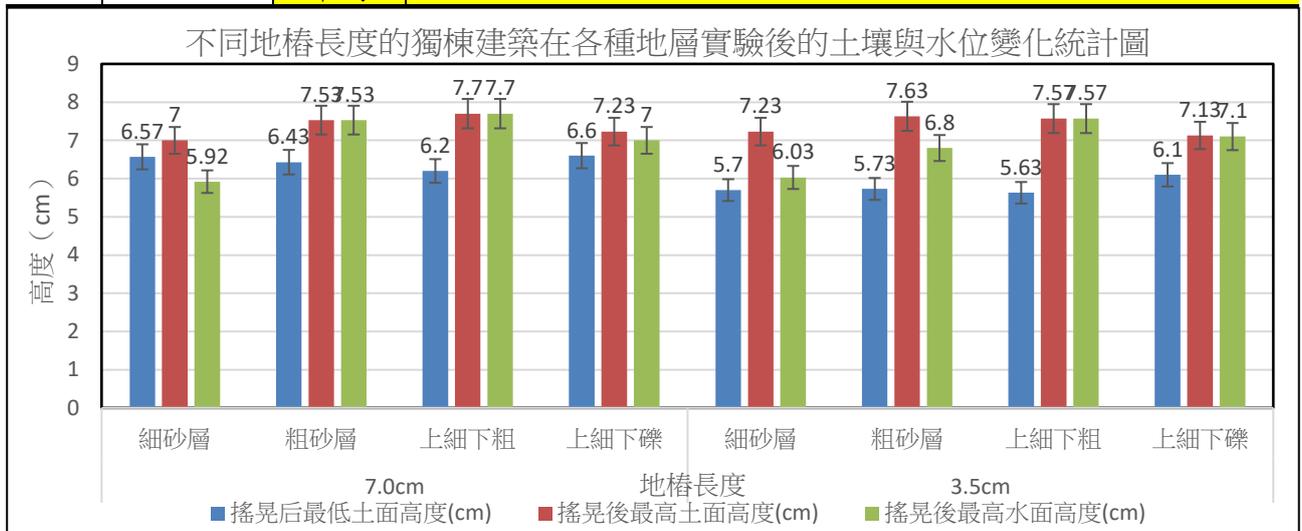


圖 50 不同地樁長度在各種地層水量 600ml、震度為 6 級實驗後的土壤與水位變化統計圖



圖 51 房屋傾斜 4 度
(研究者自行拍攝)



圖 52 細砂層左側地層下陷
(研究者自行拍攝)



圖 53 房屋周圍下陷 0.5cm
(研究者自行拍攝)

2. 不同地樁長度在水量 700ml、震度為 7 級下，搖晃 2 分鐘（一定會液化）的實驗記錄

表 10 不同地樁長度的房屋在水量 700ml、震度為 7 級實驗記錄表

| 地樁長度 | 地層別 | 搖晃后最低土面高度(cm) | 搖晃後最高土面高度(cm) | 搖晃後最高水面高度(cm) | 房屋是否傾斜 | 房屋傾斜角度 |
|-------|-----|---------------|---------------|---------------|--------|--------|
| 7.0cm | 細砂層 | 6.30 | 7.20 | 6.80 | 否 | 0 度 |
| 3.5cm | 細砂層 | 6.50 | 6.70 | 6.70 | 是 | 48 度 |



圖 54 土壤液化對 7cm 地樁房屋的影響
(研究者自行拍攝)



圖 55 土壤液化對 3.5cm 地樁房屋的影響
(研究者自行拍攝)

(二)實驗結果

- 我們以 **7cm** 長的地樁模擬「樁基礎、地樁直達堅固岩盤」的情況，研究結果發現：
 - 細砂層的房屋有 33.3% 的機率發生傾斜，其中一次房屋傾斜角度為 7 度。
 - 粗砂層的房屋則皆沒有發生傾斜的現象。
 - 上細砂下粗砂地層的房屋 66.7% 的機率發生傾斜，房屋平均傾斜角度為 3.3 度。
 - 模擬竹北地層的上細砂下礫石的地層，雖然房屋皆未發生傾斜，但房屋周遭的地層有掏空現象，三次實驗有兩次皆下陷 0.5cm。
- 我們以 **3.5cm** 長的地樁模擬樁基礎、地樁直達兩種地質交界處，研究結果發現：
 - 細砂層的房屋皆沒有發生傾斜的現象。
 - 粗砂層的房屋有 33.3% 的機率發生傾斜，其中一次房屋傾斜角度為 4 度。
 - 上細砂下粗砂地層的房屋 66.7% 的機率發生傾斜，房屋平均傾斜角度為 4.7 度。
 - 以上層細砂下層礫石來模擬部分竹北地區的地層分布，搖晃後，發現房屋雖然傾斜機率都是 0，但房屋地基周遭的地層有掏空現象，三次實驗分別有下陷 0.8cm 和下陷 0.5cm（圖 32）的現象。
- 我們將兩種地樁長度的房屋分別置入細砂層實驗箱中，以水量 700ml、震度為 7 級下搖晃 2 分鐘的環境模擬地震後一定會發生土壤液化的情形來觀察不同地樁長度的房

屋建築受到的影響，實驗結果發現，地樁為 7cm 的房屋並未傾斜，但地樁為 3.5cm 的房屋因為土壤液化而傾斜了 48 度，且地樁已裸露，房屋受到很大的影響。

小結：

我們以上細砂下粗砂的地層做為不同地樁長度比較的實驗，發現地樁長度不論是 3.5cm 或 7cm 的地樁，房屋發生傾斜的機率都是 66.7%，兩者無差距；但傾斜平均角度則是短地樁（4.7 度）的大於長地樁（3.3 度），顯示地樁較長，房屋傾斜角度較小。

在上層細砂下層礫石的地層上，樁基礎的房屋雖然不會造成傾斜，但地震後房屋周遭容易發生掏空現象。

在地震後土壤液化的地層上，地樁較短的房屋容易傾斜且角度較大，地樁甚至會裸露。

六、探討軟腳蝦大樓在不同地樁長度下，對建物傾斜的影響

(一)實驗記錄

1. 不同地樁長度在水量 600ml、震度為 6 級下，搖晃 2 分鐘的實驗記錄

表 11 不同地樁長度的軟腳蝦大樓的實驗記錄表(平均±標準差，N=3)

| 地樁長度 | 地層別 | 組別 | 最低土高(cm) | 最高土高(cm) | 搖晃後水位高度(cm) | 房屋是否傾斜 | 傾斜角度 | 屋倒時間 |
|------------|-------------------|-----|----------|------------|-------------|--------|-------|-------|
| 7.00 cm | 細砂層 | 1 | 6 | 7 | 6.6 | 往圓弧面傾斜 | 5 | -- |
| | | 2 | 5.5 | 7 | 7 | 往圓弧面傾斜 | 3.5 | -- |
| | | 3 | 6.7 | 7 | 7 | 往圓弧面傾斜 | 5 | -- |
| | | 平均 | 6.07 | 7.00 | 6.87±0.189 | 100% | 4.5 | -- |
| | 粗砂層 | 1 | 6 | 7 | 7 | 往圓弧面傾斜 | 7 | -- |
| | | 2 | 6.8 | 7 | 6.6 | 往圓弧面傾斜 | 5 | -- |
| | | 3 | 6.8 | 7.2 | 7.2 | 往圓弧面傾斜 | 19 | -- |
| | | 平均 | 6.53 | 7.07 | 6.93±0.249 | 100% | 10.33 | -- |
| | 上層細砂 + 下層粗砂 | 1 | 6.7 | 7.7 | 7.7 | 往圓弧面傾斜 | 10 | -- |
| | | 2 | 6.8 | 7.2 | 7 | 往圓弧面傾斜 | 4 | -- |
| | | 3 | 5.7 | 7.2 | 7.2 | 往圓弧面傾斜 | 20 | -- |
| | | 平均 | 6.75 | 7.45 | 7.35±0.294 | 100% | 11.33 | -- |
| | 上層細砂 + 下層礫石 | 1 | 7 | 7.4 | 7.4 | 無 | 0 | -- |
| | | 2 | 6.5 | 7.6 | 7.6 | 往圓弧面傾斜 | 5 | -- |
| | | 3 | 6 | 7.5 | 7.5 | 往圓弧面傾斜 | 7 | -- |
| 平均 | | 6.5 | 7.5 | 7.5±0.0.82 | 67.70% | 4 | -- | |
| 3.50 cm | 細砂層 | 1 | 5.8 | 6.2 | 6.2 | 往圓弧面傾倒 | 90 | 28s |
| | | 2 | 5.6 | 6.8 | 6.2 | 往圓弧面傾倒 | 90 | 14s |
| | | 3 | 5.7 | 6.8 | 6.2 | 往圓弧面傾倒 | 90 | 23s |
| | | 平均 | 5.70 | 6.60 | 6.20±0.000 | 100% | 90 | 21.7s |
| | 粗砂層 | 1 | 5.7 | 6.2 | 6.2 | 往圓弧面傾倒 | 90 | 10s |
| | | 2 | 5.8 | 6.8 | 6.2 | 往圓弧面傾倒 | 90 | 10s |
| | | 3 | 5.8 | 6.8 | 6.2 | 往圓弧面傾倒 | 90 | 10s |
| | | 平均 | 5.77 | 6.60 | 6.20±0.000 | 100% | 90 | 10s |
| | 上層細砂 | 1 | 5.9 | 7 | 5.9 | 往圓弧面傾倒 | 90 | 1s |
| | | 2 | 5.9 | 7 | 7 | 往圓弧面傾倒 | 90 | 2s |

| | | | | | | | | |
|---|------|----|------|-----|------------|--------|----|----|
| + | 下層粗砂 | 3 | 5.8 | 7 | 7 | 往圓弧面傾倒 | 90 | 3s |
| | | 平均 | 5.87 | 7 | 6.63±0.519 | 100% | 90 | 2s |
| + | 上層細砂 | 1 | 6 | 6.9 | 6.9 | 往圓弧面傾倒 | 90 | 3s |
| | | 2 | 5.9 | 7 | 7 | 往圓弧面傾倒 | 90 | 3s |
| + | 下層礫石 | 3 | 5.3 | 7.2 | 7.2 | 往圓弧面傾倒 | 90 | 3s |
| | | 平均 | 5.3 | 7.2 | 7.2±0.125 | 100% | 90 | 3s |

