

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 地球科學科

040505

應用 3D 列印於縮尺建物耐震試驗之可行性探討

學校名稱：新北市立瑞芳高級工業職業學校

作者： 高二 黃林軍 高二 潘冠廷 高二 吳堃詣	指導老師： 李銘哲 詹秉鈞
---	-----------------------------

關鍵詞：3D 列印、縮尺建物、制震系統

摘要

台灣對建物安全與結構防災的意識提升，為達到處於地震頻繁的臺灣具有居住安全，目前建築多強調房屋結構中加設制震系統以達到減震效益，因此國震研究中心投入相當成本進行耐震試驗，而透過本專題去探討此一耐震試驗於研究架構之可行性。

本研究目的係利用 3D 列印技術進行縮尺建物之耐震試驗，並透過數值與實驗模擬不同地震波下，比對 3D 列印模型之頂層加速度與位移歷時是否有相同之變化趨勢？並討論他們在實驗後各方面的特性差異並做比較，藉由結果數據，以「效益值」、「嚴謹度」、「合理性」三點進行討論出耐震試驗之可行性，其結果在長週期之針筒阻尼有顯著之制震結果趨勢，唯利用熔絲製造的 3D 列印方式較無法達到元件具有理想的結構力學行為。

壹、研究動機

地震帶包括環太平洋地震帶、歐亞地震帶、中洋脊地震帶，而台灣處於環太平洋地震帶，為歐亞大陸板塊與菲律賓板塊交界，致使地震頻繁，當地震級數越大越易造成建物的損壞與倒塌，導致房舍倒塌時發生連鎖效應，其中以九二一地震為例，而其主因多是建材品質不齊或老舊等問題造成，所以在建築業中逐漸重視制震系統的重要性，就前面提及的問題於探討文獻中可以得知。過去高一時我曾撰寫有關制震系統優缺點的小論文，因此對建築物的制震系統有了初步了解，便想是否可以對此方向去做研究與探討

3D 列印應用在近年來無論在科學實驗與科技實作的應用，不斷有新聞報導的消息，於是我們就發想選用 3D 列表機去做建物模型，我們透過尋找相關資料，了解 3D 列印成型方式有很多種，因此我們想應用 3D 列印的融絲製造技術來進行抗震結構的建模，進而探討耐震試驗之可行性的主題。

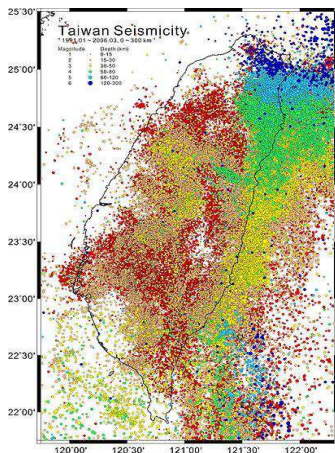


圖 1-1 台灣地震分布圖



圖 1-2 房舍倒塌時發生連鎖效應

表 1-1 2004-2015 地震造成之傷害

日期	震央	緯度	經度	震級	災害情形
2004 年 5 月 1 日	花蓮秀林	北 24.08	東 121.53	5.3	2 人死亡中橫公路落石
2006 年 4 月 1 日	台東卑南	北 22.88	東 121.08	6.2	14 棟房屋全毀
2006 年 12 月 26 日	屏東恆春外海	北 21.69	東 120.56	7.0	2 人死亡 3 棟房屋全毀
2009 年 11 月 5 日	南投名間	北 23.79	東 120.72	6.2	1 人受傷
2009 年 12 月 19 日	花蓮磯崎外海	北 23.79	東 121.66	6.9	17 人受傷多棟房屋毀損
2010 年 3 月 4 日	高雄茂林	北 23.0	東 120.73	6.4	96 人受傷 54 萬戶停電
2012 年 2 月 26 日	屏東霧台	北 22.74	東 120.78	6.1	
2013 年 3 月 27 日	南投仁愛	北 23.90	東 121.05	6.2	1 人死亡 97 傷
2013 年 6 月 2 日	南投仁愛	北 23.86	東 120.97	6.5	5 人死亡
2013 年 10 月 31 日	花蓮瑞穗	北 23.55	東 121.42	6.3	1 人受傷
2015 年 4 月 20 日	花蓮東部外海 76.2 公里	北 24.05	東 122.37	6.3	1 人死亡，1 人受傷

貳、研究目的

本研究目的就是探討 3D 列印技術應用於縮尺建物進行耐震試驗的可行性，並希望以縮小建物尺寸來達到設計制震系統的桿件形式，因此我們開始進行一連串的資料收集、歸納分析跟實驗模擬，並探討其效益值、嚴謹度、合理性之三要項，本研究目的架構如圖 2-1 所示。

此外我們也將建築物模型分成兩類四種，一類為斜撐，分別為 H 型與 O 型亦如實際建築工程所製造之鋼材元件，另一類為阻尼，分別以針筒與彈簧模擬現行房屋結構之制震系統，藉此探討出 3D 列印元件的縮尺建物進行耐震試驗是否具有可行性。

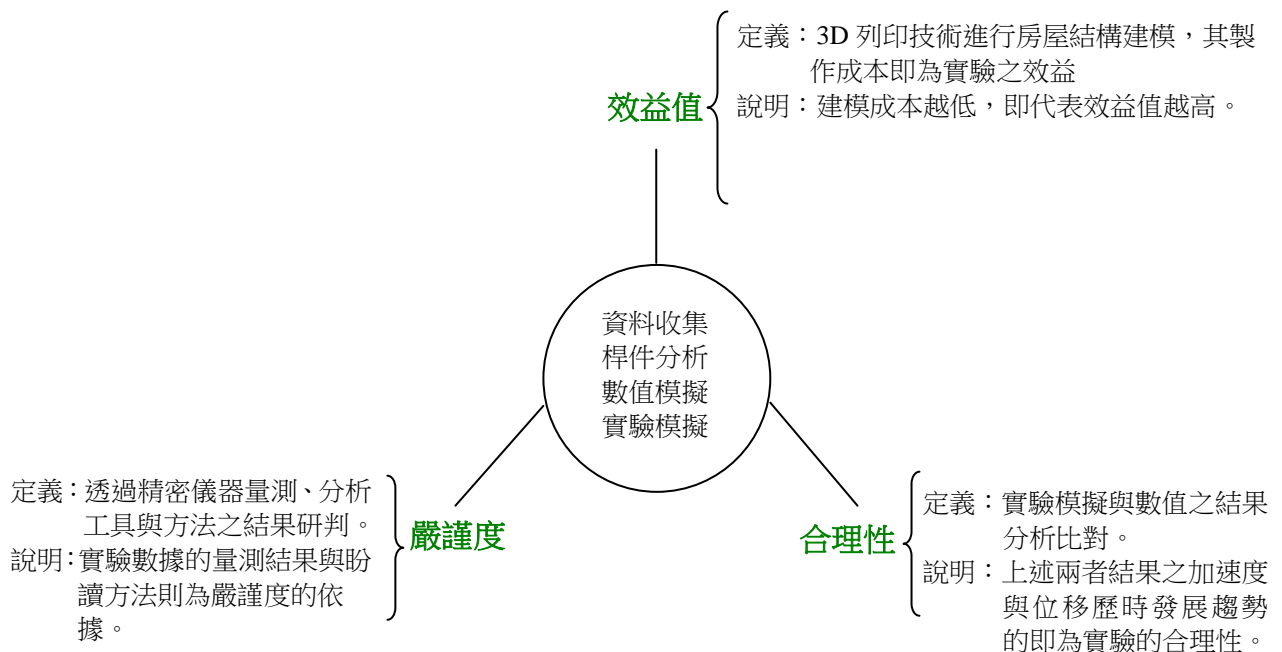












圖 2-1 研究架構圖

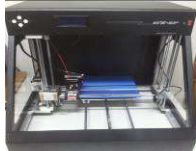





參、研究設備及器材

下列為本次研究過程所使用過的材料、儀器及工具設備如下：

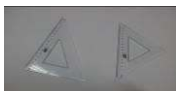













一、使用材料：

項次	名稱	數量			
1	白色 PLA 線材	2 捆			
2	紅色 PLA 線材	1 捆	PLA 線材(白)	PLA 線材(紅)	木板
3	木板	10 塊			
4	彈簧	24 個	彈簧	針筒	熱熔膠
5	針筒	8 個			
6	熱熔膠條	20 條	180 號砂	瓦楞板	3M 耐熱美紋膠帶
7	180 號砂紙	1 張			
8	瓦楞板	四片	質量塊		
9	3M 耐熱美紋膠帶	1 捆			
10	質量塊	12 塊			
11	螺絲	40 顆			

二、使用儀器

項次	名稱	數量			
1	3D 列表機	2 台			
2	無旁束壓縮試驗儀	1 座	3D 列表機	無旁束壓縮試	電子磅秤
3	電子磅秤	1 台			
4	電子分析天平	1 台	電子分析天平	六軸式抗震台	加速規監測設
5	六軸式電動平台	1 座			
6	加速規感測系統	1 套			

三、使用工具

項次	名稱	數量				
1	三角板(45 度跟 60 度)	2 把				
2	延長線	2 座	三角板	延長線	烙鐵	美工刀
3	美工刀、剪刀	2 把				
4	烙鐵、烙鐵架	2 件	鑷子	游標卡尺	鋸子	剪刀
5	鋸子	1 把				
6	補土刀	1 把	斜口鉗	補土刀	電鑽	墊子
7	斜口鉗	1 把				
8	游標卡尺	1 個	熱熔槍	鑽尾	銼刀	螺絲起子
9	電鑽、熱熔槍	1 把				
10	銼刀	1 把				
11	螺絲起子	1 把				
12	墊子、鑷子	1 件				

