

2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 100018

參展科別 工程學

作品名稱 The effects of a water tower with dual-damping energy dissipation system on shock absorption

得獎獎項 大會獎 四等獎

就讀學校 國立彰化師範大學附屬高級工業職業學校

彰化縣立陽明國民中學

指導教師 韓顏吉、李怡欣

作者姓名 王子誥、王咸永

關鍵詞 地震、液體阻尼、水波共振

作者簡介



嗨~我叫王子誥，目前就讀國立彰師大附工，另一個組員是我親愛的弟弟叫王咸永，目前就讀彰化市陽明國中。在爸媽鼓勵下我從小開始獨自一人參加無數次科展比賽，弟弟也因此對科展產生興趣，也曾獨自一人參加全國科展獲得佳績，弟弟說：「他最大的希望是能夠與哥哥參加科展比賽」，如今願望終與成真了！我們都很開心。只要你願意花時間探索科學奧秘，相信你也一定可以徜徉在這片知識淵博的科學海。

Abstract

The 921 earthquake wave has caused major damage to buildings of 11 to 15 th floors. In this study, a model was used to simulate the design of a dual-damping energy dissipation system with a water tower on the top floor of a building with a height of 11 stories and a water-filled balcony ceiling to explore the effect of shock absorption of different seismic intensities under the design of the dual-damping system. The simulated equipment included self-made fixed water pumping equipment using 3D printers, liquid damping parts in different forms of mesh compartments, motors with current regulators to control idle speed, and self-made earthquake simulators. It used these devices to simulate the state and characteristics of swings and vibrations of tall buildings under different seismic intensities. Experimental results found that the shock absorption and damping efficiency of a single damping energy dissipation element is relatively poor, and the dual damping energy dissipation system can increase the shock absorption and damping performance by 39% to 58%. Among them, if the double damping energy dissipation system has mesh compartments, the water wave disturbance and turbulence will be more evident , and the damping efficiency will increase by 6% to 14%. On the top floor of the high-rise building, a square water tower with mesh-shaped compartments parallel to the wall is installed, and the short-distance mesh-shaped compartments are installed on the 9th to 11th floors. This liquid double damping shock absorption and energy dissipation system can effectively suppress the forward wave resonance of the building generated by the simulated seismic wave with magnitude 5 to 7 and the autonomous torsional resonance of the building structure.

摘要

921 地震震波對高 11-15 層大樓產生重大危害。本研究以模型模擬 11 層大樓建築物，頂樓設置水塔配合陽台天花板設置水撲滿的雙阻尼消能系統設計，探討不同震度震波在雙阻尼系統減震成效。模擬之設備利用 3D 列印機自製水撲滿、不同形式網狀隔間液體阻尼零件，自製地震模擬器以電流調整器控制怠速馬達，進行模擬不同震度下高樓產生擺動與震盪之狀態與特性。

實驗發現單一阻尼消能元件的減震阻尼效能較差，雙阻尼消能系統可**提升 39%至 58%減震**阻尼效能。其中雙阻尼消能系統若有網狀隔間，水波擾動震盪越明顯，阻尼效能**提升 6%至 14%**。11 層大樓於頂樓設置平行器壁網狀隔間正方形水塔，並配合在第 9 至 11 層樓處，設置隔間距離較短網狀隔間水撲滿，二者水位設定六分滿，此**液體雙**阻尼減震消能系統，**可抑制模擬震度 5 至 7 級震波對大樓產生的順向波動共振與大樓結構體的自主扭轉共振。**

壹、研究動機

台灣位於環太平洋地震帶，同時也是世界排名第 18 名的缺水國家，近年來政府想鼓勵民眾節水，除研擬調整水價外還立法強制販售具省水標章之馬桶、洗衣機、水龍頭以及設置**水撲滿**等辦法。在學校工程概論這門課的建築工程單元裡提到，基礎與樑柱結構對抗震有其重要性，而 921 大地震倒塌大樓，人員傷亡較大的樓層大約是 10 至 14 樓，於是我想在樓高 11 層的大樓建築物，利用其設置在頂樓上的**水塔**，配合樓層陽台天花板設置安裝**水撲滿**的方法，做為地震來臨時建築物的阻尼器，這樣的設置**不但可以防止大樓倒塌避免人員傷亡，還可以引用水撲滿內的雨水來澆花以及當消防用水，達到防震又節水的雙重效果。**

貳、研究目的

- 一、 探討單一阻尼水撲滿消能元件，受不同震度對建築物震盪之影響。
- 二、 探討單一阻尼水塔消能元件，受不同震度對建築物震盪之影響。
- 三、 尋找出最佳雙阻尼設置方法，水塔要如何配合水撲滿設置大樓。
- 四、 探討有無加裝網狀隔間，雙阻尼消能系統與單一阻尼消能元件，阻尼效能之差異。
- 五、 探討雙阻尼消能系統，有無加裝網狀隔間，阻尼效能差異之比較。

參、設備器材

一、研究器材

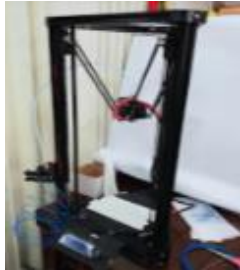



















				
(1)3D 列印機	(2)電流調整器	(3)包紙鋼條	(4)木板	(5)0.5 公分膠網
				
(6)怠速馬達	(7)透明軟膠水管	(8)正方體容器	(9)圓柱體容器	(10)游標卡尺
				
(11)老虎鉗	(12)螺絲起子	(13)剪刀	(14)鑽孔機	(15)熱熔膠槍
				
(16)釘子	(17)銅線	(18)橡皮圈	(19)收束帶	(20)碼表

圖 1 設備器材圖

二、自製地震模擬器



圖 2 自製模擬振動平台流程圖

三、實驗裝置

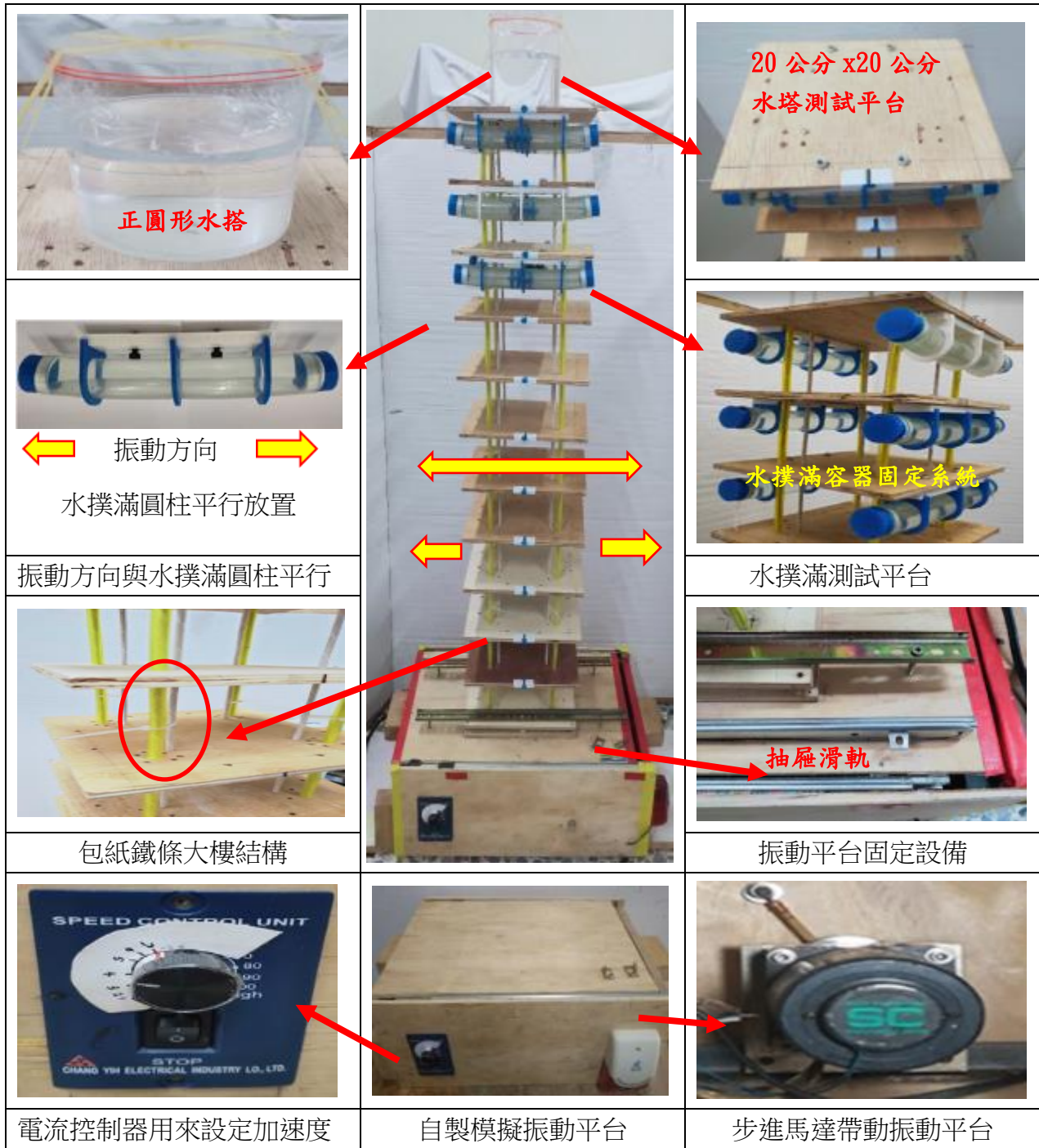


圖 3 阻尼測試實驗裝置說明圖

肆、研究過程與方法

一、實驗流程

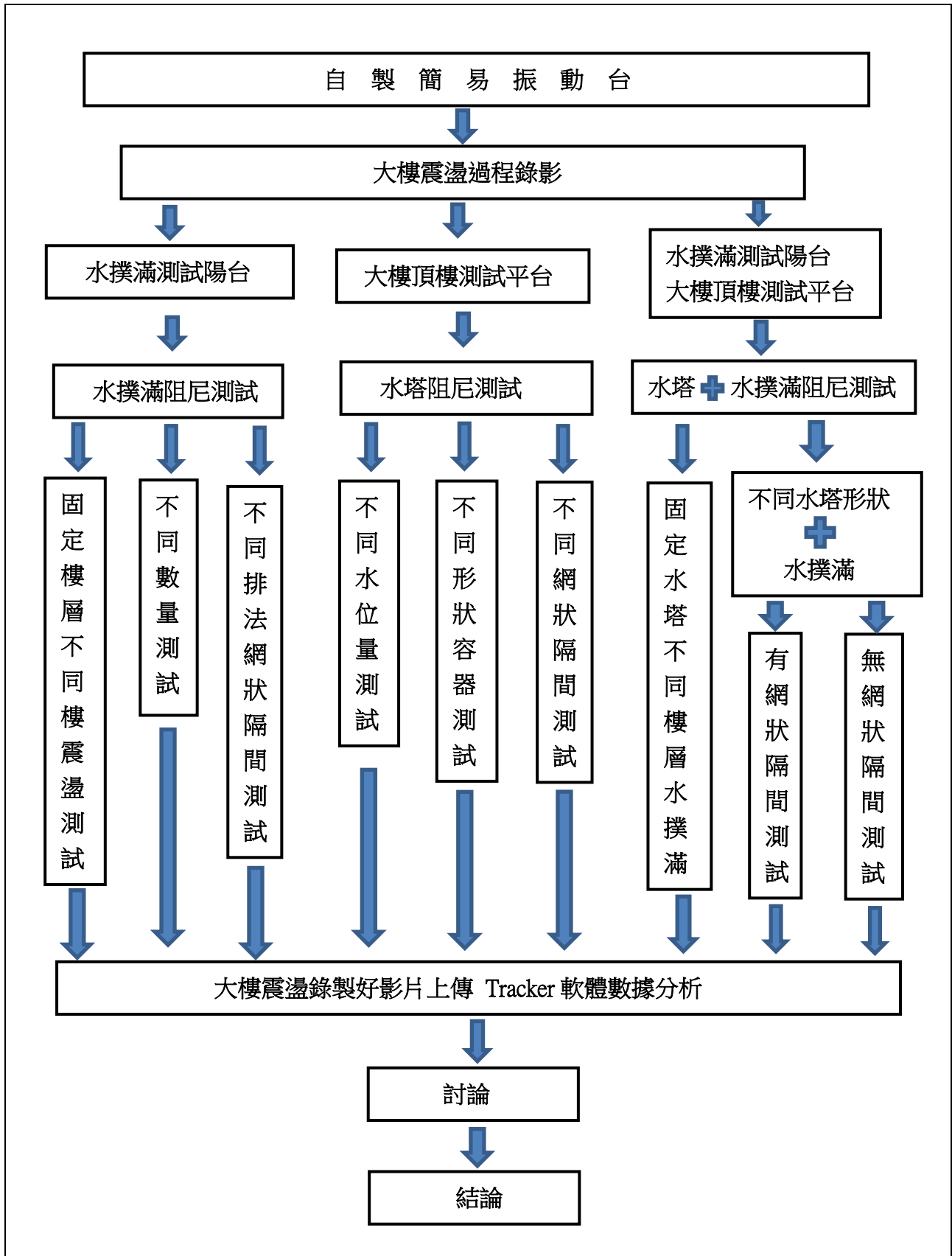


圖 4 實驗流程

二、研究方法

(一)自製簡易振動台，振動台加速度計算公式，對應震度分級數

1. 本組使用的簡易振動台並無加速度設定功能，只有無段轉速控制器，為確認振動台的加速度，於是藉由振動台的運動方式去推算。其中振動台是以等速率圓周運動方式進行，而振動台面可依據等速率圓周運動〈如圖 5 所示〉，推算出振動台面的運動加速度為振動台加速度計算公式：

振動檯面的最大運動加速度 a_M 為

$$a_M = R * \omega^2 = 4 * \pi^2 * R * f^2$$

$$\chi = R \cos(\omega t + \theta)$$

$$v = \frac{d\chi}{dt} = R\omega \sin(\omega t + \theta)$$

$$\alpha = \frac{dv}{dt} = -R\omega^2 \cos(\omega t + \theta)$$

ω =角速度

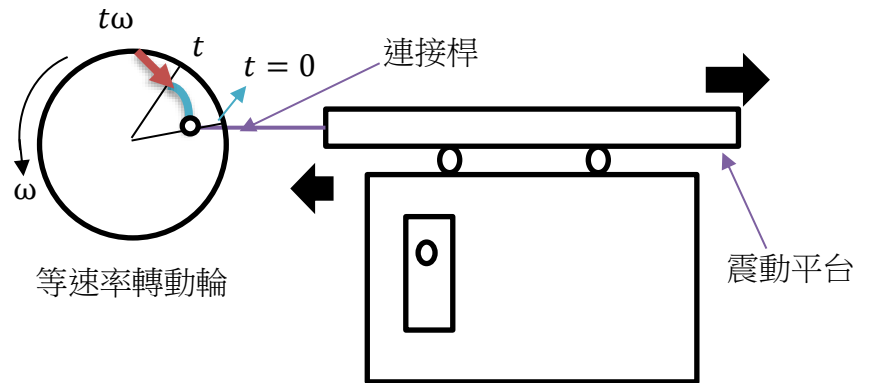


圖 5 振動台等速率圓周運動方式示意圖

2. 依振動台震動頻率分別模擬 10 種不同之地震頻率

- (1) 第 1 階段：水平移動來回 9 次/ 1 分鐘， $9/60=0.15$ 次/sec
- (2) 第 2 階段：水平移動來回 17 次/ 1 分鐘， $17/60=0.28$ 次/sec
- (3) 第 3 階段：水平移動來回 24 次/ 1 分鐘， $24/60=0.4$ 次/sec
- (4) 第 4 階段：水平移動來回 51 次/ 1 分鐘， $51/60=0.85$ 次/sec
- (5) 第 5 階段：水平移動來回 90 次/ 1 分鐘， $90/60=1.5$ 次/sec
- (6) 第 6 階段：水平移動來回 104 次/ 1 分鐘， $104/60=1.73$ 次/sec
- (7) 第 7 階段：水平移動來回 127 次/ 1 分鐘， $127/60=2.11$ 次/sec

表 1 振動台加速度對應震度分級換算表請參考圖 6 中央氣象局公告之地震震度分級表圖

階段	振幅距離(cm)	頻率	推算加速度(cm/sec ²)	推算對應震度分級	
1	2.5	0.15	2.2	1	微震
2	2.5	0.28	7.7	2	輕震
3	2.5	0.4	15.7	3	弱震
4	2.5	0.85	71.3	4	中震
5	2.5	1.5	222.	5	強震
6	2.5	1.73	295.3	6	烈震
7	2.5	2.11	439.4	7	劇震

註：推算加速度(cm/sec²) 對應圖 6 中央氣象局地震震度分級表圖內的**地動加速度**。

震度分級	地動加速度範圍	人的感受	物內情形	屋外情形
0. 無感	0.8 Gal 以下	人無感覺。		
1. 微震	0.8 ~ 2.5 Gal	人靜止時可感覺微小搖晃。	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。
2. 輕震	2.5 ~ 8.0 Gal	大多數的人可感到搖晃，睡眠中的人有部分會醒來。	房屋震動，碗盤門窗發出聲音，懸掛物搖擺。	靜止的汽車明顯搖晃，電線略有搖晃。
3. 弱震	8 ~ 25 Gal	幾乎所有的人都感覺搖晃，有的人會有恐懼感。	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。
4. 中震	25 ~ 80 Gal	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。	部分牆壁產生裂痕，重家具可能翻倒。	汽車駕駛人明顯感覺地震，有些牌坊煙囪傾倒。
5. 強震	80 ~ 250 Gal	搖晃劇烈以致站立困難。	部分建築物受損，重家具翻倒，門窗扭曲變形。	汽車駕駛人開車困難，出現噴沙噴泥現象。
6. 烈震	250 ~ 400 Gal	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。
7. 劇震	400 Gal 以上			

