

## 一、前言

台灣傳統漢人建築依屋身木造柱樑構造方式主要可分為穿鬥式及疊斗式兩種。穿鬥式木構架屬於台灣民間建築普及的構造方式，早期使用於一般厝屋及廟宇，如南投張厝等。這些歷時已久的古蹟及歷史建築許多都在九二一地震中遭到損毀，雖說是國內文化資產的浩劫，後續卻也致使了科學方法介入古蹟及歷史建築物保存工作中。

綜觀地震發生至今已五年，雖然國內已有部分研究投入於古蹟及歷史建築修復技術的研發，但距離可應用於實務方面還有一段距離，直至去年，內政部建築研究所委託中華民國建築學會執行研究案『台灣傳統式古蹟及歷史建築耐震能力之基礎研究(3)——穿鬥式木構架結構特徵與接點之調查與解析』，針對國內多處穿鬥式木構架古蹟及歷史建築進行形式及實體調查，選取穿鬥式木構架中較常見的一種接點(面內柱梁接點)進行足尺力學試驗，並利用統計方法分析出穿材與柱材接點旋轉勁度之評估公式，是國內首次較大規模針對傳統木接點進行足尺力學實驗的計畫。

從結構分析的觀點而言，欲分析傳統穿鬥式木構造之結構行為首先必須先瞭解構造(包括梁、柱及接點等構件)及材料特性，而木結構接點在進行整個結構分析時扮演的角色最為重要。一般而言，穿鬥式木構架接點可分為幾種，面內包括：(1)柱材與穿材交會處(柱梁接點)；(2)柱材與基礎接點；(3)童柱與穿材接點，及(4)穿材與磚牆接點。面外則包括：(1)門楣、門檻或門檻、門楣或燈梁與柱材接點；(2)楹仔與柱材接點等兩大類。前述面內接點中的第一項相關研究已在第一年計畫中完成，且主要的研究方

法已在第一年計畫中確立，本研究案則為該研究案之第二年延續計畫，因此主要目標在完成剩餘的五種接點的相關研究，檢討其力學特性及瞭解其旋轉勁度。一旦這五種接點的旋轉勁度與強度的評估方式建立後，我們便具有初步的能力可以針對傳統穿鬥式木構架結構行為進行分析。因此本研究的主要工作包括：

1. 針對第一年調查的實體史料中接點的相關幾何條件進行分析。
2. 利用上述分析結果規劃上述五種接點的力學研究，並針對實驗結果進行分析以得到旋轉勁度評估公式。

## 二、文獻回顧與研究方法

### 2-1 文獻回顧

國內過去針對木接點的研究相當少見，但近來已有較多研究針對木構架接點進行研究。閻嘉義首先針對若干傳統接點進行試驗，並利用鑽孔移除木纖維以模擬接點被白蟻侵蝕的情形，最後利用半剛性接點之理論分析整個構架（閻嘉義，1993）。其實驗方式雖可供參考，但由於該研究利用縮尺試體以試驗，導致試驗數據無法使用於實際情形（因為試體尺寸縮小，但木纖維並沒有縮小，因此必須考慮尺寸效應）；此外，該研究在鑽孔移除木纖維方面並未考慮白蟻啃食木構件的實際狀況，僅考慮纖維的連續性，此亦與實際情形稍有出入，主要係因白蟻攻擊木構件主要集中在春材（較軟）。

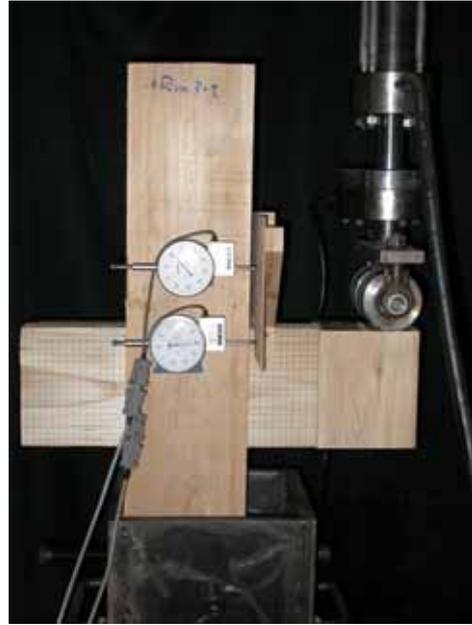
陳啟仁針對上述缺點進行研究，移除春材纖維以模擬白蟻攻擊（圖 2-1），並針對斷面損失率與力學性能下降的關係進行研究。在進行試驗及統計分析後建立白蟻攻擊穿材時，斷面損失對於旋轉勁度影響公式為  $RS=0.9218 \cdot RAR+0.07818$ ；其中 RS 為殘餘強度（Residual Strength），而 RAR 為斷面損失率（Ratio of Area Reduction）（陳啟仁，2003）。

而徐明福則利用足尺實體實驗取代過去的縮尺試驗（圖 2-2），該研究中首先利用三棟穿鬪式古蹟及歷史建築物的解體為基礎，發現穿材與柱材的接點形式大致可分為三類，包括（1）穿材連續、（2）穿材斷開對接及（3）穿材斷開利用燕尾榫搭接等。為瞭解各項可能會影響接點旋轉勁度的因子及其影響程度，利用統計學上的實驗設計法安排各項可能影響因子的尺寸以進行足尺實體試驗，最後得到三種不同形式接點的旋轉勁度評估公式（徐明福，2003）。其發現

當穿材為連續時，其旋轉勁度最大，其次為燕尾榫搭接，最大僅約為 40%，最小的狀況為斷開對接，僅約 20%-30%。因此可以發現，不同形式的接點其旋轉勁度差異非常大，並在該研究中做出結論：未來在進行調查時，應一併針對接點形式進行調查。



圖 2-1 陳啟仁研究試體圖



2-2 穿鬪式接點實驗試體

而張紋韶則利用非破壞檢測方式針對穿鬪式木構架接點形式判斷問題進行研究，該文中利用應力波速及振幅傳遞率 (Amplitude Transmission Ratio) 針對 72 組足尺試體進行試驗，得到應力波速可以自上述三種類型中分辨出穿材為連續的構件 (波速較快)，而振幅傳遞率則可以從三種類型中分辨出穿材為斷開對接 (振幅傳遞率小) 的情形，透過上述現象得到未來欲判斷穿材的形式時，首先應先利用波速判斷穿材的連續性後再利用振幅傳遞率判斷是否為斷開對接 (張紋韶，2004)。由上述討論可知，透過試驗方式探討木接點的結構行為方面，至今在國內已有初步結果，但研究對想僅集中於穿材與柱材交接處的一種接點。

在利用數值分析穿鬮式木接點力學行為方面，亦是在近來才開始有相關研究。Chang 利用數值分析方式搭配實驗設計法針對日式木構造樑柱接點旋轉勁度進行研究。該研究中發現，影響日式木構造樑柱接點最大的因素為樺頭深度，第二至第五大因素依序是樺頭寬度、木材彈性模數、樺頭高度及樺頭寬度及高度之交互作用，並利用統計分析推演出評估旋轉勁度的公式，在透過 8 組確認實驗後發現該評估公式可以相當準確的預測日式木構造樑柱接點之旋轉勁度；唯該研究中將梁與柱之彈性模數假設為相同，導致無法討論梁的彈性模數影響程度是否與柱相同 (Chang et. al, 2004)。

陳啟仁亦利用數值分析針對傳統穿鬮式木構架中接點進行數值分析，並藉以與實驗結果相互比較獲得印證。綜合國內數值分析木接點之相關研究可發現，其研究方法皆是利用數值分析搭配實驗設計法以行，其優點在於可以將各個因子的影響程度大小排名後得到量化的結果，另可以推演出一條相當準確的評估公式 (陳啟仁，2003)；但由於兩份文獻皆未做干擾實驗，因此沒有進行變異分析，較為可惜。

國外針對木構造接點進行研究大多集中在利用螺栓與木接的接點上，針對木/木接點則相對較少。主要有 Fujita 等人針對日本傳統之斗拱組進行靜力與動力試驗 (圖 2-3)，討論在地震力作用下整個斗拱組是否對於整體有正向幫助，經研究發現若是牆體之剛度與整個斗拱組剛度接近，則可減少建築之位移(Fujita, 2000)。

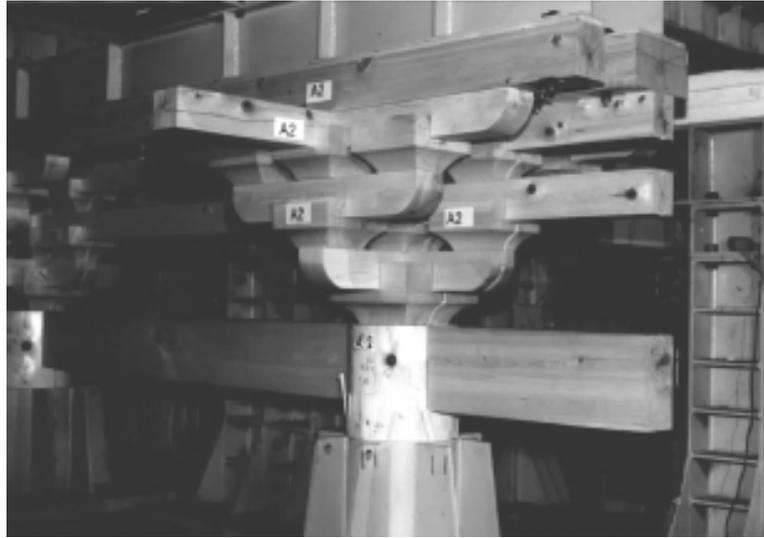


圖 2-3 Fujita 實驗試體

在中國大陸方面，王天著詳細說明傳統大木作受到靜力作用時之分析方法，其將大木構架分為桁、檁、通、柱及斗拱、牆體等部分分別說明各個構件部位受到靜力時之計算方式（王天著，1992）。但是由於缺乏實驗及分析數據佐證，該文獻僅將接點視為鉸接，斗拱組的部分則視為剛性基座。這樣的假設在斗拱組方面在斗拱相當密集的區域依據構造方式也許尚可認為合理，但在一般接點部分則明顯有過度簡化的趨勢，且該文獻僅針對個別構件提出計算方式，對於構架整體則沒有交代。

