

中華民國第 57 屆中小學科學展覽會 作品說明書

國中組 地球科學科

030513

土壤液化發生的地層共振條件相關研究

學校名稱：新竹市立光華國民中學

作者： 國二 張又仁 國二 黃威程	指導老師： 林君翰
---------------------------------	------------------

關鍵詞：土壤液化

摘要

地震可能造成土壤液化，本實驗是利用自製的震動台來模擬地震，壓克力盒內裝彈珠, BB 彈和沙來模擬地層，試著改變其震動頻率，來找出最容易發生土壤液化的共振頻率條件。

我們分別做了 S 波和 P 波的震動台，震盪模擬地層及地下水層的實驗盒，並建立研究模型利用水沙比(R_{ws})、液化時間(T_L)定義出土壤液化潛勢指數 I_L ，作為土壤液化的指標並用來說明土壤液化與地震頻率的關係，我們發現震動頻率的確跟土壤液化有很大的關聯，當頻率在某個頻寬時很容易液化，過後即變不容易液化，而 S 波對土壤液化的發生影響明顯的比 P 波還來的大，最後我們藉由在地層中埋入隔板試圖改變地層的共振條件並獲得良好的成果，以期未來在土壤液化防治上有更進一步的成果。

壹、研究動機

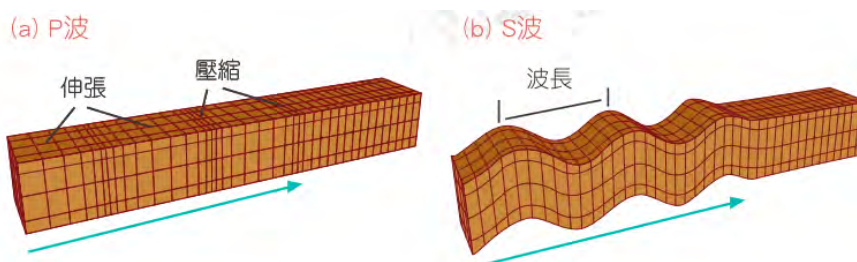
2016 年2月6日的美濃地震，引起臺南市部分地區發生震災，導致一些建築物結構因耐震能力不足，自然震盪頻率產生共振等等，造成更嚴重的地震及災情，建築物發生倒塌與破壞，而在安南區惠安街與新市區三民街及多處地方也發生嚴重土壤液化災情, 使得「土壤液化」安全問題受到社會大眾的關注與重視。我們看到了這篇新聞，並對為何會產生土壤液化及震動頻率與土壤液化的關聯產生了好奇，於是我們著手進行了有關土壤液化的研究。

貳、文獻探討

一、地震波依震動方向可分為兩類：

P 波（縱波或壓縮波）：性質與音波相似，質點運動和波傳播方向一致，速度最快。

S 波（橫波或剪力波）：質點運動與波傳播方向垂直，產生前後左右在水平各方向的振動，速度次之。

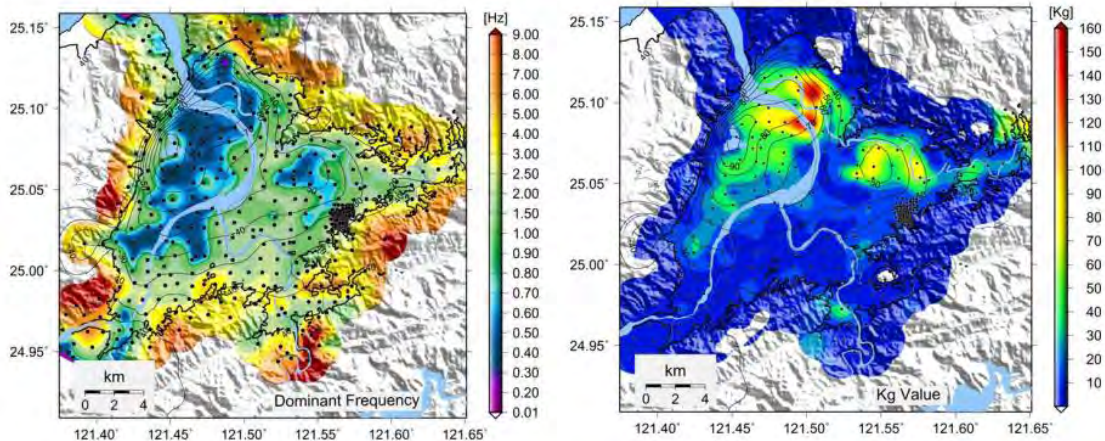


二、地層的自然振動頻率，是否有可能在地震時發生共振？

「發生地震時，本身之自然頻率與地層之自然頻率若相近時，則容易發生共振造成振幅的放大而造成更大的災害。」

「Nakamura 提出計算液化潛能指數(Kg 值)用來評估土壤液化的潛勢。Kg 值越大的地區越容易發生土壤液化。根據 Nakamura 推論標準，台北盆地內有許多區域具有中度至嚴重液化潛勢。雖然 Kg 值評估液化潛能並沒有很精確，但此與地調所公布之土壤液化潛勢分布大致相符。」

(截自台灣地震科學中心通訊第十一期)



圖(一)

圖(二)

從圖(一)和圖(二)當中，可以發現液化潛能指數(Kg 值)較高的地區位於盆地中央處，且以台北盆地來說，液化潛能指數較高區域其地層的自然振動頻率也相當一致大約為 0.3~0.6Hz，顯示土壤液化潛勢與地層的自然共振頻率有關，因此若是地震波頻率恰可與地層發生共振則地震波頻率與土壤液化勢必有密不可分的關聯性。

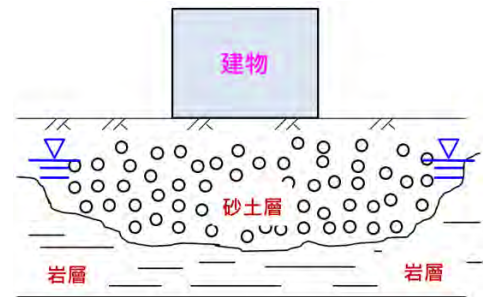
三、場址效應是甚麼？

場址效應 (英語: Seismic site effects) 是一種影響地震震度的因素，當震源的地震波傳到地表時，因地表表面的地下介質 (地盤) 的軟硬程度而影響此地的震度大小。原本離震央越近震度就會越大，但地震波傳至沖積層地表時，因淺層地底下的介質，導致速度降低，引起地震波放大，不僅震幅加大，持續時間也延長。(Wikipedia)

四、土壤液化的必要條件

根據國家災害防救中心所提出的「0206美濃地震相關資訊綜整與研判」簡報當中提到土壤液化的必要條件為：

- (一)地表下沙土層的地層結構需大於20公尺
- (二)地下水須高於沙土層2/3高度



△土壤液化區域地層結構示意圖

參、研究目的

一、確定研究模式，建立模型

- (一)挑選數據
- (二)使用斜率作為液化指數

二、研究土壤液化與震動頻率的相關性

- (一)頻率區間
- (二)探討沙和水的合適比例之範圍

三、P波、S波對土壤液化之影響

- (一)土壤液化S波頻率相關性
- (二)土壤液化P波頻率相關性

四、利用隔板改變震盪行為之可能性

肆、研究設備及器材

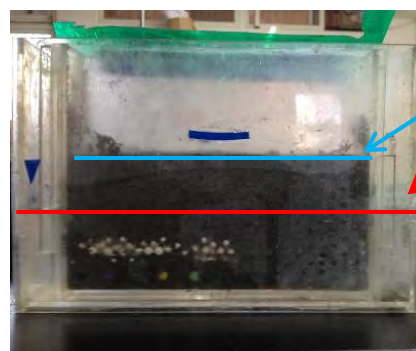
一、實驗主體：

(一)細沙：取自海邊出海口，經過固定粒徑大小的篩網過篩，為提高實驗的一致性，實驗皆使用過篩後的細沙。

(二)連通管裝置：利用連通管原理外接補注水體(如下圖左)，確保實驗盒中的模擬地下水位不會因為細沙吸水或土壤液化時周圍的地下水位發生劇烈變化(如下圖右)



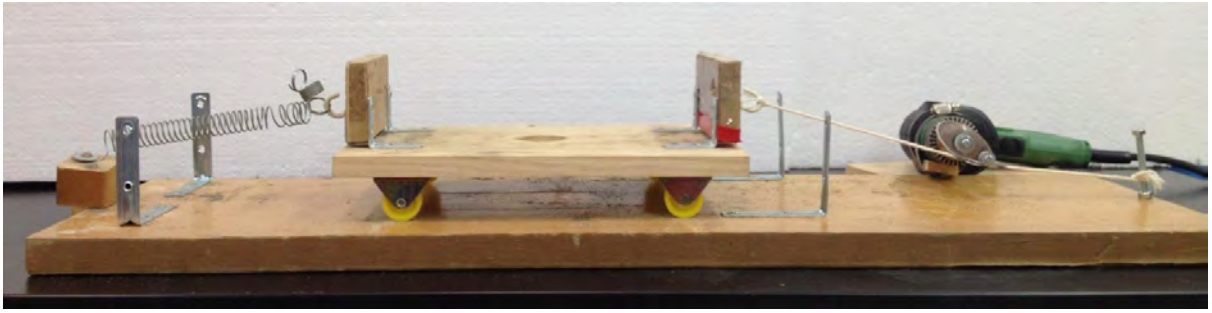
△連通管裝置可做為補注水體



△實驗盒，分為內外盒兩盒以卡榫連接使內外盒單面緊密相連，可用於錄影時方便觀察土壤中水線變化。使用連通管裝置可使液化時地下水位(紅線)不產生劇烈變化。

(三)實驗盒：分為內外盒(如上圖右)，利用雷射精準切割3mm 壓克力製成，外盒(23x6x16cm³)為水盒可模擬土壤液化區周圍的地下水。內盒(18x3x15cm³)為土壤盒利用細沙、BB彈、彈珠分層水平堆疊模擬的地層，側邊開有細孔以利地下水進出。兩盒以卡榫連接使內外盒單面緊密相連，可用於錄影時方便觀察土壤中水線變化。

(四)自製 S 波震動台：主體震動台，為20x30cm²的4分松木板，兩端有間距約為26cm 的 L 型檔板，可將實驗盒固定在中間，並且在實驗盒側邊有約5cm 空間可加裝 Arduino 裝置；震動台下方則裝設滑輪減少摩擦力，並且提供定向震動。震源，利用電鑽加上自製橢圓壓片，壓動棉繩產生微小震幅，並由與震動台另一端相連的彈簧提供回復力，具有可固定震幅及隨時調整震動頻率的優勢。



△ S波震動台全貌，具有可固定震幅及隨時調整震動頻率的優勢

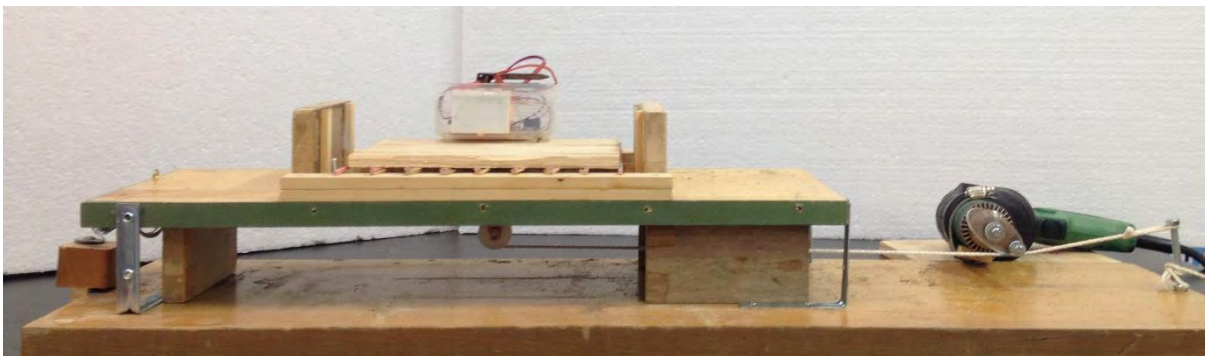


△ L型檔板及下方滑輪，滑輪有助於提供定向震動

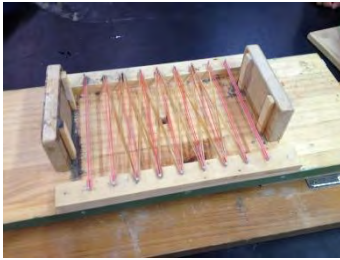
△ 電鑽、自製橢圓壓片

△ 彈簧提供回復力

(五)自製 P 波震動台：主體震動台，分為震動台及固定座兩部分。震動台為 $50 \times 20 \text{cm}^2$ 的5分松木板加上下方支架固定於提供震源的底座，其上設有垂直的滑軌以限制實驗和震動方向，以及兩排平行的勾板，可用橡皮筋編織成網狀的支撐平台，具有平均受力並提供穩定回復力的優勢；震動台下方則有定滑輪可改變棉繩的施力方向。固定座為 $15 \times 20 \text{cm}^2$ 的3分松木板放置在支撐平台上裝有 Arduino 裝置，下方勾有棉繩並穿過支撐平台經過定滑輪，再與震源底座相連接。震源，與 S 波震動台相同底座，利用電鑽加上自製橢圓壓片，壓動棉繩產生微小震幅，透過震動台下的定滑輪改變施力方向，牽動固定座達到上下震動的效果，具有可固定震幅及隨時調整震動頻率的優勢。



