

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

第三名

030502

「非」天「頓」地—非牛頓流體阻尼的減震效果
與建物即時監測研究

學校名稱： 新北市立海山高級中學

| | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 作者： 國二 李語庭 國二 應沅蓁 | 指導老師： 林鈺龍 張惟捷 |
|---------------------------------|-----------------------------|

關鍵詞： 阻尼、地下室、減震

摘要

本研究探討非牛頓流體阻尼位於地上不同樓層及地下室的減震效果。我們以樂高動力積木搭配伺服馬達及程式控制器自製地震模擬器，體積較小，且能透過調整程式的功率模擬不同震度的 S 波，進而討論不同震度在相同變因中的差異。此外，我們為建築物設計地下室結構，並將非牛頓流體阻尼放入地下室外牆，觀察減震效果，實驗得知，地下室外牆放入阻尼皆較填入輕黏土更減震。同時，我們也製作不同長細比及不同建材的建築，分析數據後得出最減震、最具安全性的結構比例和建築材料。並比較建築上不同重心高度及搖晃時間長短對非牛頓流體減震效果的影響。最後，利用 Arduino 超聲波測距模組進行建築傾斜觀測，提高建築各面向的安全性。

壹、前言

一、研究動機

臺灣位在板塊交界處，是個地震頻繁的國家，加上人口密集，地震往往造成許多房屋倒塌、人口傷亡，因此，減震的技術值得我們探討與發展。舉例來說，台灣最高的大樓-101 大樓第 87~92 層中，有一顆巨大的阻尼球，利用慣性定律減輕大樓的搖晃程度。看了過往關於阻尼的參賽作品後，我們發現各組模擬地震的機器都較為簡易，例如第 56 屆科展《屹立不搖 - 以積木模型模擬建築物探討地震 S 波的影響》，模擬器利用滑車加橡皮筋製成；隔年科展作品則是改造足部搖擺機，皆無法改變震度大小，所以我們決定自製一個能夠調整前後搖晃程度的模擬地震儀，並為建築物加上地下室，除了能讓建築物更堅固，也更符合現今建築樣貌，也期許研究結果，能夠實際運用於生活。

二、研究目的

- (一) 將手機置於不同樓層觀察加速度變化，並分析造成此變化的可能因素
- (二) 以 60%比例的太白粉水(非牛頓流體)進行實驗，比較不同樓層、震度的減震效果差異，並探討造成差異的原因
- (三) 設計地下室結構的建築，對比在有無地下室的建築上測出的加速度
- (四) 比較地下室外牆填入輕黏土、直接倒入阻尼、放入裝有阻尼的夾鏈袋三者的減震效果差異，並探討其中可能原因。
- (五) 製作不同長細比的建築，在地下室加入阻尼，比較其減震效果差異
- (六) 探討地震搖晃時間長短以及重心高低對非牛頓流體阻尼減震效果的影響
- (七) 觀察鋼骨、鋼筋、木棒建築相同變因下的加速度和非牛頓流體減震效果
- (八) 利用超聲波測距模組進行建築傾斜監測，確認是否能應用於生活中

三、 文獻回顧

(一) 歷屆科展研究探討

臺灣處於菲律賓海板塊和歐亞大陸板塊交界帶，地震相當頻繁，九二一地震時，台灣數以萬計的房子倒塌或傾斜，也因此在地震後，對於房子結構與設計有更嚴謹的檢視，也在建築的減震方面多了不少研究。為了能更了解有關於地震與減震的資料與知識，查詢歷年類似的科展，搜尋到以下幾件作品：「天不搖，地不動－非牛頓流體在建築結構抗震之應用」、「屹立不搖－以積木模型模擬建築物探討地震 S 波的影響」、「游泳池可以減震耶！－流體阻尼的研究」、「震震有池－水塔阻尼器設計及減震效能探討」、「自行設計的實驗研究多層水箱擋水器結構響應的緩解(Experimental Study on Self-designed)」、「阻尼器對鋼骨大樓之影響」，藉由歷年研究報告的了解與探討，希望能從中汲取優點，以及其中不足之處，作為研究的基礎及參考。

首先是第 51 屆科展中的「天不搖，地不動－非牛頓流體在建築結構抗震之應用」，其中研究者先使用高速攝影機拍攝，再以分格分析計算不同非牛頓流體(玉米粉、太白粉、地瓜粉與水)在不同質量比(20%、40%、60%、80%)時的最大抗阻力。接著利用自製黏滯力測定儀，以自製磁浮軸承來降低摩擦力，並用光電式計時器測出黏滯力。之後使用自製撞擊製震器，用斜坡上的滑車撞擊承載流體的滑車，以高速攝影機拍攝流體中柱子的搖晃頻率，再分格分析。最後使用自製地震模擬器，其中的移動平台是以輪胎驅動，加上抽屜滑軌使其能左右晃動，並用網路攝影機由上拍攝，觀測平台上紅點的路徑，判斷其對建築的破壞程度。最後結果得出黏滯性最高的麥芽糖避震效果最佳，玉米粉液則次之。

而第 56 屆中小學科學展覽會中「屹立不搖－以積木模型模擬建築物探討地震 S 波的影響」，其目的在探討何種建築結構能達成最佳的減震效果。研究者下載軟體 AccelView 測量地震時的加速度大小，自製滑車及橡皮筋製造震動平台，以模擬地震情況。當地下室加深時，建物的抗震能力提升。建物越低，底面積越大，抗震能力越佳。突出造型的建物在連結處地震時容易造成受損。當梁柱位置不對稱或數量不足時，地震會造成其產生轉動，容易因扭轉而倒塌。

在第 57 屆科學展覽會裡其中一個作品「游泳池可以減震耶！－流體阻尼的研究」，其中的地震模擬器是由足部震動器改裝而成，水平來回移動，週期約為 0.35 秒/次。經過研究者實驗，凝膠狀流體減震效果最明顯。適當的黏稠度(密度約為 1.135g/cm^3 的太白粉凝膠液)減震效果最好，有約 21% 減震效果；若加細網隔間，減震效果則超過 27%。研究建議一般大樓可在約 85% 樓高的位置放置適當大小、裝適當黏

稠度的凝膠液槽或游泳池，能達到不錯的減震效果。

而第 59 屆科展中的「震震有池—水塔阻尼器設計及減震效能探討」，其研究目的在於探討影響水塔阻尼器減震效能之因素。研究者以自製建物及水塔、彈射平台與地震晃動平台進行實驗，地震晃動平台以電鑽為動力來源，由調光器調整電流以調整頻率，連接連桿與電鑽的鐵片長度則可調整幅度。實驗得知，水體會因共振效應而吸收震動能量，若水塔底部改為曲面，能使水體更易晃動而有效吸收大樓晃動能量；另一種影響因子為阻尼大小，網子、內部粗糙度、浮球及隔板開啟狀態均影響阻尼。隔板開啟越高，水體自然頻率越低，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水塔阻尼器更易調整水體自然頻率。

在 54 屆科展中的「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震效應」一篇研究當中，研究者製作震盪平台，使用不鏽鋼彈簧及鐵片焊接固定而成。另外設計木製斜坡軌道、基準台及中隔擋板，可控制鉛球沿斜坡落下撞擊震動台。實驗總結空瓶中的水於振動時因慣性定律的影響，產生即時性的反向拉力進而減弱振幅。

第 58 屆科展中的「制震阻尼系統在縮尺建物消能運用之初步評估探討」中，利用自製制震阻尼系統及縮尺建物模型模擬位移、軸力與加速度，得出結果為位於第 7 樓層的阻尼表現為最佳，因此得出阻尼器安裝為 2/3 樓層以上為佳的結論。

第 60 屆科展作品「屋欲靜而電不止—探究冷次定律在建築物的減震運用」，以自製倒置平台、阻尼裝置與外力調頻器進行實驗，當阻尼器晃動頻率與大樓晃動頻率接近時，能產生共振，進而有效吸收大樓晃動之能量，實驗結果顯示，無論是液體阻尼還是磁鐵同性相斥阻尼元件，只要振動頻率接近，都能提高減震效果。

第 61 屆科展作品「地動山不搖—隔震裝置在建築物之應用與探究」，以自製省力曲柄晃動裝置、自製外力調頻系統及自製擺盪式隔震裝置作為實驗器材。安裝自製擺盪式隔震裝置的建物自然頻率會比無安裝的低一點。地震波方向若與隔震裝置方向平行有較佳效果，而地震波可能從不同方向傳入，所以作者推測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，解決地震波來自不同方向的問題。

縱覽歷年豐富的研究資料與報告，在使用工具的方面，發現過去已有許多研究針對模擬地震製作模擬平台，但利用樂高積木製作，使用程式驅動目前還沒有前輩研究過；而在研究內容中，有針對不同非牛頓流體的避震實驗，也有探討各種建築結構的

減震效果之研究，另外也有研究者設計流體阻尼器，和研究水塔阻尼的減震因素，也有針對 101 大樓進行模擬，驗證其減震效應，最後，也有不同樓層的減震效果比較，但在地下室或地基方面，較少研究者與非牛頓流體阻尼結合，本研究希望結合地下室和非牛頓流體阻尼，進行減震效果的探討。

(二)地震波定義及簡介

地震波主要分成：主要分為體波（在地球內部傳遞，P 波和 S 波）及表面波（在表面傳遞，洛夫波和雷利波）

P 波是最早到達的波。地球內部介質的震動方向與震波能量傳遞方向平行，震波以前後壓縮、縱波的方式向外傳遞。因為壓縮力在固體、液體中都能存在，因此 P 波能在固體和液體中傳播。

S 波速度僅次於 P 波。S 波是橫波，地球內部介質的震動方向與震波能量傳遞方向垂直，使介質扭曲，由於此種特性，故 S 波無法在液體或氣體中傳播。

$$S \text{ 波傳播速度的公式: } v_S = \sqrt{\mu / \rho}$$

$$P \text{ 波傳播速度的公式: } v_P = \sqrt{(k + 4/3\mu) / \rho}$$

k=體積模數、 μ =剪切模數(液、氣態為 0)、 ρ =介質密度

(三)101 阻尼球原理及簡介

101 大樓 92 樓到 87 樓之間，以 12 公尺長的纜索，懸掛了一顆重達 660 噸的質量塊。纜索的上方固定在 92 樓，下方的質量塊則垂掛在 87 樓，並且以 8 支阻尼器與樓板連接，組成單擺式的「調諧質塊阻尼器減震系統，(Tune Mass Damper)」。

當 101 大樓承受風壓而擺動時，懸掛的質量塊因為「質量慣性作用」，透過質量塊的重量，以鋼纜拉住大樓，並以反方向的擺動抵銷大樓的晃動。

地上樓層的阻尼(實驗一)與 101 大樓阻尼球的原理相似，地下室周圍的阻尼至於建築外(地下室外牆)，不會影響建築整體的重心，阻尼質量不影響減震。

(四)新舊制震度分級表比較

| 地震震度階級對照最大地動加速度值 (PGA) 範圍表，震度 4 級(含) 以下依 PGA 決定 | | | | | | | | | | |
|---|------|---------|---------|--------|-------|--------|---------|---------|---------|------|
| 震度階級 | 0 級 | 1 級 | 2 級 | 3 級 | 4 級 | 5 弱 | 5 強 | 6 弱 | 6 強 | 7 級 |
| PGA (cm/s ²) | <0.8 | 0.8~2.5 | 2.5~8.0 | 8.0~25 | 25~80 | 80~140 | 140~250 | 250~440 | 440~800 | >800 |

| 新地震震度階級對照最大地動速度值 (PGV) 範圍表，震度 5 級(含) 以上依 PGV 決定 | | | | | | | | | | |
|---|------|---------|---------|---------|--------|-------|-------|-------|--------|------|
| 震度階級 | 0 級 | 1 級 | 2 級 | 3 級 | 4 級 | 5 弱 | 5 強 | 6 弱 | 6 強 | 7 級 |
| PGV (cm/s) | <0.2 | 0.2~0.7 | 0.7~1.9 | 1.9~5.7 | 5.7~15 | 15~30 | 30~50 | 50~80 | 80~140 | >140 |

圖 1、新舊制震度分級表(出自科學月刊第 603 期)

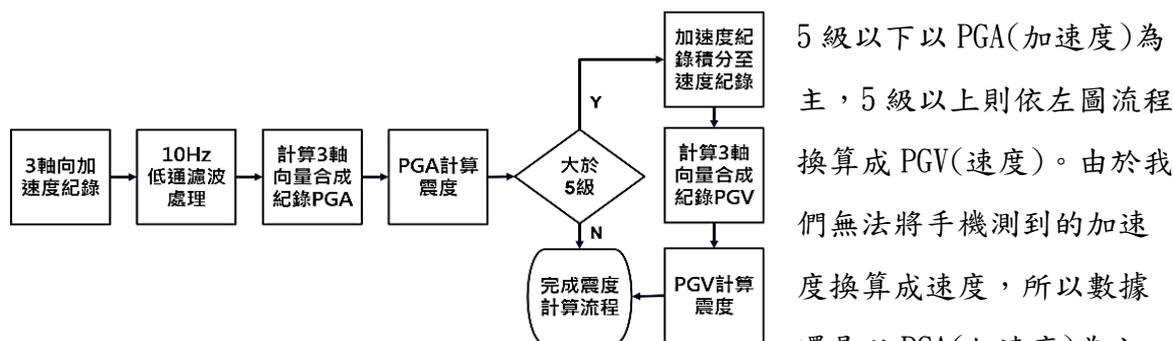


圖 2、新制震度加速度及速度換算(出自中央氣象局地震測報中心)

5 級以下以 PGA(加速度)為主，5 級以上則依左圖流程換算成 PGV(速度)。由於我們無法將手機測到的加速度換算成速度，所以數據還是以 PGA(加速度)為主。



圖 3、研究架構圖

貳、研究設備及器材

一、地震模擬器器材

(一) Ev3 classroom 樂高積木+馬達+資料盒--1 組

二、自製建築物(第二版)

(一) 珍珠版(0.5cm*10cm*12cm)

(二) 竹棒\鉛棒\鉛線*4(直徑 0.5cm，長 60cm)、鐵絲(直徑 0.1、0.3、0.5cm)

三、地下室製作

(一) 紙盒*2(10cm*12cm*10.5cm、14cm*16cm*10.5cm)

(二) 塑膠盒*1(17cm*20cm*10.5cm)

(三) 壓克力盒*3(10cm*12cm、12.5cm*16cm、14.5cm*17.5cm，高均為 10.5cm)

參、研究過程或方法

一、 實驗過程

(一) 地震模擬器製作

用樂高積木製作出平台和軌道，再以連接桿連接，最後加上馬達、連接電腦中的 EV3 classroom，以程式讓馬達牽動平台移動。我們共作了兩版地震模擬器，第一版模擬器是架設用來放建築的平台於軌道上，如圖 4、6，但承重過重時，平台會脫離軌道，因此設計第二版。第二版模擬器將軌道改成兩層，中間有一層凹槽，將盒子卡在凹槽中，如圖 5、7，運作時更穩定，避免脫軌。

模擬器模擬的震波為表面波中的 S 波，所以我們取用的數值是 Phyphox 程式中 X 欄，也就是和震波平行的加速度值

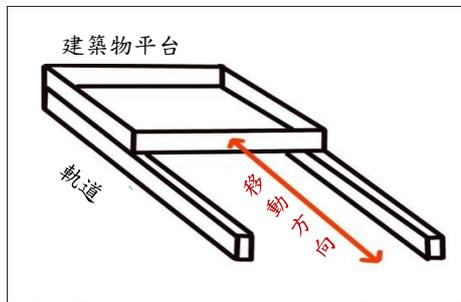


圖 4、第一版地震模擬器設計圖

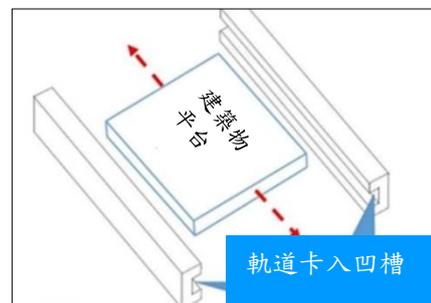


圖 5、第二版地震模擬器設計圖

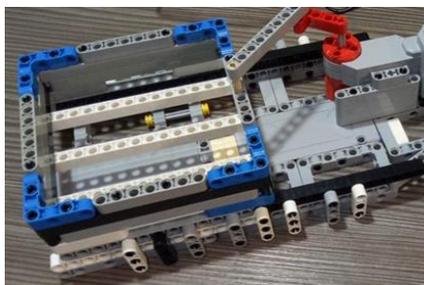


圖 6、第一版地震模擬器（由第一作者拍攝）



圖 7、第二版地震模擬器（由第二作者拍攝）

(二) 模擬器馬達功率對照震度

1. 說明:對照不同等級的震度及加速度，並找出相對應的馬達功率

2. 步驟:

