

# 中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

國中組 地球科學科

**第三名**

030514

**震震有池—水塔阻尼器設計及減震效能探討**

學校名稱：新北市立安溪國民中學

作者：  國二 陳郁煊  國二 廖艾秀  國二 陳俊融	指導老師：  劉明元  解宗翰
---	-----------------------------

關鍵詞：水塔阻尼器、減震、自製地震模擬平台

## 摘要

本篇為研究影響水塔阻尼器減振效能之因素，受 $\Delta f$ 、阻尼大小及水體晃動程度的影響。以自製建物及水塔、彈射平台與地震晃動平台進行實驗，後者平台以電鑽為動力來源，由調光器調整電流而可調頻，連接連桿與電鑽的鐵片長度可調幅。實驗得知，水體與建築物 $\Delta f$ 在臨界值(調諧)範圍內，水體會因共振效應而有效吸收大樓能量，若水塔底部改為曲面，亦能使水體更易晃動而有效吸收大樓晃動能量；另一影響因素為阻尼大小，網子、內部粗糙度、浮球及隔板開啟狀態均造成阻尼提升。隔板開啟狀態越高，水體自然頻率越低，反之亦然，而加入隔板亦可提升阻尼、降低延遲震盪時間；也許可用隔板開啟狀態調整水體頻率使得設計水塔阻尼器變得更易調整水體自然頻率。

## 壹、研究動機

台灣位於環太平洋地震帶，時常傳出地震使得房屋倒塌的憾事發生，因為看到台北 101 的協調質量阻尼器，其體積龐大且較難於一般建物中安裝，因考量到實用性的原則，我們決定對家家戶戶都有的水塔進行改造。我們的想法來自於當地震發生時水體會因為慣性而使得水體本身與大樓產生一反向運動而可吸收大樓晃動能量，進而導致大樓晃動有減緩的效果。

## 貳、研究目的

1. 文獻探討，蒐集有關震動平台組建，建築物模型組建，水塔阻尼之相關訊息。
2. 建置適當高度、質量及結構裝置的測震建築物與水塔。
3. 建構彈射震動平台與可調控振幅及振動頻率的地震模擬平台進行地震模擬與檢測。
4. 探究影響水塔阻尼器減振效果的因素，在以此些條件設計水塔阻尼器。
5. 檢測水塔阻尼器在不同設計條件之下的減振效能探討。

## 參、研究器材與設備

1. 使用軟體:Tracker、Excel、Tinkercad
2. 實驗材料

器材		耗材	
壓克力板	延長線	壓克力板	壓克力黏著劑
轉速計	游標卡尺	熱熔膠	鋁管
調光器	手機	木板	L型角鐵
電鑽	手機腳架	螺絲、螺帽	束帶
麵包板/Arduino 板	Arduino 傳輸線	砂紙	鐵網
加速度感測器	積木板與積木	小石頭	浮球
Makita 木工切割機	平面鏡	黏土	
筆記型電腦			



圖 1 本研究所需的重點器材



圖 2 自製地震彈射平台與地震模擬晃動平台

# 肆、研究過程與方法

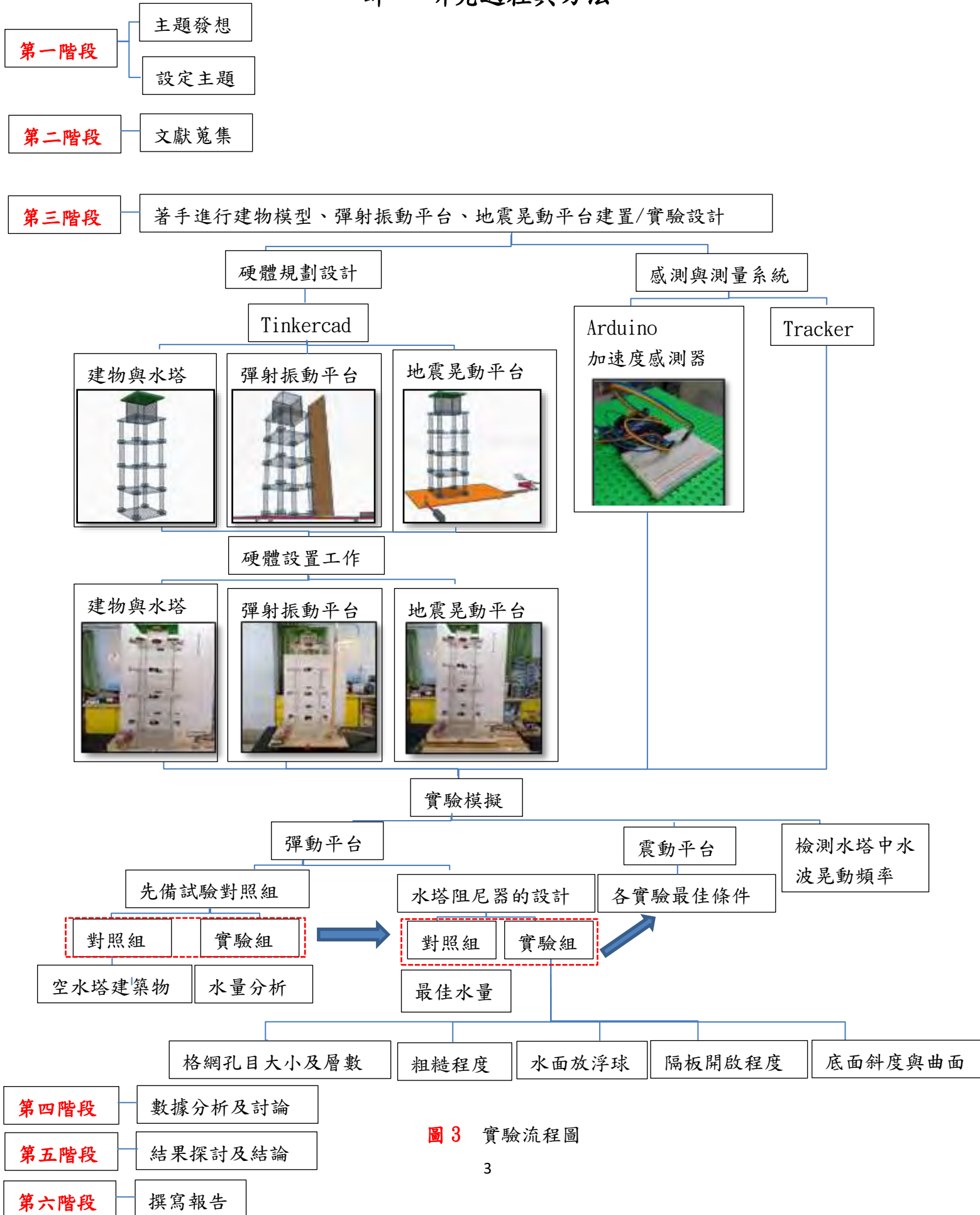


圖 3 實驗流程圖

## (一) 文獻探討(歷屆科展報告)

### 一、全國科展57屆高中組農業食品學科 第一名 奶泡阻尼效應之研究

探討容器形狀、奶泡厚度、奶泡成分對阻尼之效應，重點結論為

1. 奶泡與容器杯壁產生阻尼，消耗液面振動時的能量，所以奶泡具有阻尼效應
2. 杯壁越垂直越易濺出，建議採用上寬下窄曲線的形狀，減少垂直線的長度長度，對於撞擊波有減緩的功用

本作品中的應用：

1. 在液體阻尼器中加裝浮球，模擬奶泡在杯中的情況，假設其具有阻尼效應。
2. 在水塔底部裝置斜面或曲面，減少垂直直線長度，預估將有較佳之減振效能

### 二、全國科展55屆國中組物理科 第一名 Experimental Study on Self-designed Multi-layer-tank Water Damper for Mitigation of Structural Response

本篇以彈射式振動台模擬大樓受地震時的振動情況，以繪製出大樓晃動的位置-時間作圖並以振動波峰的連線以指數函數擬合探討曲線波峰振幅衰減效應，並以TV、c/R2值、D60三項震動參數評估震動振動模式的減振效應。

本作品中的應用：

1. 建置彈射振動平台，並模仿其分析方式，以指數函數擬合波峰震幅衰減情形，以得知其減振效能。

### 三、全國科展55屆國小組物理科 第一名 水塔超人震得住-液體阻尼器的防震研究

探討圓柱體容器內隔間數及孔洞間格數對阻尼效能的影響，重點結論為

1. 孔洞隔間數越多，阻尼效果越好，孔洞隔間數與阻尼效果成正比。
2. 推論加裝隔間，能增加液體運動時的吸收或釋放能量，因此孔洞是一種流體式的減振器。

本作品中的應用：

1. 其結論中提及「孔洞隔間數與阻尼效果成正比」，但若推廣到間格數最多，也就是阻尼極大情況下，水體將極不易晃動，是否仍有較佳之減振效能?因此我們對間格數是否越多減振效果越好這一點保持存疑，以進一步進行驗證
2. 由本篇實驗結果我們可以知道水體因阻尼較小故以隔網增加其阻尼，而水體會因通過隔網而產生摩擦進而將晃動的動能轉換成摩擦的熱能，這讓我們聯想到可以產生摩擦的形式還可以有1. 增加底面與邊界的粗糙度2. 加入浮球等其他方法。
3. 評審在評語當中有建議以共振(調諧)的角度去探討，我們將在我們作品中加入此一要素當成我們研究的主軸目標。

【註 在此調諧的意思指的是水體晃動頻率與建物晃動頻率接近時的況。】

### 四、106學年 新北科展 應用科學科 優等 震震有磁-建構電磁抗震裝置及效能探討

本篇以交通部中央氣象局公告地震震度分級表的加速度來推算振動台的頻率，並以圓周運動公式推算震動平台地動加速度，再以Tracker軟體分析建築物位移

本作品中的應用：

1. 建置地震晃動平台，並以圓周運動方程式進行推算震動平台地動加速度及其對應地震級數，再利用Tracker軟體分析建築物加速度。



## (二) 自製建築物與水塔

建築物與水塔設計圖如圖 4-1，首先以厚 3mm 邊長 12cm×12cm 的 4 塊正方形壓克力板與壓克力邊條互相黏接製作正方形水塔，並以厚 5mm 邊長 30cm×30cm 的正方形壓克力板與直徑 10mm 長 20cm 鋁管組合連結製作出四層高的建築物，並將水塔固定於建築物上。成品如圖 4-2



圖 4-1 建築物與水塔設計圖



圖 4-2 建築物與水塔完成圖

## (三) 自製彈射震動平台模擬大樓的震動與數據量化方法

### 彈射震動平台設計與架設

自製彈射震動平台設計圖如圖 5-1，以木板與滑輪製成平台底座，再將壓克力建築物與水塔安裝至平台上，最後再以 C 型夾將平台固定至實驗桌上。實驗時平推壓克力建築物至定位木板 A 點，藉以控制振幅大小為 5cm。成品如圖 5-2

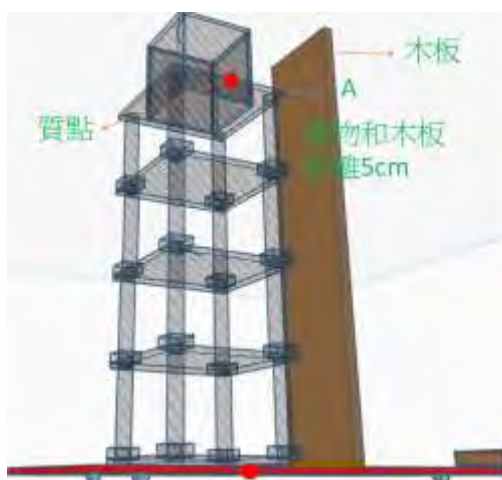


圖 5-1 自製彈射震動平台設計圖



圖 5-2 彈射震動平台實體圖

## 數據分析方法

自製彈射震動平台進行水塔阻尼器減振效能檢測的實驗步驟：

- (1) 裝置水塔阻尼器於與建築物在平台上
- (2) 將建築物拉開到定位檔板 A 點固定最大振幅(註 圖 5-1)並釋放且同時進行錄影
- (3) 以 Tracker 和 Arduino 加速度感測器做測量
- (4) 分析頂樓質點的振幅衰減情形

自製彈射平台檢測減振效能的實驗原理說明：

將壓克力建築物放置於彈射震動平台上，並將建築物平推至離平衡位置 5cm 振幅處待水波平穩後放手並錄影，將錄製影像丟入 Tracker 軟體中進行質點追蹤的震盪分析，繪出位置 (X) 對時間 (t) 曲線圖，觀察到波峰(振幅)會隨時間而遞減，即震盪過程中的彈力位能會逐漸下降，最後震盪至振幅為零，如圖 6。由此圖形我們推論系統受到阻尼力的作用而使得震盪能量衰減。為了量化衰減情形，我們紀錄位置 (X) 對時間 (t) 圖當中的波峰值與相對應的時間，擷取前面四個波峰與時間的數據點至 excel 繪製波峰衰減的衰減曲線(註 取前四個波峰是因為從影片觀察中發現建築物已停止震盪時，水塔中的水波依然會因慣性而晃蕩進而使建物有些微的晃動，故我們只取前四個波峰來做分析)，分析結果如圖 7

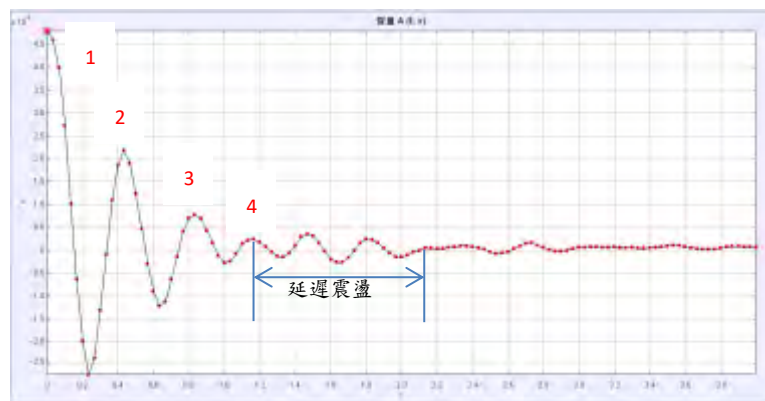


圖 6 建築物樓頂晃動時位置 X 對時間 t 作圖

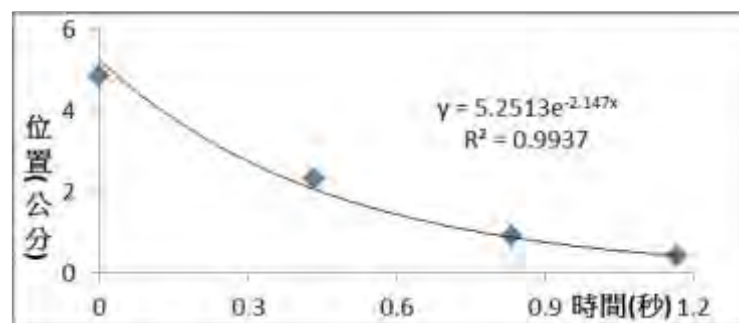


圖 7 建築物樓頂晃動時波峰經 excel 以指數方程式擬合的振幅衰減

圖 7 中的振幅遞減曲線，其衰減情形滿足指數衰減的關係，可用(1)式來描述

$$x = Ae^{-\alpha t} \text{-----}(1)$$

(1)式中  $x$  為波峰位置， $A$  為初始振幅， $t$  為震盪所經過時間， $\alpha$  定義為衰減係數( $\alpha > 0$ )。

在不同的實驗設計中我們改變不同的操作變因，如水量多寡、網子數目與層數、砂紙與石頭、保麗龍浮球、隔間開啟程度、底部斜面與曲度等，並同時觀察應變變因  $\alpha$  值的大小並比較不同條件下的減震效能。量化數據中衰減係數  $\alpha$  值越大即表示能量衰減的越快，也就是建築物在越短的時間內可以回復到靜止狀態減震效果越佳。

數據處理上我們重複 5 次實驗，再取平均值。我們取的數據其可信程度均為  $R^2$  值為 0.98 以上(註 決定係數  $R^2$  值為 0 到 1 之間，越接近 1 表示實驗的數據點越接近擬合後的結果，也就是可以相信的程度越高)。

#### 延遲震盪時間定義與產生的原因：

彈動平台實驗中，當彈射進行實驗的時候我們發現到當建築物停止晃動後，水體會因慣性的關係而繼續晃動，導致建築物隨之產生震盪，而這現象可能會造成當地震發生時住在大樓頂端的人感覺到不適的時間延長，故我們定義建築物停止晃動到因水體慣性而產生的晃動而慢慢停止的這段時間為延遲震盪時間，我們將進行討論在水塔中做怎樣的設計能有效降低延遲震盪而讓大樓可以快速的回復到靜止狀態。

### (四) 自製地震晃動平台模擬不同震度下的地震震動與數據量化方法

#### 地震晃動平台設計與架設

自製地震晃動平台設計圖如圖 8-1，將建築物安置於平台上並將平台以連桿與電鑽連結，電鑽上插頭連接至調光器上。藉由控制連結在電鑽上鐵片旋轉半徑的大小控制迴轉半徑而達到控制平台晃動振幅的大小，同時可藉由轉速計測得平台晃動頻率的高低，並藉由調整調光器上的可變電阻來調整電流大小，進而控制地震晃動平台的晃動頻率，由以上設計我們自製晃動平台可同時調整振幅與頻率，進而可模擬對應不同的地震震度。成品實體如圖 8-2



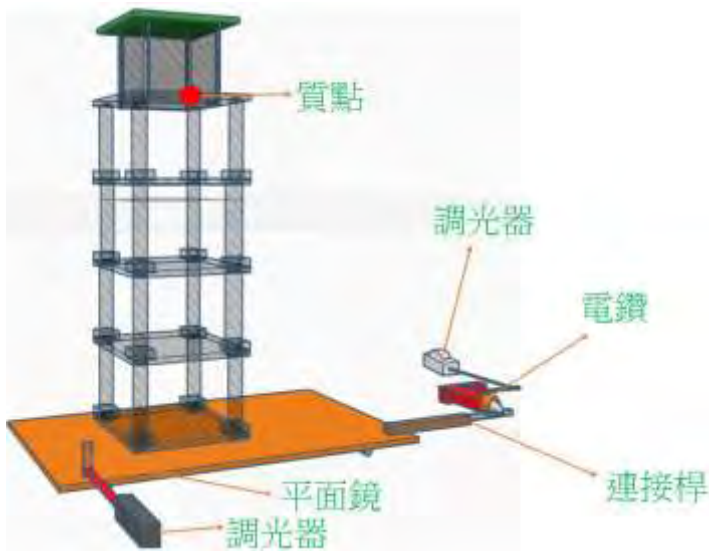


圖 8-1 自製地震晃動平台設計圖



圖 8-2 自製地震晃動平台實體圖

### 數據分析方法

#### 自製晃動平台模擬不同震度情形的實驗步驟：

- (1) 裝置水塔阻尼器與建築物於平台上
- (2) 開啟電鑽並搭配轉速計，藉由調光器調整至相對應震度下的頻率進行實驗
- (3) 以 Tracker 追蹤質點運動情形和運用 Arduino 加速度感測器做測量
- (4) 紀錄頂樓質點晃動的最大加速度值，並且與平台的晃動平均加速度做出比值，以此定義大樓的加速度放大率

