中華民國第 55 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

030505

扭一扭，地震滾出去!

學校名稱：新北市立自強國民中學

作者：	指導老師：
國一 王均倍 國二 戴宸洋	王碧玉

關鍵詞：地震、防震措施、建物結構

摘要

由 14 種建物模型在不同條件下晃動情形與倒塌時間實驗得知：

SS1 倒塌率約 21%及倒塌時間平均 55 秒，垂直 RC1、水平 RC1 和垂直 RC5 樓層愈高倒塌率愈大且倒塌時間愈短。SS 模型加防震貼片或用滑軌皆可延長倒塌時間並降低倒塌率，SS、垂直 RC 和水平 RC 三類模型加裝滾動鋼珠都能藉由滾動消耗地震能量，明顯降低倒塌率，且加裝滾動鋼珠適用於易發生低頻地震的臺灣北部 SS 和 RC 建物與易發生高頻地震的臺灣東部 RC 建物。各種模型多是振幅愈大倒塌率愈大，但某些模型在特定頻率最容易倒塌。SS 本體具韌性，藉扭轉與搖擺消化地震能量，再加入滾動鋼珠，都可以消耗水平震動與上下震動的地震能量以大幅降低倒塌率，並延長倒塌時間，是本次研究認為最有效的制震方式。

壹、研究動機

國小畢業旅行時我們參觀臺中市霧峰區的 921 地震教育園區，看見板塊推擠作用將學校的操場和跑道抬高了 2.5 公尺，旁邊的三樓校舍也因此倒塌，場面怵目驚心，讓我們見識到地震的強大威力。進入國中後，學到臺灣位於板塊交界帶，因此多地震，危及居民的生命安全(翰林版社會 1 上 6-2 臺灣的環境問題與災害)，我們決定研究怎樣的地震對建物的破壞最為嚴重？以及常聽到的建物防震措施是否真的能夠達到防震的效果？希望藉由此次的研究，讓我們對地震和建物間的關係有更深入的了解。

貳、研究目的

一、探討不同振幅之地震對建物倒塌情形的影響。

二、探討不同頻率之地震對建物倒塌情形的影響。

三、探討地震對不同建物結構的影響。

四、探討地震對加裝防震貼片之建物的影響。

五、探討地震對加裝滑軌之建物的影響。

六、探討地震對加裝滾動鋼珠之建物的影響。

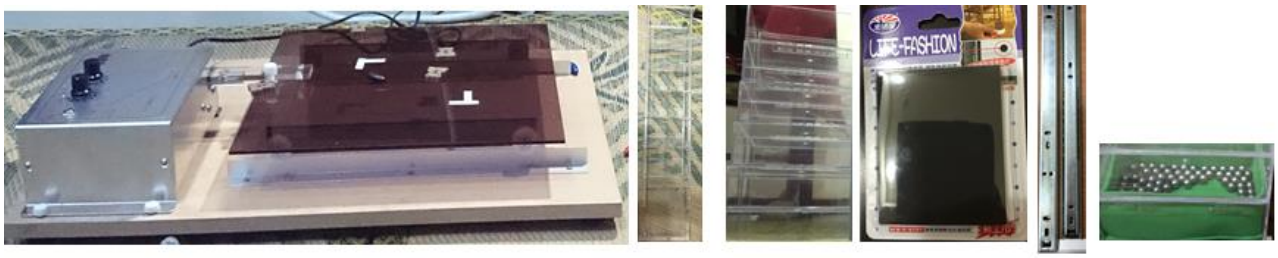
七、探討不同震動方向的地震對建物倒塌情形的影響。

參、研究設備及器材

一、地震模擬平台 1 台、SS 建物模型（類鋼骨結構建物，8cm x 8cm x 30cm）1 座、RC 建物模型（類鋼筋混凝土建物，12.5cm x8.5cm x4cm）12 個（下圖一）。

二、防震貼片（9cm x 11cm）2 片、鋼珠滑軌（330mm）2 組、鋼珠（直徑 8mm）81 顆。

三、碼表 2 只、小熊擦布 6 個、彩虹筆 1 支、家具墊（1.7cm x 1.7cm）1 包、剪刀 1 把、泡棉（21cm x 30cm）1 片、雙面膠 1 捲、保麗龍膠 1 瓶、泡棉膠 1 捲、透明膠帶 1 捲、硬紙板書盒 1 個、鞋帶繩一條。



圖一　研究設備及器材

（由左而右依序是地震模擬平台、SS、RC、防震貼片 、鋼珠滑軌、鋼珠）

肆、研究過程或方法

一、擬出實驗方針：

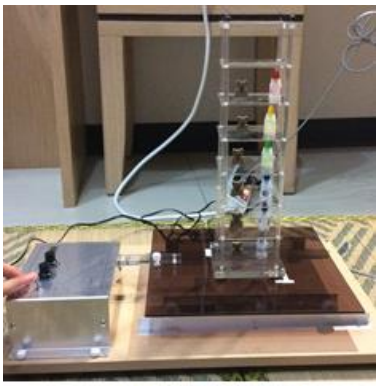
蒐集地震及防震方法等相關資料→與指導老師及組員討論→擬出實驗方針。

表(一)建物模型名稱定義：　震動方向為水平			
名稱	類SS建物模型	類RC建物模型(垂直放置)	類RC建物模型(水平放置)
未加裝防震措施	SS1	獨棟：垂直RC1、連棟：垂直RC5	水平RC1
加裝防震貼片	SS2	垂直RC2	水平RC2
加裝兩組滑軌	SS3		水平RC3
加裝滾動鋼珠	SS4	垂直RC4	水平RC4
震動方向為上下			
名稱	類SS建物模型	類RC建物模型(垂直放置)	類RC建物模型(水平放置)
未加裝防震措施	SS6		水平RC6

二、研究過程：

（一）地震對「SS1」的實驗：

觀測並記錄 SS1（右圖二）不同層樓數（1 層、3 層、5 層、7 層）在不同振幅（10mm、20mm、30mm、40mm、50mm）及頻率（2Hz、4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物、人（以小熊擦布表示）、家具（以 1 節彩虹筆表示）的晃動情形與倒塌時間。



圖二 SS1建物模型

1.插上地震模擬器的插頭，打開電源。

2.先確認承載建物的板子是否在軌道上，再將建物放置於板子的中央（對齊格線），各樓層放置 1 個小熊擦布和 1 節彩虹筆。

3.調整該次實驗之頻率（最小刻度：1Hz）及振幅（最小刻度：10mm）。

4.開啟地震模擬器開關，觀察建物和小熊擦布、彩虹筆晃動情形且以碼表（最小刻度：0.01 秒）測量倒塌時間，紀錄與錄影。

5.建物倒塌後約等待 1 秒停止錄影，若建物持續 120 秒時仍未倒塌，則觀測與錄影時間皆為 120 秒。

6.停止錄影後，關閉地震模擬器開關，並重新確認板子在軌道上，再將建物和小熊擦布、彩虹筆放回原位。重複實驗步驟 2~5。

7.相同層樓數、相同頻率、相同振幅的實驗進行三次，但前兩次皆維持靜力平衡時則只進行兩次實驗。

（二）地震對「垂直 RC1」的實驗：

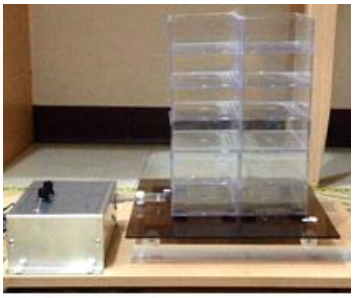
觀測並記錄垂直 RC1（右圖三）不同層樓數（2 層、4 層、6 層、8 層、10 層、12 層）在不同振幅（30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.，但不放置小熊擦布、彩虹筆。



圖三 垂直RC1

（三）地震對「垂直 RC5」的實驗：

觀測並記錄垂直 RC5（右圖四）不同層樓數（2 層、4 層、6 層）在不同振幅（30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.，但不放置小熊擦布、彩虹筆。（請參考附件一圖 11～13）



圖四 垂直RC5

（四）地震對「水平 RC1」的實驗：

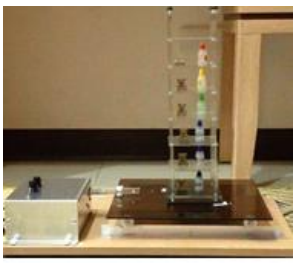
觀測並記錄水平 RC1（右圖五）不同層樓數（2 層、4 層、6 層、8 層、10 層、12 層）在不同振幅（30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.，但不放置小熊擦布、彩虹筆。



圖五 水平RC1

（五）地震對「SS2」的實驗：

觀測並記錄 SS2（右圖六）7 層樓在不同振幅（10mm、20mm、30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物和小熊擦布、彩虹筆的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.。



圖六 SS2

（六）地震對「垂直 RC2」的實驗：

觀測並記錄垂直 RC2（右圖七）8 層樓在不同振幅（30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.，但不放置小熊擦布、彩虹筆。（請參考附件一圖 21）



圖七 垂直RC2

（七）地震對「水平 RC2」的實驗：

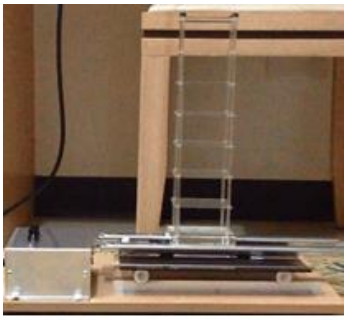
觀測並記錄水平 RC2（右圖八）8 層樓在不同振幅（30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.，但不放置小熊擦布、彩虹筆。



圖八 水平RC2

（八）地震對「SS3」的實驗：

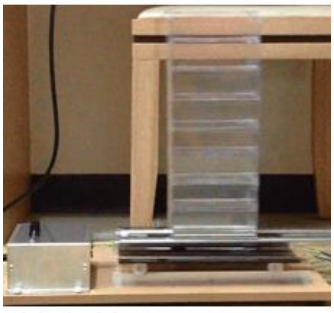
觀測並記錄 SS3（右圖九）7 層樓在不同振幅（10mm、20mm、30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.，但不放置小熊擦布、彩虹筆。



圖九 SS3

（九）地震對「水平 RC3」的實驗：

觀測並記錄水平 RC3（右圖十）8 層樓在不同振幅（30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.，但不放置小熊擦布、彩虹筆。



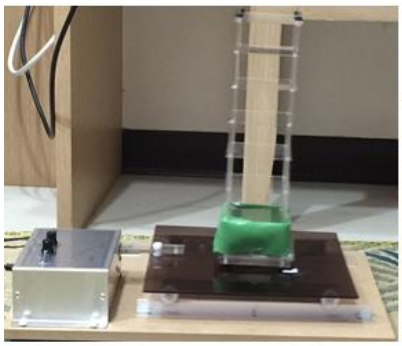
圖十 水平RC3

（十）地震對「SS4」的實驗：

觀測並記錄 SS4（下圖十一）7 層樓在不同振幅（10mm、20mm、30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.，但不放置小熊擦布、彩虹筆。

（十一）地震對「垂直 RC4」的實驗：

觀測並記錄垂直 RC4（下圖十二）8 層樓在不同振幅（30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.，但不放置小熊擦布、彩虹筆。



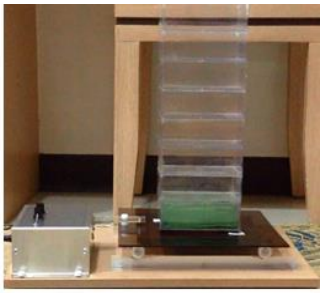
圖十一 SS4側面圖及俯視圖

（十二）地震對「水平 RC4」的實驗：

觀測並記錄水平 RC4（右圖十三）8 層樓在不同振幅（30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.，但不放置小熊擦布、彩虹筆。