- (1) 利用手機的 Phyphox 程式的不含重力加速度測出各功率的震波
- (2) 排除一開始無規律的波，取之後有規律的波中數值最大的一點
- (3) 調整程式中的功率，並以同樣的方式找出各震度最大/小值

每個震度的加速度數值為一個範圍，但由於加速度和功率的上升並不完全成正比，因此我們利用 Excel 得出公式，將該震度加速度的最大值和最小值的平均套入公式，得出各震度實驗時固定使用的功率

表 2、各震度固定功率計算方法

| | | | |
|---|---------|------------------|----------------|
| 輸入該震度範圍內的功率及加速度數值 | 以震度五強舉例 | | |
| | 功率 | 加速度 | |
| | 6.75% | 144 | |
| | 7% | 158 | |
| | 9% | 204 | |
| 畫出折線圖，並顯示趨勢線和公式（y 為加速度，x 為功率） | 震度 | 公式 | R ² |
| | 5 弱 | y=687.92x+95.954 | 0.9159 |
| | 5 強 | y=3009.9x-57.232 | 0.9805 |
| | 6 弱 | y=2191.3x+41.14 | 0.972 |
| | 6 強 | y=1029.7x+289.61 | 0.9477 |
| | 7 級 | 由於沒有最大值，另外計算 | |
| 計算該震度最大及最小加速度（cm/s ² ）平均帶入公式 | 震度 | y 值=加速度 | x 值=功率 |
| | 5 弱 | 130.5 | 5 |
| | 5 強 | 191.5 | 8.2 |
| | 6 弱 | 338.5 | 13.5 |
| | 6 強 | 619.5 | 32 |

表 1、各震度功率最大、小值(與標準差 10cm/sec²內)

| 震度 | 標準 (cm/s ²) | 最小值 (cm/s ²) | 最大值 (cm/s ²) |
|-----|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 5 弱 | 80~140 | 3%:119 (2%不穩定) | 6.5%:142 |
| 5 強 | 140~250 | 6.5%:142 | 9.75%:241 |
| 6 弱 | 250~440 | 9.75%:241 | 17.75%:436 |
| 6 強 | 440~800 | 17.75%:436 | 53.5%:803 |
| 7 級 | 800 以上 | 53.5%:803 | 無上限 |

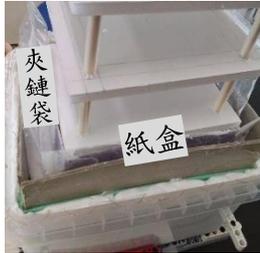
(三) 模擬建築製作:由於第一版製作完後發現手機寬度大於樓板，無法置於樓板上測量，我們將樓層板加寬，並以較易切割的保麗龍板製作。

表 3、製作模擬建築

| | 第一版 | 第二版 |
|----|--|--|
| 材料 | 冰棒棍、白膠、細吸管、木筷 | 珍珠板、細吸管、60 公分竹棍 |
| 步驟 | 1. 製作 13 片樓板(最常見的建築 RC 鋼筋混凝土多為 10~15 樓，平均後四捨五入為 13) 2. 測量梁柱位置及與邊緣距離後，在樓地板的四個角鑽洞 3. 將四根竹棍分別穿進四個洞 4. 輪流套入 5(第一版)/3.5(第二版)公分的吸管和板子 | |
| 成品 | (由第一作者拍攝)  | (由第一作者拍攝)  |

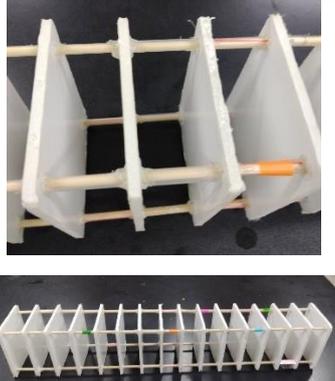
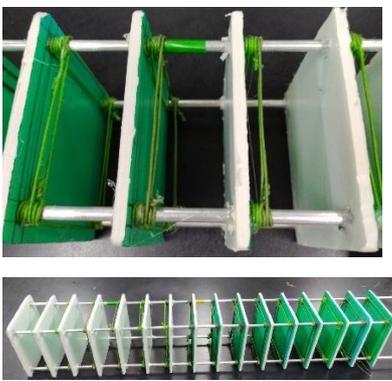
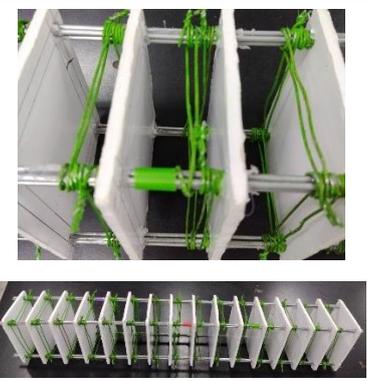
(四) 地下室製作

表 4、製作建築物地下室

| | 第一版 | 第二版 |
|----|--|--|
| 差異 | 使用紙盒、紙板黏製而成 | 使用壓克力塑膠盒 |
| 圖片 | (由第一作者拍攝)  | (由第一作者拍攝)  |
| 優點 | 重量輕，馬達負擔較小 | 防水，可直接倒入阻尼 |
| 缺點 | 紙盒不防水，無法直接倒入阻尼 | 重量重，馬達負擔較大 |

(五) 不同建築材料建築製作

表 5、不同建材建築製作

| 結構 | 木棒 | 鋼骨 | 鋼筋 |
|-----------------|---|--|---|
| 材料 | 直徑 0.5mm 木棒 | 直徑 0.5mm 空心鋁棒 | 直徑 0.3mm*4 條鉛線、鐵絲 |
| 步驟 | 前面已有說明，略過 | 將木棒建築的木棒替換成空心鋁棒，樓板下方與鋼筋相同，以粗鐵絲四面纏繞固定 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 將四根鋼條底部用鐵絲以箍筋工法(旋轉 135 度)，製成四根柱子。 2. 粗鐵絲四面皆纏繞固定 3. 套上樓板，四根柱子上再用鐵絲束緊 4. 重複步驟 2 直到 15 樓 |
| 優點 | 輕便、不會對模擬器造成負擔 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 仿真 2. 較不容易倒榻 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 仿真 2. 感受到的搖晃較小 |
| 缺點 | 無法模擬真實建築 | 無 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 笨重、對模擬器造成負擔 2. 無法模擬鋼筋「混凝土」與現實建築有誤差 |
| 圖片 (由第一作者拍攝) |  |  |  |

二、 實驗方法

為了增加實驗精確，各實驗不同地震震度各做 5 次，刪去最大/小值，取剩餘三者的平均作為數據參考。在減震效果的比較中，減震值 (cm/sec^2) 指未放置減震裝置減掉放置減震裝置的數值；減震率(%)是減震值除以無減震裝置的數值。

(一) 實驗一:相同震度在不同樓層測到的加速度

1. 說明:在各級震度下，將手機置於不同樓層進行實驗，觀察加速度變化
2. 步驟:
 - (1) 輸入設定功率，將建築置於模擬器上，各震度 1~13 樓各測五次

(二) 實驗二: 阻尼位於不同樓層各級震度的減震效果比較

1. 說明:各級震度下，將阻尼置於不同樓層進行實驗，觀察加速度變化。
2. 步驟:
 - (1) 將阻尼置於不同樓層，手機固定在 13 樓利用 Phyphox 測量加速度
 - (2) 對比有無阻尼加速度，比較減震效果
3. 阻尼製作:參考歷屆作品「天不搖地不動-非牛頓流體在建築結構抗震之應用」，最佳減震效果阻尼比例為重量百分濃度 60%(水:太白粉=4:6)。
 - (1) 在盒子中倒入 60 克的太白粉加入 40 毫升的水
 - (2) 攪拌至液體均勻(不會出現粉狀物)

(三) 實驗三:建築物有無地下室的加速度比較

1. 說明:製作建築地下室，比較有無地下室的減震效果
2. 實驗步驟:
 - (1) 根據實驗二結果:阻尼放置 10 樓減震幅度最大，得出阻尼置於 10 樓時，減震效果最好→太白粉重量百分濃度 60%阻尼 100g 置於 10 樓
 - (2) 在模擬器旁放上與地下室等重的金屬棒，以原建築(總共 13 層樓的建築)進行實驗→**對照組(無地下室)裝置，如圖 8**
 - (3) 建築多做兩層樓(總共 15 層樓的建築)，並製作地下室。將地下 1、2 樓放在地下室中→**實驗組(有地下室)裝置，如圖 9**



圖 8、無地下室裝置(由第一作者拍攝)

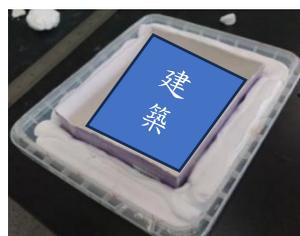


圖 9、地下室結構(由第二作者拍攝)

- (4) 將手機固定置於 13 樓，並進行加速度測量

(四) 實驗四:建築物地下室外牆加阻尼的減震效果

1. 說明: 為了讓地下室能與阻尼產生碰撞, 模擬建築地下室的小盒子底部不固定於中盒子上, 證明結果顯示的減震效果是因為阻尼造成的而不是因為底部固定。於地下室的牆壁與外牆間分別放入夾鏈袋阻尼、直接倒入阻尼、填滿輕黏土, 測量並比較三組數據中阻尼減震效果。

2. 實驗步驟:

(1) 分別以地下室外牆填滿輕黏土(圖 10)、放入裝阻尼的夾鏈袋(圖 11)、直接倒入阻尼(圖 12), 並將手機固定置於 13 樓進行實驗

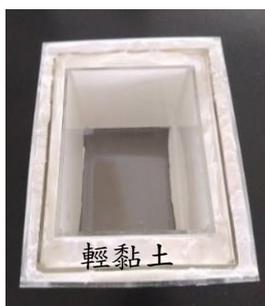


圖 10、填輕黏土的地下室
(由第一作者拍攝)



圖 11、夾鏈袋阻尼的地下室
(由第二作者拍攝)



圖 12、直接倒入阻尼
(由第一作者拍攝)

(五) 實驗五:不同長細比建築的減震效果比較

1. 說明: 改變建物的長細比, 比較減震效果差異。長細比對應到建築物中即是每層樓高(長)及樓板窄邊(細)的比值。前一個實驗得出地下室直接倒入的阻尼有較佳的減震效果, 但直接倒入阻尼後建築會浮起來, 無法有效控制變因, 因此以下實驗我們使用夾鏈袋阻尼進行實驗。

2. 實驗步驟:

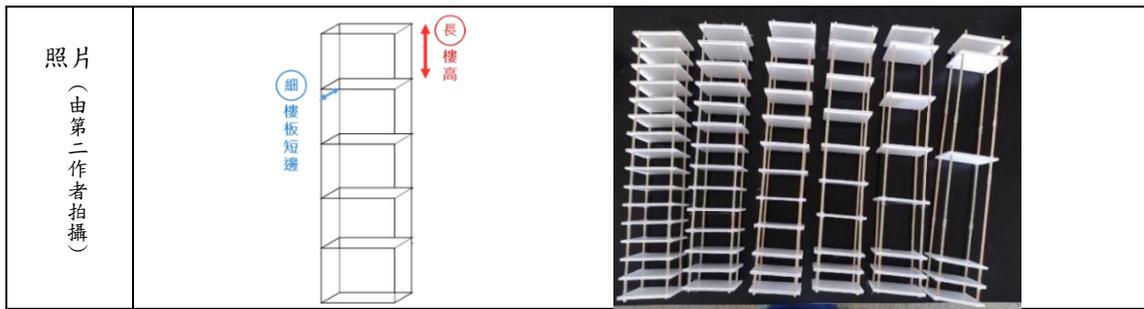
(1) 製作 5 棟長細比不同的建築(B-F, A 為原建築), 結構如表 6 所示

(2) 製作阻尼並倒入夾鏈袋, 放置於地下室外牆中(如實驗四)

(3) 將手機置於 13 樓進行實驗

表 6、建築結構比例計算及製作

| 項目 | 相同的結構 | | 相異的結構 | | | | | | |
|---------------------------|---------|----------|---------------|------|------|------|------|------|------|
| | 地下室 | 頂樓 | 扣除頂樓及地下室的其餘樓層 | | | | | | |
| 說明 | 地下室結構相同 | 手機放置 13F | 建築 | A | B | C | D | E | F |
| | | | 長細比 | 0.43 | 0.53 | 0.67 | 0.89 | 1.32 | 2.67 |
| 樓層間隔+0.5cm 厚的樓板/樓板窄邊 10cm | | | | | | | | | |
| 樓層數 | 2 | 1 | 樓層數 | 12 | 10 | 8 | 6 | 4 | 2 |
| 樓層間隔 (cm) | 3.8 | 3.8 | 樓層間隔 (cm) | 3.8 | 4.8 | 6.2 | 8.4 | 12.8 | 26.2 |
| 樓板窄邊 | 10 cm | | | | | | | | |



(六) 實驗六:不同建材對建築減震效果的影響

1. 說明:比較三種不同建材的建築(木棒、鋼骨及鋼筋建築)地下室外牆放入夾鏈袋阻尼的加速度。

2. 實驗步驟:

根據表 31 統計，過去的地震當中，六弱及六強震度下所倒塌的建築最多，所以接下來的實驗將以六弱及六強進行實驗

- (1) 由於三種建築的重量不一致，所以若給予相同功率的情況下，平台上的搖晃程度引此有所差異。於是我們配置三批和三棟建築等重的重物，置於模擬器上，以相對應的功率進行搖晃，確保模擬器在相同加速度的情況下，探討比較不同建材的差異。

- (2) 將手機置於 13F，將三種建築的地下室外牆放入夾鏈袋阻尼，置於模擬器上，使用步驟(1)得出的功率進行實驗

(七) 實驗七:不同建材搖晃時間長短對加速度的影響

1. 說明:將模擬器(地震)的搖晃時間設為操作變因，加速度為應變變因，觀察不同搖晃時間分別對不同建築的減震效果造成的影響。

2. 實驗步驟:

- (1) 將手機置於 13F，使用實驗六步驟(1)得出的功率進行實驗

- (2) 分別將三種建築的地下室外牆放入夾鏈袋阻尼，置於模擬器上，讓模擬器搖晃 10、20、30、40……至 110 秒，以 10 秒為一個區間，取 11 組加速度(選擇 110 秒作為最久時長是因為 921 大地震約搖晃了 102 秒)。

(八) 實驗八:不同建築上不同重心高度對減震效果的影響。

1. 說明:利用重物調整建築重心，比較不同重心高度對減震效果的影響。

2. 實驗步驟:

- (1) 此實驗平台上的總重與實驗六、實驗七不同(多了重物的重量)，我們用相同的方法找到不同建築的重量適用的功率。

(2) 先利用懸吊法找出手機置於 13F 時，三棟建築的重心所在，當作中間高度的重心。接著將與手機等重的重量分別置於 1F、12F(13F 放置手機)，分別將建築的重心調低及調高。配置出低、中、高三種高度的重心(如表 7)。



圖 13、懸吊法找重心-鋼筋建築
(由第二作者拍攝)



圖 14、懸吊法找重心-鋼骨建築
(由第二作者拍攝)



圖 15、懸吊法找重心-木棒建築
(由第二作者拍攝)

表 7、不同重心在建築中的高度比例

| 重心 | 木棒 | 鋼骨 | 鋼筋 |
|----|-----|-----|-----|
| 低 | 56% | 54% | 54% |
| 中 | 76% | 68% | 60% |
| 高 | 82% | 74% | 66% |

(3) 將手機置於 13F，將三種建築的地下室外牆放入夾鏈袋阻尼，置於模擬器上，調整不同重心，使用步驟(1)得出的功率進行實驗

(九) 實驗九:建物即時監測之應用

1. 說明:我們利用 Arduino 超聲波測距模組進行監測，觀察測出的數據變化判斷建物是否有下陷、傾斜的情形。

2. 實驗步驟:

(1) 將四組 HC-SR04 模組連線 Uno 板，再連接 Arduino IDE 程式，使用 New Ping 範本修改，讓 HC-SR04 能測出距離

(2) 將四組 HC-SR04 固定於建築 13 樓，利用兩支 30cm 的尺架設(由於 HC-SR04 測到的距離是 15 度角的範圍，需與建築間隔一定的距離，避免超聲波偵測到建築樓板或柱子)，如圖 16、17 所示



圖 16、Uno 板架設
(由第一作者拍攝)