#### 自製晃動平台模擬不同震度的實驗原理說明：

為了確認自製晃動平台的加速度大小，我們藉由晃動平台的運動可知平台以等速率圓周運動進行晃動，而晃動台平面可依據等速率圓周運動如圖 9，推算出晃動平台運動時移動的加速度大小，我們可以用式子(2)來描述。

$$a = rw^2 = 4\pi^2rf^2 \text{-----}(2)$$

(2)式中  $a$  表示加速度、 $r$  表示迴轉半徑、 $w$  為角速度、 $f$  為晃動頻率。

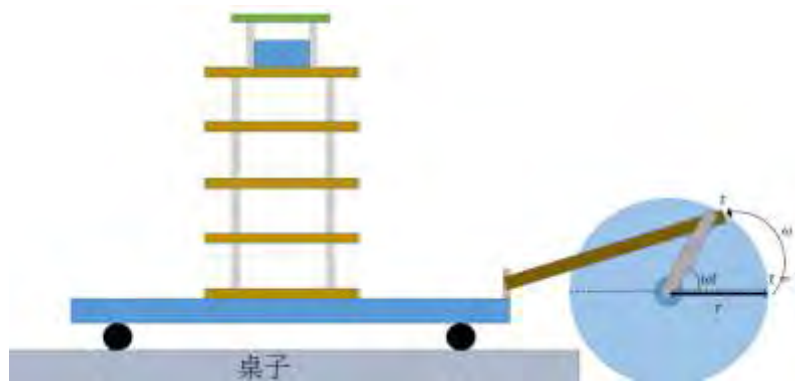


圖 9 自製晃動平台圓周運動示意圖

依據交通部中央氣象局公告地震震度分級表的加速度來推算振動台的頻率。我們由圖 10 的晃動平台地震震度分級 4、5、6 級的地動加速度值帶入加速度算式中推算出所對應頻率，如表一

表一 震度 4、5、6 級所對應的頻率大小

4 級中震(取 74gal)	$74 = 4\pi^2 \times 5.5 \times f^2$ , $f$ 為 $0.58(1/s)$ , 即 $35r.p.m$
5 級劇震(取 217gal)	$210 = 4\pi^2 \times 5.5 \times f^2$ , $f$ 為 $1(1/s)$ , 即 $60r.p.m$
6 級地震(取 255gal)	$255 = 4\pi^2 \times 5.5 \times f^2$ , $f$ 為 $0.34(1/s)$ , 即 $65r.p.m$

交通部中央氣象局地震震度分級表(2000年8月1日公告)					
震度分級	地震加速度 ( $cm/s^2$ gal)	人的感受	室內情形	室外情形	
0	無感	0.8 以下	人無感覺		
1	微震	0.8-2.5	人靜止時可感覺到微小搖晃		
2	輕震	2.5-8.0	大多數的人可感到搖晃。睡覺中的人有部分會醒來	電燈等懸掛物有小搖晃	靜止的汽車輕輕搖晃，類似卡車經過，但歷時很短
3	弱震	8-25	幾乎所有的人都感覺到搖晃。有的人會恐懼感	房屋震動。碗盤門窗發出聲音。懸掛物搖晃	靜止的汽車明顯搖動。電線略有搖晃
4	中震	25-80	有相當程度的恐懼感。部分的人會尋求躲避的地方。睡覺中的人幾乎都會醒來	房屋搖動甚烈。乘坐不穩物品傾倒。較重傢俱移動。可能有輕微災害	汽車駕駛人明顯有感。電線明顯搖晃。步行中的人也感到搖晃
5	強震	80-250	大多數人會感到驚嚇恐慌	部分建築物產生裂縫。重傢俱可能翻倒	汽車駕駛人明顯感覺地震。有些牌坊燈塔傾倒
6	烈震	250-400	搖晃劇烈以致站立困難	部分建築物受損。重傢俱翻倒。門窗扭曲變形	汽車駕駛人開車困難。出現噴沙噴泥現象
7	劇震	400以上	搖晃劇烈以致無法意識行動	部分建築物受損嚴重或倒塌。幾乎所有傢俱都大幅移位或掉落地面	山崩地裂。鐵軌彎曲。地下管線破壞

圖 10 交通部中央氣象局之地震震度分級表圖

我們以不同地動加速度所對應的轉速值進行不同震度的地震模擬，以調光器調整轉速快慢，並可由轉速計的測量得到當時平台的晃動頻率，當調整至實驗晃動頻率時，我們藉由 Arduino 加速度感測器測量水塔頂端的加速度值，並同時開啟手機進行錄影，最後把影片匯入電腦中以 Tracker 軟體分析繪出加速度(a)對時間(t)的關係圖。

因為建築物在地震產生晃動時，越高的樓層搖晃程度會越高，而加速度越大的時候會造成居住的人感到不適，並且房屋都有最大可承受的最大加速度，若超出此最大加速度則房屋可能受損或是產生斷裂現象。所以我們定義建築物頂樓晃動所量測到的最大加速度  $a_{\max}$  與平台晃動的地動加速度大小  $a_{gnd}$  的比值為**加速度放大率**  $\gamma$ ，定義如(3)式

$$\gamma = \frac{a_{\max}}{a_{gnd}} \text{-----(3)}$$

#### (五) 水塔阻尼器中水波晃動頻率的測量

我們把釣魚用浮標放入水塔阻尼器圖 11，雙手平推水塔以造成水波產生水平方向規則的晃動，再以手機錄影並將影片匯入到電腦中，以 Tracker 軟體分析出浮標晃動的位置(x)對時間(t)作圖，進而得到水波的晃動頻率。



圖 11 水波晃動示意圖

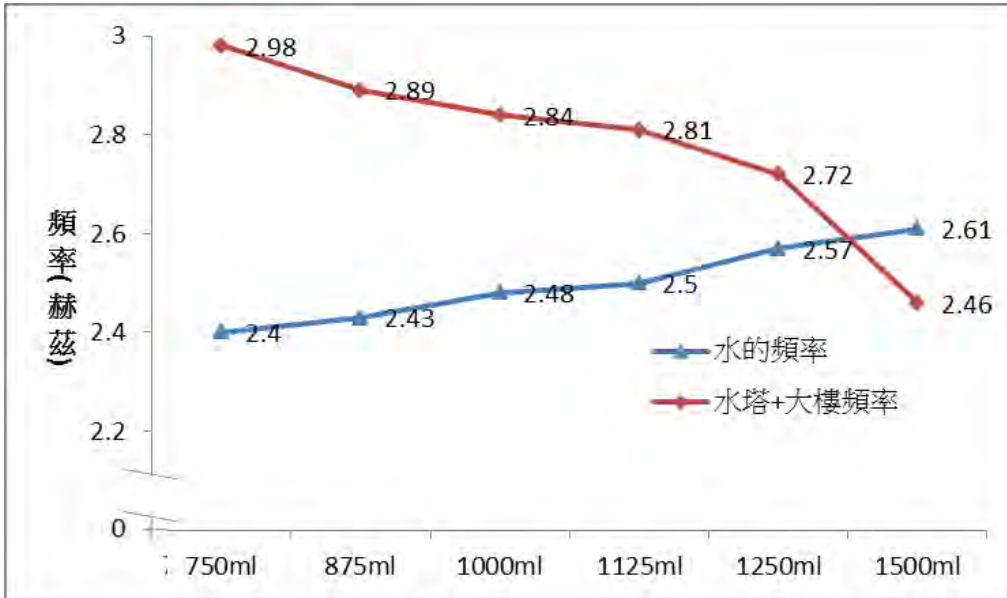
### 伍、研究結果與討論

實驗一 探討空水塔的減振效能與不同水量下水體的自然頻率與建築物自然頻率的差值  $\Delta f = |f_{\text{水}} - f_{\text{大+水}}|$  和減振效能之間的關係

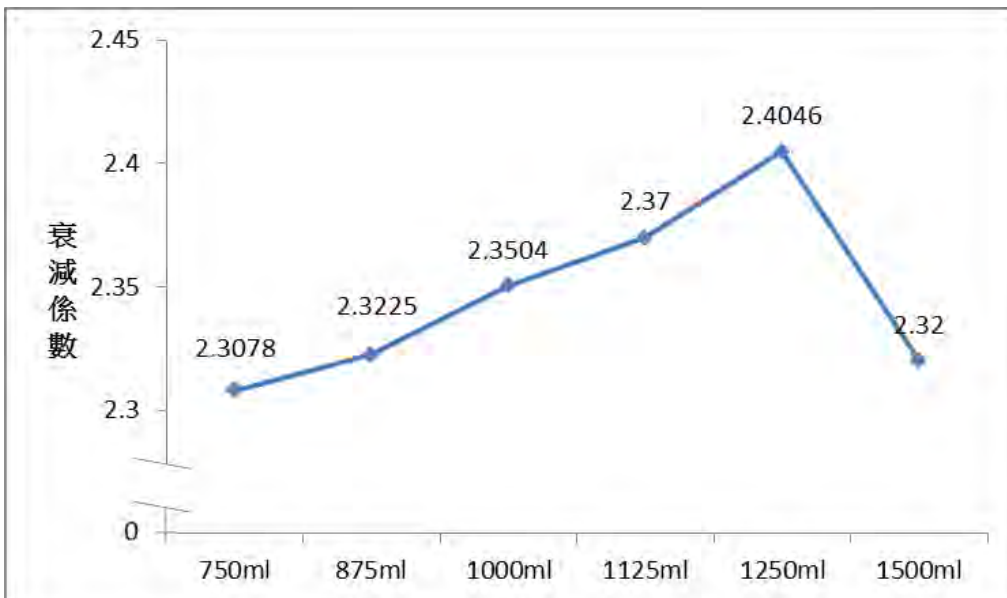
在做過先備試驗並與老師討論過實驗數據後，我們知道單擺系統，擺動頻率不受擺錘影響，而只會受到擺長的影響(註 小角度情況下)。由文獻得知，101 大樓的振動頻率接近於台北 101 大樓阻尼器的頻率，而由我們八年級在波動所學過的概念可以知道當兩個物體頻率一致或接近(調諧)的情況下，會產生共振效應，使得阻尼器可以較為有效的吸收大樓晃動的能量。所以我們猜想如果可以讓水塔中水體晃動的自然頻率接近於大樓晃動的自然頻率，那是否會有與 101 大樓阻尼器有類似的效果呢？於是我們設計了以不同水量當實驗組，以空水塔為對照組來進行頻率差與減振效能之間的關係比較。

**表 2** 空水塔建築物(對照組)的衰減係數

對照組	衰減係數
空水塔	1.71



**圖 12** 不同水位的自然頻率(藍線)與建築物在不同水位下的自然頻率



**圖 13** 不同水量對衰減係數的關係圖

## 實驗一 數據討論

由表 2 與圖 12、圖 13 發現

1. 裝有水的水塔確實是比無裝水的情況下有較好的減振效果，即水塔具有減振效果。
2. 當水量增加水位會越深，水體本身的自然頻率上升；而水量越多時，水塔質量變大，建築物重心會些微上移，如同單擺擺長變長而導致建築物晃動週期變長，頻率變小。如圖 14。

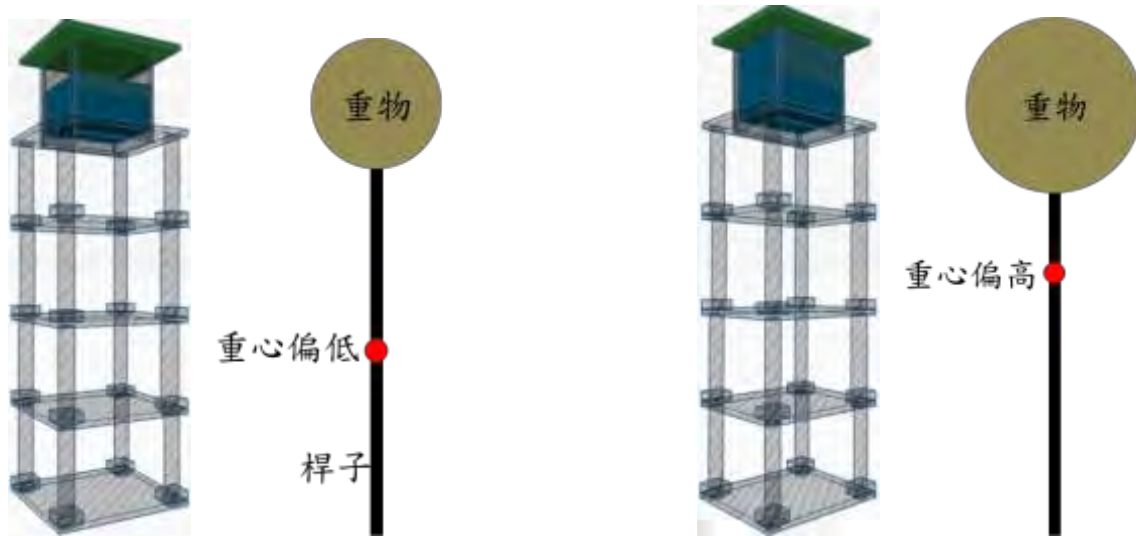


圖 14 建物重心偏移等效示意圖

3. 當水體的自然頻率與建物自然頻率越接近時，即  $\Delta f = |f_{\text{水}} - f_{\text{大+水}}|$  越接近零的情況下（調諧），會因為產生共振現象而使得水體本身吸收較多大樓晃動的能量而減振效果較佳。
4. 1250ml 與 1500ml  $\Delta f = |f_{\text{水}} - f_{\text{大+水}}|$  相近，為什麼減振效能卻差很多？


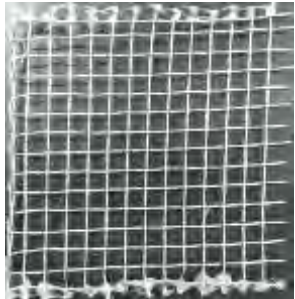

從影片觀察發現，1500 毫升水在建物晃動中會不斷和水塔蓋子產生碰撞擠壓，而擺盪不規律；在圖 12 中所測得的水體自然頻率是利用浮標丟入 1500 毫升水槽中以輕微水平方向晃動所測得的水體晃動自然頻率。也許因實驗情境不同使 1500 毫升在接近滿水位下的水塔在加了蓋子後因撞擊樓頂板而使得水體本身晃動不規則進而造成頻率已非原測量水體的自然頻率，導致大樓加水體的自然頻率與晃動中水體的自然頻率相差變大進而造成減振效能不佳。



## 實驗二 探討固定 1250ml 水量情況下，水塔內加裝正方形孔目且大小不同的網子與層數對減振效能的影響

由實驗一我們可以知道  $\Delta f$  小於某一臨界值的情況下會使水體有較好的減振效能，由文獻中知道台北 101 阻尼器是利用單擺擺動進而吸收風阻或因地震產生的晃動能量，而 101 阻尼器上除了單擺以外，還有液壓吸震器，其扮演著吸收能量的角色，所以我們設計實驗以 1250ml 的水為依據，希望在水塔中加入消耗能量的元件而得到更好的減振效果。本實驗我們以不同孔目大小為實驗組、以裝 1250ml 水為對照組來比較網子對減振效果的影響。

**表 3** 不同網子孔目大小

	粗網孔目	中網孔目	細網孔目
孔目大小	$1.4 \times 1.4 \text{cm}^2$	$0.8 \times 0.8 \text{cm}^2$	$0.4 \times 0.4 \text{cm}^2$
			



**圖 15** 加隔網水塔設計裝置圖(註 左圖單層網放置正中間、右圖雙層網放置於 1/3 與 2/3 處)



圖 16 隔網孔目大小及層數改變對衰減係數作圖(註 圖中下表為建物、水波頻率差之表格)

## 實驗二 數據討論

由圖 16 發現

1. 從實驗數據中發現，當  $\Delta f = |f_{\text{水}} - f_{\text{大+水}}|$  小於 0.24 Hz(註 1250ml 水、粗網 1 層、2 層、中網 1 層都小過 0.24Hz，中網 2 層的  $\Delta f = 0.24\text{Hz}$ ) 的情況下，隨著孔洞變小與層數變多，發現減振效果會較好。所以我們推論  $\Delta f$  若在一定範圍內則當阻尼(阻力)越大時則減振效果會越佳；而當  $\Delta f$  大過某一臨界值的時候(註 細網 1 層、細網 2 層)，即使阻尼(阻力)變大仍無法造成較好的減振效果。
2. 影響水塔減振效能的原因應該包含幾個部分，其一為水體自然頻率與大樓自然頻率是否相近，類似 101 大樓阻尼器頻率是否和大樓頻率相近；其二為阻尼(阻力)的大小，阻尼的大小扮演著消耗能量的角色，相當於 101 大樓阻尼器的油壓裝置，它可以有效將阻尼器晃動的能量轉成熱能消耗掉。

而我們由文獻探討知道，因為 101 大樓阻尼器的鐵球質量非常的巨大可以吸收比較多地震造成的能量，我們覺得若是在相同  $\Delta f$  與相同阻尼的條件下，若水體本身質量可以增加則應該也會有較好的減振效能，因為水體和大樓的震盪方向會相反而達到吸收能量的目的，若是比較大的質量體則能造成建物本身比較大的反向作用力來阻擋大樓晃動。

### 實驗三 探討固定 1250ml 水量情況下，水塔內壁粗糙程度對減振效能的影響

由實驗一和二可知頻率和阻尼皆會對減震效能產生影響，而實驗二中加裝網子可以使阻尼變大，但同時可能因為隔間孔目較小且層數變大而造成  $\Delta f$  過大而無法達到共振情況。所以我們思考是否有其他方式增加阻尼但不會讓  $\Delta f$  改變太大，決定增加水塔底面及晃動面上兩側的粗糙度，並假設水波晃動時，摩擦水塔內側時消耗的能量會更多，則減震效能較好。