肆、研究過程與方法

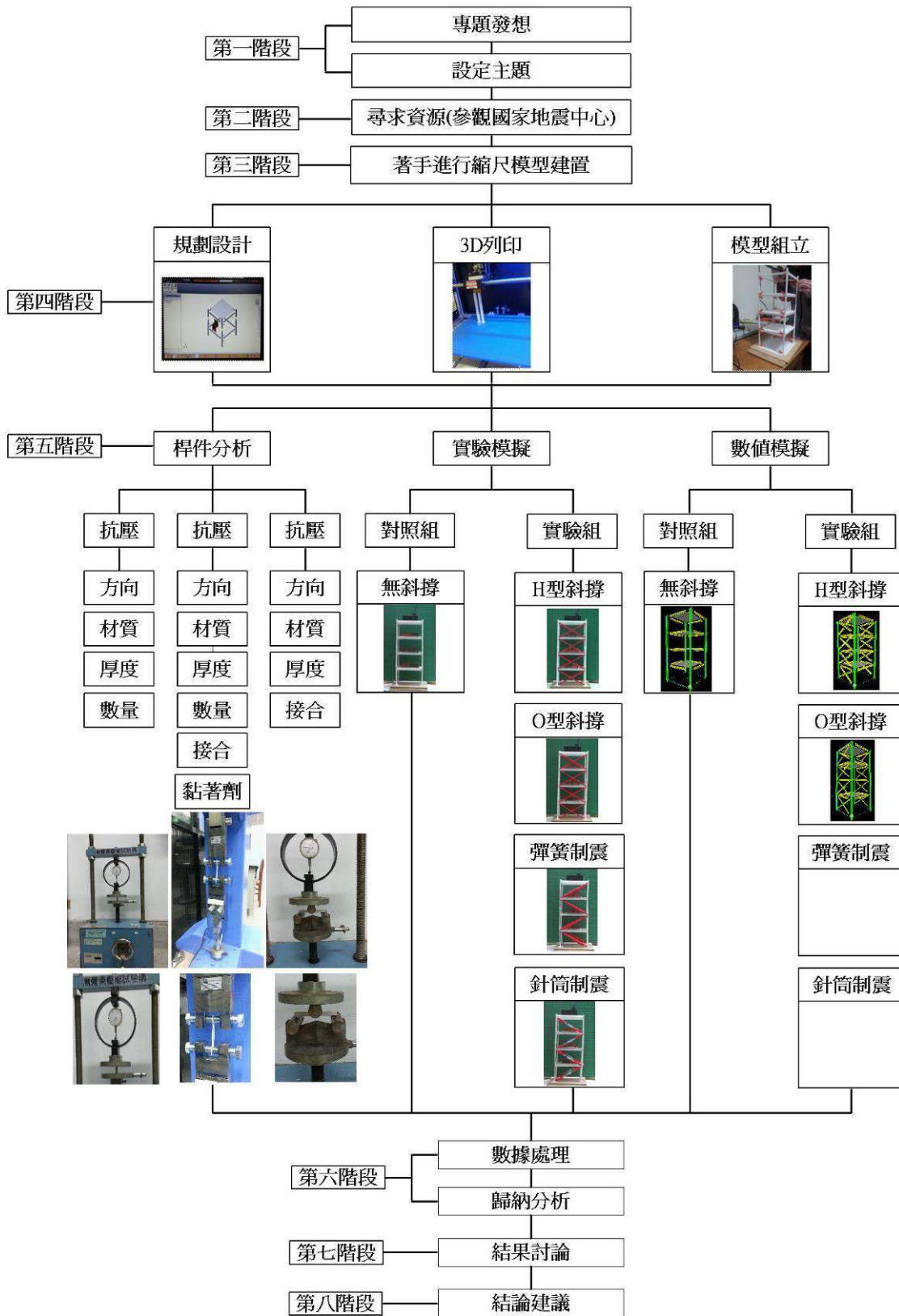


圖 4-1 本專題之整體架構流程圖

一、蒐集資料立體製圖

(一)蒐集 3D 相關資料：本研究透過網路蒐集現代 3D 打印成型方法如下表 4-1，並選擇常運用到的熔絲打印型式，而此打印型式中有兩種線材，並選用 PLA(聚乳酸)作此研究的打印原料。

■研究目的：選擇出打印方式、打印原料

■研究步驟：1、蒐集現代 3D 打印成型方法

2、匯整資料，找出常運用到的打印型式

3、選擇打印時要使用那種打印原料

表 4-1 打印型式與原料

項次	打印型式	項次	原料種類
1	選擇性激光燒結	1	熱塑性塑料、金屬粉末、陶瓷粉末
2	直接金屬激光燒結	2	幾乎任何合金
3	熔融沉積式	3	熱塑性塑料，共晶系統金屬、可食用材料
4	立體平版印刷	4	光硬化樹脂 (photopolymer)
5	數字光處理	5	液態樹脂
6	熔絲製造	6	PLA(聚乳酸)、ABS 樹脂
7	融化壓模式	7	金屬線、塑料線
8	分層實體製造	8	紙、金屬膜、塑料薄膜
9	電子束熔化成型	9	鈦合金
10	選擇性熱燒結	10	Thermoplastic powder
11	粉末層噴頭 3D 打印	11	石膏

(二) 蒐集制震系統相關資料：蒐集制震相關資料，使用 Autodesk Inventor 做 3D 縮尺建物桿件的設計，並將設計好的各桿件做繪製 3D 縮尺建物。

■研究目的：設計與繪製 3D 縮尺建物

■研究步驟：1、蒐集制震系統有斜撐、阻尼器

2、設計各 3D 桿件

3、繪製 3D 縮尺建物

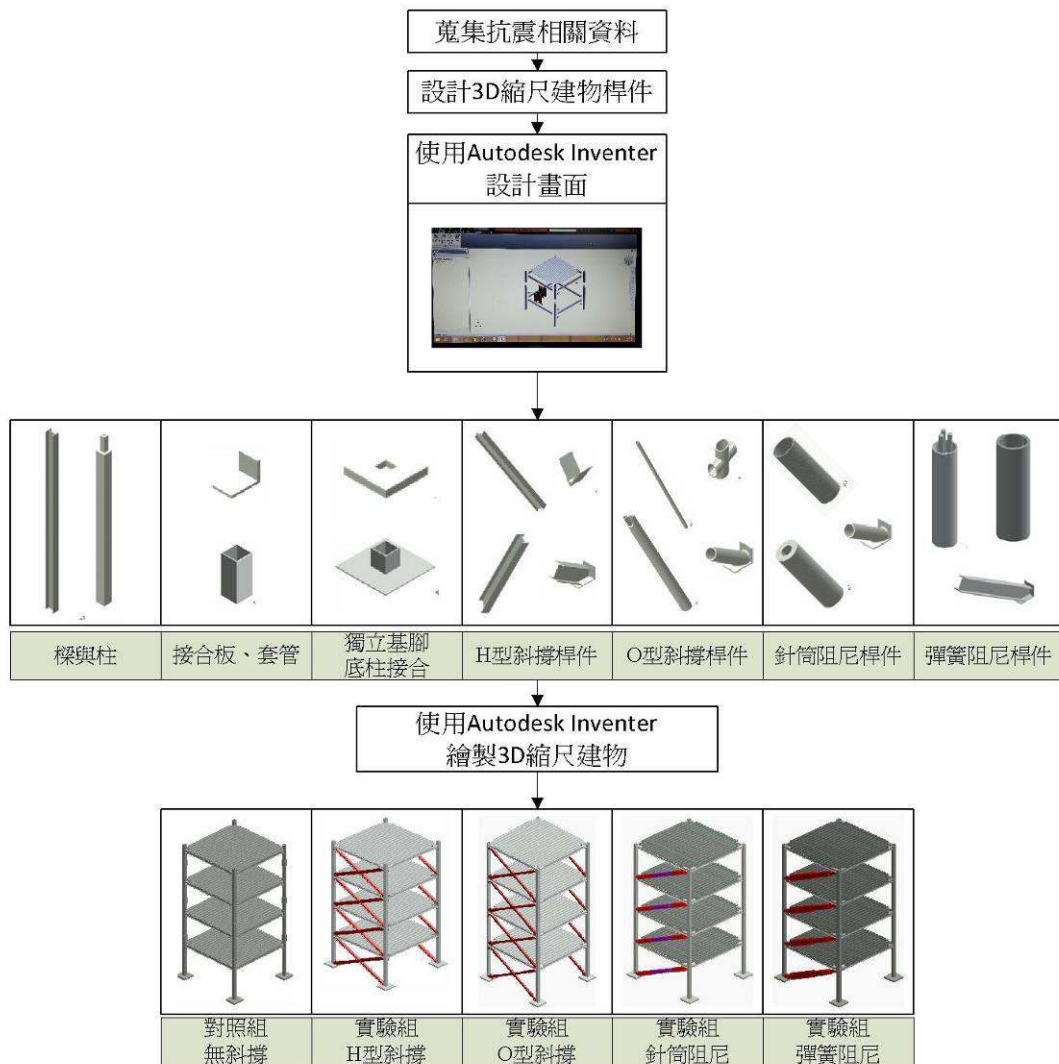


圖 4-2 設計與繪製 3D 縮尺建物之流程圖

二、3D 桿件分析試驗

(一) 3D 桿件抗壓強度(S_c)試驗

- 試驗目的：本方法係用測定 3D 桿件之抗壓強度
- 試驗步驟：
 - 1.將試體於 3D 桿件取出，並將底板與主體分開
 - 2.量測 3D 桿件長、寬、厚與重量
 - 3.置試體於抗壓試驗機中央，注意試體與儀器接觸之上下兩面不得使用墊板。
- 計算結果：

$$S_c = \frac{P}{A} (\text{kg}/\text{cm}^2)$$

P =最大荷重(kg)

A =面積(cm^2)



(二) 3D 桿件抗拉強度(S_T)試驗

- 試驗目的：本方法係用測定 3D 桿件之抗拉強度
- 試驗步驟：1.將試體於 3D 桿件取出，並將底板與主體分開
2.量測 3D 桿件長、寬、厚與重量
3 將 3D 桿件放置夾具中
- 計算結果：

$$S_T = \frac{P}{A} (\text{Kg/cm}^2)$$

P=作用力(Kg)

A=破壞處之斷面積
(cm^2)



(三) 3D 桿件抗折強度(T)試驗

- 試驗目的：本方法係用測定 3D 桿件之抗折強度
- 試驗步驟：1.將試體於 3D 桿件取出，並將底板與主體分開
2.測定其試體之長、寬、高、厚度與重量。
3.將試體三點抗折試驗
4.放入二圓柱於無旁束壓縮試驗中之等距支承軸上如下圖。
- 計算結果：試樣之抗折強度 (kg/cm^2)，依下式計算。

$$T = \frac{3WL}{2bd^2}$$

W=最大載重 (kgf)

L=支持用滾筒之中心間距 (cm)

b=試樣寬度 (cm)

d=試樣厚度 (cm)



三、實驗模擬耐震試驗

- 試驗目的：探討透過斜撐及阻尼的桿件設計，並利用 3D 桿件組立模型，由對照組來測試出建物模型在彈性範圍內，是否符合與數值模擬相同之頂層加速度減少趨勢。
- 試驗步驟：1.印製出縮尺模型各個桿件的長、寬、高。
2.在木板上進行放樣並鎖上獨立基腳。
3.柱放樣完後，將樑焊上柱，最後把斜撐與阻尼系統焊至模型上。
4.做不同週期地震波的 3D 列印縮尺建物耐震實驗

項目 順序	主旨	說明	圖表
Step 1	設計	叉型斜撐與阻尼設計	

Step 2	印製	由3D列印印製出桿件尺寸																					
Step 3	桿件接合	木板上進行獨立基腳與底柱放樣及鎖上																					
Step 4		樑與接合版接合，焊好的樑與柱接合，並放上樓板																					
Step 5		將以焊好的斜撐及阻尼系統放上每一層樓																					
Step 6	模型秤重及量測尺寸	把每棟模型都量測尺寸與重量，以增加其嚴謹度。																					
Step 7	加速規的線路安裝	將加速規接到 D718-ES 裝置並裝置 D718-ES 接上電源並用網路線連接至數據機，再從數據機連接至電腦 DATAQ 軟體																					
Step8	擷取電子訊號	設定 DATAQ 軟體的紀錄時間為 36 秒，並用槌子及棉線來測試無震動前及震動後的自然振動頻率																					
Step 9	模擬搖晃破壞	進行長、中、短及共振頻率的週期地震波，輸入參數如表 4-3，每次的破壞都會對建物造成破壞，所以都必須測出自然振動頻率，必較模型是否有降低的趨勢	<p>表 4-2 模擬地震波之控制參數</p> <table border="1" data-bbox="863 1541 1289 1742"> <thead> <tr> <th>次項</th> <th>週期 sec/次</th> <th>振幅 mm</th> <th>位移 mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.10</td> <td>40</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.25</td> <td>40</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>1.00</td> <td>40</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td colspan="2">共振週期</td> <td>40</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table>	次項	週期 sec/次	振幅 mm	位移 mm	1	0.10	40	10	2	0.25	40	10	3	1.00	40	10	共振週期		40	10
次項	週期 sec/次	振幅 mm	位移 mm																				
1	0.10	40	10																				
2	0.25	40	10																				
3	1.00	40	10																				
共振週期		40	10																				
Step12	轉換類比訊號	1.利用 DATAQ 軟體做頻率的分析，軟體中運用 FFT 快速傅立葉轉換成頻率。並轉換頻率後，比對出損壞程度。 2.透過地震歷時，分析加速度之分佈情形																					

