

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 地球科學科

第二名

030508

地動山不搖—隔震裝置在建築物之應用與探究

學校名稱：新北市立安溪國民中學

作者： 國二 劉芊妤 國二 歐東霖 國二 吳奕廷	指導老師： 解宗翰 劉明元
---	-----------------------------

關鍵詞：自製擺盪式隔震裝置、

自製省力曲柄晃動平台、阻尼消能元件

摘要

本篇研究隔震裝置及搭配不同消能元件之探討。實驗得知，安裝隔震裝置可有效隔震；單層隔震裝置擺動方向與地震力方向相同有較佳隔震效果，角度加大隔震效果變差，也許可透過疊三層，各層夾 120 度之擺放模式解決地震力方向問題。建物高寬比大晃動明顯，蓋建物應考量隔震器承載重量與建物擺動力矩的極限；不同擺長隔震裝置有不同自然頻率；組合擺之自然頻率較單長擺低，且最大加速度較低但頻寬較寬；隔震裝置並非越多層越好，多層可能造成重心偏高晃動加劇；隔震層於底部隔震效果最佳；以隔震為基礎加裝阻尼消能發現，在適當的阻尼下，系統可兼顧隔震與消能，有效降低大樓晃動，若阻尼過大則導致隔震功能喪失，能量大幅傳入建物造成擺動加劇。

壹、研究動機

臺灣位於環太平洋地震帶上，時不時發生有感地震並發布國家災害警報簡訊。近 5 年較大的地震有 2018 年發生的花蓮地震與 2016 年的美濃地震，分別造成 17 人與 177 人不幸罹難。從網路及報章雜誌報導得知，台灣史上最嚴重的地震發生於 1999 年震央於台灣南投的集集大地震（如圖 1 所示），芮氏規模高達 7.3，造成 2415 人死亡，29 人失蹤與 11305 人輕重傷，51711 間房屋倒塌，53768 間房屋損毀。地震災害是居住在台灣島上的我們所要面臨的一大難題。



圖 1 921 集集地震震後之慘況

在國中八年級理化第三章波動與聲音，老師曾提及共振效應的許多例子，當中包含台北 101 的單擺式調諧質量阻尼器，它透過共振原理與牛頓第一定律造成的反向擺動來吸收台北 101 的震動能量，削弱地震力造成的晃動，可使台北 101 大樓於強風及地震來臨之情況下，較為平穩且晃動較小，深深吸引了我們對制震阻尼器的好奇。查詢全國科展文獻後發現，近五年與阻尼器相關的研究主題，都以單擺式質量阻尼器與水塔阻尼器為主，由於阻尼器相關的研究主題太多，讓我們一時想不到研究可從哪些方向切入。偶然在 Youtube 新聞影片看到豪宅陶珠隱園的隔震裝置(圖 2)的相關報導，其採用以柔克剛的方式將地震能量阻絕於大樓外而降低大樓晃動，查詢文獻並與老師討論後得知，隔震墊的設計應考量以下兩點特性：(1) 可長期穩定支撐載重的能力(2) 可追隨與地層之間的預估相對變位，且大變形能力與復位能力。

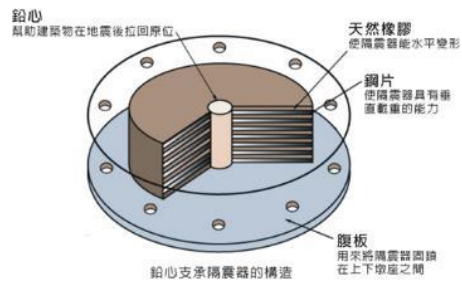


圖 2 鉛心積層橡膠墊



圖 3 自製擺盪式隔震裝置

因考量到鉛心積層橡膠墊中的橡膠是專利產品，於實驗室無法自行製造，且設計隔震裝置須考量到長期穩定支撐載重的能力與能有較大的形變與復位能力，於是我們透過木板與培林的組合，自行開發了一套自製擺盪式隔震裝置(圖 3)，並搭配類似台北 101 單擺調諧質量組尼器上的消能元件，以進行一系列的實驗探究。

希望透過本研究，開發出有效之隔震裝置，降低建物損壞程度，以確保財產與身命安全，延長建物之使用年限，達到提升安全且舒適的居住環境。

貳、研究目的

1. 探討有無隔震作用的情況下，於不同地震頻率(震度)下之晃動情形
2. 探討隔震裝置於不同地震方向、建築物高寬比、不同擺臂長短與組合、安置於不同樓層等情況下，對隔震效果的影響
3. 探討隔震裝置加裝不同阻尼消能元件，對建物隔震效果的影響
4. 探討隔震裝置加裝電磁式消能元件，對建物隔震效果的影響

參、研究設備及器材

1. Tinkercad、Phyphox、Excel、Tracker
2. 實驗材料

器材		耗材	
筆電	線鋸機	木板	熱熔膠條
手機腳架	延長線	螺絲、螺母	培林
手機	線性滑軌	梅花角鐵	
轉速計	直流馬達		
鐵尺	轉速調整器		
鑽孔機	電源供應器 (AC 110 轉 DC 24V)		

表 1 實驗材料

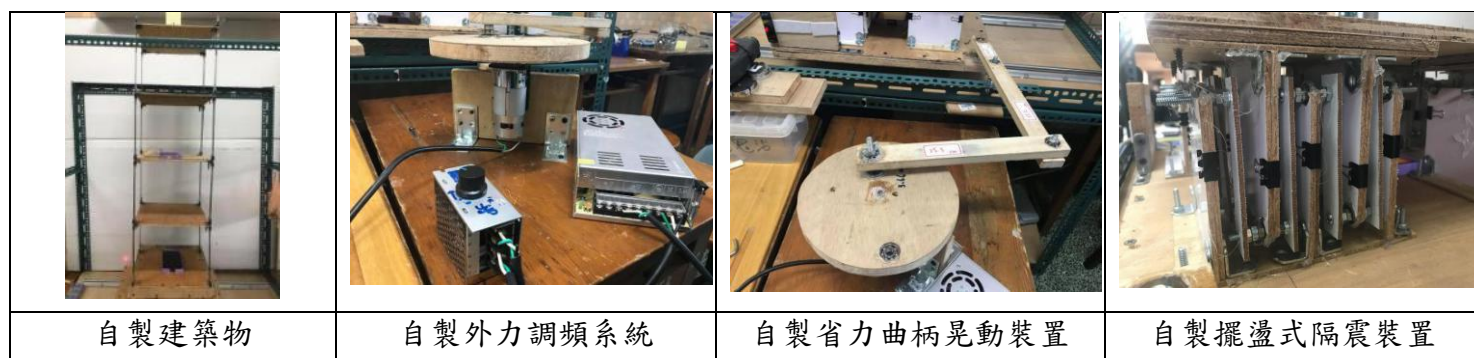
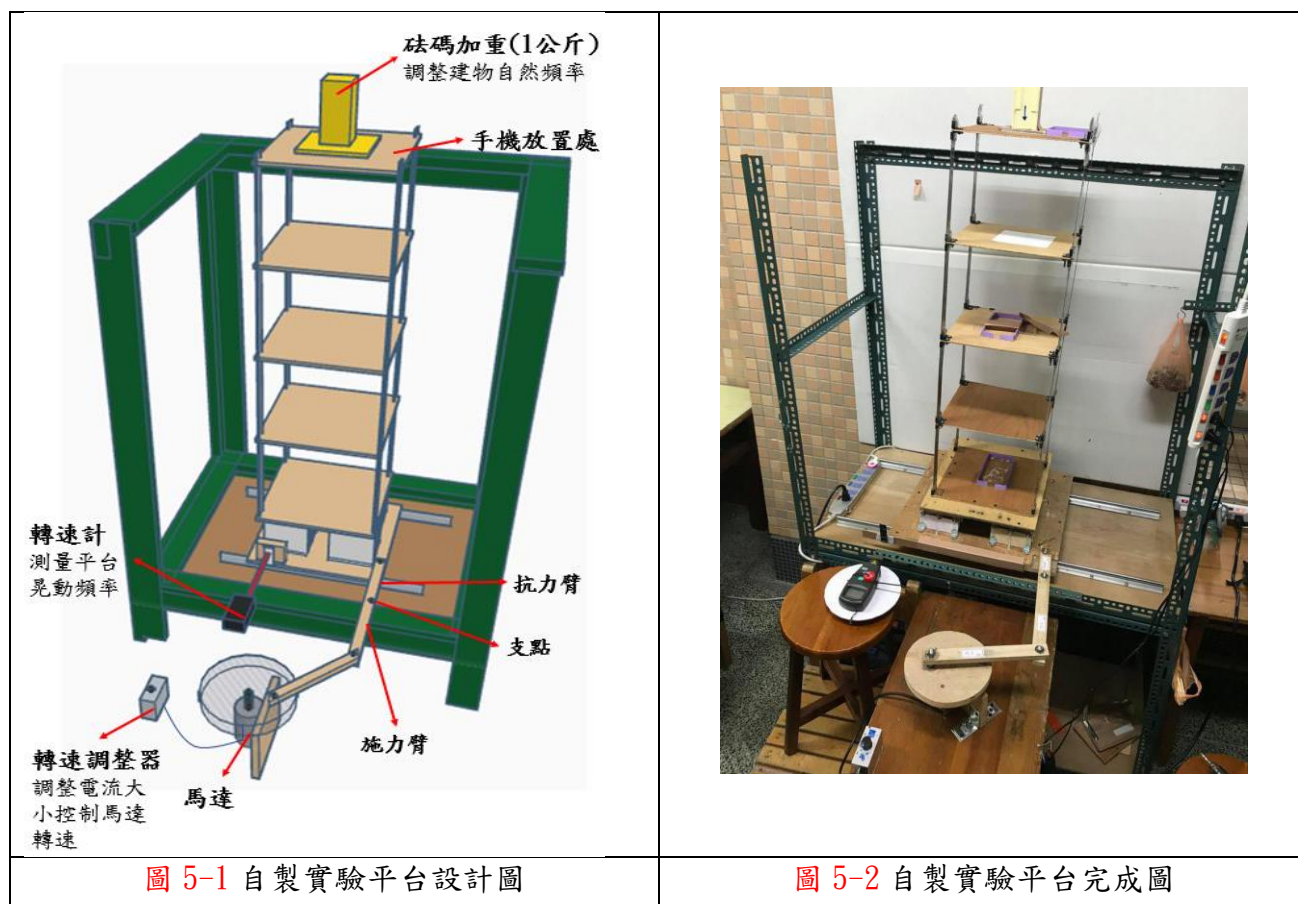
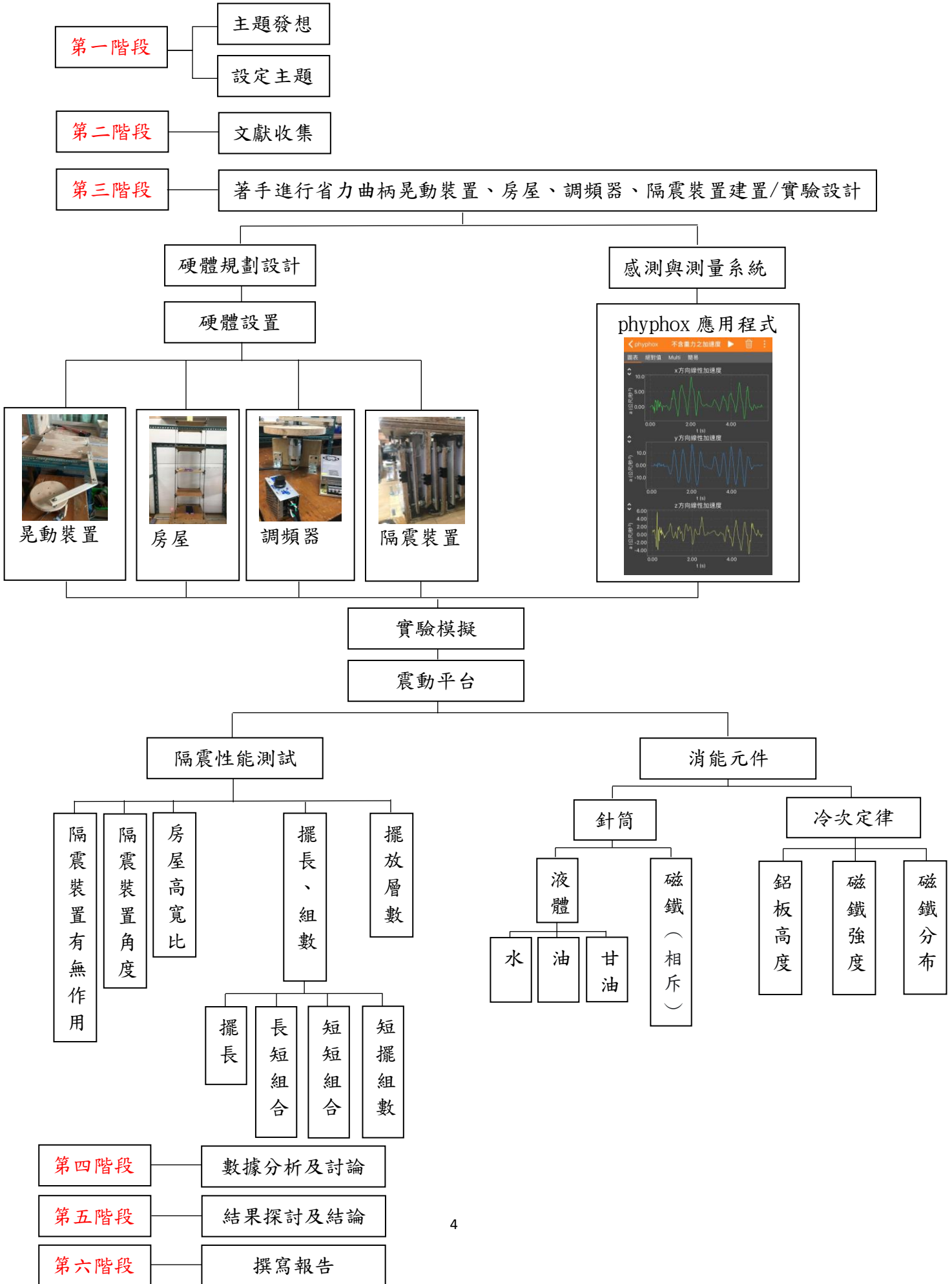


圖 4 本實驗所設計之重點器材



肆、研究過程與方法



實驗器材設計概念及裝置示意圖

1. 自製建築物

第一代建築物(直尺木板建築)

我們以 5 個邊長 30cm×30cm 的薄木板與 4 支長 100cm 的鐵尺組合連結製作出四層高的建築物。直尺薄木板建築物完成圖如圖 6-1。

第二代建築物(壓克力鋁管建築)