圖 17 不同粗糙度水塔設計裝置圖(註 左:底部放小石頭;右:砂紙安置於底面和側面上)

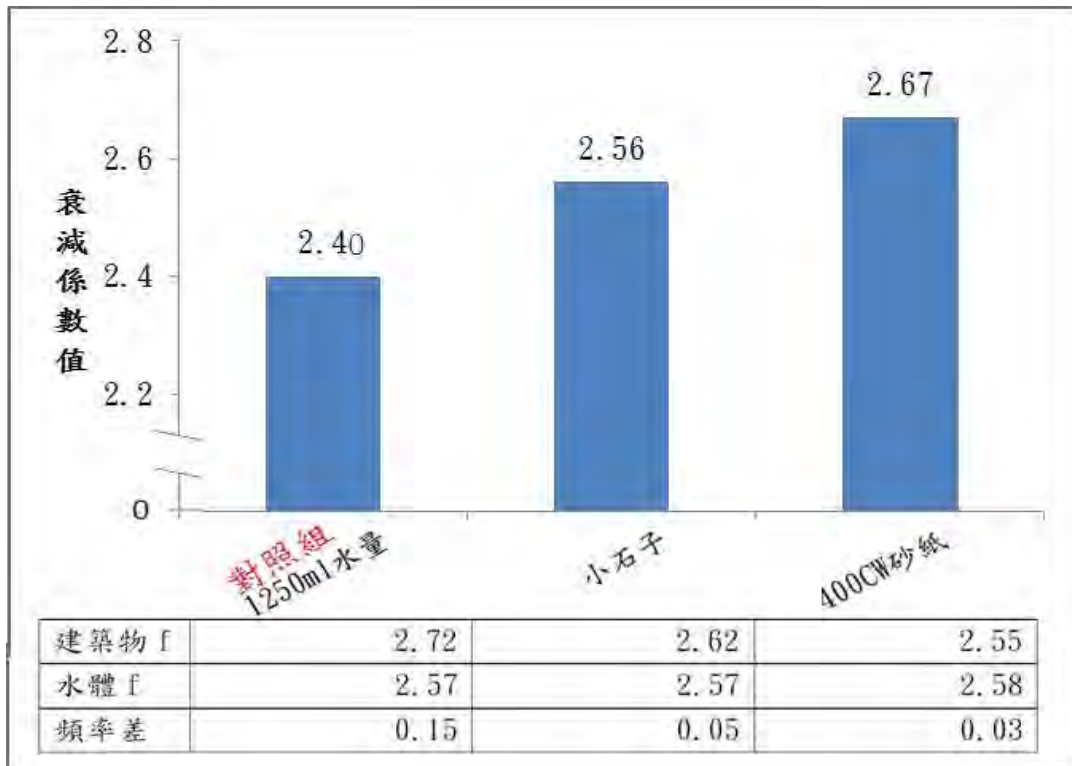


圖 18 1250ml 水量表面粗糙度對衰減係數作圖(註 圖中下表為建物、水波頻率差之表格)

### 實驗三 數據討論

從圖 18 中發現由於 1250ml、小石頭、400cw 砂紙所對應的  $\Delta f$  皆小於 0.24Hz，也就是這三種情境都會有共振效應產生，進一步比較水與小石頭、水與 400cw 砂紙的衰減係數，我們發現表面粗糙程度確實會影響減振效能的好壞。以比較粗糙度，實驗結果 400cw 砂紙的減振效果最佳，它與實驗 2 條件為中網 2 層的情況下的減振效果差不多。

### 實驗四 探討固定 1250ml 水量情況下，水塔表面加不同浮球對減振效能的影響

在閱讀完文獻報告並與老師討論過後，我們覺得也許在水面上加入漂浮物也可能使得在震盪的過程中，因保麗龍球可能在晃動中會造成彼此摩擦而產生阻尼較大的情況，進而使得減震效果較好。



圖 19 不同保麗龍球水塔裝置圖(註 左上:2r=3.25cm;右上:2r=1.91cm

左下:2r=1.45cm;右下:2r=0.35cm)



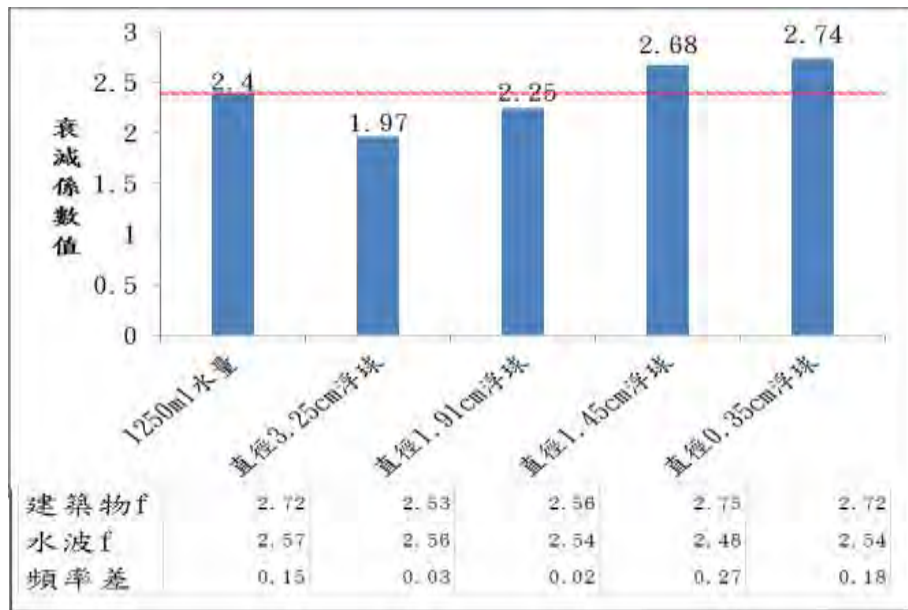


圖 20 1250ml 水量不放浮球與放入不同直徑浮球對衰減係數作圖

(註 圖中下表為建物、水波頻率差之表格)

#### 實驗四 數據討論

由圖 20 數據中發現，本實驗中每個條件下，衰減係數皆在共振範圍內，當浮球直徑越小，其減振效能會越好，直徑 1.45 公分及 0.35 公分之浮球減振效能較 1250ml 水量佳，但其餘兩者(直徑 3.25 公分與 1.91 公分)則反之。由影片中觀察可發現大浮球震盪擺幅相較於小浮球的震盪擺幅來的小，而兩者的擺動狀況又比 1250ml 的水量來的小。故我們從觀察中推論，當水體晃蕩過程中若能產生碎波，就表示晃蕩程度較大，也就是說水體本身能吸收較多能量，可達到比較好的減振效果。雖然 1250ml 水量的對照組其較易晃動，但因在不加任何消能元件的情況下水的阻尼過小，而造成減振效能相較直徑 1.45 公分及 0.35 公分之浮球來的差。

大浮球減振效能差的原因可能與實驗一當中 1500ml 水量的情況相同，因為水體的自然晃動頻率所測得的情境與本身大樓晃動時的情境不同，因為加入浮球已經接近滿水位，會導致震盪過程中震盪碰撞水塔頂端，可能在大樓中水體本身的晃動頻率被改變，而導致其  $\Delta f$  差值過大(註 可能須要想辦法測量水塔實際晃動時水體晃動的頻率確認)，進而導致無法達到調諧情況而使得共振效應無法產生，進而無法有效吸收大樓震盪能量。

而直徑為 1.45 公分及 0.35 公分之浮球則無上列之問題，水體晃動時，浮球之間或浮球與水體產生摩擦，將水體晃動能量轉換為熱能並消散，且頻率差在共振範圍內故能有較佳的



減振效果。此外，直徑 1.45 公分的浮球整體建築物與水體頻率差為 0.27 赫茲，並有較好的減振效果，故我們推論 0.27 赫茲也在共振範圍內。

### 實驗五 探討在 1250ml 水量下，水塔加入單隔板開啟狀態對減振效能的影響

由連通管原理可以知道，晃動的過程當中會因為兩邊壓力差而來回震盪，震盪過程中因為水體會和管壁間產生摩擦，進而達到阻尼的效果，我們覺得也許可以利用加入隔板來達到如同連通管晃動的情況，所以我們在水塔裡，分別以全隔間、隔間開啟 2cm、隔間開啟 4cm、隔間開啟 6cm、隔間開啟 8cm 為我們實驗的討論變因的實驗組，我們用裝 1250ml 水的水塔為我們的對照組來相互比較減振效能。實驗結果如圖 22、圖 23。



圖 21 隔板開啟狀態 8cm 結構圖(註 其他條件因與此圖相似，所以只放最佳情況表示)

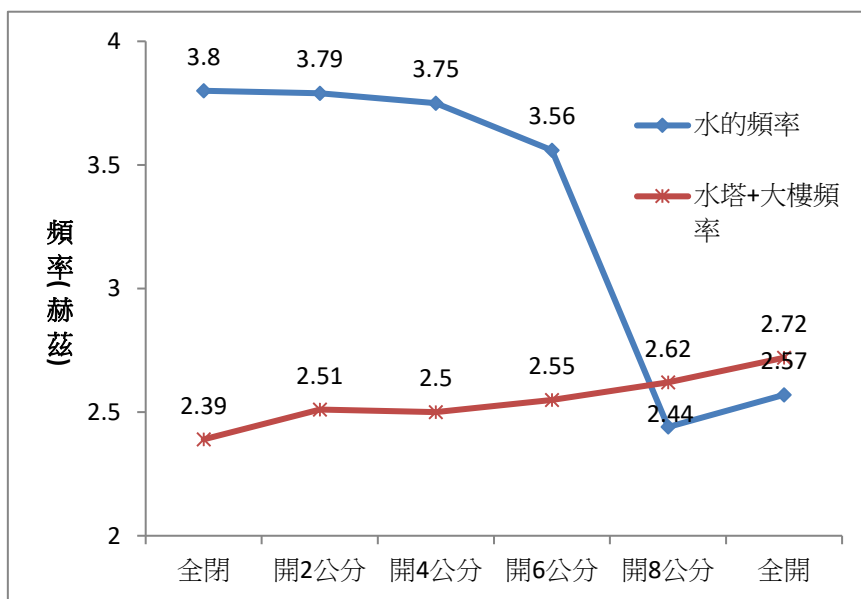


圖 22 固定 1250ml 水量下在不同隔間開啟狀態下水體的自然頻率與大樓自然頻率

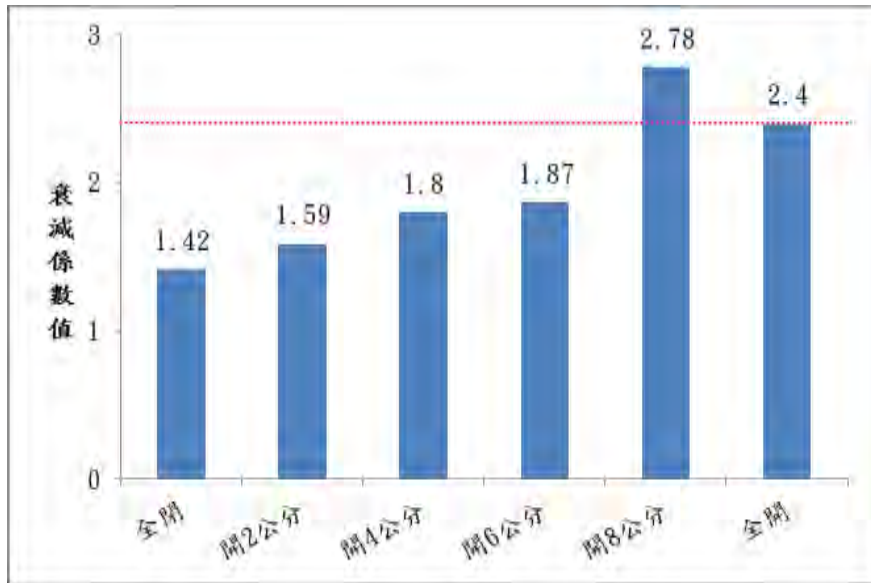


圖 23 固定 1250ml 水量改變隔板開啟狀態下衰減係數圖

#### 實驗五 數據討論

由圖 22、圖 23 數據圖可以知道

1. 隔板的開啟狀態如果越大，則水體的自然頻率會漸漸變小。首先考量在全閉的情況之下水體的自然頻率最大，我們推論應該是水塔的長寬比改變而影響水體的自然頻率。因為在實驗一當中我們以正方形水塔裝不同水量做實驗，從圖 12 觀察到水位越高，則頻率會漸漸變大，即水位高低會影響到水波的自然頻率，而在全閉條件下深度並未改變，故合理推論是因為隔板將水槽一分為二，使得隔間的長寬比已經改變，並非方形的 1:1 關係。

而在其他開啟程度不同的情況下，水體本身的自然頻率其實也會有所改變，我們覺得可能是與長寬比改變有關係，也可能跟水塔阻尼的改變有關係(註 阻尼效果討論以第 3 點說明)。

2. 當開啟程度越大時，我們觀察到水體晃動情形較開啟狀態小時來的劇烈，由此我們推論水體在越易晃動的情況之下大樓的重心偏移會比較大一些，而導致平均重心會略為下降，而類似單擺系統的擺長變短，而造成週期下降頻率上升的情形。
3. 由數據可知隔板開啟狀態為 8cm 時會有較好的減振效果。由全閉開始隨著開啟程度越高，減振效能越好。比較隔板開啟狀態為 8cm 與全開的情況下，頻率差  $\Delta f$  均小於 0.24Hz 表示都有共振現象產生(註 其他條件  $\Delta f$  差距過大而減振效能不彰)，但

是開度 8cm 比全開有更好的減振效能，我們推論是因為加了隔板確實會造成阻尼效果提升。

### 實驗六 探討 1250ml 水量下，水塔底面不同對減振效能的影響

我們認為若水塔底面為斜面或曲面，水體或許較為容易晃動，晃蕩程度較大時，水體能吸收較多建築物晃動能量，使減振效能提升。分別以在 1250ml 水量下底面斜度為 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 及曲面為實驗組，用裝 1250ml 水的水塔為對照組來相互比較減振效能。

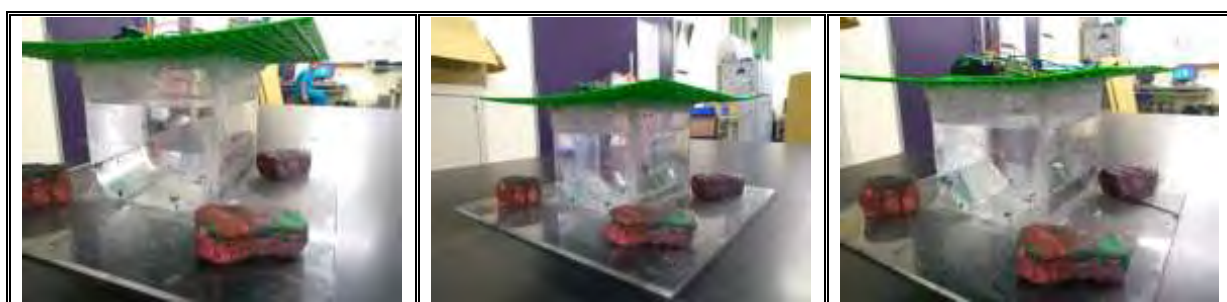


圖 24 底面斜度與曲面裝置圖(註 左:曲面;中:斜面  $30^\circ$ ;斜面  $45^\circ$ )

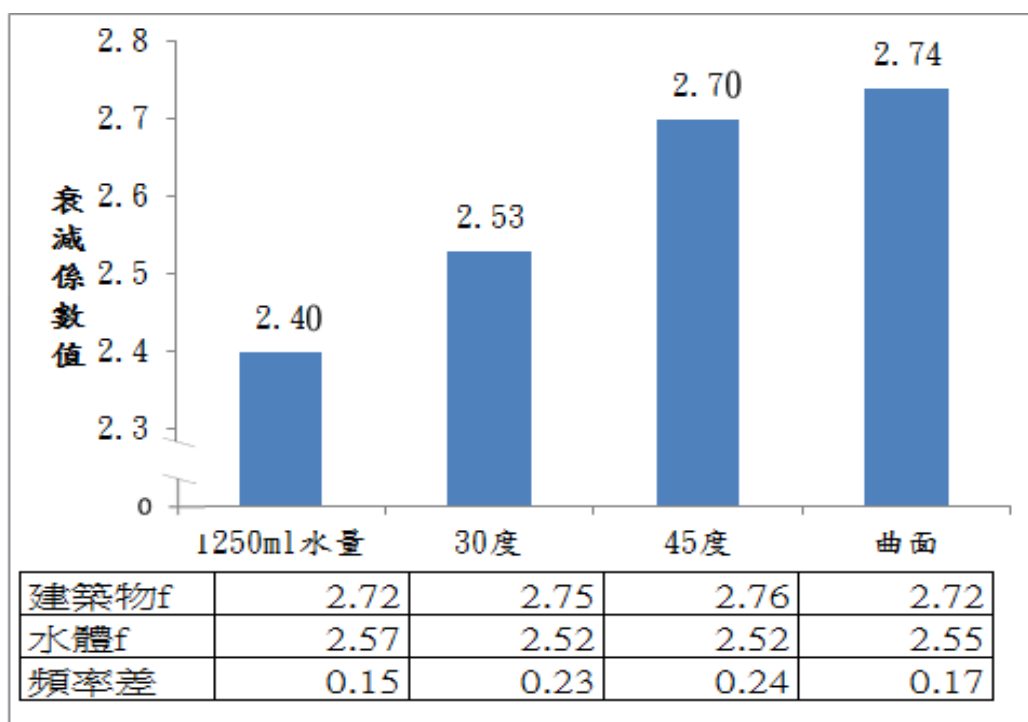


圖 25 固定 1250ml 水量改變底面斜度與曲面狀態下衰減係數圖  
(註 圖中下表為建物、水波頻率差之表格)

## 實驗六 數據討論

由圖 25 可知，在固定 1250ml 水量情況下，水塔底面加裝 30 度、45 度及曲面的鋁板，頻率差皆在共振範圍內，而圖 25 中以衰減係數值而言，底面曲面衰減係數值為 2.74 最佳，45 度為 2.70 其次，30 度為 2.53，皆優於 1250ml 水量的 2.40。由實驗觀察可以發現，水塔底部加裝斜面或曲面裝置會使得水體較易晃動，進而導致水體可以吸收較多大樓晃動能量，並且當頻率差於調諧範圍內時，會使得減振效能有高度提升。