Fang 等人亦針對中國傳統木構架進行有限元素法數值分析(圖 2-4)，並在考慮接點的半剛性行為後與微振動量測結果進行比對藉以校正分析模式，經研究發現，利用數值分析可針對整棟建築物之動態特性及補強後之行為進行數值分析，並獲致有效之預測結果（Fang，2001）。

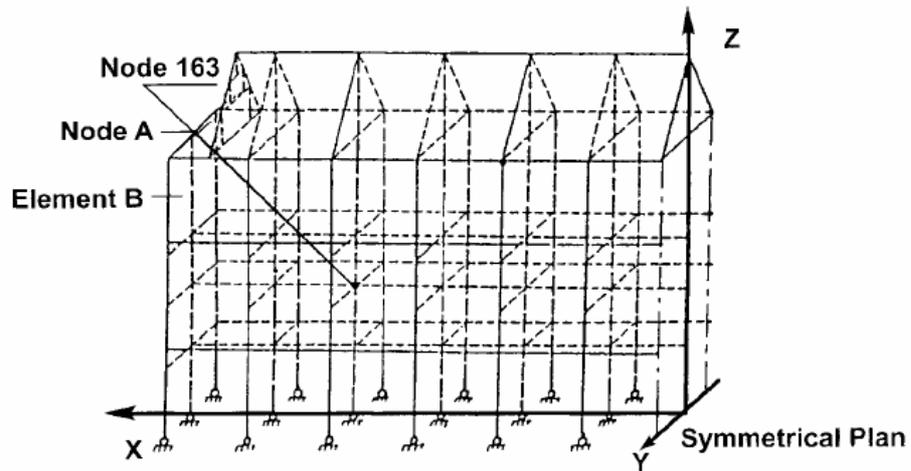


圖 2-4 Fang 分析模型

## 2-2 研究方法

本研究的研究方法首先透過實體史料的分析，瞭解各種不同接點的尺寸範圍與關係，再針對上述分析結果規劃足尺實體實驗，待完成實驗後再利用統計手法進行資料分析，推演出各種接點的旋轉勁度。其中前述實體史料分析中的史料乃本研究案第一年所進行的田野調查相關資料。

### 三、各種接點調查分析與其力學特性

本章的目的在於分析各種接點的尺寸與介紹其力學特性，透過資料的整理可以幫助我們做為下一章規劃實體實驗的依據。

#### 3-1 調查範圍

本研究利用第一年針對台南縣、嘉義縣、南投縣與彰化縣等地之田野調查資料作進一步的分析，主要分析項目包括各構材的尺寸、接點形式、所受的應力大小等與結構相關的因子來進行分析。更進一步考慮區域進行交叉比對，探討上述因子是否有區域性的差異。在調查的案例數量方面，台南縣與嘉義縣各有 28 個案例，南投與彰化則各有 11 與 15 個案例，各案例的資本資料與分析結果如附錄所示。

穿鬮式木構架接點依照面內面外來區分可以分為六種，除了一般穿材與柱材接點為第一年研究對象外，尚包括(1)柱材與基礎；(2)童柱與穿材接點；(3)穿材與牆體接點；(4)門檻、門楣或燈梁與柱材接點；(5)楹仔與柱材接點等。以下分別針對各種接點的力學特性進行介紹：

#### 3-2 柱材與基礎接點

一般利用礎石的目的是在於避免潮氣對於柱材產生危害，柱材與基礎接點依照礎石的有無及礎石的材質可分為三大類。第一類為利用石材做為礎石(圖 3-1)；第二類則利用磚材做為礎石；而第三類則沒有礎石而柱材直接落地(圖 3-2)。而第一類的情形較常發現的是中柱柱礎為石造，柱斷面為圓形，且其他落柱並沒有柱礎。而第二類則較常用在柱斷面為方形的案例中，且由於利用一整排的磚砌

成基礎，因此所有落柱都有礎石。第三類的案例中的柱斷面則圓形與方形都有可能。

通常柱材在基礎附近左右兩側大多有牆體，可避免整根柱材的側向位移，而在一些案例中，礎石與柱材交界處尚會有榫頭以增加水平側向力的抵抗能力。



圖 3-1 有柱礎柱材



圖 3-2 柱材直接接地

從過去破壞調查的結果可以知道，當建築物完全崩塌時，柱材與礎石是呈滾動破壞 (Rocking Failure)，而在建築物僅是側向變位的案例中，柱材與基礎則是呈現滑動破壞 (Sliding Failure)。因此我們可以將基礎分為滾動與滑動兩種破壞機制。

由下圖 (圖 3-3) 可以知道滾動機構的自由體圖，當彎矩達到  $M_{cr}$  (臨界彎矩) 時，整根柱子開始產生旋轉，在柱腳承受小於  $M_{cr}$  的彎矩作用時，柱材並不會發生轉動 (亦即此時柱腳的旋轉勁度接近無限大)。但是一旦承受的彎矩超過  $M_{cr}$  時，整個柱子就會像樞接一樣轉動，因此其彎矩-旋轉角圖應如右下圖 (圖 3-4) 所示。由此可知，柱材斷面與所承受的軸力越大，其臨界彎矩就越大。從力學的觀點來說，不論柱材是否利用礎石接地，其力學行為皆相同。這

樣的分析模式，在許多針對柱材回復力（Restoring Force）進行研究中，比較實驗與預測的結果便有相當不錯的結果（Nakhara et al., 2000；Tsuwa, 2003）。

再來分析實體調查結果，由實體調查我們可以發現柱材斷面圓形與矩形的比例約各半，若柱材為矩形的斷面，幾乎都是正方形。而在接點形式方面，經過調查後發現，所有案例中約有 60% 的接點沒有柱礎，有柱礎的約僅 40%。其中值得注意的是，就區域來說，柱材與基礎的接點形式有很大差異。在台南縣市的案例中，約有 35.7% 的案例沒有柱礎；嘉義的案例中則有 63.2% 的案例沒有柱礎，而南投與彰化則大部分案例都沒有發現柱礎（分別是 90.0% 與 93.3%）。但前面已經說明，從力學的觀點來說，不論柱材是否利用礎石接地，其力學行為皆相同。

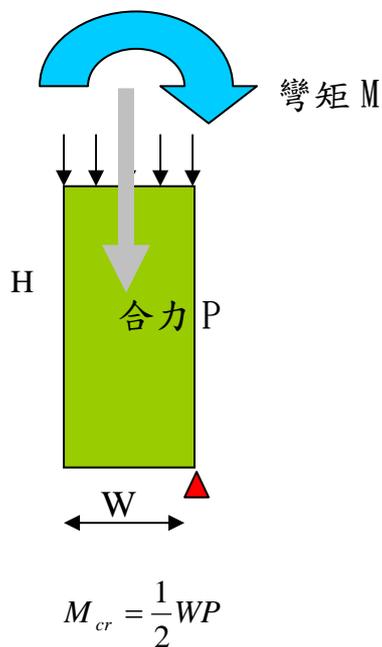


圖 3-3 滾動機制的自由體圖

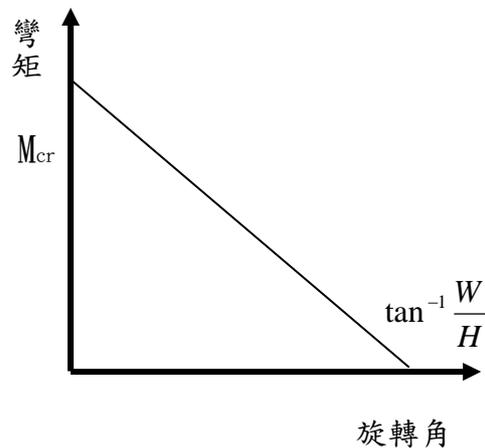


圖 3-4 彎矩-旋轉角圖

在柱材尺寸方面，所有調查案例的柱材其平均寬度約為 16.7 公分，再進一步針對不同區域柱材的尺寸進行 t 檢定後我們可以發現，

台南縣市的平均約為 18.0 公分；嘉義約為 15.3 公分；南投縣的案例約為 15.9 公分；而彰化縣的案例約為 17.3 公分，台南縣與彰化縣的案例其平均值明顯大於嘉義縣與南投縣。這樣的現象反映出來的是，彰化縣與台南縣的案例中，柱材所受的平均正向應力分別為  $3.9\text{kg/cm}^2$  與  $4.2\text{kg/cm}^2$ ，相較於嘉義與彰化的  $5.17\text{kg/cm}^2$  與  $5.18\text{kg/cm}^2$  明顯較小。

### 3-3 童柱與穿材接點

童柱位於穿材上方，除了下接穿材上承桁條以外，中間亦會有一接點與穿材相接（圖 3-5），因此童柱本身有上下三接點。在童柱與穿材相接的部分，其結構行為與第一年所進行的實驗—穿材與柱材接點相同，因此在本年度研究中不再予以考慮。由圖 3-5 可知，在童柱兩側通常會有編泥牆，這樣會對其旋轉及平移運動產生束置作用，但由於這樣的結構行為牽涉到童柱與兩側牆體之間的相互作用，因此亦不在本年度研究的討論範圍中。另外值得注意的是，由於童柱本身具有開口，當其受力時很容易發生柱材本身爆裂的情形，因此一般匠師都會在開口附近製作藤箍以防止柱材本身爆裂。實際調查發現，藤箍位置往往位於上下兩接點中央（可能係因這樣可以減少藤箍製作的數量），這樣的效果如何值得做進一步的探討。



圖 3-5 童柱接點

為探討藤箍位置與其效果的關係，本研究首先利用有限元素法針對此類接點的力學行為作進一步分析，並針對不同位置的木材受到彎矩作用而產生的張應力進行討論。在進行分析時，由於所分析的對象幾何皆對稱，因此分析時僅取一半且局部進行分析以降低計算量。在所使用的元素方面，使用 Solid 184 元素，如圖 3-6 所示該元素共有 20 個節點 (Node)，每一個節點有三個位移的自由度，使用這樣元素的好處是可以降低網格的密度，使得元素數量降低，因此計算量得以降低此外更可提高解析度。在接觸力學方面，使用面對面的接觸 (Face-to-Face Contact)，使用 Penalty Method，將補償彈簧勁度設為  $800000\text{kg}/\text{cm}^2$  (材料彈性係數的 10 倍)，可容許的穿透比值 (Penetrate Tolerance) 設為 0.05。

