



公開  
 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：070404e301

## 農業部林業及自然保育署112年度科技計畫研究報告

計畫名稱：**竹構造整合性設計與實作研究：接頭、結構元件與施工程序** (第1年/全程3年)

(英文名稱) **Integrated Design and Research for Bamboo Structures: Joints, Structural Components and Construction Processes**

計畫編號：112農科-7.4.4-務-e3(1)

全程計畫期間：自 112年3月1日 至 114年12月31日

本年計畫期間：自 112年3月1日 至 112年12月31日

計畫主持人：許倍銜  
執行機關：國立陽明交通大學



1123424



## 一、執行成果中文摘要：

本研究之計畫目標為推廣竹材於建築空間構築上的利用，主要架構以接頭、結構元件、結構系統和施工程序多個面向進行，期望透過各式設計方法及構築成果，讓竹建築可以更加便於施工、降低成本之餘，保留形式上的表現性與多樣性。

重點開發的內容為通用竹構造接頭研發、曲線竹結構單元開發及彈性網殼設計與構築程序，而每項研究都包含了數位參數設計程序建構、實體構造物呈現、相關實驗測試程序之量化報告、相關加工/施工程序知識建立等成果。

在學術上，各面向之研究成果均會發表論文及參與學術研討會，並將與課程結合，讓大學生與研究生能夠參與研究，擴大其在學術上的影響力；而在國際層面，將和世界竹會有所交流，將於2024舉辦之世界竹會論壇及工作坊就是一個很好的合作機會，此外，也會與香港大學建築系協同合作，針對彎曲木集成材如何延伸至竹材應用進行探討。

根據以上多個研究方向推展，其研究成果預期會做為open design，以無償之技術推廣為目標，開放其他專業者參考與使用，期許對未來竹構築與竹建築的發展做出貢獻。

## 二、執行成果英文摘要：

The objective of this research project is to promote the utilization of bamboo in architectural construction. The main framework includes multiple aspects such as joints, structural components, structural systems, and construction procedures. Through various design methods and construction outcomes, the aim is to make bamboo architecture more easily constructed and cost-effective, while still preserving its expressive and diverse forms.

The key development contents include the research and development of universal bamboo structural joints, the development of curved bamboo structural units, and the design and construction procedures of flexible mesh shells. Each research topic includes results such as digital parameter design procedures, physical structural models, quantitative reports on relevant experimental testing procedures, and the establishment of relevant processing/construction procedures.

In academia, the research results from each aspect will be published in academic papers and presented at academic conferences. The research will also be integrated into courses to enable undergraduate and graduate students to participate and expand their academic influence. At the international level, there will be exchanges with the World Bamboo Organization, and the World Bamboo Forum and Workshop in 2024 will be a great opportunity for collaboration. In addition, there will be collaborations with the Department of Architecture at the University of Hong Kong to explore how curved wood integrated materials can be extended to bamboo applications.

Based on the various research directions outlined above, the research results are expected to be open design with the goal of promoting free technology. Other



1123424



professionals are encouraged to reference and use the results, with the hope of contributing to the future development of bamboo construction and architecture.

### 三、計畫目的：

面對當代竹材在建築領域應用的困境與關鍵議題，本計畫期許發展實際構築上使用竹材的相關方法，讓竹構築可以更加便於施作、盡可能降低成本且保留形式上的表現性與多樣性，使得竹材於建築空間構築上的利用可以被廣泛推廣。

研究方向將朝向通用接頭、結構單元、施工程序三個層面，提出改良的竹構造與整體施工程序。基於設計研究的基本策略以及務實的開發程序，展開整合設計、實作與相關實驗測試，並根據提出的設計，製作出接頭與構造雛形，再加以進行性能測試與設計修正優化。

本計畫在廣義建築定義的前提下，進行設計與實作兩個層面的研究方向及考量，綜觀台灣目前的竹建築發展趨勢，均以pavilion型態為主，型式上趨近於涼亭的建築構造，因此本計畫於實作之竹構造，亦以休憩用的半開放空間建築物為發展方向。

然而因竹構造尚未有完整的技術規則，因此在竹材之前期處理、構造體設計、結構計算及後續維護等面向，主要會參照現行木構造之技術規則為基準，期望研究成果可以成為台灣竹構築產業向前推動的助力。

今年做為三年計畫之開端，本年度工作的重點在鋪設研究的基礎，以利後續研究的進行，並開始推展階段的研究成果。此階段研究內容包含：

- 1.1 文獻研究與案例分析：包含竹構造接頭的文獻與案例、竹集成材彎曲加工技術文獻、彈性網殼的細部設計與構築程序文獻研究。
- 1.2 基礎設計：竹構通用接頭的設計、彈性網殼的細部設計。
- 1.3 階段實作：竹構通用接頭的雛形製作、彎曲竹集成材結構元件雛形製作、彈性網殼實作構築。

### 四、重要工作項目及實施方法：

#### （一）通用竹構造接頭研發

以研發具備各式形態之適應性竹構造接頭為目標，且能夠與各式竹構造中的元件之間有著高彈性的連接，並以標準化、可大量生產的方式進行設計，以期盡量降低成本，進一步達到推廣之目的。此項研究主要以各式竹搭接類型的接頭設計為主，例如端點、續接、T型、十字搭接等，設計出可適應竹材之新型態金屬零件。

#### 1. 設計方法

首先進行文獻蒐集和資料分析，整理出常見的竹構造和相應的搭接情境，接著開發能夠應用的接頭構造，包括使用電腦軟體進行3D模擬和設計構築，以及透過3D Printer、工廠開模製作等方式製作實體prototype進行測試。並且，搭建小規模結構體以測試接頭的適用性和強度，並反覆進行資料分析和設計修正，以達到產出完善的通用性竹構造接頭成果的目的。

#### 2. 實作





實作部分包含強度測試和小規模構造體搭建，完成初步設計和構造發展後，由結構技師選擇接頭樣本，製作1:1的mock-up進行測試。利用萬能材料試驗機進行壓長、下壓、拉壓等測試實驗，模擬實際構築情境中的變形狀況，並分析測試數據以修正接頭設計，以利後續進行實際構造搭建，將成品應用於竹構築中。

### 3. 面臨問題與挑戰

適應性方面是竹接頭設計的挑戰，可從以下的面向研究：在設計中是否應使用彈性或塑性材料，如金屬薄片、橡膠或矽膠等以適應竹材表面，接頭規格的通用性也應考慮，例如是否統一一種規格，或者針對常用竹材（如桂竹、孟宗竹）制定若干種規格等，以上這些問題都應納入設計考慮。

#### （二）曲線竹結構單元開發

此研究主要以「懸鏈線」為曲線的依據發展數位參數設計程序，並配合竹集成材之加工程序，建構出如同曲面薄殼的結構型態。根據近年已知的集成方式，進行統整分析，羅列OSB、WBS、BS、BLVL、FB、LBL等不同集成膠和材料的製造方式。加以對比上述集成方式的材料強度、加工程序和材料彈性模數等因素，並參考了國內外各單位的文獻，以獲取機械竹材在各國的發展現況。

#### 1. 設計方法

首先以懸鏈線作為參數設計之依據，利用懸鏈線曲線的材料中僅受張力而不受壓力之特性，可以有效減小材料尺寸，以固定曲率的懸鏈線為結構元件的形式基準，僅在長度上做變化，如此在竹集成材的加工上只需使用一種模具設定，便可減少開發的經費與時間成本，以這樣的方式作為設計基準，即可構築一種接近曲面薄殼的結構型態，而在落實到實際產出部分，則是先進行少量彎取集成築結構單元的生產，並進行強度測試與優化檢討，並以小規模結構體來驗證曲線竹結構單元構成曲面的可行性。

#### 2. 實作

在數位參數設計程序中需要了解加工條件上的限制，例如加工尺寸與曲率設定等，並將這些數據導入參數設計中進行考量，此外，竹集成材的製作需要和有專業設備之加工單位合作，而製作完成之竹集成材也需要測試結構強度，以這些材料、測試作為基礎後，落在結構單元中，並在後續產出竹構造的結構體。

### 3. 面臨問題與挑戰

竹集成材需要和外部單位在加工處理上進行合作與產出，且同時需要顧慮其加工條件，其加工或者材料本身的限制性可能成為參數設計上的考量，再來，彎曲竹集成材的耐久性亦需要長時間的觀察與驗證。此外，由於台灣竹集成材取得不易，因此研究中也加入「竹木混合」的構築方式作為考量的方向之一，可能以木集成材為結構基礎，加入局部竹集成材的方式來建構整體型態。

#### （三）彈性網殼設計與構築程序

以彈性網殼(elastic grid shell)作為設計基礎，用以建構數位構築程序及實體結構設計，整體型態會是由2D平面網格為起始，其中交點上設計可鬆動、允許滑動的接頭，並透過移動端點來塑造整體結構的型態。

#### 1. 設計方法





根據彈性網殼的基本論述，數位參數的模擬與接點細部設計是彈性網殼的關鍵。數位參數設計程序需要模擬平面網格移動接點的型態變化，如移動點的位置、數量、移動程度等，以建立相應的參數。同時也能從最終形態去反推初始的2D網格安排。另外，實體材料的性能需轉化為參數，如最大曲率、竹材長度等，這是一個來回檢討、整合的參數設計程序。

## 2. 實作

在實作部分，網格相交的接頭設計是主要需要實驗的重點，接頭在初始需要能夠允許滑動與調整，而在塑形之後又能夠快速鎖固，這部分會參考使用在木材上的elastic gridshell案例，加以分析與改良。首先從小規模、縮小尺度的mock-up開始，同步測試接頭和整體結構塑形，先以下方頂高的方式移動交點，之後朝向1:1mock-up，調整優化接頭和細部設計，並以吊具或吊車來移動交點，除了可順利組裝、達到預期的型態之外，結構穩定性亦需要被測試，需和專業結構測試單位合作，以搖動整體結構的方式做強度測試，並可實際應用於竹構造中。

## 3. 面臨問題與挑戰

在構築彈性網殼時，竹材本身的彎曲性能是一個挑戰，青竹容易彎曲，但竹材需要經過乾燥加工，先組裝後乾燥有其難度，而先經過乾燥加工的話會乾縮，可能會產生接頭的鬆動，因此在接頭的設計上應要克服鬆動的問題，或是elastic grid shell的模式下，先乾燥的竹材能夠達成足夠的彎曲性能，此外，也可實驗已頗開的竹子、多層來取代未剖的圓竹，達到彎曲性能的要求。

## 五、結果與討論：

在本計畫的研究項目中，包括通用竹構造接頭研發、曲線竹結構單元開發、彈性網殼設計與構築程序，在今年度分為期中與期末兩個階段，分別進行了文獻研究與案例分析、基礎參數設計、階段性實作等內容。

在文獻研究與案例分析的項目中，本計畫深入研討之下建立了廣泛的知識與數據庫：竹構造接頭的部分探討了傳統與新式工法的差異性，並對其進行了接頭類型及實際案例兩個項目來作分析，使本計畫打造新式金屬零件接頭之研究方向更加明確；而在竹集成材彎曲加工的部分，首先以製程來分類，共可歸納出數種不同的集成材製作方式，並進行小規模試做與強度試驗，作為後續探討可能與本計畫未來研究相關之加工技藝；最後在彈性網殼的部分，由於其特殊的構造形式，是需要參數與實作兩者之間相輔相成，因此由實作施工案例及參數構築程序案例兩個項目著手，理解各種材料於彈性網殼發展上所需研發之細部構造與設計，並回頭檢視竹材於此特殊結構上可能對應的處理程序與方式。

經過文獻整理與分析後，本計畫在竹接頭及彈性網殼展開了基礎的參數設計：竹構造接頭部分已經規劃了三大類型的接頭設計，經由電腦輔助之下進行了初步2D及3D圖面繪製，並且涉及材料測試等內容，將持續優化精進，後續也將針對不同構造形式加以改良，以期達成以簡便、輕量化的施工模式，讓竹材能夠更易於推廣於建築與空間構造上；而在彈性網殼的參數細部設計部分，則是針對其數位模擬程序進行了一系列的程式撰寫與研究，並且同時以實體模型來作相關驗證，其中涵蓋結構力學分析與相關演算法模擬評估等，這類程序得以更好的評估竹材於參數工具中將如何進行模擬，後續將對其自然特性數據展開評估，能夠確認竹子與彈性網殼結構之間如何進行相關型態、接點、構造等部分之設計與優化。

而本年度的下半年啟動了階段性實作的測試，包括竹構造接頭兩種類型的雛形製作以及相關強度試驗，經由經驗及測試數據得到反饋，得以優化接頭的設計；在竹集成材彎曲加工的項目





中，則與外部廠商進行產業合作，從材料選定到加工製程等，經過詳細探討之下，已有了初步的元件形式實作，亦有針對各式集成材類型進行抗壓、抗彎等測試，以求得其強度數據並加以分析比較；在彈性網殼部分，則前後進行了四次大型的構築實作，從單層、雙層到細部構造，經過數次參數程序模擬到局部構造實作的過程，亦進行了多次了整體結構模擬，力求讓數位參數與實體構築之中取得良好的平衡點。

## 六、結論：

在今年度的計畫執行過程中，前期的文獻研究與參數設計均很順利地進行，而在下半年，三個項目均落實到實作階段時，便會出現一些待解決的問題：例如材料選用、加工類型、施工方式等，各個項目的細節都需要對外合作與溝通，在過程中不斷修正與改良。

實作是這個計畫必不可少的一環，明年在構築部分也會更投入更多人力，因此也期望之後的計畫裡可以針對今年度所遇到的問題加以檢討，並在未來的設計與實作過程中優化。

綜合以上關於文獻研究、基礎參數設計及階段性實作等三個部分的成果，本計畫得以更好的往下推進與深入探討，以利明年度計畫內容的展開：承接今年度的研究成果，明年度將著重於實體構築的研究。

除了基本的參數設計、實體研發製作及強度測試等規劃之外，三個項目都會涵蓋到竹構築的實作內容，包含竹接頭的其他類型研發以及實體構築應用、彎曲竹集成材的大型元件及曲面構造、彈性網殼的材料轉換及大尺度構築等內容，藉由1:1的竹構作品建構出設計研究與實體構築之間的橋樑。

除此此外，本計畫亦會整合「竹構設計人才培育暨2024竹論壇總企劃」，預期規劃與現行業界之建築師、設計師合作，推廣研究成果，在學術及實務兩個層面最大限度地研發竹材於產業技術上的發展。

## 七、參考文獻：

- [1]林家荷（2015），《竹材應用於薄膜式完全張力體之研究》，國立成功大學碩士論文。
- [2]張三酉（2021），《竹片應用於撓曲主動空間結構之研究》，國立成功大學碩士論文。
- [3]鄭少耘（2022），《台灣常用竹構接合型式分類與結構性能試驗》，國立成功大學碩士論文。
- [4]鄭中杰（2022），《應用拓樸優化於竹集成材板狀結構之形態構成》，逢甲大學碩士論文。
- [5]覃祥輝（2003），《結構用竹集成曲樑製造與彎曲性質之評估》，國立屏東科技大學碩士論文。
- [6]林文川（2003），《竹材製造2x4結構用材之研究》，國立中興大學碩士論文。
- [7]湯春安（2020），《側壓竹集成材力學性能試驗研究》，中南林業科技大學碩士論文。
- [8]袁平（2020），《側壓竹集成材梁受彎性能試驗研究》，中南林業科技大學碩士論文。
- [9]陶鈞/謝力生/劉嘉誠/沈夢陽（2020），《結構用竹集成材研究進展》，中南林業科技大學。
- [10]王逸凡（2020），《竹構輕盈化策略探索--記“結竹為軒”設計建造教學》，東南大學建築學院。
- [11]社團法人臺灣竹會（2020），《從竹子到竹房子：給所有人的竹構築指南》





- [12]王榮進/杜怡萱(2022),內政部建築研究所建築工程技術發展與整合應用計畫(二)協同研究計畫第1案「竹構造建築物設計技術研究」資料蒐集分析報告。
- [13]Jules J. A. Janssen ,(2000),Design and Building with Bamboo, Beijing: International Network for Bamboo and Rattan (INBAR).
- [14]Lionel du Peloux ,(2018),Elastic Gridshell (hardcover).
- [15]Manuel Guaita Fernández and Almudena Majano-Majano ,(2021),Gridshells in Recent Research-A Systematic Mapping Study
- [16]Vaulot, Laélia Kim-Lan, (2016),Form-finding of elastic gridshells
- [17]D'Amico, Bernardino, (2015),Timber grid-shell structures : form-finding, analysis and optimisation
- [18]Nogueira, Cláudia de Lima, (2013),Science of bamboo material and technology application in glued laminated cross beams composite section
- [19]Maria Izabel de Mello Barreto, (2018),Cross Laminated Timber and Bamboo, composto de madeira e bambu





農業部林業及自然保育署主管一般科技計畫

竹構造整合性設計與實作研究：接頭、結構元件與施工程序  
Integrated Design and Research for Bamboo Structures:  
Joints, Structural Components and Construction Processes

112年度期末報告

委辦機關：農業部林業及自然保育署

執行機關：國立陽明交通大學 建築研究所

計畫主持人：許倍銜 副教授

研究助理：曾子亭

計畫編號：112農科-7.4.4-務-e3(1)

執行期間：112年3月1日至114年12月31日(全程)

112年3月1日至112年12月31日(本年度)

國立陽明交通大學

中華民國 112 年 12 月 5 日



1123424



## 目錄

摘要.....	8
ABSTRACT.....	9
壹、擬解決問題.....	10
一、問題分析.....	10
二、擬解決問題重點.....	10
貳、前人研究概況（含近三年已完成之重要計畫成果摘要）.....	11
一、竹接頭.....	11
二、竹集成材.....	11
三、竹網殼.....	12
四、竹構築.....	12
參、計畫目標.....	13
一、全程目標.....	13
二、本年度目標.....	13
肆、重要工作項目及實施方法.....	14
一、通用竹構造接頭研發.....	14
二、曲線竹集成樑單元開發.....	14
三、彈性網殼設計與構築程序.....	15
伍、期末成果.....	16
一、文獻研究與案例分析.....	16
（一）竹構造接頭的文獻與案例.....	16
（二）竹集成材彎曲加工技術文獻.....	21
（三）彈性網殼的細部設計與構築程序文獻研究.....	30
二、基礎參數設計.....	43
（一）竹構通用接頭的設計.....	43
（二）彈性網殼數位設計流程.....	57
三、階段實作.....	64
（一）竹構通用接頭雛形製作.....	64
（二）曲線竹集成材結構雛形製作.....	89
（三）彈性網殼實作構築.....	112
陸、結語.....	153
柒、參考文獻.....	155
附錄（一）：期中報告審查意見回覆.....	161
附錄（二）：期末報告審查意見回覆.....	163





## 圖目錄

圖1：竹接頭傳統工法示意圖.....	17
圖2：竹接頭新式工法示意圖.....	17
圖3：竹接頭之端點銜接形式.....	19
圖4：竹接頭之橫接銜接形式.....	19
圖5：竹接頭之交疊銜接形式.....	19
圖6：竹。之徑接頭設計.....	20
圖7：林-鐵-編界接頭設計.....	21
圖8：北門翼接頭設計.....	21
圖9：各種膠合竹材的MOE、MOR.....	22
圖10：Engineered bamboo for structural applications.....	23
圖11：不同的集成元排列方式的集成材.....	24
圖12：利用曲木加工技術開發設計竹集成材家具.....	24
圖13：集成元排列方式.....	25
圖14：竹單板的製作工序.....	26
圖15：LBC composite beams.....	27
圖16：LBL、Gluebam之集成元排列方式.....	27
圖17：bamboo zephyr mat.....	28
圖18：以每層為單元進行備製.....	28
圖19：去除竹綠的程度.....	29
圖20：Multihalle Mannheim鳥瞰圖.....	32
圖21：Multihalle Mannheim內部構造.....	32
圖22：Multihalle Mannheim施工過程.....	33
圖23：Japan Pavillion Expo 2000 Hannover.....	33
圖24：Weald and Downland Gridshell.....	34
圖25：The Ephemeral Cathedral of Créteil.....	34
圖26：The Ephemeral Cathedral of Créteil細部設計.....	35
圖27：The Ephemeral Cathedral of Créteil施工過程.....	35
圖28：Solidarité Sida參數模型建立.....	37
圖29：網格桿件內部的應力.....	38
圖30：彈性測地網格之繪製方式示意圖.....	39
圖31：Generation of elastic geodesic.....	40
圖32：Design and fabrication of multi-patch elastic geodesic grid structures... 40	
圖33：參數建模程序案例.....	41
圖34：三種竹接頭設計類型示意圖.....	44
圖35：初步接頭設計規劃與流程.....	45
圖36：交疊接頭設計構想1.....	46





圖37：交疊接頭設計構想2.....	46
圖38：交疊接頭設計構想3.....	46
圖39：交疊接頭設計構想4.....	47
圖40：交疊接頭設計構想5-1.....	47
圖41：交疊接頭設計構想5-2.....	47
圖42：交疊接頭設計構想6-1.....	48
圖43：交疊接頭設計構想6-2.....	48
圖44：交疊接頭雛形材料選用（0.2mm不鏽鋼）.....	48
圖45：不鏽鋼束帶試作.....	49
圖46：不鏽鋼束帶改良示意圖.....	49
圖47：不鏽鋼束帶咬合力改良-A. 原型鋼扣、B. L扣、C. 牙扣.....	50
圖48：不鏽鋼束帶摩擦力改良-D. 橡膠、E. 橡膠漆.....	50
圖49：不鏽鋼束帶摩擦力改良-F. 布紋膠帶、G. 磨砂防滑膠帶.....	51
圖50：不鏽鋼束帶摩擦力改良-H. 圓點壓花加工、G. 直條紋壓花加工.....	51
圖51：不鏽鋼束帶回字繞法.....	51
圖52：不鏽鋼束帶X型繞法.....	52
圖53：不鏽鋼束帶回字加固繞法.....	52
圖54：金屬束帶X型加固繞法.....	52
圖55：續接竹材時中心桿件擺動示意圖.....	53
圖56：可膨脹金屬片設計示意圖.....	54
圖57：可膨脹金屬片實作測試.....	55
圖58：與木製研接頭設計參訪.....	55
圖59：橫接接頭設計構想示意圖.....	56
圖60：幾何資訊之間的相互轉換關係.....	57
圖61：「彎曲型態主導」的參數設計過程.....	58
圖62：「攤平型態主導」的參數設計過程.....	58
圖63：圓規法曲面分割.....	61
圖64：利用Kangaroo插件物理模擬找型.....	63
圖65：四種不鏽鋼束帶綁紮方式.....	64
圖66：不鏽鋼束帶咬合改良-L扣.....	65
圖67：不鏽鋼束帶咬合改良-牙扣.....	65
圖68：不鏽鋼束帶摩擦力改良-橡膠.....	66
圖69：不鏽鋼束帶摩擦力改良-磨砂防滑膠帶.....	66
圖70：不同寬度之不鏽鋼束帶.....	66
圖71：抗剪強度試驗示意圖.....	67
圖72：試驗流程-校內資源整合.....	68
圖73：A束帶接頭抗剪試體設計圖.....	69





圖74：A束帶接頭試體製作過程紀錄.....	69
圖75：抗剪試驗輔具製作.....	70
圖76：A束帶接頭試驗現場紀錄.....	70
圖77：A束帶接頭試驗破壞情形.....	71
圖78：抗剪試體設計變更1.....	71
圖79：抗剪新試體製作.....	72
圖80：A束帶接頭抗剪試驗位移關係圖.....	72
圖81：A束帶接頭抗剪試驗破壞變形情況.....	73
圖82：抗剪試體設計變更2.....	75
圖83：B-1束帶接頭抗剪試驗.....	76
圖84：B-2束帶接頭抗剪試驗.....	76
圖85：B-3束帶接頭抗剪試驗.....	76
圖86：B束帶接頭抗剪試驗位移關係圖（左：B-1，右：B-2）.....	77
圖87：續接接頭零件設計組裝步驟.....	79
圖88：續接接頭零件設計（一字型、十字型、分割線）.....	80
圖89：續接接頭零件加工（徒手彎折、V-Cut刨溝）.....	81
圖90：續接接頭零件參數改變（長、寬、厚）.....	82
圖91：A續接接頭試體設計剖面圖.....	83
圖92：B續接接頭試體設計剖面圖.....	84
圖93：C續接接頭試體設計剖面圖.....	84
圖94：續接接頭試體外觀及試驗示意圖.....	84
圖95：A續接接頭抗壓試驗.....	85
圖96：A續接接頭抗壓試驗位移關係圖（左：A-1，中：A-2，右：A-3）.....	85
圖97：B續接接頭抗壓試驗.....	86
圖98：B續接接頭抗壓試驗位移關係圖（左：B-1，中：B-2，右：B-3）.....	86
圖99：C續接接頭抗壓試驗.....	87
圖100：C續接接頭抗壓試驗位移關係圖（左：C-1，中：C-2，右：C-3）.....	87
圖101：曲線竹集成材之設計圖面.....	94
圖102：竹集成材實體製作.....	94
圖103：（左）竹木合構，（右）全木冷杉，按照強度進行組合比較.....	97
圖104：抗壓及抗彎試驗示意圖（左：抗壓，右：抗彎）.....	98
圖105：集成曲線竹樑之prototype製作過程.....	107
圖106：整體彎曲型態物理模擬之極限曲率部分.....	112
圖107：四點抗彎及抗壓實驗圖.....	115
圖108：四點抗彎試驗示意圖.....	115
圖109：竹片受軸壓力之力-位移關係圖.....	117
圖110：竹片受軸壓力破壞後之變形.....	120





圖111：竹片受四點抗彎下的彎矩與位移關係圖.....	121
圖112：竹片受四點抗彎破壞後之變形.....	124
圖113：彈性網殼第一次實作結構尺寸與交接點定位上視圖.....	126
圖114：彈性網殼第一次實作軸向續接方式說明.....	127
圖115：彈性網殼第二次實作十字固定方式.....	128
圖116：彈性網殼第二次實作建造過程.....	129
圖117：彈性網殼第三次實作設計圖面.....	130
圖119：彈性網殼第三次實作於電腦中以GH預先確認十字交接定位點.....	132
圖120：彈性網殼第三次實作竹材拼接示意圖.....	132
圖121：彈性網殼第三次實作第一階段紀錄.....	133
圖122：彈性網殼第三次實作分段與螺栓位置圖.....	134
圖123：彈性網殼第三次實作電腦設計與補強實作對照.....	135
圖124：彈性網殼第三次實作第二階段細部補強.....	136
圖125：彈性網殼第三次實作補強之細部形變狀況.....	137
圖126：彈性網殼第四次實作上視圖.....	142
圖127：彈性網殼第四次實作透視圖.....	142
圖128：彈性網殼第四次實作1:10模型進行重量分布測試.....	143
圖129：彈性網殼第四次實作三種交叉點高度關係.....	144
圖130：彈性網殼第四次實作組裝參考.....	144
圖131：彈性網殼第四次實作初步十字續接討論.....	145
圖132：彈性網殼第四次實作軸向續接prototype.....	145
圖133：彈性網殼第四次實作交叉點說明圖.....	146
圖134：彈性網殼第四次實作基座設計規劃.....	146
圖135：彈性網殼第四次實作基礎設計.....	148
圖136：彈性網殼第四次實作基礎開挖與基座鐵件.....	149
圖137：彈性網殼第四次實作基礎灌漿與基座鐵件固定.....	149
圖138：彈性網殼第四次實作攤平組裝.....	150
圖139：彈性網殼第四次實作吊裝.....	150
圖140：彈性網殼第四次實作兩側增加剖竹片.....	151
圖141：彈性網殼第四次彈性網殼實作完工紀錄.....	152





## 表目錄

表1：自由曲面上網格建立方法比較.....	36
表2：竹材續接內部填充物比較.....	54
表3：彎曲型態與攤平型態之比較.....	59
表4：不鏽鋼束帶綁紮類型比較.....	64
表5：交疊接頭抗剪試驗之試體命名1.....	68
表6：A束帶接頭抗剪試驗數據.....	73
表7：A束帶接頭抗剪試驗位移與承载力關係圖.....	74
表8：交疊接頭抗剪試驗之試體命名2.....	75
表9：B束帶接頭抗剪試驗位移與承载力關係圖.....	77
表10：B束帶接頭抗剪試驗數據.....	77
表11：A、B束帶接頭抗剪試驗數據比較.....	78
表12：設計型態差異比較.....	80
表13：加工方式差異比較.....	81
表14：設計與設計參數差異比較.....	82
表15：續接金屬零件各式版本類型.....	82
表16：續接接頭抗壓試驗命名.....	83
表17：A續接接頭抗壓數據.....	85
表18：B續接接頭抗壓數據.....	86
表19：C續接接頭抗壓數據.....	87
表20：續接接頭抗壓數據綜合數據.....	88
表21：臺灣常見之各式結構與飾面用集成材種類.....	90
表22：竹材續接內部填充物比較.....	92
表23：市售強化集成竹材樣式排列說明.....	93
表24：四種集成元規格斷面說明圖（單位：cm）.....	95
表25：三種材料的直線樑prototype之集成元規格表.....	96
表26：等比例調整之試體集成元規格表.....	96
表27：試體編號及其材料種類.....	98
表28：集成材受軸壓力之力-位移關係圖.....	100
表29：集成材抗壓試驗結果.....	100
表30：集成材受軸壓力之破壞情形.....	102
表31：集成材抗彎試驗之彎矩-位移關係圖.....	103
表32：集成材四點抗彎試驗結果.....	103
表33：集成材四點抗彎之破壞情形.....	105
表34：集成材含水率數據.....	106
表35：曲線集成竹樑斷面整體紀錄照.....	111
表36：剖竹片受壓差異以及其相對的勁度、挫曲強度以及彎曲勁度.....	118





表37：剖竹片受彎差異以及其相對的勁度、彎矩強度以及彎曲勁度.....	122
表38：四次彈性網殼實作規劃概要.....	125
表39：彈性網殼第二次實作細部設計形式.....	128
表40：彈性網殼第三次實作細部設計形式.....	132
表41：彈性網殼第三次實作工序說明圖.....	134
表42：彈性網殼第三次型態方案建構與模擬檢討.....	141





## 摘要

本研究之計畫目標為推廣竹材於建築空間構築上的利用，主要架構以接頭、結構元件、結構系統和施工程序多個面向進行，期望透過各式設計方法及構築成果，讓竹建築可以更加便於施作、降低成本之餘，保留形式上的表現性與多樣性。

重點開發的內容為通用竹構造接頭研發、曲線竹結構單元開發及彈性網殼設計與構築程序，而每項研究都包含了數位參數設計程序建構、實體構造物呈現、相關實驗測試程序之量化報告、相關加工/施工程序知識建立等成果。

在學術上，各面向之研究成果均會發表論文及參與學術研討會，並將與課程結合，讓大學生與研究生能夠參與研究，擴大其在學術上的影響力；而在國際層面，將和世界竹會有所交流，將於2024舉辦之世界竹會論壇及工作坊就是一個很好的合作機會，此外，也會與香港大學建築系協同合作，針對彎曲木集成材如何延伸至竹材應用進行探討。

根據以上多個研究方向推展，其研究成果預期會做為open design，以無償之技術推廣為目標，開放其他專業者參考與使用，期許對未來竹構築與竹建築的發展做出貢獻。





## ABSTRACT

The objective of this research project is to promote the utilization of bamboo in architectural construction. The main framework includes multiple aspects such as joints, structural components, structural systems, and construction procedures. Through various design methods and construction outcomes, the aim is to make bamboo architecture more easily constructed and cost-effective, while still preserving its expressive and diverse forms.

The key development contents include the research and development of universal bamboo structural joints, the development of curved bamboo structural units, and the design and construction procedures of flexible mesh shells. Each research topic includes results such as digital parameter design procedures, physical structural models, quantitative reports on relevant experimental testing procedures, and the establishment of relevant processing/construction procedures.

In academia, the research results from each aspect will be published in academic papers and presented at academic conferences. The research will also be integrated into courses to enable undergraduate and graduate students to participate and expand their academic influence. At the international level, there will be exchanges with the World Bamboo Organization, and the World Bamboo Forum and Workshop in 2024 will be a great opportunity for collaboration. In addition, there will be collaborations with the Department of Architecture at the University of Hong Kong to explore how curved wood integrated materials can be extended to bamboo applications.

Based on the various research directions outlined above, the research results are expected to be open design with the goal of promoting free technology. Other professionals are encouraged to reference and use the results, with the hope of contributing to the future development of bamboo construction and architecture.





## 壹、擬解決問題

### 一、問題分析

竹材於建築領域的應用已經有悠久的歷史，舊時有許多竹構造或自然材料的應用，不過隨著科技發展，竹材料到了近代逐漸式微，然而在環保意識崛起的當代，又萌芽出復興的潮流。

而竹建築要能夠融入當代社會中，除了設計的形式之外，在構造與工法上亦需要更新以適應當代的條件，包含加工環境、機具和人力條件等。其中，相較於竹建築發展迅速的東南亞國家，台灣的人力成本相對較高，因此為推廣竹材的應用，需要發展降低人力需求的構築方式，才能有效促進竹建築在台灣發揚。

另一方面，使用竹材在建築上的一大優勢，是能夠基於竹子本身的特質（例如彈性、韌性和圓管等基本形式），發展出具備曲線的多變型態，有別於人工建材，這是竹子做為自然材料的優勢與特質，應該要盡量被保留於構築與設計中。

基於以上論述即可導出研究的目標——發展出一套能夠使竹材融入當代生產體系的設計方法，其中應盡可能減少產出竹建築需求之人力與營建成本之餘，同時能夠維持竹建築的型態自由度與多樣性，避免因為諸多限制而在簡單、直線性的形式中做選擇。

### 二、擬解決問題重點

根據擬解決問題中的論述，主要目標可分解成三個面向：竹構造接頭、結構單元和構築程序，綜合三個面向，以達到推廣竹材於建築層面之推廣與應用。

其一，發展通用的竹構造接頭，並以減少穿刺產生的強度破壞為研究方向之一，接頭應具備各式形態的適應性，且能夠應付大部分竹構造中元件之間的各種連接，相較於繩索綁紮的不穩定性和技術門檻，通用竹接頭可有效降低時間與人力成本，以利推廣竹材應用。

其二，發展曲線的竹結構單元，透過組裝形成整體的曲線形式，這樣的過程可避免依賴繁複、成本高的加熱彎曲程序，並以集成竹材的方式（GluLam）製作，同時使用單一模具作為設計規劃，以降低對模具的需求。

其三，基於竹材的彈性與韌性，發展特殊的營建程序，以「整體快速形變」的方式塑造具有曲線美感的竹結構，且基於elastic grid shell的基本原理，可利用挪動整體結構中的少數接點位置來形塑整體型態，這樣的構築形式可擺脫成本高的加熱彎曲程序或繁複的現場組立。





## 貳、前人研究概況（含近三年已完成之重要計畫成果摘要）

根據研究方向，可以粗略分為以下幾個論述進行文獻探討：竹接頭、竹集成材、竹網殼及竹構築之資料蒐集、分析及作品呈現。

### 一、竹接頭

對於竹構造而言，接頭可說是從古至今研究的重點，而在傳統竹接頭中，主要以綁紮式為主，利用拉力構件收緊時對竹材接觸面造成壓力之摩擦型接合，需要大量人力及經驗的累積，較為耗時與費力；而新式的竹接頭中，則是以金屬構件加工為主，有插梢式（於竹材上先鑽孔，以插樺、竹釘、細竹桿、螺栓等插梢構件穿過固定，屬於剪力型接合）、中介構件（利用其他材料製作接頭構件，而竹材之間只輕微接觸或完全無接觸）及集成式（接合處各向竹材數量不止一支，以分散應力並提高接合處剛性之多對多接合）等數種發展，有逐漸成熟之趨勢。

而在林務局與台灣竹會合作辦理的構竹林鐵新銳展中，由陳建同設計師帶領的與木製研所設計的2022構竹林鐵作品「北門翼」，就有著創新的竹接頭研發，不同於木構或鋼構，陳建同設計師利用竹材的空心且拉力很強的材料特性，朝向大跨距、大出挑的方向來發展設計，在接點方面主要以金屬構件為主，如鐵板、鐵管輔以釣魚線等，並在續接時將零件藏在竹子的中空內部，發展出單根竹、二根竹、三根竹、I字型、Y字型等銜接方式，並有T型接頭與O型接環等依據不同情境下使用的接頭設計，整體造型與結構都有一定的強度與突破。

### 二、竹集成材

集成材是將鋸板或小角材等材料（集成元）之纖維方向互成平行，在厚度、寬度及長度方向層積膠合而成，現今大部分的集成材主要以木頭做為材料來進行加工，而竹集成材（Laminated bamboo）則是以孟宗竹為原材料，經鋸截、前處理、乾燥、刨削、砂磨、膠合、集成、熱壓而製成竹集成板材。

而集成材可以按照不同需求，製造成通直集成材、彎曲集成材、方型截面集成材、矩形截面集成材及變形截面集成材等，而作為空間構築的構件而言，直條及彎曲形狀的集成材都是很理想的材料。

另一方面，曲線集成材在結構發展中，較缺乏以竹集成材為主的案例，主要都以木集成材為主要構築材料，如2021年嘉義市立博物館所舉辦《森林之嘉：現代木造建築特展》中，便涵蓋了許多國內木構築作品介紹，其中崙坪文化地景園區木構棚架便是利用美國花旗松曲面集成材設計而成的曲線構築型態，而為達成結構特殊造型曲線之精準，主要構件施予預拱及無重力全支撐方式施工，減少實際結構變形之不利影響。





基於以上的文獻分析，以木集成材的構造基礎及既有的加工環境作為開發方向，發展竹集成材的曲線結構元件應也是可研究的範疇。

### 三、竹網殼

在竹建築領域，以竹材構成網殼是一種常見的設計手法，大部分竹網殼結構是採用加熱彎曲竹材的方式，產出構成曲面網的彎曲竹材元件，另一類作法是在施工中施加應力將竹材彎曲後相互固定，竹桿間中存在預力，是一種動態彎曲（bending active）的結構系統，然而，以上兩種類型的竹網殼構造都有其缺點，前者需要模具且加工時間長，後者需要花較多時間在施工現場進行組構，且彎曲程度（最大曲率）亦會受限於竹材本身的彎曲性能。

網殼被定義為一種與平板網架類似的空間桿件結構，以桿件為基礎，按一定規律組成網格，按殼體結構佈置的空間構架。而彈性網殼（elastic grid shell）則是一種特殊形式的網殼系統，通常為雙曲面的自由形式結構，其特徵為初始於2D平面上的網格系統，在交叉點上擁有可鬆動、滑動的接頭，移動幾個點來塑造整體結構的型態，移動點的方式又分上方吊拉、下方頂撐、充氣氣囊支撐等方式，即可導出各種可能的彎曲構造。

而在2018年出版的《Elastic Gridshell》一書中，便有對於彈性網殼於建築中應用的呈現，主要包含其案例分析、參數分析、結構、材料、力學、幾何學、施工等各層面的論述，其中在材料上有提到，具有良好強度和彎曲性的材料即可適用於彈性網殼結構，一般而言主要以木頭、鋼或鋁等材料為主。

而基於以上的文獻參考，竹材易於加工且高強度的特質，亦可以是被納入彈性網殼構造材料的考量範圍中，若以竹材加上彈性網殼的方式來進行竹構造設計，便可以彌補傳統竹網殼構築的缺點，建構出一種新的設計思維。

### 四、竹構築

國立陽明交通大學近幾年在竹構築方向上的發展不遺餘力，如2019城市構竹中跨校聯合合作，在新竹北門公園構築之作品「一葉」、「聲之雲」、2020桃園地景藝術節作品「浮竹」等作品、及2021桃園地景藝術節作品「流竹」，這些作品中，包含了預力彎曲結構的測試、控制重力、繁複接點的精準構件組裝等各種挑戰，其中都結合了數位參數設計，包括數個階段的模擬與實作驗證，以期在竹構造的發展中，賦予其現代化的設計語彙，融入自然的質感與現代化的造型。

除此之外，在近幾年的研究成果中，包含社團法人臺灣竹會2020年所出版之《從竹子到竹房子：給所有人的竹構築指南》一書中，便有集結學界與業界人士於竹構築之綜合經驗，書中從竹材力學與結構、竹接頭工法、竹構設計要點到施工規範等步驟，都有詳盡解析，可以說是推進竹構築發展的一大助力。





## 參、計畫目標

### 一、全程目標

面對當代竹材在建築領域應用的困境與關鍵議題，本計畫期許發展實際構築上使用竹材的相關方法，讓竹構築可以更加便於施作、盡可能降低成本且保留形式上的表現性與多樣性，使得竹材於建築空間構築上的利用可以被廣泛推廣。

研究方向將朝向通用接頭、結構單元、施工程序三個層面，提出改良的竹構造與整體施工程序。基於設計研究的基本策略以及務實的開發程序，展開整合設計、實作與相關實驗測試，並根據提出的設計，製作出接頭與構造雛形，再加以進行性能測試與設計修正優化。

本計畫在廣義建築定義的前提下，進行設計與實作兩個層面的研究方向及考量，綜觀台灣目前的竹建築發展趨勢，均以pavilion型態為主，型式上趨近於涼亭的建築構造，因此本計畫於實作之竹構造，亦以休憩用的半開放空間建築物為發展方向。

然而因竹構造尚未有完整的技術規則，因此在竹材之前期處理、構造體設計、結構計算及後續維護等面向，主要會參照現行木構造之技術規則為基準，期望研究成果可以成為台灣竹構築產業向前推動的助力。

### 二、本年度目標

做為三年計畫之開端，本年度工作的重點在鋪設研究的基礎，以利後續研究的進行，並開始推展階段的研究成果。此階段研究內容包含：

(一) 文獻研究與案例分析：包含竹構造接頭的文獻與案例、竹集成材彎曲加工技術文獻、彈性網殼的細部設計與構築程序文獻研究。

(二) 基礎設計：竹構通用接頭的設計、彈性網殼的細部設計。

(三) 階段實作：竹構通用接頭的雛形製作、彎曲竹集成材結構元件雛形製作、彈性網殼實作構築。





## 肆、重要工作項目及實施方法

### 一、通用竹構造接頭研發

以研發具備各式形態之適應性竹構造接頭為目標，且能夠與各式竹構造中的元件之間有著高彈性的連接，並以標準化、可大量生產的方式進行設計，以期盡量降低成本，進一步達到推廣之目的。此項研究主要以各式竹搭接類型的接頭設計為主，例如端點、續接、T型、十字搭接等，設計出可適應竹材之新型態金屬零件。

#### (一) 設計方法

首先進行文獻蒐集和資料分析，整理出常見的竹構造和相應的搭接情境，接著開發能夠應用的接頭構造，包括使用電腦軟體進行3D模擬和設計構築，以及透過3D Printer、工廠開模製作等方式製作實體prototype進行測試。並且，搭建小規模結構體以測試接頭的適用性和強度，並反覆進行資料分析和設計修正，以達到產出完善的通用性竹構造接頭成果的目的。

#### (二) 實作

實作部分包含強度測試和小規模構造體搭建，完成初步設計和構造發展後，由結構技師選擇接頭樣本，製作1:1的mock-up進行測試。利用萬能材料試驗機進行壓長、下壓、拉壓等測試實驗，模擬實際構築情境中的變形狀況，並分析測試數據以修正接頭設計，以利後續進行實際構造搭建，將成品應用於竹構築中。

#### (三) 面臨問題與挑戰

適應性方面是竹接頭設計的挑戰，可從以下的面向研究：在設計中是否應使用彈性或塑性材料，如金屬薄片、橡膠或矽膠等以適應竹材表面，接頭規格的通用性也應考慮，例如是否統一一種規格，或者針對常用竹材（如桂竹、孟宗竹）制定若干種規格等，以上這些問題都應納入設計考慮。

### 二、曲線竹集成樑單元開發

此研究主要以「懸鏈線」為曲線的依據發展數位參數設計程序，並配合竹集成材之加工，建構出如同曲面薄殼的結構型態。針對現有之集成竹材種類加以分析其集成元組成、材料強度、彈性模數、加工等，歸納出最適合作為發展曲線竹集成樑之方式。

#### (一) 設計方法

首先以懸鏈線作為參數設計之依據，利用懸鏈線曲線的材料中僅受張力而不受壓力之特性，可以有效減小材料尺寸，以固定曲率的懸鏈線為結構元件的形式基準，僅在長度上做變化，如此在竹集成材的加工上只需使用一種模具設定，便可減少開發的經費與時間成本，以這樣的方式作為設計基準，即可構築一種接近曲面薄殼的結構型





態，而在落實到實際產出部分，則是先進行少量彎取集成築結構單元的生產，並進行強度測試與優化檢討，並以小規模結構體來驗證曲線竹結構單元構成曲面的可行性。

## （二）實作

在數位參數設計程序中需要了解加工條件上的限制，例如加工尺寸與曲率設定等，並將這些數據導入參數設計中進行考量，此外，竹集成材的製作需要和有專業設備之加工單位合作，而製作完成之竹集成材也需要測試結構強度，以這些材料、測試作為基礎後，落實在結構單元中，並在後續產出竹構造的結構體。

## （三）面臨問題與挑戰

竹集成材需要和外部單位在加工處理上進行合作與產出，且同時需要顧慮其加工條件，其加工或者材料本身的限制性可能成為參數設計上的考量，再來，彎曲竹集成材的耐久性亦需要長時間的觀察與驗證。此外，由於台灣竹集成材取得不易，因此研究中也加入「竹木混合」的構築方式作為考量的方向之一，可能以木集成材為結構基礎，加入局部竹集成材的方式來建構整體型態。

## 三、彈性網殼設計與構築程序

以彈性網殼 (elastic grid shell) 作為設計基礎，用以建構數位構築程序及實體結構設計，整體型態會是由2D平面網格為起始，其中交點上設計可鬆動、允許滑動的接頭，並透過移動端點來塑造整體結構的型態。

### （一）設計方法

根據彈性網殼的基本論述，數位參數的模擬與接點細部設計是彈性網殼的關鍵。數位參數設計程序需要模擬平面網格移動接點的型態變化，如移動點的位置、數量、移動程度等，以建立相應的參數。同時也能從最終形態去反推初始的2D網格安排。另外，實體材料的性能需轉化為參數，如最大曲率、竹材長度等，這是一個來回檢討、整合的參數設計程序。

### （二）實作

在實作部分，網格相交的接頭設計是主要需要實驗的重點，接頭在初始需要能夠允許滑動與調整，而在塑形之後又能夠快速鎖固，這部分會參考使用在木材上的 elastic gridshell 案例，加以分析與改良。首先從小規模、縮小尺度的 mock-up 開始，同步測試接頭和整體結構塑形，先以下方頂高的方式移動交點，之後朝向 1:1 mock-up，調整優化接頭和細部設計，並以吊具或吊車來移動交點，除了可順利組裝、達到預期的型態之外，結構穩定性亦需要被測試，需和專業結構測試單位合作，以搖動整體結構的方式做強度測試，並可實際應用於竹構造中。





### (三) 面臨問題與挑戰

在構築彈性網殼時，竹材本身的彎曲性能是一個挑戰，青竹容易彎曲，但竹材需要經過乾燥加工，先組裝後乾燥有其難度，而先經過乾燥加工的話會乾縮，可能會產生接頭的鬆動，因此在接頭的設計上應要克服鬆動的問題，或是elastic grid shell的模式下，先乾燥的竹材能夠達成足夠的彎曲性能，此外，也可實驗已剖開的竹子來取代未剖的原竹，達到彎曲性能的要求。





## 伍、期末成果

### 一、文獻研究與案例分析

#### (一) 竹構造接頭的文獻與案例

基於竹材的材料特性，在構築方面存在兩種主要的搭接方式：傳統和新式兩種做法。傳統方式包括繩綁法和榫接法，而新式方式則是利用金屬零件進行固定和加工，這些方法依據結構要求、施工效率和美學等因素而有不同的選擇。

繩綁法和榫接法的傳統方式是利用竹子的天然彎曲和纖維結構，能夠提供良好的強度和穩定性；而新式方式則利用金屬零件的強度和耐久性，提供更大的靈活性和精確性，同時也能夠達到更複雜的結構形式。因此，在選擇竹構造的搭接方式時，需要考慮到竹材的特性及結構需求等因素。

傳統工法作為一種應對竹材特性的構築方式，以最大限度減少對竹材的損壞為前提進行設計與操作，因此也凸顯出傳統工法在結構和強度方面表現出穩定的性能。然而，其最大的問題在於依賴大量的人力和時間，隨著科技進步，這種方式的成本相對較高。此外，在需要大量人力投入但缺乏相應學習機會的情況下，技術的傳承也變得逐漸困難。



圖1：竹接頭傳統工法示意圖[14]

而隨著科技的發展逐漸興起，市面上出現各種經過加工的管材，例如鋼管、鐵管、鋁管和塑膠管等，並具有相同的特點：強度和直徑都是可量化及均質化的，基於這樣的人造特性，在使用這些管材時，進行各式加工操作或開發接頭形式都相當便捷，而這些人工管材的出現，同時也帶來許多金屬零件的研發，同時亦啟發了對竹材進行類似的新式加工方式的研究。



圖2：竹接頭新式工法示意圖[14]





在對竹材進行新式工法的加工時主要都是透過金屬零件作固定，最常見的是直接使用電鑽在竹材上穿刺，並通過螺絲螺桿等零件進行鎖固，這種方式使得竹子之間能夠很簡單快速地被固定住。

然而，儘管新式工法可以快速地施工於竹構築，但竹子作為一種天然材料，本身的纖維卻容易在此過程中遭到破壞而有劈裂的狀況，且竹子無法像人工管材一樣具有相同的受力強度和相等的直徑，曲直和管徑不一導致受力不平均，將其進行類似人工管材的加工會對其結構造成破壞性的損傷，在這樣的加工方式情況下，新式工法在結構上存在一定的疑慮。

因此，許多的建築師、設計師、政府及民間單位都對此進行了研究，如何可以截長補短，設計出既擁有傳統工法的高穩定、低破壞性，亦能整合新式工法的快速、便利性的接頭形式，使得竹材於建築與空間的層面上可以有更廣泛的應用，這也是本計畫的研究方向之一。

關於竹接頭的研究，過去數年來已累積許多的參考資料及實作項目，因此在文獻的整理上，主要可分為接頭類型及實際案例兩個項目來做整理與分析。接頭類型的參考內容大多來自社團法人臺灣竹會2020年所出版之《從竹子到竹房子：給所有人的竹構築指南》[12]中的相關介紹；實際案例則是由林務局與臺灣竹會主辦之2022構竹林鐵中[13]的作品做為參考與分析對象。

## 1. 接頭類型

在接頭的類型上，依照接合的部位及方向來做分類的話，大致可分為以下三大類型：端點銜接類型（細分為平行與非平行）、橫接銜接類型（細分為正交與非正交）、交疊銜接類型（細分為平行與非平行），這三大類型的接頭下，又可依據其角度、方向或者銜接數量等不同需求，可再細分成數種接頭研究方向。

### 1-1. 端點銜接類型

所謂端點銜接，即指在竹子的兩端進行銜接，而其中又可分為平行與非平行的銜接，若是平行的銜接，則通常會被稱為「續接接頭」，用於當竹構造的跨距太大而單跟竹子的長度不夠時，可以延續其長度；若是非平行的端點銜接，通常是帶有各種角度的萬象接頭，依照其構造需求，甚至可能會在同一端點上有兩隻以上的竹子銜接。



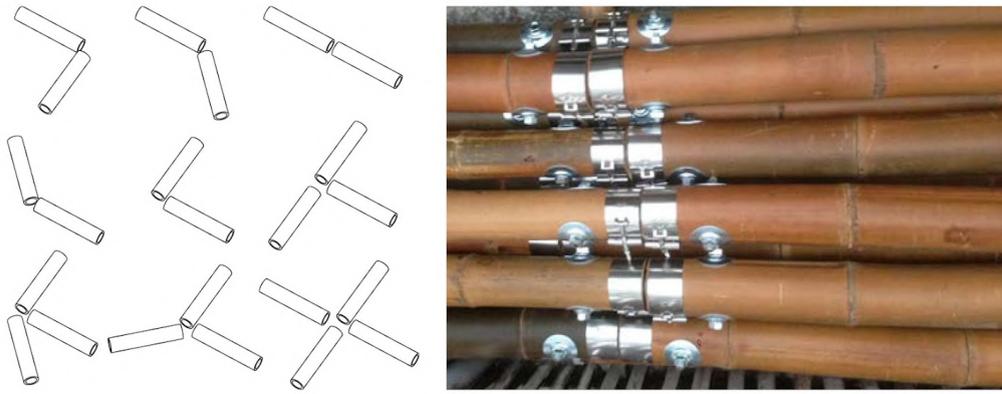


圖3：竹接頭之端點銜接形式[12][14]

### 1-2. 橫接銜接類型

橫接是指取自竹子的端點與竹子中間部位進行接合，其銜接方式亦可細分為90度正交或者非正交的角度，90度正交（形式像T型）的接合，通常用於梁柱的接點處；而非正交的橫接，則會有各式角度以及不同隻數的可能性，如用於桁架等構造形式。