備註: 1Gal = 1cm/s²

圖 6 交通部中央氣象局公告之地震震度分級表圖

(二) 測量大樓平均加速度實驗方式

1. 本實驗測量大樓平均加速度是利用 Tracker 軟體
2. 將已錄製好的 30 秒影片在 Tracker 上打開
3. 分析建築物各時間之加速度

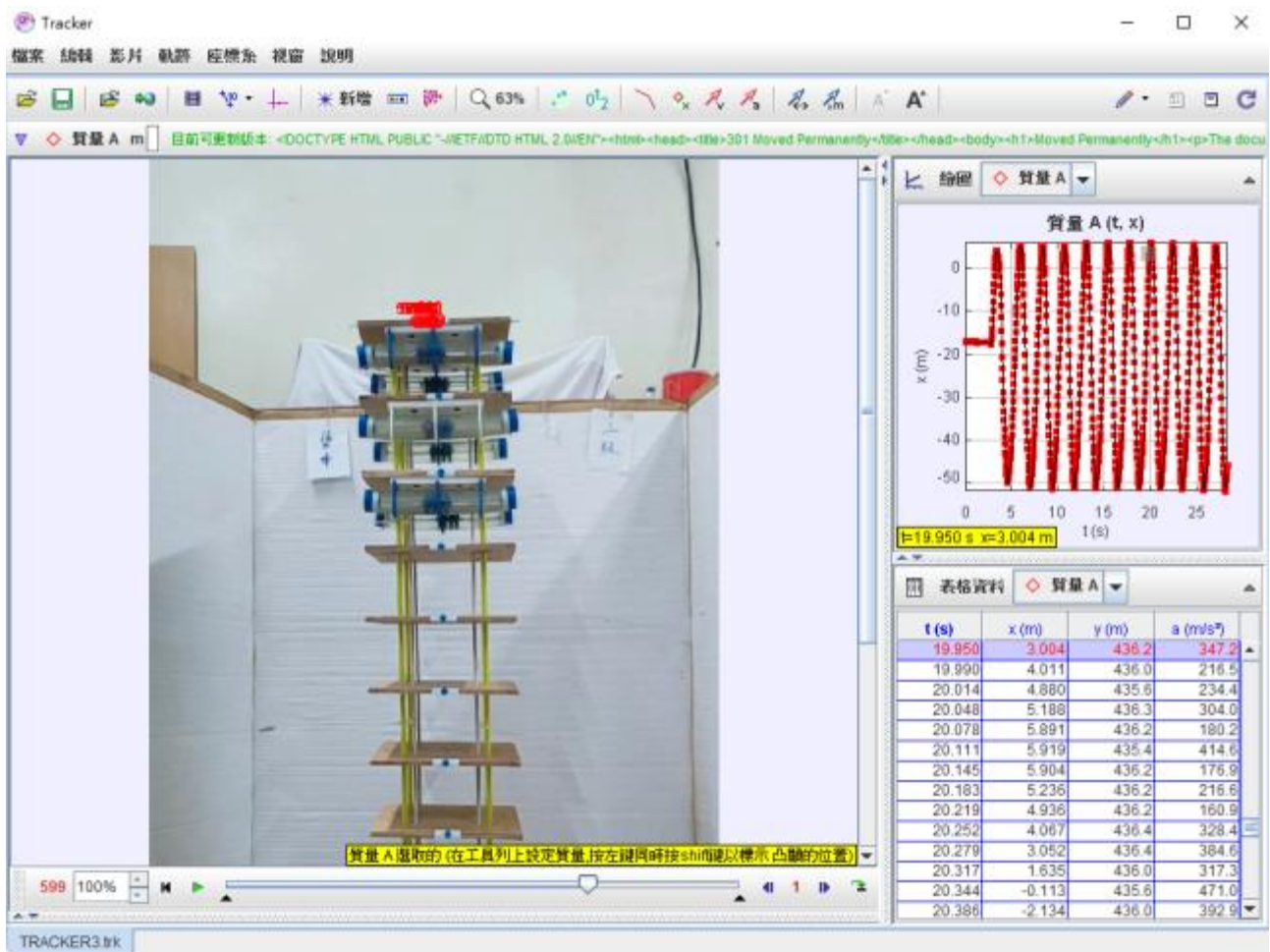


圖 7 測量大樓平均加速度實驗方式解說圖

(三) 水撲滿受不同震度對大樓建築物震盪變化情形實驗方法

1. 不同數量水撲滿實驗方法



圖 8 不同數量水撲滿實驗方法解說圖

- (1) 將直徑 3.2 公分×長 18 公分圓柱體水撲滿內注入 40cc 水，安裝大樓陽台測試平台，分別以不同數量水撲滿進行實驗，第一組安裝 11 大樓陽台前後、第二組安裝 11、10 樓陽台前後、第三組安裝 11、10、9 樓陽台前後。
- (2) 手機開啟錄影模式，開啟震動台電源進行 30 秒錄影，再將影片上傳 Tracker 軟體，進行振動大樓 30 秒內，第 11 層樓平均加速度分析。
- (3) 以上步驟重複 5 次，再以 5 次平均值做為總平均速度。

2. 固體與液體水撲滿實驗方法

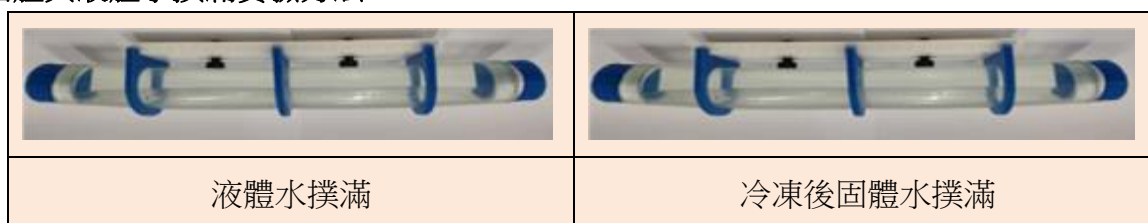


圖 9 固體與液體水撲滿實驗方法解說圖

- (1) 將直徑 3.2 公分×長 18 公分圓柱體水撲滿內注入 40cc 水，水撲滿放置冰箱冷凍做為固體水撲滿，安裝 11、10、9 樓陽台前後測試平台。
- (2) 手機開啟錄影模式，開啟震動台電源進行 30 秒錄影，在將影片上傳 Tracker 軟體，進行振動大樓 30 秒內，第 11 層樓平均加速度分析。
- (3) 以上步驟重複 5 次，再以 5 次平均值做為總平均速度。

(四) 水塔受不同震度對大樓建築物震盪變化情形實驗方法

1.水塔不同水量實驗方法

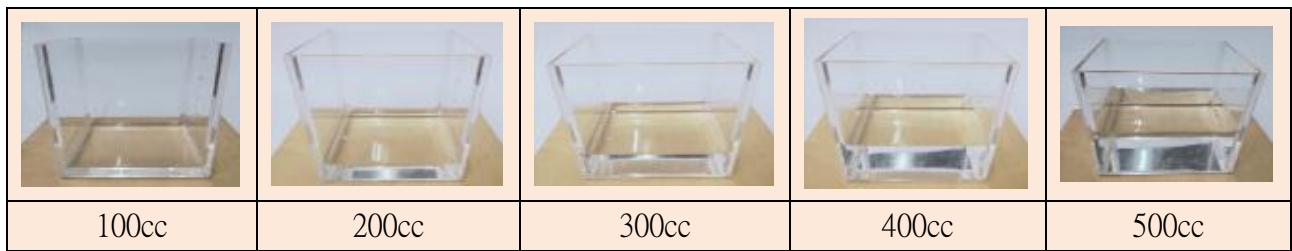


圖 10 水塔容器內不同水量實驗方法解說圖

- (1) 利用橡皮圈將水塔固定 11 樓振動平台，分別放置直徑 10 公分×高 12 公分圓柱體與 10 公分×10 公分×高 12 公分正方體，水塔內注入 100cc、200cc、300cc、400cc、500cc 水。
- (2) 手機開啟錄影模式，開啟震動台電源進行 30 秒錄影，在將影片上傳 Tracker 軟體，進行振動大樓 30 秒內第 11 層樓平均加速度分析。
- (3) 以上步驟重複 5 次，再以 5 次平均值做為總平均速度。

2.水塔與不同高度水撲滿實驗方法

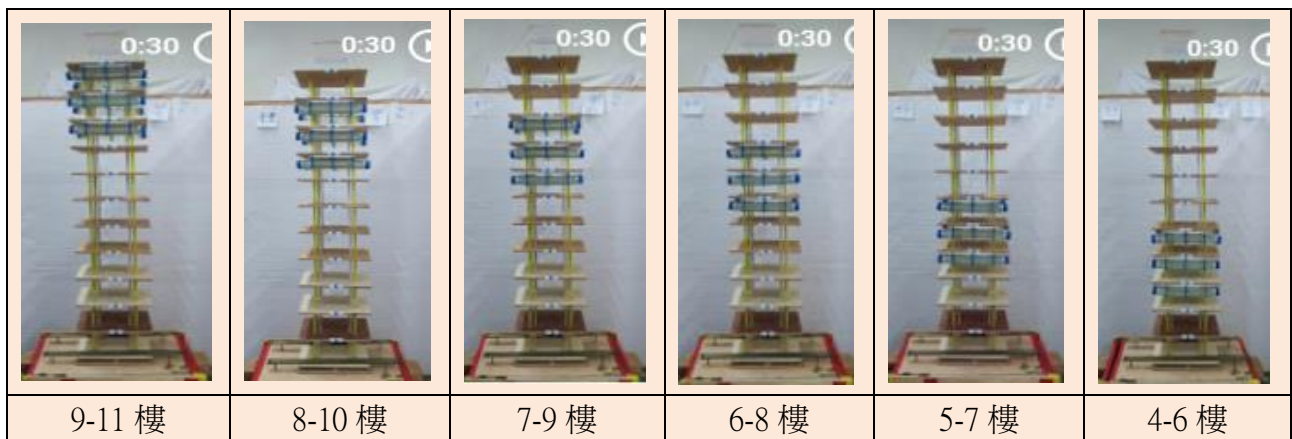


圖 11 水塔與不同高度水撲滿解說圖

- (1) 利用橡皮圈將水塔固定 11 樓振動平台，分別放置直徑 10 公分×高 12 公分圓柱體與 10 公分×10 公分×高 12 公分正方體，水撲滿放置 9-11 樓、8-10 樓、7-9 樓、6-8 樓、5-7 樓、4-6 樓。
- (2) 手機開啟錄影模式，開啟震動台電源進行 30 秒錄影，在將影片上傳 Tracker 軟體，進行振動大樓 30 秒內第 11 層樓平均加速度分析。
- (3) 以上步驟重複 5 次，再以 5 次平均值做為總平均速度。

(五) 水塔與水撲滿不同網狀隔間對建築物震盪變化情形實驗方法

1. 水塔容器內不同網狀隔間實驗方法

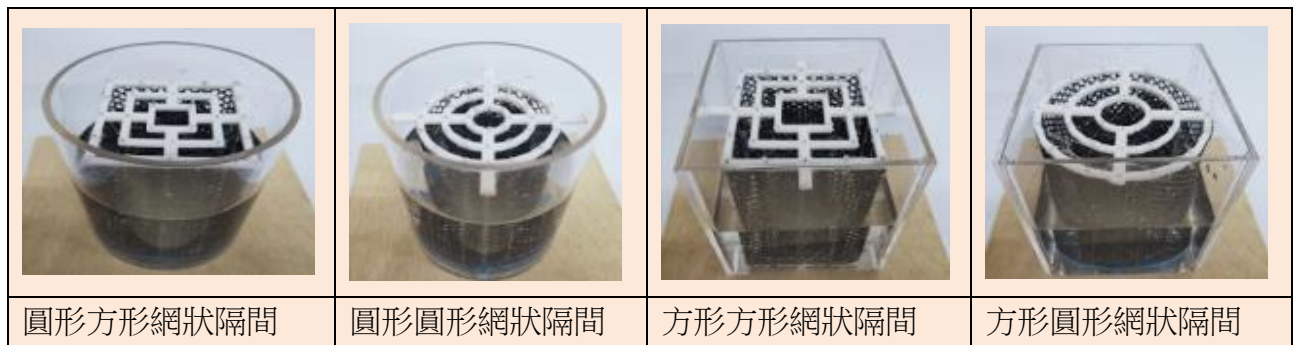


圖 12 水塔容器內不同網狀隔間實驗方法解說圖

- (1) 利用橡皮圈將水塔固定 11 樓振動平台，分別放置直徑 10 公分×高 12 公分圓柱體與 10 公分×10 公分×高 12 公分正方體，以不同網狀隔間水塔進行實驗，第一組圓形水塔方形網狀隔間、第二組圓形水塔圓形網狀隔間、第三組方形水塔方形網狀隔間、第四組方形水塔圓形網狀隔間。
- (2) 手機開啟錄影模式，開啟震動台電源進行 30 秒錄影，在將影片上傳 Tracker 軟體，進行振動大樓 30 秒內第 11 層樓平均加速度分析。
- (3) 以上步驟重複 5 次，再以 5 次平均值做為總平均速度。

2. 水撲滿容器內不同排法網狀隔間實驗方法



圖 13 水撲滿容器內不同排法網狀隔間實驗方法解說圖

- (1) 將直徑 3.2 公分×長 18 公分圓柱體水撲滿內注入 40cc 水，以不同網狀隔間水撲滿進行實驗，第一組平均排法網狀隔間水撲滿、第二組集中排法網狀隔間水撲滿、第三組分邊排法網狀隔間水撲滿，安裝 11、10、9 樓陽台前後測試平台。
- (2) 手機開啟錄影模式，開啟震動台電源進行 30 秒錄影，在將影片上傳 Tracker 軟體，進行振動大樓 30 秒內第 11 層樓平均加速度分析。
- (3) 以上步驟重複 5 次，再以 5 次平均值做為總平均速度。

伍、研究結果與討論

一、 探討單一阻尼水撲滿消能元件，受不同震度對建築物震盪之影響。

(一) 固定一組，水撲滿設置不同樓層，受不同震度對建築物震盪之影響。

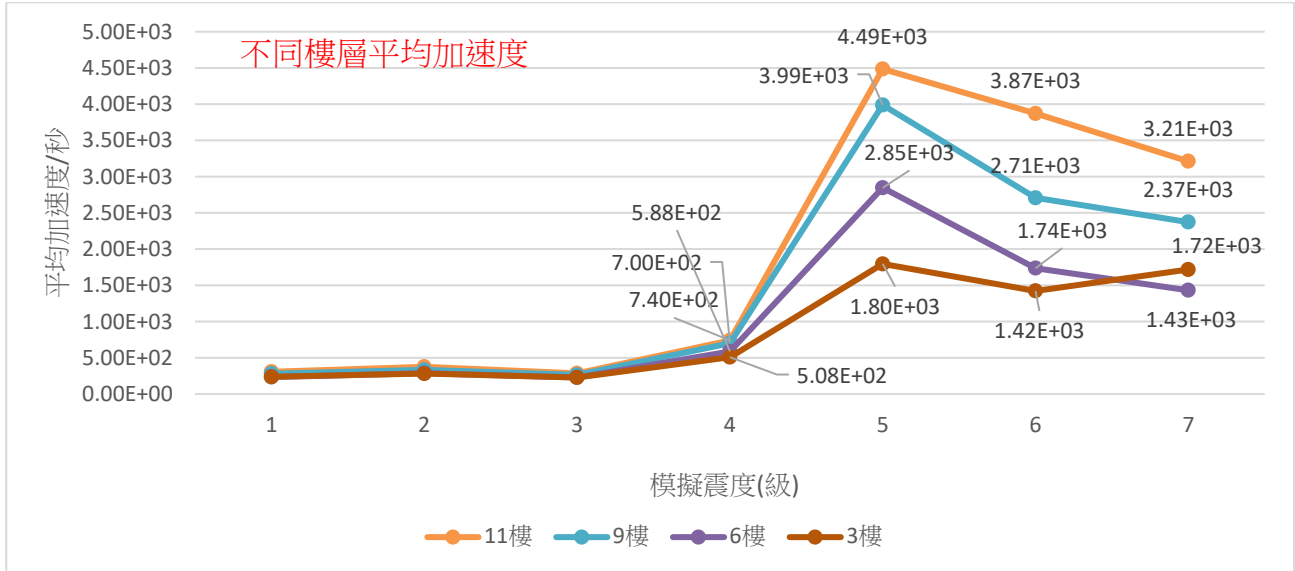


圖 14 固定一組水撲滿，平均加速度與大樓高低關係圖

1. 從圖 14，模擬震度 1-3 級大樓震盪不明顯，模擬震度 4-6 級第 11 層大樓平均加速最快，第 3 層大樓平均加速最慢，模擬震度 7 級第 6 樓層平均加速度最低大樓建築物震盪最小。