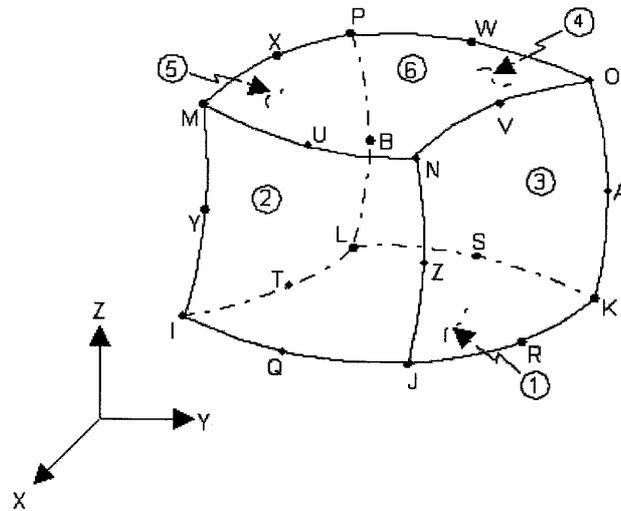


圖 3-6 Solid 184 元素幾何及節點示意圖

在材料方面，由於木材是一種異向（Anisotropic）且非均質性（Nonhomogeneous）的材料，但是若是木材髓心在構件的幾何中心，則可將之簡化成為同向性（Orthotropic）材料。在材料彈性性質方面，依據過去實驗結果，將平行纖維方向設為  $80000\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，垂直方向則設為  $4000\text{Kg}/\text{cm}^2$ （垂直方向約為平行方向的  $1/20$ ），木材的密度設為  $300\text{kg}/\text{m}^3$ ，在非線性方面，則使用 Hill Plasticity 理論。若材料在進入塑性範圍後，彈性常數變成一條水平線將會造成整體勁度矩陣產生奇異（Singular）的現象，因此必須給予一個足夠大的斜率，在本分析中取初始斜率的  $1/20$ 。

在進行分析時，由於材料會由彈性進入塑性，且如變形較大必須考慮幾何非線性，此外在接觸面上又牽涉到變狀態（Changing Status）的非線性，因此這樣的分析是相當複雜的，因此在本文中改用位移控制，即給予一個位移。模型分析後，其應力分佈圖如圖 3-7 所示，由圖 3-7 可知，在穿材受彎後，童柱與穿材交接處出現應力集中現象，因此當穿材受壓後，下方的纖維會受到垂直纖維方向的張

力，而產生爆裂的情形。

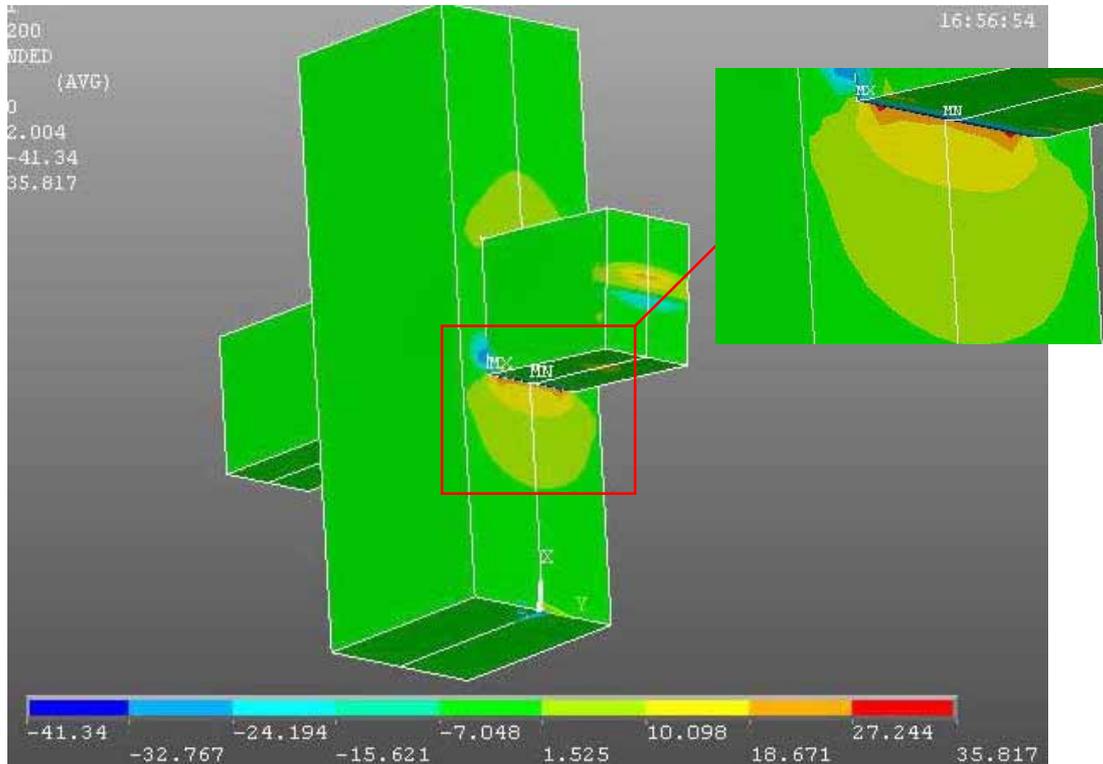


圖 3-7 有限元素分析模型

為瞭解前述張應力的分佈，沿著對稱的軸向畫出張應力分佈圖，但為了表現其應力降低的情形，因此將整個應力分佈予以無因次化（亦即所有張應力都除以最大值），而僅以殘餘的百分比表示。結果如圖 3-8 所示。由圖 3-8 可知，這個部位的張應力衰減的相當快，張應力在穿材與童柱交會處有最大值，而距離穿材與童柱的交會點 5 公分時，其張應力僅剩下最大值的 16.99%；而距離 10 公分時，僅剩下最大值的 3.60%。這樣的現象說明，藤箍位置在距離接點越遠的地方，則其所能發揮的效果就越小。而根據調查發現，所有的調查案例中，大部分的藤箍位置都位於童柱的中心，或距離接點相當遠，因此無法發揮效果。基於此，本研究在進行童柱試驗時，不考慮藤箍的存在，這樣也是取較保守的方式進行研究。

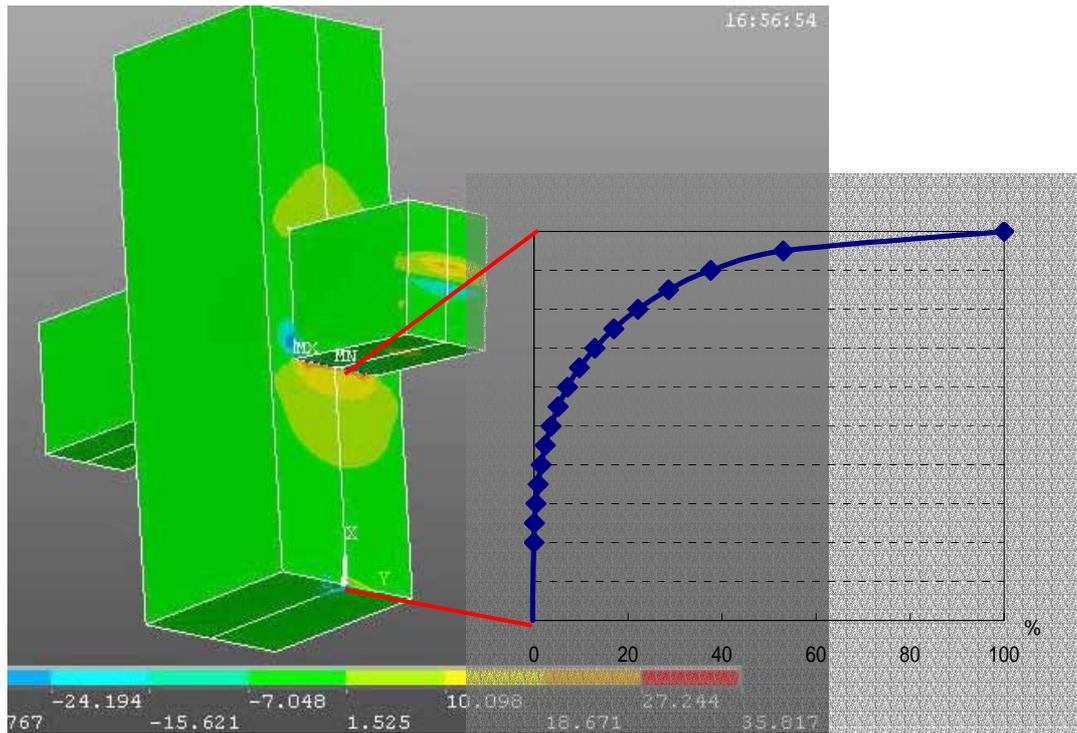


圖 3-8 殘餘張應力分佈圖

前面說明了童柱與穿材的接點及藤箍的影響，至於童柱與穿材接點其結構行為與前一類接點類似。一般而言，童柱兩旁皆會與編泥牆相接，因此比較不會有滑移的現象發生。因此在考慮其破壞時僅需考慮其滾動破壞，而其滾動破壞的機構與前一類接點相同，因此其結構行為也相同，在承受臨界彎矩前，接點應為剛接，而達到臨界值以後則其行為會逐漸變成鉸接。而這個臨界彎矩則與童柱所承受的垂直軸向力、童柱的寬度、高度有關。

在實體調查結果方面，發現所有案例中童柱的平均寬度約為 15.5 公分，且其斷面大多為矩形。就不同的區域來看，可以發現雖然與童柱相接的穿材寬度大多介於 6-7 公分之間，但童柱的平均寬度還是有一些差異的。台南縣、嘉義縣、南投縣與彰化縣四個區域的童柱其平均寬度各約 16.1 公分、14.1 公分、15.6 公分、16.7 公分。透過統計上的 t 檢定可以發現，僅嘉義縣的童柱其平均寬度與

其他三個區域有顯著的不同，其他三個區域並無明顯差異。

從童柱所承受的軸向應力來看，台南縣、嘉義縣、南投縣與彰化縣四個區域的童柱其平均軸向應力各分別約  $1.97\text{kg/cm}^2$ 、 $2.51\text{kg/cm}^2$ 、 $2.25\text{kg/cm}^2$  及  $1.80\text{kg/cm}^2$ 。嘉義縣與南投縣案例中童柱所承受的軸向應力明顯大於台南縣與彰化縣，但仍然是在  $2.0\text{kg/cm}^2$  左右。

