

2025年臺灣國際科學展覽會

優勝作品專輯

作品編號	100003
參展科別	工程學
作品名稱	非牛頓流體於地下結構中的減震效果與減震裝置探討 The damping action and the effective damping structure of the non Newtonian fluid in the gap between basement wall and diaphragm wall
就讀學校	新北市立海山高級中學
指導教師	張惟捷 林鈺龍
作者姓名	李語庭 應沅蓁
關鍵詞	<u>非牛頓流體、地下室、減震</u>

作者簡介



我們是來自新北市海山高中國中部的李語庭和應沅蓁，從七年級就陸續開始進行各種與非牛頓流體阻尼及減震相關實驗與研究，參加了許多科展競賽，從市賽到全國科展，也曾參加過教育局舉辦的獎助計畫，除了取得實驗所需經費，同時增加上台報告的經驗，也取得與專家交流的機會，希望透過這次國際科展能拓展我們的視野，汲取經驗。

2025 年臺灣國際科學展覽會

研究報告

區別： 北區

科別：工程學科

作品名稱：非牛頓流體於地下結構中的減震效果與減震裝置探討

The damping action and the effective damping structure of the
non- Newtonian fluid in the gap between basement wall and
diaphragm wall

關鍵詞：非牛頓流體、地下室、減震

編號：

（編號由國立臺灣科學教育館統一填列）

摘要

本研究探討臺灣常見的鋼筋華廈、鋼筋及鋼骨大樓，透過於地下室外牆與連續壁間填入非牛頓流體、牛頓流體及輕黏土，比較建物受震時加速度，發現地下結構中設置非牛頓流體減震裝置較牛頓流體、輕黏土更減震。而模擬器搖晃20-50秒時，非牛頓流體能顯著的減震，超過50秒後，非牛頓流體可能因沉澱而減震效果下降；在100秒後，無減震裝置的建築加速度上升，非牛頓流體再次出現明顯的減震效果；不同重心的建築質量分布導致不同的擴溶現象，使減震效果發生變化；較高的建物因力臂較長，重心高時產生較大的加速度。接著觀察光穿透吉利丁凍的偏折情形，發現受力面與地震方向垂直時，牆面受力明顯；若受力面和搖晃方向不垂直，柱的部分受力大，且觀察到力量有轉移的現象。最後，為建築設計超聲波測距模組，即時監測建築下陷或傾斜情形，以利即時修繕及重建。

Abstract

This study investigates common types of buildings in Taiwan, including reinforced structure apartment, steel construction building, and reinforced structure building. By filling the space between the basement outer walls and the diaphragm walls with non-Newtonian fluid, Newtonian fluid, and light clay, we compared the acceleration experienced by the buildings during seismic events. It was found that installing non-Newtonian fluid damping devices in the underground structures of reinforced structure building provided greater damping effects than Newtonian fluid and lightweight clay. When our earthquake simulator shakes for 20 to 50 seconds, non-Newtonian fluids can exhibit significant damping effects. However, after 50 seconds, the damping effect decreases due to sedimentation. After 100 seconds, the acceleration of buildings without a damping device increases, while non-Newtonian fluids again demonstrate noticeable damping effects. Additionally, variations in mass distribution related to different centers of gravity result in different solubility phenomena, affecting the damping performance. Taller buildings experience greater acceleration due to longer moment arms when the center of gravity is high. We also observed the deflection of light passing through gelatin, finding that when the force surface is perpendicular to the direction of seismic vibrations, the stress on the wall is more pronounced. Conversely, if the force surface is not perpendicular to the shaking direction, the beams and columns experience greater stress. Finally, we designed an ultrasonic distance measurement module for buildings to monitor any subsidence or tilting in real-time, facilitating timely repairs and reconstruction.

壹、前言

一、研究動機

臺灣目前主要住宅建築分為三合院、透天、公寓、華廈、大樓與摩天大樓，人口密集的都會區以公寓、華廈、大樓為主，所謂的公寓是指總樓層 5 樓以下，沒有配置電梯也無管理員，平均屋齡超過 40 年，是目前許多小資族或大學生在外租屋便宜的選項；大樓是總樓層達 12 樓以上，但總高普遍低於 50 公尺，依法須設置電梯，通常配有地下停車場與管理員，屋齡 0-30 年都有，考慮容積與土地開發效益，大樓產品是目前雙北新建案的主力；而華廈樓高則介於公寓和大樓之間，和公寓最大的差異是配有電梯，部分也具有地下停車場，但由於華廈基地面積普遍比大樓少，故無管理員或公共空間的配置，屋齡介於 25-40 年居多。

根據內政部統計^[1]，全國平均屋齡高達 32 年，且有超過 52%建物屋齡超過 30 年。六都中，台北市平均屋齡 37.6 年最老；403 大地震中，災情嚴重的花蓮平均屋齡也達 36.8 年，該次強震造成全台超過 200 處建物毀損，包括基隆市義一路三棟坍塌的危樓老屋，而花蓮屋齡 38 年、9 層樓高的天王星大樓，由於屋齡過高加上結構設計不良，建物入口柱子數量太少，導致受力過重，向前倒塌。經過 403 大地震，臺灣超過 440 萬棟的老屋是否應該重建、強制拆除等相關議題也受到關注。而若從減震的角度出發，大量的老屋與危樓若希望重建在重新設計建案時，是否能在地下結構中加入減震裝置，以提升建築的安全性。因此我們針對鋼筋混凝土結構的公寓、華廈建築進行研究，希望能設計出適用於公寓及華廈建築的減震裝置，地震來臨時，為臺灣建物提供更安全的保障。

經過我們的統計，近年來 5 級以上的地震毀損(紅單)、倒塌建築數目如下表 1 所示，在舊制震度 6 級、新制震度 6 弱及 6 強震度中，倒塌及毀損數目最多，換言之，6 級地震對於臺灣的建物破壞情形最明顯，因此我們希望透過模擬 6 級震度地震波，探討 6 級震度下，何種減震裝置能達到最好的減震效果。

表 1、近年震度 5 級以上房屋倒塌及毀損數量統計

新制震度	5 弱	5 強	6 弱	6 強	7 級
舊制震度	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

二、研究目的

- (一) 比較公寓及大樓各樓層加速度差異(無地下室)
- (二) 比較無地下室的公寓及有地下室的華廈建築加速度差異
- (三) 探討地下室外牆與連續壁之間直接倒入非牛頓流體阻尼、放入夾鏈袋裝非牛頓流體、水及輕黏土的加速度差異
- (四) 探討地下室結構中的受力情形
- (五) 探討不同搖晃時間對非牛頓流體阻尼的減震效果影響
- (六) 探討不同重心高低對非牛頓流體阻尼的減震效果影響
- (七) 設計建物即時監測模組進行建物傾斜情形的即時監測

三、文獻回顧

(一) 相關期刊論文及研究作品

《土木水利》期刊於 2023 年 8 月刊登了一篇以〈消波塊型地震超材料設計及減震效果模擬分析〉^{二1}為題的研究，主要構想是在城鎮或社區周圍挖一個類似護城河的結構，並在其中填入軟性物質，建立屏障阻隔特定頻段的地震波，以不接觸建築本身的方式達到減震效果，嘗試利用土木材料、混凝土、消波塊體、圓板與半球為元素，組合出新型消波塊型地震超材料，透過分析模擬，驗證此設計對地震表面波的衰減效果。而我們將流體阻尼裝置放置於地下室外牆連續壁之間，與其的理念有異曲同工之妙，希望可以透過實際的模擬實驗，更具體證明該理論的可行性。

而我們也找到了 2016 年 9 月的” Extreme Mechanics Letters” 第八卷中的 <Seismic waves damping with arrays of inertial resonators>^{三-2}，這篇研究也是由超材料的構想進行延伸，主要針對沉積盆地中發生短波長的表面彈性動力波的地震屏蔽，並提出由直徑 0.74 m 的鐵球組成、間距為 1 m 的週期性陣列，透過薄橡膠韌帶連接到基礎設施地基下方或周圍的大量混凝土。在概念中有提到:現今，土木工程師們利用金屬彈簧、滾珠軸承及橡膠墊等設計以減輕震波能量，保護特定建築；地震工程學中，有結構外的耗散系統結合半懸吊式減震器。這篇研究的目的便是說明，針對來自建築物底部的地震波，這些埋在土壤中的地基或地下樓層結構可以在不久的就能實現。在某種意義上，此篇研究便是初步的利用數值模型證明透過地下的共振鐵球達到頻率濾波的效果。

另外在 2019 的國際科展中找到一篇「『震』『震』有詞--臺灣南部大陸隱沒帶地震發生之研究與探討」^{三-6}，研究者利用吉利丁模擬板塊，利用偏光片觀察受力情形，於是我們便參考他們的實驗方法，將吉利丁棟至於地下室外牆與連續壁之間，希望得知地下室結構的受力分布情形。