首先以厚 5mm 邊長 30cm×30cm 的 4 塊的壓克力板與直徑 10mm 長 20cm 鋁管組合連結製作出四層高的建築物。壓克力建築物完成圖如圖 6-2。

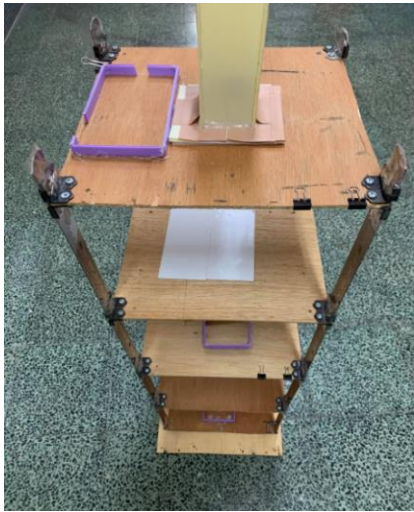


圖 6-1 鐵尺木板建築物



圖 6-2 壓克力鋁管建築物

2. 自製擺盪式隔震裝置

以邊長 12cm×16.5cm 的 2 塊的薄木板與 10cm×1cm 的 10 塊的薄木板與培林組合連結製作出隔震裝置。擺盪式隔震裝置製作設計圖(圖 7-1)與製作流程圖(圖 7-3)而自製擺盪式隔震裝置完成圖如圖 7-2 所示。

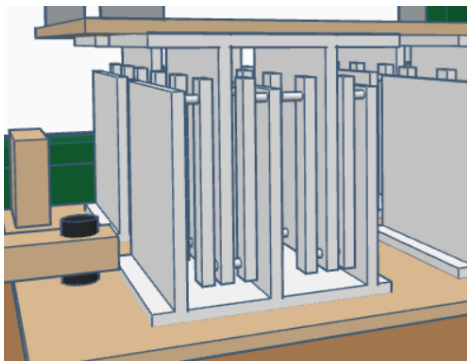


圖 7-1 隔震裝置設計圖



圖 7-2 隔震裝置完成圖

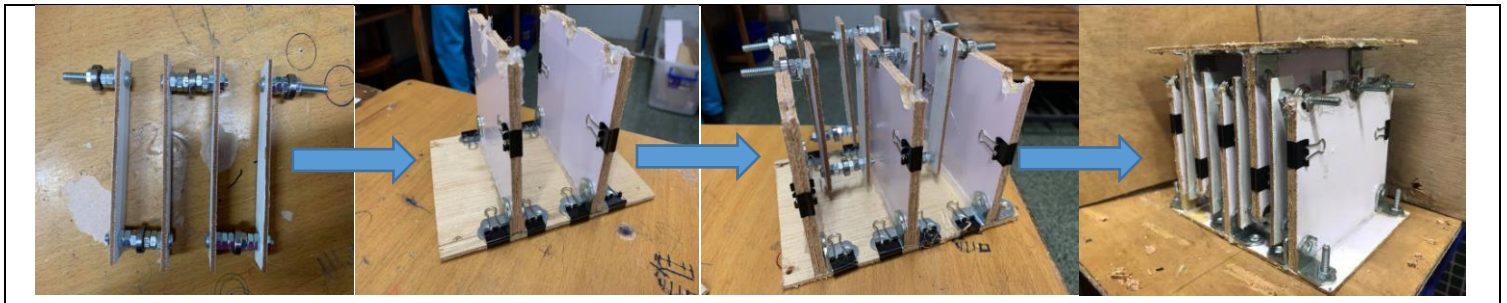


圖 7-3 擺盪式隔震裝置製作流程圖

3、自製地震晃動平臺之研發歷程

成功的地震晃動頻台應兼具以下兩點：

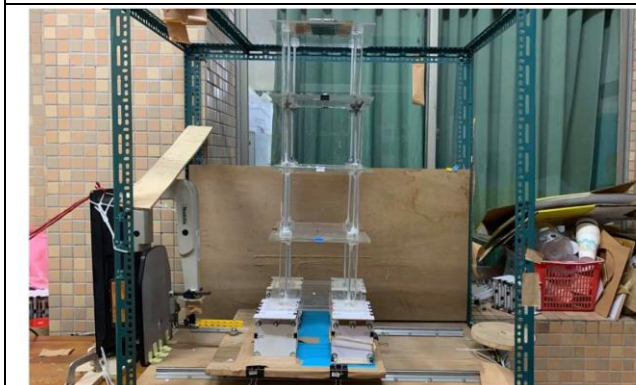
1. 晃動平穩不卡頓。
2. 可進行多段連續調控晃動頻率，以進行多震度之實驗模擬。



第一代平台

第一代 自製晃動地震平台

第一代使用直流馬達與單連桿帶動平台產生晃動，實驗過程中發現轉盤轉至左右兩側時，會因為慣性的關係而使得平台產生卡頓的現象，不符合我們的實驗需求。



第二代平台

第二代 自製晃動地震平台

第二代使用 Makita 線鋸機倒放 90 度並與平台連結，同時以自製調光器來控制平台晃動頻率，但測試過程中發現線鋸機可改變的頻寬範圍有限，只能模擬幾種地震頻率，不符合我們的實驗需求。



第三代平台

第三代 自製(發明)曲柄式地震晃動平臺

根據九年級理化的力矩原理可知，當施力臂大於抗力臂，施力端連結直流馬達能以較省力的方式帶動抗力端平台晃動，使平台晃動平穩，不會產生卡頓，同時使用調速調整器可進行多段連續性的調整，可進行震度 3-7 級以上的震度模擬。

第三代 自製(發明)曲柄式地震晃動平臺之設計與架設

自製曲柄式地震晃動平臺設計圖如圖 8-1 將建築物安置於平臺上並將平臺以曲柄連桿連結至圓盤上。在設計上我們利用槓桿原理讓施力臂連結動力圓盤作為動力輸出端，由九年級理化槓桿原理可知，若施力臂來的比抗力臂較長可達到省力的效果，進而讓輸出端的晃動趨近於理想之簡諧震盪的擺動模式，經由本實驗裝置之設計，可實現「平台穩定晃動」，並同時可藉由控制馬達轉速而達成「連續且細微改變的晃動頻率」。透過本裝置的發明可分別模擬 3 至 7 級以上之地震晃動情形。曲柄式地震晃動平台設計圖如圖 8-1，而完成圖如圖 8-2 所示。

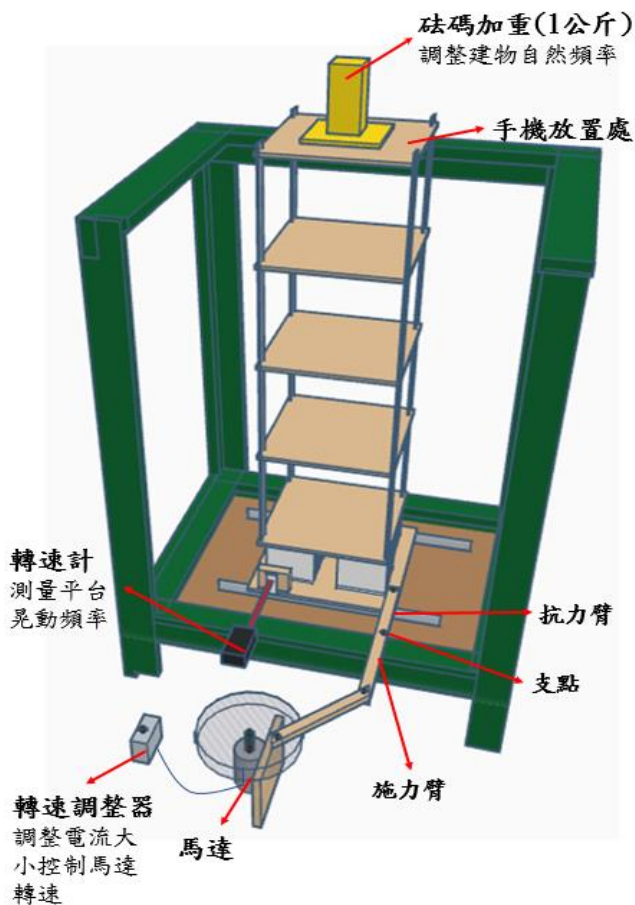


圖 8-1 曲柄式地震晃動平台完成圖

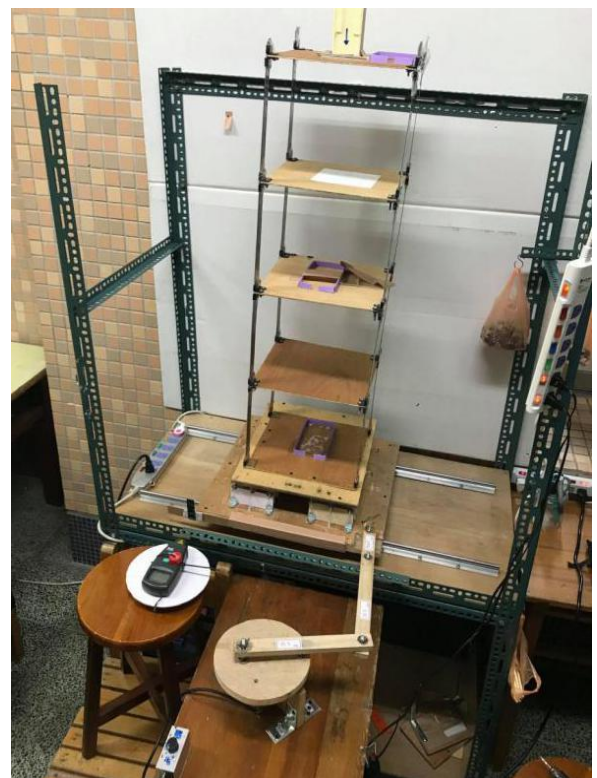


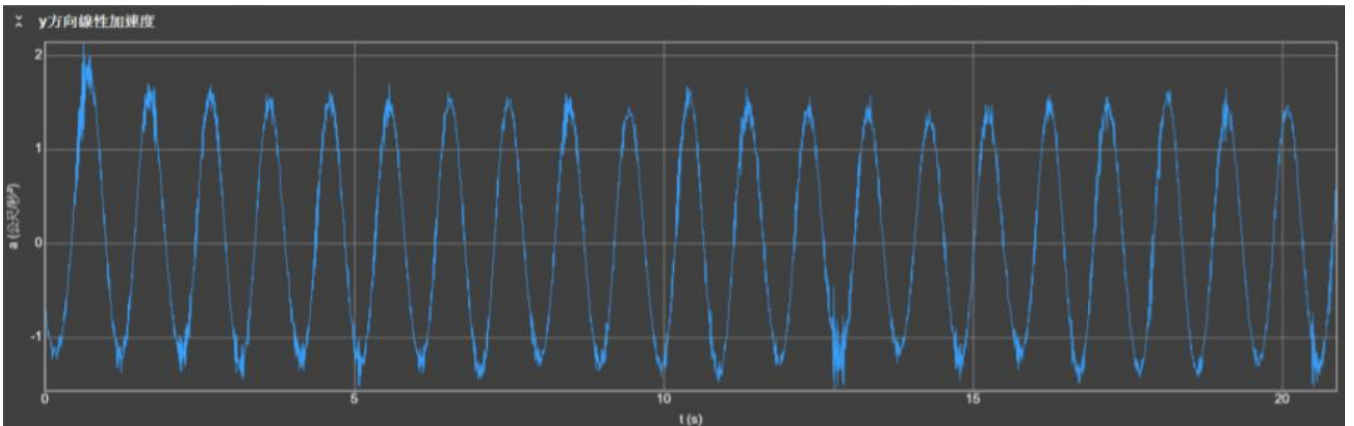
圖 8-2 曲柄式地震晃動平台完成圖

自製(發明)曲柄式地震晃動平臺模擬不同震度下的地震震動與數據量化方法

數據分析方法與流程

- (1) 將手機安置於平台建築物之樓頂並加以固定
- (2) 開啟手機 Phyphox 並以遠端模式與電腦連結，將測量數據以電腦輸出
- (3) 開啟與馬達連結之轉速調整器調整平台晃動頻率，並同時以轉速計測量平台的晃動頻率，將

其調整至實驗設定之待測頻率時，進而輸出加速度對時間之關係圖



(4)由電腦中呈現之加速度與時間作圖擷取 5 個加速度最大值取平均值做分析，並重複相同實驗三次取最大加速度之平均值

本研究所進行的實驗均重複三次實驗以進行實驗的再現性，並算出平均值。且進一步的計算出平均差(註 1)和差值比(註 2) 以評估其準度。

註 1：平均差(y)=測量值(x)-平均值(x_{avg})的絕對值總和，再除其樣本數(n)

平均差越大，代表測量數據的變異性越高。(如下面方程式)

$$y = \frac{1}{n} \sum |x - x_{avg}|$$

註 2：差值比=平均差/平均值，用來評估測量結果的信賴度，差值比越小，代表信賴度越高。我們將標準訂定為 5%

自製曲柄式地震晃動平臺模擬不同震度實驗原理說明：

由於支點至抗力點之間的橫向擺動可近似為簡諧震盪(S. H. M.)，故我們可將其視為等速率圓周運動的投影，示意圖如圖 9。推算平台晃動加速度為(1)式，最大加速度可以用(2)式來描述

$$a(t) = r \cos(\omega t + \theta) \text{ --- (1)}$$

$$a = r\omega^2 = 4\pi^2 r f^2 \text{ --- (2)}$$

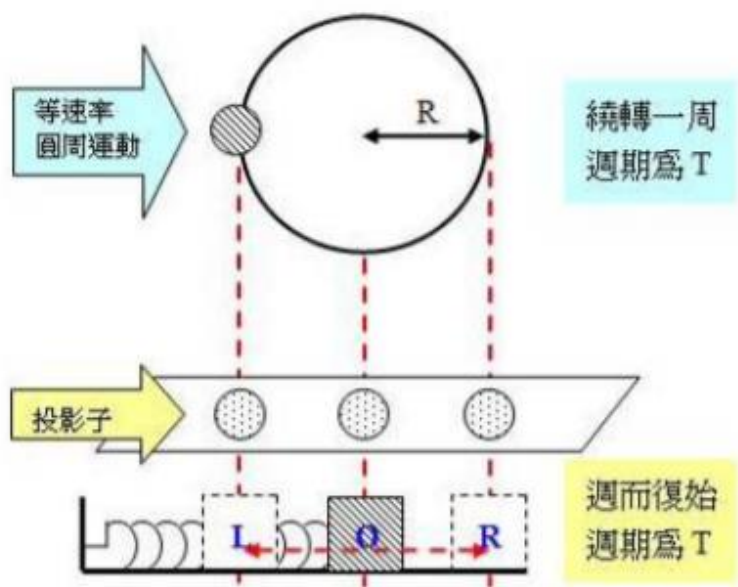


圖 9 震動之運動方式(註:圖摘自科學 Online-科技部自然科學教學資源平台)

