

竹建築設計之構思—以雲林農博公園為例

◎大藏聯合建築師事務所·甘銘源 (arch.770@gmail.com)、王怡婷、黃寶億

竹子是碳足跡最小的建材

近年來隨著全球暖化及氣候異常的趨勢日益嚴重，環境問題是我們這個世代必須重視的議題，也是建築產業需要去投入更多努力的一個區塊。根據資料統計，臺灣建築產業相關之二氧化碳排放比例，建材生產及運輸過程，加上使用生命週期的能源消耗，對整體環境的二氧化碳排放量有很大的影響。有鑑於臺灣木材的來源多仰賴進口、碳足跡高(北美人工栽培的永續林的木材運到臺灣，碳足跡已高於其當地的固碳效益，更遑論破壞雨林的東南亞木材砍伐)，熟稔綠建築設計的大藏聯合建築師事務所，在三年前承接雲林農業博覽會園區的規劃及建築設計，思考為何不利用臺灣中部盛產的竹子來做農博園區的主要建材？

雲林農業博覽會的主軸為農業的幸福鐵三角，包括人、土地跟作物這三個元素，它是在地出發的觀點去看待人、土地跟作物的關係。我們認為其實農博基地的構築本身也可以用這種方式來思考，透過一個創新的概念，利用周邊環境的資源來重新發現竹子的價值。竹造建築的CO₂排放量只有鋼構造的2%，竹子可以說是碳足跡最小的建材。此外加上臺灣中部地區竹產業群集的優勢，是我們在取材與加工推動的一大要素。在環境議題與產業群聚這兩者的契機之下，我們在農博基地嘗試多樣前瞻性的建築設計，運用低碳竹材來呈現農博基地建築設施的主結構，並藉此搭構建築產業與在地竹產業的橋樑。

竹材力學系統應用

在農博公園的公共設施及展館建築物中，我們因應不同建築物的使用空間及基地特性，發展出各式不同的竹結構系統。透過各種竹材接合方式，以及不同材料的搭配，充分發揮竹材特性。

一、入口棚架

入口棚架位於博覽會基地入口，最大跨距達14公尺，利用孟宗竹與鋼材的結合，形成大型的桁架結構系統。竹子端部利用不繡鋼索纏繞及高拉力螺桿結合局部水泥灌注，形成穩固的竹接頭。棚架區兩翼展開的地方，也是運用孟宗竹材做為主要的支撐系統。桁架結構及兩翼的結構系統利用竹管代替鋼管，是一個非常穩固的結構系統。

二、微笑餐廳

微笑餐廳在結構的設計上利用竹材可以彎曲、及可以承受比較高的張力特性，以孟宗竹材上下兩層斜向交疊，形成編織交錯的傘形屋架結構，展現竹子材料優異的韌性特色。在結構垂直支撐的部分，分成內高外低的兩個圓圈，外圈部分以清水混凝土柱形成橢圓形平面的柱列，上端與環狀鋼樑互相連結。內圈則運用18根直立交叉的孟宗竹材，形成環狀圍繞的巨型柱結構，也為室內空間提供一個自然採光及通風的天井空間。



入口棚架施工過程(大藏聯合建築師事務所 提供)



微笑餐廳施工過程(大藏聯合建築師事務所 提供)

三、碳匯林場

碳匯林場展場呼應中國傳統建築意象，由重複組合的竹樑與竹柱所組成。結構上採用最普遍的螺桿型式，竹材鑽洞之後，螺桿穿過鎖固。螺桿對接的兩端，以弧形墊片及螺帽鎖固，分散竹材表面的應力。

四、竹構廁所

竹構廁所的結構設計採用各自獨立的竹構樑柱系統，以四支竹材上下重疊構成一組竹樑。竹構樑採用多支竹材上下錯位相疊以螺桿穿孔鎖固，形成較深的樑斷面支撐上方花旗松木桁條屋架，竹構樑柱部分採用最普遍的螺桿型式固定，竹材穿孔後直接螺母鎖固，螺桿鎖固的位置以特製的弧形墊片分散表面力量，避免產生應力集中的結構破壞行為。

五、指揮中心

指揮中心、售票亭及其他展覽營運的臨時設施，全部都是用可拆卸的竹構架構件所組立，可逆還原，未來若有損壞亦可單支抽換。竹材端點運用外套鋼管的方式，在縫隙中填入混凝土做為黏著劑，固定竹材與柱頭的連結。屋面結構運用雙層桂竹交疊而成，形成雙拋物線的曲面屋頂，達到最佳結構效率。