而我們在參考了賓州州立大學埃伯利理學院的網站資源^{三-2}後，決定實驗中可以利用週期圖表法(periodogram)來觀察模擬建築和地震模擬器的頻率。週期圖法通過傅立葉轉換來估計信號的功率譜密度（Power Spectral Density, PSD）。功率譜密度描述了信號隨頻率變化的能量或功率分佈情況。換句話說，週期圖法能夠顯示信號在哪些頻率上具有較高的能量或功率。

(二) 地震波定義及簡介

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

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傳播。

S 波傳播速度的公式: $v_s = \sqrt{\mu / \rho}$

P 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。

地上樓層的阻尼與 101 大樓阻尼球的原理相似，地下室周圍的阻尼置於建築結構外，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⁻⁴

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⁻⁴(出自科學月刊第 603 期)

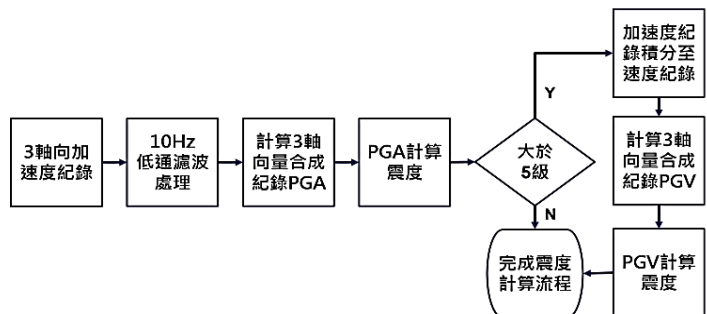


圖 2、新舊震度加速度及速度換算⁻³(出自中央氣象局地震測報中心)

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)。由於西元 2020 年時，中央氣象署將震度改為新制，但過去的地震皆使用舊制規範的加速度紀錄，為了與過去的地震資料進行比較，數據以 PGA(加速度)做為紀錄單位。

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

二、 自製模擬建築物

(一)0.5cm*10cm*12cm 的珍珠板

(二)直徑 0.5cm，長 60cm 的竹棒\鉛棒鉛線、直徑 0.1、0.3、0.5cm 的鐵絲

三、 地下室製作

(一)10cm*12cm、12.5cm*16cm、14.5cm*17.5cm，高均為 10.5cm 的三種壓克力盒

四、 地下室外牆填充物

(一) 非牛頓流體阻尼:太白粉:水=6:4(重量百分濃度 60%)^{三-3}

(二) 水、輕黏土

參、研究過程或方法及進行步驟

一、 研究過程

(一) 地震模擬器製作^{三-4}

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。我們共做了兩版地震模擬器，第一版模擬器是架設用來放建築的平台於軌道上，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 3、4，運作時更穩定，避免脫軌，再根據各實驗所需，微調結構。

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。

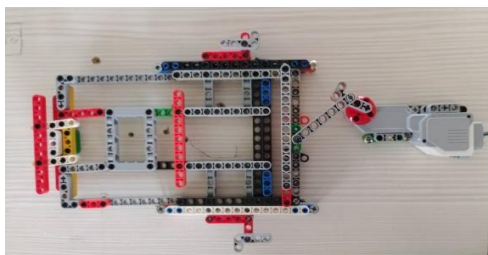


圖 3、模擬器上視圖(由第一作者拍攝)

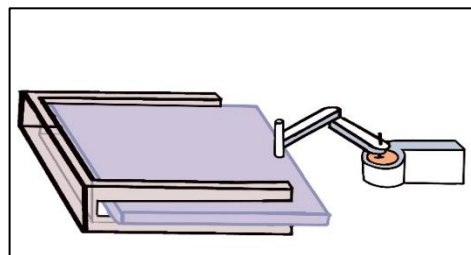


圖 4、地震模擬器設計圖(由第二作者繪製)

(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。因模擬器平台加速度受重量等因素影響，我們會依實驗設置調整功率。

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

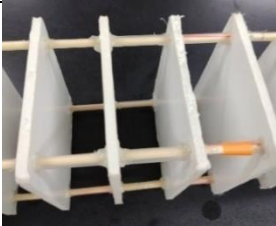
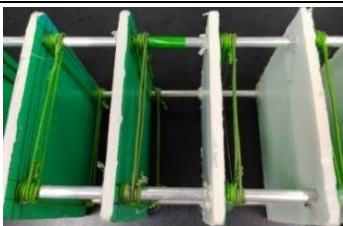
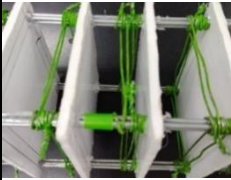
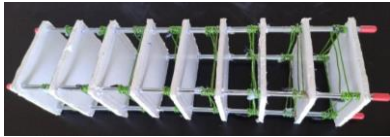
(2) 取每個震波的最大加速度值

(3) 調整程式中的功率，並以同樣的方式找出各震度最大/小加速度值

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

(三) 不同建築材料建築製作

表 2、建築製作說明

結構	木棒(大樓)	鋼骨(大樓)	鋼筋(公寓及華廈)
樑柱	直徑 5mm 木棒	直徑 5mm 空心鋁棒、鐵絲	直徑 3mm*4 條鉛線、鐵絲
樓板	厚 5mm 的珍珠板		
步驟	1. 樓地板的四個角鑽洞 2. 將四根竹棍分別穿進四個洞，輪流套入吸管和樓板	1. 將木棒建築的木棒替換成空心鋁棒 2. 樓板下方以粗鐵絲四面纏繞固定	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，重複步驟 2
特色	1. 輕便、不會對模擬器造成負擔 2. 無法模擬真實建築	1. 仿真 2. 較不容易倒塌	1. 笨重、對模擬器造成負擔 2. 無法模擬鋼筋「混凝土」與現實建築有差異
圖片	 (由第一作者拍攝)  (由第一作者拍攝)	 (由第一作者拍攝)  (由第一作者拍攝)	 (由第一作者拍攝)  (由第二作者繪製)  (由第一作者拍攝)

(四) 地下室製作

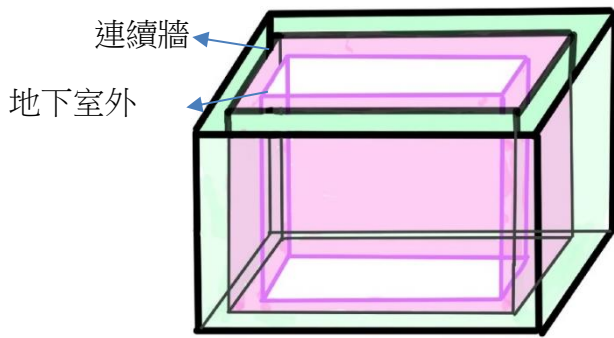


圖 5、地下室結構示意圖(由第二作者繪製)

表 3、地下室結構說明

空間	設置說明
綠色區域(地基)	輕黏土:模擬土壤
紫色區域 (地下室外牆與連續壁間)	非牛頓流體阻尼:減震裝置、輕黏土:模擬土壤
白色區域 (地下室)	放置模擬建築
備註	地下室小盒子(白色區域)底部不固定於中盒子(紫色區域)上，以排出固定造成的減震效果。

二、 研究方法

(一) 實驗一: 公寓、大樓建築各樓層加速度比較

- 說明: 測量現實生活中最常見 6 樓公寓鋼筋建築以及 15 樓大樓木棒建築於 6 級震度時，各樓層的加速度，分析造成差異的原因。
- 實驗步驟:
 - 將手機輪流置於各樓層，並將等重的重物置於對稱樓層，使其中心固定，測量加速度
 - 觀察數據變化並推測造成差異的原因

(二) 實驗二: 公寓、華廈鋼筋建築有無地下室加速度比較

- 說明: 測量公寓鋼筋建築(地上 6 層樓)以及華廈鋼筋建築(地下 2 層樓+地上 6 層樓)在 6 級震度的加速度，分析造成差異的原因。
- 實驗步驟:
 - 公寓建築: 為了排除因為重量不同影響加速度的因素，在模擬器上放置與地下室等重的重物，將公寓建築的重量控制與華廈建築相同。手機置於 6 樓測量加速度。
 - 華廈建築(有地下室): 為建築加上地下室。將手機置於地上 6 樓測量加速度。
 - 觀察數據變化並推測造成差異的原因。