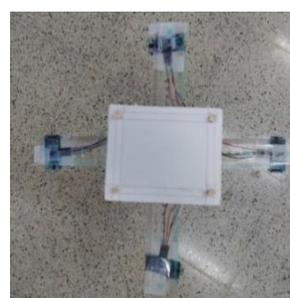
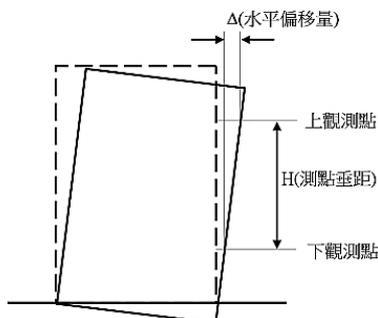


圖 17、四組 HC-SR04 架設
(由第一作者拍攝)

- (3) 將四組模組的距離控制相同(相差 2cm 內)並觀測數據。若建築傾斜，其中兩組數值會不同；若建築下陷，四組數值會同時變小。
- (4) 墊高建築，製造出建築傾斜，兩組相異數值相減，得到高度差，並計算傾斜率。



Δ = 傾斜水平偏移量，H = 上下測點垂直距離，傾斜率 = Δ/H

圖 18、傾斜率計算(出自 HM 建築建材工程)

- (5) 台灣省土木技師公會規定，房屋傾斜率超過 1/40，應該重建。

肆、研究結果

一、地上樓層實驗(無地下室)

(一) 實驗一：同震度在不同樓層測到的加速度

| 震度 | 1F (cm/s ²) | 2F (cm/s ²) | 3F (cm/s ²) | 4F (cm/s ²) | 5F (cm/s ²) | 6F (cm/s ²) | 7F (cm/s ²) | 8F (cm/s ²) | 9F (cm/s ²) | 10F (cm/s ²) | 11F (cm/s ²) | 12F (cm/s ²) | 13F (cm/s ²) |
|-----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 5 弱 | 134 | 127 | 88 | 74 | 65 | 60 | 47 | 58 | 40 | 37 | 34 | 46 | 48 |
| 5 強 | 232 | 156 | 122 | 111 | 110 | 87 | 70 | 74 | 74 | 55 | 57 | 50 | 68 |
| 6 弱 | 273 | 266 | 194 | 143 | 141 | 117 | 100 | 101 | 90 | 98 | 94 | 114 | 110 |
| 6 強 | 460 | 430 | 420 | 364 | 304 | 257 | 322 | 354 | 282 | 178 | 211 | 256 | 292 |
| 7 級 | 701 | 631 | 550 | 578 | 592 | 589 | 660 | 867 | 902 | 1235 | 908 | 637 | 495 |

表 8、各震度不同樓層加速度值

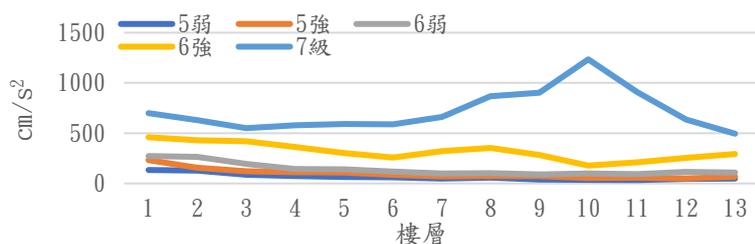


圖 19、各震度不同樓層加速度值比較

(二) 實驗二：阻尼位於不同樓層各級震度的減震效果比較

表 9、阻尼位於不同樓層各震度加速度比較

| 樓層 | 無阻尼 | 有阻尼 | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | 1F (cm/s ²) | 2F (cm/s ²) | 3F (cm/s ²) | 4F (cm/s ²) | 5F (cm/s ²) | 6F (cm/s ²) | 7F (cm/s ²) | 8F (cm/s ²) | 9F (cm/s ²) | 10F (cm/s ²) | 11F (cm/s ²) | 12F (cm/s ²) | 13F (cm/s ²) |
| 5 弱 | 52 | 46 | 47 | 46 | 50 | 49 | 49 | 47 | 39 | 40 | 54 | 50 | 34 | 36 |
| 5 強 | 68 | 33 | 32 | 30 | 34 | 33 | 33 | 32 | 36 | 32 | 38 | 52 | 46 | 35 |
| 6 弱 | 112 | 72 | 73 | 71 | 84 | 70 | 68 | 93 | 110 | 68 | 83 | 64 | 120 | 75 |
| 6 強 | 362 | 203 | 187 | 187 | 176 | 183 | 214 | 200 | 185 | 218 | 235 | 229 | 245 | 228 |
| 7 級 | 527 | 519 | 520 | 512 | 514 | 512 | 481 | 499 | 470 | 480 | 407 | 453 | 502 | 507 |

表 10、阻尼位於不同樓層減震值比較(減震值=無阻尼-有阻尼)

| 震度 | 1F | 2F | 3F | 4F | 5F | 6F | 7F | 8F | 9F | 10F | 11F | 12F | 13F | 平均 (cm/sec ²) |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------------------------|
| 5弱 | 6 | 5 | 6 | 2 | 3 | 3 | 5 | 13 | 12 | -2 | 2 | 18 | 16 | 7 |
| 5強 | 35 | 36 | 38 | 34 | 35 | 35 | 36 | 32 | 36 | 30 | 16 | 22 | 35 | 32 |
| 6弱 | 40 | 39 | 41 | 28 | 42 | 44 | 19 | 2 | 44 | 29 | 48 | -8 | 37 | 31 |
| 6強 | 159 | 175 | 175 | 186 | 179 | 148 | 162 | 167 | 144 | 127 | 133 | 117 | 134 | 154 |
| 7級 | 8 | 7 | 15 | 13 | 15 | 46 | 28 | 57 | 47 | 120 | 74 | 25 | 20 | 37 |
| 平均 | 50 | 52 | 55 | 53 | 55 | 55 | 50 | 54 | 57 | 61 | 55 | 35 | 48 | |

表 11、阻尼位於不同樓層減震效果百分比比較

| 百分比計算:減震值/無阻尼加速度 | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 震度 | 1F | 2F | 3F | 4F | 5F | 6F | 7F | 8F | 9F | 10F | 11F | 12F | 13F | 平均% |
| 5弱 | 11.5 | 9.6 | 11.5 | 3.9 | 5.8 | 5.8 | 9.6 | 25.0 | 23.1 | -3.9 | 3.9 | 34.6 | 30.8 | 13.2 |
| 5強 | 51.5 | 52.9 | 55.9 | 50.0 | 51.5 | 51.5 | 52.9 | 47.1 | 52.9 | 44.1 | 23.5 | 32.4 | 48.5 | 47.3 |
| 6弱 | 35.7 | 34.8 | 36.6 | 25.0 | 37.5 | 39.3 | 17.0 | 1.8 | 39.3 | 25.9 | 42.9 | -7.1 | 33.0 | 27.8 |
| 6強 | 43.9 | 48.3 | -48.3 | 51.4 | 49.5 | 40.9 | 44.8 | 48.9 | 39.8 | 35.1 | 36.7 | 32.3 | 37.0 | 42.8 |
| 7級 | 1.5 | 1.3 | 2.9 | 2.5 | 2.9 | 8.7 | 5.3 | 10.8 | 8.9 | 22.8 | 14.0 | 4.7 | 3.8 | 6.9 |
| 平均% | 28.8 | 29.4 | 31.0 | 26.5 | 29.4 | 29.2 | 25.9 | 26.7 | 32.8 | 24.8 | 24.2 | 19.4 | 30.6 | |

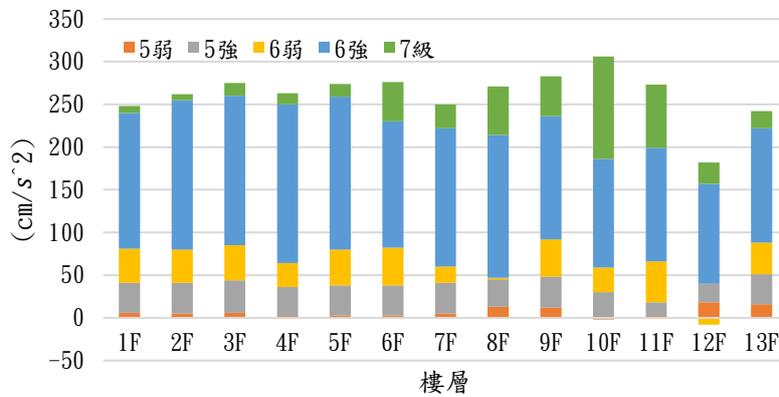
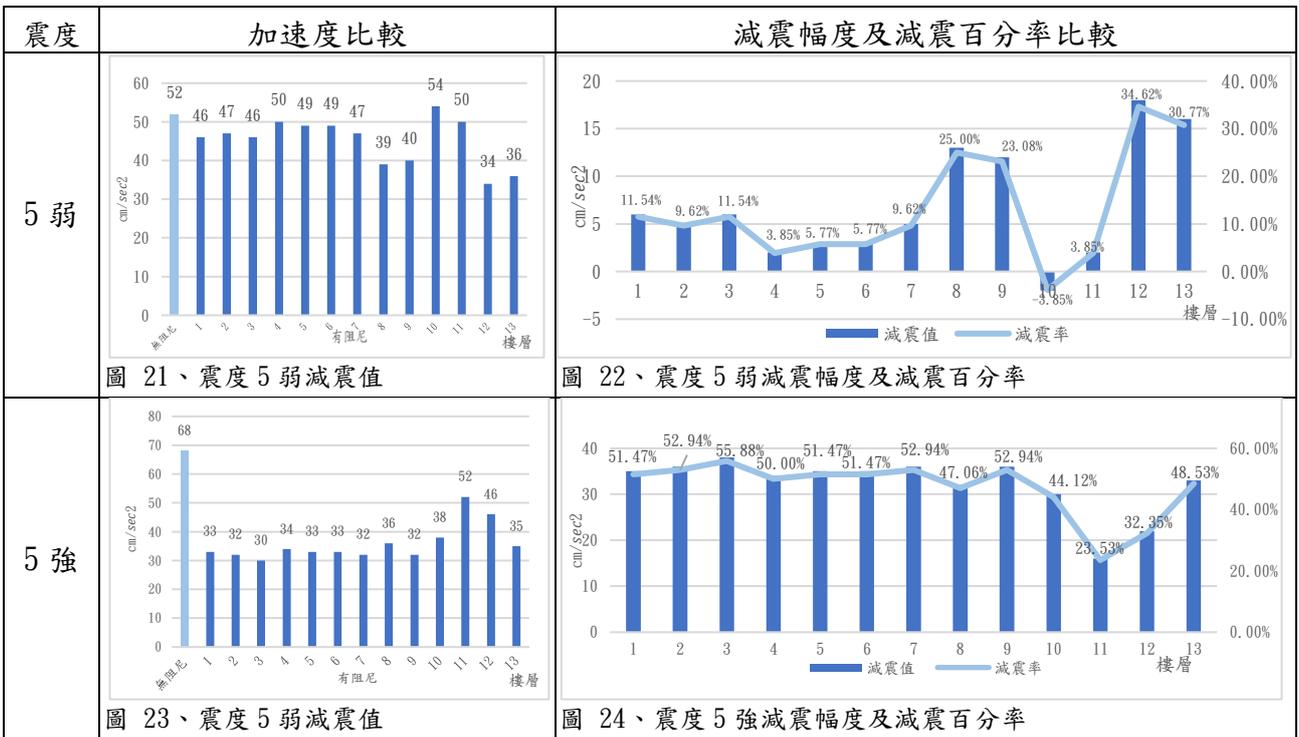


圖 20、阻尼位於不同樓層減震效果加總



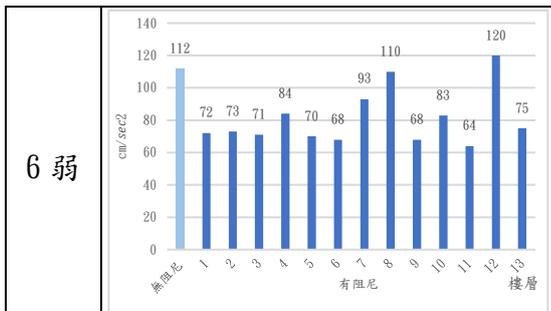


圖 25、震度 6 弱減震值

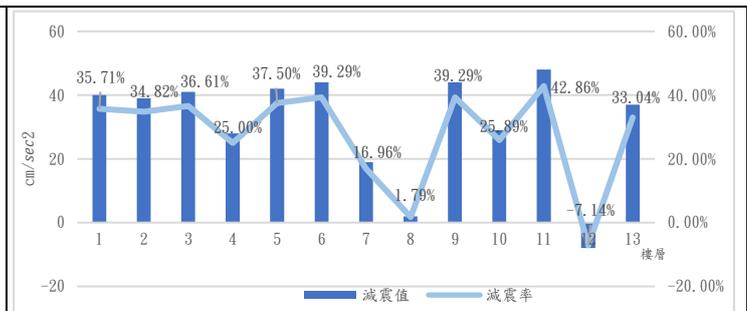


圖 26、震度 6 弱減震幅度及減震百分率

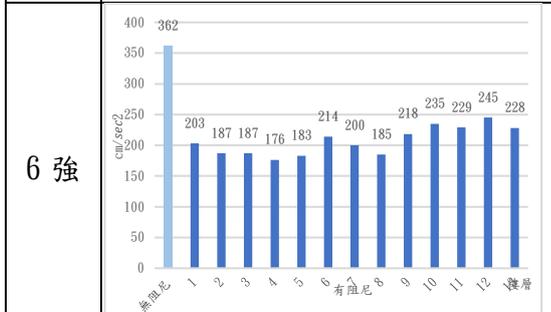


圖 27、震度 6 強減震值

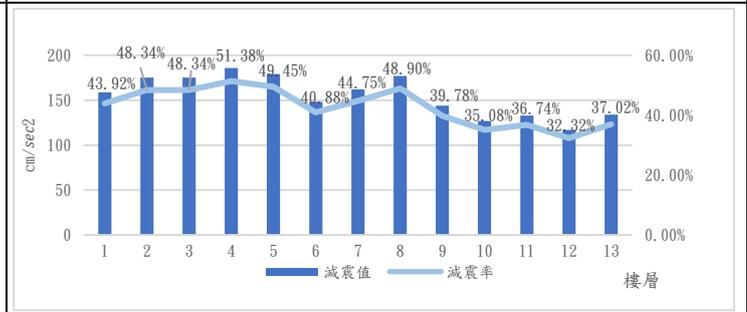


圖 28、震度 6 強減震幅度及減震百分率

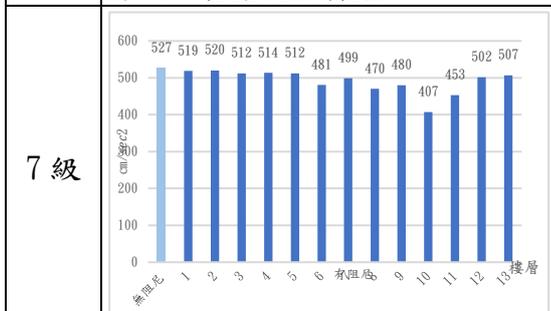


圖 29、震度 7 級減震值

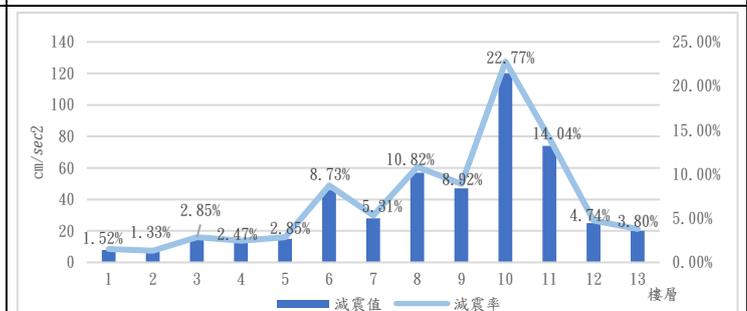


圖 30、震度 7 級減震幅度及減震百分率

二、 地下樓層實驗(有地下室)

(一) 實驗三:建築物有無地下室的加速度比較

表 12、建築物有無地下室加速度值、減震值、減震率

| 震度 | 無地下室 | | | | 有地下室 | | | | 減震值 (cm/s ²) | 減震率 (cm/s ²) |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 (cm/s ²) | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 (cm/s ²) | | |
| 5 弱 | 43 | 43 | 46 | 44 | 32 | 33 | 34 | 33 | 11 | 25.00% |
| 5 強 | 53 | 52 | 49 | 52 | 47 | 46 | 47 | 47 | 5 | 9.62% |
| 6 弱 | 83 | 80 | 80 | 81 | 76 | 74 | 76 | 75 | 6 | 7.41% |
| 6 強 | 214 | 226 | 207 | 216 | 193 | 193 | 194 | 193 | 23 | 10.65% |
| 7 級 | 445 | 449 | 434 | 443 | 347 | 352 | 360 | 353 | 90 | 20.32% |