註 1.耐震實驗操作說明如如下表 4-3

註 2.耐震實驗模擬操作現況如下圖 4-2

表 4-3 耐震實驗操作說明

步驟	操作內容	量測項目
Step1	控制端輸入地震波參數	量測短、中、長週期之加速度歷時
Step2	給予模型的適當微振動源	量測搖前之自然震動頻率(Hz)
Step3	進行短週期地震波之模擬振動	量測搖時之模型頂層加速度歷時(g)
Step4	給予模型的適當微振動源	量測搖後之自然震動頻率(Hz)
Step5	進行中週期地震波之模擬振動	量測搖時之模型頂層加速度歷時(g)
Step6	給予模型的適當微振動源	量測搖後自然震動頻率(Hz)
Step7	進行長週期地震波之模擬振動	量測搖時之模型頂層加速度歷時 (g)
Step8	給予模型的適當微振動源	量測搖後自然震動頻率(Hz)
Step9	進行共振週期地震波之模擬振動	量測搖時之模型頂層加速度歷時 (g)
Step10	給予模型的適當微振動源	量測搖後自然震動頻率(Hz)



圖 4-2 耐震實驗模擬操作現況

四、數值模擬動力分析

本研究數值模擬採用 ETABS 結構分析設計程式，係因該軟體已廣為工程界進行耐震工程制震系統或動力分析時所採用，並依據 3D 列印所組成之五種對照組與實驗組的建物模型，於 ETABS 進行建模並在加以分析，

■試驗目的：探討透過斜撐及阻尼的桿件設計，並利用 3D 桿件組立模型，由對照組來測試出建物模型在彈性範圍內，是否符合與實驗模擬相同之頂層加速度減少趨勢。

■試驗步驟：操作程序說明如下圖所示

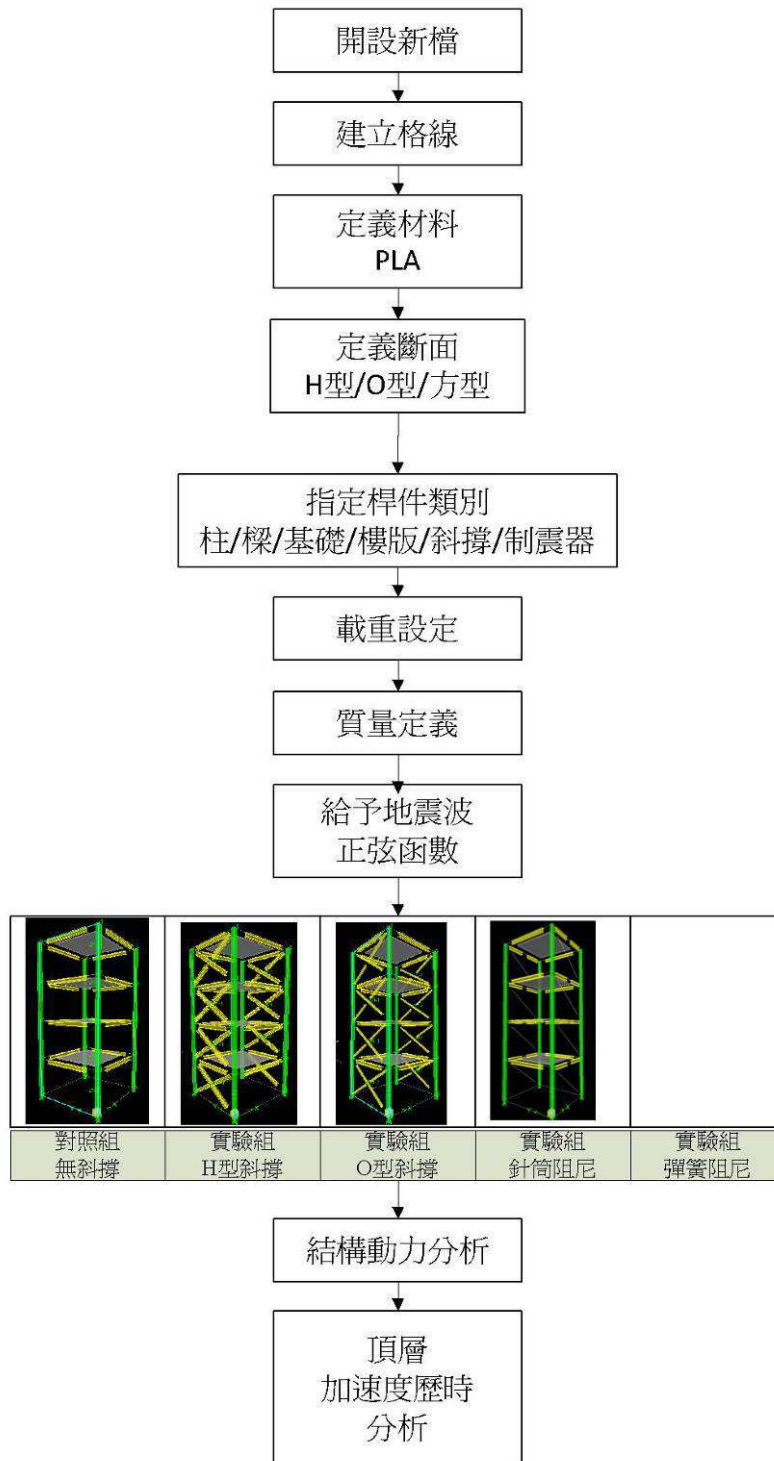


圖 4-3 數值模擬 ETABS 程式之操作流程圖

伍、研究結果

本專題係透過 3D 列印機、六軸式電動平台、微振動感測設備，以及結構分析程式 ETABS 進行一系列的實驗，以下就實驗結果分為 3D 桿件力學特性、耐震實驗試驗模擬、數值模擬分析結果依序分項說明如下：

一、3D 桿件特性

為了測試 3D 列印對於縮尺結構桿件的問題，故採用之控制變因-列印方向（直立與橫列）、列印線材(PLA;ABS)、設定厚度(樑： W0.3F0.4、W0.6F0.8、W0.9F1.2 ;柱： 0.65cm、1.3cm、1.95cm ;試片： 0.6cm、0.9cm、1.2cm)、接合方式(柱抗折、試片抗拉)、斷面樣式改變(樑抗折)、同時列印數量(柱、樑抗壓： 單印 1 支、並列 4 支、並列 8 支)，以下就幾點要項的實驗階段結果分析如下：

本研究在實驗材料特性，其結果如下：

(一) 抗折強度-柱

表 5-1 柱桿件之 3D 列印類別與抗折強度分析探討一覽表

項目	主題	分類	有無支撐線材	代號	設計長度 (cm)	設計寬度 (cm)		設計厚度 (cm)	實際長度 (cm)	實際寬度 (cm)		實際厚度 (cm)	重量 (g)	顏色	材質	抗折強度 (kg/cm ²)
						長	寬			長	寬					
1	方向	直立	無	BC-U-2	12.000	0.750	0.750	0.130	11.999	0.748	0.756	0.121	4.573	白	PLA	83.581
2		橫列	有	BC-H-1	12.000	0.750	0.750	0.130	12.117	0.769	0.770	0.130	5.638	白	PLA	177.661
3		橫列	無	BC-H-2	12.000	0.750	0.750	0.130	12.127	0.799	0.780	0.124	5.137	白	PLA	144.749
4	材質	PLA	無	BC-PLA	12.000	0.750	0.750	0.130	12.008	0.748	0.756	0.121	4.573	白	PLA	83.581
5		ABS	無	BC-ABS	12.000	0.750	0.750	0.130	12.030	0.763	0.754	0.127	3.085	白	PLA	43.968
6	厚度	0.65	無	BC-T-065	12.000	0.750	0.750	0.065	11.980	0.758	0.763	0.066	2.543	白	PLA	54.015
7		1.30	無	BC-T-130	12.000	0.750	0.750	0.130	11.999	0.748	0.756	0.121	4.573	白	PLA	217.214
8		1.95	無	BC-T-195	12.000	0.750	0.750	0.195	12.003	0.748	0.749	0.189	6.758	白	PLA	422.905
9	接合	焊接	無	BC-R	12.000	0.750	0.750	0.130	11.986	0.748	0.750	0.139	4.847	白	PLA	39.553