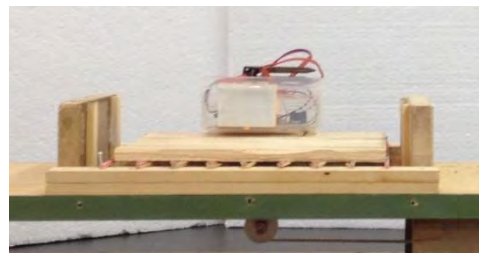
△ P 波震動台全貌，同樣具有可固定震幅及隨時調整震動頻率的優勢。



△ 兩側垂直方向滑軌及橡皮筋編織成網狀的支撐平台，可平均受力並提供穩定回復力。



△ 下方定滑輪可改變棉繩的施力方向。



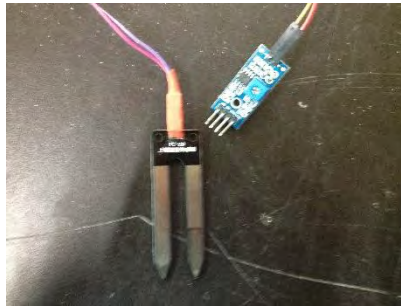
△ 放置於支撐平台上的固定座及 Arduino 裝置。

二、輔助工具：

Arduino 裝置



土壤溼度計



光電轉速表



伍、研究方法





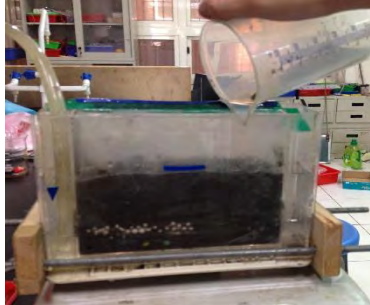
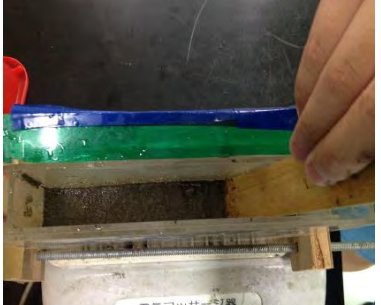
一、基礎設定：

(一) 沙子過篩並混合均勻：確保實驗的一致性

(二) 模擬地層的方法：底層放入一層 1.5cm 彈珠(大孔隙岩層)，上面鋪著一層與彈珠等高的沙，接著蓋上與彈珠等高的 BB 彈(小孔隙岩層)，最後把沙子加到做實驗的高度(實驗中的沙高包括彈珠和 BB 彈)

(三) 頻率設定：1.7~12Hz

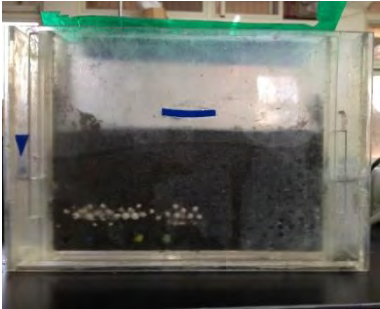
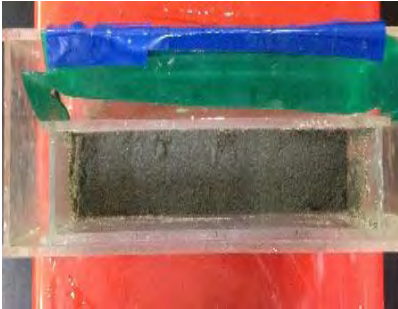

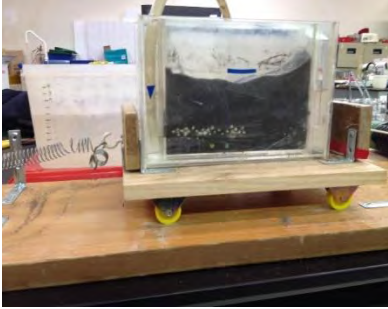
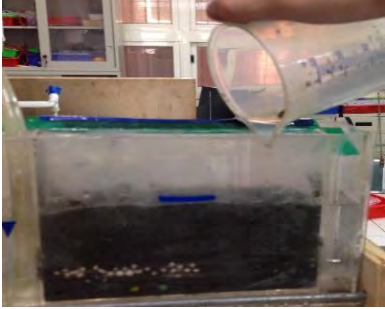


二、研究一：用搖擺機模擬地震，找出最容易發生土壤液化的水沙比 Rws

<p>1. 將實驗盒內裝入模擬地層(沙、BB彈、彈珠)</p> 	<p>2. 將內層實驗盒卡入外盒固定</p> 	<p>3. 用螺帽將整個實驗盒固定在搖擺機上</p> 
<p>4. 外盒裝水並架設連通管裝置，等水位平衡達到實驗需要的水位</p> 	<p>5. 土壤會因為吸水而變緊密，而導致沙高降低，故需把沙子補足到實驗高度</p> 	<p>6. 將沙子表面撥平，並將砝碼放在沙子表層，即開始實驗</p> 

補充說明：定義土壤液化為當砝碼沉陷時，即為發生土壤液化。

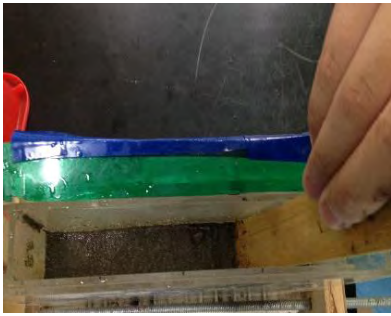
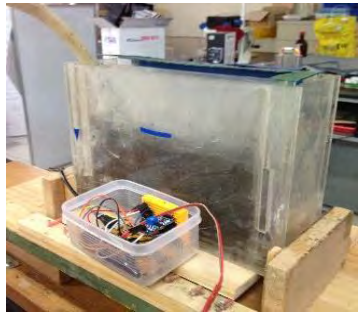
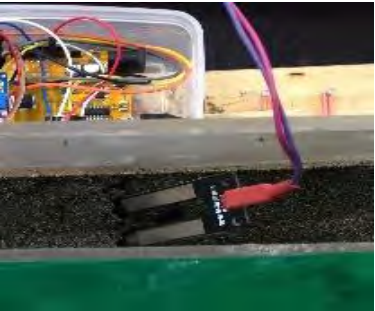
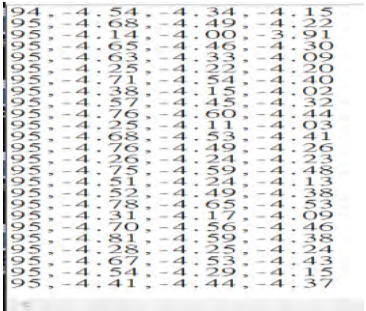
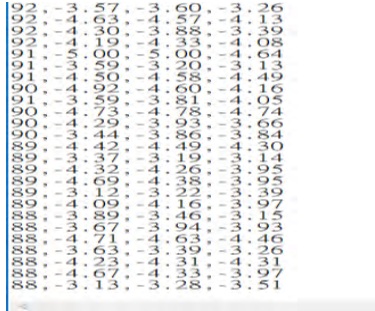
三、研究二：使用 S 波震動台來測量不同頻率對各個水沙比的土壤液化指數

在參考資料中寫到土壤液化潛勢區的沙土層厚度40到50公尺，而我們的沙土層只有6到10公分，換算下來，我們模擬的震幅必須控制在0.1到0.2公分之間，但是搖擺機震幅卻有8公分，所以我們製作振幅較小的 S 波震動台來模擬地震。

<p>1. 將實驗盒內裝入模擬地層(沙、BB彈、彈珠)</p> 	<p>2. 將內層實驗盒卡入外盒固定</p> 	<p>3. 利用木塊把整個實驗盒固定在裝著輪子的震動台上</p> 
<p>4. 外盒裝水並架設連通管裝置，等水位平衡達到實驗需要的水位</p> 	<p>5. 土壤會因為吸水而變緊密，而導致沙高降低，故需把沙子補足到實驗高度</p> 	<p>6. 將沙子表面撥平，並將砝碼放在沙子表層，調好固定頻率，開始實驗</p> 
<p>7. 實驗中測量頻率並取平均值作為此實驗的震動頻率</p> 		


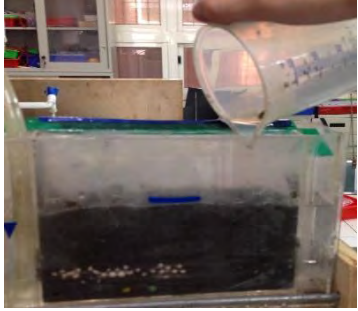
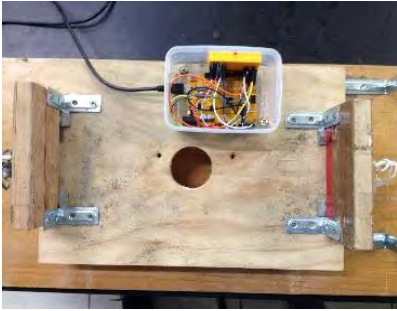
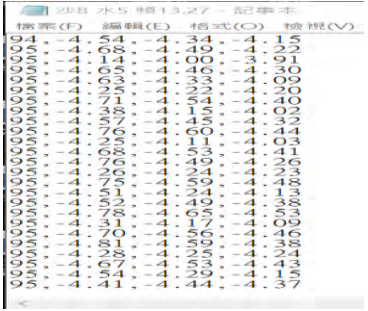
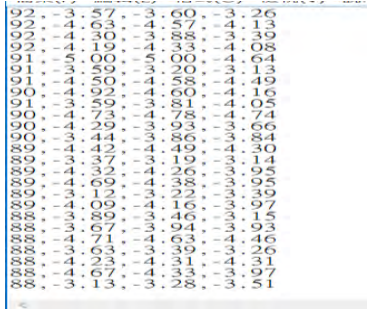
四、研究三：使用 S 波和 P 波震動台並加入 Arduino 土壤濕度計來測量不同頻率對各個水沙比的液化的相關性

人為判斷是否發生土壤液化，可能發生誤差，所以接下來使用 Arduino 土壤濕度計，用電腦讀出數據後，便可記錄發生液化的秒數，使實驗數據能夠更準確的記錄。首先我們做了乾沙搖動及不搖動和溼沙搖動及不搖動的實驗，我們發現搖動和不搖動的溼度並沒有明顯不同。原本認為土壤濕度計的測量可能是和導電度有關，後來發現搖動跟沒搖動的溼度是差不多的，所以我們便可以判定為極小的誤差。

<p>1. 如研究二1~5</p>	<p>2. 將沙子表面撥平</p> 	<p>3. 將寫好程式的 Arduino 裝置裝在盒子並用螺絲鎖在震動台上(S 波及 P 波)</p> 
<p>4. 固定頻率，將土壤濕度計插入沙子表層</p> 	<p>5. 看溼度讀數為94、95，即開始實驗</p> 	<p>6. 實驗後，讀取資料並可得知液化所需時間</p> 

補充說明:土壤濕度計測量試驗後，發現每一組乾沙實驗的初始數據為94或95，而溼沙為88或89，所以便可知何時液化。

五、研究四：利用 S 波的震動台並在實驗盒上裝入隔板來改變其震盪形式

<p>1. 如研究二1~4</p>	<p>2. 沙子因水變緊密，而使沙高由9cm 變為8cm，並將1~3片隔板平均分散插入沙中</p> 	<p>3. 把沙子補足至9cm 處，撥平，並固定頻率</p> 
<p>4. 將寫好程式的 Arduino 裝置裝在盒子並用螺絲鎖在震動台上</p> 	<p>5. 看溼度讀數為94、95，即開始實驗</p> 	<p>6. 將數據輸入電腦，並記錄數據</p> 

補充說明：S 波比 P 波更容易發生土壤液化，而水6沙9的模式在不同頻率中，液化時間的變化較明顯，所以就只取 S 波的這組來加入隔板做研究。

陸、研究結果

一、研究一：用搖擺機模擬地震，找出最容易發生土壤液化的水沙比例

(一)實驗結果：

液化時間(S)		水高(cm)					
		4	5	6	7	8	9
沙 高 (cm)	7	X	1.4	0.8			
	8	X	1.5	0.8	0.5		
	9	19	1.8	1.2	1	0.5	
	10	0.9	9	X	0.7	0.33	0.2
	11	X	X	X	1.03	0.67	1

註：X 表示未發生液化

(二)討論：

1. 當水高為3cm時，所有的土壤厚度皆不發生液化，故數據未列出。
2. 數據大致上可以觀察到「相同沙高水越高，液化所需時間越短」、「相同水高沙越高，液化所需時間越長」。
3. 數據趨勢與理論相符，地下水位若超過土層的2/3有較大機會發生液化，且地下水面越高越容易發生液化。
4. 有部分明顯不合理的數據，例如：水高較低卻較容易液化、液化時間的數量級有明顯差異。

