

逢甲大學學生報告 ePaper

3D 列印應用於組合式建築概念評估：柱結構分析 Study of 3D-Printing Applications for Column Element

作者：顏騰澎、李祐瑄、吳盈盈、朱脩祁、黃偉豪、蔡崇鴻

系級：土木四甲

學號：D0618854、D0610008、D0610025、D0638376、D0638507、D0610072

開課老師：黃亦敏

課程名稱：畢業設計(二)

開課系所：土木工程學系

開課學年：109 學年度 第 1 學期

中文摘要

近年來台灣房價日漸上漲，且房屋的興建過程需耗費許多時間以及勞動力，近期更是發現工地的勞動力平均年齡日漸增高，使得勞動力嚴重的不足與短缺。近十年來 3D 列印技術日漸發展，在國外有許多成功運用 3D 列印技術來興建房屋的案例，但我們發現成功的案例大部分都是低矮建築，如要發展高層建築，則建築需有高強度之柱子。此研究目的為直接利用 3D 列印技術印製柱，不需綁紮鋼筋、使用模板和澆置混凝土，可以節省綁紮鋼筋與釘模板的勞動力、縮短興建的工期、甚至減少建築廢料與財務成本。

本論文將探討柱子內部結構，透過不斷討論、設計及測試，最終設計出四種結構來進行比較，分別為空心、井字、螺旋和斜撐。研究過程使用軟體 SketchUp 將構想繪製成 3D 模型，再用軟體 Cura 將 3D 模型切片導入 3D 列印機印製，試體印製完成後使用抗壓試驗機進行抗壓試驗，得出不同結構的抗壓強度數據。以空心試體抗壓強度為基準，井字設計強度有明顯的增加，增加 $46.34\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，約 26%。根據試驗結果，得知在所有的試體中井字設計試體的抗壓強度最高，由此得知井字設計有更強抗壓的效果。

關鍵字：3D 列印、建築、T-PLA

Abstract

In recent years, Taiwan's housing prices have been rising day by day, and the construction of building houses are time and labor consuming. Recently, it has been found that the average age of labor on the construction site has been increasing, resulting in a serious shortage of labor. In the past ten years, there are many success cases using 3D printing technology to build houses in foreign country. However, we found that most of the successful cases are low-rise buildings, this is because high-rise buildings construction needs high-strength column. In this study, our research goal is to use 3D printing technology to print columns without using rebars, formwork and pouring concrete, which can save labor usage, shorten the construction period, and even reduce construction waste and financial costs.

In this study, four internal structure of the column were designed and compare through testing. Four internal structures are hollow, tic-tac-toe, spiral and diagonal brace. During the research process, there are two software includes, which are SketchUp and Cura, SketchUp was used to draw the idea into a 3D model, while Cura was used to slicing the 3D model into a 3D printer for printing. After the sample was printed, samples are subjected to a compression test, and the compression strength of different structures was obtained. Use compressive strength of the hollow specimen as a benchmark, the design strength of the tic-tac-toe has a significant increment of 46.34 kgf/cm^2 , about 26 %. According to the test results, it is known that the Tic-Tac-Toe design column has the highest compressive strength among all the design, and it is known that the Tic-Tac-Toe design has a stronger compressive strength.

Keyword : 3D Printing, Construction, T-PLA

目錄

中文摘要.....	1
Abstract	2
目錄.....	3
圖目錄.....	6
表目錄.....	10
第 1 章 緒論	11
1.1 研究背景與動機	11
1.2 研究目的	11
1.3 研究架構	12
第 2 章 文獻探討.....	13
2.1 3D 列印建築.....	13
2.2 3D 列印應用於組合式模板可行性研究	13
2.3 3D 列印材質與混凝土比較	14
2.4 PLA 與 T-PLA 材料之比較.....	17
第 3 章 研究方法與流程.....	18
3.1 研究介紹	18
3.2 研究方法	18
3.3 研究限制	19
3.4 研究工具	20

3.4.1 使用軟體.....	20
3.4.2 使用儀器.....	21
3.5 實驗條件.....	22
3.5.1 使用線材.....	22
3.5.2 列印條件.....	23
3.6 實驗流程.....	24
3.6.1 內部結構設計與發想.....	25
第 4 章 研究結果與討論.....	31
4.1 T-PLA 材料強度.....	31
4.1.1 實心立方試體.....	31
4.1.2 空心立方試體.....	37
4.1.3 抗壓強度比較.....	43
4.2 各設計的抗壓強度.....	44
4.2.1 空心試體抗壓強度.....	44
4.2.2 井字試體抗壓強度.....	50
4.2.3 螺旋試體抗壓強度.....	56
4.2.4 斜撐試體抗壓強度.....	62
4.3 討論.....	68
4.3.1 抗壓強度比較.....	68
4.3.2 試體破壞形態分析.....	69
4.3.3 破壞曲線分析.....	69
第 5 章 結論與建議.....	70

5.1 結論	71
5.2 建議	72
參考文獻.....	73



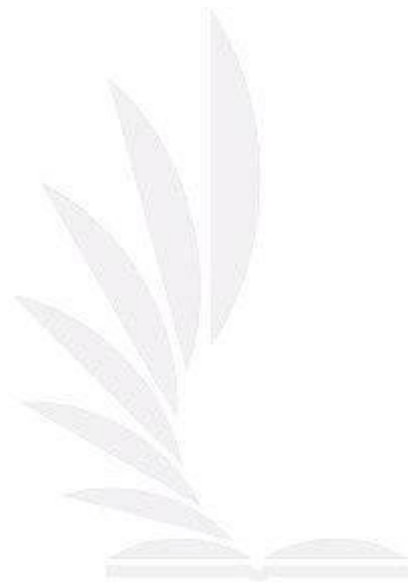
圖目錄

圖一 研究架構.....	12
圖二 3D 列印模型成品.....	15
圖三 運用 3D 列印技術印製房屋.....	16
圖四 SketchUp 2017 軟體圖標圖.....	20
圖五 Cura 軟體圖標圖.....	20
圖六 KINGSSSEL3070-Q 機型外觀圖.....	21
圖七 萬能材料試驗機-CY-6690 外觀圖.....	21
圖八 線材盒裝顯示的基本資訊.....	22
圖九 線材卷軸外觀圖.....	22
圖十 在 Cura 中基礎列印條件設定頁面示意圖.....	23
圖十一 實驗流程圖.....	24
圖十二 空心柱正面尺寸詳圖.....	25
圖十三 空心柱俯視尺寸詳圖.....	25
圖十四 構想一修正前內部支撐厚度設計示意圖.....	26
圖十五 構想一修正後內部支撐厚度設計示意圖.....	26
圖十六 構想一修正後設計尺寸詳圖.....	26
圖十七 構想二修正前設計示意圖.....	27
圖十八 構想二修正後設計示意圖.....	27
圖十九 構想二修正後設計尺寸詳圖.....	28
圖二十 構想二修正後設計俯視尺寸詳圖.....	28
圖二十一 構想三修正前設計示意圖.....	29
圖二十二 構想三修正後設計示意圖.....	29
圖二十三 構想三修正後設計尺寸詳圖.....	30
圖二十四 構想三修正後設計俯視尺寸詳圖.....	30

圖 二十五	5×5×5 公分實心立方試體(一)抗壓結果	31
圖 二十六	5×5×5 公分實心立方試體(一)抗壓曲線	32
圖 二十七	5×5×5 公分實心立方試體(一)破壞形態	32
圖 二十八	5×5×5 公分實心立方試體(二)抗壓結果	33
圖 二十九	5×5×5 公分實心立方試體(二)破壞曲線	33
圖 三十	5×5×5 公分實心立方試體(二)破壞形態	34
圖 三十一	5×5×5 公分實心立方試體(三)抗壓結果	35
圖 三十二	5×5×5 公分實心立方試體(三)破壞曲線	35
圖 三十三	5×5×5 公分實心立方試體(三)破壞形態	36
圖 三十四	5×5×5 公分空心立方試體(一)抗壓結果	37
圖 三十五	5×5×5 公分空心立方試體(一)破壞曲線	37
圖 三十六	5×5×5 公分空心立方試體(一)破壞形態	38
圖 三十七	5×5×5 公分空心立方試體(二)抗壓結果	39
圖 三十八	5×5×5 公分空心立方試體(二)破壞曲線	39
圖 三十九	5×5×5 公分空心立方試體(二)破壞形態	40
圖 四十	5×5×5 公分空心立方試體(三)抗壓結果	41
圖 四十一	5×5×5 公分空心立方試體(三)破壞曲線	41
圖 四十二	5×5×5 公分空心立方試體(三)破壞形態	42
圖 四十三	4×4×30 公分空心試體(一)抗壓數據	44
圖 四十四	4×4×30 公分空心試體(一)破壞曲線	44
圖 四十五	4×4×30 公分空心試體(一)破壞形態	45
圖 四十六	4×4×30 公分空心試體(二)抗壓數據	46
圖 四十七	4×4×30 公分空心試體(二)破壞曲線	46
圖 四十八	4×4×30 公分空心試體(二)破壞形態	47
圖 四十九	4×4×30 公分空心試體(三)抗壓數據	48

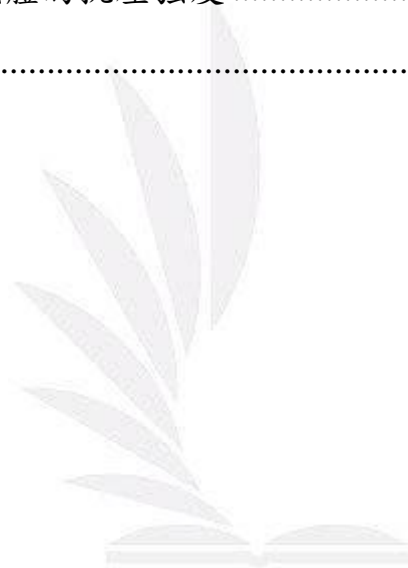
圖 五十	4×4×30 公分空心試體(三)破壞曲線	48
圖 五十一	4×4×30 公分空心試體(三)破壞形態	49
圖 五十二	4×4×30 公分井字試體(一)抗壓數據	50
圖 五十三	4×4×30 公分井字試體(一)破壞曲線	50
圖 五十四	4×4×30 公分井字試體(一)破壞形態	51
圖 五十五	4×4×30 公分井字試體(二)抗壓數據	52
圖 五十六	4×4×30 公分井字試體(二)破壞曲線	52
圖 五十七	4×4×30 公分井字試體(二)破壞形態	53
圖 五十八	4×4×30 公分井字試體(三) 抗壓數據	54
圖 五十九	4×4×30 公分井字試體(三)破壞曲線	54
圖 六十	4×4×30 公分井字試體(三)破壞形態	55
圖 六十一	4×4×30 公分螺旋試體(一)抗壓數據	56
圖 六十二	4×4×30 公分螺旋試體(一)破壞曲線	56
圖 六十三	4×4×30 公分螺旋試體(一)破壞形態	57
圖 六十四	4×4×30 公分螺旋試體(二)抗壓數據	58
圖 六十五	4×4×30 公分螺旋試體(二)破壞曲線	58
圖 六十六	4×4×30 公分螺旋試體(二)破壞形態	59
圖 六十七	4×4×30 公分螺旋試體(三)抗壓數據	60
圖 六十八	4×4×30 公分螺旋試體(三)破壞曲線	60
圖 六十九	4×4×30 公分螺旋試體(三)破壞形態	61
圖 七十	4×4×30 公分斜撐試體(一)抗壓數據	62
圖 七十一	4×4×30 公分斜撐試體(一)破壞曲線	62
圖 七十二	4×4×30 公分斜撐試體(一)破壞形態	63
圖 七十三	4×4×30 公分斜撐試體(二)抗壓數據	64
圖 七十四	4×4×30 公分斜撐試體(二)破壞曲線	64

圖 七十五	4×4×30 公分斜撐試體(二)破壞形態	65
圖 七十六	4×4×30 公分斜撐試體(三)抗壓數據	66
圖 七十七	4×4×30 公分斜撐試體(三)破壞曲線	66
圖 七十八	4×4×30 公分斜撐試體(三)破壞形態	67



表目錄

表 1 抗壓強度結果比較表.....	14
表 2 實心立方試體的抗壓強度.....	36
表 3 空心立方試體的抗壓強度.....	42
表 4 PLA 材料與混凝土抗壓強度比較.....	43
表 5 4×4×30 公分空心試體的抗壓強度.....	49
表 6 4×4×30 公分井字試體的抗壓強度.....	55
表 7 4×4×30 公分螺旋試體的抗壓強度.....	61
表 8 4×4×30 公分斜撐試體的抗壓強度.....	67
表 9 抗壓強度結果比較.....	68



第1章 緒論

1.1 研究背景與動機

近年來台灣地價房價日漸上漲，一間房屋動輒百萬千萬，是大部分的人無法承擔之金額，因此現今社會有許多人房貸的壓力。房屋的興建過程需耗費許多時間以及勞動力，近期更是發現工地的勞動力平均年齡日漸增高，許多年輕人不願在環境惡劣的工地工作，留下的大多都是稍有年紀的長者，使得勞動力嚴重的不足與短缺。

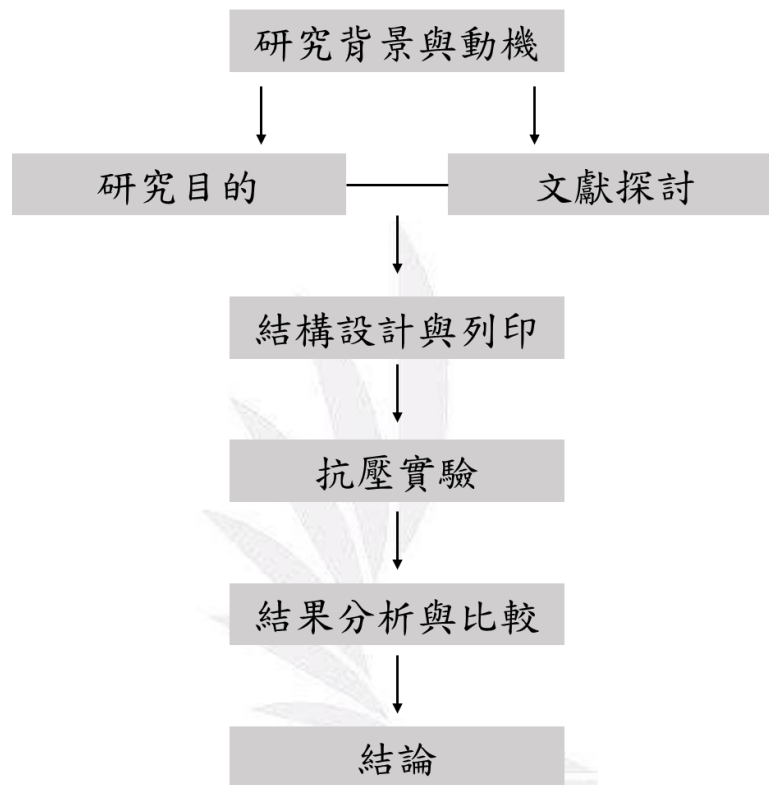
近十年來 3D 列印技術日漸發展，在國外有許多成功運用 3D 列印技術來興建房屋的案例，其中大部分案例只需短短的數日甚至數個小時便可完成一棟房屋，所花費的成本金額也比市場上的興建成本便宜許多，也是因為是由 3D 列印機在興建房屋，所以不需要許多的勞動力，這些正好都可以解決如今社會上、營建業上所面臨的困難，如果台灣能將此技術引進發展，並進行深入的研究與改善，將會解決台灣社會上許多人的煩惱。