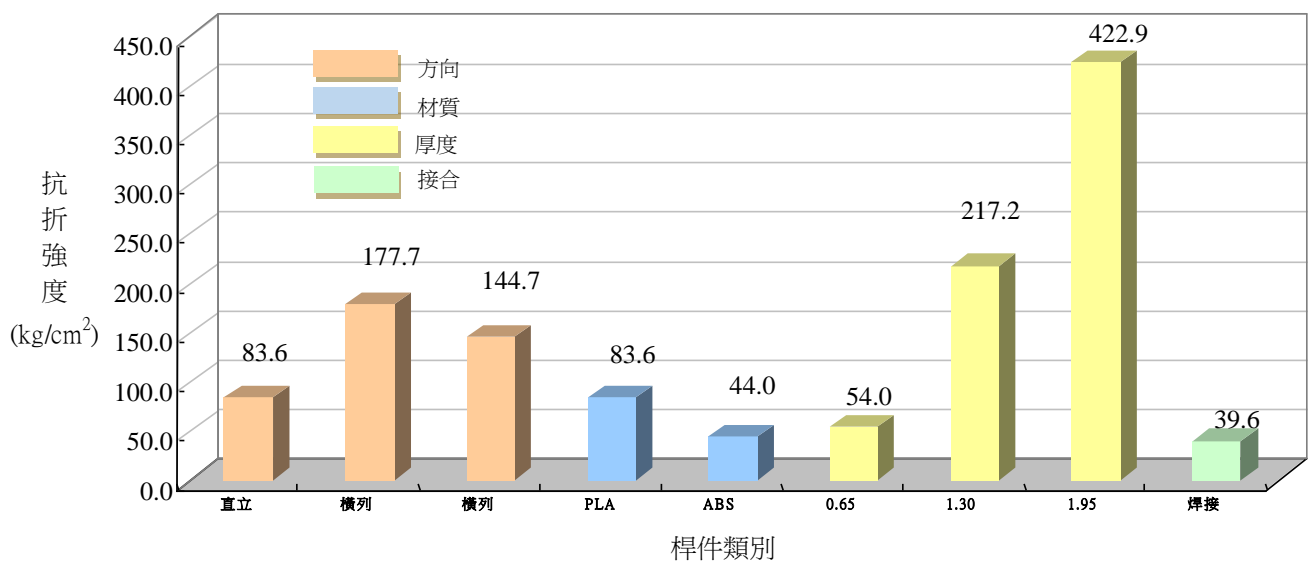


圖 5-1 柱桿件於 3D 列印類別與抗折強度之關係圖

1. 量化分析部分：

列印方向：由圖 5-1 得知，橫列無論有無支撐線材，抗折強度皆提升 18%~53%。

線材材質：PLA 較 ABS 強度多達 48%。

設定厚度：厚度愈大，抗折性隨之增加，最高達 88%。

2. 質化分析部分：推估原因

(1) 加入支撐線材後，造桿件厚度細微的變化以及列印的更完全、密實。

(2) 材質的不同會對熔絲列印黏合後的韌性產生差異。

(二) 抗折強度-樑

表 5-2 樑桿件之 3D 列印類別與抗折強度分析探討一覽表

項目	主題	分類	有無支撐線材	代號	設計長度 (cm)	設計寬度 (cm)		設計厚度 (cm)		實際長度 (cm)	實際寬度 (cm)		實際厚度 (cm)		重量 (g)	顏色	材質	抗折強度 (kg/cm ²)
						腹板	翼板	腹板	翼板		腹板	翼板	腹板	翼板				
						1	方向	直立	無		BB-U-2	12.000	0.850	0.625				
2	橫列	有	BB-H-1	12.000	0.850	0.625		0.030	0.040	12.147	0.848	0.632	0.064	0.081	2.705	白	PLA	26.078
3		無	BB-H-2	12.000	0.850	0.625		0.030	0.040	12.160	0.846	0.638	0.111	0.071	2.138	白	PLA	20.532
4	材質	PLA	無	BB-PLA	12.000	0.850	0.625	0.030	0.040	12.012	0.876	0.587	0.027	0.057	1.366	白	PLA	10.575
5		ABS	無	BB-ABS	12.000	0.850	0.625	0.030	0.040	12.026	0.880	0.615	0.127	0.108	2.343	白	PLA	35.094
6	厚度	W0.3F0.4	無	BB-U-0304	12.000	0.850	0.625	0.030	0.040	12.012	0.876	0.587	0.027	0.057	1.366	白	PLA	10.575
7		W0.6F0.8	無	BB-T-0608	12.000	0.850	0.625	0.060	0.080	11.969	0.845	0.638	0.055	0.070	1.994	白	PLA	62.821
8		W0.9F1.2	無	BB-T-0912	12.000	0.850	0.625	0.090	0.120	12.010	0.863	0.636	0.085	0.112	2.982	白	PLA	146.133
9	斷面	圓形	無	BB-R	12.000	0.650		0.065		120.350	6.570		0.800		1.948	白	PLA	34.652
10		方形	無	BC-U-1	12.000	0.750	0.750	0.130		11.999	0.748	0.756	0.121		4.573	白	PLA	84.384
11		H形	無	BB-U-2	12.000	0.850	0.625	0.030	0.040	12.012	0.876	0.587	0.027	0.057	1.366	白	PLA	17.329

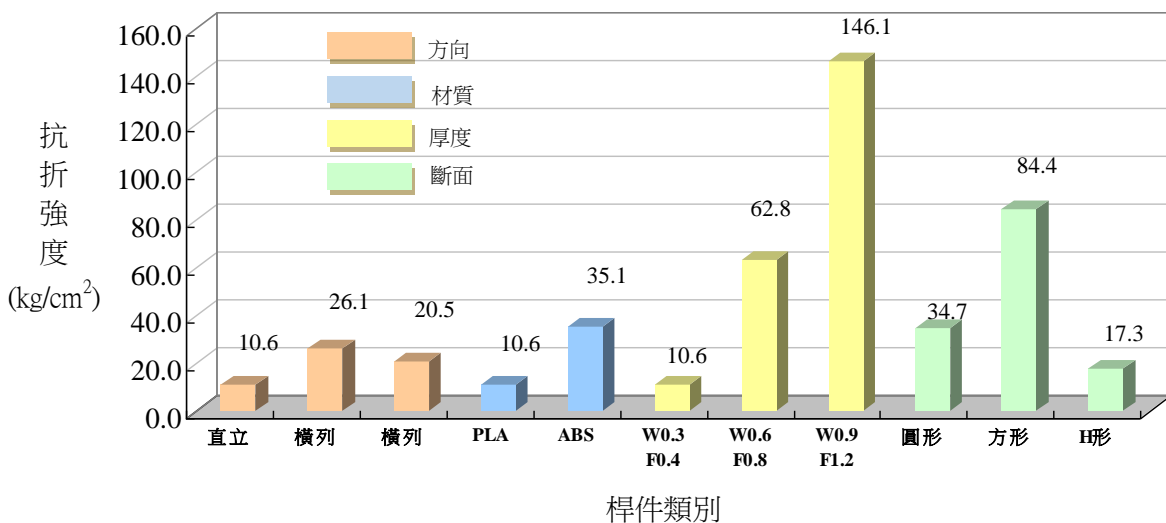


圖 5-2 梁桿件 3D 列印類別與抗折強度之關係圖

1. 量化分析部分：

列印方向：由圖 5-2 得知，橫列無論有無支撐線材，抗折強度皆提升 21%~60%。

線材材質：ABS 較 PLA 強度多達 70%。

設定厚度：厚度愈大，抗折性隨之增加，最高達 93%。

鋼材型式：方形較圓形及 H 型強度多達 58%~80%。

2. 質化分析部分：推估原因除呈上所述外，形式的不同會對受力的大小產生改變。

(三) 抗壓強度-樑

表 5-3 樑桿件之 3D 列印類別與抗壓強度分析探討一覽表

項目	主題	分類	有無支撐線材	代號	設計長度 (cm)	設計寬度 (cm)		設計厚度 (cm)		實際長度 (cm)	實際寬度 (cm)		實際厚度 (cm)		面積 (cm ²)	重量 (g)	顏色	材質	抗壓強度 (kg/cm ²)
						腹板	翼板	腹板	翼板		腹板	翼板	腹板	翼板					
1	方向	直列	無	CB-U-2	2	0.85	0.625	0.08	0.06	1.997	0.847	0.619	0.905	0.590	1.496	0.3065	白	PLA	515.0
2		橫列	有	CB-H-1	2	0.85	0.625	0.08	0.06	2.010	0.845	0.627	0.710	0.775	1.572	0.4675	白	PLA	546.4
3			無	CB-H-2	2	0.85	0.625	0.08	0.06	2.010	0.844	0.618	0.735	1.035	1.901	0.327	白	PLA	410.0
4	材質	PLA	無	CB-PLA	2	0.85	0.625	0.08	0.06	1.997	0.847	0.619	0.091	0.059	1.496	0.3065	白	PLA	515.0
5		ABS	無	CB-ABS	2	0.85	0.625	0.08	0.06	2.031	0.876	0.639	0.123	0.087	0.218	0.392	白	ABS	471.4
6	厚度	F0.4W0.3	無	CB-T-0403	2	0.85	0.625	0.04	0.03	2.010	0.850	0.619	0.041	0.033	0.075	0.28	白	PLA	411.5
7		F0.8W0.6	無	CB-T-0806	2	0.85	0.625	0.08	0.06	1.997	0.847	0.619	0.091	0.059	0.150	0.3065	白	PLA	515.0
8		F1.2W0.9	無	CB-T-1209	2	0.85	0.625	0.12	0.09	2.018	0.852	0.636	0.126	0.103	0.238	0.4975	白	PLA	650.7
9	數量	單印 1 支	無	CB-N1	2	0.85	0.625	0.08	0.06	2.013	0.823	0.606	0.085	0.068	0.152	0.325	白	PLA	568.1
10		並列 4 支	無	CB-N4	2	0.85	0.625	0.08	0.06	2.012	0.825	0.619	0.095	0.068	0.163	0.3275	白	PLA	422.5
11		並列 8 支	無	CB-N	2	0.85	0.625	0.08	0.06	1.998	0.825	0.620	0.085	0.068	0.153	0.3285	白	PLA	365.8