圖十二 垂直RC4

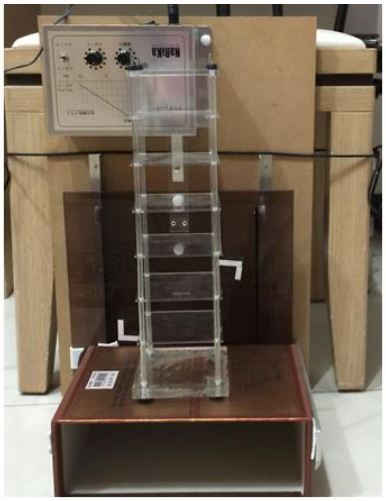


圖十三 水平RC4

（十三）將地震模擬器原設計為水平方向震動，改裝成可垂直方向震動的儀器。（下圖十四）



圖十四地震模擬平台
震動方向為垂直



圖十五 SS6



圖十六 水平RC6

（十四）地震對「SS6」的實驗：

觀測並記錄垂直 SS6（上圖十五）7 層樓在不同振幅（30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.，但不放置小熊擦布、彩虹筆。

（十五）地震對「水平 RC4」的實驗：

觀測並記錄水平 RC6（上圖十六）8 層樓在不同振幅（30mm、40mm、50mm）及頻率（4Hz、6Hz、8Hz、10Hz）震動下，建物的晃動情形與倒塌時間。重複（一）的 1.～7.，但不放置小熊擦布、彩虹筆。

伍、研究結果

一、SS1 的 1、3、5、7 層樓於不同振幅與頻率下的倒塌時間：下表(二)~(五)

表(二) SS1的1層樓

振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
10	2	2	0	>120
10	4	2	0	>120
10	6	3	0	>120
10	8	3	0	>120
10	10	3	0	>120
20	2	2	0	>120
20	4	3	0	>120
20	6	3	1	108.36
20	8	3	0	>120
20	10	3	1	64.6
30	2	2	0	>120
30	4	3	0	>120
30	6	3	1	46.35
30	8	3	0	>120
30	10	3	0	>120
40	2	2	0	>120
40	4	3	0	>120
40	6	3	0	>120
40	8	3	0	>120
40	10	3	1	45
50	2	2	0	>120
50	4	3	0	>120
50	6	3	1	66.06
50	8	3	0	>120
50	10	3	0	>120
	小計	**69**	**5**	**平均66.07**

表(三) SS1的3層樓

振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
10	2	2	0	>120
10	4	2	0	>120
10	6	3	1	80.09
10	8	3	1	85.34
10	10	3	0	>120
20	2	2	0	>120
20	4	3	0	>120
20	6	3	1	12.61
20	8	3	0	>120
20	10	3	0	>120
30	2	2	0	>120
30	4	3	0	>120
30	6	3	2	61.26
30	8	3	0	>120
30	10	3	0	>120
40	2	2	0	>120
40	4	3	0	>120
40	6	3	2	60.19
40	8	3	0	>120
40	10	3	2	45.65
50	2	2	0	>120
50	4	3	0	>120
50	6	3	2	120
50	8	3	0	>120
50	10	3	0	>120
小計	**69**	**11**	**平均68.44**	

（一）1 層樓：

1.建物：倒塌率 6.67%，20mm6Hz 和 10Hz、30mm6Hz、40mm10Hz、50mm6Hz，有 33.33%的機率倒塌；倒塌時間皆≧45 秒，平均 66.07 秒；其他振幅和頻率皆沒有倒塌。

2.人：頻率愈高倒塌機率愈大，振幅愈高倒塌機率愈大；倒塌時間平均 2.76 秒。

3.家具：≧6Hz 有 100%機率倒塌，振幅愈高倒塌率愈大；倒塌時間平均 15.03 秒。

（二）3 層樓

1.建物：倒塌率 14.67%；30mm6Hz、40mm6Hz、40mm10Hz、50mm6Hz，有 66.67%機率倒塌，10mm6Hz、10mm8Hz、20mm6Hz，有 33%機率倒塌；倒塌時間平均 68.4 秒；其他振幅和頻率皆沒有倒塌。

2.人：≧6Hz 有 100%機率會倒塌，振幅愈高倒塌機率愈大；倒塌時間平均 8.9 秒。

3.家具：≧6Hz 有>95%機率會倒塌，振幅愈高倒塌機率愈大；倒塌時間平均 16.4 秒。

表(四)SS1的5層樓					表(五)SS1的7層樓				
振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
10	2	2	0	>120	10	2	2	0	>120
10	4	3	0	>120	10	4	3	0	>120
10	6	3	0	>120	10	6	3	1	20.29
10	8	3	1	13.41	10	8	3	0	>120
10	10	3	0	>120	10	10	3	1	63.7
20	2	2	0	>120	20	2	2	0	>120
20	4	3	0	>120	20	4	3	1	39.2
20	6	3	3	77.13	20	6	3	1	58.31
20	8	3	3	77.13	20	8	3	1	67.17
20	10	3	0	>120	20	10	3	2	36.18
30	2	2	0	>120	30	2	2	0	>120
30	4	3	0	>120	30	4	3	2	6.97
30	6	3	0	>120	30	6	3	3	46.88
30	8	3	0	>120	30	8	3	2	47.83
30	10	3	0	>120	30	10	3	1	27.85
40	2	2	0	>120	40	2	2	0	>120
40	4	3	0	>120	40	4	3	2	1.2
40	6	3	1	73.59	40	6	3	1	13.76
40	8	3	3	35.87	40	8	3	2	45.46
40	10	3	1	28.32	40	10	3	2	64.65
50	2	3	0	>120	50	2	3	0	>120
50	4	3	2	55.75	50	4	3	2	1.82
50	6	3	1	46.47	50	6	3	1	29.02
50	8	3	3	33.26	50	8	3	1	101.88
50	10	3	3	26.3	50	10	3	1	96.85
	小計	**71**	**21**	**平均47.22**		**小計**	**71**	**27**	**平均39.51**
					總計		**280**	**64**	**平均49.09**

（三）5 層樓

1.建物：倒塌率 28.0%；20mm6Hz 和 8Hz、40mm8Hz、50mm8Hz 和 10Hz，有 100%機率倒塌，50mm4Hz，有 67%機率倒塌，10mm8Hz、40mm6Hz 和 10Hz、50mm6Hz，有 33.33%機率倒塌；倒塌時間平均為 47.22 秒；其他振幅和頻率皆沒有倒塌。

2.人：≧6Hz 有>90%機率會倒塌，振幅愈高倒塌機率愈大；倒塌時間平均 6.87 秒。

3.家具：≧6Hz 有>85%機率會倒塌，振幅愈高倒塌機率愈大；倒塌時間平均 12.88 秒。

（四）7 層樓

1.建物：倒塌率 36.0%；30mm6Hz 有 100%機率倒塌，20mm10Hz、30mm4Hz 和 8Hz、40mm4Hz、8Hz 及 10Hz、50mm4Hz，有 66.67%機率倒塌，10mm6Hz 和 10Hz、20mm4Hz、6Hz 及 8Hz、30mm10Hz、40mm6Hz、50mm6Hz、8Hz 及 10Hz，有 33.33%機率倒塌；倒塌時間平均 39.81 秒；其他振幅和頻率皆沒有倒塌。

2.人：頻率愈大倒塌機率愈大，振幅愈大倒塌機率愈大；倒塌時間平均 3.39 秒。

3.家具：≧6Hz 有 100%機率會倒塌，振幅愈高倒塌機率愈大；倒塌時間平均 6.53 秒。

（五）SS1 綜合分析：

1.建物：倒塌率 21.33%；任一振幅且≧6Hz 皆有倒塌機會；倒塌時間大多在 40~70 秒間，平均約 55 秒。

2.人：≧6Hz 有 95%機率會倒塌，振幅愈高倒塌機率愈大；倒塌時間大多在 10 秒內，平均約 5 秒。

3.家具：≧6Hz 有 95%機率會倒塌，振幅愈高倒塌機率愈大；倒塌時間大多在 15 秒內，平均約 13 秒。

二、垂直 RC1 的 2、4、6、8、10、12 層樓於不同振幅與頻率下的倒塌時間：下表(六)~(十一)

（一）2 層樓倒塌率 30.56%，在 10Hz 時與 40mm 兩種情形下皆有>50%機率會倒塌；倒塌時間平均為 57.29 秒。

（二）4 層樓倒塌率 69.44%，在≧30mm 任一振幅且≧6Hz 皆有>50%機率會倒塌；倒塌時間平均 39.51 秒。

（三）6 層樓倒塌率 22.22%，僅在 4Hz 時有>85%機率會倒塌；倒塌時間平均 0.71 秒。

（四）8 層樓倒塌率 83.33%，在≧30mm 任一振幅與≧4Hz 任一頻率下皆有>50%機率會倒塌；倒塌時間平均為 38.32 秒。

（五）10 層樓：≧4Hz 與≧30mm 下有 100%機率會倒塌；倒塌時間平均 15.14 秒。

（六）12 層樓：≧4Hz 與≧30mm 下有 100%機率會倒塌；倒塌時間平均 12.44 秒。

（七）垂直 RC1 倒塌率 67.59%，除 6 層樓外，樓層愈高倒塌機率愈大（從 30%到 100%）且建物倒塌所需時間愈短（從 57 秒到 12 秒）。且在≧30mm 任一振幅與≧4Hz

任一頻率下皆有>60%機率會倒塌；倒塌時間大多在 1 分鐘內，平均約 27.24 秒。

表(六)垂直RC1的2層樓

振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
30	4	2	0	>120
30	6	3	0	>120
30	8	3	1	60.29
30	10	3	0	>120
40	4	2	0	>120
40	6	3	2	70.39
40	8	3	1	43.2
40	10	3	3	54.24
50	4	3	0	>120
50	6	3	0	>120
50	8	3	2	58.75
50	10	3	2	52.84
	小計	**34**	**11**	**平均57.29**

表(七)垂直RC1的4層樓

振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
30	4	2	0	>120
30	6	3	3	14.5
30	8	3	3	27.83
30	10	3	3	44.33
40	4	2	0	>120
40	6	3	3	42.04
40	8	3	3	27.26
40	10	3	3	33.2
50	4	3	0	>120
50	6	3	3	36.98
50	8	3	1	87.7
50	10	3	3	73.91
	小計	**34**	**25**	**平均39.51**

表(八) 垂直RC1的6層樓

振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
20	4	2	0	>120
30	4	3	2	1.1
30	6	3	0	>120
30	8	3	0	>120
30	10	3	0	>120
40	4	3	3	0.66
40	6	3	0	>120
40	8	3	0	>120
40	10	3	0	>120
50	2	1	0	>120
50	4	3	3	0.55
50	6	3	0	>120
50	8	3	0	>120
50	10	3	0	>120
	小計	**39**	**8**	**平均0.73**

表(九)垂直RC1的8層樓

振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
30	4	3	3	4.22
30	6	3	3	12.16
30	8	3	3	91.52
30	10	3	3	75.35
40	4	3	3	1.29
40	6	3	3	23.5
40	8	3	1	73.11
40	10	3	0	>120
50	4	3	3	1.48
50	6	3	3	30.36
50	8	3	3	70.24
50	10	3	2	57.18
	小計	**36**	**30**	**平均38.32**