經 Tracker 追蹤質點測量可知抗力臂端之擺幅半徑為 1.97cm，我們可以將實驗設定之頻率經(2)式換算出平台晃動加速度值，並與交通部中央氣象局之地震分級圖(圖 10)做參照，可得知在特定頻率下之地震級數如表 2

表 2 擺幅 1.97cm 下於不同頻率之加速度與震度換算表

擺幅(cm)	頻率(Hz)	加速度(gal)	震度
1.97cm	0.5	19.44	3
1.97cm	0.75	43.75	4
1.97cm	1	77.77	4
1.97cm	1.25	121.52	5
1.97cm	1.5	174.99	5
1.97cm	1.75	238.18	5
1.97cm	2	268.45	6
1.97cm	2.25	393.72	6
1.97cm	2.5	461.40	7

震度分級		地動加速度 (cm/s ² , Gal)	人的感受	屋內情形	屋外情形
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 微小搖晃		
2	輕震	2.5~8.0	大多數的人可感到動，睡眠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搖晃，有的人會有恐懼感	房屋震動，碗盤門窗發出聲音，懸掛物搖擺	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，睡眠中的人幾乎都會驚醒	房屋搖動甚烈，底座不穩物品傾倒，較重傢俱移動，可能有輕微災害	汽車駕駛人略微有感，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	部分牆壁產生裂痕，重傢俱可能翻倒。	汽車駕駛人明顯感覺地震，有些牌坊煙囪傾倒
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	搖晃劇烈以致無法依意志行動	部分建築物受損嚴重或倒塌，幾乎所有傢俱都大幅移位或摔落地面	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

因建築物在地震產生晃動時，由觀察發現越高的樓層搖晃程度會越大，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。故我們定義建築物頂樓晃動所量測到的最大加速度為 a_{\max} 和平台晃動的地動加速度大小 a_{gnd} 的差值與 a_{gnd} 之比值為**加速度放大率** γ ，定義如(3)式

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

伍、研究結果及討論

實驗一 探討有無隔震裝置在不同地震頻率下之隔震效能

地震來臨時，若可以在大樓與地基之間安置一個摩擦係數小的裝置，那麼是否可以達到減少能量傳遞的效果呢？我們認為是肯定的，以下為我們的推論過程，根據牛頓第一運動定律可知，大樓於地震來臨時欲保持其原本的運動狀態而維持靜止，若能阻隔力量之傳遞，則大樓應可維持在原本的運動狀態，而不易晃動，故我們以摩擦力小的培林來進行裝置設計。

為了實現與驗證這樣的想法，我們使用了木板與培林自製了一套擺盪式隔震裝置以進行試驗。透過實驗一來探討有無擺盪式隔震裝置在不同頻率地震下的隔震效果，對照表 2 我們總共做了 9 種頻率，即震度 3-7 級之不同測試，選擇這 9 種頻率是因為當頻率小於 0.5Hz，大樓幾乎不晃動，較難以進行實驗觀察，而當頻率大於 2.5Hz 時，地震晃動劇烈並同時對建筑物和隔震裝置造成損毀，故我們設定以 0.5Hz-2.5Hz 每隔 0.5Hz 為一間格進行實驗。

分別配置四個隔震裝置於大樓底部如圖 11，對照組為無隔震作用之配置，我們以竹篾跟橡皮筋將隔震裝置固定不讓其晃動如圖 12。

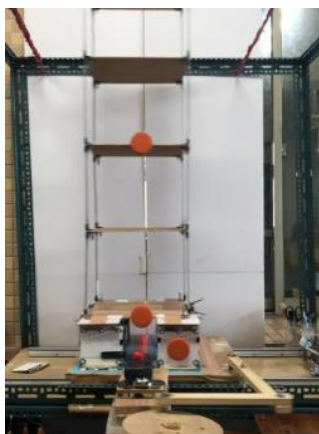


圖 11 裝置有隔震作用



圖 12 裝置無隔震作用

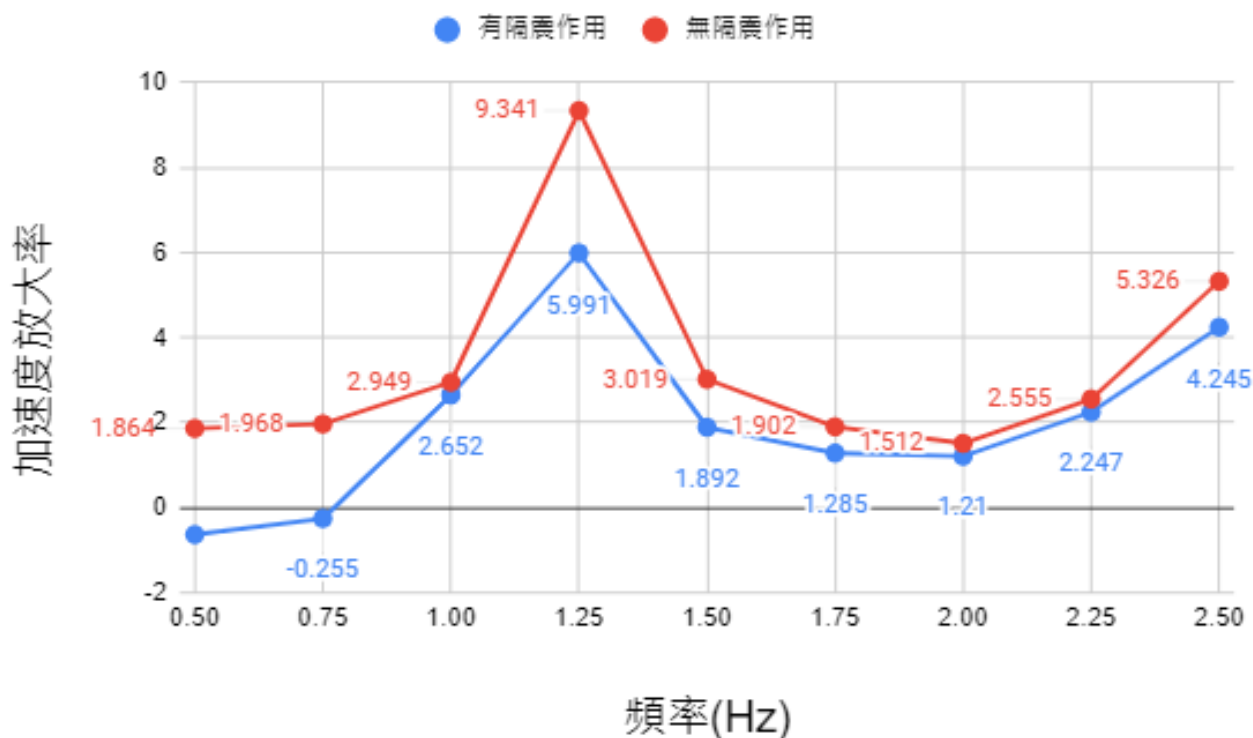


圖 13 裝置有無作用對隔震效果優劣的關係

表 3 有隔震作用時與無隔震作用時之自然頻率(讓房屋自然擺動以 Tracker 分析擺動頻率)

隔震裝置無作用	自然頻率 $f = 1.33\text{Hz}$
隔震裝置有作用	自然頻率 $f = 1.23\text{Hz}$

實驗一 數據探討

由圖 13 與表 3 發現實驗結果與實驗前的推理論證有一致性，有隔震裝置之作用下能降低加速度放大率，尤其以低於 1.25Hz 較為顯著。而從圖中發現，兩條曲線均在 1.25Hz 的地方出現峰值，即有一較大的加速度放大率，由八年級學過的共振效應我們可知，當地震晃動的頻率與大樓晃動的自然頻率接近甚至相同時，大樓會因為共振效應而吸收較多的地震能量，導致晃動加劇的現象產生。從實驗觀察與數據中我們也發現到當有隔震裝置時，即摩擦力降低時，大樓的擺動週期會略為延長，即擺動的自然頻率會略微降低的現象產生。圖中數據顯示由頻率 1.25Hz 至 2.5Hz 之間有隔震作用時也能減少放大率，到了頻率 2.5Hz 後放大率有逐漸提升之趨勢，我們推測應該是大樓之自然頻率應該不是只有一個的關係。

實驗二 探討地震能量從不同之單一方向傳入建築物時其隔震效果的研究

由於地震波會從四面八方傳入建物，於是想探討地震波方向對隔震效果的影響。我們認為地震波方向與隔震裝置晃動方向平行時，會有較好的隔震效果；反之當彼此夾角漸大至垂直，則隔震效果應會漸差，會做以上實驗前預測乃根據慣性定律，大樓欲維持原本的靜止狀態，則應降低摩擦力進而讓地震能量不易傳入大樓中，而隨地震波傳遞方向與建物隔震裝置之擺動方向間的角度增加，擺動有一垂直於擺動方向的分力產生，夾角漸大使能量傳入漸大，導致晃動加劇。由實驗一知，接近共振頻率時有較大的震盪情況，為方便觀察能量於不同角度傳入大樓對隔震效果之影響，此實驗設定以頻率為 1.25Hz 的條件下進行測試驗證。



圖 14-1 夾角為 0 度



圖 14-2 夾角為 30 度



圖 14-3 夾角為 60 度



圖 14-4 夾角為 90 度

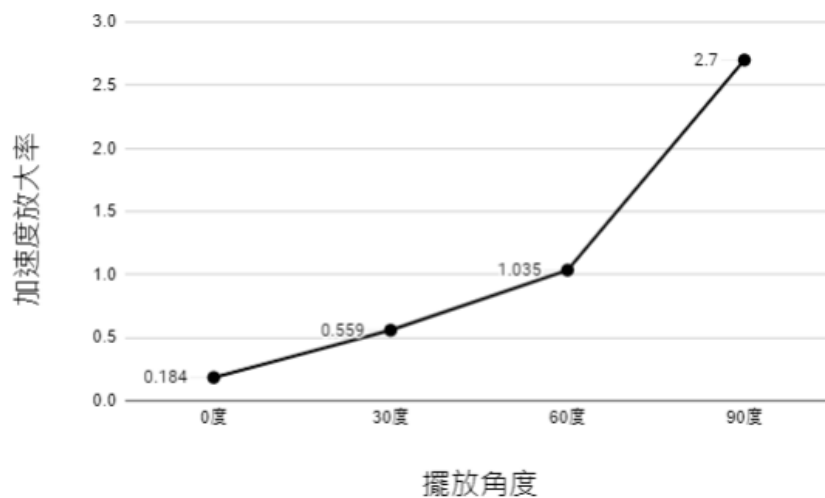


圖 15 不同擺放角度下之加速度放大率

實驗二 數據探討

由圖 15 可知，實驗結果與實驗前推論相符合。在零度時效果最佳，隨著角度增加隔震效果越弱。推測零度時地震力的傳播方向與隔震裝置晃動方向平行，培林能有效降低摩擦力，而有效阻隔能量傳至大樓；而隨著角度加大，而造成之摩擦力漸增進而導致傳入至大樓的能量漸大，導致晃動加劇。

而由實驗二之結果我們思考到地震之能量可能來自四面八方，若想達到有效的阻隔能量傳入大樓中，也許我們可以將自製式擺動隔震柱疊成三層並讓每層之夾角為 120 度，以阻絕來自四面八方的地震能量，示意圖如圖 16 所示。

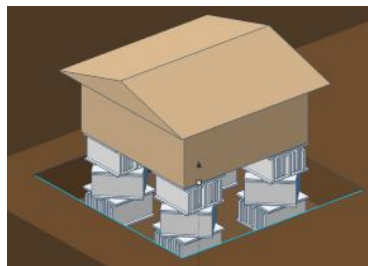


圖 16 夾角各 120 度之隔震裝置安置於地下室之示意圖

實驗三 探討不同房屋高寬比(4:3、8:3)之大樓隔震效果

站在建築師的角度思考，若是我們可以在相同土地面積大小上蓋的樓層越多，那麼就能夠獲取越多的報酬與更有效的運用空間。基於這個角度我們想進一步探討當每層樓於質量相同的情況下，不同樓高的建物在我們自製式擺盪隔震物裝置之作用下的隔震效能。

為避免因共振效應而產生之搖晃加乘的效果，首先我們於實驗前先由 Tracker 分別測得兩棟樓之自然頻率，如表 4 所示，為了避開兩棟樓之自然頻率故本實驗採用了 0.9、1.6 與 2.3Hz 等三種頻率進行實驗探究。

表 4 高寬比 4:3 與 8:3 的大樓自然頻率

高寬比 4:3 的大樓自然頻率	$f = 1.9\text{Hz}$
高寬比 8:3 的大樓自然頻率	$f = 1.2\text{Hz}$



圖 17-1 兩層房屋(高寬比 4:3)



圖 17-2 四層房屋(高寬比 8:3)

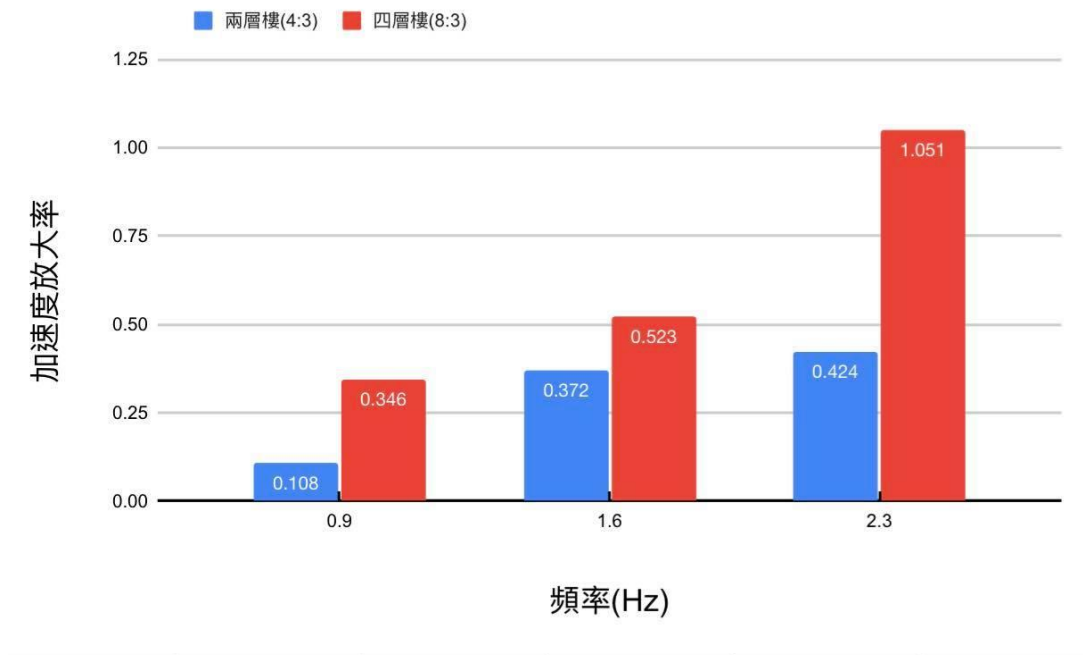


圖 18 房屋高寬比 4:3 與 8:3 之加速度放大率

實驗三 數據探討

由圖 18 可以發現高寬比較大的四層樓(8:3)於三種不同頻率下其加速度放大率都比高寬比較小之雙層樓(4:3)來的大。

推論可能是因大樓越高而致使整體重量增加且重心會越高(如圖 19 所示)，從力矩的分析發現當重量增加造成擺動時之作用力增加，同時重心提高也造成了力臂增加，因而造成擺動時力矩增加，導致晃動加劇。故我們認為於隔震裝置上蓋房子時不止要考慮隔震裝置的載重程度，同時也應該考量晃動時所造成的力矩大小，可以蓋的樓高有其極限，若超過此極限，當地震來臨時將可能造成建物本體損毀甚至倒塌。