竹材加工處理

竹材生長快速，竹子約三至五年即可生長成材可供利用，在臺灣是不虞匱乏的天然資材。而竹材本身又有許多特點，重量較輕，材料取得容易，與其他金屬材料配合應用，可充分發揮竹材原有特性，非常適合作為建築材

料。但竹材本身容易受蟲蛀的問題，需要經過適當的加工流程以及保存處理，以延長其使用期限。為確保農博基地的竹建築可以符合長久的使用性能，我們在竹材加工處理的方面，也必須進行殺青及保存處理的多道程序。

一、竹材採伐

農博園區的竹材主要來自雲林石壁地區，合適的竹材為生長4年的竹子，需人工離地搬運，表面不可有磨損擦傷。

二、殺青處理

竹材殺青過程可將竹材表皮上的油污與竹肉的糖分去除掉，可用煮沸法或炭火法。我們過程採用煮沸法，將竹材放入不銹鋼槽煮沸的水中殺青。

三、竹材保存處理

配合室內室外不同的環境及不同的使用需求，農博竹建築的竹材採用了兩種不同的保存處理方式。入口棚架的竹材處理過程中，除了初步的殺青風乾處理外，另外考量竹材在室外空間的耐候需求，竹材同時也採用蒸氣高壓的美耐皿(melamine)塑化處理。微笑餐廳因屬於室內空間，比較不受到日曬雨淋影響，所以採用浸泡硼酸的方式處理。浸泡硼酸的處理是將竹材網綁浸泡至硼酸溶劑中，並確認竹材竹節已貫穿打通，以利溶劑吸收，浸泡溶劑約兩至三週的時間。

四、乾燥存放

經過處理的竹材，需放置於通風良好的地方晾乾20天以上。



破匯林場竹構施工過程(大藏聯合建築師事務所 提供)



竹構廁所(大藏聯合建築師事務所 提供)



售票亭曲面屋頂(大藏聯合建築師事務所 提供)



竹接頭試驗(大藏聯合建築師事務所 提供)

五、竹接頭加工

因天然竹材的端部大小尺寸形狀不一，透過竹接頭與鐵件的加工結合，使端部的尺寸統一。配合各建築設施的結構需求，我們採用了多種不同的竹接頭加工方式，包含端點接頭及螺桿鎖固的形式。

竹接頭研發設計

竹材在建築應用上有許多特性，但在運用上的困難點就是自然材料本身每一根尺寸都不一樣，沒辦法用一個標準化的材料製作方式來生產。竹材之間的接合如果處理不當，會嚴重影響竹材的物理優勢。如果在竹材上打

洞穿孔，圓筒狀的竹管很容易裂開，就算不裂也容易破壞它原有的強度。若以榫卯或綁籐條的接合方式，需要在現場施工，既費工又不容易控制品質，所以我們在設計過程中嘗試了不同竹材接合的方式及加強構件。

一、竹接頭端點構件

1. 竹接頭A：端點構件竹接頭A是採用鋼纜線纏繞固定，埋入錨定螺栓及灌注無收縮水泥砂漿，端點為鉸接的金屬構件。施作方式將竹材表面切為V字形，利用不鏽鋼索纏繞將竹材頂部固定縮成圓錐狀。由上方埋入的錨定螺桿及灌注無收縮水泥砂漿在承受拉力之下，圓錐狀的形體會防止螺

桿及水泥砂漿塊的滑動，確保竹接頭端點可以承受10.0噸以上的拉力。

2. 竹接頭B：端點構件竹接頭B是以鋼管埋入竹材，端點為鉸接的金屬構件，由橫向螺桿穿過竹材及鋼管對鎖。鎖固後竹節內部灌入無收縮水泥砂漿，並以不鏽鋼束環圍束竹材表面。端點在承受拉力及壓力之下，橫向螺桿會產生剪力作用，確保竹接頭端點可以承受1.5噸以上的拉力。