(二) 不同組數水撲滿，設置 9、10、11 層樓，受不同震度對建築物震盪之影響差異。

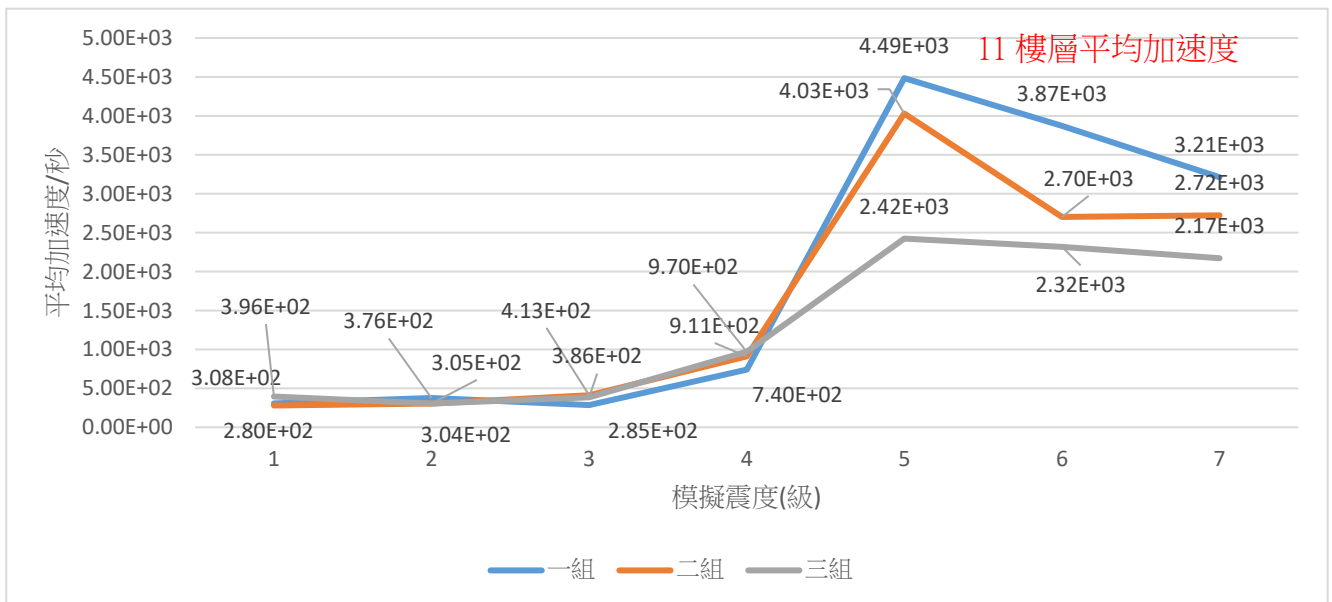


圖 15 不同震度，平均加速度與不同組數水撲滿關係圖

1. 從圖 15，大樓設置三組水撲滿，模擬震度 1 至 4 級建築物震盪最大，模擬震度 5 至 7 級建築物震盪最小；大樓安裝一支水撲滿，模擬震度 3、4 級建築物震盪最小，模擬震度 5 至 7

級建築物震盪最大。

(三) 固定三組，不同排法網狀隔間水撲滿容器，受不同震度對建築物震盪之影響。

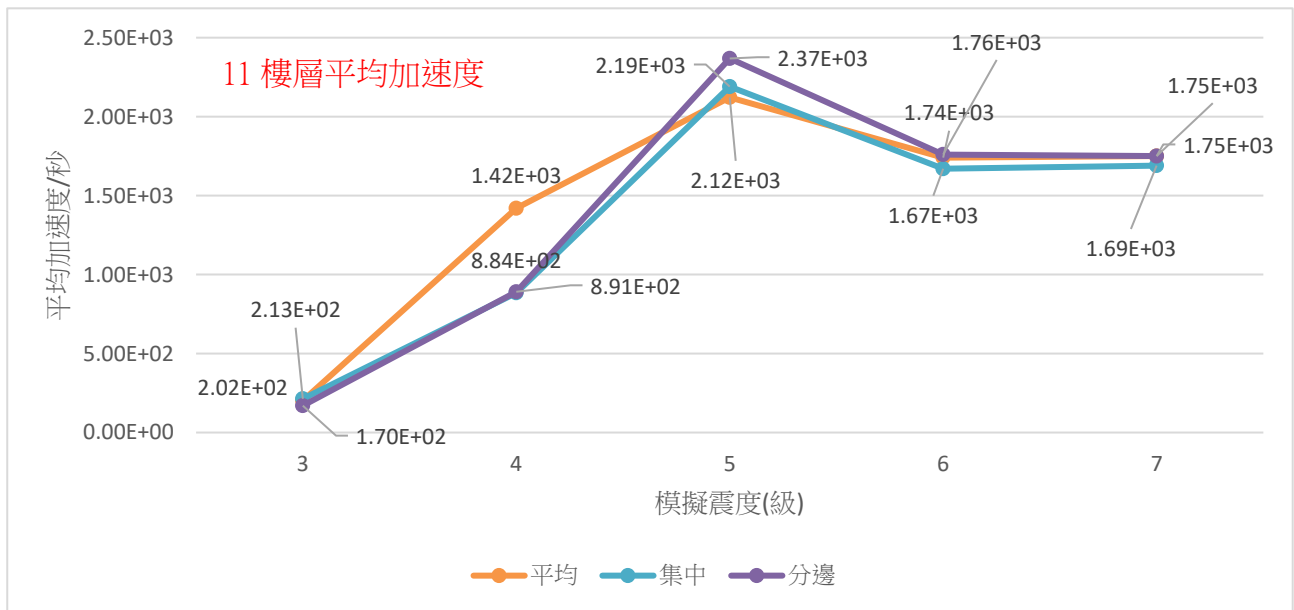


圖 16 固定三組水撲滿，平均加速度與不同排法網狀隔間水撲滿關係圖

1. 從圖 16，大樓安裝三組水撲滿不同排法網狀隔間，平均排法網狀隔間模擬在震度 4 級建築物震盪最大，模擬震度 5 級時建築物震盪最小。集中、分邊排法網狀隔間對建築物震盪影響差異不大。

(三) 固定三組，水撲滿容器內設置固體、液體、網狀隔間，對建築物震盪之差異。

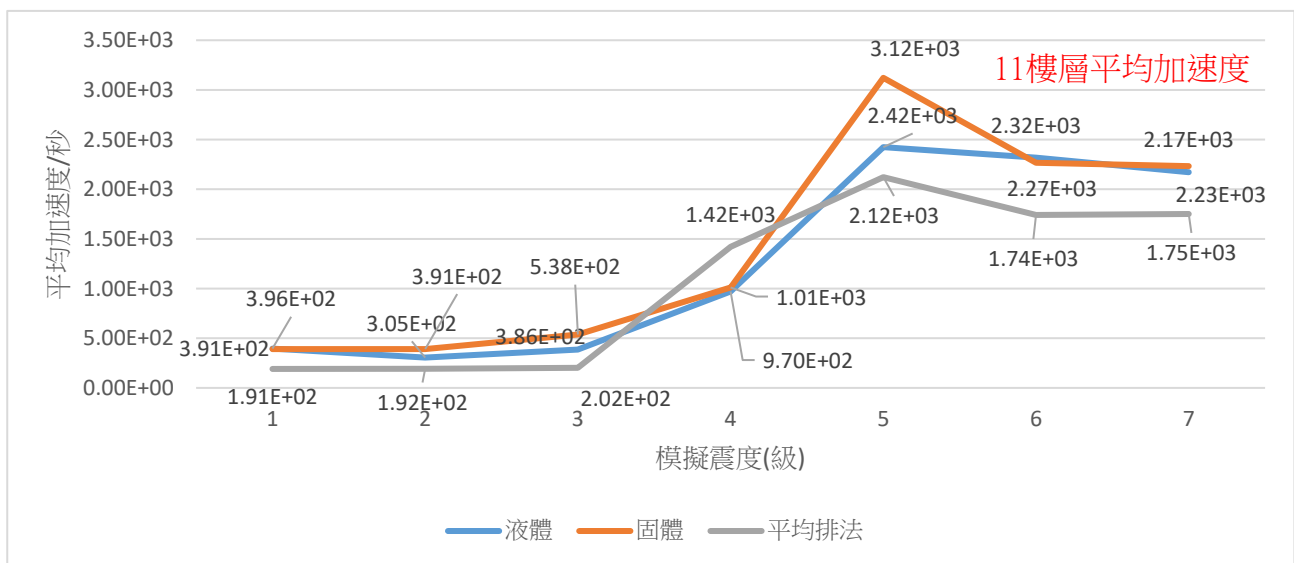


圖 17 固定三組水撲滿，平均加速度與水撲滿內設置固體、液體、網狀隔間關係圖

1. 從圖 17，大樓安裝三組水撲滿，固體水撲滿在模擬震度 1-7 級時建築物震盪較大，固

體、液體、平均排法網狀隔間水撲滿模在擬震度 5 級建築物震盪相差最大；固體與液體水撲滿於模擬震度 6 級時建築物震盪差不多。平均排法網狀隔間水撲滿建築物震盪較小。

(四) 觀察與討論：

1. 大樓設置一組水撲滿，模擬震度 1-3 級大樓震盪不明顯，模擬震度 4-6 級時樓層越高震盪越大，模擬震度 7 級時第 6 樓層大樓震盪最小。**推論：**當大樓震盪在模擬震度七級時，第 6 層樓剛好是大樓震盪建物的中心點。因此才會產生第 6 層樓加速度最慢的現象。
2. 大樓設置三組水撲滿重量較重，模擬震度 1-4 級建築物震盪明顯較大，模擬震度 5-7 級建築物震盪較小；反觀設置一組水撲滿模重量較輕，模擬震度 3、4 級建築物震盪較小，模擬震度 5-7 級建築物震盪最大。**推論：**是因為三組液體水撲滿發揮阻尼效能。
3. 平均排法與集中、分邊排法網狀隔間水撲滿比較，模擬震度 4 級建築物震盪最大，但是模擬震度 5 級建築物震盪最小。為何平均排法網狀隔間水撲滿，在模擬震度 5 級阻尼效果較佳？**推論：**因為平均排法網狀隔間，網狀隔間的距離短，模擬震度 5 級振幅，水波運動長度在較短網狀隔間相互紊流產生消能，進而增加大樓阻尼效能。**圖 18**
4. 集中排法網狀隔間位於水撲滿中間，網狀隔間的距離較長，當模擬震度 6、7 級振幅，水波運動長度在長距離網狀隔間相互紊流產生消能，進而增加大樓阻尼效能。**圖 18**

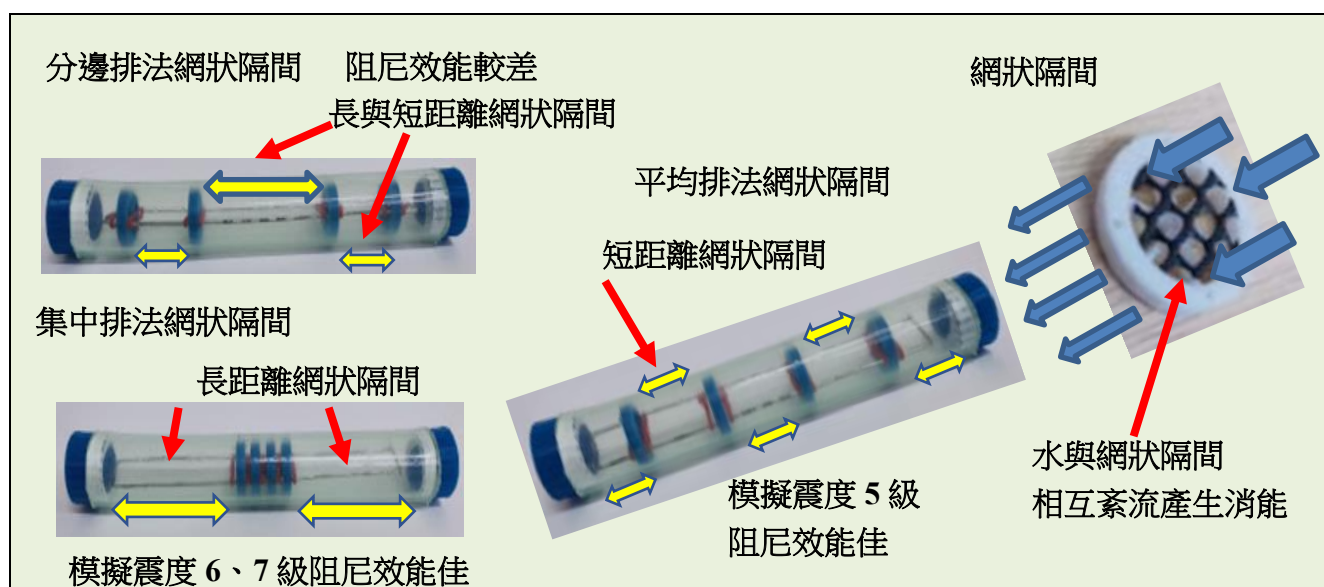


圖 18 不同排法網狀隔間水撲滿阻尼效能概況圖

5. 分邊排法網狀隔間消能阻尼效能較差。
6. 不同裝置固體、液體無網狀隔間、液體有網狀隔間水撲滿比較，模擬震度 1-7 級時固體水撲滿阻尼效能較差，有網狀隔間水撲滿擬在震度 4 級其阻尼效能較差，擬震度 5、6、7 級阻尼效能較佳。液體無網狀隔間水撲滿阻尼效果其次。如表 2
7. 大樓建築物受不同震度影響，樓層越高震盪越大，當 11 層大樓在模擬震度 7 級時，第 6 樓層為大樓建築物中心點震盪最小。
8. 三組液體水撲滿震度小建築物搖晃大，震度大建築物搖晃小；顯示可以破壞震度 5、6 級與大樓建築物共振；固體水撲滿較無法破壞震度 5、6 級與大樓建築物共振。

表 2 三組不同消能元件水撲滿差異比較表

水撲滿形式	固體水撲滿	液體水撲滿	網狀隔間液體水撲滿
容器內形式	冰塊	無網狀隔間	集中、平均排法
阻尼效果差異	阻尼效能較差	有阻尼效能	阻尼效能提升

二、 探討單一阻尼水塔消能元件，受不同震度對建築物震盪之影響。

(一) 大樓設置正圓形水塔，不同水位量對建築物震盪之影響。

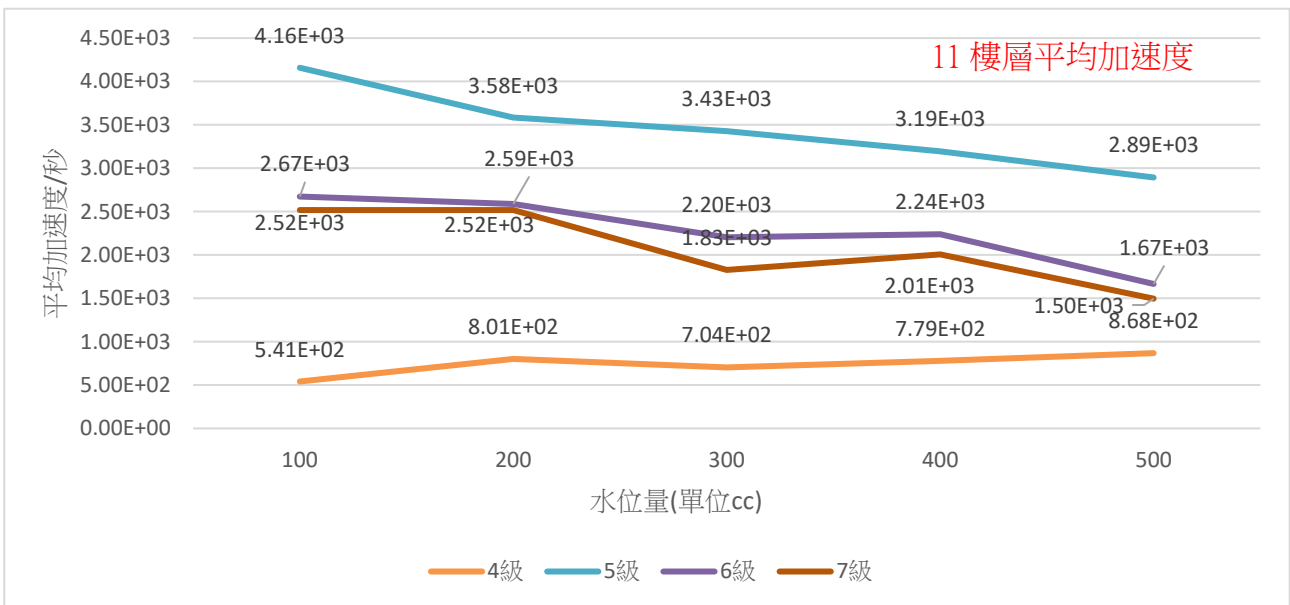


圖 19 正圓形水塔，平均加速度與不同水位量關係圖

1. 從圖 19，大樓水塔在模擬震度 4 級水位量 100cc 建築物震盪最小；水位量 500cc 建築物震盪最大，模擬震度 5、6、7 級水位量 100cc 建築物震盪最大；水位量 500cc 建築物震盪最小，模擬震度 6、7 級水位量 300cc 比 400cc 建築物震盪小。