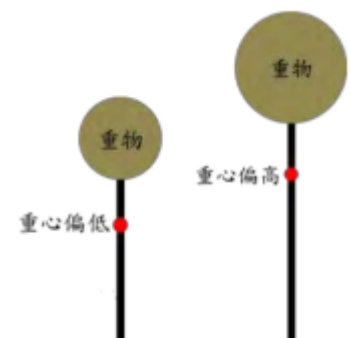


圖 19 建物重心示意圖

實驗四 探討自製擺盪式隔震裝置於不同擺臂長度及組數之組合下之隔震效能

由於思考到地震能量是一種以波的形式來傳遞能量，而從八年級學過的光波我們可以知道波可以分成入射波、反射波與折射波。若將地震能量進入大樓前視為入射波，而隔震裝置的作用能提升反射波的增加，而從能量守恆的角度可知若反射波增加將使得透射波的能量降低，使得大樓晃動較為緩和。故我們設計了以下實驗以進行一系列的探究

實驗 4-1 探討長擺與短擺之擺長不同於不同頻率下的隔震效果

實驗 4-2 探討組合擺(長擺+短擺與短擺+長擺)於不同頻率下的隔震效果

實驗 4-3 探討高度相同下單一長擺與雙短擺組合下的隔震效果

實驗 4-4 探討單組短擺與多組短擺於不同頻率下的隔震效果

我們使用如圖 20 所示的大平台，將不同組合的隔震裝置裝置在同一平台上，再將自製擺盪式隔震裝置上的載重配至相同，進行實驗測量。



圖 20 不同隔震裝置作用示意圖

實驗 4-1 探討長擺與短擺之擺長不同於不同頻率下的隔震效果



圖 21-1 長擺隔震裝置



圖 21-2 短擺隔震裝置

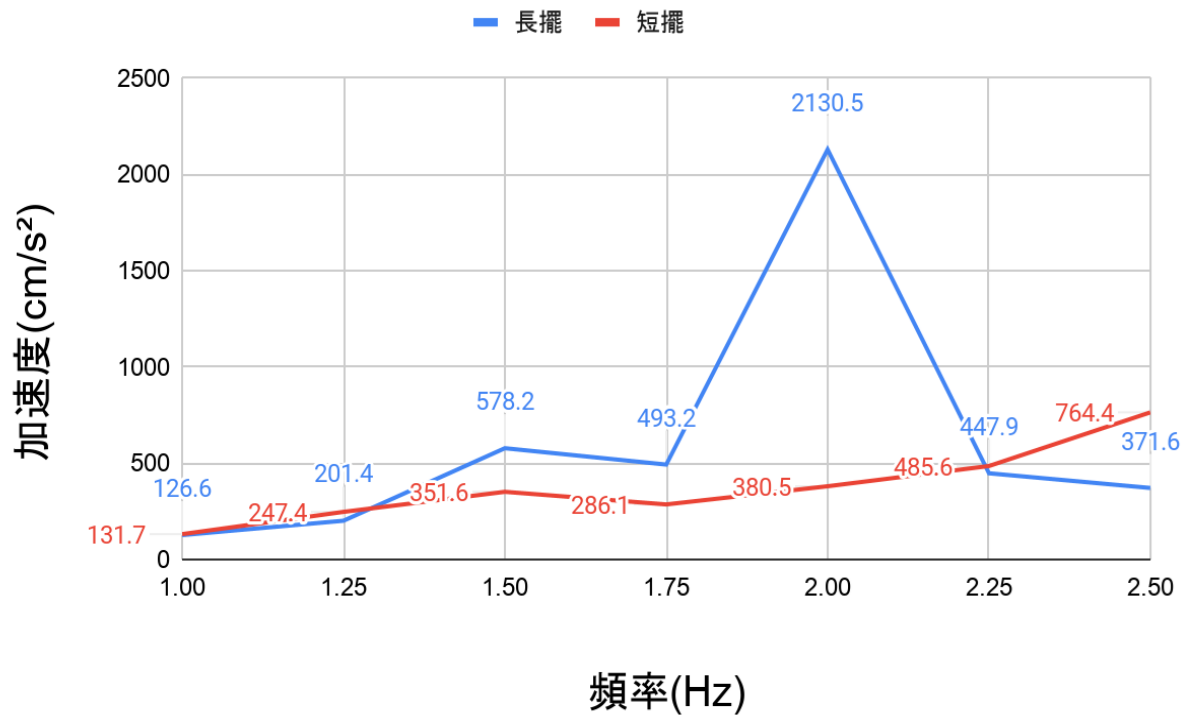


圖 22 長擺與短擺於不同頻率下的加速度圖

實驗 4-1 數據探討

由圖 22 可知，長擺在頻率 2Hz 時，加速度有一峰值，即表示其自然頻率為 2Hz。而從數據我們可以推論長擺的共振頻率來的較短擺來的小，而在接近其自然頻率時會有一較大的晃動情況。長擺與短擺有不同的擺動頻率，此結果與 9 年級理化單擺章節裡所提及之單擺擺動頻率只受擺長的長短影響相似，長度長則擺動頻率慢，反之擺長短則擺動頻率快。

隔震裝置擺長長短的不同會造成房子與地面之相對變位之可容許範圍的不同，擺長較長其相對變位較大，故在建置隔震裝置時，應考量到擺長的長短以控制相對變位的幅度可以大過地震造成的搖晃擺幅，使擺盪在於安全範圍內而不致倒塌。

實驗 4-2 探討組合擺(短擺+長擺 與 長擺+短擺)於不同頻率下之隔震效果



圖 23-1 短擺+長擺



圖 23-2 長擺+短擺

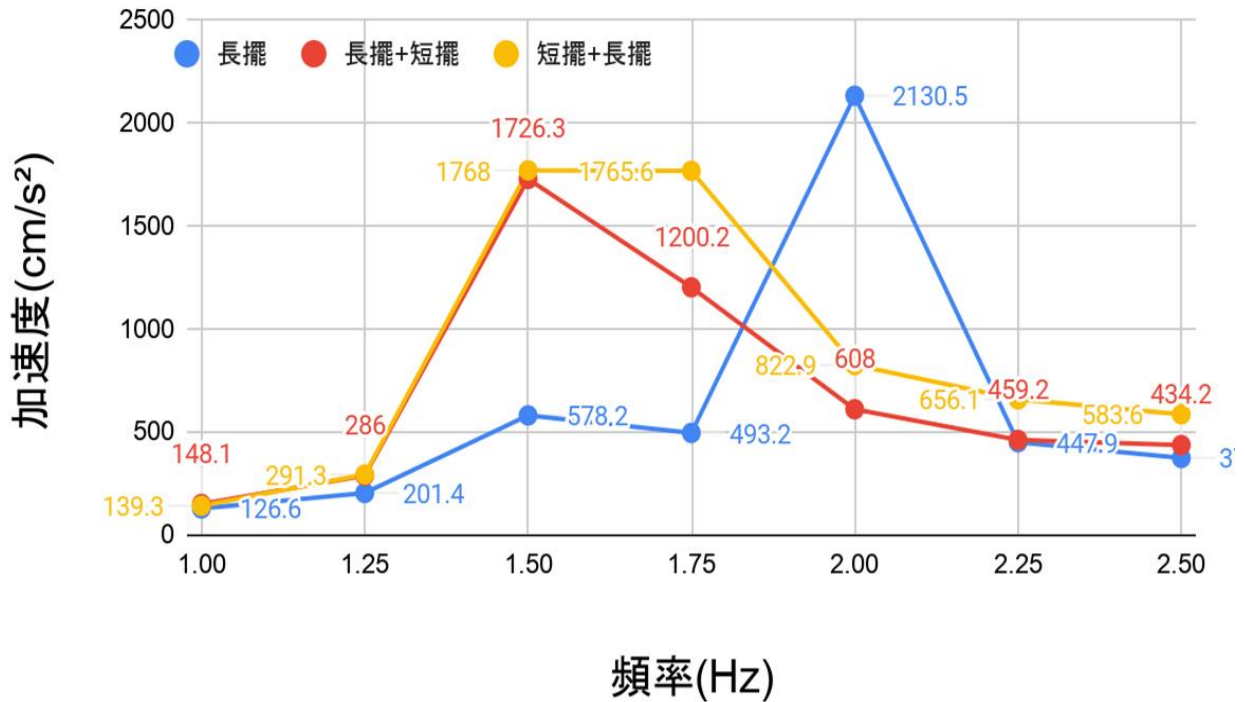


圖 24 長擺、短擺+長擺、長擺+短擺於不同頻率下之隔震效果

實驗 4-2 數據探討

由圖 24 可知，組合擺發生共振的頻率較單一長擺來的低；而發生在共振頻下的最大加速度之比較可發現兩種組合擺之峰值加速度近乎接近且較單一長擺低，但較大晃動的頻寬範圍比較大。

而比較短擺+長擺與短擺+長擺之頻率對加速度關係可發現，在 1.5Hz 以下其加速度值相近，而 1.5Hz 至 2.5Hz 長擺+短擺有較佳的隔震效果，我們推測可能是因為單一長擺的自然頻率為 2Hz，而短擺+長擺的組合中，因為下層是長擺的關係故使得在 1.5Hz 至 2.5Hz 之區間內吸收了較多的能量至上層，進而導致加速度較長擺+短擺為大。

實驗 4-3 探討高度相同下單一長擺與雙短擺組合下之隔震效果



圖 25-1 單長擺



圖 25-2 雙短擺相疊

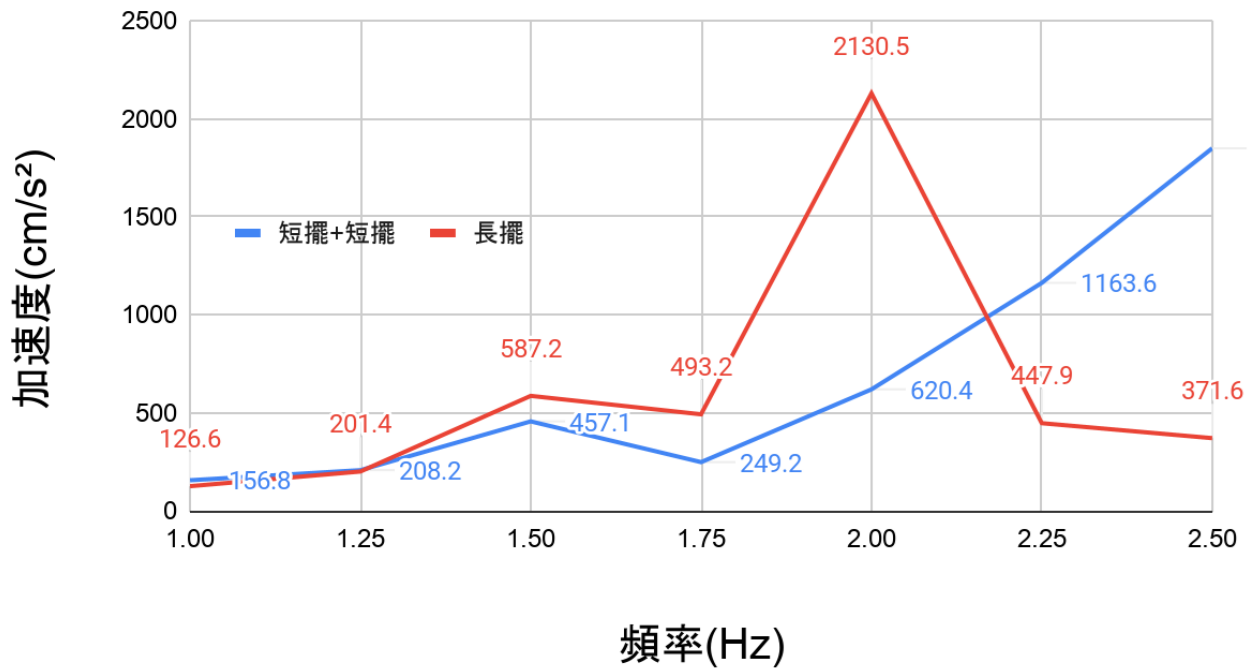


圖 26 同高度下單一擺長擺與雙短擺之隔震效果

實驗 4-3 數據探討

由圖 26 可知雙短擺在低頻時有較佳之隔震效果，而在越接近雙短擺之共振頻時其晃動加速度值將會陡升。

實驗 4-4 探討單組短擺與多組短擺於不同頻率下之隔震效果

若將隔震裝置相疊多層，能量是否會一層一層阻隔反射而使傳遞能量降低呢？我們使用短擺相疊不同層數，觀察其晃動加速度值。



圖 27 單短擺、雙短擺、三短擺之示意圖

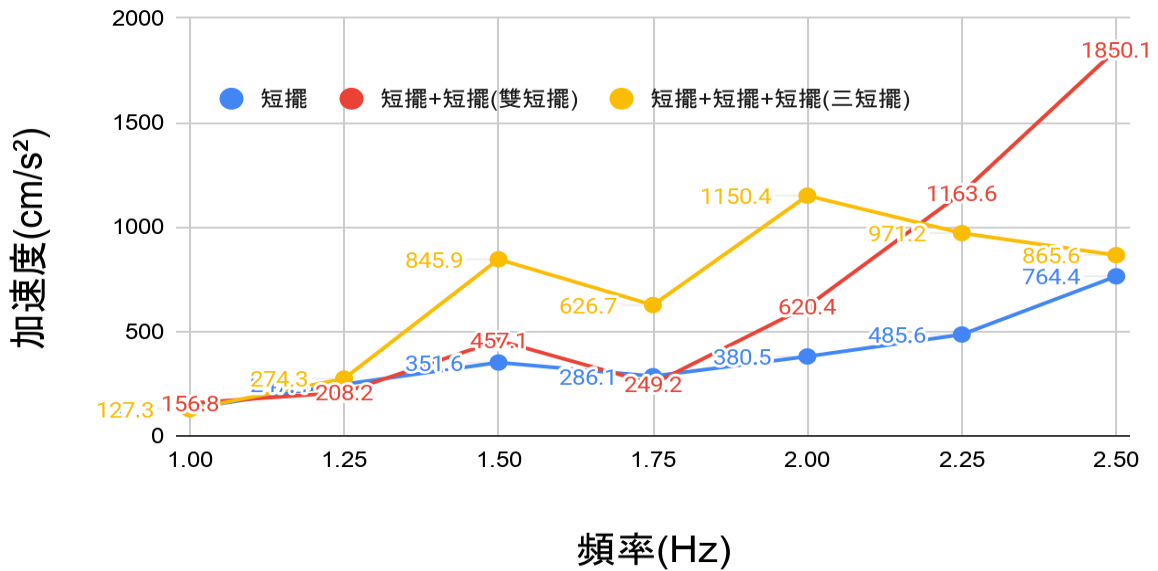


圖 28 隔震裝置組數不同在不同頻率下之隔震效能

實驗 4-4 數據探討

由圖 28 比較單組與多組可發現組數非越多越好，組數越多我們猜想也許有多層阻隔的效果，但同時會讓系統加重且使得整體建物之重心偏高，進一步造成較大的力矩。

實驗五 探討自製隔震裝置安裝在不同樓層於頻率 0.75Hz 與 2Hz 下對各層隔震效果影響

透過實驗一可知隔震裝置可有效阻隔能量傳入建物內，讓晃動降低。我們由 Youtube 上的新聞看到豪宅陶朱隱園將隔震裝置安置於建築物的最底層，這讓我們感到很好奇，若是我們將隔震裝置安置於不同樓層的話，是否會有較好的隔震效能呢？於是我們進行了本實驗的探究。