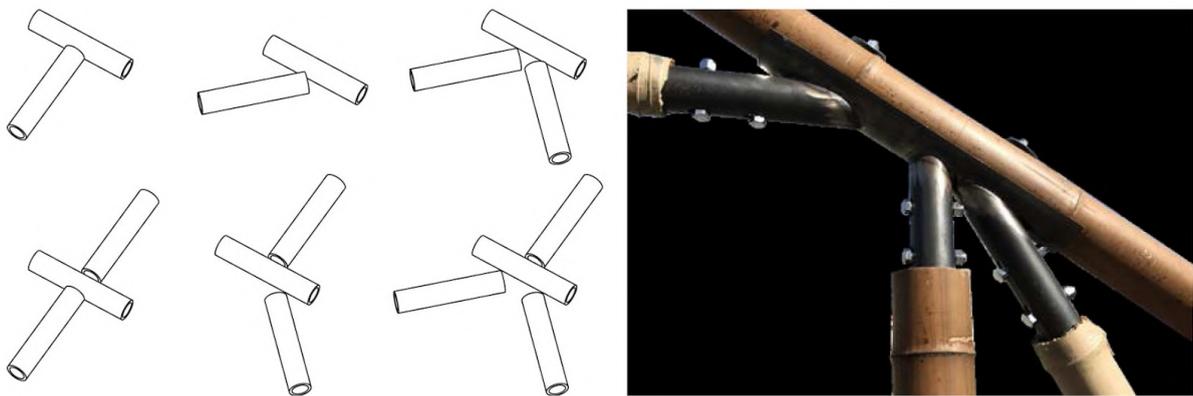


圖4：竹接頭之橫接銜接形式[12][14]

### 1-3. 交疊銜接類型

交疊意指兩隻竹子是在垂直向度上有上下疊合的關係，亦可分為平行與不平行的交疊方式，若是平行的交疊，可應用於同向度的竹材集結成束，增加其強度；不平行的交疊則是有角度上的改變（如十字型的交叉），可用於網殼等結構形式。

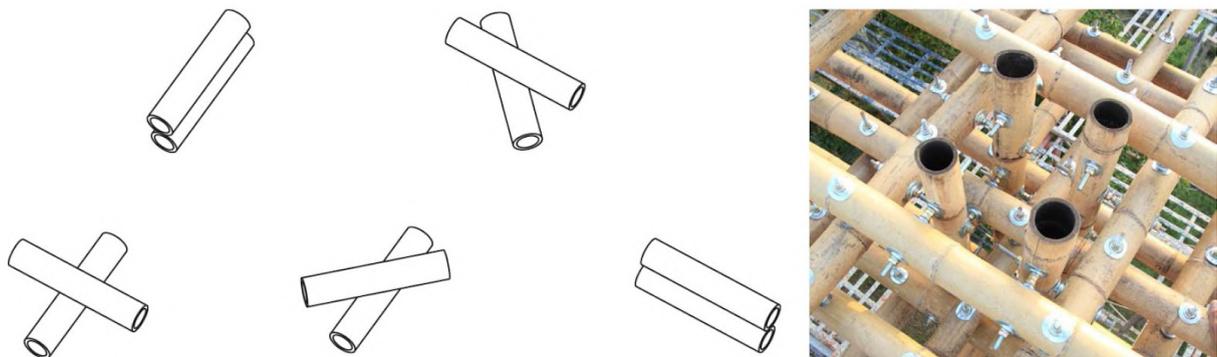


圖5：竹接頭之交疊銜接形式[12][14]





## 2. 實際案例

由林務局及臺灣竹會共同策辦的2022構竹林鐵新銳展中可以看出，臺灣對於推廣竹產業已有相當程度的重視，而在建築圈中，一群由建築設計師、結構技師組構而成的新興力量也將竹材於空間的利用持續發揚，這些創作者們結合傳統工藝、新式金屬構件、複合材料等嘗試，使竹構造在工序、尺度及構築手法上都有更廣泛的應用，進而有了更多設計的可能性。

其中包括原型結構的作品「竹。之徑」、丁尺建築師事務所+和光接物環境. 建築. 設計之「林-鐵-編界」、與木製研的作品「北門翼」均與本計畫的研究方向有一定程度上的相符。

### 2-1. 竹。之徑

由原型結構設計的作品「竹。之徑」在接頭的設計上是採用了傳統的工藝「竹包管」形式，設計出了由金屬製成的三角管，以減少竹子被螺栓刺穿而導致的破壞，而經過計算後，三角管內部呈現不同角度的桿件形式，用以維持整體的結構穩定[13]。



圖6：竹。之徑接頭設計[13]

### 2-2. 林-鐵-編界

由丁尺建築師事務所+和光接物環境. 建築. 設計之「林-鐵-編界」之設計構想是為減少泥作基礎，因此將竹子以套管的方式續接起來，而桿件則以漸變捆束的方式增加勁度，並透過特製的金屬零件固定於山坡地錨基礎及綁紮於原生竹叢，以此來創作懸臂型的遮棚[13]。





圖7：林-鐵-編界接頭設計[13]

### 2-3. 北門翼

由與木製研設計之「北門翼」作品中，主要構想是由竹子構築出大型的懸臂桁架，其龍骨由成束的桂竹透過金屬鐵件組構而成，而根據桁架的系統設計出多角度的鉸接接頭，這些接頭承擔了大部分的受力，因此能夠收斂桁架軸力的集中力[13]。



圖8：北門翼接頭設計[13]

### 3. 小結

經過廣泛的文獻蒐集和案例分析，本計畫之竹接頭研究目標也希望朝新式金屬構件的方向前進，同時以減少破壞及刺穿的方式進行設計，這一目標的追求是為了改良金屬零加工於竹子本身時所造成的破壞及強度疑慮，並降低竹材於空間構築上的時間和人力成本，以利促進竹材的廣泛應用。

在這一共同的想法和概念下，本計畫特聘與木製研之主持人陳建同設計師作為計畫顧問，共同致力於開發具有多樣適應性的竹接頭，除了接頭本身的研究設計外，亦是希望得以應用於實際產業端，在這樣的這種合作模式下，期望能夠創造出更具創新及與實務接軌的竹接頭設計，並為竹材的應用領域帶來更廣闊的前景。





## (二) 竹集成材彎曲加工技術文獻

竹集成材的出現使竹子在使用上更為自由，然而，竹集成材的成本與經濟效益是個現實的問題，相較於其他自然材料，如木材和生質材，竹集成材仍存在許多待議的問題，且應同步建立相應的檢測標準，以供後續相關研究參考。

本計畫專注於竹集成材料的彎曲加工，包括彎曲半徑、彎曲強度和彎曲變形等性質的掌握，同時考慮到不同膠合劑對彎曲加工的影響，以提升竹集成材料的性能；另一方面，竹集成材料在高溫和潮濕環境下可能出現強度下降和脆性等問題，因此在實際應用中需採取相應的措施以確保其穩定性和可靠性。

綜觀以上，竹集成材存在著諸多材料與技術上的議題，均有其分析與探討之價值，因此，本計畫未來的研究方向將進一步推進竹集成材在彎曲加工上的研究，探索其性能以及在建築結構中的潛在應用方式。

### 1. 膠合竹材 (英文: glued bamboo, GB)[32]

是指採用化學藥劑在特定溫度下對原竹材進行膠合處理，或是對竹材的纖維進行重組、膠合而成的竹纖維複合材料，其類型廣泛，包含但不僅限於：Gluebam, LB, LBL, LBC, PSB, BLVL, BS, WBS, NBS, OBSB, BOSB, CLBT等不同類別。多年以來，集成材陸續出現各式優化，因此也產生許多不同的製造工法，因而「膠合」二字經常植用於細化分項的命名，在閱讀文獻與互相討論時應加以釐清以防誤會。

在開始討論竹集成材料的彎曲加工技術之前，需要先了解竹集成材的種類和特性：竹集成材的種類繁雜，包括多種不同的品項，各個研究團隊開發新的材料與製造工藝之後，多半會將眾多材料彙整加以比較，以顯示該新材料之創新與突破，而突破層面不外乎力學表現、材料穩定度、加工耗能等。

#### 1-1. 各種膠合竹材的機械效能

根據本篇文獻[32]中提及，WBS的製作靈感來自BS，而為了證明WBS的優勢，文獻中將板材的機械效能與其他常見的竹複合材料進行了比較，而除了探討竹束的結構形態和產品密度對WBS效能的影響之外，同時也有對於耐久性的討論，及材料的膨脹厚度和吸水性等方面進行比較，並且強調其在成本和效能之間是取得平衡的狀態。

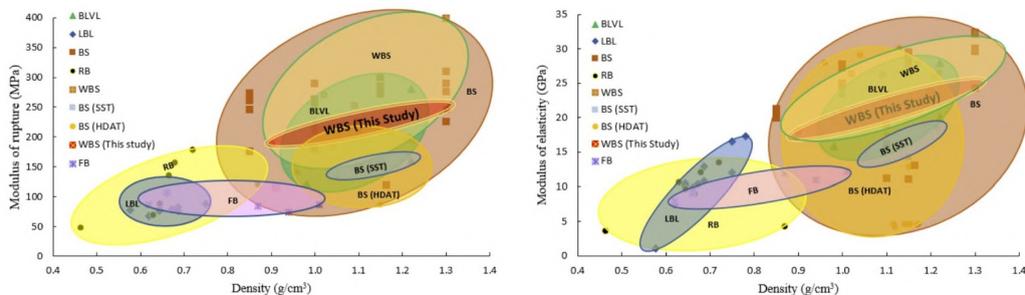


圖9：各種膠合竹材的MOE、MOR[32]





### 1-2. 集成竹材發展方向

本篇文獻[33]以竹集成元的方式發展工程竹材 (Engineered bamboo)，紀錄竹材處理和製造各種組合，並探討工程竹材在主要結構應用中的發展。

根據其內容可知，儘管天然材料通常代表低碳與環保，但由於其固有的變異性以及可能存在的退化問題，通常不被視為傳統建築材料，因此此文獻其中一個目的是證明工程竹材是一種具有競爭力及可持續性的材料，更可以是傳統結構材料的替代品。

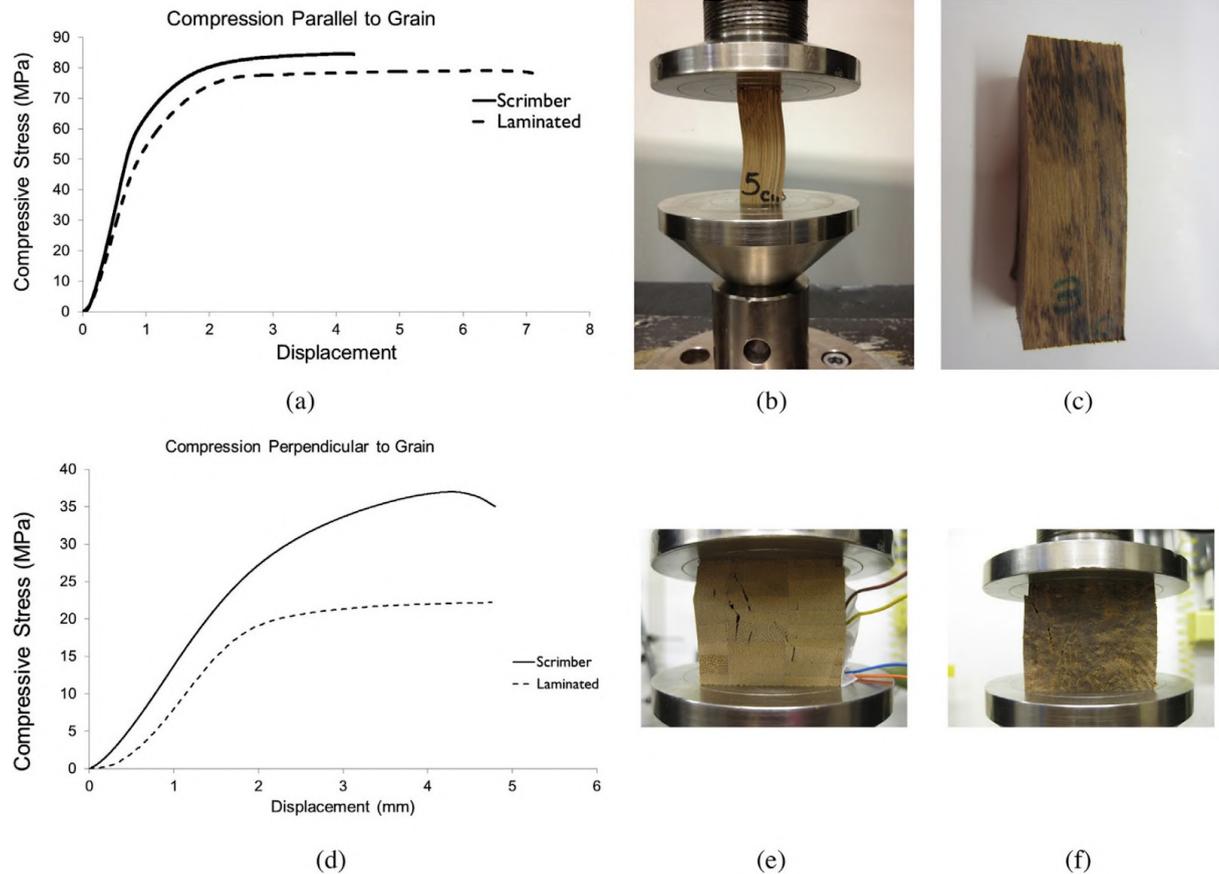


圖10：Engineered bamboo for structural applications[33]

### 1-3. 膠合竹材的效益

此文獻[34]中紀錄膠合竹材的力學性能的比较，包含竹集成材、重組竹材、Gluebam、原竹、各種工程木與主要工程材料等，除了力學性能外，在材料成本的層面亦有著對比，其中包含生產各種材料的環境成本等相關數據，例如：碳排放係數、生產耗能。

### 2. 集成竹材 (英文：Laminated Bamboo, LB) [15][16]

又稱竹單板[17]、層竹[18]、竹集成材[35]，通常是以孟宗竹 (*Phyllostachys pubescens* Mazel) 為原材料，取一定的長、寬、厚的竹片，又稱集成元 (lamina)、





竹片單元，在特定溫度下採用化學藥劑膠合處理。在家具、面飾材料的使用多於在結構材料的使用。

在各文獻中可得知，各式集成材之力學試驗在實驗組對照組上有很大的不同，包括膠合時的佈膠量、使用何種膠、混合兩種膠的配比、集成元含水率、集成排列方式、加壓時間、加壓時的溫度等。

## 2-1. 高週波加熱

高週波加熱意指集成竹材是經過鋸截、前處理、乾燥、刨削、砂磨、膠合、集成、熱壓而製成[15]。集成元 (lamina) 取徑向5mm、弦向20mm為斷面，縱向180cm為長度，依集成元排列方式分為側壓集成竹材、平壓集成竹材，平壓集成竹材包含：平壓排列集成竹材、直交排列集成竹材。製成板材後，以高週波曲木熱壓彎曲加工，可用來製作家具，此外，莊閔傑老師亦承接國內其他應用案例，如製作臺大社科院圖書館書架，其板材因膠合方向不同的排列有不同力學性質：共分為橫板膠合雙層的側壓集層竹材，以及豎板膠合多層的平壓集層竹材與側壓集層竹材。

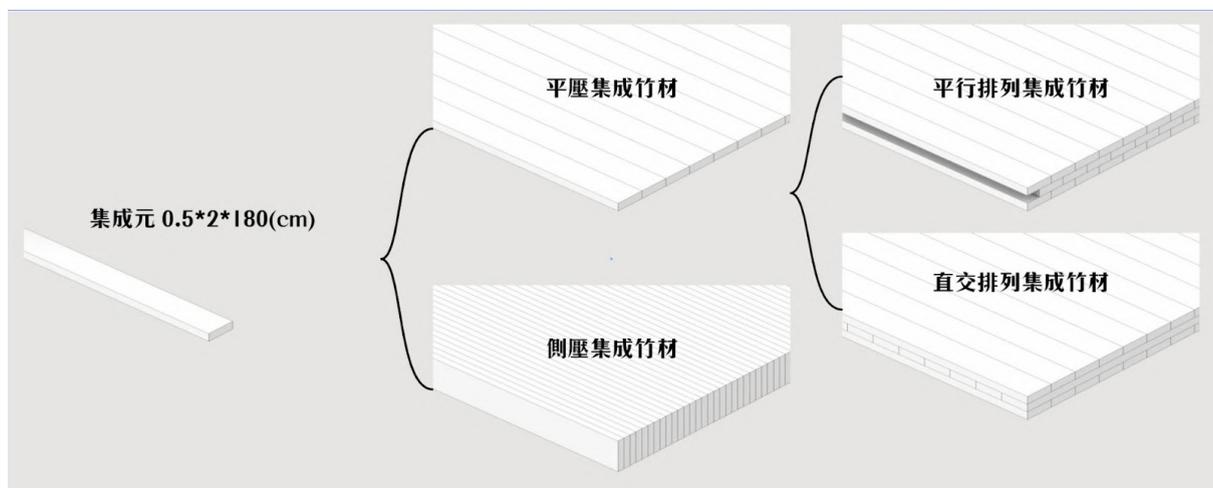


圖11：不同的集成元排列方式的集成材



圖12：利用曲木加工技術開發設計竹集成材家具[15]





## 2-2. 集成材的膠合劑

此文獻[16]主要針對膠合劑進行各項試驗，材料包含未經處理的孟宗竹、碳化處理後的孟宗竹、麻竹以及桃花心木，其中集成竹材取集成元厚6mm，並使用不同的膠合配置與膠合劑之下所得出各項物力性質的結果，各竹材之比重為：竹節部位大於竹肉，竹青側大於竹膜側，以此比重分別在不同的集成元排列方式之下測試各式材面之膠合性，其中包含：RF膠、UF膠、PVAc膠，而根據結果顯示，雖然木破率最高，但膠合強度不一定是優異的表現。

後續以數種比例混合UF膠與PVAc膠進行試驗，得出的結果是未經處理的孟宗竹、碳化處理後的孟宗竹、麻竹的膠合竹集成材之靜曲強度均大於桃花心木，其中又以未經處理的孟宗竹最高。

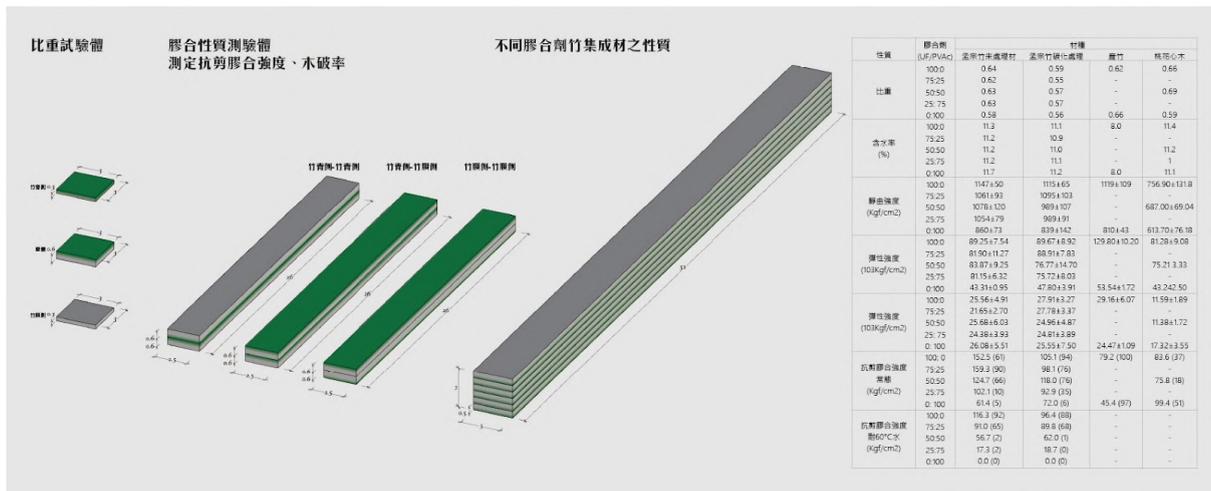


圖13：集成元排列方式

## 2-3. 竹單板

此篇文獻[17]中竹單板之英文亦是使用 laminated bamboo 一詞，但根據內容所提出的歸納中包含「竹單板作為貼面材料時可得類似竹片拼板之柔美紋理」，可見其並非是涉及結構材料的設定，但其分析內容中對竹單板製造過程中的積層竹塊進行了各項膠合劑使用，其試驗具備相當高的參考價值，竹單板在製作工序上最大的不同是將市售厚度約6mm的竹片上下磨平至5mm作為一個小單元，首先膠合上下方向再膠合側方向，直至成為一大塊積層竹塊，後續再進行取厚3mm為一片竹單板。



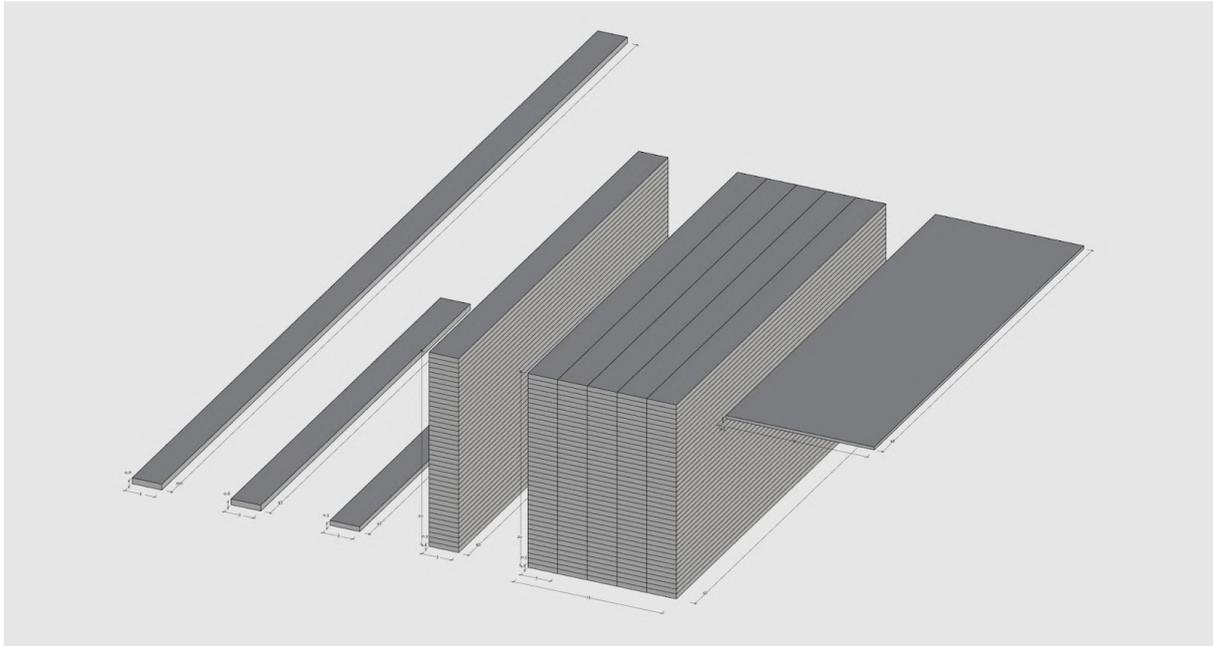


圖14：竹單板的製作工序

#### 2-4. 曲率

此文獻[18]中講述關於三至四年生孟宗竹之最高竹片製材率，其建議使用外徑為8cm，並以2.5cm作為鋸製竹片寬度，與其他文獻中所使用的竹山市售2x0.6cm竹片規格相近。此外，文獻中針對多種尺寸的集成元製作層竹角材進行曲率試驗，包含：S形彎曲層積（Laminated bending-S shape）、碳化竹片之曲率（Curvature of carbonized bamboo piece），以尋找最經濟的彎曲層積法。

其曲率試驗在模具曲率4、6、8和10cm之下分別進行了不同厚度集成元的竹集成材破壞片數，並將破壞等級進行分級，同時也對於防腐竹片層積後的各項性質進行試驗，竹片經碳化處理後，強度減弱，彎曲加工時較未碳化者易於折裂，同時文獻中也另外提及層竹角材之製作方式，是先將竹片彎曲上下方向膠合，再側向膠合件。

#### 2-5. 結構應用

在結構應用方面參考了此篇文獻[35]，內容紀錄之案例是以LBC composite beams作為結構，是以竹膠合材與混凝土組合的複合材料，並且與側壓集盛竹材使用了相同集成方向的板材進行彎曲膠合，開發了曲線層壓竹材與混凝土的複合式材料。在材料使用上為厚度為26mm的六層層壓竹板進行膠合，並形成曲線竹梁，其具有三種不同的拱高：50mm、100mm和150mm，在上方與T形混凝土加以錨定，並對其進行各項力學強度試驗。





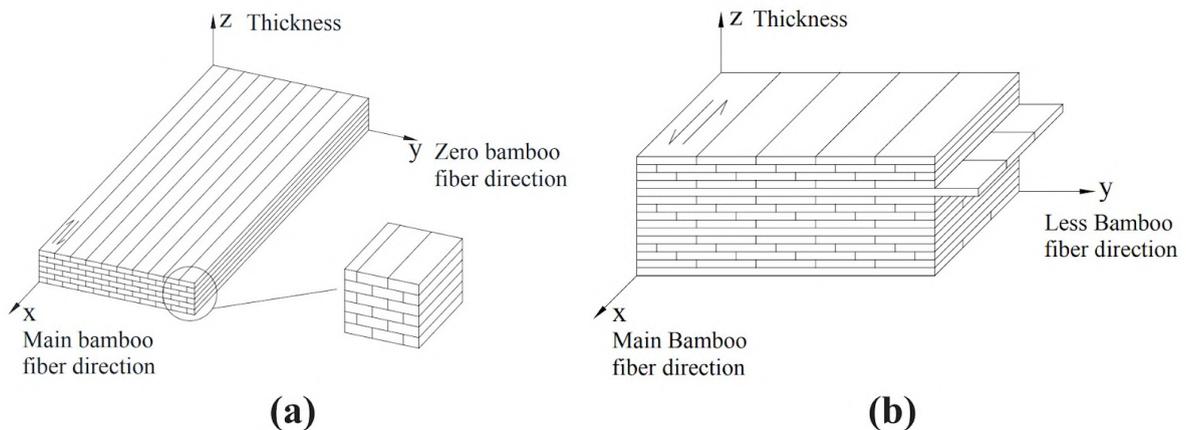
圖15：LBC composite beams[35]

### 3. 集成竹材（英文：laminated bamboo lumber，LBL）

多篇文獻中的材料都出現過此名稱，但對於製造工序均有不同的描述，以下列舉兩個案例，前者較接近竹集成材（LB）[36]；後者較接近膠合板（LVL）、BLVL[37]。

#### 3-1. 取完整竹片為材

此文獻[36]中的LBL較接近竹集成材（LB），並且與GB、PSB、LBL、Glubam的各項試驗結果進行比較，而此篇內容之集成元排列方式，在經過比對之下，與莊閔傑老師論述中集成材（LB）的平壓排列集成竹材之中的平行排列集成竹材相同。



The arrangement of bamboo grain in GB: (a) LBL; (b) Glubam

圖16：LBL、Gluebam之集成元排列方式[36]

#### 3-2. 破壞竹材形狀

此文獻[37]中的LBL定義較接近於膠合板（LVL）、BLVL，其製程方式為取原竹的四分之一，將其輾壓五次得到bamboo zephyr mat，平均厚度為11mm，接著在相同含水量、壓力、時間之下，分別以100、130、150、180°C進行熱壓比較，而根據成果數據，後續選擇150°C熱處的單元作為膠合試驗的設定，並以此進行集成材的備製。



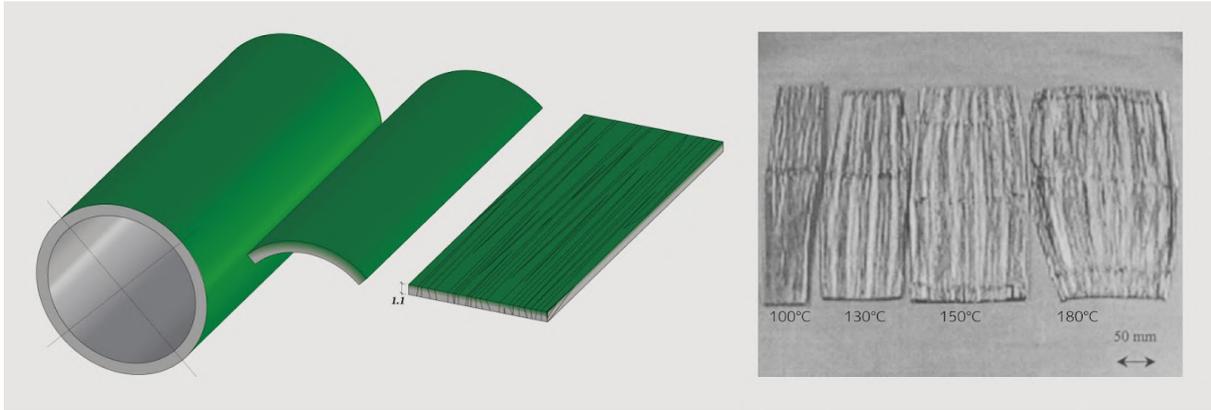


圖17：bamboo zephyr mat

製作工序上首先需要備製單元，厚度11mm的bamboo zephyr mat在150°C的熱壓處理中控制厚度到6mm，鉋平內外層成為5mm，變可以作為LVL的單一層，接著根據試驗不同進行不同層數的上下方向膠合。

其中包含三組試驗，分別有兩層與四層膠合，並分別比較其排列方式及佈膠量。本文獻對試驗材料製作的過程詳盡且嚴謹，內容亦提及竹束纖維重塑使用的工法與BS等相關衍生膠合竹材有著相同的製作邏輯，其製材率是相對較高的。

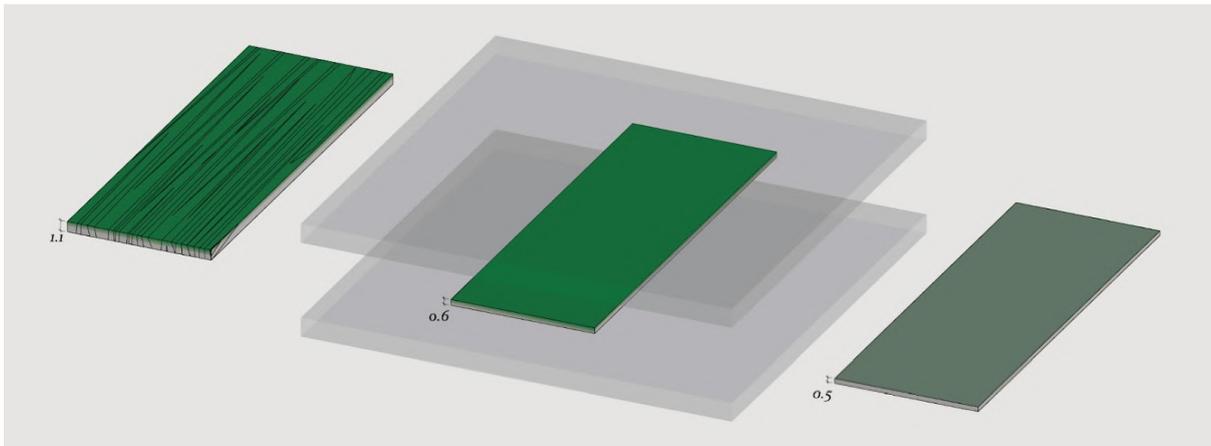


圖18：以每層為單元進行備製

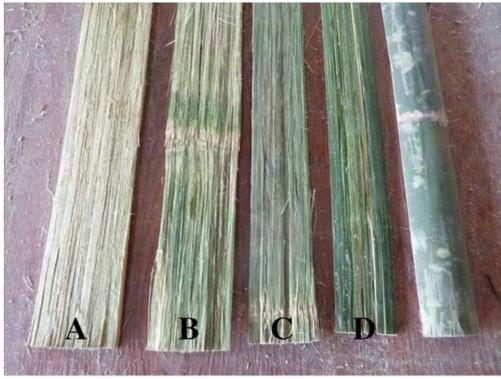
#### 4. 竹膠合板（英文：bamboo laminated veneer lumber，BLVL）

製作靈感來自膠合板（LVL），其製造方式為將原竹壓平後取得bamboo bundle，此作法較竹集成材（LB）取得集成元的方式工序較簡單且利用率較高，接著去除竹青側後排列後通過熱壓膠合，能展出良好的密度均勻性、尺寸穩定性。

而此篇文獻[28]的主要目的是調查去除竹綠的程度對BLVL的物理和機械性能，為了更好定量去除竹綠程度及竹束顏色變化，使用了分光光度法（Spectrophotometry），其內容討論了去除竹材碧綠程度對BLVL的尺寸穩定性、抗彎破壞模數、彈性模數和水平剪切強度的影響，試驗包含了彎曲性能以及板材剪切性能測試。



1123424



Bamboo bundle sheets with different removing extent of bamboo green.  
a bamboo bundle sheet with complete removal of bamboo green;  
b bamboo bundle sheet with high removing extent of bamboo green;  
c bamboo bundle sheet with low removing extent of bamboo green;  
d bamboo bundle sheet without any removal of bamboo green (color figure online)

圖19：去除竹綠的程度[40]

## 5. 重組竹

### 5-1. BS重組竹（英文：bamboo scrimber）

是由竹束或纖維化竹單板作為基本構成單元，並按順紋組坯、膠合、壓製而成的板材或方材[19]，經過再製造處理的重組竹具有較高的密度和均勻的結構[38]，使其效能得到了顯著提升，這種材料的抗壓、抗彎和抗剪強度都表現優異，同時具有較好的耐久性和抗腐蝕性，且擁有較低的線性膨脹係數和較高的耐火性能，這樣的處理過程可以消除竹材內部的缺陷，增加材料的密度和強度，並衍生出WBS、NBS[39]，是為提升竹材料使用率為目標的優化。

### 5-2. PSB重組竹（英文：parallel strand bamboo）

將竹條沿順紋方向組坯，經高壓膠合而成的一種高強竹基複合材料[41]，文獻中提出重組竹力學性能和阻燃性均優於木材。且重組竹的含水率低於12%，故不易乾縮、翹曲，是一種理想的輕質高強結構材料。

### 5-3. RCBT重組竹（英文：Re-combined Bamboo Timber）

雖然同樣的在中國學者筆下皆使用重組竹作為命名，但其製作工序與竹材纖維排列方式明顯與其他重組竹不同[20][21]，RCBT重組竹將小徑級竹材材、枝材等低質材，經輾搓設備加工，產出橫向不斷裂、縱向鬆散而交錯相連的竹束，再經過乾燥、施膠、組坯、熱壓而成的一種强度高、規格大、具有天然竹材紋理結構的新型竹材人造板。

### 5-4. 定向竹重組板材[22]（英文：oriented bamboo scrimber board）

基於改良集成材（LB）的加工過程而出現的製程方法，在集成材（LB）的加工中，為能達到規格化生產的條件，需要犧牲部分竹材特性及造成加工成本提高，因此定向竹重組板材乃是針對上述缺點所開發出的新加工方法，而由於定向竹重組板材的集成單元的長度比集成材（LB）之集成元高，因此製成樑柱或板材後具有更高的強度，同時達成利用率提升、簡化製程及降低加工成本等優點。





## 5-5. 竹定向刨花板[23] (英文: Bamboo Oriented Strand Board)

將窄長竹刨花經過施膠、定向鋪裝和熱壓而成的一種多層結構板材，通過測定竹刨花形態、施膠量、熱壓工藝等因素，而決定對竹定向刨花板 (BOSB) 性能的影響。

## 6. 小結

竹集成材料的彎曲加工技術是一個複雜而重要的領域，需要對不同種類和特性的竹集成材料進行深入的研究和綜合分析。過去台灣竹農面臨竹子不同部位之經濟效益的差異，這導致了整個竹產業的發展受阻。

根據國內外的實際應用情況，竹集成材料的彎曲加工技術具有廣泛的應用前景。在建築相關領域中，可以看到竹集成材料被應用於地板、屋頂、牆板、隔斷等方面，同時在家具製造中也被用於製作桌椅、沙發和床等。然而，竹集成材料在耗能最多的結構體中的應用仍需進一步的研究和開發。

竹集成材料種類繁雜，包括多種不同的品項，因此需要先釐清各種品項的性質，以及它們的加工製成方式、物理性質、力學表現和使用的膠合劑等方面的特性，除此之外，還需要整理和比對各品項的在不同文獻中所載錄的性質，以便更好地了解各種竹集成材料的特性和優劣，以及它們在彎曲加工技術中的應用，另外，文獻中的試驗成果進行記錄，可以更好地理解和分析各種竹集成材在實際應用中的表現和問題，對於後續的彎曲加工技術試驗進行試驗作為援引理論。

為了推廣竹集成材料在建築產業的應用，尋找具有合適製造技術的民間產業，與開發出相對於全竹更低廉的複合材料是這個階段的實作目標。





### (三) 彈性網殼的細部設計與構築程序文獻研究

彈性網殼 (elastic grid shell) 是一種特殊的網殼結構，其構築方式是由一個平面網格開始，每個網格交點處都有可允許滑動的設計機制，並透過垂直向度的移動形成整體型態，在材料選擇上，從鋼構、木構到複合材料等都有實作案例，而富有彈性的材料是建構彈性網殼很重要的因素之一，竹材於基本特性上就與之相符，若導入其材料條件及數據評估後，亦是一個值得嘗試的方向。

在此範疇之下，彈性網殼之參數及實作層面都有其值得探討之處，因此文獻研究共可以分為兩個部分來探討：分別是實作施工設計案例及參數構築程序案例，實作施工設計是借鑑過去已有之實際空間、建築案例，並參考其細部構造；參數構築程序則是可參考相關數位程序，如何利用現有之參數軟體，導入現有條件及材料性能，探討其成形及模擬狀態，兩者之間亦可以相輔相成，交叉比對檢視。

#### 1. 實作施工設計案例

彈性網殼的實作案例中，不得不提到創造出elastic grid shell一詞的Frei Otto，其在彈性網殼領域上的實作貢獻是相當大的；而在Frei Otto後，彈性網殼因技術及工程上的複雜問題而有一段時間無法取得進展與突破，但於數位軟體逐漸成熟之後，這個特殊的結構又重新受到挑戰及創新，並發展出各式材料及參數程序，因此本章節主要會提及20世紀至21世紀時彈性網殼重要的實作案例、其發展過程與演變。

##### 1-1. 木構彈性網殼

Frei Otto第一個啟動的彈性網殼項目並非是木構，起初他更多探討輕型外殼及其成形方式，因此於1962年與美國柏克萊加州大學的學生一起建造名為Steel Gridshell的構造體，主體由雙鋼棒 (twin steel rods) 製成，並用螺栓和夾板以網格方式連接，後續又建造了幾個木構的彈性網格後，才在Multihalle Mannheim項目中擔任顧問，使得彈性網殼一詞廣為人知，並初步定義出木構彈性網殼的構成方式。

Multihalle設計始於1970年，當時德國曼海姆將於1975年舉辦德國聯邦園藝博覽會 (Bundesgartenschau)，負責此項目的建築師Carl Mutschler & Partners諮詢了Frei Otto的意見，這也是為何這個設計使用了彈性網殼的原因。

Multihalle的設計規模比過去Frei Otto所設計的彈性網殼都大上許多，占地7400平方公尺，且是以長久使用為前提，而不是供短期的展出使用，因此經過精密的計算及施工下，Multihalle整體由兩個相互連接的圓頂組成，分別是跨度60公尺、高度20公尺的多功能廳及跨度50公尺、高度18公尺的餐廳，這個項目在當時可算是跨時代的建築構造，經過多次的整修與維護，至今仍正常使用中。





圖20：Multihalle Mannheim鳥瞰圖[42]

Multihalle的設計加入了雙層網格構造系統，這樣的構造系統可以使得網格具有足夠的靈活性，因此在成形前有一定的彈性能夠彎曲成所需的形狀，而網格向上吊起豎立起來後，一個網殼可以於另一個網殼上形成有範圍的滑動，在固定後又可提供足夠的彎曲剛度避免坍塌。



圖21：Multihalle Mannheim內部構造[43]

在施工過程中，首先將平面網格平放於基地上，然後使用吊車吊起網格中經過計算的數個節點，並慢慢上升到指定高度後，就能使整體構造成形，後續為防止網殼之間再有滑動，因此在每個交叉節點處都會使用螺栓鎖固，並且額外加入鋼索來增強及構造強度及穩定性。



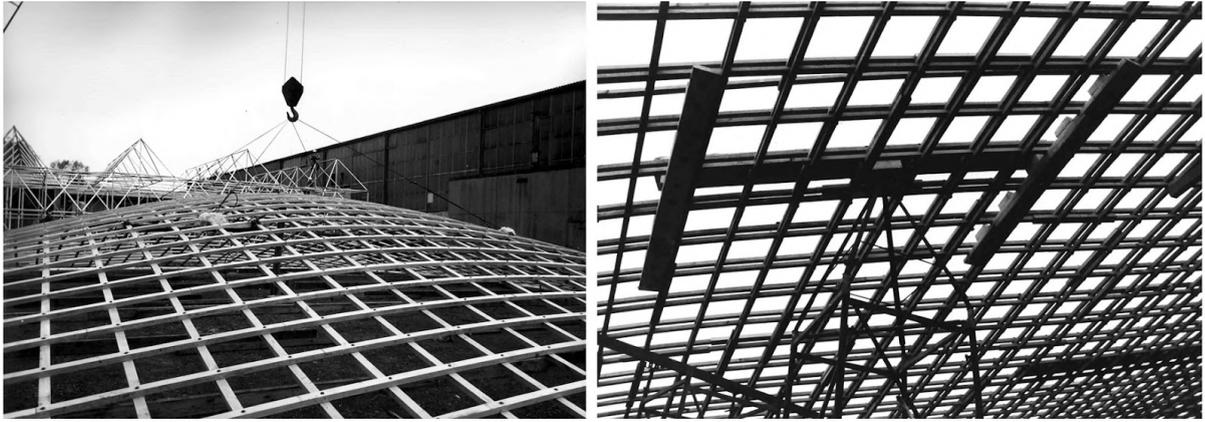


圖22：Multihalle Mannheim施工過程[44]

然而儘管Multihalle的設計經驗證明了彈性網殼結構在大型項目中的可行性和潛力，但也同時展現了在結構設計、幾何形狀、建模、測試、團隊合作及施工方法等方面都具有高度的複雜性，考慮到當時可用的軟體、工具及技術等考量，設計這種結構的工程造價相當高昂，因此在Multihalle之後並沒有多少彈性網殼的實作構築。

直到大約20年後，各項技術發展都較為純熟，彈性網殼構造開始重新出現，例如2000年於德國的世博會，建築師坂茂與Frei Otto及Buro Happold合作設計日本館，亦是使用彈性網殼的方式來構築，整體展館外觀如同由紙板管製成的大型波紋網格殼，內部構造亦是用經過特殊壓制的紙殼及木構製成。

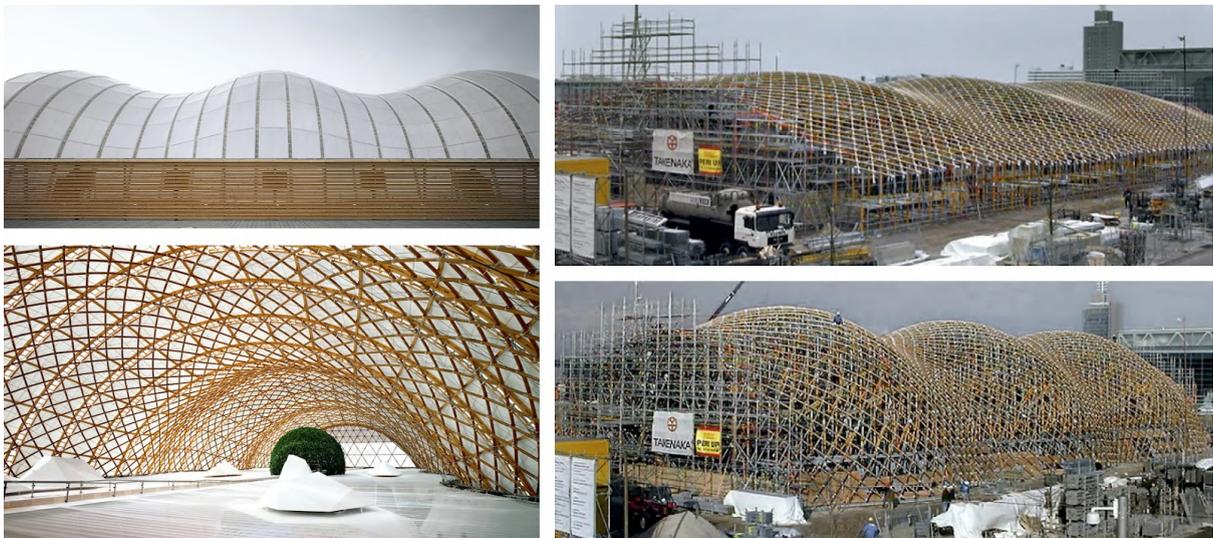


圖23：Japan Pavillion Expo 2000 Hannover[45]

此外，於2002年建造的Weald and Downland Gridshell亦是一個很典型的彈性網殼木構案例，外觀上與坂茂所設計的日本館有些類似，亦是使用雙層的木網殼系統來構築而成，但與過去的其他彈性網殼構造不同的是，此設計是先將平面網格抬高後逐漸降低塑形，經過變形後在將基座部分固定，此舉為彈性網殼帶來新的構築可行性。





圖24：Weald and Downland Gridshell[46]

除此之外還有許多使用彈性網殼方式構築而成的空間構造，大多都是以木構作為主體來進行設計，在經過參數軟體飛速的發展與進步下，這些當年過於困難的計算及模擬都可以獲得更好的優化與修正，也就能嘗試更多的方案與可行性。

#### 1-2. 複合材料彈性網殼

在2000年後，一些新興的實驗室開始針對彈性網殼進行新的研發，側重於複合材料的應用及現代參數計算方法等開發，以彈性網殼的機制下生成更加複雜的形式與結構，法國團隊納維爾實驗室（laboratoire Navier）便針對彈性網殼啟動了研究計畫，並試驗了多種可能的實作構築，其中以2013年落成的The Ephemeral Cathedral of Créteil最為成功。

The Ephemeral Cathedral of Créteil是在納維爾實驗室經過數次對於彈性網殼複合材料試驗後打造出的教堂建築，主要材料為玻璃纖維增強塑料（GFRP）製成的複合管材，並且經過計算後確定以單層加上斜撐的彈性網殼結構來構成，跨度達17公尺，屋頂由一層PVC塗層的膜覆蓋。



圖25：The Ephemeral Cathedral of Créteil[26]

The Ephemeral Cathedral of Créteil使用了玻璃纖維複合管材做為材料來構築彈性網殼，此材料輕盈且富有彈性，因此結構計算及施工處理上會與一般木構的彈性





網殼有所不同，主要要面對的議題是其構築的程序以及細部交接處的接頭設計，根據參數軟體的計算，每根管材都有特定的長度及相關定位細節，並且由特殊設計的套管、接頭及基座連接而成。

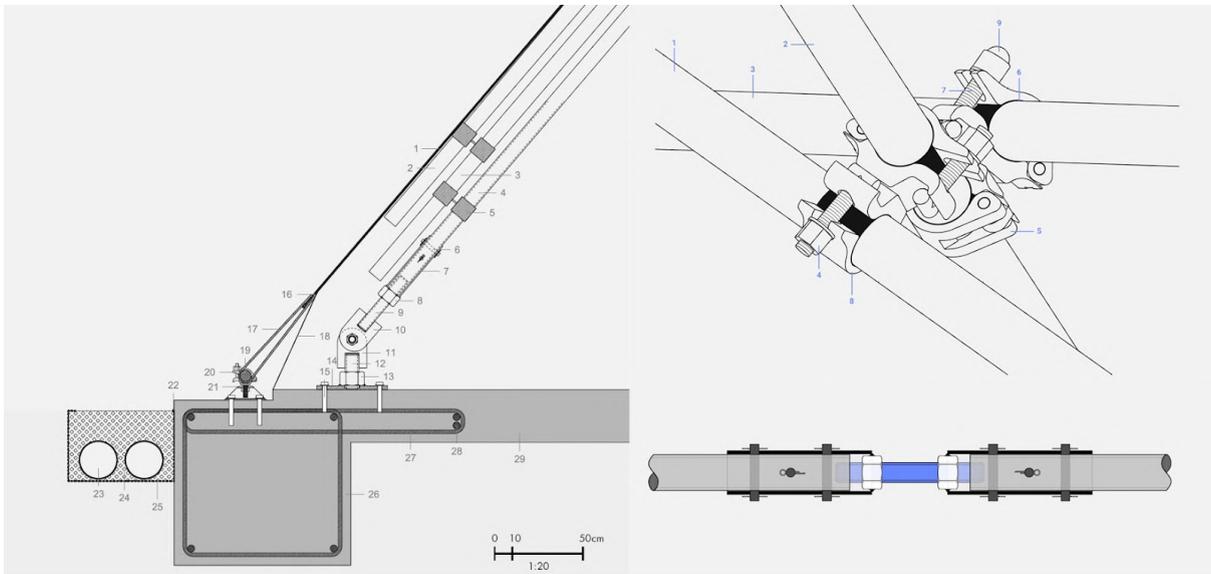


圖26：The Ephemeral Cathedral of Créteil細部設計[26]

在構築施工程序上主要分為三個部分，第一步為定位平面網格，每個交叉的地方用特殊訂製的旋轉耦合器 (swivel couplers) 固定，初步固定時不會擰緊螺栓，允許其還有滑動的空間；第二步為結構成形，會使用兩台起重機同時將網格的特定節點向上吊起，直到達到計算的高度後再將接觸於地面的管材固定於地面的錨點上，並將每個網殼交點處加以固定；第三步是支撐穩定，當網殼整體形式固定後，為加固其結構穩定性，會再增加一個向度的管材，將原本是四邊形的網格分割為三角形，使得整體結構的剛性增加。



圖27：The Ephemeral Cathedral of Créteil施工過程[26]

The Ephemeral Cathedral of Créteil從2013年竣工至今仍在使用，代表其結構的穩定及可行性是可受驗證的，於彈性網殼新式複合材料應用中可謂是向前邁出了一步，更為其他材料開啟了新的可能性，而竹材同樣具有高彈性及塑造性，與彈性網殼有基礎設定上的相符，因可因應其特殊的屬性，為竹材研發出相對應之細部設計，且竹子為自然環保的材料，其構築發展同時具有時代性的意義與價值。





## 2. 參數構築程序案例

在參數構築程序案例中，本計畫試圖從過去的文獻資料中尋找網格原始狀態、網格彎曲狀態、參考物三者之間的邏輯，歸納出相關數據與理論，並將對四種網格設計理論與五個程式案例進行分析。

首先對此篇文獻[26]進行分析，文獻中收集大量的彈性網格建築、實構築與工作營案例，包含整合數學、測量模型、結構學、控制負載和計算等理論各種研究核心方向。其中案例Solidarité Sida含有兩篇研究文獻[47][48]，紀錄了其使用了圓規法(Compass Method)進行的相關參數建模與力學表現的內容。

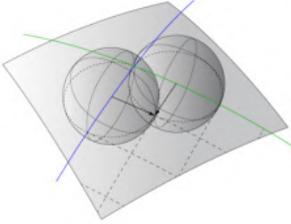
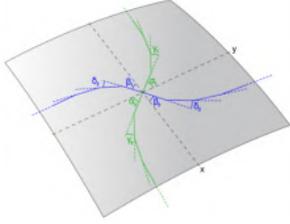
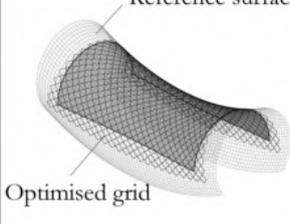
	<b>COMPASS METHOD</b> <i>Otto F. et al. (1974)</i> 	<b>GENETIC ALGORITHMS</b> <i>Boubaya L. et al. (2011)</i> 	<b>VARIATIONAL PRINCIPLES</b> <i>Lafuente Hernández E. et al. (2011)</i> 
<b>SURFACE GEOMETRY</b>	TARGET SURFACE AS GEOMETRIC <b>CONSTRAINT</b>	TARGET SURFACE AS GEOMETRIC <b>CONSTRAINT</b>	TARGET SURFACE AS GEOMETRIC <b>REFERENCE</b>
<b>GRID PATTERN</b>	PROGRESSIVE INTERSECTION OF CRICLES TRACED ON THE TARGET SURFACE	GENETIC ALGORITHMS: <b>OPTIMISATION OF PROFILES' CURVATURE</b>	VARIATIONAL PRINCIPLES: <b>OPTIMISATION OF PROFILES' CURVATURE</b>
<b>STATIC EQUILIBRIUM</b>	<i>not specified</i> <i>(Du Peloux L. et al. 2013)</i> NON LINEAR ANALYSIS BASED ON DYNAMIC RELAXATION	<i>not specified</i>	<i>(Lafuente Hernandez E. et al. 2011, 2013)</i> NON LINEAR ANALYSIS WITH FINITE ELEMENT METHODS

表1：自由曲面上網格建立方法比較[26]