(二) 大樓設置正方形水塔，不同水位量對建築物震盪之影響。

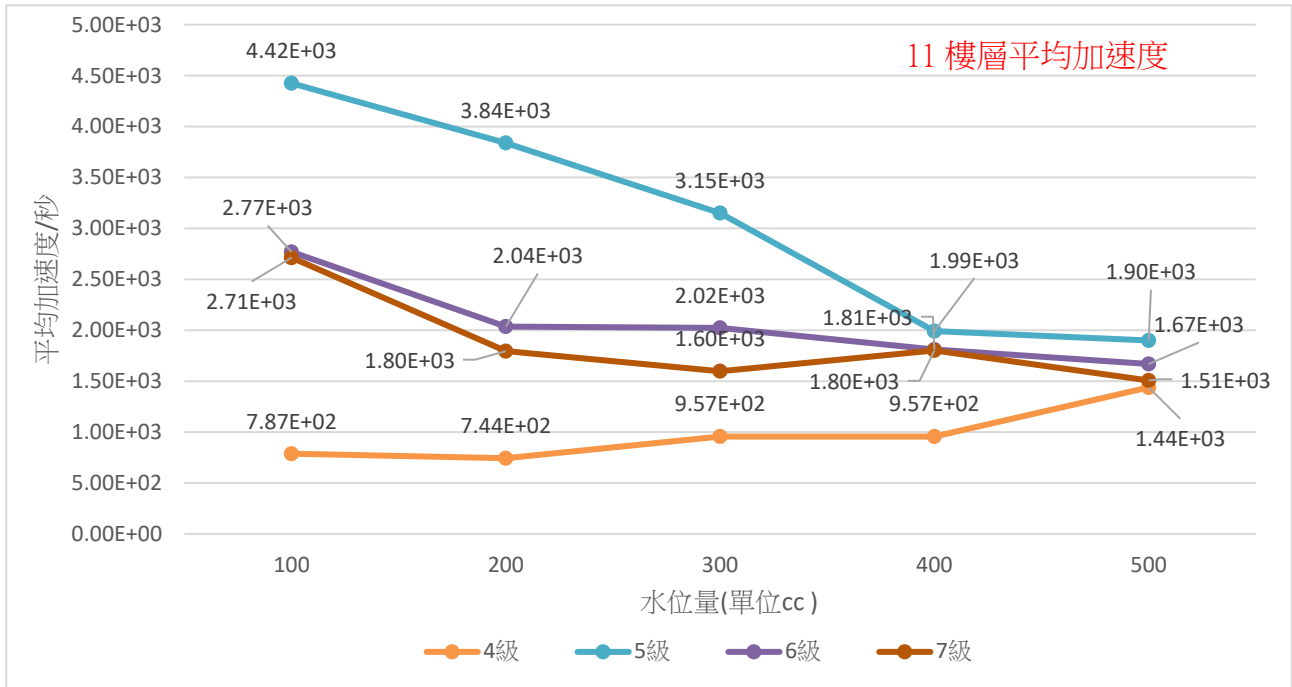


圖 20 正方形水塔，平均加速度與不同水位量關係圖

- 從圖 20，大樓水塔在模擬震度 4 級水位量 100cc 建築物震盪最小；水位量 500cc 建築物震盪最大，模擬震度 5、6、7 級水位量 100cc 建築物震盪最大；水位量 500cc 建築物震盪最小，模擬震度 7 級水位量 300cc 比 400cc 建築物震盪小。

(三) 固定 500cc 水位量，正方形與正圓形水塔，受不同震度對建築物震盪之影響。

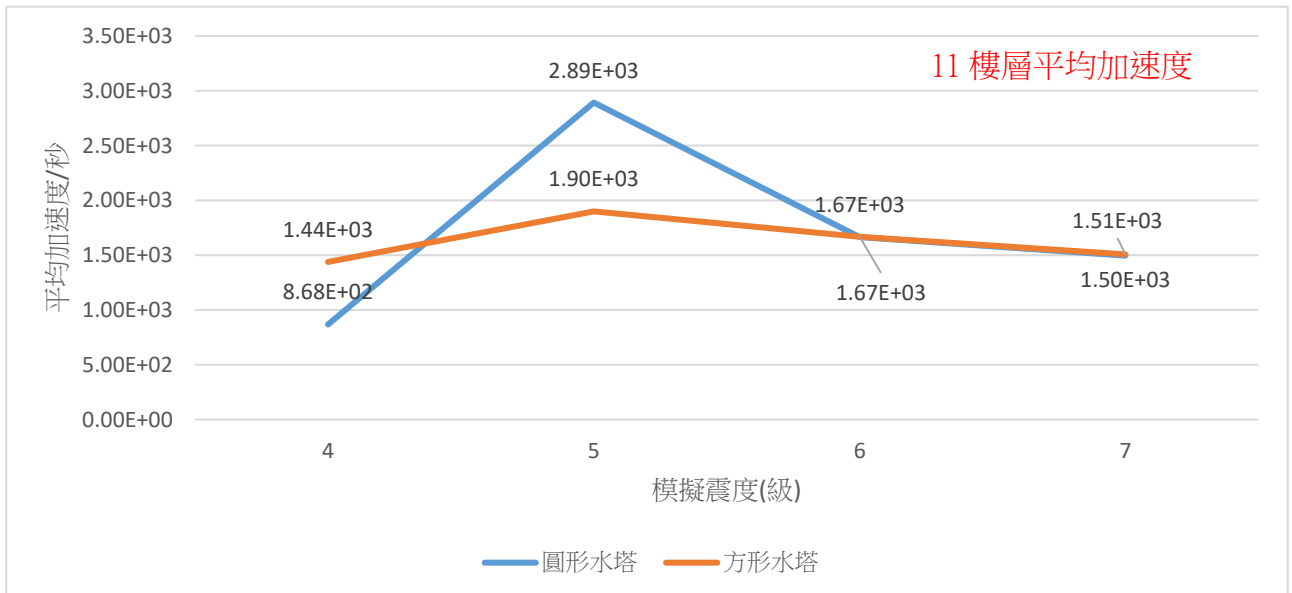


圖 21 固定 500cc 平均加速度與正方形、正圓形水塔關係圖

- 從圖 21，大樓設置正圓形水塔在模擬震度 4 級建築物震盪較小，模擬震度 5 級建築物震盪較大，模擬震度 6、7 級建築物震盪狀況差不多。

(四) 固定 500cc 水位量，加裝網狀隔間**正圓形**水塔，受不同震度對建築物震盪之影響。

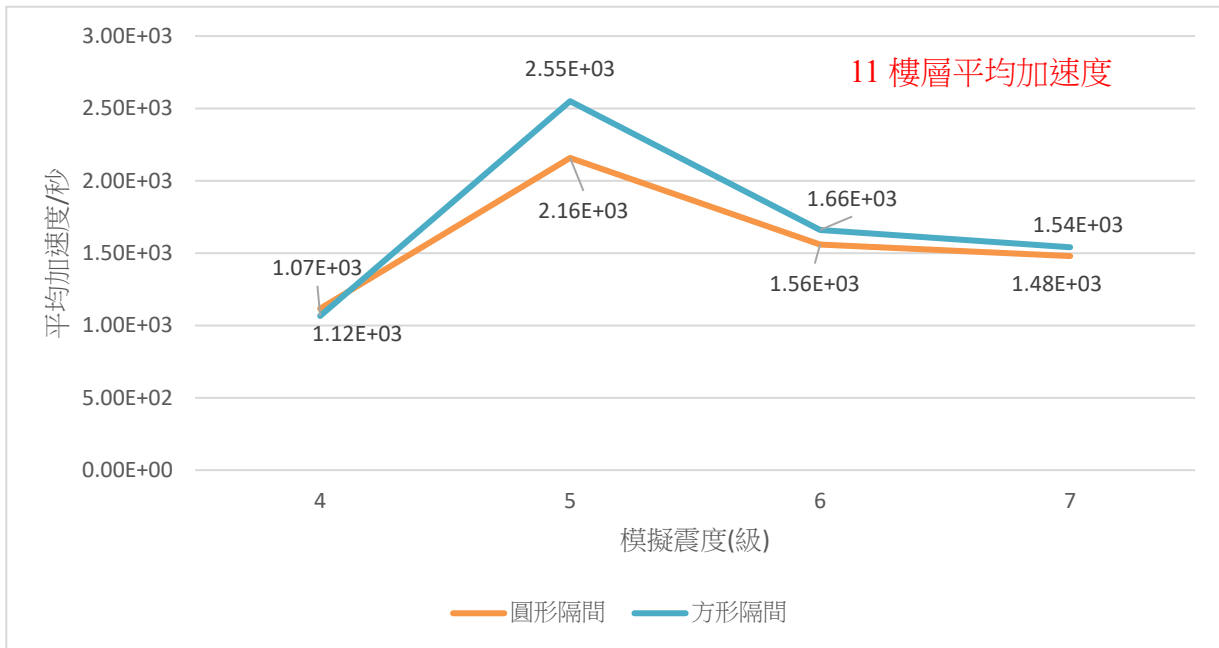


圖 22 正圓形水塔，平均加速度與不同形狀網狀隔間關係圖

1. 從圖 22，正圓形水塔內以正圓形網狀隔間對建築物震盪較小。
2. 正圓形水塔內以正方形網狀隔間對建築物震盪較大。

(五) 固定 500cc 水位量，加裝網狀隔間**正方形**水塔，受不同震度對建築物震盪之影響

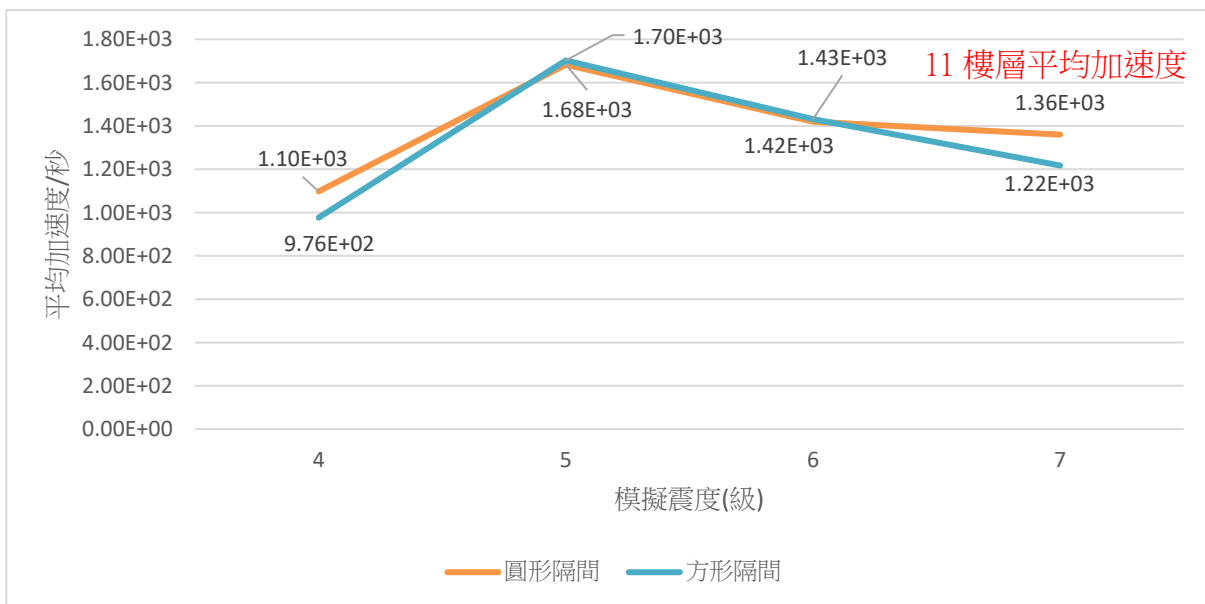


圖 23 正方形水塔，平均加速度與不同形狀網狀隔間關係圖

1. 從圖 23，正方形水塔內以正方形網狀隔間對建築物震盪較小。
2. 正方形水塔內以正圓形網狀隔間對建築物震盪較大。

(六) 固定 500cc 水位量，有無網狀隔間正圓形水塔，受不同震度對建築物震盪之差異。

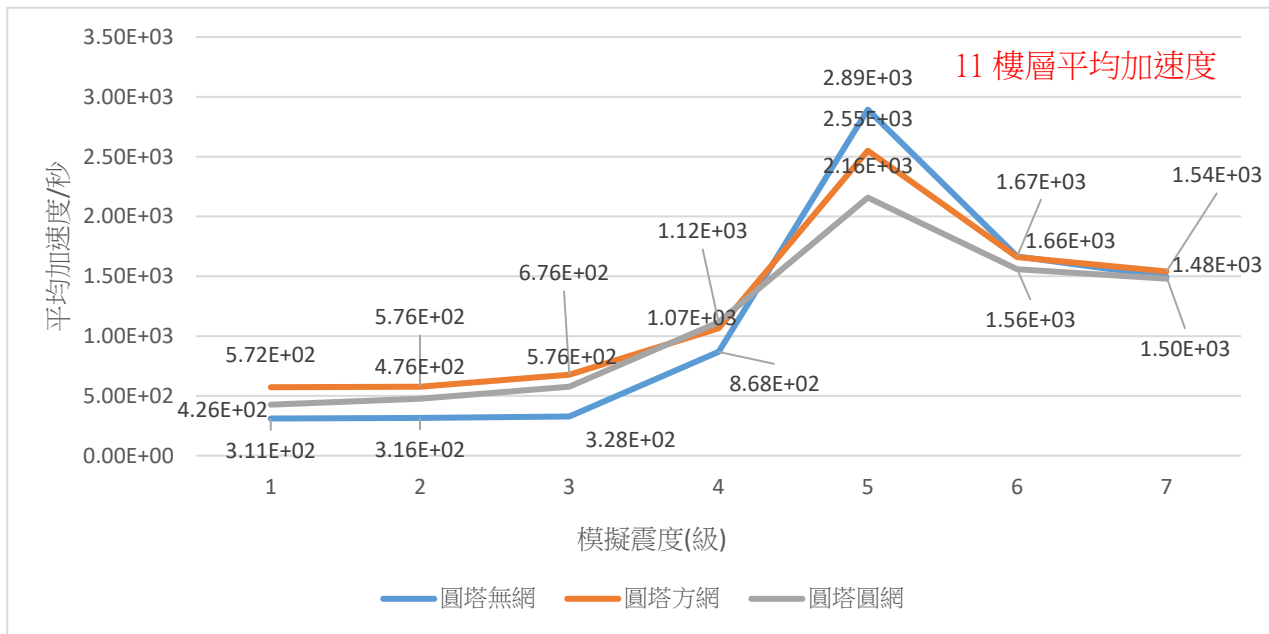


圖 24 正圓形水塔，平均加速度與有無網狀隔間水撲滿關係圖

1. 由圖 24 模擬震度 5 級正圓形水塔內以正圓形網狀隔間對建築物震盪較小。
2. 正圓形無網狀隔間水塔模擬震度 1 至 4 級對建築物震盪較小，模擬震度 5 級建築物震盪較大。

(七) 固定 500cc 水位量，有無網狀隔間正方形水塔，受不同震度對建築物震盪之差異。

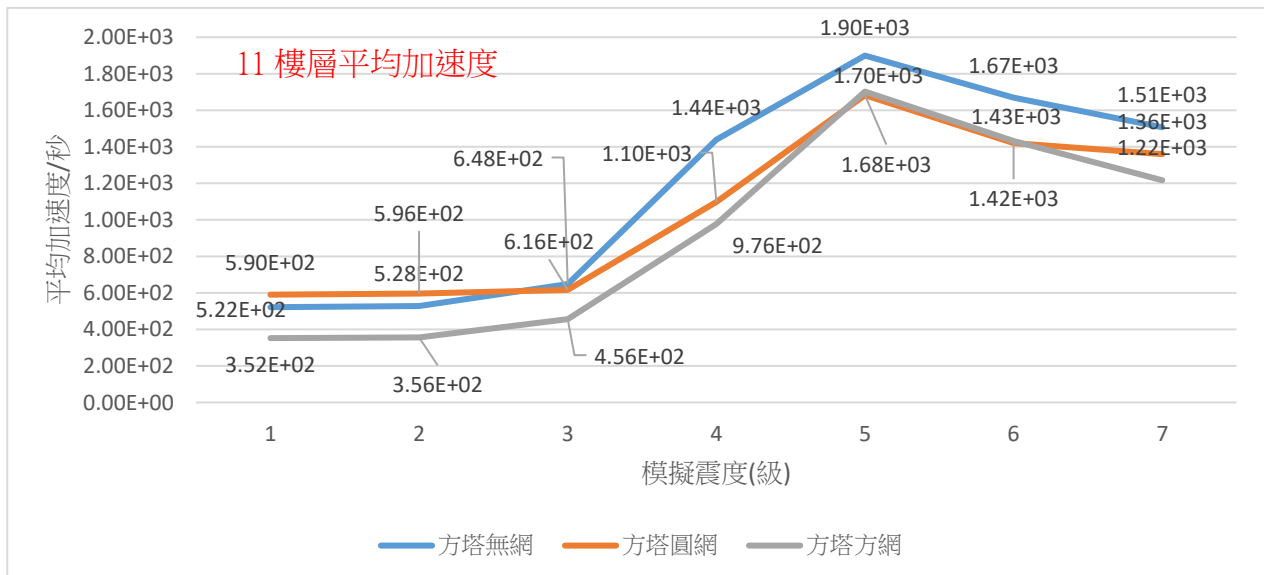


圖 25 正方形水塔，平均加速度與有無網狀隔間水撲滿關係圖

1. 由圖 25 模擬震度 4 至 7 級正方形水塔內無網狀隔間對建築物震盪較大。
2. 正方形水塔內正方形網狀隔間模擬震度 1 至 7 級對建築物震盪較小。

(八) 觀察與討論：

1. 正圓形、正方形水塔模擬震度 4 級水位量 100cc 建築物震盪較小，水位量提升 500cc 建築物震盪變大；模擬震度 5、6、7 級水位量 100cc 建築物震盪較大，水位量提升 500cc 建築物震盪變小。因此小振幅底水位量建築物震盪較小，大震幅高水位量建築物震盪較小。
2. 無網狀隔間水塔阻尼效能比較，正圓形水塔阻尼效能較佳；正圓形水塔阻尼效能較差。
3. 有無網狀隔間阻尼效能比較，正圓形水塔內加裝正圓形網狀隔間阻尼效能可以提升，正方形水塔內加裝正方形網狀隔間阻尼效能可以提升。表 3

表 3 水塔形狀與網狀隔間阻尼效能差異表

水塔形狀	網狀隔間形狀	水塔形狀與網狀隔間關係	阻尼效能
正方形水塔	正圓形網狀隔間	網狀隔間與水塔非平行	差
正方形水塔	正方形網狀隔間	網狀隔間與水塔平行	佳
正圓形水塔	正圓形網狀隔間	網狀隔間與水塔平行	佳
正圓形水塔	正方形網狀隔間	網狀隔間與水塔非平行	差