實驗時希望在改變隔震裝置之位置時(如圖 29)，建物的整體質量與重心不偏移的情況下進行試驗探究，首先建置各樓層並進行配重，使其與隔震裝置有相同的質量。並且同時透過 Tracker 軟體分別測量將隔震裝置安置於 1、2、3、4 層時，以隔震裝置為界線，分別測量上層與下層於自然擺盪下的自然頻率(如圖 29 所示)。並為了避開可能因共振效應造成的影響，故我們選擇了頻率 0.75Hz(震度 4 級)與 2Hz(震度 6 級)進行實驗，並同時以 Tracker 軟體紀錄隔震裝置安裝於不同樓層時，於地震頻率 0.75Hz 與 2Hz 下之各樓層與加速度關係圖進行分析。

實驗五-房屋自然頻率

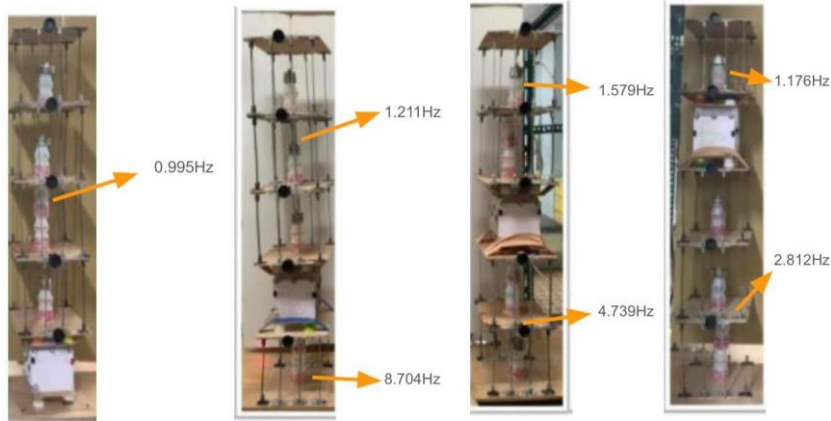


圖 29 隔震裝置安裝於第 1.2.3.4 層之示意圖與自然頻率



圖 30 隔震裝置安裝於不同樓層時，於地震頻率 0.75Hz 下之各樓層與加速度關係圖

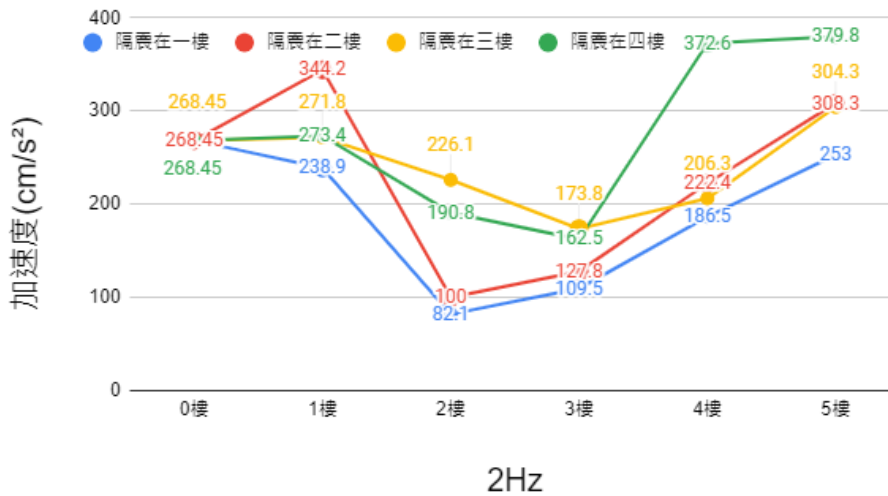


圖 31 隔震裝置安裝於不同樓層時，於地震頻率 2Hz 下之各樓層與加速度關係圖

實驗五 數據探討

由圖 30 及圖 31 可得知，不論是地震頻率 0.75Hz 或者是 2Hz，以圖形趨勢都是將隔震裝置安裝於最底層有較佳的隔震效果。

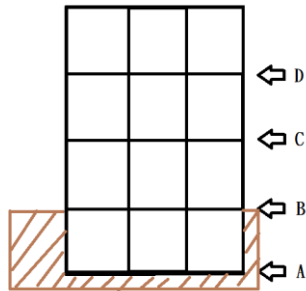


圖 32 隔震裝置的位置配置圖

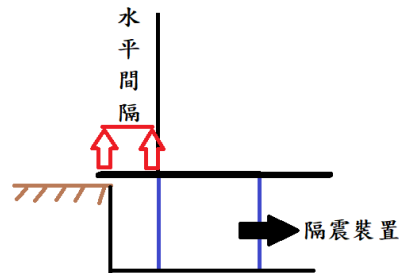


圖 33 隔震裝置之水平間隔示意圖

由本實驗的結果我們得到了一些啟發，若建物無地下層或者是僅僅只有一層地下深度的建築物，根據實驗數據可知，將隔震裝置配置於圖 32 的 A 處有最佳之隔震效果。

隨著地下樓層越深，建築物於地震來臨時所需的水平移動空間需要更大(如圖 33 所示)，即所需的預留水平間格範圍要更寬才行，故也許應將隔震裝置安置於圖 32 的 B 處會較理想，若隔震裝置安置於 B 處則施工上應考量到樓梯與電梯的配套安裝上的問題。

若是將隔震裝置安置於 C、D 兩處做中間層隔震系統，則以隔震層以上之樓層將可視為和台北 101 的單擺式質量阻尼器相同的制震器，若可以將上層之自然頻率調整至與下層樓之自然頻率相接近，或許可實現隔震與制震的雙重效應，即隔震系統可減少向上樓層傳遞之地震力，並同時可藉由上部結構進行如同台北 101 調諧質量阻尼器的功能進行對建物之下部結構減震，這部分可能還需要進行新的實驗去驗證我們這樣的猜想是否正確，由於新冠疫情停課的關係，這部分的試驗只能待疫情過後再繼續進行。

由實驗可知，不論是否安裝隔震裝置之大樓均有其自然頻率，當地震頻率與建物之自然頻率相同時，建物會因共振效應而劇烈搖晃，可能造成建物損毀甚至倒塌。由實驗一與實驗五之結果，讓我們聯想到，若能建置複合式隔震裝置的系統，即在最底層與中間層各安裝一隔震裝置(如圖 32 中的 A 與 D 兩處同時安裝)，並在中間隔震層處安裝隔震裝置之開關(說

明:關閉即無隔震作用),並大樓建置一電腦中控系統,可進行開啟或關閉中間層隔震裝置,或許可藉由此系統的開啟或關閉來避開地震之共振頻率。具體做法如下,假設地震發生於花蓮外海(如圖 34 所示),地震波傳遞至鄰近的地震觀測站進行頻譜分析,對照此次地震的最大震幅之主要頻率是否與大樓自然頻率一致,並將訊息透過光訊號傳至建物的中控電腦上,進而藉由開啟或關閉中間層隔震裝置來避開致命的共振效應,也許可因此而降低建物損毀的可能性。



圖 34 地震發生點示意圖

實驗六 探討自製隔震裝置上安裝針筒阻尼器以進行消能效果測試

透過對 101 阻尼器的觀察,我們發現 101 的調諧質量阻尼器除了有吸收晃動能量的單擺以外,同時有負責消散能量的 8 支油壓阻尼消能器。而我們的大樓與自製隔震裝置之組合恰好就如同擺一樣,於是我們猜想,若是在我們的隔震裝置上加裝阻尼消能器,那麼是否可以讓傳入建物之能量因消能而降低晃動程度呢?

我們透過針筒去除裡面的黑色活塞,並在針筒中裝入不同黏滯性的液體,如水、沙拉油、甘油等液體(圖 35)並討論擠壓推桿打洞與否之消能效能,同時也以磁鐵同極相斥以進行一系列的阻尼器消能探究。實驗上我們分別在隔震裝置左右兩側各安置兩支針筒式阻尼器(阻尼器擠壓方向與地震晃動方向同向),如圖 36 所示。本實驗以接近建物自然頻率下之頻率 1.25Hz 進行實驗探究



圖 35 液體阻尼示意圖



圖 36 單側磁鐵同極相斥阻尼器安置圖

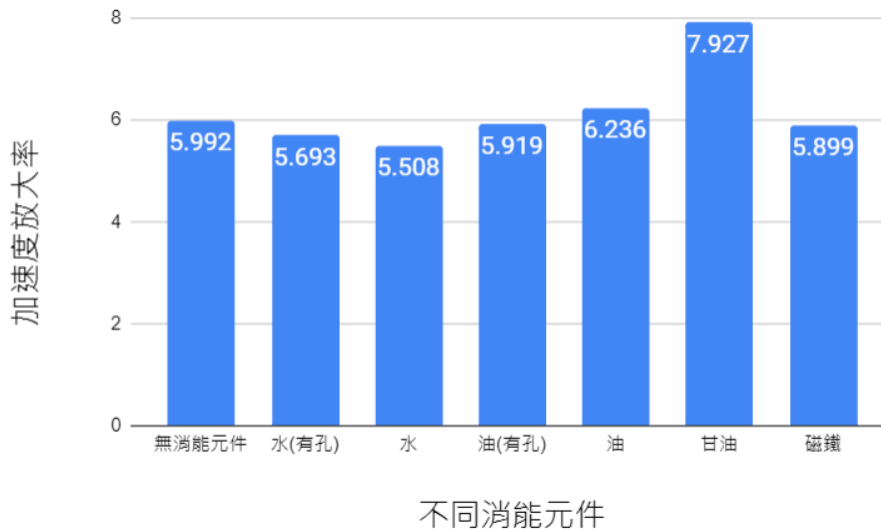


圖 37 在自製擺盪式隔震裝置下安裝不同消能元件之加速度放大率

實驗六 數據探討

由圖 37 可知在液體黏滯性較小時，消能效果有提升，其中以水的消能效果最佳，磁鐵相斥也有些許的消能效果。而甘油和油的效果與對照組(只有隔震裝置)相比較下，反而效能不減反升。經由實驗數據與討論，我們覺得有適當黏稠度的阻尼消能元件與自製擺盪式隔震裝置做搭配確實可以有效降低建物晃動。而從數據中我們發現消能與隔震會有阻抗的效果，當消能元件之黏稠度太高(阻尼太大)會造成在擠壓的過程中大量的能量傳入建物中導致隔震效能弱化，使得能量湧入建物，造成劇烈搖晃。

實驗七 探討自製擺盪式隔震裝置上安置磁生電阻尼元件以進行減震效果測試

由於實驗五之阻尼元件是以熱能形式耗散晃動動能，進一步我們思考是否有其他的能量轉換形式可以來進行消能呢?與老師討論過後，我們發現可利用磁鐵與金屬產生相對運動時所造成的法拉第定律(將建物晃動動能轉成電能的形式)來進行探究。實驗裝置圖如圖 38 實驗設計可分成 3 個小實驗如下