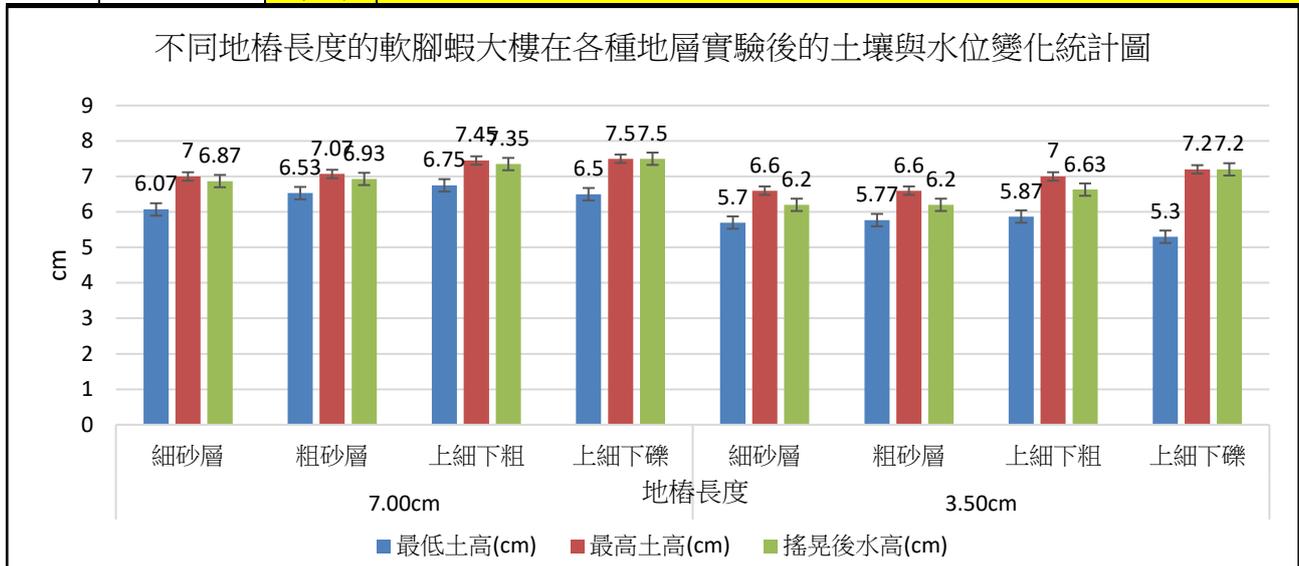


圖 56 不同地樁長度在各種地層水量 600ml、震度為 6 級實驗後的土壤與水位變化統計圖

(二)實驗結果

由上表可知：

1. 不論是何種地質，搖晃後軟腳蝦大樓都向圓弧面傾斜。
2. 7cm 地樁的軟腳蝦大樓，在所有地質中皆無傾倒但有輕微傾斜，其中上層細砂下層粗砂的組別平均傾斜角度最大，達到 11.33 度。
3. 3.5 地樁的軟腳蝦大樓，在實驗的所有地質中皆有傾倒現象，其中上層細砂下層粗砂或礫石的地層結構都是房屋在 3 秒內傾倒。
4. 與獨棟房屋相比，在安裝 7 公分樁基礎的粗砂層中，獨棟房屋並無傾斜現象，但軟腳蝦大樓組別平均傾斜角度達到 10.33 度。
5. 與獨棟房屋相比，在安裝 3.5 公分樁基礎的細砂層中，獨棟房屋並無傾斜現象，但軟腳蝦大樓組別全數在平均 21.7 秒時倒塌。

小結：

整體而言，長地樁的軟腳蝦大樓較不容易傾倒，只有輕微傾斜現象。短地樁的軟腳蝦大樓皆會傾倒且都向缺乏承重牆與支撐柱的圓弧面傾斜。

七、模擬兩種建物が竹北地層結構中，遭遇六級和七級強震時對建物的影響

模擬的竹北地層結構為上層細砂 1.8cm、下層礫石 8.2cm，水位 4.6cm 高。兩種建物的地樁長度則都設定為 5.0cm 高，也就是會固定在下層較堅固的礫石層中以進行實驗。

(一)實驗記錄

表 12 兩種建物が竹北地層結構中，震度為 6 級搖晃 2 分鐘的實驗記錄表

| 震度 | 建物種類 | 組別 | 土壤下陷高度(cm) | 土壤變化 SD | 水位變化 (cm) | 水位變化 SD | 房屋是否傾斜 | 房屋傾斜角度 | 土壤是否液化 |
|----|-------|-------|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|--------|
| 六級 | 獨棟房屋 | 第 1 次 | 4.7 | -- | 5.8 | -- | 是 | 29 | 是 |
| | | 第 2 次 | 4.7 | -- | 5.6 | -- | 是 | 37 | 是 |
| | | 第 3 次 | 3.7 | -- | 5.8 | -- | 是 | 47 | 是 |
| | | 平均 | 4.37 | 0.471 | 5.73 | 0.094 | 100% | 37.67 | 100% |
| | 軟腳蝦大樓 | 第 1 次 | 3.5 | -- | 5.9 | -- | 是 | 45 | 是 |
| | | 第 2 次 | 2.4 | -- | 6 | -- | 是 | 15 | 是 |
| | | 第 3 次 | 2.8 | -- | 8 | -- | 是 | 30 | 是 |
| | | 平均 | 2.9 | 0.455 | 6.63 | 0.967 | 100% | 30 | 100% |

表 13 兩種建物が竹北地層結構中，震度為 7 級搖晃 2 分鐘的實驗記錄表

| 震度 | 建物種類 | 組別 | 土壤下陷高度(cm) | 土壤變化 SD | 水位變化 (cm) | 水位變化 SD | 房屋是否傾斜 | 房屋傾斜角度 | 土壤是否液化 |
|----|-------|-------|------------|---------|-----------|---------|--------|--------|--------|
| 七級 | 獨棟房屋 | 第 1 次 | 3.2 | -- | 5.9 | -- | 倒塌 | 90 | 是 |
| | | 第 2 次 | 3.2 | -- | 6 | -- | 傾斜 | 45 | 是 |
| | | 第 3 次 | 3 | -- | 5.5 | -- | 倒塌 | 90 | 是 |
| | | 平均 | 3.13 | 0.094 | 5.8 | 0.216 | 67.70% | 75 | 100% |
| | 軟腳蝦大樓 | 第 1 次 | 3.2 | -- | 5.9 | -- | 倒塌 | 90 | 是 |
| | | 第 2 次 | 3.7 | -- | 5.4 | -- | 倒塌 | 90 | 是 |
| | | 第 3 次 | 3 | -- | 6.4 | -- | 倒塌 | 90 | 是 |
| | | 平均 | 3.3 | 0.294 | 5.9 | 0.408 | 100% | 90 | 100% |



圖 57 軟腳蝦大樓震度 6 級實驗後傾斜 15 度 (研究者自行拍攝)



圖 58 軟腳蝦大樓 7 級實驗後倒塌 (研究者自行拍攝)

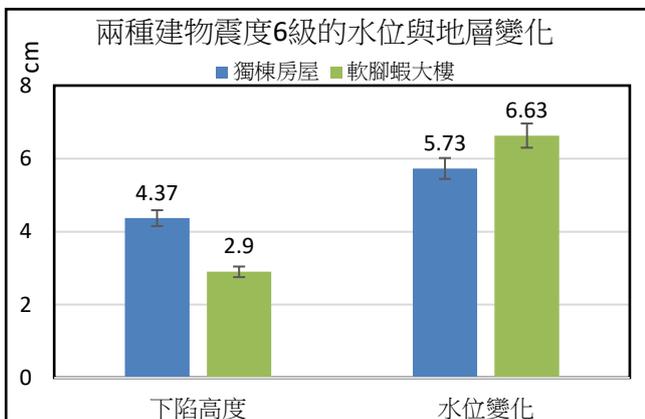


圖 59 不同建物震度 6 級實驗統計圖

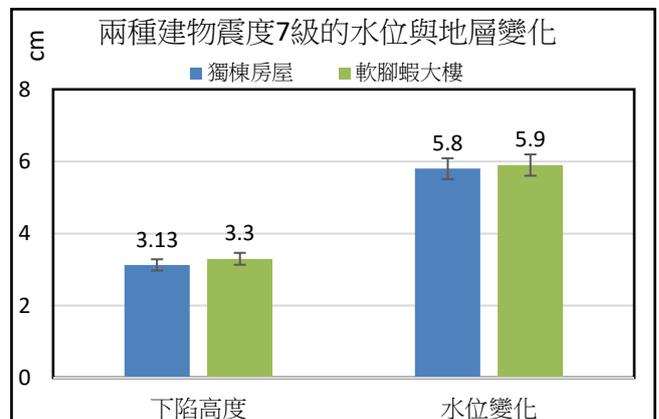


圖 60 不同建物震度 7 級實驗統計圖

(二)實驗結果

1. 在六級震度搖晃下，兩種建物都有傾斜情形但沒有倒塌，平均傾斜角度分別為 37.67 度與 30 度，兩者無太大差異。
2. 在七級震度搖晃下，獨棟建築的倒塌機率為 67.7%，而軟腳蝦大樓 100%倒塌，顯示軟弱層造成的軟腳蝦大樓蓋在竹北地質層上，無法抵擋震度 7 級以上之強震，且都是一震就倒。