1.2 研究目的

目前成功使用 3D 列印興建的房屋皆為低矮樓層之建築，但台灣地狹人稠沒有足夠多的空間可以運用，倘若要在台灣發展 3D 列印房屋，高樓層建築才是更符合台灣的需求，高樓層建築需要具有高抗壓強度的柱，才能承受建築物自身的重量與使用時的活載重。此研究目的為直接利用 3D 列印技術印製柱，不需綁紮鋼筋、使用模板和澆置混凝土，可以節省綁紮鋼筋與釘模板的勞動力、縮短興建的工期、甚至減少建築廢料與財務成本。因此組員透過大學四年所學，與指導教授討論、設計、試驗，設計出具有更好抗壓強度的柱子結構。

1.3 研究架構

本研究將從研究背景與動機進行說明，並就研究目的與相關文獻回顧進行探討，擬定研究方法與目標，並依研究方法進行研究，最後根據抗壓試驗結果來探討此結果之可行性。



圖一 研究架構

第2章 文獻探討

2.1 3D 列印建築

3D 列印 (3Dprinting) 在工業設計、醫療、以及許多領域都有應用，此技術同樣引發了建築業追捧的熱潮。3D 列印建築與傳統建築相比，其優勢在於：速度快，不需要使用模板，也代表著不需要數量龐大的建築工人，不只節省成本，還大大提高了生產效率；可以非常容易地列印出設計樣式極為複雜的建築物；具有低碳、綠色、環保的特點。3D 列印建築技術可能改變建築業的發展方向，對眾多土木相關行業帶來的改變是顯而易見。

實際上現今社會已有許多 3D 列印建築成功的案例：Apis Cor 再度使用其技術蓋出了一棟房子，他們使用巨型的移動式 3D 列印機，在建築現場直接製作，從機器灌出作為房子基本架構的是一種石膏的混合物。但這棟建築物也不是僅僅依靠 3D 列印機，事實上它的地基跟屋頂，還是採用了傳統的建築工法，但其所採用的 3D 列印機蓋出的房子，能大大縮減需要的工人與時間，成本也會引此降低。（蔡惠如，2020）（美學生活，2019）

2.2 3D 列印應用於組合式模板可行性研究

此項專題研究的前身，為去年學長的專題研究，並且我們以其所得到的研究成果作為續接，進行此次各種不同結構模型的專題研究。

上屆專題研究主要內容為比較不同種設計之柱體：一種為小柱以灌漿能使水泥緊貼內壁為目的作為設計主軸；另一種大柱則是以快速組裝作為發想。第一種小柱灌漿並進行養護之動作，並取三種不同養護時間之結果，進行抗壓試驗，好以比較不同養護時間產生強度的差異，不過比較之後竟發現，養護時間較久的柱體本應具有更高的強度，但實驗結果並不符合合理

論值，因此推斷並查閱資料後發現 3D 列印材料「PLA」遇水，其強度會降低。

第二種為拼接組裝式之柱體，經過抗壓後會發現其強度比一體成形之柱體脆弱許多。根據上屆實驗之結果獲得結論：1. 不得進行養護，以免影響 PLA 本身強度。2. 拼接的大柱相較一體成形之小柱，強度明顯低了許多，因此本次研究全部採用一體成形印製。3. 改用設計不同之內部結構進行抗壓強度之比較（塗峻維、謝鈞毅、陳柏豪、廖楚信、楊世傑、賴好柔，2019）。

表 1 抗壓強度結果比較表

	小柱 (kgf/cm ²)	大柱 (kgf/cm ²)
無灌漿	324.4	155.75
養護 4 天	211.78	75.63
養護 9 天	130.34	80.81
養護 15 天	110.34	64.376

2.3 3D 列印材質與混凝土比較

本次 3D 列印專題中我們所使用的材料為「PLA」，此材料也是目前 3D 列印最常見的材料之一，不過因 PLA 的性質與承壓能力的問題，在現實中並無法直接利用此種材料進行建築物的 3D 列印。實際上，現今已有不少 3D 列印的建築物，其主要使用的材料還是以水泥為主，因為水泥有極好的抗壓能力，但建築物的結構除了需能夠抵抗壓力之外，該用何種材料取代在傳統建築的鋼筋，也就是該如何抵抗拉力的問題，也是今後在 3D 列印建築材料上的一大難關。

PLA

「PLA」在 3D 列印上是最被廣泛運動的材質之一，中文也就是「聚乳酸」，它是一種生物聚合物，意思就是它是生物可降解塑料，此種材料具有熱塑性，意味著它只要受熱時就會變軟，加熱後我們可經由 3D 列印機，使其方便塑形，也因其冷卻時間快，冷卻後即可維持形狀，較不會有材料未冷卻而造成模型倒塌的情況發生，且「PLA」價格相對便宜，同時也是最容易列印的材料，不需額外設定複雜的參數，其都能達到適應溫度。

不過沒有任何材料是完美的，熱塑性是他的老處同時也是壞處，具有熱塑性就代表著 PLA 的耐溫性不好，持續的高溫會讓 PLA 成品變得脆弱，甚至是只要其遇水，便會開始軟化，而在混凝土試驗中，養護是必須進行的一項動作，但因其遇水軟化的特性，所以由 PLA 列印出的模型，皆無進行養護的動作，所以我們的方法就是採用原先的強度，直接進行抗壓試驗。（縱維科技，2017）



圖二 3D 列印模型成品

（圖片來源：<https://blog.project3dprinters.com/blog/printing-with-thermoplastics>）

混凝土

目前最廣泛被應用的建築材料—混凝土硬度大、抗壓性能良好、堅固耐用、成本低、製作方法簡單、有充足的原物料，是世界使用量最大的土木工程建築材料。混凝土也可依照其組成成分比例不同，會有不同的性質，各項材料的比例稱為配比，會直接影響混凝土的強度、耐久性、工作性等……。

混凝土已具備良好的抗壓能力，但抗拉性能較差，而在所有建築結構的設計上，抗壓性能與抗拉性能是必須同時具備的條件，缺少抗拉的性能，會使得只以混凝土所建造的建築，在高度上永遠被受限於一定的範圍，直到鋼筋的出現，混凝土結構的大規模應用才得以實現，同時這也是 3D 列印建築始終無法在高度上做出突破的一大原因。

如果只採用單一系列印材料，對以承受壓力為主的牆柱構件是合適的，但對於梁、樓板等受彎構建是極度不合適的。一旦拉應力超過材料的抗拉強度，建築物就很容易出現裂縫，而發生危險。正因為有此種問題存在，所以目前 3D 列印的房子樓板只能採用鋼筋混凝土現場澆注或預製樓板。



圖三 運用 3D 列印技術印製房屋

(圖片來源：<https://www.a-life.com.tw/trend/?p=2242>)

2019 年，中國出現了全球第一個 3D 列印房屋的公司，其是使用列印單一構建，在將構件運送製現場組裝的方式打造 3D 列印建築，此公司也針對 3D 列印建築材料缺少抵抗拉力性能的問題採用了相應的解決方案。在列印構件除了使用水泥以外，同時也添加了玻璃纖維作為原材料，與傳統建築工法相比，其使用水泥替代混凝土、玻璃纖維替代鋼筋，但還是有許多問題需進一步探討與解決。（南極熊 3d 打印網，2016）

2.4 PLA 與 T-PLA 材料之比較

PLA 是目前最受歡迎的 FDM 3D 列印材料，這種聚乳酸材料可生物降解、價格便宜且容易列印。PLA 材料的生產是直接生產的過程中添加韌劑，讓這個材料的韌性有所提升，但卻無法改變其原本的性能，也不能保證材料原本的純度。

T-PLA 同時具有與 PLA 相似的材料特性，但在強度及韌性上卻比傳統的 PLA 材料更好。T-PLA 在生產過程中，是從原料顆粒進行改良，做出 T-PLA 的顆粒純料，再透過生產製出線材。在原料的改良上，針對性的改善了 PLA 材料脆性較大、抗衝擊強度弱、易脆裂、自生成支撐料難去除的缺點。因此，T-PLA 具有較強勁的韌性，也改善了傳統 PLA 材料的缺點。（捌零三维材料技术（深圳）有限公司，2018）

第3章 研究方法與流程

3.1 研究介紹

本次研究利用現有 3D 列印技術，以不綁紮鋼筋、不設置模板為前提，嘗試直接列印出等比例縮小之結構柱，利用現行建築所使用的混凝土作為基準，接著去比較由 3D 列印技術製造的柱強度，從基礎的材料特性、強度開始著手，再透過不同的內部結構設計，比較不同結構的排列方式之抗壓強度，經由上述過程，去探討未來實際運用於土木工程的可行情性，以及 3D 列印技術於建設工程的發展性。

3.2 研究方法

- 一、透過網路收集 3D 列印使用之材料特性，取得材料基本性質、特性、強度後，選擇現行中華民國建築技術規範中經常使用到的 280kgf/cm^2 強度混凝土進行比較，接著使用 3D 列印機印製 $5 \times 5 \times 5$ 公分方塊數塊，與製作 $5 \times 5 \times 5$ 公分混凝土方塊，於相同環境下進行抗壓試驗，取得實際抗壓數據後進行比較。
- 二、由於本實驗希望達成不需要綁紮鋼筋、不須建置模板等，直接由 3D 列印機完成結構體的建置，因此透過柱內部結構的設計去試驗，透過不同形式的內部結構設計，印製 $4 \times 4 \times 30$ 公分等比例縮小結構柱模型進行抗壓實驗，透過數阻抗壓數據的比較，希望找出可行之設計。

3.3 研究限制

- 一、材料限制：本次實驗所取的列印材料僅有一種，所以僅以一種材料與混凝土"一般設計強度"去比較去進行探討。
- 二、器材限制：本次實驗所使用之 3D 列印機因為本身尺寸的限制，固本實驗無法印製實際尺寸之結構柱，只能列印等比例縮小之模型進行試驗。
- 三、印製限制：因本次專題所使用的 3D 列印機，印製過程是由下往上一層一層堆疊，所以在印製過程中無法印製懸空之結構。



3.4 研究工具

3.4.1 使用軟體

SketchUp 2017

SketchUp 這個軟體，原本是一套為建築師、城市規劃專家、室內設計是等相關專業人員提供的 3D 建模程序。基於其界面簡單、操作容易，且適用於建製任何形狀的 3D 模型，靈活性較高。因此，我們選擇 SketchUp 作為我們 3D 建模的軟體。模型在 SketchUp 建製完成後可以匯出 dae.檔，便可匯入 Cura 進行模型的後續處理。



圖四 SketchUp 2017 軟體圖標圖

(1) Cura

Cura 是一款由 Ultimaker 公司所設計的 3D 列印軟體，這個軟體最大的優點就是簡單好上手，非常適合初入 3D 列印領域的我們。此外，其包含了所有 3D 列印需要的功能，有模型切片的功能和印表機的控制兩大部分。因此，我們便可以直接使用這個軟體與印表機連接，完成想要列印的模型。



圖五 Cura 軟體圖標圖

3.4.2 使用儀器

(1) 3D 列印機

型號：KINGSSEL3070-Q

KINGSSEL3070-Q 所使用的列印技術為 FDM（熱熔融層積）技術，FDM 是最普遍使用的 3D 列印技術。其 3D 列印的原料會透過捲軸來進行輸送，所使用的線材規格為 $\varnothing 1.75\text{mm}$ 的 PLA 材料，線材透過加熱噴頭擠出，擠出的材料在列印的範圍內層層堆疊、冷卻並固化於平台上以完成物體模型。此印表機最大可列印的體積為 $\varnothing 30\text{cm} * \text{H}70\text{cm}$ 。



圖六 KINGSSEL3070-Q 機型外觀圖

（圖片來源：<http://www.mastech3d.com/3dfdm/kingsel3070>）

(2) 試體抗壓試驗機

型號：萬能材料試驗機-CY-6690，駿諺精機

最大容量：200 噸



圖七 萬能材料試驗機-CY-6690 外觀圖

（圖片來源：<http://www.testingmachine.com.tw/chinese/CY-6690.jpg>）

3.5 實驗條件

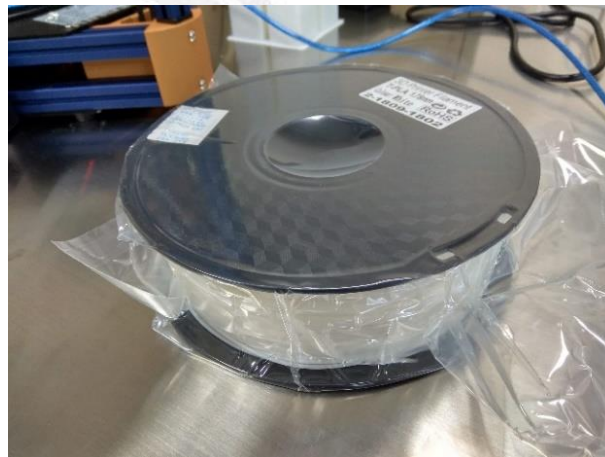
3.5.1 使用線材

T-PLA 1.75mm

T-PLA 具有強勁的韌性，性能上更優於 PLA，同時是環保食品級材料，可自然降解以降低對環境帶來的負擔。T-PLA 的使用方法簡答，且適用於大部分的 FDM 設備，因此我們選定這個線材作為列印模型的材料。



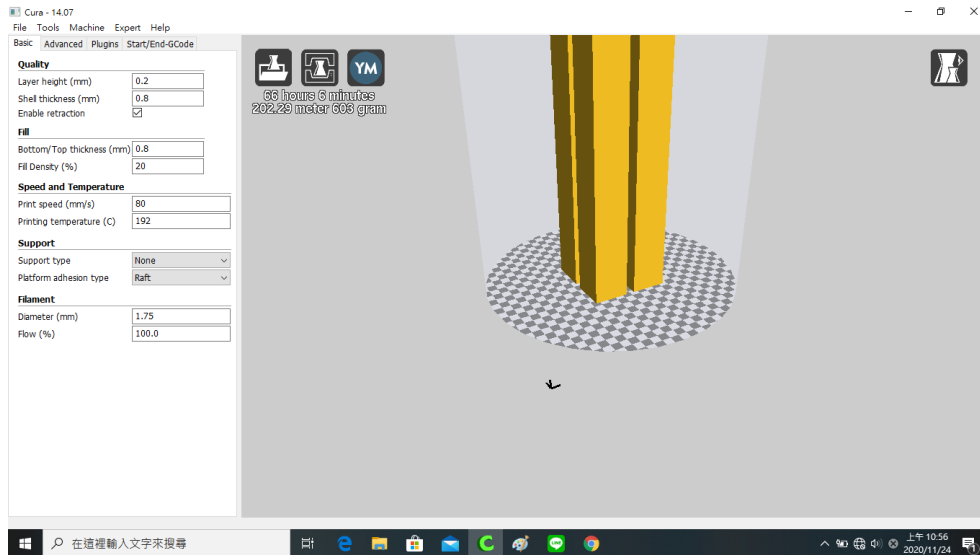
圖八 線材盒裝顯示的基本資訊



圖九 線材卷軸外觀圖

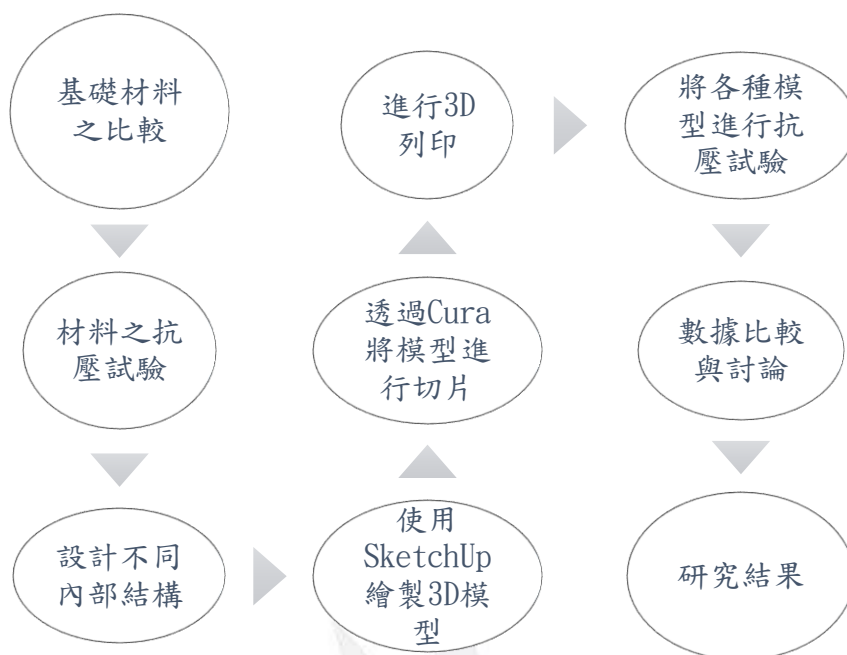
3.5.2 列印條件

- 一、噴嘴溫度：190-220 °C
- 二、列印速度：80 mm / s
- 三、平台溫度：常溫（加藍色膠帶）



圖十 在 Cura 中基礎列印條件設定頁面示意圖

3.6 實驗流程



圖十一 實驗流程圖

首先進行3D列印所使用之材料的資料收集，接著印製正方形方塊進行抗壓試驗，以取得材料之抗壓強度，再經過柱子內部結構設計後，透過SketchUp繪製出3D模型，確認模型細節後使用軟體Cura將3D模型進行切片處理，切片完成後對3D列印機進行參數設定，設定完成後即進行實際印製，等待印製完成後，確認印製結果是否符合要求並進行改善，接著將符合要求之試體模型進行抗壓試驗，於取得試驗數據後進行分析討論，並取得研究結果。