(三) 實驗三: 華廈鋼筋建築地下室外填入不同材料加速度比較

1. 說明: 透過實驗二確定建築物加上地下室能更穩固後, 於地下室的外牆與連續壁間分別放入非牛頓流體(太白粉+水)、牛頓流體(水)、輕黏土, 測量 6 弱及 6 強震度的加速度, 並比較減震效果。
2. 實驗步驟:
 - (1) 將地下 2 樓層+地上 6 層樓的鋼筋建築最下方兩層放入地下室中最小的盒子, 形成 B1、B2, 再將小盒子依序放入中盒子、大盒子, 模擬地下室外牆小盒子與模擬連續壁中盒子間的空間, 用來放入軟性材料; 中、大盒子間的空隙填入輕黏土, 模擬地下的土壤。
 - (2) 對照組:將地下室外牆與連續壁之間填滿輕黏土, 模擬一般的地下室情形, 將手機放在頂樓測量加速度。
 - (3) 實驗組 1:使用水當作牛頓流體, 裝在夾鏈袋中, 置於地下室外牆與連續壁之間, 將手機放在頂樓測量加速度。
 - (4) 實驗組 2:使用重量百分濃度 60%太白粉水溶液作為非牛頓流體, 裝在夾鏈袋中, 置於地下室外牆與連續壁間, 將手機放在頂樓測量加速度。
 - (5) 分別計算牛頓及非牛頓流體阻尼減震效果, 推測造成差異的原因。

對照組

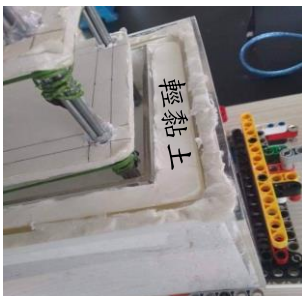


圖 6、輕黏土填入地下結構
(由第一作者拍攝)

實驗組 1

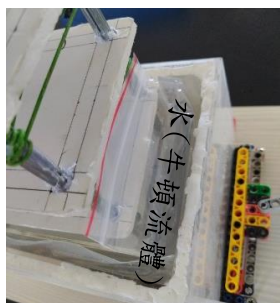


圖 7、夾鏈袋裝水置於地下結構
(由第二作者拍攝)

實驗組 2

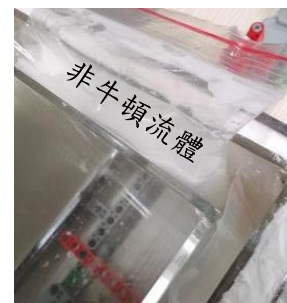


圖 8、夾鏈袋裝非牛頓流體置於地下結構
(由第一作者拍攝)

(四) 實驗四: 華廈鋼筋建築地下室外填入不同狀態的非牛頓流體加速度比較

1. 說明: 在進行實驗三時, 我們發現直接在地下室外牆倒入非牛頓流體阻尼會造成建築浮起傾斜, 但現實生活中多數建築物重量足以抵抗浮力, 或利用適當配重解決, 所以我們比較實驗三所使用的夾鏈袋裝阻尼和直接倒入兩種狀態的非牛頓流體, 會不會有減震效果的差異。

2. 實驗步驟:

- (1) 分別在地下室外牆放入裝阻尼的夾鏈袋(圖 9)、直接倒入阻尼(圖 10)。手機放置於頂樓進行實驗測量加速度。
- (2) 觀察數據變化並推測造成差異的原因。

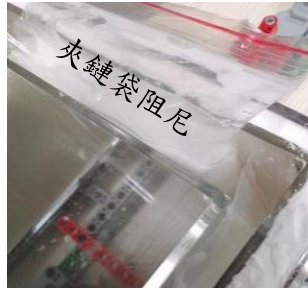


圖 9、夾鏈袋裝阻尼(由第一作者拍攝)



圖 10、直接倒入阻尼(由第二作者拍攝)

(五) 實驗五: 透過吉利丁凍的偏光情形觀察地下室外牆的受力情形

1. 說明:利用偏光片觀察光線穿透吉利丁凍偏折情形，探討地下室結構的受力分布。
2. 實驗步驟:
 - (1) 吉利丁凍填滿地下室外牆與連續壁之間的空間，將發光盒置於地下室內，並將偏光片置於連續壁外。
 - (2) 在模擬器模擬地震波的同時，利用手機錄影，觀察透過偏光片看到吉利丁凍的顏色變化，探討地下室結構中的受力分布情形。
 - (3) 調整地下室放置的角度(寬面與震動方向的夾角，共四種角度 0° 、 21° 、 54° 、 90° ，每個角度均錄寬面、窄面兩種的色彩變化)，嘗試觀察不同角度度的受力變化情形。裝置如圖 11~14 所示。

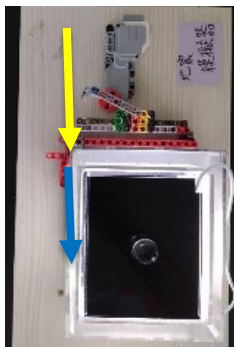


圖 11、夾角 0° 裝置
(皆由第一作者拍攝)



圖 12、夾角 21° 裝置
(皆由第一作者拍攝)



圖 13、夾角 54° 裝置
(皆由第一作者拍攝)

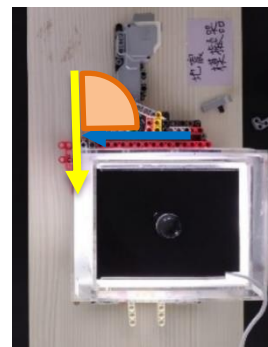


圖 14、夾角 90° 裝置
(皆由第一作者拍攝)

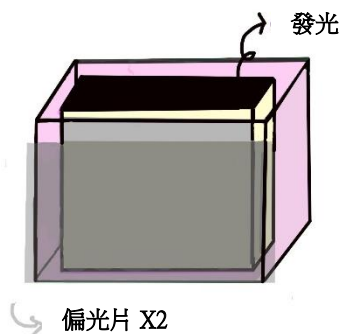


圖 15、偏光實驗設計圖(由第二作者繪製)

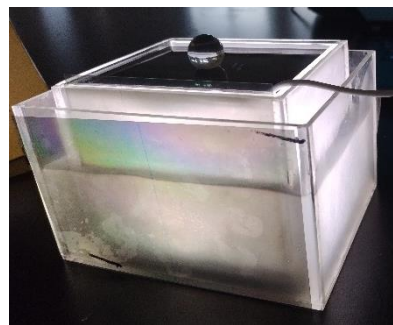


圖 16、偏光實驗裝置(由第一作者拍攝)

(六)實驗六: 不同地震搖晃時間對非牛頓流體阻尼的減震效果和建物材質影響

1. 說明: 我們查詢地震相關資料時, 發現 921 大地震之所以會有如此嚴重的災情, 有很大一部分是因為地震搖晃時間長達 102 秒, 所以我們調整模擬器的搖晃時間, 觀察震度 6 強時, 不同搖晃時間分別對不同建築的加速度及減震效果造成的影響。
2. 實驗步驟
 - (1) 第一組實驗-華廈地下結構填入輕黏土 vs.非牛頓流體: 在地下室外牆與連續壁間填入輕黏土及非牛頓流體, 比較搖晃時間對減震效果的影響。
 - (2) 第二組實驗- 鋼筋 vs.鋼骨大樓: 在地下室外牆與連續壁間放入夾鏈袋阻尼, 比較搖晃時間對鋼筋及鋼骨大樓加速度的差異。
 - (3) 讓模擬器搖晃 10、20……至 110 秒, 以 10 秒為區間, 取 11 組加速度。
 - (4) 將在時間內測出的所有震波最大值平均, 得出的數據製作成圖表, 並分析造成變化的原因。

(七)實驗七: 重心高低對非牛頓流體阻尼的減震效果影響

1. 說明:我們發現生活中的建築, 高樓層梁柱較細而低樓層梁柱較粗, 影響建築物重心, 我們猜想可能因為重心不同而影響建築物的加速度和非牛頓流體的減震效果, 因此我們利用重物調整鋼筋華廈、鋼筋大樓、鋼骨大樓建築重心, 比較 6 弱及 6 強震度, 不同重心高度對減震效果的影響。
2. 實驗步驟:
 - (1) 為了避免重量因素影響加速度, 加上重物讓各組實驗平台上重量皆與鋼筋大樓組別等重。

- (2) 利用懸吊法找出手機置於建築頂樓時，三棟建築的重心所在，當作重心中。接著將與手機等重的重量分別置於最低樓層-1 樓、次高樓層-華廈 5 樓/大樓 12 樓(最高樓層放置手機)，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 4)。



圖 17、懸吊法找重心-鋼筋大樓
(由第二作者拍攝)



圖 18、懸吊法找重心-鋼骨大樓
(由第二作者拍攝)