八、探討不同變因對地層下陷與土壤液化的影響

綜合實驗一、二和四的結果，我們發現不同水量、地質與震度對地層下陷和土壤液化都有影響，為比較這些變因孰輕孰重，我們利用下列的矩陣方格（表 14）來分析影響結果，發現地質種類是影響地層下陷與土壤液化的最關鍵因素；其次，低水位至少要遇到震度 6 級以上才會發生地層下陷；粗砂層則在中水位遇到震度 4 級以上就會發生地層下陷與土壤液化。礫石層則只有在震度 7 級以上會發生地層下陷，礫石層不會產生液化情形。

表 14 不同變因影響地層下陷與土壤液化的矩陣分析表

| 地層下陷機率 | | | | | 土壤液化機率 | | | | |
|--------|-----|------|------|------|--------|-----|------|------|------|
| 細砂層 | 4 級 | 5 級 | 6 級 | 7 級 | 細砂層 | 4 級 | 5 級 | 6 級 | 7 級 |
| 200ml | | | | 100% | 200ml | | | | |
| 400ml | | | | 100% | 400ml | | | | |
| 600ml | | | | 100% | 600ml | | | 67% | 100% |
| 粗砂層 | 4 級 | 5 級 | 6 級 | 7 級 | 粗砂層 | 4 級 | 5 級 | 6 級 | 7 級 |
| 200ml | | | 100% | 100% | 200ml | | | 67% | |
| 400ml | 67% | 100% | 100% | 100% | 400ml | 33% | 100% | 100% | 33% |
| 600ml | 33% | 100% | 100% | 100% | 600ml | 67% | 100% | 100% | 100% |
| 礫石層 | 4 級 | 5 級 | 6 級 | 7 級 | 礫石層 | 4 級 | 5 級 | 6 級 | 7 級 |
| 200ml | | | | 100% | 200ml | | | | |
| 400ml | | | | 100% | 400ml | | | | |
| 600ml | | | | 100% | 600ml | | | | |

陸、討論

一、探討不同水量多寡對地層下陷與土壤液化的影響

我們發現不論水量多寡，經過搖晃後水位皆會上升，水量越多，水位上升越明顯，土壤液化的機率也會增加。我們推論是因為搖晃後，土壤顆粒與顆粒之間間隙縮小，原本在孔隙間的水因為空間變小而被擠壓出來，而當水量愈多時，被擠壓出的水量也會愈多。

二、探討不同地質與地層分布對地層下陷與土壤液化的影響

李珩（2015）指出，顆粒越小的土壤，越容易土壤液化。但顆粒最小的黏土因為顆粒太小，遇到地震時空隙也不會有太大改變，所以也不會發生土壤液化。故顆粒小的細砂就是引發土壤液化的關鍵。此說法與我們的實驗結果「粗砂層明顯比細砂層容易產生地層下陷與土壤液化現象」不同。我們認為，首先，實驗是在實驗箱中操作，可能無法準確模擬大範圍液化的情形；第二，粗砂粒徑較大，孔徑也較大，所以當我們模擬地震時，粗砂發生位移，導致擠壓出的水量也比細砂還多，所以結果是粗砂會比細砂容易液化。

此外，粗砂中也含有大量細砂粒徑的顆粒，並非顆粒大小一致，因此我們認為這也是影響實驗結果的關鍵之一。再者，我們認為土壤液化也和砂土的孔隙率有關，因此我們先計算了三種地質的孔隙率，分別為：

$$\text{孔隙體積} = V_s ; \text{砂土體積} = V ; n = V_s / V * 100\%$$

| | | |
|---|---|---|
| 礫石： $V_s = 363 - 100 = 263$ $V = 500$ $n = (263 / 500) * 100\% = 52.6\%$ | 粗砂： $V_s = 335 - 100 = 235$ $V = 500$ $n = (235 / 500) * 100\% = 47\%$ | 細砂： $V_s = 264 - 100 = 164$ $V = 500$ $n = (164 / 500) * 100\% = 32.8\%$ |
|---|---|---|

在計算完孔隙率後，三種砂石的孔隙率大小為：礫石>粗砂>細砂；而三種砂石的下陷程度為：粗砂層>礫石層>細砂層；土壤液化程度則是：粗砂層>細砂層>礫石層，我們發現土壤下陷程度和土壤液化程度和土壤孔隙率並非呈現正相關。然後又上網查資料，發現影響土壤下陷和液化情形的因素除了孔隙率之外，還受到地層質地、孔隙水壓力、土壤壓實程度等等的多種變因，其中有一項資料顯示出砂質土壤(也就是本次實驗的粗砂)比起其他土壤更加容易產生土壤下陷和土壤液化情形，和我們的實驗結果相符合。

至於細砂層不是最容易液化的原因，可能與其顆粒較小、摩擦力較大、結構相對穩定等

原因有關。

三、探討不同地層分布對地層下陷與土壤液化的影響

在不同地層分布的實驗結果顯示，不同地質所組成的地層中，上層是細砂的地層比較容易液化。而竹北剛好發生多次地層下陷造成天坑的大學地段，是砂質粉土+卵礫石+砂岩（如圖 19），與我們實驗結果較容易發生地層下陷與土壤液化的地層相符。

基於砂質土壤與地下水是構成土壤液化的其中兩項要件，故土壤液化較容易出現在河川下游的沖積平原及砂質海岸(土壤液化潛勢查詢系統，2023)。此項說明，也符合竹北地區屬於頭前溪下游沖積平原的砂質地形以及地下水位較高的兩者條件。

四、探討不同震度下，對地層下陷與土壤液化的影響

根據台北市政府土壤液化潛勢查詢系統指出，只有實際發生的地震大小接近或超過設計地震力時(臺北市約為 5 級地震)，才有土壤液化的可能。因此我們在設計實驗時，從 4 級地震開始進行，發現粗砂層在震度 4 級就會發生土壤液化與地層下陷；但細砂層要到 6 級開始會造成細砂層有 67%的機率發生土壤液化；而震度 7 級對每種地層都有嚴重影響，上層細砂下層礫石的地層，除了地層嚴重下陷外，地表也發生龜裂。故除了震度，地質組成也會影響土壤液化程度。

五、探討獨棟房屋在不同地樁長度下，對建物傾斜的影響

在單一地質中，地樁長度並非影響房屋建築的關鍵；但兩種地層結構中，顯示地樁較長，房屋傾斜角度較小。在土壤液化的地層上，地樁較短的房屋容易傾斜且角度較大，地樁甚至會裸露。由此可見地樁最適長度與地質種類仍有很大關係。我們都知道，地樁越長越好，最好可以深及兼顧岩盤。但真正施作時仍然要考慮施工難度與成本問題，如何符合法規規定並在安全與經濟上達到最佳平衡點是最重要的。未來的研究或許可以從房屋配重與地樁長度的關係做更仔細的實驗，以提供最佳地樁比例建議。

而模擬竹北地層的實驗也發現以樁基礎建造的房屋不論地樁長短，雖然都不會造成傾斜，但震後房屋周遭地層容易發生掏空現象，此與實際發生的天坑事件相符。土木結構技師拱祥生表示，竹北發生的第 3 次崩塌，是基地內水位不斷上升，又進一步將上層土壤浸泡鬆軟後，才導致地層塌陷(2023 年 10 月 18 日，聯合新聞網)。我們的實驗也證

明了這一部分。

不過，由於研究時間限制，未來我們還想要比較樁基礎、筏式基礎和連續壁等不同地基施做方式在強震下對房屋建築的影響，以提供建商更好的建議並確保居民的安全。

六、探討軟腳蝦大樓在不同地樁長度下，對建物傾斜的影響

由於實驗期間發生了花蓮 0403 大地震，因此我們又設計了軟腳蝦大樓來與原本的獨棟房屋進行實驗比較，發現地樁長短是軟腳蝦大樓是否傾倒的關鍵。短地樁的軟腳蝦大樓皆會傾倒且都向缺乏承重牆與支撐柱的圓弧面傾斜倒塌，這樣的設計很可能也產生了頭重腳輕、整棟建築重心不平衡的現象。而未產生軟弱層的獨棟房屋發生傾斜的機率與角度都小很多，房屋也不會整棟倒塌。根據國家地震工程研究中心網站指出，結構上，如果某一樓層比起其他樓層明顯軟弱，地震摧毀的能量會集中在這一層樓，造成該樓層先坍塌，而其它樓層跟著倒塌，這種建築物就稱為軟弱層建築，而先被震垮的樓層則稱為軟弱層。我們的實驗過程在最後一次震度七級搖晃下，地樁甚至被搖斷了，可見軟弱層建築問題絕對不容小覷。

七、模擬兩種建物蓋在竹北地層結構中，遇到強震時對建物的影響

模擬蓋在竹北地層結構的建物が在六級震度搖晃下，兩種建物都有傾斜情形且角度無顯著差異；在七級震度搖晃下，獨棟建築的倒塌機率为 67.7%，而軟腳蝦大樓 100%倒塌，顯示軟弱層影響建物倒塌之大。由於竹北地質結構容易受到地震而被破壞，產生地層下陷、掏空及土壤液化現象，故建物的地樁長度與建物結構設計會是建築安全最重要的考量。