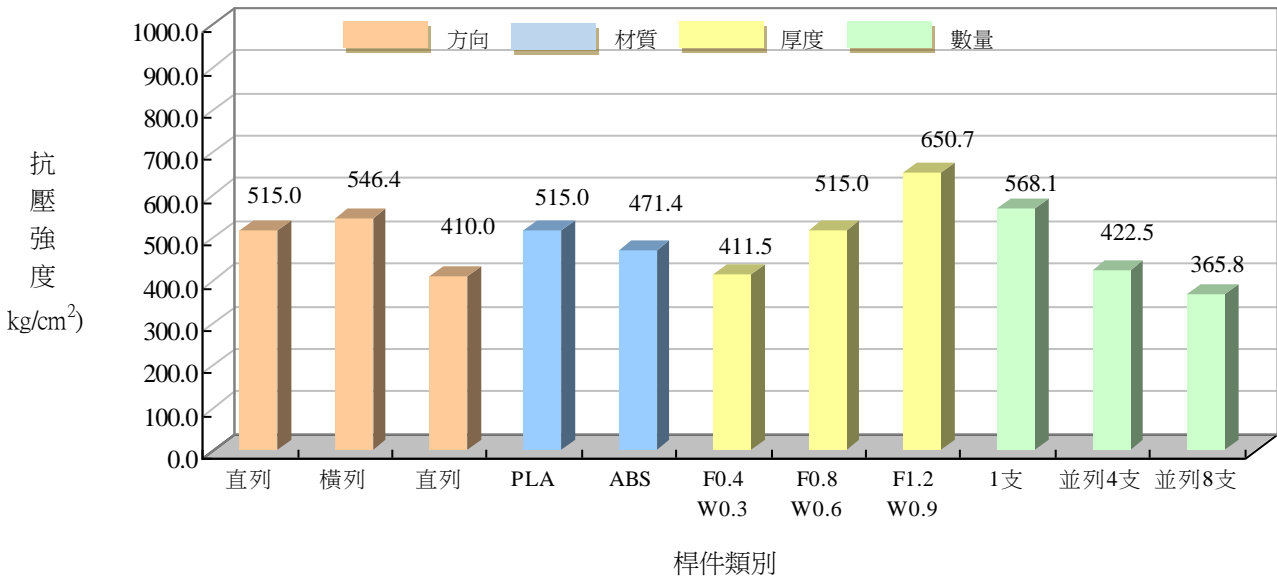


圖 5-3 樑桿件 3D 列印類別與抗壓強度之關係圖

1. 量化分析部分：

列印方向：由圖 5-3 得知，抗壓直立列印的強度大於 5%~25%。

線材材質：PLA 較 ABS 強度多達 9%。

設定厚度：厚度愈小，抗壓性隨之增加，最高達 37%。

輸出數量：同時列印的越少，強度即隨之增加，最高達 36%。

2. 質化分析部分：推估原因

- (1) 因印製方式不同後，造成桿件紋理不同。
- (2) 材質的不同會產生材質壓縮能力的不同。
- (3) 大量生產，品質就會降低。

(四) 抗壓強度-柱

表 5-4 柱桿件之 3D 列印類別與抗壓強度分析探討一覽表

項目	主題	分類	有無支撐線材	代號	設計長度 (cm)	設計寬度 (cm)		設計厚度 (cm)	實際長度 (cm)	實際寬度 (cm)		實際厚度 (cm)	面積 (cm ²)	重量 (g)	顏色	材質	抗壓強度 (kg/cm ²)
						寬	寬			寬	寬						
1	方向	直列	無	CC-U-2	2	0.75	0.75	0.13	1.997	0.847	0.619	0.905	0.328228	0.6905	白	PLA	534.07
2		橫列	有	CC-H-1	2	0.75	0.75	0.13	2.010	0.845	0.627	0.710	0.328654	0.9495	白	PLA	688.78
3			無	CC-H-2	2	0.75	0.75	0.13	2.010	0.844	0.618	0.735	0.338552	0.754	白	PLA	615.69
4	材質	PLA	無	CC-PLA	2	0.75	0.75	0.13	1.997	0.847	0.619	0.091	0.328228	0.6905	白	PLA	534.07
5		ABS	無	CC-ABS	2	0.75	0.75	0.13	2.031	0.876	0.639	0.123	0.311096	0.5025	白	ABS	317.01
6	厚度	0.65	無	CC-T-065	2	0.75	0.75	0.13	2.010	0.850	0.619	0.041	0.166688	0.374	白	PLA	434.73
7		1.30	無	CC-T-130	2	0.75	0.75	0.13	1.997	0.847	0.619	0.091	0.328228	0.6905	白	PLA	688.78
8		1.95	無	CC-T-195	2	0.75	0.75	0.13	2.018	0.852	0.636	0.126	0.451828	0.9215	白	PLA	603.29
9	數量	單印 1 支	無	B-N1	2	0.75	0.75	0.13	2.013	0.823	0.606	0.085	0.311535	0.698	白	PLA	526.65
10		並列 4 支	無	B-N4	2	0.75	0.75	0.13	2.012	0.825	0.619	0.095	0.333199	0.6925	白	PLA	481.35
11		並列 8 支	無	B-N8	2	0.75	0.75	0.13	1.998	0.825	0.620	0.085	0.336993	0.6955	白	PLA	434.15

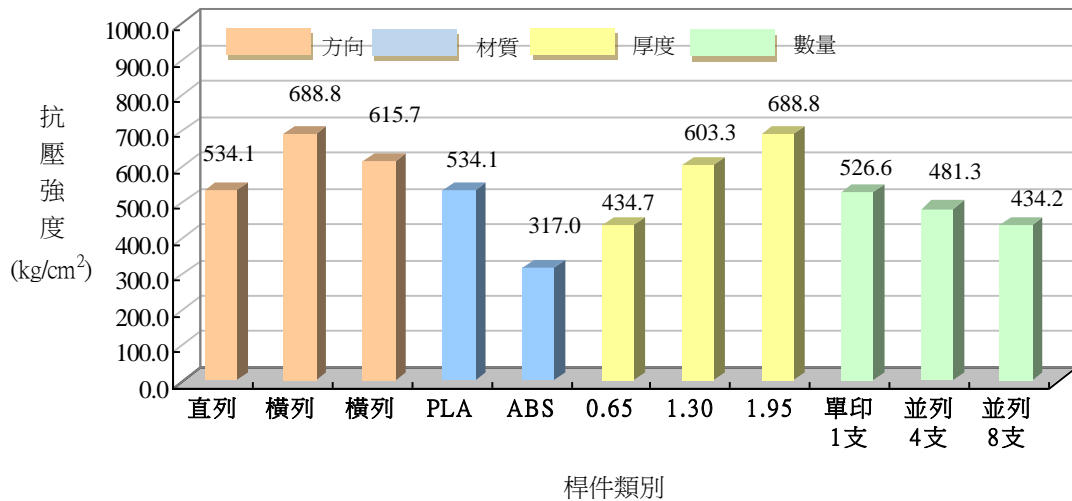


圖 5-4 柱桿件 3D 列印類別與抗壓強度之關係圖

1. 量化分析部分：

列印方向：由圖 5-4 得知，橫列無論有無支撐線材，抗壓強度皆提升 10%~23%。

線材材質：PLA 較 ABS 強度多達 41%。

設定厚度：1.3cm 較其他抗壓强度高，最高達 37%。

輸出數量：同時列印的越少，強度即隨之增加，最高達 18%。

2. 質化分析部分：推估原因與樑為相同原因所致

(五) 抗拉強度-試片

表 5-5 試片之抗拉強度材質分析探討一覽表

項目	主題	分類	代號	長度 (cm)	寬度上 (cm)	寬度中 (cm)	寬度下 (cm)	厚度上 (cm)	厚度中 (cm)	厚度下 (cm)	面積 (cm ²)	重量 (g)	顏色	材質	數量 (片)	抗拉強度 (kg)	抗拉強度 (kg/cm ²)
1	方向	直列	P-U	16.033	1.361	1.350	1.345	0.064	0.065	0.067	0.088	1.620	白	PLA	3	10.400	38.110
2		橫列	P-H	16.182	1.406	1.399	1.395	0.065	0.067	0.065	0.092	1.731	白	PLA	3	53.000	189.740
3	數量	並列 4 片	P-N4	16.017	1.387	1.378	1.053	0.064	0.064	0.063	0.081	1.593	白	PLA	3	6.450	60.732
4		並列 8 片	P-N8	16.027	1.380	1.374	1.384	0.067	0.064	0.068	0.092	1.621	白	PLA	3	6.300	23.525
5	材質	PLA	P-U	16.033	1.361	1.350	1.345	0.064	0.065	0.067	0.088	1.620	白	PLA	3	10.400	38.110
6		ABS	P-ABS	16.016	1.415	1.402	1.406	0.064	0.062	0.065	0.090	1.644	白	ABS	3	11.400	82.777

7		0.6cm	P-T-060	16.015	1.342	1.344	1.342	0.065	0.065	0.062	0.086	1.583	白	PLA	3	7.200	56.013
8	厚度	0.9cm	P-T-090	16.030	1.397	1.378	1.390	0.089	0.088	0.086	0.122	2.233	白	PLA	3	24.600	67.438
9		1.2cm	P-T-120	16.043	1.384	1.391	1.387	0.118	0.115	0.118	0.162	2.843	白	PLA	3	33.750	138.037

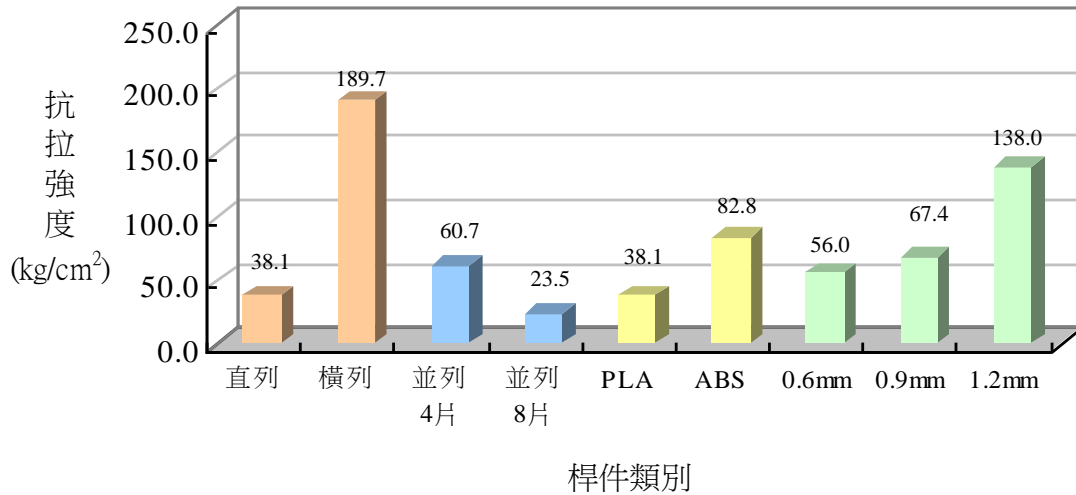


圖 5-5 3D 列印試片類別與抗拉強度之關係圖

1. 量化分析部分：

列印方向：由圖 5-5 得知，橫躺列印較直立列印之抗拉強度提升 80%。

輸出數量：同時列印的越少，強度即隨之增加，最高達 62%。

設定厚度：厚度愈大，抗拉性隨之增加，最高達 60%。

2. 質化分析部分：推估原因為印製方式不同後，造成試片紋理不同，且大量生產，品質仍就會降低之趨勢。

二、 實驗模擬--耐震實驗：

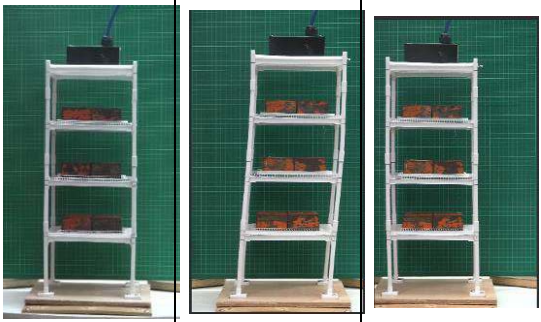
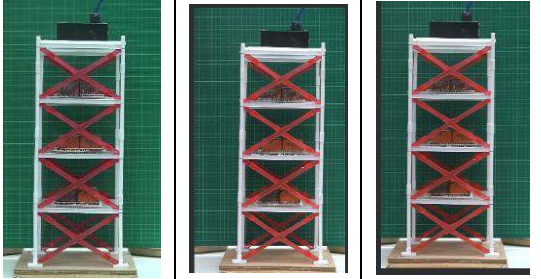
(一) H 型斜撐分析結果：

表 5-6 H 型斜撐實驗組與對照組於各週期之耐震試驗結果一覽表

	地震波加速度 (g)	輸出數據			自然振動頻率差值 (次/秒)
		對照組 無斜撐 Max	實驗組 H 型斜撐 Max	對照組與 實驗組 差值	
	0.000	0.000	0.000	2.988	0.00
短週期 0.10 sec/次	0.897	1.002	0.105	2.988	0.00
中週期 0.25 sec/次	0.902	0.677	-0.225	2.988	0.00
長週期 1.00 sec/次	0.319	0.206	-0.113	2.988	0.00

表 5-7 H 型斜撐實驗組與對照組於各週期之動態攝影結果一覽表

名稱	代號	自然振動頻率 與週期	靜止畫面	最大變位 畫面(右偏)	最大變位 畫面(左偏)	變位量
----	----	---------------	------	----------------	----------------	-----

無斜撐	NX	第三 周期 (長週期) (1.0sec/次)		107MM
H 型 斜撐	NX	第三 周期 (長週期) (1.0sec/次)		65MM

1. 量化分析：

- (1) 短週期：H型斜撐未受破壞，自然振動頻率與初始值相同，和無斜撐相較下加速度增加 11.7%。
- (2) 中週期：H型斜撐未受破壞，自然振動頻率與初始值相同，和無斜撐相較下加速度減少 24.9%。
- (3) 長週期：H型斜撐未受破壞，自然振動頻率與初始值一樣，和無斜撐相較下加速度減少 35.4%。