實驗七 綜合先前實驗，比較空水塔、1250ml 水量、1250ml 雙層中網、1250ml 砂紙 400、1250ml 水量隔間開啟 8cm、直徑 0.35 公分浮球、底面曲面之震盪延遲時間

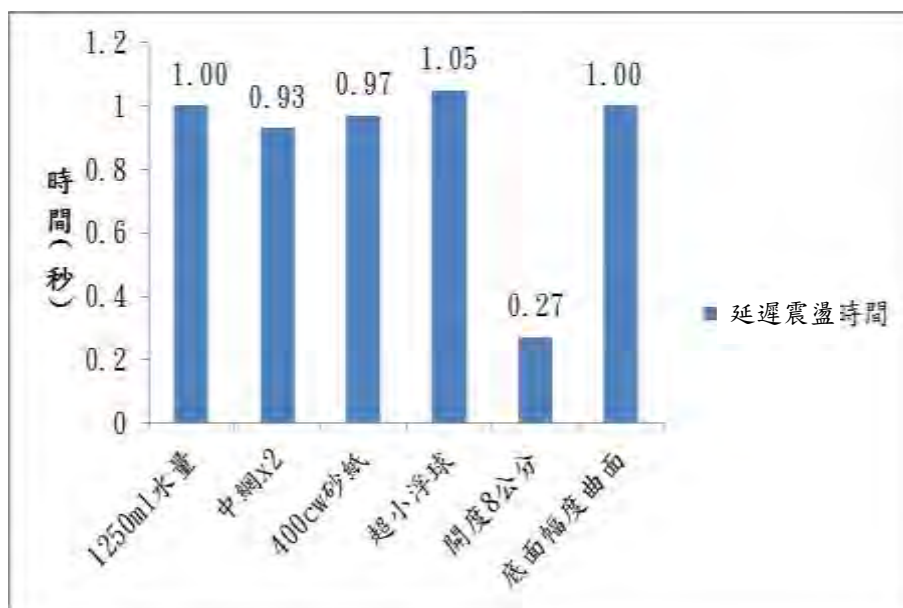


圖 26 不同條件下，彈射振動平台

## 實驗七 數據討論

由圖 26 數據圖可以知道

1. 彈動平台實驗中，因為液體阻尼器能吸收建築物晃動能量並消耗，故每個實驗中，當建築物停止晃動後，水體會因慣性而繼續晃動，導致建築物隨之產生震盪，我們稱建築物停止晃動後到因水體慣性而產生的晃動停止這段時間為延遲震盪。

2. 在 1250ml 水量、中網兩層、400cw 砂紙、超小浮球(直徑 0.35cm)及底部曲面的狀況下，延遲震盪時間皆為 1 秒鐘上下，但唯獨隔板開 8 公分之震盪衰減時間明顯較少，為 0.27 秒。造成如此顯著差異推測可能是因為加裝隔板能使水體於晃動時，水體與水塔受力面積增加，導致能量較快消散，如圖 27。

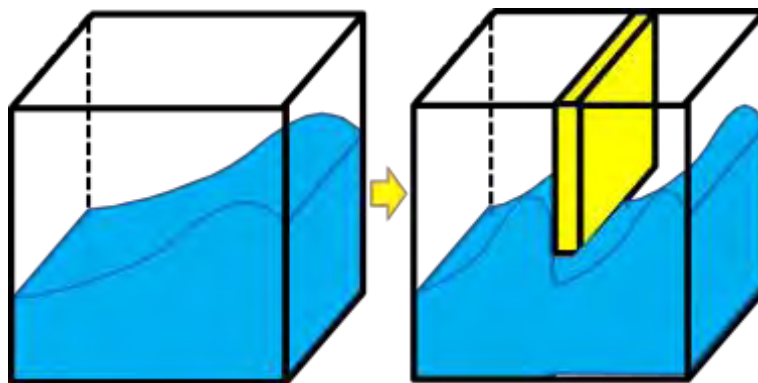


圖 27 受力面積增加示意圖

實驗八 綜合先前實驗，比較空水塔、1250ml 水量、1250ml 雙層中網、1250ml 砂紙 400、1250ml 水量隔間開啟 8cm，分別在自製地震晃動平台上模擬 4、5、6 級震度下的減振效能分析

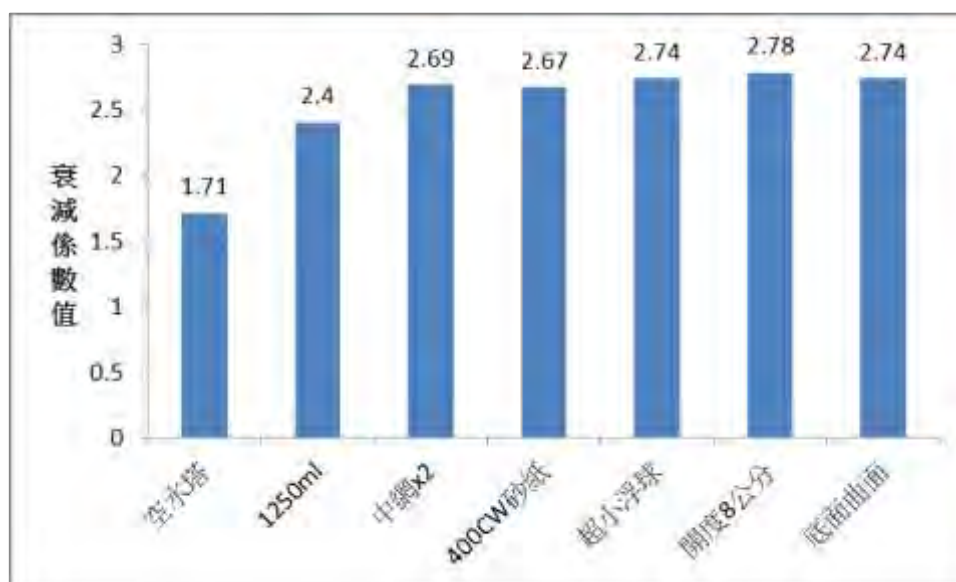


圖 28 各彈動平台實驗中減振效能較佳之實驗組衰減係數比較圖



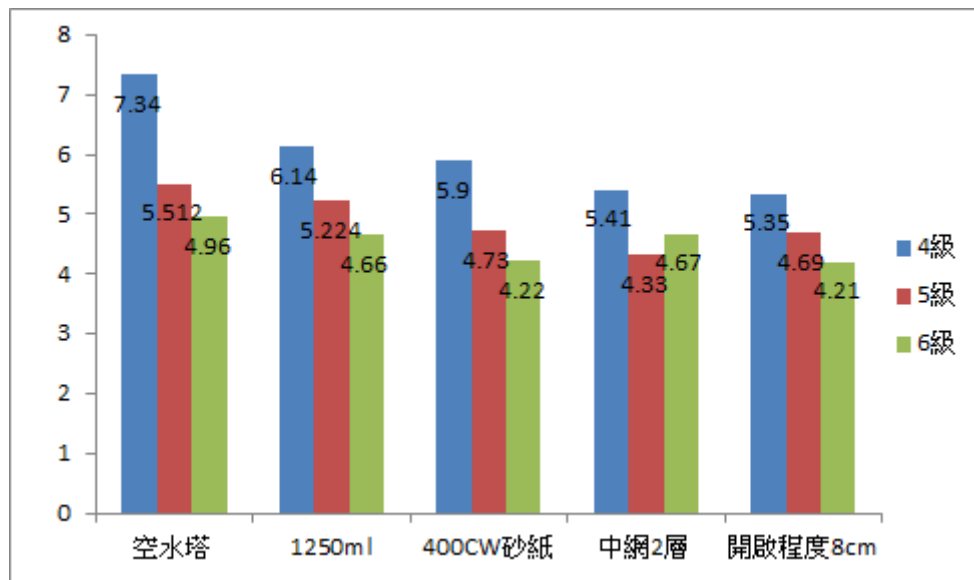


圖 29 不同條件下以晃動平台模擬 4 級、5 級、6 級震度頂樓加速度放大率

#### 實驗八 數據討論

我們將自製地震彈射平台所做的測試數據衰減係數  $\alpha$  與地震模擬晃動平台下所做的 4 級、5 級、6 級震度下的加速度放大率  $\gamma = \frac{a_{\max}}{a_{gnd}}$  做比較。衰減係數值越小與加速度放大率越大即表示減振效能是越差的。

由圖 28、圖 29 可以發現到空水塔的加速度放大率最大，即減振效能最差，裝有 1250ml 水量無阻尼消能裝置的水塔次差，而加裝消能元件的水塔阻尼器皆有較好的減振效能，與我們原先實驗結果相接近。

## 陸、結論

### 1. 能自製兩種不同地震平台模擬晃動情況：

(1)彈射振動平台的設計:能以彈射建築物方式進行分析水塔阻尼器減振效能好壞。

(2)地震晃動平台的設計:以電鑽為動力來源，並且用調光器調整電流大小使得震盪頻率得以控制，且由連結電鑽的鐵片迴轉半徑可調控振幅大小以作為可調頻也可調幅的地震晃動平台模擬器。

### 2. 家家戶戶都有的水塔具有減振效能是值得開發與研究的減震阻尼器。由本實驗中發現影響減振效果的最主要因素有兩個。首要是水體震盪自然頻率是否和大樓本身的自然頻率相接近，即 $\Delta f = |f_{\text{水}} - f_{\text{大+水}}|$ 是否在小於某臨界值而會使水體發生共振(調諧)效應，使水塔阻尼器能有效吸收大樓晃動能量；次要水塔中安裝的**阻尼消能元件**是否能有效的將吸收的能量轉換成摩擦的熱能而達成消能。

由實驗我們也發現到阻尼增加可能會使得共振頻率被破壞，進而使得減振效果變差。若設計水塔阻尼器時，兩個條件能同時滿足，且阻尼效果適中不破壞共振效應的情況下，則能設計出減振效能較優的水塔減震阻尼器。

同時我們覺得水塔阻尼器是能與台北 101 的諧調阻尼器做類比對照的，以 101 阻尼器的設計來說可以分成三大主軸，由單擺實驗可以得知在小擺角情況下，只有擺長會影響到頻率，所以說能以擺長來控制頻率(註 類比於水體自然頻率)，擺錘越重應該越能吸收振動所產生的能量(註 我們覺得若水塔阻尼器  $\Delta f$  在臨界值內，水體質量越大應能接收越多能量，還需要進行實驗做驗證)，第三是阻尼器扮演能量轉化的角色。

### 3. 本實驗發現不論是放入網子、加裝浮球或是改變內部粗糙程度、以及改變隔板開啟狀態都能有不錯的阻尼效果產生。

直徑 1.45 公分及 0.35 公分之浮球減振效能均比對照組 1250ml 水量為佳，而直徑 3.25 公分及 1.91 公分浮球的減振效能表現不佳，我們推測是因水體不易晃動而導致無碎波產生，進而效果較差；同時也可能因大樓晃動時擠壓保利龍球而使水體的自然頻率已非當時以浮標法所測的自然頻率，而導致已超過  $\Delta f$  的臨界值範圍。

我們觀察到水波震盪時若能產生較大的碎波則減振效果會較好，推測可能原因是水波在晃動過程中可吸收較多能量產生較大的擺動進而產生碎波現象。

4. 孔目越細層數越多阻尼效果會越高。在對照隔板實驗的分析情況下，我們覺得阻尼越高可能會破壞共振效應。而根據我們測量所到的數據，細網一層與兩層的減振效果較差是事實，但是卻並非水體本身的自然頻率跑掉，而是建物的頻率改變，這讓我們比較無法理解，可能需要再重新進行比對實驗做數據驗證。
5. 我們由隔板開啟狀態的實驗中發現，開啟程度越大減振效果越佳，但若超過一定臨界值則會因為阻尼效果降低而使得減振效果變差。同時我們發現隔板開啟的程度越大則水體晃動的自然頻率會下降，或許可以利用此一特性來達成簡易調整水體本身的自然頻率而使得能更便利的設計調諧水塔阻尼器。
6. 由底面斜度實驗中發現，增加底面斜度 30 度、45 度及曲面皆能有效增加減振效能，對此我們觀察到其它實驗中(除隔板實驗外)水體較不易晃動。故我們推論較底部的水體可能受到上部水體的重量擠壓關係而呈現靜止不動或者震盪擺幅較小，導致只有上半部的水體晃動較為劇烈，而增加底面斜度也許可導致水體更容易晃動，使得水體能吸收較多大樓晃動能量，使減振效能提升。
7. 在分析延遲震盪的情況中，我們發現隔板開啟程度 8 公分時，因為加裝隔板能增加受力面積，使得震盪能量較快被消散，能有效縮短延遲震盪時間。
8. 我們由兩種不同的震動平台做交叉測試的減振效能比對，基本上結果與談動平台實驗的結果有相接近的趨勢。

## 柒、參考資料與其他

- 一、陳彥辰、黃聖翔、王博奕(2014)。101 奇幻阻尼鋼球—以單擺原理和慣性定律模擬 101 大樓調諧質量阻尼器的減振效應。中華民國第 54 屆中小學科學展覽會。
- 二、陳彥辰(2015)。Experimental Study on Self-designed Multi-layer-tank Water Damper for Mitigation of Structural Response。中華民國第 55 屆中小學科學展覽會。
- 三、王子誥(2016)。水塔超人震得住-液體阻尼器的防震研究。中華民國第 55 屆中小學科學展覽會。
- 四、王子誥、吳宗諭(2017)。震震有聲水峰鳴 -探討利用水波當成地震警報器之可行性。中華民國第 57 屆中小學科學展覽會。
- 五、楊啟令、劉仕衡、陳毅庭(2017)。游泳池可以減震耶!-- 流體阻尼的研究。中華民國第 57 屆中小學科學展覽會。
- 六、高山峰夫、田村和夫、池田芳樹和著(2012)/邱榮政翻譯(2015)。簡單搞懂耐震、制震、隔震。詹氏書局。

## 【評語】 030514

相關的科展研究已多，作者重複前人實驗之餘，提出以保麗龍球來製造阻尼的方法。實驗很努力，有仔細記錄與歸納實驗的結果，建議讀一些流體相關的書籍，對水體與阻尼的形式增加瞭解，對之後實驗設計會有幫助。此外，建築物的高度和水塔高度的最佳配置可以再探討。



# 一、研究動機

台灣位於地震頻繁的區域，著名的台北101以單擺式質量阻尼器來吸收地震的能量。而單擺式質量阻尼器因體積過大，不易裝置在一般大樓上。液體阻尼器優點有成本低廉、維護需求較少且操作容易，若能將供水或消防用的水箱設計成兼具阻尼器的功能，則能使水塔阻尼器普及化。所以我們打算對水塔進行改造與設計，並檢測其效能。

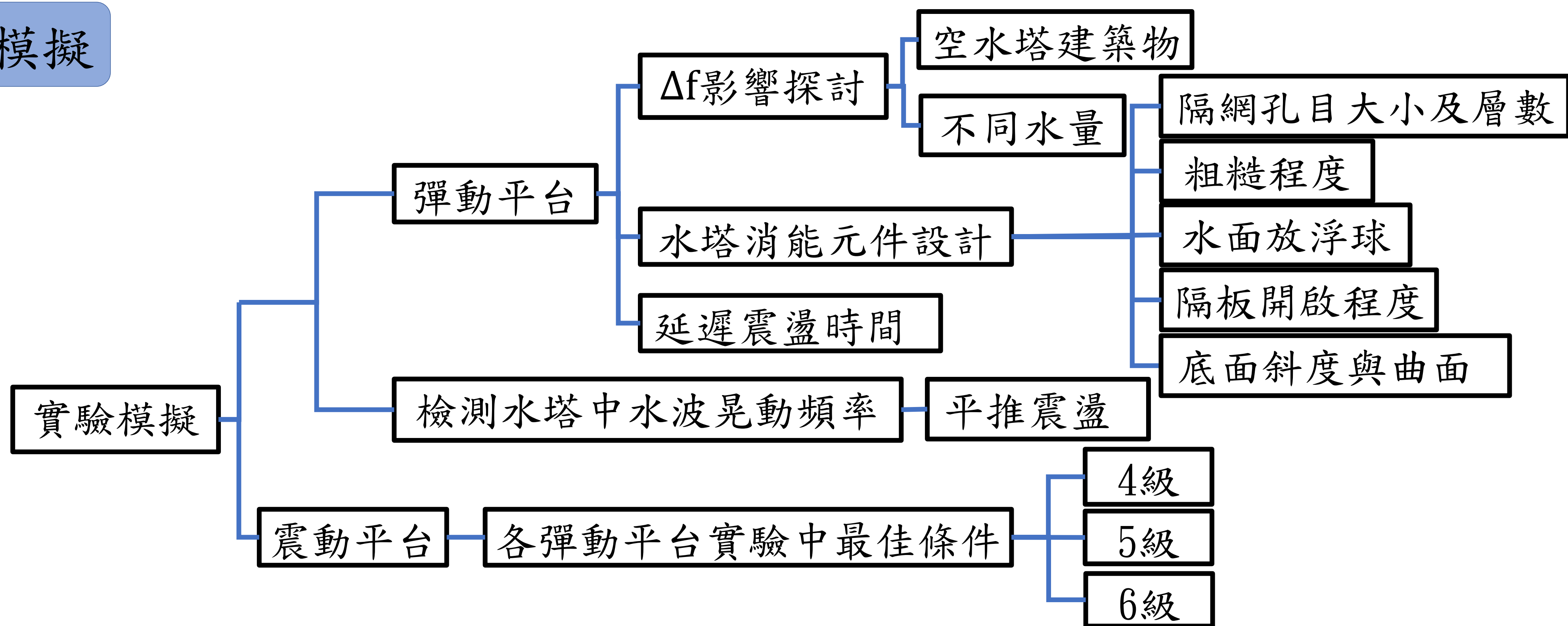
阻尼類別	能量吸收	頻率控制	消能裝置
單擺式質量阻尼器	擺錘	擺長	油壓阻尼器
液體阻尼器	水體	?	?