柒、結論

由本研究的七項實驗可歸納出以下幾點結論：

- 一、細砂層和粗砂層的地下水位越高，震後的地下水位變化越大，越容易產生地層下陷與土壤液化；礫石層無論水量多寡都不會液化。
- 二、地質種類是影響地層下陷與土壤液化的最關鍵因素，整體而言：
 - (一) 土壤液化程度：粗砂層>細砂層>礫石層。
 - (二) 地層下陷程度：粗砂層>礫石層>細砂層。
 - (三) 水位變化高度：粗砂層>細砂層>礫石層。
- 三、不同地質所組成的地層中，上層是細砂的地層比較容易液化。
- 四、震度越高，越容易發生地層下陷和土壤液化。震度 7 級對每種地層都有嚴重影響，上層細砂下層礫石的地層，除了地層嚴重下陷外，地表也發生龜裂。
- 五、在上細砂下粗砂的地層與上細砂下礫石的地層中，不論地樁長短、房屋傾斜機率都相同，但地樁較長者，房屋傾斜角度較小。
- 六、長地樁的軟腳蝦大樓較不容易傾倒，只有輕微傾斜現象。短地樁的軟腳蝦大樓皆會傾倒且都向缺乏承重牆與支撐柱的圓弧面傾斜，顯示軟弱層影響建物倒塌之大。
- 七、模擬蓋在竹北地層結構的兩種建物在六級震度下，都有傾斜情形且角度無顯著差異；在七級震度下，獨棟建築的倒塌機率為 67.7%，而軟腳蝦大樓 100%倒塌。
- 八、竹北地質結構容易受到強震而產生地層下陷、掏空及土壤液化現象，故建物的地樁長度與建物結構設計會是建築安全最重要的考量。

綜合七項實驗結果，我們發現地層下陷與土壤液化的變因受到地質種類、水位高低與震度大小所影響，其中，地質種類是最關鍵因素；而地下水位與震度也會交互影響，低水位至少要遇到震度 6 級以上才會發生地層下陷；粗砂層則在中水位遇到震度 4 級以上就會發生地層下陷與土壤液化。礫石層則只有在震度 7 級以下會發生地層下陷，但不會產生液化。

捌、參考資料及其他

一、圖片

(一) 圖 1~圖 18、圖 20~圖 60，皆由研究者自行拍攝及繪製。

(二) 圖 19 資料來源：關於竹北的地質（2023 年 05 月 14 日）。Mobile01 討論群組。取自：
<https://www.mobile01.com/topicdetail.php?f=458&t=6785081>。

二、資料

土壤液化 Q&A / 基本認識（2023）。土壤液化潛勢查詢系統網站。經濟部地質調查及礦業管理中心。取自：<https://www.liquid.net.tw/cgs/public/QA01.html>

交通部中央氣象局地震震度分級表（2022 年 08 月 03 日）。取自：
file:///C:/Users/Uset/Downloads/2022-08-03_62ea06893fe6b_earthquake_20220721155303.pdf

竹北市公所網站（2024 年 01 月 31 日）。地理環境。取自：
https://www.zhubei.gov.tw/iframecontent_edit.php?menu=1167&typeid=35&typeid2=655&menu=25&typeid=35

巫鴻璋、郭政芬（2023 年 04 月 27 日）。離譜！竹北天坑吃掉一輛車 特斯拉 Model Y 遭殃整輛掉進洞。聯合新聞網。取自：<https://udn.com/news/story/7320/7126418>

巫鴻璋、黃羿馨（2023 年 10 月 18 日）。竹北再爆天坑 專家曝因這個地層結構釀禍...天坑恐一再上演。聯合新聞網。新竹即時報導。取自：<https://udn.com/news/story/7323/7513328>

李珩（2015）。土壤液化成因。科學 Online 高瞻自然科學教學資源平台。取自：
<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=65098>

國家地震工程研究中心（2024 年 06 月 01 日）。地震與樓房振動/建築物的外觀形狀與耐震性/軟弱層建築的耐震力不佳。取自：https://www.ncree.org/safehome/ncr03/pc5_6.htm

張裕珍（2023 年 8 月 21 日）。極端氣候加劇「催生」天坑 專家提短中長期解方。經濟日報。取自：https://money.udn.com/money/story/5648/7384850?from=edn_related_storybottom

寧于晨（2023 年 5 月 19 日）。不只信義區天坑！北市 11 處路段「恐藏土壤液化危機」中山、內湖全上榜。Yahoo!新聞。取自：<https://ynews.page.link/XHFY1>

臺北市政府土壤液化潛勢查詢系統網站（2018）。臺北市政府。取自
<https://soil.taipei/Taipei/Main/pages/QA2.html>

關於竹北的地質（2023 年 05 月 14 日）。Mobile01 討論群組。取自：
<https://www.mobile01.com/topicdetail.php?f=458&t=6785081>

【評語】 030508

本研究主題與減災有關，並針對特定區域進行評估，具有鄉土性。

實驗過程自行設計與製作地震模擬器，具有實作經驗。本研究規劃分析項目完整，涵蓋引起土壤液化需要考慮的多種變因。由於確認參數多，實驗結果已定性描述為主。本實驗使用定義的震度與實際地震應用的尺度之間的轉換仍需要確認。天坑事件的起因並非完全因為震動產生的土壤液化所造成，可能原因為地層掏空。

作品簡報

晃地自「陷」—

地層下陷與土壤液化的變因探討

摘要

日前，竹北發生天坑事件，讓我們想探討影響地層下陷和土壤液化的變因。於是我們設計了水量、地質、地層分布、震度、地樁長度和不同建物等變因的實驗。

研究發現，地質種類是影響地層下陷與土壤液化的最關鍵因素。粗砂層最容易地層下陷與土壤液化；上層是細砂的地層也較易液化。水位與震度越高影響越大，但二者也會交互影響，低水位要震度 6 級以上才會發生下陷；粗砂層則在中水位、震度 4 級以上就會下陷與液化。礫石層則只在 7 級以上才會下陷但不會液化。地樁較長者，房屋傾斜角度較小。竹北地質層易受強震而產生地層下陷、掏空及土壤液化，且軟腳蝦大樓在此地層中遇 7 級震度時，一震就倒，故地樁長度與避免形成軟弱層結構是建築安全首要的考量。

壹、研究動機

2023 年 04 月 27 日，據聯合新聞網記載，竹北一處建築案旁的路面突然發生塌陷；同年 10 月又再次發生天坑塌陷事件，此問題讓我們想進行專題研究，了解為何路面會發生塌陷，產生天坑。

有學者指出，地質軟鬆容易出現塌陷問題；若土地含水量高，基地內水位不斷上升，又進一步將上層土壤浸泡鬆軟後更易導致地層塌陷。還有新聞表示，天坑不僅是工程施作不慎，土壤液化也會導致建築物下陷或傾斜。因此，我們決定研究不同變因對地層下陷與土壤液化的影響，以避免天坑事件再次重演。

貳、研究目的

- 一、探討不同水量多寡對地層下陷與土壤液化的影響
- 二、探討不同地質對地層下陷與土壤液化的影響
- 三、探討不同地層分布對地層下陷與土壤液化的影響
- 四、探討不同震度下，對地層下陷與土壤液化的影響
- 五、探討獨棟房屋在不同地樁長度下，對建物傾斜的影響
- 六、探討軟腳蝦大樓在不同地樁長度下，對建物傾斜的影響
- 七、模擬兩種建物蓋在竹北地層結構中，遇到強震時對建物的影響

參、研究設備及器材

一、實驗材料

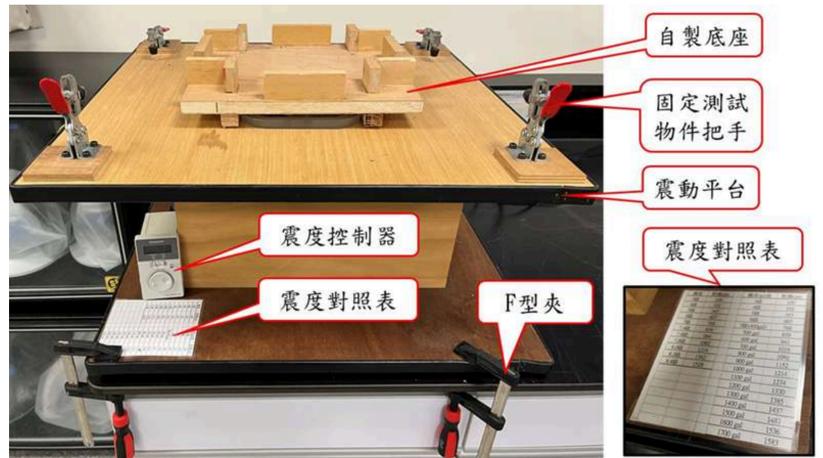
- (一) 細砂：粒徑0.125~0.25mm
- (二) 粗砂：粒徑0.5mm~1.0mm
- (三) 一分石：粒徑10~30mm



細砂(左)、粗砂(中)與一分石(右)
(研究者自行拍攝)

二、實驗設備與儀器

- (一) 地震模擬器 (研究者自行拍攝與繪製)



(二) 實驗箱與自製模型 (研究者自行拍攝)



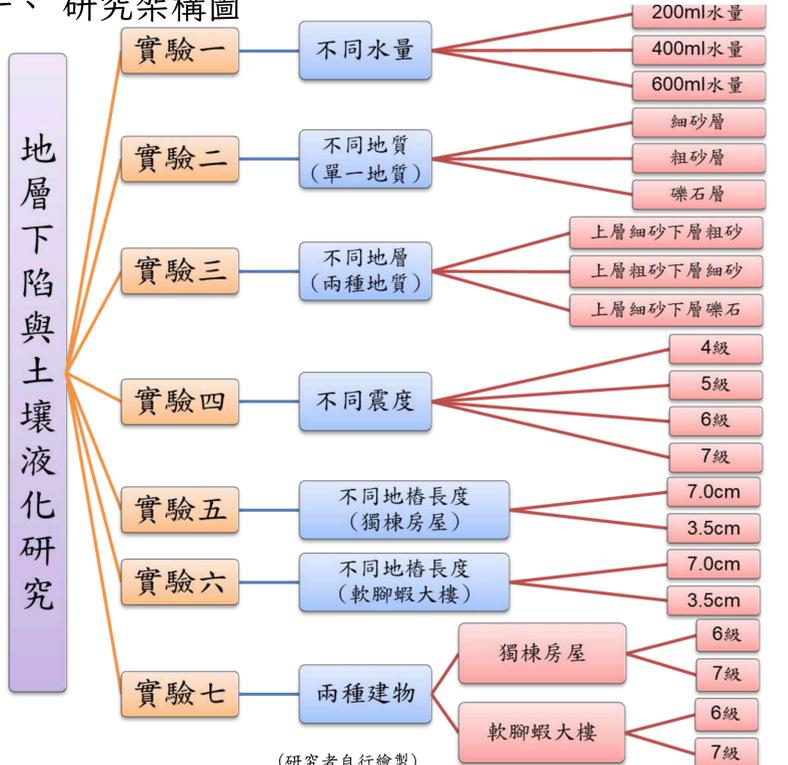
自製房屋模型

實驗箱與房屋模型

實驗箱、固定底座與模型

肆、研究過程或方法

一、研究架構圖



(研究者自行繪製)