2. 質化分析：




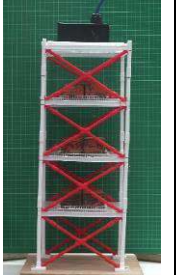
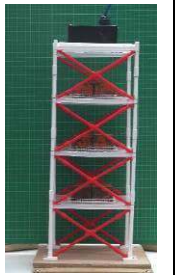
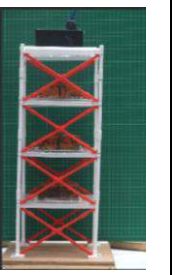
- (1) 短週期：H型斜撐和無斜撐相較，加速度增加，因斜撐加強結構勁度，故結構物在短週期下加速度較大
- (2) 中週期：H型斜撐和無斜撐相較，加速度數值下降，斜撐發揮作用
- (3) 長週期：H型斜撐和無斜撐相較，加速度數值下降，斜撐發揮作用

(二) O 型斜撐分析結果：

表 5-8 O 型斜撐實驗組與對照組於各週期之耐震試驗結果一覽表

	輸入數據	地震波加速度 (g)			輸出數據	自然 振動頻率 差值 (次/秒)
	地震波 週期	對照組 無斜撐 Max	實驗組 O 型斜撐 Max	對照組與 實驗組 差值	實驗組 自然振動 頻率 (Hz)	
	0.000	0.000	0.000	0.000	2.988	0.00
短週期 0.10 sec/次	0.100	0.897	1.810	0.913	2.988	0.00
中週期 0.25 sec/次	0.250	0.902	0.711	-0.191	2.988	0.00
長週期 1.00 sec/次	1.000	0.319	0.188	-0.131	2.988	0.00

表 5-9 O 型斜撐實驗組與對照組於各週期之動態攝影結果一覽表

名稱	代號	自然振動頻率與週期	靜止畫面	最大變位畫面(右偏)	最大變位畫面(左偏)	變位量
無斜撐	NX	第三 周期 (長週期) (1.0sec/次)				107MM
O 型斜撐	NX	第三 周期 (長週期) (1.0sec/次)				60MM

1.量化分析：

- (1)短週期：O 型斜撐未受破壞，自然振動頻率與初始值相同，和無斜撐相較下加速度增加 **50.4%**。
- (2)中週期：O 型斜撐未受破壞，自然振動頻率與初始值相同，和無斜撐相較下加速度減少 **21.2%**。
- (3)長週期：O 型斜撐未受破壞，自然振動頻率與初始值一樣，和無斜撐相較下加速度減少 **41.1%**。

2.質化分析：

- (1)短週期：O 型斜撐和無斜撐相較，加速度增加，因斜撐加強結構勁度，故結構物在短週期下加速度較大，和 H 型斜撐相較，加速度較高，因 O 型斜撐圓管厚度較厚，故勁度增加，加速度增加。
- (2)中週期：O 型斜撐和無斜撐相較，加速度數值下降，斜撐發揮作用。
- (3)長週期：O 型斜撐和無斜撐相較，加速度數值下降，斜撐發揮作用。




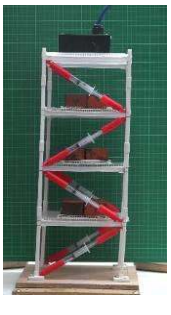
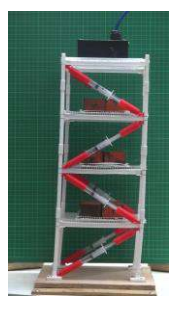
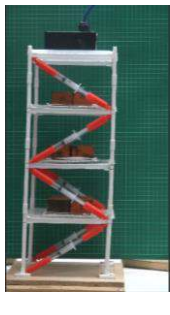
(三) 針筒制震分析結果：

表 5-10 針筒制震實驗組與對照組於各週期之耐震試驗結果一覽表

	輸入數據	地震波加速度 (g)			輸出數據	自然振動頻率差值 (次/秒)
	地震波週期	對照組無斜撐 Max	實驗組針筒制震 Max	對照組與實驗組差值	實驗組自然振動頻率 (Hz)	
1	0.000	0.000	0.000	0.000	2.988	0.00

短週期 0.10 sec/次	0.100	0.897	0.488	-0.409	2.988	0.00
中週期 0.25 sec/次	0.250	0.902	0.688	-0.214	2.988	0.00
長週期 1.00 sec/次	1.000	0.319	0.168	-0.151	2.988	0.00

表 5-11 針筒制震實驗組與對照組於各週期之動態攝影結果一覽表

名稱	代號	自然振動頻率與週期	靜止畫面	最大變位畫面(右偏)	最大變位畫面(左偏)	變位量
無斜撐	NX	第三 周期 (長週期) (1.0sec/次)				107MM
針筒制震	OD	第三 周期 (長週期) (1.0sec/次)				71MM

1. 量化分析：


- (1)短週期：針筒制震未受破壞，自然振動頻率與初始值相同，和無斜撐相較下加 速度減少 45.6%。
- (2)中週期：針筒制震未受破壞，自然振動頻率與初始值相同，和無斜撐相較下加 速度減少 23.7%。
- (3)長週期：針筒制震未受破壞，自然振動頻率與初始值一樣，和無斜撐相較下加 速度減少 47.3%。

2. 質化分析：

- (1)短週期：針筒制震和無斜撐相較，加速度數值下降，斜撐發揮作用。
- (2)中週期：針筒制震和無斜撐相較，加速度數值下降，斜撐發揮作用。
- (3)長週期：針筒制震和無斜撐相較，加速度數值下降，斜撐發揮作用。




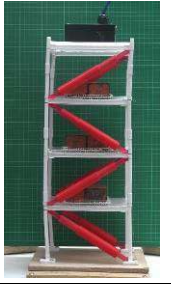


(四) 彈簧制震分析結果：

表 5-12 彈簧制震實驗組與對照組於各週期之耐震試驗結果一覽表

	輸入數據	地震波加速度 (g)			輸出數據	自然 振動頻率 差值 (次/秒)
	地震波 週期	對照組 無斜撐 Max	實驗組 彈簧制震 Max	對照組與 實驗組 差值	實驗組 自然振動 頻率 (Hz)	

1	0.000	0.000	0.000	0.000	2.988	0.00
2	0.100	0.897	0.480	-0.417	2.988	0.00
3	0.250	0.902	0.592	-0.310	2.988	0.00
4	1.000	0.319	0.291	-0.028	2.988	0.00

表 5-13 彈簧制震實驗組與對照組於各週期之動態攝影結果一覽表

名稱	代號	自然振動頻率 與週期	靜止畫面	最大變位 畫面(右偏)	最大變位 畫面(左偏)	變位量
無斜撐	NX	第三 周期 (長週期) (1.0sec/次)				107MM
彈簧 制震	HD	第三 周期 (長週期) (1.0sec/次)				91MM

1. 量化分析：

- (1)短週期：彈簧制震未受破壞，自然振動頻率與初始值相同，和無斜撐相較下加速度減少**46.5%**。
- (2)中週期：彈簧制震未受破壞，自然振動頻率與初始值相同，和無斜撐相較下加速度減少**34.4%**。
- (3)長週期：彈簧制震未受破壞，自然振動頻率與初始值一樣，和無斜撐相較下加速度減少**8.8%**，**結構物此時已損壞**。

2. 質化分析：

- (1)短週期：針筒制震和無斜撐相較，加速度數值下降，斜撐發揮作用。
- (2)中週期：針筒制震和無斜撐相較，加速度數值下降，斜撐發揮作用，自然振動頻率下降，外部無明顯破壞。
- (3)長週期：針筒制震和無斜撐相較，加速度數值些微下降，一樓四根樑斷裂，一根斜撐斷裂，二樓一根樑斷裂，一根斜撐斷裂且完全脫落，三樓一根斜撐斷裂，結構多處受損**嚴重損壞**。

三、 數值模擬--動力分析：

透過 ETABS 結構分析程式，輸入與 3D 列印建模之幾何斷面與材料性質一致的參數，針對加速度歷時與位移歷時之分析結果說明如下

(一) 加速度歷時分析結果：

因彈簧與針筒制震系統之輸入參數有疑義，故本章節暫不討論，待釐清正確輸入方式後，方進行合理之推論。故以下針對 H 型斜撐與 O 型斜撐進行分析：

表 5-14 針筒制震實驗組與對照組於各週期之數值模擬結果一覽表

數值模擬步驟			1	2		3	4		5	6		7	9
量測項目		本身	短週期		短週期	中週期		中週期	長週期		長週期	共振週期	
		自然	地震波		搖後	地震波		搖後	地震波		搖後	自然	
		震動	頂層加速度		自然震動	頂層加速度		自然震動	頂層加速度		自然震動	震動	
		頻率	(cm/sec ²)		頻率	(cm/sec ²)		頻率	(cm/sec ²)		頻率	頻率	
		(Hz)	Max	Min	(Hz)	Max	Min	(Hz)	Max	Min	(Hz)	(Hz)	
對照組	無斜撐		2.988	606.5	-730.3	2.988	2365	-2451.000	2.988	7902.000	-7643.000	2.988	2.637
實驗組	H 型斜撐	原數據	2.988	20.910	-17.200	2.988	168.800	-168.700	2.988	1.993	-1.997	2.988	2.637
		差異值	0.000	-585.590	713.100	0.000	-2196.200	2282.300	0.000	-7900.007	7641.003	0.000	0.000
	O 型斜撐	原數據	2.520	17.790	-12.860	2.520	43.450	-43.050	2.520	1.824	-1.856	2.520	2.285
		差異值	-0.468	-588.710	717.440	-0.468	-2321.550	2407.950	-0.468	-7900.176	7641.144	-0.468	-0.352
	針筒阻尼	原數據	2.402	63.400	-63.830	2.402	49.930	-49.950	2.402	2.318	-2.233	2.402	2.285
		差異值	-0.586	-543.100	666.470	-0.586	-2315.070	2401.050	-0.586	-7899.682	7640.767	-0.586	-0.352
	彈簧阻尼	原數據	3.105	14.530	-14.230	3.105	26.430	-25.280	2.637	2.617	-2.611	2.402	-
		差異值	0.117	-591.970	716.070	0.117	-2338.570	2425.720	-0.351	-7899.383	7640.389	-0.586	-