圖 19、懸吊法找重心-鋼筋華廈
(由第二作者拍攝)

表 4、不同重心在建築中的高度比例

重心	鋼筋華廈	鋼筋大樓	鋼骨大樓
低	40%	54%	54%
中	62%	68%	60%
高	70%	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，進行實驗

(八) 實驗八: 建物即時監測研究

- 說明: 因為台北基泰大直的工安事故，讓我們意識到建築物狀態的即時監測很重要，所以我們就利用 Arduino 超聲波測距模組所回傳至電腦的數據進行建物監測，透過數據變化判斷建物是否下陷、傾斜。
- 實驗步驟:
 - 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
 - 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 20、21 所示

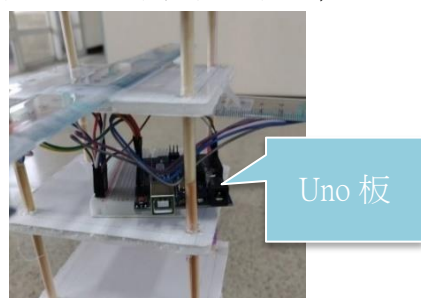


圖 20、Uno 板架設(由第一作者拍攝)

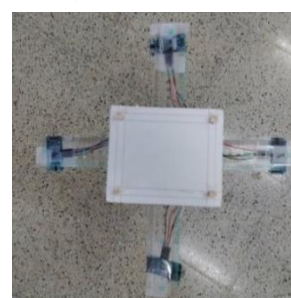


圖 21、HC-SR04 架設(由第一作者拍攝)

- (3) 將四組模組的距離控制相同並觀測數據。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

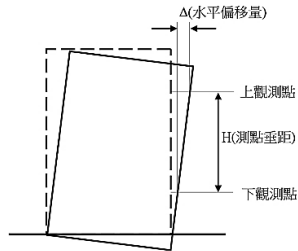


圖 22、傾斜率計算(出自 HM 建築建材工程)

- (5) 臺灣省土木技師公會規定，房屋傾斜率超過 1/40，應該重建。

肆、研究結果與討論

一、實驗一：公寓、大樓建築各樓層加速度比較

(一) 鋼筋公寓：

表 5、鋼筋公寓各樓層加速度變化

樓層	1 st	2 nd	3 rd	平均(cm/s ²)
平台	453	418	416	429
1F	384	377	371	377
2F	329	299	302	310
3F	423	444	452	440
4F	330	327	346	334
5F	383	449	418	417
6F	350	345	332	342

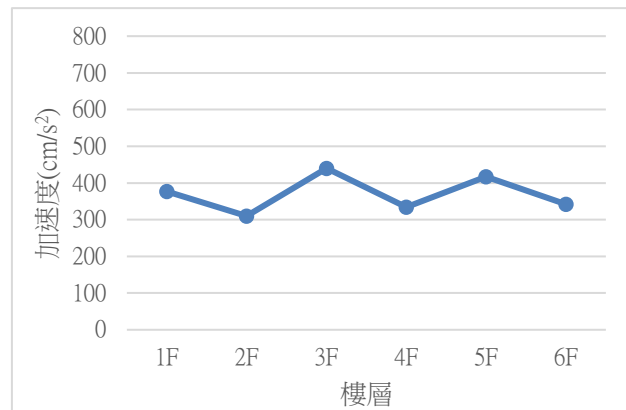


圖 23、鋼筋公寓各樓層加速度變化折線圖

我們實驗前預想，高樓層可能因形變有較大的振幅，若要確保高樓層較大的振幅會使其測量到的加速度較低樓層大，則需得知各樓層的搖晃頻率，若高樓層頻率較低樓層大，我們便可以得出：「高樓層越大，加速度越大」的結論，為了得出各樓層確切的搖晃頻率，我們利用 periodogram（週期圖法）進行傅立葉轉換，得出影響加速度最主要的頻率，periodogram 常用於頻譜分析中，特別是用來檢測信號中的主要頻率成分。以圖 24-27 為例，我們選擇紀錄所占成分最多的頻率。

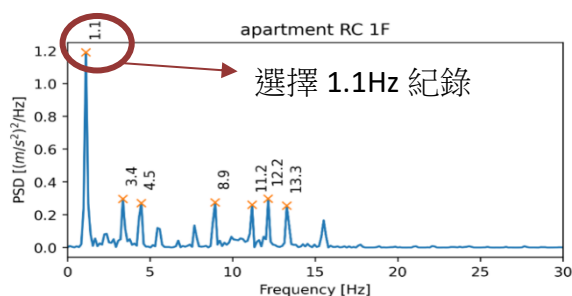


圖 24、鋼筋公寓建築 1 樓頻譜分析圖

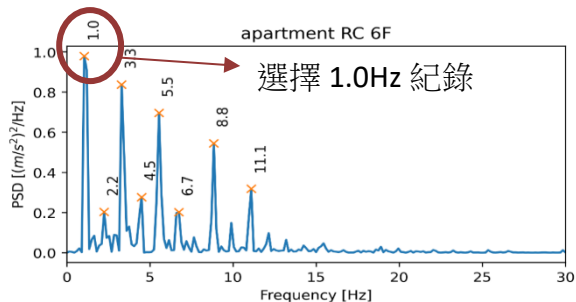


圖 25、鋼筋公寓建築 6 樓頻譜分析圖

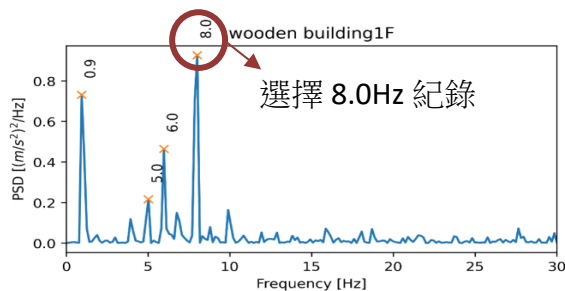


圖 26、木棒大樓建築 1 樓頻譜分析圖

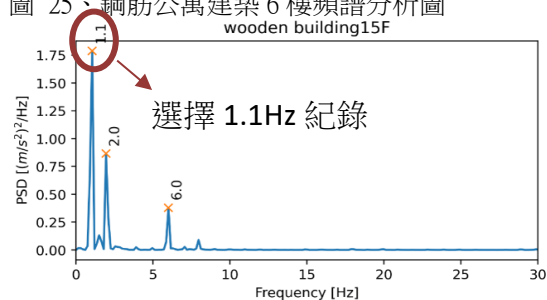


圖 27、木棒大樓建築 15 樓頻譜分析圖

表 6、鋼筋公寓各樓層頻率

樓層	頻率(Hz)
平台	1.0
1F	1.1
2F	1.1
3F	1.1
4F	1.1
5F	1.1
6F	1.0

在圖 23 中觀察到，鋼筋公寓各樓層的加速度變化並沒有明顯的上升或下降趨勢；而經過頻譜分析，我們得出表 6，分析結果顯示，各樓層的頻率十分接近，無明顯變化。綜合實驗數據與分析結果，推測由於鋼筋公寓樓層數少，材質堅硬，能量傳遞完整，不易產生形變，所以高樓層的振幅不會較低樓層大，而同時頻率也相近，使加速度無明顯變化趨勢。

另外，從鋼筋公寓的頻譜分析結果中發現，1 樓(圖 24)時除了我們所記錄的 1.1Hz，其他頻率(3.4 Hz、4.5 Hz、8.9 Hz)的成分相較於 1.1Hz 並不高；但在 6 樓的頻譜圖中(圖 25)，除了我們取的 1.0Hz，其他頻率的成分也不低，推測是因為相較於 1 樓，6 樓時手機所接收的搖晃，能量傳遞經過更多樓層，所產生的雜訊成分增加。

(二) 木棒大樓

表 7、木棒大樓各樓層加速度變化

樓層	1 st	2 nd	3 rd	平均(cm/s ²)
模擬器平台	426	419	412	419
1F	485	497	401	461
2F	365	334	318	339
3F	344	360	352	352
4F	356	397	346	366
5F	351	378	333	354
6F	226	247	258	244
7F	252	251	246	250
8F	195	204	213	204
9F	233	194	187	205
10F	239	205	184	209
11F	250	201	191	214
12F	260	246	245	250
13F	256	229	233	239
14F	263	253	238	251
15F	232	215	214	220