二、實驗設計

(一) 模擬單一地質層

實驗箱的大小為長26cm 寬16.5cm 高11.5cm，因此我們把倒入砂土的量設定為3000立方公分、7cm高，以模擬單一地質層。

(二) 模擬兩種地質結構地層

將兩種地層各設置成3.5cm高，以模擬不同地層分布的情形。

(三) 水量

由於3000立方公分的砂土加到800ml的水時，土壤的含水量會達到飽和狀態，土壤表層不需搖晃便會直接溢出水，故水量實驗設定為200ml(0.8cm高)、400ml(1.25cm高)、600ml(1.7cm高)，共三種水量來進行實驗。

(四) 震度

根據交通部中央氣象局舊制震度分級表的資料：「震度4級的屋內情形房屋搖晃劇烈；屋外情形則少數建築物牆磚可能剝落，小範圍山區可能發生落石」，可見舊制震度4級以上才會對房屋以及屋外的地貌變化有影響，因此我們實驗的震度依序為震度4、5、6和7共四種震度。由於地震時間很難長達2分鐘，故震動搖晃時間則統一設定為2分鐘。

(五) 砂土含水量的控制

每次實驗前，必須確保倒入實驗箱的砂土為全乾的砂土，因此會將砂土倒入不鏽鋼鍋中，放置加熱攪拌器或黑晶爐上攪拌並持續加熱直至砂土全乾，才倒入實驗箱進行實驗。

(六) 按等比例模擬竹北大學段地層方式

為模擬竹北發生天坑地段之地質來進行實驗，我們利用竹北大學段地質採樣圖(右圖)的各地層與水位的高度比例，換算成實驗箱的比例後，再進行實驗。

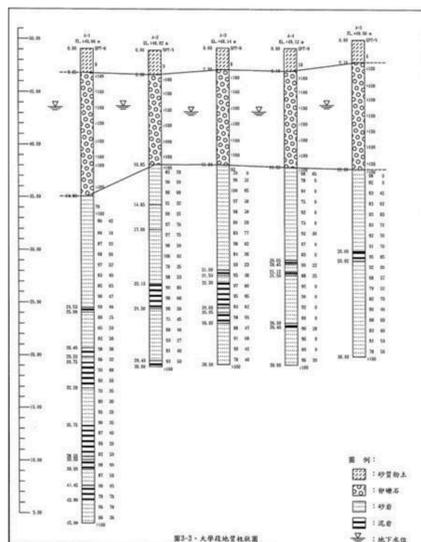


圖19 竹北大學段地質採樣圖

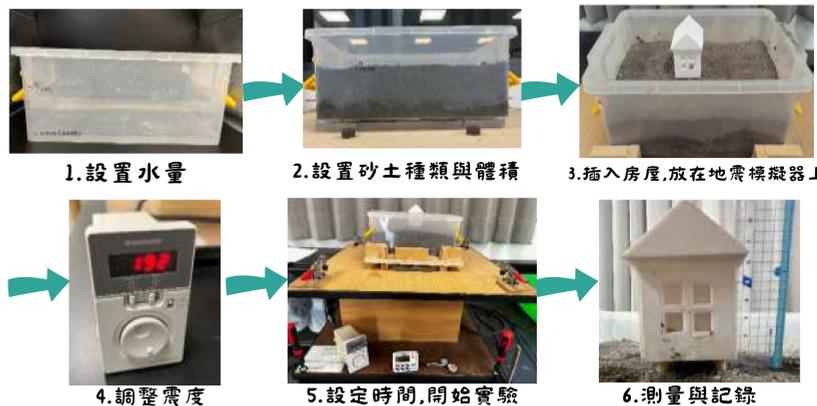
資料來源：關於竹北的地質 (2023年05月14日)

(七) 地樁長度部分

配合兩種地質結構高度設計成短地樁3.5cm和長地樁7.0cm高。但模擬等比例的竹北地層實驗中，為避免受到地層介面的影響，故將兩種建物地樁設定為5cm。

三、實驗步驟

(研究者自行拍攝)



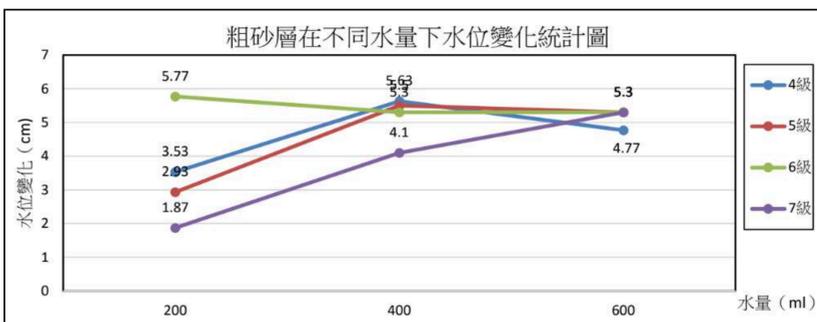
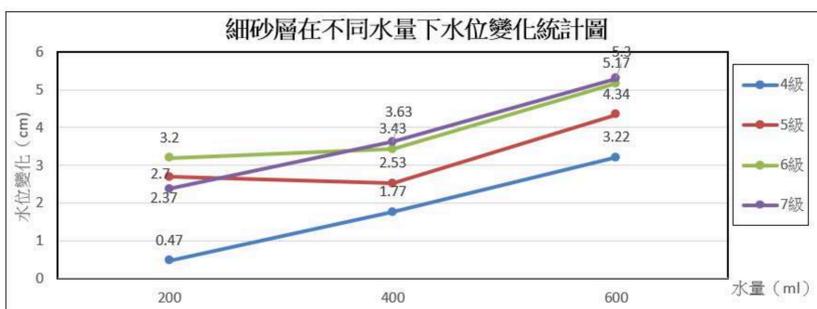
四、實驗變因

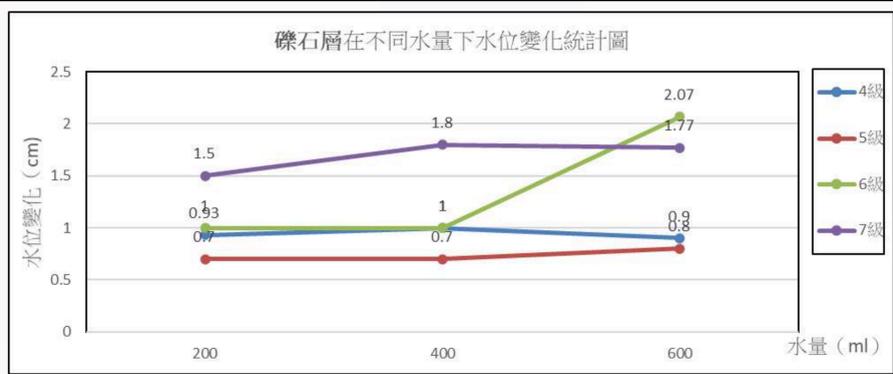
| 實驗 | 研究目的 | 操縱變因 |
|-----|---------------------|----------------------------|
| 實驗一 | 不同水量多寡的影響 | 水量：200ml、400ml、600 ml |
| 實驗二 | 不同地質的影響 | 地質：粗砂、細砂、礫石等地質 |
| 實驗三 | 不同地層分布的影響 | 地層：上細砂+下粗砂、上粗砂+下細砂、上細砂+下礫石 |
| 實驗四 | 不同震度的影響 | 震度：4 級、5 級、6 級、7 級 |
| 實驗五 | 獨棟房屋在不同地樁長度的影響 | 地樁長度：7.0cm、3.5cm |
| 實驗六 | 軟腳蝦大樓在不同地樁長度的影響 | 地樁長度：7.0cm、3.5cm |
| 實驗七 | 兩種建物蓋在竹北地層結構時遇強震的影響 | 建物：獨棟房屋、軟腳蝦大樓；震度：6 級、7 級 |