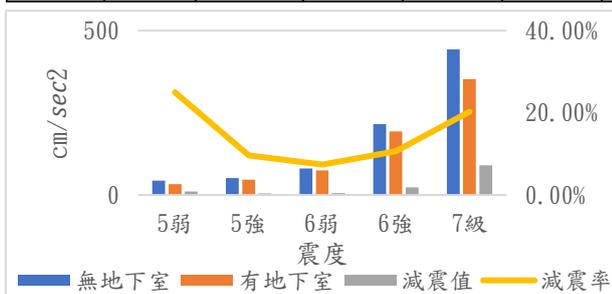


圖 31、建築物有無地下加速度、減震值、減震率比較

由於換成第二版地下室(可防水),我們將手機置於 13 樓,重設定各震度的功率標準(第一版地下室是將手機放在 1 樓設定,由於之後實驗手機皆置於 13 樓,所以重新設定功率),所以之前實驗的加速度和接下來實驗會有些落差。

(二) 實驗四:建築物地下室外牆加阻尼的減震效果

1. B2 底部不固定於地下室中:

*減震值=無阻尼平均加速度-有阻尼平均加速度

*減震率=減震值/無阻尼平均加速度

表 13、地下室外牆放輕黏土、夾鏈袋阻尼加速度值、減震值、減震率

| 震度 | 無阻尼(黏土) | | | | 裝有阻尼的夾鏈袋 | | | | 減震值 平均:-62.6 cm/sec ² | 減震率 平均:-3.03% |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|--|------------------|
| | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² | | |
| 5 弱 | 92 | 94 | 98 | 95 | 126 | 132 | 132 | 130 | -35 | -36.84% |
| 5 強 | 139 | 134 | 137 | 137 | 172 | 168 | 174 | 171 | -34 | -24.82% |
| 6 弱 | 337 | 338 | 334 | 336 | 300 | 296 | 304 | 300 | 36 | 10.71% |
| 6 強 | 459 | 463 | 455 | 459 | 332 | 325 | 349 | 335 | 124 | 27.02% |
| 7 級 | 569 | 564 | 570 | 568 | 341 | 354 | 343 | 346 | 222 | 39.08% |

表 14、地下室外牆放輕黏土和直接倒入阻尼加速度值、減震值、減震率

| 震度 | 無阻尼(黏土) | | | | 直接倒入阻尼 | | | | 減震值 平均:-76.4 cm/sec ² | 減震率 平均:-17.92% |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|--|-------------------|
| | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² | | |
| 5 弱 | 92 | 94 | 98 | 95 | 90 | 91 | 90 | 90 | 5 | 5.26% |
| 5 強 | 139 | 134 | 137 | 137 | 137 | 130 | 137 | 135 | 2 | 1.46% |
| 6 弱 | 337 | 338 | 334 | 336 | 249 | 236 | 245 | 243 | 93 | 27.68% |
| 6 強 | 459 | 463 | 455 | 459 | 311 | 324 | 343 | 326 | 133 | 28.98% |
| 7 級 | 569 | 564 | 570 | 568 | 423 | 416 | 423 | 419 | 149 | 26.23% |

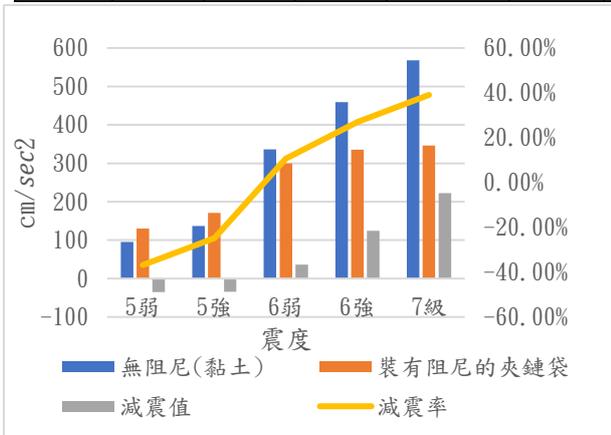


圖 32、地下室外牆放輕黏土、夾鏈袋阻尼加速度、減震值、減震率比較

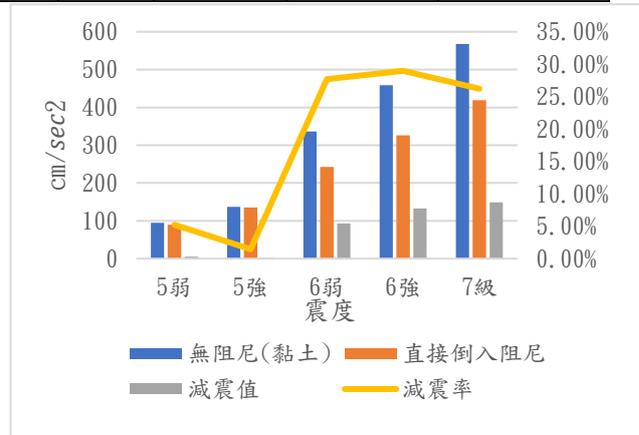


圖 33、地下室外牆放輕黏土、直接倒入阻尼加速度、減震值、減震率比較

(三) 實驗五:不同長細比建築物減震效果比較

1. 地下室外牆放入裝阻尼的夾鏈袋

表 15、長細比為 0.43 的建築

| 震度 | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 5 弱 | 144 | 142 | 142 | 142 |
| 5 強 | 168 | 169 | 163 | 167 |
| 6 弱 | 288 | 295 | 294 | 292 |
| 6 強 | 341 | 339 | 341 | 341 |
| 7 級 | 422 | 418 | 412 | 417 |

表 16、長細比為 0.53 的建築

| 震度 | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 5 弱 | 134 | 134 | 134 | 134 |
| 5 強 | 174 | 172 | 173 | 173 |
| 6 弱 | 302 | 305 | 303 | 303 |
| 6 強 | 338 | 348 | 338 | 341 |
| 7 級 | 437 | 415 | 429 | 427 |

表 17、長細比為 0.67 的建築

| 震度 | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 5 弱 | 157 | 153 | 153 | 154 |
| 5 強 | 189 | 192 | 193 | 192 |
| 6 弱 | 310 | 308 | 309 | 309 |
| 6 強 | 408 | 405 | 402 | 405 |
| 7 級 | 456 | 443 | 454 | 452 |

表 18、長細比為 0.89 的建築

| 震度 | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 5 弱 | 119 | 118 | 118 | 118 |
| 5 強 | 158 | 158 | 157 | 158 |
| 6 弱 | 322 | 321 | 320 | 321 |
| 6 強 | 421 | 420 | 415 | 419 |
| 7 級 | 474 | 483 | 475 | 477 |

表 19、長細比為 1.32 的建築

| 震度 | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 5 弱 | 117 | 109 | 106 | 111 |
| 5 強 | 159 | 165 | 162 | 162 |
| 6 弱 | 357 | 353 | 353 | 354 |
| 6 強 | 386 | 390 | 392 | 389 |
| 7 級 | 426 | 426 | 426 | 426 |

表 20、長細比為 2.67 的建築

| 震度 | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 5 弱 | 121 | 117 | 122 | 120 |
| 5 強 | 174 | 171 | 171 | 172 |
| 6 弱 | 289 | 279 | 273 | 280 |
| 6 強 | 322 | 316 | 310 | 316 |
| 7 級 | 425 | 414 | 424 | 421 |

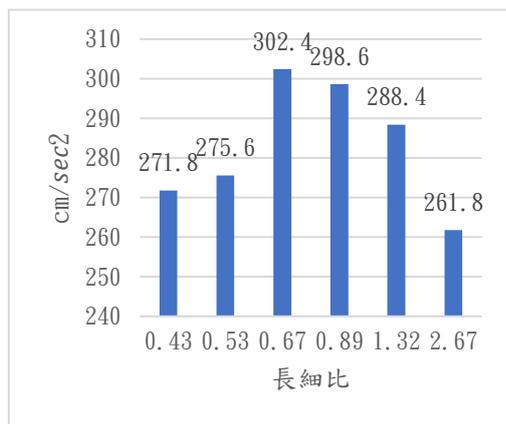


圖 34、不同建築加速度總平均

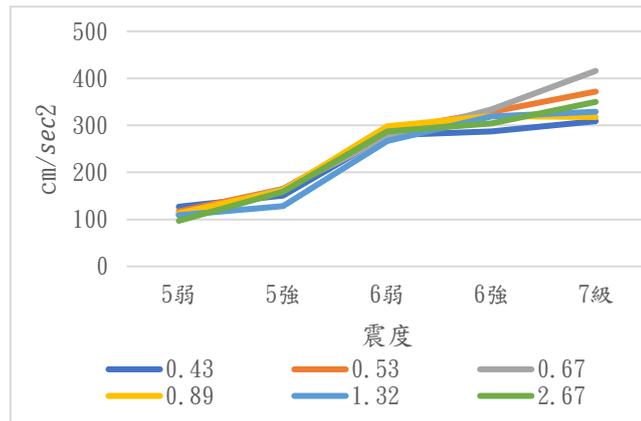


圖 35、不同建築在各震度下的加速度變化

2. 地下室外牆直接倒入阻尼

表 21、長細比為 0.43 的建築

| 震度 | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 5 弱 | 129 | 126 | 126 | 127 |
| 5 強 | 148 | 153 | 153 | 151 |
| 6 弱 | 270 | 289 | 277 | 279 |
| 6 強 | 289 | 294 | 278 | 287 |
| 7 級 | 323 | 307 | 298 | 309 |

表 23、長細比為 0.67 的建築

| 震度 | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 5 弱 | 117 | 112 | 100 | 110 |
| 5 強 | 163 | 162 | 166 | 164 |
| 6 弱 | 285 | 260 | 280 | 275 |
| 6 強 | 349 | 334 | 319 | 334 |
| 7 級 | 422 | 405 | 420 | 416 |

表 25、長細比為 1.32 的建築

| 震度 | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 5 弱 | 105 | 111 | 112 | 109 |
| 5 強 | 125 | 130 | 128 | 128 |
| 6 弱 | 265 | 254 | 282 | 267 |
| 6 強 | 320 | 323 | 314 | 319 |
| 7 級 | 322 | 331 | 333 | 329 |

表 22、長細比為 0.53 的建築

| 震度 | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 5 弱 | 112 | 114 | 125 | 117 |
| 5 強 | 165 | 167 | 162 | 165 |
| 6 弱 | 288 | 285 | 293 | 289 |
| 6 強 | 330 | 338 | 319 | 329 |
| 7 級 | 369 | 376 | 372 | 372 |

表 24、長細比為 0.89 的建築

| 震度 | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 5 弱 | 101 | 117 | 121 | 113 |
| 5 強 | 168 | 157 | 160 | 162 |
| 6 弱 | 314 | 302 | 278 | 298 |
| 6 強 | 304 | 320 | 335 | 320 |
| 7 級 | 318 | 320 | 317 | 318 |

表 26、長細比為 2.67 的建築

| 震度 | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 5 弱 | 95 | 97 | 99 | 97 |
| 5 強 | 156 | 156 | 166 | 159 |
| 6 弱 | 284 | 285 | 293 | 287 |
| 6 強 | 296 | 310 | 307 | 304 |
| 7 級 | 368 | 352 | 329 | 350 |

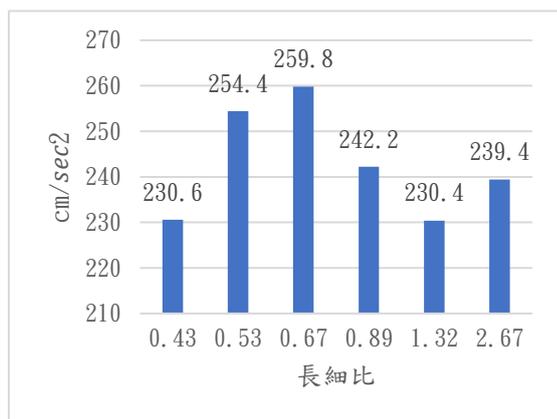


圖 36、不同建築加速度總平均

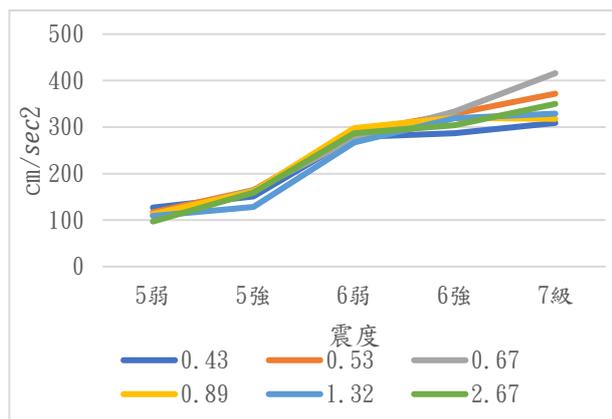


圖 37、不同建築在各震度下的加速度變化

(一) 實驗六:不同建材對建築減震效果的影響

表 27、不同建材建築地下室外牆加入夾鏈袋阻尼加速度比較

| 震度 | 木棒建築 | | | | 鋼骨建築 | | | | 鋼筋建築 | | | |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² | 1 st | 2 nd | 3 rd | 平均 cm/sec ² |
| 6 弱 | 263 | 258 | 256 | 259 | 309 | 300 | 286 | 298 | 321 | 302 | 319 | 314 |
| 6 強 | 411 | 415 | 406 | 411 | 598 | 564 | 574 | 579 | 576 | 595 | 561 | 577 |

(二) 實驗七: 不同建材搖晃時間長短對加速度的影響

表 28、不同建材不同搖晃時間加速度

| 建築 | s | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 木棒 | 6 弱 | 294 | 294 | 294 | 294 | 293 | 295 | 303 | 305 | 302 | 300 | 300 |
| | 6 強 | 674 | 674 | 719 | 757 | 780 | 668 | 676 | 605 | 598 | 452 | 448 |
| 鋼骨 | 6 弱 | 256 | 265 | 271 | 267 | 249 | 249 | 263 | 277 | 278 | 286 | 280 |
| | 6 強 | 546 | 565 | 568 | 576 | 581 | 610 | 611 | 667 | 705 | 714 | 697 |
| 鋼筋 | 6 弱 | 303 | 290 | 307 | 309 | 320 | 321 | 327 | 337 | 320 | 329 | 346 |
| | 6 強 | 536 | 536 | 549 | 550 | 561 | 582 | 588 | 592 | 550 | 579 | 552 |

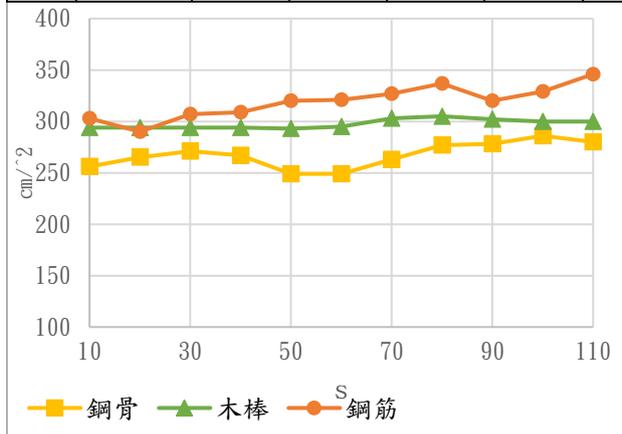


圖 38、六弱時不同建材不同搖晃時間加速度變化

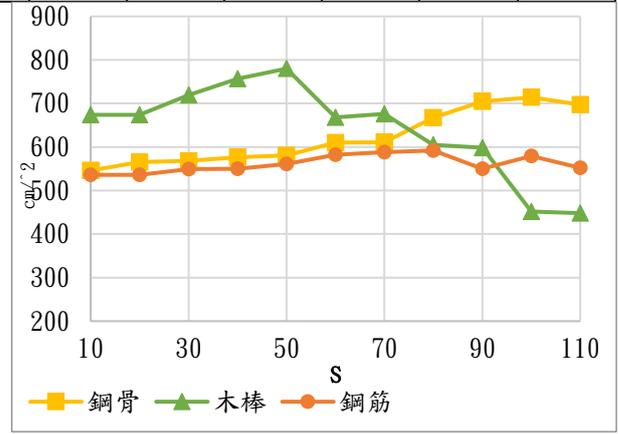


圖 39、六強時不同建材不同搖晃時間加速度變化

(三) 實驗八:不同建築上不同重心高度對減震效果的影響

表 29、三種建築不同重心加速度

| 震度 | 木棒建築 | | | 鋼骨建築 | | | 鋼筋建築 | | |
|----------------------------|------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|
| | 低 | 中 | 高 | 低 | 中 | 高 | 低 | 中 | 高 |
| 6 弱 cm/sec ² | 247 | 254 | 308 | 347 | 343 | 416 | 494 | 506 | 513 |
| 6 強 cm/sec ² | 626 | 647 | 688 | 562 | 572 | 729 | 744 | 755 | 710 |