# 二、研究目的

1. 建置適當高度、質量及結構裝置的測震建築物與水塔。
2. 建構彈射振動平台與可調控振幅及振動頻率的地震模擬平台進行地震模擬與檢測。
3. 探究影響水塔阻尼器減振效果的因素，再以此條件設計水塔阻尼器並分析減振效能。
4. 比較單擺式質量阻尼器和液體阻尼器的優缺點和適用性。

# 三、研究方法

## 實驗模擬

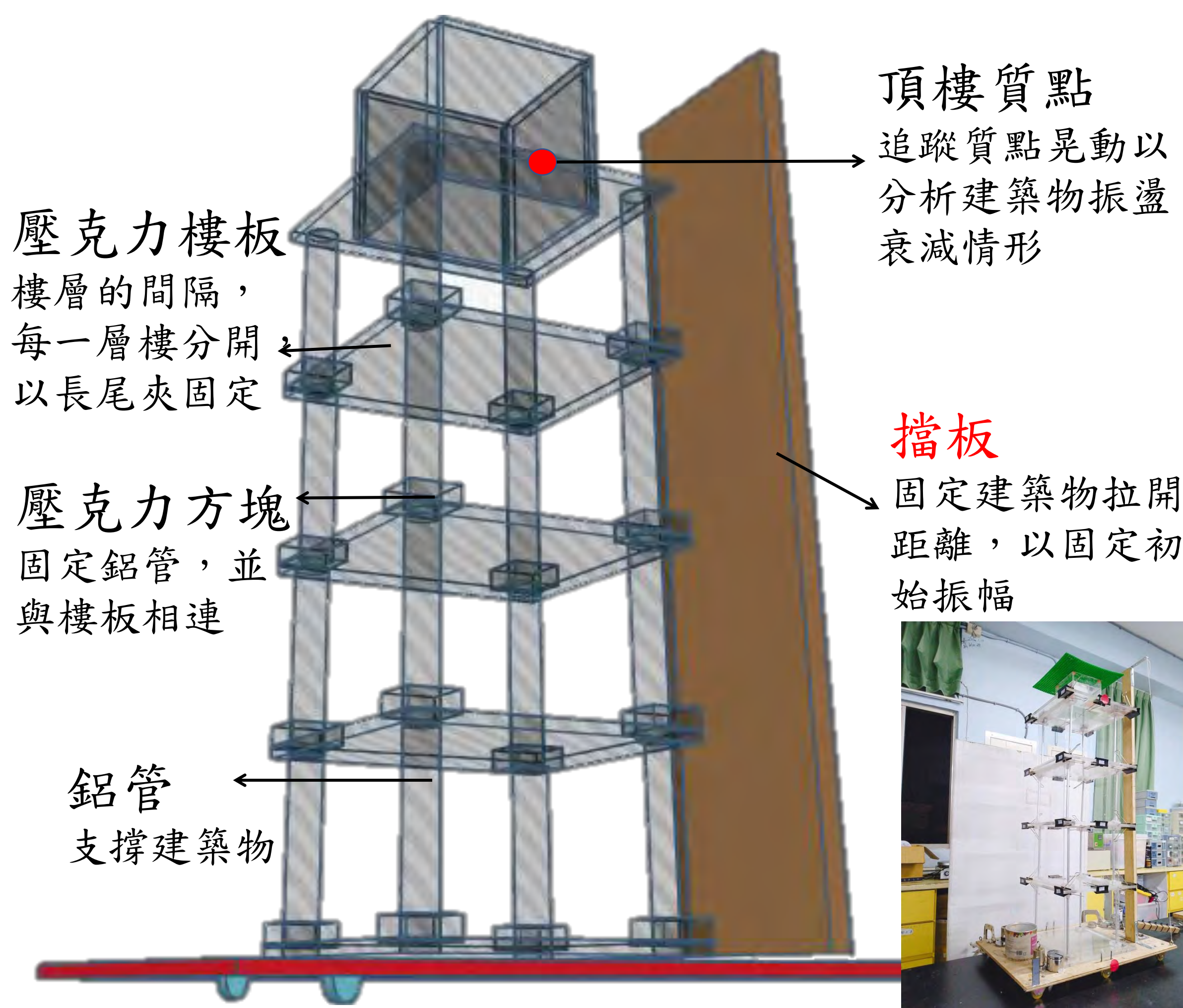


# 四、彈射振動平台設置、分析方法與研究結果

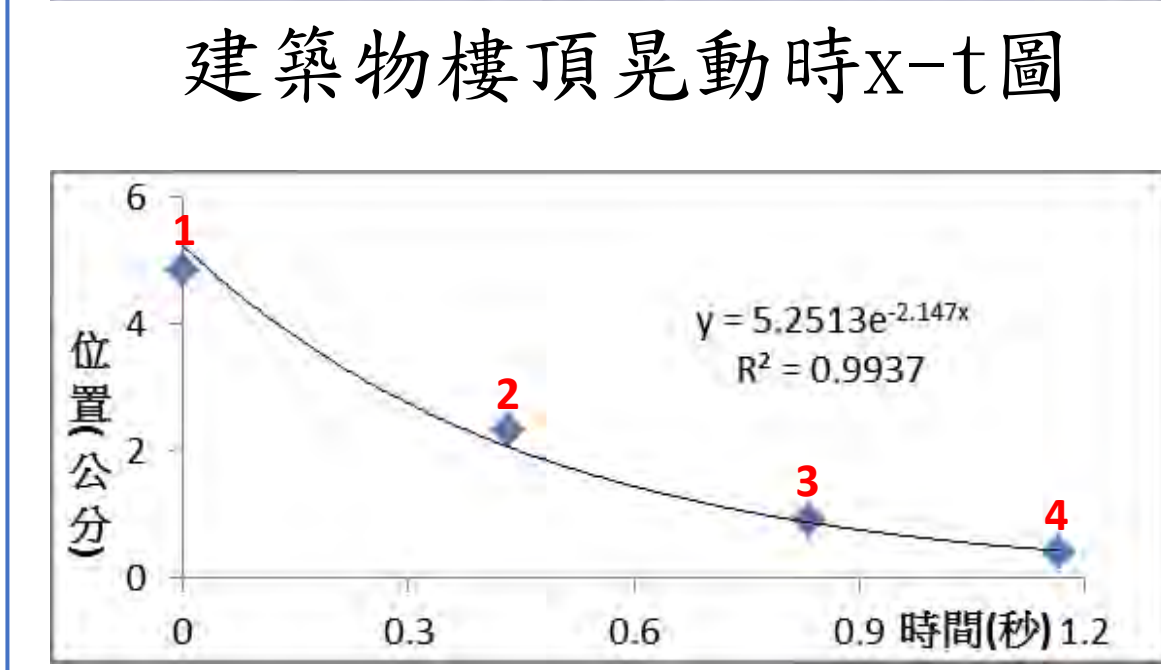
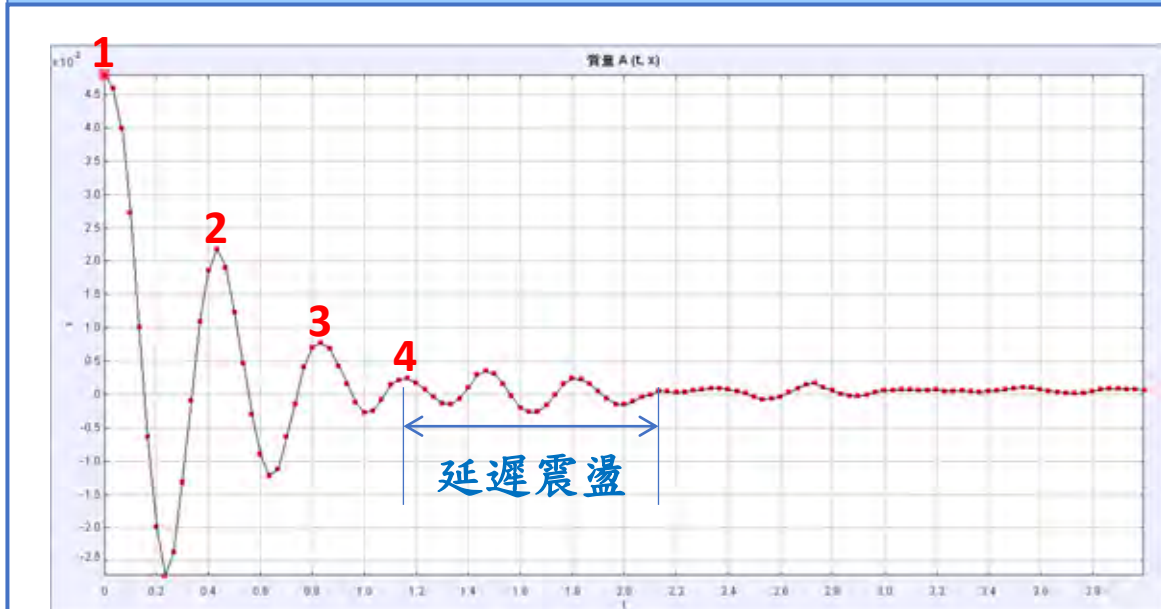
## 彈射振動平台設置

### 實驗步驟

1. 將建物拉至擋板，固定最大振幅 $x_0$ 。釋放並同時錄影。
2. Tracker和Arduino加速度感測器做測量分析。
3. 分析頂樓質點振幅的衰減情形。



### 分析方法

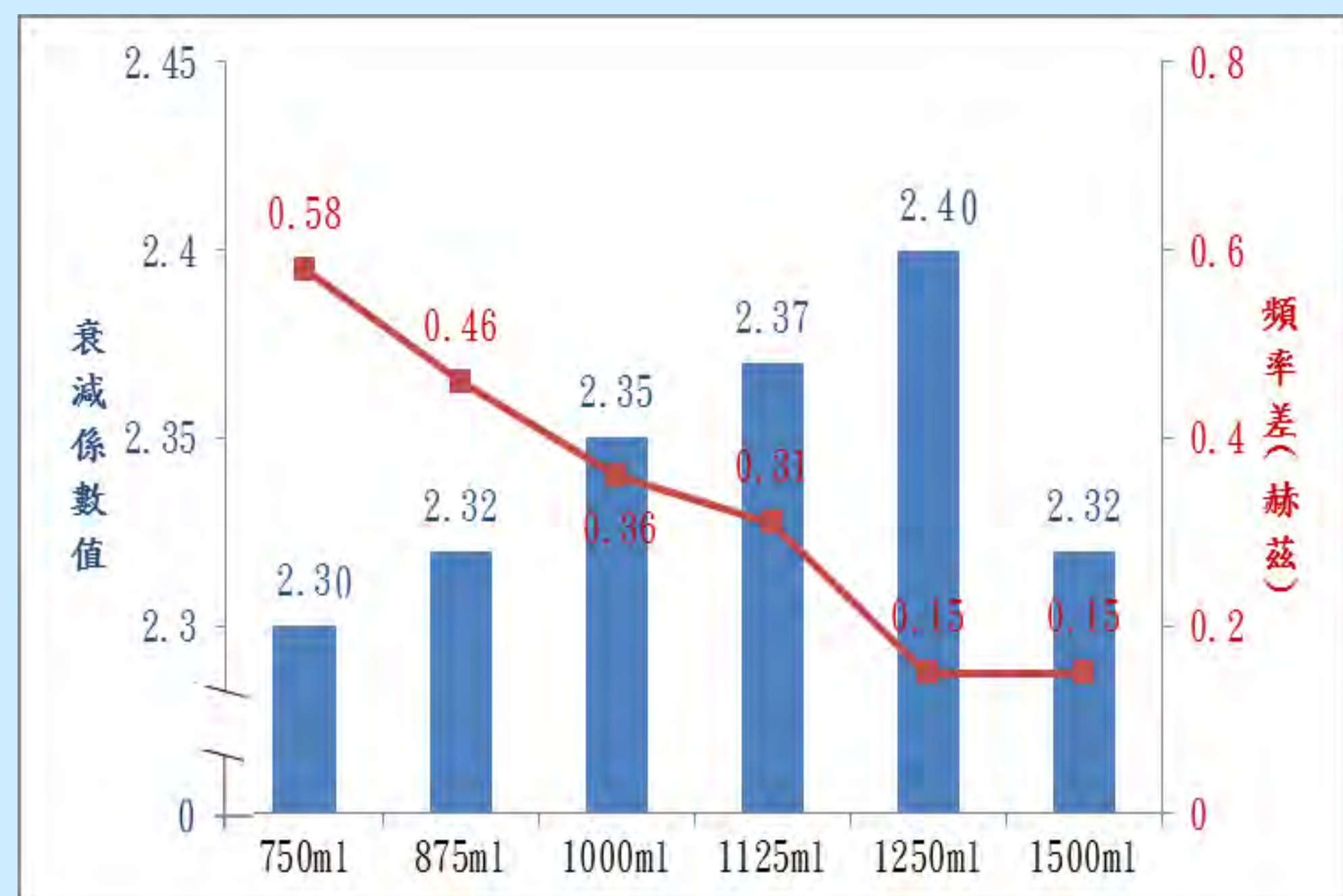
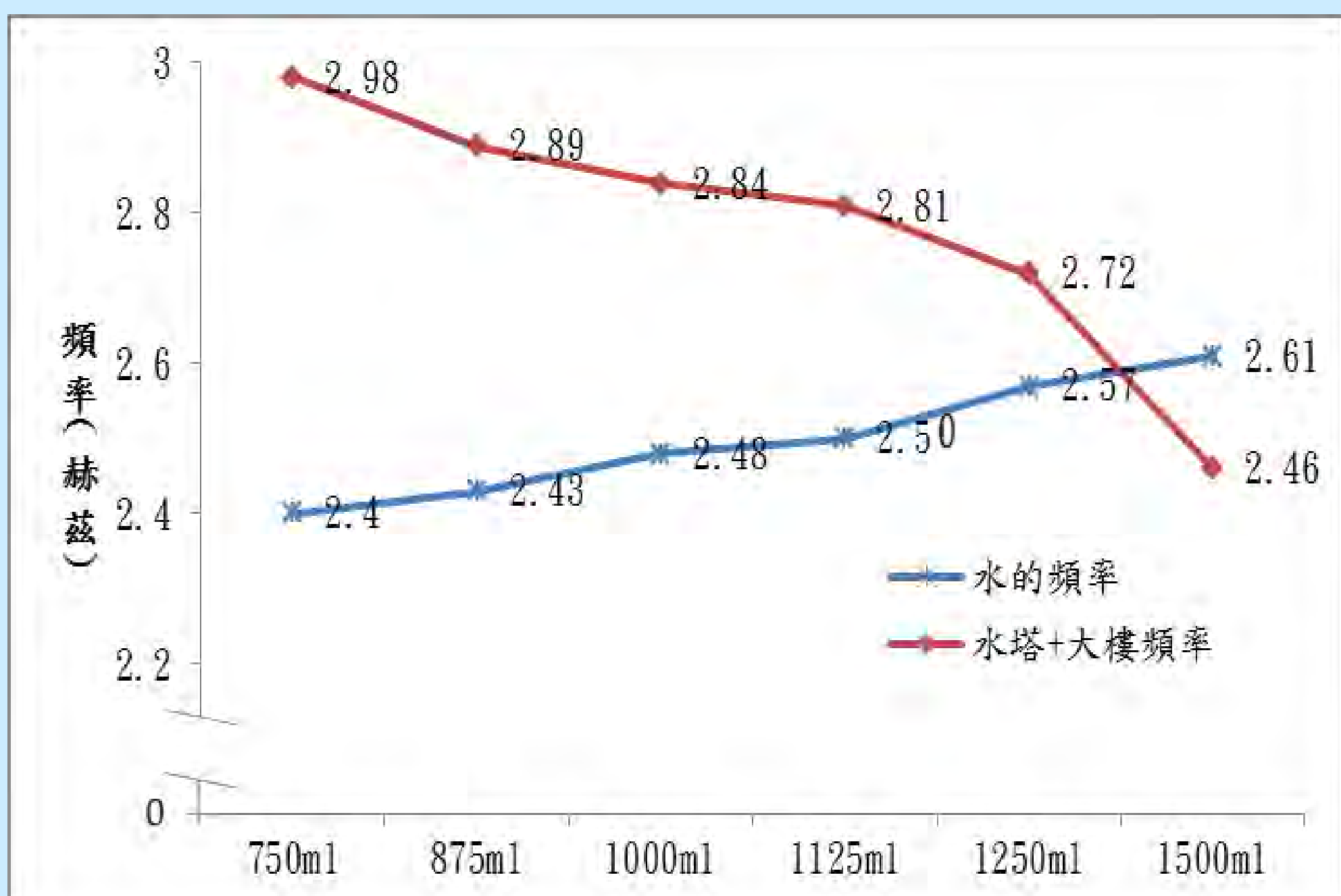