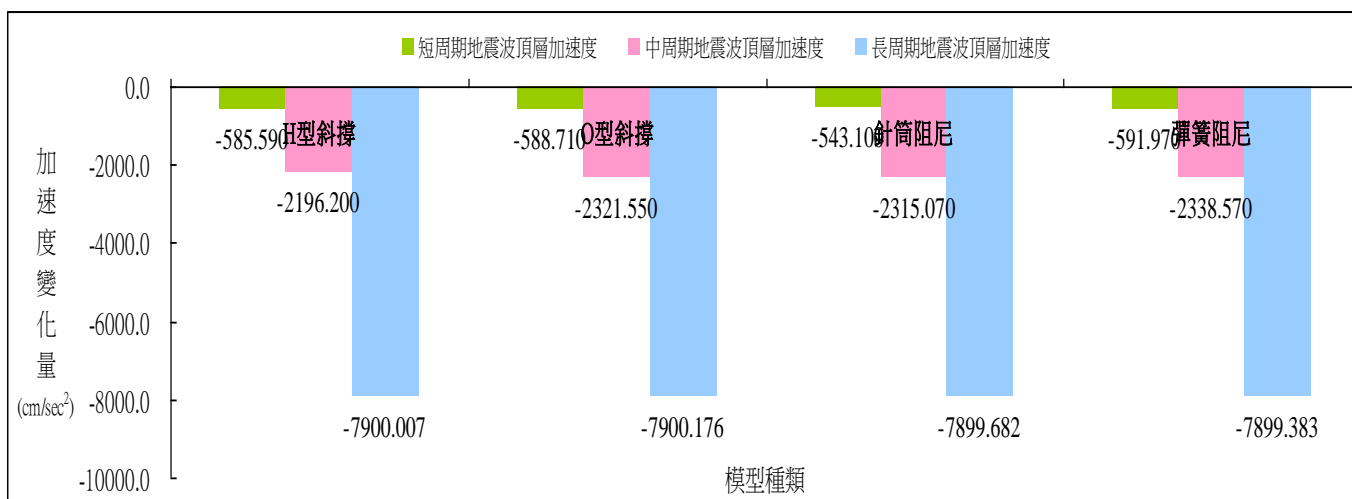


圖 5-6 針筒制震實驗組與對照組於各週期之加速度差值結果

由上圖結果顯示，各建物模型在長週期具有明顯之加速度減低效果，但在短週期與中週期皆較不明顯現象，推估原因為該模型之自然振動頻率較接近其地震波之數值。

(二) 位移歷時分析結果：

表 5-15 針筒制震實驗組與對照組於各週期之數值模擬結果一覽表

數值模擬步驟			1	2		3	4		5	6		7	9
量測項目		本身 自然 震動 頻率 (Hz)	短週期 地震波 頂層加速度 (cm/sec ²)		短週期 搖後 自然震動 頻率 (Hz)	中週期 地震波 頂層加速度 (cm/sec ²)		中週期 搖後 自然震動 頻率 (Hz)	長週期 地震波 頂層加速度 (cm/sec ²)		長週期 搖後 自然震動 頻率 (Hz)	共振週期 自然 震動 頻率 (Hz)	
			Max	Min		Max	Min		Max	Min			
			對照組	無斜撐	2.988	18.23	-17.29	2.988	47.26	-43.910	2.988	293.400	-301.700
實驗組	H 型斜撐	原數據	2.988	0.008	-0.008	2.988	0.253	-0.253	2.988	0.011	-0.011	2.988	2.637
		差異值	0.000	-18.222	17.282	0.000	-47.007	43.657	0.000	-293.389	301.689	0.000	0.000
	O 型斜撐	原數據	2.520	8808.000	-8772.000	2.520	614.300	-616.200	2.520	8943.000	-9082.000	2.520	2.285
		差異值	-0.468	8789.770	-8754.710	-0.468	567.040	-572.290	-0.468	8649.600	-8780.300	-0.468	-0.352
	針筒阻尼	原數據	2.402	233.100	-232.500	2.402	878.700	-879.000	2.402	149.100	-148.600	2.402	2.285
		差異值	-0.586	214.870	-215.210	-0.586	831.440	-835.090	-0.586	-144.300	153.100	-0.586	-0.352
	彈簧阻尼	原數據	3.105	8161.000	-8001.000	3.105	505.200	-506.600	2.637	194.600	-197.600	2.402	-
		差異值	0.117	8142.770	-7983.710	0.117	457.940	-462.690	-0.351	-98.800	104.100	-0.586	-

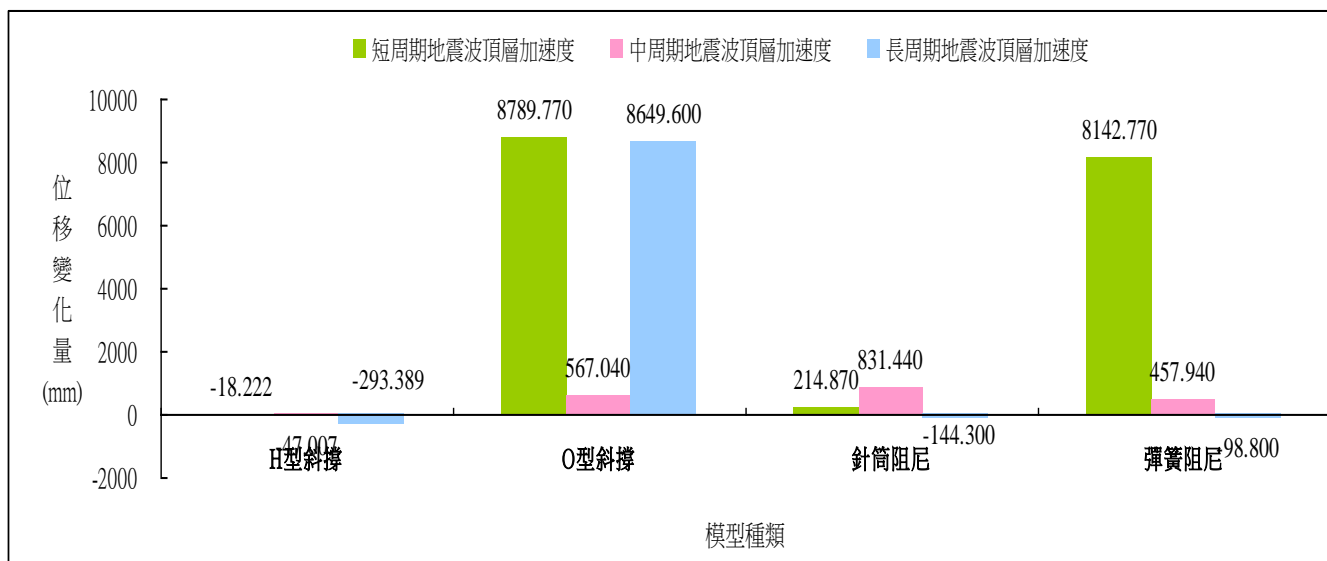


圖 5-7 針筒制震實驗組與對照組於各週期之位移歷時差異結果

由上圖結果顯示，H 型、針筒、及彈簧阻尼在長週期具有明顯之位移量減低成效，但在 O 型斜撐卻在中週期有提高現象，推估原因為該模型之自然振動頻率較接近其地震波之數值。

陸、討論

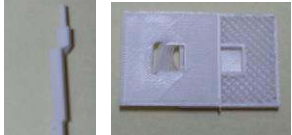

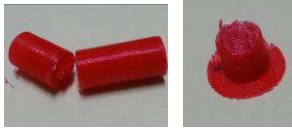

一、3D 桿件特性研究

本研究材料特性，目的是為了可以驗證 3D 列印製實驗桿件的可行性，因此我們進行了抗折、抗壓、抗拉實驗，結果彙整如下：

- (一) 列印方向：列印元件在橫躺列印時，無論有無支撐線材，抗折、抗壓、抗拉實驗強度皆比直立列印有明顯提升效果，而樑亦此如此。
- (二) 線材材質：在柱抗折上，PLA 較 ABS 抗折強度多達 48%，而在梁抗折上，ABS 則較 PLA 抗折強度多達 70%。樑抗壓時，PLA 較 ABS 強度多達 2%，而柱抗壓時，PLA 較 ABS 強度多達 41%。
- (三) 設定厚度：厚度愈大，無論樑、柱、或試片之抗壓、抗拉與抗折性皆隨有增加強度趨勢。
- (四) 桿件形式：方形較圓形及 H 型強度多達 58%~80%。
- (五) 輸出數量：透過 3D 列印大量生產，品質就會降低。樑或柱同時列印數量的越少，強度就會增加。

本研究在 3D 列印過程產生許多問題，如下表所示，且產出之元件，經由量測發現，雖能達到尺寸均一之特點，但卻無法控制每一成品之力學性質之等質性，其原因在於列印係採噴頭之熔絲製造成品，故其內部產生堆疊上的冷縫，造成力學特性的變異數。

表 6-1 3D 列印過程中產生問題與解決方法一覽表

項次	失敗現象	圖片	問題	解決
1	偏移		1.3D 列印機噴頭列印產生錯位。	請廠商做軟體更新及檢查履帶是否有定位問題。
2	主體站立不穩		1.打底不完全 2.平台粗度更改過小 3.未選打底形式導致不穩。	1.將線材於列印前做預擠動作使出料順暢。 2.注意平台粗糙度使否為 0.1。 3.打印前可使用口紅膠讓主體站穩。
3	虛化及卡料		1.未做預擠動作。 2.未開 50%風扇。 3.線材口徑設定錯誤。	1.注意做好預擠動作。 2.將風扇開至 50%。 3.注意線材口徑與本身線材是否相符合。
4	厚度過小		1.再做設計時厚度與打印出料口徑不相符合。	1.在設計時建議是以出料孔徑為倍數設計。

二、模型實際耐震模擬

表 6-2 各 3D 列印縮尺建物模型之耐震實驗的加速度歷時分析一覽表

實驗模擬步驟			1	2	3	4	5	6	7	9
量測項目			本身自然 震動頻率 (Hz)	短週期 頂層加速度 (g) Max	搖後自然 震動頻率 (Hz)	中週期 頂層加速度 (g) Max	搖後自然 震動頻率 (Hz)	長週期 頂層加速度 (g) Max	搖後自然 震動頻率 (Hz)	共振週期 自然震動 頻率(Hz)
對照組	無斜撐		2.988	0.897	2.988	0.902	2.988	0.319	2.988	2.637
實驗組	H 型	原數據	2.988	1.002	2.988	0.677	2.988	0.206	2.988	2.637
		差異值	0.000	0.105	0.000	-0.225	0.000	-0.113	0.000	0.000
	O 型	原數據	2.520	1.810	2.520	0.711	2.520	0.188	2.520	2.285
		差異值	-0.468	0.913	-0.468	-0.191	-0.468	-0.131	-0.468	-0.352
	針筒	原數據	2.402	0.488	2.402	0.688	2.402	0.168	2.402	2.285
		差異值	-0.586	-0.409	-0.586	-0.214	-0.586	-0.151	-0.586	-0.352
	彈簧	原數據	3.105	0.480	3.105	0.592	2.637	0.291	2.402	-
		差異值	0.117	-0.417	0.117	-0.310	-0.351	-0.028	-0.586	-