### 3-4 穿材與牆體接點

在經過調查分析後可以發現，穿材與牆體的接點形式大致可分為三種：(1) 混合形式、(2) 磚/木接點形式與 (3) 木/木接點形式。在第一種類型方面，木構架與牆體交會處常常會將柱材做成半圓形的附壁柱，穿材首先通過該附壁柱後再插入磚牆中，可以說是磚木/木木混合的接點 (圖 3-9、圖 3-10)。第二類接點形式雖然較不容易發現，但在一些較特殊的案例中，穿材也有可能直接插入磚牆中 (圖 3-11)。第三類形式的接點則主要出現在建築物後簷牆係由編泥牆所構成，在這樣的情形下，穿材往往會直接接在柱材上，而做成出挑。

在一般所發現的破壞模式方面，這各部位的接點破壞模式主要包括 (1) 柱材因為受到外力而與牆體脫離；及 (2) 插入磚牆內部的穿材腐朽 (圖 3-12)。在分析實體調查結果方面可以發現，上述的第一類接點約有 83.8%，而第二及第三類則分別有 12.2% 與 4.1% 的比例，可說是相對較少。另外調查結果發現在第一類接點中，半圓形的附壁柱其直徑大多與中柱相同。由於第一類接點在所有的案例中佔大多數 (約 83.8%)，因此本研究中僅針對此類接點進行研究。



圖 3-9 混和形式接點

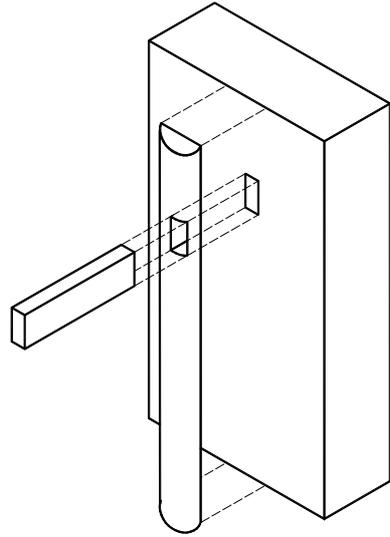


圖 3-10 混和形式接點示意圖



圖 3-11 穿材直接與牆面相接



圖 3-12 牆體內磚材腐朽狀況

### 3-5 門檻、門楣或燈梁與柱材接點

此類面外接點依照所在部位可分為兩大類，第一大類是位於正廳『界屏』與落柱交會點的門檻與門楣；第二類則為燈梁。一般來說，當建築物規模較大時，通常其正廳會多製作一道界屏，而前面放置神桌（圖 3-13）。而這一道木製牆牆體通常利用門檻、門楣或木梁與兩旁的落柱相接（圖 3-14）。經過實際解體調查發現，這類的接點與落柱接法大致有兩種，包括：(1)利用直榫與落柱相接、(2)踏步燕尾榫；但在訪談大木匠師時，大木匠師陳天平表示不論在實體接點或在進行修復時皆存在第三種接點—鈎逗榫，尤其在現行修

復實務中大多使用鈎逗榫，此乃因根據匠師經驗，鈎逗榫強度大過踏步燕尾榫。第一種接法其結構行為應與第一年所研究的接點相同，因此不在本年度計畫的討論範圍內；第二類與第三類則包含在本年度主要的議題中，分別如圖 3-15、3-16 所示。

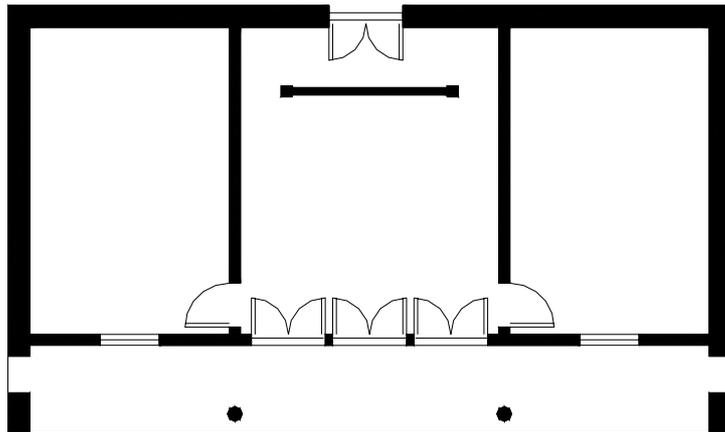


圖 3-13 含界屏穿闔式民居平面

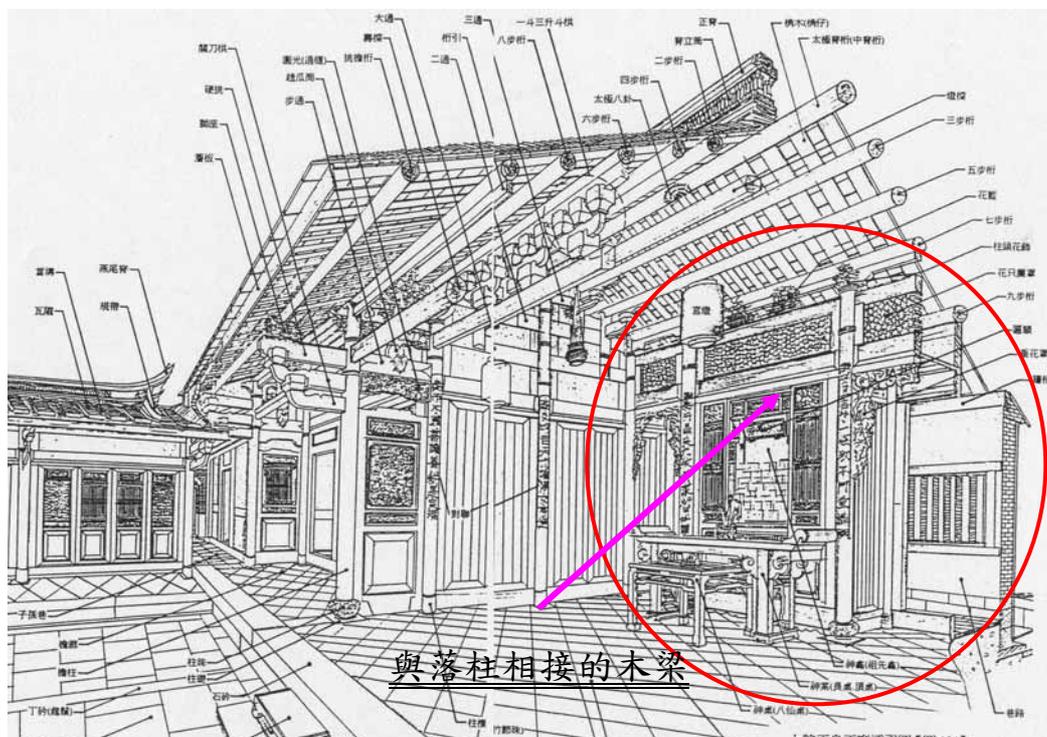


圖 3-14 正廳內界屏與木梁位置

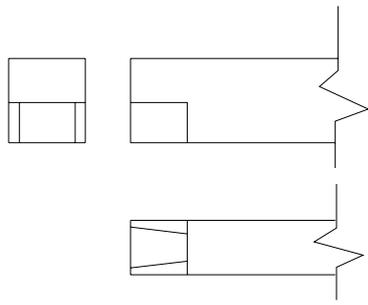


圖 3-15 踏步燕尾榫

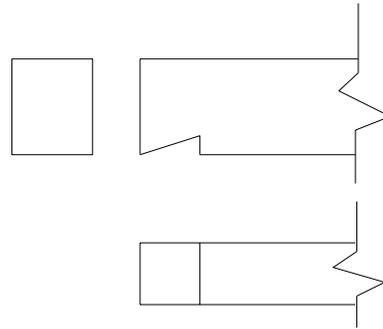


圖 3-16 鉤逗榫

燈梁接點可分為三大類，包括：(1) 透過木製底座連接至穿材上 (圖 3-17)、(2) 透過榫卯系統與柱材連接 (圖 3-18) 及 (3) 架在穿材上端 (圖 3-19) 等三種。此三大類中，第一與第三類在結構上皆沒有辦法發生效用，僅第二類接點可以因為榫卯系統而對構架間有拉繫作用。在分析田野調查資料後發現，在所有的調查案例中，第一類至第三類所佔的比例分別為 38.0%、19.0% 與 43.0%。



圖 3-17 透過底座連接至穿材上



圖 3-18 透過榫卯系統與柱材



圖 3-19 燈梁架在穿材上端

在燈梁的榫卯系統方面，根據解體現況調查與整理匠師的訪談紀錄後可以發現該類接點榫卯系統可分為兩種，第一種為燈梁尾端製作直榫與柱材相連，第二類則透過鉤逗榫與柱材相連。

本研究在進行試體製作期間訪談大木匠師，得到踏步燕尾榫及鉤逗榫的制式作法，整理如圖 3-20 所示。就踏步燕尾榫的燕尾而言，我們可以發現燕尾榫的三個向度的尺寸都一樣 (L)，可以有 1.5 寸及 2 寸兩種，若梁的寬度 (W) 或插入深度 (D) 大於 2 寸，則燕尾榫的尺寸採用 2 寸，否則則使用 1.5 寸。例如  $D=5.0\text{cm}$ ，則不論梁寬 (W) 是否超過 2 寸，燕尾榫的尺寸皆使用 1.5 寸。對於鉤逗榫來說，L 的選擇與踏步燕尾榫的選擇相同，也是分為 1.5 寸及 2 寸，若插入深度 (D) 為 7 公分，則使用 2 寸，否則則使用 1.5 寸。