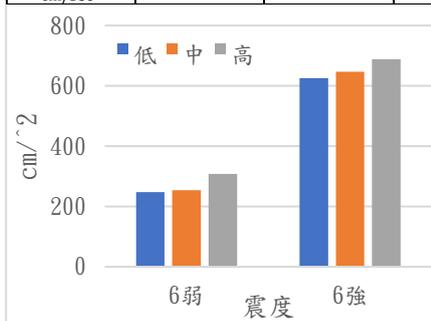


圖 40、木棒建築不同重心加速度

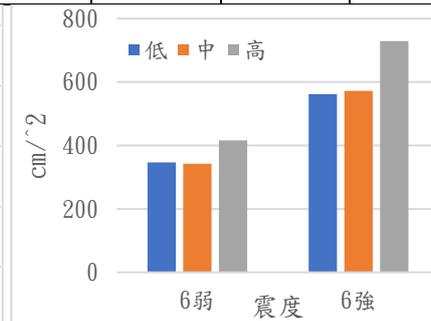


圖 41、鋼骨建築不同重心加速度

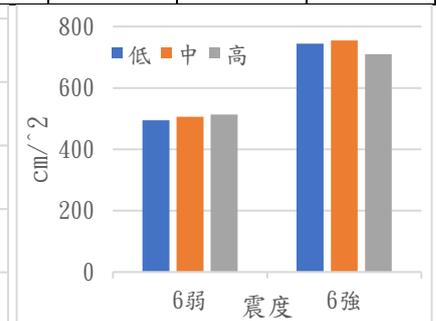


圖 42、鋼筋建築不同重心加速度

三、 生活應用

(一)實驗九：建物即時監測之應用

表 30、建築監測結果及傾斜率計算

| cm | 高度差 | 垂直距離 H(cm) | 水平偏移量 Δ (cm) | 底邊長 (cm) | $\tan \theta$ | 計算 角度 | 實際 測量 角度 | 傾斜率 |
|--------|-----|---------------|------------------------|-------------|---------------|----------|----------------|--------|
| 寬 邊 | 3 | 61 | 6.48 | 26 | 0.115 | 6 | 6 | 0.1062 |
| | 4 | 61 | 9.70 | | 0.154 | 9 | 8 | 0.1590 |
| | 5 | 60 | 10.77 | | 0.192 | 11 | 10 | 0.1794 |
| 窄 邊 | 3 | 60 | 7.56 | 24 | 0.231 | 7 | 7 | 0.1260 |
| | 4 | 60 | 10.77 | | 0.269 | 10 | 8 | 0.1794 |
| | 5 | 59 | 12.89 | | 0.308 | 12 | 12 | 0.218 |

1. $\tan \theta$ = 高度差(對邊) / 兩組模組相差的距離(鄰邊、底邊長)
2. 水平偏移量(對邊) = $\sin \theta$ * 模組到地面的距離(斜邊)
3. 傾斜率 = 水平偏移量(對邊) / 傾斜方向的模組傾斜時測到的距離(垂直距離)

伍、 討論

一、 地上樓層實驗(無地下室)

(一) 實驗一:相同震度在不同樓層測到的加速度

1. 根據圖 19 顯示，震度 5 弱~6 弱於低中樓層的加速度明顯下降，9~10 樓微幅上升；震度 6 強~7 級下降不明顯，7 級在中高樓層劇烈上升
2. 這次實驗打破我們認為樓層越高，樓層搖晃程度越大的認知，推測有以下幾點原因：

- (1) 低樓層離震源較近，承受能量較大，搖晃較大；而高樓層受到的力量是由下向上傳的，收到的能量較弱。
- (2) 另外，震波的波峰及波谷在大樓中的位置也影響其搖晃程度，波峰所在的樓層會有較強的搖晃。
- (3) 根據台大氣候變遷與永續發展研究中心的資料，我們猜想出現這樣的數據可能是因為自然共振效應，就是如果該樓層的搖動頻率或週期和震波相同或成整數比例，加速度值便有加成效果。

於是我們計算不同樓層及不同震度所接受到的頻率和週期：

不同震度的週期 = 運轉的時間 / 4 個週期

不同樓層的週期 = $T(\text{週期}) = 0.0294 \text{ hn}^{0.804}$ 頻率 = 1 / 週期

表 31、不同震度、樓層的週期、頻率

| 不同震度 | | | | 不同樓層(震度不影響計算數值) | | | | | |
|------|----------------------------|-----------|-------------|-----------------|-----------|-------------|-----|-----------|-------------|
| 震度 | 加速度 cm/sec ² | 週期 (秒) | 頻率 (次/秒) | 樓層 | 週期 (秒) | 頻率 (次/秒) | 樓層 | 週期 (秒) | 頻率 (次/秒) |
| 5弱 | 130.5 | 7.50 | 0.13 | 1F | 0.03 | 33.33 | 8F | 0.58 | 1.72 |
| 5強 | 191.5 | 5.13 | 0.19 | 2F | 0.13 | 7.69 | 9F | 0.64 | 1.56 |
| 6弱 | 338.5 | 3.25 | 0.31 | 3F | 0.21 | 4.76 | 10F | 0.70 | 1.43 |
| 6強 | 619.5 | 1.50 | 0.67 | 4F | 0.30 | 3.33 | 11F | 0.76 | 1.32 |
| 7級 | 130.5 | 0.88 | 1.14 | 5F | 0.38 | 2.63 | 12F | 0.83 | 1.20 |
| | | | | 6F | 0.44 | 2.27 | 13F | 0.89 | 1.12 |
| | | | | 7F | 0.51 | 1.96 | | | |

計算完後有以下幾點發現：

若單看不同樓層的週期和頻率，和實驗一各震度在 1~13 樓的加速度確實有關聯：樓層越高，依據計算結果，頻率越小，配合實驗結果，加速度較小，因此計算與實驗是相符的。

另外，以上述討論可解釋 5 弱到 6 強的加速度隨著樓層增加而下降，但 7 級震度卻在 10 樓測量到極大加速度(1235cm/sec²)。根據研究中心的計算方式：容易產生共振的高度= $(\frac{T}{0.0294})^{0.804}$ ，七級震度時週期(T)為 0.7，代入公式後得 51.5 公分，而模擬建築的 10 樓約在 45 公分，計算與實驗結果存在一定差距，推測是因實驗精準度、建築材料影響，無法完全吻合。

(二) 實驗二：非牛頓流體阻尼位於不同樓層各震度的減震效果比較

根據實驗數據及圖表，我們提出幾個推論

1. 減震值

(1) 震度：根據表 10 顯示，6 強減震效果較其他震度佳

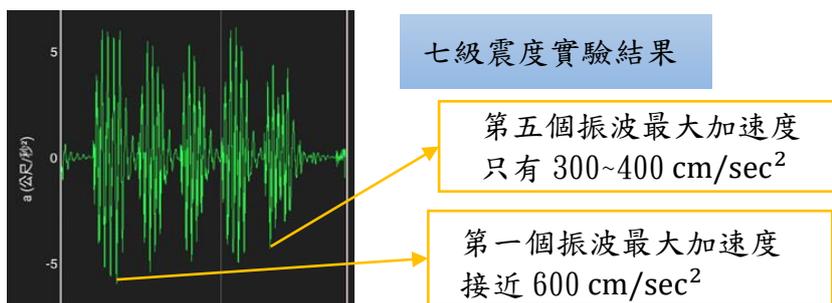


圖 43、七級震度測量結果

觀察七級震度每個震波的最大加速度，發現落差大，數據不穩定，如圖 43，推測是搖晃劇烈，產生的誤差較多，數據參考價值低。

5 弱的減震幅度在 0~20cm/sec²間，5 強及 6 弱可達 20~50cm/sec²，而 6 強更超過 100cm/sec²，若忽視七級因搖晃劇烈而產生較不穩定的數據，可視為減震效果隨著震度上升而增加。

另外，我們也將近年來 5 級(5 弱)以上的地震整理成表格，並統計建築物倒塌的數量，以驗證 6 強地震所倒塌的建築是否最多，我們的實驗結果是否能在減緩地震破壞的方面實現最好的效果。

如表 32 統計結果顯示，6 級倒塌建物最多(2020 年前使用的震度分級表 5、6 級沒有分弱強，6 強以 6 級討論)，證實結果確實能應用到實際生活中。

表 32、近年 5 級以上地震倒塌建築數目統計

| 新震度 | 5 弱 | 5 強 | 6 弱 | 6 強 | 7 級 |
|---------------|-------------|---------|------------|-----|----------|
| 舊震度 | 5 級 | | 6 級 | | 7 級 |
| 20240403 花蓮外海 | 1 | | 17(天王星大樓) | | |
| 20220918 池上 | | 1(玉里超商) | | 2 | |
| 20180206 花蓮外海 | | | 4(統帥、雲門翠堤) | | |
| 20160206 美濃 | 6 | | 78(維冠金龍) | | 2 |
| 20091219 磯崎 | | | 多棟房屋毀損 | | |
| 19990921 集集 | 25064(東星大樓) | | 62780(金巴黎) | | 6497(天廬) |
| 總計(棟) | 25071 | | 62864 | | 6499 |

(2) 樓層:根據圖 20 顯示，只有置於 10 樓的非牛頓流體阻尼減震幅度各震度加總超過 $300\text{cm}/\text{sec}^2$ ，較其他樓層大

- 根據文獻探討，歷屆科展「震不震『阻』了就知道」的研究結果顯示，阻尼放在中高樓能有最佳效果
- 上網搜尋資料後發現:101 與 85 大樓的阻尼都置於 89~90%樓高
- 若以模擬建築計算，阻尼在約 11.5 樓有最好的減震效果，和實驗結果所示的 10 樓有些微的落差，推測是因為實驗設置上不完全相同(例如震波模擬方式)及誤差。為了讓實驗結果能應用在不同高度的建築，計算樓層高度占 13 層建築總高的百分比，如表 33。

表 33、無地下室建築各樓層高度占建築總高的百分比

| 樓層 | 樓高(cm) | 樓高百分比 | 樓層 | 樓高(cm) | 樓高百分比 |
|----|--------|--------|-----|--------|--------|
| 1F | 4.5 | 7.88% | 8F | 35.5 | 61.82% |
| 2F | 9 | 15.76% | 9F | 39.4 | 69% |
| 3F | 13.5 | 23.64% | 10F | 44 | 77.05% |
| 4F | 17.7 | 31% | 11F | 48.5 | 84.94% |
| 5F | 22 | 38.53% | 12F | 52.8 | 92.47% |
| 6F | 26.5 | 46.41% | 13F | 57.1 | 100% |
| 7F | 31 | 54.29% | | | |

2. 以百分比計算(減震率)

(1) 震度:根據表 11 顯示, 5 強~6 強的減震百分率較高, 5 強、6 強總減震百分率皆可達 40%以上, 6 弱則減少 27%的加速度。觀察圖 24、圖 26、圖 28 可以發現, 減震百分率較高的震度, 所有樓層都有穩定的減震效果。也就是在強震~烈震會有最好的減震效果。

實驗過程中發現, 阻尼放太久會乾掉, 減震效果下降, 推測是因為水分蒸發或太白粉沉澱導致阻尼減震效果不同, 於是我們將製作好的阻尼利用鋁箔紙密封後放在無日晒的櫃子中, 經 24 小時, 發現阻尼已經發酸發臭, 表面甚至出現黃色黴菌。我們找到的解決方法



圖 44、阻尼表面的黴菌
(由第二作者拍攝)

是使用其他不會有水分蒸發或發霉等問題的非牛頓流體, 像是口香糖(橡膠溶液)。

二、 地下樓層實驗(有地下室)

(一) 實驗三:建築物有無地下室的加速度比較

根據 5 弱到 7 級的平均加速度值, 建築物有地下室的加速度皆較無地下室的小, 因此符合建築地下室有更好減震效果之推論。根據台電輸工處的出國報告「隔減震設施應用規劃設計」, 地下室以下功能與減震有關:

1. 如果在容易發生土壤液化的地層上蓋房子, 可以加挖地下室防治(將地層中容易造成土壤液化的砂質地層挖掉, 改建為一層或兩層的地下室)
2. 許多抗震、隔震、防震或建築法規規定的必要結構都在地下室裡面或周圍, 由此可見地下室對於房屋的安全及地震防治都十分重要

(二) 實驗四:建築物地下室外牆加阻尼的減震效果

根據圖 32、圖 33 地下室外牆放輕黏土、夾鏈袋阻尼和直接倒入阻尼比較, 對照組-無阻尼(塞入輕黏土)的加速度值從 6 弱之後明顯大於放入夾鏈袋阻尼或直接倒入阻尼的加速度, 可以看出, 在較強的震度下, 無論阻尼處於何種狀態, 都能發揮一定的減震效果。

根據圖 32 比較夾鏈袋阻尼及輕黏土放入地下室外牆的加速度, 發現夾鏈袋阻尼在 5 弱~5 強的加速度比放入輕黏土大一些, 6 弱~7 級的加速度值則幾乎沒有上升, 有非常顯著的減震效果, 說明夾鏈袋阻尼在強震時能有效減緩建築的劇烈搖晃。

而觀察圖 32 搭配表 14，比較地下室外牆放入輕黏土及直接倒入阻尼的加速度值，發現直接倒入阻尼在 5 弱~5 強有些微的減震，在 6 弱~7 級出現較明顯的減震。但若將夾鏈袋阻尼及直接倒入阻尼做比較，在 7 級時，夾鏈袋阻尼的減震效果更為明顯。

根據表 13、14 的減震值及減震率一欄，可得知直接倒入阻尼的減震效果平均起來較夾鏈袋阻尼好。推測是因為夾鏈袋阻尼在 5 級震度時加速度稍大了一些，出現負值，因此平均結果不如直接倒入阻尼。

因此，我們推論直接倒入的阻尼因為能自由流動，從 5 弱開始就能發揮非牛頓流體的減震功能；而夾鏈袋阻尼若沒有激烈碰撞或搖晃，阻尼可能因為形狀被夾鏈袋限制，無法變成暫時性固體，進而使減緩加速度值。但隨震度上升，搖晃更激烈，阻尼就能更有效的發揮減震效果。

非牛頓流體的黏度會因為受到的壓力或速度而產生變化，壓力越大，黏度越大，甚至成為暫時性固體，因為太白粉分子在承受外力施壓時，會自動排列整齊抵抗外力，因此，非牛頓流體才具有減震效果。

同理可證，阻尼(非牛頓流體)在地下室中受到建築大力擠壓，有抵抗外力的特性，也就是建築在搖晃時施加於阻尼的力量反而會讓阻尼內部結構產生變化，在建築搖晃時，無法隨著振波劇烈、快速的搖晃，進而減緩搖晃程度，達到減震效果。

我們同樣計算出含地下室的建築，各樓層在建築高度比例，以讓研究結果更能應用到不同建築中，如表 34。

表 34、有阻尼建築各樓層(含地下室)高度占建築總高的百分比

| 樓層 | 樓高(cm) | 樓高百分比 | 樓層 | 樓高(cm) | 樓高百分比 |
|----|--------|--------|-----|--------|--------|
| B1 | 5 | 7.55% | 7F | 39.5 | 60.12% |
| B2 | 9.5 | 14.35% | 8F | 44 | 66.47% |
| 1F | 13.5 | 20.39% | 9F | 48.3 | 72.96% |
| 2F | 18 | 21.19% | 10F | 52.7 | 79.60% |
| 3F | 22.2 | 33.53% | 11F | 57.2 | 86.40% |
| 4F | 26.5 | 40.03% | 12F | 61.7 | 93.20% |
| 5F | 31 | 46.83% | 13F | 66.2 | 100% |
| 6F | 35.4 | 53.47% | | | |

(三) 實驗五:不同長細比建築物減震效果比較

觀察實驗四表 13 裝有阻尼的夾鏈袋一欄及本實驗的數據，發現相同的變因之下，兩者 5 弱~6 強的平均值落差不大(20 cm/sec²之內)，顯示

實驗有一定的再現性，唯有 7 級有較大的落差(71 cm/sec²)，推論是因為 7 級震波較不穩定，加上兩次實驗的阻尼狀況存在著一定的誤差，導致數據產生差距。

由圖 34 觀察到，建築 A~C 的平均加速度逐漸上升，減震效果逐漸下降；建築 C~F 的平均加速度逐漸下降，減震效果逐漸提升。我們原先的預想是長細比越大，建築內的支撐結構較少，較不穩固，勁度較小，加速度應較大；但結果卻只有建築 A~C 符合預想，推測是因為建築的勁度小，不代表強度弱、不減震。可能因為我們建築材料是木棒，較有彈性，影響強度，導致強震時可能出現低樓層及高樓層的晃動週期不一致的情形，使傳遞的能量減弱或增強，使 C~F 建築實驗結果與設想不同。