4. 為何平行水塔器壁網狀隔間阻尼效能較佳？ 推論：當水塔受地震波振幅影響，容器內第一次波的水會往器壁撞，此時產生回彈的第二次波，平行容器內的網狀隔間，能有較好的水波運動長度液體阻尼效能。反觀未平行容器內的網狀隔間，未有效的與器壁紊流空間，液體阻尼效能較差。圖 26

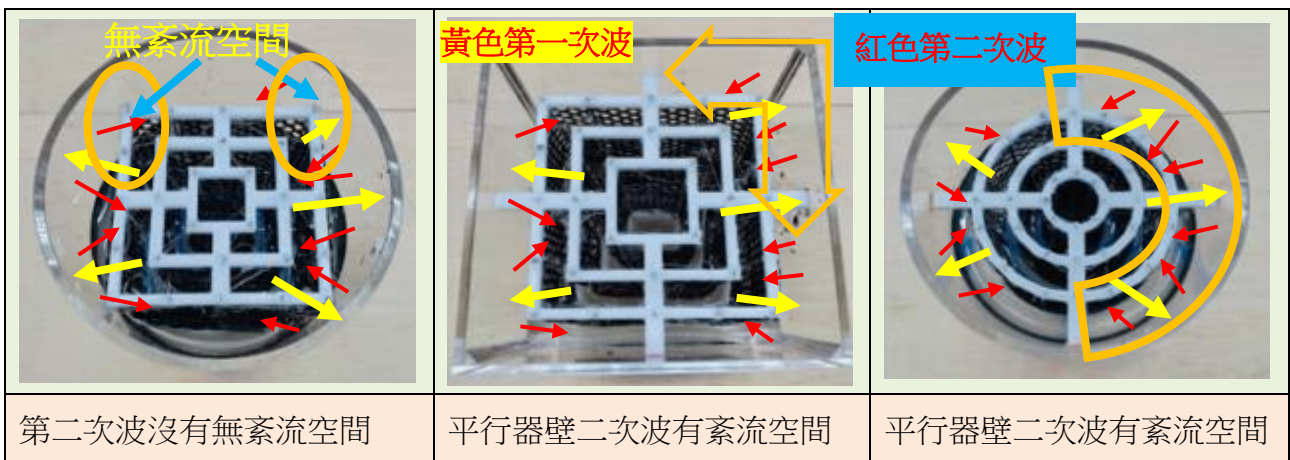


圖 26 水塔形狀與網狀隔間阻尼效能解說圖

三、尋找出最佳雙阻尼設置方法，水塔要如何配合水撲滿設置大樓。

(一) 固定震度 4 級，不同水塔形狀配合設置不同樓層水撲滿，對建築物震盪之影響。

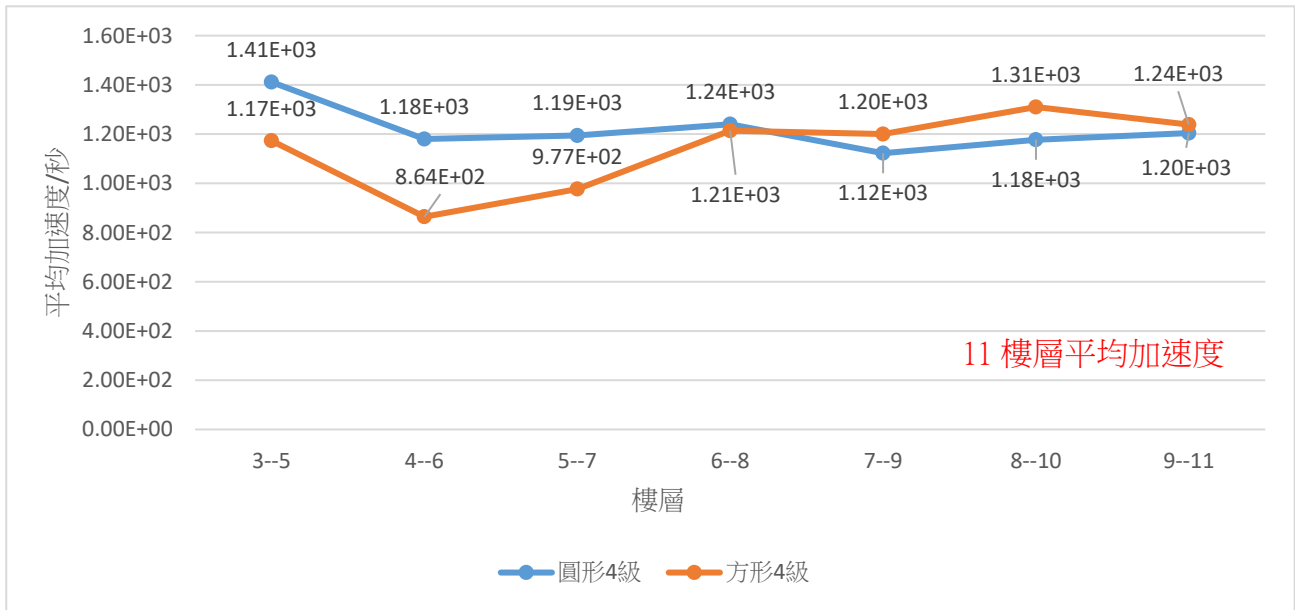


圖 27 固定震度 4 級，平均加速度與設置不同樓層水撲滿關係圖

- 從圖 27，正方形水塔配合設置 4-6 樓三組水撲滿建築物震盪較小，設置 8-10 樓三組水撲滿建築物震盪較大。正圓形水塔配合設置 3-5 樓三組水撲滿建築物震盪較大，設置其他樓層建築物震盪差異不大。

(二) 固定震度 5 級，不同水塔形狀配合設置不同樓層水撲滿，對建築物震盪之影響。

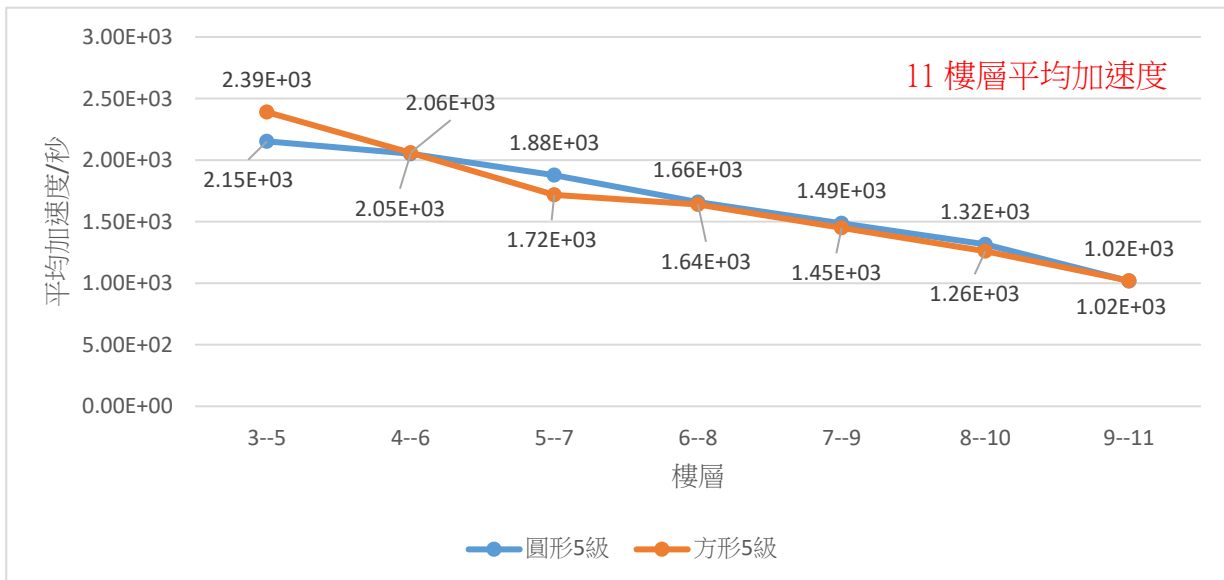


圖 28 固定震度 5 級，平均加速度與設置不同樓層水撲滿關係圖

- 從圖 28，正圓形與正方形水塔配合設置 3-5 樓三組水撲滿建築物震盪最大，設置 9-11 樓三組水撲滿建築物震盪最小。

(三) 固定震度 4、5 級，不同水塔形狀配合設置不同樓層水撲滿，對建築物震盪之影響。

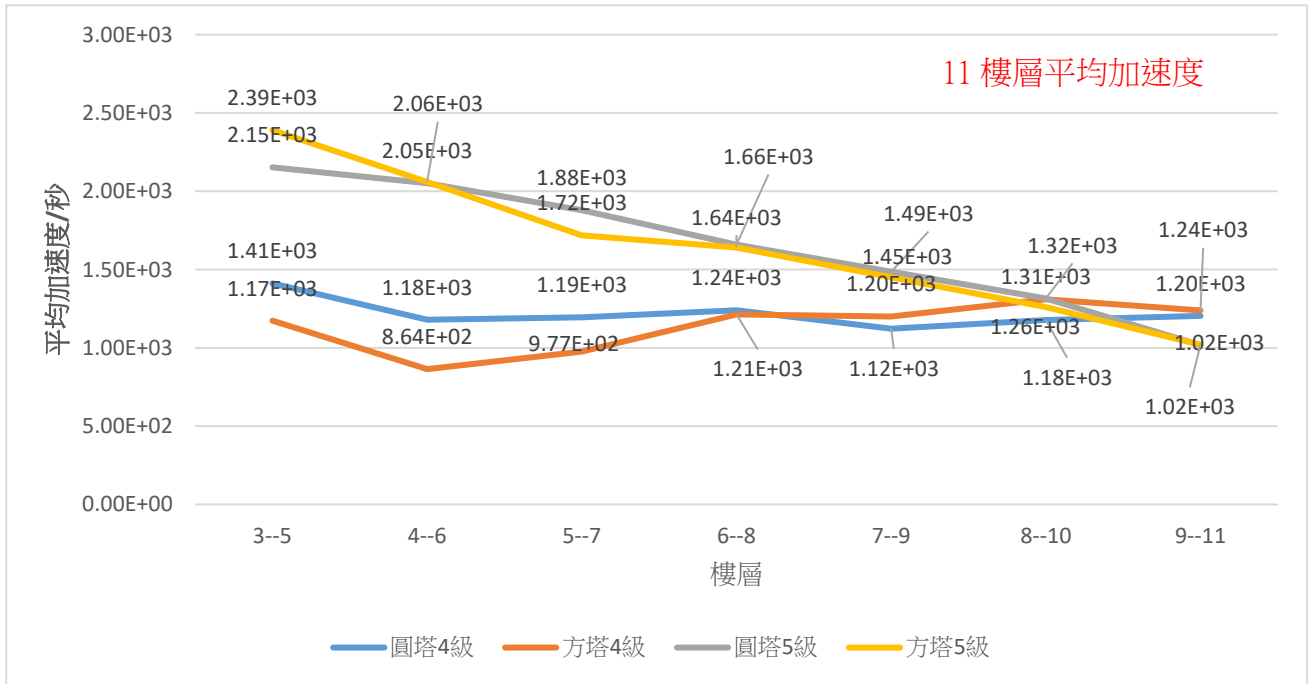


圖 29 固定震度 4、5 級，平均加速度與設置不同樓層水撲滿之差異圖

1. 從圖 29，模擬震度 5 級，設置高樓層三組水撲滿建築物震盪較小；設置底樓層三組水撲滿建築物震盪差異較大。
2. 模擬震度 4 級，設置低樓層三組水撲滿建築物震盪較小。