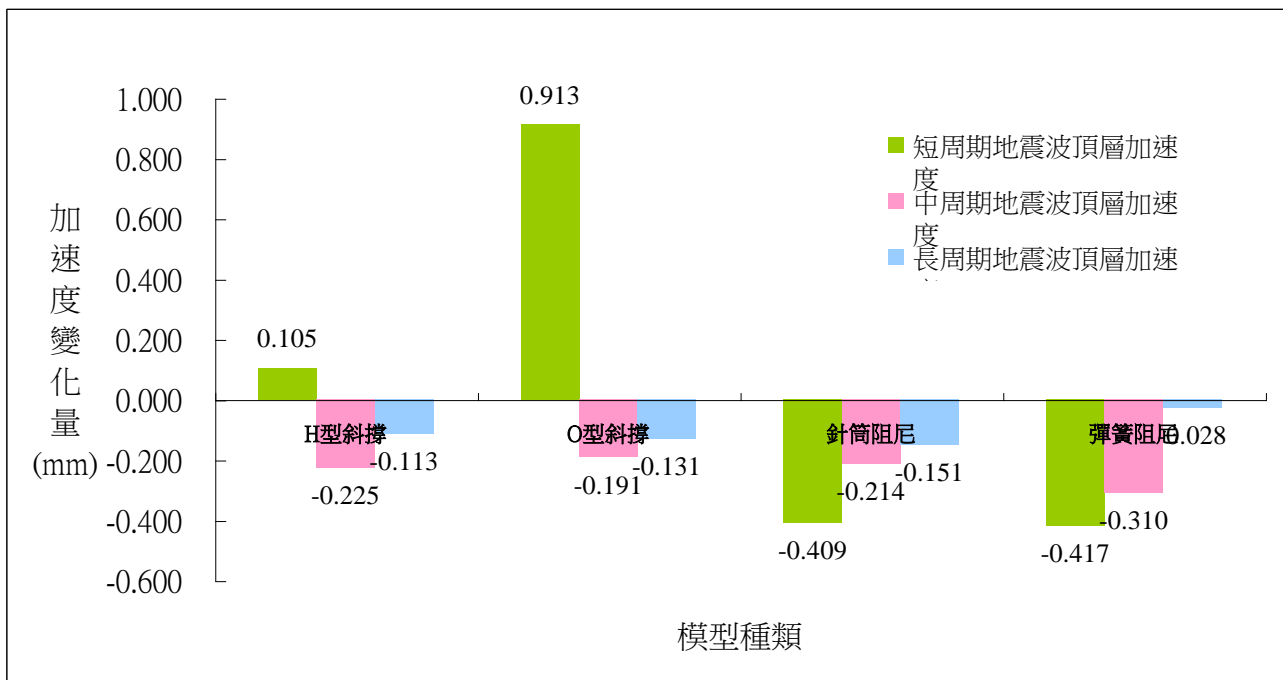


圖 6-1 各 3D 列印縮尺建物模型之耐震實驗的加速度歷時比較圖

將各建物模型與對照組作一比較，發現各模型之加速度歷時數值皆有減低趨勢，制震效果越佳，其中彈簧阻尼與針筒阻尼產生制震效果越佳。推估原因在短週期中，因搖動幅度小，其彈簧阻尼即用其彈簧吸收震動以達抗震效果，但在中週期中，因搖動幅度接近共振，且彈簧壓力過大，其彈簧阻尼亦無法提升其抗震效果。而在長週期中，因搖動幅度大，其針筒阻尼係以空壓提升其抗震效果。

表 6-3 各 3D 列印縮尺建物模型之耐震實驗的位移度歷時分析一覽表

實驗模擬步驟		1	2	3	4	5	6	7	9	
量測項目	本身自然震動頻率 (Hz)	短週期頂層位移 (mm)	搖後自然震動頻率 (Hz)	中週期頂層位移 (mm)	搖後自然震動頻率 (Hz)	長週期頂層位移 (mm)	搖後自然震動頻率 (Hz)	共振週期自然震動頻率 (Hz)		
										Max
對照組	無斜撐	2.988	18	2.988	50	2.988	107	2.988	2.637	
實驗組	H 型斜撐	原數據	2.988	7	2.988	16	2.988	65	2.988	2.637
		差異值	0.000	-11	0.000	-34	0.000	-42	0.000	0.000
	O 型斜撐	原數據	2.520	10	2.520	23	2.520	60	2.520	2.285
		差異值	-0.468	-8	-0.468	-27	-0.468	-47	-0.468	-0.352
	針筒阻尼	原數據	2.402	10	2.402	37	2.402	71	2.402	2.285
		差異值	-0.586	-8	-0.586	-13	-0.586	-36	-0.586	-0.352
	彈簧阻尼	原數據	3.105	9	3.105	43	2.637	91	2.402	-
		差異值	0.117	-9	0.117	-7	-0.351	-16	-0.586	-

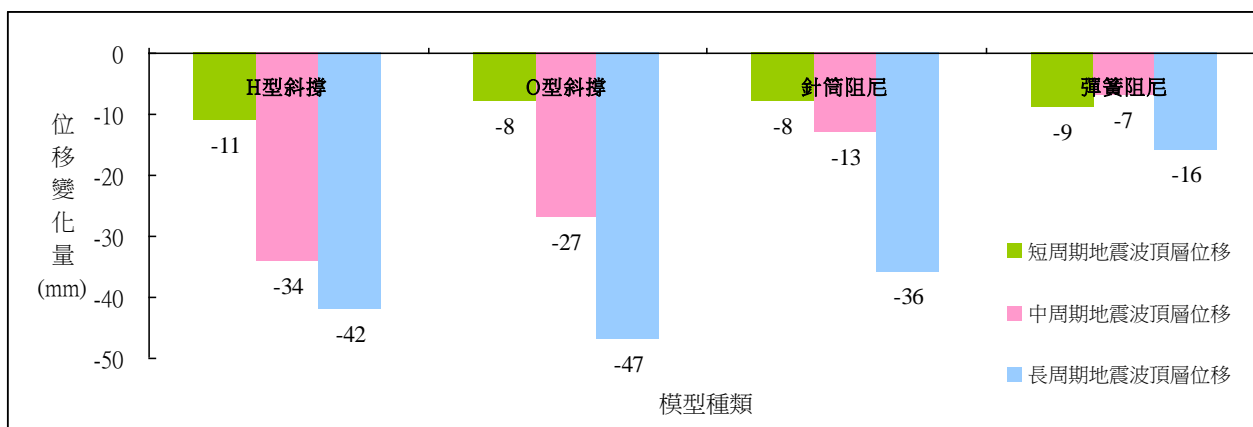


圖 6-2 各 3D 列印縮尺建物模型之耐震實驗的位移歷時比較圖

將無斜稱建物模型與實驗組各模型針對位移歷時作一比較，發現其差值越小，抗震就越強，無論是短週期、中週期、長週期之地震波頂層位移，皆具有減少位移量之成效。

三、模型數值動力模擬

因彈簧與針筒制震系統之輸入參數有疑義，故本章節暫不討論，待釐清正確輸入方式後，方進行合理之推論。本研究僅就 H 型斜撐與 O 型斜撐進行分析，加設斜稱之實驗組與對照組比較，無論在加速度與位移歷時在長週期時，有明顯之制震效果。

柒、結論

經過此研究之結果分析，歸納出效益值、嚴謹性、合理性，做為應用 3D 列印於縮尺建物耐震試驗之可行性探討，以下就各要項的結論作一說明：

一、效益值

建物模型的比例與建築構件的製造成本，係為耐震試驗效益值的主要考量，透過本研究所利用 3D 列印做縮尺模型之桿件，可降低其使用相關成本。唯以目前低廉之 3D 列印技術尚無法達到結構模型所需的力學特性，故結構桿件的技術提升為本研究後續探討的重點

二、嚴謹度

利用 3D 列印技術製成精密之結構元件，並透過高度微感測系統的試驗過程、量測頂樓加速度歷時與自然振動頻率，以及結合工程實務之分析程式進行數值模擬比對，本研究具有相當程度之嚴謹度。唯本研究之結構元件所採熔絲製造僅可達到形體之精密程度，但卻無法符合結構動力分析所需之均質性與定向性等特點。

三、合理性

我們透過實驗模擬之高感測設備與後處理之 DATAQ 軟體取得每棟 3D 列印縮尺模型的加速度與位移歷時之結果，配合結構動力數值模擬分析之相互比對的實驗方法，應可取得結果驗證之合理性，由線性圖得知針筒制震系統設計是具有合理性。唯需考量縮尺模型建構之元件組成特性的變異性，將影響兩者比對時的判讀結果。

四、總結

- (一) 已得知 3D 列印在印製實驗桿件上是可行的，唯利用熔絲製造的列印方式無法達到元件具有理想的結構力學特性，故產生實驗模擬結果與數值模擬結果產生差異無法比對趨勢，建議後續研究宜採用直接金屬雷射燒結，方可達到理想桿件之力學特性。
- (二) 整體實驗結果顯示，彈簧制震系統在中週期就已被壞，原因為彈簧兩端未做好束制工作，故此設計為不具合理性，而針筒制震系統在加速度歷時與位移歷時之整體成效為最好，在與對照組比較時頂樓加速度為最少，所以我們得出針筒制震系統制震效果最佳。
- (三) 就本研究一系列的實驗架構與結果驗證之設備與方法，方可確信可透過此研究方式應可與大型之實體模型試驗相互比較，因此具有實質之參考價值，期能利用更加之 3D 列印技術，使縮尺建物之結構元件更加均質、等向特性，便可透過此方式建議不同建築結構之減震方式，驗證更多結果。
- (四) 唯數值模擬隸屬結構動力分析，故應在強化參數輸入與程式功能認知的提升，以利相關數值之比對與判讀，瞭解是否達到實驗模擬的合理性目標。

捌、參考資料及其他

- 一、學校建築工程結構規畫手冊 http://tech.ths.com.tw/ths2/2_04.htm
- 二、PLA 與 ABS 的不同特性：<http://voltivo.com/zh-tw/blog/3d-abs-pla>
- 三、ABS 和 PLA 材料的區別：<http://t-rm.blogspot.tw/2013/07/abs-pla.html>
- 四、國家地震研究中心 <http://www.ncree.org/ZH/EarthquakeQA.aspx>
- 五、中央氣象局兒童網 <http://www.cwb.gov.tw/kids/html/08.htm>
- 六、陳正平技師，100 年 7 月 30 日，結構用鋼材基本特性介紹，取自於台灣省土木技師公會
<http://www.twce.org.tw/modules/freecontent/include.php?fname=twce/paper/764/7-1.htm>
- 七、上海情報服務平台 - 國內外 3D 列印技術發展
<http://www.libnet.sh.cn:82/gate/big5/www.istis.sh.cn/list/list.aspx?id=7877>
- 八、表 4-1 打印型式與原料取自於：<http://zh.wikipedia.org/wiki/3D%E6%89%93%E5%8D%B0>
- 九、呂良正，微震良策於劍利建築物基本週期經驗公式及進行耐震評估之應用，博士論文，
國立台灣大學土木工程學研究所
- 十、DATAQ 加速規，MapandDirections：DATAQInstruments,Inc，founded in1984，取自：
<http://www.dataq.com/>
- 十一、張智開/高志豪/張閔淳，民 97，耐震結構元件斜撐介紹，IDEERSS，取自：
<http://ws1.ncree.org/Ideers2008Edu/earthquakeeng/bracing.htm>
- 十二、黃文宏，民國 92 年 6 月，微震量測技術應用於 RC 結構物頻率量測之研究，取自：
中華大學碩士論文
- 十三、李錫霖，民國 96 年，我國房屋建築結構耐震能力初步評估自主檢查作業，取自：
中華大學土木系
- 十四、陳耀如、洪國珍、劉叔松，工程材料 II，二版，台北市，旭營文化，32 頁，民 92 年
- 十五、呂守陞、鄭慶武、侯惠仁，工程概論 I，一版，台北縣，弘揚圖書，34 頁、76 頁，民 99 年
- 十六、陳宏州，工程力學 II，二版，台北市，矩陣，384 頁、293 頁、446 頁、481 頁，民 92 年
- 十七、王鑫，基礎地球科學（上），再版二刷，台南市，南一書局，126 頁、132 頁，民 102 年
- 十八、王鑫，基礎地球科學（下），再版二刷，台南市，南一書局，128 頁、130 頁，民 102 年

【評語】 040505

1. 研究目的希望降低地震災害，值得讚許。
2. 與以前科展作品相近，材料改用 3D 列印製成，並用 ETABS 分析。
3. 敘述可再改進。