3.6.1 內部結構設計與發想

空心設計

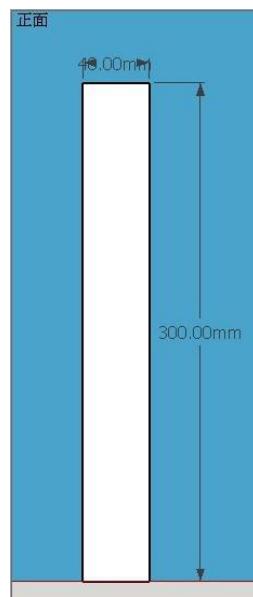


圖 十二 空心柱正面尺寸詳圖

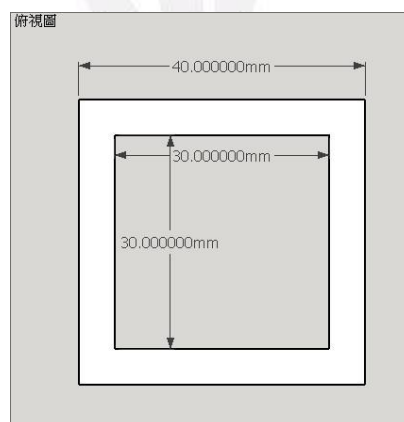


圖 十三 空心柱俯視尺寸詳圖

構想一：(4 公分×4 公分)

想仿造鋼筋在柱子裡面樣子而設計，但因為 3D 列印無法懸空列印，所以改成由下至上一體成型的井字設計。

修正：原設計內部支撐厚度為 0.3 公分，初次印製後發現比例不符合要求，故將內部支撐厚度改為 0.15 公分。

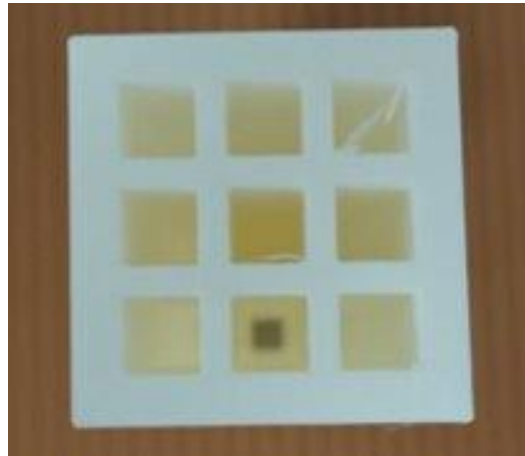


圖 十四 構想一修正前內部支撐厚度設計示意圖

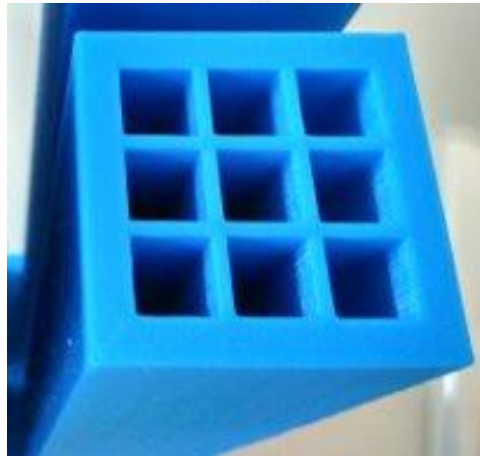


圖 十五 構想一修正後內部支撐厚度設計示意圖

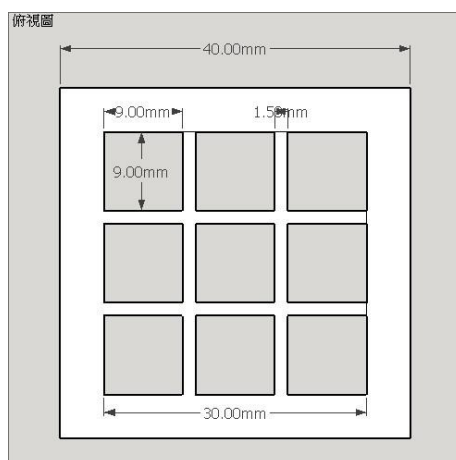


圖 十六 構想一修正後設計尺寸詳圖

構想二：(4 公分×4 公分)

採用螺旋箍筋形式，其具方便施工、節約鋼筋、增強箍筋對柱的約束力等優點，我們以此為發想，設計出螺旋結構。

修正：原設計由雙股螺旋向上延伸，初次印製後發現雙股螺旋略顯單薄，因想增加結構強度，所以將雙股螺旋改為四股螺旋支撐。

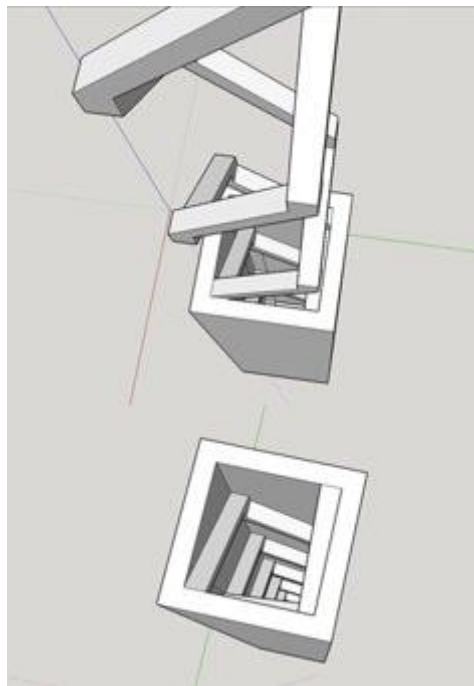


圖 十七 構想二修正前設計示意圖

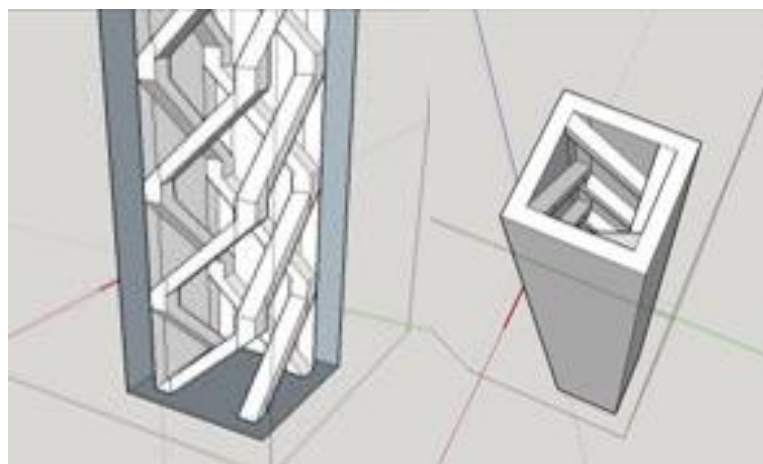


圖 十八 構想二修正後設計示意圖

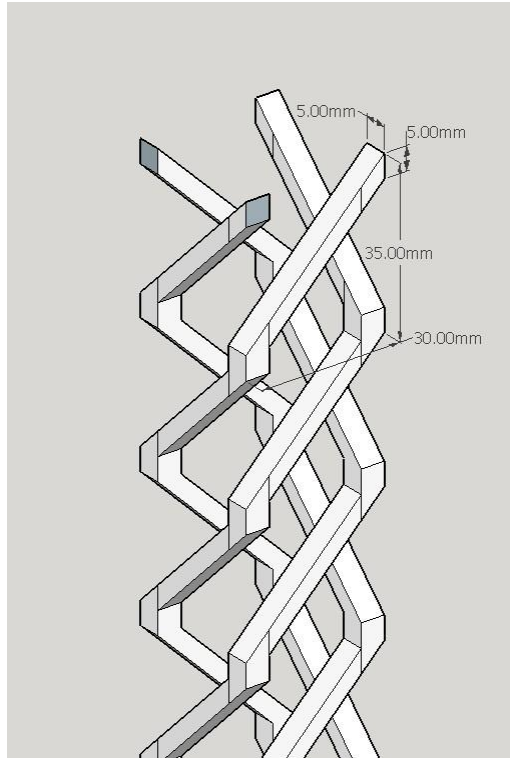


圖 十九 構想二修正後設計尺寸詳圖

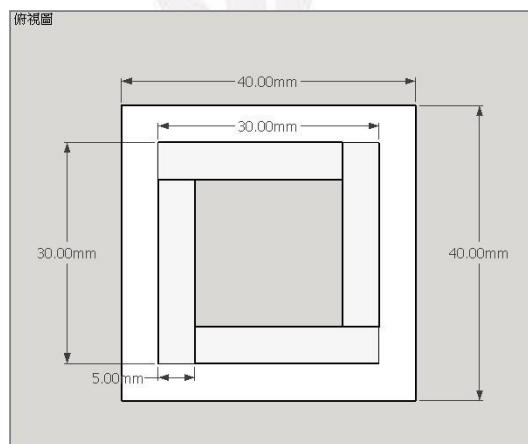
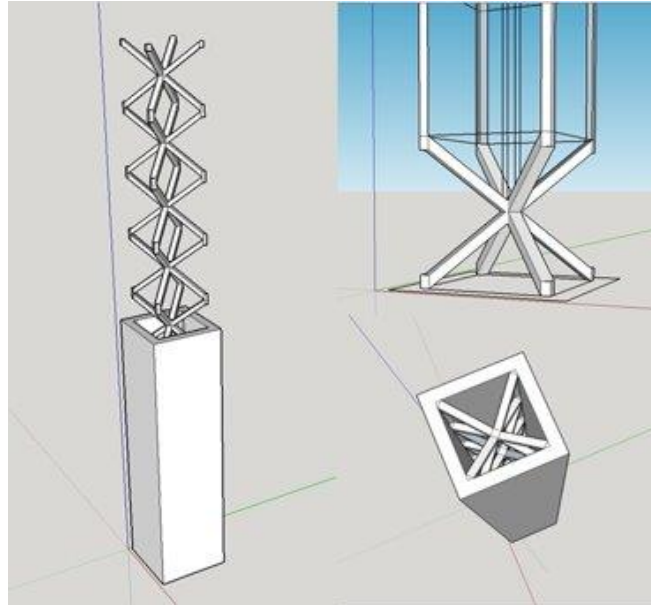


圖 二十 構想二修正後設計俯視尺寸詳圖

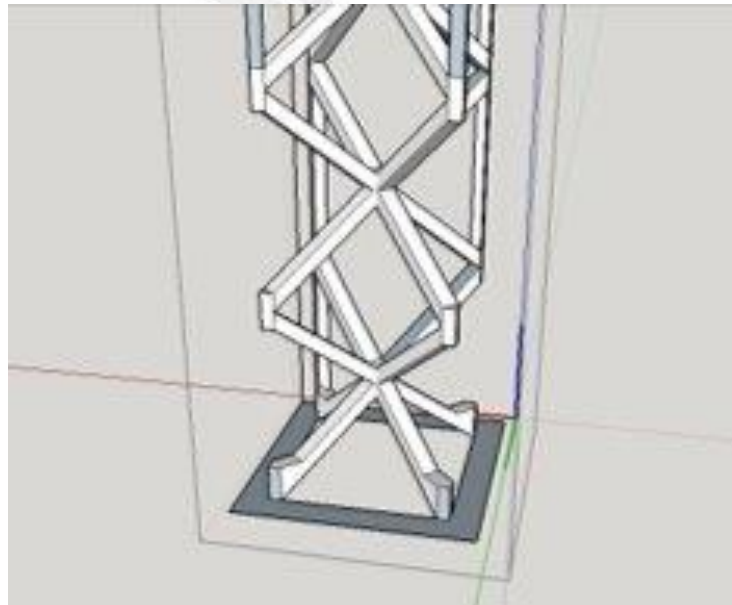
構想三：(4 公分×4 公分)

想法來源為參考鋼結構中的斜撐，以四個角向對角的斜撐組成。

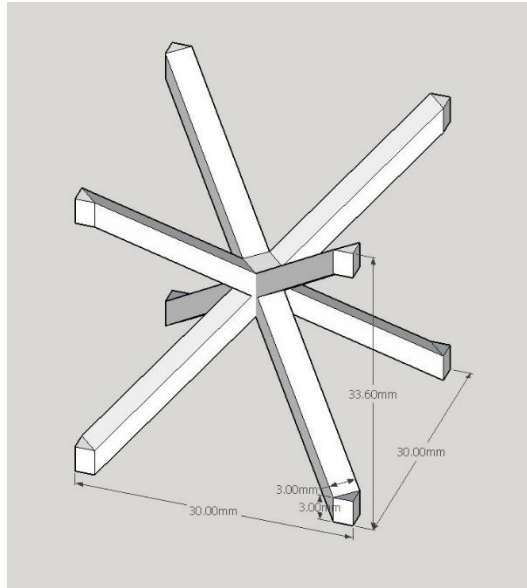
修正：初次印製時最底部的斜撐在印製過程中出現瑕疵，所以將底部支撐進行改良加固。



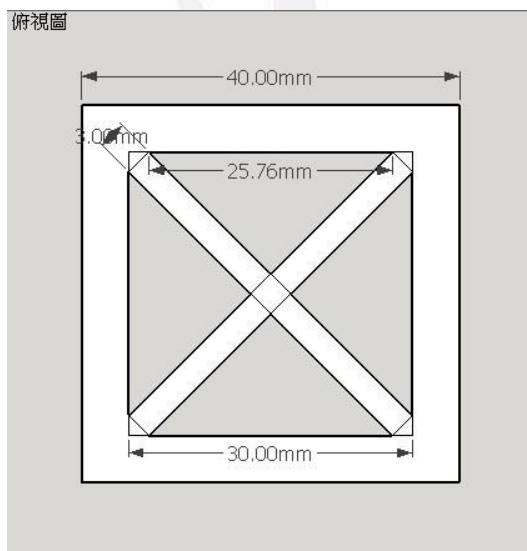
圖二十一 構想三修正前設計示意圖



圖二十二 構想三修正後設計示意圖



圖二十三 構想三修正後設計尺寸詳圖



圖二十四 構想三修正後設計俯視尺寸詳圖

藉由以上三種不同的內部結構設計，加上空心柱，一共四種進行抗壓實驗，接著比較四種設計之強度。

第4章 研究結果與討論

4.1 T-PLA 材料強度

使用 PLA 材料列印出 $5 \times 5 \times 5\text{cm}$ 的立方試體，立方試體分成空心與實心，進行抗壓實驗以便得到 PLA 材料的強度，抗壓結果如下：