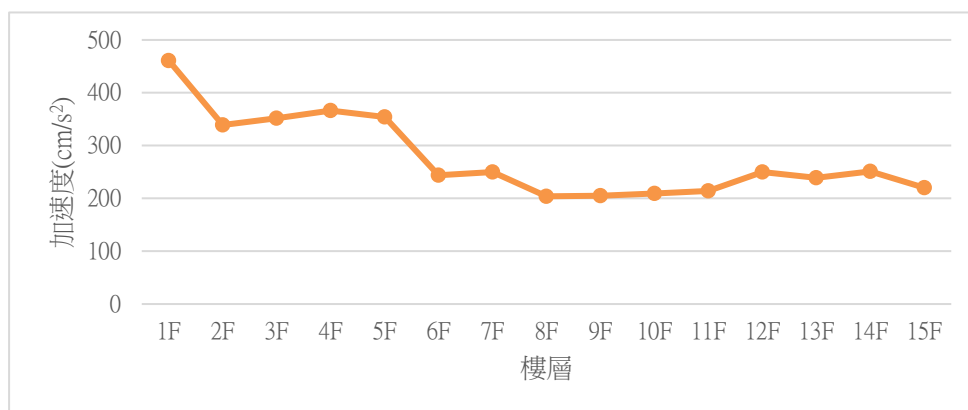


圖 28、木棒大樓各樓層加速度變化折線圖

根據圖 28 的加速度變化，發現木棒建築的加速度從低樓層到高樓層有逐漸下降的趨勢，與一開始的推論：「高樓層因為振幅較大，加速度應較大」不符；而經過頻譜分析，我們得出木棒大樓建築各樓層的頻率變化，如表 8 所示，發現平台及 1 樓的搖晃頻率皆在 8.0 Hz 左右，但 2 樓之後頻率大幅下降，從 2~15 樓皆在 0.9–1.1 Hz 之間，對照到表 7 中的平均加速度，發現 1 樓的平均加速度為 461cm/s^2 ，而在 2 樓之後的加速度皆在 200cm/s^2 – 370cm/s^2 間，明顯小於 1 樓。綜合以上數據與分析，我們推測：雖然

表 8、木棒大樓各樓層頻率

震度	頻率(Hz)
平台	7.9
1F	8.0
2F	1.0
4F	1.0
6F	1.0
8F	1.0
10F	1.0
12F	1.0
14F	0.9
15F	1.1

木棒大樓較鋼筋公寓樓高更高、材料更柔軟具彈性，使能量傳遞不完整，在高樓層可能有形變產生，也導致頻率發生變化，根據頻譜分析的結果，1 樓雖然振幅小，但搖晃頻率為 8.0 Hz，頻率明顯大於其他樓層，導致其產生較 2–15 樓更大的加速度；而高樓層雖然振幅大，但搖晃頻率只有 1.0 Hz 左右，週期較大，因此形變不足以使其產生更大的加速度。

二、 實驗二：公寓、華廈鋼筋建築有無地下室加速度比較

表 9、鋼筋建築有無地下室加速度

實驗裝置	1 st	2 nd	3 rd	平均(cm/s^2)
有地下室(6 樓+地下 2 樓)	393	406	394	398
無地下室(6 樓)	435	423	432	430
減震值(cm/s^2)	32		減震率(%)	7

根據表 9 中，兩組實驗數據(有/無地下室)顯示，建築物加上地下室結構確實可以使加速度微幅減少，可達到約 7% 的減震率，符合建築的地下室結構使建築更穩固之推論。根據台電輸工處的出國報告「隔減震設施應用規劃設計」^{三-1}，地下室以下功能與減震有關：

如果在易發生土壤液化的地層上建造建築，可以加挖地下室，將地層中容易造成土壤液化的砂質地層挖掉，並改建為一層或兩層的地下室，能達成防治土壤液化的效果。

許多抗震、隔震、防震或建築法規規定的必要結構都於地下室結構內或周圍，由此可見，地下室對於建築的安全及地震防治都至關重要。

三、 實驗三:華廈鋼筋建築地下室外填入不同材料加速度比較

表 10、華廈鋼筋建築地下室外牆與連續壁之間填入材料後加速度

材料	輕黏土				牛頓流體(水)				減震值	減震率	非牛頓流體(太白粉水溶液)				減震值	減震率
震度	1st	2nd	3rd	平均 (cm/s ²)	1st	2nd	3rd	平均 (cm/s ²)	(cm/s ²)	(%)	1st	2nd	3rd	平均 (cm/s ²)	(cm/s ²)	(%)
6 弱	454	453	470	459	473	473	469	472	-13	-3	367	380	369	372	87	19
6 強	641	674	689	668	614	478	452	521	147	22	442	401	440	428	240	36

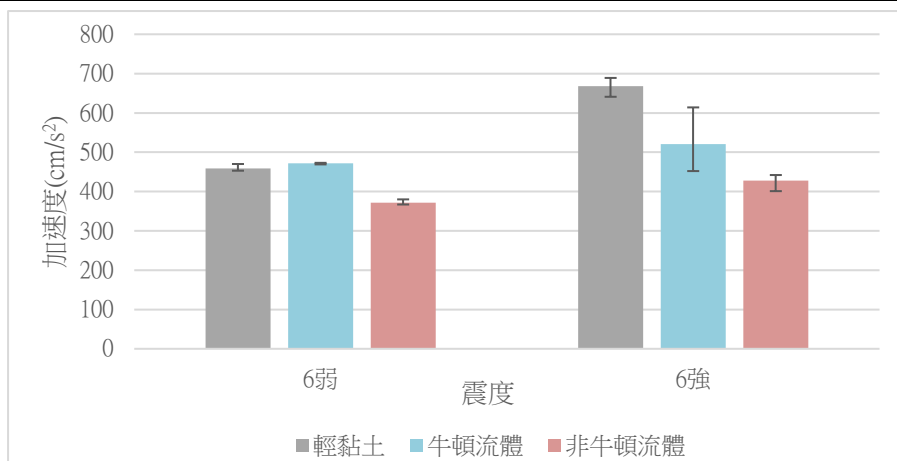


圖 29、輕黏土、牛頓流體(水)及非牛頓流體的減震效果比較

觀察表 10 後得知，實驗結果大致與我們實驗前的假設相符：「地下室外牆與連續壁之間放入牛頓流體或非牛頓流體皆能減震」。但透過觀察實驗結果，我們發現不論是在 6 弱或是 6 強，牛頓流體的減震效果皆不如非牛頓流體，我們推測與非牛頓流體的減震特性有關。當非牛頓流體急速受到外力時，太白粉粒子會緊密地排列，甚至形成暫時性固體，此現象稱為「擴溶現象」^{三-2}，透過擴溶現象，非牛頓流體能抵抗外力，以達到減震效果。

非牛頓流體在地下室的外牆與連續壁之間之所以能減震，是因為當建築的地下室結構在搖晃時，最接近地表的部分搖晃幅度最大，造成表面的非牛頓流體較

快形成暫時性固體，以支撐建築，避免其過度傾斜，導致倒塌等情形；而表面以下的非牛頓流體還未形成暫時性固體，能以液態的形式達到消能的效果，能**同時兼具固體的支撐作用及液體的消能作用**。而牛頓流體的水相較於非牛頓流體，受力無法形成暫時性固體，不具有支撐建物的效果，減震效果自然不如非牛頓流體，但根據實驗數據，水在 6 弱時不具減震效果，但在 6 強時卻出現了極為顯著的減震效果，推測因為水是流體，可透過形狀改變吸收能量，可在有限範圍內**減緩地震搖晃**，減緩地震對建築的破壞。若傾斜角度過大，可能無法支撐建築重量，導致其倒塌。

四、 實驗四:華廈鋼筋建築地下室外填入不同狀態的非牛頓流體加速度比較

表 11、華廈鋼筋建築地下室外牆與連續壁之間填入不同狀態的非牛頓流體加速度

材料	輕黏土				夾鏈袋裝非牛頓流體				減震值 (cm/s^2)	減震率 (%)	直接倒入非牛頓流體				減震值 (cm/s^2)	減震率 (%)
震度	1st	2nd	3rd	平均 (cm/s^2)	1st	2nd	3rd	平均 (cm/s^2)			1st	2nd	3rd	平均 (cm/s^2)		
6 弱	454	453	470	459	367	380	369	372	87	19	342	351	348	348	111	24
6 強	641	674	689	668	442	401	440	428	240	36	383	383	376	381	287	43