$$x = x_0 e^{-\alpha t}$$

$\alpha$  為衰減係數

## 研究結果

### ◎實驗一 探討不同水量下水體與建築物的頻率差和減振效能的關係



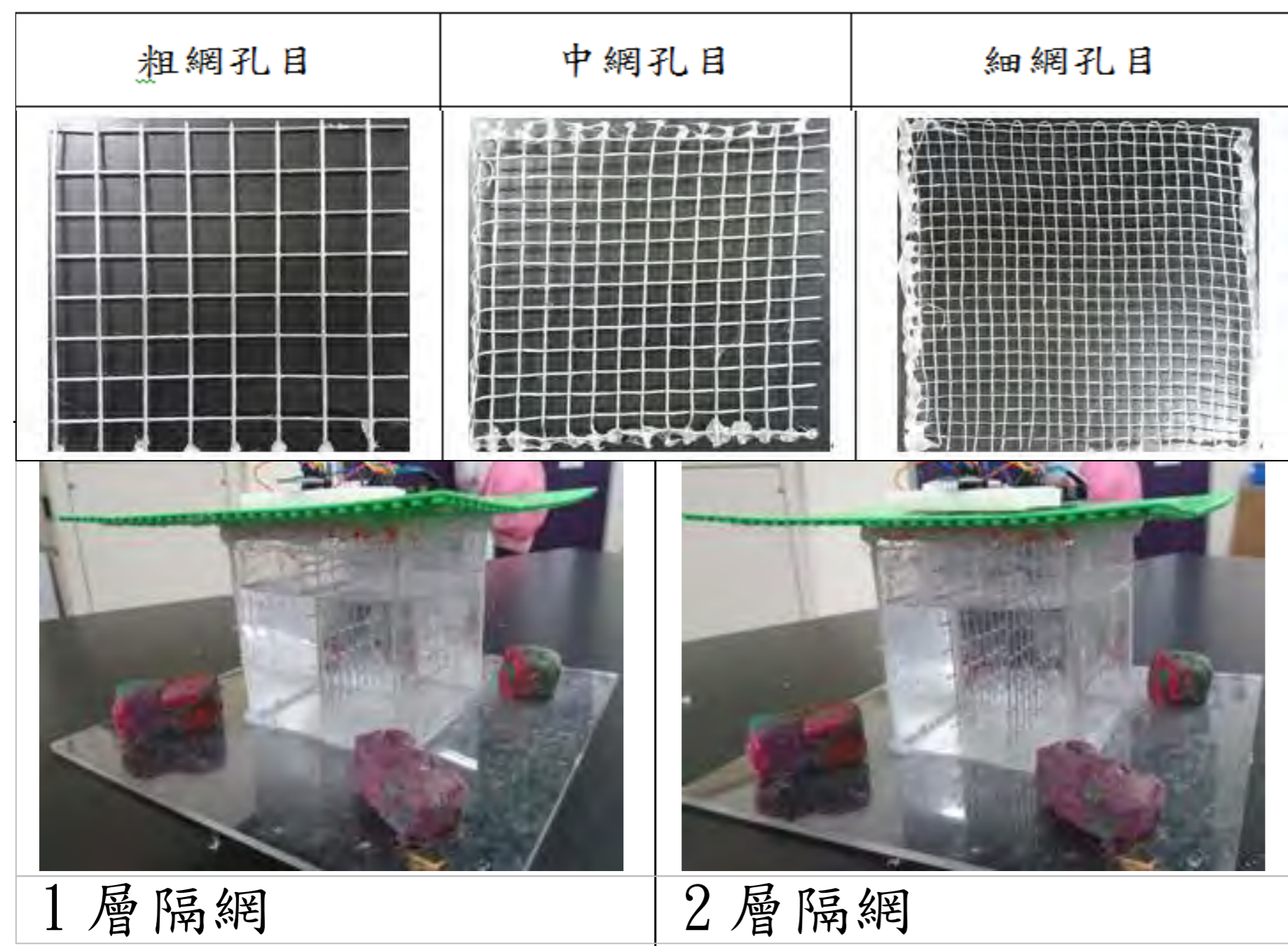
圖一 水量改變對水體與建築物的自然頻率作圖

圖二 不同水量對衰減係數的關係圖

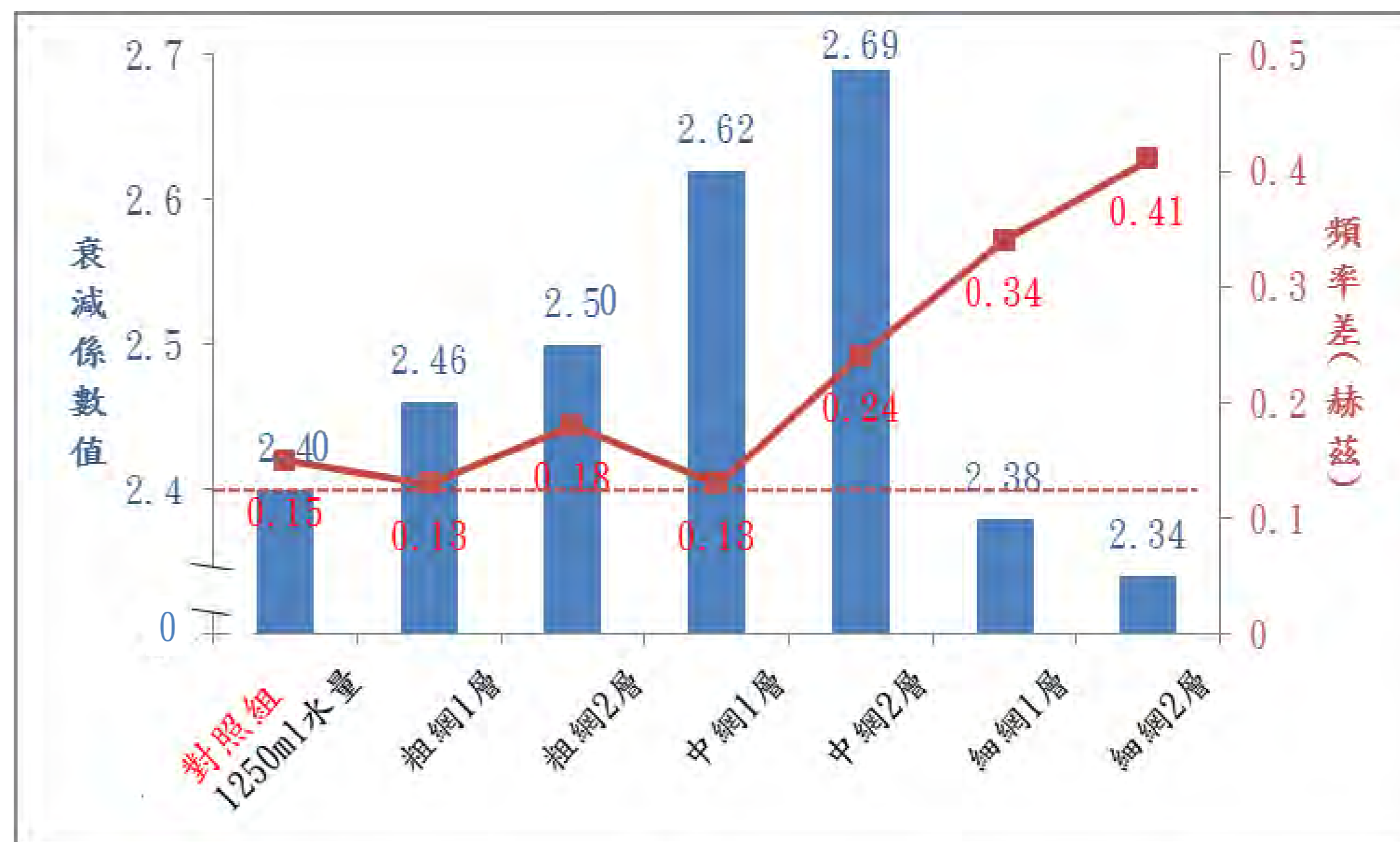
★附圖說明： $\Delta f$ 較小時，水體與建築物產生「共振效應」，使得水體能吸收較多大樓晃動能量，使減振效果提升。



◎實驗二 探討1250ml水量下，水塔內加裝隔網的孔目大小與層數對減振效能的影響



圖三 隔網擺放位置示意圖



圖四 隔網孔目大小及層數改變對衰減係數作圖



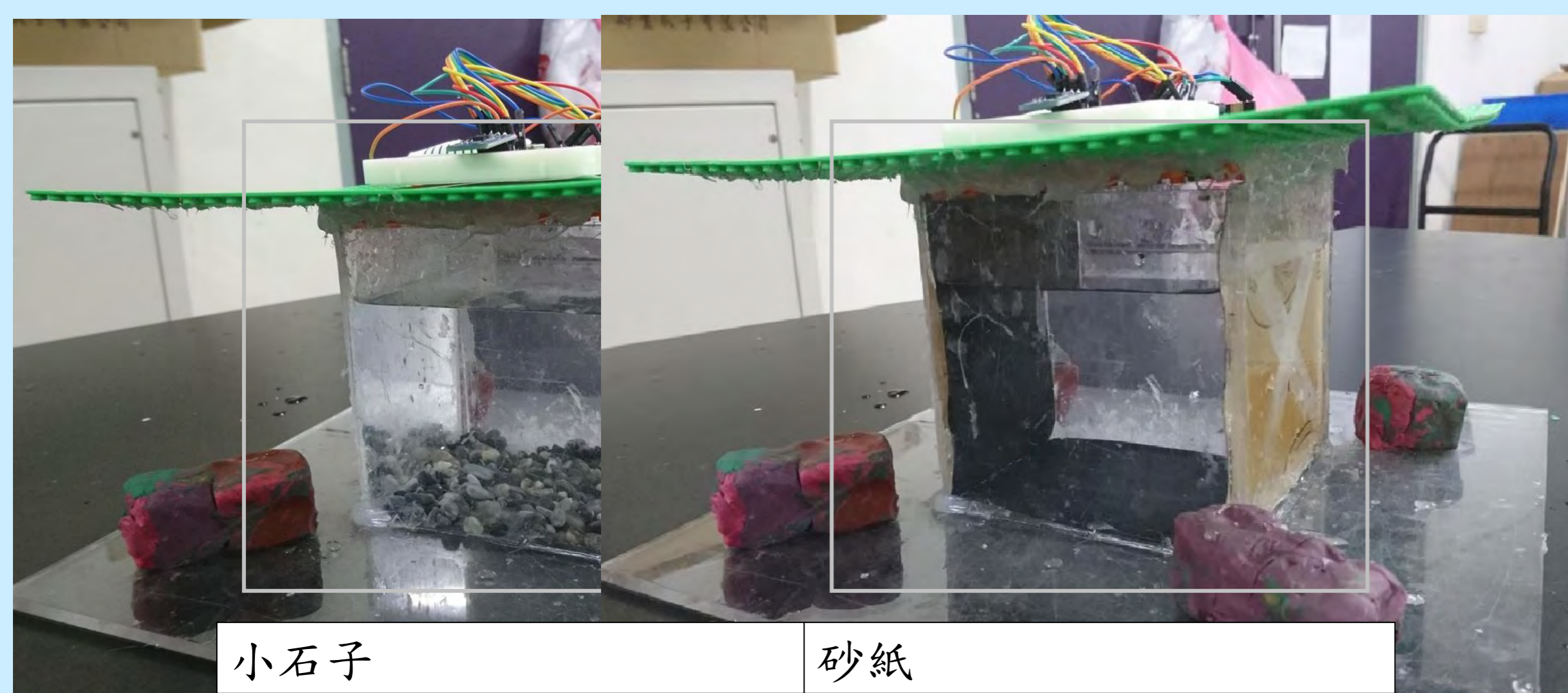
附圖說明:

$\Delta f$  在臨界範圍內(臨界頻率差介於0.24Hz到0.34Hz之間), 隨阻尼增加減振效果越好; 但當 $\Delta f$  超過臨界範圍, 共振效應消失, 即使阻尼較大也無法造成較好的減振效果。

◎實驗三 探討水塔內壁粗糙程度對減振效能的影響

小石子

400CW 砂紙



小石子

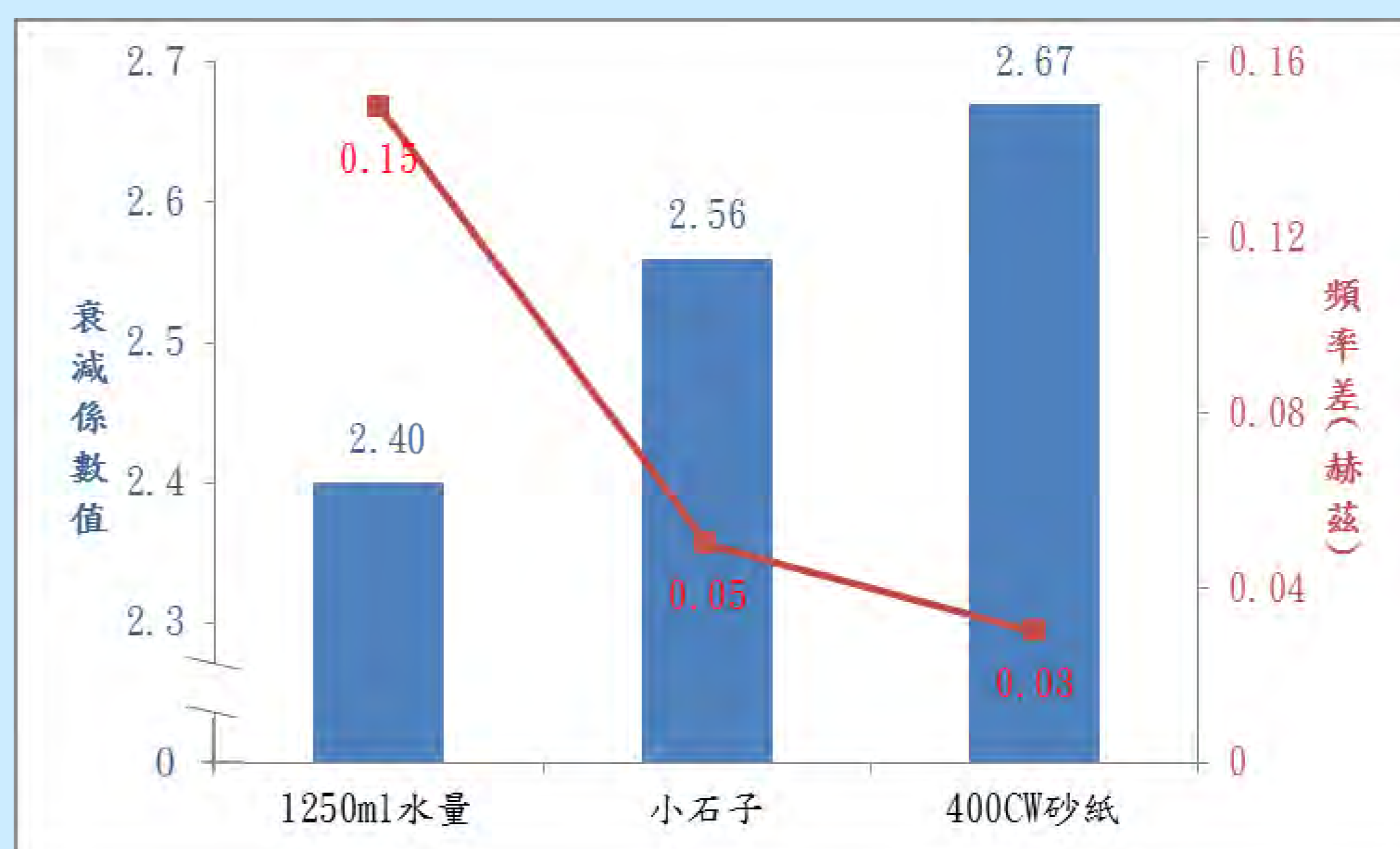
砂紙

圖五 小石子及砂紙擺放位置示意圖



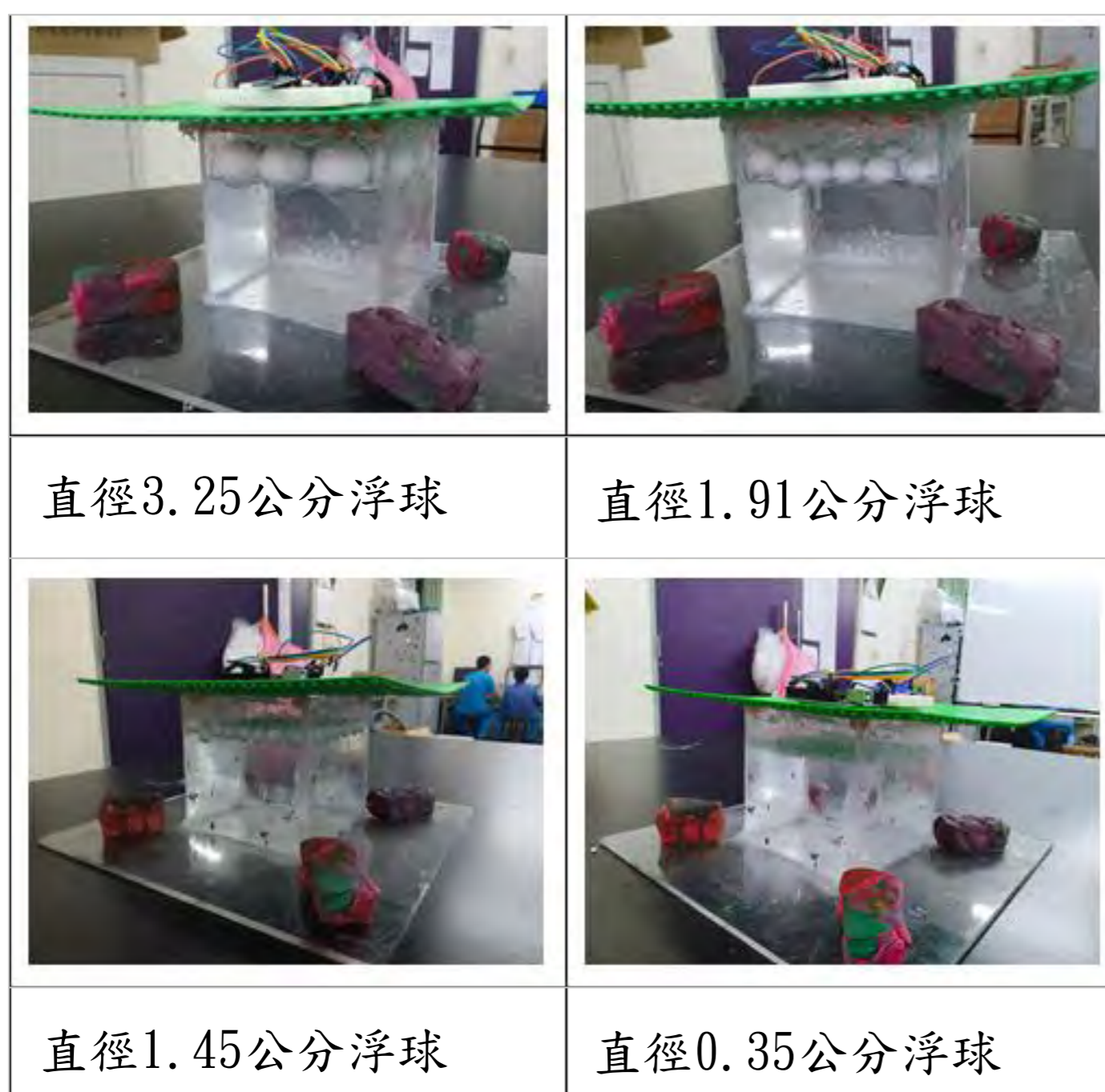
附圖說明:

$\Delta f$  在臨界範圍內, 小石子與砂紙均能造成阻尼效果的提升, 使得減振效果變好。



圖六 1250ml 水量表面粗糙度對衰減係數作圖

◎實驗四 探討水塔表面加不同浮球對減振效能的影響



直徑3.25公分浮球

直徑1.91公分浮球

直徑1.45公分浮球

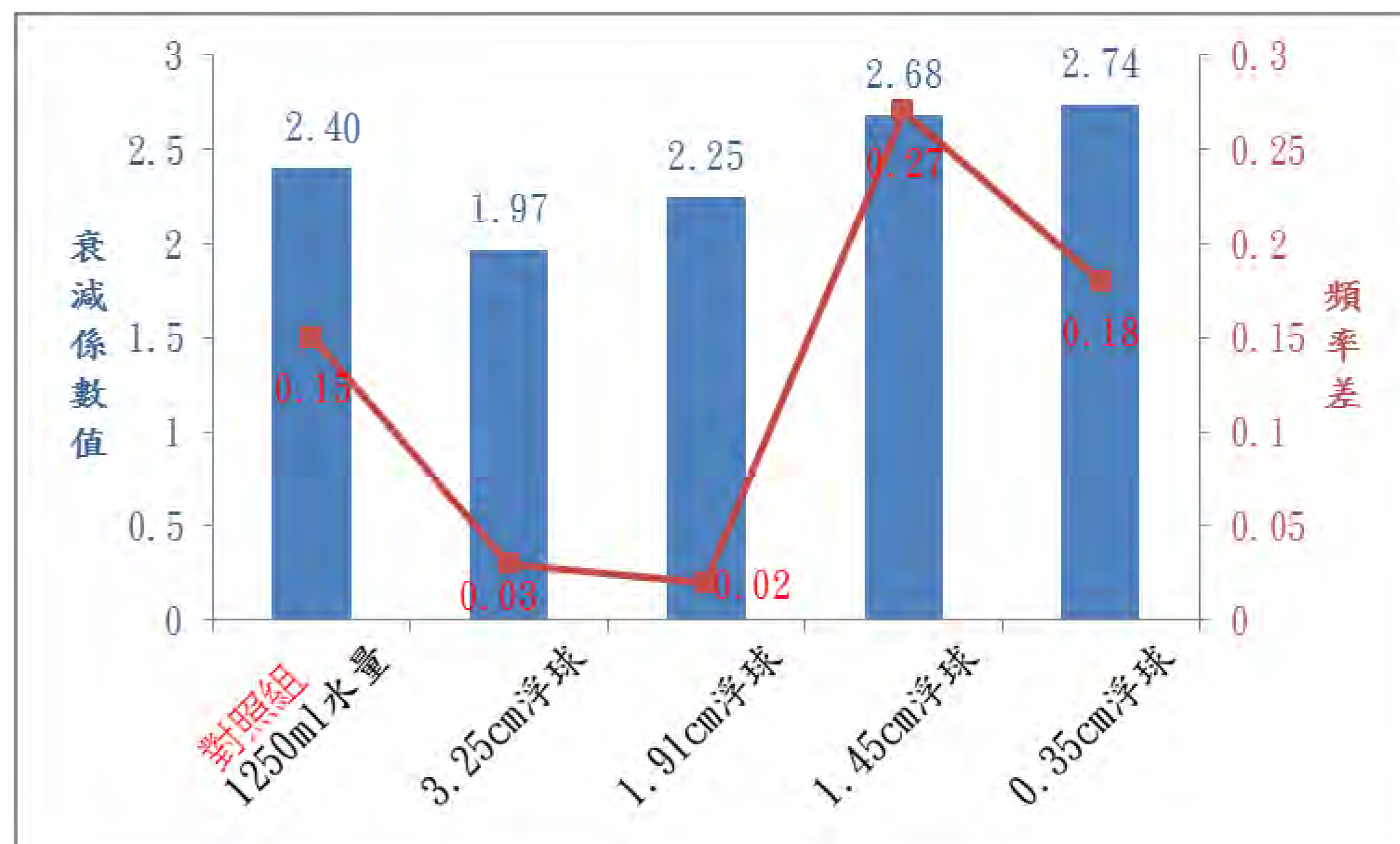
直徑0.35公分浮球

圖七 小石子及砂紙擺放位置示意圖



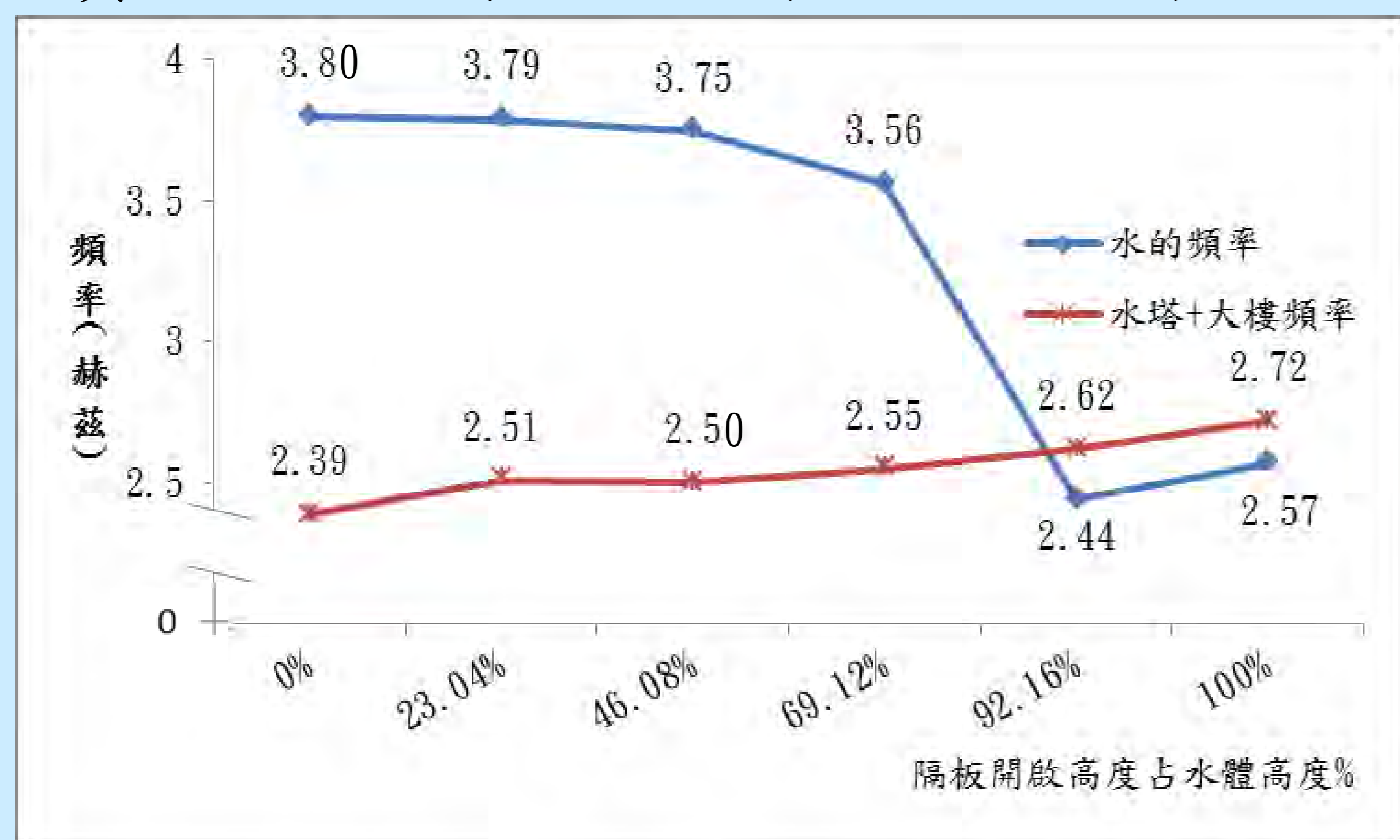
附圖說明:

- $\Delta f$  在臨界範圍內, 直徑小於等於1.45cm的浮球能造成阻尼效果提升, 使得減振效果變好。
- 直徑大於1.45cm的浮球減振效果不佳, 觀察發現浮球會撞擊樓頂板, 可能導致水體晃動頻率與所測時不同, 而不再產生共振效應。



圖八 1250ml 水量無浮球與放入浮球大小對衰減係數作圖

◎實驗五 探討1250ml(水深8.5cm)水量下，水塔加入單隔板開啟狀態對減振效能的影響

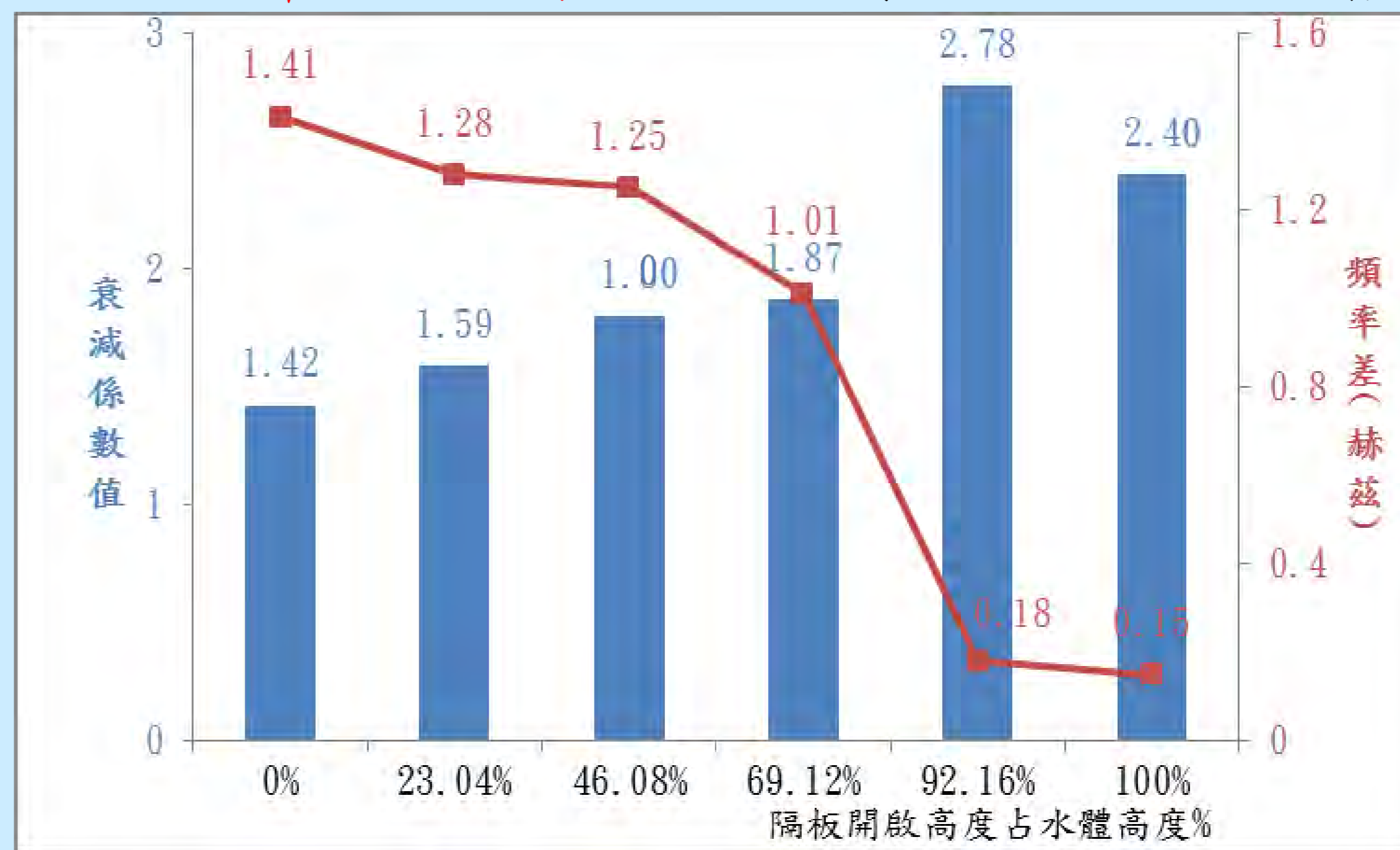


圖九 固定1250ml水量下在不同隔間開啟比例下水體的自然頻率與大樓自然頻率圖



附圖說明:

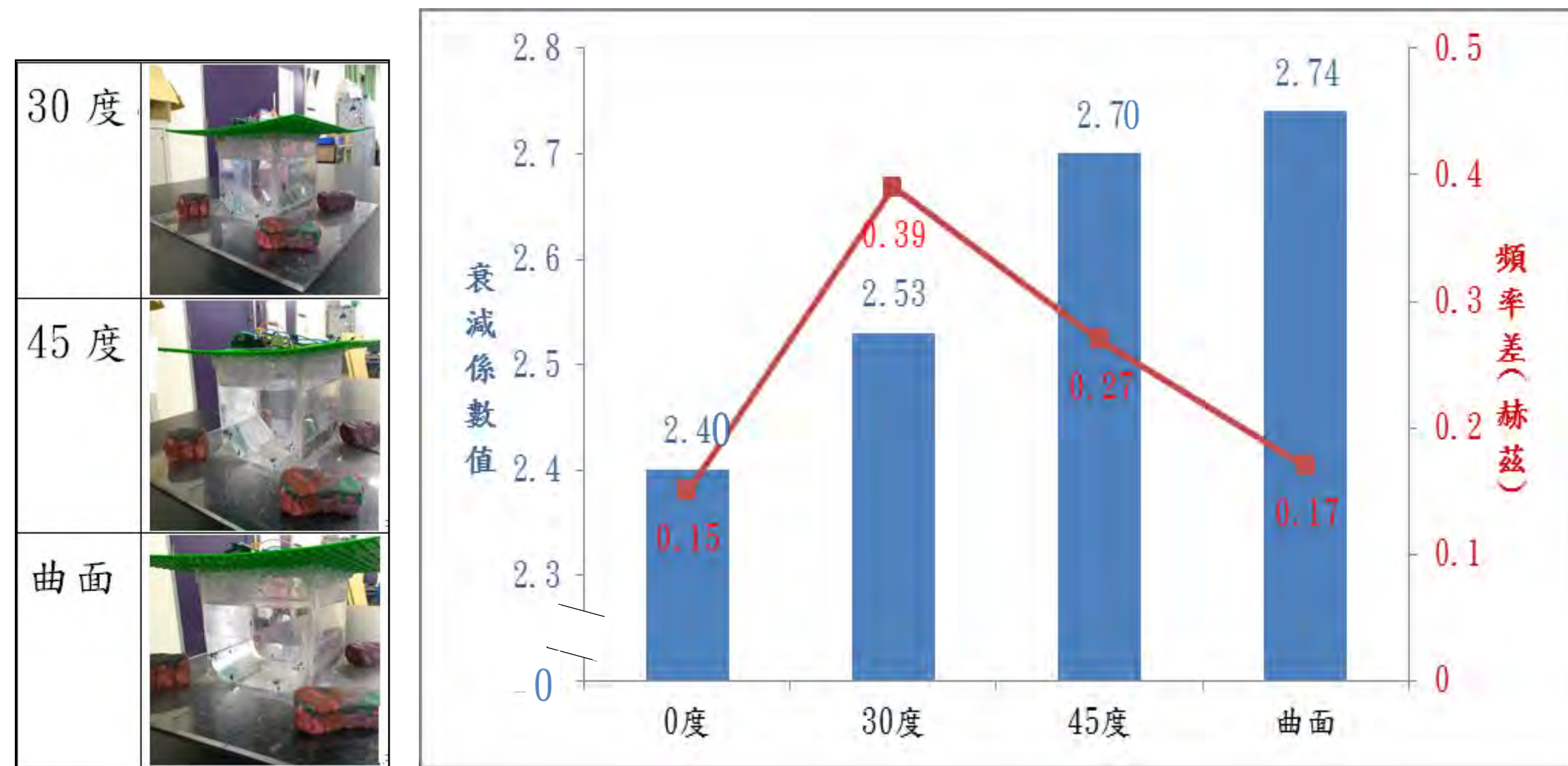
- 開啟狀態增加水體晃動頻率下降。可藉此調整隔板開啟程度進而達到簡易控制水體晃動頻率。
- 隔板由全閉至開8cm, 開啟越大減振效果越好; 開8cm與全開相比,  $\Delta f$  均在臨界範圍內, 而開8cm減震效果較佳, 故推論加入隔板可使阻尼效果提升, 開啟程度越低造成阻尼效果越大。