4.1.1 實心立方試體

試體（一）



圖 二十五 5x5x5 公分實心立方試體(一)抗壓結果

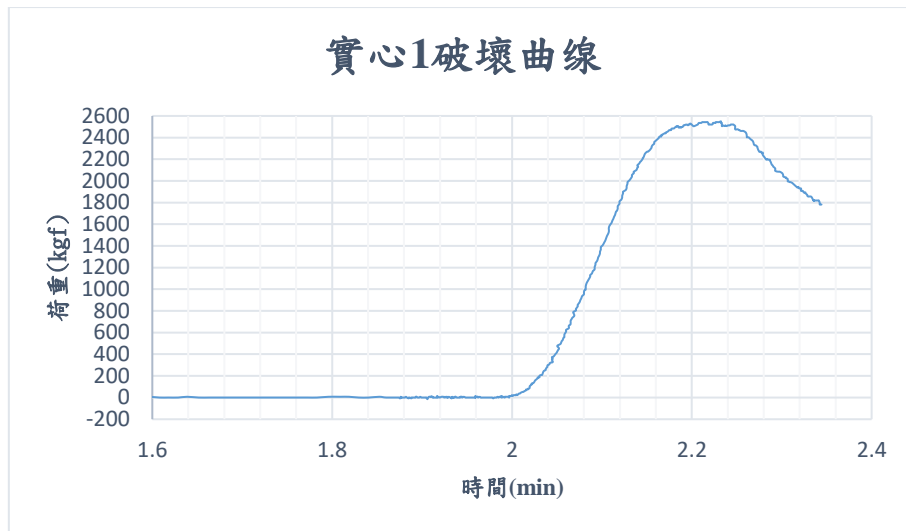


圖 二十六 5×5×5 公分實心立方試體(一)抗壓曲線

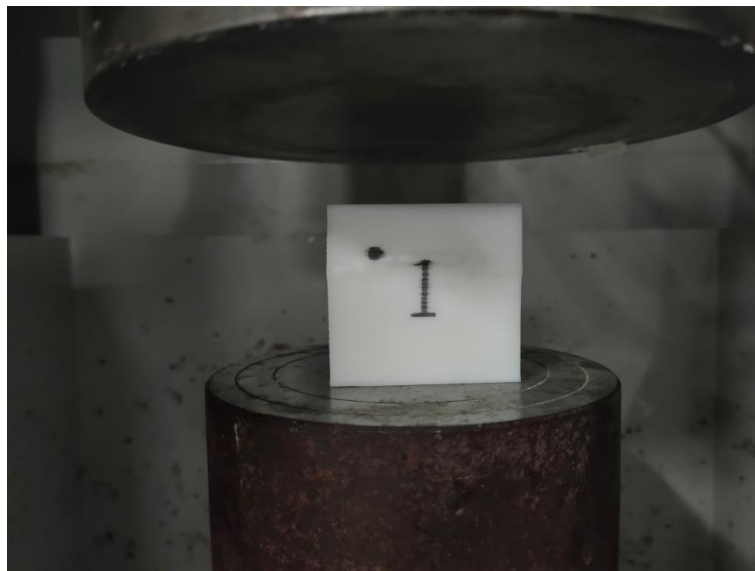


圖 二十七 5×5×5 公分實心立方試體(一)破壞形態

抗壓總強度為 2550kgf

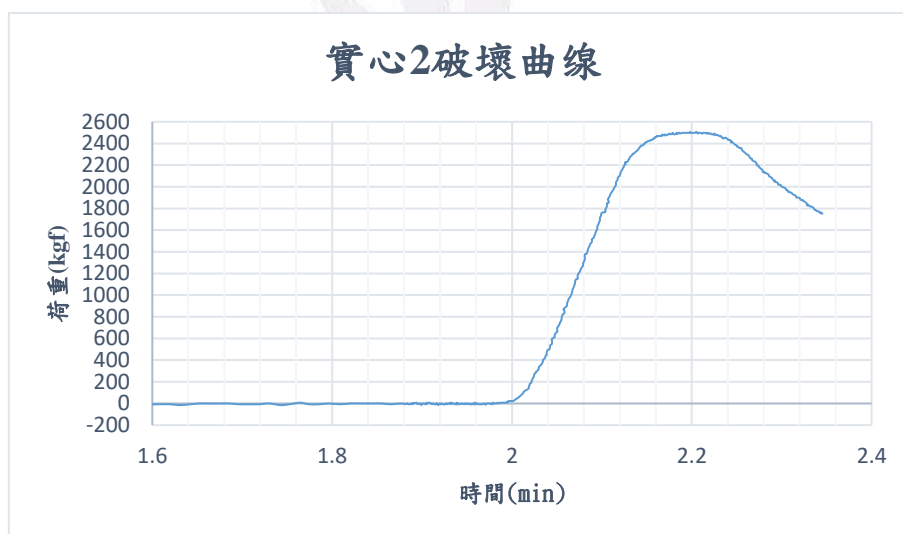
實心立方試體的承壓面積為 25cm^2

因此試體 (一) 的抗壓強度為 $\frac{2550\text{kgf}}{25\text{cm}^2} = 102\text{kgf/cm}^2$

試體 (二)



圖二十八 5x5x5 公分實心立方試體(二)抗壓結果



圖二十九 5x5x5 公分實心立方試體(二)破壞曲線



圖三十 5x5x5 公分實心立方試體(二)破壞形態

抗壓總強度為 2505kgf

實心立方試體的承壓面積為 25cm^2

因此試體（二）的抗壓強度為 $\frac{2505\text{kgf}}{25\text{cm}^2} = 100.2\text{kgf}/\text{cm}^2$

試體 (三)



圖 三十一 5x5x5 公分實心立方試體(三)抗壓結果

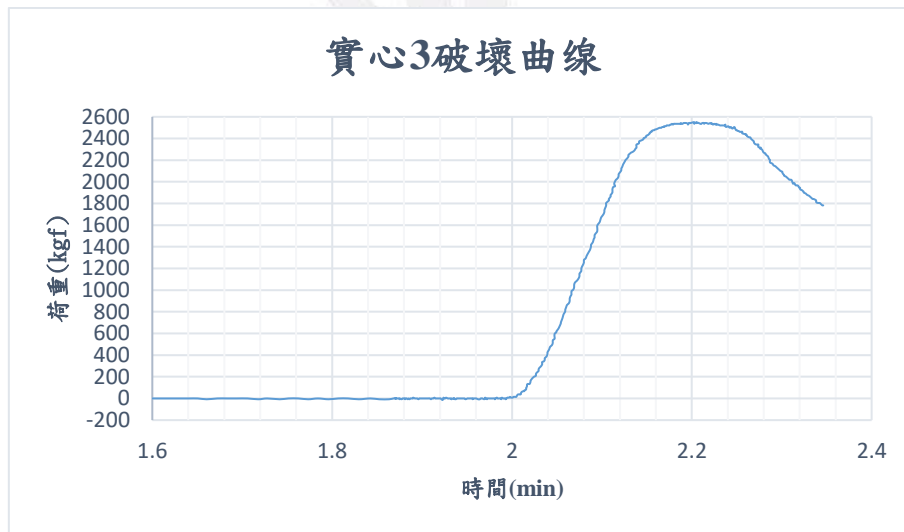


圖 三十二 5x5x5 公分實心立方試體(三)破壞曲線

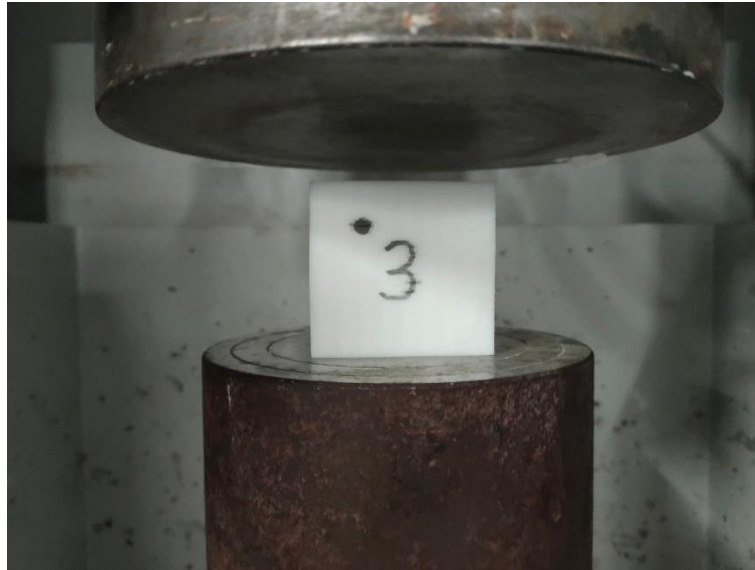


圖 三十三 5x5x5 公分實心立方試體(三)破壞形態

抗壓總強度為 2550kgf

實心立方試體的承壓面積為 25cm^2

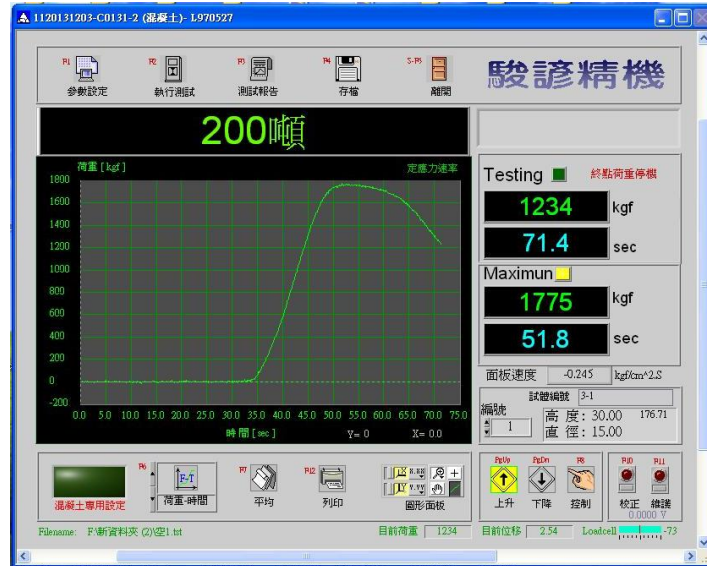
因此試體（三）的抗壓強度為 $\frac{2550\text{kgf}}{25\text{cm}^2} = 102.0\text{kgf/cm}^2$

表 2 實心立方試體的抗壓強度

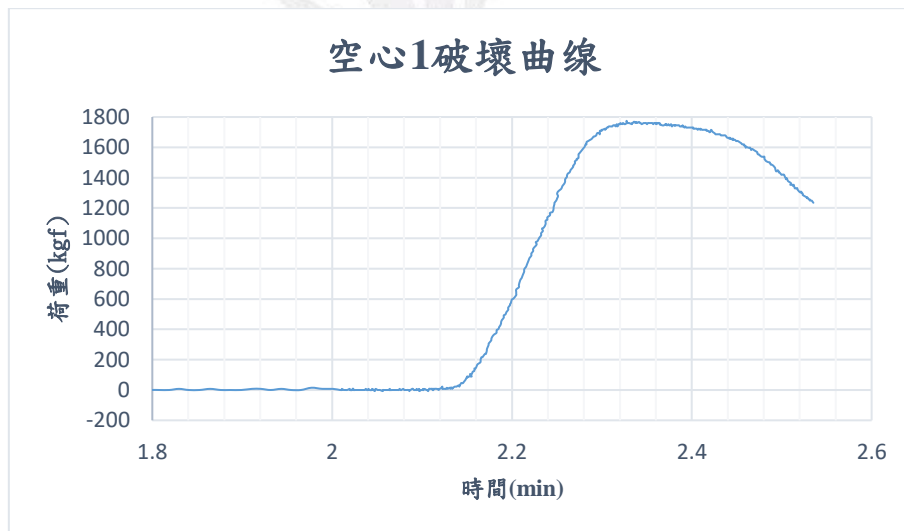
	試體（一）	試體（二）	試體（三）	平均值
抗壓強度 (kgf/cm^2)	102.0	100.2	102.0	101.4

4.1.2 空心立方試體

試體 (一)



圖三十四 5x5x5 公分空心立方試體(一)抗壓結果



圖三十五 5x5x5 公分空心立方試體(一)破壞曲線



圖 三十六 5x5x5 公分空心立方試體(一)破壞形態

抗壓總強度為 1775kgf

空心立方試體的壁厚為0.5cm，因此其承壓面積為 $25\text{cm}^2 - 16\text{cm}^2 = 9\text{cm}^2$

因此試體（一）的抗壓強度為 $\frac{1775\text{kgf}}{9\text{cm}^2} = 197.22 \text{kgf}/\text{cm}^2$

試體 (二)

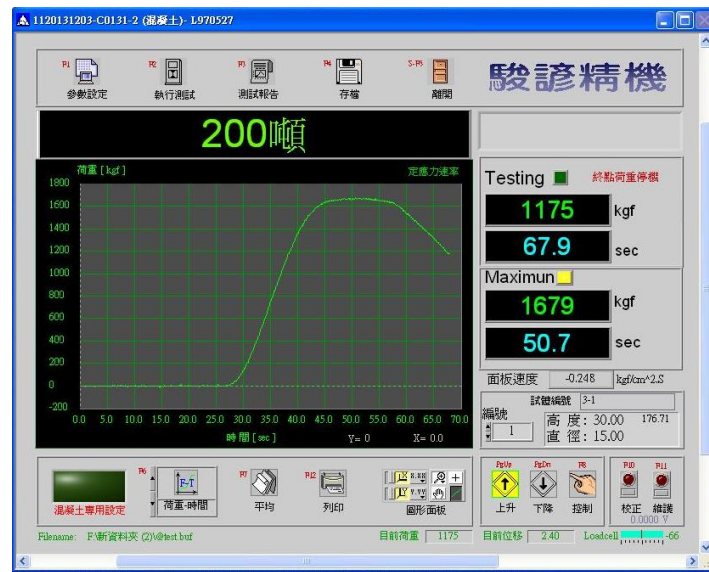


圖 三十七 5x5x5 公分空心立方試體(二)抗壓結果

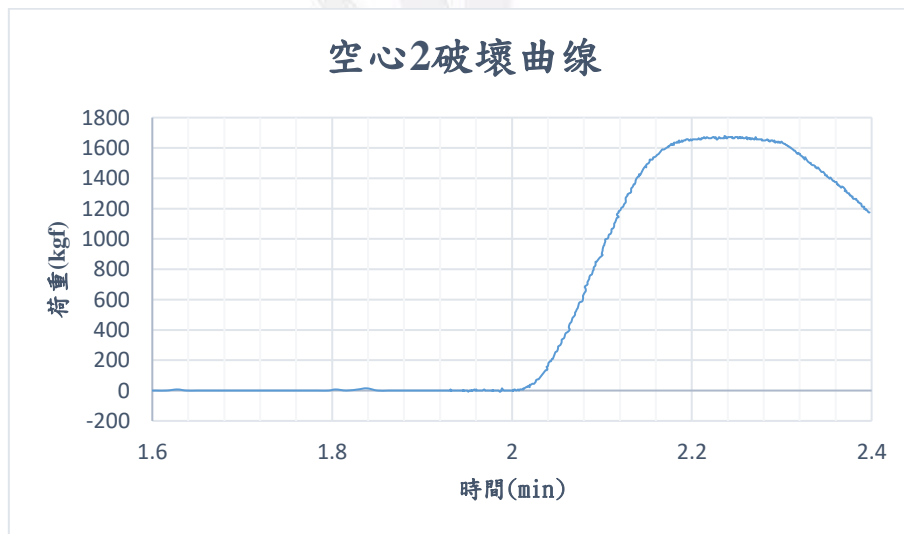


圖 三十八 5x5x5 公分空心立方試體(二)破壞曲線

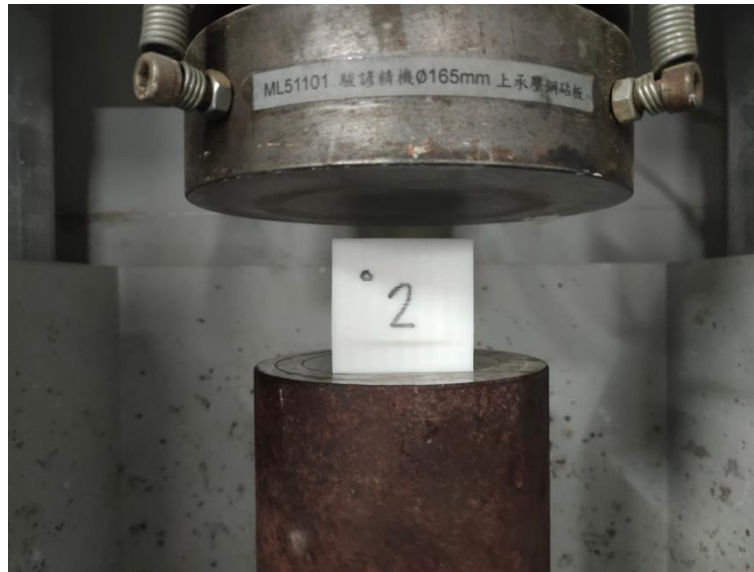


圖 三十九 5x5x5 公分空心立方試體(二)破壞形態

抗壓總強度為 1679kgf

空心立方試體的壁厚為0.5cm，因此其承壓面積為 $25\text{cm}^2 - 16\text{cm}^2 = 9\text{cm}^2$

因此試體（二）的抗壓強度為 $\frac{1679\text{kgf}}{9\text{cm}^2} = 186.56 \text{kgf}/\text{cm}^2$