表(十)垂直RC1的10層樓

振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
30	4	3	3	4.56
30	6	3	3	11.7
30	8	3	3	16.09
30	10	3	3	30.88
40	4	3	3	1.37
40	6	3	3	4.35
40	8	3	3	23.48
40	10	3	3	21.79
50	4	3	3	2.01
50	6	3	3	4.33
50	8	3	3	33.66
50	10	3	3	27.42
	小計	**36**	**36**	**平均15.14**

表(十一)垂直RC1的12層樓

振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
30	4	3	3	2.29
30	6	3	3	6.59
30	8	3	3	16.64
30	10	3	3	24.43
40	4	3	3	1.08
40	6	3	3	10.95
40	8	3	3	18.09
40	10	3	3	20.67
50	4	3	3	1.08
50	6	3	3	21.01
50	8	3	3	16.14
50	10	3	3	16.32
	小計	**36**	**36**	**平均12.94**
	總計	**215**	**126**	**平均25.92**

三、垂直 RC5 的 2、4、6 層樓於不同振幅與頻率下的倒塌時間：下表(十二)~(十四)

（一）2 層樓倒塌率 41.67%，在≧6Hz 與 40mm>50%機率倒塌；倒塌時間平均 83.34 秒。

（二）4 層樓倒塌率 25.0%，在 50mm 與 10Hz≧50%機率倒塌；倒塌時間平均 56.18 秒。

（三）6 層樓倒塌率 58.33%，在≧30mm 任一振幅與≧6Hz 任一頻率下皆有≧50%機率會倒塌；倒塌時間平均 26.71 秒；。

（四）垂直 RC5 倒塌率 41.67%，倒塌時間平均 55.41 秒；以 6 層樓倒塌機率最大且建物樓層愈高倒塌所需時間愈短（從 83 秒到 27 秒）。僅在 10Hz 時>60%機率倒塌。

表(十二)垂直RC5的2層樓					表(十三)垂直RC5的4層樓					表(十四) 垂直RC5的6層樓				
振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
30	4	2	0	>120	30	4	2	0	>120	30	4	2	0	>120
30	6	3	1	78.88	30	6	3	0	>120	30	6	3	3	12.55
30	8	3	2	98.34	30	8	3	0	>120	30	8	3	1	37.19
30	10	3	1	92.51	30	10	3	1	96.6	30	10	3	2	22.93
40	4	2	0	>120	40	4	2	0	>120	40	4	3	0	>120
40	6	3	2	63.01	40	6	3	0	>120	40	6	3	3	11.11
40	8	3	2	86.98	40	8	3	0	>120	40	8	3	3	41.49
40	10	3	2	70.74	40	10	3	2	73.64	40	10	3	3	48.35
50	4	2	0	>120	50	4	2	0	>120	50	4	3	0	>120
50	6	3	2	109.32	50	6	3	2	62.92	50	6	3	3	5.93
50	8	3	1	112.63	50	8	3	1	29.79	50	8	3	1	62.63
50	10	3	2	47.75	50	10	3	3	73.91	50	10	3	2	41.76
	小計	**33**	**15**	**平均83.34**		**小計**	**33**	**9**	**平均56.18**		**小計**	**35**	**21**	**平均27.98**
										總計		**101**	**45**	**平均52.07**

四、水平 RC1 的 2、4、6、8、10、12 層樓於不同振幅與頻率下的倒塌時間：下表(十五)~(二十)

（一）2 層樓倒塌率 36.11%，在 6Hz 時高達 89%的機率會倒塌；倒塌時間平均 52.71 秒。

（二）4 層樓倒塌率 66.67%，振幅愈高倒塌機率愈大，頻率愈高倒塌機率也愈大；倒塌時間平均 52.62 秒。

（三）6 層樓倒塌率 36.11%，僅在 6Hz 時有 100%機率會倒塌；倒塌時間平均 30.53 秒。

（四）8 層樓倒塌率 77.78%，在≧30mm 任一振幅與≧4Hz 任一頻率下皆有>50%機率會倒塌；平均約 25.04 秒。

（五）10 層樓：≧4Hz 與≧30mm 下有 100%機率會倒塌；倒塌時間平均為 28.69 秒。

（六）12 層樓：≧4Hz 與≧30mm 下有 100%機率會倒塌；倒塌時間平均為 12.25 秒。

（七）水平 RC1 除 6 層樓外，樓層愈高倒塌機率愈大(從 36%到 100%)且建物倒塌所需時間愈短（從 57 秒到 12 秒）。且在≧30mm 任一振幅與≧4Hz 任一頻率下皆有>60%機率會倒塌；倒塌時間大多在 1 分鐘內，平均約 33.64 秒。

表(十五)水平RC1的2層樓					表(十六)水平RC1的4層樓					表(十七)水平RC1的6層樓				
振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
30	4	2	0	>120	30	4	2	0	>120	30	4	2	0	>120
30	6	3	3	27.32	30	6	3	0	>120	30	6	3	3	26.22
30	8	3	1	8.53	30	8	3	2	33.51	30	8	3	0	>120
30	10	3	1	66.41	30	10	3	3	62.72	30	10	3	0	>120
40	4	2	0	>120	40	4	3	0	>120	40	4	2	0	>120
40	6	3	2	70.7	40	6	3	2	82.38	40	6	3	3	17.71
40	8	3	1	64.45	40	8	3	3	50.85	40	8	3	2	13.18
40	10	3	0	>120	40	10	3	3	40.61	40	10	3	1	72.2
50	4	2	0	>120	50	4	3	3	87.08	50	4	3	0	>120
50	6	3	3	60.25	50	6	3	3	77.67	50	6	3	3	23.71
50	8	3	1	84.01	50	8	3	2	13.36	50	8	3	0	>120
50	10	3	1	57.73	50	10	3	3	15.87	50	10	3	1	95.45
	小計	**33**	**13**	**平均57.71**		**小計**	**35**	**24**	**平均52.62**		**小計**	**34**	**13**	**平均30.53**

表(十八)水平RC1的8層樓					表(十九)水平RC1的10層樓					表(二十)水平RC1的12層樓				
振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
30	4	3	0	>120	30	4	3	3	34.07	30	4	3	3	5.47
30	6	3	3	12.14	30	6	3	3	10.83	30	6	3	3	17.49
30	8	3	2	29.48	30	8	3	3	42.1	30	8	3	3	24.36
30	10	3	1	34.44	30	10	3	3	44.86	30	10	3	3	11.21
40	4	3	3	33.4	40	4	3	3	20.51	40	4	3	3	1.85
40	6	3	3	11.34	40	6	3	3	21.95	40	6	3	3	15.99
40	8	3	2	23.18	40	8	3	3	23.5	40	8	3	3	14.29
40	10	3	2	41.5	40	10	3	3	18.74	40	10	3	3	11.51
50	4	3	3	45.87	50	4	3	3	19.14	50	4	3	3	1.9
50	6	3	3	11.65	50	6	3	3	16.8	50	6	3	3	10.03
50	8	3	2	27.44	50	8	3	3	41.51	50	8	3	3	15.29
50	10	3	3	18.4	50	10	3	3	75.25	50	10	3	3	17.65
	小計	**36**	**27**	**平均25.04**		**小計**	**36**	**36**	**平均28.69**		**小計**	**36**	**36**	**平均12.25**
										總計		**210**	**149**	**平均30.17**

五、SS2 的 7 層樓於不同振幅與頻率下的建物倒塌時間：下表(二十一)

（一）建物：大約有 21.7%機率倒塌，以 4Hz 與 50mm 的倒塌機率最大約為 40%，且頻率愈高倒塌機率卻愈小；倒塌時間平均約 47 秒。

（二）人：高達 98.3%的機率倒塌，任一頻率與任一振幅的倒塌機率都>90%；倒塌時間大多在 10 秒內，平均約 3.49 秒。

（三）家具：高達 91.9%的機率倒塌，振幅愈高倒塌機率愈大，頻率愈高倒塌機率也愈大，≧6Hz 與≧30mm 都有>97%機率會倒塌；倒塌時間大多在 20 秒內，平均約 10.93 秒。

表(二十一)SS2的7層樓					表(二十二)垂直RC2的8層樓					表(二十三)水平RC2的8層樓				
振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
10	4	3	0	>120	30	4	3	3	17.94	30	4	3	0	>120
10	6	3	1	32.13	30	6	3	3	31.96	30	6	3	3	37.99
10	8	3	0	>120	30	8	3	3	27.57	30	8	3	3	21.24
10	10	3	0	>120	30	10	3	3	42.55	30	10	3	3	25.34
20	4	3	0	>120	40	4	3	3	1.18	40	4	3	2	3.12
20	6	3	0	>120	40	6	3	3	13.63	40	6	3	3	38.1
20	8	3	0	>120	40	8	3	3	41.3	40	8	3	3	64.24
20	10	3	0	>120	40	10	3	3	24.55	40	10	3	0	>120
30	4	3	1	2.01	50	4	3	3	1.21	50	4	3	3	1.41
30	6	3	1	50.98	50	6	3	3	13.92	50	6	3	3	17.06
30	8	3	2	59.6	50	8	3	3	49.63	50	8	3	2	35.32
30	10	3	0	>120	50	10	3	3	30.32	50	10	3	2	49.36
40	4	3	3	1.6		**總計**	**36**	**36**	**平均24.53**		**總計**	**36**	**27**	**平均29.32**
40	6	3	0	>120										
40	8	3	0	>120										
40	10	3	0	>120										
50	4	3	2	75.77										
50	6	3	2	66.01										
50	8	3	0	>120										
50	10	3	0	>120										
	總計	**60**	**12**	**平均41.06**										

六、垂直 RC2 的 8 層樓於不同振幅與頻率下的建物倒塌時間：上表(二十二)

垂直 RC2 在≧30mm 任一振幅與≧4Hz 任一頻率下皆 100%機率會倒塌；倒塌時間都在 50 秒內，平均約 24.65 秒。

七、水平 RC2 的 8 層樓於不同振幅與頻率下的建物倒塌時間：上表(二十三)

水平 RC2 大約有 75%機率倒塌，在≧30mm 任一振幅下有>66%機率會倒塌，≧4Hz 任一頻率下皆>50%機率會倒塌，其中 6Hz 時有 100%機率會倒塌；倒塌時間大多在 1 分鐘內，平均約 29.32 秒。

八、SS3 的 7 層樓於不同振幅與頻率下的建物倒塌時間：下表(二十四)

SS3 大約有 26.67%機率倒塌，在 4Hz 和 20mm 時都不會倒塌，但在 8Hz 時卻有 60%機率會倒塌；倒塌時間大多超過 1 分鐘，平均約 86.98 秒。

九、水平 RC3 的 8 層樓於不同振幅與頻率下的建物倒塌時間：下表(二十五)

水平 RC3 約有 88.89%機率倒塌，在≧30mm 任一振幅下有>75%機率會倒塌，≧4Hz 任一頻率下皆>50%機率會倒塌，且≧6Hz 和 50mm 時有 100%機率會倒塌；倒塌時間大多在 20 秒內，平均約 19.42 秒。

表(二十四)SS3的7層樓					表(二十五)水平RC3的8層樓				
振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
10	4	2	0	>120	30	4	2	0	>120
10	6	3	1	80.1	30	6	3	3	12.81
10	8	3	2	107.05	30	8	3	3	13.25
10	10	3	0	>120	30	10	3	3	14.92
20	4	2	0	>120	40	4	3	2	60.51
20	6	3	0	>120	40	6	3	3	15.33
20	8	3	0	>120	40	8	3	3	19.17
20	10	3	0	>120	40	10	3	3	18.99
30	4	2	0	2.01	50	4	3	3	25.85
30	6	3	1	73.41	50	6	3	3	11.26
30	8	3	2	81.23	50	8	3	3	16.48
30	10	3	1	105.03	50	10	3	3	18.71
40	4	2	0	>120		**總計**	**35**	**32**	**平均19.42**
40	6	3	1	71.83					
40	8	3	2	87.73					
40	10	3	1	109.38					
50	4	2	0	>120					
50	6	3	2	54.12					
50	8	3	3	97.22					
50	10	3	0	>120					
	總計	**55**	**16**	**平均86.98**					