(三)建立研究模型

1. 刪減數據：

由於此實驗的變因相當多，且不易控制，是以我們初期採取的方式是「蒐集大量樣本，降低錯誤樣本比率」，但是仍然發現數據趨勢不夠明顯或是有部分是明顯不合理的，因此我們採取以下的規則來刪減數據：

- (1) 液化時間由左向右逐漸遞減。
- (2) 液化時間由上而下逐漸遞增。
- (3) 相鄰時間需有相同數量級。

數據依規則刪減後如下圖：

液化時間(S)		水高(cm)					
		4	5	6	7	8	9
沙 高 (cm)	7	X	14	0.8			
	8	X	15	0.8	0.5		
	9	19	18	1.2	1	0.5	
	10	0.9	9	X	0.7	0.33	0.2
	11	X	X	X	1.08	0.67	1

註：X表示未發生液化

△刪除數據圖示

■ 依規則(1)刪除

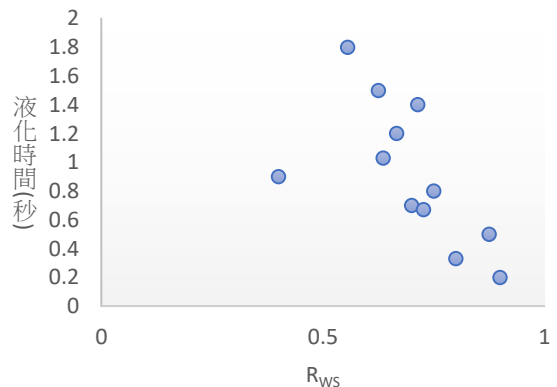
■ 依規則(2)刪除

■ 依規則(3)刪除

2. 建立模型：

因土壤液化與地下水高有密切關係，因此我們將水高與沙高轉換為「水沙比」(縮寫為 R_{ws})即：

$$R_{ws} = \text{水高} \div \text{沙高}$$



接著將水沙比與液化時間作圖(如右圖)，可以發現主要數據呈現高度相關性，但是其中有一個點有極大的偏差，我們認為是數據刪減規則下的漏網之魚，表示右圖關係同時兼具檢驗數據合理性的功能。

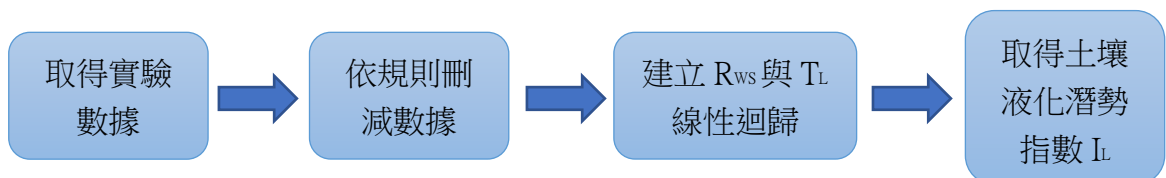
進一步將數據再度刪減後的水沙比(R_{ws})與液化時間(縮寫為 T_L ，以下皆沿用)的資料作線性迴歸，屬高度相關($R=0.89$)並得到以下線性方程式：

$$T_L = -4.268 R_{ws} + 4.001$$

由上述線性方程式我們可以推論下列結果：

- (1)相同震盪頻率、相同周圍地質結構(實驗盒幾何)， R_{ws} 與 T_L 具高度相關性。
- (2)由方程式的 R_{ws} 軸截距發現當 $R_{ws} = 0.94$ 則 $T_L = 0$ ，此交點或可解釋為「此時地下水位幾乎與地表等高，因此無須液化時間，因為此時狀態與液化無異」。
- (3)由相關性及 R_{ws} 軸交點可發現此方程式可作為土壤液化潛勢的指標，故我們定義此方程式的斜率絕對值為 I_L ，在本研究中稱為「土壤液化潛勢指標」簡稱為「液化指標」或 I_L ， I_L 越低則表示越容易發生液化。

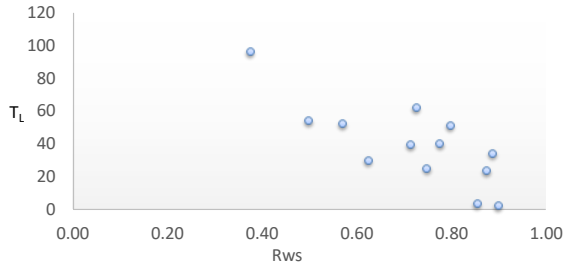
(四)取樣流程



二、研究二：使用 S 波震動台來測量不同頻率對各個水沙比 R_{ws} 的液化指數 I_L

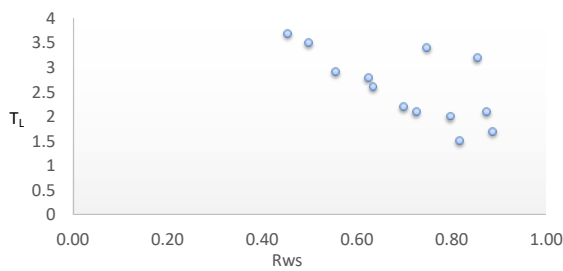
(一)實驗結果：

頻率4.5~11.0Hz 間的 R_{ws} 及 I_L 。



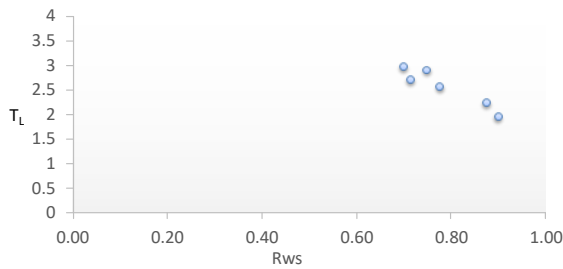
△頻率 $f=4.5\text{Hz}$

液化指數 $I_L=122.15$



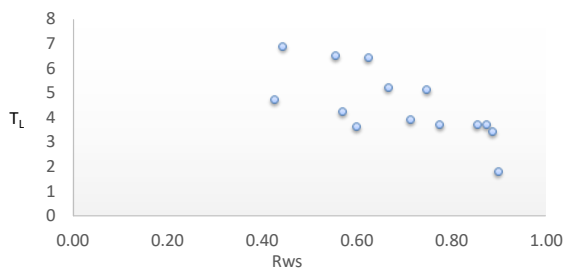
△頻率 $f=6.2\text{Hz}$

液化指數 $I_L=3.36$



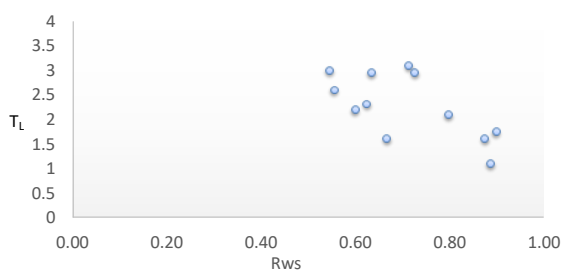
△頻率 $f=7.9\text{Hz}$

液化指數 $I_L=4.50$



△頻率 $f=9.1\text{Hz}$

液化指數 $I_L=6.18$



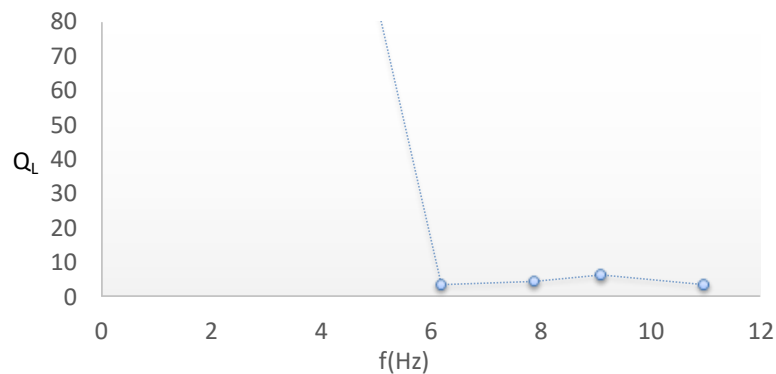
△頻率 $f=11.0\text{Hz}$

液化指數 $I_L=3.35$

(二)討論：

1. 頻率2.5、3Hz 在各 R_{ws} 之下皆不液化，可能是由於我們的 S 波震動台震幅固定，故在小頻率區域造成加速度過小，無法引起土壤液化，故後續實驗並未將此頻率列入。
2. 從數據的分布來看依舊具有高相關性，顯示即使由搖擺機換成 S 波震動台，我們的取樣模型同樣適用。
3. 將震盪頻率 f 與液化指數 I_L 作比較(如下圖表)，可以發現頻率4.5~9.1Hz 出現 I_L 較低的頻寬，表示此頻寬中央的震盪頻率在我們的實驗盒中較不易引起土壤液化，而越接近兩端則較易引起土壤液化。

頻率(f)	4.5	6.2	7.9	9.1	11.0
液化指數(I_L)	122.15	3.36	4.50	6.18	3.35



△頻率4.5~9.1Hz 出現 I_L 較低的頻寬，表示此頻寬中央的震盪頻率在我們的實驗盒中較容易引起土壤液化。

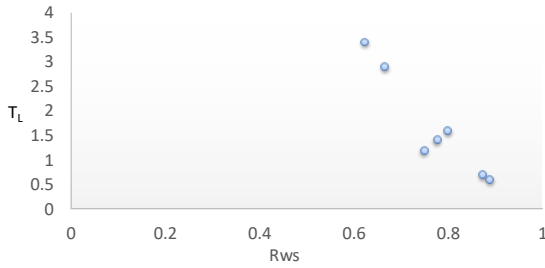
4. 頻率4.5的 R_{ws} 和 T_L 雖然具有高度相關，但是其土壤液化指數與其他頻率相比看起來有些不合理。

(三)重新定義研究範圍

我們發現取樣的 R_{ws} 當中，特別是表格周圍的數據出現不合理而被刪除的比例特別高，可能是因為極端的 R_{ws} 所造成，因此我們重新定義研究範圍，將沙高限制在8-10cm、水高限制在5-8cm，此範圍中數據的錯誤率最小，且在各頻率實驗中皆然。

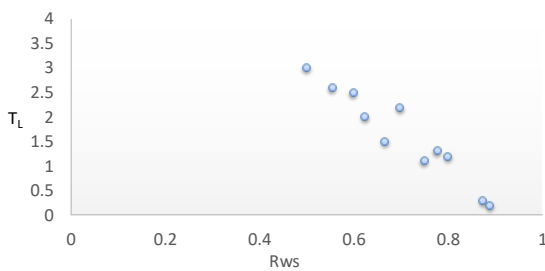
三、研究三：使用 S 波和 P 波震動台並加入 Arduino 土壤濕度計來測量不同頻率對各個水沙比例的液化的相關性