試體 (三)



圖 四十 5x5x5 公分空心立方試體(三)抗壓結果

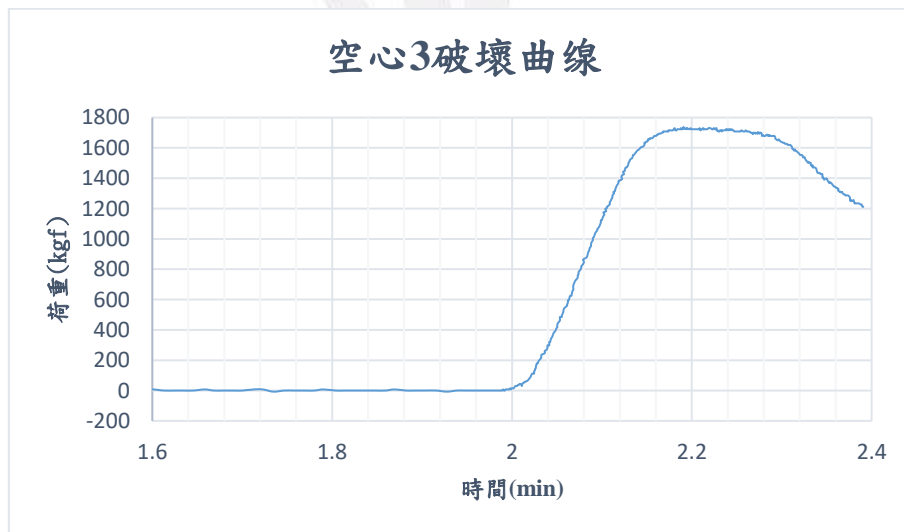


圖 四十一 5x5x5 公分空心立方試體(三)破壞曲線

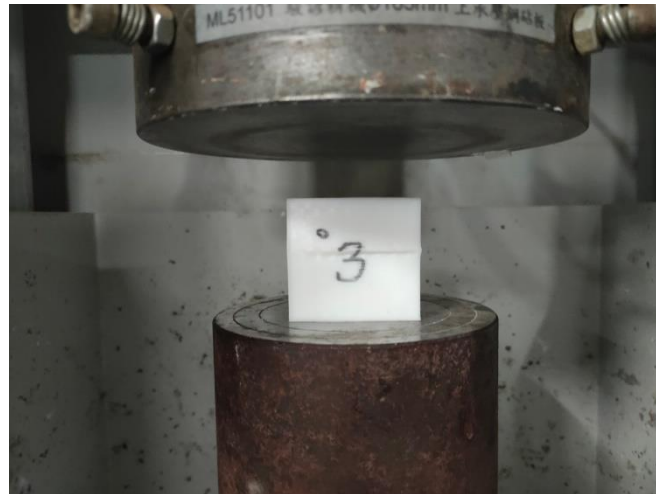


圖 四十二 5x5x5 公分空心立方試體(三)破壞形態

抗壓總強度為 1738kgf

空心立方試體的壁厚為0.5cm，因此其承壓面積為 $25\text{cm}^2 - 16\text{cm}^2 = 9\text{cm}^2$

因此試體（三）的抗壓強度為 $\frac{1738\text{kgf}}{9\text{cm}^2} = 193.11\text{kgf/cm}^2$

表 3 空心立方試體的抗壓強度

	試體（一）	試體（二）	試體（三）	平均值
抗壓強度 (kgf/cm^2)	197.22	186.56	193.11	192.3

4.1.3 抗壓強度比較

表 4 PLA 材料與混凝土抗壓強度比較

材料	抗壓強度 (kgf/cm^2)
PLA (空心)	192.3
PLA (實心)	101.4
混凝土 (常用)	210 - 280

由上表可以得知 PLA 材料的強度與常用混凝土的強度相當，因此在各種設計的柱子抗壓強度結果是可參考的。此外可以得知實心試體的總承壓強度大於空心試體，但因為承壓面積上差異較大，使得空心試體的抗壓強度大於實心試體。



4.2 各設計的抗壓強度

4.2.1 空心試體抗壓強度

空心試體(一)



圖 四十三 4x4x30 公分空心試體(一)抗壓數據

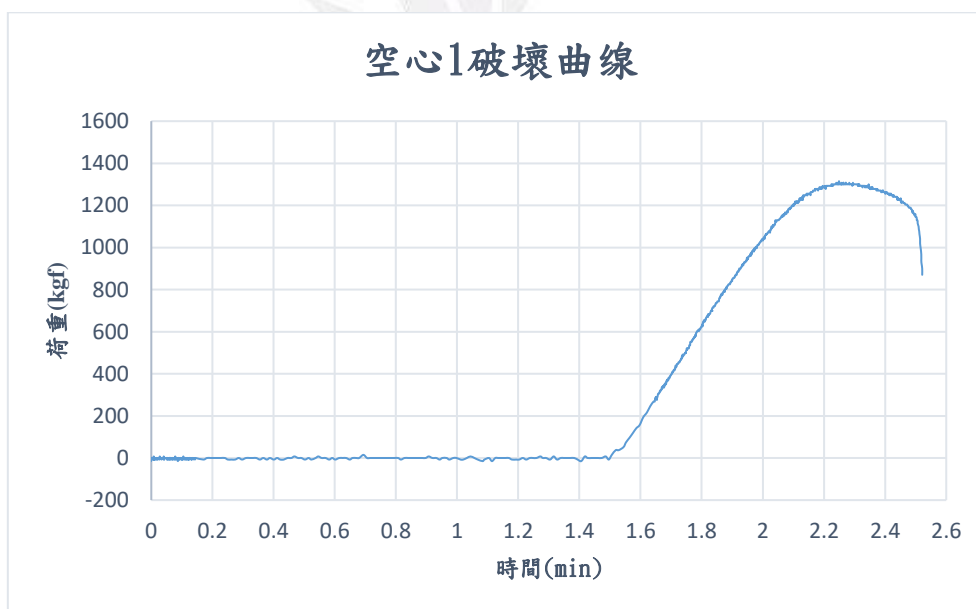


圖 四十四 4x4x30 公分空心試體(一)破壞曲線



圖 四十五 4x4x30 公分空心試體(一)破壞形態

抗壓總強度為 1315kgf

空心試體(一)的壁厚為0.5cm因此其承壓面積為 $16\text{cm}^2 - 9\text{cm}^2 = 7\text{cm}^2$

因此試體 (一) 的抗壓強度為 $\frac{1315\text{kgf}}{7\text{cm}^2} = 187.86 \text{kgf/cm}^2$

空心試體(二)

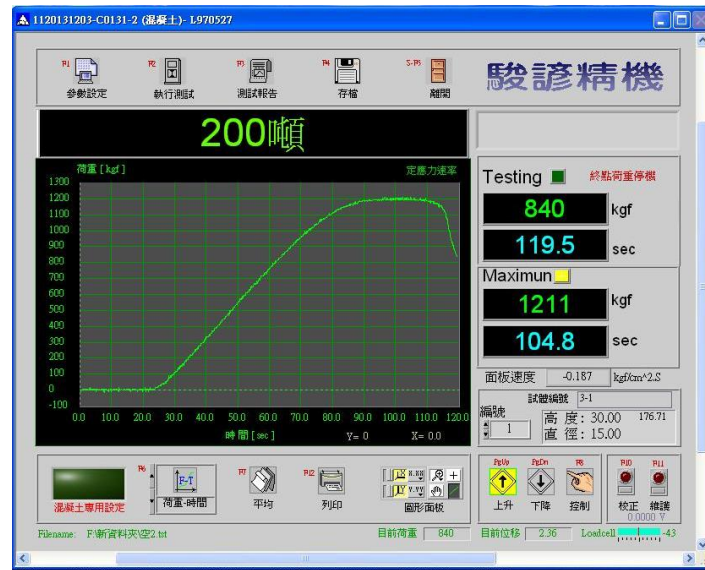


圖 四十六 4x4x30 公分空心試體(二)抗壓數據

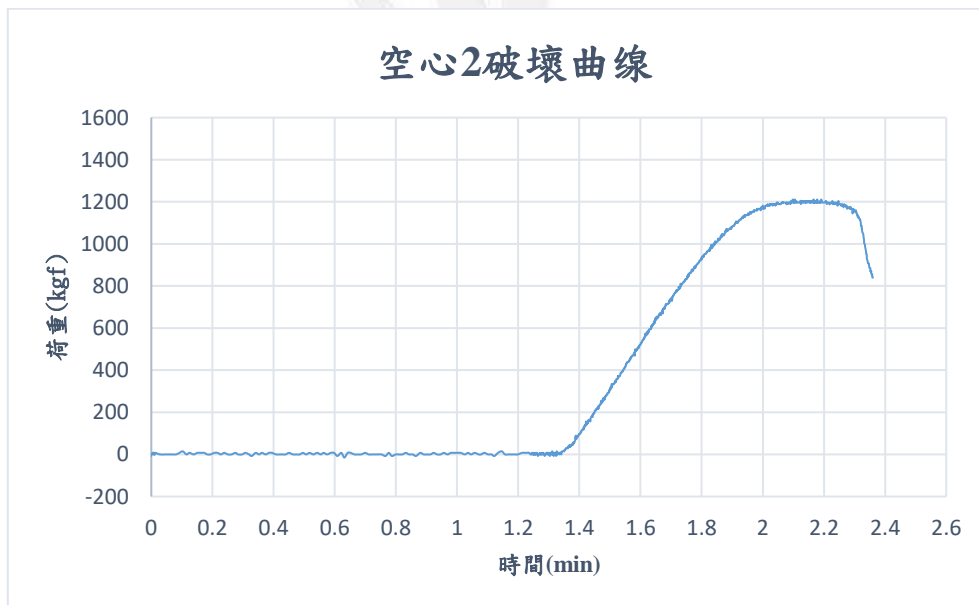


圖 四十七 4x4x30 公分空心試體(二)破壞曲線



圖 四十八 4x4x30 公分空心試體(二)破壞形態

抗壓總強度為 1211kgf

空心試體(二)的壁厚為0.5cm因此其承壓面積為 $16\text{cm}^2 - 9\text{cm}^2 = 7\text{cm}^2$

因此試體 (二) 的抗壓強度為 $\frac{1211\text{kgf}}{7\text{cm}^2} = 173.0\text{kgf/cm}^2$

空心試體(三)



圖 四十九 4x4x30 公分空心試體(三) 抗壓數據

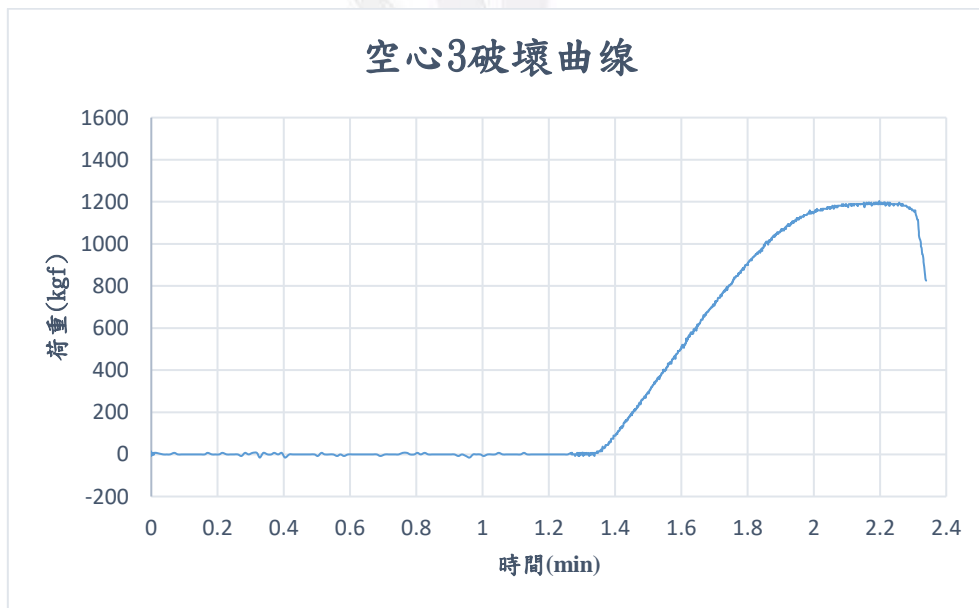


圖 五十 4x4x30 公分空心試體(三)破壞曲線

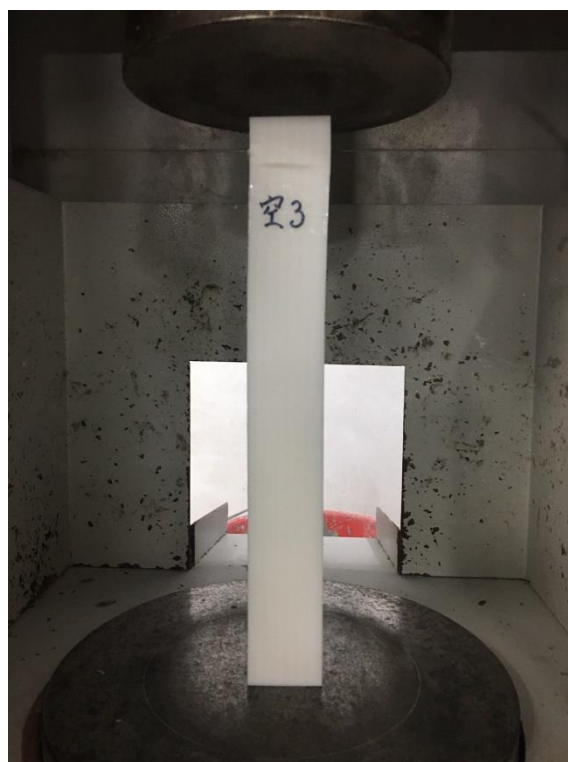


圖 五十一 4x4x30 公分空心試體(三)破壞形態

抗壓總強度為 1204kgf

空心試體(三)的壁厚為0.5cm因此其承壓面積為 $16\text{cm}^2 - 9\text{cm}^2 = 7\text{cm}^2$

因此試體 (三) 的抗壓強度為 $\frac{1204\text{kgf}}{7\text{cm}^2} = 172.0 \text{kgf/cm}^2$

表 5 4x4x30 公分空心試體的抗壓強度

	試體 (一)	試體 (二)	試體 (三)	平均值
抗壓強度 (kgf/cm^2)	187.86	173.0	172.0	177.62

4.2.2 井字試體抗壓強度

井字試體(一)