十、SS4 的 7 層樓於不同振幅與頻率下的建物倒塌時間：下表(二十六)

SS4 僅在 20mm6Hz 時有一次倒塌，即 1.67%機率倒塌，倒塌時間 82.23 秒。其他振幅和頻率皆沒有倒塌。

十一、垂直 RC4 的 8 層樓於不同振幅與頻率下的建物倒塌時間：下表(二十七)

垂直 RC4 大約有 11.11%機率倒塌，以 4Hz 時機率最大（44%），其次在 50mm 時次之（25%），倒塌時間平均 14.19 秒。

十二、水平 RC4 的 8 層樓於不同振幅與頻率下的建物倒塌時間：下表(二十八)

水平 RC4 約有 30.56%機率倒塌，以 6Hz 時機率最大(100%)，倒塌時間平均 25.56 秒。

表(二十六)SS4的7層樓					表(二十七)垂直RC4的8層樓					表(二十八)水平RC4的8層樓				
振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
10	4	2	0	>120	30	4	3	1	26.79	30	4	2	0	>120
10	6	3	0	>120	30	6	3	0	>120	30	6	3	3	38.57
10	8	3	0	>120	30	8	3	0	>120	30	8	3	1	43.33
10	10	3	0	>120	30	10	3	0	>120	30	10	3	0	>120
20	4	2	0	>120	40	4	3	0	>120	40	4	2	0	>120
20	6	3	1	82.23	40	6	3	0	>120	40	6	3	3	12.36
20	8	3	0	>120	40	8	3	0	>120	40	8	3	0	>120
20	10	3	0	>120	40	10	3	0	>120	40	10	3	0	>120
30	4	3	0	>120	50	4	3	3	9.99	50	4	2	0	>120
30	6	3	0	>120	50	6	3	0	>120	50	6	3	3	10.77
30	8	3	0	>120	50	8	3	0	>120	50	8	3	1	52.71
30	10	3	0	>120	50	10	3	0	>120	50	10	3	0	>120
40	4	3	0	>120		**總計**	**36**	**4**	**平均14.19**		**總計**	**33**	**11**	**平均25.56**
40	6	3	0	>120										
40	8	3	0	>120										
40	10	3	0	>120										
50	4	2	0	>120										
50	6	3	0	>120										
50	8	3	0	>120										
50	10	3	0	>120										
	總計	**57**	**1**	**平均82.23**										

十三、SS6 的 7 層樓於不同振幅與頻率下的建物倒塌時間：下表(二十九)

SS6 大約有 25%機率倒塌，僅在 40mm4Hz 和 6Hz 倒塌率分別是 66.67%和 33.33%，且 50mm4Hz 和 6Hz 倒塌率 100%，其他狀態皆不會倒塌；倒塌時間平均約 47.01 秒。

表(二十九)SS6的7層樓					表(三十)水平RC6的8層樓				
振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)	振幅(mm)	頻率(Hz)	實驗次數	倒塌次數	平均倒塌時間(秒)
30	4	2	0	>120	30	4	2	0	>120
30	6	2	0	>120	30	6	3	3	5.64
30	8	2	0	>120	30	8	3	3	20.23
30	10	2	0	>120	30	10	3	3	34.56
40	4	3	2	61.71	40	4	3	2	1.91
40	6	3	1	102.66	40	6	3	3	22.77
40	8	2	0	>120	40	8	3	3	48.26
40	10	2	0	>120	40	10	3	2	2.95
50	4	3	3	13.7	50	4	3	3	35.33
50	6	3	3	51.96	50	6	3	3	4.69
50	8	2	0	>120	50	8	3	2	53.99
50	10	2	0	>120	50	10	3	3	53.31
	總計	**28**	**9**	**平均47.01**		**總計**	**35**	**30**	**平均26.42**

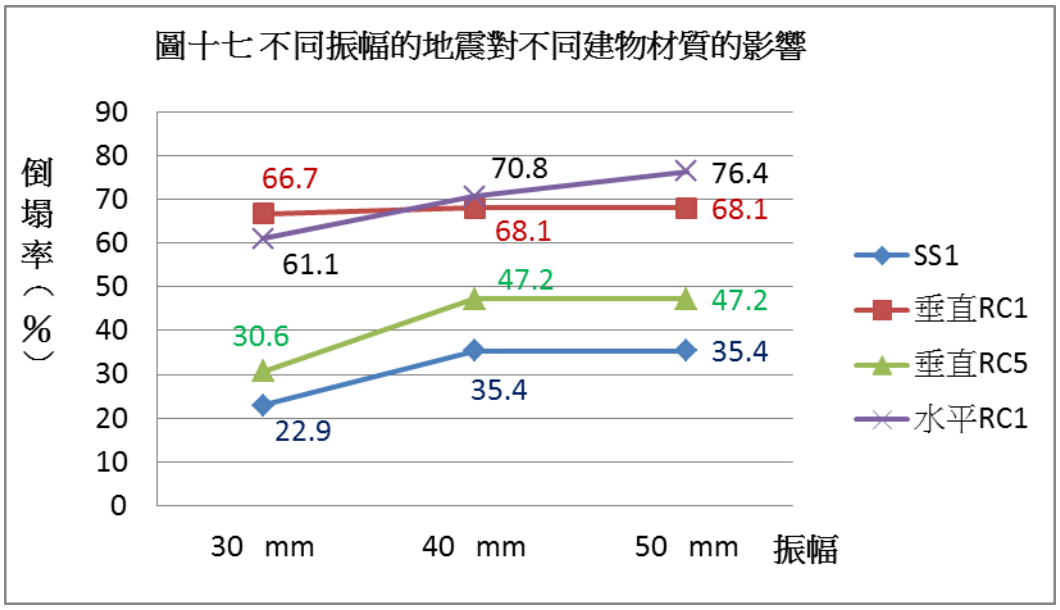
十四、水平 RC6 的 8 層樓於不同振幅與頻率下的建物倒塌時間：上表(三十)

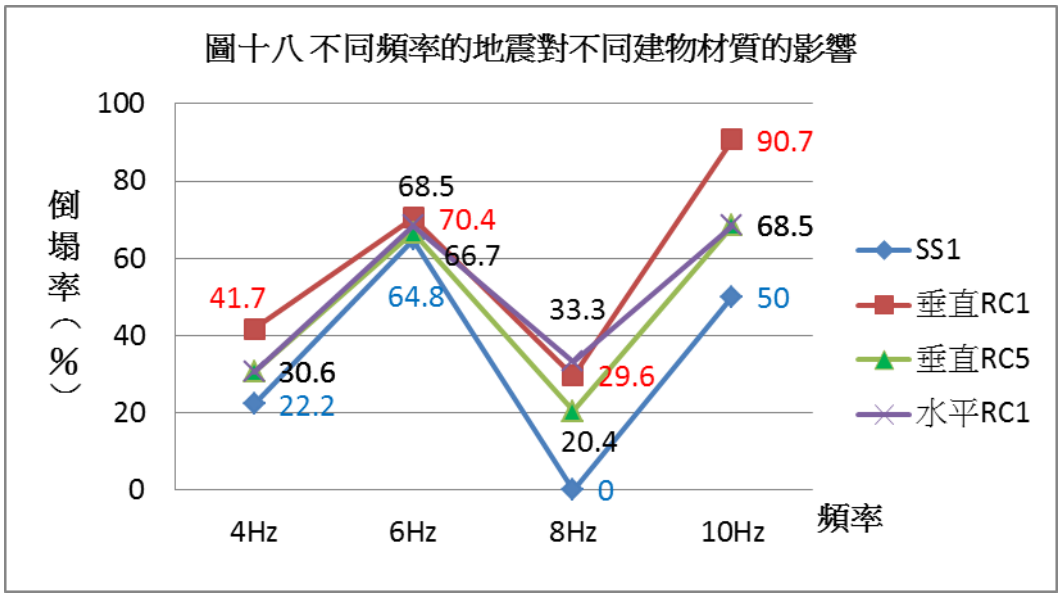
水平 RC6 約有 75%的機率倒塌，除 30mm4Hz 不會倒塌外，其他狀況皆會倒塌，以 6Hz 時機率最大(100%)，倒塌時間平均 26.42 秒。

【建物的晃動情形與倒塌時間完整記錄，請參考附件二表(一)~表(二十九)】

陸、討論

一、地震對不同建物材質 （SS1 相對於垂直 RC1、垂直 RC5、水平 RC1）的影響：





（一）SS1 有 31.3%機率倒塌，倒塌時間平均 55 秒。

（二）垂直 RC1 有 67.59%機率倒塌，倒塌時間平均 27.24 秒；垂直 RC5 有 41.7%機率倒塌，倒塌時間平均為 55.41 秒；水平 RC1 有 69.44%機率倒塌，倒塌時間平均 33.64 秒。