(一)實驗結果：S 波



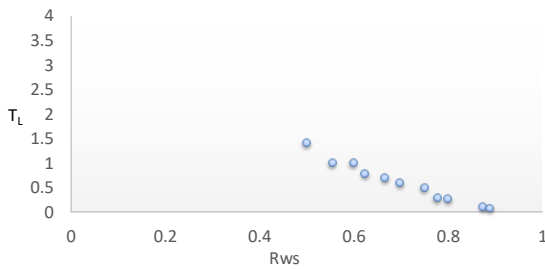
△頻率 $f=4.5\text{Hz}$

液化指數 $I_L=21.13$



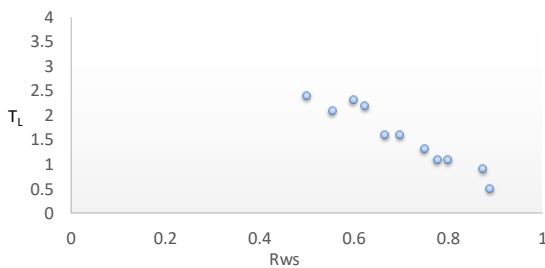
△頻率 $f=6.2\text{Hz}$

液化指數 $I_L=6.91$



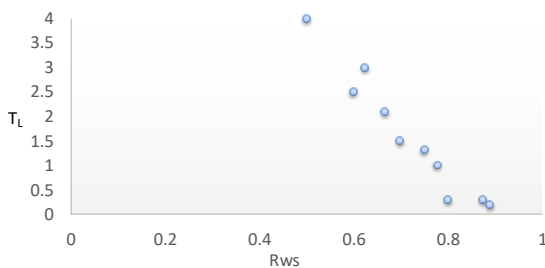
△頻率 $f=7.9\text{Hz}$

液化指數 $I_L=3.23$



△頻率 $f=9.1\text{Hz}$

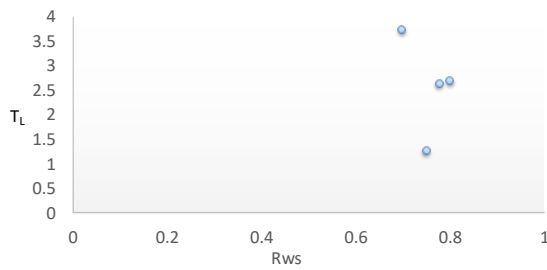
液化指數 $I_L=4.80$



△頻率 $f=11.0\text{Hz}$

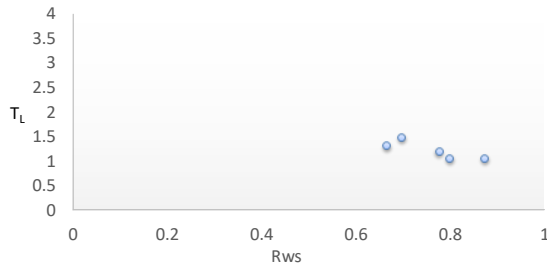
液化指數 $I_L=11.12$

P 波



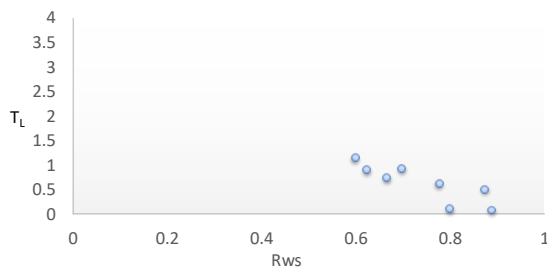
△頻率 $f=10.93\text{Hz}$

液化指數 $I_L=17.29$



△頻率 $f=13.27\text{Hz}$

液化指數 $I_L=1.80$



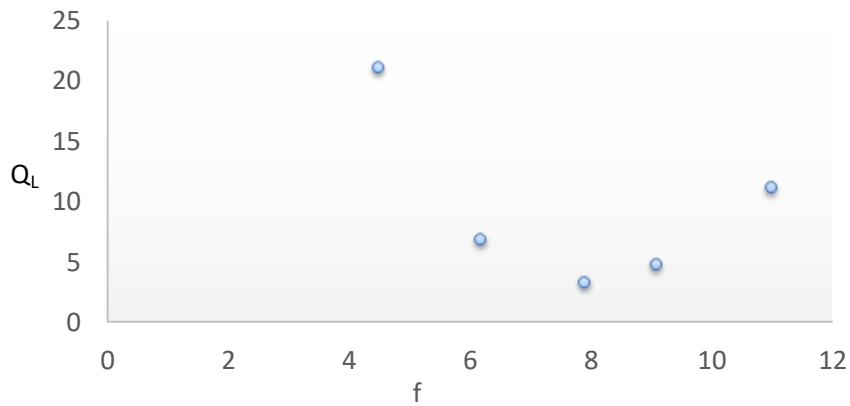
△頻率 $f=16.42\text{Hz}$

液化指數 $I_L=2.98$

(二)討論：

1. 引入土壤濕度計後，在確認土壤液化發生時間有非常良好的改善，因此也使得實驗數據品質大幅提升。因此在 S 波部份我們得到與前次實驗相仿，但是更明確的現象「在某個頻寬中較不容易發生土壤液化」

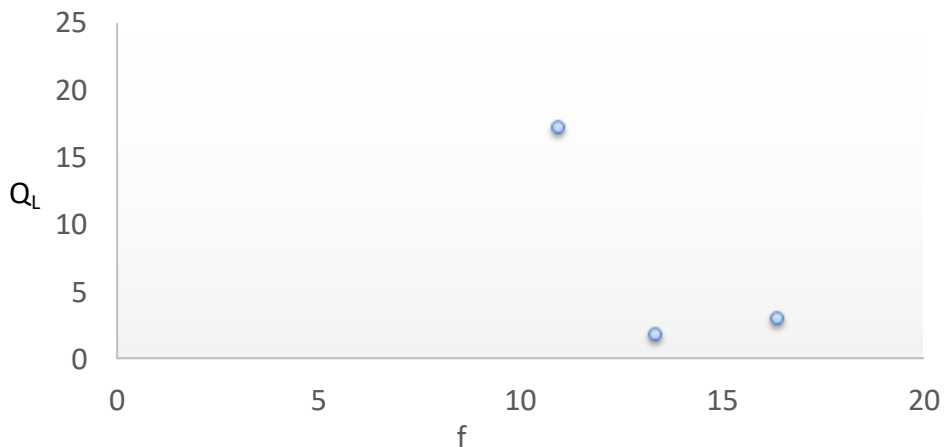
頻率(f)	4.5	6.2	7.9	9.1	11.0
液化指數(I_L)	21.13	6.91	3.23	4.80	11.12



△S 波實驗 I_L 大約在頻率 7.9Hz 附近出現最小值，而越往兩端 I_L 越大表示越不容易在我們的實驗盒當中發生土壤液化。

2. P 波實驗我們發現同一頻率實驗中相同的 R_{ws} 不一定都能夠發生液化，且在原本的取樣頻率 (4.5~9.1Hz) 皆無法液化，但是我們加大頻率 (10.93、13.27、16.42Hz) 直到液化發生，並取了三組數據。

頻率(f)	10.93	13.27	16.42
液化指數(I_L)	17.29	1.80	2.98



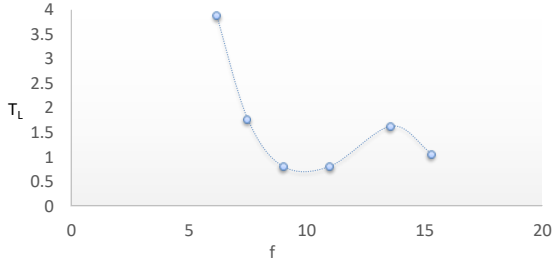
△P 波實驗 I_L 可能也具有易發生土壤液化的頻寬，但是本研究中並不明顯。

3. 我們推測 P 波相較於 S 波較不易引起土壤液化，因此數據雖然沒有 S 波數據來得集中，但是還是屬於高相關，且符合我們的取樣模型。因此我們相信此取樣模型在各種波型皆適用。

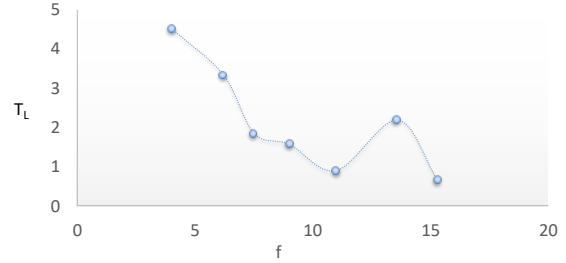
四、研究四：利用 S 波的震動台並在實驗盒上裝入隔板來改變其震盪形式

(一)實驗結果

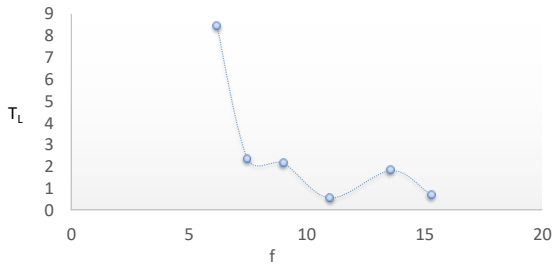
水高6cm、沙高9cm、 $R_{ws}=0.67$



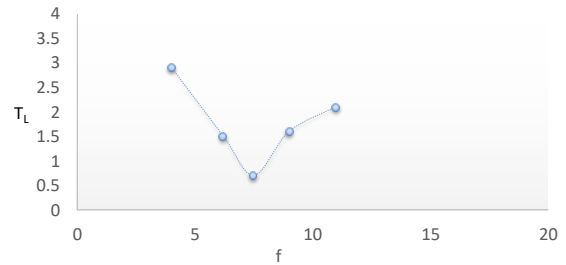
△加入1塊隔板



△加入2塊隔板



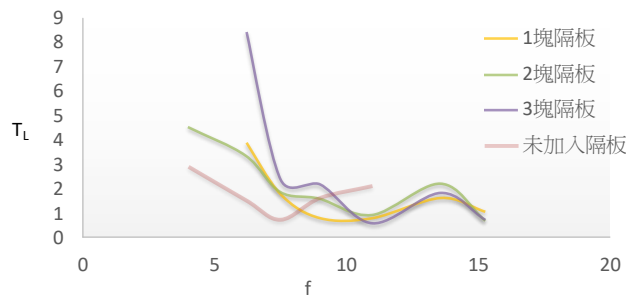
△加入3塊隔板



△未加入隔板、原 $R_{ws}=0.67$

(二)討論：

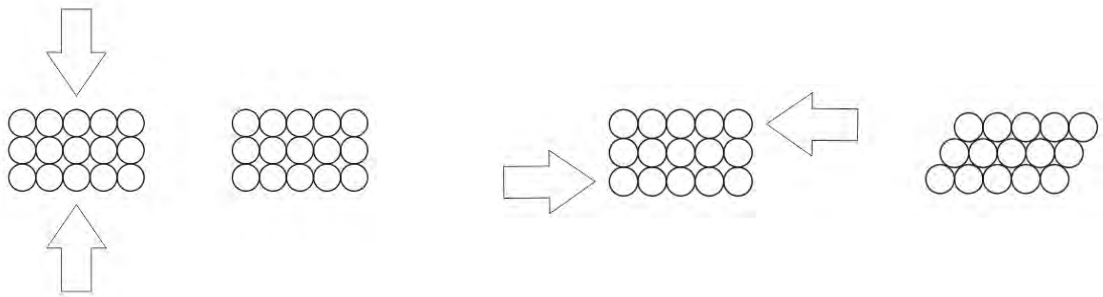
1. 加入隔板後除2塊隔板在頻率4.5可以液化外，其餘1塊隔板和3塊隔板之情形皆從頻率6.2Hz 開始才會發生液化，似乎有提高共振頻率的可能性。
2. 加入隔板後依舊有較容易液化的頻寬出現，1塊隔板時頻寬約在9.2Hz 左右，2塊3塊隔板時頻寬約在11.0左右，比原本在6.2Hz 左右出現的頻寬有明顯增加。
3. 若將各圖形疊合比較，可發現加入不等數量隔板後，震盪模式有明顯改變。



△加入不等隔板在地層當中，震盪模式有明顯變化

柒、結論

- 一、取樣模型其中所定義的「土壤液化潛勢指數 I_L 」在本研究中發揮優異的演繹效果，對於有類似土壤液化之研究有相當之參考價值。
- 二、本研究中的自製震動台提供了另一種經濟實惠的方式，有別於一般液壓式的震動台造價昂貴，非國中小經費可以負擔，其危險性也較高。而電鑽震動台的概念可以在更小尺度當中模擬地震，對於地震相關研究可以提供相對安全而有效的震源。
- 三、本研究發現不同的地震震盪頻率確實會影響土壤液化的發生機會，在某個頻寬內液化潛勢較高，而高或低於此區間液化前是隨即下降，我們推測這地層(實驗盒所模擬)的自然震盪頻率有關，或者與實驗盒當中所產生的駐波可能也有關係。未來在預測土壤液化潛勢時或可將自然震盪頻率考慮進去。
- 四、由本研究中的 P、S 波所造成的土壤液化效果來看，S 波所以造成的土壤液化效果是相當顯著的，我們認為沙土之所以對剪力波(S 波)有較低的抗性，是由於沙粒排列的關係可由下圖加以解釋：



△當地層受到壓力波(P 波)上下擠壓，堆疊的沙粒在與作用力平行的方向有較好的抗性，沙粒不一定會發生錯動擠壓，進而發生土壤液化。

△當地層受到剪力波(S 波)左右推擠時，堆疊的沙粒在此方向上抗性較差，沙粒容易發生錯動，將彼此間空隙填得更滿，因而發生土壤液化。

- 五、在隔板是否改變震盪模式的研究中，隔板確實發揮效果使振動模式發生改變，我們推論與駐波的關係較有可能，隔板將實驗盒分割的結果使得盒中的地層在 S 波震動的方向上間距變短，根據駐波原理固定端間距縮短則波長縮短基頻增加，基頻增加則連帶使共振頻率也增加，我們可以由研究四的圖中與未加隔板情況比較可見。

- 六、本研究尚屬半定量半定性的研究，因此雖然我們觀察到模擬地層的共振進而引發土壤液化，其中有段特別容易液化的頻寬，但是頻寬發生位置很有可能因實驗盒尺寸改變有所不同，而這也是我們未來可以努力的地方，如何將我們的研究推展到實際的地層，該如何找出實際地層易發生液化的地震頻率，也許在未來土壤液化潛勢的研究更可以引入地層剖面的幾何機制。
- 七、而隔板的研究更可以減緩土壤液化的情況，改變震動模式以避開可能引發土壤液化的地震頻率，使得土壤液化潛勢區的土地可以更有效的利用。

捌、參考資料

【摘要及資料庫資料】

地震百問 · 中央氣象局 · 取自

<http://www.cwb.gov.tw/V7/knowledge/encyclopedia/eq100-all.pdf>

陳銘鴻 · 土壤液化成因、災害與復建 · 取自

<http://cgsweb.moeacgs.gov.tw/Result/921/9.%E9%99%B3%E9%8A%98%E9%B4%BB.pdf>

土壤液化 · 維基百科 · 取自

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%9C%9F%E5%A3%A4%E6%B6%B2%E5%8C%96>

【期刊文章】

國家災害防救科技中心「0206美濃地震相關資訊綜整與研判」簡報 · 取自

www.ncdr.nat.gov.tw/EarthquakeMeinong1050206.aspx

台灣地震科學中心通訊第十一期 · 取自

http://tec.earth.sinica.edu.tw/new_web/upload/publications/TEC-Newsletter_201603.pdf