(四) 無網狀隔間，不同形狀水塔配合水撲滿雙阻尼系統，受不同震度對建築物震盪影響。

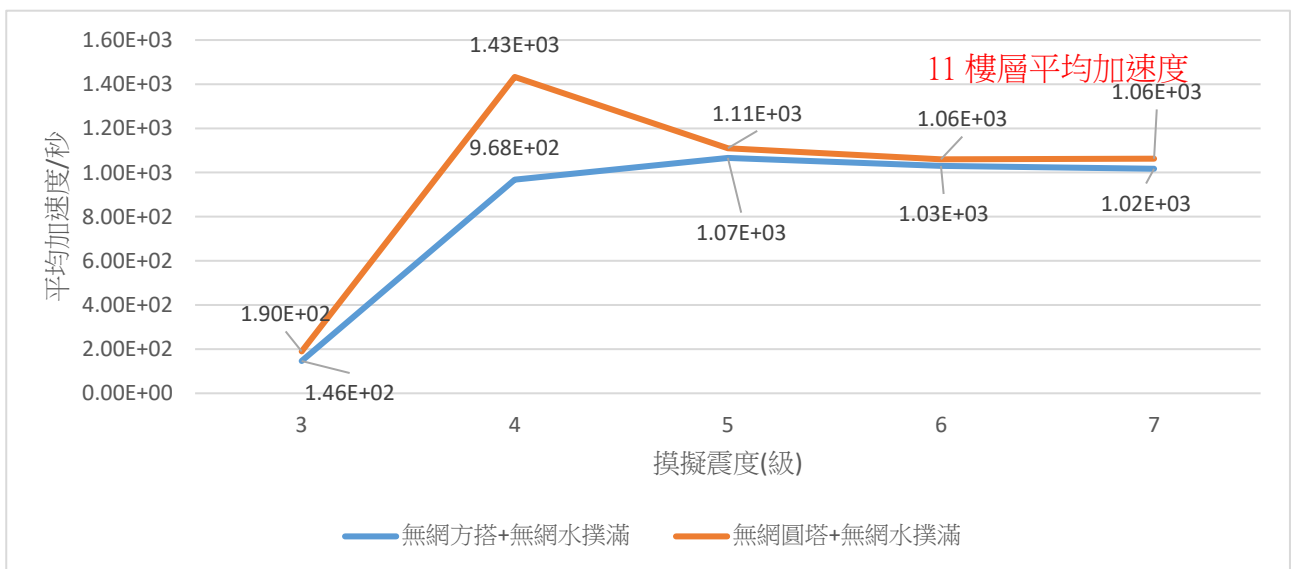


圖 30 無網狀隔間，平均加速度與雙阻尼系統對建築物震盪影響關係圖

1. 從圖 30，無網狀隔間三組水撲滿設置 9、10、11 高樓層，搭配無網狀隔間正方形水塔對建築物震盪影響較小。

(五) 平形器壁圓形網隔水塔，配合不同排法網隔水撲滿雙阻尼系統，對建築物震盪影響。

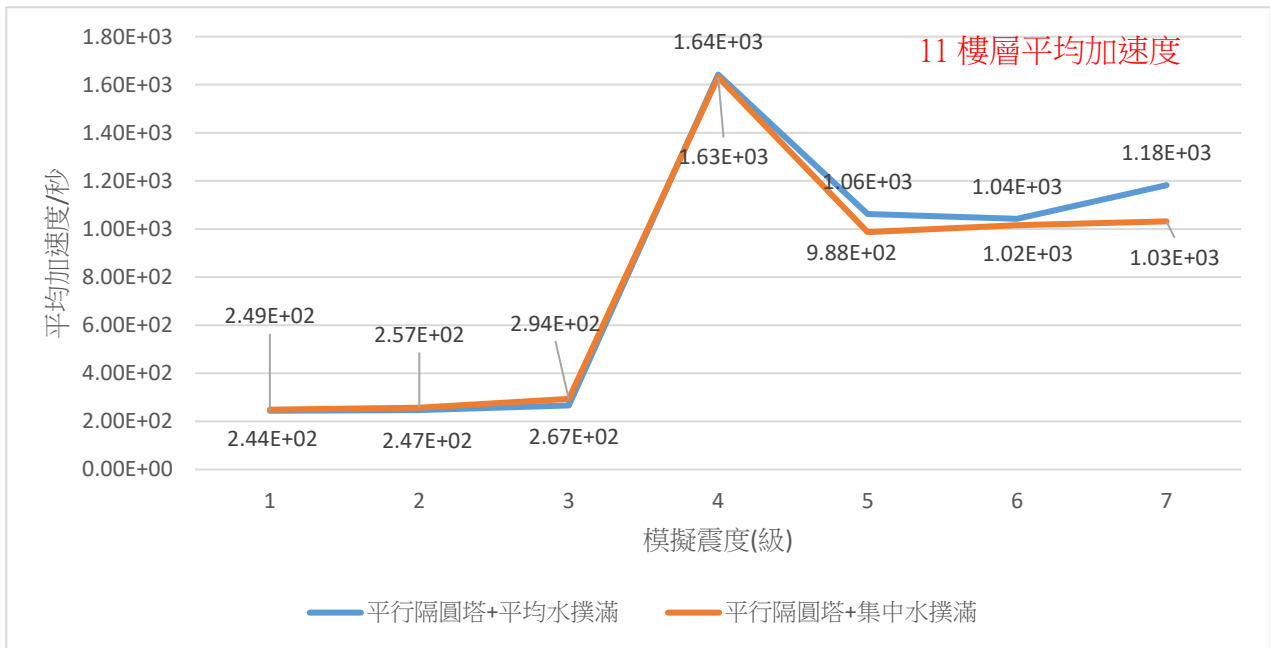


圖 31 平形器壁圓形網隔水塔，平均加速度與不同排法網隔水撲滿對建築物震盪影響關係圖

- 從圖 31，平行器壁網狀隔間正圓形水塔，搭配集中排法網狀隔間水撲滿，模擬震度 4 級建築物震盪影較大，擬震度 5、6、7 級建築物震盪影較小。

(六) 平形器壁方形網隔水塔，配合不同排法網隔水撲滿雙阻尼系統，對建築物震盪影響。

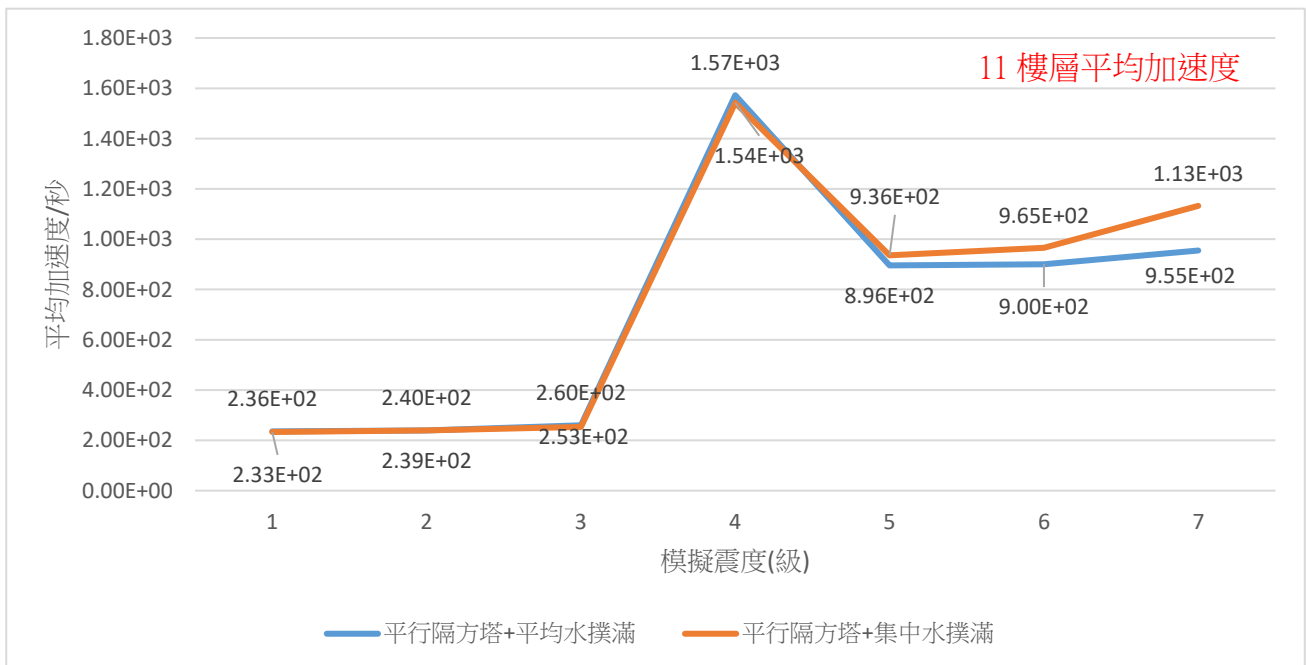


圖 32 平形器壁方形網隔水塔，平均加速度與不同排法網隔水撲滿對建築物震盪影響關係圖

- 從圖 32，行器壁網狀隔間正方形水塔，搭配平均排法網狀隔間水撲滿，模擬震度 4 級建築物震盪影較大，擬震度 5、6、7 級建築物震盪影較小。

(七) 觀察與討論：

1. 模擬震度 5 級水塔**配合設置高樓層處**三組水撲滿阻尼效能較佳；模擬震度 4 級水塔配合設置底樓層處三組水撲滿阻尼效能較佳。
2. 有無網狀隔間，不同設計設置，雙阻尼消能系統阻尼效能差異如下表：

表 4 不同設計設置，雙阻尼消能系統阻尼效能差異表

雙 阻 尼 消 能 系 統		
水塔形狀	水撲滿	阻尼效能
無網狀隔間正圓形水塔	無網狀隔間水撲滿	差
無網狀隔間正方形水塔	無網狀隔間水撲滿	佳
平行器壁網狀隔間正圓形水塔	集中排法網狀隔間水撲滿	佳
平行器壁網狀隔間正圓形水塔	平均排法網狀隔間水撲滿	差
平行器壁網狀隔間正方形水塔	集中排法網狀隔間水撲滿	差
平行器壁網狀隔間正方形水塔	平均排法網狀隔間水撲滿	佳

3. 由表 4 觀察發現平行器壁正方形水塔配合平均排法水撲滿，以及平行器壁正圓形水塔配合集中排法水撲滿阻尼效果較好。為何會有如此現象？這個現象如質塊阻尼鉛垂線，振動**頻率快要較短**鉛垂線，振動**頻率慢要較長**鉛垂線阻尼效果較佳。圖 33

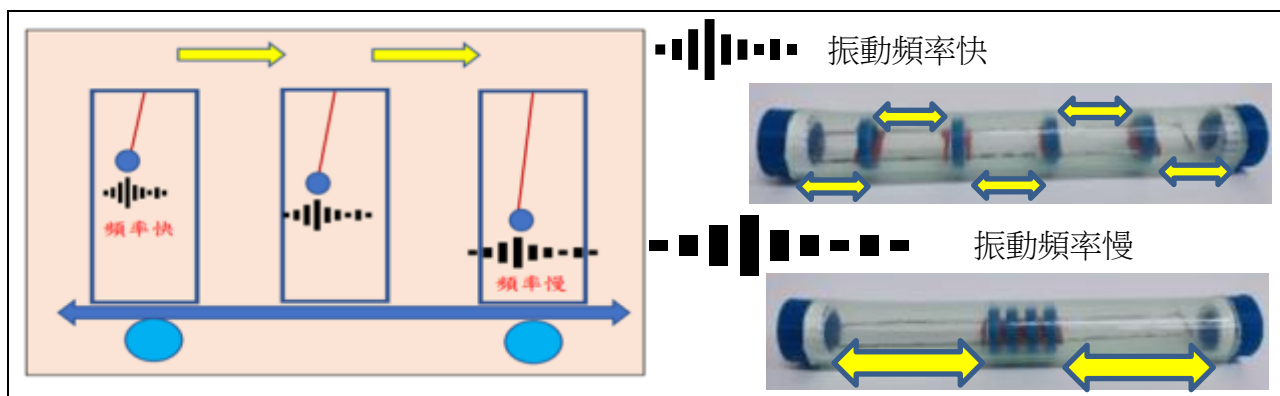


圖 33 質塊阻尼鉛垂線與液體水波運動長度，阻尼原理運用解說圖

由圖 33 推論：正方形水塔容器有直角器壁與網狀隔間，能有效破壞大樓扭轉共振，此時大樓扭轉共振較小，配合**較短水波運動長度**網狀隔間水撲滿，液體阻尼效能才能提升；正圓形水塔容器沒有直角器壁與網狀隔間，無法有效破壞大樓自主扭轉共振，此時大樓扭轉共振較大，配合**較長水波運動長度**網狀隔間水撲滿，液體阻尼效能才能提升。圖 34

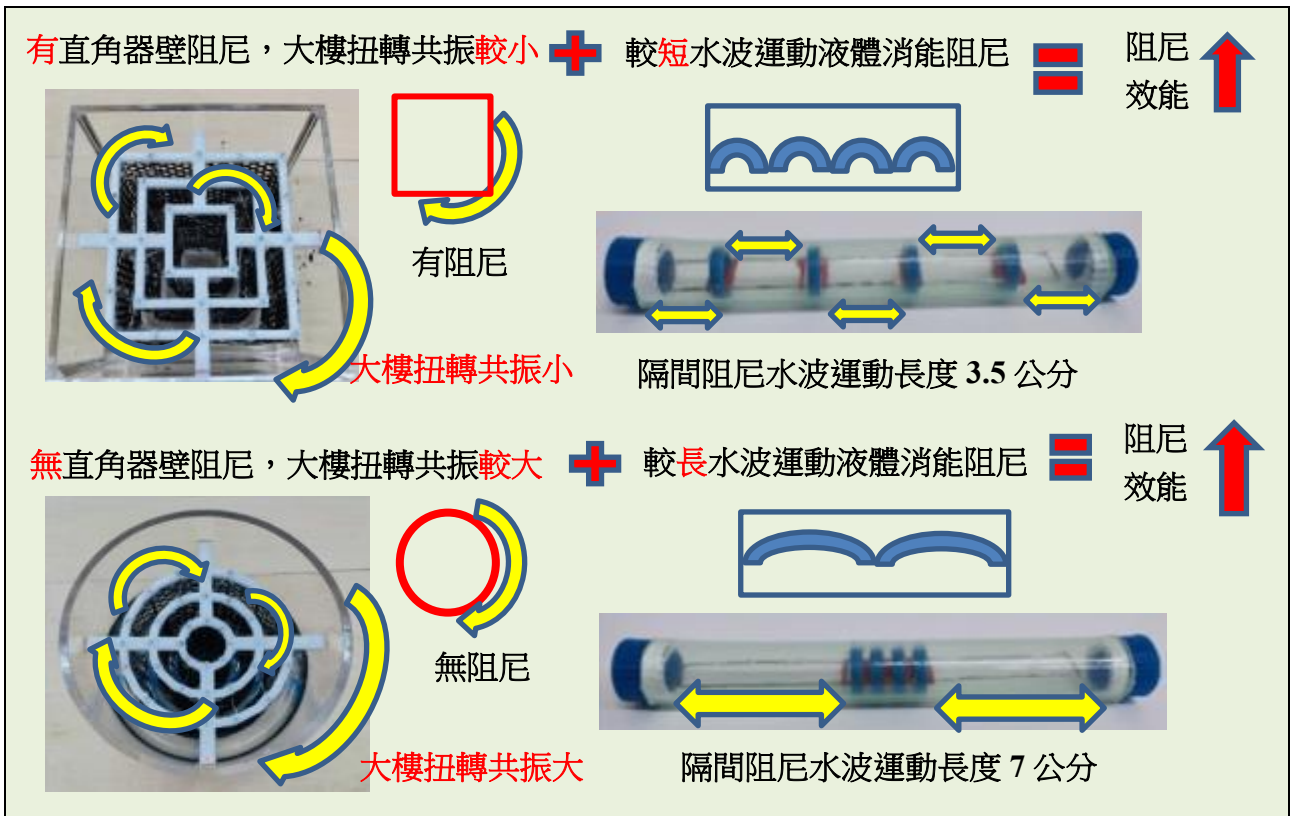


圖 34 不同形狀水塔配合不同排法網狀隔間水撲滿阻尼效能差異解說

4. 平行器壁網狀隔間正圓形水塔，配合集中排法網狀隔間水撲滿對建築物阻尼效能較佳，觀察水波運動現象如圖下：

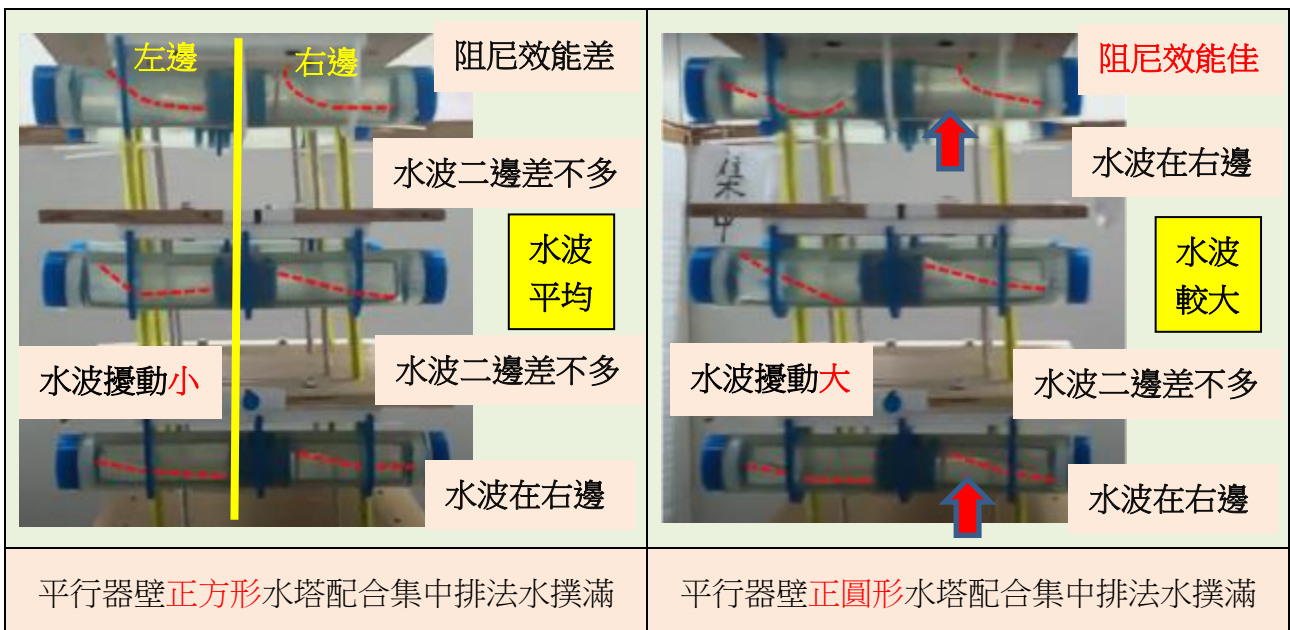


圖 35 平行器壁隔間正方形、正圓形水塔集中排法網狀隔間水撲滿阻尼差異比較圖

5. 平行器壁網狀隔間正方形水塔，配合平均排法網狀隔間水撲滿對建築物阻尼效能較佳，觀察水波運動現象如圖下：

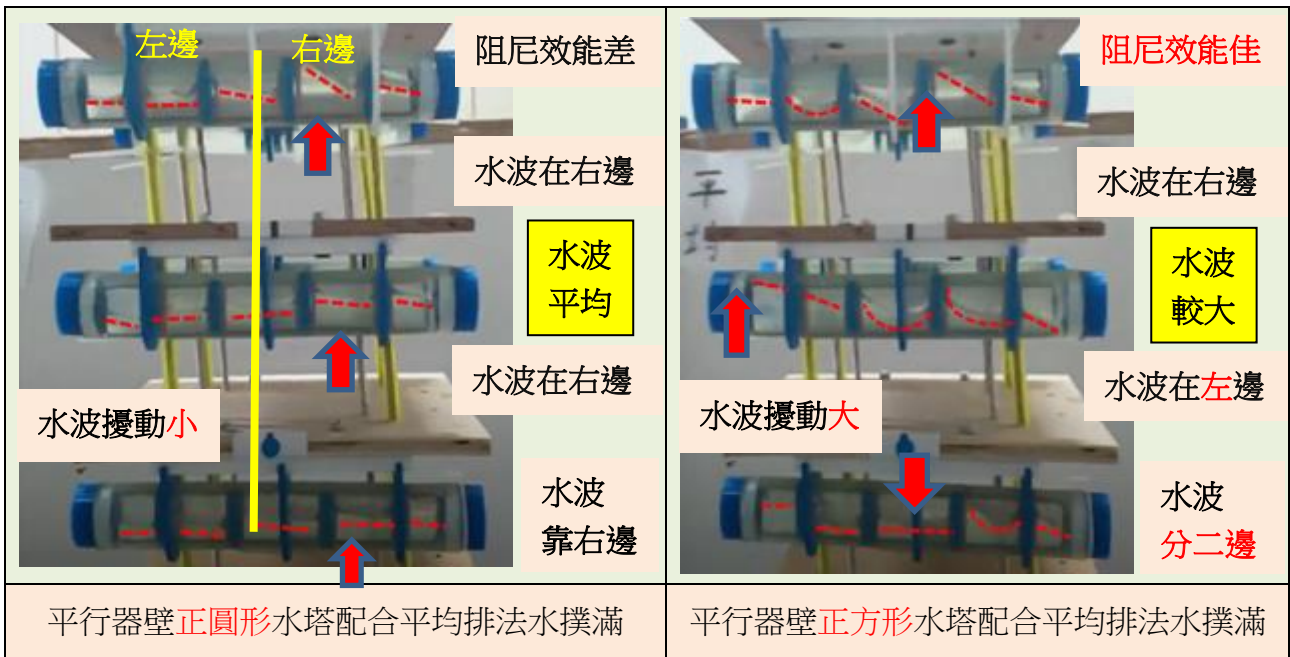


圖 36 平行器壁隔間正方形、正圓形水塔平均排法網狀隔間水撲滿阻尼差異比較圖

6. 由以上圖 35、36 整理出，雙阻尼消能系統阻尼差異比較表，如下表 5 觀察發現三組水撲滿容器內，水波運動形態一致平均擾動小阻尼效能較差；反之水波運動形態不一致擾動大阻尼效能較佳。推論：水撲滿網狀隔間阻尼效能與水波擾動現象成正相關。

表 5 平行器壁隔間正方形、正圓形水塔不同排法網狀隔間水撲滿阻尼差異比較表

平行器壁隔間正方形、正圓形水塔不同排法網狀隔間水撲滿阻尼差異比較表				
水撲滿排法	集中排法網狀隔間		平均排法網狀隔間	
水塔形狀	平行隔間正方形	平行隔間正圓形	平行隔間正圓形	平行隔間正方形
水撲滿最上層	水波二邊差不多	水波在右邊	水波在右邊	水波在右邊
水撲滿中間層	水波二邊差不多	水波二邊差不多	水波在右邊	水波在左邊
水撲滿最下層	水波在右邊	水波在右邊	水波在右邊	水波分二邊
水波形態	水波平均擾動小	水波明顯擾動大	水波平均擾動小	水波明顯擾動大
阻尼效能	差	佳	差	佳