### 2-1. 圓規法

以往，自由形狀曲面由於其難以展開的性質，使得在將其材料配置到曲面化成實際結構線時變得非常困難，而此文獻[47]中提出一種參數式設計方法，是基於將自由曲面格狀殼的趨附，以實現結構之自由形狀，這樣的設計方法得以降低自由形狀曲面在結構線配置過程的難度，其從形狀到結構線再到優化的程式設計，為彈性網格的參數式設計和實現提供思路解決方案。





以Solidarité Sida為例，首先以該案例的形態進行參數程式設計的模式演算，構成自由曲面後以圓規法（Compass Method）為曲面配置網格，接著對彈性網格的結構線進行的結構分析，找到網格的安息形狀，並檢查其在負載下的穩定性、強度、剛度，以及其桿件材料性質的曲率。

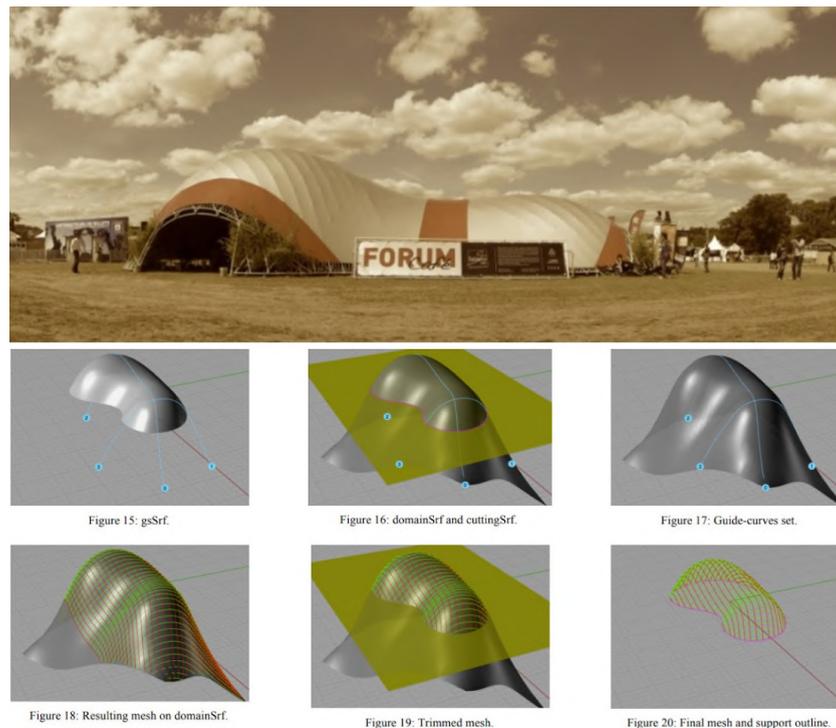


圖28：Solidarité Sida參數模型建立[47]

在文獻中可得知，每根梁的曲率都不能太高，如此一來即使在鬆弛和疲勞現象下也不至於會斷裂，而梁中的最大應力不得超過其強度的30%，在此應力限制下，網格的每根桿件對應的曲率若是成立，則斷裂風險則低到可被允許的程度；再來，在數位建模中的曲面應為Mesh，即為以多個小平面描述曲面，使整個表面都被網格化，讓結構線是得以進行力學運算的直線，除此之外，由於梁中的應力主要是由結構形狀引起的，因此，可以在未施加任何承載的情況下，從網格殼結構的研究中獲得應力的資訊。



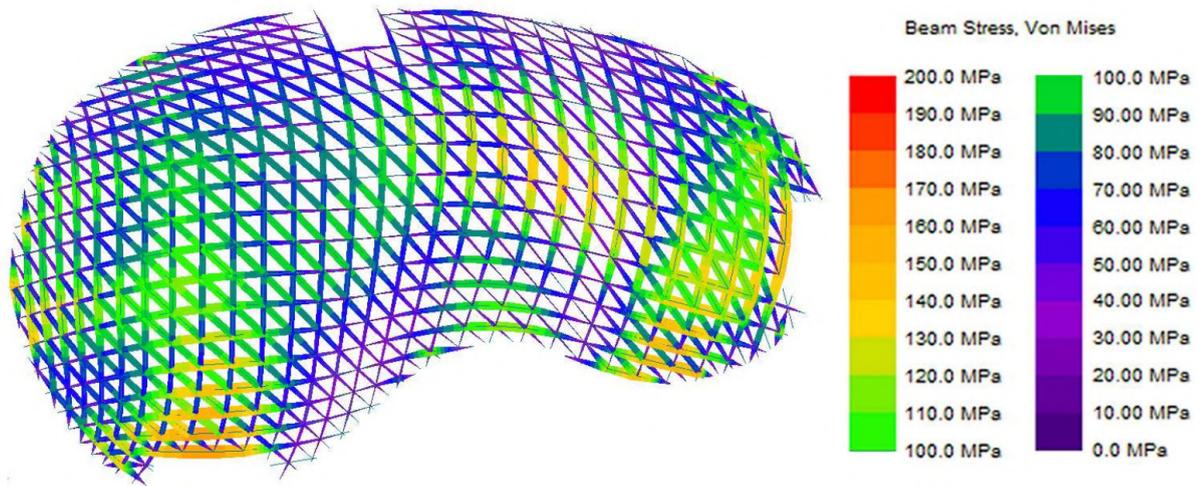


圖29：網格桿件內部的應力[48]

## 2-2. 演算法

演算法 (Genetic algorithm method) [50]先使用圓規法，然後通過演算法在剖面曲率方面進行比較，自動推理並選擇最佳的網格配置，演算法對於結構系統的優化，主要是為設計者尋找最佳網格方向為研究的核心，是一種網格系統的UV軸轉向最高效益的形態。

## 2-3. 變分原理法

變分原理法 (Variational principles method) [51]是建築系與數學系的共同研究，目的是使用變分原理來確定參考曲面 (reference surface)，並建立極值函數，以此網格趨附的方法去尋找優化網格 (optimised grid) 的幾何方式，變分原理使得參考曲面網格和優化網格之間關聯的數量值最小化，包含剖面的曲率、參考表面幾何的距離、邊緣長度與期望網格尺寸的偏差等。

## 2-4. 彈性測地網格

本小節試圖分析一種名為彈性測地網格 (elastic geodesic grids) 的結構，彈性測地網格亦屬於彈性網格結構，具有彈性和適應性等特質，本篇文獻[52]介紹了測地網格的基本概念和特點，是基於彈性材料和變形模型的建立方法，結構系統具備可伸縮性和可變形性。

彈性測地網格在數學上提供一種具有彈性和可變形的解決方案，可以通過使用簡單的運動機制，從平面網格形變成由彎曲薄片組成的空間網格，以此建構近似自形式的曲面。彈性測地網格是一種基於目標曲面上測地線網絡的繪製方案，這樣的形式是基於微分幾何學的理论見解提出的純幾何學方法，避免了對形狀進行數值優化的必要性，文獻中提出彈性測地網格用於設計、計算和物理模擬的解決方案，並展示了幾個具有不同複雜性的小尺度實例，最後將結果與製造模型進行掃描與比較。



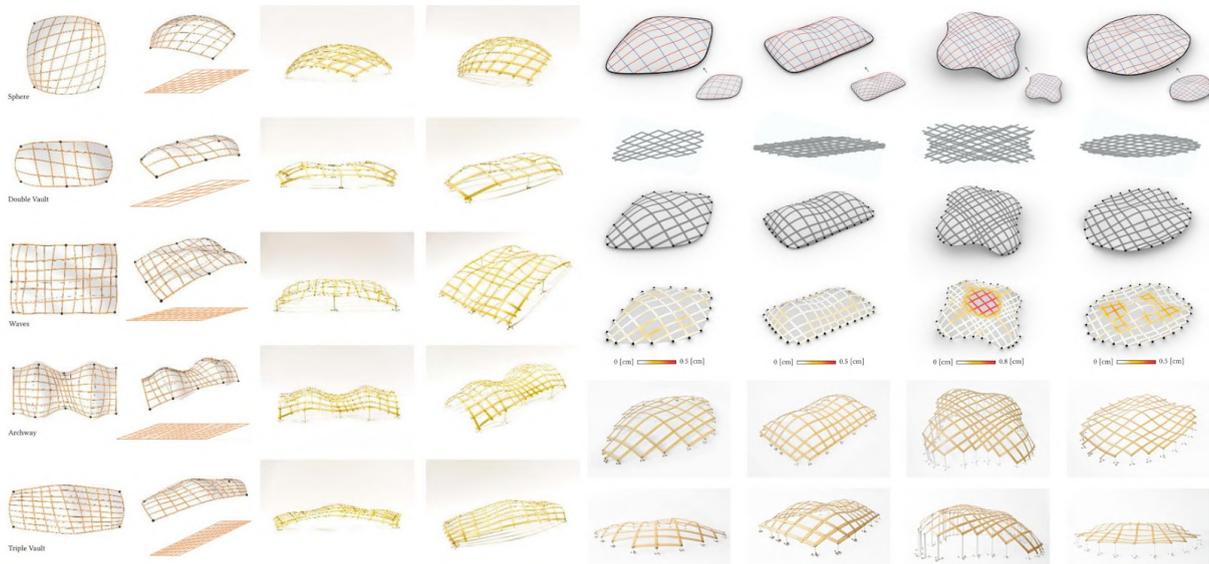


圖30：彈性測地網格之繪製方式示意圖[52][53]

第二個彈性測地網格繪製方法主要針對在3D空間中創建的自由曲面[53]，並計算出由彈性元素組成的網格，其繪製方法同樣要求網格的所有材料在初始狀態是平面且直線的，後續僅通過將平面元素的端點固定在適當的位置，這個2D網格就可以彎曲並達到近似3D的曲面。其計算方式較為特別是引入一個明確定義的彈性網格能量函數（elastic grid energy functional），可以識別出最小化彎曲能量及與提供的輸入曲面相契合的曲線網格。

此外，此案例中更進一步將網格曲面邊界型態優化成不需要是凸形的情況，這個優化方向有利本計畫的發展方向，而由於整個結構已經預應變，因此同時還具有承載能力，文獻中亦有紀錄物理模擬評估結果，其製作的模型中包含橢圓和多曲面的範例供參考。

在彈性測地網格的第三個案例中提供了一種優化的組裝方式，過去彈性測地網格的模型多使用扁長形狀的木片，在彈性網格從平面升到立體的組裝過程，側邊的木片為會因為兩個向度的桿件有各自的角變量，使材料發生彎折導致斷裂，從而避免其在桿件的主軸上發生不良彎曲，而此文獻[54]中設計了一種彈性測地網格的改良設計：即最小化形成和接近平面配置的彎曲矩，首先，保持弧長並將目標曲面轉移到平面上，再放鬆平面網格以最小化其曲率，從而減小其個桿件的彎曲矩。



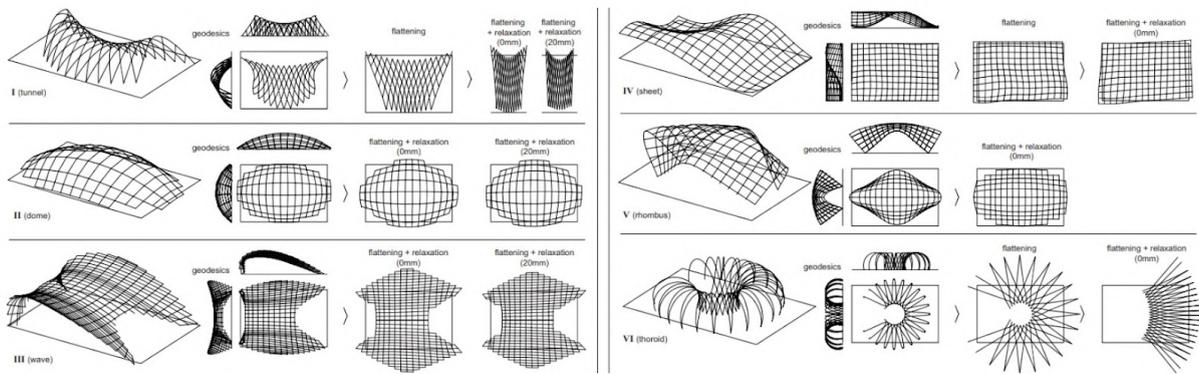


圖31：Generation of elastic geodesic[54]

第四個彈性測地網格文獻[55]突破以往的模型製作方式，進行了人體尺度的1:1彈性測地網格實構，而當面臨到更大尺度的實作時，將考慮更複雜的設計曲面（如自由曲面建築），一些限制就會變得更加明顯，例如由於高局部曲率或非測地邊界等特性，單個彈性測地網格實構將無法完整捕捉這些曲面，因此本案例將此類曲面進行優化研究，將其拆解為多個彈性測地網格後再組裝在一起，並在製作工序的改善實現了大尺度的實作。



圖32：Design and fabrication of multi-patch elastic geodesic grid structures[55]

## 2-5. 參數建模程序案例

本小節將說明五個關於網格與型態關係的參數建模程序案例，將對於網格建立的邏輯加以進行分析，下圖紅線為網格原始狀態的外框，黑線是經過程序的指令變形之後生成的網格，黃色部分為參考物是網格變形的目標。



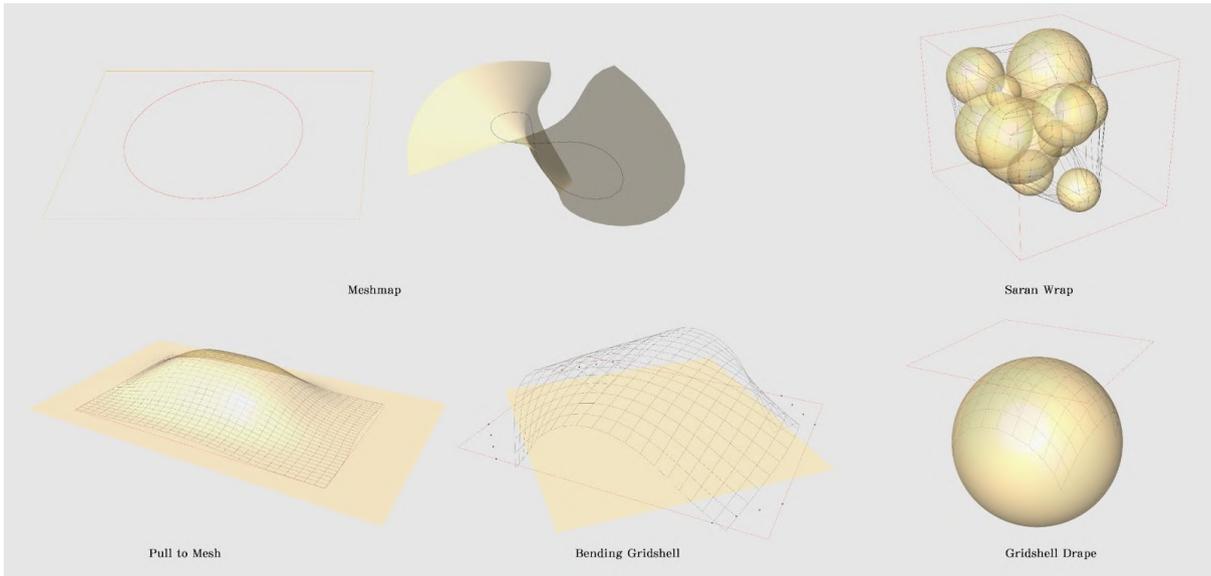


圖33：參數建模程序案例

#### 2-5-1. 案例一：Meshmap

案例一的邏輯是使網格依照基礎平面和參考物平面進行相關連的等化形變，類似於平面設計語彙中的封套扭曲，黃色框線的基礎平面對應到黃色的參考物，參考物的型態則為案例設計者建立，網格原始狀態位於基礎平面的置中位置，此處以圓形的三角網格為例，進入程序後生成右側黑線，按照基礎平面到參考物發生的形變，包含網格元素的位置、資料結構等，均會作為變形參數。

此處的網格為mesh的概念，是用多個小而平的面表達曲面，通常是共平面的三點或四點，與之相反的是nerbs，因此，每個單元的面、所有的點都能視為元素，並根據上述變化重新演算面的型態。而在這個案例中網格變形後的面積、長度皆會具有變化量，所以網格原始狀態作為定義，也並不等於彈性網格組立前；但若定義時符合圓規法，變化結果也會符合圓規法。

#### 2-5-2. 案例二：Saran Wrap

案例二的網格原始狀態是由方形的六個面構成，並利用幾何計算方式將網格上所有的點尋找到參考物，並以最短距離的位置作為基礎而成立新網格的程序。參考物為隨機數量的點，且每個球體均具有不同的直徑，接著建立一個包裹全部球體的方塊作為網格原始狀態，再將網格的點投射到參考物上，計算每個點與球體表面最近的距離，並使其趨向於與球體表面一致，這種方法所得到的網格演算結果是類似於將保鮮膜纏繞的效果，以方塊的外觀轉化為與球體接近的外觀，但不會受到隙縫干擾。透過這種案例，網格產生成具有彈性表現的模型，使網格外觀在各個球體之間更加平滑。





案例一和案例二的方式，僅考慮到參數演算幾何形狀的產生，但並未納入力學性質或結構系統的考量，因此雖然可以控制網格形成所需的形狀，卻不具備模擬結構行為的能力，因此後面參照的三個案例中使用了物理引擎Kangaroo2進行輔助運算，以計算各種物理條件，並建立模型的模擬結果。它能考慮到材料的彈性、剛性以及環境因素（如重力和風力）對結構的影響，亦能夠對幾何設定條件進行約束，和優化組件的預處理。

### 2-5-3. 案例三：Pull Mesh to Surface

案例三中網格原始狀態為平面，透過伸縮網格的各個線段，使網格變形並趨附參考物，而變形的方式需要分別針對網格的各種元素來進行，包含mesh的各項參數，如資料結構、點、面等，依據對網格的線段進行性質而判定。

### 2-5-4. 案例四：Bending Gridshell

案例四中經過程式演算，將模型的網格設定為具有彈性的線段，並在網格的四個角落增加移動的設定，將其推向設定的終點位置，隨著四個角落的移動，網格會開始彎曲和變形，且彎取會隨著越接近目標位置而更加明顯。可調整的參數包括四個角落移動的方向、線段的彈性、控制彎曲的程度和模型的行為等，並可以通過觀察網格變形量和方向來調整演算的參數，可以透過反覆試驗和調整，以取得優化模型的設計和行為，使網格在推移過程中呈現出期望的彎曲效果。

本案例對於建構彈性網格的設計有其優缺，形是力的圖解，拱和懸鏈線通常是鏡射的，所以本案例將重力場方向設定為向上，可以演算出較為直觀的模型；但後續以該案例為基礎對程式設計加入更多參數時，較容易產生漏洞。

### 2-5-5. 案例五：Gridshell Drape

案例五同樣需要進行網格整體的彈性設定，但是較特殊的是，其應變的強度設定需要在執行程式前以較小的數值輸入，並在執行程式後代入極大數值，以利變化的發生，其意味著對演算中的模型執行長度上的限制，使演算結果的模型中每個線段的長度相等，且變形後的網格長度與原先相同，這是最符合竹材料不可拉伸的情況。程序中為網格的每一個點設置向下重力以模擬垂落狀態，並在網格下安置一圓球與網格發生實體作用，即演算生成不會相互穿透的模型。相比於案例二取原始網格到參考物最近距離，本案例各個點的最終位置，會因為重力而受到周圍的點與網格分布的影響，且因為各個線段的長度相同，所以產生的網格會符合圓規法。

## 3. 小結

由彈性網殼之實作施工及參數構築程序兩個方向的文獻蒐集與案例分析可得知，要構築一個實際的彈性網殼結構，參數與實作兩者之間的結合與配合是必不可少，是一個需要來回驗證與修正的過程。





在實作層面，彈性網殼的結構處理會因為材料的不同，而產生細節上的迥異，例如每個網格交點處的接頭、跨度、斷面與基座處理等層面都需要經過探討，因此關於使用竹子作為彈性網殼材料時，細部設計會是一個需要側重處理的重點。

此外，彈性網殼於數位軟體上的操作與模擬有著很廣泛的研究，除了構築方式不同而會產生截然不同的程序外，亦跟其材料特性差異有關連性，因此本計畫應研究竹材本身的材料限制與自然參數，並加以數據化導入模擬軟體中，使其數位參數得以更加貼近真實狀態，便可以在實作的過程中輔以精準的計算，建構出屬於彈性竹網殼的參數程序。





## 二、基礎參數設計

### (一) 竹構通用接頭的設計

根據過去與竹構造相關的接頭類型文獻蒐集，並以具備各式形態之適應性竹構造接頭為目標之下，本計畫和與木製研的主持人陳建同設計師合作，初步規劃了三種接頭類型，依序為交疊接頭、續接接頭與橫接接頭，幾種接頭又可依據構造之不同需求做調整，設計出可適應竹材之新型態金屬零件，以標準化且大量生產，並降低竹構造施工難度為出發點，並可對應到不同的構造情境。

交疊接頭主要用於竹材於垂直向度上上下下疊合時的固定；續接接頭則是當構造跨度太大，而竹材本身長度不夠時，可用於水平向度上的銜接；橫接接頭即是取竹子端點及竹子中間部位接合，多半是用於類似於桁架系統的空間形式。

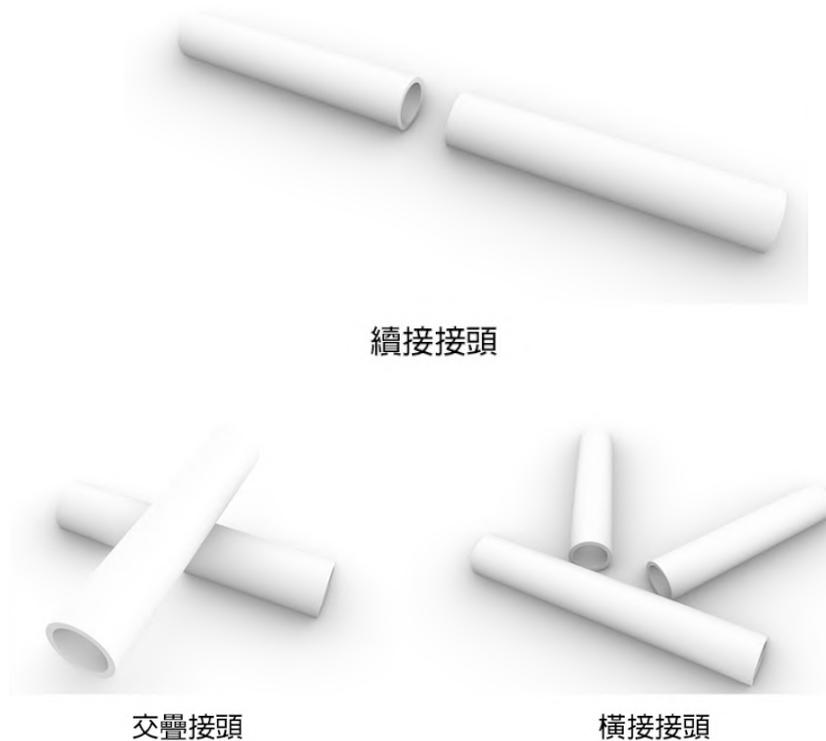


圖34：三種竹接頭設計類型示意圖

目前這三種接頭類型均同步研發，分別對其進行設計構及材料測試等不同面向的研究。時程及項目規劃上，從計畫三月啟動開始進行設計研究構思，包含2D及3D圖面繪製及發想；接著進行相關材料測試及延伸變化；再來會根據實作的內容進行不同類型的離型製作及強度試驗，合作對象有德豐木業、中興大學實驗室等單位，本計畫亦開發了整合校內資源的模式，與交大土木系合作，整合金屬加工工廠、結構實驗室等，在學術及研究面向上共創成果。



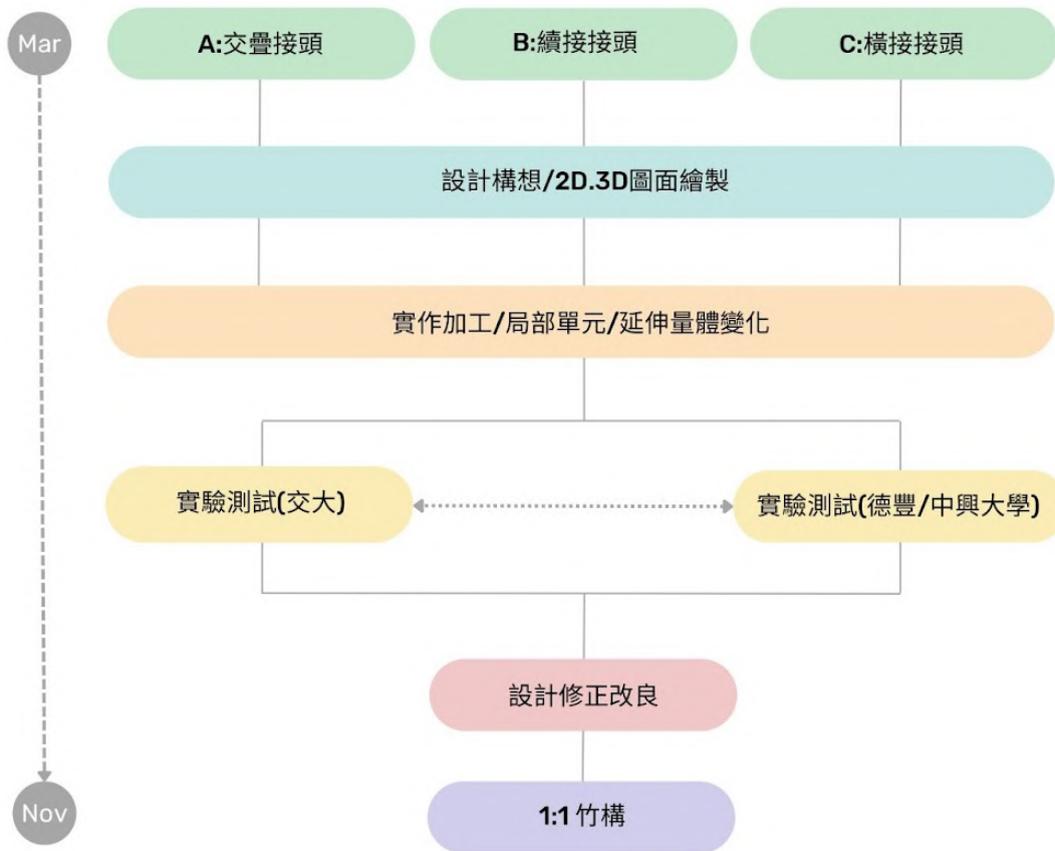


圖35：初步接頭設計規劃與流程

## 1. 交疊接頭

交疊接頭主要用於竹材於垂直向度上上下下疊合時的固定，且與本計畫的另一個主要項目「彈性竹網殼」中需要建立的竹子交接處有一定程度的關聯性，而彈性網殼的特點是，當其還是處於平面網格時，需要允許其十字交點可有角度與位移的彈性範圍，而當其向上吊起形成空間型態時，交點則需要進行穩定鎖固，因此共分為兩個階段。而交疊接頭的設計為達到可與彈性網殼結構通用的形式，在設計構想上會盡可能保持其擁有角度及左右位移變化的允許值。

### 1-1. 設計構想

起初構思整體接頭型態時，考量到需可通用於彈性網殼交點的細部設計，因此在竹子交疊的情況下仍「可允許一定範圍的滑動」為設計方向，並使用3D軟體模擬設計了幾種可能性。



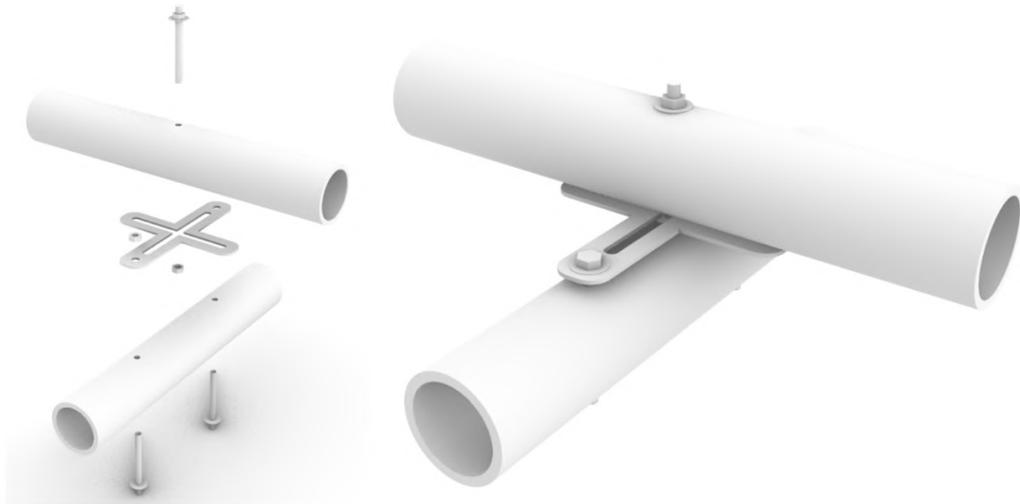


圖36：交疊接頭設計構想1

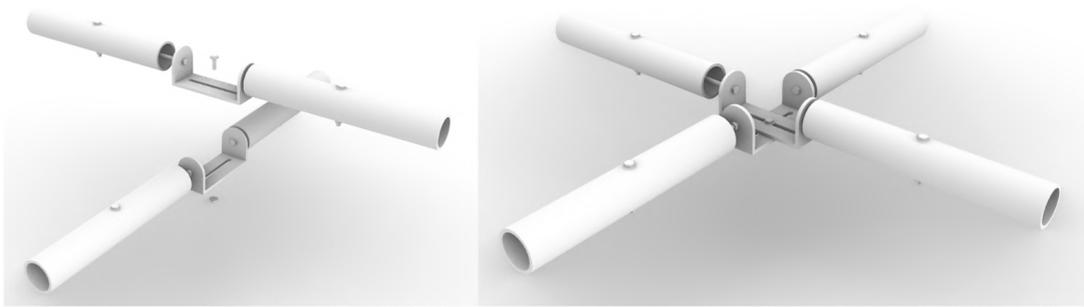


圖37：交疊接頭設計構想2

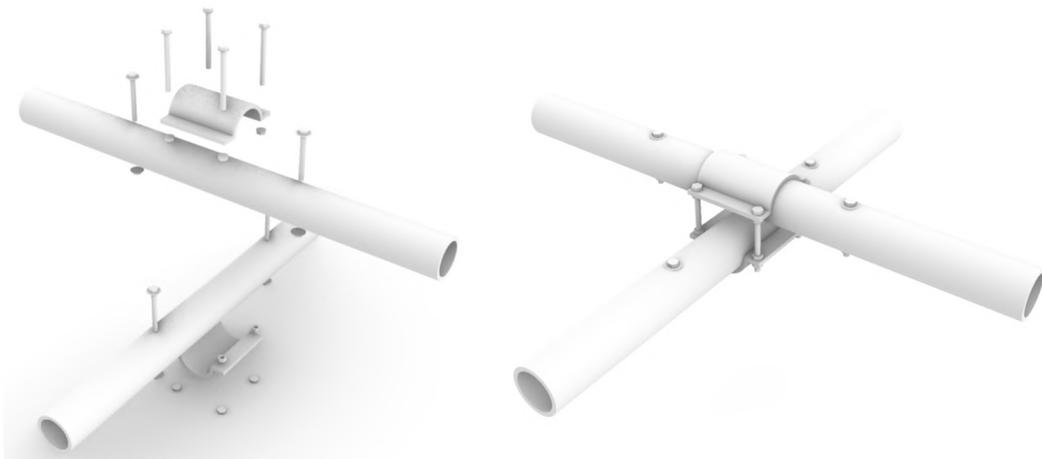


圖38：交疊接頭設計構想3



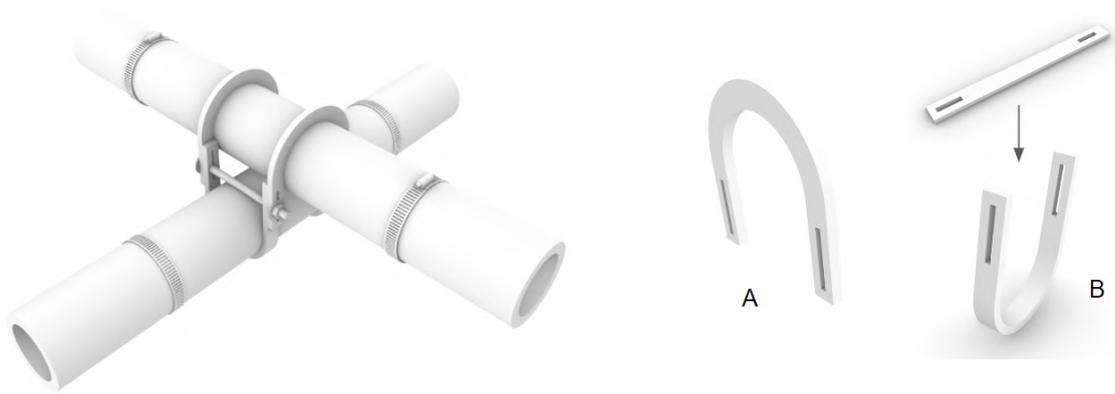


圖39：交疊接頭設計構想4

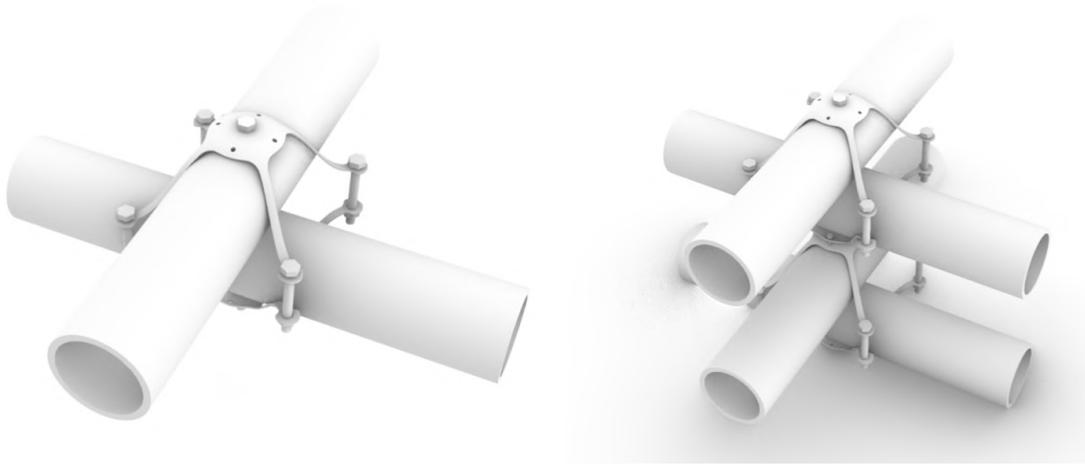


圖40：交疊接頭設計構想5-1

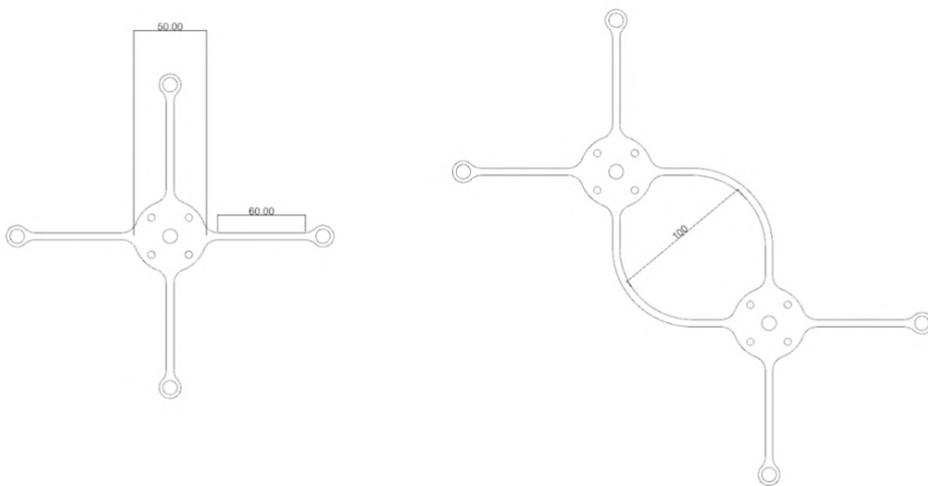


圖41：交疊接頭設計構想5-2





然而，以上幾種設計因為未考慮到竹子交疊的情況下可能會有角度上的改變（有時候並非總是垂直水平90度正交），因此又重新設計了線性的版本，使得竹材交疊時不會受到束縛，並在接頭材料的選用上，構思使用彈性較高、較薄的不鏽鋼，使其較能服貼竹材的同時，亦符合可左右滑動與角度變動的需求。

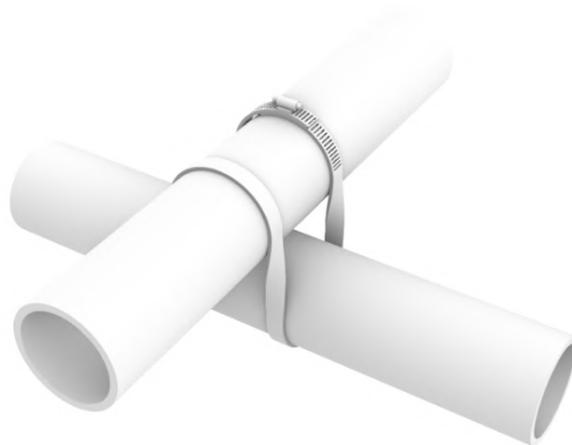


圖42：交疊接頭設計構想6-1

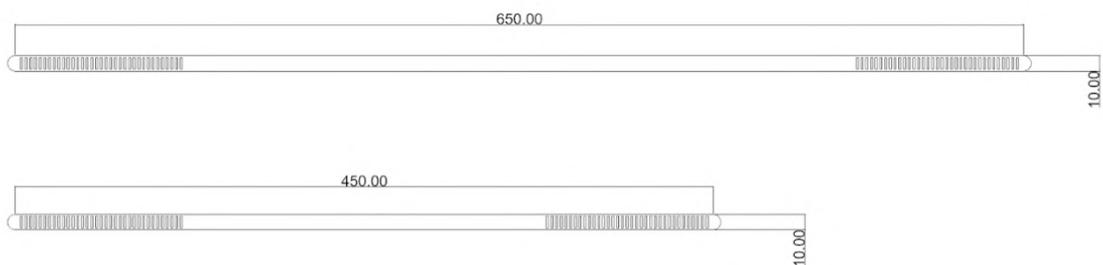


圖43：交疊接頭設計構想6-2

### 1-2. 材料測試

經過設計發想後，目前以交疊接頭設計構想6進一步製作prototype，選用了薄不鏽鋼束帶進行改良與設計，厚度約0.2mm的不鏽鋼薄貼合度高，且彈性佳，徒手即可彎折，易恢復原形，且特性上強度高，抗風雨、耐腐蝕，適合用於戶外環境。



圖44：交疊接頭雛形材料選用（0.2mm不鏽鋼）





在第一次試著將不鏽鋼束帶施作於竹子上是使用4.6mm寬度的束帶與直徑約25mm的竹子，束帶纏繞於竹子上時展現出高彈性與高服貼的特質，且不鏽鋼束帶是需要使用專門工具來束緊，因此可以有效省時省力，並讓整體強度達到平均值，能減少像傳統使用繩子綁紮時，可能綁了6至8組節點就會使人力陷入疲勞，也可以避免由師傅手工施工而有強度不同的問題。



圖45：不鏽鋼束帶試作

然而因為不鏽鋼本身摩擦力不足的關係，因此在竹材表面上會有較大的滑動問題，因此首要之務是要能增加其本身的摩擦力，除此之外，原本不鏽鋼束帶本身的鋼扣亦需要有強度的評估，是否要進行改良。

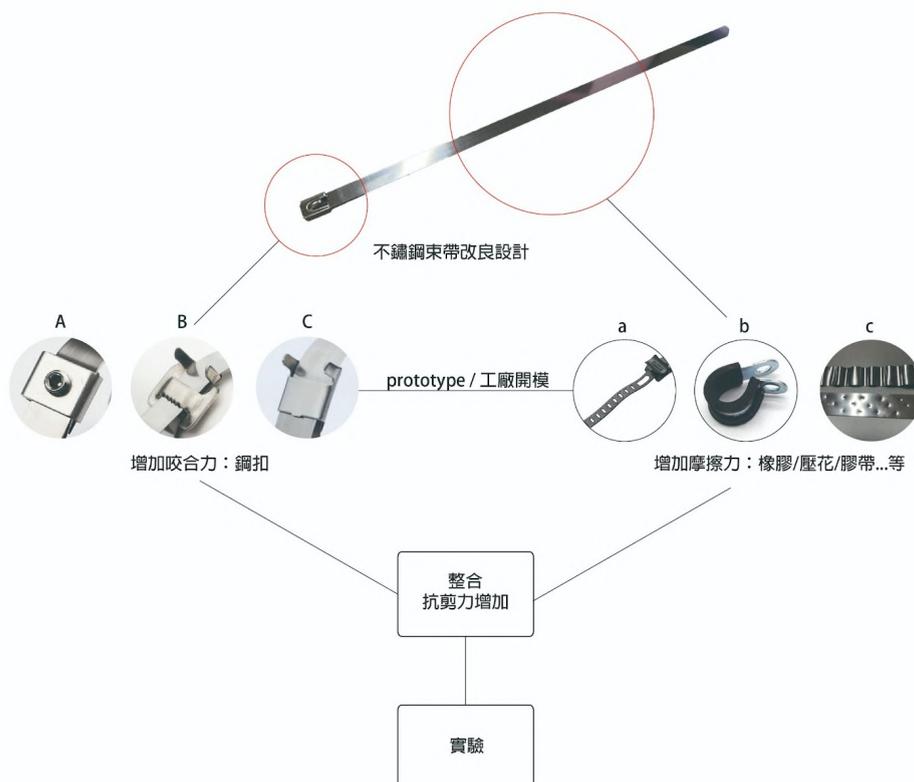


圖46：不鏽鋼束帶改良示意圖





改良的方式初步擬定了兩個大方向，分別是「咬合力改良」及「摩擦力改良」，咬合力改良的部分主要是針對不鏽鋼束帶的鋼扣進行加強，因為既有的不鏽鋼束帶主要是依靠內部的滾珠去卡住束帶，因此可能強度上無法承受過重的力量，因此針對這個部分目前共改良了兩種不同的鋼扣，分別是L扣及牙扣。

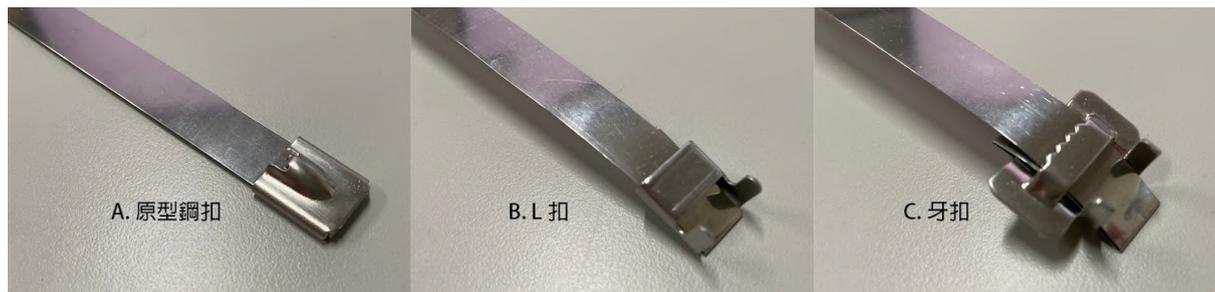


圖47：不鏽鋼束帶咬合力改良-A. 原型鋼扣、B. L扣、C. 牙扣

至於摩擦力改良的部分，則是為了改善不鏽鋼表面過於光滑而在竹材表面上會有的滑動問題，因此初步嘗試了四種方案來跟束帶結合，分別是橡膠、橡膠漆、布紋膠帶、磨砂防滑膠帶及壓花加工。

橡膠無庸置疑是一個很好增加摩擦係數的材料，只是必須考量到不鏽鋼與橡膠之間的銜接方式，應該使用怎樣的接著劑才能達到良好的附著強度；而橡膠漆則是一種特殊塗料，其特性為耐腐蝕及增加摩擦力，通常用於船舶、橋樑、貯槽、發電廠及化學工廠等之鋼鐵構造物，要將橡膠漆塗上不鏽鋼之前，需要經過底漆與硬化劑處理。

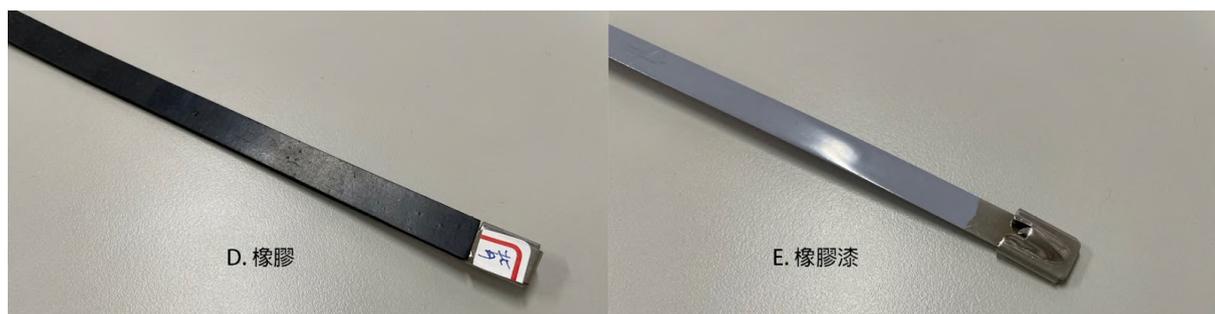


圖48：不鏽鋼束帶摩擦力改良-D. 橡膠、E. 橡膠漆

布紋膠帶及磨砂防滑膠帶與束帶結合的想法，是因為從杜怡萱教授於108年之《竹構接頭設計委託試驗期末報告》[24]中發現，若在竹子上先纏繞布紋膠帶再用尼龍繩綁方回結的話，會大大增加其抗剪能力，因此若是直接將布紋膠帶及磨砂防滑膠帶與不鏽鋼束帶結合的話，就可以讓接頭本身摩擦力提升。





圖49：不鏽鋼束帶摩擦力改良-F. 布紋膠帶、G. 磨砂防滑膠帶

不鏽鋼的表面是相當光滑的，若直接於不鏽鋼上面進行壓花加工的話，就可以經由不同凹凸紋路來形成較佳的摩擦力，這個部分與國立陽明交通大學機械系的金屬加工工廠合作，由機械系的技師們協助處理加工，目前共研製出圓點凹凸及直條紋凹凸兩種紋路。



圖50：不鏽鋼束帶摩擦力改良-H. 圓點壓花加工、G. 直條紋壓花加工

而除了束帶本身摩擦力的改良之外，亦可以針對綁紮方式進行探討，如同傳統的以繩索或者鐵絲作為材料，在竹材上進行綁紮、纏繞，以達成銜接的目的，若將材料改為金屬束帶後，亦可發展其綁紮的各種類型，因此本計畫針對金屬束帶的綁紮方式上，亦有不同層面的思考，研究了四種綁紮類型，分別是回字繞法、X型繞法、回字加固繞法、X型加固繞法。



圖51：不鏽鋼束帶回字繞法

不鏽鋼束帶的回字繞法是最基礎的綁紮方式，相當便捷，且能夠很好的使用工具束緊，因此可以達到相當平均的強度，只是會有些微滑動及轉動的問題。



1123424



圖52：不鏽鋼束帶X型繞法

不鏽鋼束帶X型繞法相較於普通的回字繞法而言相對所花費的時間會較長，但強度也較高，亦是傳統使用鐵絲纏繞於竹材做固定的常見綁法之一。



圖53：不鏽鋼束帶回字加固繞法

回字加固繞法是基于普通回字繞法改良而成，使用兩條金屬束帶綁紮而成，先使用回字繞法進行第一次纏繞，並在兩根交疊的竹材中間進行第二次圍束，類似於鋼筋中的箍筋概念，使整體強度提升。



圖54：金屬束帶X型加固繞法

X型加固繞法也是由X型繞法演變而來，在綁紮的過程中在兩側進行來回纏繞，以達成加強的效果，而這種纏繞方式會需要一條極長的金屬束帶，且綁紮的時間也相對較長。

而金屬束帶除了材料特性上更耐用之餘，不管是本身摩擦力的改良，亦或是綁紮方式的不同，在整個纏繞的過程中，因為有工具的輔助，可以讓整體強度上更加平均，亦能減少人力與時間的成本。





後續會經過與專業結構技師的討論後，針對以上幾種改良的類型進行評估與選定，並執行後續的強度試驗（如抗壓、抗剪等測試），再根據成果數據報告的分析，回頭修正與優化設計內容。

## 2. 續接接頭

所謂續接接頭即是竹材端點與端點在平行的狀態下進行銜接，當竹構造跨度太大或者有其他銜接需求時，可以用於延長竹子的長度，以往，竹子續接方面最大的難題就是當用桿件於竹子中心貫穿並銜接兩根竹子時，中心的桿件會有擺動的問題。

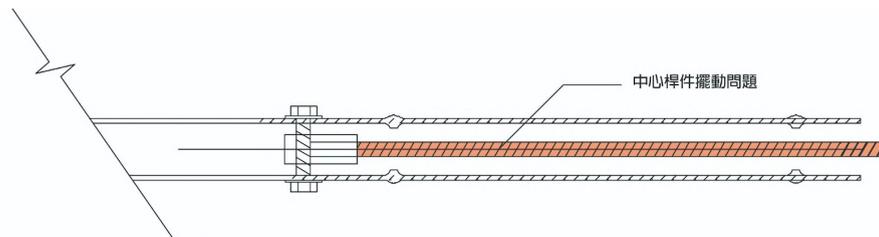


圖55：續接竹材時中心桿件擺動示意圖

因此為了克服這個桿件擺動的問題，過去許多建築師及設計師對其進行研究，其中比較成熟的作法當屬大藏聯合建築師事務所（以下簡稱大藏）所研發的續接方式，大藏於續接竹子的做法中，以鋼筋貫穿於兩根竹子內部，並加入填充物，起初使用發泡材料，後來發現強度不足，因此改用無收縮水泥，效果顯著，並應用於多個竹構造中。

然而，灌製無收縮水泥於竹材內部的話，每個續接處都需要大量時間處理（施作時間長且需等待水泥乾燥），並且會使得竹子的重量大大提升。針對這個問題，與木製研主持人陳建同設計師也進行了一連串的設計研發，例如改成以橡膠塊作為內部填充物，橡膠因為摩擦力高，因此填入內部可以很好的固定中心桿件，然而若使用橡膠的話，會需要準備大量不同尺寸，才能把不同直徑之竹材內部填充完整，像孟宗竹那樣大直徑的竹材就更難適用；此外，陳建同設計師也使用過以牙條水平貫穿竹子內部，並在牙條上開洞，使螺桿在垂直向度由外部刺穿後和牙條作固定，但將會破壞牙條本身的結構，有強度上的疑慮。





填充物	優點	缺點
發泡材料	施作時間快	強度低
無收縮水泥	強度高	施作時間慢 材料變重
橡膠塊	摩擦力高 結構穩固	備料無法統一
螺桿	施工快速	破壞牙條結構

表2：竹材續接內部填充物比較

### 2-1. 設計構想

基於以上緣由，陳建同設計師與本計畫合作，共同研發新式的竹材續接接頭。一開始的想法是先將竹材續接之中心桿件替換成牙條，牙條比起鋼筋的優勢是不用焊接，且大小上可以自由改變，接著內部固定桿件的填充物部分，設計一個類似於膨脹螺絲的金屬零件，使其在內部可以透過上下兩個螺絲向內擠壓，並達到逐漸膨脹並撐開於竹子內部，以固定中心桿件的效果，這樣設計的好處除了是乾式施工之外，也可以達到快速施作且整體輕便簡潔的狀態，亦可以與牙條本身結合通用。

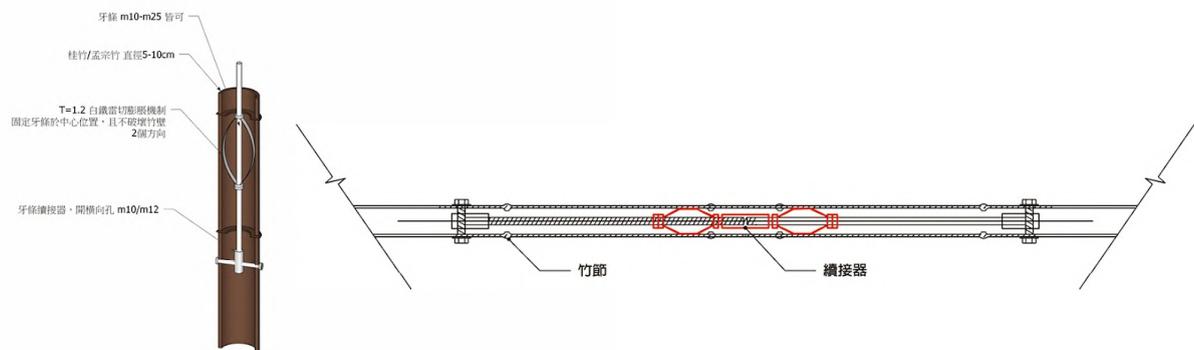


圖56：可膨脹金屬片設計示意圖

### 2-2. 材料測試

在進行初步設計構想後進行材料測試，先以最普遍的1.2mm鋼板進行雷切並彎折，測試其膨脹及固定中心桿件的可行性，而除了原型外，亦有研究從頂部就分岔的形式，這樣的分岔可以讓整體金屬片膨脹的大小及位置產生變化，便可以依據結構或者材料本身的限制及需求來調整膨脹位置。而這樣輕盈化的金屬片是提供一種快速搭接的可行性，但因應每個竹構造的結構都不盡相同，例如當整體結構的抗彎矩需求較高時，亦可以再竹材內部灌製如同無收縮水泥一樣的填充物，以增加其結構強度。