所以我們在 A、C、F 建築上，每隔 10cm 做一個記號(一個質點)，重新進行實驗並錄成影片，運用 Tracker 進行質點追蹤，並分析每個質點的週期(相鄰兩個波峰的時間相減)，並將分析結果製成長條圖進行比較。總共以三個變因製作圖表:建築上不同高度、不同長細比的建築、不同震度，最後以不同長細比進行解釋。

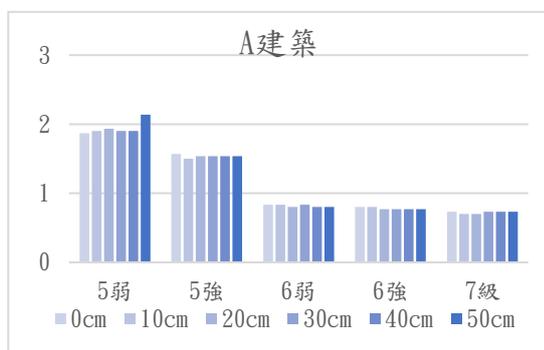


圖 45、A 建築離地平面不同高度週期長條圖

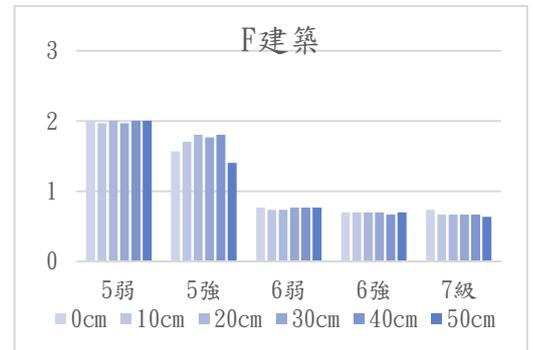


圖 46、F 建築離地平面不同高度週期長條圖

A 建築不同高度的週期整體而言明顯較 F 更一致，而 F 建築在 5 弱時週期較一致，在 7 級觀察到 0cm 時週期最大，隨著高度漸高，到 50cm 時，週期最小，出現低樓層及高樓層週期的不一致的情形，可推論長細比較大的建築波的能量傳遞較慢，因為建築較容易產生形變，形狀的改變導致更多能量被吸收，使建築的不同高度承受的力量及週期也不一致。

後來發現使用 Tracker 追蹤時，只產生兩個波，才剛開始搖晃便停止，週期可能不穩定，因此接下來用 15 個波的搖晃情形來分析週期。

表 35、離地 50cm 各長細比建築週期計算

| 次數 | A(s) | C(s) | F(s) |
|----|------|------|------|
| 1 | 0.87 | 0.8 | 0.73 |
| 2 | 0.87 | 0.83 | 0.77 |
| 3 | 0.87 | 0.83 | 0.77 |
| 4 | 0.87 | 0.83 | 0.77 |
| 5 | 0.87 | 0.8 | 0.77 |
| 6 | 0.87 | 0.8 | 0.77 |
| 7 | 0.87 | 0.83 | 0.77 |
| 8 | 0.87 | 0.8 | 0.73 |
| 9 | 0.83 | 0.83 | 0.77 |
| 10 | 0.87 | 0.77 | 0.77 |
| 11 | 0.87 | 0.83 | 0.77 |
| 12 | 0.87 | 0.8 | 0.73 |
| 13 | 0.83 | 0.8 | 0.8 |
| 14 | 0.87 | 0.8 | 0.7 |
| 15 | 0.87 | 0.8 | 0.77 |

由於離地 50cm 接近手機測量加速度的位置，根據此高度的週期進行分析。從 A~F 週期漸小，加速度應該越來越大，與預想相符，但和實驗結果不符，於是進行以下推論。

A 建築從第 1~15 個週期都接近相同，顯示能量分布平均；C 建築週期則在 0.8~0.83 之間；F 建築週期在 0.73~0.8 間分布不均，沒有一定變化，推測手機測到的可能是週期最大時的加速度，導致加速度較 A、C 建築小。

(四)實驗六:不同建材對建築減震效果的影響

觀察表 27、28，從 6 弱及 6 強的數據得出木棒 < 鋼骨及鋼筋。在我們的認知中，現代建築中較少看見木頭建築，是因為木頭結構較不耐震，加速度應該較大，但卻得出加速度較小的實驗結果，推測是因為我們的模擬建物結構與真實的木頭結構不同，模擬建築的木頭材質較真實的木頭材質更柔軟，結構較鬆散，相較於鋼筋及鋼骨建築，更具彈性，可透過結構的形變吸收地震波，使測量到的加速度較其餘兩種建材小。

接著比較鋼骨及鋼筋結構，兩者的加速度沒有明顯差異，而若在結構上則可與現實情形對應。由於鋼筋建築的結構重量較鋼骨重，根據牛頓第二運動定律， $F=ma$ ，所以當鋼骨及鋼筋的加速度(a)落差不大時，質量(m)越大，產生的破壞力(F)變越大，可以和現實生活中的鋼骨及鋼筋對應。

(五)實驗七:不同建材搖晃時間長短對加速度的影響

觀察表 28 搭配圖 38 得知，木棒建築在 6 弱時，加速度在 293~305 cm/sec^2 之間，變化不太，非常穩定；若看到圖 39 中的木棒建築，會發現數值變化非常劇烈，在 50 秒後加速度急遽下降，推測是因為持續的搖

晃，超出木棒結構可承受的強度，形變結構變得鬆散，使木棒建築失去韌性，震波無法完全傳遞及釋放，也就是說向上傳的能量無法完全反應在加速度上，導致木棒建築在搖晃時間較長時，加速度較小。

由圖 38、圖 39 的黃色折線發現，鋼骨建築在 6 弱及 6 強時，70 秒之後的加速度皆會上升，推測是因為鋼骨建築具彈性及韌性，可透過搖晃吸收能量，雖然測量到的加速度較大，結構本身不減震；但結構不易毀損，具有耐震特性。而我們的阻尼最適合放置於鋼骨建築中，由於本身結構耐震但不減震，搭配上阻尼的減震特性，能使建築更具安全性。

鋼筋建築代表的橘色折線，6 弱及 6 強時，90 秒的加速度皆下降，推測是因為建築利用本身剛性的結構吸收地震能量，加速度較小，但吸收的能量超過一定強度後，建築結構不具彈性，隨即斷裂甚至倒塌，與鋼骨建築相反，可減震但不耐震。

若針對鋼筋及鋼骨建築進行比較，可以發現在實驗六的結果中，兩者加速度相差不大；而在本實驗的圖 38，也就是 6 弱的部分，鋼筋的加速度稍大於鋼骨，但加速度變化皆沒有明顯差異。但若看到圖 39，6 強的數據可以明顯看出三種建材特性對加速度影響。推測是因為 6 弱搖晃不夠劇烈，無法明顯對比出建材的差異；而 6 強有足夠的晃動，可展現建材特性，加速度變化有明顯差異。

(六) 實驗八: 不同建築上不同重心高度對減震效果的影響

由圖 40、41 發現，木棒及鋼骨建築的加速度隨著重心高度上升，因為重心越高，物體的穩定性越差，加速度越大，安全性越低，與現實情形符合；而在圖 42 看到，鋼筋建築的加速度不一定隨重心上升，推測是因為在使用相同重量的重物的情況下，較重的鋼筋建築重心高度受影響較小，重心不如另外兩棟建築高，使鋼筋建築在重心最高時，重心對加速度的影響較不顯著。

三、生活應用

(一) 實驗九: 建物即時監測之應用

透過表 30 的計算角度及實際測量角度得知，此模組所測得的距離及計算方法，能得知建物的傾斜率，進行建築傾斜情形的即時監測及回報。

台灣省土木技師公會規定如下：

1. $(\Delta/H) < 1/200$ ：修復房屋傾斜率 (Δ/H) 低於 $1/200$ 者，應估算建

物損害部份的修復費用。

2. $1/200 \leq (\Delta/H) \leq 1/40$: 房屋傾斜率 (Δ/H) 超過 $1/200$, 但未達 $1/40$ 者, 鑑定技師應依評估結果估算建物損害部份之修復補強費用。
3. $(\Delta/H) > 1/40$: 重建房屋傾斜率 (Δ/H) 超過 $1/40$ 者, 不論損害情況如何, 應拆除房屋重新建造。

依計算結果得知, 當模擬建築傾斜 6 度時, 便已超過需要修復的房屋之傾斜率。在實際生活應用當中, 也能利用這樣的儀器及計算方式, 並設計當建物的傾斜率的角度有超過標準時, 能隨時向屋主警示或回報, 讓屋主能及時進行建築的修繕或重建。

陸、結論

通過調整實驗方法, 我們提高數據穩定性, 並確定各級震度的功率範圍。有助了解馬達功率和震度間的相關, 提供基礎數據便於未來研究和應用。

根據實驗一的實驗結果顯示, 樓層高度並非唯一決定加速度的因素。低樓層承受能量較大, 破壞程度較大。此外, 自然共振效影響不同樓層的加速度, 這說明為何在某些情況下高樓層的加速度不會上升。

根據實驗二, 六強震度減震效果最佳, 因七級震度的震波落差較大, 數據不穩定; 在 10 樓放置阻尼的減震效果最好, 與先前研究結果大致相符。然而, 11 樓在 5 弱到 6 強減震效果比 10 樓稍佳, 但七級減震效果差; 阻尼長時間暴露於空氣可能因水分蒸發或粉沉澱, 導致減震效果下降。希望能以不會發霉的非牛頓流體做為防震裝置, 例如: 口香糖(橡膠溶液)。

根據實驗三的結果和相關研究, 建築加上地下室確實能提供更好的減震效果。依據實驗結果, 在地下室設有減震的結構下, 未來若再加入隔震系統, 可以更有效降低建築的震動和提高地震防護能力, 對地震防治至關重要。

根據實驗四, 於地下室外牆加入阻尼(非牛頓流體)則有助於減緩建築物在地震或其他振動情況下的搖晃, 而兩種不同的阻尼配置(裝入夾鏈袋和直接倒入地下室外牆的非牛頓流體), 減震效果也不太一樣。夾鏈袋阻尼適合常發生強震地區; 直接倒入的阻尼則較適合常發生中強震度的區域。

由實驗五得知, 不同結構建築的加速度在特定範圍內隨著長細比增加而上升; 而超過特定臨界值, 加速度隨著長細比增加而下降, 推測與建築搭建材料的特性有關, 利用 Tracker 分析不同建築的搖晃頻率後, 得出的結論顯示, 長

細比越小的建築結構較穩固，雖然建造成本較高，但建築相對也更具安全性。

由實驗六得知，我們所製作的木棒建築結構與真實的木頭結構不同，具有彈性能吸收地震能量。而鋼筋結構較鋼骨重，導致產生的破壞力較大，與現實中的情形符合。

由實驗七發現，木棒建築的實驗結果因為重量等因素，數據較不值得參考。而在鋼筋與鋼骨建築的實驗結果中，可以發現在搖晃時間拉長超過一分鐘後，加速度會有上升或下降的情形，推測是因為從高樓層向下傳的力量和向上傳的波，相互抵銷或加成，出現建設性或破壞性干涉的情形。

從實驗八的數據中得知，在木棒及鋼骨建築中，可以看到加速度隨著中心上升的情形，與現實生活中重心越高，建築越不穩固的現象相對應；而鋼筋建築因為重量較重，重物對重心的影響較小，導致重心對加速度的影響較小。

依據實驗九結果得知，超聲波測距的相關儀器能實際應用到生活中，進行建築傾斜情形的即時監測及回報，及時告知屋主建築的情形，避免建築在不覺中產生過度的傾斜，最終造成房屋倒塌，能提升建築的安全性，保護住戶的人身安全。

柒、參考文獻資料

一、 研究報告 (Reports)

- (一) 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。國立台灣科學教育館；中華民國第 60 屆中小學科學展覽會作品說明書。
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/60/pdf/NPHSF2020-030115.pdf?785>
- (二) 陳芷榆、呂宣儀、楊承諺(2022)。震出你的非牛頓流體。國立台灣科學教育館；2022 全國科學探究競賽。
<https://sciexplore2022.colife.org.tw/work.php?t=B0219>
- (三) 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震效應。國立台灣科學教育館；中華民國第 54 屆中小學科學展覽會 作品說明書。
<https://www.ntsec.edu.tw/science/detail.aspx?a=21&cat=12032&sid=12042>
- (四) 陳郁煊、廖芝秀、陳俊融 (2019)。震震有池—水塔阻尼器設計及減震效能探討。國立台灣科學教育館；中華民國第 59 屆中小學科學展覽會作品說明書。
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/59/pdf/NPHSF2019-030514.pdf>
- (五) 彭宇呈 (2016)。屹立不搖 -以積木模型模擬建築物探討地震 S 波的影響。國立台灣科學教育館；中華民國第 56 屆中小學科學展覽會 作品

說明書。

<https://www.ntsec.edu.tw/science/detail.aspx?a=21&cat=12947&sid=13048>

- (六) 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。國立台灣科學教育館；中華民國第 57 屆中小學科學展覽會 作品說明書。

<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/57/pdf/030506.pdf>

- (七) 溫雪琴(2002)。隔減震設施應用規劃設計。公務出國報告資訊網；行政院及所屬各機關出國報告。

<https://report.nat.gov.tw/ReportFront/PageSystem/reportFileDownload/C09105148/001>

- (八) 劉冠澤、柯維恆、柯維恩 (2011)。天不搖，地不動-非牛頓流體在建築結構抗震之應用。國立台灣科學教育館；中華民國第 51 屆中小學科學展覽會 作品說明書。

<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/51/pdf/030817.pdf>

- (九) 劉昆祈、黃聖閔、楊凱鈞 (2018)。制震阻尼系統在縮尺建物消能運用之初步評估探討。國立台灣科學教育館；中華民國第 58 屆中小學科學展覽會 作品說明書。

<https://www.ntsec.edu.tw/science/detail.aspx?a=21&cat=15105&sid=15490>

- (十) 劉芊妤、歐東霖、吳奕廷 (2021)。地動山不搖—隔震裝置在建築物之應用與探究。國立台灣科學教育館；中華民國第 61 屆中小學科學展覽會 作品說明書。

<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/61/pdf/NPHSF2021-030508.pdf?0.9331091432832181>

二、網路相關資源 (Websites and Other Online Communities)

- (一) 馮俞璇 (2023 年 9 月 21 日)。【地震小教室】震央、震源在哪裡？芮氏規模、震度是什麼？地震級數新制！。HOUSEFEEL 房感不動產科技。

<https://www.housefeel.com.tw/article/%E5%9C%B0%E9%9C%87-%E9%9C%87%E5%BA%A6-%E9%9C%87%E5%A4%AE-%E8%8A%AE%E6%B0%8F%E8%A6%8F%E6%A8%A1/>

- (二) 吳宗翰 (2015 年 1 月 27 日)。有地震！居家房屋怎麼選？。台大氣候變遷與永續發展研究中心。

<http://ccsd.ntu.edu.tw/26032306933561122530/17>

- (三) 涂耀賢(2017 年 6 月 18 日)。建築物之不同測線傾斜率量測值合理性比較探討。台灣省土木技師公會。

- (四) 蕭乃祺(2020 年 9 月 19 日)。臺灣的新地震震度分級制度。台灣網路教科館。

<https://www.ntsec.edu.tw/liveSupply/detail.aspx?a=6829&cat=6841&p=1&lid=16214&print=1>

【評語】 030502

101 阻尼球功能對於風的低頻變化成效明顯，地震時功能效益為何？

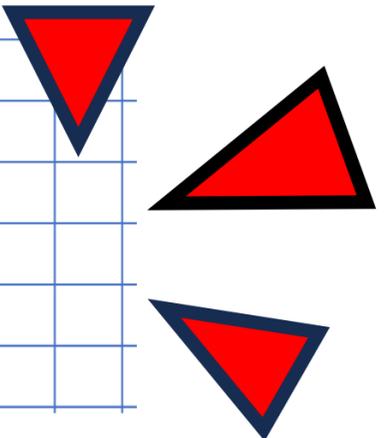
報告可補強阻尼作用的物理機制及本實驗結果的驗證。Arduino 超聲

波測距精度為何？

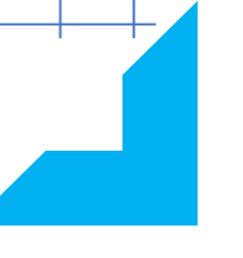
作品簡報



「非」天「頓」地



非牛頓流體阻尼的減震效果與建物即時監測研究



摘要

探討非牛頓流體阻尼位於地上樓層及地下室中的減震效果。以樂高積木搭配馬達及程式自製地震模擬器，透過調整功率模擬不同震度的S波。並將阻尼放入地下室外牆。實驗得知，地下室外牆灌入非牛頓流體阻尼能達到減震效果。同時，我們也製作不同長細比及不同建材的建築，分析數據後得出最減震、最具安全性的結構比例和建築材料，並比較建築上不同重心高度及搖晃時間長短對非牛頓流體減震效果的影響。最後利用Arduino超聲波測距模組進行建築傾斜觀測，提高建築的安全性。另外，我們也參考歷屆作品的做法，利用吉利丁凍及偏光片，透過光的偏折情形，希望了解地下室結構的受力情形。