圖 五十二 4x4x30 公分井字試體(一)抗壓數據

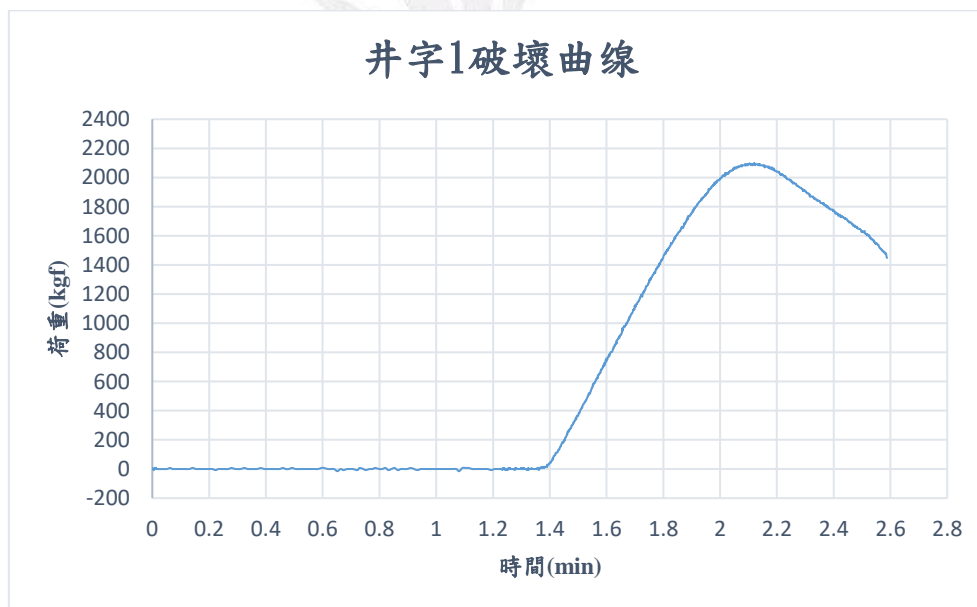


圖 五十三 4x4x30 公分井字試體(一)破壞曲線

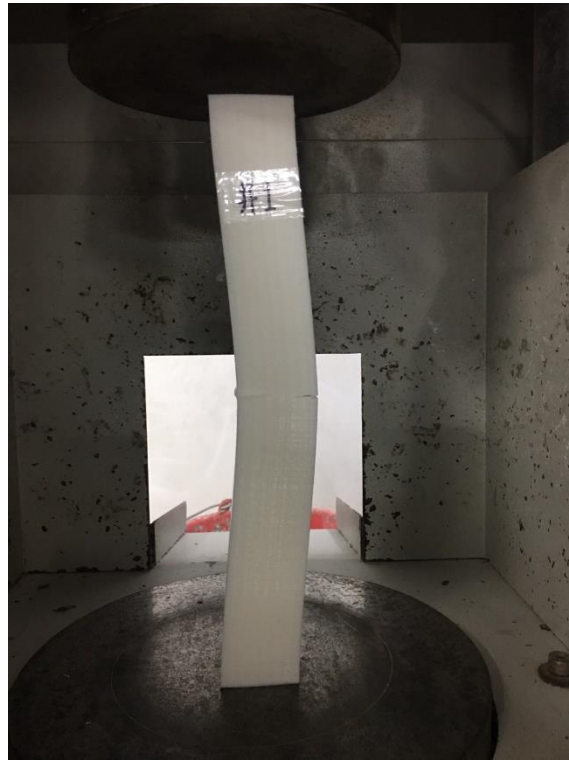


圖 五十四 4x4x30 公分井字試體(一)破壞形態

抗壓總強度為 2098kgf

試體(一)的外部壁厚為0.5cm，內部壁厚為0.15cm，因此其承壓面積為
 $16\text{cm}^2 - 7.29\text{cm}^2 = 8.71\text{cm}^2$

因此試體(一)的抗壓強度為 $\frac{2098\text{kgf}}{8.71\text{cm}^2} = 240.87\text{kgf}/\text{cm}^2$

井字試體(二)

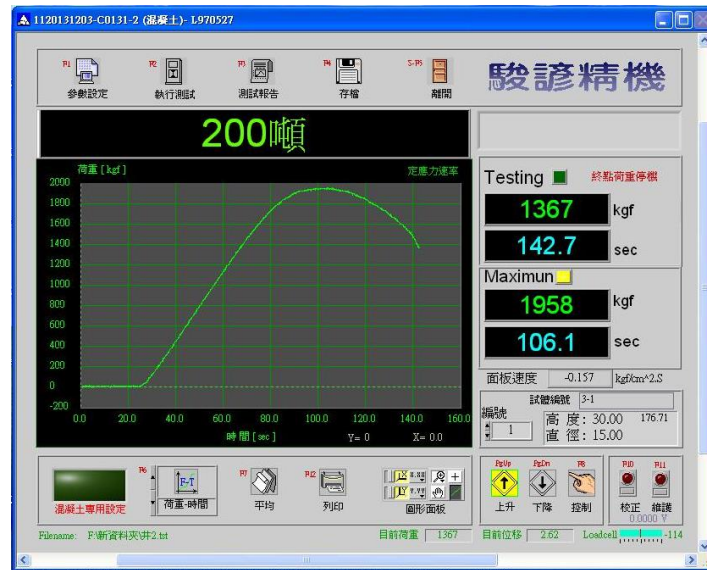


圖 五十五 4x4x30 公分井字試體(二)抗壓數據

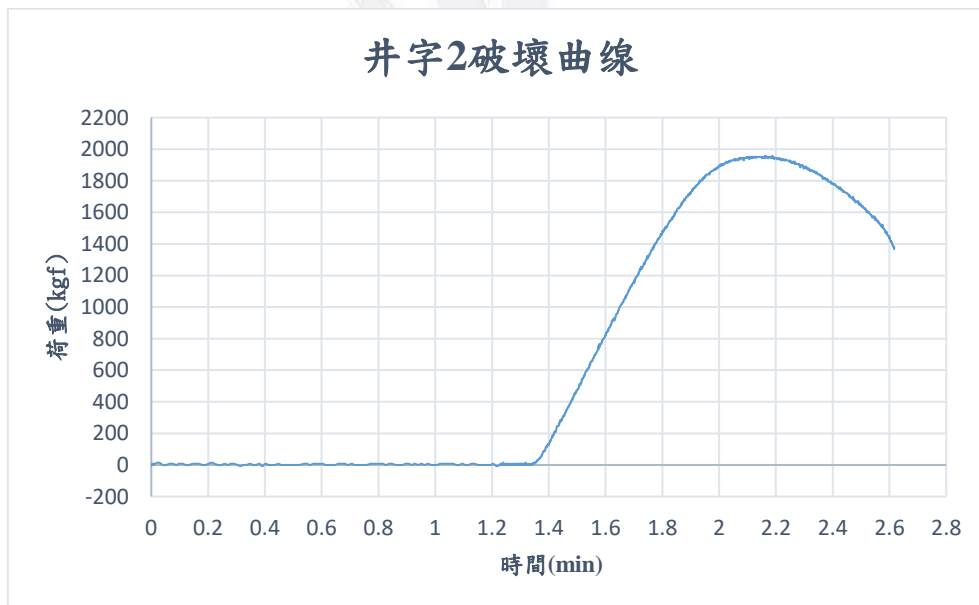


圖 五十六 4x4x30 公分井字試體(二)破壞曲線

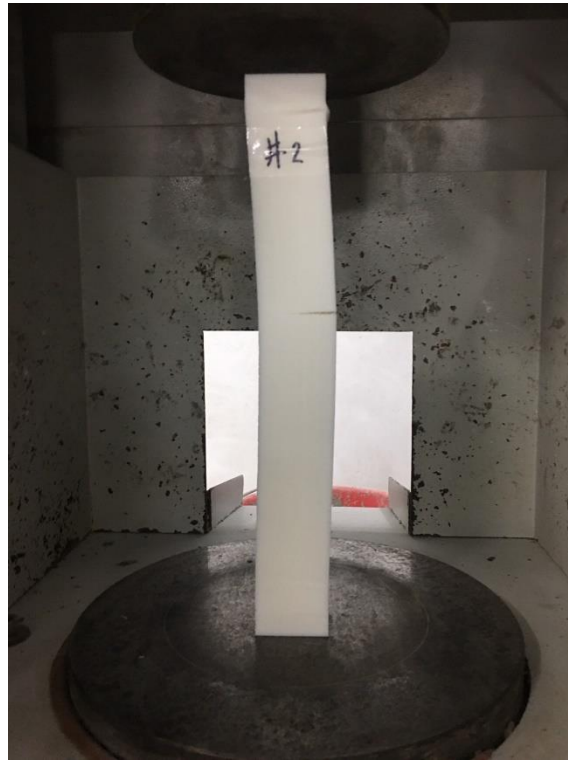


圖 五十七 4x4x30 公分井字試體(二)破壞形態

抗壓總強度為 1958kgf

試體(二)的外部壁厚為0.5cm，內部壁厚為0.15cm，因此其承壓面積為
 $16\text{cm}^2 - 7.29\text{cm}^2 = 8.71\text{cm}^2$

因此試體(二)的抗壓強度為 $\frac{1958\text{kgf}}{8.71\text{cm}^2} = 224.8\text{kgf}/\text{cm}^2$

井字試體(三)



圖 五十八 4x4x30 公分井字試體(三) 抗壓數據

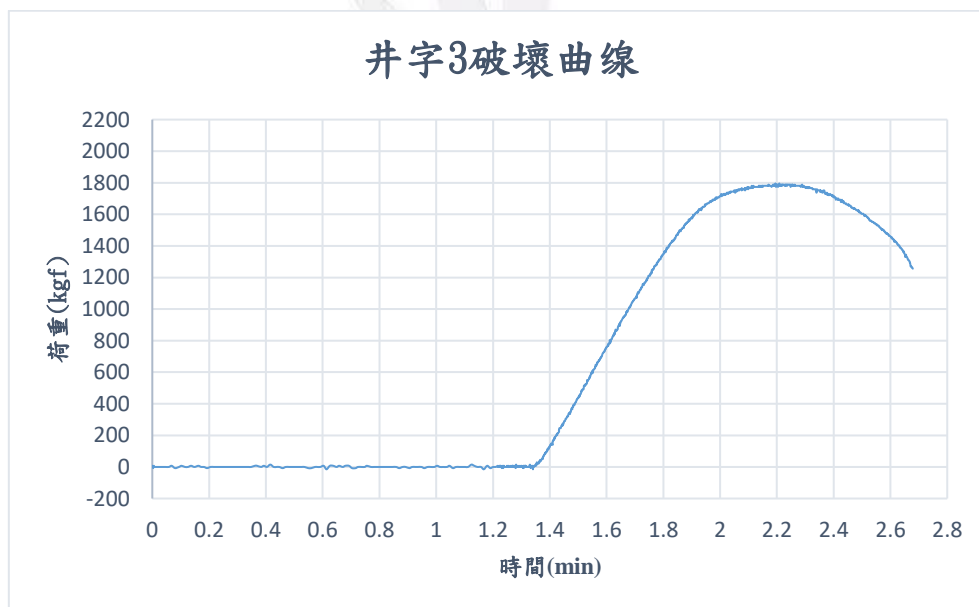
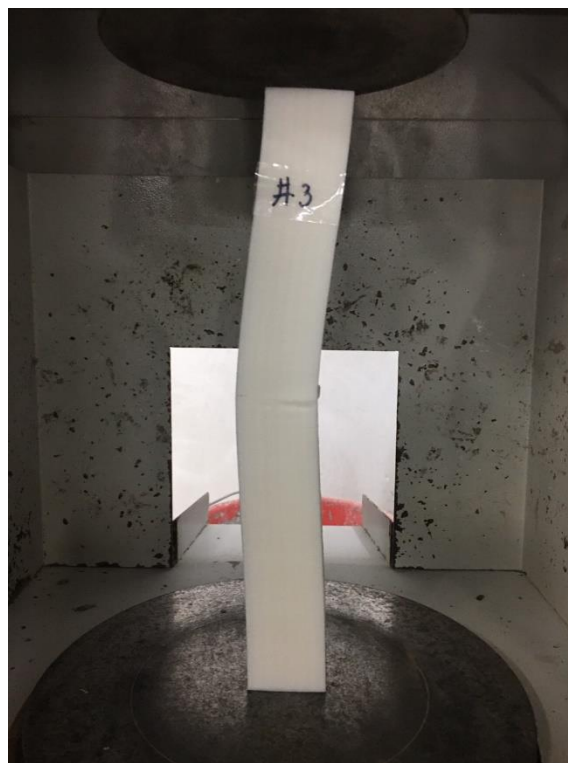


圖 五十九 4x4x30 公分井字試體(三)破壞曲線



圖六十 4x4x30 公分井字試體(三)破壞形態

抗壓總強度為 1796kgf

試體(三)的外部壁厚為0.5cm，內部壁厚為0.15cm，因此其承壓面積為

$$16\text{cm}^2 - 7.29\text{cm}^2 = 8.71\text{cm}^2$$

因此試體(三)的抗壓強度為 $\frac{1796\text{kgf}}{8.71\text{cm}^2} = 206.2 \text{ kgf/cm}^2$

表 6 4x4x30 公分井字試體的抗壓強度

	試體 (一)	試體 (二)	試體 (三)	平均值
抗壓強度 (kgf/cm^2)	240.87	224.8	206.2	223.96

4.2.3 螺旋試體抗壓強度

螺旋試體(一)