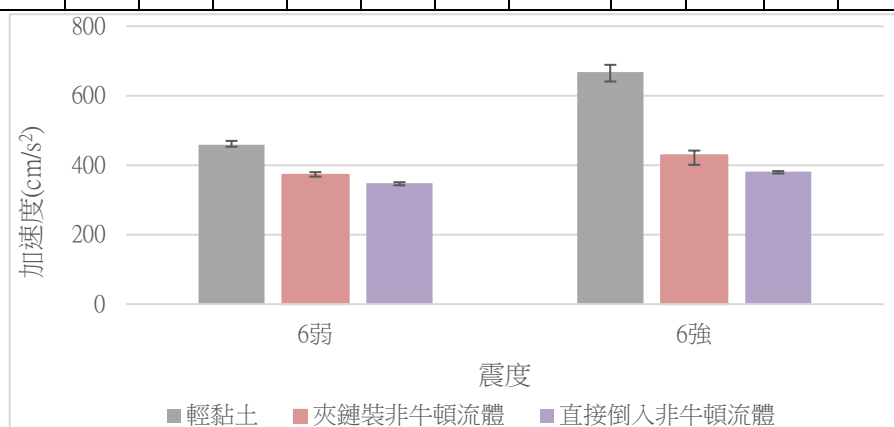


圖 30、華廈鋼筋建築地下室外牆與連續壁之間填入不同狀態的非牛頓流體加速度比較

由表 11 得知，非牛頓流體直接倒入地下室外牆與連續壁之間較裝入夾鏈袋的非牛頓流體更加減震。推測是因為夾鏈袋裝阻尼放入地下室時，是獨立的四個個體，不流通，也不會流動；直接倒入阻尼則是一體包裹住地下室。因此地震時，夾鏈袋裝阻尼只會在其中一面或兩面的非牛頓流體發揮支撐作用及消能效果；而直接倒入阻尼則會在接受地震波的能量後，將力量往其他部分傳遞，使其

他部分同時也形成暫時性固體，產生抵抗力，可利用整個地下室外牆與連續壁之間的非牛頓流體減震，更有效的分散能量，減震效果自然也更明顯。但由於直接倒入非牛頓流體需考慮重量及浮力因素，可能會產生建築浮起或傾斜的情形，導致實驗誤差，所以接下來的實驗還是以夾鏈袋裝非牛頓流體進行實驗。

五、 實驗五: 透過吉利丁凍的偏光情形觀察地下室外牆的受力情形

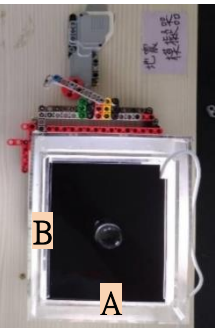
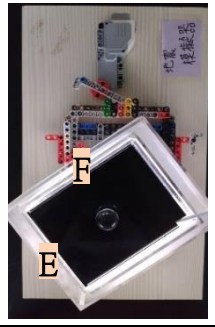
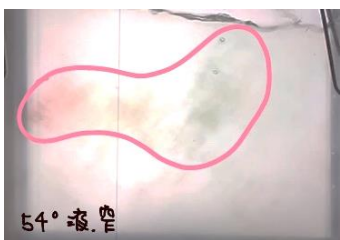
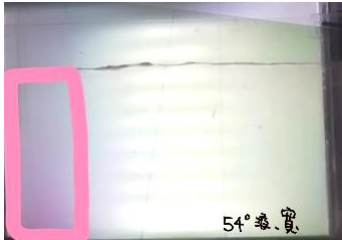
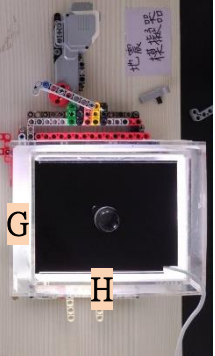
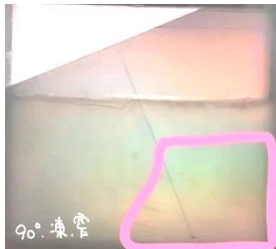
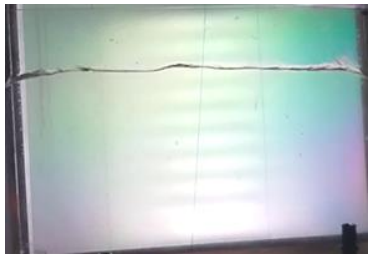
由表 12 中 0° 的 A 圖得知，當地震波的傳遞方向與受力面垂直時，力量從受力面的中間傳遞周圍，地下室的牆面(受力面中間)受力最明顯。

從 21° 的 C 圖、 54° 的 E 圖發現，顏色變化從右側蔓延至左側，力量從受力面的右側傳遞至左側。地震使建築的地下室擠壓其中一側，當地震使建築向另一側搖晃時，力量順著搖晃方向傳遞另一側，使整個受力面的顏色皆發生改變。從顏色變化的程度來看，發現受擠壓的一側，也就是力量在外牆傳遞的起點，和力量傳遞的終點受反向地震波擠壓的一側，受力面左右的這兩側顏色變化較中間更明顯，代表建築地下室的外牆兩側，也就是「柱」的部分受力較大。

21° 的 D 圖、 54° 的 F 圖發現，建築向右搖晃時，受力面右側顏色產生變化；向左搖晃時相反。但 21° 的 D 圖中，向右搖晃受力情形較向左明顯，推測是因為其寬面與搖晃方向接近平行，當建築向左搖晃時，力量多施加在窄面，因此寬面左側受力不明顯。而 54° 的 F 圖則相反，右側受力較左側明顯，因為其寬面與搖晃方向接近垂直，向左搖晃時力量不完全由窄面承受，導致寬面左側受力明顯。

綜合以上觀察結果，當建築受力面與地震搖晃方向垂直，地下室外牆的牆面受力明顯；若受力面與地震搖晃方向不垂直，地下室外牆柱的部分受力較大，且隨地震波週期性的出現，從影片中可觀察到力量轉移的過程。

表 12、地下室結構受力情形(以下照片皆由第一作者拍攝)

角度	裝置	窄面受力情形	寬面受力情形
0°		A  中間受力再向周圍傳	B  受力較不明顯
21°		C  21° 液.窄 能量由右傳至左，整片受力	D  21° 液.寬 向右搖晃右側受力明顯，向左搖晃否
54°		E  54° 液.窄 力量由右傳至左，整片受力	F  54° 液.寬 力量由左傳至右
90°		G  90° 液.窄 向右/左搖晃使右/左側受力明顯	H  受力變化不明顯

六、 實驗六：不同地震搖晃時間對非牛頓流體阻尼的減震效果和建物材質影響

(一) 鋼筋華廈建築

表 13、鋼筋華廈建築搖晃時間不同測得加速度及減震效果

搖晃時間(s)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
輕黏土(cm/s^2)	466	476	461	464	462	468	476	479	486	494	562
非牛頓流體(cm/s^2)	458	417	417	415	427	459	462	472	476	474	483
減震值(cm/s^2)	8	59	44	49	35	9	14	7	10	20	79
減震率(%)	2	12	10	11	8	2	3	1	2	4	14

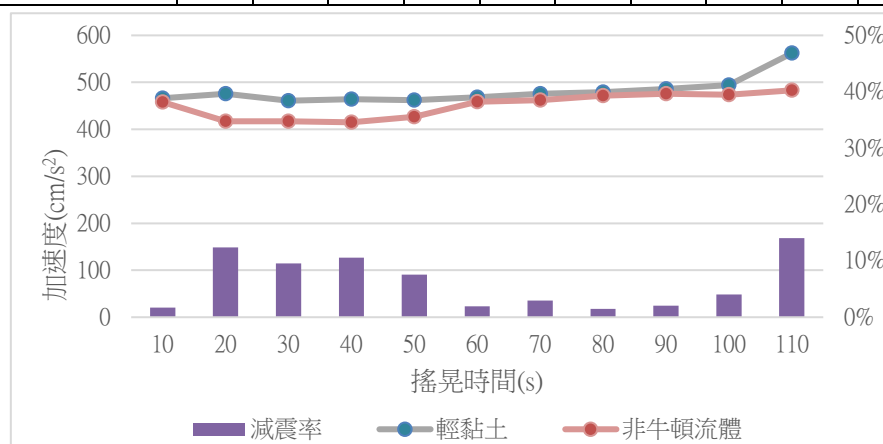


圖 31、搖晃時間長短對於加速度及減震效果的影響

觀察圖 31 後發現，搖晃 20~50 秒時，地下室外牆與連續壁之間填入非牛頓流體的加速度明顯小於輕黏土，產生顯著的減震效果；但在搖晃 60~100 秒的數據中，填入非牛頓流體的加速度上升，十分接近輕黏土的加速度，導致減震效果不明顯。推測是因為搖晃時間較久，非牛頓流體的太白粉可能沉澱，與水分離，集中在夾鏈袋下方(地下室外牆接近底部的部分)，形成固體，導致能量可以完全傳遞至建築；而接近表面、搖晃幅度最大的部分則只剩下液態的水，不具支撐作用，使測量到的加速度隨著持續的搖晃而上升，減震效果下降。而在搖晃 110 秒時，填入輕黏土的加速度增大，即 921 大地震破壞程度大的原因，而非牛頓流體的加速度維持穩定，因此又再次出現了明顯的減震效果。