實驗 7-1 探討固定磁鐵顆數、集中磁鐵，調整磁鐵與鋁板之距離造成之消能效果測試

實驗 7-2 探討固定鋁板距離、集中磁鐵，調整磁鐵堆疊高度之消能效果測試

實驗 7-3 探討固定鋁板距離、磁鐵顆數，調整磁鐵分布位置之消能效果測試



圖 38 磁生電系統與隔震裝置安置示意圖

實驗 7-1 探討固定磁鐵顆數、集中磁鐵，調整磁鐵與鋁板之距離造成之消能效果測試

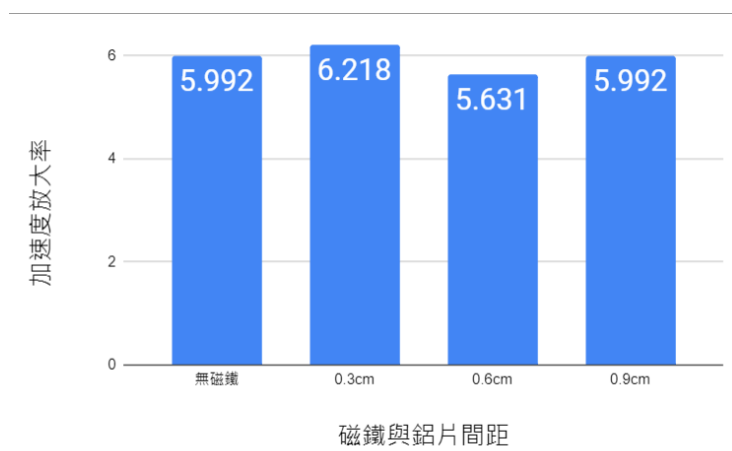


圖 29 磁鐵與鋁板間距和隔震效能優劣的關係

實驗 7-1 數據探討

由圖 29 可知磁鐵與鋁板之間間距並非越近越好，也非越遠越好，最佳消能應有一範圍值，和實驗五所得之數據雷同有一致性。

實驗 7-2 探討固定鋁板距離、集中磁鐵，調整磁鐵堆疊高度之消能效果測試

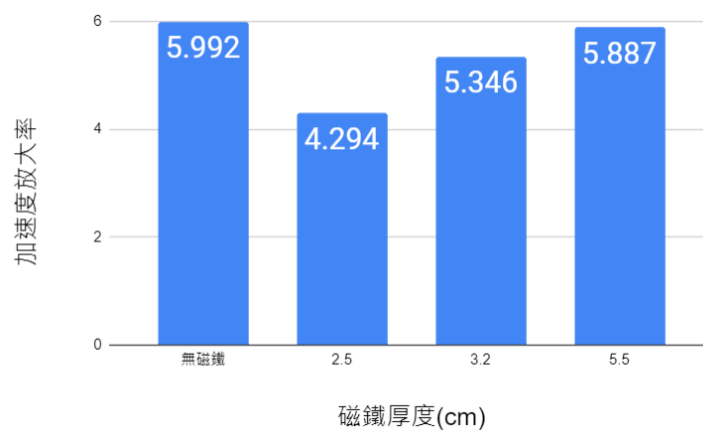


圖 30 磁鐵強度和隔震效能優劣的關係

實驗 7-2 數據探討

由圖 30 可知，在固定距離時磁鐵強度並非越強越好，亦有一範圍值。實驗結果與實驗五、實驗 6-1 雷同有一致性。

實驗 7-3 探討固定鋁板距離、磁鐵顆數，調整磁鐵分布位置之消能效果測試

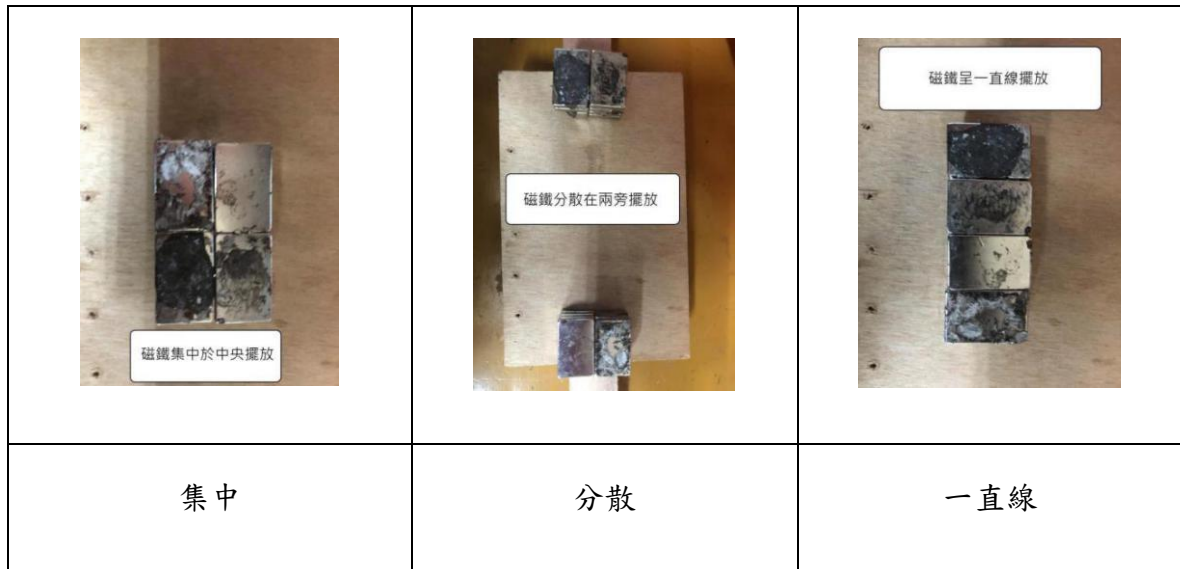


圖 31 磁鐵分布示意圖

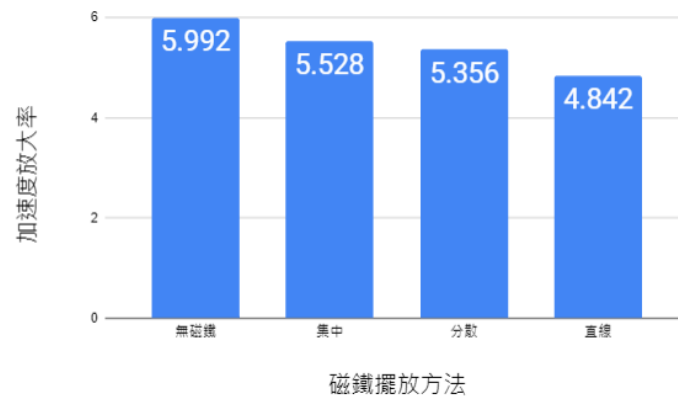


圖 32 磁鐵分布和隔震效能優劣的關係

實驗 7-3 數據探討

由圖 32 可知不論集中或分散或直線擺放與無消能之對照組(只有隔震裝置)比較，均可以有效降低加速度放大率。

實驗七綜合討論:由法拉第感應電動勢 $\varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -NBA\omega\sin(\omega t)$ 可知，感應電動勢的大小由單位時間內的磁通量的改變所造成，感應電動勢的大小與線圈圈數以及磁場強度還有截面積與

擺動角速度均成正比關係。我們可以透過改變磁體厚度、金屬板與磁鐵之間距離來控制磁場強弱，也可以控制金屬板的厚薄與磁力線和金屬板的切割面積等，來控制感應電動勢的大小，進而控制產生的阻尼強弱。

由於實驗七我們將地震頻率設定為大樓本身的自然頻率，發現有一最佳的阻尼範圍。進一步我們猜想，會不會在不同的地震頻率之下，其最佳阻尼大小都不相同呢？我們有想用電磁鐵，藉由控制輸出電壓以調整電流大小，進而控制輸出功率來調整電磁鐵的強弱，進行在不同地震頻率時最佳阻尼效果的進一步再探討，但是由於新冠疫情的關係，此部分的實驗可能要等疫情過後再來進行實驗驗證與探究了。

陸、結論

1. 測試了不同地震頻率 0.5Hz-2.5Hz(不同震度下)的晃動發現，有安裝自製擺盪式隔震裝置的建物其自然頻率會比無安裝自製擺盪式隔震裝置的建物來的低一點；而有安裝自製擺盪式隔震裝置可有效阻隔地震能量傳入建築物中。
2. 地震波方向若與自製擺盪式隔震裝置方向平行有較佳之隔震效果，隨隔震裝置與地震波方向夾角變大隔震效果將減少，而地震波在地震來臨時可能從不同方向傳入，故我們認為也許可以將自製擺盪式隔震裝置疊成三層，層與層之間的夾角以 120 度角擺放也許能解決地震波來自不同方向的問題。
3. 在探討高寬比的實驗中我們發現，蓋建物時除了考量隔震裝置的長時間耐重程度外，也許考量樓高造成的力矩擺動大小。建地面積固定下無論是否有加裝隔震裝置，可以蓋的樓高有其極限，若超過此極限當地震來臨時將可能造成建築物本體損毀甚至於可能會有倒塌的危險產生。
4. 長短擺實驗中發現不同擺長之自然頻率不同，擺長越長的自然頻率越小。
5. 組合擺(長擺與短擺組合)發生共振的頻率較單一長擺來的較低；而發生在共振頻下的最大加速度之比較可發現兩種組合擺之峰值加速度近乎接近且較單一長擺低，但較大晃動的頻寬範圍比較大。
6. 比較短擺之組合，單組與多組之比較可發現組數非越多越好，組數越多我們想也許有多層阻隔的效果，但同時會讓系統加重且使得整體建物之重心偏高，進一步造成較大的力矩，導致晃動加劇。
7. 探究隔震層安置於不同樓層之實驗，我們發現隔震裝置安置於最底層其隔震效果最佳，若是建物無地下層或者是僅僅只有一層地下深度的建築物，我們會建議安置於底部。倘若地下層較多，則會建議安置於一樓處，因為安裝於地下會造成所需之水平位移之間隔空間範圍要較大，可能不符合經濟效益。然而安置於樓層中的中間隔震層，其可能扮演隔震與制震的雙重角色，有關這部分的探究需要進行進一步的實驗探究。
8. 實驗發現隔震裝置若搭配消能阻尼器於適當的阻尼大小下，無論是液體或磁相斥的阻尼器，亦或是磁生電的轉換機制，只要阻尼在適當範圍內隔震裝置可有效阻斷能量傳入且消能元件可有效進行消能，在隔震與消能之雙重效果下，可使建物晃動有效降低。

柒、參考資料及其他

- 一、陳郁煊、廖芟秀、陳俊融(2019)。「震震有池-水塔阻尼器設計及減震效能探討」。中華民國第 59 屆中小學科學展覽會。
- 二、林宥禎、楊安鈞(2020)。「屋欲靜而電不止-探究冷次定律在建築物的減震運用」。中華民國第 60 屆中小學科學展覽會。
- 三、葉祥海、黃德琳、曾一平、楊森翔、吳志強(2003)。「建築物格制震設計規範與務實之研究比較」。內政部建築研究所研究報告
- 四、戴立嘉、徐家齊(2007)。「十震九穩-建築物抗震之研究」。中華民國第 47 屆中小學科學展覽會。
- 五、鄭光泰、林佳渝、黎芷君(20170331)。「阻尼器面面觀」
- 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】 030508

【優點】

1. 研究主題與減災及生活相關，自製擺盪式隔震裝置具減災應用之開發潛能。
2. 研究實驗過程完整、設想周全，且施作充分。
3. 問題回答切合主題，且有抓住重點。

【建議】

1. 近五年科展與阻尼器相關的研究主題，都以單擺式質量阻尼器與水塔阻尼器為主，建議可更強調自製擺盪式隔震裝置與前述阻尼器的優劣比較。
2. 將來可考慮多重頻率混合的實驗。
3. 報告的呈現需加強，例如使用的示圖曲線顏色(例如淡黃色)不易清楚鑑別，曲線上的有效數字不夠嚴謹，橫軸與縱軸的數字不夠清晰。
4. 將來可考量及討論尺度比例放大到實際狀況的修正。

作品簡報



地動山不搖
隔震裝置在建築物之應用與探究

組別：國中組

科別：地球科學科

編號：030508

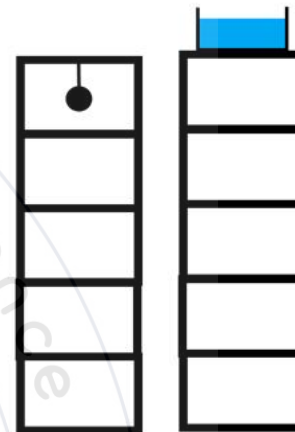
研究動機



台灣地理位置



共振效應

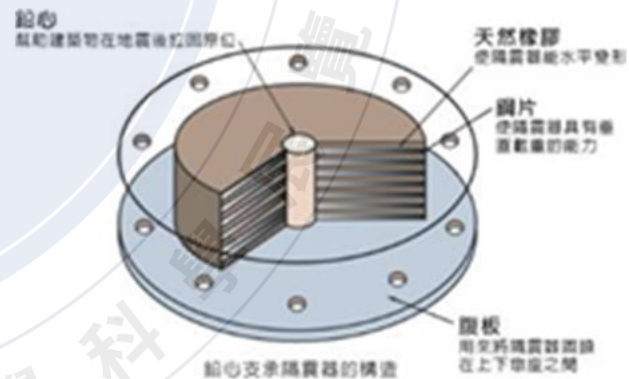
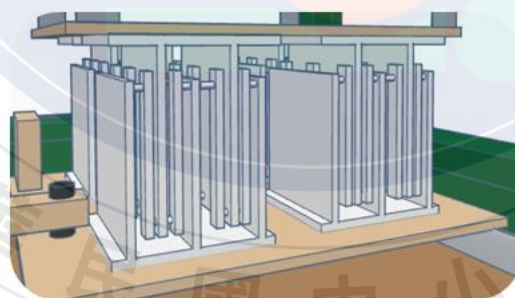


文獻探討



自製擺盪式隔震裝置

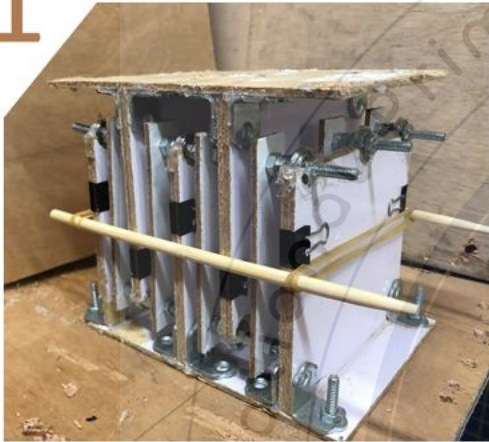
(1)可長期載重能力
(2)大變形與復位能力



豪宅陶珠隱園的隔震裝置

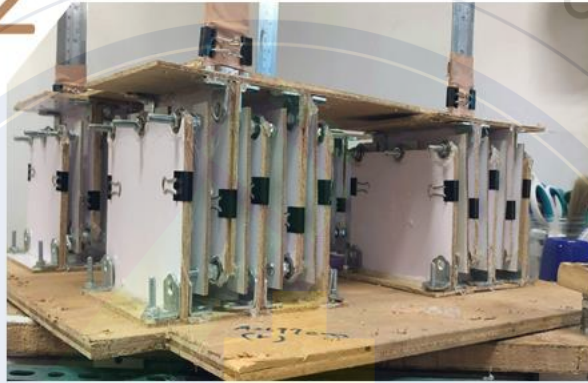
探究歷程

1



隔震裝置有無作用(擺盪)

2



裝置擺盪與平台震動之間夾角大小

3



房屋高寬比(4:3、8:3)

4



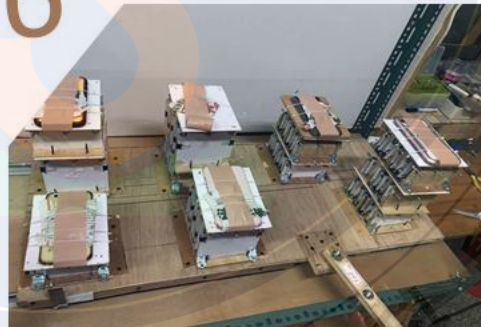
擺長與組合(相疊)