圖57：可膨脹金屬片實作測試

### 3. 橫接接頭

橫接接頭意即竹子端點與竹子中間部位銜接，有非為正交（類似於T型）與非正交（帶有角度）的形式，比起斜角的銜接，直角正交的接頭類型較容易處理，大藏也曾做過正交形式的竹接頭，內部構造也與續接接頭有部分類似，主要是以螺桿、螺帽及特殊定製的金屬弧形墊片做固定，但依舊可能會有偏移的狀況。

為了可以優化正交與非正交的橫接方式，因此在接頭設計的部分初步構思了兩種可能的方向，分別是中介接合形式及直接接合形式，中介接合形式意即使用金屬零件來製做接頭，並使兩根竹材幾乎無接觸，只靠金屬構件本身來做連接，如陳建同設計師於北門翼中所設計的金屬接頭，也是屬於此類型。本計畫特地安排南下前往與木製研總部參訪，並與陳建同設計師討論其接頭發展過程與後續方向等，這種中介類型的接頭設計可以比較不受到竹子本身材料性的限制，可以有更多發展的空間。



圖58：與木製研接頭設計參訪





而直接接合的方式則是透過螺桿或者牙條在竹子內部銜接，讓兩根竹子本身會有所接觸，並且若於竹子內部加入如續接接頭一樣的可膨脹金屬片的話，就可以很好的固定位於中間的牙條了。其中銜接方式又可細分為貫穿或者非貫穿的形式，貫穿形式是指讓牙條直接刺穿到另一側，並用帶有特殊角度的訂製螺帽來鎖緊；而非貫穿形式則是讓兩根竹子鎖固的交點位於內部軸線上，一樣是透過在竹子內部設置特殊角度的金屬零件並旋轉另一側的竹子，即可達到鎖緊的效果。

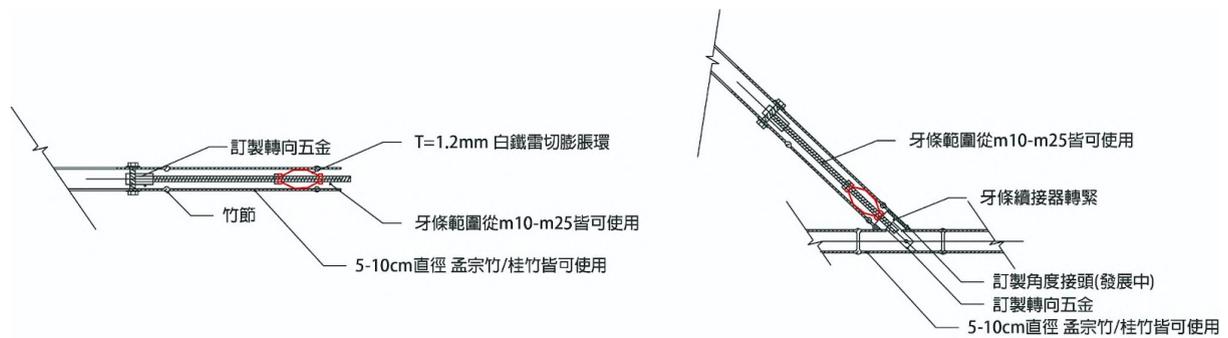


圖59：橫接接頭設計構想示意圖

#### 4. 小結

綜上所述，目前整體竹接頭的設計共分為三大類型：交疊接頭、續接接頭以及橫接接頭，這三種接頭目前都有進行初步的設計構想及材料測試，並持續精進與修正中，期望可以減少如傳統竹接頭需要仰賴大量人力與時間成本的方式，透過設計過後的金屬零件，以精簡、方便、輕量化的施工模式，讓竹構築能夠更易於推廣。

這三種接頭只能說是一個大方向與類型，但事實上竹接頭的設計應可大致分為兩個階段來進行：第一個階段就如同現在本計畫目前正在進行的研究與設計，針對竹子與竹子本身的銜接方式來作探討，但第二個的階段就會開始以整體竹構造的空間形式來檢討，例如網殼結構、拱形結構、穹頂結構等，都需要考量到其力學結構而給予不同的處理方式，並以此進行更多的接頭設計優化、改良甚至是分支等可能性。

此外，後續將針對以上幾種接頭展開雛形製作及強度測試，透過金屬雷切延伸其他零件設計，並製作試體來進行包含抗壓、抗剪等強度實驗，以數據報告來評估設計的可行性，並加以修正與優化，以期可以使用研究開發的接頭來應用於明年度的竹構築成果。





## (二) 彈性網殼數位設計流程

### 1. 設計方法與電腦模擬運算說明

#### 1-1. 數位設計流程

為了將幾何造型實體化在現實世界中，首要之務需要確定設計是可以建造的，這是一個將彈性網殼的設計概念轉換為有形可建造資訊 (fabricable information) 的過程。本章將說明如何透過對應上一章的數位設計流程，確保在各環節中能是當從數位模型中取得需要的資訊，並且得到往下一個階段前進所需的幾何資訊。

設計與構築程序可用下圖進行說明：箭頭表示數位流程的先後順序；導角外框的塊體表示轉換幾何資訊的方法，分別為找到材料分布或是找到型態；其餘文字部分代表階段性的幾何資訊，例如「目標幾何nurbs surface」所指的是在Rhino環境中建立一個nurbs surface作為網殼設計的參考面，並且在往後的設計流程中以該曲面目標做幾何優化與幾何合理化。

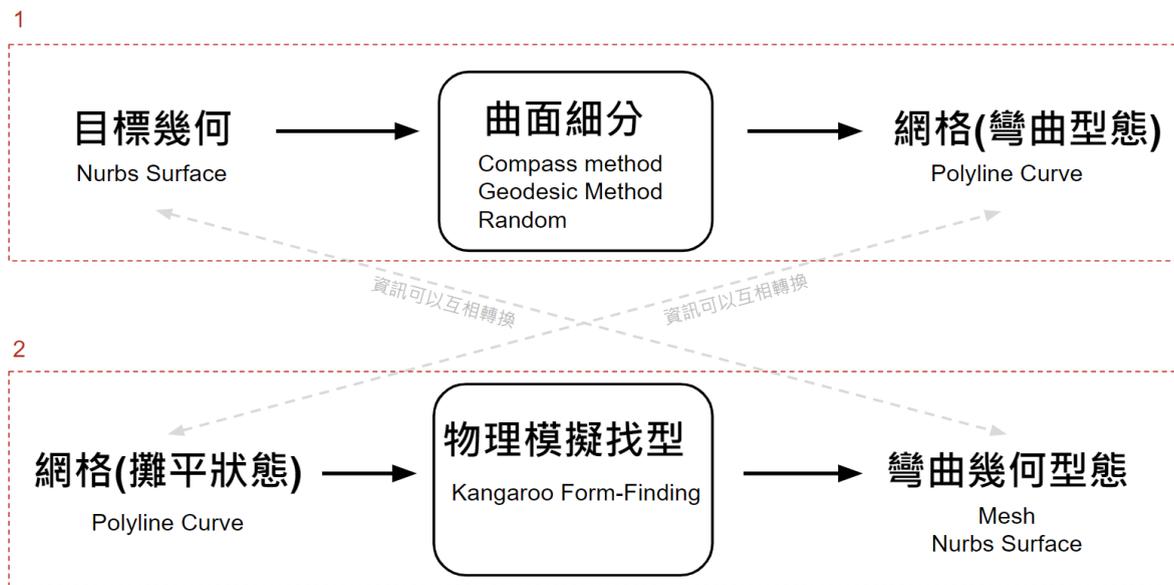


圖60：幾何資訊之間的相互轉換關係

如上圖紅色虛線所示，彈性網殼的設計流程可以透過兩個方式進行，本研究也分別對應到四個實驗性構築中應用竹材驗證。





### 1-1-1. 彎曲型態主導

於設計初始階段需要決定好最終網殼的幾何彎曲型態，並透過不同的曲面細分方法 (Surface Subdivision method) 找到合適的材料分布，在這個階段中考量結構合理性、材料性能、施工效率、備料成本等細節，最後產生能夠對應到實際完工尺寸的 Polyline Curve 的幾何資訊。

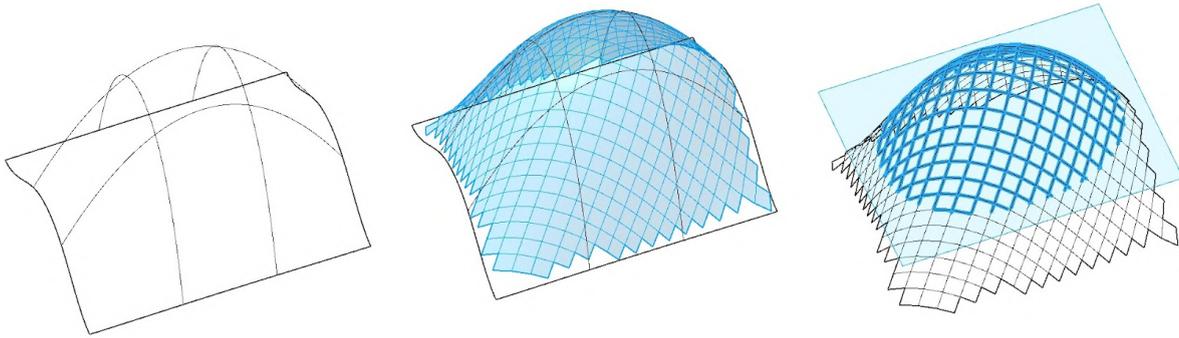


圖61：「彎曲型態主導」的參數設計過程

在這個設計系統中，設計者需要不斷調整「目標幾何型態」與「網格細分的參數」。不同的設計軟體中各有調整方法，以本研究使用的Rhino環境為例，設計者可以透過控制點 (control point) 即時地塑形\*nurbs surface，這個設計方法經過參數設計軟體的評估與實作顯示，適合應用於容許材料扭轉量 (torsion) 大、且設計彎曲極限曲率大、與材料斷面無明顯強弱邊之分的材料，例如管狀材料，而在設計情境上，能夠使設計者對於最終型態有很高的掌控度。

### 1-1-2. 攤平型態主導

於設計初始階段決定網殼材料攤平的樣態，再透過物理引擎模擬材料彎曲至不同的基礎 (anchor) 固定點後的狀態，在這個階段中亦需要考慮結構合理性、材料性能、施工效率、備料成本，以及最後產生能夠對應到實際完工尺寸的幾何資訊。

在這個設計系統中，設計者需要不斷調整材料攤平範圍與基礎固定點位置，直到型態能夠完整回應設計需求，在經過驗證下，這個設計方法有利於設計者對施工的材料成本控制與施工效率有更好的掌控度。

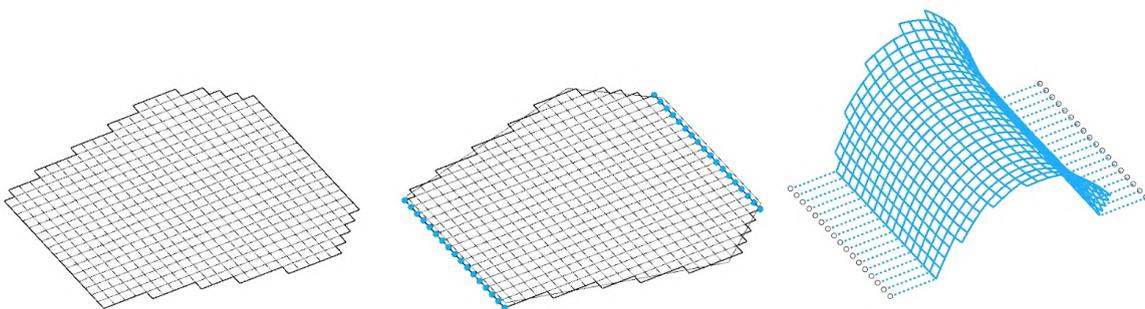


圖62：「攤平型態主導」的參數設計過程





另外，這個方法的成形後的幾何「近似」於可展曲面（Developable surface），具有彎曲後整體表面積「十分接近」攤平狀態的特性，但會因為網殼交叉點可以轉動的特性在局部因應剪力微調，於不同的曲率處產生網格面積微調，經實作結果與數位模擬的評估，適合應用於低材料扭轉量、且有明顯強弱邊分別的材料，例如本研究所用的剖竹材、木角材。

### 1-1-3. PROS/CONS 情境比較

彎曲型態主導	攤平型態主導
pros	pros
1. 最終型態明確，設計者對幾何掌控度佳。 2. 因為是應用曲面細分找到材料分布，所以設計發揮上可以應用更自由的型態。	1. 材料性能要求不高，且適合應用於低材料扭轉量、且有明顯強弱邊分別的材料。 2. 設計初始即可以有料控制材料量與材料分布，有利控制材料成本與施工效率。
cons	cons
1. 容易出現局部形變較大的狀況，對材料性能要求高。 2. 因為容許出現型態更加自由，所以在結構評估成本更高。	1. 因為需要透過物理引擎進行找形（Form-Finding），最終型態不明確，設計者無法直接掌握。 2. 型態自由不高。大多為單軸對稱、雙軸對稱，或是較接近基本原形，例如方形平面、三角形平面。

表3：彎曲型態與攤平型態之比較

### 1-2. 幾何資訊與格式轉換

本研究使用Rhino/Grasshopper的幾何建模軟體與參數設計環境來進行相關的研究與實作，故本節後續使用的名詞將會對應軟體內的名詞使用，與Rhino相關的功能、名詞對照可以參考Rhino使用者手冊與Rhino Common API網站說明；與Grasshopper相關的功能、指令集可以參考Grasshopper SDK網站說明。

為了使數位設計流程中的各階段都可以擷取用於評估或產生新的幾何的資訊，又或是產生用於下一個設計階段需要的資訊，在對彈性網殼構造做幾何合理化（geometry rationalization）的過程中，充滿各種幾何資訊之間的切換工作，以下分為三個小節敘述三個主要的轉換工作如何進行以及對應到彈性網殼設計流程的意義。





### 1-2-1. NURBS曲面轉換至Polyline系統

NURBS曲面透B-Spline在uv兩個方向的推廣產生對於曲面的精準描述，在Rhino系統中可以產生用於局部曲率評估的主曲率( $k_1, k_2$ )、高斯曲率( $k_1 \times k_2$ )、平均曲率( $(k_1 + k_2) / 2$ )，故對於曲面特徵的掌控度最佳。

彈性網殼在「彎曲型態主導」的設計流程中，初期即應用NURBS曲面捏塑型態至設計者新種滿意的造型，在RHINO環境中，設計者可以在笛卡爾坐標系中移動控制點，直接調整NURBS曲面的型態，設計者可以同時控制曲面連續性，使該曲面達到折面到不同Degree的曲面連續性變化。

NURBS曲面可以進一步取得UV Point，其同時兼具細分網格的交叉點、實際彈性殼中的材料交叉固定點位置、對照於NURBS曲面的法向量等資訊，有利於設計者產生精準的材料開孔位置、計算材料長度、生成交叉點的接頭幾何，設計者可以透過「曲面細分方法」（後續章節詳述）取得NURBS曲面上的UV Point，然後再透過UV Point進一步取得該點對應於曲面局部的各種曲率資訊。

UV Point 則可以進一步產生Polyline，應用於材料量評估、材料碰撞評估、與透過圖形化界面預覽掌握實際空間感，Polyline也可以搭配Rhino中的Sweep功能產生實體，應用於材積的計算，協助掌握整體靜載重，設計者透過賦予UV Point新的資料結構，使其在方向與順序上對應於實際材料方向，產生與實際尺寸相同的線段資訊。

### 1-2-2. 攤平Polyline轉換至彎曲的Mesh曲面

Polyline中包含點座標 (Point coordinates) 與其順序 (Point order) 的資訊，對於彈性網殼來說，有利於設計者掌握線性材料在線性上的開孔位置、三度空間中的放樣位置、最終彎曲成型後的定位，有助於掌握彈性網殼的「線」資訊。

Mesh曲面有助於設計者掌握彈性網殼的「面」資訊，在網殼設計過程中，網殼開孔大小、開孔於成形後產生的三維扭轉或局部變形是需要關切的議題，有助於取得斜撐長度、產生外包材料，進行各種相關評估。

Mesh曲面可以透過重新賦予Polyline點資訊新的資料結構產生，反之也可以解構出Mesh的點元素並且賦予新的資料結構使其攤平回Polyline，前述操作可行主要是因為Mesh曲面的元素與Polyline類似，同樣都包含點座標與其順序資訊，其差異僅在於描述的方式：針對Polyline為一維的線性資訊，針對Mesh則為二維的面資訊。

### 1-2-3. Mesh曲面轉換至近似NURBS曲面

Mesh曲面轉換至近似的NURBS曲面則有助於設計者在「攤平型態主導」的設計流程中，對材料狀態與整體型態做評估，因為Mesh系統雖然可以透過離散曲率取得局部的曲率近似值，但其本質上仍然是對於曲面的一種離散化的描述，在不同的解析度下





取得曲率的值並不如使用NUBRS進行評估穩定，透過這個轉換，協助設計者在取得NURBS曲面後，回到前述「1. NURBS曲面轉換至Polyline系統」的方法做評估。

Mesh曲面相對於NURBS曲面的優勢同樣也是基於「攤平型態主導」方法為前提，該方法應用的物理引擎找形主要使用粒子系統進行模擬，其系統使用的幾何元素本質上為點座標與賦予點座標的各種參數，例如速度、加速度、角速度、角加速度等，以Grasshopper環境中的物理引擎Kangaroo為例，其主要支援的找形幾何就是Mesh曲面，所以應用Mesh區面讓設計者可以享有設計流程的方便性與效率。

### 1-3. 曲面細分 (Surface Subdivision)

在彈性網殼的數位流程中，曲面細分主要應用於「彎曲型態主導」的設計流程，支援設計者將連續性的曲面資訊細分為離散的Mesh或是Point點資訊，以便執行各種進一步應用。

本研究應用到的曲面細分方法為「Compass Method」，翻譯為「圓規法」，主要因其細分原理可以直觀比喻為與手持原規在曲面上畫圓取得交點的過程，後續將以「圓規法」對應該方法做敘述。圓規法的分割演算法，在運算完畢後會得到稱為「Chebyshev Net」的網格，並研究應用Petras Vestartas等人開發的NGON插件完成此一演算法計算。

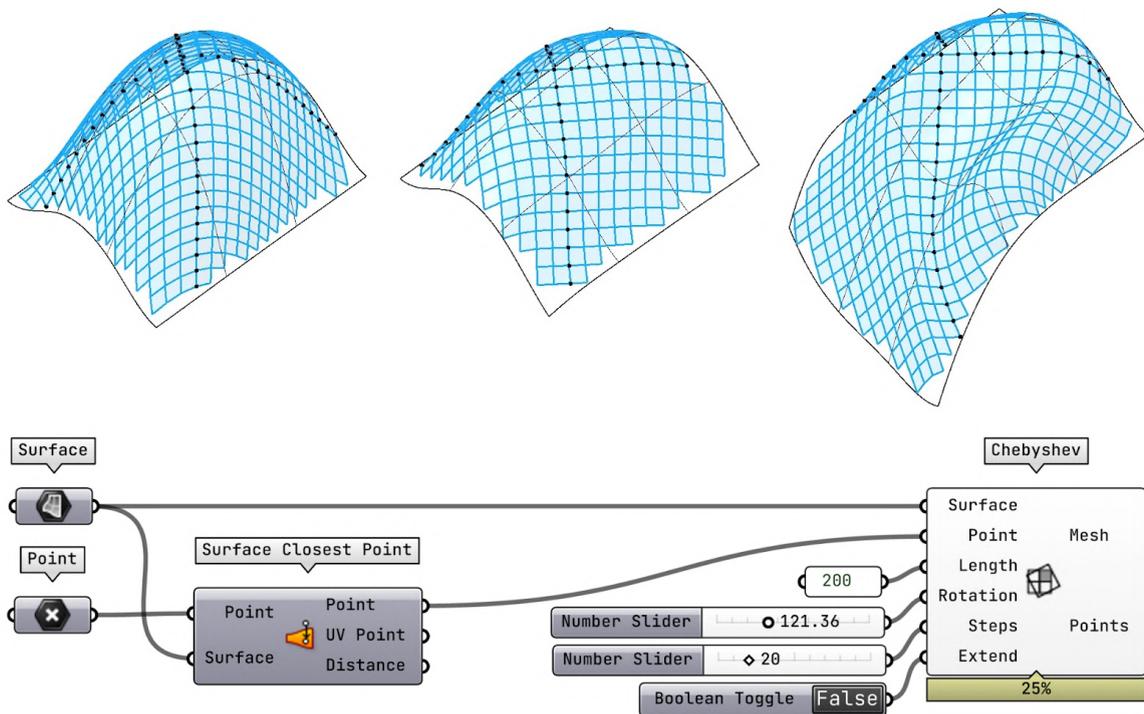


圖63：圓規法曲面分割





#### 1.4. 物理模擬 (Physics Engine) 找型 (Form-Finding)

物理引擎模擬主要透過在數位軟體中模擬實際粒子在空間中受力後產生位移的情形，企圖逼近現實狀況下彈性網殼由「攤平」至「彎曲」後的網格型態變化，本研究使用之幾何與參數化建模平台Rhino/Grasshopper內的建物理模擬外掛「\*Kangaroo2」能夠針對Mesh幾何、點幾何、複合線段幾何進行前述的物理模擬，並讓設計者搭配Rhino圖形化預覽介面直覺地操作編輯，對於彈性網殼的模擬來說，在幾何資訊於數位軟體上的應用十分直接且合適。

彈性網殼的物理模擬之幾何特性，主要在符合可展曲面變化的大方向上，在角度或是曲率變化幅度較大之處，局部產生網格的內角變形，使原先共面的四個網格端點產生非共面的位移，此舉將使彈性網殼在純可展曲面的變形機制下，額外獲得更多的幾何性能。

在參數定義上需要符合下幾點：

(1) 設計者需要將Mesh的Edge都定義為長度固定，以此模擬具相同高斯常數的類似可展曲面在不同的彎曲度下，都可以攤平回到相同的形狀，在彈性網殼構築的意義上也代表能夠達到攤平再吊裝彎曲成型的工法。

(2) 將兩個網格的「橫向與縱向材料」如現實中的排列順序一樣獨立出來，並且將其複合線段的子線段夾角定義為零，該設定將可使材料行為趨近於剖竹片材料特性，在數位環境中模擬彈性材料受外力產生形變後可再次恢復到形變前的狀態之性能。

(3) 定義地面的固定點 (anchor point)：此舉設定與現實狀況相同的地面基礎位置，也提供整體彎曲型變後，因為材料重量與竹材彈性恢復力，而產生再平行地面方向的水平推力。

(4) 定義均佈載重：透過進一步提取Mesh中的點Vertices之座標參數，計算材料重量得到靜載重值後，將其定義於數位模型上。此舉模擬實際竹材重量、五金重量、以及外覆材重量。

物理模擬找型可以提供設計者在參數設計環境中的「實際型態變化趨勢」，而緊接著對於精確結構與材料狀況的評估，將會於後續章節中獨立敘述。



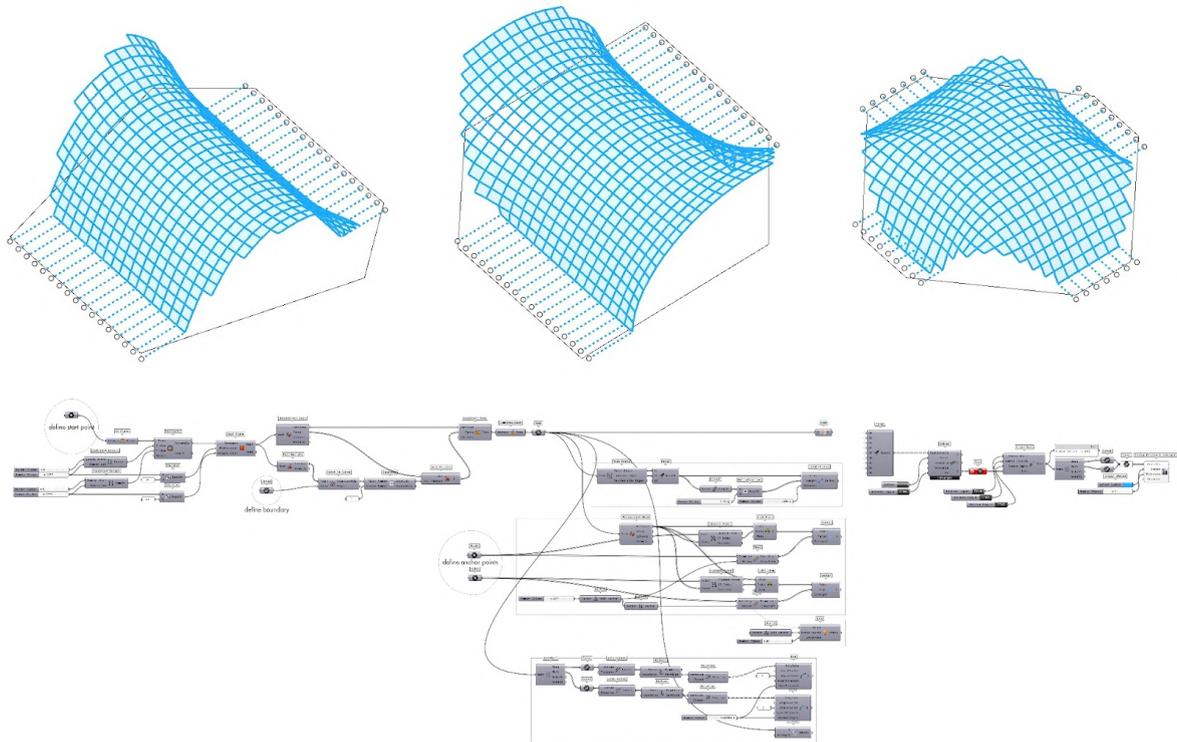


圖64：利用Kangaroo插件物理模擬找型

### 3. 小結

本章節設計了一系列之參數方法並同步以實體模型進行相關驗證，這些步驟將成為實現彈性網格細部設計解決方案的重要工具，未來的研究將著重此部分進行進一步的分析和強化，以提升彈性網殼設計的效能，其中應涵蓋結構力學分析、受力特性、承載分析、模擬評估和強化演算法等不同方面，使竹材於在彈性網格的細部設計中進行各層面的運算，例如確定連接方式、評估負載的影響等，並強化整體網殼結構設計。





### 三、階段實作

#### (一) 竹構通用接頭雛形製作

在基礎參數設計的章節中，有針對交疊接頭、續接接頭以及橫接接頭進行設計與研發，也對材料有了初步的測試，因此在此章節中，將進行階段性的實作與強度試驗，將取交疊接頭以及續接接頭作為實作與測試對象，分別展開金屬雷切、打樣製作、抗壓抗剪單元測試等內容。

#### 1. 交疊接頭

在交疊接頭的階段實作階段分為雛形製作與強度試驗，雛形製作的階段將嘗試各種可能性的單元實作，如增加咬合力的兩種鋼扣、增加摩擦力的橡膠及磨砂防滑膠帶、四種綁紮改良等；而在強度試驗中，則先進行了各式寬度、各式綁紮方式的抗剪試驗，以確保其設計是可達成構築的水平。

##### 1-1. 雛形製作

在進行交疊單元的實作時，首先製作了第一種回字繞法的形態，並延伸出X型繞法、回字加固繞法、X型加固繞法等四種綁紮方式，每種綁紮的方式也都各有其優缺，應針對不同的需求而選定適用的方案。



圖65：四種不鏽鋼束帶綁紮方式

類型	操作時間	操作簡易度	預估強度	標準化	消耗材料
回字繞法	短	簡單	中等	容易	少
X型繞法	中	中等	較高	較難	中等
回字加固繞法	短	簡單	較高	容易	中等
X型加固繞法	長	複雜	最高	較難	多

表4：不鏽鋼束帶綁紮類型比較

上表是經過實際操作經驗紀錄而來，其中，回字繞法及回字加固繞法是比较節省時間的，且形式簡潔俐落，消耗材料少，但強度中等；而X型繞法及X型加固繞法的操作時間較長，強度也較高，只是因為形式複雜則難以標準化，且耗材較多，成本也會隨之提高。



1123424



因此也可從表中資訊得知，每種綁紮方式各有優缺，應針對不同需求而選定適用的綁紮方法，例如需要追求效率，就可選用回字繞法；若希望可以有較高的固定性及強度，則可選用X型加固繞法。

而除了束帶綁紮方式的四種單元實作外，亦有針對咬合力的改良進行嘗試，除了原型鋼扣外，另外發展了L扣及牙扣兩種形式，然而，在製作交疊接頭的實作單元時發現，這兩種形式的扣件需要仰賴工具（老虎鉗、尖嘴鉗等）才能鎖固，所消耗的時間較原型鋼扣長很多，且其穩固性也並不比原型鋼扣來得高。



圖66：不鏽鋼束帶咬合改良-L扣



圖67：不鏽鋼束帶咬合改良-牙扣

此外，在束帶本身改良摩擦力的部分，亦有製作了增加橡膠及磨砂防滑膠帶的兩種交疊單元形式。而在初步的測試中，因為摩擦力的提升，強度是有比原本來得高，然而因為目前的接合形式都是手工上膠黏合，因此在將橡膠與磨砂防滑膠帶與金屬束帶接合的過程中，會有許多人工上的誤差以及時間上的消耗，且黏著的密合狀況也難以統一。

這樣的方式會導致耗時耗力且難以標準化，因此雖然初步判斷會有效提升束帶的摩擦力，進而提升其單元強度，但會需要進一步研究如何避免手工造成的差異性，進一步標準化，例如是否要與代工廠接洽與合作等。





圖68：不鏽鋼束帶摩擦力改良-橡膠



圖69：不鏽鋼束帶摩擦力改良-磨砂防滑膠帶

在經過一系列的交疊接頭雛形製作後，將會挑選其中幾種類型進行強度試驗：首先是針對各式綁紮方法的強度差異進行比較，分別根據回字繞法、X型繞法、回字加固繞法三種綁紮的交疊單元來製作實驗試體，對其進行抗剪強度試驗規劃，並根據其數據分析結果來進行後續的設計優化。

### 1-2. 強度試驗

而在進行改良後的束帶測試之前，首先需要確認要使用什麼規格的束帶，不鏽鋼束帶的厚度統一為0.2mm，寬度從4.6mm、7.9mm、10mm到12mm共四種規格，長度上不受限制，從20公分至100公分都有，所以重點會放在寬度上的差異性，為了測試寬度是否會造成強度上的影響，因此首先會進行不同寬度的抗剪強度試驗。



圖70：不同寬度之不鏽鋼束帶



1123424



而此次試驗的參考資料與對照組皆來自於杜怡萱教授於108年撰寫之《竹構接頭設計委託試驗期末報告》（以下稱成果報告）[24]，未來將以此份研究報告為基礎進行相關強度試驗，並將成果進行對比與分析，進一步修正與優化。

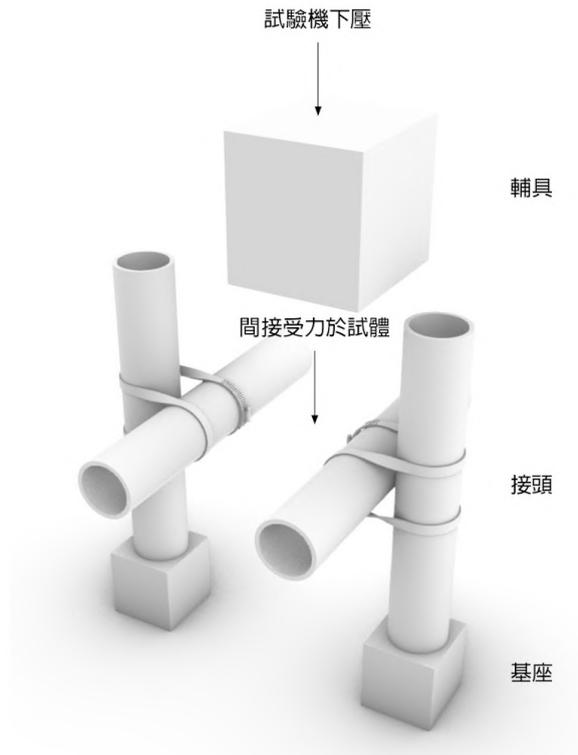


圖71：抗剪強度試驗示意圖

而為了執行本計畫之強度試驗，特別聘請了本校（國立陽明交通大學）土木工程學系的袁宇秉副教授作為計畫顧問，與袁教授進行合作，目的是在接頭的強度測試上能夠結合校內資源，從局部單元到整體結構、實驗設計到後續的試驗成果等，均會與一起進行研討，協力產出相關學術與研究成果。

在合作的模式上，由我方（國立陽明交通大學建築研究所）進行接頭設計與試體製作，並委託土木系袁教授進行試驗，產出內容包含輔具製作、實驗進行及成果數據，生成的結果將與杜怡萱教授之成果報告進行交叉對比，不足之處再回頭進行設計優化，並持續進行相關試驗，是一個來回反覆測試的過程。



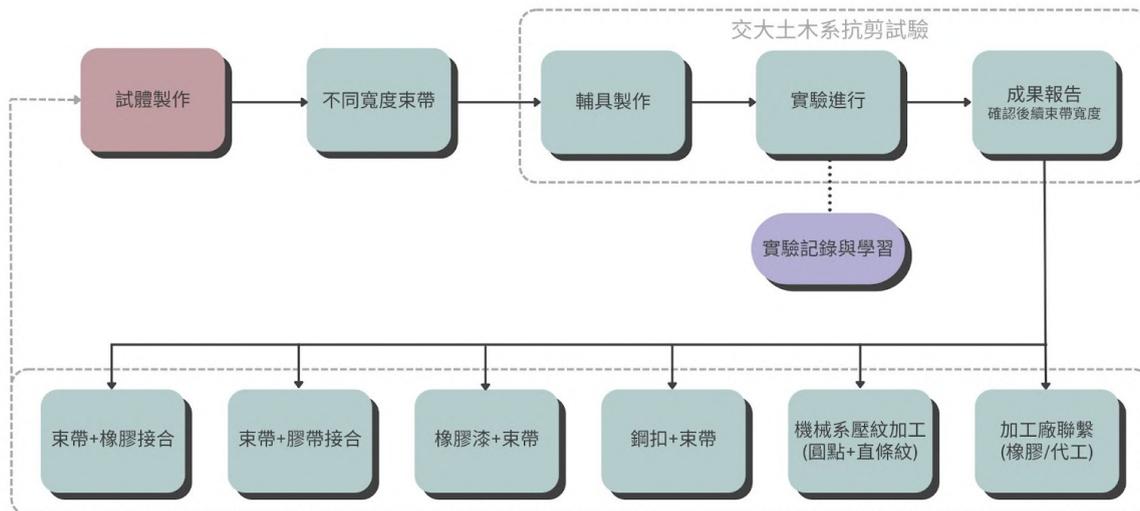


圖72：試驗流程-校內資源整合

第一次的試體準備，主要是要確認束帶寬度是否會有剪力強度上的不同，並決定後續的束帶改良要使用何種寬度規格，因此除了寬度不同外，其餘的綁紮方式、咬合力及摩擦力都維持原本金屬束帶的初始樣態。

而在製作試體的過程中，材料使用直徑在40-60mm粗的桂竹，每組試體由兩根十字交疊的竹子構成，交疊處則由不同寬度之不鏽鋼束帶綁製而成，並且使用了金屬束帶束緊使用之專門工具，再依照四種寬度（4.6mm/7.9mm/10mm/12mm）製作八組試體（每次測試需兩組試體成對放置進行），分別命名為A-4.6、A-7.9、A-10、A-12。

試體命名	A-4.6	A-7.9	A-10	A-12
A. 金屬束帶寬度	4.6(mm)	7.9(mm)	10(mm)	12(mm)
B. 綁紮法	回字繞法	回字繞法	回字繞法	回字繞法
C. 鋼扣（咬合力）	原型	原型	原型	原型
D. 附加物（摩擦力）	無	無	無	無

表5：交疊接頭抗剪試驗之試體命名1



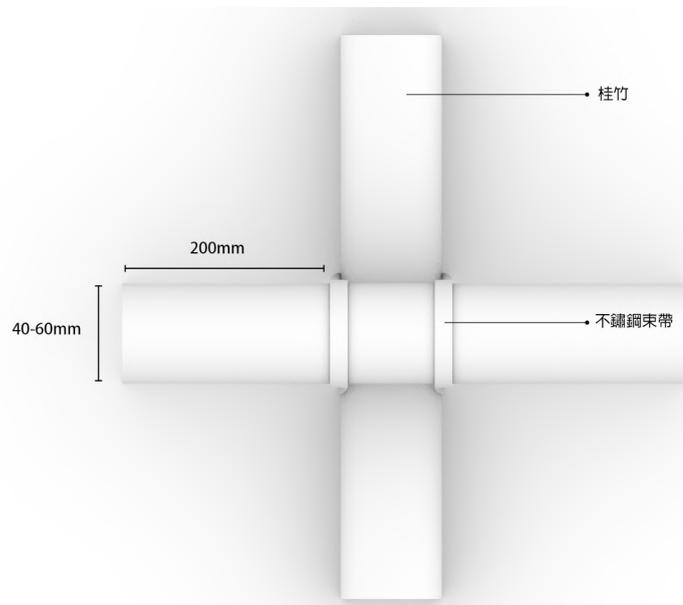


圖73：A束帶接頭抗剪試體設計圖



圖74：A束帶接頭試體製作過程紀錄

每組試體底部灌製了樹脂作為基座，防止下壓過程中滑動，此外，根據力學判斷，為使下壓時能夠平均受力，因此必須製作試驗輔具，材料選擇上使用了木料與鐵件製作，木料主要用於與試體（竹子）之間的支撐與平衡，鐵件用於試驗機圓盤加載受力的接觸面，不易因下壓而變形。



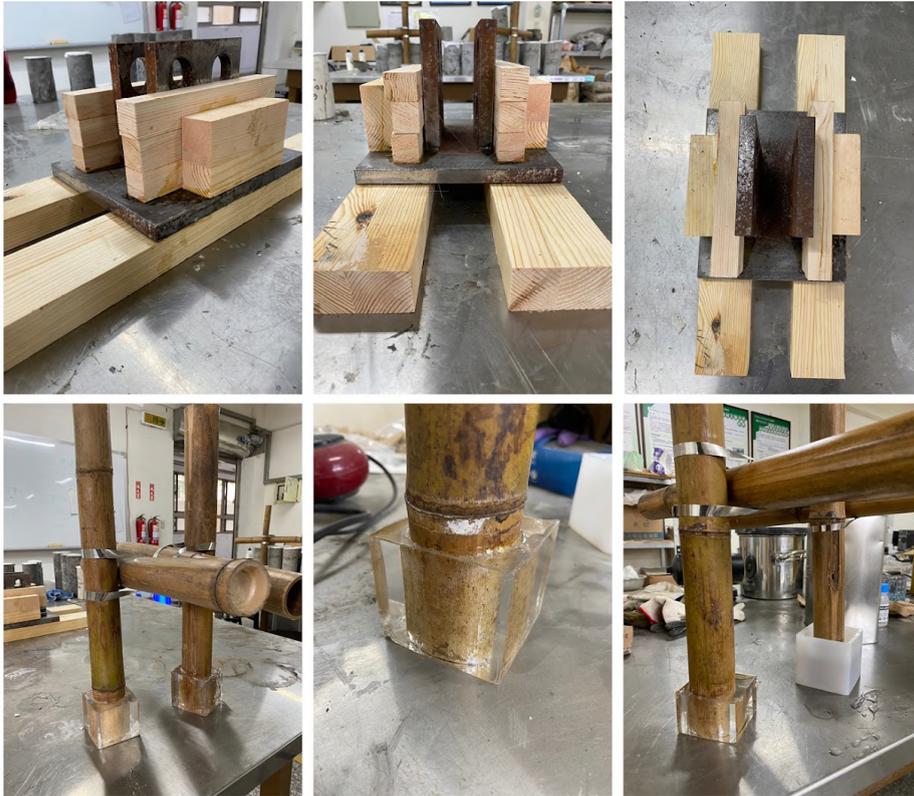


圖75：抗剪試驗輔具製作

試驗的方式參考杜怡萱教授之成果報告，以100噸萬能試驗機進行軸向加載，加載速率為0.5mm/sec，兩組試體成對放置，輔具置於兩組試體上面，持續於輔具上載重施加，間接受力於試體，直到試體明顯破壞或位移達到100mm時即停止試驗，整個試驗過程均有攝影即拍照記錄其破壞和位移情形，並以程式紀錄軸向變形及測力計讀數。



圖76：A束帶接頭試驗現場紀錄





在第一次進行試驗的過程中，四組試體均出現一樣的問題：在尚未有破壞狀況，位移程度也未達100mm時，試體就會有轉動、滑脫的情形，導致試驗機自動停止，但在機器停止之前，可測達的最大承受公斤數已有174.5kg（包含試驗機129.5kg加上輔具45.5kg重量），對比杜怡萱教授之成果報告中的數據之下，可看出尚未增加咬合力與摩擦力之金屬束帶強度應就已經與尼龍繩不相上下，是值得繼續實驗的接頭材料。

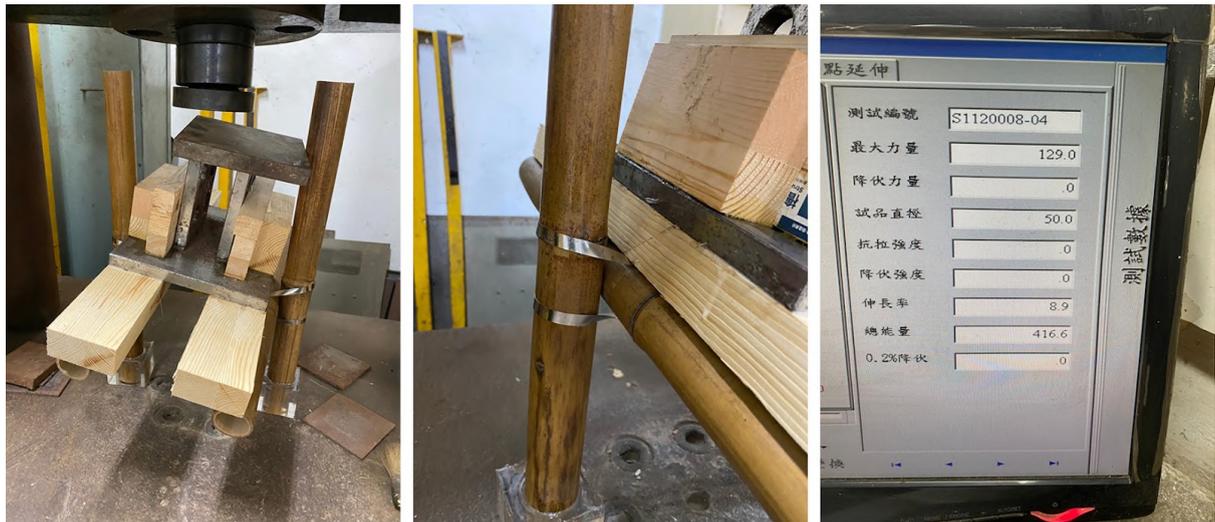


圖77：A束帶接頭試驗破壞情形

為了能夠優化抗剪試驗，因此經過討論後將試體設計進行變更，單個試體由兩根竹子構成的十字交疊，改成垂直向度上再加入一根竹子，共三根竹子組成一組試體，以增加其穩定性。試驗方式一樣使用兩組試體（共六支竹子）成對放置，並於輔具上施壓直到破壞或者位移達100mm，其測試結果會再回算單個十字節點所承受之剪力，以確保不影響其數據正確性。

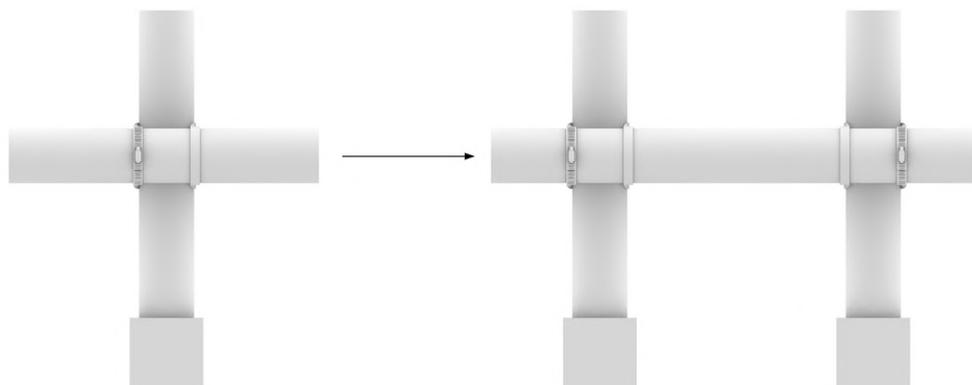


圖78：抗剪試體設計變更1





圖79：抗剪新試體製作

在與袁宇秉教授進行過相關會議討論後，後續製作了A-4.6、A-7.9及A-12之優化後試體並再次進行試驗，此次試驗過程中，已有明顯改善之前的滑脫問題，但在位移達到2至4公分不等時，仍舊會有些許轉動問題，因為兩邊水平狀態不同而導致機器自動停止，因此仍達不到位移10公分停止試驗的標準，後續應可以在針對試體的穩定性進行加固優化。然而，此次試驗的穩定性以比上一次精進許多，因此已經可以針對試驗數據進行相關分析。

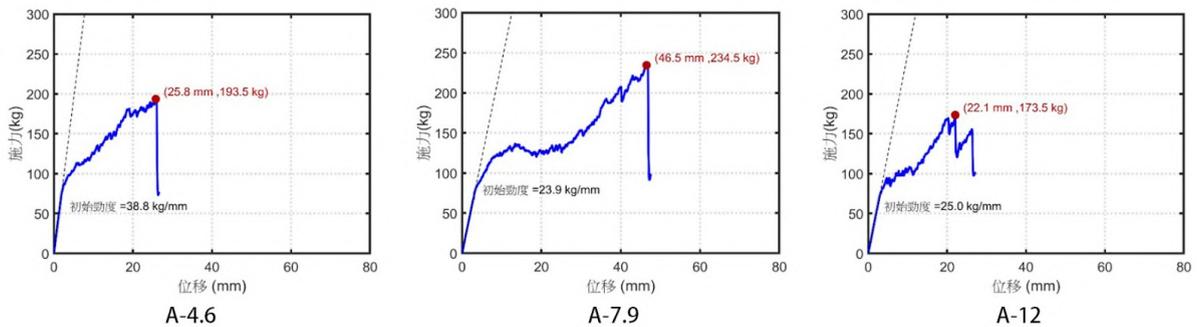


圖80：A束帶接頭抗剪試驗位移關係圖

上圖顯示了三個試體的總載荷 ( $F_t$ )-位移曲線 ( $\Delta$ )，所測量的載荷是萬能材料試驗機對整個試體施加的總載荷，每個接頭可承受的平均力量為  $F_j$ ，並套用以下公式得出數據： $F_j = F_t/4$ ，此外，初始勁度  $k(s, t)$  的計算則是經過對初始線性區域進行線性回歸分析獲得，在該線性區域內，力量與位移呈線性比例關係： $F_t = k(s, t)\Delta$ 。

由於改良後的試體是由四個接頭平均受力，因此經由以上幾個公式套用，可回算出每個接頭的平均勁度如下： $k_s = k(s, t)/4$ ，亦可總結出三個試體進行載荷測試時所獲得的平均最大力量和平均初始接頭勁度。





試體	平均接頭最大受力(kg)	平均接頭勁度(kg/mm)
A-4.6	48.38	9.70
A-7.9	58.63	8.17
A-12	43.38	6.25

表6：A束帶接頭抗剪試驗數據

根據試驗的位移關係圖、公式計算及成果數據分析後，可進一步討論三個試體的破壞模式和其他行為：三個試體在承受最大力量後失效時的變形情況不一，A-4.6之變形情況主要是部分的節點滑移；A-7.9則是兩側平均滑移；A-12亦是集中滑移於部分節點。由數據可得知，A-12的強度和勁度是最低的，其原因可能與其彈性、咬合力以及可接觸面積有關，而A-4.6及A-7.9的狀況則較為特殊，A-4.6的初始勁度最高，但A-7.9卻擁有最大承载力，研判應與外在因素「竹節」有密切關聯。

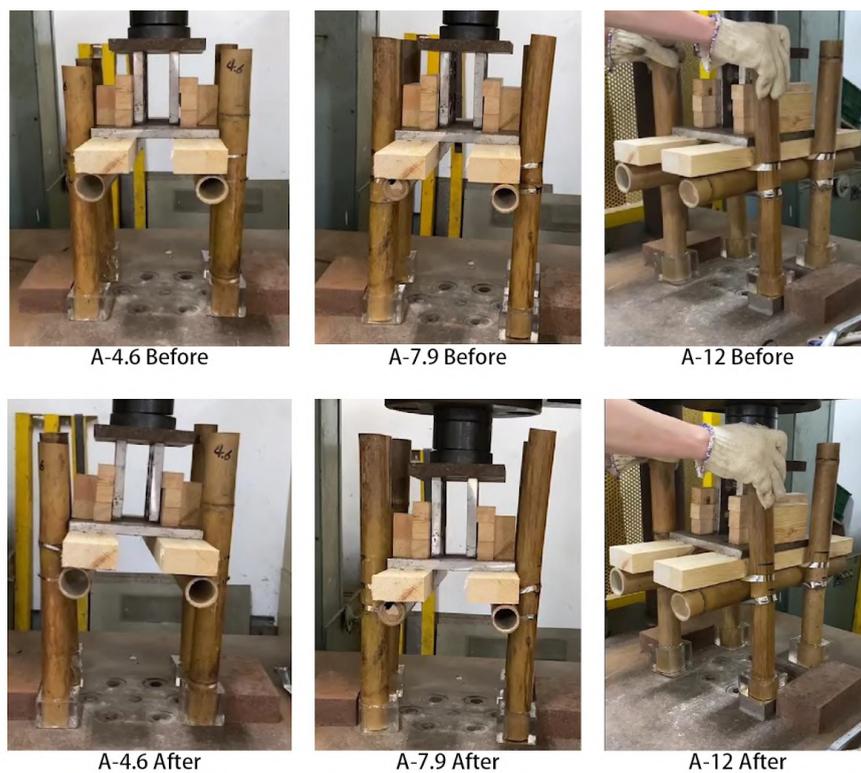


圖81：A束帶接頭抗剪試驗破壞變形情況





觀察試體的破壞情況與實際數據後發現，A-7.9試體在製作時碰巧兩根竹子在交疊處都有竹節，也因此增強了金屬束帶的強度，且能夠在試驗機下壓時保持水平向下位移，有效增加其最大承載能力；相對的，A-4.6僅有單邊竹子擁有竹節，因此才會造成逐漸向右端傾斜並使試驗機停止下壓的情況產生，因此儘管A-4.6的初始勁度最高，卻無法擁有最大承載力。

試體	位移(mm)	最大承載力(kg)
A-4.6	25.8	193.5
A-7.9	46.5	234.5
A-12	22.1	173.5

表7：A束帶接頭抗剪試驗位移與承載力關係圖

綜觀以上試驗成果與數據分析，可以初步判定金屬束帶寬度與試體勁度成反比，束帶寬度越小者，初始勁度（欲位移1mm所需之力量）越大，因此強度也相對越高，且加入竹節一起探討可得知，勁度不受竹節所影響，勁度越低也並不代表其所能承受之力量越小，如A-4.6及A7.9兩組對照，前者勁度較後者高，但後者最終之最大力量較前者為高，由此可得知，擁有竹節與否，於試體製作及真實情況的構造體下，都對其強度有一定的影響力。

根據試驗結果，後續將會有兩個方向的修正與精進：其一，針對試體的優化方案，因為竹節帶來的變因太多，會影響到整個試驗的成果，但竹節本身是一個較難受到控制的自然參數（例如其每個竹節的強度、位置都不同），滑移也不一定發生在竹節位置（例如地震期間的循環載荷情況），因此竹節的存在可能會使試驗數據產生難以量化或者誤判的情況，因此後續應會使用沒有竹節的部分來製作新試體；其二，根據試驗結果，越細的金屬束帶其初始勁度越高，因此後續應該會使用較細的束帶來進行咬合力及摩擦力的改良，但另一方面，較寬的束帶可能於改良後能有較佳的表現力，因此也不排除進一步嘗試新的可能性。

依據上段的結論，在接下來的試體製作過程中，都會特意挑選沒有竹節的部位，以避免竹節帶來的強度影響；且沒有竹節的試體所計算出的數據，可以說是一個最低標準，若是將來應用於竹構造上時，有些交疊處碰到有竹節的狀況下強度就會更高。