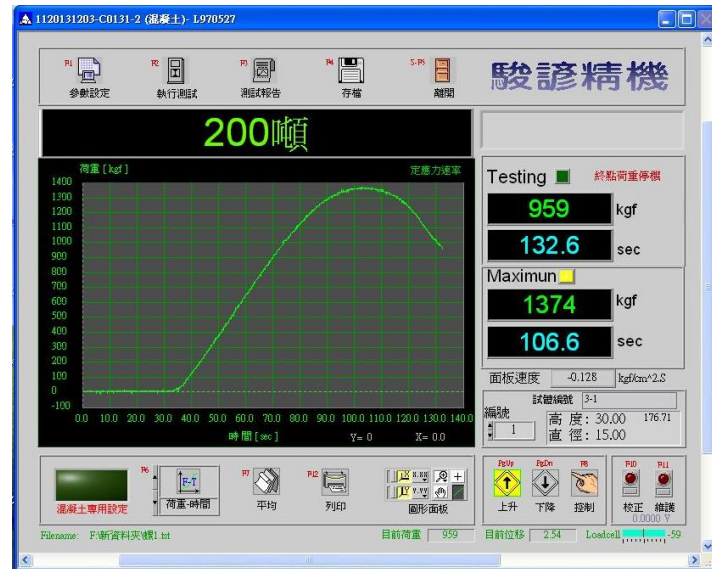


圖 六十一 4x4x30 公分螺旋試體(一)抗壓數據

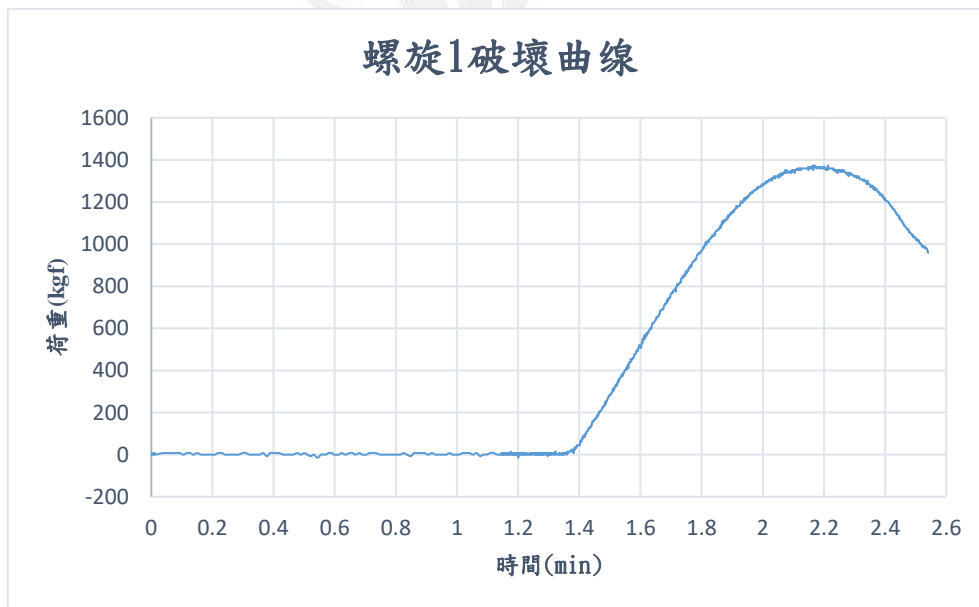


圖 六十二 4x4x30 公分螺旋試體(一)破壞曲線

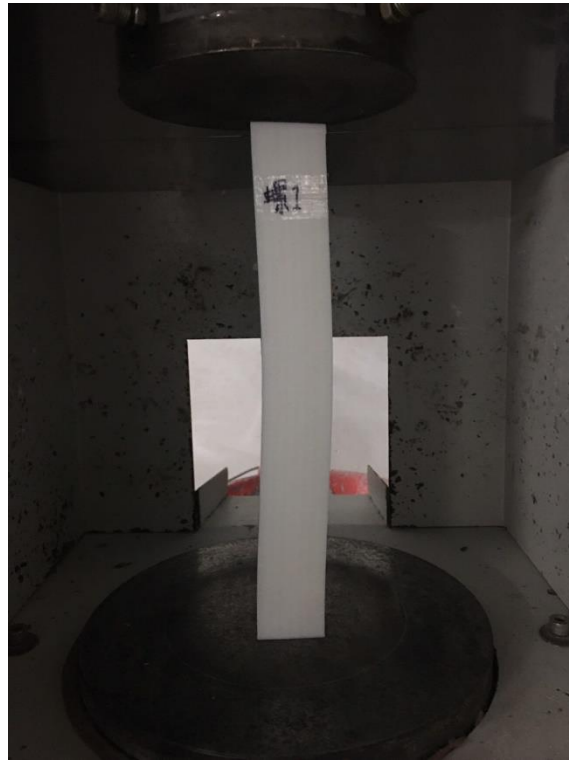


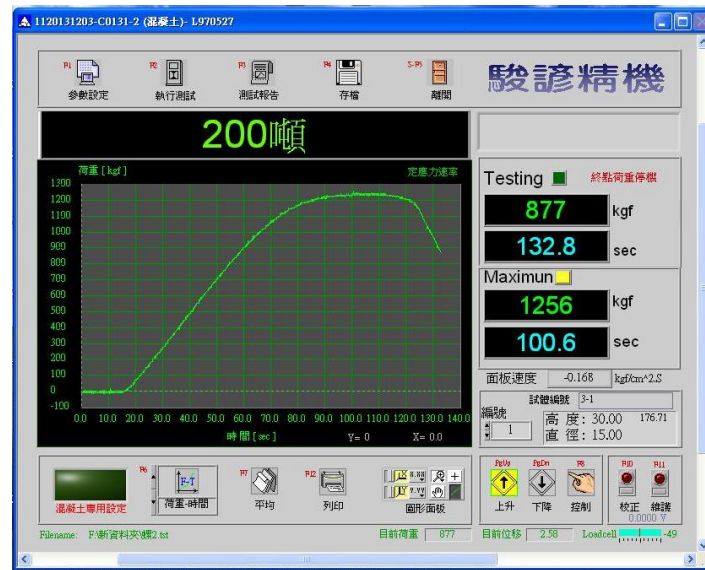
圖 六十三 4x4x30 公分螺旋試體(一)破壞形態

抗壓總強度為 1374kgf

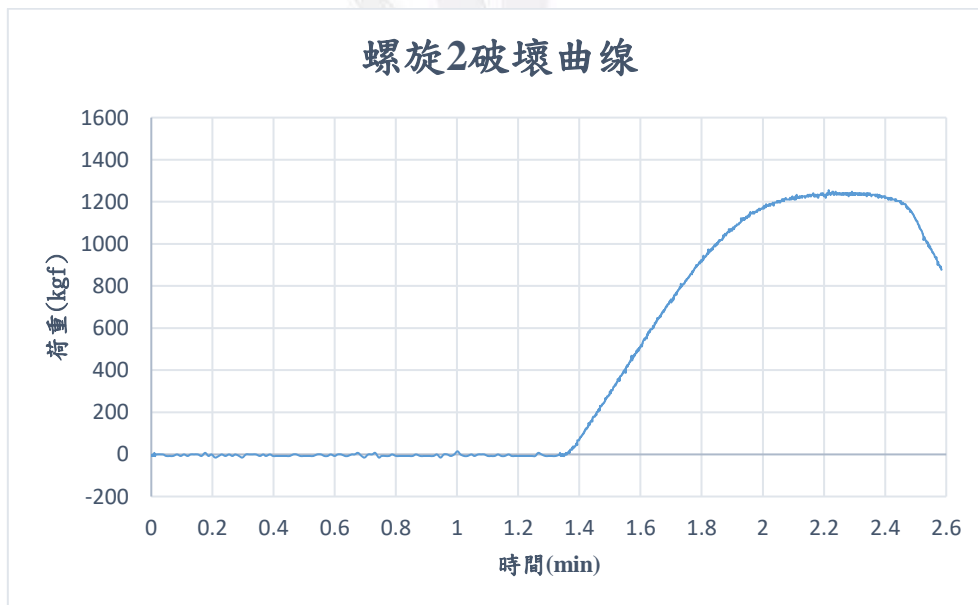
螺旋試體(一)的壁厚為0.5cm，因此其承壓面積為 $16\text{cm}^2 - 9\text{cm}^2 = 7\text{cm}^2$

因此試體(一)的抗壓強度為 $\frac{1374\text{kgf}}{7\text{cm}^2} = 196.29\text{kgf/cm}^2$

螺旋試體(二)



圖六十四 4x4x30 公分螺旋試體(二)抗壓數據



圖六十五 4x4x30 公分螺旋試體(二)破壞曲線



圖 六十六 4x4x30 公分螺旋試體(二)破壞形態

抗壓總強度為 1256kgf

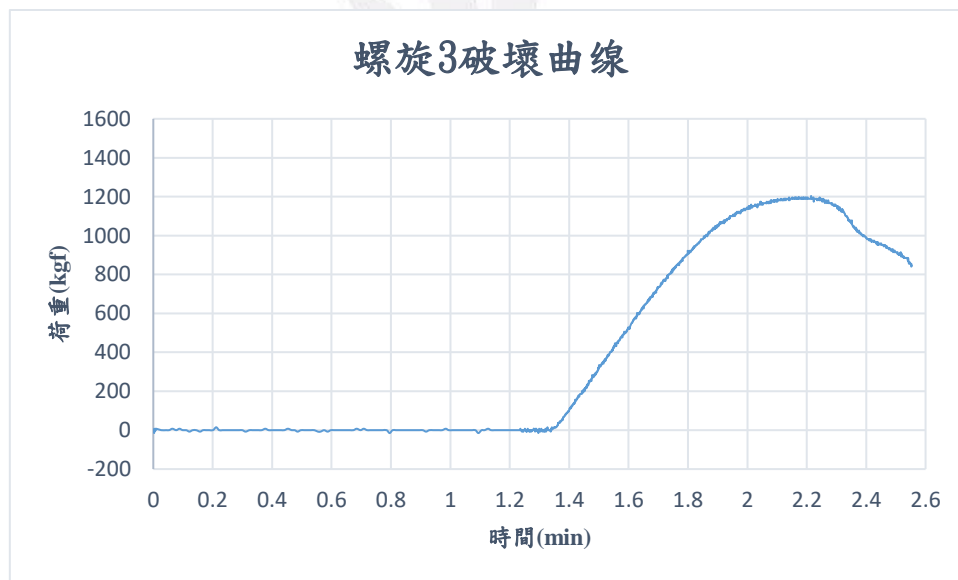
螺旋試體(二)的壁厚為0.5cm，因此其承壓面積為 $16\text{cm}^2 - 9\text{cm}^2 = 7\text{cm}^2$

因此試體 (二) 的抗壓強度為 $\frac{1256\text{kgf}}{7\text{cm}^2} = 179.43 \text{kgf/cm}^2$

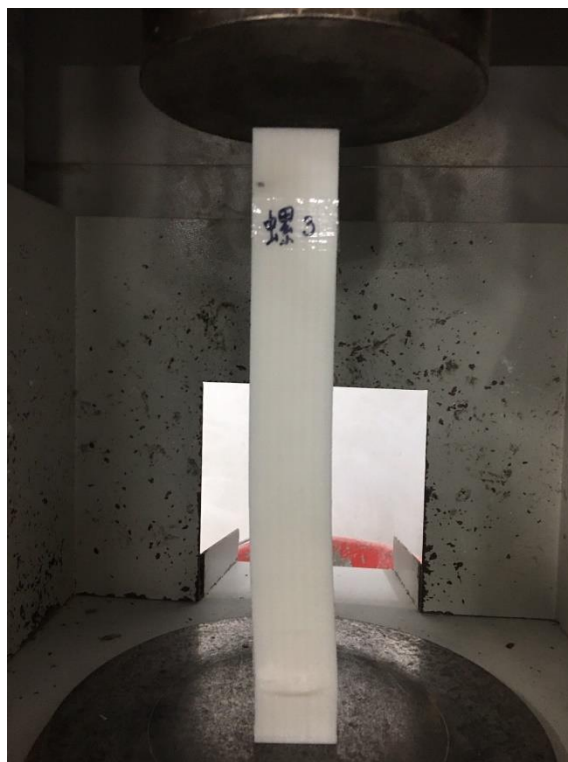
螺旋試體(三)



圖六十七 4x4x30 公分螺旋試體(三)抗壓數據



圖六十八 4x4x30 公分螺旋試體(三)破壞曲線



圖六十九 4×4×30 公分螺旋試體(二)破壞形態

抗壓總強度為 1204kgf

螺旋試體(三)的壁厚為0.5cm，因此其承壓面積為 $16\text{cm}^2 - 9\text{cm}^2 = 7\text{cm}^2$

因此試體(三)的抗壓強度為 $\frac{1204\text{kgf}}{7\text{cm}^2} = 172.0 \text{ kgf/cm}^2$

表 7 4×4×30 公分螺旋試體的抗壓強度

	試體(一)	試體(二)	試體(三)	平均值
抗壓強度 (kgf/cm^2)	196.29	179.43	172.0	182.57

4.2.4 斜撐試體抗壓強度

斜撐試體(一)



圖 七十 4x4x30 公分斜撐試體(一)抗壓數據

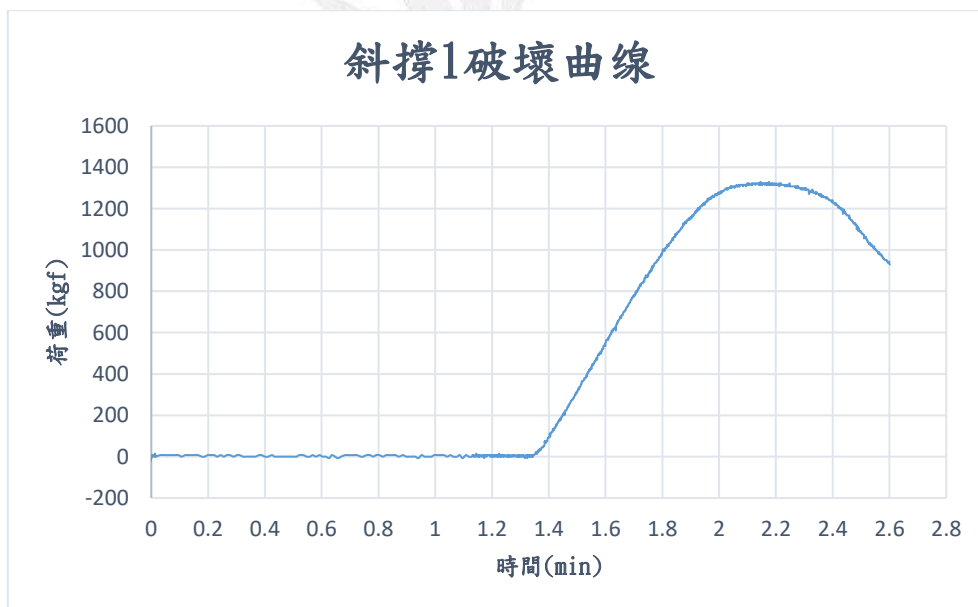


圖 七十一 4x4x30 公分斜撐試體(一)破壞曲線

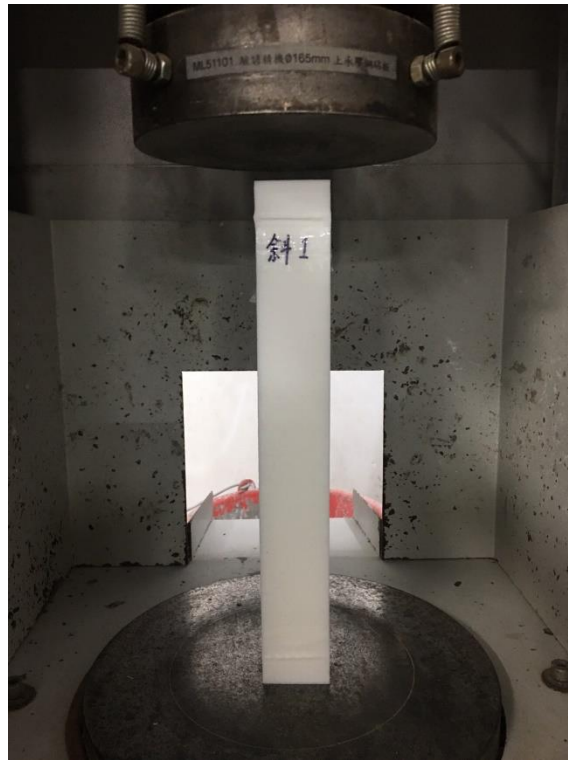


圖 七十二 4x4x30 公分斜撐試體(一)破壞形態

抗壓總強度為 1330kgf

斜撐試體(一)的壁厚為0.5cm，因此其承壓面積為 $16\text{cm}^2 - 9\text{cm}^2 = 7\text{cm}^2$

因此試體(一)的抗壓強度為 $\frac{1330\text{kgf}}{7\text{cm}^2} = 190.0\text{kgf/cm}^2$

斜撐試體(二)