伍、研究結果

【實驗一】不同水量及【實驗二】不同地質實驗

(一) 各地質在不同水量下的實驗記錄與數據分析





| 地質 | 震度 | 水量 (ml) | 水位變化 (cm) | 標準差 | 土壤高度變化 (cm) | 標準差 | 土壤是否凹陷 | 是否土壤液化 |
|-----|-------|---------|-----------|-------|-------------|-----|--------|--------|
| 細砂層 | 4級 | 200ml | 0.47 | 0.377 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 1.77 | 0.386 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 3.22 | 0.283 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | 5級 | 200ml | 2.70 | 0.216 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 2.53 | 0.205 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 4.34 | 0.125 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | 6級 | 200ml | 3.20 | 0.852 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 3.43 | 0.478 | 0.00 | 0 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 5.17 | 0.189 | 0.00 | 0 | 否 | 67%液化 |
| 7級 | 200ml | 2.37 | 0.125 | -0.50 | 0.082 | 是 | 否 | |
| | 400ml | 3.63 | 0.591 | -1.30 | 0.648 | 是 | 否 | |
| | 600ml | 5.30 | 0 | -0.60 | 0.450 | 是 | 100%液化 | |

| 地質 | 震度 | 水量 (ml) | 水位變化 (cm) | 標準差 | 土壤高度變化 (cm) | 標準差 | 土壤是否凹陷 | 是否土壤液化 |
|-----|-------|---------|-----------|-------|-------------|-------|--------|--------|
| 粗砂層 | 4級 | 200ml | 3.53 | 1.297 | 0.00 | 0.573 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 5.63 | 0.047 | -0.33 | 0.000 | 是 | 33%液化 |
| | | 600ml | 4.77 | 0.411 | -0.67 | 0.471 | 是 | 67%液化 |
| | 5級 | 200ml | 2.93 | 1.181 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 5.50 | 0.283 | -1.47 | 0.340 | 是 | 100%液化 |
| | | 600ml | 5.30 | 0.000 | -0.47 | 0.205 | 是 | 100%液化 |
| | 6級 | 200ml | 5.77 | 0.340 | -0.23 | 0.450 | 是 | 67%液化 |
| | | 400ml | 5.30 | 0.294 | -0.57 | 0.330 | 是 | 100%液化 |
| | | 600ml | 5.30 | 0.000 | -1.07 | 0.205 | 是 | 100%液化 |
| 7級 | 200ml | 1.87 | 0.330 | -1.20 | 0.163 | 是 | 否 | |
| | 400ml | 4.10 | 0.993 | -2.00 | 0.163 | 是 | 33%液化 | |
| | 600ml | 5.30 | 0.000 | -0.83 | 0.713 | 是 | 100%液化 | |

| 地質 | 震度 | 水量 (ml) | 水位變化 (cm) | 標準差 | 土壤高度變化 (cm) | 標準差 | 土壤是否凹陷 | 是否土壤液化 |
|-----|-------|---------|-----------|-------|-------------|-------|--------|--------|
| 礫石層 | 4級 | 200ml | 0.93 | 0.094 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 1.00 | 0.082 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 0.90 | 0.141 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | 5級 | 200ml | 0.70 | 0.141 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 0.70 | 0.216 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 0.80 | 0.000 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | 6級 | 200ml | 1.00 | 0.082 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 400ml | 1.00 | 0.141 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| | | 600ml | 2.07 | 0.450 | 0.00 | 0.000 | 否 | 否 |
| 7級 | 200ml | 1.50 | 0.245 | -1.57 | 0.330 | 是 | 否 | |
| | 400ml | 1.80 | 0.082 | -0.57 | 0.634 | 兩側凹陷 | 否 | |
| | 600ml | 1.77 | 0.340 | -0.73 | 0.573 | 兩側凹陷 | 否 | |

★小結：
由此可知地下水水位越高時，地震後的地下水位的變化也越大。每一次的搖晃都會造成地下水水位上升，細砂層在水量600ml震度7級時開始產生地層下陷的現象，粗砂層則是在水量400ml震度5級時就會產生地層下陷，礫石層則是在7級時有明顯往兩側凹陷的情形。整體而言，地層下陷程度大小為粗砂>礫石>細砂，土壤液化程度大小則為粗砂>細砂>礫石。

【實驗三】不同地層分布的實驗

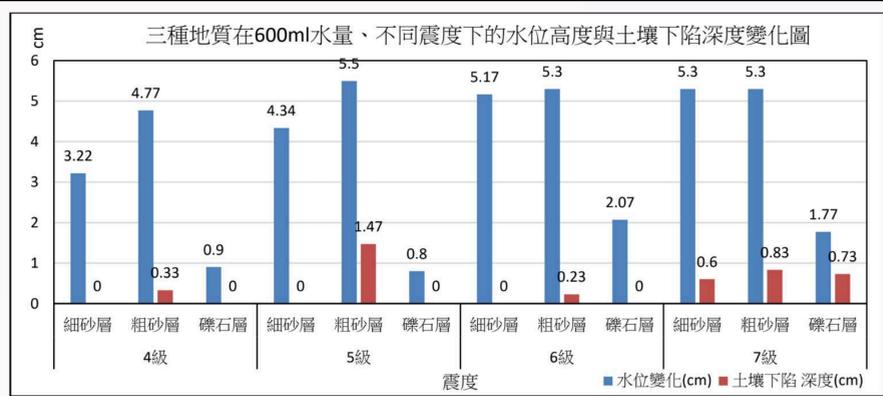
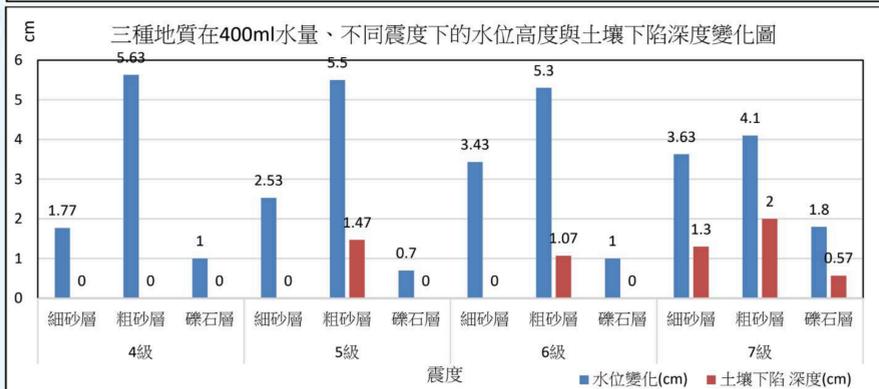
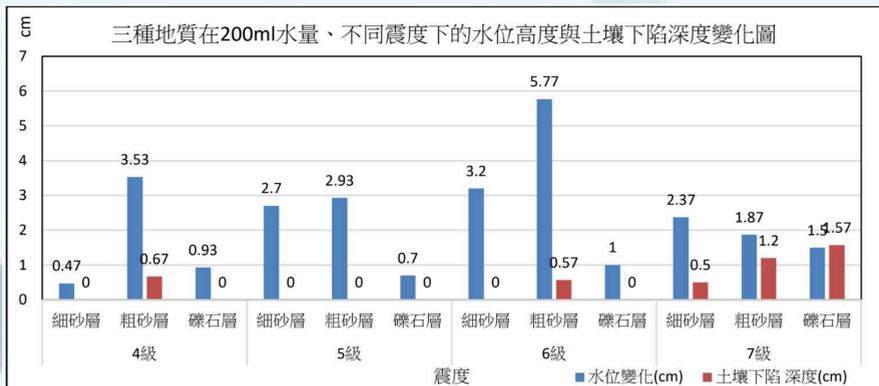
(一)實驗記錄

| 不同地層 | 組別 | 水位變化 (cm) | 標準差 | 土壤高度變化 (cm) | 標準差 | 土壤是否凹陷 | 是否土壤液化 |
|-------------|-----|-----------|-------|-------------|-------|--------|--------|
| 上層細砂 + 下層粗砂 | 第1次 | 5.00 | -- | -1.4 | -- | 是 | 是 |
| | 第2次 | 5.40 | -- | -0.8 | -- | 是 | 是 |
| | 第3次 | 5.30 | -- | -0.2 | -- | 是 | 是 |
| | 平均 | 5.23 | 0.170 | -0.80 | 0.490 | 是 | 100%液化 |
| 上層粗砂 + 下層細砂 | 第1次 | 5.20 | -- | -0.60 | -- | 是 | 是 |
| | 第2次 | 3.50 | -- | -1.10 | -- | 是 | 否 |
| | 第3次 | 5.10 | -- | -1.80 | -- | 是 | 是 |
| | 平均 | 4.60 | 0.779 | -1.17 | 0.492 | 是 | 67%液化 |
| 上層細砂 + 下層礫石 | 第1次 | 5.10 | -- | -1.50 | -- | 是 | 是 |
| | 第2次 | 5.30 | -- | -0.10 | -- | 是 | 是 |
| | 第3次 | 5.30 | -- | -0.90 | -- | 是 | 是 |
| | 平均 | 5.23 | 0.094 | -1.13 | 0.573 | 是 | 100%液化 |

★小結：
1. 單一地質的粗砂層比細砂層容易地層下陷及土壤液化。
2. 不同地質組成的地層中，上層是細砂的地層較容易液化。
3. 上層是細砂，則不論下層是粗砂或礫石，震度6級搖晃2分鐘的液化機率都是100%。

【實驗四】不同震度的實驗

(一)實驗記錄與數據分析



| 地層 | 震度 | 組別 | 水位變化 (cm) | 標準差 | 土壤高度變化 (cm) | 標準差 | 土壤是否凹陷 | 是否土壤液化 |
|-------------|----|-----|-----------|-------|-------------|-------|--------|--------|
| 上層細砂 + 下層礫石 | 6級 | 第1次 | 5.10 | -- | -1.50 | -- | 是 | 是 |
| | | 第2次 | 5.30 | -- | -0.10 | -- | 是 | 是 |
| | | 第3次 | 5.30 | -- | -0.90 | -- | 是 | 是 |
| | | 平均 | 5.23 | 0.094 | -1.13 | 0.573 | 是 | 100%液化 |
| 上層細砂 + 下層礫石 | 7級 | 第1次 | 5.30 | -- | -2.00 | -- | 是、龜裂 | 是 |
| | | 第2次 | 5.20 | -- | -1.50 | -- | 是、龜裂 | 是 |
| | | 第3次 | 5.30 | -- | -2.92 | -- | 是、龜裂 | 是 |
| | | 平均 | 5.27 | 0.047 | -2.14 | 0.588 | 是、龜裂 | 100%液化 |