從這個實驗中，我們發現使用太白粉及水混合而成的非牛頓流體在不持續攪拌的情況下容易沉澱，甚至可能產生發霉的現象，皆有可能影響其減震效果。若要實際應用到現實生活的建築中，建議能使用其他不具時效性的非牛頓流體，例如橡膠溶液等。

(二) 鋼筋及鋼骨大樓建築

表 14、鋼筋及鋼骨大樓搖晃時間不同測得的加速度變化

搖晃時間(s)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
鋼骨大樓(cm/s^2)	546	565	568	576	581	610	611	667	705	714	697
鋼筋大樓(cm/s^2)	536	536	549	550	561	582	588	592	550	579	552

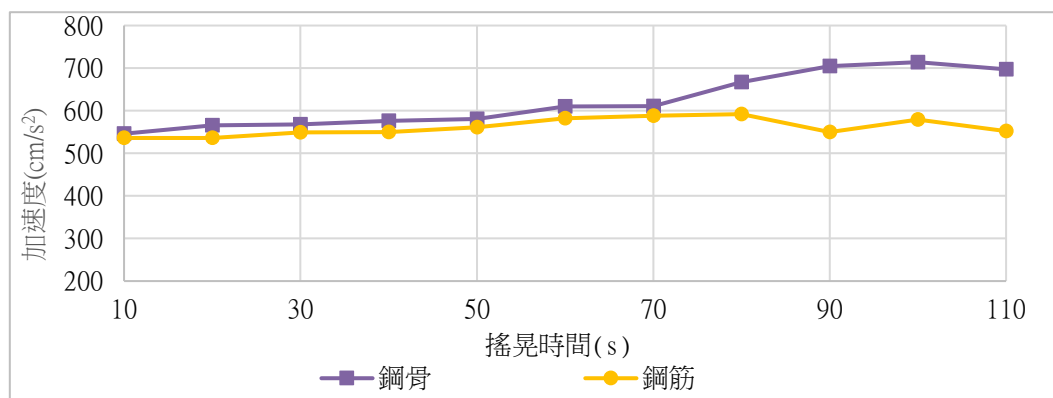


圖 32、鋼筋及鋼骨大樓搖晃時間不同測得的加速度變化折線圖

圖 32 中的黃色折線，鋼骨建築在 70 秒之後的加速度上升，推測是因為**鋼骨建築具彈性及韌性**，可透過形變吸收能量，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。由於**鋼骨建築**本身結構耐震但不減震，搭配上非牛頓流體的減震特性，能使建築更具安全性。

鋼筋建築代表的粉紅色折線，90 秒的加速度下降，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。

七、 實驗七: 重心高低對非牛頓流體阻尼的減震效果影響

(一) 鋼筋華廈建築

表 15、重心不同時鋼筋華廈建築的加速度及減震效果

震度	六弱			六強		
重心	高	中	低	高	中	低
輕黏土(cm/s^2)	434	456	489	535	528	561
非牛頓流體(cm/s^2)	315	375	332	366	419	478
減震值(cm/s^2)	119	81	157	169	115	83
減震率(%)	27	18	32	32	22	15

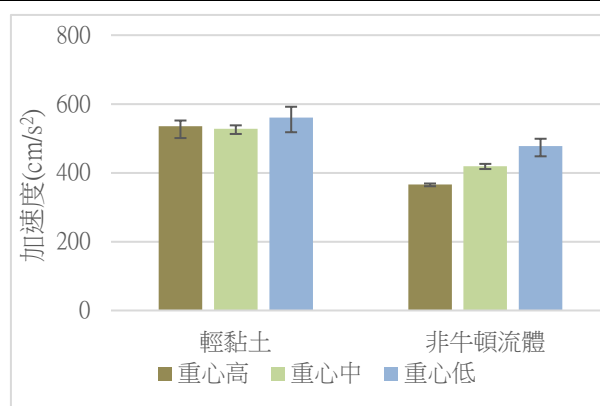
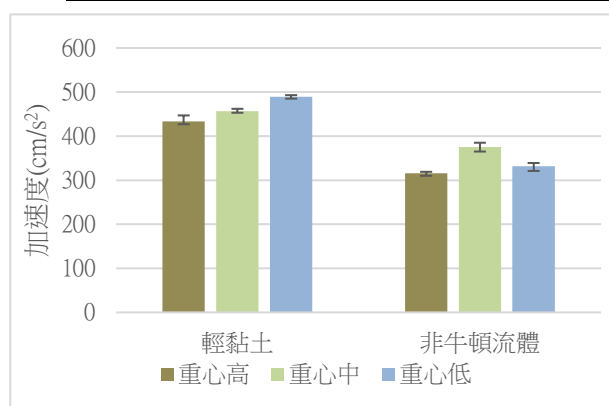


圖 33、6 弱不同重心輕黏土與非牛頓流體加速度

圖 34、6 強不同重心輕黏土與非牛頓流體加速度

從鋼筋華廈建築的數據發現，重心越高，加速度並不會較大，與原先重心越高、加速度越大的預想不同。由圖 33、34 觀察到，地下室外牆填入輕黏土的加速度在重心高低不同時，並沒有明顯不同，推測是因為加重的重量對建築重心的影響不夠大，不足以讓重心有明顯變化；而在地下室外牆與連續壁之間填入非牛頓流體的數據中，6 弱的加速度和填入輕黏土類似，並沒因為重心高低有太大的差異，但在 6 強時，卻發現重心低的建築測到的加速度比重心高還大，推測與非牛頓流體減震的原理有關。在實驗三的討論中提到，非牛頓流體受到急速外力作用時，會產生「擴溶現象」，形成暫時性固體，達到支撐建築的作用。而重心低的建築中，重物置於 1 樓，使低樓層較重，在搖晃時產生的撞擊力較大，擴溶現象發生的更快速、更明顯，使地下室外牆與連續壁之間的非牛頓流體形成暫時性固體的部分更多，反應時間短，速度更快，導致能量非常完整的傳遞到建築上，使其產生較大的加速度。

(二) 鋼筋及鋼骨大樓建築

表 16、重心不同時鋼筋及鋼骨大樓建築的加速度

震度	六弱			六強		
重心	高	中	低	高	中	低
鋼骨建築(cm/s^2)	416	343	347	729	572	562
鋼筋建築(cm/s^2)	513	506	494	710	755	744

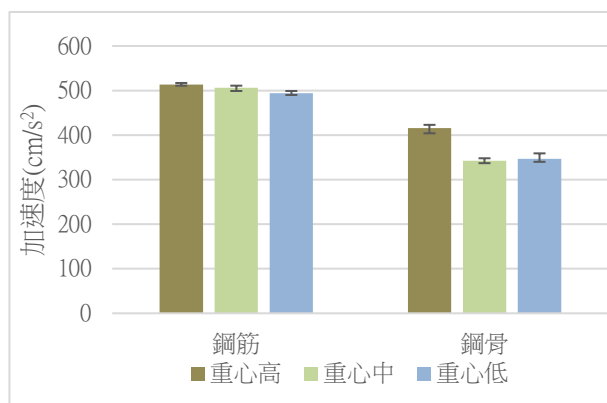


圖 35、6 弱不同重心鋼筋及鋼骨大樓加速度

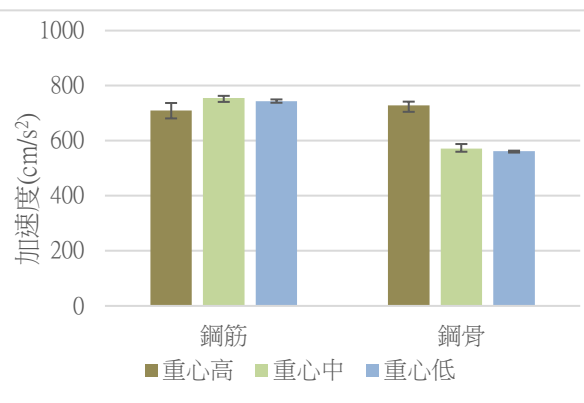


圖 36、6 強不同重心鋼筋及鋼骨大樓加速度

鋼骨大樓建築(351g)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；鋼筋大樓建築的加速度不一定隨重心上升，推測是因為在使用 200 克重物的情況下，較重的鋼筋大樓(843g)重心高度受影響較小，重心不如鋼骨建築高，使鋼筋建築在重心最高時，重心對加速度的影響較不顯著。

鋼筋及鋼骨大樓的實驗結果與鋼筋華廈建築截然不同，推測是因為鋼筋華廈建築地上樓層數與地下樓層數的比值為 3，搖晃時力臂較短；鋼筋及鋼骨大樓地上樓層數與地下樓層數的比值為 6.5，搖晃力臂較長。因此大樓重心高時，受力臂較長影響，產生較大的加速度；而華廈建築力臂較短，重心高時加速度變化較不明顯。