3. 各式端點構件發展過程：

接頭形式	接頭說明	破壞模式	照片
1)鋼纜圍束固接 (初期型式)	以相同斜率將竹材端部孔徑收縮至固定尺寸，以鋼纜纏繞圍束。內灌砂漿錨定螺桿，端部為固接。		
2)無鋼纜雙夾層金屬套件固接 (初期型式)	圓錐狀金屬套件，雙夾層金屬套件。金屬構件製作成本較高。		
3)鋼纜圍束+金屬套件固接 (初期型式)	保留部分鋼纜，端部改成金屬套件(一體成型或焊接)。經由幾次試驗及修改，增加端部鋼板厚度，以增進其受拉性能。	破壞模式為端部與內部鋼板降伏變形，最後砂漿塊與竹管介面產生滑移。試驗拉力強度約5.54 ~ 5.61噸。	
4)鋼纜圍束鉸接 (竹接頭A)	將固接的螺桿改成鉸接方式，分為螺桿與金屬構件穿過金屬套件及為穿過。端點改為鉸接，開孔長度可提供施工的伸縮空間，並可微調旋轉角度。	破壞模式為錨定螺柱拉斷或拉除，及鋼纜線鬆脫或砂漿塊與竹管介面產生滑移。設計拉力強度為10.0噸以上。	
5)螺桿對鎖鉸接 (竹接頭B)	竹材內套鋼管，螺桿穿過竹材及鋼管，由竹材兩側對鎖。	破壞模式為竹材表面劈裂或砂漿塊滑移。設計拉力強度為1.5噸以上。	

(大藏聯合建築師事務所 攝)

二、竹接頭螺桿鎖固

1. 鑄造弧形墊片：為防止螺桿鎖固時力量過度集中在某一點上面，產生破壞的應力，我們設計了一組弧形的墊片，在鎖固的同時，可以把鎖固的力量分散到竹子其他的表面上去，不會產生單點的破壞。而墊片中央隆起的平面可以與螺帽平接，不會產生空隙。

2. 各式墊片發展過程：

墊片形式	照片
1)鑄造/沖壓弧形墊片(平滑表面) (初期型式)	
2)沖壓弧形墊片(中央隆起)	

(大藏聯合建築師事務所 攝)

三、竹結構加強構件

1. 不鏽鋼束環：因竹材自然材料容易開裂的特性，在不同溼度氣溫條件下熱漲冷縮。為維持竹材長久的使用性能，我們在竹材表面以不鏽鋼束環固定。在抗壓方面，竹桿中間圍束不鏽鋼箍可增加其極限載重，對於有裂縫之竹構件而言，有不鏽鋼箍圍束及Epoxy補強，可增加約15%的極限承載力。在抗彎曲方面，並無法推論出明顯差異。本次試驗各類試體皆僅有一組，需經過更多試驗次數來取得更精確的結果。
2. 碳纖維布：碳纖維布功能與不鏽鋼束環相同，可於竹材表面增加圍束力，但抗壓數據需更進一步試驗。在抗彎曲方面，試體於竹材中央包覆碳纖維，在試驗中因破壞模式為端部支承處受局部壓力過大而破壞，未能有效觀察到碳纖維對竹材劈裂之圍束效應。
3. 灌注無收縮水泥砂漿：為了解竹管為中空或實心之強度差異，我們試驗在整支竹材內部打通竹節，灌注無收縮水泥砂漿。在抗壓力方面，若有不鏽鋼箍圍束及灌注無收縮水泥砂漿，可增加約32%的極限承載力，但須注意無收縮水泥砂漿確實填滿整個竹桿的中空部分。在抗彎曲方面，因竹節處內部的直徑變化容易造成無收縮水泥砂漿灌注不實的缺點，灌注無收縮水泥砂漿對於抗彎曲性能之效益尚待更精確的推論。在外部未有圍束力的情況下，水泥砂漿對於撓曲強度之貢獻較不明顯。