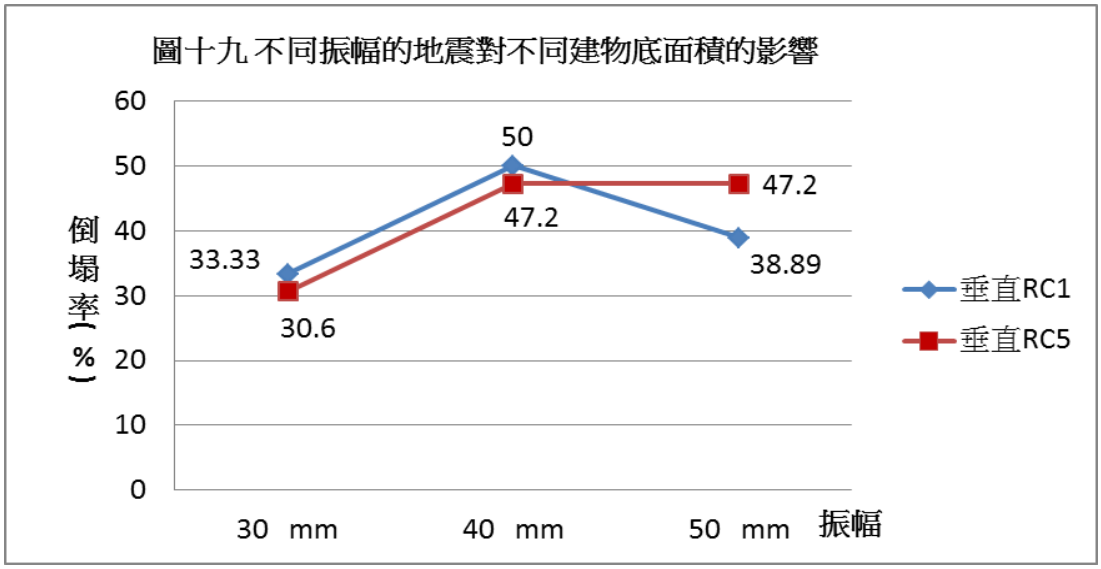
（三）可見 SS1 的建築結構較其他不易倒塌，在根據實驗觀察結果：

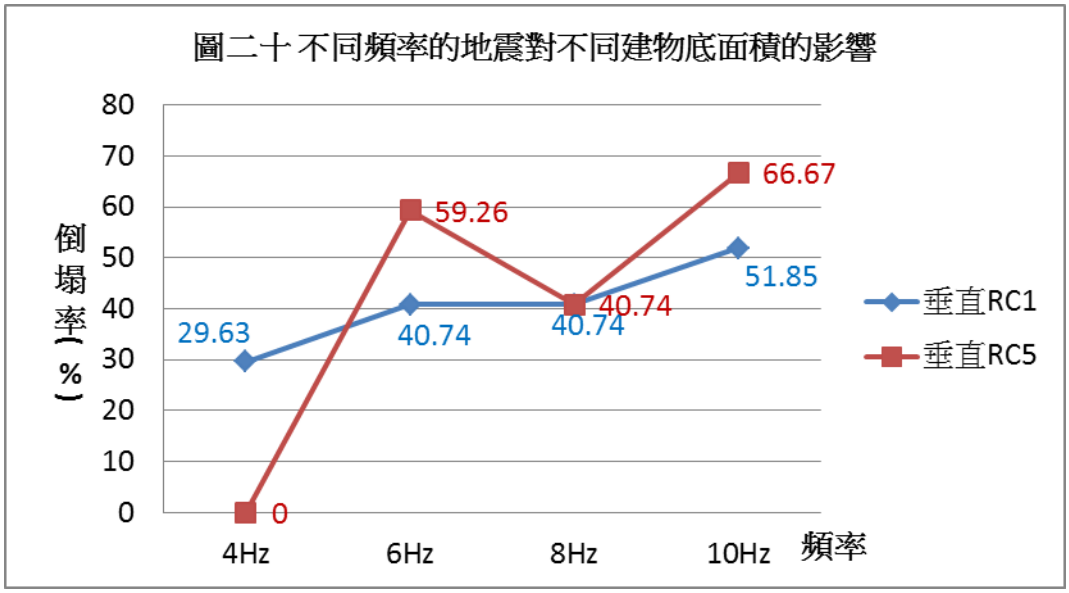
SS1 會有扭轉與搖擺的情形，垂直 RC1~四都不會。

（四）原因探討：判斷 SS1 建物本體具有韌性，地震時較不易破壞整體結構，藉由扭轉形變與搖擺的方式來消耗地震的能量，所以可以較不易倒塌或支撐較久的時間，如同 SS 建築（鋼構）或是 SRC 建築（鋼骨鋼筋水泥），利用鋼骨具有的軟性避震效果，削減地震搖晃力。

（五）不同地震對不同建物材質的影響：由圖十七和圖十八可看出，各種建物都是振幅愈大其倒塌率愈大；除垂直 RC1 外，其他建物在 6Hz 時的倒塌率最大。

二、地震對不同建物底面積（2、4、6 層樓垂直 RC1 相對於垂直 RC5）的影響：





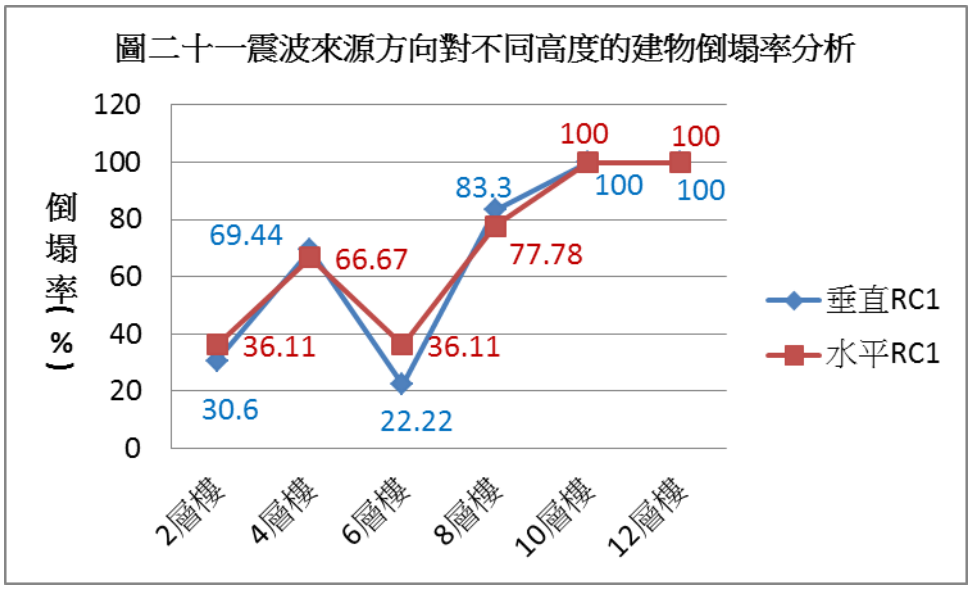
（一）垂直 RC1 有 40.74%機率倒塌，頻率愈高倒塌機率愈大；倒塌時間平均 32.5 秒，且樓層愈高倒塌時間愈短（從 57.29 秒→39.51 秒→0.71 秒），其中以 4 層樓（69.44%）、10Hz（51.85%）、40mm（50%）最容易倒塌。

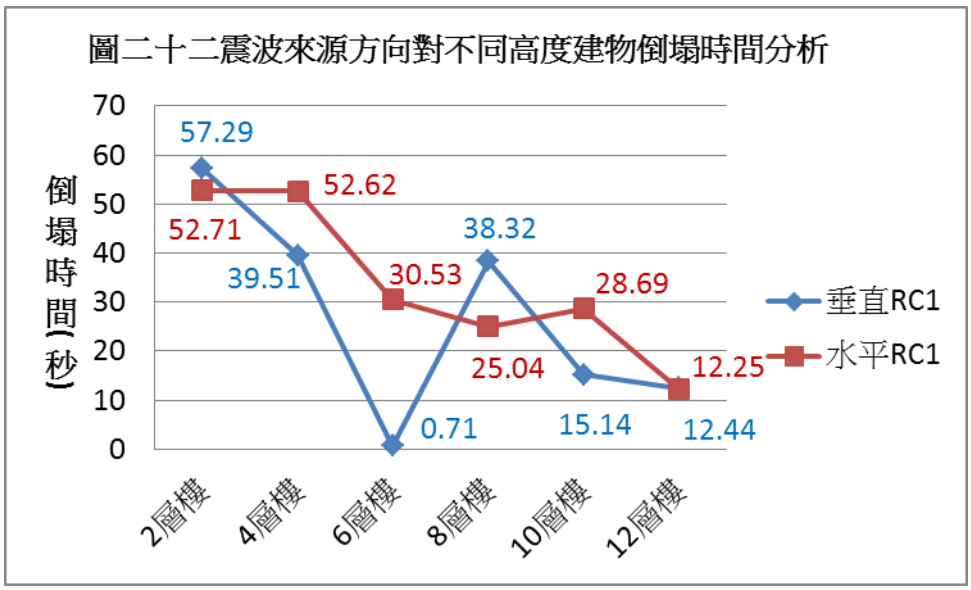
（二）垂直 RC5 有 41.67%機率倒塌，倒塌時間平均 55.41 秒，且樓層愈高倒塌時間愈短（從 83.34 秒→56.18 秒→26.71 秒），其中以 6 層樓（58.33%）、10Hz（66.67%）最容易倒塌。由實驗觀察結果兩種模型多因為地震時建物移動到邊緣不穩而倒塌。

（三）原因探討：判斷垂直 RC5 的底面積較大，移動到邊緣所需時間較長，所以倒塌時間也較長。但是我們本來認為「建物樓板面積較小者，地震所造成影響程度較大」的假設與實驗結果不符合（兩者倒塌機率都約 40%且底面積大的垂直 RC5 還略高於垂直 RC1）。

（四）不同地震對不同建物底面積的影響：由圖十九和圖二十可看出，在層樓數較低時，不同建物底面積和振幅沒有其規律性；各建物在 10Hz 時的倒塌率最大。

三、地震晃動方向（垂直 RC1 相對於水平 RC1）與建物倒塌情形的比較：





（一）震波來源方向與建物的結構正面（即長形建築的較長的面）成不同方向（垂直

或平行）時倒塌情形與時間差異不大。

（二）相同點：

1.除6層樓外兩者都是樓層愈高倒塌率愈大，10層與12層樓都是100%倒塌率。

2.倒塌時間大多在1分鐘內且平均約30秒。

3.都以6Hz的倒塌機率最大（垂直RC1為70.4%、水平RC1為90.7%）。

4.倒塌機率都與振幅相關性不大（都是60~70%）。

（三）原因探討：我們本來認為「震波來源方向與建物的結構正面較垂直者，地震所造成影響程度較大」的假設與實驗結果不符合（兩者倒塌機率都近70%且震波來源方向與建物的結構正面平行的水平RC1還略高於垂直RC1）。

四、地震對加裝防震貼片的建物之影響：

（一）由SS2和SS1比較：於具有韌性結構的SS1加裝防震貼片可以降低一半以上的倒塌機率（從45%→20%），且延長倒塌的時間（從39.81秒→47秒）。

（二）由垂直RC2和垂直RC1比較：於不具有韌性結構的垂直RC1加裝防震貼片反而提高倒塌機率（從83.33%→100%），且減短倒塌的時間（從38.82秒→24.65秒）。

（三）由水平RC2和水平RC1比較：於不具有韌性結構的水平RC1加裝防震貼片可略降低倒塌機率（從77.78%→75%），且略延長倒塌時間（從25.04秒→29.32秒）。

（四）探討原因：SS1使用防震貼片可以增加建物與地板間的摩擦力，增加倒塌所需的時間，因而降低在120秒內的倒塌機率。但垂直RC1和四因為不具有韌形結構，所以使用防震貼片所增加的摩擦力反而無法有效達到防震的效果。

（五）驗證：我們將原SS1和二底面所貼的四角墊片去除後進行實驗，發現沒有任何墊片時，模型會因為減少摩擦力而較快移動到邊緣並倒塌。

五、地震對加裝滑軌設計的建物之影響：

（一）由SS3和SS1比較：於具有韌性結構的SS1底面加裝滑軌設計可以降低部分的倒塌機率（從45%→26.67%），且大幅延長倒塌的時間（從39.81秒→86.98秒）。

（二）由水平RC3和水平RC1比較：於不具有韌性結構的水平RC1底面加裝滑軌設計反而提高倒塌機率（從77.78%→88.89%），且減短倒塌時間（從25.04秒→19.42秒）。

（三）探討原因：利用與震動方向平行的滑軌隨著地震作直線來回運動，藉著滑軌的滑動來隔絕地震能量的傳達， 以達到隔震的目的。SS1使用滑軌可以將地震能量以滑動方式消耗一部分，增加倒塌所需的時間，因而降低在120秒內的倒塌機率。但水平RC1因為不具有韌形結構，所以使用滑軌無法有效達到防震的效果，僅是增加建物的結構裝置。

六、地震對加入滾動鋼珠的建物之影響：

（一）由SS4和SS1比較：於具有韌性結構的SS1的1樓加入36顆鋼珠可以大幅降低倒塌機率（從45%→1.67%），且延長倒塌的時間(從39.81秒→82.23秒)。