玖、附錄

綠色部分為上下左右對照下來不合理的，故繪圖時將其排除在外

研究二

	水							
沙	3	4	5	6	7	8	9	
7	74	52	39	3				
8	96	54	30	25	23			
9	不液化	不液化	110	29	40	34		
10	不液化	不液化	不液化	76	82	51	1.8	
11	不液化	不液化	不液化	不液化	142	62	32	

(頻率4.5)

	水							
沙	3	4	5	6	7	8	9	
7	不液化	不液化	3.2	3.2				
8	不液化	不液化	2.8	3.4	2.1			
9	不液化	不液化	2.9	3.1	2.1	1.7		
10	不液化	不液化	3.5	2.9	2.2	2	1.8	
11	不液化	不液化	3.7	2.7	2.6	2.1	1.5	

(頻率6.2)

	水							
沙	3	4	5	6	7	8	9	
7	不液化	不液化	不液化	2.9				
8	不液化	不液化	不液化	3.3	2.9			
9	不液化	不液化	不液化	2.05	1.6	1.3		
10	不液化	不液化	不液化	2.3	2.9	1.7	4.7	
11	不液化	不液化	11.9	2.6	1.9	1.8	1.6	

(頻率7.9)

	水							
沙	3	4	5	6	7	8	9	
7	4.7	4.2	3.9	3.7				
8	17	7.3	6.4	5.1	3.7			
9	不液化	6.9	6.5	5.2	3.7	3.4		
10	不液化	4.4	3.7	3.6	8.9	4.2	1.8	
11	不液化	不液化	3.5	3.9	3.7	2.9	7	

(頻率9.1)

	水							
沙	3	4	5	6	7	8	9	
7	不液化	不液化	3.1	2.8				
8	不液化	不液化	2.3	1.8	1.6			
9	不液化	21	2.6	1.6	1.2	1.1		
10	不液化	不液化	2.3	2.2	3.6	2.1		
11	不液化	不液化	不液化	3	2.96	2.95	1.3	

(頻率11)

研究三

S波	水			
沙	5	6	7	8
8	3.4	1.2	0.7	
9	6.8	2.9	1.4	0.6
10	9.1	7	5	1.6

(頻率4.5)

S波	水			
沙	5	6	7	8
8	2	1.1	0.3	
9	2.6	1.5	1.3	0.2
10	3	2.5	2.2	1.2

(頻率6.2)

S波	水			
沙	5	6	7	8
8	0.8	0.5	0.1	
9	1	0.7	0.3	0.08
10	1.4	1	0.6	0.26

(頻率7.9)

S波	水			
沙	5	6	7	8
8	2.2	1.3	0.9	
9	2.1	1.6	1.1	0.5
10	2.4	2.3	1.6	1.1

(頻率9.1)

S波	水			
沙	5	6	7	8
8	3	1.3	0.3	
9	4.5	2.1	1	0.2
10	4	2.5	1.5	0.3

(頻率11)

P波	水			
沙	5	6	7	8
8	不液化	1.26	4.16	
9	不液化	4.78	2.65	3.26
10	不液化	1.33	3.74	2.69

(頻率10.93)

P波	水			
沙	5	6	7	8
8	不液化	5.63	1.05	
9	不液化	1.3	1.19	1.51
10	不液化	不液化	1.47	1.05

(頻率13.27)

P波	水			
沙	5	6	7	8
8	0.91	4.84	0.51	
9	不液化	0.75	0.63	0.08
10	不液化	1.14	0.93	0.11

(頻率16.42)

研究四

頻率(Hz)	隔板 1	隔板 2	隔板 3
4	不液化	4.52	不液化
6.2	3.87	3.34	8.43
7.5	1.77	1.85	2.36
9	0.8	1.57	2.17
11	0.8	0.9	0.57
13.6	1.62	2.19	1.82
15.3	1.06	0.66	0.71

【評語】 030513

1. 從 P 波及 S 波的震動實驗中找出問題的差異性，具有實驗性價值。
2. 從各種不同材料樣品進行液化現象的分析，說明清楚，值得肯定。
3. 研究主題清楚而且聚焦，具有實用性。

摘要

我們分別做了S波和P波的震動台，震盪模擬地層及地下水層的實驗盒，並建立研究模型利用水沙比(R_{ws})、液化時間(T_L)定義出土壤液化潛勢指數 I_L ，作為土壤液化的指標並用來說明土壤液化與地震頻率的關係，我們發現震動頻率的確跟土壤液化有很大的關聯，當頻率在某個頻寬時很容易液化，過後即變不容易液化，而S波對土壤液化的發生影響明顯的比P波還來的大，最後我們藉由在地層中埋入隔板試圖改變地層的共振條件並獲得良好的成果，以期未來在土壤液化防治上有更進一步的成果。

研究動機

2016年2月6日的美濃地震，引起臺南市部分地區發生震災，導致一些建築物結構因耐震能力不足，自然震盪頻率產生共振等等，造成更嚴重的地震及災情，建築物發生倒塌與破壞，而在安南區惠安街與新市區三民街及多處地方也發生嚴重土壤液化災情，使得「土壤液化」安全問題受到社會大眾的關注與重視。我們看到了這篇新聞，並對為何會產生土壤液化及震動頻率與土壤液化的關聯產生了好奇，於是我們著手進行了有關土壤液化的研究。

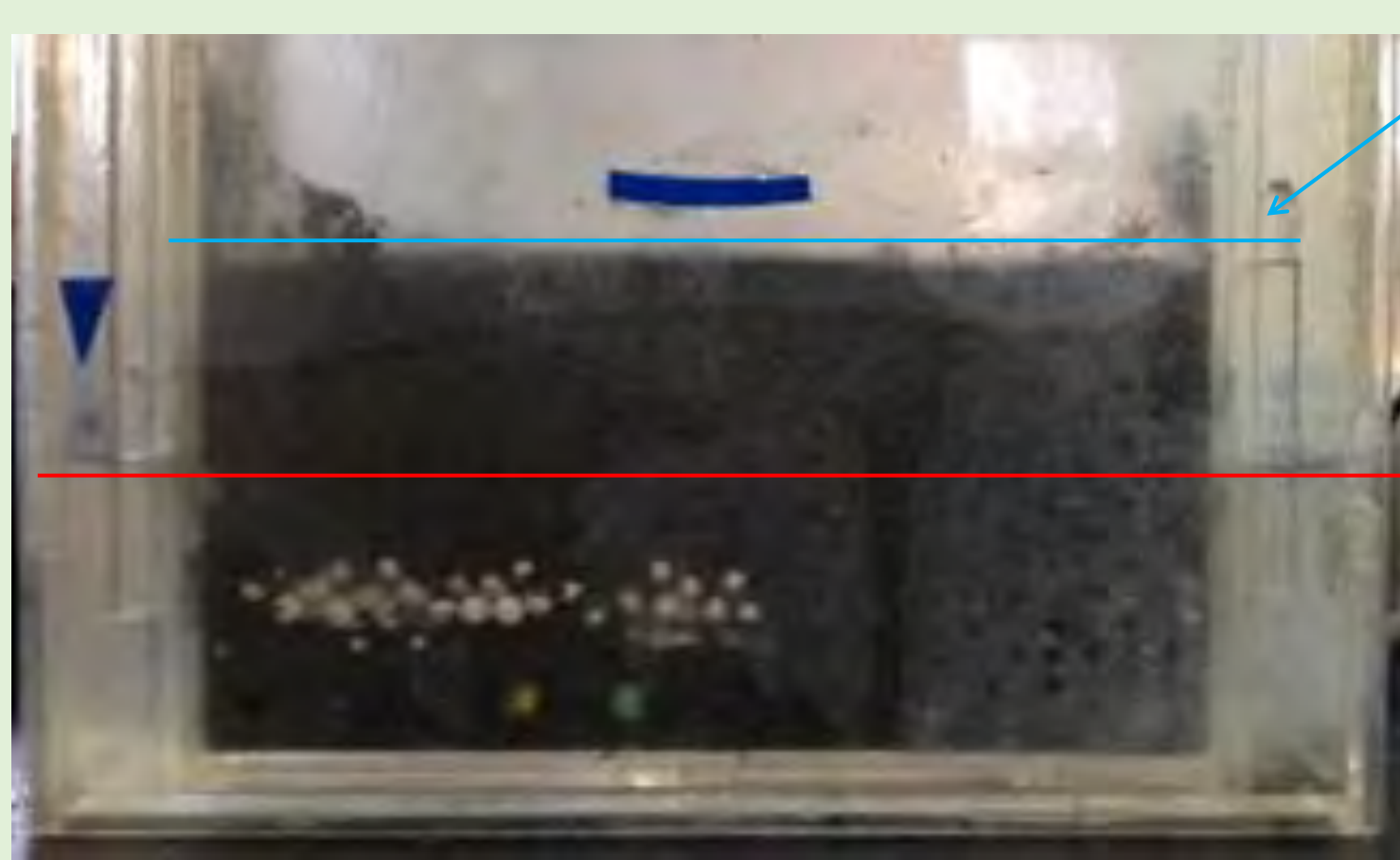
研究目的

- 一、確定研究模式，建立模型
 - (一)挑選數據
 - (二)使用斜率作為液化指數
- 三、P波、S波對土壤液化之影響
 - (一)土壤液化S波頻率相關性
 - (二)土壤液化P波頻率相關性
- 二、研究土壤液化與震動頻率的相關性
 - (一)頻率區間
 - (二)探討沙和水的合適比例之範圍
- 四、利用隔板改變震盪行為之可能性

研究設備及器材

一、實驗主體：

- (一) 細沙:取自南寮海邊頭前溪出海口，經過固定粒徑大小的篩網過篩，為提高實驗的一致性，實驗皆使用過篩後的細沙。
- (二) 連通管裝置：利用連通管原理外接補注水體，確保實驗盒中的模擬地下水位不會因為細沙吸水或土壤液化時周圍的地下水位發生劇烈變化



土壤表面

地下水位

△實驗盒，分為內外盒兩盒以卡榫連接使內外盒單面緊密相連，可用於錄影時方便觀察土壤中水線變化。使用連通管裝置可使液化時地下水位(紅線)不產生劇烈變化。

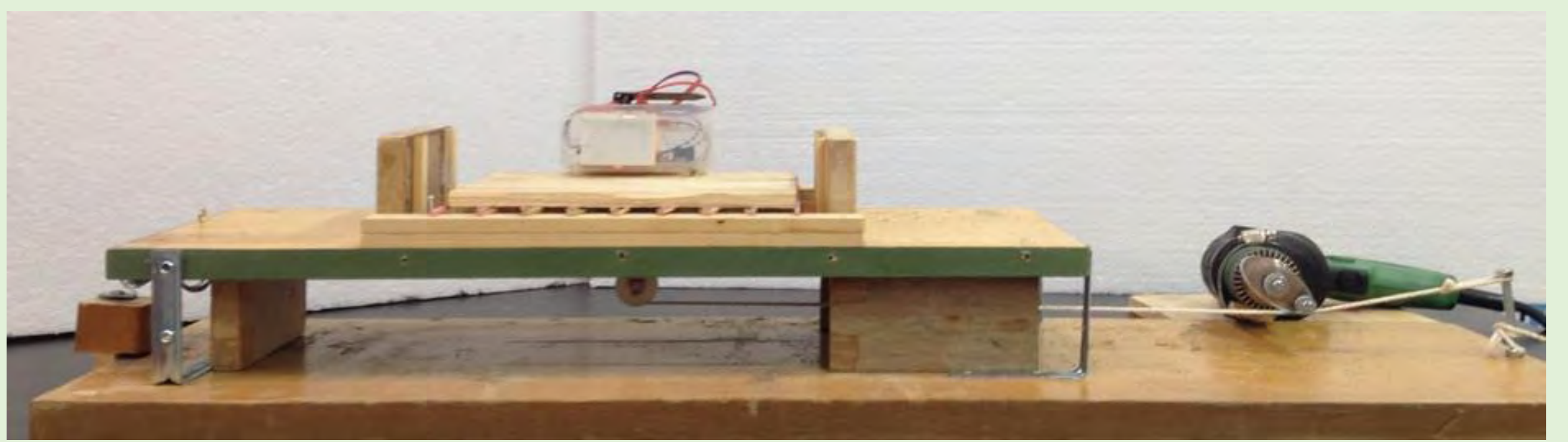
- (三) 實驗盒:分為內外盒，外盒可模擬土壤液化區周圍的地下水。內盒為模擬的地層(如上圖)，側邊開有細孔以利地下水進出。兩盒以卡榫連接使內外盒單面緊密相連。

- (四) 自製S波震動台:主體震動台，並且在實驗盒側邊空間可加裝Arduino裝置。震源，利用電鑽加上自製橢圓壓片，壓動棉繩產生微小震幅。



S波震動台

- (五) 自製P波震動台:主體震動台，其上設有垂直的滑軌以限制實驗和震動方向，可用橡皮筋編織成網狀的支撐平台具有平均受力並提供穩定回復力的優勢。震源與S波震動台相同。