因此，在這樣的前提之下，使用了最細的不鏽鋼束帶（4.6mm）加上原型鋼扣的組合來測試三種綁紮方式（回字繞法、X型繞法、回字加固繞法）的強度影響，分別命名為B-1、B-2、B-3，並選用沒有竹節的竹段來製作試體。





試體命名	B-1	B-2	B-3
A. 金屬束帶寬度	4.6(mm)	4.6(mm)	4.6(mm)
B. 綁紮法	回字繞法	X型繞法	回字加固繞法
C. 鋼扣 (咬合力)	原型	原型	原型
D. 附加物 (摩擦力)	無	無	無

表8：交疊接頭抗剪試驗之試體命名2

本次試驗一樣使用萬能試驗機 (universal testing machine 或UTM) 進行載重測試，載重速率保持在每分鐘30毫米。試體於上次試驗後進行了二次優化，同樣為四足設計，但水平向度上在外側新增了兩根竹桿件，加強其平衡及穩定性，每組試體由4根直徑40-60mm的竹桿件製成，透過上述金屬束帶進行各式綁紮後相互交疊並固定，並成對放置形成四個接頭，再經過回算以測得抗剪最低強度及勁度。

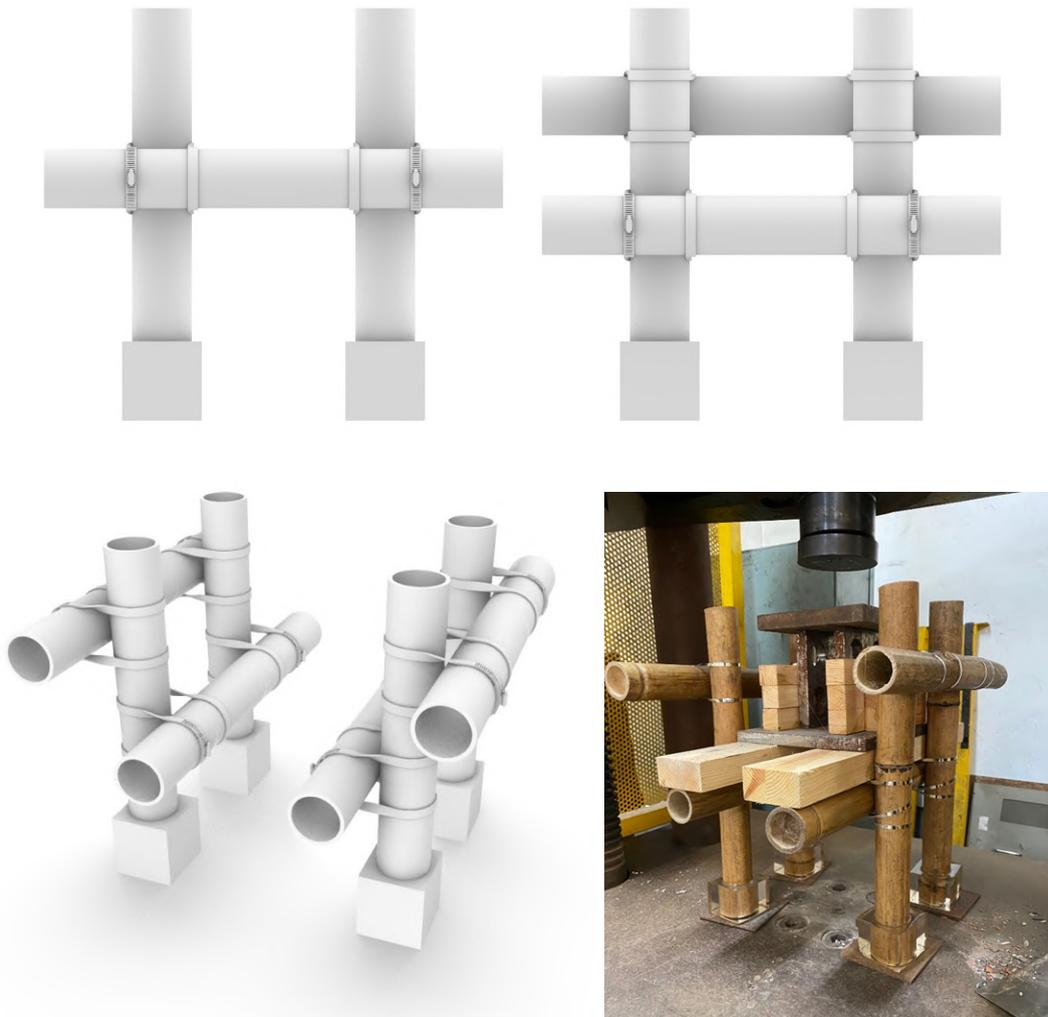


圖82：抗剪試體設計變更2





圖83：B-1束帶接頭抗剪試驗



圖84：B-2束帶接頭抗剪試驗

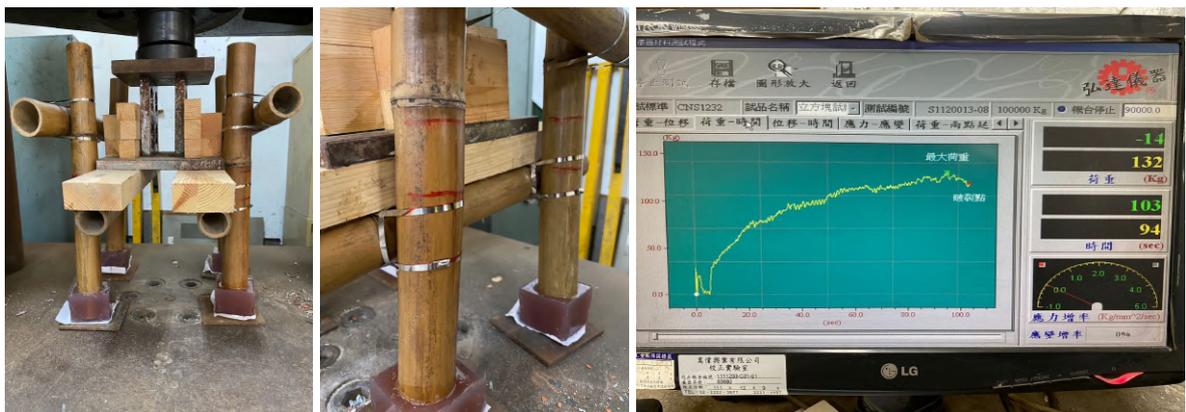


圖85：B-3束帶接頭抗剪試驗

由現場紀錄可得知，在刻意挑選沒有竹節的竹桿的情況下，僅只用回字繞法的B-1狀況不甚理想，最大力量甚至無法達到100kg，而B-2及B-3相對優異且穩定，因此在後續的數據分析中，主要以B-2及B-3為主。





試體	位移(mm)	最大承載力(kg)
B-1	20	<100
B-2	20	152
B-3	50	132

表9：B束帶接頭抗剪試驗位移與承載力關係圖

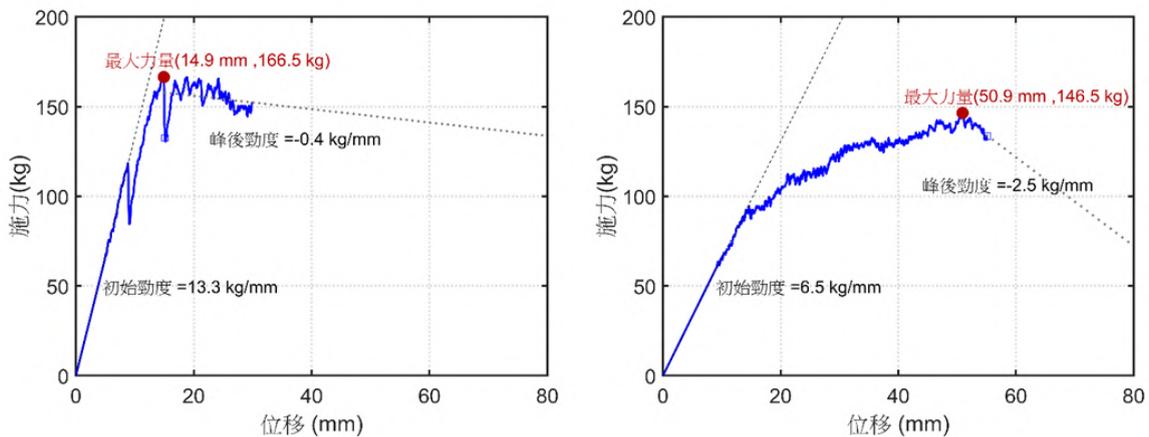


圖86：B束帶接頭抗剪試驗位移關係圖（左：B-1，右：B-2）

上圖顯示了試體的總載荷 ( $F_t$ ) - 位移曲線 ( $\Delta$ )，所測量的載荷是萬能材料試驗機對整個試體施加的總載荷，每個接頭可承受的平均力量為  $F_j$ ，並套用以下公式得出數據： $F_j = F_t/4$ ，此外，初始勁度  $k(s, t)$  的計算則是經過對初始線性區域進行線性回歸分析獲得，在該線性區域內，力量與位移呈線性比例關係： $F_t = k(s, t)\Delta$ 。

而經過改良後的試體是由四個接頭平均受力，因此經由以上幾個公式套用，可回算出每個接頭的平均勁度如下： $k_s = k(s, t)/4$ ，亦可總結出試體進行載荷測試時所獲得的平均最大力量和平均初始接頭勁度。

試體	平均接頭最大受力(kg)	平均接頭勁度(kg/mm)
B-2	41.63	3.33
B-3	36.63	1.63

表10：B束帶接頭抗剪試驗數據





根據試驗結果，試體B-2的抗剪強度以及初始勁皆為兩試體中最高者，且與B-1的數據結果比較，最大強度以及勁度皆有改善，因此可推斷此綁紮方式可以增加接頭抗剪能力；然而，B-2試體韌性較差，試驗開始後下壓未達20mm實驗即結束，判斷有可能因綁紮方式較複雜，難以標準化而造成兩邊受力不平衡，導致最後因竹桿傾斜而使機器停止試驗。

而B-3比起B-1在強度上有所增加，但強度上比起B-2略遜一籌。然而，雖然B-3試體強度及勁度沒有B-2來得優異，但其韌性相對較高，整體試驗結果下向位移約50mm才停止，下壓過程相當穩定，若以韌性及穩定度作為考量，則可以使用B-3的綁紮方式。

試體	竹節	平均接頭最大受力(kg)	平均接頭勁度(kg/mm)
A-4.6	有	48.38	9.70
A-7.9	有	58.63	8.17
A-12	有	43.38	6.25
B-2	無	41.63	3.33
B-3	無	36.63	1.63

表11：A、B束帶接頭抗剪試驗數據比較

而根據前次試驗的結果比較，可以得知A跟B兩種試體會因為材料本身的差異（是否有竹節）而在數據上有明顯的不同：A組的三組試體因為都涵蓋竹節，因此最大受力及勁度都相對較高；B組在試體製作上刻意挑選沒有竹節的部位，因此整體強度就會有所下降。然而B-2及B-3試體因為綁紮方式的改良，因此在最大受力的部分還是有著一定的水準，因此可以推斷，若以改良後的綁紮方式使用於竹構造上，則碰到有竹節的部位會有更優異的表現。

因此，可以繼續朝改良綁紮方式的方向來進行研究，但依舊需要解人工綁紮時的個別差異性，進而產生強度上的不平均等問題，越複雜的綁紮方式，強度相對會提高，但越會產生難以標準化的困難；此外，咬合力及摩擦力改良等方式，亦可以朝對外合作的方式持續推進。





## 2. 續接接頭

在階段實作的過程中，續接接頭與陳建同設計師合作，分為雛型製作及強度試驗兩個部分做嘗試：雛形製作的階段，除了基本的材料測試外，亦與外部廠商合作進行金屬雷切，用以測試不同零件參數的可能性；強度測試部分，則規劃了三種類型的試體進行抗壓試驗，實驗接頭零件的設計強度是否達標。

### 2-1. 雛形製作

如基礎參數設計章節中的內容，續接接頭是設計一個類似於膨脹螺絲的零件，雷切後彎折並套在牙條上，透過上下兩個螺帽向內擠壓，使零件逐漸膨脹並撐開在竹子內部，以達成固定中心桿件（牙條），並連接兩端竹子的效果。

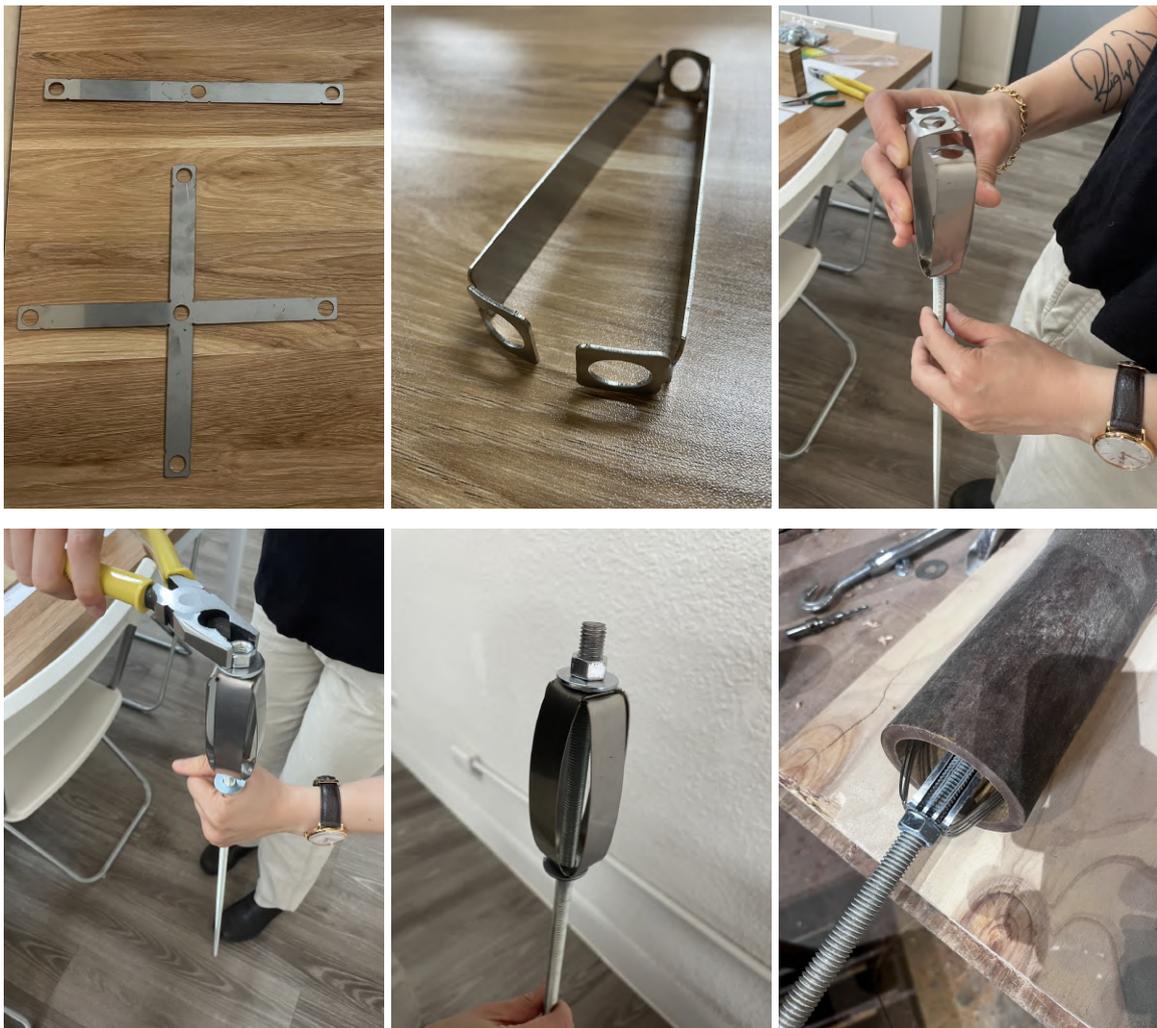


圖87：續接接頭零件設計組裝步驟

而在一開始的材料測試中，使用了1.2mm的鋼板進行雷切並徒手彎折，初步判斷其設計可行性，後續則開始延伸研究各種版本的差異性，例如：設計型態、加工方式、設計與材料參數……等內容，並與外部工廠合作，進行各式雷切與加工實作，以評估後續的試驗規劃。



1123424



### 2-1-1. 設計型態

起初在設計型態時是以一字型作為最原始的版本，兩個一字型的零件經過彎折之後轉90度放置成十字的樣態進行鎖固，操作性上很簡便，只是零件會被拆分為兩個；因此後續也有思考是否能直接將零件設計為十字型，這樣就只有單一零件的彎折，只是在實際操作的過程中發現相較一字型而言，十字型彎折不易，且穿過牙條時也需要花費更多的時間。

此外，也針對是否要於鋼板上分割進行探討，分別在一字型及十字型上都有做過測試。實驗後發現，若有分割線的話，整體材料會變得較為柔軟，也因此在工作上變得較為輕鬆，只是經過切割後，相對強度就會有所下降，因此若要進行分割，也需要經過整體結構的評估。

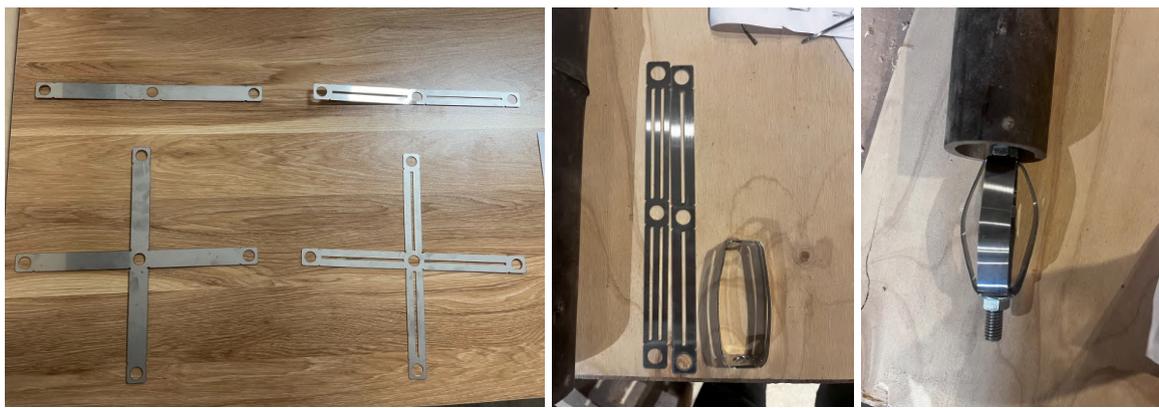


圖88：續接接頭零件設計（一字型、十字型、分割線）

設計型態	優點	缺點
一字	容易操作	零件較多
十字	單一零件	較難操作
分割線	柔軟易操作	強度降低

表12：設計型態差異比較

### 2-1-2. 加工方式

在加工的層面，首先不可取代的是雷射切割，因為台灣中小型企業的蓬勃發展，因此在金屬加工上有著多樣性的選擇，在經過與加工廠的討論後，討論出兩種零件做法：首先是單純平面雷切，在需要彎折的地方加上小凹槽，雷切的成品再經由手工彎折，這個做法是在加工端最省時、成本又低的方式，只是因為需要人工彎折，因此需要耗費較多時間；另一種方式則是平面鋼板雷切完成後，直接在工廠以V-Cut刨溝進行二次加工，收到的成品就已經是經過機器彎折完畢的零件，可以直接套上牙條使用，這樣的加工方式對施工層面而言相當省時省力，只是成本會有所提升，因此也是需要考量到施工單位的經費以及時間成本等顧慮。





圖89：續接接頭零件加工（徒手彎折、V-Cut刨溝）

加工方式	優點	缺點
雷切+徒手彎折	成本低	耗時長
雷切+V-Cut刨溝	操作時間減少	成本較高

表13：加工方式差異比較

### 2-1-3. 設計與材料參數

在參數改變的研究上，主要會針對不同的竹種以及對應不同強度而調整，例如桂竹及孟宗竹兩種竹種的直徑差異較大，因此零件在長度上就可以有所調整，以改變其膨脹後的大小，較長的零件膨脹後較大，可適用於孟宗竹；較短的零件膨脹後較小，適用於桂竹。





此外，材料本身的厚度以及寬度都與其零件組裝後的強度有關連性，越厚/越寬的鋼板強度越高，但彎折起來越困難，且在塞進竹子內部後，越可能造成竹子有劈裂的狀況，這些情況同樣應該要依據不同的構築而調整。

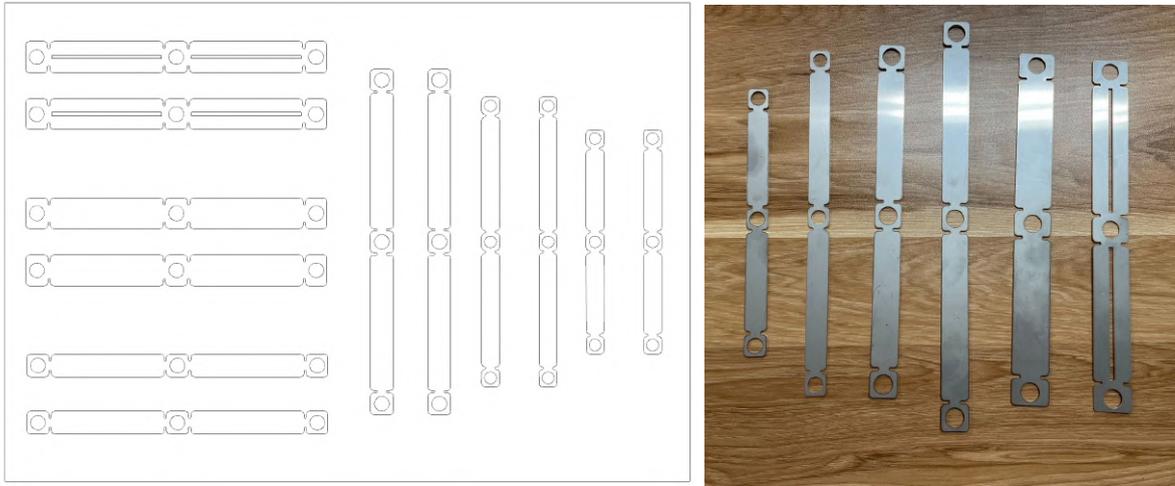


圖90：續接接頭零件參數改變（長、寬、厚）

設計與材料參數	優點	缺點
材料厚度	越厚強度越高	越厚成本越高 造成竹劈裂
零件寬度	越寬強度越高	越寬成本越高 造成竹劈裂
零件長度	影響膨脹後大小 可對應不同直徑的竹種	成本不一

表14：設計與設計參數差異比較

以上的雛形實作涵蓋了設計型態、加工方式及參數改變，牽涉到不同的操作方式以及結構強度，可以依據不同使用者的需求而有無數種版本搭配，當然，會希望以最少的規格去符合大部分的竹材直徑，以達到標準化、通用性高的目的，不過這些構想會需要進一步的實證，因此接下來也會進入到強度試驗的階段，以驗證設計的可行性，與加以優化改良。

設計型態	加工方式	設計與材料參數
一字型	雷切+徒手彎折	材料厚度
十字型		零件寬度
分割線	雷切+V-Cut刨溝	零件長度

表15：續接金屬零件各式版本類型





## 2-2. 強度試驗

在與陳建同設計師以及陽明交大土木系袁教授經過幾次會議討論後，規劃了三種試體來進行續接接頭的抗壓試驗，分別是六角轉接頭、膨脹零件、膨脹零件加工程膠的三種版本，其中，六角轉接頭是現行普遍用於竹材續接時的作法，主要使用牙條加上六角轉接零件的方式連接兩根竹子，不另外加入其他構件，此方法快速簡潔，但容易有晃動產生，是作為本次試驗的對照組；而膨脹零件的部分則是加入了一字型的金屬零件，以雷切加上徒手彎折加工製成，也是乾式且快速的工法；膨脹零件加工程膠的版本則是在前述版本的基礎下，另外在竹子內部增加填充物，步驟會較為繁複，但推斷可使整體強度提升。

因此，在續接接頭首次的強度測試中，主要規劃以這三種版本進行試體製作，每種版本各製作三組試體，取其平均值，因此共計九組試體測試抗壓強度，同時，根據不同的特性及設計方式命名如下，並繪製了三種試體設計的剖面圖，以利設計與構造上的閱讀和理解。

試體命名		A	B	C
內部零件		牙條+六角轉接頭	牙條+六角轉接頭 +膨脹零件	牙條+六角轉接頭 +膨脹零件
膨脹零件	設計型態	X	一字型	一字型
	加工方式		雷切+徒手彎折	雷切+徒手彎折
	設計與材料參數		厚度:1mm 寬度:20mm 長度:250mm	厚度:1mm 寬度:20mm 長度:250mm
填充物		無	無	工程膠

表16：續接接頭抗壓試驗命名

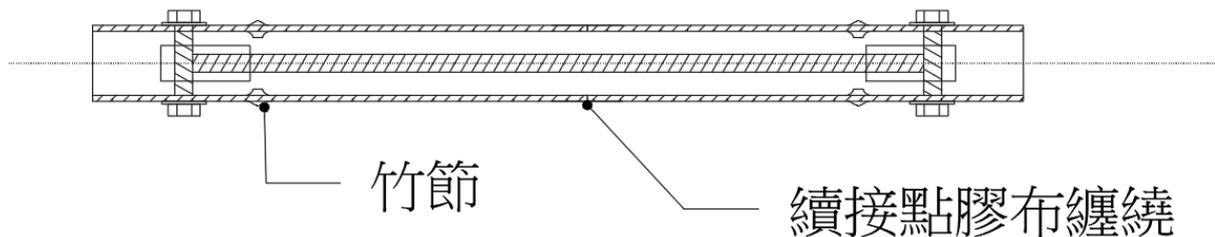


圖91：A續接接頭試體設計剖面圖



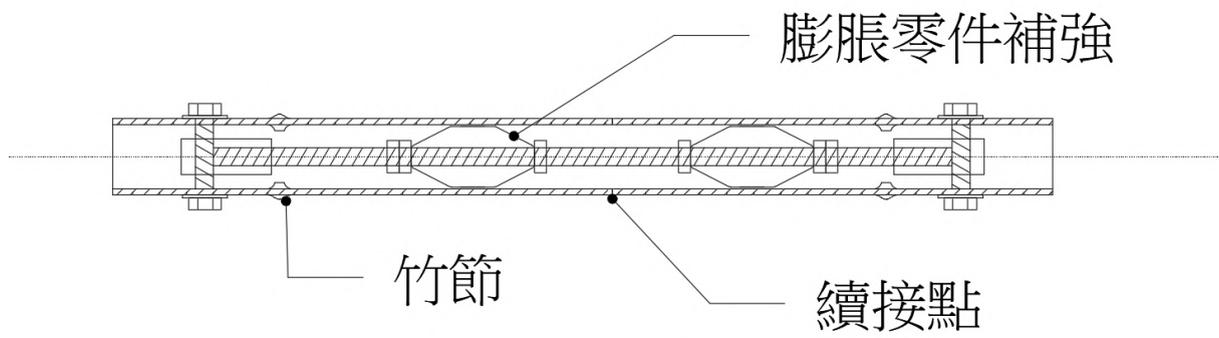


圖92：B續接接頭試體設計剖面圖

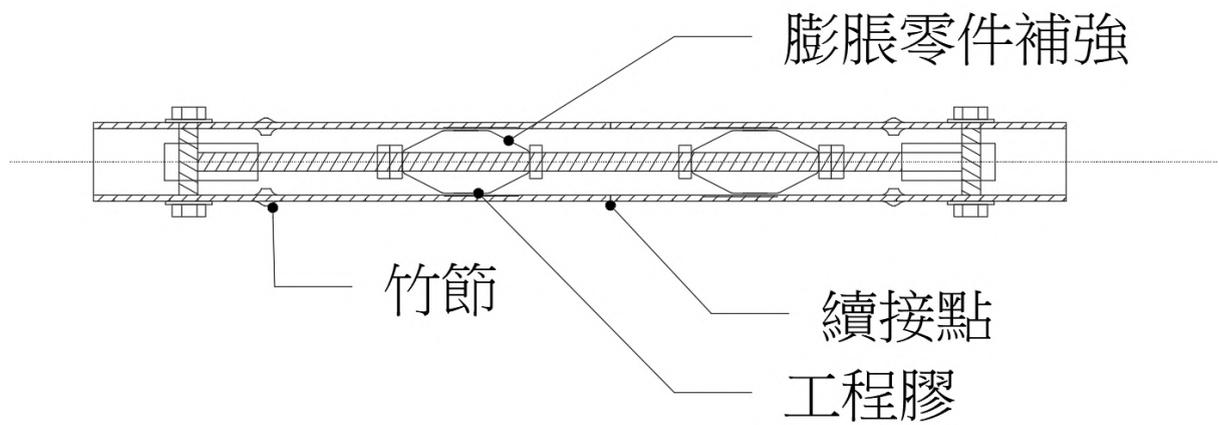


圖93：C續接接頭試體設計剖面圖



圖94：續接接頭試體外觀及試驗示意圖





在試驗的規劃上，同樣使用萬能試驗機（universal testing machine 或UTM）進行竹材續接之抗壓試驗，對試體進行軸向抗壓，以2mm/min之定位移進行，以此方式研究續接接頭A、B、C三種續接方式對竹材的抗壓強度及力學行為有無影響，並根據數據探討分析各試體及其對應的最大強度以及勁度為何。



圖95：A續接接頭抗壓試驗

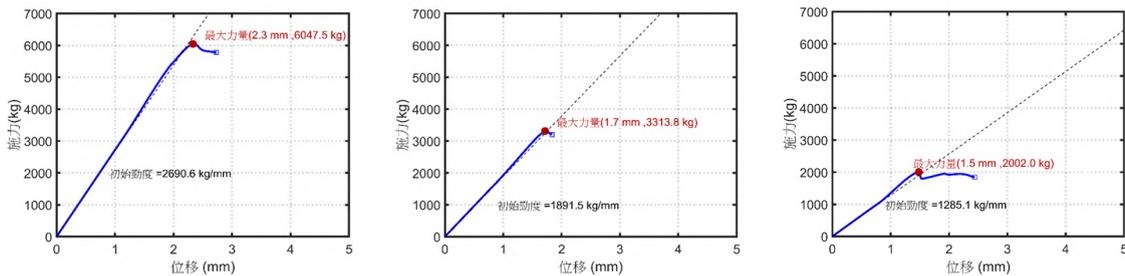


圖96：A續接接頭抗壓試驗位移關係圖（左：A-1，中：A-2，右：A-3）

試體	初始勁度 (kg/mm)	最大力量 (kg)	平均最大力量 (kg)	最大力量之位移 (mm)	平均最大力量之位移(mm)
A-1	2690.6	6047.5	3787.77	2.3	1.83
A-2	1894.5	3313.8		1.7	
A-3	1285.1	2002		1.5	

表17：A續接接頭抗壓數據

在進行A試體的抗壓試驗時，因內部沒有膨脹零件的固定輔助，兩根竹子之間會有錯位的狀況發生，導致試驗機無法順利下壓，因此在續接點另外貼上防水布膠帶進行固定，以免在進行抗壓實驗時產生滑動導致實驗中止或失敗。





在試驗的過程中，發現三個試體的實驗數據結果相差甚大，推斷因少了膨脹零件的加強，使其無法達到良好的固定狀態，導致試體於抗壓試驗過程無法保持平衡平穩，使實驗數據有較大的差距，且試體在最後也出現了嚴重的破壞與劈裂，相較其他兩者試體強度皆弱上許多。



圖97：B續接接頭抗壓試驗

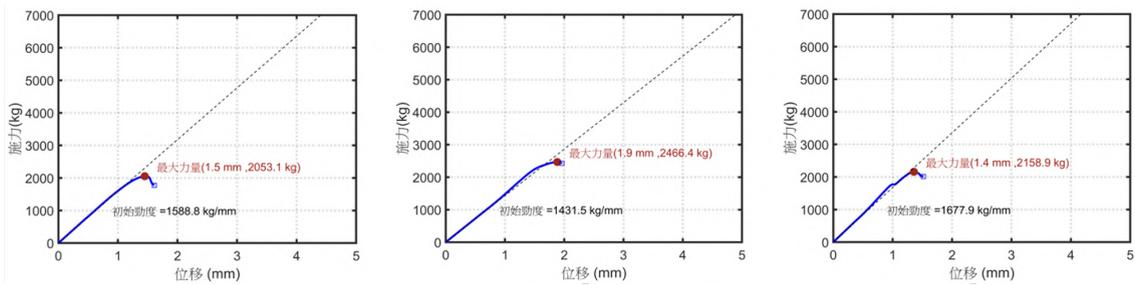


圖98：B續接接頭抗壓試驗位移關係圖（左：B-1，中：B-2，右：B-3）

試體	初始勁度 (kg/mm)	最大力量 (kg)	平均最大力量 (kg)	最大力量之位移 (mm)	平均最大力量之位移 (mm)
B-1	1588.8	2053.1	2226.13	1.5	1.60
B-2	1431.5	2466.4		1.9	
B-3	1677.9	2158.9		1.4	

表18：B續接接頭抗壓數據





由圖表以及數據可以看出，B試體的三個試體勁度表現相當一致，到破壞前的斜率成接近直線之情形，三者受力狀況表現優良，破壞後的試體只有1號及2號有一道開裂，其餘部位都相當完整，因此在強度以及勁度的表現上，B試體的試驗結果相當平均且有一定水準。



圖99：C續接接頭抗壓試驗

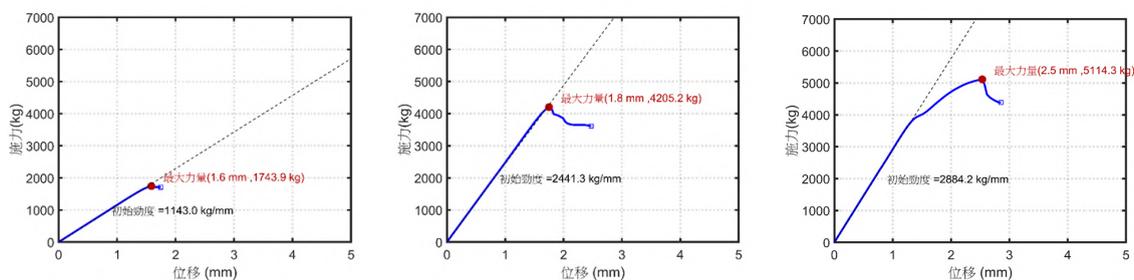


圖100：C續接接頭抗壓試驗位移關係圖（左：C-1，中：C-2，右：C-3）

試體	初始勁度 (kg/mm)	最大力量 (kg)	平均最大力量 (kg)	最大力量之位移 (mm)	平均最大力量之位移 (mm)
C-1	1143	1743.9	3687.80	1.6	1.97
C-2	2441.3	4205.2		1.8	
C-3	2884.2	5114.3		2.5	

表19：C續接接頭抗壓數據

相較於B試體，C試體在勁度以及強度上都高了許多，然而C-1試體初步判斷可能為製造過程的誤差、竹子缺陷或實驗人為誤差，強度與C-2及C-3相比顯得遜色許多，



1123424



但平均的抗壓強度仍高於B試體，除此之外，C試體的三個試體在實驗結束後皆無任何破壞及劈裂產生，由此可推斷，工程膠的添加的確能提升續接接頭的抗壓表現。

試體	初始勁度 (kg/mm)	最大力量 (kg)	平均最大力量 (kg)	最大力量之位移 (mm)	平均最大力量之位移(mm)
A-1	2690.6	6047.5	3787.77	2.3	1.83
A-2	1894.5	3313.8		1.7	
A-3	1285.1	2002		1.5	
B-1	1588.8	2053.1	2226.13	1.5	1.60
B-2	1431.5	2466.4		1.9	
B-3	1677.9	2158.9		1.4	
C-1	1143	1743.9	3687.80	1.6	1.97
C-2	2441.3	4205.2		1.8	
C-3	2884.2	5114.3		2.5	

表20：續接接頭抗壓數據綜合數據

綜合上述分析成果，A試體是平均最大力量較高者，然而其強度落差範圍大，且仍舊需要克服錯位及滑動問題，否則亦無法達到良好的抗壓結果；而B試體是整體強度最平均者，試驗後的試體也無明顯破壞；C試體是在B試體的基礎上於竹子內部添加了工程膠，由試驗數據可知，添加工程膠夠有效提升抗壓力量以及勁度，是三者表現最優異且較為平均者。

而在這三種試體之後，接下來仍會繼續規劃其他種類的試體及試驗進行強度測試，例如以膨脹零件置中放置於續接點的試體做法，而除了抗壓外，也可能拓展出抗彎、抗拉等強度試驗，進一步測試各項強度指標，並加以優化接頭零件設計。

### 3. 小結

在經過竹接頭的階段性實作後，今年度於交疊接頭及續接接頭兩種類型上有著較多測試，後續將根據兩者的試驗結果來進行設計改良，深入進行研究與精進，同時也將拓展更多的強度試驗類型，另一方面，也將發展橫接接頭的設計研究，朝可被廣泛應用的通用性接頭為目標邁進。

除此之外，本計畫預計在明年將會進行1:1實際竹構造的搭接，以目前現有的竹接頭設計來做檢討與應用，使得設計與研究成果能夠更貼近真實狀態，得以應用於竹材空間構築上，且能夠實際使用於產業端。





## (二) 曲線竹集成材結構雛形製作

### 1. 現有集成材之比較分析

竹集成元尚未有標準規範，因而此次集成元設計參考木集成材之規範CNS11031作為初步比較依據，並納入交大建研所同時進行的東勢彎曲木構案的冷杉曲線樑集成元之規格作為對照組，與竹集成材一同接受強度試驗。

下列表分析市面常見之結構用木集成材種類以及其特性：

木集成材之種類及特性	圖片
1. 結構用集成材類型	
<p style="text-align: center;">結構用層壓膠合木材 (Structural Glued-laminated timber, GLT or Glulam) [77]</p> <p>泛指所有將原木單板膠合層壓為結構材之集成材</p>	
<p style="text-align: center;">直交式集成板 (Cross-laminated timber, CLT) [78]</p> <p>原木製材成鋸板後，以直交方式排列 可作為承重與抗剪力牆</p>	
<p style="text-align: center;">單板層積材 (Laminated veneer lumber, LVL) [61][80]</p> <p>將原木以旋切或平切方式製成單板後膠合層壓為角材 對於中小徑木有製材利用率的優勢 分為結構型與裝修型</p>	





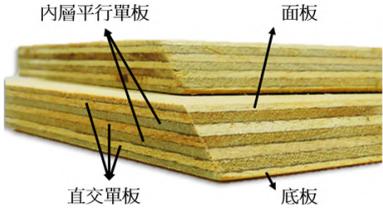
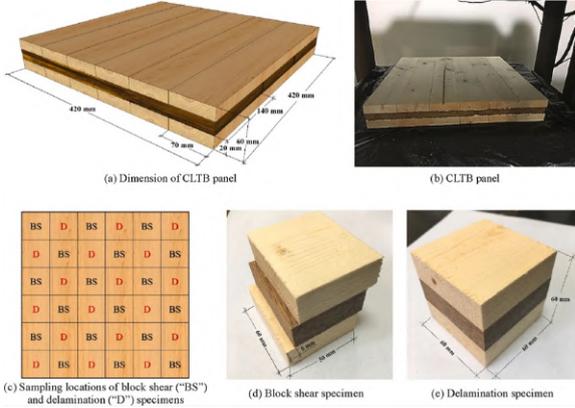
木集成材之種類及特性	圖片
2. 木質板類 (Wood-based panels) 包含單板、合板、粒片板和纖維板等木質板類	
<p style="text-align: center;">合板/夾板 (Plywood) [80]</p> <p style="text-align: center;">以旋切或平切原木為單板原料後 將各層單板以纖維方向相互直交並膠合層壓</p>	
<p style="text-align: center;">粒片板、定向粒片板/塑合板及其他 (Particle board, Oriented strand board, OSB and Others) [81]</p> <p style="text-align: center;">由粒片、切削碎片混膠熱壓成形，為裝修材</p>	
<p style="text-align: center;">纖維板/密集板 (Fibreboard, Medium density fiberboard ; MDF, High density fiberboard ;HDF) [82]</p> <p style="text-align: center;">主要構成型態是纖維形式 未必需要使用膠合劑纖維板中纖維間的維繫 主要可透過氫鍵的發展、木質素的塑性流動、 纖維毛氈化交織 (Interweaving) 或添加合成樹脂使其結合[60]</p>	

表21：臺灣常見之各式結構與飾面用集成材種類

以上為目前市面廣泛使用之木集成材，臺灣之竹集成材 (Laminated bamboo) [70]儘管目前仍以客制訂單為主，但研究與應用發展愈趨多元，以下列表搜集目前市場常見以及參訪之製造端的現有產品：





竹集成材種類	圖片
1. 結構角材類型	
<p style="text-align: center;">膠合層壓竹材 (Glued-Laminated Bamboo, GLB) [32]</p>	
<p style="text-align: center;">直交式竹集成材 (Cross-laminated bamboo, CLB)</p>	
<p style="text-align: center;">直交式竹木合構集成材 (Cross laminated bamboo and timber, CLBT) [76][62]</p>	
<p style="text-align: center;">長束狀竹層積材 (Bamboo scrimber, BS) / (Bamboo composites)</p>	





<p>寬版束狀竹層積材 (Wild-Bundle bamboo scrimber, WBS) (Parallel strand bamboo, PSB) [32]</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>After forming Mat</th> <th>After pressing Panel</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Narrow bamboo scrimber</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Wide bamboo scrimber</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Bamboo-bundle laminated veneer lumber</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		After forming Mat	After pressing Panel	Narrow bamboo scrimber			Wide bamboo scrimber			Bamboo-bundle laminated veneer lumber		
	After forming Mat	After pressing Panel											
Narrow bamboo scrimber													
Wide bamboo scrimber													
Bamboo-bundle laminated veneer lumber													
<p>束狀單板層壓材 (Bamboo bundle laminated veneer lumber, BLVL) [74][75]</p>													
<p>2. 板材類型</p>													
<p>定向竹重組板材 (Oriented bamboo scrimber boards, OBSB) [22] 無去除竹皮、細長比高較高、 製程簡化、機械强度高</p>													
<p>竹粒片板 (Bamboo particleboard)</p>													

表22：竹材續接內部填充物比較

此外，加諸成本考量，木集成元也發展出同等級、異等級、對稱異等級、非對稱異等級之品質組成以因應不同受力情形之使用，例如適用於高抗彎性能的結構材往往





會選用對稱異等級集成材，因此在此次集成元規格設計部分，本計畫設定了全竹、全木、竹木合構的組合相互對照。

竹木合構的部分，根據孟宗竹之機械性能來挑選相近強度等級的冷杉集成元，依照其機械性質以對稱異等級方式與竹集成元層積膠合（如下表中之型態一CB-C、型態二TS-C、型態三STS-C）。

此外，木頭因其材料生長特性，集成元厚度能輕易達到50mm，相較之下，竹子因斷面直徑小且內壁偏薄，於生產製作工程集成材有其限制，經過與製造廠商多次討論後，本計畫選擇使用外徑較粗且竹節間距較長的孟宗竹與硬度較高、市場使用率較低的刺竹作為此次測試集成元。

考量經剖片、削皮、展平等加工程序後，斷面定寬長邊多為30~40mm，短邊多為5mm內，因此特與能製作定寬長邊至50mm、短邊4mm之元宇生技共同研發具結構承重強度之三種集成竹材。

## 2. 材料與方法

### 2-1. 材料條件集成元材料組成與斷面尺寸

現有結構用集成竹材產品，大多以拼接方式構成（平壓平行排列、平壓直交排列、側壓），這類型的拼接方式都以增加勁度與抗壓為製作前提。

產品	A	B	C
斷面			
透視			
說明	以平壓平行排列方式增加集成板材厚度，適用於平面板材，以膠合方式提高整體材料抗彎能力	以側壓方式排列，加強板材橫向強度	上下兩層集成元平壓，中間集成元側壓拼接，進行直交式集成堆疊，各方向之機械強度皆上升

表23：市售強化集成竹材樣式排列說明[69]



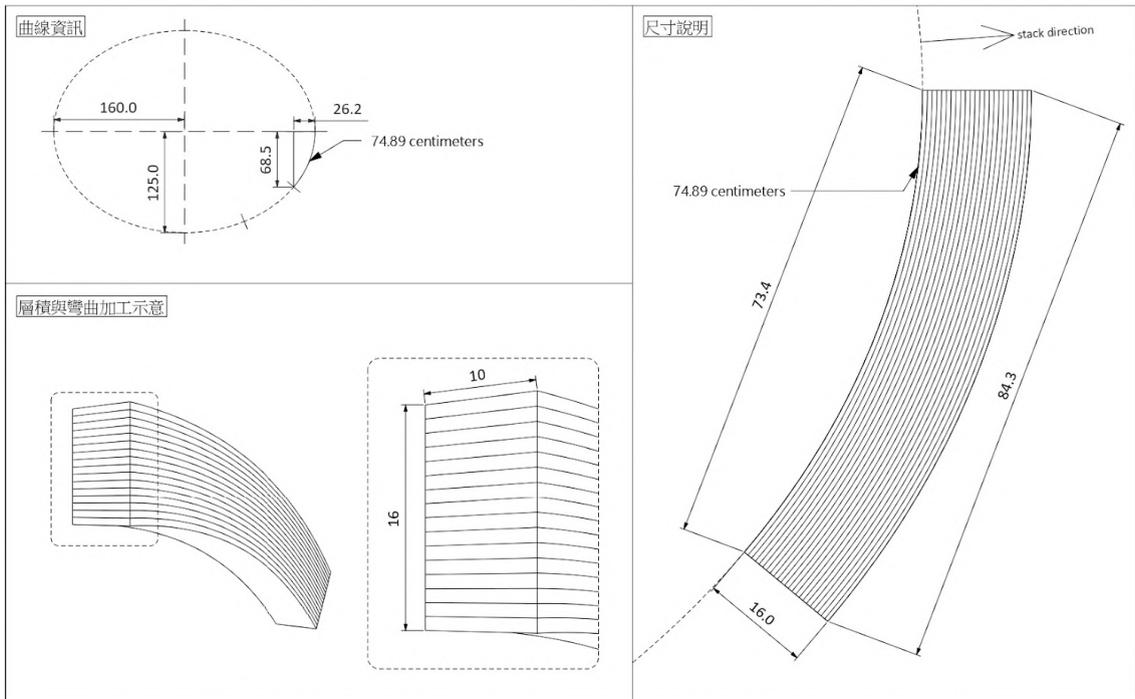


圖101：曲線竹集成材之設計圖面

而這次的曲線竹集成樑加工及型態特性，較合適的力學考量是將結構件斷面較短邊設計為受壓與引張側，集成板沿Z軸層積堆疊，因此初步設計出四種集成元組成型態（如下表），集成方式分別為40層、23層、竹10層+木9層、木16層製作完成面尺寸相同之集成樑，膠合面為竹青側貼合下一層之竹簧側，採用富蘭克林公司太棒二代木工膠並雙面佈膠，以冷壓法製成。



圖102：竹集成材實體製作





<p style="text-align: right;">(a)</p>	<p style="text-align: right;">(b)</p>
<p>(上圖) 兩種全竹集成材斷面尺寸 (下圖) 兩種全竹集成元斷面尺寸</p>	<p>(上圖) 兩種全竹集成材斷面尺寸 (下圖) 兩種全竹集成元斷面尺寸</p>
<p style="text-align: right;">(c)</p>	<p style="text-align: right;">(d)</p>
<p>(上圖) 兩種竹木合構集成材斷面 (下圖) 兩種合構材之竹集成元斷面</p>	<p>(上圖) 全木冷杉集成材斷面</p>

表24：四種集成元規格斷面說明圖（單位：cm）





<b>型態二：實驗試體（無彎曲）</b> <b>Shear test specimens</b>							
	TS-A		TS-B		TS-C		TS-D
尺寸 (cm)	10*16*100						
類型	全竹		全竹		竹木合構		全木
編號	TS-A-1	TS-A-2	TS-B-1	TS-B-2	TS-C-1	TS-C-2	TS-D
集成元尺寸 (cm)	0.4*5		0.7*4.2		竹：0.7*4.2		1*10
					木：1*10		
集成元層數	40		23		竹：5+5		16
					木：9		
材料種類	刺竹	孟宗竹	刺竹	孟宗竹	刺竹+冷杉	孟宗竹+冷杉	冷杉

表25：三種材料的直線樑prototype之集成元規格表

<b>型態三：實驗試體（小）（無彎曲）</b> <b>Small Shear test specimens</b>							
	STS-A		STS-B		STS-C		STS-D
尺寸 (cm)	4*6*60						
類型	全竹		全竹		竹木合構		全木
編號	STS-A-1	STS-A-2	STS-B-1	STS-B-2	STS-C-1	STS-C-2	STS-D
集成元尺寸 (cm)	0.4*5		0.7*4.2		竹：0.7*4.2		1*10
					木：1*10		
集成元層數	15		9		竹：2+2		5
					木：3		
材料種類	刺竹	孟宗竹	刺竹	孟宗竹	刺竹+冷杉	孟宗竹+冷杉	冷杉
數量 (根)	10	10	10	10	10	10	10

表26：等比例調整之試體集成元規格表





#### 4. 抗壓、抗彎與含水率試驗

在設定完集成元特性與尺寸後，需要進一步比較全竹（孟宗竹、刺竹）、全木（冷杉）、竹木（冷杉+孟宗竹、冷杉+刺竹）合構集成材的各種特性，因此將規劃在相同集成元組成的尺寸條件中，測試其分別機械性質。

首先以校內（陽明交大土木系）實驗室作為初步試驗資源，因應其設備之尺寸，將設計試體等比縮小至萬能試驗機適用尺寸進行測試，再由此回推算出原始設計的強度數據。

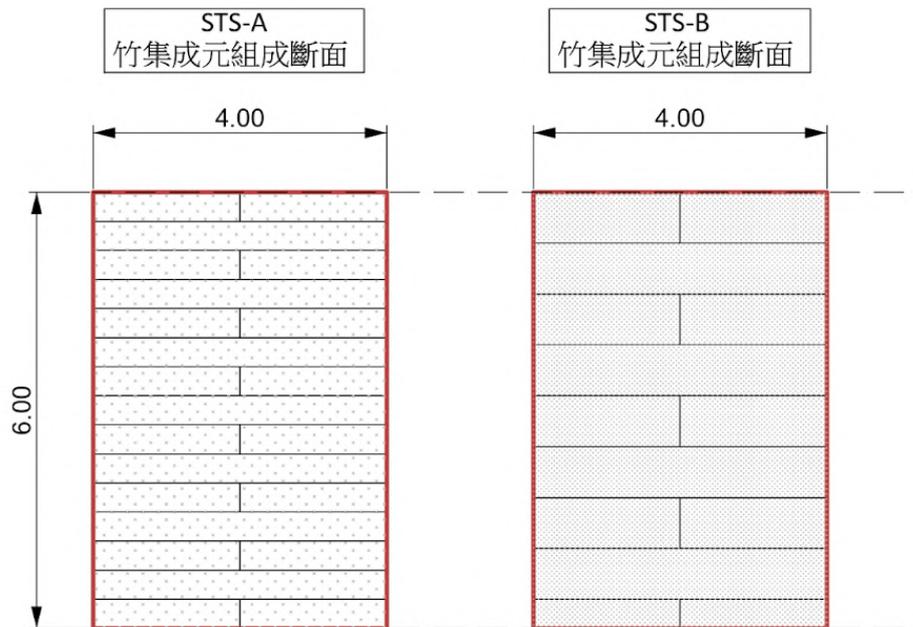


圖. 全竹：不同斷面尺寸進行強度測試

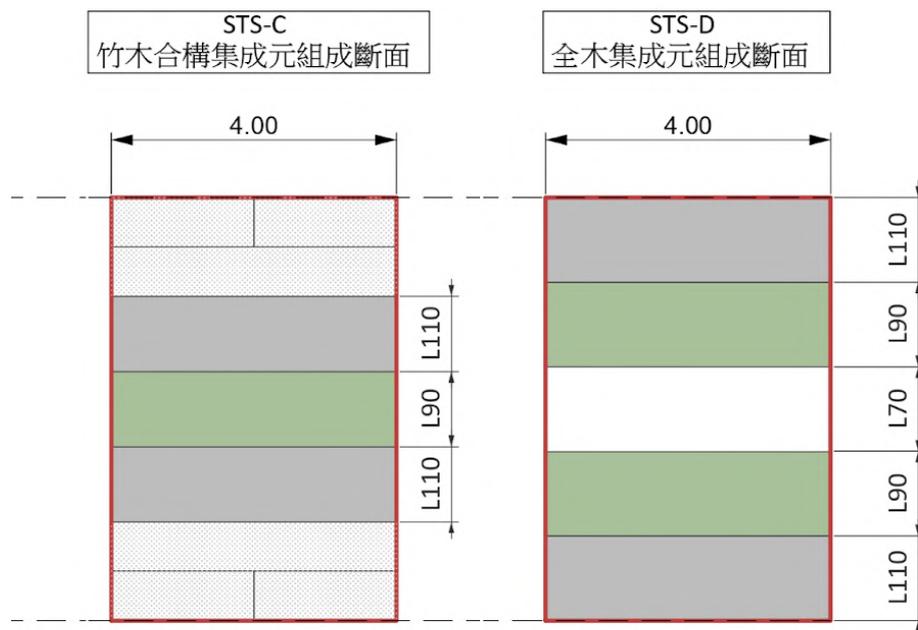


圖103：（左）竹木合構，（右）全木冷杉，按照強度進行組合比較





實驗使用萬能試驗機UTM (universal testing machine) 進行集成材抗壓與抗彎測試，以研究由不同種類的集成材其材料參數以及力學行為，測試對象分別為不同竹子種類組合之集成材。