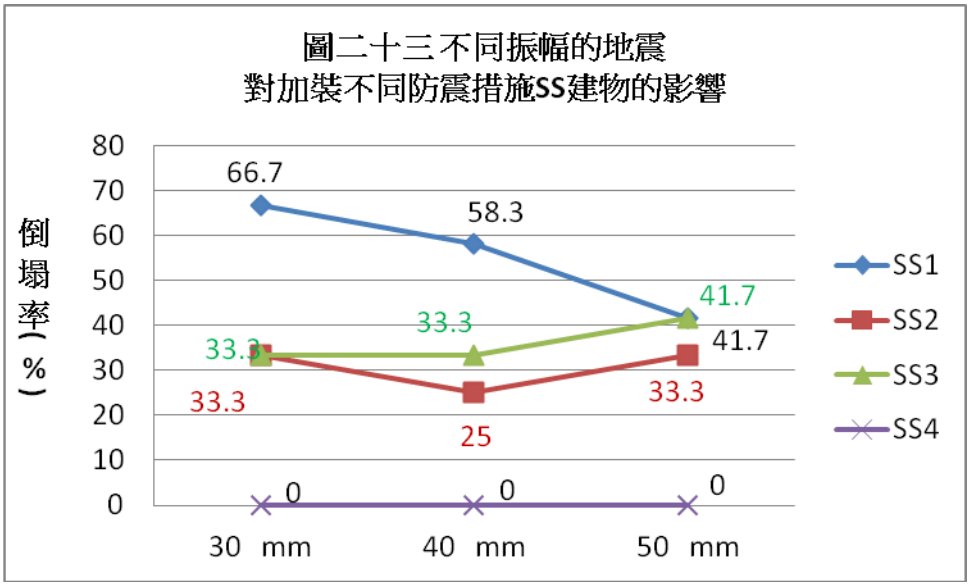
（二）由垂直RC4和垂直RC1比較：於不具韌性結構的垂直RC1的1樓加入81顆鋼珠也大幅降低倒塌機率（從83.33%→11.11%），但卻縮短倒塌時間（從39.81秒→14.19秒）。

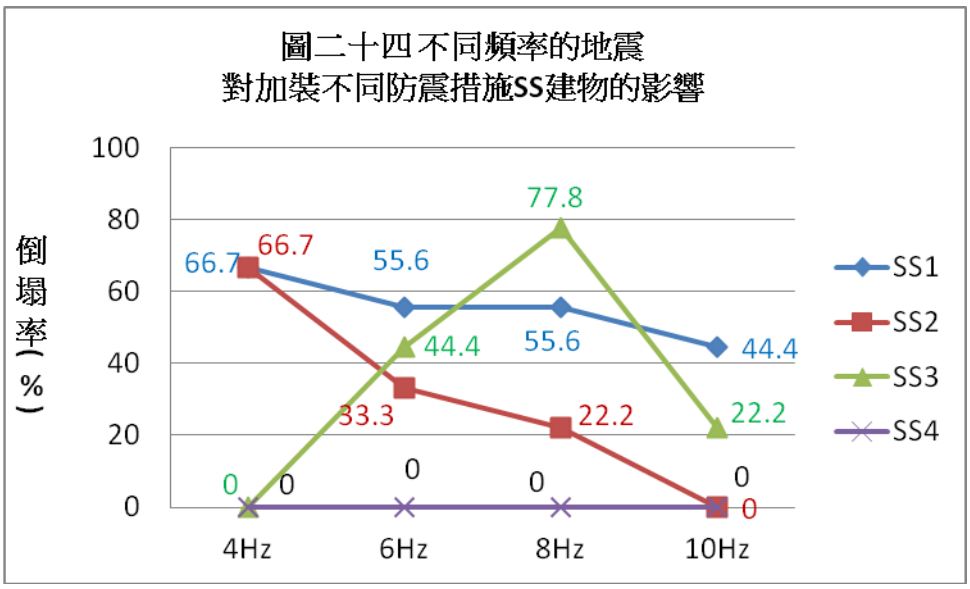
（三）由水平RC4和水平RC1比較：於不具韌性結構的水平RC1的1樓加入81顆鋼珠也可以降低倒塌機率（從77.78%→30.56%），但倒塌時間變化不大（從25.04秒→25.56秒）。

（四）探討原因：滑動式隔震的原理是在建物的底面設置鋼珠、鋼球、石墨、砂粒等材質的滑動層或滾動層，在地震時，建物可藉由滑動位移產生的摩擦過程，阻絕地震的傳輸路徑。所以在SS4、垂直RC4和水平RC4三種模型中所加裝的鋼珠滑動時都能藉由滾動消耗地震的能量，進而明顯地降低建物的倒塌機率，是我們認為最有效的隔震元件。

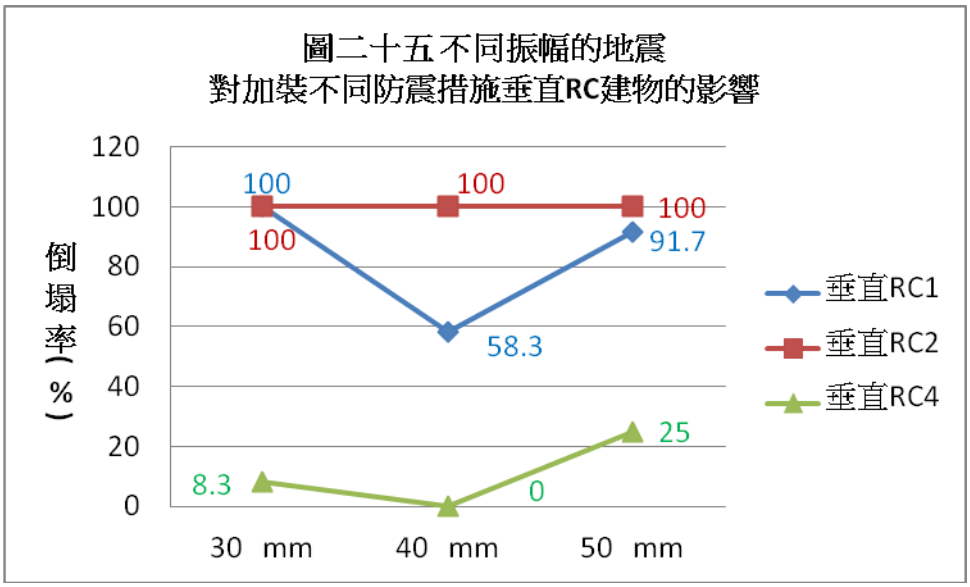
七、不同地震對建物加裝防震措施的影響：

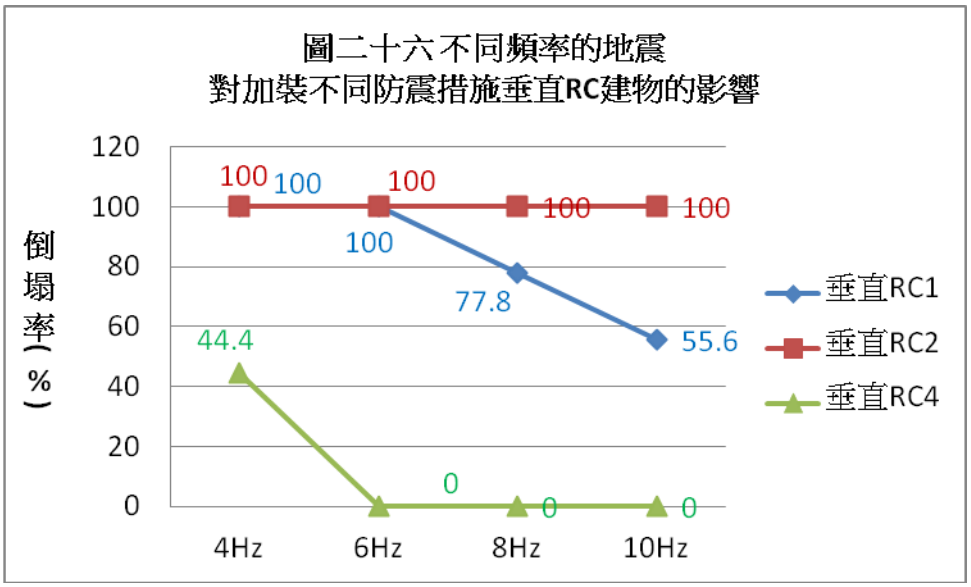
（一）對SS模型：由圖二十三和圖二十四可看出，任一振幅的地震加裝防震措施皆可降低建物倒塌率，尤以加裝鋼珠效果最佳；然而只有加裝鋼珠才能有效降低所有頻率的地震。



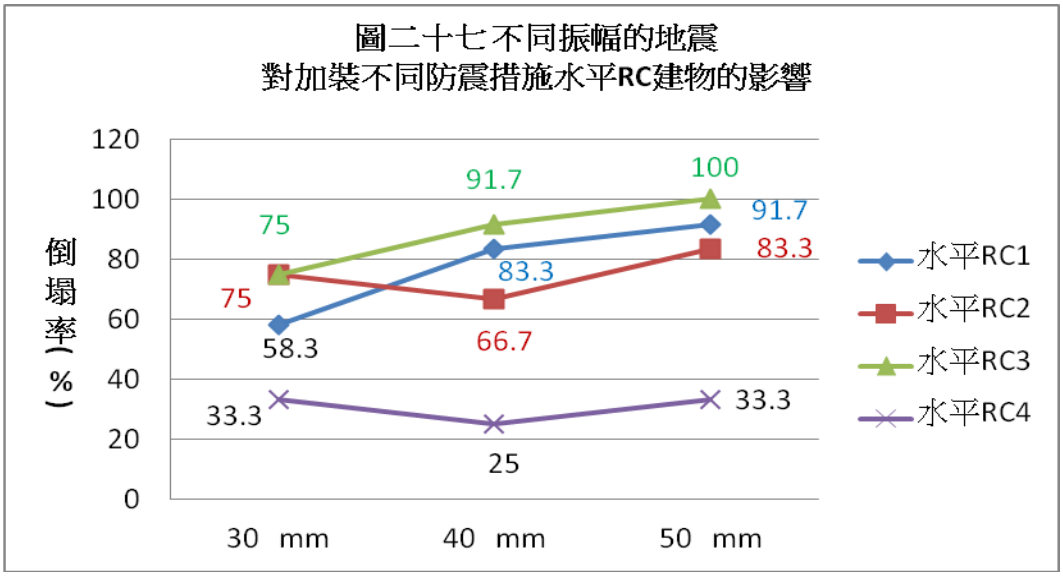


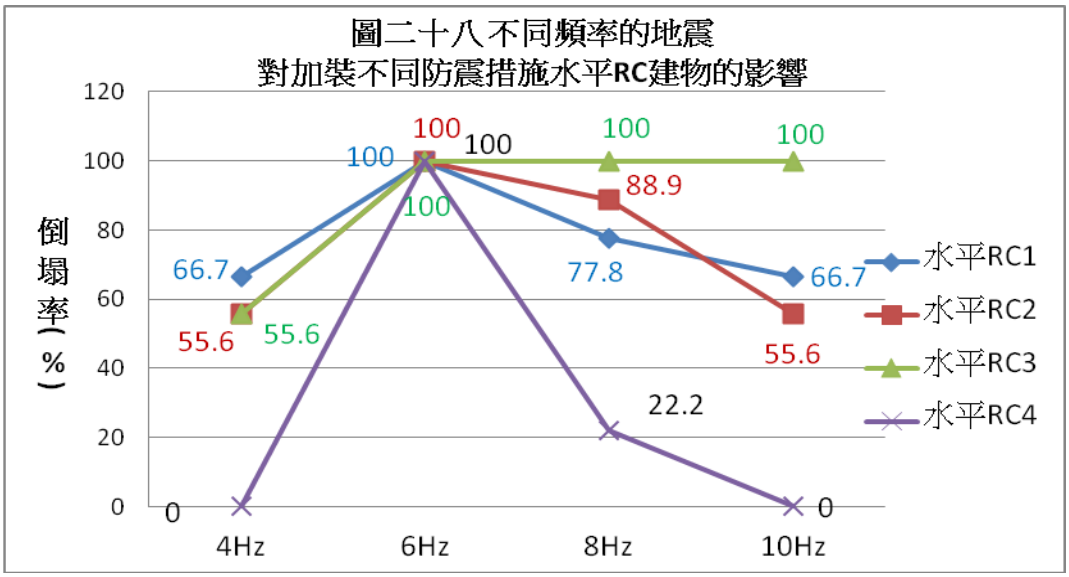
（二）對垂直RC模型：由圖二十五和圖二十六可看出，任一振幅及頻率的地震都只有加裝鋼珠才能有效降低倒塌率。