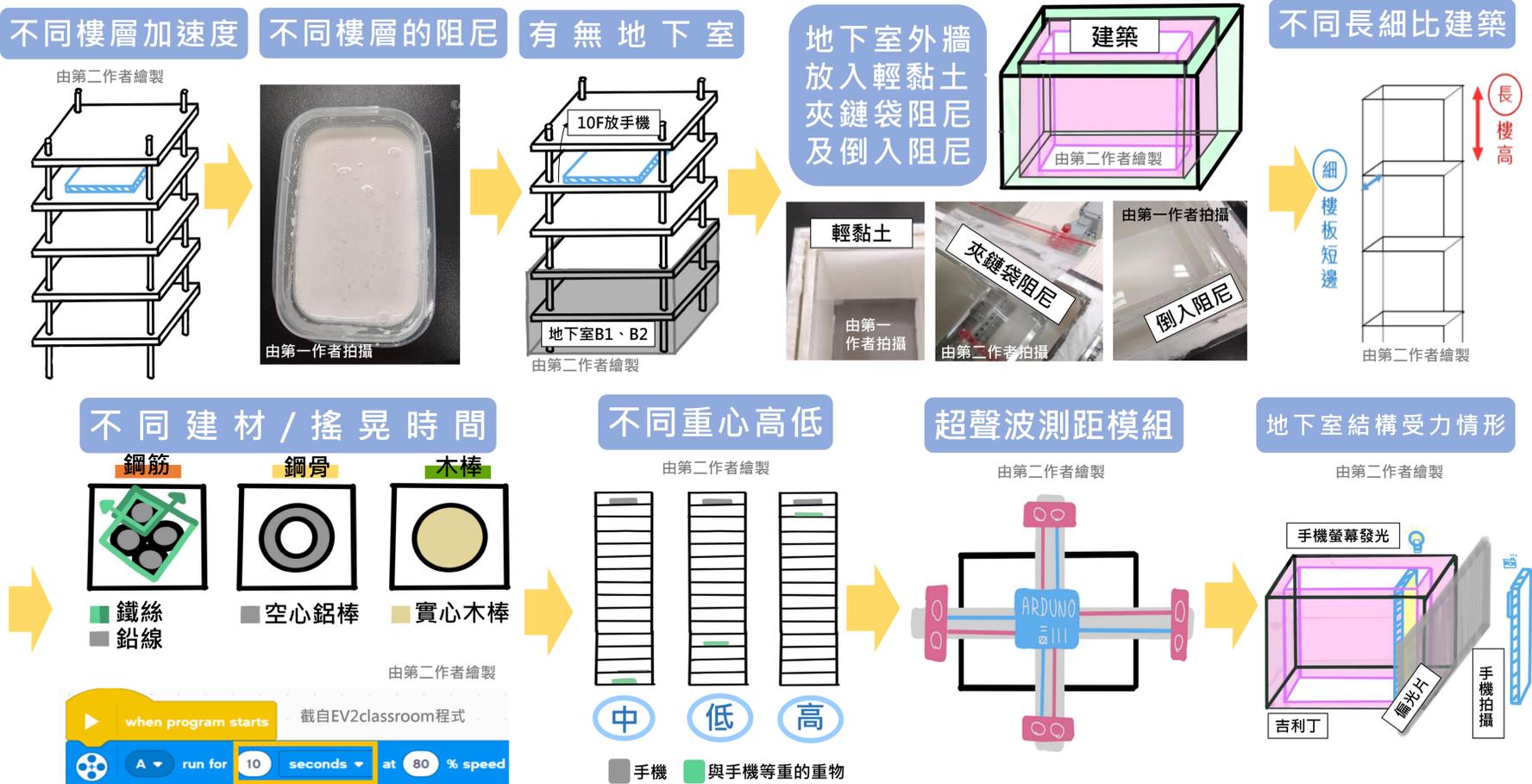
研究動機

臺灣地震頻繁，地震往往造成房屋倒塌、人口傷亡，因此減震的技術值得我們探討與發展。我們自製地震模擬器，並為建築加上地下室，讓建築更堅固，也更符合現今建築樣貌，也期許研究結果，能夠實際運用於生活，提高建築的安全性。

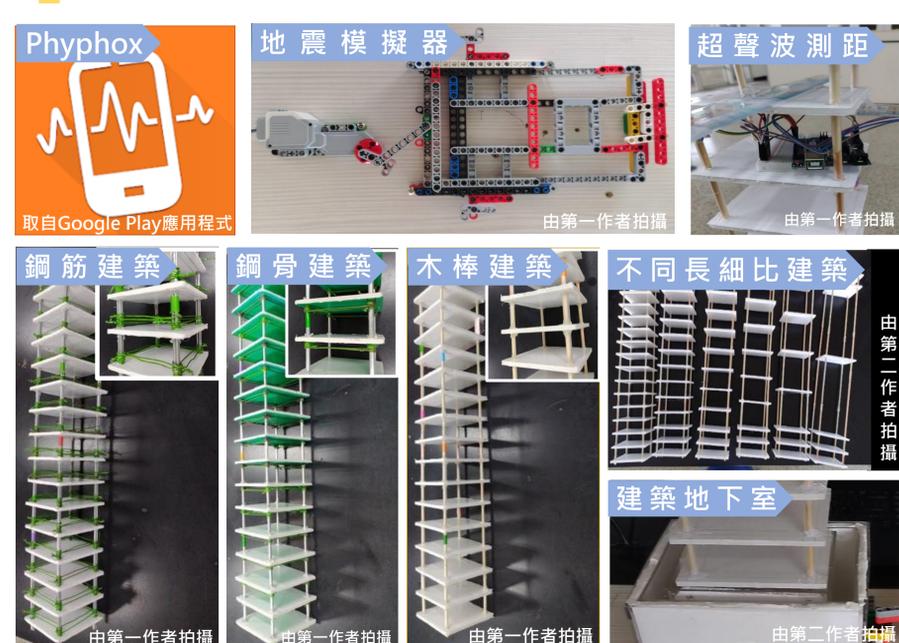
研究目的

1. 探討不同樓層的加速度變化
2. 比較非牛頓流體位於不同樓層的減震效果差異
3. 設計地下室結構的建築，對比在有無地下室的建築上測出的加速度
4. 比較地下室外牆填入輕黏土、直接倒入阻尼、放入裝有阻尼的夾鏈袋的減震效果差異
5. 比較不同長細比的建築之減震效果差異
6. 觀察鋼骨、鋼筋、木棒建築相同變因下的加速度和非牛頓流體減震效果
7. 探討地震搖晃時間長短以及重心高低對非牛頓流體阻尼減震效果的影響
8. 利用超聲波測距模組進行建築傾斜監測

研究過程



實驗器材

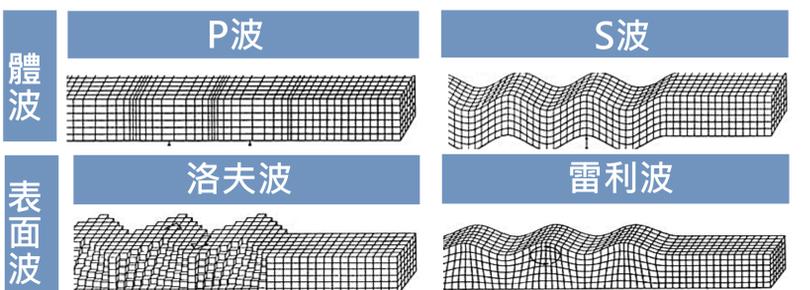


實驗原理

1. 震度分級表 (取自科學月刊第603期)

| 地震震度階級對照最大地動加速度(PGA)範圍表 | | | | | |
|-------------------------|--------|---------|---------|---------|-------|
| 階級 | 0級 | 1級 | 2級 | 3級 | 4級 |
| cm/s ² | <0.8 | 0.8~2.5 | 2.5~8 | 8~25 | 25~80 |
| 階級 | 5弱 | 5強 | 6弱 | 6強 | 7級 |
| cm/s ² | 80~140 | 140~250 | 250~440 | 440~800 | >800 |

2. 地震波類型 (圖片出自PanSci 泛科學)



實驗設置

| | 實驗名稱 | 對照組 | 實驗組 |
|---|----------------|-----------------------------------|---------------------|
| 一 | 不同樓層的加速度 | 手機位於建築1~13樓進行實驗 | |
| 二 | 阻尼位於不同樓層減震效果比較 | 手機置於13樓，阻尼置於1~13樓進行實驗 | |
| 三 | 建築有無地下室的加速度比較 | 原建築(共13層) | 建築加上兩層地下室(共15層樓) |
| 四 | 建築地下室外牆加阻尼減震效果 | 填滿輕黏土 | 放入裝有阻尼的夾鏈袋 直接倒入阻尼 |
| 五 | 不同長細比建築的減震效果比較 | 比較長細比0.43~2.67建築的減震效果 | |
| 六 | 不同建材建築減震效果比較 | 比較鋼筋、鋼骨及木棒建築減震效果差異 | |
| 七 | 不同搖晃時間減震效果比較 | 比較以10秒為間距，搖晃10~110秒對減震效果的影響 | |
| 八 | 不同重心高度對減震效果的影響 | 調整重心高度，比較減震效果的差異 | |
| 九 | 地下室結構試體受力變形探討 | 利用偏光片和吉利丁凍，透過觀察光的偏折，探討地下室中的受力情形 | |
| 十 | 建物即時監測之應用 | 利用Arduino 超聲波測距模組觀察數據變化判斷建物是否下陷傾斜 | |

地下室一、二版



圖1、第一版地下室

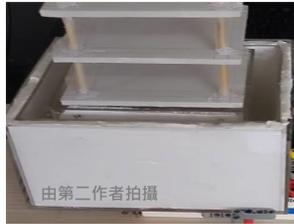


圖2、第二版地下室

地下室及地基結構

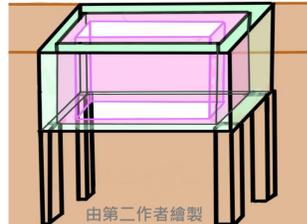


圖3、地下室與地基結構

震波調整前後情形



圖4、調整前波形



圖5、調整後波形

實驗一:相同震度在不同樓層測到的加速度

表1、不同樓層加速度值

| cm/s ² | 1F | 2F | 3F | 4F | 5F | 6F | 7F | 8F | 9F | 10F | 11F | 12F | 13F |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| 5弱 | 134 | 127 | 88 | 74 | 65 | 60 | 47 | 58 | 40 | 37 | 34 | 46 | 48 |
| 5強 | 232 | 156 | 122 | 111 | 110 | 87 | 70 | 74 | 74 | 55 | 57 | 50 | 68 |
| 6弱 | 273 | 266 | 194 | 143 | 141 | 117 | 100 | 101 | 90 | 98 | 94 | 114 | 110 |
| 6強 | 460 | 430 | 420 | 364 | 304 | 257 | 322 | 354 | 282 | 178 | 211 | 256 | 292 |
| 7級 | 701 | 631 | 550 | 578 | 592 | 589 | 660 | 867 | 902 | 1235 | 908 | 637 | 495 |

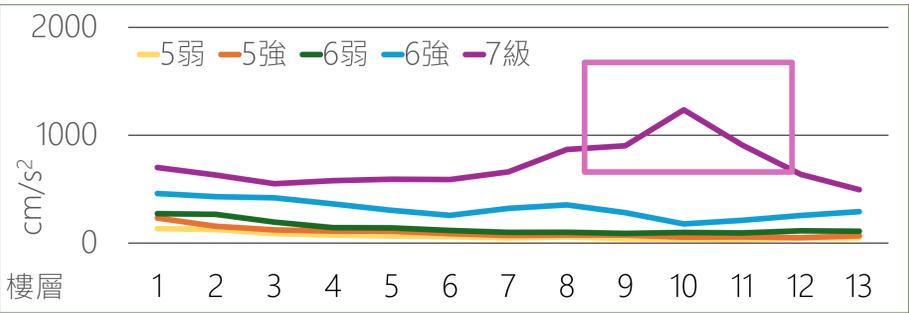
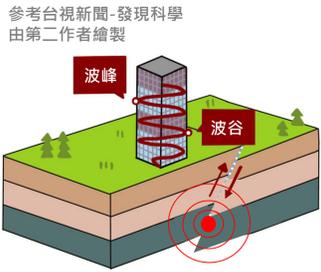


圖6、不同樓層加速度比較

分析原因

- 離震源的遠近，能量的傳遞
- 波峰和波谷在建築中的位置
- 自然共振效應



參考台視新聞-發現科學
由第二作者繪製

實驗三:建築物有無地下室的加速度比較

表4、有無地下室加速度值、減震值、減震率

| 震度 | 無地下室 | 有地下室 | 減震值 cm/s ² | 減震率 % |
|----|------------------------|------------------------|--------------------------|----------|
| | 平均(cm/s ²) | 平均(cm/s ²) | | |
| 5弱 | 44 | 33 | 11 | 25.00 |
| 5強 | 52 | 47 | 5 | 9.62 |
| 6弱 | 81 | 75 | 6 | 7.41 |
| 6強 | 216 | 193 | 23 | 10.65 |
| 7級 | 443 | 353 | 90 | 20.32 |

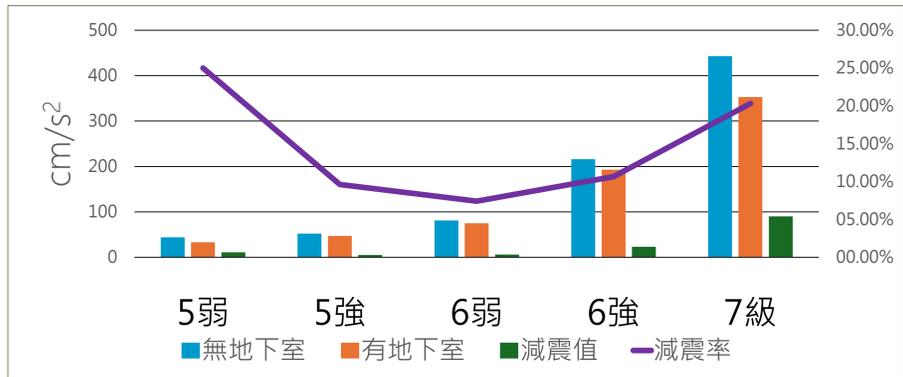


圖10、有無地下室加速度值、減震值、減震率

地下室功能

- 防止土壤液化
- 許多抗震、隔震、防震的必要結構與地下室有關

實驗四:建築物地下室外牆加阻尼的減震效果

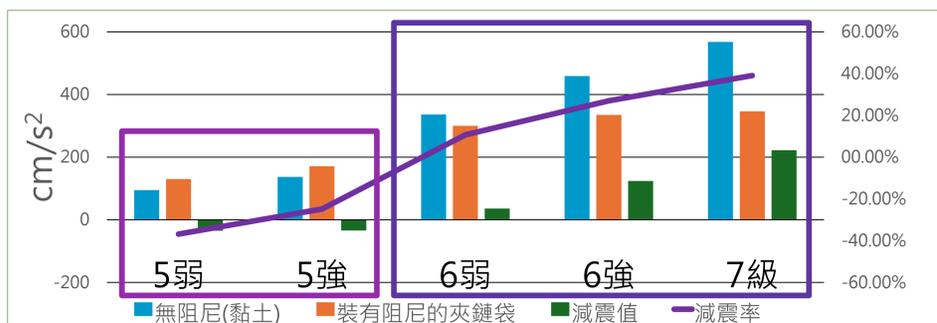


圖11、輕黏土、夾鏈袋阻尼加速度、減震值、減震率

夾鏈袋阻尼

平均減震值:62.6cm/s² 平均減震率:3.03%

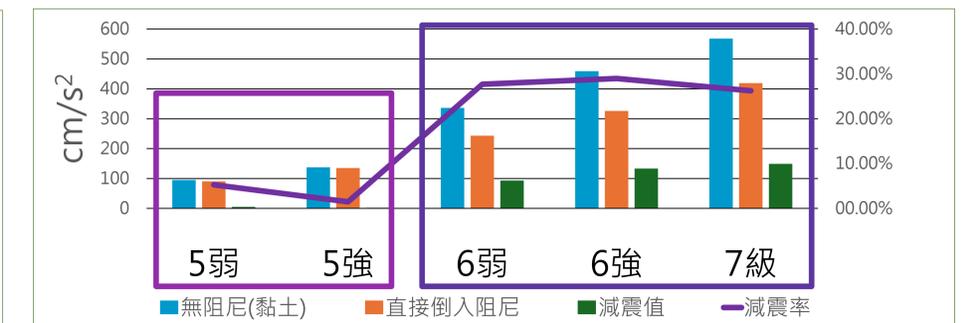


圖12、輕黏土、直接倒入阻尼加速度、減震值、減震率

直接倒入阻尼

平均減震值:76.4cm/s² 平均減震率:17.92%

實驗二:阻尼位於不同樓層各級震度的減震效果比較

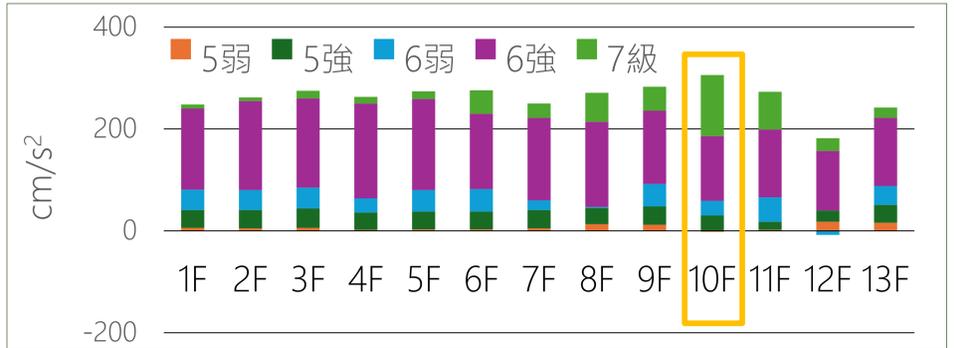


圖7、阻尼位於不同樓層減震效果加總(無阻尼-有阻尼)