抗壓試驗之儀器設定為負荷率 (Loading rate) 550N/s，使用UTM進行軸向壓力試驗，並探討各材料的抗壓強度以及勁度等表現；抗彎試驗以UTM進行四點抗彎，以定位移15mm/min進行，透過實驗研究集成材之彎矩以及彎曲應力之表現，並綜合抗壓實驗結果得出各材料之楊氏模數；集成材含水率試驗將透過測量常溫下的集成材重量，並對比烘乾24小時後的集成材，進行含水率計算。

試體編號	試體材料組成	抗壓試體尺寸(cm)	抗彎試體尺寸(cm)
STS-A-1	刺竹	4*6*30	4*6*60
STS-A-2	孟宗竹	4*6*30	4*6*60
STS-B-1	刺竹	4*6*30	4*6*60
STS-B-2	孟宗竹	4*6*30	4*6*60
STS-C-1	刺竹+冷杉	4*6*30	4*6*60
STS-C-2	孟宗竹+冷杉	4*6*30	4*6*60
STS-D	冷杉	4*6*30	4*6*60

表27：試體編號及其材料種類



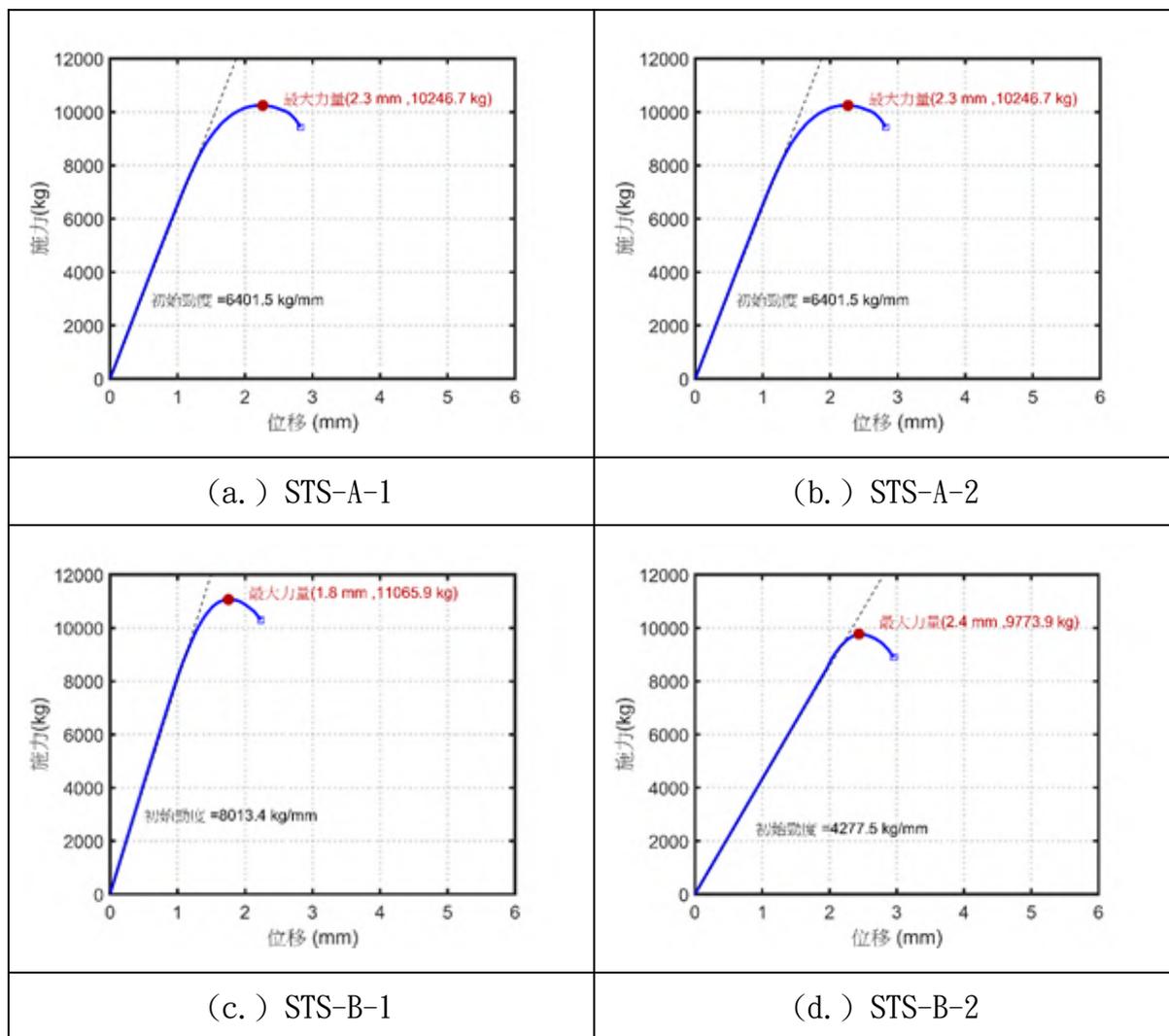
圖104：抗壓及抗彎試驗示意圖（左：抗壓，右：抗彎）





#### 4-1. 集成材抗壓試驗結果

根據數據結果顯示，刺竹以及孟宗竹在抗壓試驗下有優秀的強度表現，A與B之差異為竹子斷面組成的尺寸不同，B的組成方式可以使抗壓強度有些微的提升，但並不顯著，而加入冷杉後的集成材強度皆下降許多，D試體以全冷杉方式組成，其強度為七項最低者，因此若以抗壓強度為取向則不建議使用冷杉作為材料，以B方式組成之刺竹具備最大抗壓強度以及勁度，刺竹之抗壓能力優於孟宗竹與冷杉。



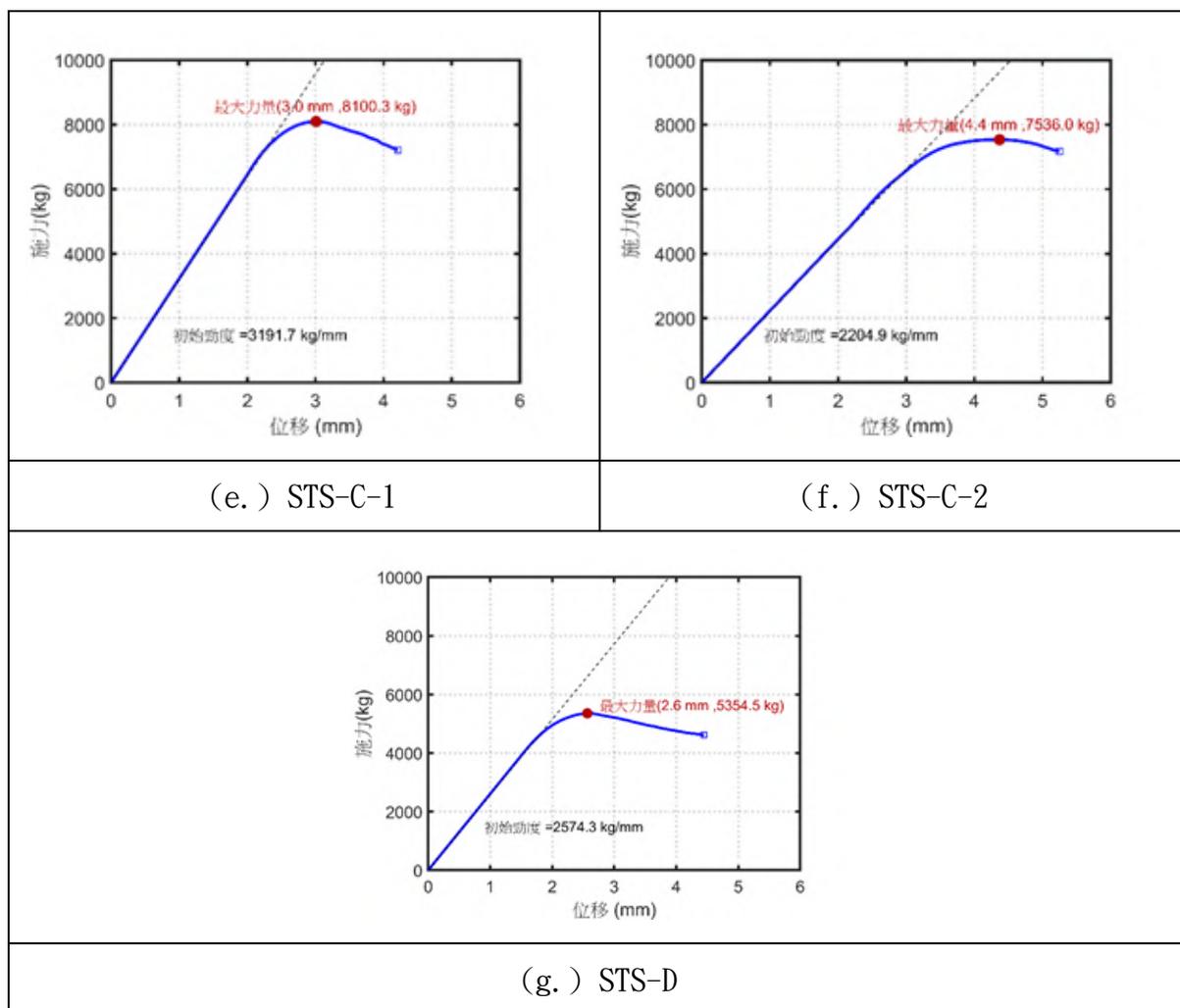


表28：集成材受軸壓力之力-位移關係圖

試體材料組成	試體編號	試體尺寸	最大壓力 (kg)	最大壓力之位移 (mm)	勁度 (kg/mm)	最大抗壓應力 (N/mm <sup>2</sup> )	楊氏模數 (MPa)
刺竹	STS-A-1	4*6*30 (cm)	10246.7	2.3	6401.5	41.88	7849.84
孟宗竹	STS-A-2		9517.8	2.3	5727.8	38.9	7023.71
刺竹	STS-B-1		11065.9	1.8	8013.4	45.23	9826.43
孟宗竹	STS-B-2		9773.9	2.4	4277.5	39.95	5245.28
刺竹+冷杉	STS-C-1		8100.3	3	3191.7	33.11	3913.82
孟宗竹+冷杉	STS-C-2		7536	4.4	2204.9	30.8	2703.76
冷杉	STS-D		5354.5	2.6	2574.3	21.89	3156.74

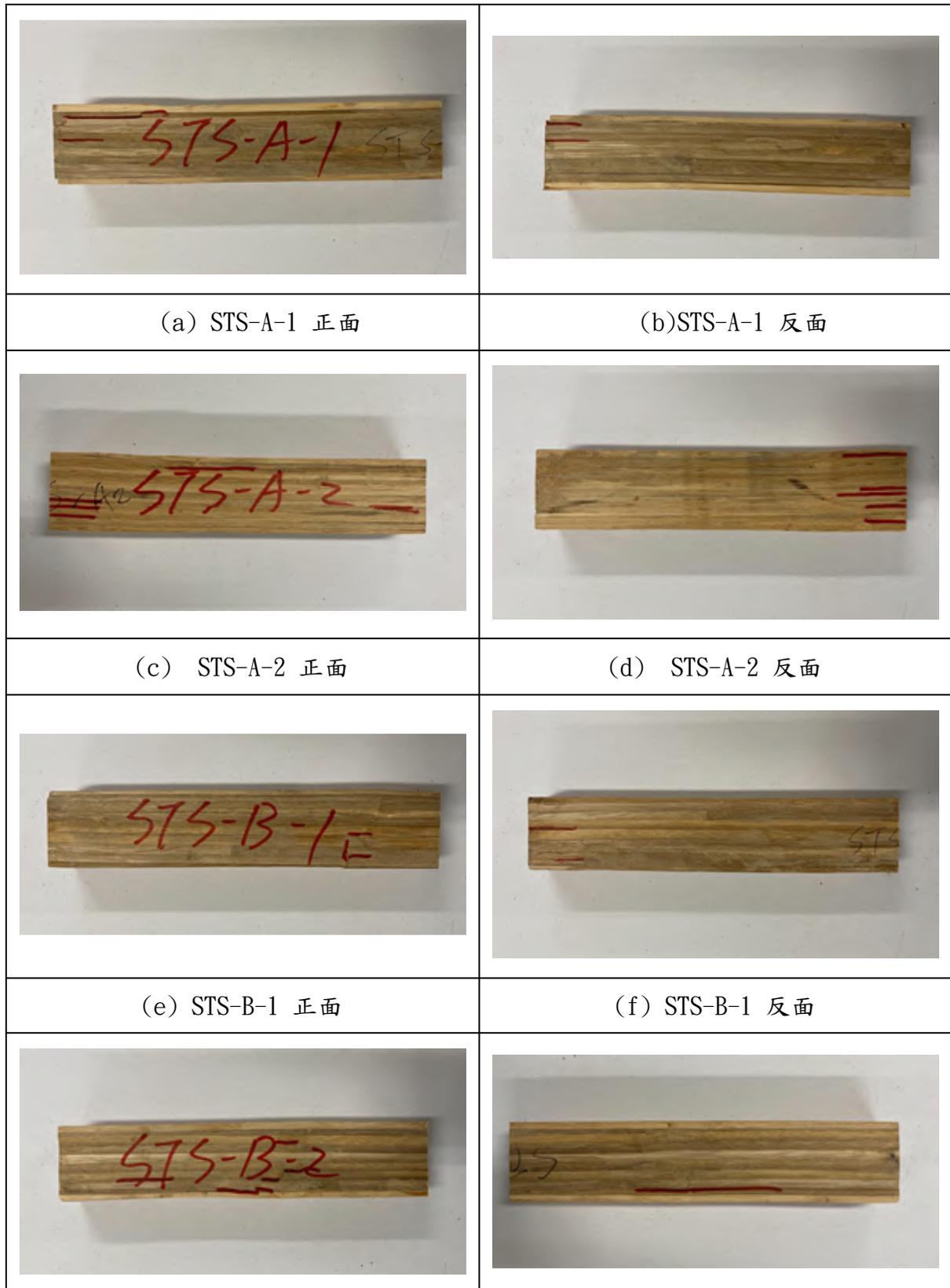
表29：集成材抗壓試驗結果





#### 4-2. 壓力破壞模式

下圖為集成材受抗壓後的破壞情形，紅筆為凸顯破壞裂縫所用，由下列圖可見，刺竹與孟宗竹的A及B組成方式的破壞裂痕數量較少，且無嚴重破壞狀況，而加入冷杉後的集成材，試體變得較脆弱，出現較嚴重且較大的破壞裂縫。





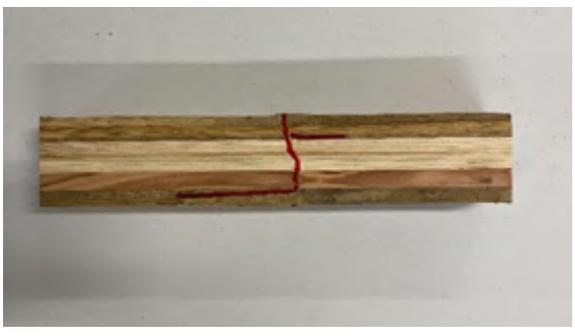
(g) STS-B-2 正面	(h) STS-B-2 反面
	
(i) STS-C-1 正面	(j) STS-C-1 反面
	
(k) STS-C-2 正面	(l) STS-C-2 正面
	
(m) STS-D 正面	(n) STS-D 正面

表30：集成材受軸壓力之破壞情形

#### 4-3. 彎矩試驗結果

由成果數據可知，相較於抗壓試驗，冷杉材質於抗彎試驗中表現最為優異，其中使用刺竹及孟宗竹與冷杉做結合的C試體具備最強的彎矩強度，而抗壓試驗相當優異的刺竹與孟宗竹在抗彎試驗下，強度弱上許多，承受彎矩的能力遠低於冷杉材質，推斷由於抗壓強度較好的刺竹與孟宗竹，其强度高且較脆，而冷杉由於本身較柔軟，因此具備抗彎能力優良的特色，而將冷杉與兩材料合而為一，則可獲得更好的抗彎效果。



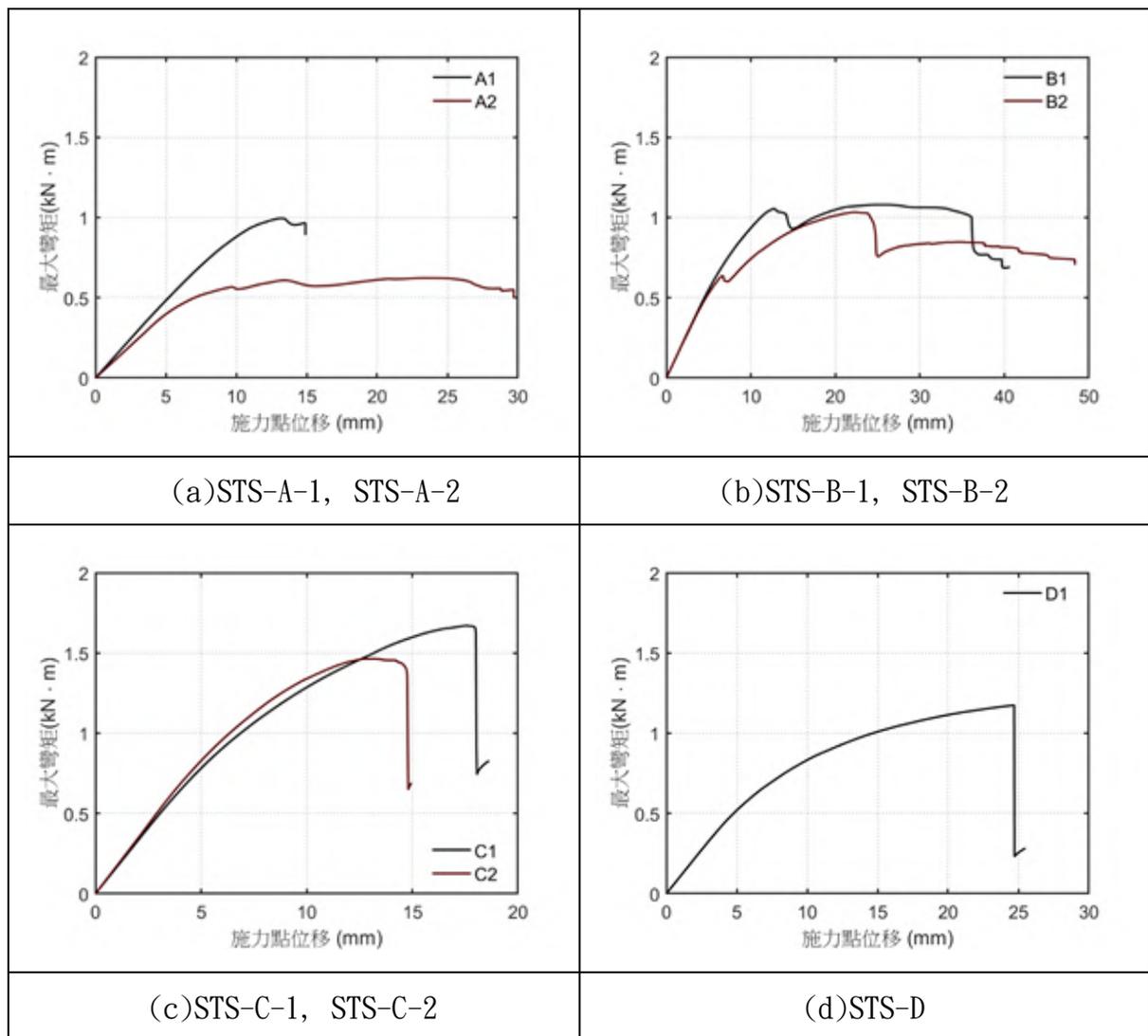


表31：集成材抗彎試驗之彎矩-位移關係圖

試體材料組成	試體編號	試體尺寸	最大彎矩 (kN m)	最大彎曲應力 (N/mm <sup>2</sup> )
刺竹	STS-A-1	4*6*60 (cm)	1	41.67
孟宗竹	STS-A-2		0.62	25.83
刺竹	STS-B-1		1.08	45
孟宗竹	STS-B-2		1.03	42.92
刺竹+冷杉	STS-C-1		1.67	69.58
孟宗竹+冷杉	STS-C-2		1.47	61.25
冷杉	STS-D		1.18	49.17

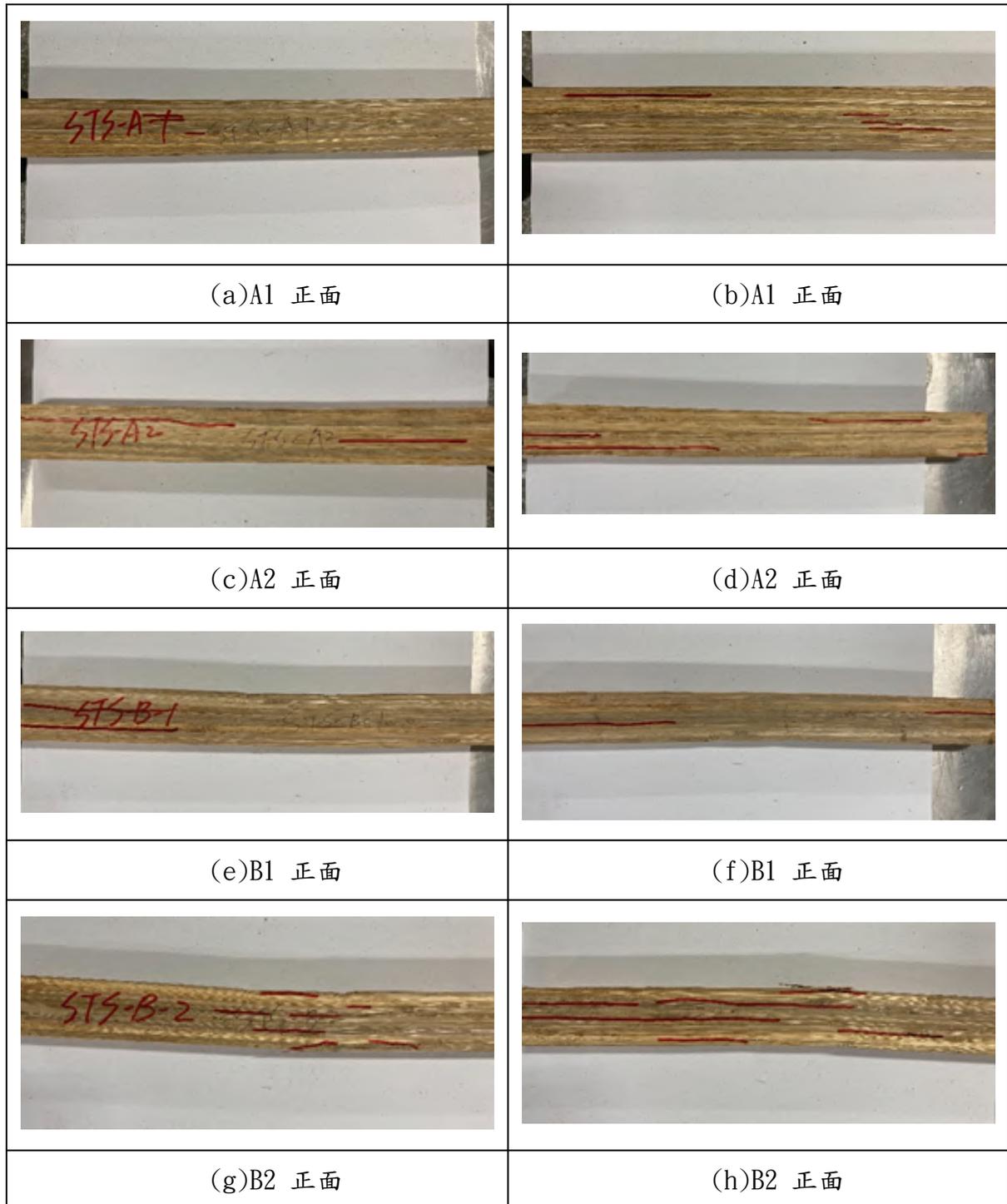
表32：集成材四點抗彎試驗結果





#### 4-3. 彎矩破壞模式

由現場記錄可知，A與B試體皆有許多裂縫產生，尤其是孟宗竹試體A2與B2，其裂縫區域較多也較大，C試體裂縫較輕微，屬於集成材各材料組合之間產生些微裂縫而造成的開列，D試體延展性好，直到最後一刻才發生嚴重破壞，除了斷裂處外，其餘皆無裂縫產生。





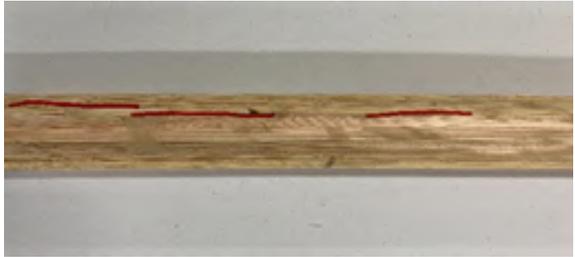
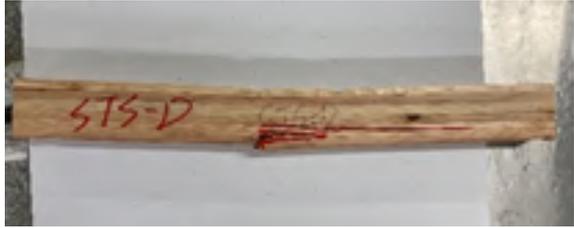
	
(i)C-1 正面	(j)C-1 正面
	
(k)C-2 正面	(l)C-2 正面
	
(m)D 正面	(n)D 正面

表33：集成材四點抗彎之破壞情形





#### 4-4. 含水率試驗結果

集成材含水率測驗是先將常溫無加工的集成材進行秤重，完成後將集成材放入烘箱進行24小時烘乾，待24小時後將試體拿出並進行秤重，可得以下含水率：含冷杉材質之集成材含水率較高，推斷三種材料中冷杉的孔隙率較高，而刺竹與孟宗竹的空隙率相差微小。

試體材料組成	試體編號	試體尺寸	乾燥前質量(g)	絕乾質量(g)	含水率(%)
刺竹	STS-A-1	4*6*30(cm)	465.5	425.8	9.32
孟宗竹	STS-A-2		512.2	470.8	8.79
刺竹	STS-B-1		478.5	438.6	9.09
孟宗竹	STS-B-2		482.6	440.5	9.55
刺竹+冷杉	STS-C-1		377.7	343.5	9.95
孟宗竹+冷杉	STS-C-2		396.2	362.1	9.14
冷杉	STS-D		268.3	239.4	12.07

表34：集成材含水率數據

#### 5. 小結

藉由以上這些實驗初探竹木合構集成樑的機械性質與未來發展可能，強度試驗方面包括抗壓試驗、針對非均質材料抗彎試驗、含水率試驗：其中，刺竹與孟宗竹的抗壓表現相當優異，若以抗壓能力作為設計目標則建議使用此兩種材料，額外與冷杉結合在集成材的抗壓能力上並無法有效提升，反而降低了強度；而抗彎強度以冷杉與刺竹及孟宗竹結合的C試體最為優異，以彎曲能力作為設計目標者建議使用該試體；含水率的部分，冷杉具備最高的含水率，七種試體之間含水率差異不大，推測彼此的孔隙率很接近。

今年度曲線樑為小尺度的prototype嘗試，採取客製模具，預計於明年度進行相同斷面尺寸之直線樑與曲線樑的機械性能試驗，在此次生產成本方面，粗估全竹組合的原料成本最高，全木組合之原料成本最低，竹木合構之原料成本次之；全竹的製作成本相較全木則高出1.17倍，竹木合構之製作成本相較全木則高出1.05倍，與全竹相去不遠；而製作時程方面，集成元層數越多，膠合及鋸板製作時間亦越多，加工需時越長。

強度試驗中，刺竹相較孟宗竹、冷杉具有較高的彈性模數及抗壓強度，厚度0.7cm之集成元相較0.4cm在勁度表現提高1.25倍，更不容易發生形變，冷杉則具有較好的延展與抗彎能力，結合竹木兩種材質的STS-C則抗彎能力優於單一冷杉。





整體評估，竹木合構集成材相較另外兩組（全竹、全木）具有較佳的綜合抗壓與抗彎表現，且生產成本亦低於全竹，與全木相近，因此此複合材可做為後續進入大尺度集成材構造物的發展方向。



圖105：集成曲線竹樑之prototype製作過程



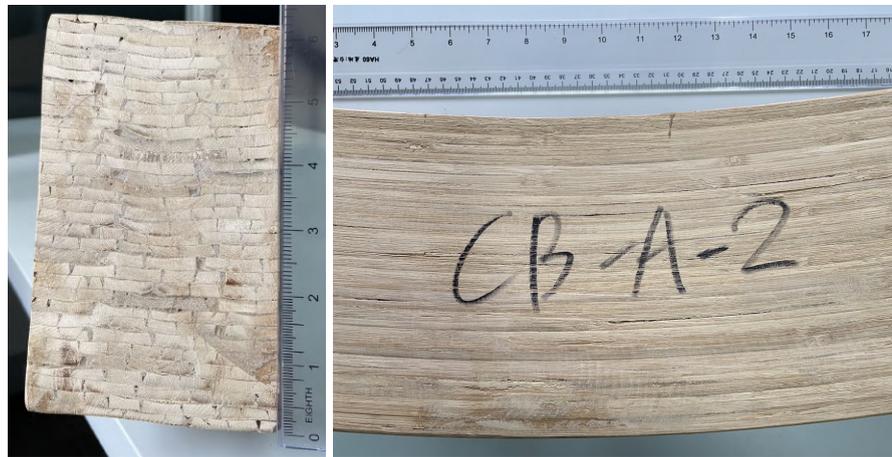


曲線集成樑試作 (Curved Beam)

CB-A-1  
全刺竹



CB-A-2  
全孟宗竹

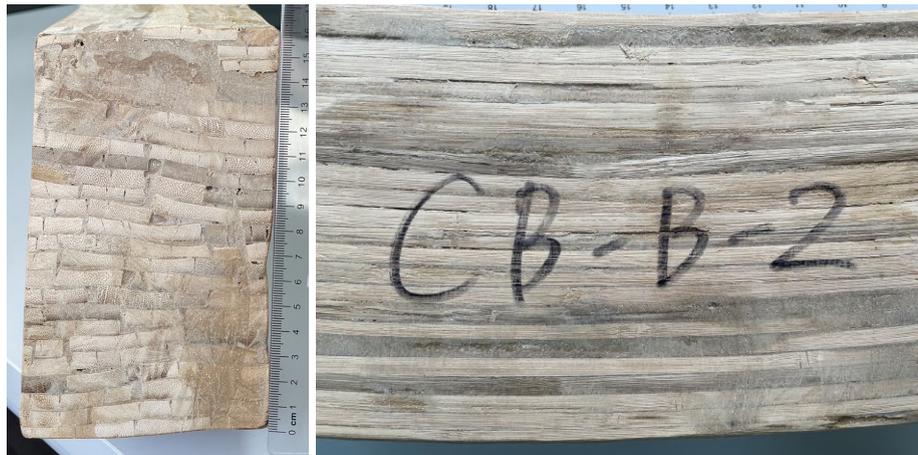




CB-B-1  
全刺竹



CB-B-2  
全孟宗竹





CB-C-1  
刺竹+冷杉



CB-C-2  
孟宗竹+冷杉





表35：曲線集成竹樑斷面整體紀錄照





### (三) 彈性網殼實作構築

#### 1-1. 幾何與材料狀態資訊

##### 1-1-1. 整體彎曲型態評估

彈性網殼的整體彎曲狀況可以透過Mesh與Nurbs Surface之間的幾何資訊轉換，該評估有助於設計者在設計發展過程中針對以下幾點應用做分析：

(1)了解整體型態特徵：透過軟體的圖形化與覽介面，設計者可以快速掌握曲率分布，也可以了解哪些地方的材料與構造設計需要進行特別討論，同時該整體型態評估也有助設計者了解設計成本。

(2)了解局部曲率變化：藉此可以得知整體型態何處的材料可能產生劇烈扭轉，具有比較大的安全風險，或是透過此舉評估該處劇烈變形是否具有設計意圖上的必要性，進一步評估是否對其進行局部修正。

(3)針對外覆材的幾何合理化：由於彈性網殼單元中的任意四個端點因為造型彎曲而產生特定的非共面位移，此幾何變化行為對於平面外覆材的包覆產生困難，設計者可以透過該程序掌握需要獨立處理的特定區域，設計者也能應用該程序由價值工程的角度做評估，掌握設計成本與設計意圖表達間的連結強度，下表整體彎曲型態，以第四次實作的造型為例，紅色部分定應出超出設計建議極限曲率的部分，設計者可以再根據此視覺化資訊微調造型。

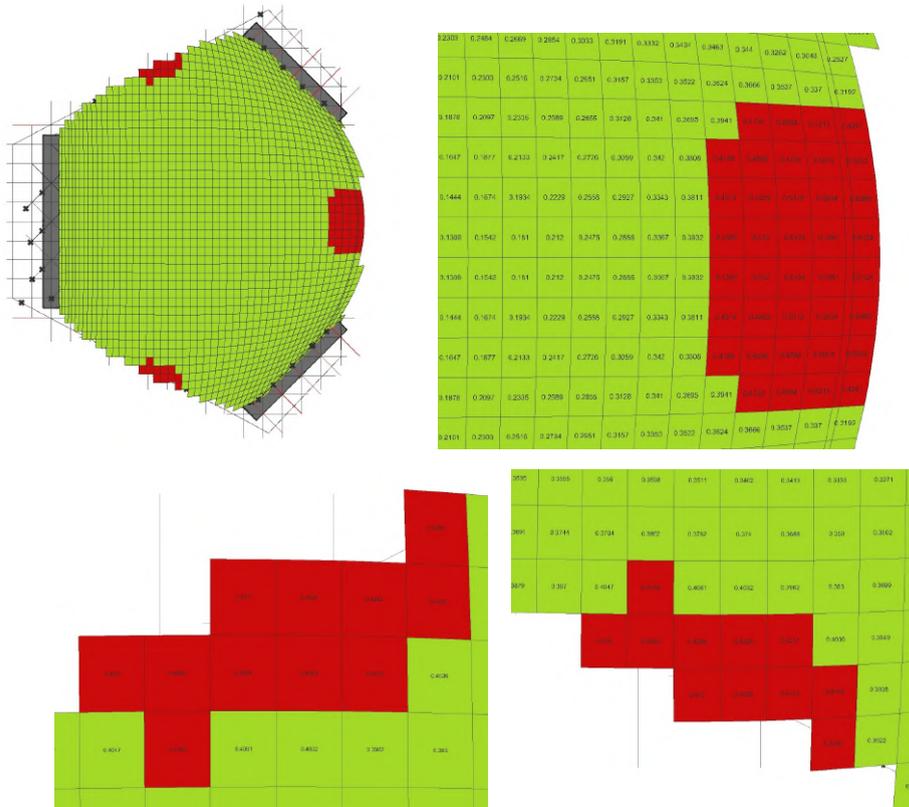


圖106：整體彎曲型態物理模擬之極限曲率部分





### 1-1-2. 材料局部狀態評估

彈性網殼經常由長條型材料組成，對於長條形材料來說，材料因為斷面形狀、斷面規格所產生的強弱邊分布而在形變至設計目標型態後，會有因為超過材料性能極限而破壞的風險，且因位彈性網殼的構造與工序要求，材料需要在同一方向續接上保持整體彈性，產生連續性的曲線，所以使用帶角度的接頭利用折角轉接的方式並不在考慮範圍，由上述幾點脈絡，本研究所以剖竹材料為應用方向，針對以下幾點做分析：

(1)竹材的扭轉 (torsion)：竹材扭轉過大產生爆裂的風險，竹材由同向纖維組成，且剖竹不具有竹節的緊固作用。

(2)竹材的側轉：剖竹的長寬比為肉可見的明顯，以本次試驗使用的剖竹材為例，常寬比為5:1至5:1.5，此明顯特徵為材料在彎曲上需要盡量避免產生側向的彎曲，避免應力集中，設計應使材料彎曲盡可能的發生於材料的弱邊，也就是變薄材料的長邊，使竹材料可以充分發揮其優量的彈性恢復能力。

(3)竹材的局部彎曲曲率：續(2)，設計應該盡可能使曲率的變形發生於材料的弱邊，應用竹材優良的彈性恢復力；然而不論再好的材料也有其極限，剖竹的設計建議彎曲極限，本研究與土木系袁教授合作進行測定，得到一經實驗後的參考數值，並帶入參數設計平台中搭配幾何形態評估，綜合多維資訊進行模擬與視覺化。

### 2-1. 構築工序

本章節敘述彈性網格的型態設計於數位參數化環境中完成後，進一步產生幾何資訊應用於構築現場，並且實際進入施工階段後的工序與其背後意義，彈性網殼的型態產生是藉由整體彎曲達成，故結構之間並不能於一開始就完全固定，反而需要應用其網格交叉點的轉動與移動自由度來成型，固定點在不同的工序階段，依序被各式構件提供更多的移動與轉動限制，直到最後完工階段完全固定所有點位的移動與轉動性能，以下以時間順序，分階段敘述各工序執行內容與其意義。

#### 2-1-1. 材料續接

本階段材料透過特定的方式在相同方向上沿長固定，受限於自然材料長度與可運送長度的限制，網格任一單方向的材料經常超出原料長度，故設計者首先需進行材料續接，續接之細部設計考量構造成型過程的特殊性，需要能夠是當傳遞竹材彈性彎曲效果，故材料選用上可以考慮以同類竹材續接、或使用具彈性恢復性能的金屬片。

#### 2-1-2. 網格放樣與交叉固定

施作者在將各項網格材料，以材料上預先鑽好的孔位相互固定，交叉點需設計為允許轉動的構造，並根據前期規畫之材料層數，相互交疊成網格型態，此階段材料呈現平鋪共面的狀態，整體攤平，相對於完工狀態幾乎沒有彎曲。





### 2-1-3. 吊裝彎曲成型

本階段施作者可使用吊裝設備、下方支撐等方式局部抬升網格，產生高度差，同時其餘施作者於周為提供水平推力，逐步將構造固定至地面固定處（anchor points），地面固定點允許完全固定或是具有適當的角度的pin點設計。

這個過程中設計會逐步接近預定的設計目標，同時也可以觀察到對應於整體型態曲率較大的材料，其局部網格的內角形變會比較大，最後，施作者完全固定好基礎位置後，整體結構應該已經達到與數位模擬相近的分布與彎曲，但仍須注意此時還不可移除吊裝設備或下方支撐，因為其整體形態雖然到位，但網格上的交叉點依然允許轉動，所以若移除前述等暫時支撐可能會產生整體形變。

### 2-1-4. 斜向材料固定

本階段施作者透過對網格施加斜向的固定材料，可以是單方向的提供固定件固定、或是雙對角線的應用拉索固定，其目的是使網格的內角不再變化，施作者需在保有暫時支撐的狀態下，首先確定各交叉固定點都位於設計目標處，然後使用前述固定方式加固，待所有的斜向材料都完成固定後，整體形態達到最終的穩定狀態，方可移除暫時支撐。

### 2-1-5. 邊緣加強

彈性網殼邊緣為所有受力之集中處，因此需要建立邊框以維持整體型態，將剖竹片框起整體邊緣，除可收尾型態構造，亦可增加收尾剖竹片數形成向內的力量，將網殼收緊，並改良其強度。

## 3. 與土木系合作之物理效度模擬及實驗報告

### 3-1. 不同種類及處理方式之剖竹抗壓試驗和抗彎試驗

本實驗使用萬能試驗機（universal testing machine 或 UTM）進行剖竹片抗壓與抗彎測試，以研究由不同種類的竹片其材料參數以及力學行為，測試對象分別為孟宗竹片、桂竹片以及桂竹原竹，孟宗竹片及桂竹片皆包含有無碳化處理以及竹節的去除的兩種試體，並探討施以不同處理下的剖竹片其材料參數及力學行為為何，每種材料將進行三次試驗，最後取平均以達較公平之結果。

剖竹的抗壓試驗採竹片以垂直擺放於UTM下，竹片兩端包含固體樹脂，以避免兩端在加壓過程有滑動狀態產生，實驗過程UTM對竹片進行軸向加壓，5mm/min為定速度設定數值，竹片產生破壞或強度大幅下降即停止試驗，待結束試驗後，對數據進行抗壓強度以及彎曲勁度的分析，探討各式體在抗壓試驗的表現為何。

剖竹的抗彎試驗以UTM進行四點抗彎，抗彎試驗中將竹片分別以竹皮朝上以及竹皮朝下分別做測試，30mm/min為定速度設定數值，竹片產生破壞或強度大幅下降即停





止試驗，待試驗結束後，分析各材料彎矩強度以及彎矩曲率，並經過公式計算提供建議設計極限曲率。

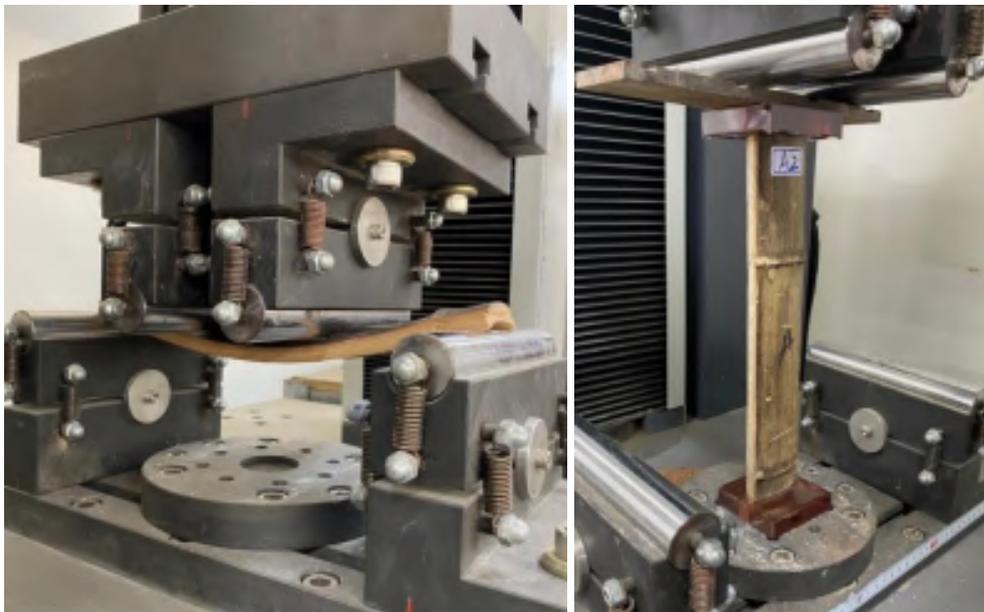


圖107：四點抗彎及抗壓實驗圖

### 3-2. 理論

#### 3-2-1. 四點抗彎試驗

在一個彎曲度  $\phi$  下的斷面彎矩可以由以下程式來計算：

$$M = -E_b I \cdot \phi \quad (1)$$

$I$ 為斷面的二次慣性矩， $E_b$ 為竹子楊氏模數，竹片試體在四點抗彎試驗(圖3)下所承受的最大彎矩為：

$$PL = -E_b I \cdot \phi \quad (2)$$

其中 $P$ 為施加的總載重， $L$ 為竹片支承間的距離。

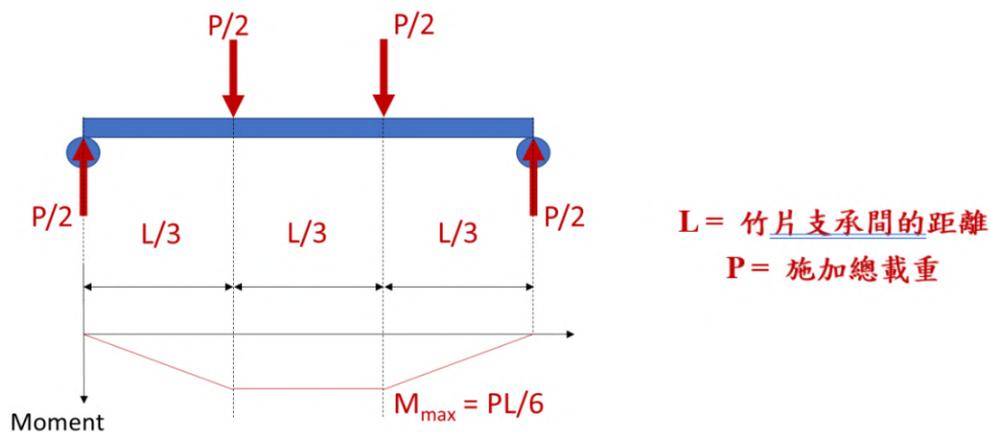


圖108：四點抗彎試驗示意圖





### 3-2-2. 挫屈載重

竹片軸向抗壓試驗的挫屈載重 $P_{bl}$ 可以透過下方方程式進行計算：

$$P_{bl} = \frac{\pi^2(E_b I)}{L_c^2} \quad (2)$$

其中 $P$ 為施加的總載重， $L_c$ 為竹片試體支承間的淨長度，根據方程式(2)，可以計算出有效彎曲模數 $(E_b I)_{eff}$ 如下：

$$(E_b I)_{eff} = \frac{P_{bl} L_c^2}{\pi^2} \quad (3)$$

接著，透過將方程式(3)代入方程式(2)來計算彎曲破壞時的有效曲率 $\psi_f$ ，如下所示：

$$\psi_f = \left| \frac{PL}{(E_b I)_{eff}} \right| = \frac{\pi^2 PL}{P_{bl} L_c^2} \quad (4)$$

此部分需要注意的是，根據彈性分析所得出的方程式(4)中，彎曲破壞時的有效曲率 $\psi_f$ 是對實際破壞曲率的保守估算值，因載重施力在未達最大值之前，竹片試體在彎曲下的非線性變形會降低其彎曲勁度，導致在相等的施力矩下的曲率將會更大，如方程式(1)所示。





### 3-3. 測試結果

#### 3-3-1 竹片軸力抗壓試驗結果

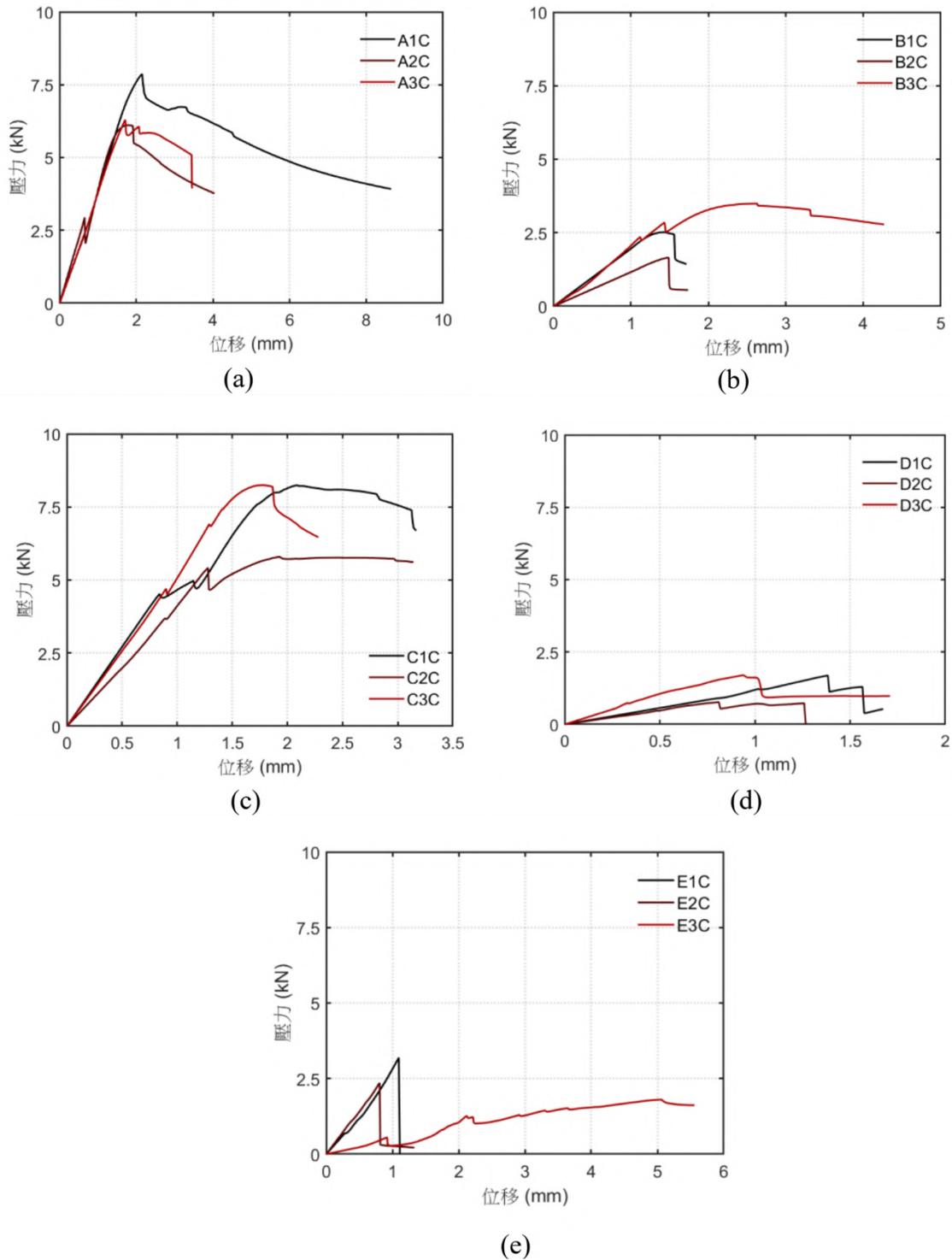


圖109：竹片受軸壓力之力-位移關係圖

(a)孟宗竹片（無乾燥處理，去除竹節）；(b) 桂竹片（無乾燥處理）；(c) 孟宗竹片（碳化處理）；(d) 孟宗竹片（碳化處理，去除竹節）；(e) 桂竹筒（水煮+乾燥）





抗壓試體	種類	竹節處理	乾燥程度	含水率	竹長 (cm)	厚度 (cm)	初始勁度 (N/mm)	受壓挫曲強度 (kN)	等效彎曲勁度 (kNmm <sup>2</sup> )	平均等效彎曲勁度 (Nmm <sup>2</sup> )
A1C	孟宗竹片	已去除	無處理	25-27%	26.8	1.3	3.665	7.87	57272.29	51477.5
A2C		已去除	無處理	25-27%	28	0.9	4.494	6.11	48535.28	
A3C		已去除	無處理	25-27%	27.6	0.8	3.704	6.3	48624.93	
B1C	桂竹片	無處理	無處理	18-22%	27.6	0.5	1.958	2.52	19449.97	19766.24
B2C		無處理	無處理	18-22%	28	0.5	1.166	1.65	13106.91	
B3C		無處理	無處理	18-22%	27.5	0.6	1.754	3.49	26741.83	
C1C	孟宗竹片	無處理	碳化處理	10-15%	27.5	1	5.432	8.24	63138.3	56259.81
C2C		無處理	碳化處理	10-15%	27.3	1	4.006	5.8	43797.93	
C3C		無處理	碳化處理	10-15%	27.2	1.1	5.144	8.25	61843.21	
D1C	孟宗竹片	已去除	碳化處理	10-15%	27.7	0.9	1.133	1.69	13138.52	10560.48
D2C		已去除	碳化處理	10-15%	27.7	0.7	0.972	0.77	5986.19	
D3C		已去除	碳化處理	10-15%	27	0.8	2.066	1.7	12556.73	
E1C	桂竹筒	無處理	水煮+乾燥	9-12%	26.4	1.05	2.477	3.19	22526.76	18167.82
E2C		無處理	水煮+乾燥	9-12%	27.5	1.05	2.903	2.35	18006.67	
E3C		無處理	水煮+乾燥	9-12%	27.6	1.15	0.459	1.81	13970.02	

表36：剖竹片受壓差異以及其相對的勁度、挫曲強度以及彎曲勁度

### 3-3-2 破壞模式

針對實驗結果進行分析，竹片C在勁度以及強度上都表現相當優異，推斷經過碳化後的竹片在強度上可以有效提升，彎矩勁度上也同時上升，但由於強度提升，脆性也較A試體高，經過對比，未碳化的孟宗竹片在韌性表現上較碳化後的孟宗竹片優異許多；試體B為桂竹，其厚度較孟宗竹薄了約0.5cm，在強度表現上並不理想，彎矩勁度也較孟宗竹低；D試體雖為孟宗竹，但其裁切的寬度較A與C試體少了2cm，挫曲強度及彎曲勁度皆為五種材料中最低的；E為桂竹原竹材料，其強度與勁度表現上與B桂竹片相近，推測桂竹本身較孟宗竹薄且軟，因此挫曲強度皆較弱。