（三）對水平RC模型：由圖二十七和圖二十八可看出，除6Hz外，任一振幅及頻率的地震都只有加裝鋼珠才能有效降低倒塌率。



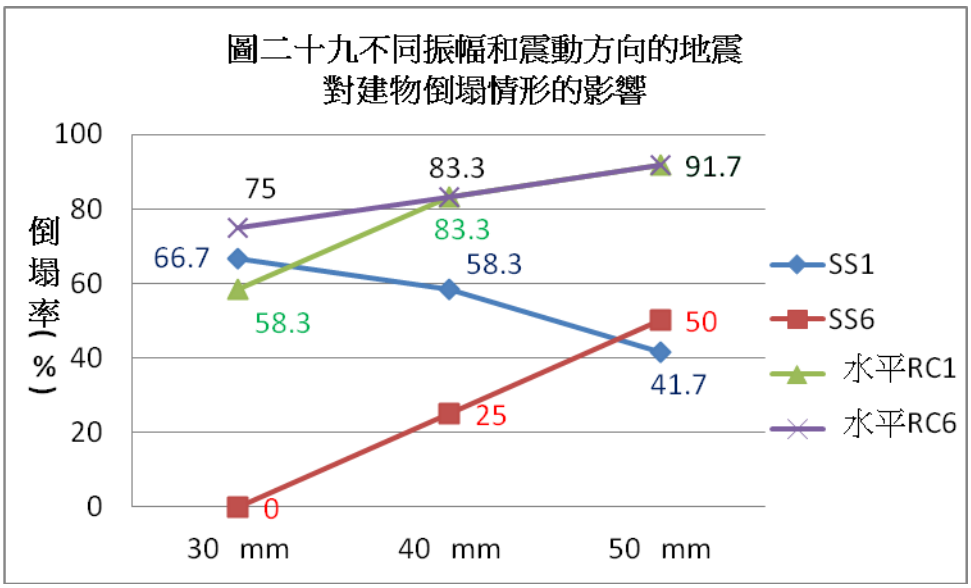


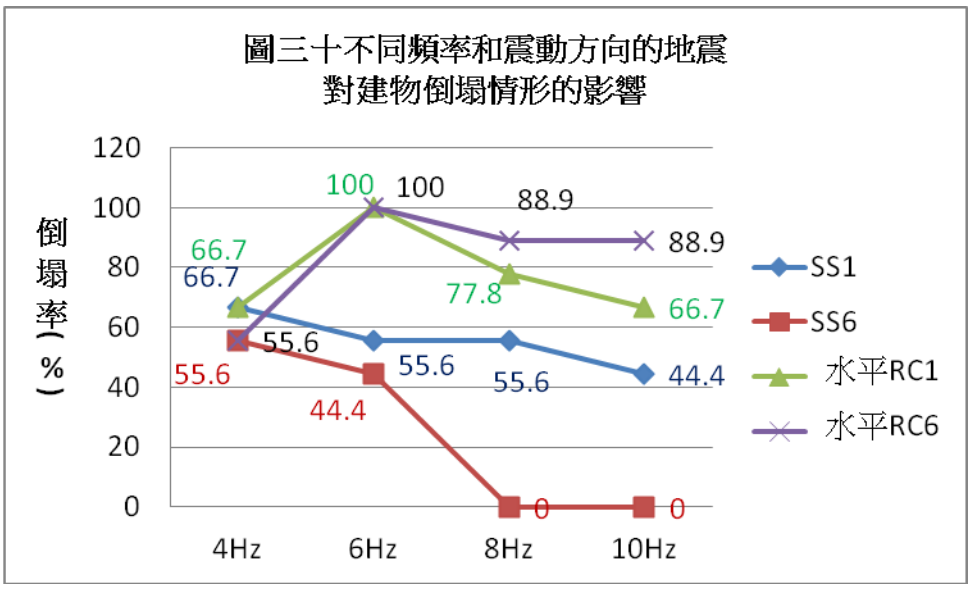
八、不同震動方向的地震對建物倒塌情形的影響：

（一）由SS6和SS1比較：具有韌性結構的SS模型在地震震動方向水平時的倒塌率高於地震震動方向垂直時的倒塌率，且倒塌率超過兩倍。

（二）由水平RC6和水平RC1比較：不具有韌性結構的RC模型在地震震動方向水平時的倒塌率略低於地震震動方向垂直時的倒塌率。

（三）探討原因：我們觀察到具有韌性結構的SS模型在地震震動方向垂直時，有較震動方向水平時，建物做更劇烈的扭轉與晃動，表示上下震動的地震給建物的影響性較大，但SS建物可藉由更劇烈的扭轉及搖擺來消耗更多的地震能量，故倒塌率反而降低。而不具有韌性結構的RC模型無法以此方式消耗上下震動的地震能量，所以倒塌率略為提高。





九、臺灣發生地震的主要頻率為何？

臺灣統計上的地震波頻率範圍，可由內政部營建署頒布的"建物耐震設計規範與解說"中第二章的"地震反應譜"探知一二。經由規範中各地的地震譜值換算，臺灣大部分的區域，地震波的主要頻率範圍平均在1.7~10 Hz，10Hz以上和0.7Hz以下的頻率很少發生。惟臺北盆地因地盤特殊，質地軟弱，地震波頻率較低，主要頻率範圍約在0.6~5Hz之間。在我們的實驗中任一模型在頻率<4Hz時建物都處在平衡狀態，不移動也不轉動。所以從垂直RC1開始我們都僅進行≧4Hz的實驗。

十、臺灣不同地區要如何防震最有效？

（一）北部臺北盆地地震波頻率較低，依據我們的研究結果SS建物使用滑軌設計或滾動鋼珠都能大幅降低建物的倒塌率（4Hz時都是從66.7%→0），RC建物可使用滾動鋼珠降低建物的倒塌率（4Hz時垂直RC從100%→44.4%，水平RC從66.7%→0）。

(二)東部如花蓮地區地震波頻率較高，依據我們的研究結果SS建物可使用防震貼片可

以大幅降低建物的倒塌率（8Hz時從55.67%→22.2%，10Hz時從44.4%→0），RC建物可使用滾動鋼珠降低建物的倒塌率（8Hz時垂直RC從77.8%→0，水平RC從77.8%→22.2，10Hz時垂直RC從55.6%→0，水平RC從66.7%→0）。

十一、地震搖晃時間：

（一）1999年9月21日凌晨1：47臺灣發生的「921集集大地震」，發生時間共102秒，所以我們的每一組實驗設計地震模擬平台的搖晃時間都是120秒。

（二）世界知名的大地震搖晃時間差異性很大（從數秒到數百秒），如下表(四十五)

表(四十五)　世界知名的大地震搖晃時間

知名地震	臺灣 921	日本 311	唐山 大地震	四川 大地震	阪神 大地震	舊金山 大地震	智利 大地震	蘇門答臘 大地震
發生年份	1999	2011	1976	2008	1995	1989	2010	2005
地震時間(s)	102	300	10	90	10	12	180	120

十二、共振現象：

（一）由實驗我們發現，各種模型在各層樓大多是振幅愈大倒塌機率愈大，但是頻率卻沒有這種趨勢，而且我們發現某些模型在特定頻率下最容易倒塌，垂直RC1的4、8、10、12層樓、水平RC1的6、8、10、12層樓、垂直RC2、水平RC2、水平RC3與水平RC4在6Hz時的倒塌機率都是100%，我們判斷每種建物都有其容易引起搖晃倒塌的頻率。

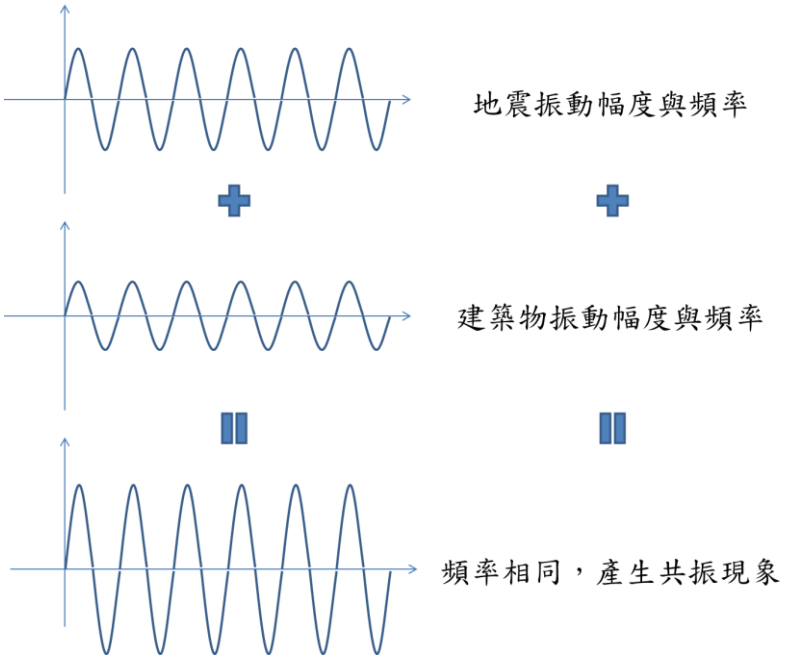
（二）所謂共振現象就是當震波遇到土質鬆軟的盆地地形時所發生的擴大效應，會使建物搖晃更劇烈。這時若建物的結構不耐震，受不了搖晃，就會發生傾斜或倒塌。由實驗我們發現，低頻率如4Hz和6Hz時，會發生一開始大幅度晃動然後倒塌的現象，但若大幅度晃動數次後未倒，則可穩定支撐到該次實驗結束，我們判斷這就是共振現象的效應。

（三）原理：學者針對臺灣地區建築物高度與基本振動周期之相關性進行研究指出，鋼筋混凝土設計的房子，其高度與周期計算如下列公式(1)，其中T為周期，h_n為地表面至頂樓之高度；依據公式(1)反推h_n則會如公式(2)

公式(1)　$T = 0.0294\ h_n^{0.804}$

公式(2)　$h_n = (T/0.0294)^{(1/0.804)}$

共振現象的發生原因如下圖二十七。



圖二十七　共振現象的發生原因

（四）根據中央氣象局地震報告，九二一大地震時車籠埔斷層由南端的振動頻率4Hz；北端的振動振動頻率1Hz，推算會產生共振的大樓高度約為14公尺及80公尺，再依據每層樓高3.6~4.2公尺來反推，在斷層北端對於樓層數3-4樓的RC建築有較大的振動幅度；在斷層南端對於樓層數19-22樓的RC建築有較大的振動幅度。然而地區不同，其地質條件亦不同，因此由於地震所造成的振動頻率也會有所不同；像臺北信義區的地震頻率一般介於0.8~3Hz，再換算成大樓高度則是20~100公尺高，約為4-6樓高的建物以及23-28樓高的建物。而花蓮地區，由於地質相較於臺北盆地來得堅硬許多，自然振動頻率較高，振動周期較短，因此低矮的建物對於地震較容易產生共振現象。

十三、地震對建築物的影響：

（一）地震使建物倒塌的原因有:老舊建築物防震力不夠、一，二樓挑高造成載重不足、結構支柱水準撐持力不夠、建築物基礎有特殊狀況、使用維護不當、結構不平衡如混凝土對鋼筋的握裹力不足、採長向無牆設計使耐震度較差、建物蓋在鬆軟的土地或地質敏感區和底部樓層無足夠樑柱支撐的開放空間等原因。

（二）如何減少建物受損?