5



隔震裝置安裝的樓層

6



加裝液體及磁鐵相斥阻尼

7



使用電磁阻尼

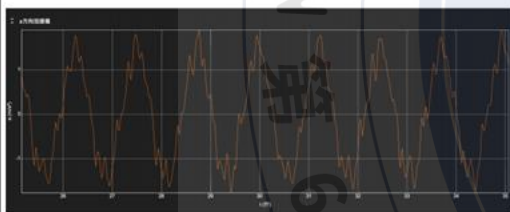
研究方法

等速率圓周最大加速度

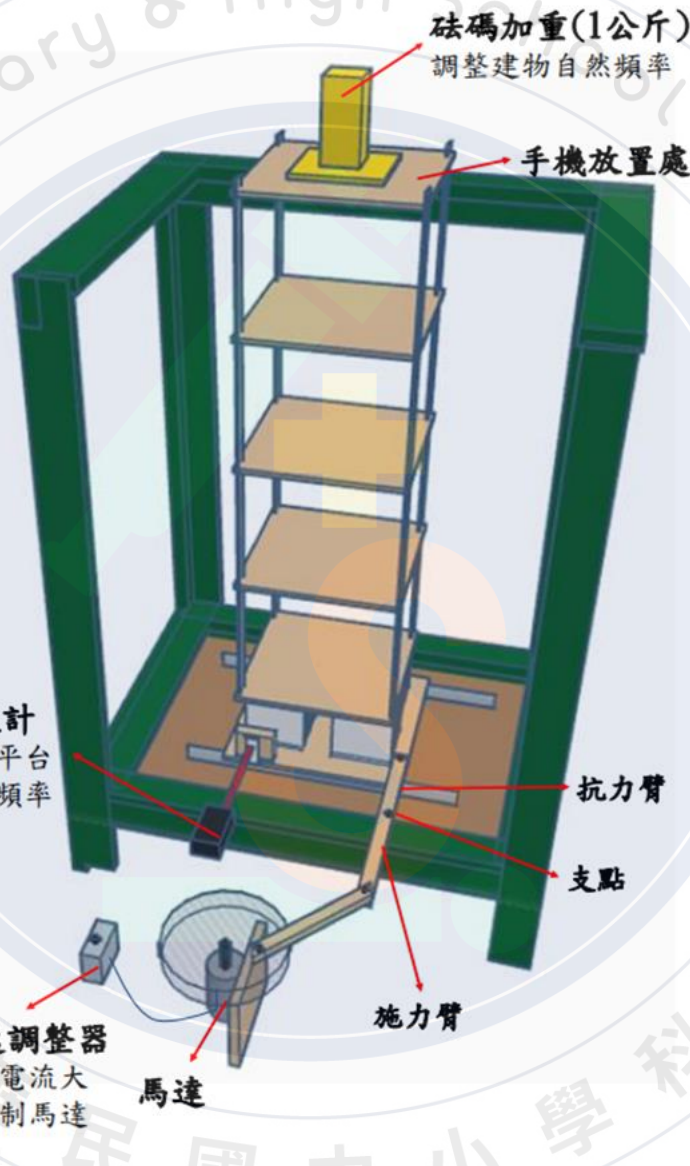
$$a = rw^2 = 4\pi^2 Rf^2$$

實驗步驟

- (1) 將手機固定於屋頂後，開啟Phyphox與電腦連結
- (2) 調整平台晃動頻率至待測頻率(0.5~2.5 Hz)



Phyphox(a-t圖)



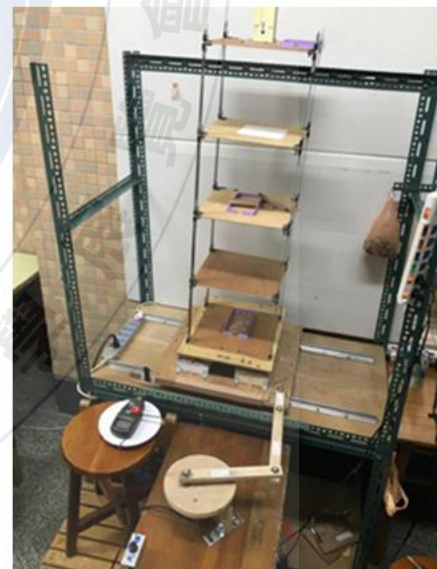
加速度放大率

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

平均差

$$y = \frac{1}{n} \sum |x - x_{\text{avg}}|$$

差值比=平均差/平均值
標準：5%



實驗結果1 在不同震度下隔震裝置有作用時能有效降低晃動



● 隔震裝置無作用



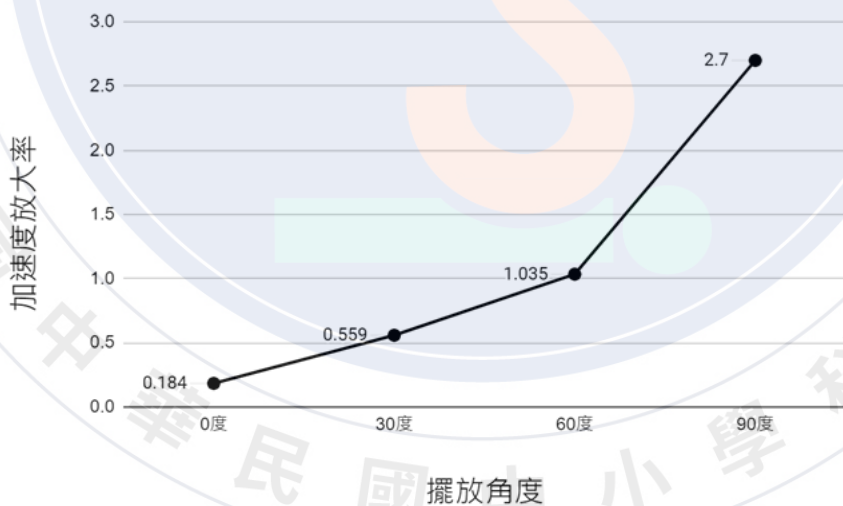
有隔震裝置，摩擦力低，能隔絕能量。
出現多個峰值，推測大樓自然頻率不只一個。

裝置無作用 $f = 1.33 \text{ Hz}$
裝置有作用 $f = 1.23 \text{ Hz}$

實驗結果2 地震方向與隔震裝置擺盪方向平行時效果最佳



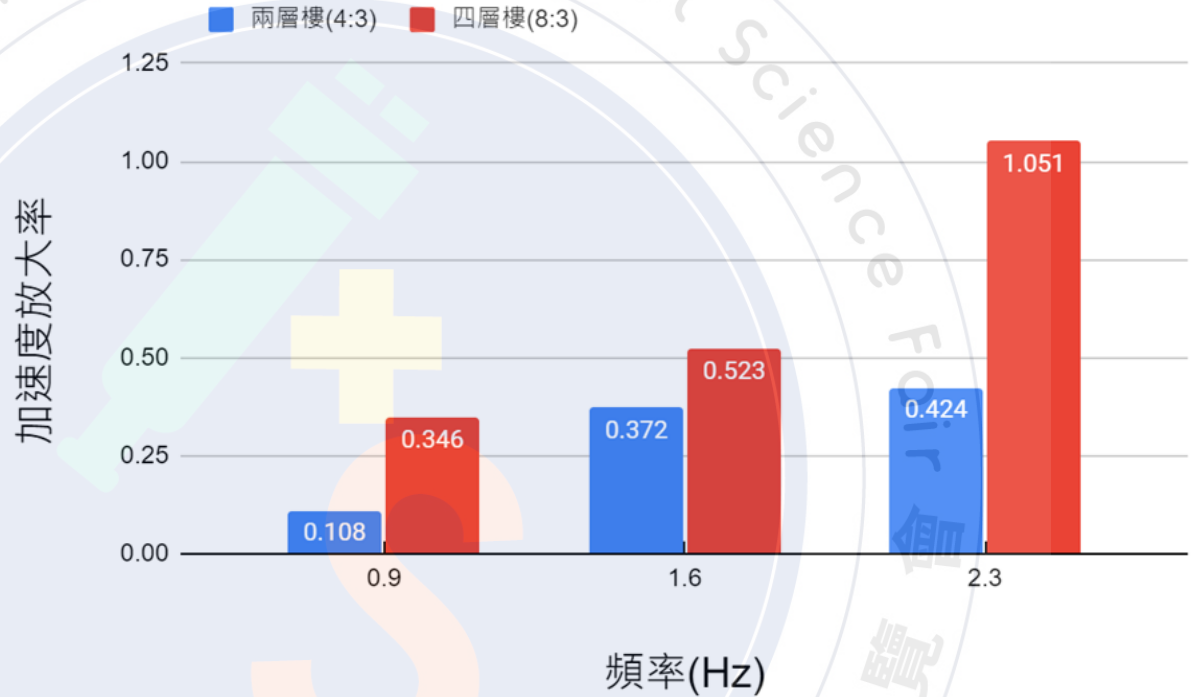
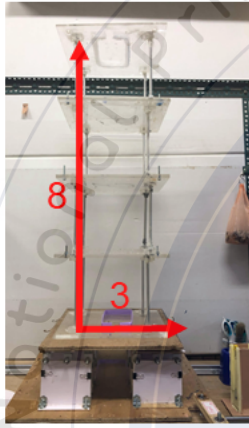
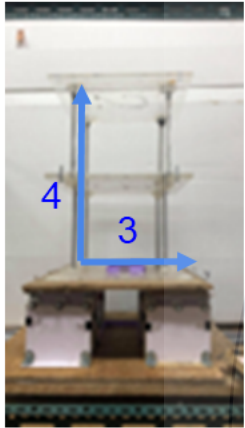
● 夾角為60度



零度培林能降低摩擦力，效果最佳，
角度增加摩擦力漸增，效果漸弱。



實驗結果3 大樓高寬比應有其極限值



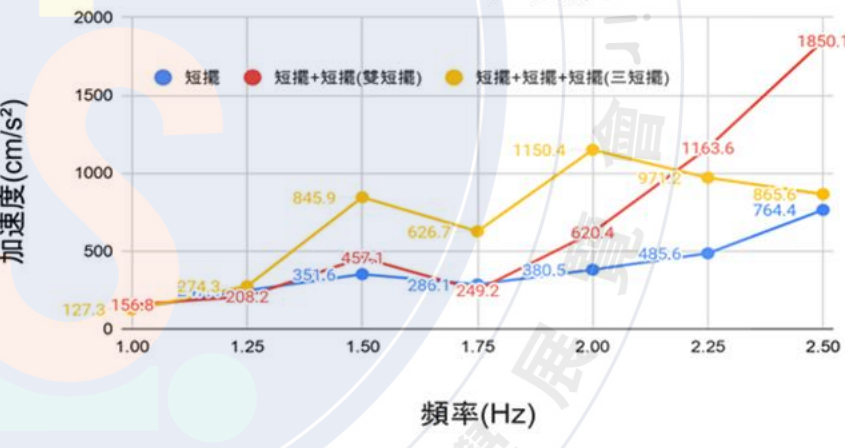
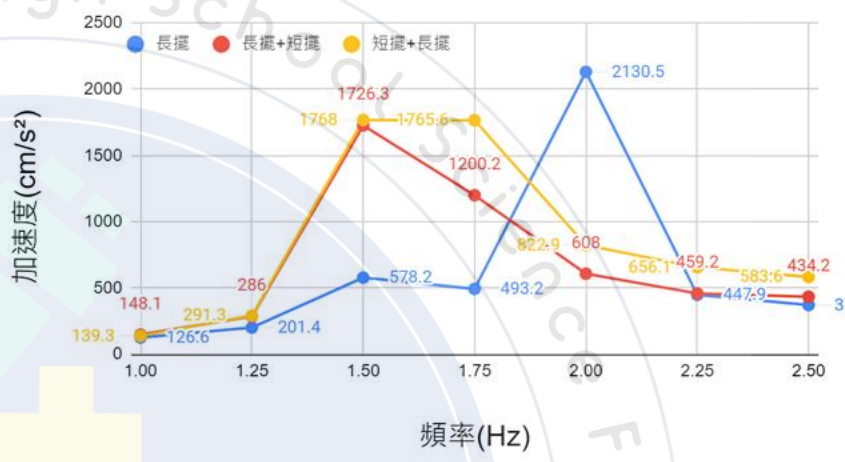
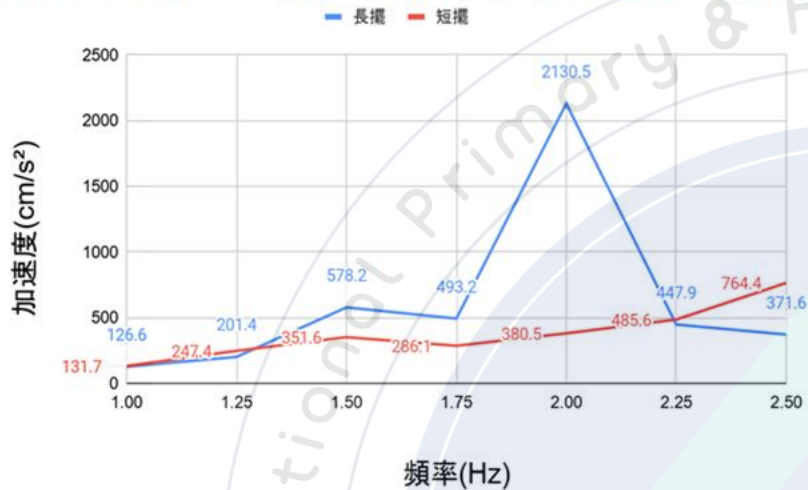
● 高寬比4:3

● 高寬比8:3



高寬比8:3加速度放大率比高寬比4:3大。
重量增加使作用力增加，重心提高使力臂增加，令力矩加大。

實驗結果4 長短擺與各組合擺自然頻率皆不同

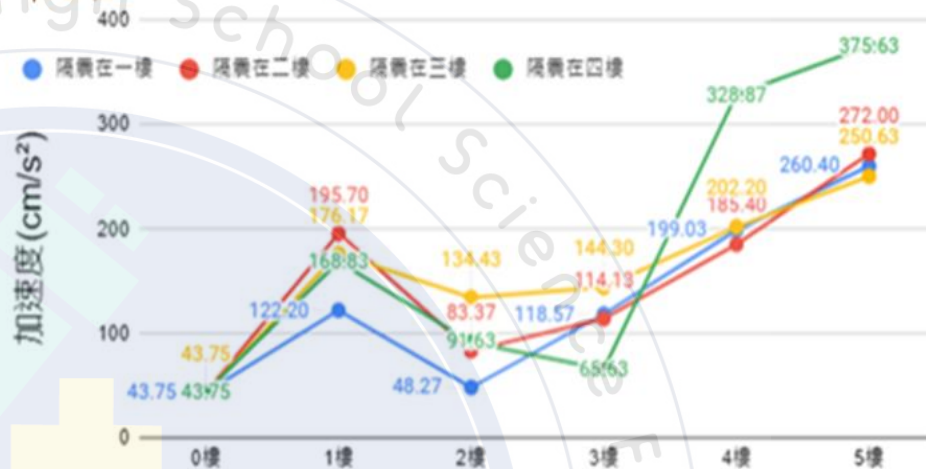
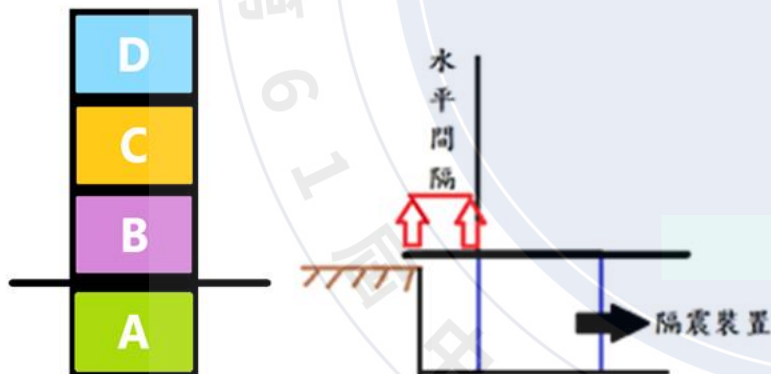