表2、阻尼位於不同樓層減震效果百分比比較(減震值/無阻尼)

| 震度 | 1F | 2F | 3F | 4F | 5F | 6F | 7F | 8F | 9F | 10F | 11F | 12F | 13F | 平均 % |
|---------|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|---------|
| 5弱 | 12 | 10 | 12 | 4 | 6 | 6 | 10 | 25 | 23 | -4 | 4 | 35 | 31 | 13 |
| 5強 | 52 | 53 | 56 | 50 | 52 | 52 | 53 | 47 | 53 | 44 | 24 | 32 | 49 | 47 |
| 6弱 | 36 | 35 | 37 | 25 | 38 | 39 | 17 | 2 | 39 | 26 | 43 | -7 | 33 | 28 |
| 6強 | 44 | 48 | -48 | 51 | 50 | 41 | 45 | 49 | 40 | 35 | 37 | 32 | 37 | 43 |
| 7級 | 2 | 1 | 3 | 3 | 3 | 9 | 5 | 11 | 9 | 23 | 14 | 5 | 4 | 7 |
| 平均 % | 29 | 29 | 31 | 27 | 29 | 29 | 26 | 27 | 33 | 25 | 24 | 19 | 31 | |

表3、近年5級以上地震毀損(紅單)、倒塌建築數目統計

| 新震度 | 5弱 | 5強 | 6弱 | 6強 | 7級 |
|--------------------|-------------|----|------------|----|----------|
| 舊震度 | 5級 | | 6級 | | 7級 |
| 2024.04.03 花蓮外海 | 1 | | 17(天王星大樓) | | |
| 2022.9.18 池上 | 1(玉里超商) | | 2 | | |
| 2018.02.06 花蓮外海 | | | 4(統帥、雲門翠堤) | | |
| 2016.02.06 美濃 | 6 | | 78(維冠金龍) | | 2 |
| 2009.12.19 磯崎 | | | 多棟房屋毀損 | | |
| 1999.09.21 集集 | 25064(東星大樓) | | 62780(金巴黎) | | 6497(天廬) |
| 總計(棟) | 25072 | | 62881 | | 6499 |

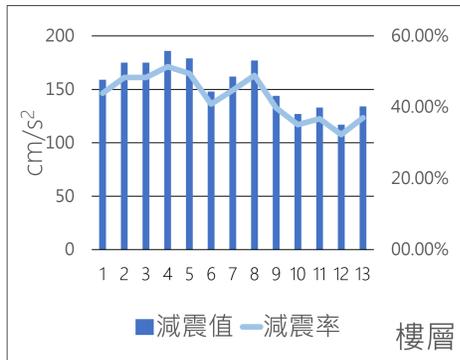


圖8、6強減震值及減震率

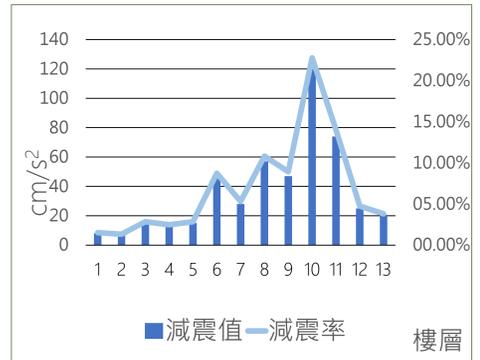
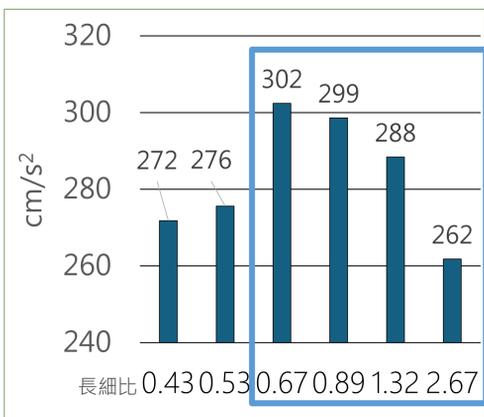


圖9、7級減震值及減震率

➤ 阻尼水分蒸發或沉澱會使減震效果下降，若使用不會發霉、沉澱等不具時效性的非牛頓流體例如:口香糖(橡膠溶液)。

實驗五:不同長細比建築的減震效果比較



原先預想:長細比大, 加速度應較大
→但建築C~F不符預想, 推測是建築材料較有彈性, 影響能量傳遞

表5、A、C、F第1~15個週期

| 建築 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| A(s) | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.83 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.83 | 0.87 | 0.87 |
| C(s) | 0.8 | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.83 | 0.77 | 0.83 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| F(s) | 0.73 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.73 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.73 | 0.8 | 0.7 | 0.77 |

圖13、不同長細比建築加速度

實驗六:不同建材對減震效果的影響

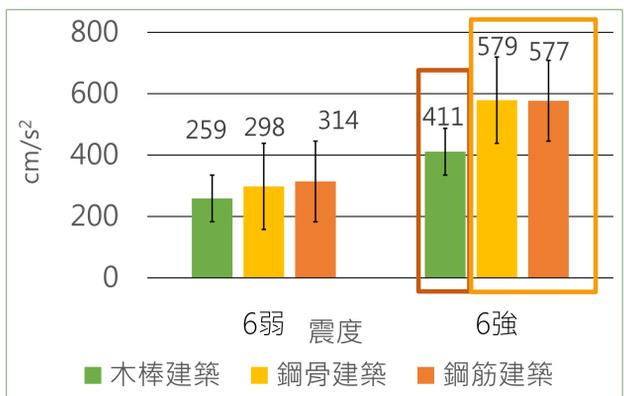


圖14、不同建材建築加速度比較

實驗七:搖晃時間長短對加速度的影響

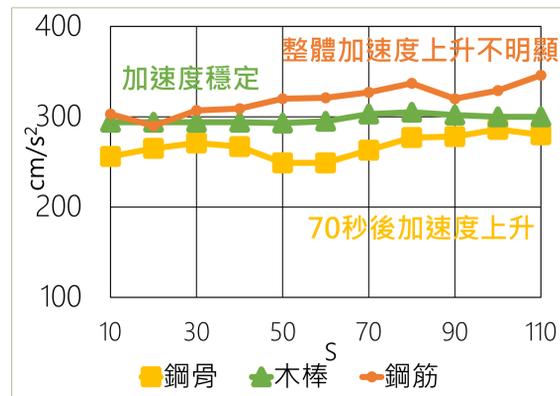


圖15、6弱時不同搖晃時間各建築加速度變化

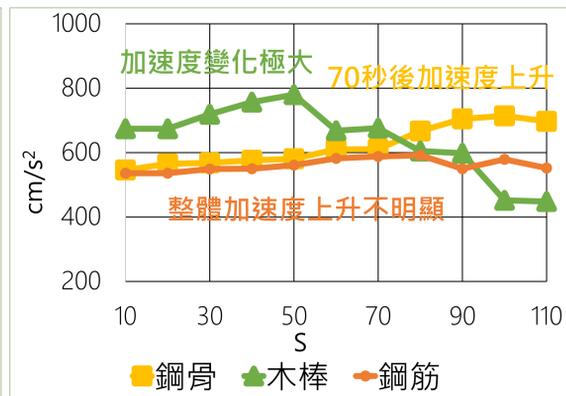


圖16、6強時不同建材不同搖晃時間加速度變化

實驗八:重心高度對減震效果的影響

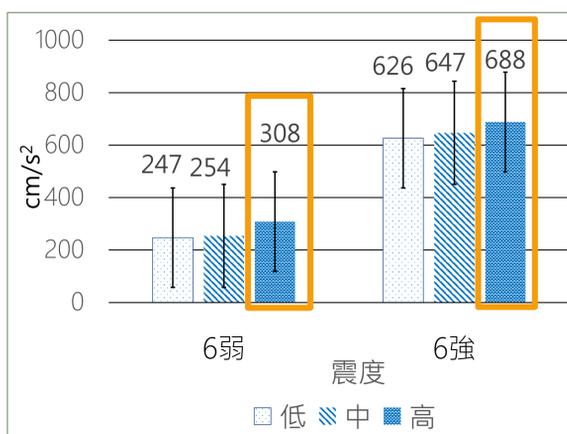


圖17、木棒建築不同重心加速度

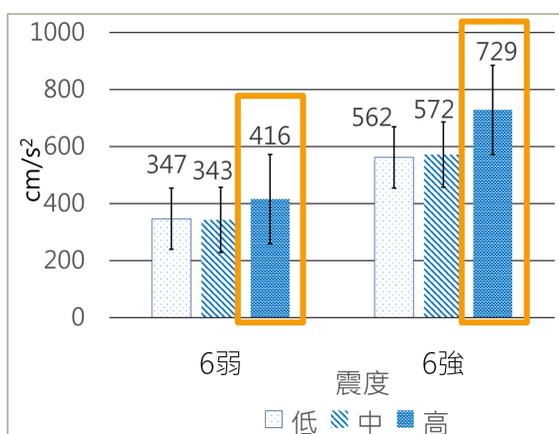


圖18、鋼骨建築不同重心加速度

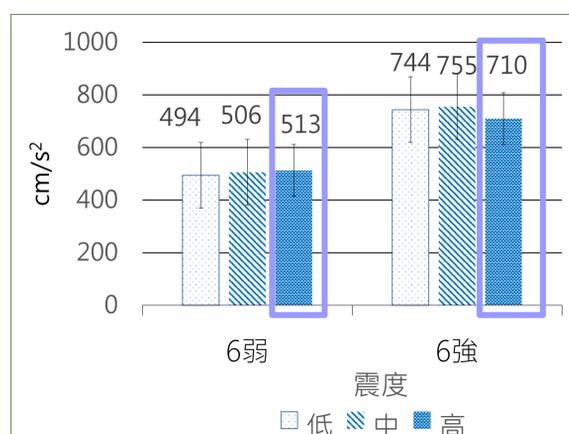


圖19、鋼筋建築不同重心加速度

實驗九:建物即時監測之應用

- $\tan\theta = \frac{\text{高度差}}{\text{兩組模組相差的距離}}$
- 水平偏移量 = $\sin\theta \times \text{模組到地面距離}$
- 傾斜率 = $\frac{\text{水平偏移量}}{\text{傾斜方向的模組垂直距離}}$

表6、建築傾斜監測數據

| cm | 高度差 | 垂直距離H | 水平偏移量Δ | 底邊長 | tanθ | 角度 | 傾斜率 |
|------|-----|-------|--------|-----|-------|----|--------|
| 寬邊 | 3 | 61 | 6.48 | 26 | 0.115 | 6 | 0.1062 |
| (左右) | 4 | 61 | 9.70 | | 0.154 | 9 | 0.1590 |
| | 5 | 60 | 10.77 | | 0.192 | 11 | 0.1794 |
| 窄邊 | 3 | 60 | 7.56 | 24 | 0.231 | 7 | 0.1260 |
| | 4 | 60 | 10.77 | | 0.269 | 10 | 0.1794 |
| | 5 | 59 | 12.89 | | 0.308 | 12 | 0.218 |

結論

- 通過調整實驗方法, 提高數據穩定性, 並確定各級震度的功率範圍, 提供基礎數據便於未來研究和應用。
- 根據實驗一, 樓層高度和能量的傳遞都會影響加速度。自然共振效應也影響不同樓層的加速度。
- 根據實驗二, 6強減震效果最佳, 而7級的數據不穩定, 可以推測震度越大, 減震效果越佳; 10樓放置阻尼的減震效果最好, 與先前研究大致相符。
- 根據實驗三, 建築加上地下室有更好的減震效果, 未來若加入隔震系統, 能更有效降低建築晃動和提高防震能力。
- 根據實驗四, 地下室外牆加入阻尼有助於減緩建築物的搖晃, 而兩種不同的阻尼配置, 減震效果也不太一樣, 若不考量浮力及重量問題, 希望能以直接倒入的阻尼, 能達到更完整的地震防治。
- 根據實驗五, 經由Tracker分析週期後, 發現長細比越小的建築能量傳遞平均, 建築更安全。
- 根據實驗六, 木棒建築有彈性能吸收地震能量。而鋼筋結構較鋼骨重, 產生的破壞力較大, 符合現實。
- 根據實驗七, 木棒建築超過一定強度後結構彈性疲乏, 能量無法完全傳遞; 鋼骨建築透過形變吸收能量, 因此產生較大的加速度, 但同時不易斷裂, 具耐震特性; 相較之下鋼筋建築利用結構的剛性吸收能量, 可減震, 但容易斷裂。
- 根據實驗八, 發現加速度隨著重心上升的情形, 與現實生活中重心越高, 建築越不穩固的現象相對應。
- 根據實驗九, 超聲波測距的相關儀器實際應用到生活中能進行建築傾斜情形的即時監測及回報, 及時告知屋主建築的情形, 提升建築的安全性。
- 吉利丁凍和偏光片的實驗中, 發現產生剪力才有明顯的偏光效果, 而我們的震波所產生的是正向力, 偏光效果不佳

參考文獻

| 研究主題 | 主要目的 |
|--|--|
| 天不搖, 地不動-非牛頓流體在建築結構抗震之應用 | 探討不同非牛頓流體、不同質量比的避震能力 |
| 屹立不搖-以積木模型模擬建築物探討地震S波的影響 | 探討最佳減震效果的建築結構 Ex:底面積或是樑柱位置等 |
| 游泳池可以減震耶!-流體阻尼的研究 | 探討流體阻尼器的最佳流體與減震方式 |
| 震震有池-水塔阻尼器設計及減震效能探討 | 探討影響水塔阻尼器效能之因素 |
| 制震阻尼系統在縮尺建物消能運用之初步評估探討 | 探討不同樓層的最佳效益 |
| 地動山不搖-隔震裝置在建築物之應用與探究 | 探討不同地震方向、不同阻尼/電磁式消能元件、不同建築高寬比等對隔震效果的影響 |
| 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 | 設計單擺模擬 101 大樓的阻尼器, 並用保特空瓶裝水取代單擺, 嘗試用慣性定律說明單擺效應。 |
| 屋欲靜而電不止 - 探究冷次定律在建築物的減震運用 | 探討單擺式質量阻尼器之擺長、擺錘質量、擺放位置、加裝液體/磁鐵同性相斥/磁生電之消能元件對減振效能之影響 |
| 「震」「震」有詞--臺灣南部大陸隱沒帶地震發生之研究與探討 | 利用吉利丁凍模擬地層, 透過偏振片的偏光效果觀察試體受各種應力的變化情形 |