1.基礎工程與地震災害防治：

堅強穩定的工程基礎，使整個工程在地震中有比較高的存活機會。例如921 地震時，豐原中正公園內與車籠埔斷層交會的房屋幾乎全被震垮或被震

歪斜，但有一棟樓房，因為基礎特別堅固而安然無恙，如圖二十八。



圖二十八 921地震之時，與車籠埔斷層交會的房屋幾乎全被震倒或被震歪斜，途中一棟樓房，因為基礎特別堅固而安然無恙(洪如江攝於豐原市中正公園)

2.結構工程與地震災害防治：

(1) 避免共振：工程結構物的自然頻率須遠離地盤的基本頻率，以免發生共振而破壞。

(2) 採用穩定的結構型態：儘量採用對稱與方正(並非排除圓形)的結構型態。避免奇形怪狀或軟硬混合的結構。

(3) 隔震結構系統：在基礎與主結構之前，或某一樓層，裝置「隔震墊」，以免地盤震動經過基礎或低樓層上傳，如圖二十九。



圖二十九 台大土木系新建研究大樓在二樓裝置隔震墊，隔絕經由基礎及一樓上傳的地盤震動(洪如江攝)

(4) 採用韌性材料、韌性構件、韌性接頭、與韌性結構，如研究中的類 SS 模型。

（三）每種建築結構都有其優缺點，鋼骨結構雖然耐震性佳，但並非是絕對的安全保證，因此就算住在鋼筋混凝土結構的房屋，只要施工用料實在、監工確實，房子的抗震性未必比鋼骨住宅差。除了選擇結構完整、安全的建物外，最重要的是切忌隨意改建或變更建物原有格局，如果房子有小瑕疵、裂縫等也要記得補強，方可在地震來臨時，讓生命財產的損失降到最低。

十四、探討實驗誤差來源與修正方式：

（一）頻率與振幅值不準確。如何減少此項誤差？→旋轉數值鈕後仔細觀察缺口是否與數值點重合，可減少誤差。

（二）按下碼表時的誤差。如何減少此項誤差？→主要計時者（紀錄建物倒塌時間）同時打開地震模擬平台及計時器的開關，可減少誤差。

（三）建物過重，使承載板無法負荷。如何減少此項誤差？→使用壓克力空盒子製作建物，可減少誤差。

（四）軌道經多次實驗後被磨損。

十五、研究過程遇到的困境與解決之道：

（一）地震模擬器：將地震模擬器原設計為水平方向震動，要改裝成可垂直方向震動的儀器時，都會因為不穩固無法平衡或因為重力因素無法順暢震動。經過多種設計方式並多次的實驗後，終於找到以最少幅度的改變方式（僅將地震模擬器由水平放置改成垂直放置並以鞋帶綁在椅子的側邊）來轉成垂直方向震動。

（二）建物模型：無法找到與類SS模型底面積與高度完全相同的類RC模型，最後則以總高度相同來進行實驗。而類RC模型為封閉壓克力盒，無法放置代表人和家具的小熊擦布和彩虹筆，所以研究只觀察地震對各種建物的影響。

（三）防震措施：研究開始時我們以常聽到的防震方式－彈簧和海綿來進行實驗，兩者都是低振幅也會使建物倒塌，不具有防震功能，所以只好放棄這兩種方式，在蒐集相關研究後，改以防震貼片、滑軌和鋼珠進行實驗，前兩者能降低一些倒塌率，最後一種則能大幅度降低倒塌率，是本次研究認為最有效的方法。

（四）研究數據：實驗結束無法找出數據的規律性，後經由轉換成倒塌率後，討論發現振幅與倒塌率有較大的正相關，頻率則是因共振現象而有特定易倒塌的頻率。

十六、未來研究方向：

（一）地震模擬器：尋找或設計可以水平也可以垂直震動的地震模擬器，進行不同震動方向的地震對各類模型的影響。

（二）建物模型：比較地震對SS模型在獨棟與連棟差異性。

（三）防震措施：以剛性彈簧進行實驗，再與滾動鋼珠的防震效能進行比較。

柒、 結論

一、各建物模型倒塌情形比較：

建物模型	倒塌機率	平均倒塌時間	觀察記錄總結論
SS1	21%	55 秒	任一振幅且≧6Hz 皆有倒塌機會。 人及家具兩者振幅愈高倒塌機率愈大 樓層愈高建物、人及家具倒塌機率愈大。
垂直與水平 RC1	70%	30 秒	除 6 層樓外，樓層愈高倒塌機率愈大且建物倒塌所需時間愈短。 震波來源方向與建物的結構正面垂直與平行，與建物倒塌情形無關。
垂直 RC5	42%	55 秒	以 6 層樓倒塌機率最大且樓層愈高倒塌所需時間愈短。
SS2	22%	47 秒	頻率愈高倒塌機率卻愈小。 加裝防震貼片可因為增加摩擦力而降低此種建物一半以上的倒塌機率，且延長倒塌的時間。
垂直 RC2	100%	25 秒	可知此種建物無論垂直或水平放置，加裝防震貼片無法降低倒塌機率也無法延長倒塌的時間。
水平 RC2	75%	29 秒	
SS3	27%	87 秒	可知此種建物底面加裝滑軌設計可藉由滑動耗能而降低倒塌機率，且大幅延長倒塌的時間。
水平 RC3	90%	19 秒	≧6Hz 和 50mm 時有 100%機率會倒塌。可知此種建物加裝防震貼片滑軌設計無法降低倒塌機率。
SS4	1.7%	82 秒	僅在 20mm6Hz 時倒塌一次。加入滾動鋼珠可以消耗地震能量以大幅降低倒塌機率，且延長倒塌的時間。
垂直 RC4	11%	14 秒	加入滾動鋼珠可以消耗地震能量以大幅降低倒塌機率，且延長倒塌的時間。

水平 RC4	31%	26 秒	加入滾動鋼珠可以消耗地震能量以大幅降低倒塌機率，且延長倒塌的時間。
SS6	25%	47 秒	50mm4Hz 和 6Hz 倒塌率 100%，其次是 40mm4Hz(66.67%)和 6Hz(33.33%)。
水平 RC6	75%	26 秒	除 30mm4Hz 不會倒塌外，其他狀況皆會倒塌，以 6Hz 時機率最大(100%)。
SS6	25%	47 秒	50mm4Hz 和 6Hz 倒塌率最大(100%)其次是 40mm4Hz(66.67%)和 40mm 6Hz(33.33%)，其他狀態皆不會倒塌。
水平 RC6	75%	26 秒	除 30mm4Hz 不會倒塌外，其他狀況皆會倒塌，以 6Hz 時機率最大(100%)。

二、實驗中多數模型是振幅愈大，倒塌率愈大；但每種模型有其特定容易引起倒塌的頻率，此為共振現象的影響，如類 RC 模型多以 6Hz 時的倒塌機率最大。

三、 判斷類 SS 建物本體具有韌性，藉由扭轉形變與搖擺的方式來消化地震的能量，較不易破壞整體結構，所以較不易倒塌或能支撐較久的時間，若再加入滾動鋼珠可以消耗地震能量以大幅降低倒塌機率，且延長倒塌的時間，是本次研究認為最有效的制震方式。

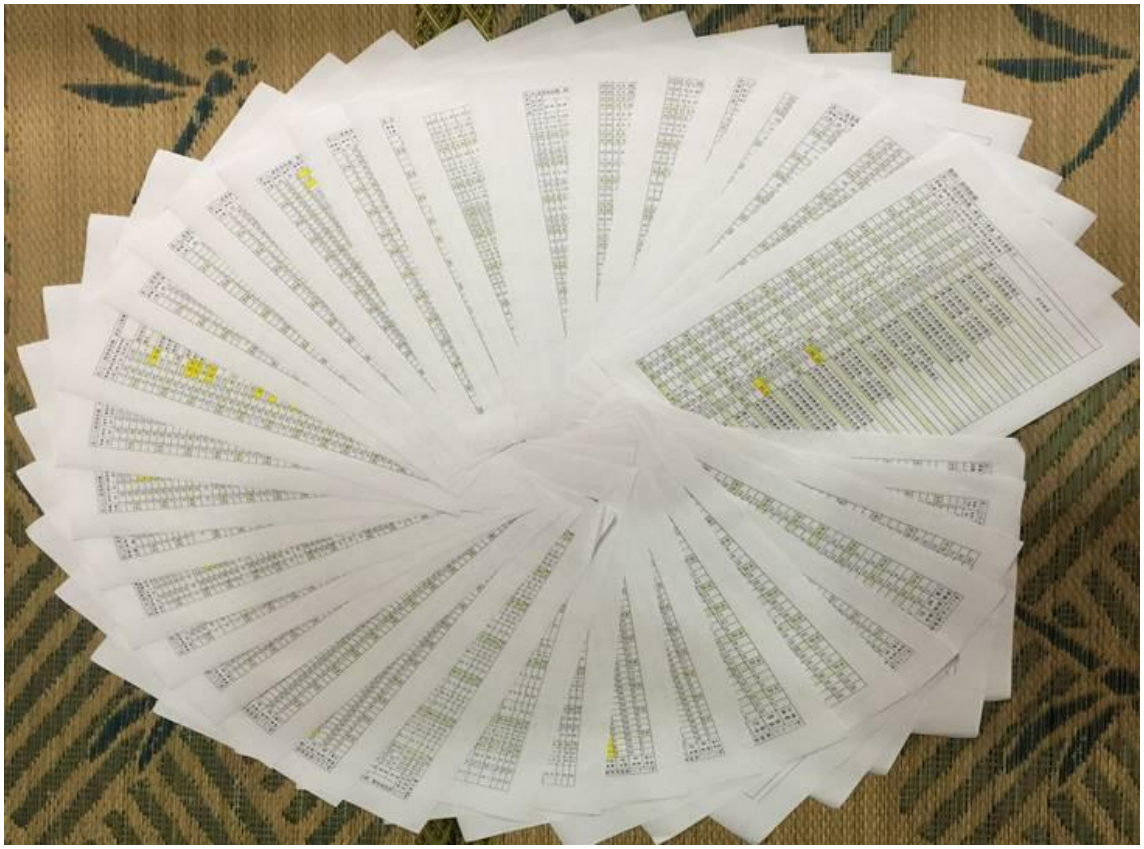
捌、 參考資料及其他

- IDEERS 抗震盃：隔震元件 http://ws1.ncree.org/Ideers2008Edu/earthquakeeng/isolation.htm
- 內政部營建署：建物耐震設計規範與解說網站 http://www.cpami.gov.tw/
- 維基百科：各次大地震資料 http://zh.wikipedia.org/zh-tw/
- 科學 Online－科技部高瞻自然科學教學資源平台：有地震！居家房屋怎麼選？ http://highscope.ch.ntu.edu.tw/
- 地震對建築物的影響 http://info.bm.hc360.com/2008/05/14114464587.shtml
- 土木工程就是文明工程(VIII)土木工程與防災　文/圖：洪如江 臺灣大學土木工程系 電子報 2008 年 6 月 http://epaper.ce.ntu.edu.tw/vol.9/Column-Hung.html

附件一　圖二十八　研究過程錄影檔目錄圖



附件二 圖二十九　研究結果：建物的晃動情形與倒塌時間完整記錄



【評語】030505

優點：

1. 清楚描述地震對各種不同建物型態，不同樓層及不同材質的影響。

2. 詳細記錄各種實驗結果，並對結果進行討論。

缺點：

未說明為何地震方向與建物方向的明確關係，為何本實驗結果與方向無關。

建議改善事項：

可考慮模擬結合垂直與水平運動的地震模擬器。