★小結：
由此可知，震度越高，越容易發生地層下陷和土壤液化。細砂層在震度4~5級時皆沒有任何影響，直至震度6級時才有67%的機率發生土壤液化、震度7級時不僅土壤液化機率100%，也發生土壤下陷的現象。粗砂層則是震度4~7級都有土壤液化與地層下陷的情形。上層細砂下層礫石的地層則是震度6~7級都有土壤液化與地層下陷的情形。

【實驗五】獨棟房屋及【實驗六】軟腳蝦大樓的實驗

(一)實驗記錄與數據分析

1. 獨棟房屋不同地樁長度實驗紀錄表

| 地樁長度 | 地層別 | 組別 | 最低土高 (cm) | 最高土高 (cm) | 搖晃後最高水面高度 (cm) | 房屋是否傾斜 | 傾斜角度 | |
|-------------|-------------|------|-----------|-----------|----------------|------------|------|-----|
| 7.00 cm | 細砂層 | 1 | 6.60 | 7.00 | 5.95 | 否 | 0.0 | |
| | | 2 | 6.70 | 7.00 | 5.80 | 否 | 0.0 | |
| | | 3 | 6.40 | 7.00 | 6.00 | 是 | 7.0 | |
| | | | 平均 | 6.57 | 7.00 | 5.92±0.085 | 33% | 2.3 |
| | 粗砂層 | 1 | 6.80 | 7.50 | 7.50 | 否 | 0.0 | |
| | | 2 | 6.50 | 7.30 | 7.30 | 否 | 0.0 | |
| | | 3 | 6.00 | 7.80 | 7.80 | 否 | 0.0 | |
| | | | 平均 | 6.43 | 7.53 | 7.53±0.250 | 0% | 0.0 |
| | 上層細砂 + 下層粗砂 | 1 | 5.60 | 7.80 | 7.80 | 否 | 0.0 | |
| | | 2 | 6.20 | 8.00 | 8.00 | 是 | 5.0 | |
| | | 3 | 6.80 | 7.30 | 7.30 | 是 | 5.0 | |
| | | | 平均 | 6.20 | 7.70 | 7.70±0.294 | 67% | 3.3 |
| 上層細砂 + 下層礫石 | 1 | 6.80 | 7.20 | 7.00 | 否 | 0.0 | | |
| | 2 | 6.50 | 7.20 | 7.00 | 否，但房屋周圍下陷0.5cm | 0.0 | | |
| | 3 | 6.50 | 7.30 | 7.00 | 否，但房屋周圍下陷0.5cm | 0.0 | | |
| | | 平均 | 6.60 | 7.23 | 7.00±0.000 | 0% | 0.0 | |
| 3.50 cm | 細砂層 | 1 | 5.80 | 7.50 | 5.60 | 否 | 0.0 | |
| | | 2 | 5.80 | 6.80 | 6.80 | 否 | 0.0 | |
| | | 3 | 5.50 | 7.40 | 5.70 | 否 | 0.0 | |
| | | | 平均 | 5.70 | 7.23 | 6.03±0.544 | 0% | 0.0 |
| | 粗砂層 | 1 | 5.00 | 8.00 | 5.50 | 是 | 4.0 | |
| | | 2 | 6.00 | 7.40 | 7.40 | 否 | 0.0 | |
| | | 3 | 6.20 | 7.50 | 7.50 | 否 | 0.0 | |
| | | | 平均 | 5.73 | 7.63 | 6.80±0.920 | 33% | 1.3 |
| | 上層細砂 + 下層粗砂 | 1 | 6.20 | 7.00 | 7.00 | 是 | 3.0 | |
| | | 2 | 4.70 | 7.70 | 7.70 | 是 | 6.0 | |
| | | 3 | 6.00 | 8.00 | 8.00 | 否 | 0.0 | |
| | | | 平均 | 5.63 | 7.57 | 7.57±0.419 | 67% | 3.0 |
| 上層細砂 + 下層礫石 | 1 | 6.10 | 7.00 | 7.00 | 否，但房屋周圍下陷0.8cm | 0.0 | | |
| | 2 | 6.00 | 7.30 | 7.30 | 否 | 0.0 | | |
| | 3 | 6.20 | 7.10 | 7.00 | 否，但房屋周圍下陷0.5cm | 0.0 | | |
| | | 平均 | 6.10 | 7.13 | 7.10±0.141 | 0% | 0.0 | |

2. 軟腳蝦大樓不同地樁長度實驗紀錄表

| 地樁長度 | 地層別 | 組別 | 最低土高 (cm) | 最高土高 (cm) | 搖晃後水位高度 (cm) | 房屋是否傾斜 | 傾斜角度 | 屋頂時間 | |
|-------------|-------------|-----|-----------|-----------|--------------|------------|------|-------|----|
| 7.00 cm | 細砂層 | 1 | 6 | 7 | 6.6 | 往圓弧面傾斜 | 5 | -- | |
| | | 2 | 5.5 | 7 | 7 | 往圓弧面傾斜 | 3.5 | -- | |
| | | 3 | 6.7 | 7 | 7 | 往圓弧面傾斜 | 5 | -- | |
| | | | 平均 | 6.07 | 7.00 | 6.87±0.189 | 100% | 4.5 | -- |
| | 粗砂層 | 1 | 6 | 7 | 7 | 往圓弧面傾斜 | 7 | -- | |
| | | 2 | 6.8 | 7 | 6.6 | 往圓弧面傾斜 | 5 | -- | |
| | | 3 | 6.8 | 7.2 | 7.2 | 往圓弧面傾斜 | 19 | -- | |
| | | | 平均 | 6.53 | 7.07 | 6.93±0.249 | 100% | 10.33 | -- |
| | 上層細砂 + 下層粗砂 | 1 | 6.7 | 7.7 | 7.7 | 往圓弧面傾斜 | 10 | -- | |
| | | 2 | 6.8 | 7.2 | 7 | 往圓弧面傾斜 | 4 | -- | |
| | | 3 | 5.7 | 7.2 | 7.2 | 往圓弧面傾斜 | 20 | -- | |
| | | | 平均 | 6.75 | 7.45 | 7.35±0.294 | 100% | 11.33 | -- |
| 上層細砂 + 下層礫石 | 1 | 7 | 7.4 | 7.4 | 無 | 0 | -- | | |
| | 2 | 6.5 | 7.6 | 7.6 | 往圓弧面傾斜 | 5 | -- | | |
| | 3 | 6 | 7.5 | 7.5 | 往圓弧面傾斜 | 7 | -- | | |
| | | 平均 | 6.5 | 7.5 | 7.5±0.082 | 67% | 4 | -- | |
| 3.50 cm | 細砂層 | 1 | 5.8 | 6.2 | 6.2 | 往圓弧面傾斜 | 90 | 28s | |
| | | 2 | 5.6 | 6.8 | 6.2 | 往圓弧面傾斜 | 90 | 14s | |

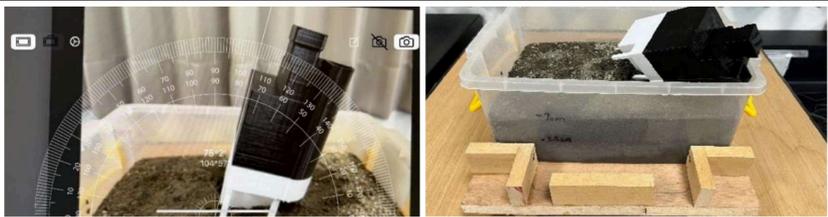


圖57 軟腳蝦大樓震度6級實驗後傾斜15度 (研究者自行拍攝)

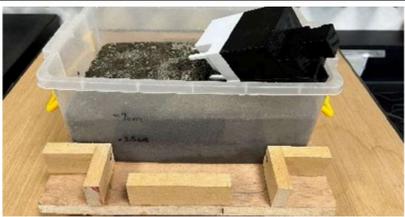


圖58 軟腳蝦大樓7級實驗後倒塌 (研究者自行拍攝)

不同變因綜合比較分析

綜合實驗一、二、四的結果，發現**水量、地質與震度**對地層下陷和土壤液化都有影響，為比較這些變因，我們利用下列的矩陣表格來分析影響結果，發現**地質是影響地層下陷與土壤液化的最關鍵因素**；其次**低水位至少要遇到震度6級以上才會發生地層下陷**；粗砂層則在中水位遇到震度4級以上就會發生地層下陷與土壤液化。礫石層則只在震度7級以上會發生地層下陷，但不會產生液化情形。

| 土壤液化機率 | | | | |
|--------|-----|------|------|------|
| 細砂層 | 4 級 | 5 級 | 6 級 | 7 級 |
| 200ml | | | | |
| 400ml | | | | |
| 600ml | | | 67% | 100% |
| 粗砂層 | 4 級 | 5 級 | 6 級 | 7 級 |
| 200ml | | | 67% | |
| 400ml | 33% | 100% | 100% | 33% |
| 600ml | 67% | 100% | 100% | 100% |
| 礫石層 | 4 級 | 5 級 | 6 級 | 7 級 |
| 200ml | | | | |
| 400ml | | | | |
| 600ml | | | | |

| 地層下陷機率 | | | | |
|--------|-----|------|------|------|
| 細砂層 | 4 級 | 5 級 | 6 級 | 7 級 |
| 200ml | | | | 100% |
| 400ml | | | | 100% |
| 600ml | | | | 100% |
| 粗砂層 | 4 級 | 5 級 | 6 級 | 7 級 |
| 200ml | | | 100% | 100% |
| 400ml | 67% | 100% | 100% | 100% |
| 600ml | 33% | 100% | 100% | 100% |
| 礫石層 | 4 級 | 5 級 | 6 級 | 7 級 |
| 200ml | | | | 100% |
| 400ml | | | | 100% |
| 600ml | | | | 100% |