四、探討有無加裝網狀隔間，雙阻尼消能系統與單一阻尼消能元件，阻尼效能之差異。

(一) 無網狀隔間，**正圓形**水塔雙阻尼、單一阻尼，受不同震度對建築物震盪影響之差異。

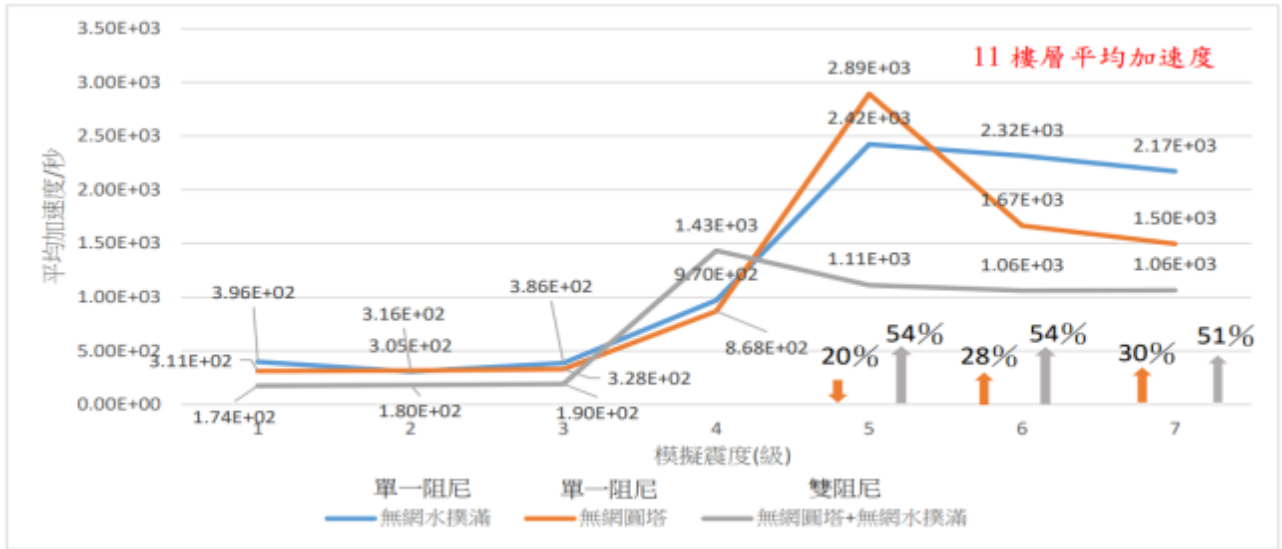


圖 37 無網狀隔間正圓形水塔，平均加速度與不同液體阻尼消能元件關係圖

- 從圖 37，無網狀隔間，單一阻尼正圓形水塔與水撲滿消能元件，受震波影響最大共振點在模擬震度 5 級，對建築物震盪影響較大；正圓形水塔配合水撲滿雙阻尼消能系統，受震波影響最大共振點在模擬震度 4 級，阻尼效能提升 51%至 54%。

(二) 無網狀隔間，**正方形**水塔雙阻尼、單一阻尼，受不同震度對建築物震盪影響之差異。

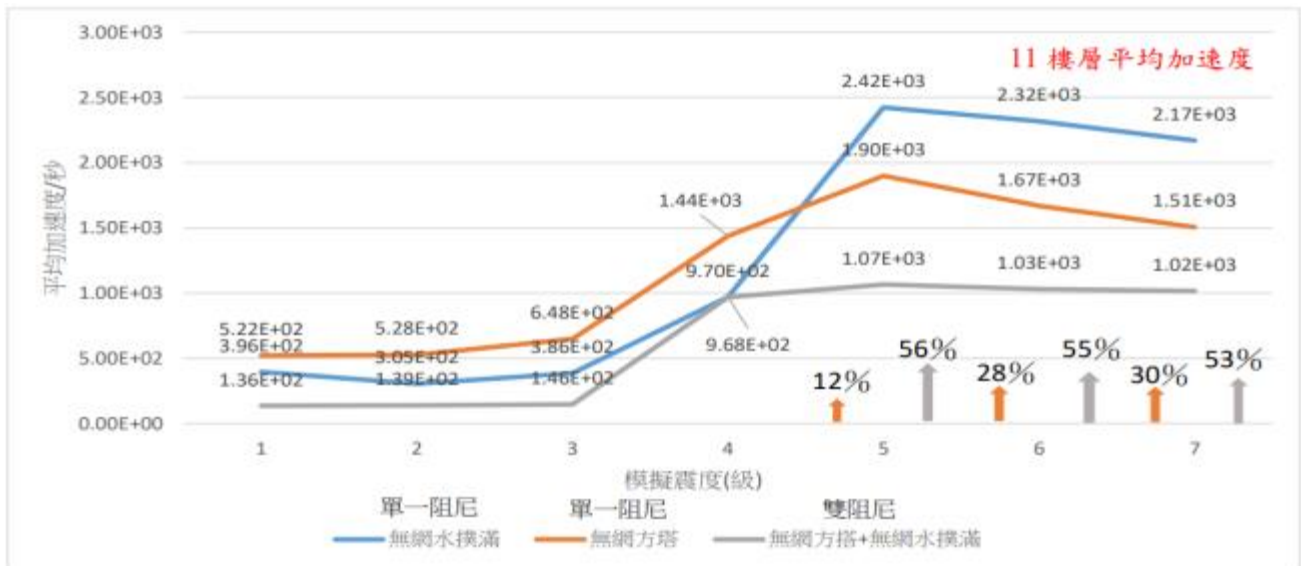


圖 38 無網狀隔間正方形水塔，平均加速度與不同液體阻尼消能元件關係圖

- 從圖 38，無網狀隔間，單一阻尼正方形水塔與水撲滿消能元件，受震波影響最大共振點在模擬震度 5 級，對建築物震盪影響較大；正方形水塔配合水撲滿雙阻尼消能系統，受震波影響最大共振點在模擬震度 5 級，阻尼效能提升 53%至 56%。

(三) 有網狀隔間，**正圓形**水塔雙阻尼、單一阻尼，受不同震度對建築物震盪影響之差異。

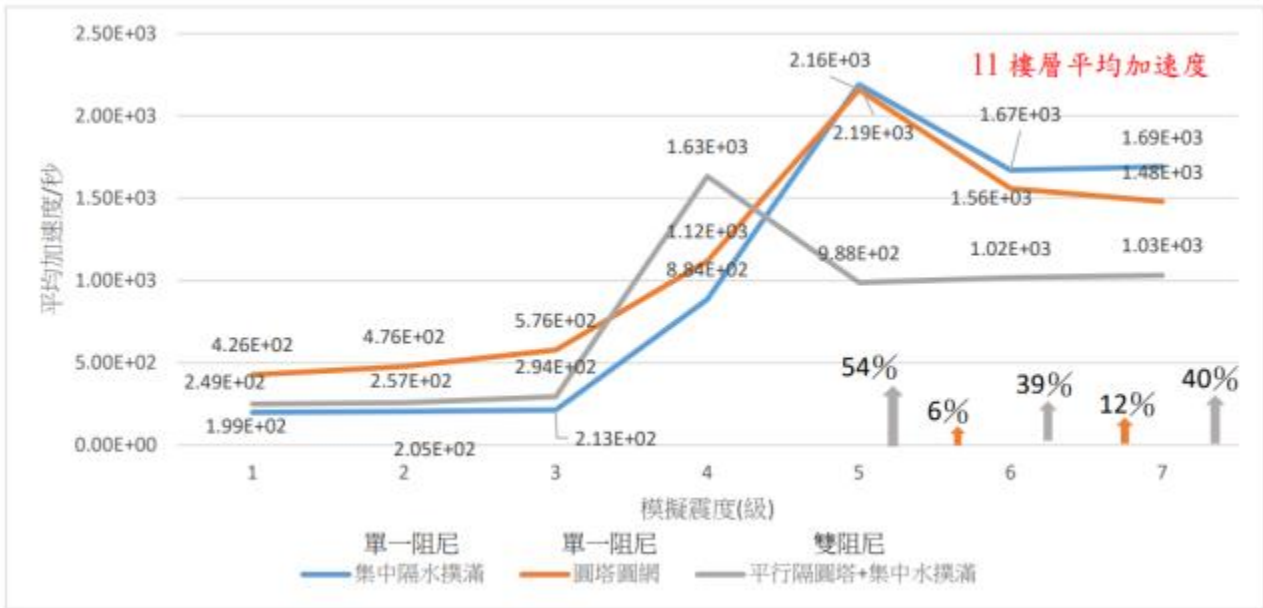


圖 39 有網狀隔間正圓形水塔，平均加速度與不同液體阻尼消能元件關係圖

- 從圖 39，平行器壁正圓形網狀隔間水塔配合集中排法水撲滿雙阻尼消能系統，受震波影響最大共振點在模擬震度 4 級，震度 5 至 7 級阻尼效能提升 39%至 54%。

(四) 有網狀隔間，**正方形**水塔雙阻尼、單一阻尼，受不同震度對建築物震盪影響之差異。

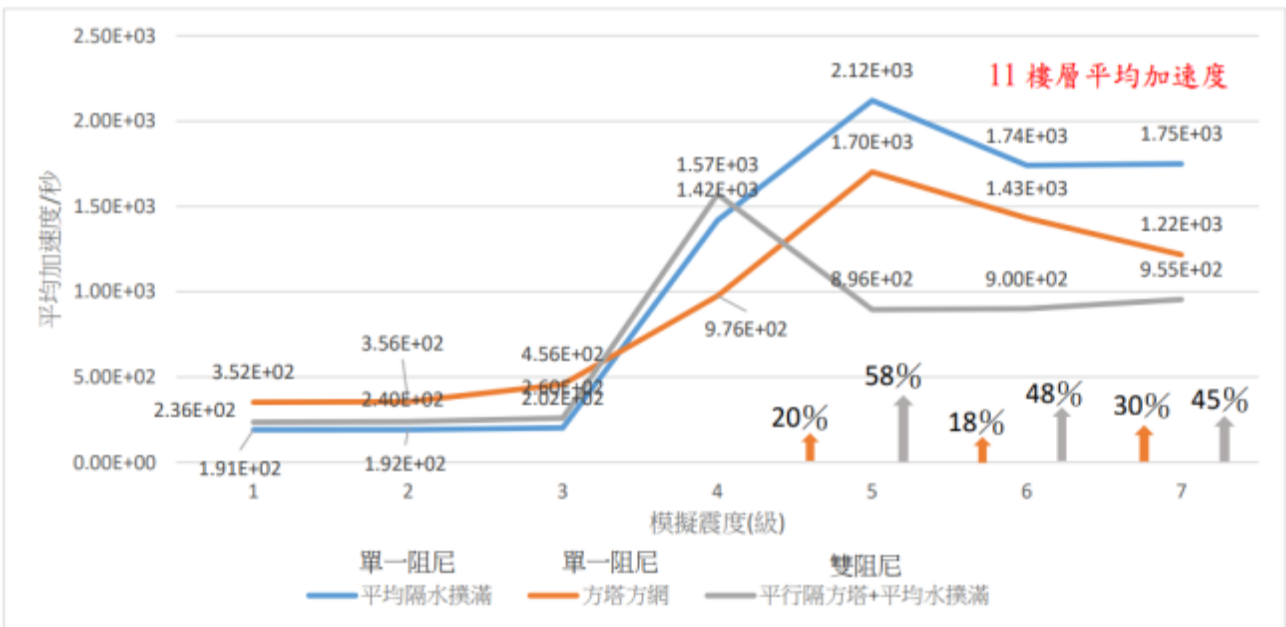


圖 40 有網狀隔間正方形水塔，平均加速度與不同液體阻尼消能元件關係圖

- 從圖 40，平行器壁正方形網狀隔間水塔配合平均排法水撲滿雙阻尼消能系統，受震波影響最大共振點在模擬震度 4 級，震度 5 至 7 級阻尼效能提升 45%至 58%。

(五) 觀察與討論：

- 以雙阻尼消能系統與單一阻尼消能元件阻尼效能差異比較，單一阻尼消能元件與大樓產生最大共振會在模擬震度 5 級，液體阻尼效能較差；無網狀隔間雙阻尼消能系統，正圓形水塔與大樓產生最大共振點在模擬震度 4 級，正方形水塔與大樓產生最大共振點在模擬震度 5 級；有網狀隔間雙阻尼消能系統，無論正方形、正圓形水塔與大樓產生最大共振點在模擬震度 4 級，阻尼效能有明顯提升 39%至 58%。
- 綜合以上雙阻尼消能系統與單一阻尼消能元件，阻尼效能差異比較本組整理如下表：

表 6 模擬震度 5 至 7 級，雙阻尼消能系統與單一阻尼消能元件效能差異比較表

雙阻尼消能系統與單一阻尼消能元件效能差異表				
不同消能元件		最大共振震度	平均加速度	液體阻尼效能
單一 阻 尼 消 能 元 件	無網狀隔間水撲滿	模擬震度 5 級	2.42E+03	差
	平均排法網狀隔間水撲滿	模擬震度 5 級	2.12E+03	差
	集中排法網狀隔間水撲滿	模擬震度 5 級	2.19E+03	差
	無網狀隔間正圓形水塔	模擬震度 5 級	2.89E+03	差
	無網狀隔間正方形水塔	模擬震度 5 級	1.90E+03	佳
	平行器壁網狀隔間正圓形水塔	模擬震度 5 級	2.16E+03	差
	平行器壁網狀隔間正方形水塔	模擬震度 5 級	1.70E+03	佳
雙 阻 尼 系 統	無網水撲滿+無網正圓形水塔	模擬震度 4 級	1.43E+03	提升 51 至 54%
	無網水撲滿+無網正方形水塔	模擬震度 5 級	1.07E+03	提升 53 至 56%
	集中排法水撲滿+平行器壁圓形水塔	模擬震度 4 級	1.63E+03	提升 39 至 54%
	平均排法水撲滿+平行器壁方形水塔	模擬震度 4 級	1.57E+03	提升 45 至 58%