4. 各式構件試驗過程：

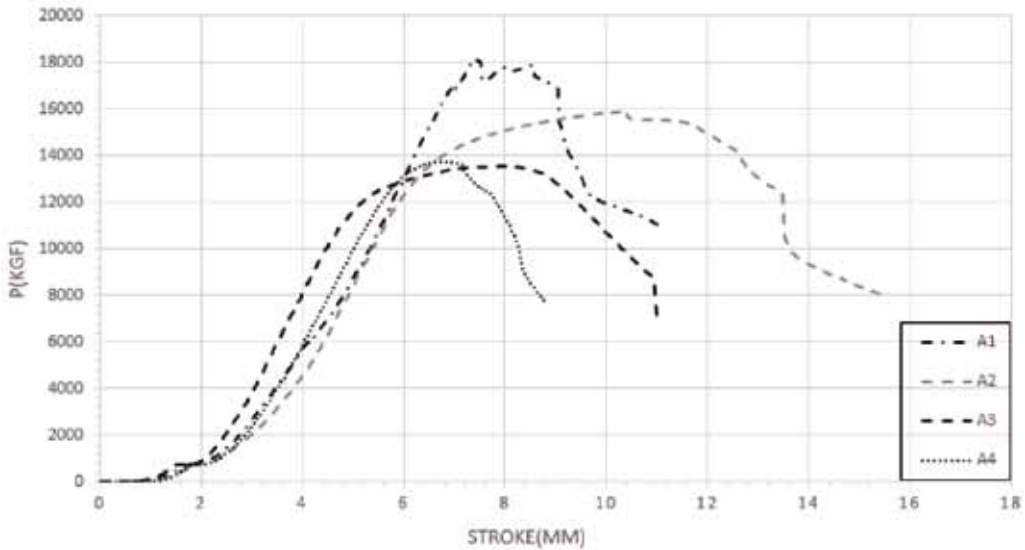
竹結構加強構件—抗壓試驗結果				
試體編號	平均外徑 (cm)	試體說明	破壞模式	極限加載 (kgf)
A1	9.87	1.已有開裂之試體 2.Epoxy裂縫填補 3.灌注無收縮水泥砂漿 4.不鏽鋼箍圍束	在不鏽鋼箍上方整根竹材四分之一處，由原本裂縫處向上向下劈裂。	18152
A2	10.03	1.已有開裂之試體 2.Epoxy裂縫填補 3.不鏽鋼箍圍束	在不鏽鋼箍上方整根竹材四分之一處，由原本裂縫處向上向下劈裂。	15899
A3	9.53	1.已有開裂之試體 2.無防腐處理竹材 3.無圍束	在整根竹材二分之一處，由原本裂縫處向上向下劈裂。	13585
A4	10.43	1.已有開裂之試體 2.塑化竹處理 3.無圍束	在整根竹材二分之一處，由原本裂縫處向上向下劈裂。	13744

(資料提供：成功大學建築系耐震建築實驗室/資料整理：大藏聯合建築師事務所)

竹結構加強構件—抗壓試驗照片			
A1-竹材開裂、內部砂漿出現裂縫，最後在竹桿失去承載能力時裂縫並未延伸過不鏽鋼箍。	A2-竹材受壓過程挫曲變形，由不鏽鋼箍上方一半處開裂，裂縫並未延伸過不鏽鋼箍。	A3-由裂縫處開始挫曲開裂，最後失去承載能力。	A4-竹材由裂縫最多處開始挫曲劈裂，最後產生上下貫穿之裂縫。
			

(資料提供：成功大學建築系耐震建築實驗室/資料整理(攝影)：大藏聯合建築師事務所)

載重-試驗機位移曲線



(資料提供：成功大學建築系耐震建築實驗室/資料整理：大藏聯合建築師事務所)

竹結構加強構件—抗彎曲試驗結果						
試體編號	平均外徑 (cm)	試體說明	破壞模式	極限加載 (kgf)	極限彎矩 (kgf-cm)	環形斷面極限撓曲強度(kgf/cm ²)
B1	9.10	1.已有開裂之試體 2.Epoxy裂縫填補 3.灌注無收縮水泥砂漿 4.不鏽鋼箍圍束	由原本劈裂處向竹桿兩端劈裂。	1200	26000.0	594.8
B2	9.84	1.已有開裂之試體 2.Epoxy裂縫填補 3.不鏽鋼箍圍束	由原本劈裂處向竹桿兩端劈裂。	1639	35511.7	643.5
B3	9.01	1.已有開裂之試體 2.無圍束	端部支程處壓力破壞。	1160	25133.3	633.25
B4	9.05	1.碳纖維布包覆	端部支程處壓力破壞。	1029	22295.0	579.9