P波震動台

二、輔助工具:Arduino裝置、土壤溼度計、光電轉速表

研究過程

- 一、基礎設定：
 - (一) 沙子過篩並混合均勻：確保實驗的一致性
 - (二) 模擬地層的方法：底層放入一層1.5cm彈珠(大孔隙岩層)，上面鋪著一層與彈珠等高的沙，接著蓋上與彈珠等高的BB彈(小孔隙岩層)，最後把沙子加到做實驗的高度(實驗中的沙高包括彈珠和BB彈)
- 二、研究一：用搖擺機模擬地震，找出最容易發生土壤液化的水沙比 R_{ws} (實驗步驟如下圖)

將實驗盒裝入模擬地層(沙、BB彈、彈珠)

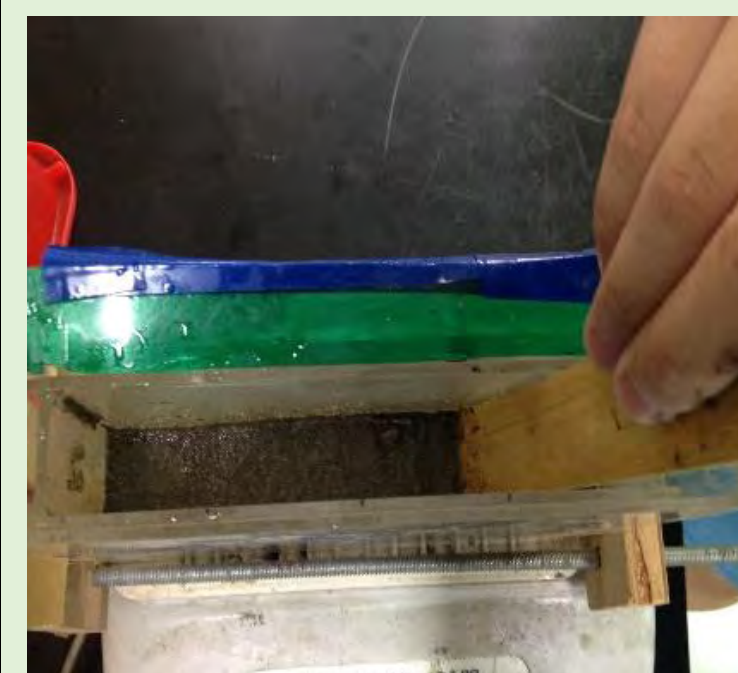
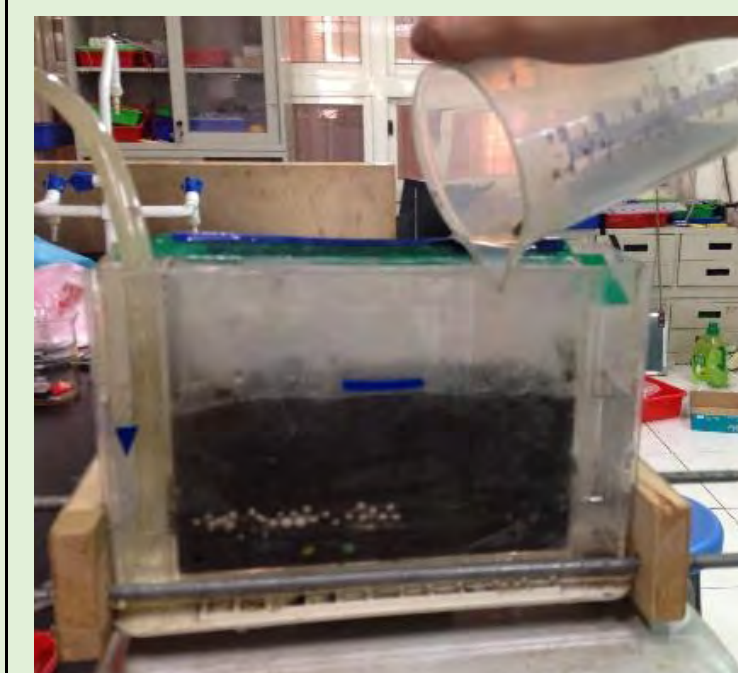
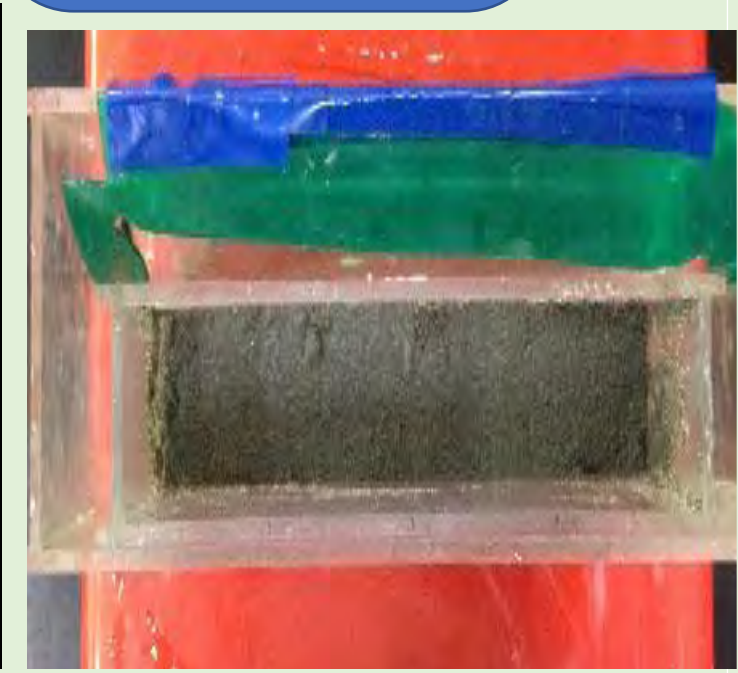
將內層實驗盒卡入外盒固定

用螺帽將整個實驗盒固定在搖擺機上

外盒裝水並架設連通管裝置，等達到實驗需要的水位

土壤會因為吸水而變緊密，故需把沙子補足到實驗高度

將沙子表面撥平，並將砝碼放在沙子表層，即開始實驗



補充說明: 定義土壤液化為當砝碼沉陷時，即為發生土壤液化。

(一)研究結果:

液化時間(S)		水高(cm)					
		4	5	6	7	8	9
沙高 (cm)	7	X	1.4	0.8			
	8	X	1.5	0.8	0.5		
	9	19	1.8	1.2	1	0.5	
	10	0.9	9	X	0.7	0.33	0.2
	11	X	X	X	1.03	0.67	1

註:X表示未發生液化

液化時間(S)		水高(cm)					
		4	5	6	7	8	9
沙高 (cm)	7	X	1.4	0.8			
	8	X	1.5	0.8	0.5		
	9	19	1.8	1.2	1	0.5	
	10	0.9	9	X	0.7	0.33	0.2
	11	X	X	X	1.03	0.67	1

註: X表示未發生液化

△刪除數據圖示

■依規則(1)刪除

■依規則(2)刪除

■依規則(3)刪除

(二)討論:

- 1.當水高為3cm時，所有的土壤高度皆不發生液化，故數據未列出。
- 2.數據大致上可以觀察到「相同沙高水越高，液化所需時間越短」等。
- 3.數據趨勢與理論相符，地下水位若超過土層的2/3有較大機會發生液化，且地下水面越高越容易發生液化。
- 4.有部分明顯不合理的數據，例如：水高較低卻較容易液化、液化時間的數量級有明顯差異。

(三)建立研究模型

1.刪減數據：由於此實驗的變因相當多，且不易控制，後來發現數據趨勢不夠明顯或是有部分是明顯不合理的，因此我們採取以下的規則來刪減數據，數據依規則刪減後如上右圖：

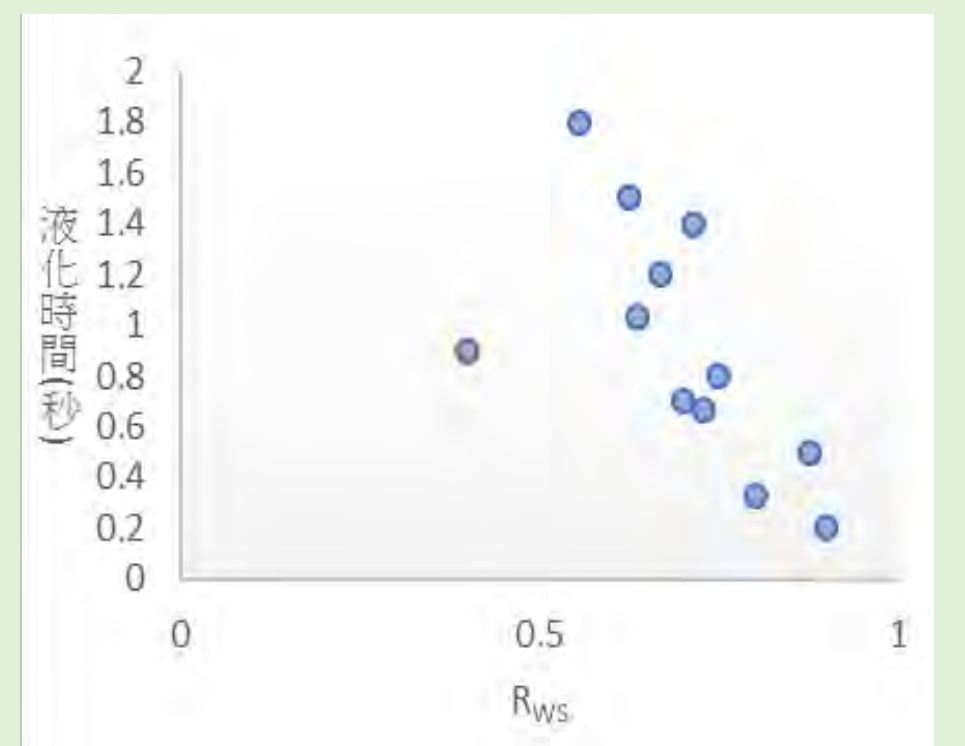
- (1)液化時間由左向右逐漸遞減 (2)液化時間由上而下逐漸遞增 (3)相鄰時間需有相同數量級

2.建立模型：

因土壤液化與地下水高有密切關係，因此我們將水高與沙高轉換為「水沙比」(縮寫為Rws)即：

$$Rws = \text{水高} \div \text{沙高}$$

接著將水沙比與液化時間作圖(如右圖)，可以發現主要數據呈現高度相關性，但是其中有一個點有極大的偏差，我們認為是數據刪減規則下的漏網之魚，表示右圖關係同時兼具檢驗數據合理性的功能。



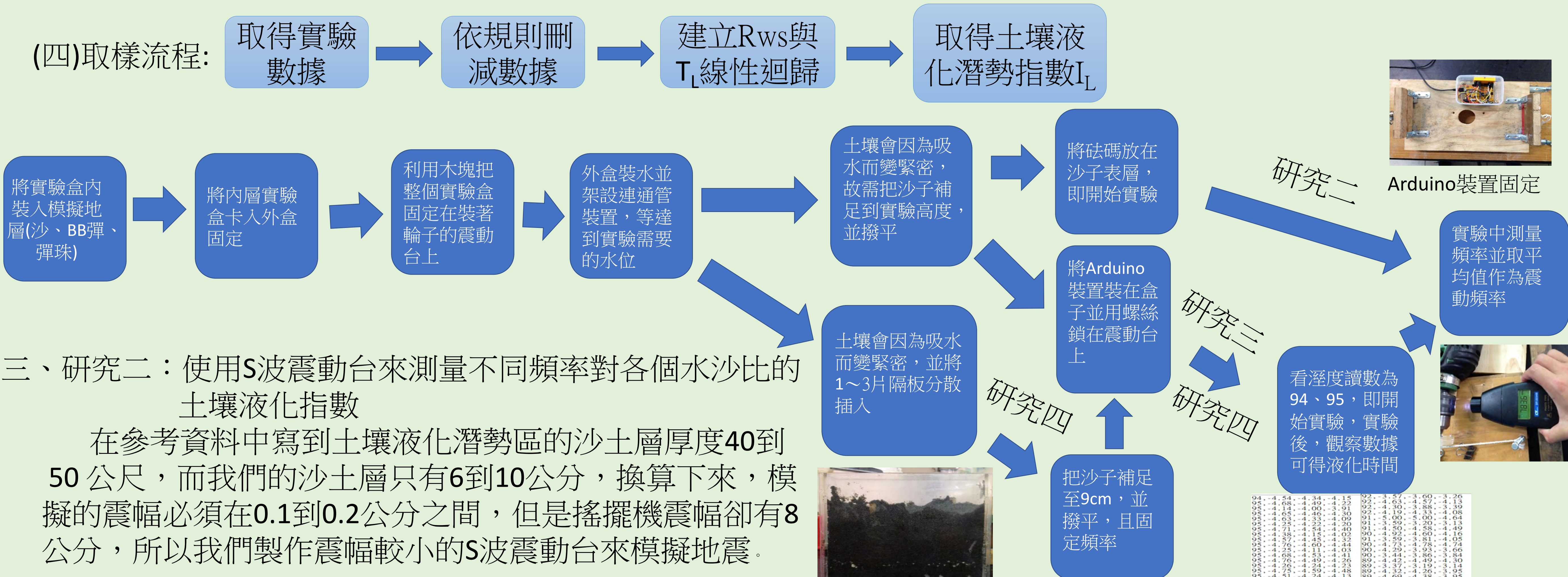
進一步將數據再度刪減後的水沙比(Rws)與液化時間(縮寫為T_L，以下皆沿用)的資料作線性迴歸，屬高度相關(R=0.89)並得到以下線性方程式：

$$T_L = -4.268 Rws + 4.001$$

由上述線性方程式我們可以推論下列結果：

- (1)相同震盪頻率、相同周圍地質結構(實驗盒幾何)，Rws與T_L具高度相關性。
- (2)由方程式的Rws軸截距發現當Rws=0.94則T_L=0，此交點可解釋為「此時地下水位幾乎與地表等高，因此無須液化時間，因為此時狀態與液化無異」。
- (3)由相關性及Rws軸交點可發現此方程式可作為土壤液化潛勢的指標，故我們定義此方程式的斜率絕對值為I_L，在本研究中稱為「土壤液化潛勢指標」簡稱為「液化指標」或I_L，I_L越低則表示越容易發生液化。