八、 實驗八: 建物即時監測研究

表 17、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) / 傾斜方向模組傾斜時測到的距離(垂直距離)

透過表 17 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。

臺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，也能利用類似的儀器及計算方式，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。

伍、研究結論與未來展望

一、研究結論

建築物的材料質地、高度樓層數、遇到地震時各樓層的振幅、頻率都會影響加速度。實驗中鋼筋公寓模擬建築樓層數較少，材質堅硬，使能量傳遞完整，所以高樓層的振幅和低樓層沒有太大的差異，而同時各樓層的頻率相近，使各樓層的加速度無明顯變化趨勢。木棒大樓模擬建築高度高、材料柔軟具彈性，過程中建物產生形變，使能量傳遞不完整，導致頻率發生變化，1 樓雖然振幅小，但搖晃頻率明顯大於其他樓層，因此造成低樓層加速度大於高樓層的現象。

非牛頓流體阻尼較牛頓流體有更好的減震效果，是因為非牛頓流體是利用擴溶效果進行減震，在建築物受到搖晃時，上部分的非牛頓流體率先變成暫時性固體支撐著建築，下部分維持流體狀態達到消能作用；而水可以在一定範圍內透過形變吸收能量，但對建築不具支撐效果，造成建築物更容易傾斜和倒塌。

此外我們推測因為夾鏈袋裝阻尼放置於地下室時是四個獨立的個體，不利於能量的分散，而直接倒入的阻尼則能透過整個地下室結構中的非牛頓流體進行減震作用。由於我們研究中的模擬建築重量較輕，若置於流動流體中會因浮力而浮起，導致建築傾斜、不穩，可能影響實驗結果。若未來有機會應用的實際生活中，希望可以進一步探討真實建築的地下室結構中，在直接將非牛頓流體倒入地下室外牆與連續壁之間的情況下，建築是否會產生歪斜等情形，又或者是否會對地下室造成影響，針對真實情況進一步改善減震裝置，讓設計更符合現實情形。

當受力面與地震搖晃方向垂直時，地下室外牆的牆面受力明顯；我們也推論：不垂直時，地下室外牆的柱部分受力較大，而夾鏈袋裝阻尼在地下室外牆的轉角處皆有空隙，用於現實生活中時，不利於柱的減震，直接倒入的阻尼則包覆著整個地下室因此會有較好的減震效果。

根據表 18，統計歷年發生災害情況較嚴重的地震，搖晃時間在間距大約 51~110 秒，但觀察圖 37、38 後，發現地震中大幅度、有效造成建物毀損的搖

晃，主要發生在前段，所以我們取地震開始到到最大地動加速度的兩倍時間做為有效搖晃時間，進行統計，發現大多為 6 秒至 30 秒左右，符合非牛頓流體發揮最佳減震效果的搖晃時間。

表 18、地震搖晃時間統計

地震	搖晃時間	有效搖晃時間
20240403 花蓮外海	98 秒	32 秒
20220918 池上	34 秒	10 秒
20180206 花蓮外海	花蓮至少 86 秒、嘉義 70 秒 臺北 51 秒、新北 64 秒	6 秒
20160206 美濃	110 秒	18 秒
20091219 磯崎	66 秒	19 秒
19990921 集集	102 秒	-

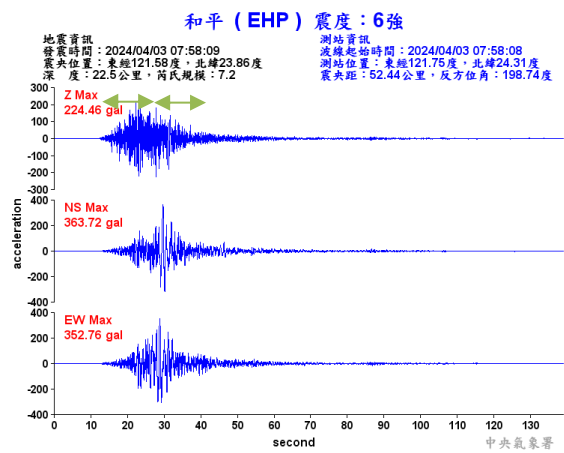


圖 37、0403 花蓮外海地震即時強地動震波圖⁻³
(取自中央氣象局地震測報中心)

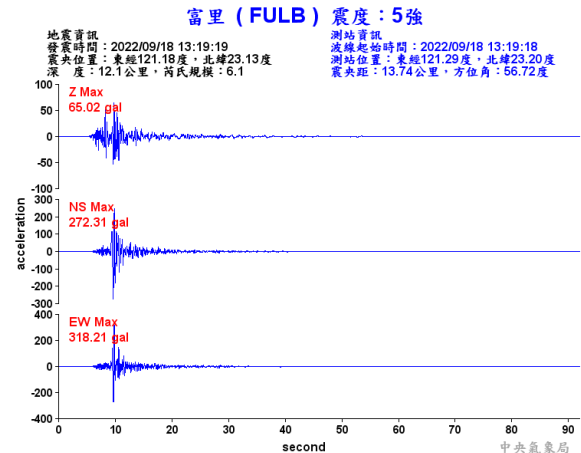


圖 38、0918 池上地震即時強地動震波圖⁻³
(取自中央氣象局地震測報中心)

在樓層數較少的公寓或華廈建築，重心低時低樓層較重，搖晃時產生的撞擊力較大，擴溶現象發生的更快速，造成非牛頓流體形成暫時性固體的部分更多，使能量得以完整的傳遞，產生較大的加速度。但在樓層數較多的大樓建築，重心高時因力臂較長而測量到較大的加速度，使建築較不穩固。

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，避免建築在不知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。

陸、參考資料(文獻)及其他

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

1. 邱琮皓、戴玉翔. (2024, April 4). 全台平均屋齡達 32 年 老屋改建要加快動作. 經濟日報. <https://money.udn.com/money/story/5621/7876672>
2. *6.1 The Periodogram / STAT 510 - STAT ONLINE*. (n.d.). Penn State University. <https://online.stat.psu.edu/stat510/lesson/6/6.1>
3. 地震測報中心. (n.d.). 中央氣象署 地震測報中心. <https://scweb.cwa.gov.tw/zh-tw/earthquake/data>
4. 潘昌志. (2020, March 1). 提升地震災害防治與準確度— 2020 年臺灣震度分級新上路. 科學月刊. <https://www.scimonth.com.tw/archives/3726>

二、期刊論文(Journal Article)

1. 王聖翔、蘇于琪(2023)。消波塊型地震超材料設計及減震效果模擬分析。土木水利，50(4)。
2. Younes Achaoui , Bogdan Ungureanua , Stefan Enocha , Stéphane Brûlé c & Sébastien Guenneau(2016)。Seismic waves damping with arrays of inertial resonators。Extreme Mechanics Letters，8，30-37。

三、研究報告(Reports)

1. 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>
2. 葉庭瑄、張憲紘、劉芷辰(2017)。兵來漿擋—非牛頓流體防衝撞力之研究。中華民國第 57 屆中小學科展。國立臺灣科學教育館。
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/57/pdf/030106.pdf>
3. 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。國立臺灣科學教育館；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>

4. 陳芷榆、呂宣儀、楊承諺(2022)。震出你的非牛頓流體。國立臺灣科學教育館；2022 全國科學探究競賽。
<https://sciexplore2022.colife.org.tw/work.php?t=B0219>
5. 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。國立臺灣科學教育館；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>
6. 楊俐婷、葉昀菱(2019)。「震」「震」有詞--臺灣南部大陸隱沒帶地震發生之研究與探討。國立臺灣科學教育館；2019 年臺灣國際科學展覽會優勝作品專輯。
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-2/2019/pdf/TISF2019-180006.pdf>
7. 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。國立臺灣科學教育館；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>

【評語】100003

1. 本計畫主要在探索建物週邊界質對減振的影響，議題切合實際需求，研究具備適宜的背景回顧、步驟、和實驗測試方法，值得肯定。
2. 由於建物龐大，需縮尺度以進行實驗，原尺度和縮尺度實驗間的物理參數對應，致震頻率的對應等，建議有更完整的說明。
3. 計畫以輕黏土和牛頓流體（水）來進行比較，和現況具有差異，建議和現有建物的支稱方式來進行比較，對工程技術的進步性會更明確。
4. 不同流體的導入引入了不同的黏滯性和阻尼，建議可以導入基礎數學模型，更易於理解致震和減震的機制（比如是何被材料特性、機械特性、和幾何構造等來共同影響）。