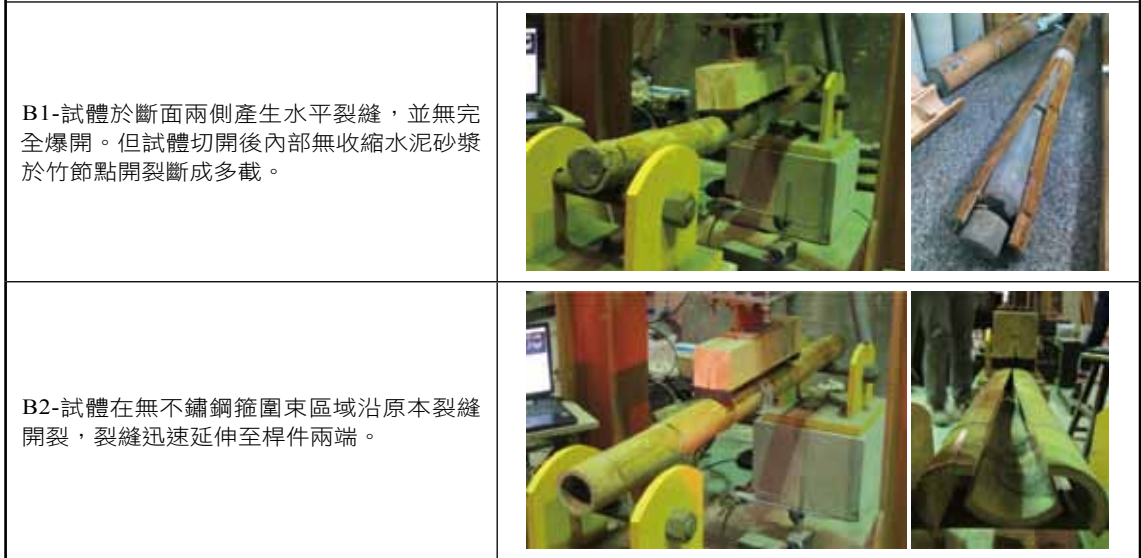
(資料提供：成功大學建築系耐震建築實驗室/資料整理：大藏聯合建築師事務所)

結語

竹子是很堅韌的材料，透過適當的建築設計，竹材的保存處理，可充分發揮竹材的特性及延長竹建築的使用期。有效率的竹材接

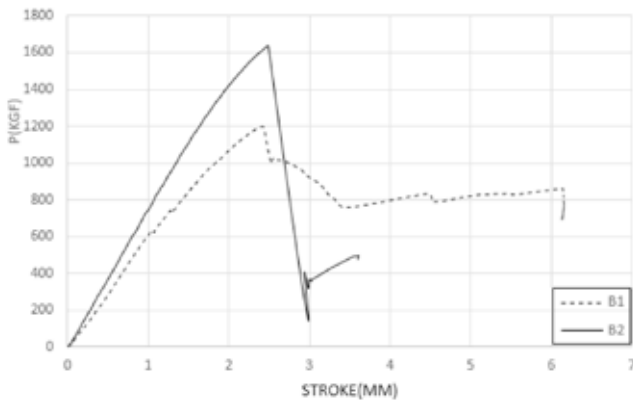
頭設計也可避免常見的損壞，以及便於日後維修抽換。在雲林農博的竹建築經驗之中，我們慎選我們使用建築的方式、規劃方式，也慎選我們使用的材料，希望透過對人跟土地一種友善的表達，達到一個永續利用地球資源的環境

竹結構加強構件—抗彎曲試驗照片



(資料提供：成功大學建築系耐震建築實驗室/資料整理(攝影)：大藏聯合建築師事務所)

載重-位移曲線

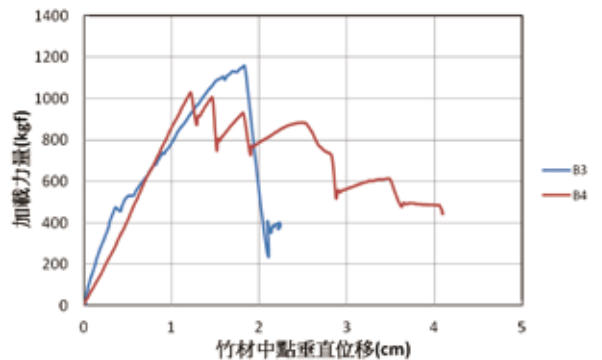


(資料提供：成功大學建築系耐震建築實驗室/資料整理：大藏聯合建築師事務所)

觀。我們希望用一個創新的概念，來重新發現竹子的價值，這是使用竹材的主要原因。

在本次農博竹建築的構築中，我們提出採用竹建築的構思及可行性，點燃臺灣建築業

界對竹材及其他自然建材的探討與興趣。未來在材料處理、構造方式、接點的設計等方面還需要竹相關產業界、竹工藝專家、研究學者、建築營造界等多方的努力，才有辦法讓竹材本身變成一種可以大眾化、可信賴的構築方式，也讓建築成為永續環境的一環。⊗



(資料提供：成功大學建築系耐震建築實驗室/資料整理：大藏聯合建築師事務所)