圖十 固定1250ml水量改變隔板開啟比例下衰減係數圖



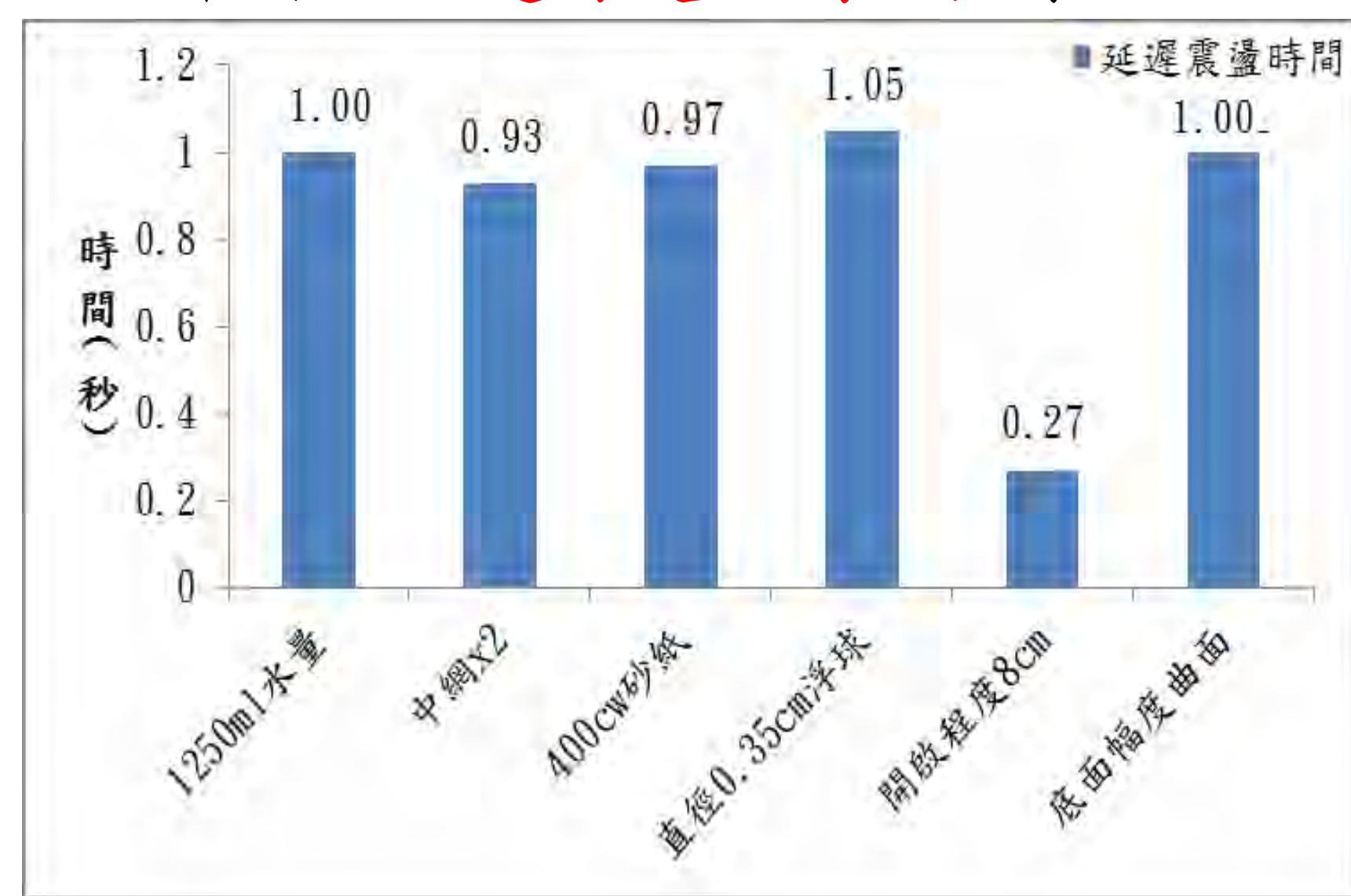
## ◎實驗六 探討水塔底面不同對減振效能的影響



圖十一 不同底面斜度與曲面下衰減係數圖

★附圖說明: 改變底部形狀可造成減振效果提升。

## ◎歸納實驗一到六，不同條件下延遲震盪時間討論



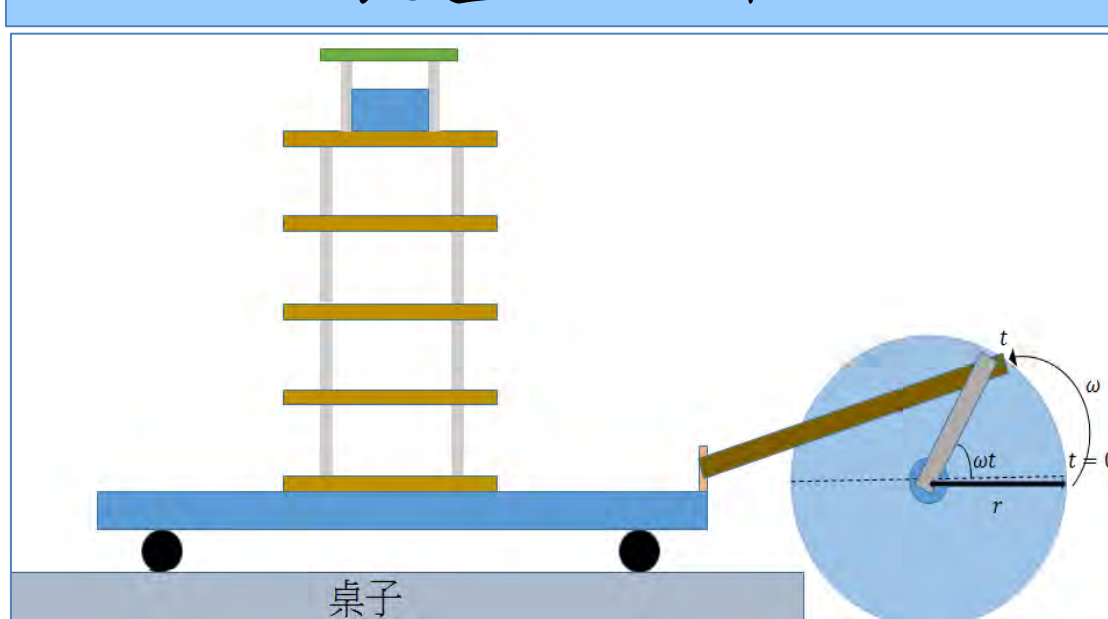
圖十二 不同條件下延遲震盪時間圖

★附圖說明: 隔板開8cm下能有效降低延遲震盪時間，推論是因加入隔板造成受力面積增加，使能量較快被消散而停止晃蕩。

## 四、地震晃動平台設置、分析方法與研究結果

### 地震晃動平台設置

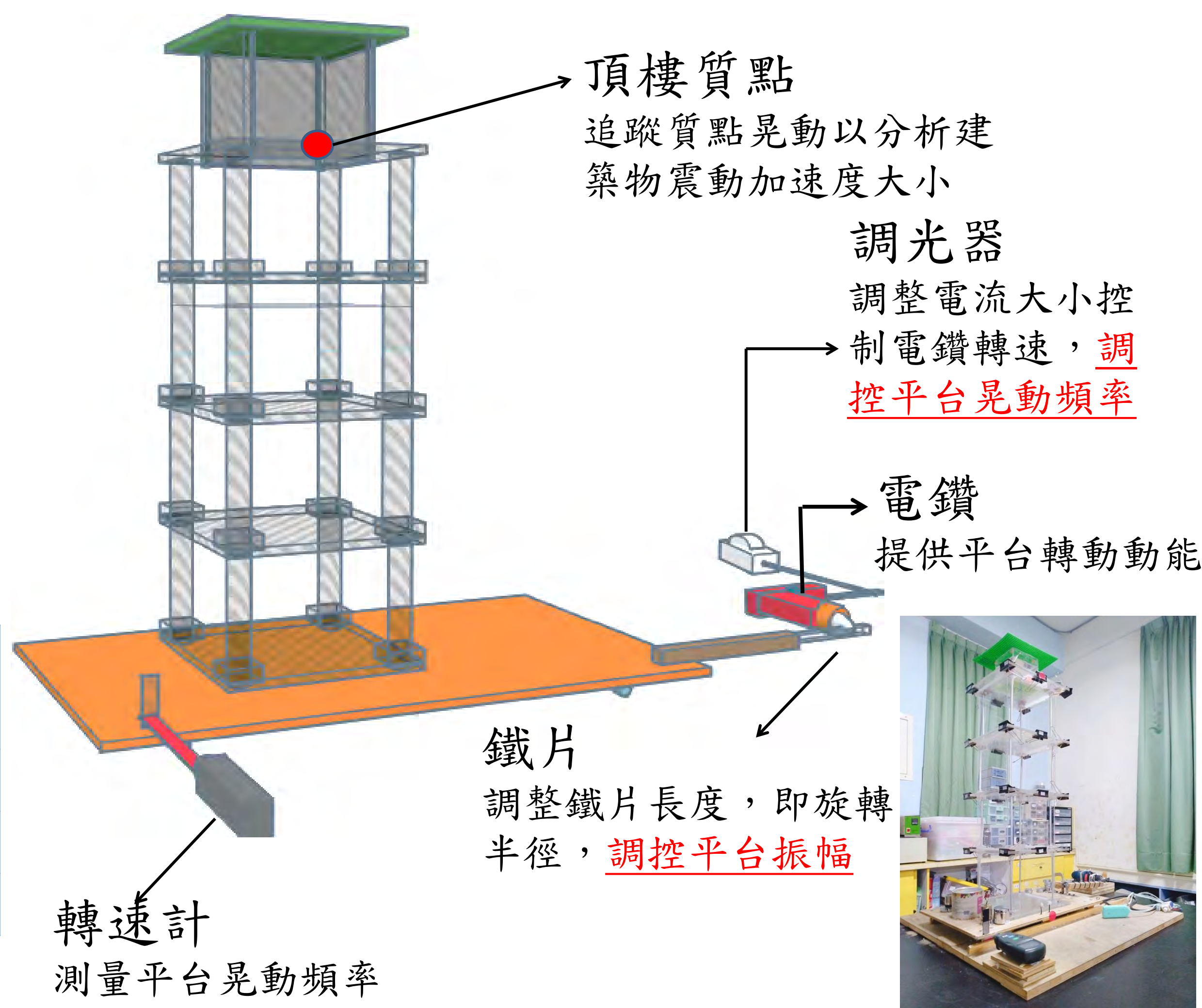
#### 震盪換算



#### 等速率圓周運動公式

$$a = r\omega^2 = 4\pi^2 r f^2$$

	加速度 gal	頻率 rpm
4級	74	35
5級	217	60
6級	255	65



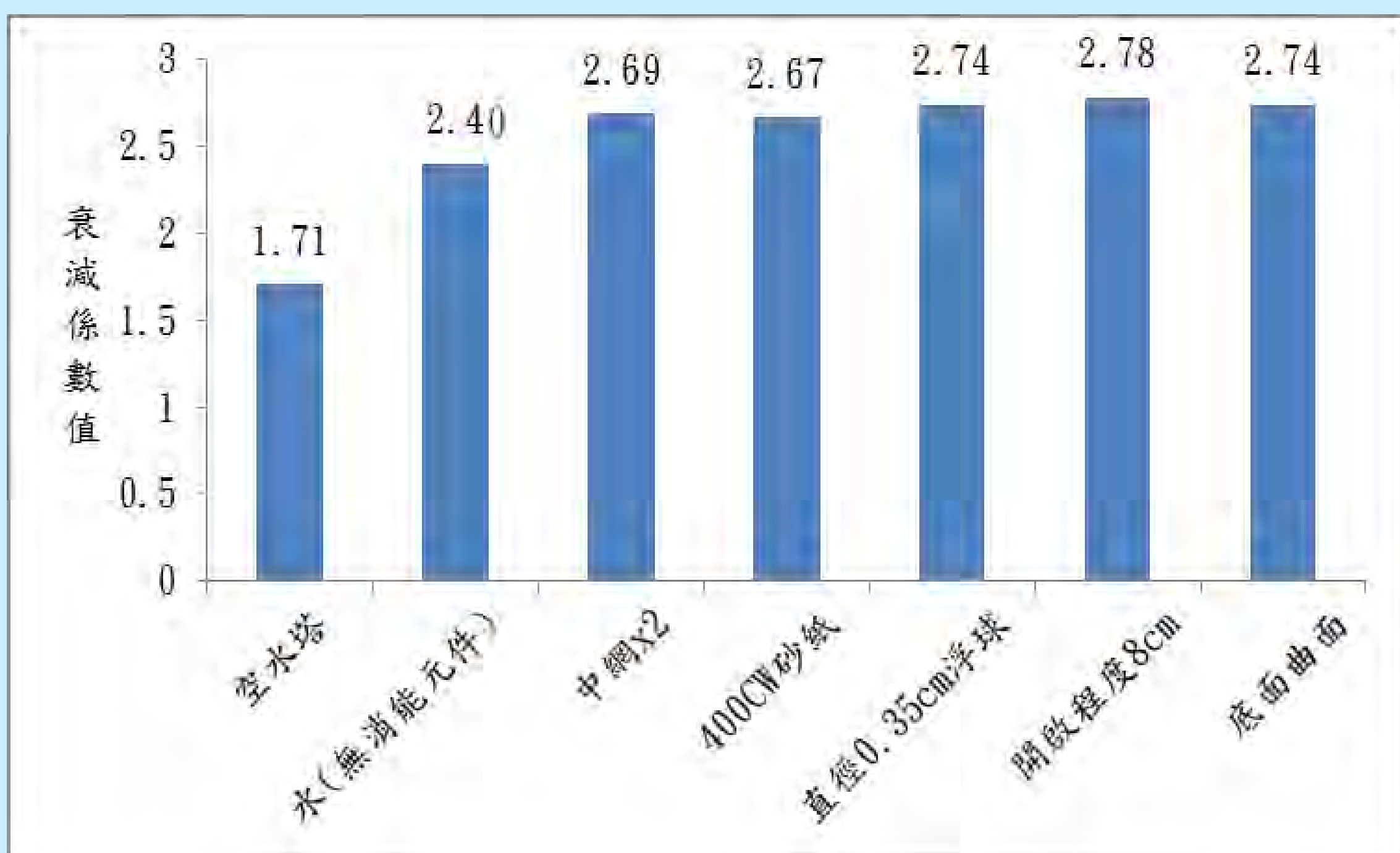
#### 實驗步驟

1. 由調光器調整電流強度，控制平台晃動頻率(轉速計測量)。
2. 以Tracker追蹤頂樓質點運動情形，分析a-t圖並記錄 $a_{max}$ 並與地動加速度 $a_{gnd}$ 做比值，定義為加速度放大率 $\gamma$ 。

$$\gamma = \frac{a_{max}}{a_{gnd}}$$

### 研究結果

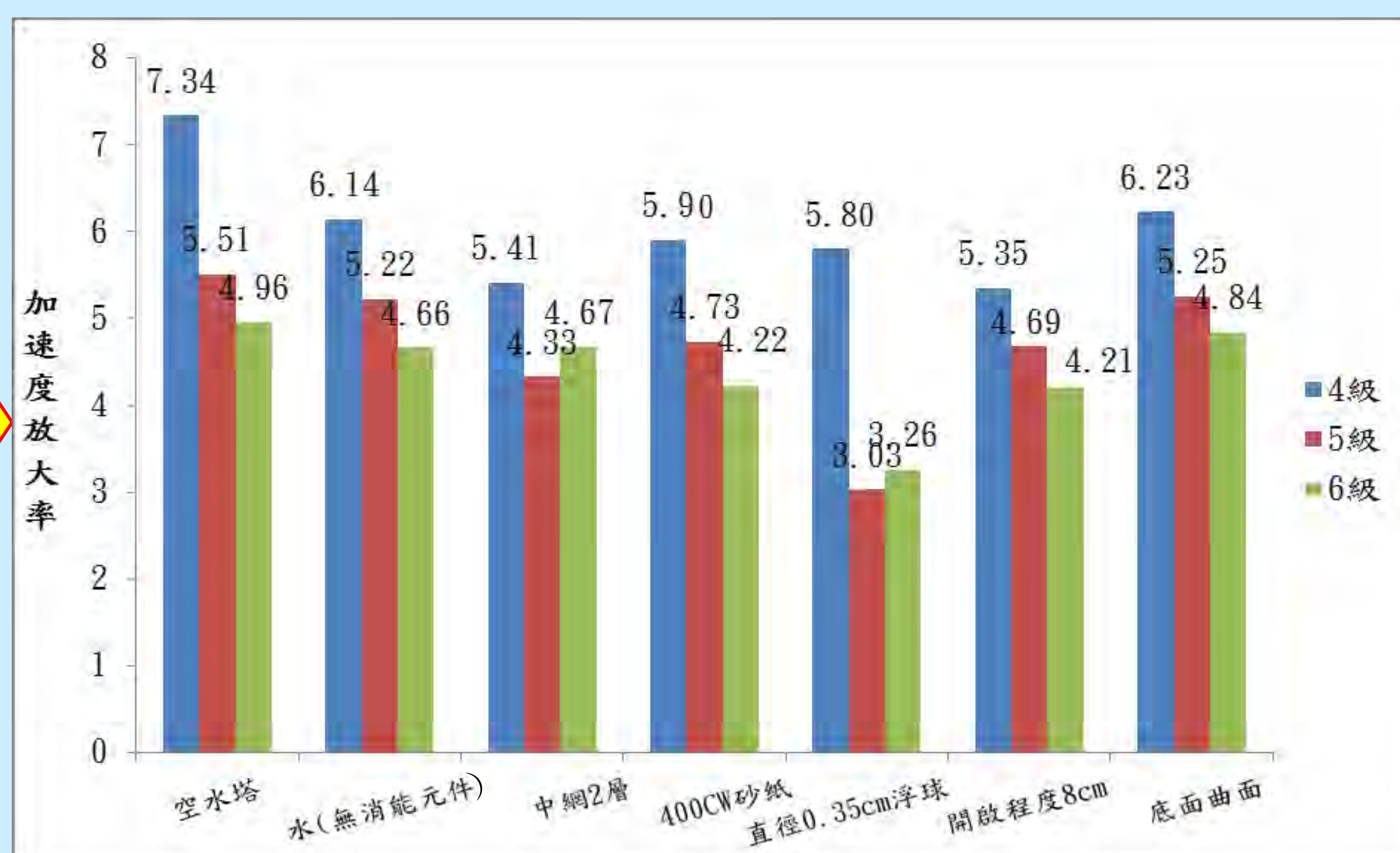
◎綜合先前實驗，比較各實驗減振效能較佳之實驗組，分別在自製地震晃動平台上模擬4、5、6級震度，以進行減振效能檢測與分析。



圖十一 各彈動平台實驗中減振效能較佳之實驗組衰減係數比較圖

★附圖說明:

改變震度(調頻)下，發現衰減係數大與加速度放大率小可表示減振效能較好。空水塔減振最差、1250ml水量次之，其它加裝消能元件的水塔皆有較好的減振效能與彈射震盪實驗結果相近。



圖十二 不同條件下以晃動平台模擬4、5、6級震度頂樓加速度放大率

## 五、結論

- 一、當水體與建物頻率接近時，會產生共振效應，使水體有效吸收大樓晃動的能量，故我們推論 $\Delta f$ 在臨界範圍(本實驗中測得之臨界頻率差約為0.27Hz)內有一最佳阻尼範圍。
- 二、加入消能元件(如隔網、浮球或砂紙)，能提升阻尼，若共振效應不被破壞(頻率差在一定範圍內)則可有效消散能量，使減振效能有所提升。
- 三、加入隔板，開啟程度由全閉漸漸開啟至8cm，水體自然晃動頻率漸小，造成 $\Delta f$ 變小，當 $\Delta f$ 落在臨界範圍內，產生與建物的共振效應，能有效吸收大樓晃動能量。在開度8cm的條件下，水體能因連通管原理晃動較順暢，同時晃動過程中能增加阻尼效果，使減振效能提升。
- 四、改變水體底部形狀為斜面或曲面，水體晃動幅度較大，能有效吸收建築物的能量，減少建築物的震盪強度。
- 五、我們觀察到水塔阻尼器會有延遲震盪的情況，加入隔板在開度8cm的條件下，受力面積變大，使延遲震盪能量較快被消散，使震盪時間有效縮短。
- 六、根據彈動平台所得到的結論，再以震動平台模擬四、五、六級震度進行測試，其結果相符合。
- 七、單擺式質量阻尼器單擺頻率穩定，且減振效能較佳，但費用昂貴、體積較大。水塔阻尼器有成本低廉、維護需求少、操作容易;但有延遲震盪的現象，且阻尼效果較質量阻尼器弱，但仍有效提升建築物的抗震效果。