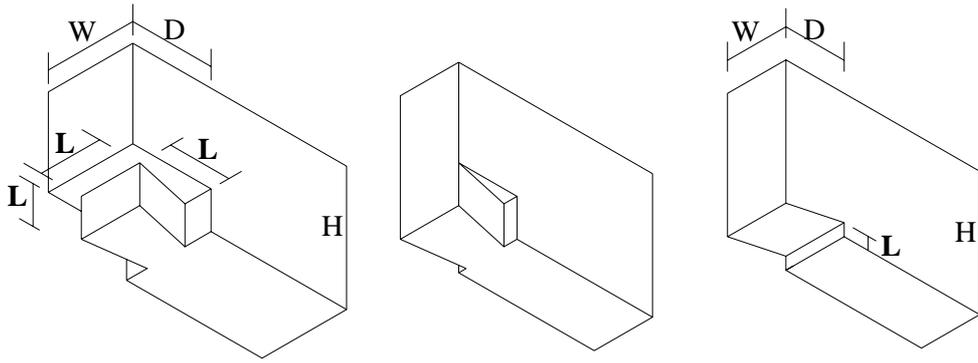


圖 3-20 踏步燕尾榫及鉤逗榫的制式作法

### 3-6 楹仔與柱材接點

一般而言，無論是柱材或童柱上方都會做成半圓形，而上承楹仔（圖 3-21）。此類接點（圖 3-22）一般而言皆被視為鉸接，然而現場調查發現部分接點會利用暗榫接合，這些暗榫對於楹仔的側移相當有幫助。由楹仔與柱材接點的旋轉自由體圖（圖 3-23）可以發現，若自外再加入外力，則接點本身對於楹仔的旋轉並無抵抗力，即使接點有暗榫，也僅能利用暗榫與柱材之間的摩擦力來抵抗楹仔的旋轉，因此對於旋轉勁度則幫助相當小。縱上所述我們可以發現，一般將楹仔與柱材接點設為鉸接是合理的，因此本研究擬不再針對此類接點進行研究。



圖 3-21 柱材上方都做成半圓形以支承楹仔



圖 3-22 楹仔與柱材接點

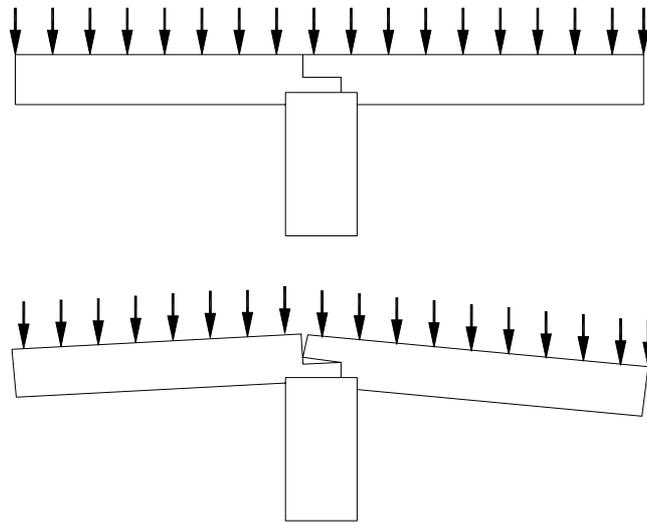


圖 3-23 楹仔與柱材接點旋轉自由體圖

## 四、接點的實驗規劃與分析

### 4-1 實驗規劃

為了使日後相關人員得以直接評估木造接點的旋轉勁度，本研究考慮適當的實驗設計法及配合足夠的試體數量，暨能瞭解影響穿鬮式木構架接點的因子，及該因子的影響程度，有了這樣的資料後可使我們日後可以更簡易的評估穿鬮式木造接點的旋轉勁度。

一般實驗計畫法可分為四種：(1) 試誤法 (trial-and-error)；(2) 一次一因子法 (one-factor-at-a-time)；(3) 全因子法 (full-factorial-experiments)，及 (4) 直交法 (orthogonal arrays)。試誤法乃憑個人的經驗及直覺，選擇一組設計參數，若實驗結果可以接受即可。這樣的方法太過依賴個人經驗，有時候很有效率，有時則非常沒有效率，是一個較沒有系統性的實驗法。一次一因子法是常常被使用的方法，亦即每一次實驗只變動一個因子，再一次求出各個因子的效應。這樣的方法有一個明顯的缺失，亦即該方法所求得的因子效應是在某一種偏見 (bias) 下所評估出來的。全因子法考慮了所有因子的可能排列，依次加以進行試驗，這樣的方法的好處是可以完全去除一次一因子法的偏見，但是這樣的方法亦有相當的缺點，即實驗量往往很大，例如欲討論 7 個因子，其中有 6 個因子有三種可能性，一種因子有 2 種可能性，則需要進行 1458 次試驗，顯然是相當沒有效率的。直交表法乃利用直交表進行試驗，是一種部分因子法 (Fractional Factorial Method)，此種試驗方法的好處在於可以用較少的實驗次數來獲得有用的統計資訊，其缺點在於無法完全消除一次一因子法的偏見，但是這樣的偏見在解決工程問題上是可以接受的了。上述四種實驗方法大部分皆採用於工業界產品的製程上，但是亦可使用於討論各種影響因子與品質特性的關係。

在木接點實驗特別要注意的部分，由於木材是一種相當複雜的材料，由於自然構造因素，使其彈性模數變化相當大。對於穿鬮式木接點而言，柱與穿接觸的彈性模數又有相當大的差異，順紋的彈性模數約為逆紋彈性模數的 20 倍。經研判，彈性模數會強烈影響木造接點的旋轉勁度，一般而言應將之列入討論因子。但本研究團對過去曾針對 60 組試體進行彈性模數試驗，發現這些試體的平均彈性模數為  $78500\text{kg/cm}^2$ ，標準差為  $13000\text{kg/cm}^2$ ，也就是說，約有 95% 的試體其彈性模數介於  $53000\text{ kg/cm}^2$  至  $104000\text{ kg/cm}^2$  之間。由此可知道，在進行實驗時，要控制木材的彈性模數是相當困難的，有可能在一批木料中，僅有 5% 的木料可以使用，在本研究中決定將之視為干擾因子，而不予控制。另外，由於國內過去亦曾經針對傳統木構架接點進行縮尺試體試驗，惟縮尺試驗的試驗結果僅能提供作為定性討論的依據，其原因在於接點的各種尺寸雖然縮小，然而木材纖維並未縮小，因此與實際接點的行為往往不可一概而論，這樣的差異一般稱之為『尺寸效應』(Size Effect)。因此在國外的相關研究中，鮮少針對木接點進行縮尺研究，為了使研究成果可以直接應用，本研究乃決定採用足尺試體加以試驗。

本研究在第一年度即使用直交表法此項實驗設計法，在透過變異分析後獲得接點旋轉勁度的評估公式，由於研究對象相同，因此本年度仍決定採用實驗設計法針對接點實驗進行規劃，並進行分析。然而實驗設計法並非沒有缺點，根據第一年的經驗，前面提及在『適當的偏見下』代表著必須犧牲某些因子間交互作用的資訊，以 L4 表為例，L4 表可以處理三個有兩水準變化的因子，A、B、C (表 4-1)，由表 4-1 可知，主因子 A、及 C 會分別跟其他兩因子的交互作用互相混淆，這也就代表說無法分辨出主因子與因子間交互

作用的影響。這是變異數分析 (ANOVA) 方法本身的限制，在這樣的情形下，在適當的因子中加入另一個水準，不但可以解決這樣的問題，在進行分析時也會變的較有彈性，除了可以使用傳統的變異分析以外，亦可以作曲線估計及可使用迴歸分析來加以處理。因此本研究決定採用這樣的實驗設計法來規劃實驗。

表 4-1 L4 直交表

Run	A	B	C	A×B	A×C	B×C
1	1	1	1	1	1	1
2	1	-1	-1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	-1	1	-1
4	-1	-1	1	1	-1	-1

◎ 由上表可知 A 的因子安排與 B×C (B 及 C 的交互作用) 相同，而 B 的安排又與 A×C 相同，C 的安排則與 A×B 相同。

在各類接點實驗規劃方面，前一章已經說明，由於楹仔與柱材接點之受力行為很明顯與鉸接類似，而柱材與基礎、童柱與穿材接點兩類其行為亦與剛體旋轉運動類似，因此本研究實驗對象僅剩兩種接點，包括：(1) 門檻、門楣或燈梁與柱材接點 (踏步燕尾樺及鈎逗樺)、(2) 穿材與牆體接點。以下分別針對各項實驗計畫進行說明。

#### 4-2 門檻、門楣或燈梁與柱材接點

##### 4-2-1 實驗計畫

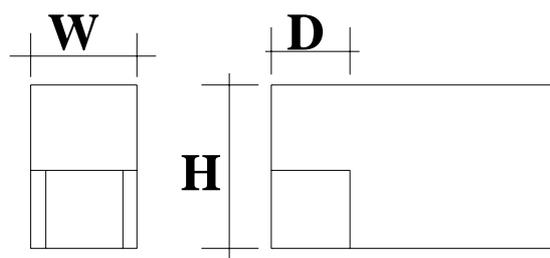
在旋轉勁度與極限彎矩實驗方面主要在測試踏步燕尾樺與鈎逗樺對於旋轉的反應。根據第一年的研究結果顯示，柱材的寬度往往不會成為影響接點旋轉勁度的主要因子，因此本次實驗規劃將柱材尺寸固定為 18 公分的正方形斷面。由於討論因子包括梁寬、梁深及插入柱材深度等三種因子，因此選擇 L4 直交表來規劃實驗。但由於

若每種因子的變異只有兩個水準，在分析時僅能進行變異數分析，因此為了日後分析方便，額外再加入一種尺寸的組合，即在梁寬加入一個水準的變異，這樣的安排使日後的分析不但可以使用傳統的因子分析，尚可使用迴歸分析，因此可以有兩種分析方式。實驗規劃則如表 4-2 所示，踏步燕尾榫及鈎逗榫各有 15 組試體，共 30 組。在試體製作方面，係請大木匠師在成功大學結構實驗室製作，在試體完成後，接點利用楔形木塊塞住以使其穩固（如圖 4-1）。在試體加載方面，利用千斤頂試體針對接點進行往覆加載，加載時歷如圖 4-2 所示，實驗裝置如圖 4-3 所示。