圖 七十三 4x4x30 公分斜撐試體(二)抗壓數據

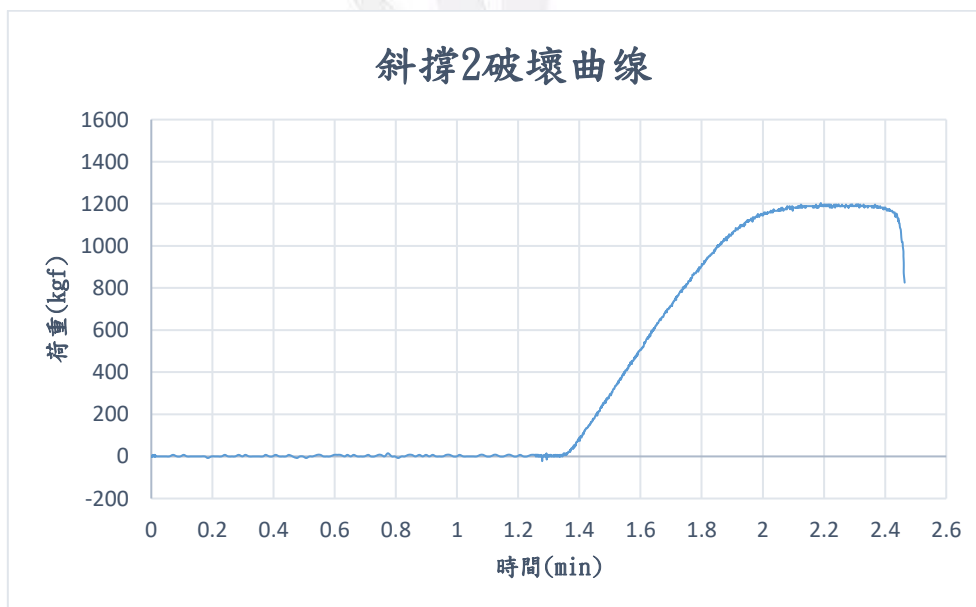


圖 七十四 4x4x30 公分斜撐試體(二)破壞曲線



圖 七十五 4x4x30 公分斜撐試體(二)破壞形態

抗壓總強度為 1204kgf

斜撐試體(二)的壁厚為0.5cm，因此其承壓面積為 $16\text{cm}^2 - 9\text{cm}^2 = 7\text{cm}^2$

因此試體(二)的抗壓強度為 $\frac{1204\text{kgf}}{7\text{cm}^2} = 172.0\text{kgf/cm}^2$

斜撐試體(三)

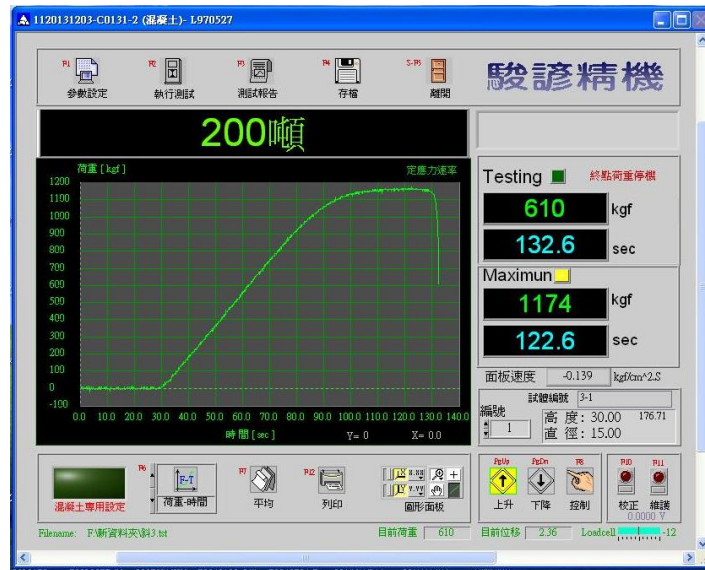


圖 七十六 4x4x30 公分斜撐試體(三)抗壓數據

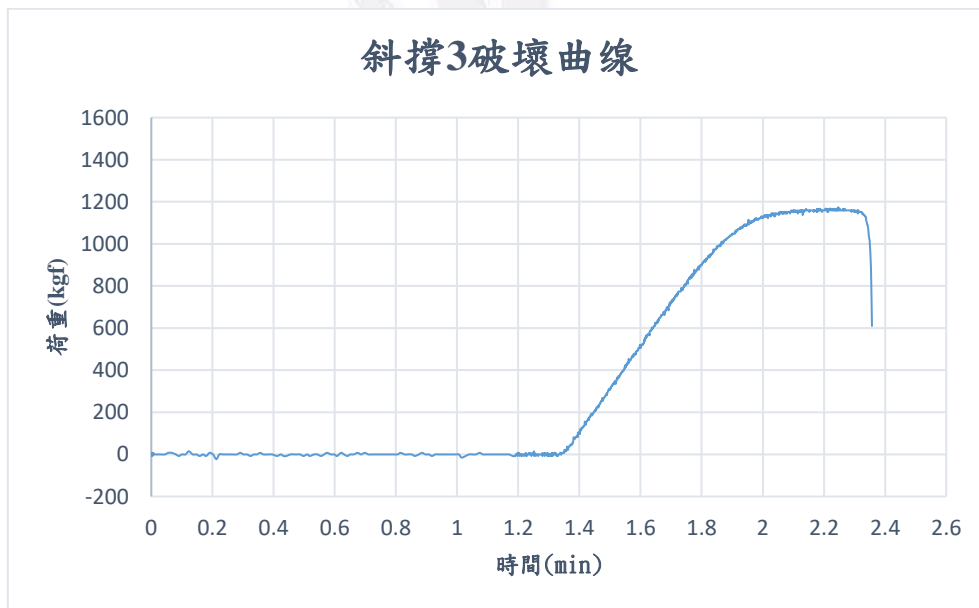


圖 七十七 4x4x30 公分斜撐試體(三)破壞曲線

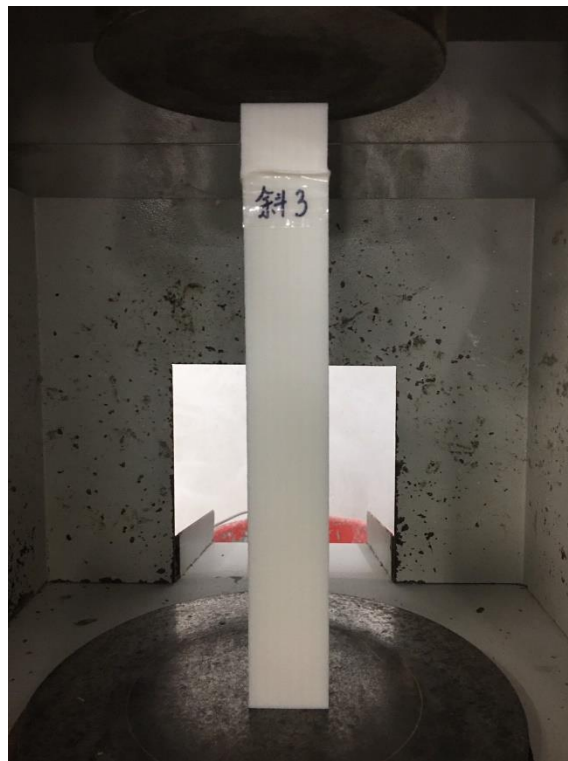


圖 七十八 4x4x30 公分斜撐試體(三)破壞形態

抗壓總強度為 1174kgf

斜撐試體(三)的壁厚為0.5cm，因此其承壓面積為 $16\text{cm}^2 - 9\text{cm}^2 = 7\text{cm}^2$

因此試體 (三) 的抗壓強度為 $\frac{1174\text{kgf}}{7\text{cm}^2} = 167.71\text{kgf}/\text{cm}^2$

表 8 4x4x30 公分斜撐試體的抗壓強度

	試體 (一)	試體 (二)	試體 (三)	平均值
抗壓強度 (kgf/cm^2)	190.0	172.0	167.71	176.57

4.3 討論

4.3.1 抗壓強度比較

表 9 抗壓強度結果比較

	抗壓強度 (kgf/cm^2)
5x5x5 公分立方 (空心)	192.3
5x5x5 公分立方 (實心)	101.4
4x4x30 公分空心試體	177.62
4x4x30 公分井字試體	223.96
4x4x30 公分螺旋試體	182.57
4x4x30 公分斜撐試體	176.57

對於我們做出的三個不同的設計中，除了井字試體外，其他設計的抗壓強度和空心試體的抗壓強度幾乎一樣，因此我們可以得知螺旋與斜撐的設計對於試體的抗壓強度幾乎沒有實際的作用。以 4x4x30 公分空心試體抗壓強度為基準，唯有井字設計強度有明顯的增加，增加 $46.34kgf/cm^2$ ，約 26%。根據試驗結果，我們得知在 4x4x30 公分的所有試體中，井字設計試體的抗壓強度最高，由此得知井字設計有更强抗壓的效果。依試驗結果顯示，同款設計之抗壓強度數據皆有明顯的排列，第一組抗壓強度最高，第二組次之，第三組為抗壓強度最差，因此我們推測模型因列印完成的時間不同，先印製完成之模型因接觸空氣中的水分較多導致強度上有所差異。

4.3.2 試體破壞形態分析

上述試驗之四種試體因尺寸較為細長故造成的破壞形態皆為挫曲破壞，但因內部結構差異仍有些微不同。井字試體有明顯的挫曲破壞，進而導致在試體的中間有斷裂的現象發生。空心試體、螺旋試體和斜撐試體，其三種破壞型態約略相同皆為輕微的挫曲破壞，沒有造成試體斷裂，但因強大的壓力而導致壁體膨脹。

4.3.3 破壞曲線分析

根據 §4.2 之破壞曲線圖可以看出，不同設計之試體呈現的破壞曲線圖也不盡相同，所有試體中，井字試體和各設計的第一組試體在抗壓強度曲線頂峰附近幾乎呈現較圓滑的二次曲線。第二組、第三組的空心試體和斜撐試體在抗壓強度曲線達到頂峰後維持約 0.2 秒到 0.4 秒就開始快速下降。第二組、第三組的螺旋試體也和空心試體和斜撐試體一樣維持約 0.2 秒到 0.4 秒後開始下降，但相對較為緩慢下降。

第5章 結論與建議

有鑒於少子化的社會，人力資源的缺乏，個人工資的成長，與工作環境對於勞工的安全的觀念提升，現場勞動技術人員卻不易取代，但綜觀各大產業，對於所有有關使用人力生產的業者，都希望使用自動化的設備，或是自動化的流程，去取代勞力，進而提升各項作業生產的效率與安全，同時也可以減少勞資雙方的糾紛，而土木建築行業裡，要如何開始朝向這方面來發展是值得探討的，由於傳統施工方式，現場施作綁紮鋼筋與釘模板的勞動人員卻不易被取代，那要如何克服這項課題，關鍵在於新的技術，以現今所有技術來說，可以製作出立體結構與符合自動化作業，同時又可以在人員使用上更加精簡的技術，首先想到的也就是 3D 列印，而我們此次研究「3D 列印應用於組合式建築概念評估」正是以此為目標，而想到土木工程，必定會討論到結構的強度，這也是本次專題第一項要探討的主要研究，首先要成功使用 3D 列印機印出我們所發想的結構體，並且去做抗壓測試。

下列為本次研究的發展原因：

- 一、未來技術型勞力人員的減少，傳統施工方式找不到工人，進而改變施工的方式，使機械能取代人力。
- 二、3D 列印機在列印結構體時，須注意無法列印無支撐的橫向結構，如何融入於垂直結構中，以減少材料的支出。
- 三、結構柱的各式形狀列印與抗壓實驗，試驗出可以列印出來的形狀，並且使結構柱具有足夠的抗壓能力，找出最有效益的列印方式與形狀。

四、比較各式形狀的抗壓能力，相同形狀間內部支撐結構有所不同時，所造成的差異與破壞的樣態，做一個相互比較，並整理可能造成之原因，並且對比混凝土柱的抗壓能力與關聯性。

五、3D 列印機為使用單一材料的自動化機械，所以用於比較的試體適合使用純混凝土柱。

以上所列幾項，為本次研究主要重點核心，我們知道承壓的面積越大，可受的總力就越大是一定的，但抗壓強度卻由空心的試體較高，代表找出合適的形狀，並把列印出更高抗壓強度的試體為主要目標，更在土木工程的結構知識上結合 3D 列印機可列印出的形狀，嘗試增加抗壓強度，又可以減少材料的使用。

5.1 結論

本次實驗嘗試同樣空心柱體加入不同內部支撐，嘗試取代鋼筋的支撐作用，並做出比較，為本次研究結果：

- 一、成功列印出井字試體、螺旋試體與斜撐試體，並且修正內部斜撐與柱體比例。
- 二、在列印成功後，拿去做抗壓試驗得到各項結果得知力量傳導的越完全的試體，強度越大。

5.2 建議

在這次研究中，嘗試了幾種不同內部支撐，並且對於柱體的強度也有所改變，在未來如果有學弟妹想持續研究這項技術的話，建議對於形狀的發想不要侷限在我們的設計而已，多方嘗試 3D 列印機能列印的形狀，測試各種極限的形狀，並且了解材料的特性，發揮 3D 列印機的長處，以現有的土木知識基礎上，配合上 3D 列印機多變延展的特性，做出適合用於建築的結構，並且是能夠列印高樓層的形狀，大幅提升自動機械化蓋房子的效益。因應台灣地狹人稠，寸土寸金的社會，才能展現出價值所在。

下列為研究建議：

- 一、嘗試更多不同形狀，不只用於垂直的柱體，更希望往更困難的橫向結構做嘗試。
- 二、盡量減少為了做橫向結構所增加的支撐，更好的是把支撐融入於垂直結構裡，以減少材料的損耗，進而減少支出與空間的浪費，畢竟多餘的材料支出不是本實驗所樂見的。
- 三、3D 列印機列印也是需要時間，嘗試計算列印所需的時間成本。
- 四、列印完成後盡量越早去做抗壓測試越好，因為材料本質的關西，碰到水會軟化，長時間放在空氣中會吸收水氣，從而影響到是體抗壓的強度，導致數據落差較大。

參考文獻

- 塗峻維、謝鈞毅、陳柏豪、廖楚信、楊世傑、賴好柔（2019）。3D 列印應用於組合式模板可行性研究。逢甲大學土木工程系畢業設計。台中市。
- 蔡惠如（2020）。LIFE・經典／全球最大 3D 列印建築 193 坪大 3 周就完工。上網日期：2020 年 11 月 20 日，檢自 <https://fashion.ettoday.net/news/1651134>。
- 美學生活（2019）。3D 列印會是快速建築的未來嗎？。上網日期：2020 年 11 月 19 日，檢自 <https://www.a-life.com.tw/trend/?p=2242>。
- 南極熊 3d 打印網（2016）。3D 列印混凝土建築及其混凝土材料現狀分析。上網日期：2020 年 11 月 19 日，檢自 <https://kknews.cc/zh-tw/tech/qgzbly.html>。
- 南極熊 3d 打印網（2016）。3D 列印房子用的混凝土有哪些成分？。上網日期：2020 年 11 月 19 日，檢自 <https://kknews.cc/zh-tw/tech/pekn3j.html>。
- 縱維科技（2017）。九大看點！PLA vs ABS：3D 列印耗材的說明及比較。上網日期：2020 年 11 月 19 日，檢自 <https://kknews.cc/zh-tw/tech/oyr9ezq.html>。
- 广州市阳铭新材料科技有限公司（2018）。PLA-T(PLA Tough)高韧聚乳酸。上網日期：2020 年 11 月 20 日，檢自 <http://www.gzymkj.com/?c=msg&id=1559>。

捌零三维材料技术（深圳）有限公司（2018）。T-PLA 材料 基本介绍。

上網日期：2020 年 11 月 20 日，檢自
<http://www.time80s.com/newsitem/278158764>。

駿諺精機(股)公司。上網日期：2020 年 11 月 18 日，檢自

<http://www.testingmachine.com.tw/chinese/CY-6690.html?CID=1>。

陳亮宇（2014）。Cura 入門教學。上網日期：2020 年 11 月 18 日，檢自

<http://diy3dprint.blogspot.com/2014/01/cura.html>。

SketchUp.（2020）。上網日期：2020 年 11 月 18 日，檢自

<https://zh.wikipedia.org/wiki/SketchUp>。

Tsai, M.（2016）。KINGSSEL 3070(國王機 3070) - 達億 3D 列印機

MASTECH。上網日期：2020 年 11 月 18 日，檢自
<http://www.mastech3d.com/3dfdm/kingssel3070>。