建置隔震裝置，應考量擺長變位幅度。
組數多有多層阻隔效果，但會加重且重心高。

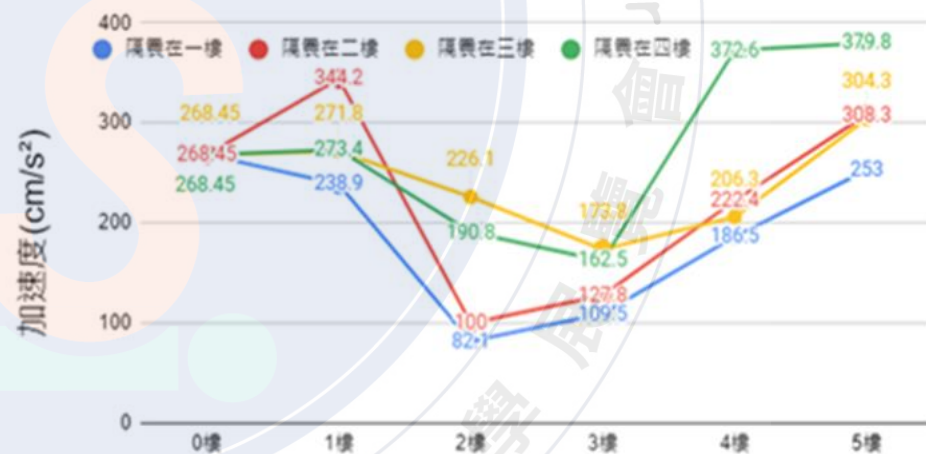
實驗結果5 隔震裝置安裝於底部較佳



● 安裝於不同樓層



0.75Hz



2Hz

◎無地下層或僅有一層，隔震安置於A處佳

◎地下層深，所需水平間隔大，隔震置於B處佳

隔震安裝於最底層有較佳效果。

實驗結果6 液體與針筒阻尼消能減震與隔震為一拮抗作用

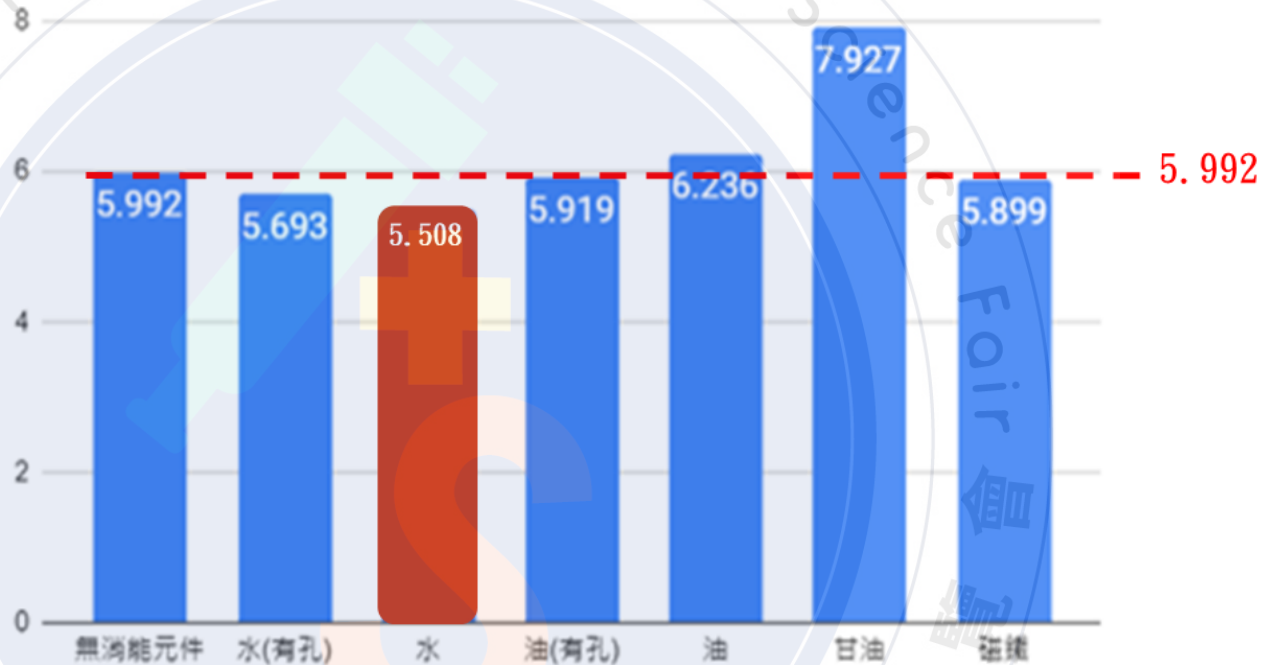


● 液體阻尼



● 磁鐵相斥阻尼

加速度放大率



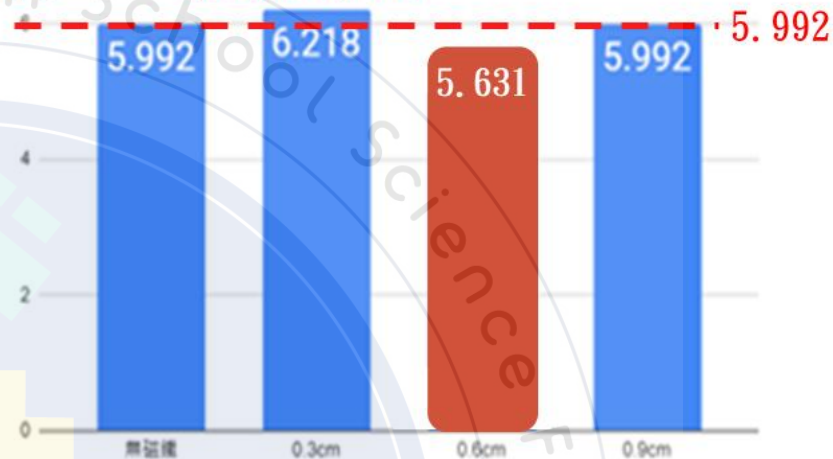
● 不同消能元件

適當黏稠度下的消能元件與隔震裝置搭配可降低建物晃動。

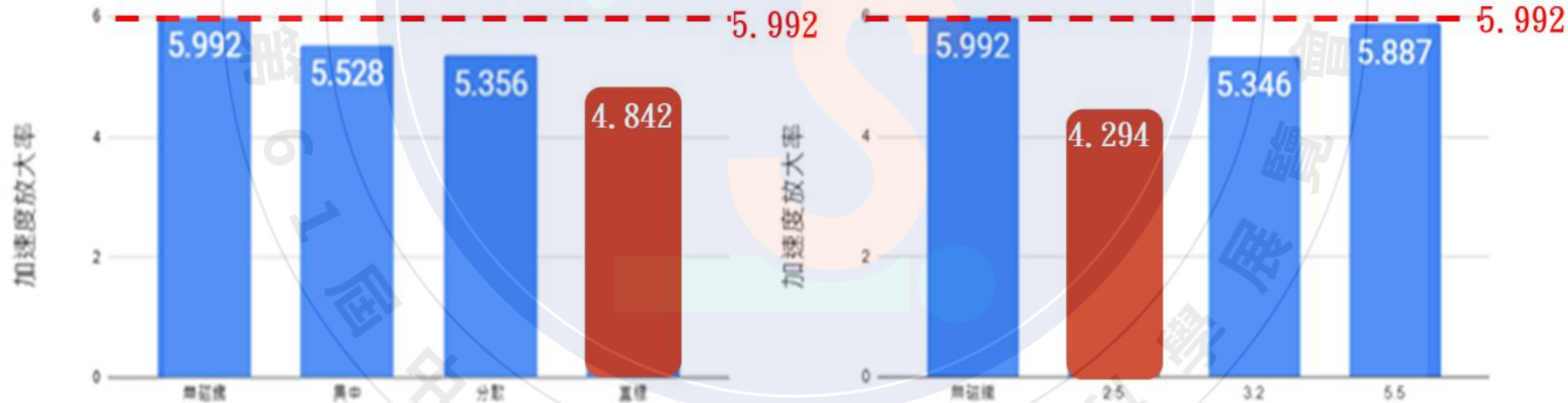
實驗結果7 電磁阻尼消能減震與隔震為一拮抗作用



● 電磁阻尼



● 磁鐵與鋁板距離

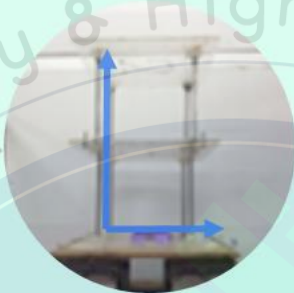
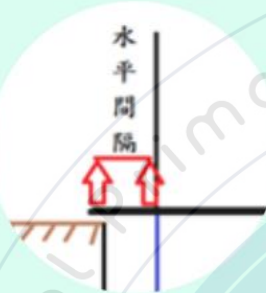


● 磁鐵擺放方法

● 磁鐵厚度

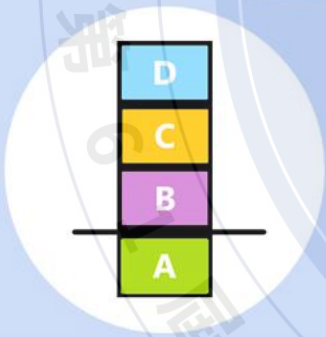
電磁阻尼大小有一適切範圍，阻尼太小則消能不顯著，阻尼太大則造成隔震效果不佳晃動加劇

結論



隔震裝置擺幅需較地震最大振幅大，擺幅影響最大水平移動距離。
隔震最大水平移動距離與可承載最大重量，決定建物最大高寬比。

單向的隔震裝置疊三層，彼此之間夾角以120度擺放也許能解決方向性問題。

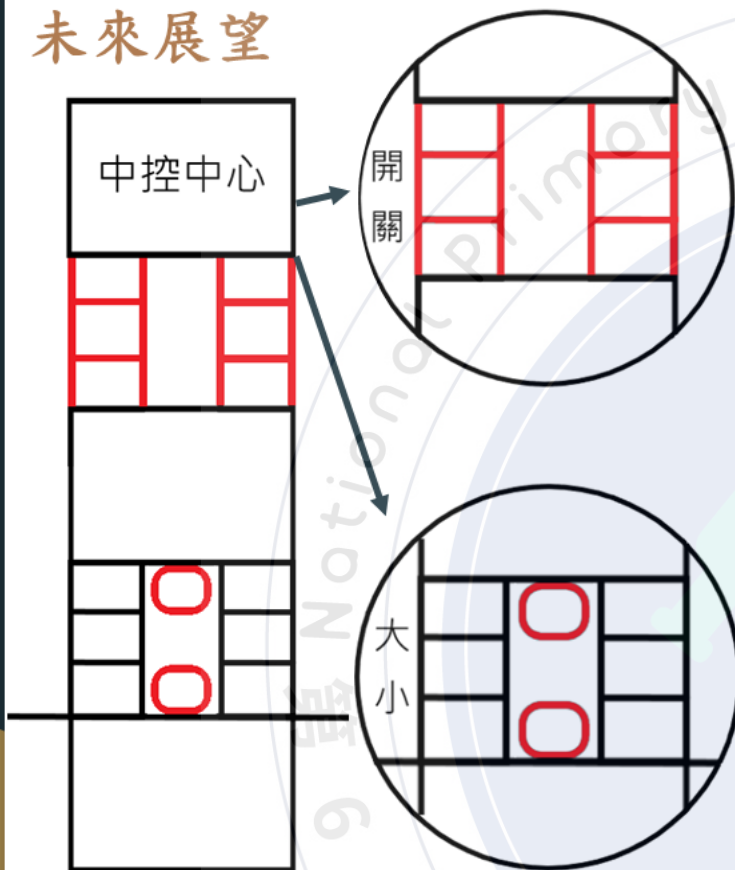


大樓高寬比大，地下層較深，建議隔震置於B處。
大樓高寬比小，地下層較淺，建議隔震置於A處。



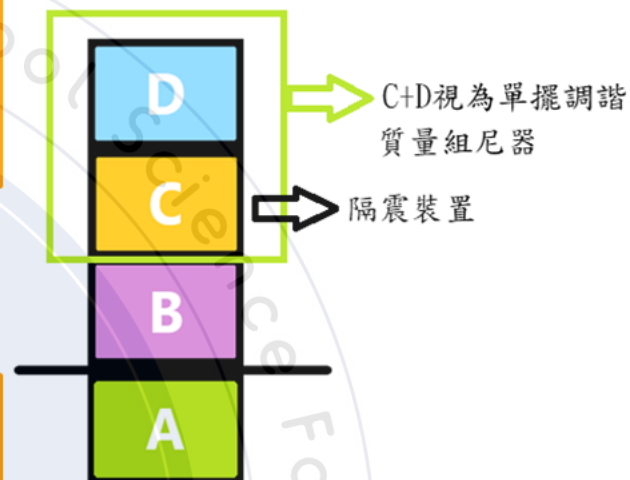
阻尼在適當範圍內，隔震與消能均可維持其有效作用時，可使建物晃動降低。

未來展望



建置複合式隔震，藉由開關中間層隔震，避開共振頻率。

不同震度下之最佳阻尼是否會相同呢？若不相同，或許可利用電磁鐵，藉由中控台控制電磁鐵強弱，調整至適當阻尼大小。



將隔震置於C處，並使得上層C+D的自然頻率與下層A+B的自然頻率相同時，是否能同時對上層隔震及對下層制震呢？

參考文獻

1. 陳郁煊、廖芟秀、陳俊融(2019)。「震震有池-水塔阻尼器設計及減震效能探討」·中華民國第59屆中小學科學展覽會。
2. 林宥禎、楊安鈞(2020)。「屋欲靜而電不止-探究冷次定律在建築物的減震運用」·中華民國第60屆中小學科學展覽會。
3. 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。