陸、討論

一、探討不同水量多寡對地層下陷與土壤液化的影響

我們發現不論水量多寡，搖晃後水位皆會上升，且水量越多，水位上升越明顯，土壤液化機率也越高。我們推論，**搖晃後，土壤顆粒與顆粒之間間隙縮小，原本在孔隙間的水因空間變小而被擠壓出來**，而當水量愈多時，被擠壓出的水量也會愈多。

二、探討不同地質與地層分布對地層下陷與土壤液化的影響

李珩 (2015) 指出，**顆粒越小的土壤，越容易土壤液化**。但顆粒最小的黏土因為顆粒太小，遇到地震時空隙也不會有太大改變，所以也不會土壤液化。故顆粒小的細砂是引發土壤液化的關鍵，但我們的實驗結果顯示，**粗砂層比細砂層更容易地層下陷和土壤液化**，與此說法不同。我們認為：**首先，實驗在實驗箱中操作，無法準確模擬大範圍液化情形。第二，粗砂粒徑較大，孔徑也較大，模擬地震時粗砂發生位移，擠壓出更多的水。另外，粗砂中含有大量細砂粒徑的顆粒，顆粒大小不一致，也有可能是影響實驗的關鍵。**

再者，我們認為土壤液化也和砂土的孔隙率有關，因此我們先計算了三種地質的孔隙率，如下表。

$$\text{孔隙體積} = V_s ; \text{砂土體積} = V ; n = V_s / V * 100\%$$

| 礫石： | 粗砂： | 細砂： |
|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| $V_s = 363 - 100 = 263$ | $V_s = 335 - 100 = 235$ | $V_s = 264 - 100 = 164$ |
| $V = 500$ | $V = 500$ | $V = 500$ |
| $n = (263/500) * 100\% = 52.6\%$ | $n = (235/500) * 100\% = 47\%$ | $n = (164/500) * 100\% = 32.8\%$ |

如上表，三種砂石的孔隙率大小為：**礫石>粗砂>細砂**；而三種地質下陷程度為：**粗砂層>礫石層>細砂層**；土壤液化程度則是：**粗砂層>細砂層>礫石層**，我們發現土壤下陷和液化程度和土壤孔隙率並非呈現正相關。上網查資料後發現，**影響土壤下陷和液化的因素除了孔隙率，還受到地層質地、孔隙水壓力、土壤壓實程度等影響。且有文獻顯示砂質土壤（本實驗中的粗砂）比其他土壤更容易液化，這與我們的實驗結果一致。至於細砂層不易液化，可能與其顆粒較小、摩擦力較大、結構相對穩定有關。**

三、探討不同地層分布對地層下陷與土壤液化的影響

在不同地層分布的實驗結果顯示，上層是細砂的地層比較容易液化。而**竹北發生多次地層下陷造成天坑的大學地段，是砂質粉土+卵礫石+砂岩**，與我們實驗結果較容易發生地層下陷與土壤液化的地層相符。

四、探討獨棟房屋在不同地樁長度下，對建物傾斜的影響

在單一地質中，地樁長度並非影響房屋建築的關鍵，但在兩種地層結構中，**地樁較長能減小房屋傾斜角度**。

在土壤液化地層上，短地樁房屋更易傾斜且角度大，地樁甚至會裸露。由此可見**地樁最適長度與地質種類仍有很大關係**。我們都知道地樁長度最好可以深及堅固岩盤，但需考慮施工難度與成本，如何達到安全與經濟平衡才是重要關鍵。未來研究可探討房屋配重與地樁長度的關係，以提供建商更好的建議。

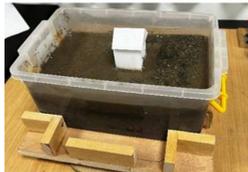


圖54 土壤液化對7cm地樁房屋的影響 (研究者自行拍攝)



圖55 土壤液化對3.5cm地樁房屋的影響 (研究者自行拍攝)

模擬竹北地層的實驗發現，**地樁長短不影響房屋傾斜，但震後周圍地層易掏空，與實際天坑事件相符**。土木結構技師拱祥生表示，竹北第3次崩塌是由基地水位上升導致上層土壤鬆軟塌陷（2023年10月18日，聯合新聞網）。我們的實驗也證明了這點。

五、探討軟腳蝦大樓在不同地樁長度下，對建物傾斜的影響

由於實驗期間發生花蓮0403大地震，我們設計了軟腳蝦大樓與獨棟房屋進行比較，發現**地樁長短是軟腳蝦大樓是否傾倒的關鍵**。短地樁的軟腳蝦大樓會向缺乏承重牆與支撐柱的**圓弧面傾斜倒塌**，這樣的設計可能產生頭重腳輕、重心不平衡的現象。獨棟房屋則傾斜機率與角度較小，不會整棟倒塌。

根據國家地震工程研究中心網站指出，如果某樓層的結構比其他樓層明顯軟弱，地震摧毀的能量會集中在這層樓，造成該樓層先坍塌，其他樓層跟著倒塌，稱為軟弱層建築。我們的實驗在最後一次七級地震中，地樁甚至被搖斷，可見軟弱層問題不容小覷。

六、模擬兩種建物蓋在竹北地層結構，遇到強震時對建物的影響

模擬竹北地層的建物在六級震度搖晃下，**兩種建物都有傾斜但角度無顯著差異**；在七級震度下，**獨棟建築的倒塌機率為66.7%，軟腳蝦大樓100%倒塌**，顯示軟弱層影響建物倒塌甚大。由於竹北地質結構易受地震破壞，產生地層下陷、掏空及土壤液化現象，地樁長度與建物結構設計是建築安全的重要考量。

柒、結論

- 一、細砂與粗砂層的**地下水位越高**，震後的水位變化越大，越容易產生**地層下陷與土壤液化**；礫石層無論水量多寡都不會液化。
 - 二、**地質**是影響地層下陷與土壤液化的最關鍵因素，整體而言：
 - (一) 土壤液化程度：粗砂層>細砂層>礫石層。
 - (二) 地層下陷程度：粗砂層>礫石層>細砂層。
 - (三) 水位變化高度：粗砂層>細砂層>礫石層。
 - 三、不同地質所組成的地層中，**上層是細砂**的地層比較容易液化。
 - 四、**震度越高，越容易發生地層下陷和土壤液化**。震度7級對每種地層都有嚴重影響。
 - 五、不同地質的地層中，不論地樁長短，房屋傾斜機率相同，但**地樁較長者，房屋傾斜角度較小**。
 - 六、長地樁的軟腳蝦大樓較不容易傾倒，只有輕微傾斜現象。**短地樁的軟腳蝦大樓皆會傾倒**且都向缺乏承重牆與支撐柱的圓弧面傾斜，顯示軟弱層影響建物倒塌之大。
 - 七、模擬蓋在竹北地層結構的兩種建物在六級震度下，都有傾斜情形且角度無顯著差異；在七級震度下，獨棟建築的倒塌機率為66.7%，而**軟腳蝦大樓100%倒塌**。
 - 八、竹北地質結構易受到強震而產生地層下陷、掏空及土壤液化，故**建物的地樁長度與結構設計**會是建築安全最重要的考量。
- 總結：****地層下陷與土壤液化的變因受到地質、水位與震度影響**，而其中**地質是最關鍵因素**；**地下水位與震度也會交互影響**，低水位至少要遇到震度6級以上才會發生地層下陷；粗砂層則在中水位遇到震度4級以上就會發生地層下陷與土壤液化。礫石層則只有在震度7級以下會發生地層下陷，但不會產生液化。

捌、參考文獻與資料

一、圖片

- (一)圖 1~圖 18、圖 20~圖 60,皆由研究者自行拍攝及繪製。
- (二)圖 19 資料來源:關於竹北的地質(2023 年 05 月 14 日)。Mobile01 討論群組。取自:https://www.mobile01.com/topicdetail.php?f=458&t=6785081。

二、資料

- 土壤液化Q&A/基本認識(2023)。土壤液化潛勢查詢系統網站。經濟部地質調查及礦業管理中心。自:https://www.liquid.net.tw/cgs/public/QA01.html交通部中央氣象局地震震度分級表(2022年08月03日)。取自:https://www.laws.taipei.gov.tw/lawatt/Law/A040110111003900-20101208-2000-001.pdf
- 竹北市公所網站(2024年01月31日)。地理環境。取自:https://www.zhubei.gov.tw/iframecontent_edit.php?menu=1167&typeid=35&typeid2=655&menu=25&typeid=35
- 巫鴻璋、郭政芬(2023年04月27日)。離譜!竹北天坑吃掉一輛車 特斯拉 Model Y 遭殃整輛掉進洞。聯合新聞網。取自:https://udn.com/news/story/7320/7126418
- 巫鴻璋、黃羿馨(2023年10月18日)。竹北再爆天坑專家曝因這個地層結構釀禍...天坑恐一再上演。聯合新聞網。新竹即時報導。取自:https://udn.com/news/story/7323/7513328
- 李珩(2015)。土壤液化成因。科學 Online 高瞻自然科學教學資源平台。取自:https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=65098
- 國家地震工程研究中心(2024年06月01日)。地震與樓房振動/建築物的外觀形狀與耐震性/軟弱層建築的耐震力不佳。取自:https://www.ncree.org/safefhome/ncr03/pc5_6.htm
- 張裕珍(2023年8月21日)。極端氣候加劇「催生」天坑 專家提短中長期解方。經濟日報。取自:https://money.udn.com/money/story/5648/7384850?from=edn_related_storybottom
- 寧于晨(2023年5月19日)。不只信義區天坑!北市11處路段「恐藏土壤液化危機」中山、內湖全上榜。Yahoo!新聞。取自:https://ynews.page.link/XHFY1
- 臺北市政府土壤液化潛勢查詢系統網站(2018)。臺北市政府。取自:https://soil.taipei/Taipei/Main/pages/QA2.html
- 關於竹北的地質(2023年05月14日)。Mobile01 討論群組。取自:https://www.mobile01.com/topicdetail.php?f=458&t=6785081