A 試體正面



A 試體反面

(a) A 組試體



B 試體正面



B 試體反面

(b) B 組試體





C 試體正面



C 試體反面

(c) C 組試體



D 試體正面



D 試體反面

(d) D 組試體



(e) E 組試體

圖110：竹片受軸壓力破壞後之變形

### 3-4-1. 竹片四點抗彎試驗結果



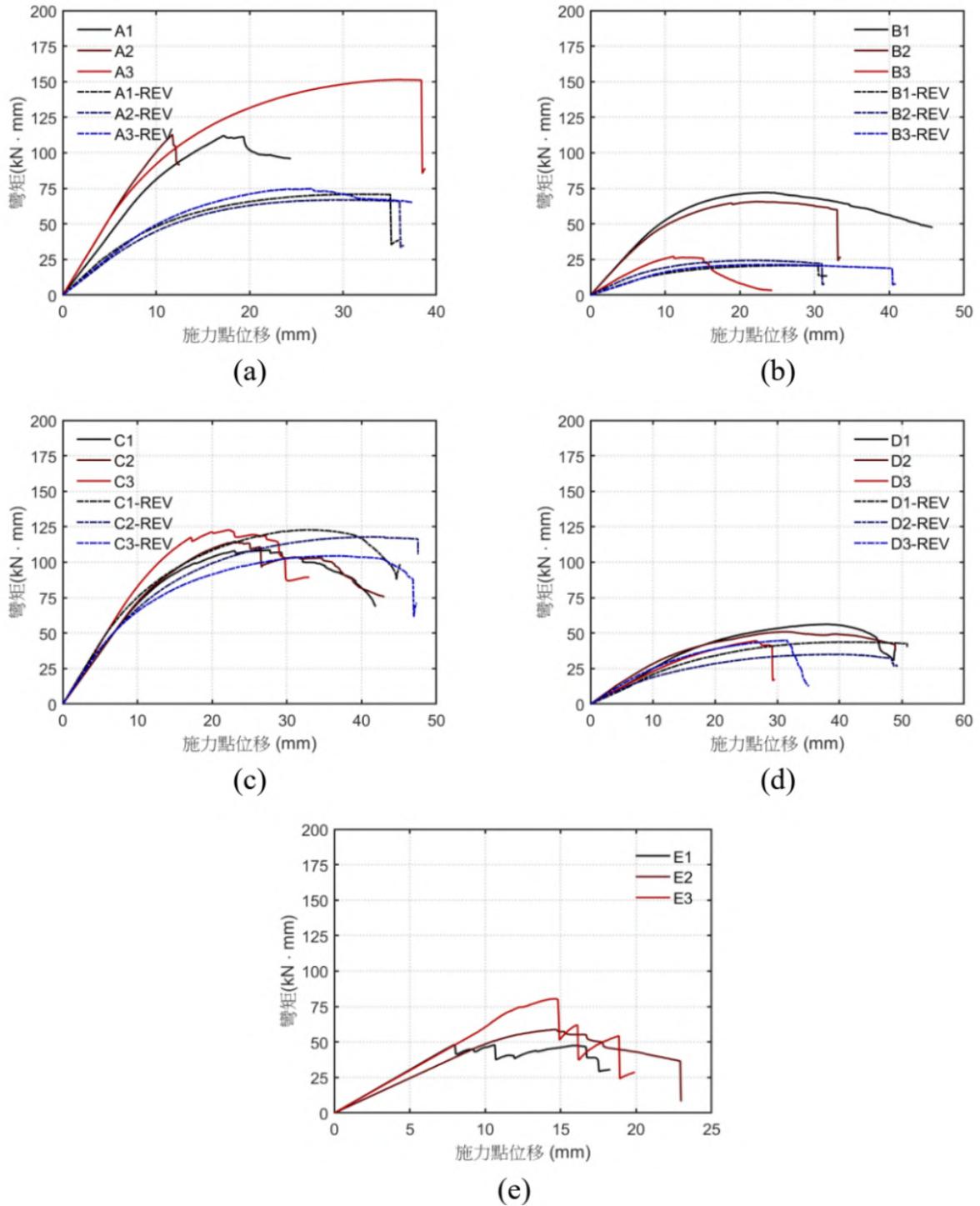


圖111：竹片受四點抗彎下的彎矩與位移關係圖

(a) 孟宗竹片（無乾燥處理，去除竹節）；(b) 桂竹片（無乾燥處理）；(c) 孟宗竹片（碳化處理）；(d) 孟宗竹片（碳化處理，去除竹節）；(e) 桂竹筒（水煮+乾燥）。





抗彎試體	種類	受力方向	竹長 (cm)	厚度 (cm)	重量 (g)	竹寬 (cm)	彎矩強度 (kN mm)	平均彎矩強度 (同一受 力方向) (kNmm)	平均彎矩強度 (全部) (kN mm)	平均等效 彎曲勁度 (kNmm <sup>2</sup> )	平均失效彎 矩曲率 (同 一受力方向) (1/m)	平均失效彎矩曲率 (全部) (1/m)	建議設計曲率極限 (安全係數 = 5) (1/m)
A1	孟宗 竹片	皮上肉下	29.8	1.9	175	5	112.09	125.49	98.24	51477.5	2.438	1.91	<b>0.38</b>
A2		皮上肉下	29.8	1.2	173.1	5	112.87						
A3		皮上肉下	30	0.7	102.7	5	151.51						
A1-REV		皮下肉上	30	0.7	106.1	5	71.05	70.98					
A2-REV		皮下肉上	30	0.7	98.5	5	66.98						
A3-REV		皮下肉上	30	1.2	178.7	5	74.92						
B1	桂竹 片	皮上肉下	29.8	0.6	100.8	5	72.23	55.1	38.69	19766.24	2.788	1.96	<b>0.39</b>
B2		皮上肉下	29.8	0.5	93.6	5	65.75						
B3		皮上肉下	30	0.5	48.5	5	27.31						
B1-REV		皮下肉上	30	0.5	39.8	5	20.89	22.28					
B2-REV		皮下肉上	30	0.5	46.5	5	24.42						
B3-REV		皮下肉上	30	0.5	44.1	5	21.53						
C1	孟宗 竹片	皮上肉下	29.5	0.9	107.2	5	108.66	115.36	115.23	56259.81	2.05	2.05	<b>0.41</b>
C2		皮上肉下	29.5	0.9	117.3	5	114.69						
C3		皮上肉下	30	1	128.9	5	122.73						
C1-REV		皮下肉上	30	1	130.5	5	122.83	115.1					
C2-REV		皮下肉上	30	1	126.6	5	117.92						
C3-REV		皮下肉上	30	1	124.7	5	104.54						
D1	孟宗 竹片	皮上肉下	29.4	0.7	64.3	3	56.39	50.72	46.01	10560.48	4.803	4.36	<b>0.87</b>
D2		皮上肉下	29.9	0.7	61.8	3	51.09						
D3		皮上肉下	30	0.8	65.6	3	44.67						
D1-REV		皮下肉上	30	0.8	67.9	3	43.79	41.29					
D2-REV		皮下肉上	30	0.7	68.6	3	35.11						
D3-REV		皮下肉上	30	0.8	69.5	3	44.96						
			竹長 (cm)	半徑 (cm)	重量 (g)								
E1	桂竹 筒	-	29.9	1.05	46.7		48.05	62.48	98.24	18167.82	3.439	3.439	<b>0.69</b>
E2		-	29.9	1.05	46.9		58.84						
E3		-	30	1.15	53.9		80.56						

表37：剖竹片受彎差異以及其相對的勁度、彎矩強度以及彎曲勁度

### 3-4-2. 破壞模式

由以上實驗結果，孟宗竹的C試體在彎矩強度以及彎曲勁度皆為最高，且無論是竹皮在上或下，其彎矩強度相近，判斷經碳化處理後的孟宗竹片，整片竹子濕度統一，使無論朝那一個方向進行彎曲其彎矩強度皆較A試體高；桂竹片B試體在強度上都較孟宗竹低許多，判斷桂竹片本身厚度較薄，在彎矩強度上並不顯著；但若桂竹成D試體的筒狀形，彎矩強度以及彎曲能力都較好，若以極限設計曲率作為選擇，桂竹原竹仍較桂竹片好。

下圖為五種試體在受四點抗彎試驗後的破壞情形，紅線為裂縫示意，C試體竹肉在上之抗彎試驗時，C1-rev以及C2-rev經過抗彎下壓將近45mm下，竹片皆完整無損，沒有任何裂縫產生，C3-rev之劈裂裂縫是儀器下壓近50mm的最後幾秒才破壞，因此C試體在抗彎試驗中數據及實體竹片表現都相當優異；D組如圖表數據，韌性表現良好，D2-rev以及D3-rev沒有產生任何裂縫。

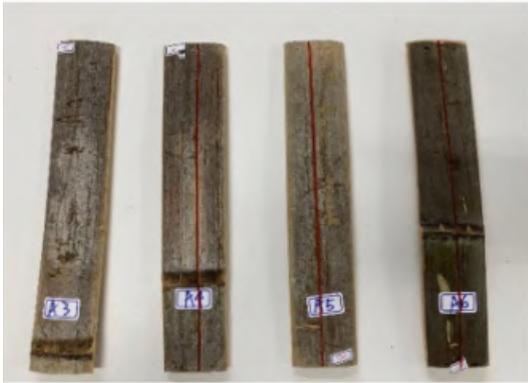




A1, A2 正面



A1, A2 反面



A3, A1rev-A3rev 正面



A3, A1rev-A3rev 反面

(a) A 組試體



B1, B2 正面



B1, B2 反面





B3,B1rev-B3rev 正面



B3,B1rev-B3rev 反面

(b) B 組試體



C1, C2 正面



C1, C2 反面



C3,C1rev-C3rev 正面



C3,C1rev-C3rev 反面

(c) C 組試體

圖112：竹片受四點抗彎破壞後之變形





### 3-5. 結論

綜述以上，孟宗竹片C試體在抗壓以及抗彎試驗中的數據表現皆最為突出，然而由於孟宗竹本身較厚，彎曲勁度相當高，並不容易進行彎曲；孟宗竹C試體經碳化後，原先認為由於水分的去除，竹片強度會升高，脆性因此提升，但經抗彎試驗後的部分C試體仍有無裂縫的結果產生，未碳化的孟宗竹卻皆有裂縫發生；判斷有可能因A試體的孟宗竹片去除了竹節，韌性降低，因此就算本身濕度較高，彎曲表現並沒有較碳化後的高。

此外，在實驗過程中可以發現未碳化的竹子在裂縫出現後，竹葉以及竹肉皆逐日長出黴菌，判斷因台灣地處濕熱環境，竹子本身的水分因裂縫與環境接觸而產生發霉現象，在竹構設計上可能須考慮原竹的發霉現象，以避免黴菌侵蝕竹子造成強度下降以及美觀上的缺陷。

### 4. 四次實作紀錄與檢討（接頭細部設計與交叉點設計、軸向續接設計）

	材料	投影面積	幾何處理方法	施工方法	實作紀錄與結論
第一次	混合竹種 (新鮮桂竹、 新鮮孟宗、 乾燥桂竹、 乾燥孟宗)	10*10(m)	彎曲型態主導 (compass method)	攤平組裝後 再彎曲成形	無法自立
第二次	混合竹種 (新鮮桂竹、 新鮮孟宗、 乾燥桂竹、 乾燥孟宗)	5*5(m)	彎曲型態主導 (compass method)	逐一固定 各方向竹材成形	1. 可自立且結構穩固 2. 整體型態無變形
第三次	乾燥處理 孟宗竹	6*6(m)	攤平型態主導 物理模擬找形	攤平組裝後 再彎曲成形	1. 結構可自立 2. 整體型態塌陷形變 3. 二次補強加入 斜撐與強化基座
第四次	乾燥處理 孟宗竹	10*10(m)	攤平型態主導 物理模擬找形	攤平組裝後 再彎曲成形	1. 結構可自立 2. 加入斜向支撐 3. 基礎處增加延伸桿 件防止底部形變 4. 材料層數增加

表38：四次彈性網殼實作規劃概要





#### 4-1. 第一次實作

第一次實作基於10x10公尺的覆蓋面積，參數程序上，本計畫利用物理模擬找型的方式，並且待配「圓規法」切分曲面，厚度設定為各方向皆為一層，採用四種混合竹種，包含新鮮桂竹、新鮮孟宗竹、乾燥處理桂竹、乾燥處理孟宗竹。

本次參考文獻中彈性網殼做法，由攤平狀態，提起中心點，並逐步由中心向外固定交叉點，並再達到一定的彎曲度後固定基座處，加上貨物綁帶提供對角線方向的推力，並搭配六名人力逐漸向材料推至定位。

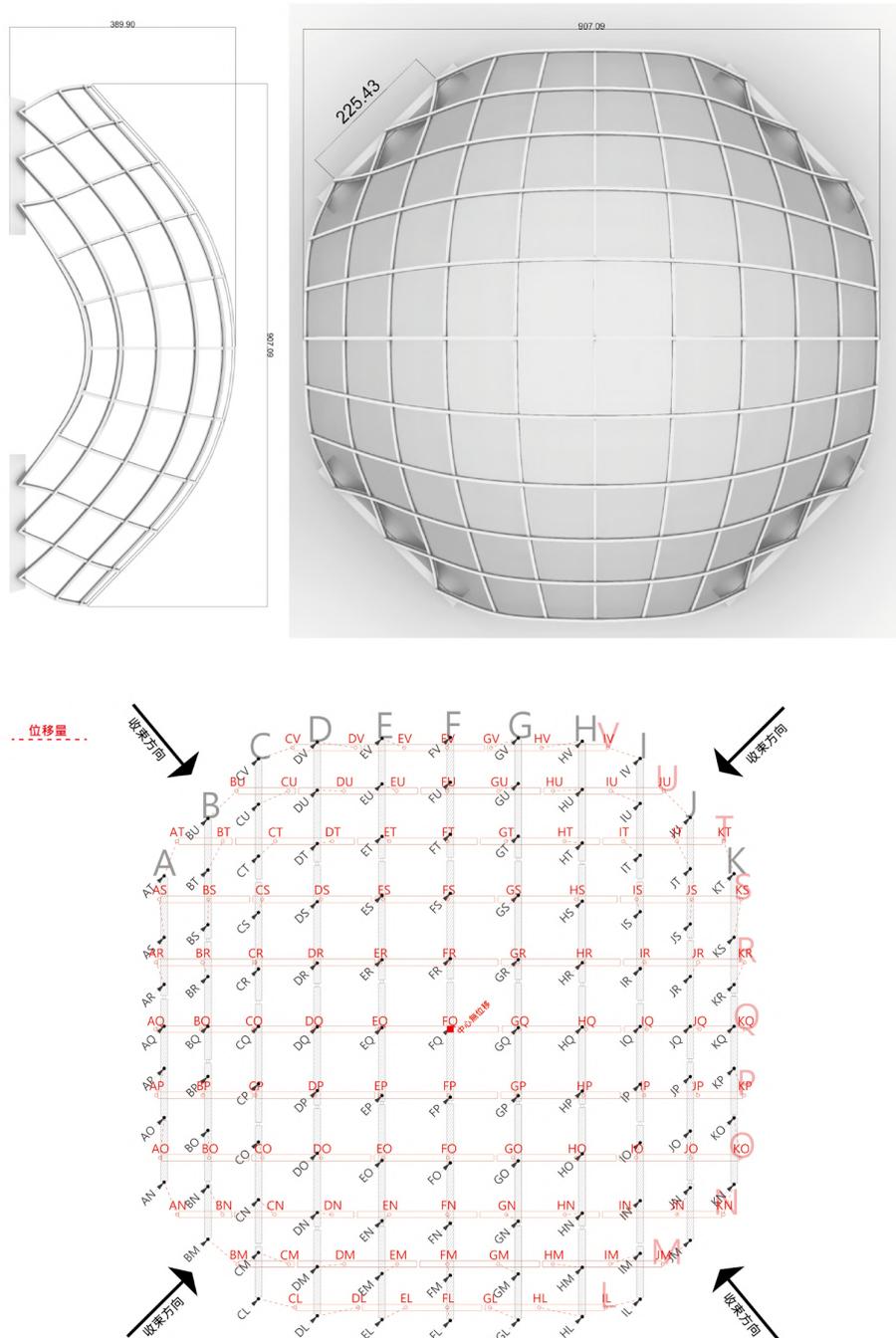


圖113：彈性網殼第一次實作結構尺寸與交接點定位上視圖





#### 4-1-2. 續接設計與交叉點設計

本次實作過程中，一共針對以下若干幾種方式進行局部續接設計實作，並且在實作時，採用單點螺栓固定並配合束帶加固螺栓兩側，固定方式為竹片續接下，疊加於原材料之下。

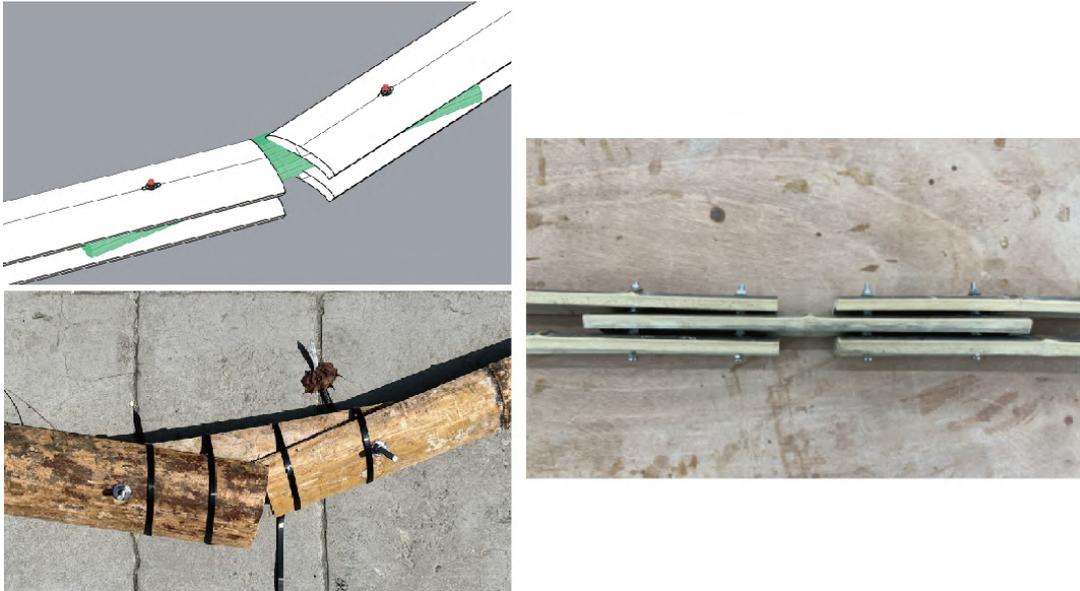


圖114：彈性網殼第一次實作軸向續接方式說明

試驗結論：

(1)因為該續接設計為單固定點，在材料彎曲成型產生「三維曲率時」，接點在平行斷面方向產生分立，以固定點為支點形成旋轉點。

(2)塑膠束張力不足以提供第(1)點提到力量之反力，多處產生鬆動或斷裂。

(3)再十字交叉處同樣遇到束帶約束力不足的問題。

固定方式為以契口式續接，可以提供利用原材料連接的好處，使曲線盡可能接近原材料性能表現，然而該設計會使竹材可能因為軸向的滑動而鬆脫，後續實作應加以改良或者改變做法。

#### 4-2. 第二次實作

第二次實作吸取第一次實作經驗，使用單層跨距，縮小跨距尺寸為6x6公尺。在數位參數設計階段，同樣使用物理模擬找型與圓規法的方式處理造型與網格分割，而本次實作改進了固定點續接方式，使用兩個帶有間距的螺栓固定，避免續接點因局部旋轉產生曲線不延續，重則產生折線影響型態或產生進一步破壞。



1123424



另外本次實作因為希望驗證6x6公尺跨距的可行性，以及續接點的局部改進，因此使用第一次實作的原構件進一步改造，依然維持混合竹種的配置，而在工序方面，本次實驗採用逐一加疊材料的方式組裝。

#### 4-2-1. 細部設計

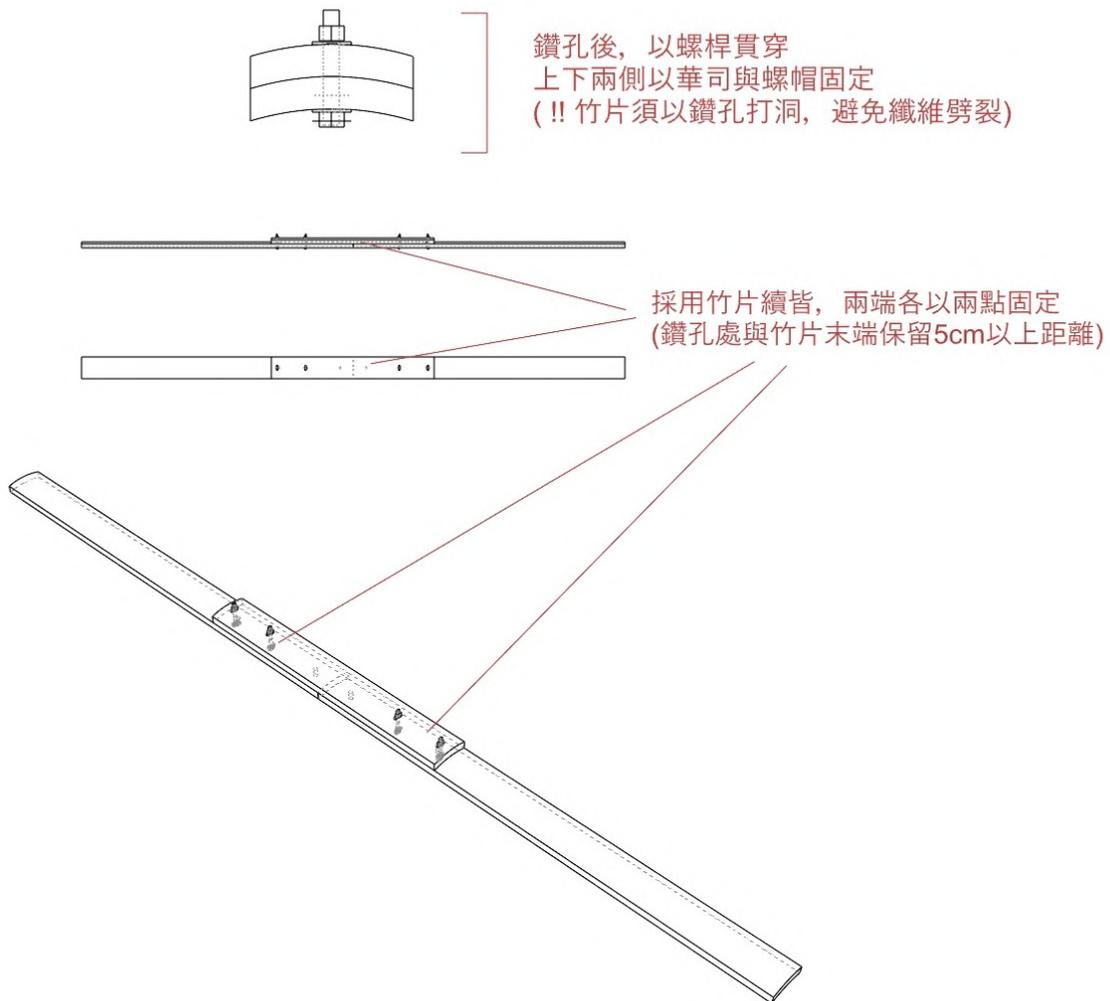


圖115：彈性網殼第二次實作十字固定方式

續接設計形式	竹片續接，疊加於原材料之下
交叉點設計形式	螺桿/牙桿固定
基礎設計形式	竹材框座與沙包固定
斜撐設計形式	無斜撐

表39：彈性網殼第二次實作細部設計形式





#### 4-2-2. 小結

本次實作驗證單層竹材可以在6x6公尺的跨距自立，同時也驗證透過自身竹材加上兩根以上的螺桿固定方式的可行性。

針對相對不同的工序，經四次實作試驗比較後，以先做好整體攤平固定後再做吊裝定位成型的方法為佳：逐一定位雖然在施工上較接近傳統的施工方式，也就是將材料一一固定到定位，像是堆積木一樣逐漸完成整體；然而由於彈網殼的成型特性就是所有的點位會不斷的在施工過程中移動，同時因為所使用的彈性材料特性、逐一加入構件的方法使固定點的不確定性更高，容易產生局部誤差影響整體造型的情形。

材料方面，本次實作採用混合竹種，經放置約兩個月後，整體構造明顯於桂竹的部分產局部拉斷以及局部因為扭轉而斷裂，經補強後雖然整體構造持續維持自立，但已經明顯影響視覺美觀，安全上也有所疑慮。以上經驗也被帶入往後實作中，採用材料性能更好的孟宗剖竹。



圖116：彈性網殼第二次實作建造過程

#### 4-3. 第三次實作

藉由前幾次實作的經驗，對網殼結構進行改良之外，同時也對實作的流程做了分析與優化：

(1)在網殼的成形過程中，需要相對固定的頂點使網殼自然垂下，但中央頂點的單點受力太大，容易斷裂，而吊裝的施作方式無法適用於該場地，故這次先確定了四個頂點的位置與高度後以240公分高的木塊將其頂起來，之後再將四個底邊移動到正確的位置。





(2)以雙層竹片拼接為一個單元，增加網科線段單元的強度。

(3)重新設計了斜撐方式，希望以更簡單的形式去維持網格曲面的形狀。

#### 4-3-1. 實作設計圖與施工規劃

第三次彈性網殼實作的設計尺寸為：平攤網格為9x9公尺，成形後內部空間為6x6公尺，最大垮距為8.5公尺，高度約為2.8公尺。

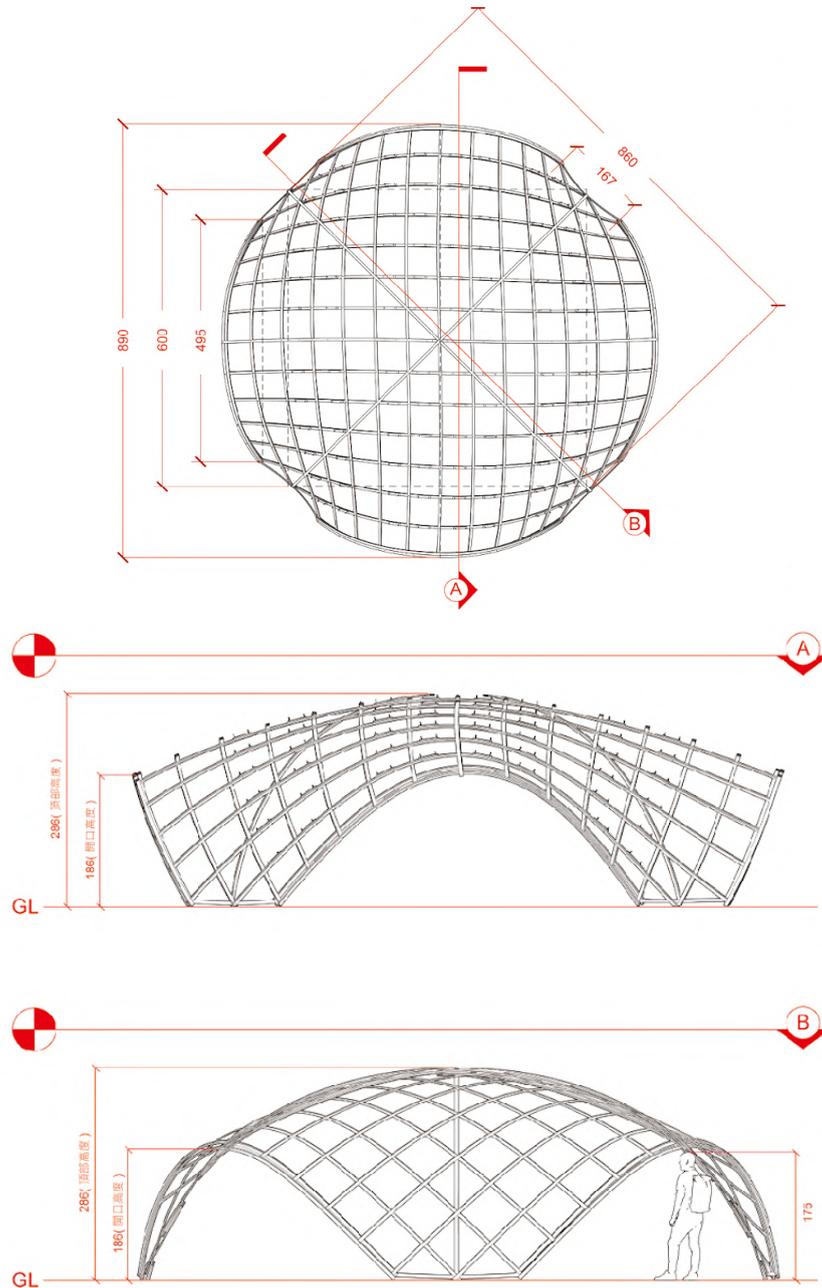


圖117：彈性網殼第三次實作設計圖面





#### 4-3-2. 續接設計流程

建立正交網格的單元存在三種竹片長度，分別為4條658cm、4條784cm、22條924cm，每個單元的形成是透過將這些竹片上下拼接而成，形成兩層竹片，依過去的經驗顯示，在建造過程中，量測、裁切和點位的固定是非常耗時耗工的步驟，因此，本次建造的分段標準以最小化工作步驟為目標，力求使用最少工序並充分利用長度的重複性，計算最適合的分段方式採用三種竹片長度的最大公因數，即658、784、924的最大公因數。

此外，還有其他條件需要考慮：

(1) 運來的竹片材料長度有限制，最長長度為240cm，因此單個分段的長度不能超過此限制。

(2) 為避免交叉點碰上續接點，需要調整分段方式。

(3) 續(2)，需要確保兩邊分段對稱，以實現受力平均分佈，這也是分段過程中的一項考慮因素。

將這些條件納入Grasshopper的腳本計算中，將網格橫向排列兩層於下層，縱向排列兩層於上層，此外也可事先確認交叉定位點，透過電腦參數輔助，能夠得到最佳的分段方式，以達到最少工序、充分利用竹片長度的目標。

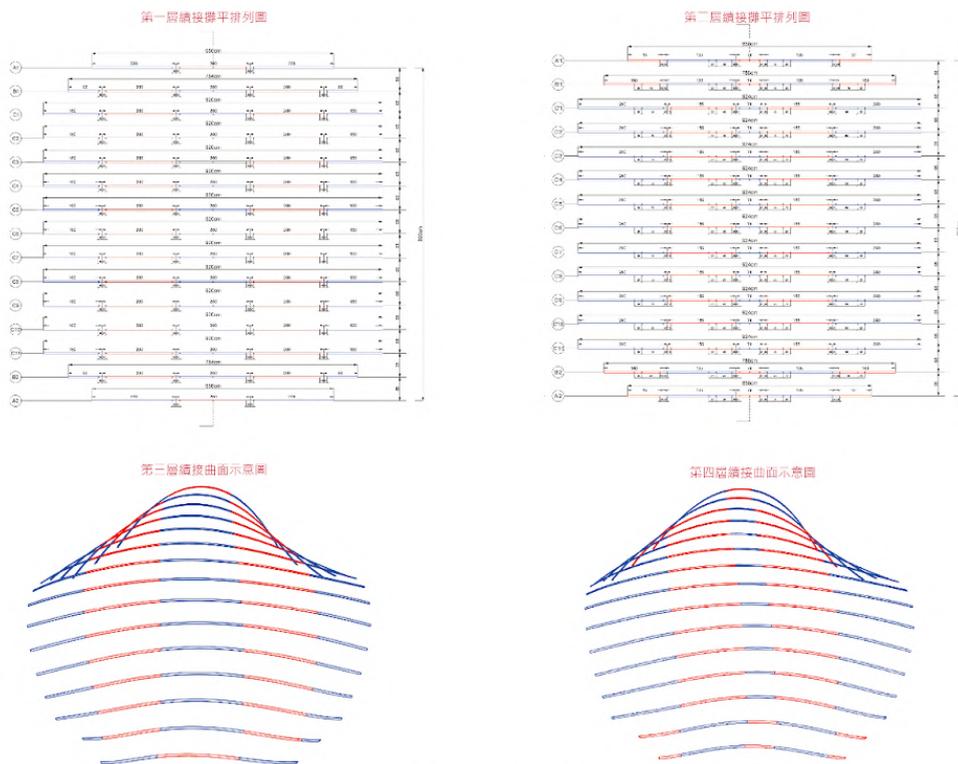


圖118：彈性網殼第三次實作剖竹片定位



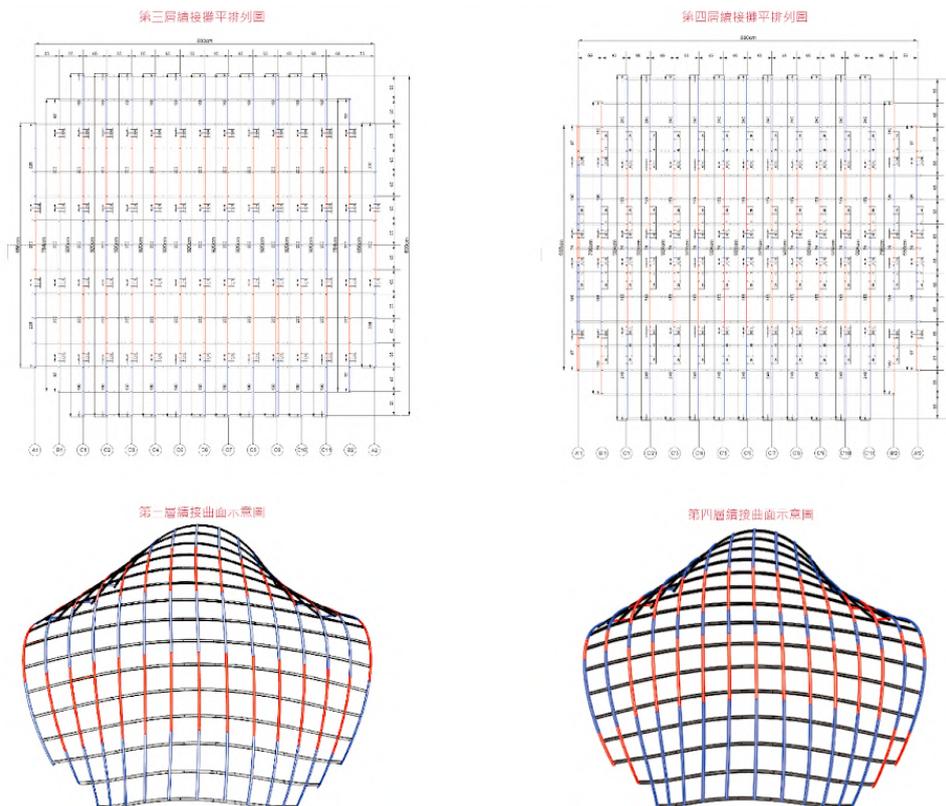


圖119：彈性網殼第三次實作於電腦中以GH預先確認十字交接定位點



圖120：彈性網殼第三次實作竹材拼接示意圖

交叉點設計形式	螺桿/牙桿固定
基礎設計形式	沙包
斜撐設計形式	加厚四個外框的拱型 並在內部做兩個十字交叉拱以增加頂點的支撐力

表40：彈性網殼第三次實作細部設計形式





#### 4-3-3. 小結

在8x8公尺的跨距情境下，本次實作雙層竹材的材料強度顯得有些不足，經深入分析後發現主要問題源於雙層竹材的抗彎能力不足，這導致中心區域的下陷現象，在所有的斜撐安裝前，無法暫時移開支撐用的木塊，此外，為減少人力消耗，本次實作方案採用了將續接點與交叉點分開的固定方式，以便於實際操作，然而這也帶來了大量的固定點位，總共有567個螺栓穿過竹片，大幅削弱了材料的結構完整性。

針對材料方面，本次實作統一採用孟宗竹，其厚度約為0.5cm，透過前次經驗意識到，實作過程中主要耗費在材料丈量，因此本次特別針對施作流程進行優化，並提出了竹材分段腳本，以縮短材料處理時間，然而目前腳本無法根據每一根單元進行不同的分段，使得斷面都落在同一條線上，除此之外，仍有許多其他條件這次沒有帶入，如材料強度、竹節位置等等，期望未來能夠進一步進行更全面的規劃，解決竹構設計中勞力密集的挑战。



圖121：彈性網殼第三次實作第一階段紀錄





這次實作中將結構撐起後，發現構造物最高處未如電腦設計中預定的曲線，因材料偏軟而呈現塌陷，暫時使用四根角料撐起（如上圖），經與土木系袁宇秉教授討論後，規劃加入四向斜撐（如下圖）。

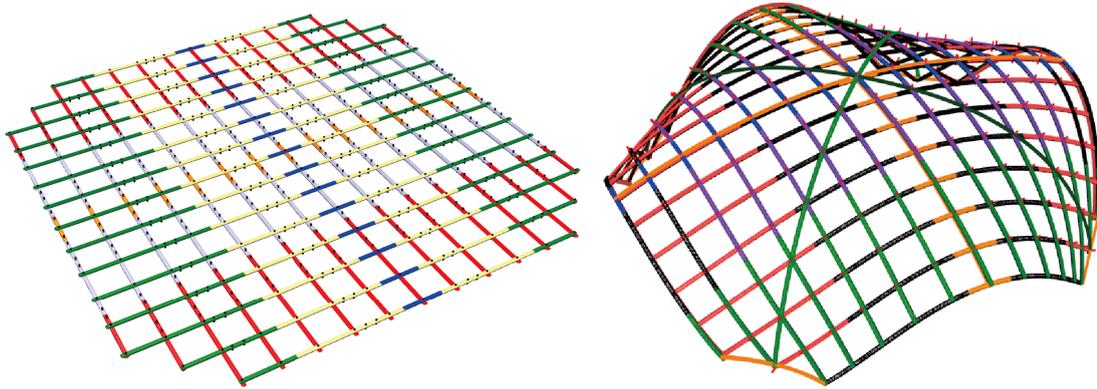


圖122：彈性網殼第三次實作分段與螺栓位置圖

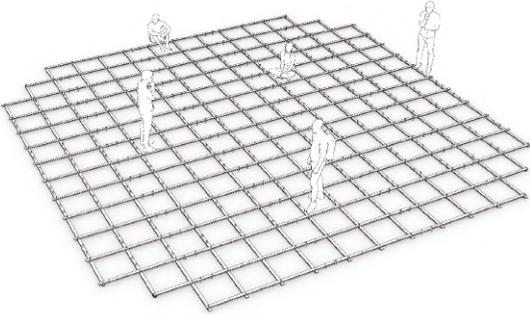
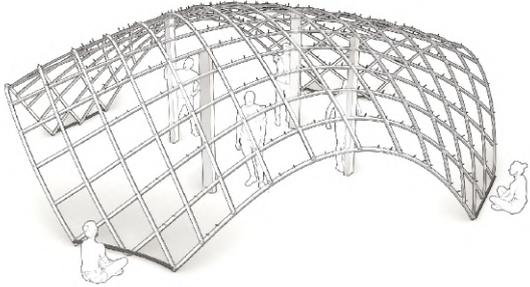
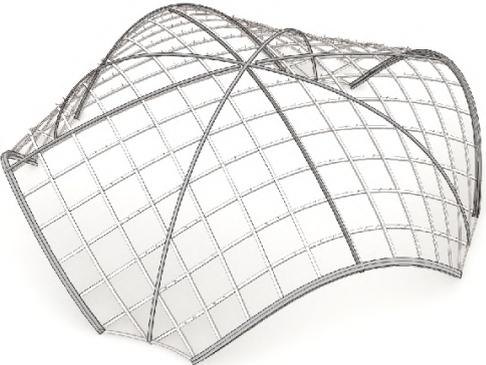
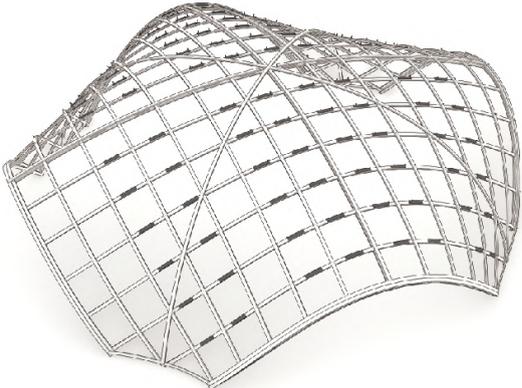
1. 放樣與確定點位，通常是最耗時的步驟	2. 以240公分高的木塊將四個頂點撐起，再將四個底邊移動到正確的位置並固定底邊
	
3. 加厚四個外框的拱型，並在內部做兩個十字交叉拱以增加頂點的支撐力	4. 檢討時發現朝上的續接點會翹起，故再加一層竹片鎖固
	

表41：彈性網殼第三次實作工序說明圖





使用竹青向外的單層剖竹片，加強外框層數、於天頂四向加入斜撐後，目視大為改善原先塌陷情況，唯因金屬固件數量過多，剖竹單元出現局部劈裂情況，因此針對部分進行綁紮補強，下圖為於Rhinoceros中進行之第二階段補強設計建模及實作照對比，圖中可見補強後天頂曲率較接近設計圖。

在8x8公尺的跨距情境下，本次實作雙層竹材的抗彎強度不足以致塌陷，未來可考慮於應力集中處增加複合材料（如金屬）或增加剖竹片層數，加強抗彎能力，另外，此次十字交叉與軸向續接處皆過於密集，孔洞增加導致劈裂可能削弱整體結構強度，應於後續實作版本中再行改進。

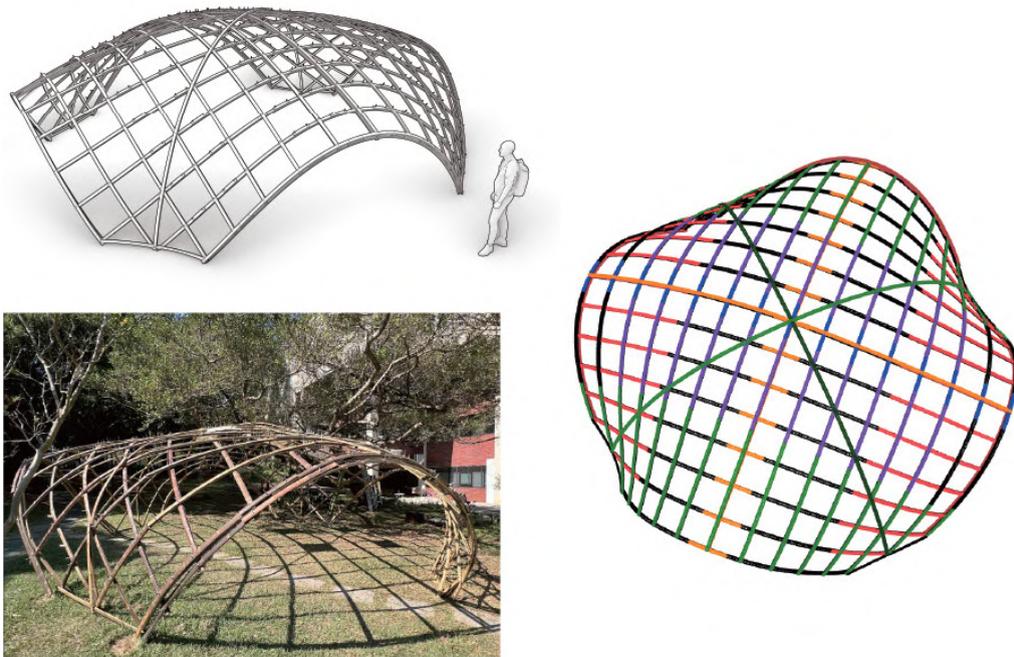


圖123：彈性網殼第三次實作電腦設計與補強實作對照

在第二階段的補強中，在頂部使用了交叉拱，以及邊框雙層加固的方式，來強化整體結構，可以看出經過補強後，已經可以去除下方支撐，但仍然有以下幾個形變：螺栓和穿孔密集，引致劈裂；十字拱下凹，斜撐材或許可選擇抗彎度較佳材料；移除假支撐角料後天頂些微下陷，但框與接地四處皆無位移。





圖124：彈性網殼第三次實作第二階段細部補強





圖125：彈性網殼第三次實作補強之細部形變狀況

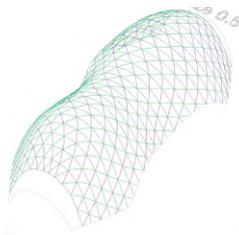
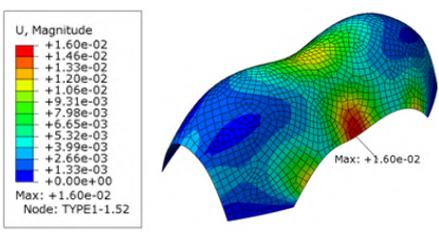
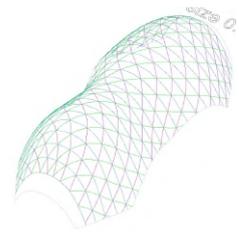
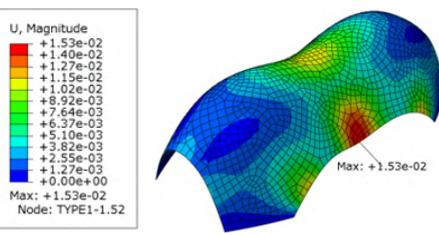
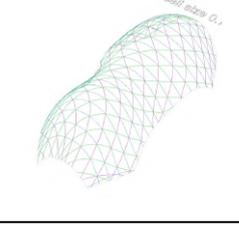
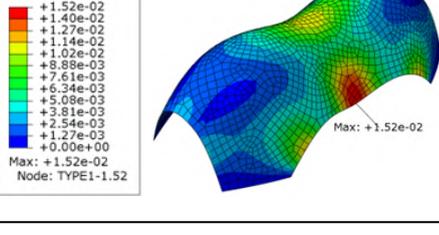




#### 4-4. 第四次實作

##### 4-4-1. 前期設計型態探討

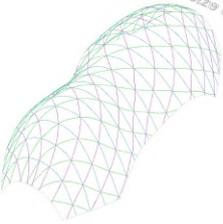
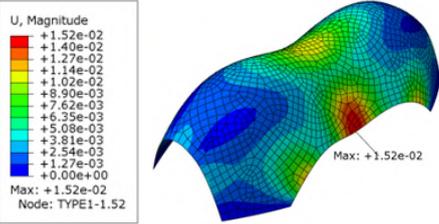
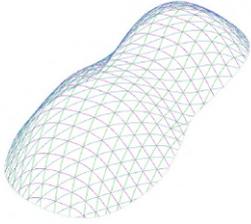
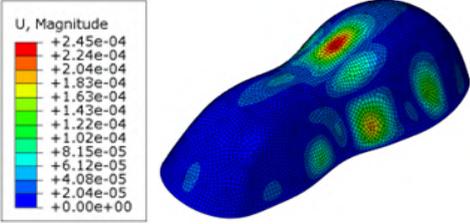
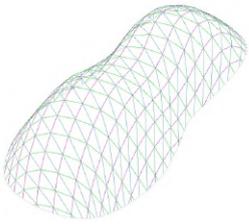
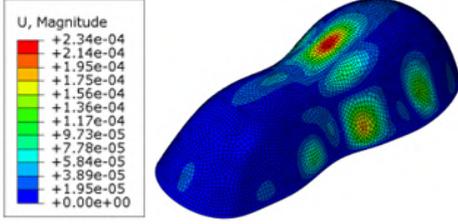
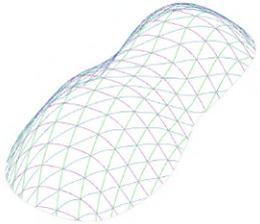
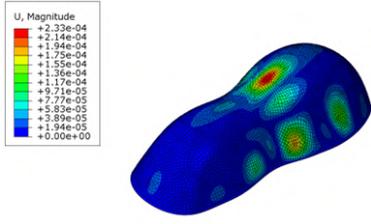
針對第四次時做前期設計階段，總共在參數環境中提出四種型態設計，同時搭配不同程度的網格密度共同探討，其中有兩種採用「彎曲型態主導」的設計方法，另外兩種採用「攤平型態主導」的設計方法。

型態		結構分析模擬結果	特徵描述
方案 1： 未採用			具兩個相對高點，所有的面為雙曲面，由全落地方案側面開口形成四個落地點
	整體尺寸(m)：10*5	局部材料分析：材料側轉過大	
	網格尺寸(m)：0.5*0.5		
方案 2： 未採用			
	整體尺寸(m)：10*5	局部材料分析：材料側轉過大	
	網格尺寸(m)：0.6*0.6		
方案 3： 未採用			
	整體尺寸(m)：10*5	局部材料分析：材料側轉過大	
	網格尺寸(m)：0.7*0.7		

彎曲型態主導

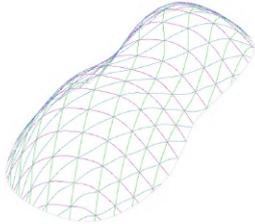
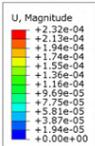
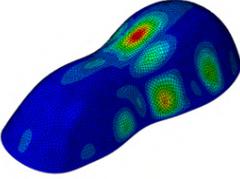
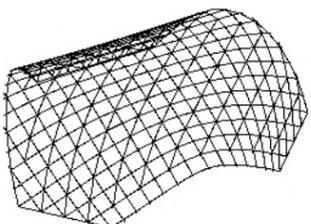
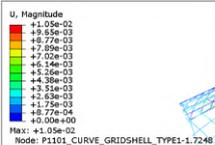
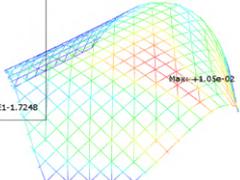
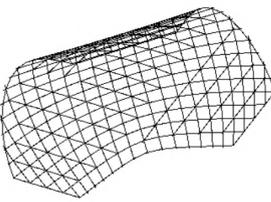
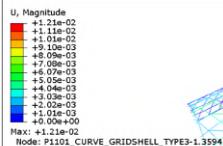
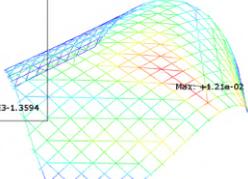
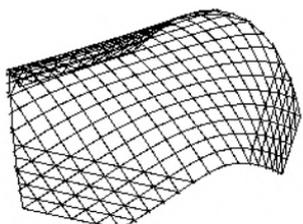
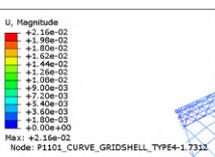
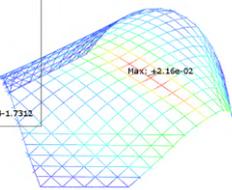




方案4： 未採用			具兩個相對高點，所有的面為雙曲面，邊緣完全落地
	整體尺寸(m)：10*5	局部材料分析：材料側轉過大	
網格尺寸(m)：0.8*0.8			
方案5： 未採用			
	整體尺寸(m)：10*5	局部材料分析：材料側轉過大	
網格尺寸(m)：0.5*0.5			
方案6： 未採用			
	整體尺寸(m)：10*5	局部材料分析：材料側轉過大	
網格尺寸(m)：0.6*0.6			
方案7： 未採用			
	整體尺寸(m)：10*5	局部材料分析：材料側轉過大	
網格尺寸(m)：0.7*0.7			





方案 8： 未採用		 	攤平型態主導
	<p>整體尺寸(m)：10*5</p> <p>網格尺寸(m)：0.8*0.8</p>	局部材料分析：材料側轉過大	
方案 9： 未採用		 	在相同的網格型態配置下，試圖以不同的斜撐配置，測試結構變位情形
	<p>整體尺寸(m)：10*10</p> <p>網格尺寸(m)：0.6*0.6</p>	整體材料分析：OK	
方案 10： 未採用		 	
	<p>整體尺寸(m)：10*10</p> <p>網格尺寸(m)：0.6*0.6</p>	整體材料分析：OK	
方案 11： 未採用		 	
	<p>整體尺寸(m)：10*10</p> <p>網格尺寸(m)：0.6*0.6</p>	整體材料分析：OK	





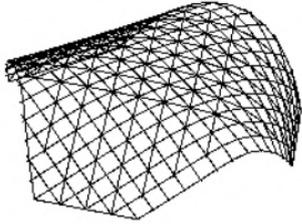
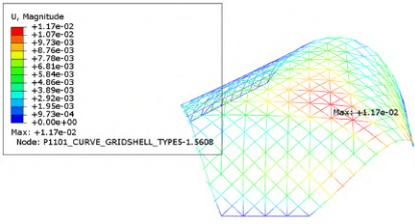
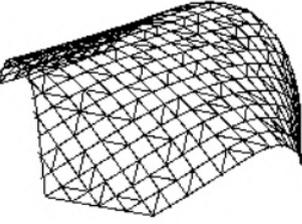
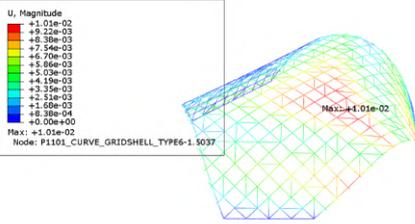
方案 12 ： 採 用			整體材料分析：OK
	整體尺寸(m)：10*10 網格尺寸(m)：0.6*0.6		
方案 13 ： 未 採 用			整體材料分析：OK
	整體尺寸(m)：10*10 網格尺寸(m)：0.6*0.6		