(四)取樣流程:

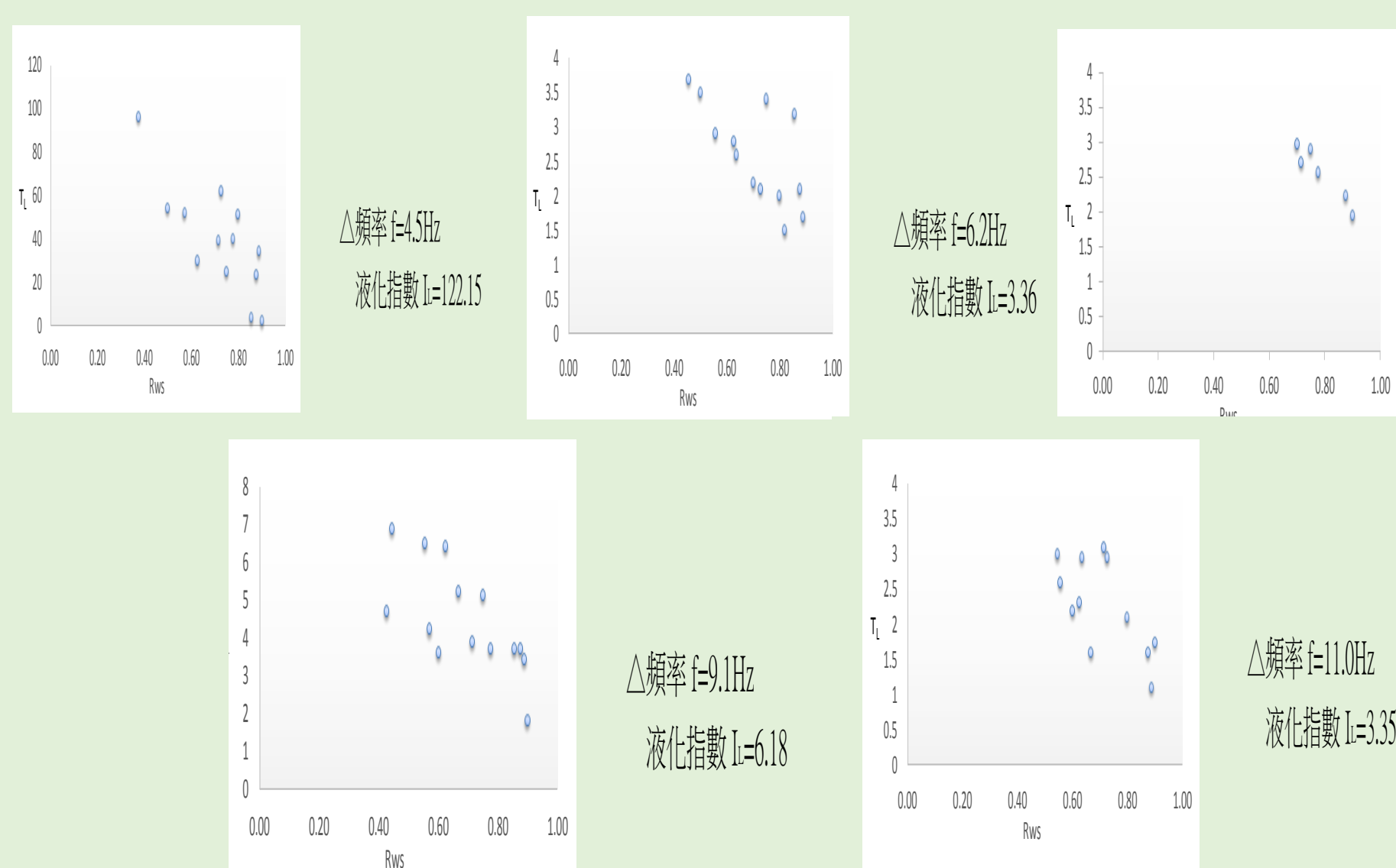


三、研究二：使用S波震動台來測量不同頻率對各個水沙比的土壤液化指數

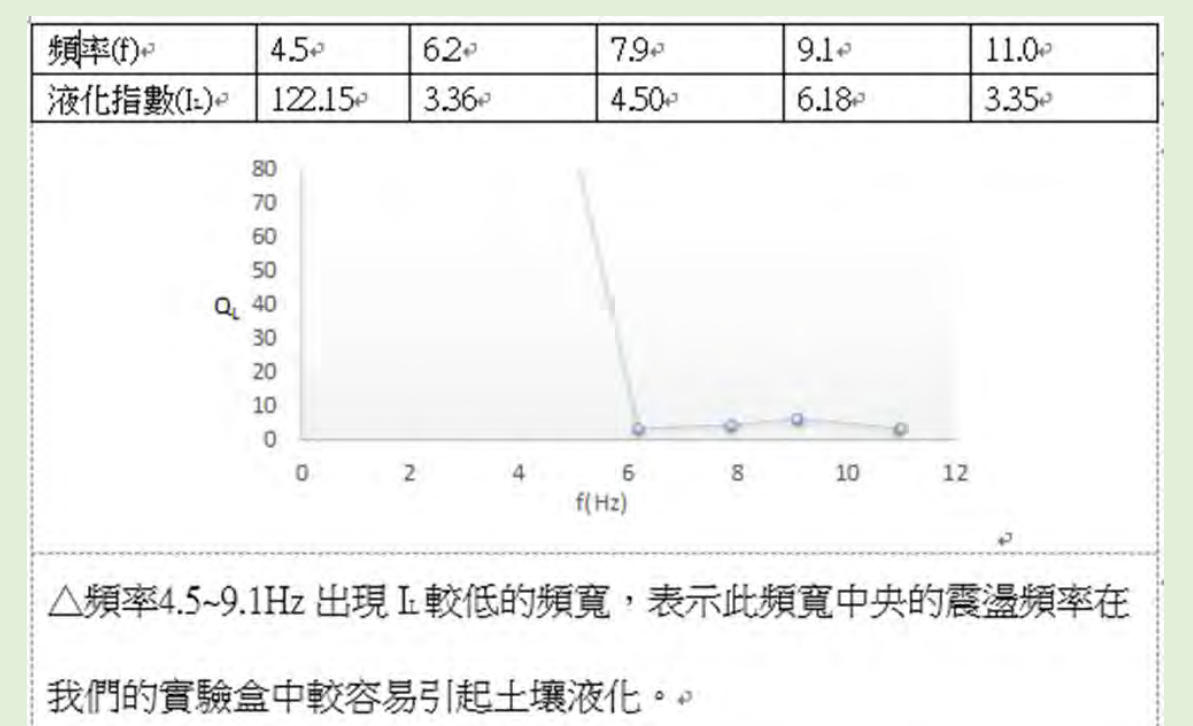
在參考資料中寫到土壤液化潛勢區的沙土層厚度40到50公尺，而我們的沙土層只有6到10公分，換算下來，模擬的震幅必須在0.1到0.2公分之間，但是搖擺機震幅卻有8公分，所以我們製作震幅較小的S波震動台來模擬地震。

(二)討論:

(一)實驗結果: 頻率4.5~11.0Hz間的Rws及I_L



- 1.頻率2.5、3Hz在各Rws之下皆不液化，可能是由於我們的S波震動台震幅固定，故在小頻率區域造成加速度過小，無法引起土壤液化，故後續實驗並未將此頻率列入。
- 2.從數據的分布來看依舊具有高相關性，顯示即使由搖擺機換成S波震動台，我們的取樣模型同樣適用。
- 3.將震盪頻率f與液化指數I_L作比較(如下圖)，可以發現頻率4.5~9.1Hz出現I_L較低的頻寬，表示此頻寬中央的震盪頻率在我們的實驗盒中較易引起土壤液化，而越接近兩端則較不易引起土壤液化。
- 4.頻率4.5的Rws和T_L雖然具有高度相關，但是其土壤液化指數與其他頻率相比看起來有些不合理。



(三)重新定義研究範圍

我們發現取樣的Rws當中，特別是表格周圍的數據出現不合理而被刪除的比例特別高，可能是因為極端的Rws所造成，因此我們重新定義研究範圍，將沙高限制在8-10cm、水高限制在5-8cm，此範圍中數據的錯誤率最小，且在各頻率實驗中皆然。

四、研究三：使用S波和P波震動台並加入Arduino土壤濕度計來測量不同頻率對各個水沙比的液化的相關性。

使用Arduino土壤濕度計，用電腦讀出數據後，便可記錄發生液化的秒數，使實驗數據能夠更準確的記錄。我們做了乾沙和溼沙搖晃及不搖晃的狀態下的讀數，得知搖晃並不會影響到土壤溼度計測量的穩定性，土壤濕度計測量試驗後，發現每一組乾沙實驗的初始數據為94或95，而溼沙為88或89，所以便可得知何時液化。

(一) 實驗結果：S波和P波(f)與(I_L)的關係圖



(二)討論:

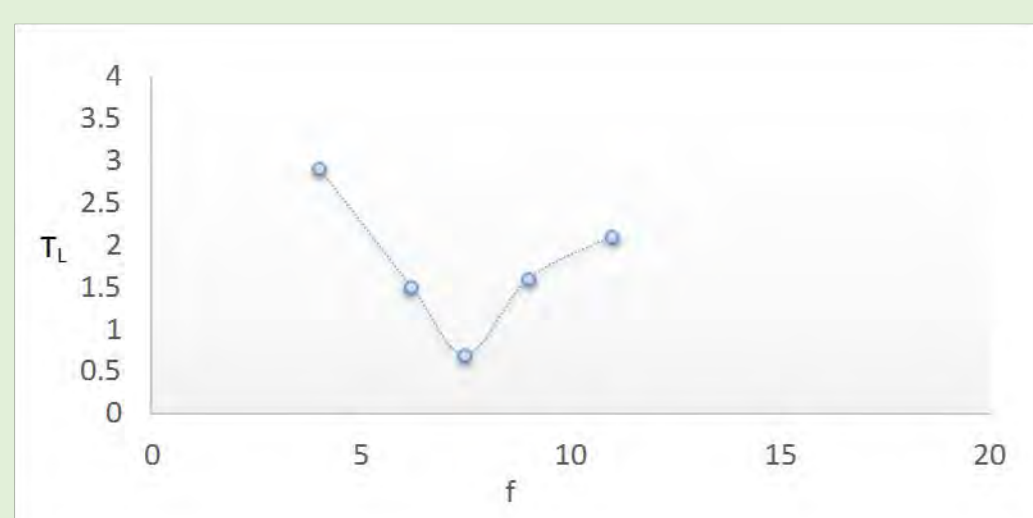
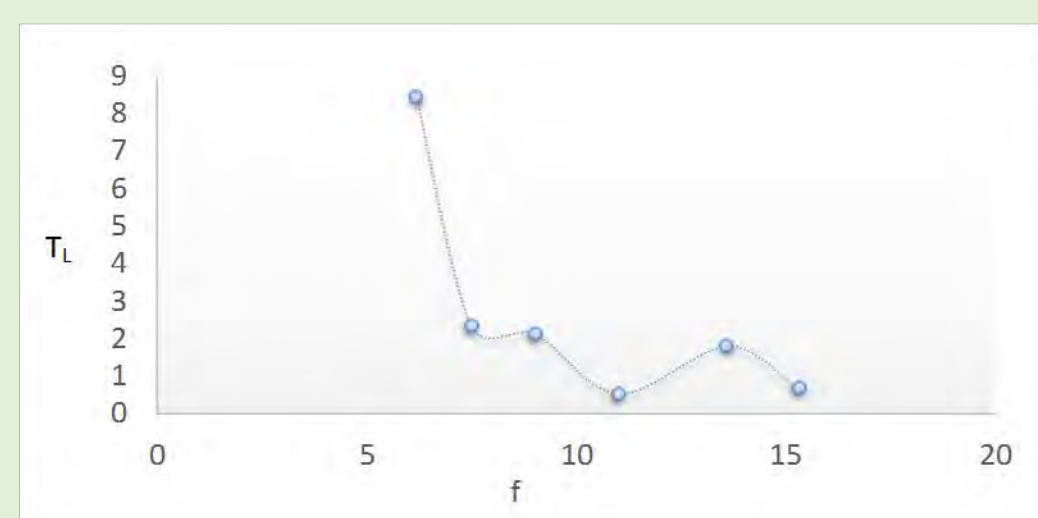
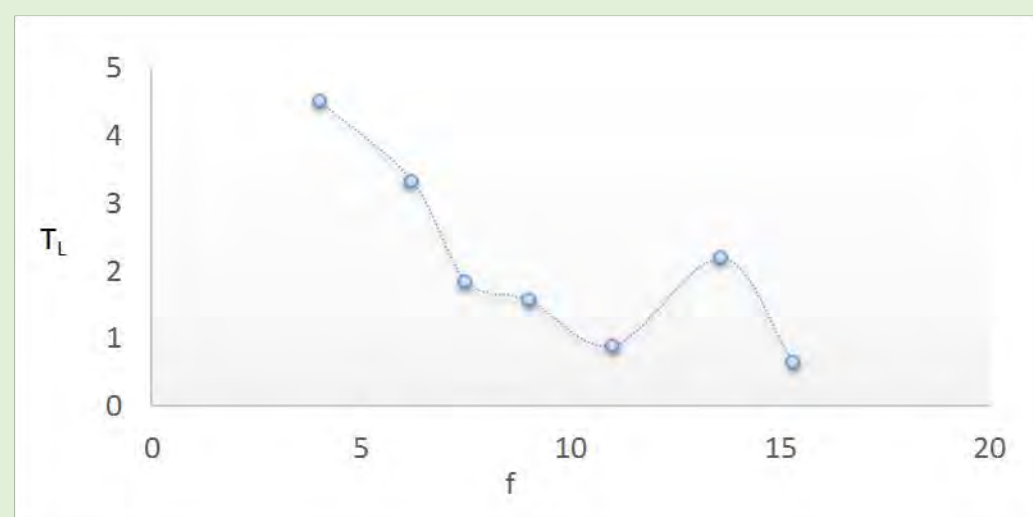
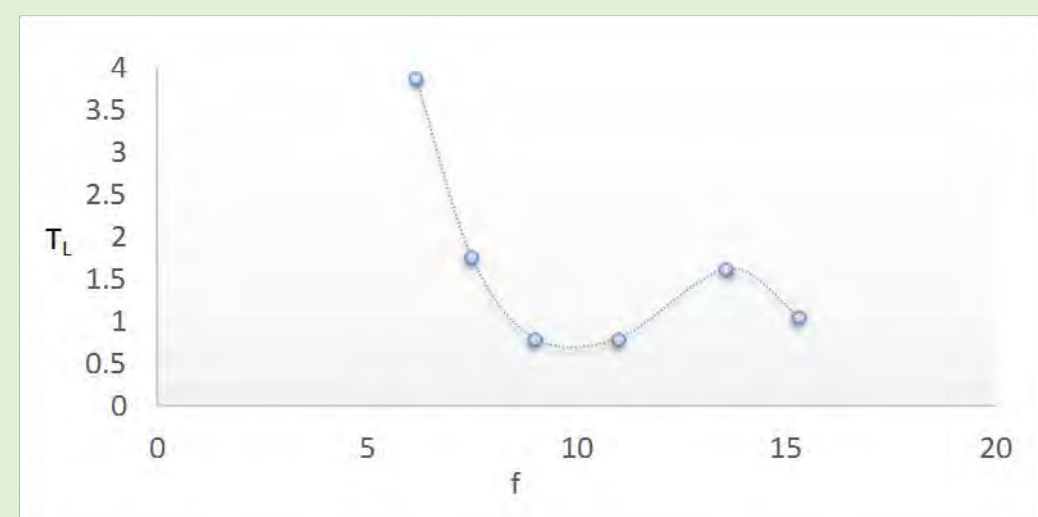
- 1.引入土壤濕度計後，在確認土壤液化發生時間有非常好的改善。
- 2.在S波部份我們得到與前次實驗相仿「在某個頻寬中較不容易發生土壤液化」。
- 3.而P波實驗我們發現同一頻率實驗中相同的Rws不一定都能發生液化，S波對土壤液化的發生影響比P波來的大

五、研究四：利用S波的震動台並在實驗盒上裝入隔板來改變其震盪形式

實驗步驟如研究三，只是在鋪完第一次沙後平均埋入1~3塊隔板(補充說明:S波比P波更容易發生土壤液化，而沙9水6的模式液化時間變化較明顯，故只取S波的這組來做隔板研究)

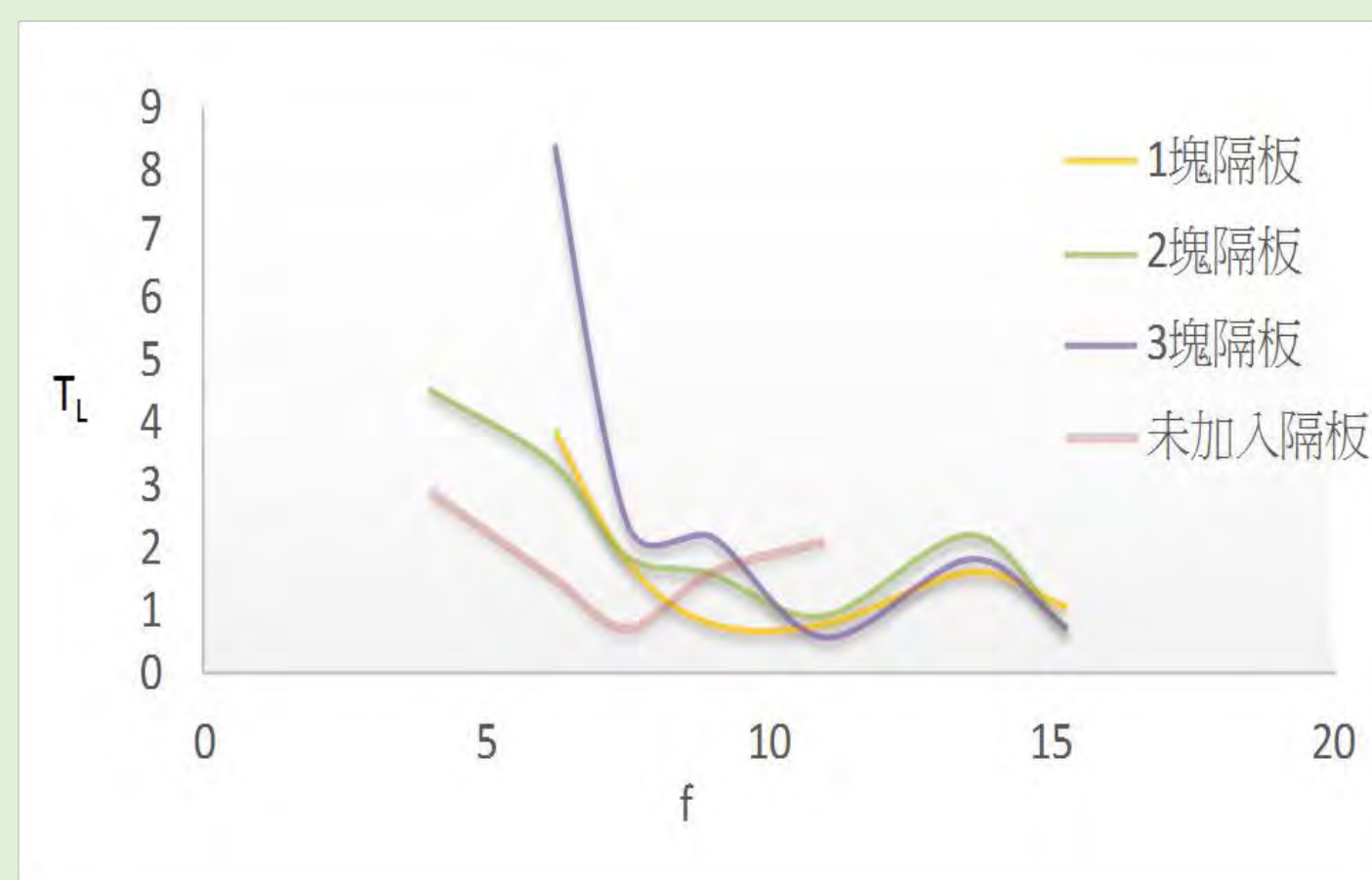
(一)實驗結果：

水高6cm、沙高9cm、Rws=0.67



(二)討論：

- 1.加入隔板後除了2塊隔板在頻率4.5可以液化外，其餘1塊隔板和3塊隔板之情形皆須從頻率6.2Hz開始才會發生液化，似乎有提高共振頻率的可能性。
- 2.若將各圖形疊合比較，可發現加入不等數量隔板後，震盪模式有明顯改變。

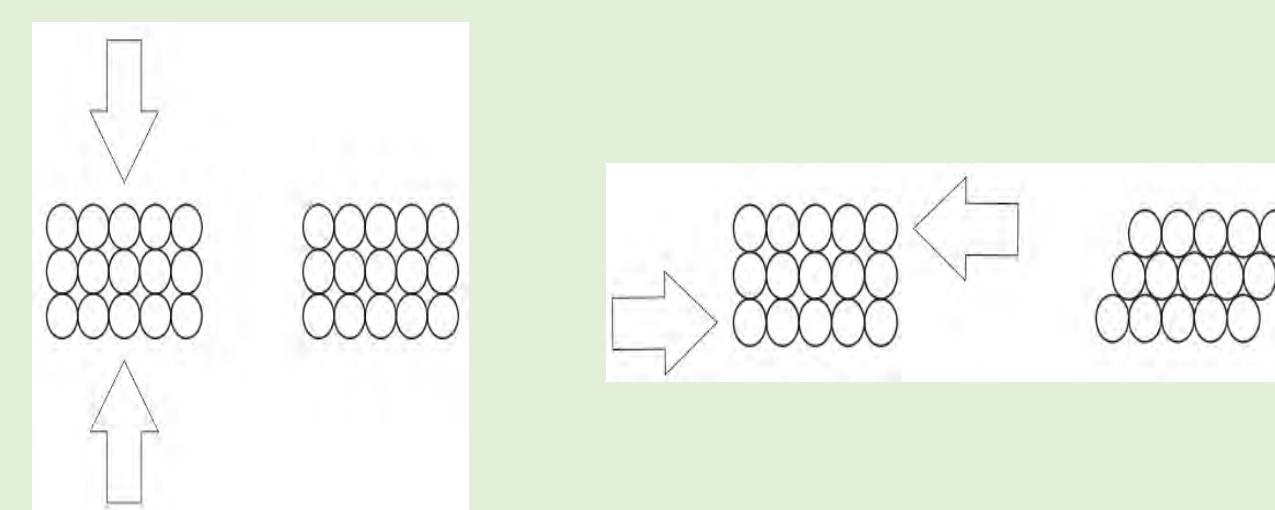


結論

一、本研究發現不同的地震震盪頻率確實會影響土壤液化的發生機會，在某個頻寬內液化潛勢較高，而高或低於此區間液化前是隨即下降，我們推測這地層(實驗盒所模擬)的自然震盪頻率有關，或者與實驗盒當中所產生的駐波可能也有關係。未來在預測土壤液化潛勢時或可將自然震盪頻率考慮進去。

二、由本研究中的P、S波所造成的土壤液化效果來看，S波所以造成的土壤液化效果是相當顯著的，我們認為沙土之所以對剪力波(S波)有較低的抗性，是由於沙粒排列的關係可由下圖加以解釋：

三、本研究尚屬半定量半定性的研究，因此雖然我們觀察到模擬地層的共振進而引發土壤液化，其中有段特別容易液化的頻寬，但是頻寬發生位置很有可能因實驗盒尺寸改變有所不同，而這也是我們未來可以努力的地方，如何將我們的研究推展到實際的地層，該如何找出實際地層易發生液化的地震頻率，也許在未來土壤液化潛勢的研究更可以引入地層剖面的幾何機制。



△當地層受到壓力波(P波)上下擠壓，堆疊的沙粒在與作用力平行的方向有較好的抗性，沙粒不一定會發生錯動擠壓，進而發生土壤液化。
△當地層受到剪力波(S波)左右推擠時，堆疊的沙粒在此方向上抗性較差，沙粒容易發生錯動，將彼此間空隙填得更滿，因而發生土壤液化。

四、而隔板的研究更可以減緩土壤液化的情況，改變震動模式以避開可能引發土壤液化的地震頻率，使得土壤液化潛勢區的土地可以更有效的利用。

五、取樣模型其中所定義的「土壤液化潛勢指數I_L」在本研究中發揮優異的演繹效果，對於有類似土壤液化之研究有相當之參考價值。

參考資料

(一)地震百問

<http://baike.baidu.com/item/%E5%9C%B0%E9%9C%87%E5%BA%94%E5%AF%B9%E7%99%BE%E9%97%AE>

(二)土壤液化成因、災害與復建

<http://cgswweb.moeacgs.gov.tw/Result/921/9.%E9%99%B3%E9%8A%98%E9%B4%BB.pdf>

(三)台灣地震科學中心通訊第十一期

(四)維基百科

(五)國家災害防救科技中心「0206美濃地震相關資訊綜整與研判」簡報