五、探討雙阻尼消能系統，有無加裝網狀隔間，阻尼效能差異之比較。

(一) 無網狀隔間雙阻尼消能系統，不同水塔形狀，受不同震度對建築物震盪影響。

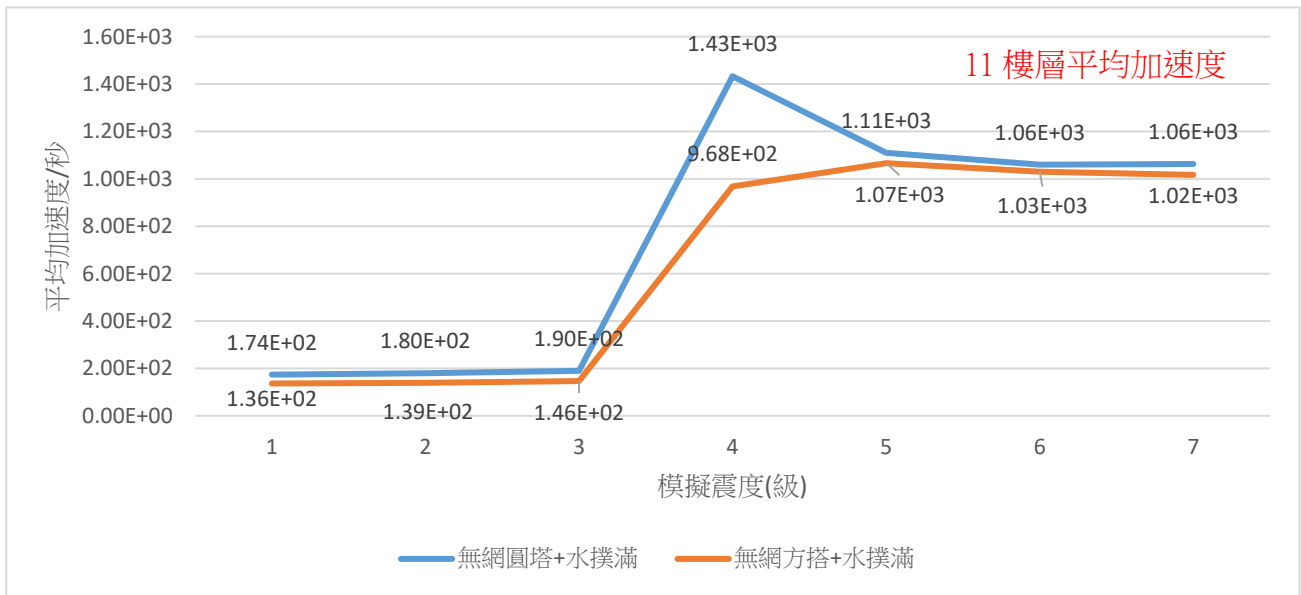


圖 41 無網狀隔間雙阻尼消能系統，平均加速度與不同水塔形狀關係圖

1. 從圖 41，無網狀隔間，正方形水塔配合水撲滿雙阻尼消能系統，受震波影響最大共振點在模擬震度 5 級，對建築物震盪影響較小。

(二) 有網狀隔間雙阻尼消能系統，不同水塔形狀，受不同震度對建築物震盪影響。

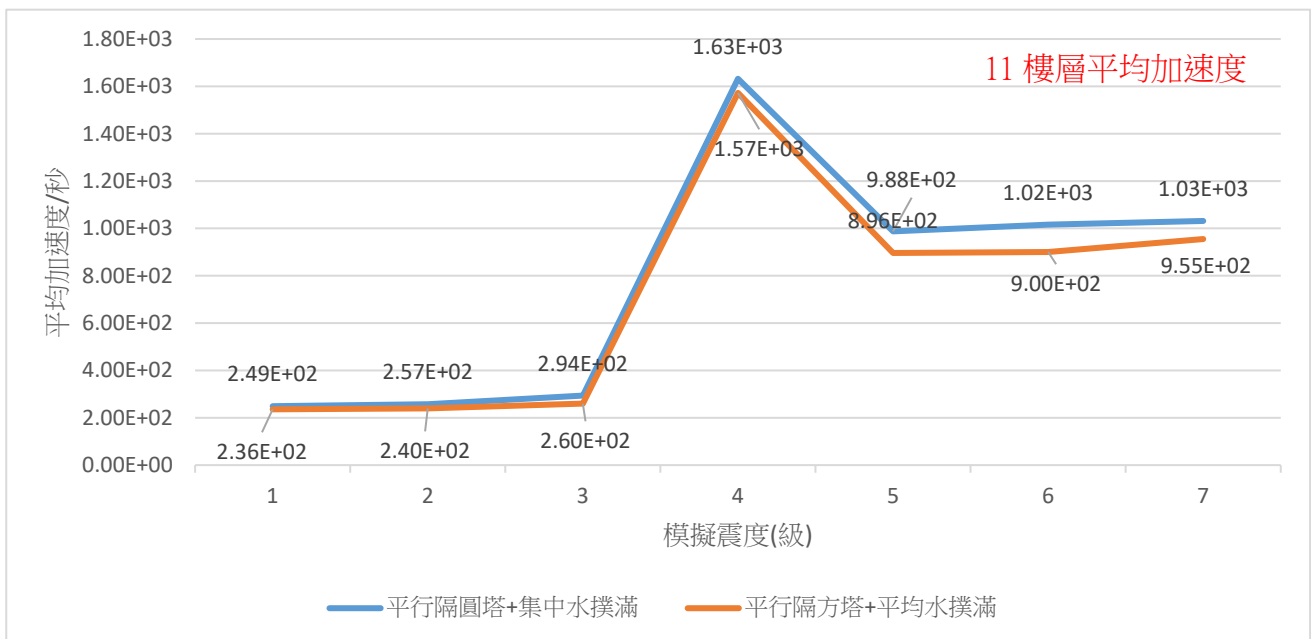


圖 42 有網狀隔間雙阻尼消能系統，平均加速度與不同水塔形狀關係圖

1. 從圖 42，有網狀隔間，平行器壁正方形網狀隔間水塔配合平均排法水撲滿，雙阻尼消能系統，對建築物震盪影響較小。

(三) 有無網狀隔間雙阻尼消能系統，不同水塔形狀，受不同震度對建築物震盪影響。

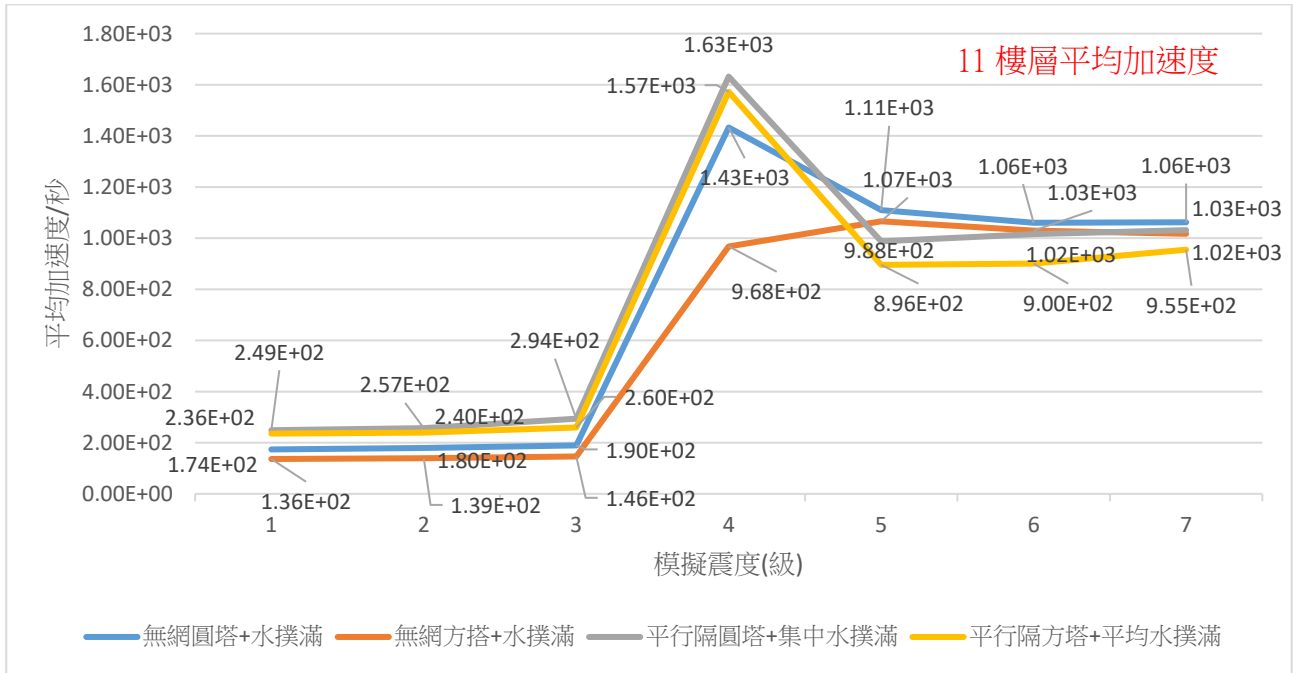


圖 43 有無網狀隔間雙阻尼消能系統，平均加速度與不同水塔形狀關係圖

1. 從圖 43，無網狀隔間正方形水塔配合水撲滿，受震波影響最大共振點在模擬震度 5 級；其它雙阻尼消能系統，受震波影響最大共振點在模擬震度 4 級。

(四) 震度 5 至 7 級平均加速，有無網狀隔間雙阻尼消能系統，阻尼效能差異之比較。

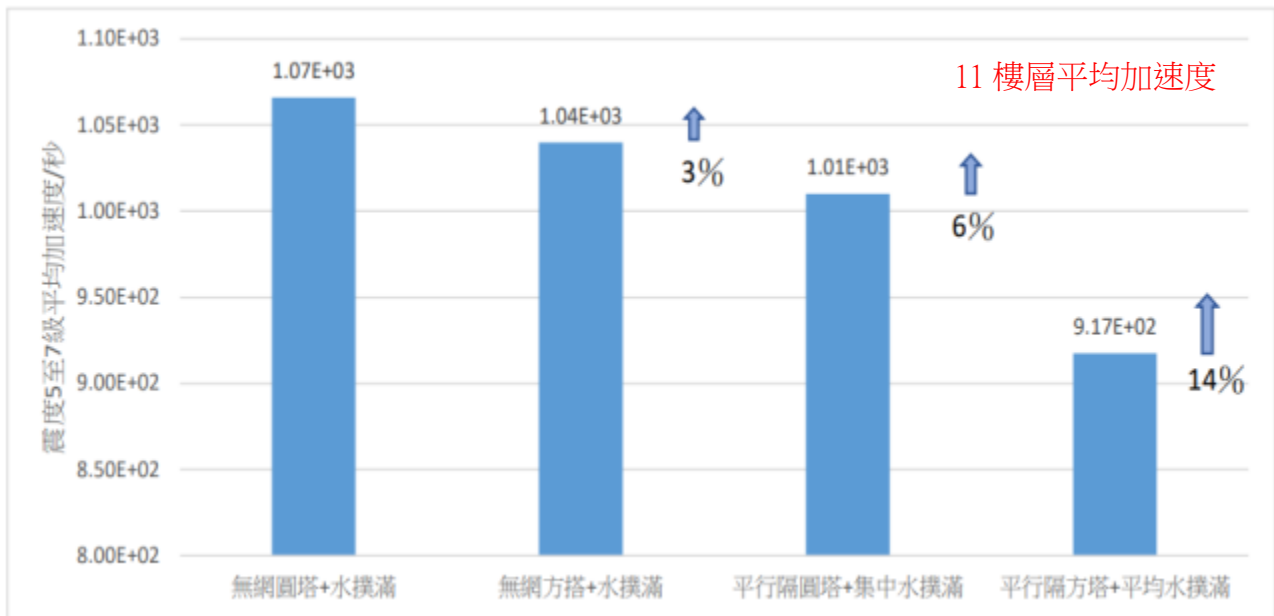


圖 44 有無網狀隔間，震度 5 至 7 級平均加速與雙阻尼系統效能差異關係圖

1. 從圖 44，無網狀隔間正圓形水塔雙阻尼消能系統，阻尼效能最差；平行器壁網狀隔間正方形水塔配合平均排法水撲滿雙阻尼消能系統，阻尼效能提升 14%。

(五) 觀察與討論：

1. 由以上圖 41、42，觀察發現有無加裝網狀隔間都是正方形水塔阻尼效能較好。為何會有如此現象？**推論**：當大樓建築物受模擬震度五級震波時，建築物本身會產生自主螺旋迴轉大樓共振，此時正圓形水塔容器內會產生螺旋波動現象，反觀正方形水塔容器有直角器壁沒有螺旋波動現象，直角器壁能有效破壞地震波引起大樓自主扭轉共振，因此正方形水塔的阻尼效能較佳。圖 45

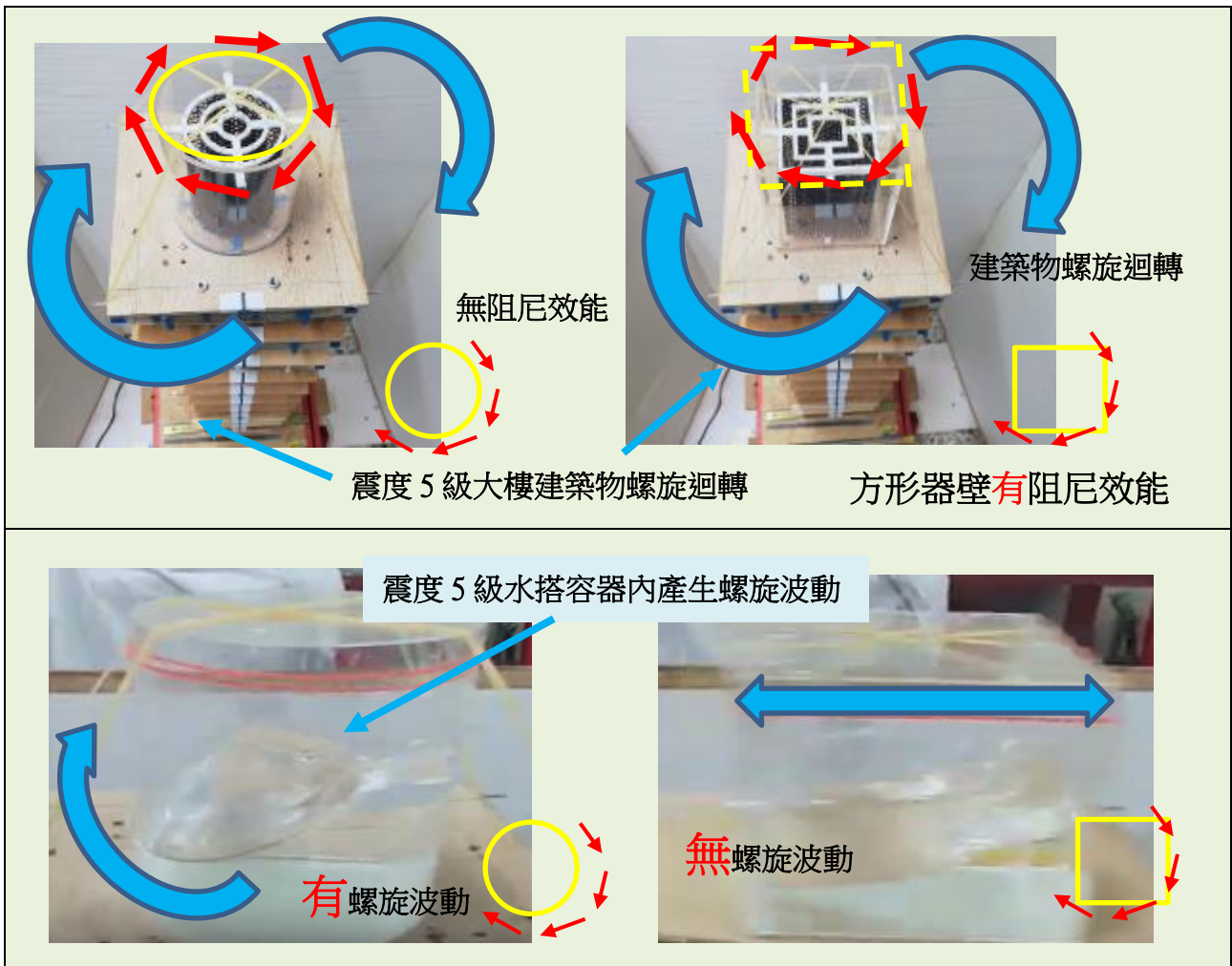


圖 45 正方形水塔正方形網狀隔間阻尼效能解說圖

2. 由圖 43 無網狀隔間正方形水塔配合水撲滿，受震波影響最大共振點在模擬震度 5 級(平均速度 $1.07E+03$)，阻尼效能比無網狀隔間正圓形水塔雙阻尼消能系統佳；模擬震度 5 至 7 級，平行器壁正方形水塔配合平均排法水撲滿雙阻尼消能系統阻尼效能較佳。因此**本組建議**：無網狀隔間正方形水塔雙阻尼消能系統，可以預防震度 1 至 7 級大樓阻尼器使用；針對預防震度較高之振波，大樓可以採用有網狀隔間正方形水塔雙阻尼消能系統

設計，預防震度 5 至 7 級之震波對大樓結構破壞。

3. 由以上圖 43，震度四級之震波對大樓結構破壞性是較小，因此本組針對預防震度 5 至 7 級阻尼效能進行分析數據差異比較，整理如下表：

表 7 不同水塔形狀，有無加裝網狀隔間雙阻尼消能系統效能差異表

雙 阻 尼 消 能 系 統	正圓形水塔效能	正方形水塔效能
無網狀隔間正圓形水塔 + 無網狀隔間水撲滿 V_S 無網狀隔間正方形水塔 + 無網狀隔間水撲滿	阻尼效能差	提升 3%
有網狀隔間正圓形水塔 + 集中排法水撲滿 V_S 有網狀隔間正方形水塔 + 平均排法水撲滿	阻尼效能差	提升 9%
有網狀隔間正方形水塔 + 平均排法水撲滿 V_S 無網狀隔間正圓形水塔 + 無網狀隔間水撲滿	阻尼效能差	提升 14%

陸、結論

綜合以上實驗，本組得到以下之結論：

- 一、不同層樓震盪實驗：同一級震度不同層樓高度，樓層越高震盪越大。11 層大樓建築物當模擬震度 7 級，第六層樓為建築物中心點震盪最小。
- 二、單一阻尼水撲滿實驗：11 層大樓設置水撲滿可安裝最高樓層處，震度小安裝單一組水撲滿，震度大安裝三組水撲滿阻尼效能較佳。水撲滿容器內加裝網狀隔間可以提升阻尼效能。
- 三、單一阻尼水塔實驗：11 層大樓在小震度，水塔容器內設定低水位量大樓震盪較小；對震度較大地震，容器內水位量設定六分滿以上並加裝平行器壁網狀隔間阻尼效能較佳。
- 四、網狀隔間實驗：水撲滿加裝網狀隔間以平均、集中排法阻尼效能較佳；水塔加裝網狀隔間以平行水塔器壁設置阻尼效能較佳。
- 五、大樓共振實驗：11 層大樓與地震波產生最大共振時，大樓結構會有螺旋迴轉的現象，正正方形水塔因有直角器壁，可以破壞大樓結構自主扭轉共振，液體阻尼效能較佳。
- 六、單一阻尼與雙阻尼實驗：11 層大樓設置水撲滿或水塔單一阻尼消能元件，會在模擬震

度 5 級與大樓產生共振阻尼效能較差；水撲滿配合水塔雙阻尼消能系統，可讓震波對大樓產生最大共振點，提前在模擬震度 4 級震波與大樓產生共振，減少震波對大樓結構破壞液體阻尼效能較佳。

七、**單一阻尼與雙阻尼效能實驗**：單一阻尼消能元件液體阻尼效能較差，雙阻尼消能系統無網狀隔間效能可以提升 51%至 56%，有網狀隔間效能可以提升 39%至 58%。

八、**不同形狀水塔實驗**：當地震波與 11 層大樓產生最大共振時，正方形水塔有直角器壁與網狀隔間，大樓結構扭轉共振較小，配合距離較短平均排法網狀隔間水撲滿，其容器內水波擾動越明顯阻尼效能越佳，並可以破壞模擬震度 5 至 7 級震波對大樓產生的，順向震波大樓共振與大樓結構本身扭轉共振，液體阻尼效能最佳。

九、**雙阻尼最佳設置實驗**：若要以水塔配合水撲滿雙阻尼消能系統，來當 11 層大樓阻尼器，三組平均排法網狀隔間水撲滿，設置安裝建物最頂樓陽台天花板，並配合平行正方形網狀隔間水塔阻尼效能最好；若要以平行正圓形網狀隔間水塔來當阻尼器，可以配合集中排法網狀隔間水撲滿阻尼效能較佳。

柒、參考資料

一、中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 高職組 土木科 不動如山-滑缸型抗震設備

二、中華民國第 53 屆中小學科學展覽會 國中組 地球科學科 "城市殺手"直下型地震

三、地震震度分級表取自 中央氣象局全球資訊網 <http://www.cwb.gov.tw>

四、科技大觀園 水波物語 2002/12/18 盛博納 | 自由撰稿人 <https://scitechvista.nat.gov.tw>

五、中華民國第 56 屆中小學科學展覽會 國小組 物理學科 水塔超人震得住-液體阻尼器的防震研究。

六、中華民國第 57 屆中小學科學展覽會 國中組 地球科學科 震震有聲水峰鳴--探討利用水波當成地震警報器之可行性。

七、中華民國第 59 屆中小學科學展覽會 高中組 地球與行星科學科 「阻」擋地震「尼」我都可以

【評語】 100018

本作品以模型模擬 11 層大樓建築物，並設計雙阻尼消能系統，並提升減震阻尼效能達 58%。本作品考慮到諸多細節，值得鼓勵。在實驗設計與測試上皆能有效驗證雙阻尼減能成效，唯亦應以物理模型說明建築物本體重量與阻尼系統搭配之關聯性。除了建立測試模型外，作者也進行文獻搜尋，如下列文獻 Tuned Liquid Damper (TLD) for tall buildings, <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-016-2188-1> 等。作者應可強調其作品與發表文獻的差異與相似之處。