表 4-2 踏步燕尾榫與鈎逗榫實驗設計

實驗	W	H	D	數量
A	6	12	5	3
B	6	18	7	3
C	9	12	7	3
D	9	18	5	3
E	7.5	12	5	3

◎踏步燕尾榫與鈎逗榫實驗設計皆相同



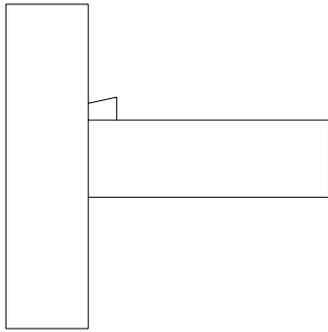


圖 4-1 實驗試體外觀

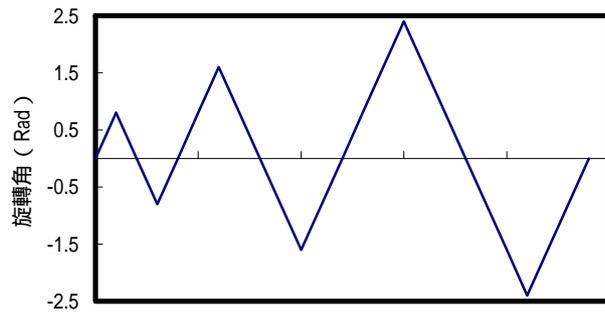


圖 4-2 往覆施力時歷

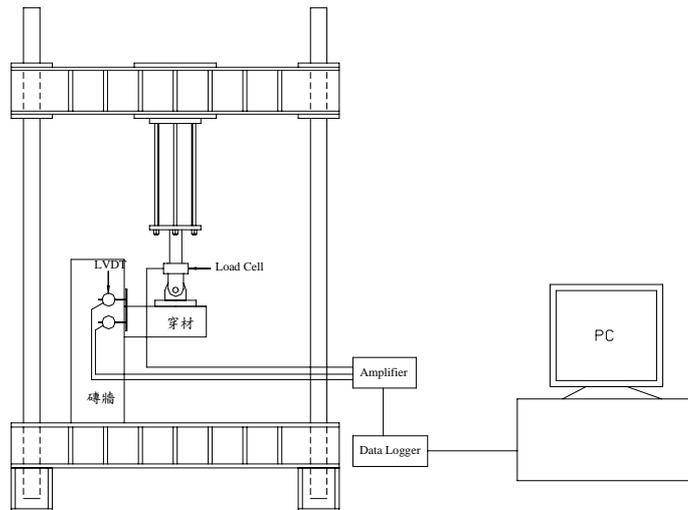


圖 4-3 接點實驗裝置圖

## 4-2-2 實驗結果與分析

### 4-2-2-1 結構行為

30 組試體的  $M-\theta$  圖如圖 4-4 所示。經過 30 組試驗後發現，無論是踏步燕尾榫亦或是鉤逗榫的遲滯迴圈不但不具對稱性，且在正向旋轉（順時針旋轉）時其剛度皆非常的小，甚至沒有剛度。當發生反向旋轉時則會有明顯的剛度出現。而當負彎矩發生時，楔子會陷入梁與柱之間（embedment），因此在欲給予反向施力時反而需要用較大的力量才能將其分開。由接點的  $M-\theta$  可知，接點在受到正向彎矩與負向彎矩時其行為有相大的差異，且由圖 4-4 可知，這類接點（不論是鉤逗榫或是踏步燕尾榫）的遲滯迴圈中的回覆力（Restoring force）皆非常的小，而且在每一週次的施力結束後，

梁會被漸次的拔出（圖 4-5），這樣的結構行為將會增加日後進行結構分析的困難度。

另外當接點在受到正向彎矩時，原本塞住柱梁接點的楔子會與柱材相互分離（圖 4-6），此時如果再有些微的側向力則楔子會有掉落之虞，當楔子發生掉落的情形後，便無法抵抗反向的彎矩，使得整個接點失去彎矩的抵抗力，而變成類似鉸接的行為。這樣的情形不只在台灣會發生，在有類似構造的地區如日本也會有相同的情形發生，並且導致建築物的崩塌（杉山英南，1996）。

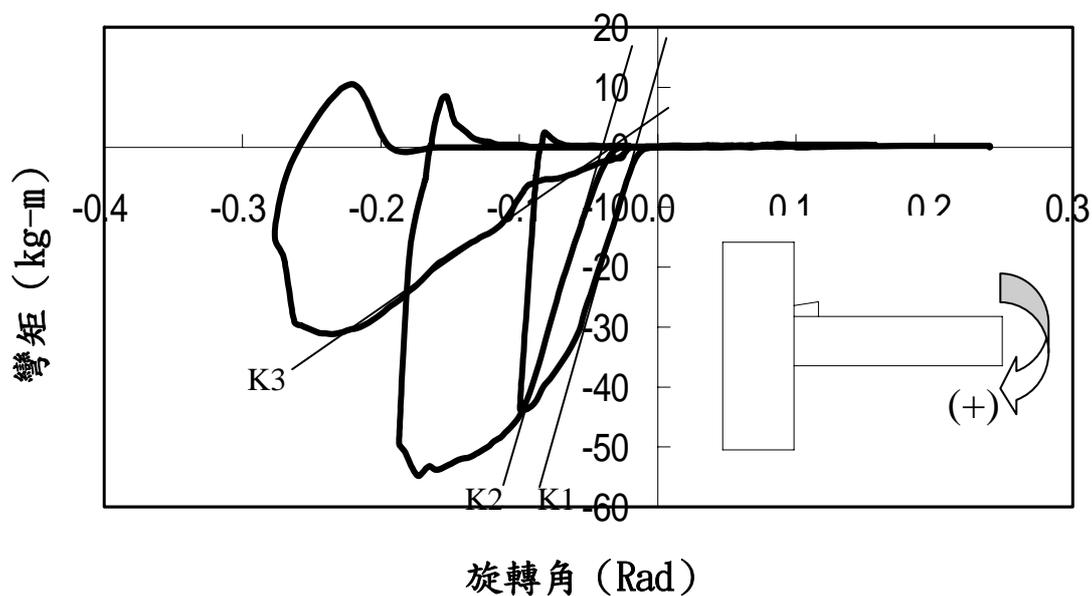


圖 4-4 接點的  $M-\theta$  圖

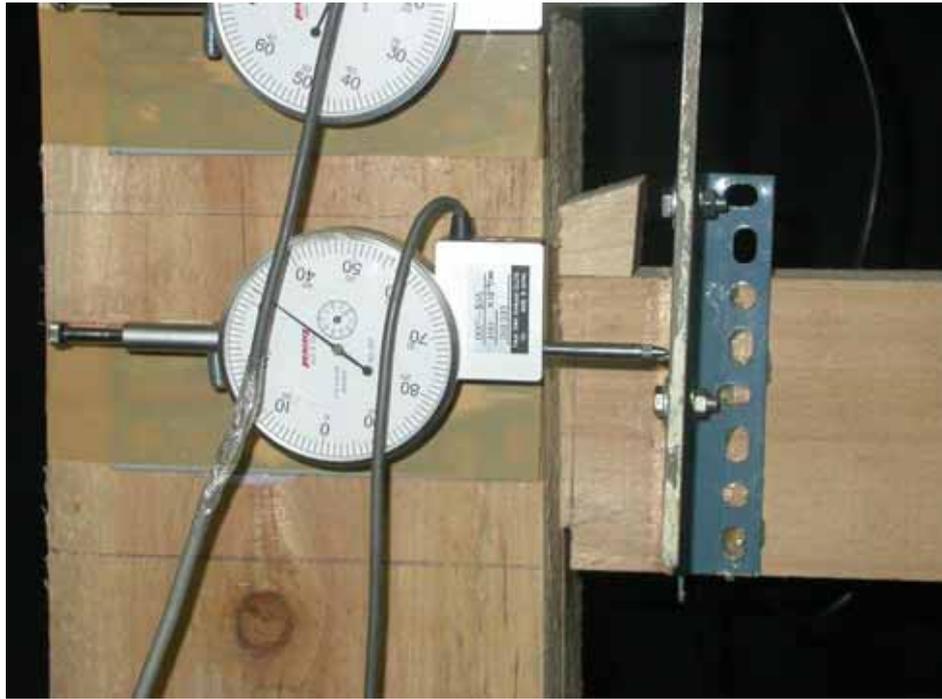


圖 4-5 每一週次施力結束後梁被逐漸拔出

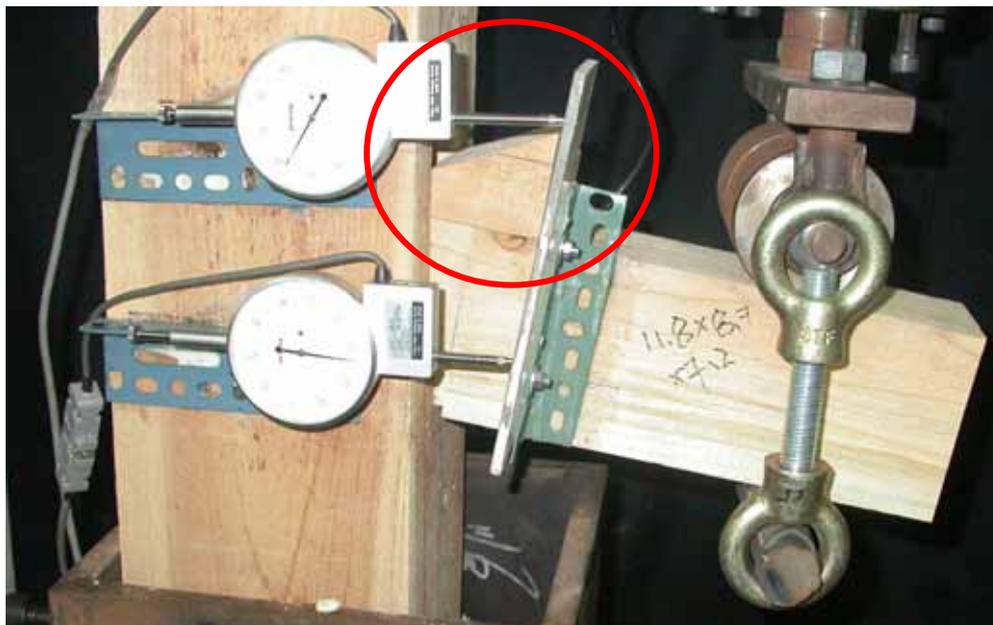


圖 4-6 正向彎矩時發生楔子與柱材發生脫離。

#### 4-2-2-2 兩種接點的破壞模式

由於兩種接點的力學特性不同，因此其破壞模式亦有相當大的差異。就鉤逗樺而言，主要破壞模式有兩種。在柱材上，破壞模式如圖 4-7 所示，而在梁上則主要在梁鉤逗的部分發生面內剪力破壞