表42：彈性網殼第三次型態方案建構與模擬檢討

#### 4-4-2. 後期型態定案

經過分析與研究後，第四次型態以「方案12」做為最後繼續發展的項目，由於「方案12」具有適當的材料形變狀況（包含扭轉、側轉），且參考符合設計極限曲率、符合材料於安全範圍內彎曲的前提。

此外，該方案在成型性質上透過「攤平型態主導」的方法，使用物理模擬找型配合基礎位置的調整，找到符合設計情境的形態配置，並且由於該方案的成型邏輯與第三次實作相同，因此也具有交叉驗證之機會。



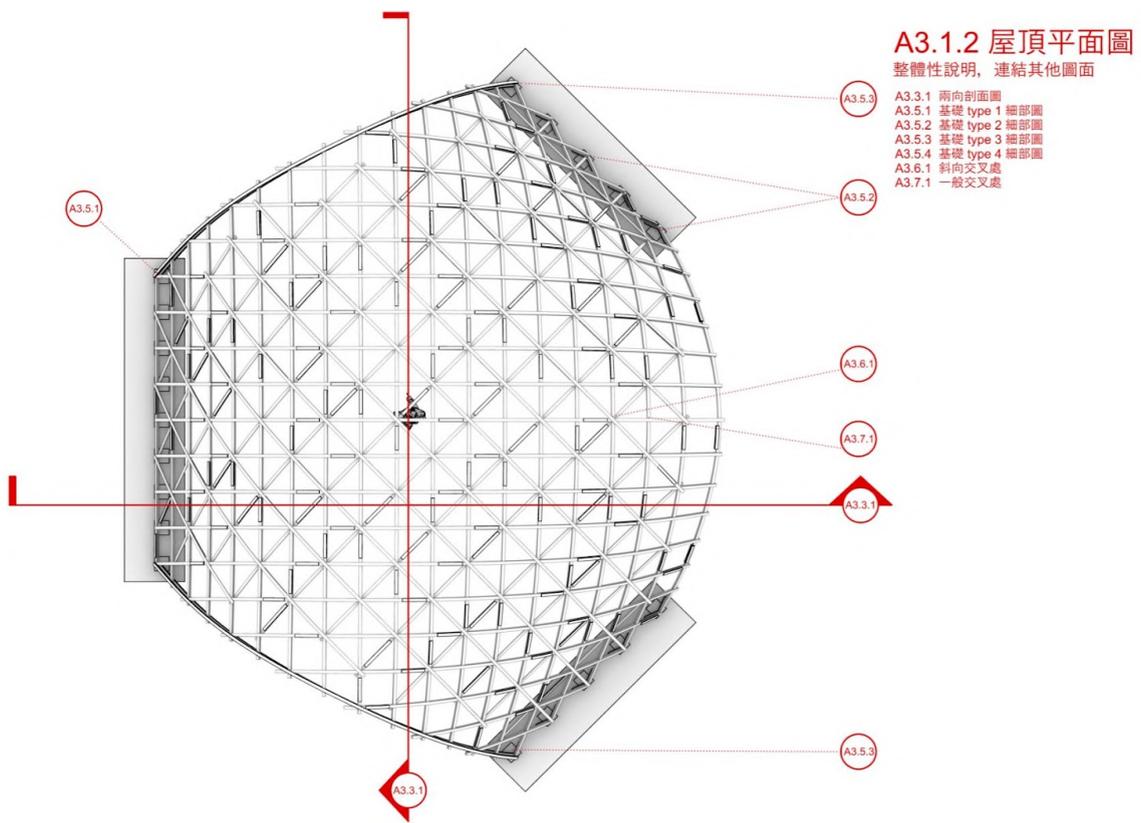


圖126：彈性網殼第四次實作上視圖

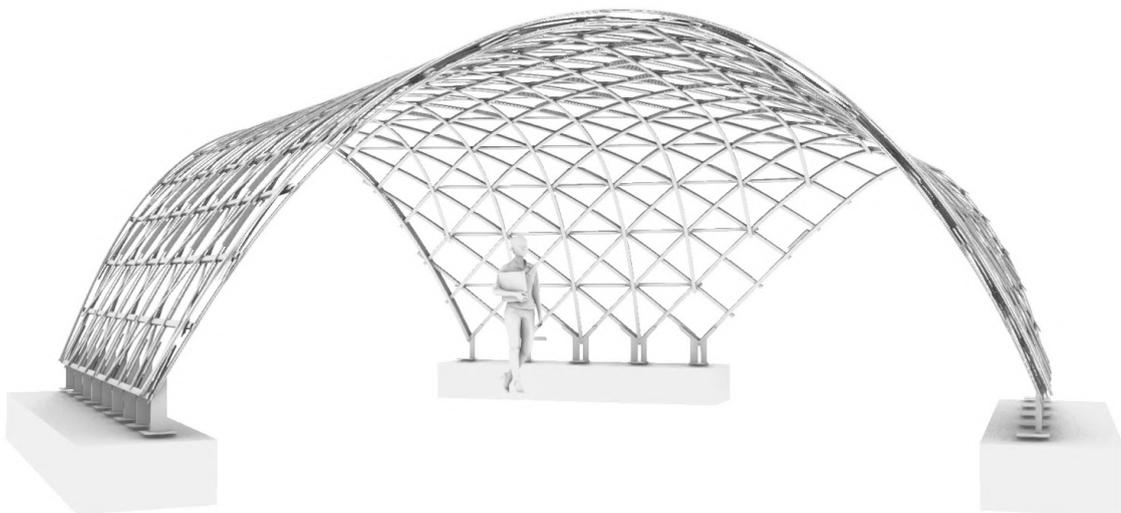


圖127：彈性網殼第四次實作透視圖





在第四次實作中，除了參數模擬外，亦進行了1:10結構模型製作，並搭配載重塊模擬結構行為：以1:10的結構模型搭配各單位重量為560公克的載重塊，針對「方案12」做加重測試，該比例下於實際大小之重量具100倍的比例關係。

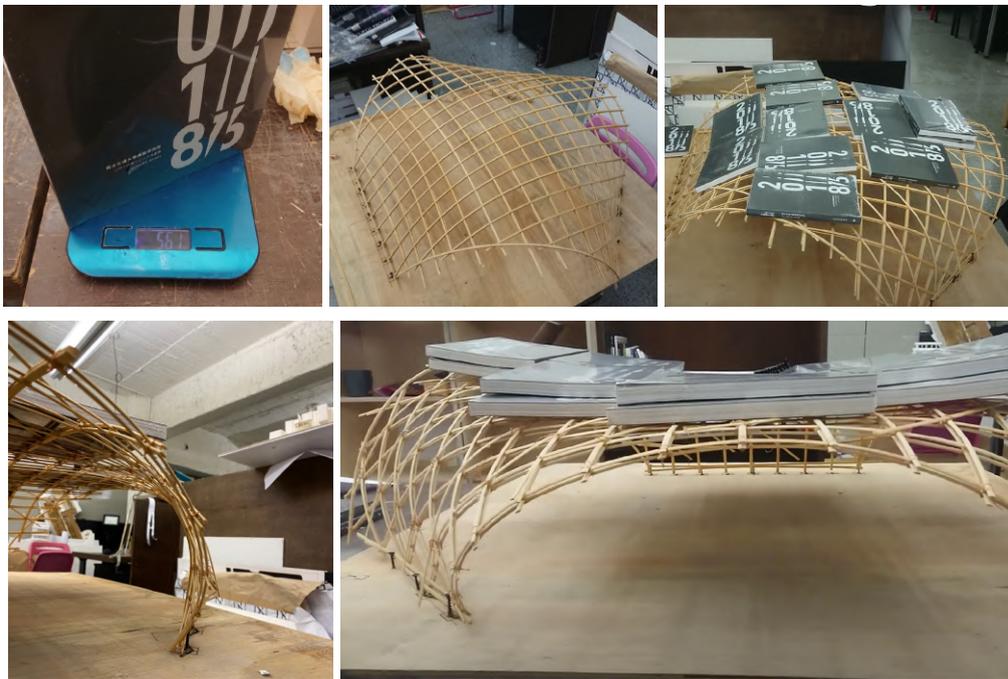


圖128：彈性網殼第四次實作1:10模型進行重量分布測試

(1)1:10的等比例縮小模型材料：竹材的模擬，採用竹肉部分的竹條製作，因此在等比例下、強度上相對弱於實際應用於實作的竹材具竹皮組織，寬度斷面5mm、斷面深度約1.5~2mm；交叉接合絞接點的部分，採用強力膠接合，搭配金屬線絞緊，在等比例下，強度會相對弱於1:1實作中牙桿/螺栓接合的方式；而針對模擬基礎的水平推力，使用整片木板加上螺絲定位基礎位置，使彎曲後的材料於外推路徑上受限於線型排列的螺絲所定義之邊界。

(2)載重模擬：經過在參數化設計平臺中針對材積的計算，整體竹材重量大約為400公斤重，其中在將這筆數字乘上1.5至2.0的安全係數計算，因此 $400 \times 1.5 = 600$ 、 $400 \times 2.0 = 800$ 為均佈載重，而在1:10的模擬中，使用單本重量為560g的書本，模擬1:10實際重量56kg。

(3)模擬情境：針對局部集中、完全分散之均佈載重測試，結果顯示，結構在模擬預定600公斤的均佈載重下，可以於合理的變形量下自立，基本上符合設計需求，並且結構可以在20本均佈重量下（實際載重1120公斤），保持自立，材料不破壞，但會產生大變形。

另外本次測試也因為基礎位置的不同斜撐配置，產生不對稱的形變，此處也應該在後續設計中調整為對稱的斜撐設計為佳。





#### 4-4-3. 續接與交叉點設計

本次實作過程中，一共針對以下若干幾種方式進行局部續接設計實作：

(1)竹片續接，疊加於原材料之上：採用與原材料相同的竹材續接，於連結處兩側分別鑽兩個孔，採用短螺栓固定避免層間碰撞。

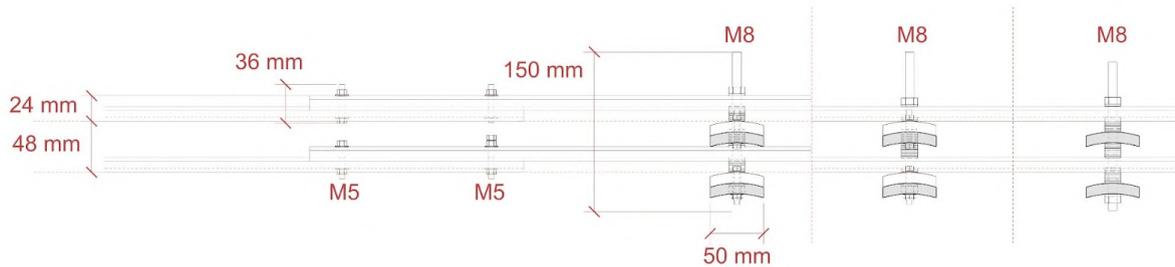


圖129：彈性網殼第四次實作三種交叉點高度關係

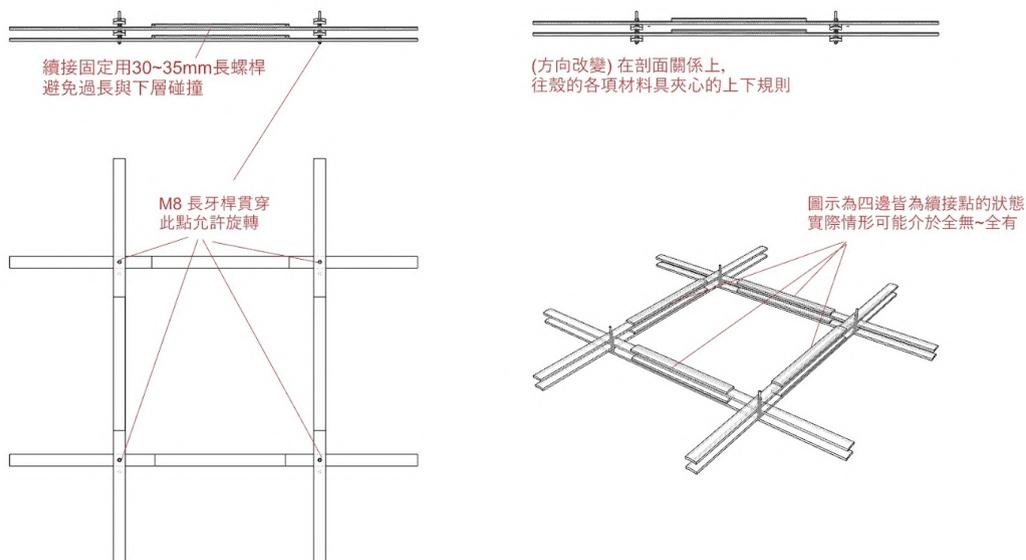


圖130：彈性網殼第四次實作組裝參考

(2)金屬片續接，疊加於原材料之上：試驗分別採用一般白鐵與高彈性鋼片，續接材料疊加於原材料上，透過增減金屬片數量，使受力後的形變量達到與竹材相同的狀態，使彎曲曲線連續。



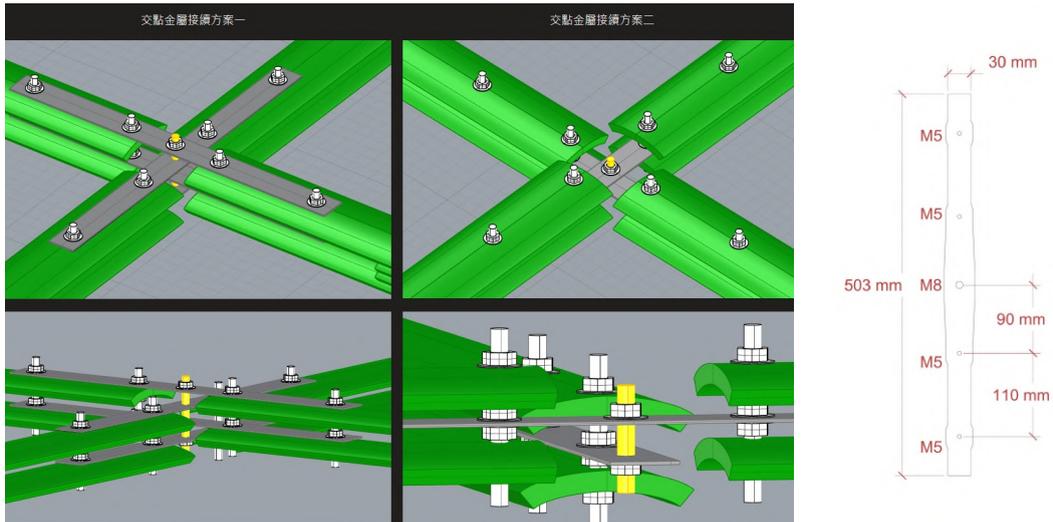


圖131：彈性網殼第四次實作初步十字續接討論

(3)金屬片續接，上下加疊於原材材料：試驗分別採用一般白鐵與高彈性鋼片，原材被上下夾心於續接材料中，透過增減金屬片數量，使受力後的形變量達到與竹材相同的狀態，使彎曲曲線連續。



圖132：彈性網殼第四次實作軸向續接prototype





經試驗觀察，採用高彈性鋼片的(2)&(3)皆可以完成材料續接的設計要求，且延續彎曲曲率，然而本次實作考量到型態並非複雜造型，且應用備料過程的邊角料即可以完成「(1)竹片續接」的方案，故決定與本次實作後續採用(1)的方法對材料做續接，搭配參數化平台Rhino/Grasshopper針對材料量做優化，做成對材料利用效率高的備料長度組合，使建築在相同的跨距內可以應用更少的材料消耗建造。

交叉點的部分與續接點共同考量，因為彈性網殼為一個規則的網格系統，因此將續接點設計於網格邊線上，避免續接點與交叉點的重疊而增加不必要的厚度，除此之外，交叉點採用牙桿固定，並且根據續接材料與原材料個高度關係，使材料盡可能緊密配置。

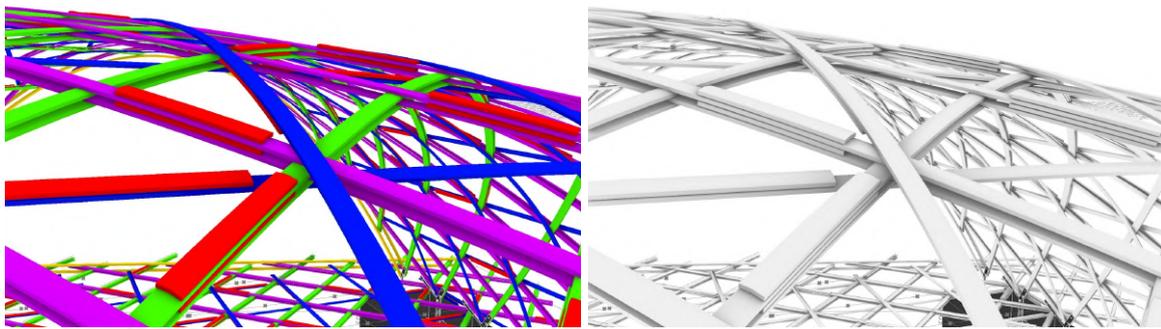


圖133：彈性網殼第四次實作交叉點說明圖

#### 4-4-4. 基礎設計

基礎為完全固定的設計，除了提供彈性網殼水平推力，也固定三軸方向的旋轉，透過金屬材料雷切出片狀材料後焊接組裝，斜面與竹材落地角度切面共面，該角度可於參數化平台Rhino/Grasshopper中得知，並與竹材之間在兩處以上鑽孔以牙桿固定，接合方向則從外部接合竹材，使工序上更加便利。

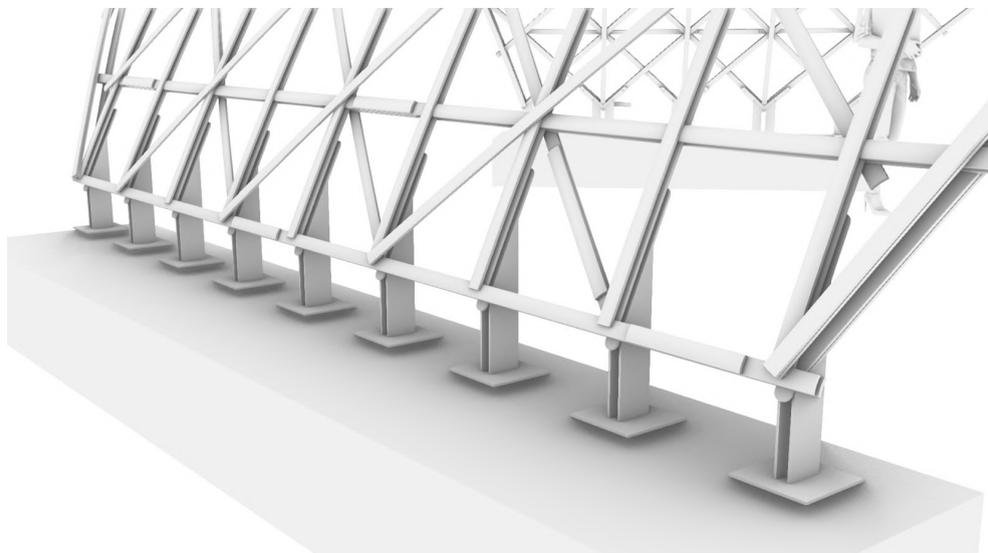
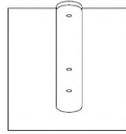
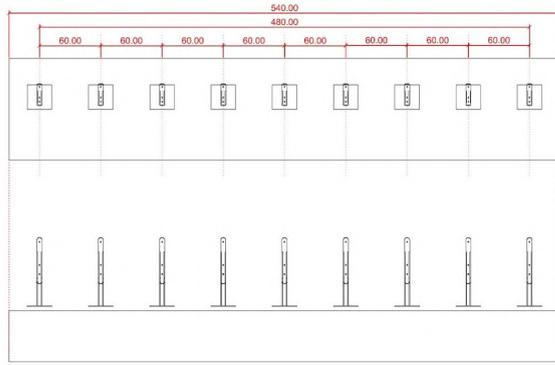


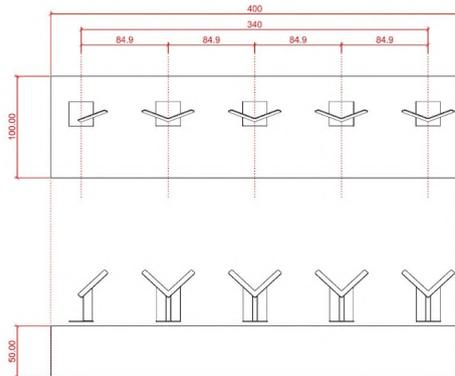
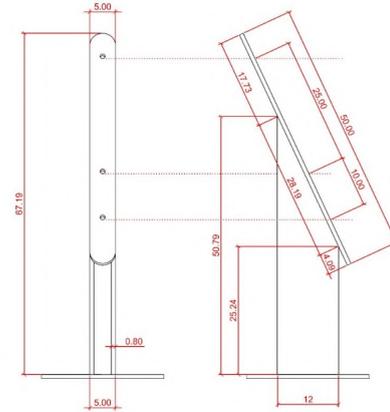
圖134：彈性網殼第四次實作基座設計規劃





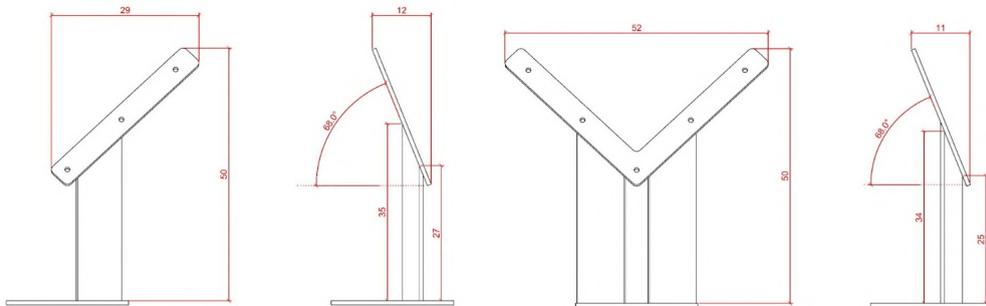
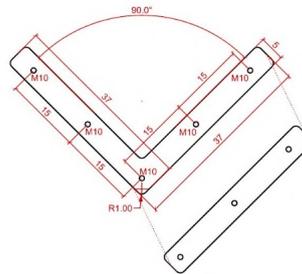
### A3.5.1 基礎設計1

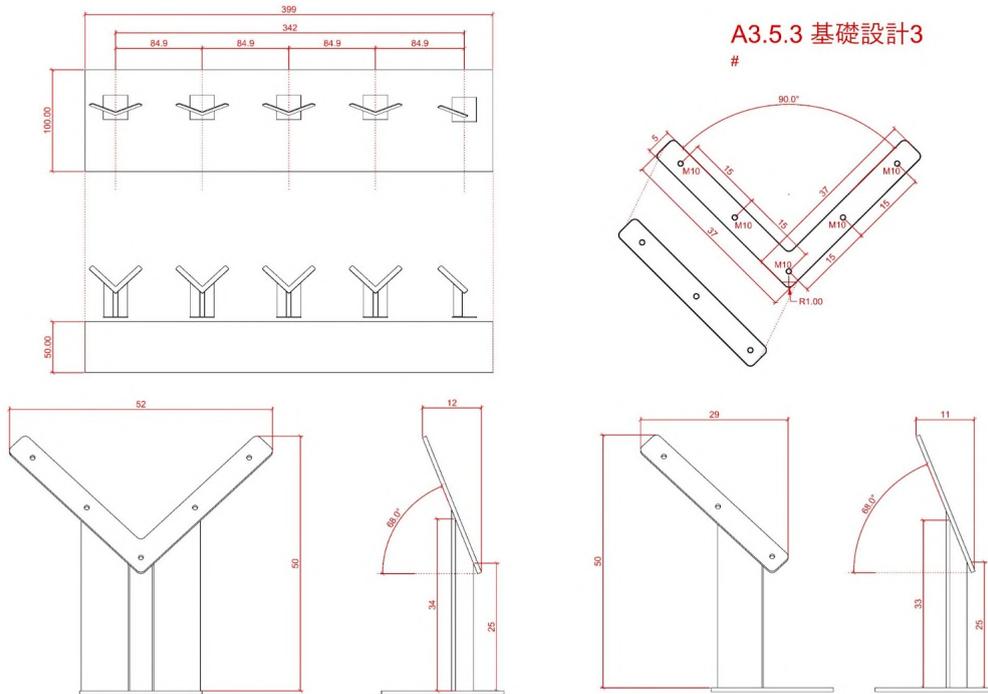
#



### A3.5.2 基礎設計2

#





A3.5.3 基礎設計3

圖135：彈性網殼第四次實作基礎設計

#### 4-4-5. 斜撐設計

斜撐應用竹材在彎曲成型後，於現場逐一固定彈性網殼的網格（cell）形狀，配置採用兩組相互鏡射斜撐，讓45度角的兩個基座附近的配置對稱，另外也讓斜撐在斜背與頂端交叉，增加殼體斷面厚度，有助於減少頂部與斜背處的形變。

在原始網格結構中加入斜向配置，交叉點設計使用長牙桿上下突出於材料表面，原則上最厚處是6層竹材（2個斜向各1層+正交方向各2層），並由於自然材料本身厚度不均，牙條長度依現場判斷最為準確。

#### 4-4-6. 上下層長度差異

上下層差距將透過將交叉位置的孔洞鑽大解決，例如鑽m9~m10的洞配m8的螺桿或牙條，而本次實作在Rhino/Grasshopper中檢查上下層長度最大差距大約4cm左右，且這屬於極端值，其餘多數落在0~2cm之間，此外，一條竹材上的開孔數落在10個以上，稍微鬆動的pin點就足以吸收掉這些誤差，另外，若使用太多滑槽也會有整體的強度下降的風險。

而斜撐方向的材料，設計上使用短滑槽，斜向支撐主要功能是固定cell的狀態，使網格角度固定，在第三次實作中發現網殼彎曲後的形態下，原始的交叉點會跑位，並與斜撐預鑽的固定點產生一小段偏移，這時候加入斜向支撐耗時耗力，所以若提前於斜撐上加入短滑槽並預留安裝空間，將在後續施工時更能增加效率、降低現場施作的成本。





圖136：彈性網殼第四次實作基礎開挖與基座鐵件



圖137：彈性網殼第四次實作基礎灌漿與基座鐵件固定





圖138：彈性網殼第四次實作攤平組裝



圖139：彈性網殼第四次實作吊裝

#### 4-4-6. 實作小結

第四次實作的跨距較大，考量到第三次施作時的塌陷檢討，在吊裝同時已加上局部斜撐，並於大基礎外側增加剖竹片，提高兩側支撐強度減少壓力產生的形變，而此次剖竹片寬度不一，材料受力狀況不平均，同時因本次跨距較寬、受力相對前三次更大，施作過程中剖竹片發生不少斷裂狀況，且續接部分因穿孔數量過多造成斷裂，臨時補強了許多竹片。





總結以上實作心得，當構築尺度變大後，整體受力情況會隨之改變，若明年施作仍維持大跨距，需改良續接方式，減少過多穿孔，並增加單元桿件厚度與層數，以及加強基礎高度與增加收邊框體的層數。



圖140：彈性網殼第四次實作兩側增加剖竹片





圖141：彈性網殼第四次彈性網殼實作完工紀錄





## 陸、結語

在本計畫的研究項目中，包括通用竹構造接頭研發、曲線竹結構單元開發、彈性網殼設計與構築程序，在今年度分為期中與期末兩個階段，分別進行了文獻研究與案例分析、基礎參數設計、階段性實作等內容。

在文獻研究與案例分析的項目中，本計畫深入研討之下建立了廣泛的知識與數據庫：竹構造接頭的部分探討了傳統與新式工法的差異性，並對其進行了接頭類型及實際案例兩個項目來作分析，使本計畫打造新式金屬零件接頭之研究方向更加明確；而在竹集成材彎曲加工的部分，首先以製程來分類，共可歸納出數種不同的集成材製作方式，並進行小規模試做與強度試驗，作為後續探討可能與本計畫未來研究相關之加工技藝；最後在彈性網殼的部分，由於其特殊的構造形式，是需要參數與實作兩者之間相輔相成，因此由實作施工案例及參數構築程序案例兩個項目著手，理解各種材料於彈性網殼發展上所需研發之細部構造與設計，並回頭檢視竹材於此特殊結構上可能對應的處理程序與方式。

經過文獻整理與分析後，本計畫在竹接頭及彈性網殼展開了基礎的參數設計：竹構造接頭部分已經規劃了三大類型的接頭設計，經由電腦輔助之下進行了初步2D及3D圖面繪製，並且涉及材料測試等內容，將持續優化精進，後續也將針對不同構造形式加以改良，以期達成以簡便、輕量化的施工模式，讓竹材能夠更易於推廣於建築與空間構造上；而在彈性網殼的參數細部設計部分，則是針對其數位模擬程序進行了一系列的程式撰寫與研究，並且同時以實體模型來作相關驗證，其中涵蓋結構力學分析與相關演算法模擬評估等，這類程序得以更好的評估竹材於參數工具中將如何進行模擬，後續將對其自然特性數據展開評估，能夠確認竹子與彈性網殼結構之間如何進行相關型態、接點、構造等部分之設計與優化。

而本年度的下半年啟動了階段性實作的測試，包括竹構造接頭兩種類型的雛形製作以及相關強度試驗，經由經驗及測試數據得到反饋，得以優化接頭的設計；在竹集成材彎曲加工的項目中，則與外部廠商進行產業合作，從材料選定到加工製程等，經過詳細探討之下，已有了初步的元件形式實作，亦有針對各式集成材類型進行抗壓、抗彎等測試，以求得其強度數據並加以分析比較；在彈性網殼部分，則前後進行了四次大型的構築實作，從單層、雙層到細部構造，經過數次參數程序模擬到局部構造實作的過程，亦進行了多次了整體結構模擬，力求讓數位參數與實體構築之中取得良好的平衡點。

在今年度的計畫執行過程中，前期的文獻研究與參數設計均很順利地進行，而在下半年，三個項目均落實到實作階段時，便會出現一些待解決的問題：例如材料選用、加工類型、施工方式等，各個項目的細節都需要對外合作與溝通，在過程中不斷修正與改良。





實作是這個計畫必不可少的一環，明年在構築部分也會更投入更多人力，因此也期望之後的計畫裡可以針對今年度所遇到的問題加以檢討，並在未來的設計與實作過程中優化。

綜合以上關於文獻研究、基礎參數設計及階段性實作等三個部分的成果，本計畫得以更好的往下推進與深入探討，以利明年度計畫內容的展開：承接今年度的研究成果，明年度將著重於實體構築的研究。

除了基本的參數設計、實體研發製作及強度測試等規劃之外，三個項目都會涵蓋到竹構築的實作內容，包含竹接頭的其他類型研發以及實體構築應用、彎曲竹集成材的大型元件及曲面構造、彈性網殼的材料轉換及大尺度構築等內容，藉由1:1的竹構作品建構出設計研究與實體構築之間的橋樑。

除此此外，本計畫亦會整合「竹構設計人才培育暨2024竹論壇總企劃」，預期規劃與現行業界之建築師、設計師合作，推廣研究成果，在學術及實務兩個層面最大限度地研發竹材於產業技術上的發展。





## 柒、參考文獻

- [1]林家荷(2015)，《竹材應用於薄膜式完全張力體之研究》，國立成功大學碩士論文。
- [2]張三酉(2021)，《竹片應用於撓曲主動空間結構之研究》，國立成功大學碩士論文。
- [3]鄭少耘(2022)，《台灣常用竹構接合型式分類與結構性能試驗》，國立成功大學碩士論文。
- [4]鄭中杰(2022)，《應用拓樸優化於竹集成材板狀結構之形態構成》，逢甲大學碩士論文。
- [5]覃祥輝(2003)，《結構用竹集成曲樑製造與彎曲性質之評估》，國立屏東科技大學碩士論文。
- [6]林文川(2003)，《竹材製造2x4結構用材之研究》，國立中興大學碩士論文。
- [7]湯春安(2020)，《側壓竹集成材力學性能試驗研究》，中南林業科技大學碩士論文。
- [8]袁平(2020)，《側壓竹集成材梁受彎性能試驗研究》，中南林業科技大學碩士論文。
- [9]陶鈞、謝力生、劉嘉誠、沈夢陽(2020)，《結構用竹集成材研究進展》，中南林業科技大學。
- [10]王逸凡(2020)，《竹構輕盈化策略探索——記“結竹為軒”設計建造教學》，東南大學建築學院。
- [11]王榮進、杜怡萱(2022)，內政部建築研究所建築工程技術發展與整合應用計畫(二)協同研究計畫第1案「竹構造建築物設計技術研究」資料蒐集分析報告。Impact properties of bamboo bundle laminated veneer lumber by preprocessing densification technology
- [12]社團法人臺灣竹會(2020)，《從竹子到竹房子：給所有人的竹構築指南》
- [13]行政院農業委員會林務局、社團法人臺灣竹會(2022)，2022構竹林鐵新銳展。
- [14]曾子亭(2016)，《竹材之適應性接頭與竹構造數位模擬程序》，國立交通大學碩士論文。
- [15]莊閔傑、鄭森松、李佳如、張上鎮(2009)，《利用曲木加工技術開發設計竹集成材家具》，國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告，頁125-132。
- [16]劉正字、李文昭、王恩華(1992)，《竹木材積層膠合製作高級製品及結構建材(I)竹材基本物理機械性質及膠合性之探討》，林產工業，11(1)，19-29。
- [17]劉正字、李文昭、王恩華(1993)，《竹材積層膠合製作高級製品—數種竹材積層膠合用膠合劑之特性及其膠合強度變化之探討》，林產工業，12(3)，51-63。
- [18]馬子斌、翟思湧、王紹萊、黃清吟、陳欣欣(1980)，《層竹家具製造技術進一步改進之研究》，林業試驗所試驗報告第329號。
- [19]于文吉(2019)，《我国重组竹产业发展现状与机遇》，世界竹藤通讯，17(3)，1-4。





- [20] 李琴、华锡奇、戚连忠 (2001), 《重组竹发展前景展望》, 竹子研究汇刊, 20(1), 76-80。
- [21] 李琴、汪奎宏、华锡奇等 (2001), 《重组竹生产工艺的初步研究[J]》, 人造板通讯, 6-9。
- [22] 莊閔傑 (2018), 《定向竹重组板材製造及其性能評估》, 國立中興大學博士論文。
- [23] 傅万四、黄军 (2007), 《酚醛树脂制造竹定向刨花板的工艺探讨》, 木材工业, 21(2), 7-9。
- [24] 杜怡萱 (2019), 《竹構接頭設計委託試驗期末報告》。
- [25] Jules J. A. Janssen, (2000), Design and Building with Bamboo, Beijing: International Network for Bamboo and Rattan (INBAR).
- [26] Lionel du Peloux, (2018), Elastic Gridshell (hardcover).
- [27] Manuel Guaita Fernández and Almudena Majano-Majano, (2021), Gridshells in Recent Research—A Systematic Mapping Study
- [28] Vaulot, Laélia Kim-Lan, (2016), Form-finding of elastic gridshells
- [29] D'Amico, Bernardino, (2015), Timber grid-shell structures : form-finding, analysis and optimisation
- [30] Nogueira, Cláudia de Lima, (2013), Science of bamboo material and technology application in glued laminated cross beams composite section
- [31] Maria Izabel de Mello Barreto, (2018), Cross Laminated Timber and Bamboo, composto de madeira e bambu
- [32] Hu, Y., Xiong, L., Li, Y., Semple, K., Nasir, V., Pineda, H., ... & Dai, C, (2022), Manufacturing and Characterization of Wide-Bundle Bamboo Scrimber: A Comparison with Other Engineered Bamboo Composites. Materials, 15(21), 7518
- [33] Sharma, B., & van der Vegte, A, (2020), Engineered bamboo for structural applications. In Nonconventional and vernacular construction materials (pp. 597-623), Woodhead Publishing.
- [34] Yang, G, (2020), Bamboo—From Raw Bamboo to Glued Laminated Bamboo Structure. Hans J Civ Eng, 9(7), 623-635
- [35] Deng, Y., Hao, Y., Mohamed, A., Wong, S. H., Tang, Y., Yuen, T. Y., ... & Zhang, H, (2023), Experimental investigation of mechanically laminated straight or curved-and-tapered bamboo-concrete T-beams. Engineering Structures, 283, 115896.
- [36] Yang, G., Ye, C., & Ye, H, (2019), Evaluation of Physical and Mechanical Properties of Glued Bamboo: A Review. Journal of Architectural Environment & Structural Engineering Research, 2(4), 29-36.





- [37] Nugroho, N., & Ando, N, (2001), Development of structural composite products made from bamboo II: fundamental properties of laminated bamboo lumber. *Journal of wood science*, 47(3), 237-242.
- [38] Yu, Y., Zhu, R., Wu, B., Hu, Y. A., & Yu, W, (2015), Fabrication, material properties, and application of bamboo scrimber. *Wood Science and Technology*, 49, 83-98.
- [39] Hu, Y., Xiong, L., Li, Y., Semple, K., Nasir, V., Pineda, H., ... & Dai, C, (2022), Manufacturing and Characterization of Wide-Bundle Bamboo Scrimber: A Comparison with Other Engineered Bamboo Composites. *Materials*, 15(21), 7518.
- [40] Deng, J., Li, H., Wang, G. et al. Effect of removing extent of bamboo green on physical and mechanical properties of laminated bamboo-bundle veneer lumber (BLVL). *Eur. J. Wood Prod.* 73, 499 - 506, (2015)
- [41] Baolu Sheng, Aiping Zhou, Dongsheng Huang, Zhen Huang. Uniaxial strength and constitutive law of parallel strand bamboo. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, (2015), 39(5): 123-128.
- [42] Architecture - Mannheim Multihalle ,  
(from:<https://mannheim-multihalle.de/en/architecture/>)
- [43] Frei Ottos Multihalle in Not ,  
(from:<https://www.marlowes.de/frei-ottos-multihalle-in-gefahr/>)
- [44] Vom Raumwunder und seinen Ingenieuren: die Multihalle in Mannheim ,  
(from:<https://baukultur.nrw/artikel/vom-raumwunder-und-seinen-ingenieuren-die-multihalle-in-mannheim/>)
- [45] Expo 2000 Japan Pavilion, Hannover ,  
(from:<https://arquitecturaviva.com/works/pabellon-de-japon-en-expo-2000-9>)
- [46] A new architectural idiom for the countryside ,  
(from:<https://www.cullinastudio.com/project-downland-gridshell>)
- [47] Du Peloux, L., Baverel, O., Caron, J. F., & Tayeb, F, (2013), From shape to shell: a design tool to materialize freeform shapes using gridshell structures. In *Design Modelling Symposium Berlin*.
- [48] Tayeb, F., Baverel, O., Caron, J. F., & Du Peloux, L, (2013), Construction of gridshells composed of elastically bended elements and covered by a stretched three-dimensional membrane. In *Structural Membranes 2013*.
- [49] Lafuente Hernández, E, (2015), Design and Optimisation of Elastic Gridshells (Doctoral dissertation, Universität der Künste Berlin).
- [50] Bouhaya, L., Baverel, O., & Caron, J. F, (2011, May), Optimisation structurelle des gridshells. In *10e colloque national en calcul des structures* (pp. Clé-USB).





- [51] Lafuente Hernández, E., Sechelmann, S., Rörig, T., & Gengnagel, C, (2013), Topology optimisation of regular and irregular elastic gridshells by means of a non-linear variational method. In Advances in architectural geometry 2012 (pp. 147-160). Springer, Vienna.
- [52] Pillwein, S., Leimer, K., Birsak, M., & Musialski, P, (2020), On elastic geodesic grids and their planar to spatial deployment. arXiv preprint arXiv:2007.00201.
- [53] Pillwein, S., & Musialski, P, (2021), Generalized deployable elastic geodesic grids. ACM Transactions on Graphics (TOG), 40(6), 1-15.
- [54] Haskell, C., Montagne, N., Douthe, C., Baverel, O., & Fivet, C, (2021), Generation of elastic geodesic gridshells with anisotropic cross sections. International Journal of Space Structures, 36(4), 294-306
- [55] Pillwein, S., Kübert, J., Rist, F., & Musialski, P, (2021), Design and fabrication of multi-patch elastic geodesic grid structures. Computers & Graphics, 98, 218-230.
- [56] 中華民國國家標準CNS 11031 (2014) 結構用集成材。經濟部標準檢驗局。
- [57] 木材產品分類與利用方式 - 卓志隆  
(<https://www.cwba-wqac.org.tw/forest-tech/index.php?action=resources-detail&id=139>)
- [58] 直交集成板 (CLT) - 楊德新  
(<https://www.cwba-wqac.org.tw/forest-tech/index.php?action=resources-detail&id=67>)
- [58] 結構用集成材 ([https://sml.pidc.org.tw/productdetail\\_tw.php?id=103](https://sml.pidc.org.tw/productdetail_tw.php?id=103))
- [59] Zhaoyan Cui a b, Ming Xu a b, Zhongfan Chen b, Jinhua Xiang b, (2018), Experimental study on thermal performance of bamboo scrimber at elevated temperatures, Construction and Building Materials. (178-187)
- [60] Impact properties of bamboo bundle laminated veneer lumber by preprocessing densification technology
- [60] 國家林產技術平臺  
(<https://www.cwba-wqac.org.tw/forest-tech/index.php?action=resources-detail&id=92>)
- [61] 林志憲、塗三賢、林振榮、楊德新 (2022), 木理角度對單板層積材之聲學、振動與力學性質影響。台灣林業科學37(2): 85-98, 2022
- [62] Bonding performance of cross-laminated timber-bamboo composites
- [63] Rogers, D. F. (2001). An introduction to NURBS: with historical perspective. Morgan Kaufmann.  
[https://books.google.com.tw/books?hl=zh-TW&lr=&id=DiyxPUiKvB8C&oi=fnd&pg=PP2&dq=nurbs+surface&ots=Vb5OZYp\\_ID&sig=3cGKk1B1q2bUMhqdWLg0zHdC\\_a0&redir\\_esc=y#v=onepage&q=nurbs%20surface&f=false](https://books.google.com.tw/books?hl=zh-TW&lr=&id=DiyxPUiKvB8C&oi=fnd&pg=PP2&dq=nurbs+surface&ots=Vb5OZYp_ID&sig=3cGKk1B1q2bUMhqdWLg0zHdC_a0&redir_esc=y#v=onepage&q=nurbs%20surface&f=false)





- [64] NURBS是非均勻有理B雲規曲線(non-uniform rational B-spline)<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%9D%9F%E5%9D%87%E5%8C%80%E6%9C%89%E7%90%86B%E6%A0%B7%E6%9D%A1>
- [65] 可展曲面  
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%8F%AF%E5%B1%95%E6%9B%B2%E9%9D%A2>
- [67] Lawrence, S. (2011). Developable surfaces: their history and application. Nexus Network Journal, 13, 701-714.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s00004-011-0087-z>
- [68] Piker, D. (2013). Kangaroo: form finding with computational physics. Architectural Design, 83(2), 136-137. <https://doi.org/10.1002/ad.1569>
- [69] 臺大實驗林管理處100年度第3次專題演講《集成竹材利用的現況及發展潛力》，莊閔傑
- [70] 李文昭，藍偉銓。全竹材製作竹集成樑，林業研究季刊 28(3)：83-90，2006。
- [71] 吳仕揚 (2015) 《竹齡及高度對孟宗竹及其竹展開板物理及機械性質之影響》，國立中興大學森林學系碩士論文。
- [72] 林業叢刊第10號。謝堂州，竹材之防腐、防蟲、防霉。1976
- [73] 許秀涵 (2009) 《竹材創新設計之探索與應用》國立交通大學應用藝術研究所碩士論文。
- [74] William Nguegang Nkeuwa a b, Jialin Zhang a, Kate E. Semple a, Meiling Chen a, Yeling Xia a, Chunping Dai. (2022) Bamboo-based composites: A review on fundamentals and processes of bamboo bonding. Composites Part B: Engineering. Volume 235, 15 April 2022, 109776.
- [75] Haiying Zhou, Xin Wei, Lee M. Smith, Ge Wang and Fuming Chen. (2019) Evaluation of the Uniformity of Density and Mechanical Properties of Bamboo-Bundle Laminated Veneer Lumber (BLVL)
- [76] Weiqun Dong, Zhiqiang Wang, Guojun Chen, Yi Wang, Qianzhi Huang, Meng Gong. (2023) Bonding performance of cross-laminated timber-bamboo composites. Journal of Building Engineering. Volume 63, Part A, 1 January 2023, 105526.
- [77] 永續材質圖書館，結構用集成材  
[https://sml.pidc.org.tw/productdetail\\_tw.php?id=103](https://sml.pidc.org.tw/productdetail_tw.php?id=103)
- [78] 直交集成版 (Cross-laminated timber, CLT) (CLT)<https://www.cwba-wqac.org.tw/forest-tech/index.php?action=resources-detail&id=67>
- [79] Features of Laminated Veneer Lumber (LVL)  
<https://canterburytimbers.com.au/blog/features-of-laminated-veneer-lumber-lvl/>





[80] 普通合板(Plywood)

<https://www.cwba-wqac.org.tw/forest-tech/index.php?action=resources-detail&id=77>

[81] 塑合板(OSB) <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%A1%91%E5%90%88%E6%9D%BF>

[82] 木質材料的種類及特徵

<https://www.cwba-wqac.org.tw/forest-tech/index.php?action=resources&gid=15&gid2=13>





## 附錄（一）：期中報告審查意見回覆

審查意見	回覆辦理情形
李委員台光	
1. 竹接頭及結構元件研發過程，除以電腦輔助工具檢討其施工性，另建議可先進行有限元素分析，避免應力集中及檢討承受風力或地震力之性能。	謝謝委員意見，已納入明年度的研究項目參考。
2. 竹接頭及結構元件之繩索及五金鐵件之耐久性為何？請補充說明。	考量到耐久性，研究中大多以不鏽鋼作為材料來設計並製作竹接頭金屬構件，可於戶外承受風雨，但同時亦有考量到成本上的顧慮，因此若是做於室內、或者藏於竹管內部之金屬零件，則也有考慮以鍍鋅鐵作為材料使用的方案。
3. 研究成果可考量納入竹構造設計規範附錄，供設計者參考。	謝謝委員意見，將持續整理研究成果，供設計者參考。
楊委員德新	
1. 本案期中評核標準應完成之工作項目多數已完成，惟建議工項有關竹集成材彎曲加工技術之文獻仍較少，宜於後續補充。	謝謝委員意見，已補充相關文獻。
2. 文中有關英文縮寫代號與中文名稱用法，宜確認並參考標準引用，統一之。	謝謝委員提供意見，已列表整理於實作階段章節。
3. 有關提及木集成材之曲線Glulam結構實作，建議說明何處施工加工製作並應確認品質，另欲轉換為竹材時，其施工問題與可能瓶頸，建議可提出。而竹木混合構造應可進行。	感謝委員建議，因下半年度工作期程考量到合作廠商之加工檔期，今年度規劃較小尺度之曲線集成竹樑實作，今年仍會加入施工檢討之紀錄，並於明年年度詳加撰寫加工問題及可能瓶頸。竹木合構部分同步進行中。
4. 本案設計三種接頭對未來應用性大，惟建議考量未來有關五金構件之量產與成本，並期待後續研究成果。有關不鏽鋼束帶，可否再加以綁紮方式補強。	謝謝委員意見及肯定，已於下半年度的研究中進行了有關不鏽鋼束帶不同綁紮方式的試驗，並呈列於期末報告中；量產與成本也將納入後續考量。





王委員松永	
1. 本計畫已收集許多竹構造接頭案例，並加以分析，如竹構造作為長期使用建築物，則其接頭構造須標準化，且種類不多才能降低成本，但如竹構造作為短期使用、藝術品者，其接頭應供設計者發揮其創意。	謝謝委員意見，將納入後續設計考量。
2. 收集竹集成材彎曲加工技術文獻，竹材不同於木材，因其竹壁厚度較薄，以孟宗竹為例，最厚也不會超過10mm，因此做為集成元會增加成本，其應用方式，須由加工業者思考，建築領域可提出需求，即在設計要使用何種竹彎曲集成材。	謝謝委員建議，將於期末中納入初步成本比較與評估，並於明年度加入曲線竹集成樑之應用實作規劃。
3. 完成彈性網殼的細部設計及構築程序文獻研究，彈性網殼設計主要應用於臨時eess(短期)者，或長期建築者，為配合國家淨零政策，當然是以長期(永久)建築之用途為對象，如此建築材料所固定之二氧化碳才能對地球暖化減輕有所貢獻。如是短期建築，展示完成後之材料處理又要耗能，材料處理又是問題。	謝謝委員意見，將納入後續設計考量。
4. 竹集成材之集成元，主要有兩種，即以剖竹機剖開圓竹後，所取得之竹片，其表面紋理係與竹桿長軸成平行方向。另一種係以旋切機，以其刀具沿著竹桿圓周旋轉時，連續削切而成之薄片，即所謂單板，其表面紋理會與竹桿縱軸成垂直方向。兩種竹片表面紋理表現有很大不同，作為建築室內裝修材料及家具用材均有很高價值。	謝謝委員提供之建議。
5. 本計畫符合期中評核標準。	謝謝委員肯定。
主席裁示	
本案計畫期中報告審查通過，請各細部計畫主持人依審查意見修正補充報告內容，並請依據契約規定於112年12月10日前提出期末報告及後續相關事宜。	





## 附錄（二）：期末報告審查意見回覆

審查意見	回覆辦理情形
王委員松永	
1. p. 88表中為結構用集成材、直交集成板(此為板材)。p. 91表中為定向竹粒片板。	謝謝委員指教，已更正。
2. p. 93竹木集成元混合製造集成材，原則將竹片配置在表底面且竹青側向外面，集成元厚度要均勻，集成元在長度方向之接合應為斜接或指接，而相鄰接集成元之接合部是不得重疊，而指接應相距15cm以上。現所規劃者為對接方式，是不可以的。對於膠和性能要求很高，使用之膠合劑有規定，特別要求須煮沸剝離兩循環試驗合格，其在沸水中浸漬4小時後，在室溫水1小時，又在70±3℃烘箱中烘至試片原來重量為止，共2循環，再評定其膠合層之剝離。	謝謝委員指教，明年度將會照此辦理，並安排按照CNS規範之實驗室進行檢測。
3. 請補充說明p. 95表25中集成元尺寸0.4*5、0.7*4.2、1*10之意義。	此標註內容0.4(cm)*5(cm)此為剖竹片斷面尺寸標註，單位為公分。明年度圖面標示將改為標註單一層集成元方式並詳加說明。
4. p. 105含水率計算方式所得數值為濕基含水率，非乾基。依CNS11031規定含水率= $(u_1 - u_0) / u_0 \times 100$ ， $u_1$ 為乾燥前質量， $u_0$ 為絕乾質量，請修改。	謝謝委員建議，已按照公式全數修改完畢。
楊委員德新	
1. 本計畫為整合計畫之細部計畫，主要由實作階段探討接頭結構元件與施工程序，請補充說明本計畫實際重點、目標及未來竹構發展之規劃。	謝謝委員意見，已於成果報告及113年度計畫書中補充說明。
2. 階段實作方面有關竹構運用接頭之可行性是本計畫一大重點，細部計畫2探討結合部位之設計，建議可綜整提出，以利後續產業推動。	謝謝委員建議，已規劃兩邊細部計畫之參訪與討論會議，會進一步商議合作內容。





3. 續接部分以抗壓試驗為主，雖同為正向力，是否考量加入抗拉試驗。	謝謝委員建議，已納入明年度的研究項目中。
4. 竹集成材部分考量4種設計，惟在結構用集成材設計上，應考量集成元等級、設計強度及膠合劑種類，並依標準進行品質試驗，此在本計畫中均未見。	謝謝委員建議，已納為明年研究重要項目，將尋求具有加工CNS11031經驗之廠商合作。
李委員台光	
1. 請說明竹集成材黏結材之規格。	今年度因應快速測試選用了富蘭克林公司太棒二代木工膠並雙面佈膠（見文p93），明年度將與製造端討論後，確認使用情境後選用符合材料特性與檢測規範之膠合劑。
2. 竹續接接頭除抗壓試驗外，是否進行其他形式試驗(抗拉或抗彎試驗)？	謝謝委員建議，已納入明年度的研究項目中。
3. 竹集成材斷面建議可採取工型斷面，較符合經濟原則。	謝謝委員建議，將納入後續考量。
4. 接頭及竹集成材之施工工藝是否影響其強度表現？	接頭施作確實可能因施工工藝影響強度，明年度將於規劃設計流程時，將縮小誤差納入設計與製作考量中，並建立操作規範；集成材部分按照今年製作方式確實存在因施工方式及製作人員差異而影響強度表現的可能，明年度將使用機械佈膠、結構樑膠合成型機，將強度表現之誤差縮至最小。
森林產業組	
建議可與農糧署輔導之休閒農場合作，推廣竹構建築。	謝謝森林產業組建議，後續將討論合作與發展之可能性。
主席裁示	
本案期末報告經審查結果「同意通過」，請各細部計畫主持人依審查意見修正補充報告內容，於農業計畫管理系統更新，並辦理後續結案事宜。	