(如圖 4-8)。踏步燕尾榫的破壞模式則主要集中在柱材上，在柱材燕尾榫眼的部分會有外翻的狀況，且梁會被逐漸拔出(圖 4-9)。



圖 4-7 柱材鉤逗部位發生破壞



圖 4-8 梁鉤逗部分發生面內剪力破壞



圖 4-9 柱材燕尾榫眼部分發生外翻，梁被拔出

#### 4-2-2-3 鉤逗榫的旋轉勁度與極限彎矩

由於前面已經說明，鉤逗榫在受到正向彎矩時幾乎沒有勁度，因此在此僅討論及受到負向彎矩時的行為。鉤逗榫的實驗結果如表

4-2 所示，由表 4-2 可知鉤逗樺的旋轉勁度約介於 600-1200kg-m 之間，而極限彎矩則介於-42k~-106 kg-m 之間。

利用迴歸分析可以針對接點的旋轉勁度 ( $K_i$ ) 及極限彎矩進行分析，由於前面提過在進行實驗設計時，在梁寬部分 ( $W$ ) 加入一個水準，因此在分析時可以針對梁寬部分進行曲線估計，迴歸分析後，接點的初始勁度及極限彎矩可以表示如下：

$$K_i = 7.306 \times W^2 + 2.352 \times H \times D + 317.163 \quad R^2 = 0.86, P < 0.001$$

$$M = 19.629 - 12.459 \times W \quad R^2 = 0.83, P < 0.001$$

其中  $K_i$ 、 $M$ 、 $W$ 、 $H$ 、 $D$  分別代表接點的旋轉勁度 (kg-m)、接點的極限彎矩 (kg-m)、梁的寬度 (cm)、梁的深度 (cm) 及梁插入柱材的深度 (cm)。

初始剛度的迴歸預測式中， $W^2$  與  $H \times D$  的標準化 Beta 係數分別為 0.9 與 0.348。由此可知，初始剛度主要來自  $W^2$  的貢獻。另外要特別注意的是，雖然迴歸式中顯示，梁的寬度與接點的極限彎矩成負相關，但由於極限彎矩具有方向性，因此若以絕對值來考量，梁的寬度應與接點的極限彎矩成正相關，亦即梁的寬度越寬，則接點的極限彎矩越大。

表 4-2 鈎逗樺實驗結果

	H (cm)	W (cm)	D (cm)	K1 (kg-m)	極限彎矩 (kg-m)
A-1	11.5	5.2	5	607.5172	-43.68
A-2	11.8	5.9	5.1	826.087	-48.46
A-3	12.3	6	5	718.9613	-54.83
B-1	17.8	6	7	877.3063	-58.87
B-2	18	6	7	887.767	-61.93
B-3	17.8	5.8	7.2	838.8889	-42.29
C-1	12	8.8	6.9	1003.384	-90.28
C-2	11.9	8.9	7	1104.615	-85.65
C-3	11.8	9	6.9	1184.96	-86.08
D-1	18	9	5	1202.318	-86.64
D-2	18.3	8.9	5	995.1797	-84.36
D-3	17.7	8.7	5	1126.625	-106.5
E-1	11.7	7.5	5.1	845.0255	-87.51
E-2	12	7.8	5	826.2588	-71.94
E-3	12.2	7.8	5	913.0653	-83.27

#### 4-2-2-4 踏步燕尾樺的旋轉勁度與極限彎矩

由於踏步燕尾樺在受到正向彎矩時亦幾乎沒有勁度，因此僅討論及受到負向彎矩時的行為。踏步燕尾樺的實驗結果如表 4-3 所示，由表 4-3 可知鈎逗樺的旋轉勁度約介於 470~1480kg-m 之間，而極限彎矩則介於-59k~-120 kg-m 之間，其極限彎矩值大致比鈎逗樺的極限彎矩大。

利用迴歸分析可以針對接點的旋轉勁度 ( $K_i$ ) 及極限彎矩進行分析，與鈎逗樺相同，可以針對梁寬進行曲線估計，迴歸分析後，接點的初始勁度及極限彎矩可以表示如下：

$$K_i = 43.384 + 8.79 \times H \times W \quad R^2 = 0.84, P < 0.001$$

$$M = -18.801 - 0.885 \times W^2 - 0.273 \times H \times D \quad R^2 = 0.86, P < 0.001$$

其中  $K_i$ 、 $M$ 、 $W$ 、 $H$ 、 $D$  分別代表接點的旋轉勁度 (kg-m)、接點的極限彎矩 (kg-m)、梁的寬度 (cm)、梁的深度 (cm) 及梁插入柱材的

深度 (cm)。

在極限彎矩的迴歸預測式中， $W^2$  與  $H \times D$  的標準化 Beta 係數分別為 0.932 與 0.345。由此可知，極限彎矩主要來自  $W^2$  的貢獻。

表 4-3 鈎逗榫實驗結果

	H (cm)	W (cm)	D (cm)	K1 (kg-m)	極限彎矩 (kg-m)
A-1	12.0	5.9	5.0	473.22	-61.84
A-2	12.2	6.0	5.0	686.00	-65.14
A-3	12.3	6.0	5.0	709.56	-65.37
B-1	18.1	5.8	7.1	1069.20	-75.80
B-2	17.8	6.2	7.0	1002.51	-92.57
B-3	17.6	5.8	6.9	922.60	-88.66
C-1	11.9	9.1	7.0	1107.61	-112.4
C-2	11.8	8.7	7.0	1063.03	-100.50
C-3	12.0	8.7	7.0	917.32	-106.92
D-1	17.9	9.0	4.9	1353.14	-114.70
D-2	17.6	8.7	4.7	1478.26	-122.20
D-3	17.7	8.4	5.0	1262.18	-93.84
E-1	12	7.8	5.2	1036.19	-96.21
E-2	12.1	7.9	5.0	725.79	-59.15
E-3	11.8	7.7	5.2	853.99	-94.42

#### 4-2-2-5 兩種接點的極限強度與剛度衰減比較

根據實體解體調查可以發現，此類面外接點共有兩種，包括如第一年研究對象中的平接接點及踏步燕尾榫兩種。但在試體製造過程中，根據大木匠師陳天平的說法當代進行修復時，多採用鈎逗榫，其原因在於根據匠師的經驗，鈎逗榫的強度大於踏步燕尾榫的強度，因此此兩種接頭的強度比較遂成為本研究的重點。因此欲比較兩種接點的極限彎矩值與初始剛度大小，可採用獨立樣本的 t 檢定，針對不同尺寸安排的試體分別進行平均值的比較，其比較結果如表 4-4 所示。

表 4-4 兩種接點極限彎矩及旋轉勁度平均值比較

	極限彎矩	旋轉勁度	W (cm)	H (cm)	D (cm)
A	踏步燕尾榫	NA	6	12	5
B	踏步燕尾榫	踏步燕尾榫	6	18	7
C	踏步燕尾榫	NA	9	12	7
D	踏步燕尾榫	踏步燕尾榫	9	18	5
E	踏步燕尾榫	NA	7.5	12	5

極限彎矩及旋轉勁度兩列中的接點名稱代表平均值較大者，而NA表示兩種接點沒有任何一種明顯大於另一種。  
H、W、D 代表原本設計的尺寸。

由表 4-4 可知在極限彎矩方面，踏步燕尾榫在所有的狀況中都顯著大於鈎逗榫（在 95%的信心水準下）；而在旋轉勁度方面則僅在尺寸編號 B 及 D 的狀況下，踏步燕尾榫顯著大於鈎逗榫。比較各種尺寸可以發現踏步燕尾榫的旋轉勁度在梁深度為 18cm 時會明顯大於鈎逗榫的旋轉勁度，而在梁深較淺（12cm）時，則沒有明顯的趨勢。這樣的結果與大木匠師的經驗並不相符，因此建議日後遇到梁深較深的修復案例中，還是應該製作傳統的踏步燕尾榫。

當接點在受到非常大的外力作用而進入非線性階段時，接點的勁度與強度會逐漸衰減。本研究由於針對木接點進行往覆載重，且利用位移控制依照 0.08 弧度逐漸遞增，在這樣大的變位中通常已經進入非線性階段，因此在所有的案例中幾乎都有剛度衰減。所有接點各次週期的勁度如表 4-5 及表 4-6 所示，其中  $K_1$ 、 $K_2$  及  $K_3$  分別代表第一、二及第三週次的旋轉勁度（如圖 4-4）。由表 4-5 及 4-6 可知，接點的剛度大多逐次衰減，就鈎逗榫點來說，第二週次的旋轉勁度平均僅為第一週次的約 75%，而第三週次又衰減成第二週次的

58%；就踏步燕尾樺接點而言，第二週次的旋轉勁度尚能保有第一週次的約 90%，而第三週次便衰減成第二週次的 50%。由這個地方可知，踏步燕尾樺在第二週次（旋轉角小於 0.16rad）時的勁度保有能力較鉤逗樺為佳。這樣的現象可能係因為兩種不同接點破壞模式的關係，通常在第一週次施力時，鉤逗樺的柱材大多已經發生破壞，因此在第二次載重發生時，其旋轉勁度便會明顯下降。反觀踏步燕尾樺的在第一週次施力時，大多僅梁上燕尾樺部位受到柱材上樺眼明顯的擠壓。

再針對各個試體的衰減率進行分析後發現，各試體的勁度衰減率與影響其旋轉勁度的因子之間並沒有很顯著的關係，因此在這裡僅取其平均值做為該種類接點勁度衰減的代表。

表 4-5 鉤逗樺勁度衰減比較

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_2 / K_1$	$K_3 / K_2$
A-1	607.52	442.83	85.44	0.729	0.193
A-2	826.09	621.33	255.32	0.752	0.411
A-3	718.96	530.32	200.84	0.738	0.379
B-1	877.31	633.73	604.91	0.722	0.955
B-2	887.77	516.04	141.62	0.581	0.274
B-3	838.89	653.32	422.32	0.779	0.646
C-1	1003.38	813.38	283.77	0.811	0.349
C-2	1104.62	818.61	588.65	0.741	0.719
C-3	1184.96	977.32	938.60	0.825	0.960
D-1	1202.32	892.34	667.51	0.742	0.748
D-2	995.18	803.84	185.58	0.808	0.231
D-3	1126.63	962.66	705.32	0.854	0.733
E-1	845.03	689.38	404.79	0.816	0.587
E-2	826.26	628.66	503.53	0.761	0.801
E-3	913.07	773.34	612.40	0.847	0.792
平均				0.767	0.585

表 4-6 踏步燕尾榫勁度衰減比較

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_2 / K_1$	$K_3 / K_2$
A-1	473.22	404.32	223.33	0.854	0.552
A-2	686.00	680.32	304.56	0.992	0.448
A-3	709.56	677.99	336.33	0.956	0.496
B-1	1069.20	903.44	553.39	0.845	0.613
B-2	1002.51	946.45	493.53	0.944	0.521
B-3	922.60	681.49	368.83	0.739	0.541
C-1	1107.61	1100.61	603.32	0.994	0.548
C-2	1063.03	945.23	455.79	0.889	0.482
C-3	917.32	900.32	432.93	0.981	0.481
D-1	1353.14	1321.05	620.38	0.976	0.470
D-2	1478.26	1284.83	773.93	0.869	0.602
D-3	1262.18	923.78	403.22	0.732	0.436
E-1	1036.19	830.32	477.18	0.801	0.575
E-2	725.79	701.32	337.21	0.966	0.481
E-3	853.99	802.55	389.92	0.940	0.486
平均				0.899	0.515

#### 4-2-3 結論

在經過 30 組足尺試驗後，對於門檻、門楣或燈梁與柱材接點的結論可整理如下：

1. 無論是踏步燕尾榫亦或是鉤逗榫在正向旋轉時其幾乎都沒有剛度。而當發生反向旋轉時則會有明顯的剛度出現。
2. 鉤逗榫接點的初始勁度及極限彎矩可以表示如：

$$K_i = 7.306 \times W^2 + 2.352 \times H \times D + 317.163$$

$$M = 19.629 - 12.459 \times W$$

且初始旋轉勁度主要來自梁寬的貢獻。

3. 踏步燕尾榫接點的初始勁度及極限彎矩可以表示如：

$$K_i = 43.384 + 8.79 \times H \times W$$

$$M = -18.801 - 0.885 \times W^2 - 0.273 \times H \times D$$

且極限彎矩主要亦來自梁寬的貢獻。

4. 踏步燕尾榫的極限彎矩在所有的狀況中都顯著大於鉤逗榫；而旋轉勁度方面則僅在梁深較深時（18cm）才會顯著大於鉤逗榫。

#### 4-3 穿材與牆體接點

在前一章已經說明本研究對象僅限於穿材同時穿過附壁柱及磚牆的案例，因這樣的案例在所有的案例中所佔的比例最大（約 83 %）。在考慮這類接點的結構行為時發現，對於半圓形柱材來說，是利用順紋的強度與穿材接觸，而穿材則是利用逆紋與柱材及磚牆接觸，不論是木材順紋或磚牆的強度及彈性模數遠遠大於木材逆紋的強度與彈性模數，這樣的力學特性與第一年的研究對象相當的接近。根據第一年的研究成果，其旋轉勁度應與穿材插入深度的平方項與寬度成正比，因此針對插入的深度有必要作較高次方的曲線估計。基於此，實驗規劃如表 4-7 所示，共 27 組試體。此部分的實驗結果將在最後報告中提出。

表 4-7 穿材與牆體接點實驗規劃

	梁寬	梁深	插入深度	數量
A	9	18	15	3
B	9	18	18	3
C	9	18	24	3
D	6	12	15	3
E	6	12	18	3
F	6	12	24	3
G	9	12	15	3
H	9	12	18	3
I	9	12	24	3

◎插入深度為半柱厚（9cm）及插入磚牆深度的總和。

## 五、結論與建議

### 5-1 結論

本研究在經過實體史料的初步分析及足尺試驗後，得到以下初步結論：

1. 所有調查案例的柱材其平均寬度約為 16.7 公分，台南縣市的平均約為 18.0 公分；嘉義約為 15.3 公分；南投縣的案例約為 15.9 公分；而彰化縣的案例約為 17.3 公分。
2. 所有案例中童柱的平均寬度約為 15.5 公分，且其斷面大多為矩形。雖然與童柱相接的穿材寬度大多介於 6-7 公分之間，但童柱的平均寬度還是有一些差異的。台南縣、嘉義縣、南投縣與彰化縣四個區域的童柱其平均寬度各約 16.1 公分、14.1 公分、15.6 公分、16.7 公分。
3. 實體調查結果方面可以發現，混合形式接點約有 83.8%，而磚/木接點形式及木/木接點形式則分別有 12.2%與 4.1%的比例，可說是相對較少。另外調查結果發現在第一類接點中，半圓形的附壁柱其直徑大多與中柱相同。
4. 燈梁接點可分為三大類，包括：(1) 透過木製底座連接至穿材上、(2) 透過榫卯系統與柱材連接及 (3) 架在穿材上端等三種。在分析田野調查資料後發現，在所有的調查案例中，三個種類所佔的比例分別為 38.0%、19.0%與 43.0%。
5. 無論是踏步燕尾榫亦或是鈎逗榫在正向旋轉時其幾乎都沒有剛度。而當發生反向旋轉時則會有明顯的剛度出現。且踏步燕尾榫的極限彎矩在所有的狀況中都顯著大於鈎逗榫；而旋轉勁度方面則僅在梁深較深時 (18cm) 才會顯著大於鈎逗榫。
6. 鈎逗榫接點的初始勁度及極限彎矩可以表示如：

$$K_i = 7.306 \times W^2 + 2.352 \times H \times D + 317.163$$

$$M = 19.629 - 12.459 \times W$$

且初始旋轉勁度主要來自梁寬的貢獻。

7. 踏步燕尾榫接點的初始勁度及極限彎矩可以表示如：

$$K_i = 43.384 + 8.79 \times H \times W$$

$$M = -18.801 - 0.885 \times W^2 - 0.273 \times H \times D$$

且極限彎矩主要亦來自梁寬的貢獻。

## 5-2 建議

### 建議一

針對接點弱點提出補強建議：立即可行建議

主辦機關：內政部建研所

協辦機關：文建會、民政司

由本研究實驗成果可知鉤逗榫及踏步燕尾榫接點的弱點相當明顯，除了遲滯模式不對稱以外，承受正向彎矩的能力亦相當的弱。因此宜針對鉤逗榫及踏步燕尾榫這個部分的弱點及上一年度所研究之梁柱接點進行補強研究，並提出補強的建議。補強的重點除了提升接點的旋轉勁度以外，還需要考慮接點在承受往覆載重時的遲滯模式及韌性等，以期建築物在承受地震力作用時可以承受更大的能量。

值得特別注意的是這樣的研究成果應能提供古蹟修復業界參考，並能予以量化以做為科學的依據。

### 建議二

提出穿鬮式木構架耐震評估方式：中長期建議

主辦機關：文建會、民政司

協辦機關：內政部建研所

由於本整合型研究案在第一年及第二年進行了相當多的基礎研究，且至今已稍具成果，而基礎研究的目的是在於提供此類木構造未來建立耐震評估方式的參考資料。由於日本已針對該國中傳統木構造的耐震力提出不同的耐震評估方式，亦已集結成冊。從研究實用的角度來說，在後續的研究上亦應該以制訂相關耐震評估及補強的手冊及規範做為目標，其中補強的規範尤為重要。

惟在達成這個目標之前，針對穿鬮式木構架其他結構構件的基礎研究必須先完成，諸如堵板牆的評估方式、整架木構造的足尺實驗來修正之前的研究成果等。因此這樣的相關手冊及規範可以做為未來在進行穿鬮式木構架震前結構評估及震後補強的依據。

## 六、參考文獻

- [01] 閻嘉義、金文森、鄭振坤，(1993)，《傳統建築木構架力學系統初步研究—樑頭行為》。行政院文建會委託研究計畫。台北，台灣。
- [02] 陳啟仁，(2003)，《古蹟及歷史建築日式及西式大木作現場檢測技術及流程之研究》。國科會專題計畫期末報告。台北，台灣。
- [03] 徐明福、林宜君、張紋韶、黃佩臻，(2003)，《台灣傳統式古蹟及歷史建築耐震能力之基礎研究(3)—穿鬥式木構架結構特徵與接點之調查與解析》期末報告。內政部建築研究所委託研究計畫。台北，台灣。
- [04] 張紋韶、陳啟仁、徐明福，(2004)。《運用應力波非破壞檢測方法研判台灣傳統穿鬥式木接點形式之研究》。建築學報(已通過)。
- [05] Chang, Wen-Shao; Chen, Chi-Jen; Hsu, Min-Fu; Yao, G. C. (2003) , " Estimating Rotational Stiffness of Timber Joints by Using Fractional Factorial Experiments Combined With Computer Simulation" , Submitted to Computer & Structures 。
- [06] 陳啟仁、張紋韶，(2003)，《台灣傳統式古蹟及歷史建築耐震能力之基礎研究(1)—磚木混造建築結構分析模式之建立》期末報告。內政部建築研究所委託研究計畫。台北，台灣。
- [07] Fujita, Kaori; Sakamoto, Isao; Ohashi, Yoshimitsu; Kimura, Masahiko , (2000) , " Static and dynamic loading tests of bracket complexes used in traditional timber structures in Japan" 。 Proceeding of 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering , paper no. 0851 , New Zealand 。
- [08] 王天著，古代大木作靜力初探，文物出版社，北京，1992。

- [09] Fang, D. P. et al. , Ancient Chinese timber architecture, II: dynamic characteristics , Journal of structural engineering , Vol. 127, No. 11 , 2001 , pp. 1358-1364 ◦
- [10] Tsuwa,I., Suzuki,S., Asano,K. “Modeling of Restoring-Force Characteristics of a Traditional Wooden-Frame Structure and its Earthquake Response Analysis” Transactions of the architectural institute of Japan Kinki network, 2003, p25-p28
- [11] Nakahara,K., Nagase,T. “Earthquake Response of Rocking column in Japanese Traditional Wooden Structure” Summaries of technical papers of annual meeting architectural institute of Japan, 2000.9, C-1 fascicle p141-142