

# 結構修復技術整合型研究計畫

台灣傳統古蹟及歷史建築耐震能力之基礎研究

(三) 子計畫 2：穿鬪式木構造之補強技術研究

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國九十四年十二月

PG9402 - 0467

094301070000G1015

# 結構修復技術整合型研究計畫

台灣傳統古蹟及歷史建築耐震能力之基礎研究

(三) 子計畫 2：穿鬪式木構造之補強技術研究

受委託者：中華民國建築學會

研究主持人：陳啟仁

研 究 員：張紋韶

研究助理：謝宗憲、陳偉傑

內政部建築研究所委託研究報告

中華民國九十四年十二月

目次

表次	.....	III
	...	
圖次	.....	V
	...	
照片	.....	I
	...	
摘要	.....	X
	...	
第一 前		1
	言.....	
	.....	
第二 文獻回		5
	顧.....	
	...	
第三 鈎逗樺及踏步燕尾樺弱點與補強策		9

	略……	
第一節	燈梁與柱材接點種類……	9
第二節	鈎逗樺及踏步燕尾樺力學弱點…	10
第三節	鈎逗樺及踏步燕尾樺補強策略…	13
第四節	踏步燕尾樺試驗結果討論……	22
第五節	鈎逗樺實驗結果討論……	38
第六節	補強策略之檢討與修正……	58
第七節	初步結論……	61
第四	穿鬪式木構架梁柱接點弱點、補強策略及試驗……	63

.....	
第一節 穿鬪式木構架梁柱接點種類.....	63
第二節 穿鬪式木構架梁柱接點力學弱點	64
第三節 穿鬪式木構架梁柱接點補強策略與試驗規劃.....	65
第四節 穿鬪式木構架梁柱接點試驗結果	68
第五節 試驗結果討論	79
第五 結論與建議.....	79
第一節 結論	79
第二節 建議.....	83

附錄一 期末簡報會議記	85
-------------	----

錄.....

參考書	87
-----	----

目.....

...

表次

### 表次

表 3-1 踏步燕尾樺試體補強設	1
------------------	---

計.....

表 3-2 鈎逗樺試體補強設	2
----------------	---

計.....

表 3-3 踏步燕尾樺實驗結	3
----------------	---

果.....

表 3-4	踏步燕尾榫平均旋轉勁度與平均旋轉彎矩之比 較..... .....	3
表 3-5	鉤逗榫實驗結果.....	5
表 3-6	鉤逗榫平均旋轉勁度與平均旋轉彎矩之比 較..... .....	5
表 3-7	實驗結果總整理.....	6
表 4-1	三種不同接點的力學性能比較.....	6
表 4-2	實驗試體規畫.....	6
表 4-3	鐵板與螺絲補強實驗結果.....	7

表 4-4	鐵板與螺栓補強實驗結果.....	7
表 4-5	燕尾榫搭接接點補強前後比較.....	7
表 4-6	斷開對接接點補強前後比較.....	8

圖次

### 圖次

圖 1-1	九二一地震受災古蹟與歷史建築中不同構造系統所佔比例.....	2
圖 1-2	傳統穿鬪式木構造在九二一地震中不同	

	破壞等級所佔比	2
	例.....	
圖 2-1	梁柱接點以貫通木栓固	6
	定.....	
圖 2-2	鐵片鐵釘固定補	6
	強.....	
圖 2-3	接點以角鐵補	6
	強.....	
圖 2-4	螞蝗釘的種類.....	7
圖 3-1	門檻門楣與柱材接點的三種接	1
	法.....	
圖 3-2	未補強前接點的 $M-\theta$ 圖.....	1
圖 3-3	S-V-B 系	1
	列.....	
圖 3-4	S-V-S 系	1
	列.....	

圖 3-5	S-H-B 系	1
	列.....	
圖 3-6	鐵片尺寸之設計.....	1
圖次		
圖 3-7	G-P 系	2
	列.....	
	...	
圖 3-8	G-I1 系列.....	2
圖 3-9	G-I2 系列.....	2
圖	接點的 M- $\theta$ 圖.....	2
	ε	
	-	
	1	
	0	
圖	S-V-B-1 遲至迴	2
	ε 圈.....	

-

1

1

圖 S-V-B-2 遲至迴 2

ε 圈.....

-

1

2

圖 S-V-B-3 遲至迴 2

ε 圈.....

-

1

ε

圖 S-V-S-1 遲至迴 2

ε 圈.....

-

1

4

圖 S-V-S-2 遲至迴 2

ε 圈.....

-

1

ε

圖 S-V-S-3 遲至迴 2

ε 圈.....

-

1

ε

圖 S-H-B-1 遲至迴 3

ε 圈.....

-

1

7

圖 S-H-B-2 遲至迴 3

ε 圈.....

-

1

ε

圖 S-H-B-3 遲至迴 3

ε 圈.....

-

1

ε

圖 踏步燕尾樺中遲至迴圈的剛度衰 3

ε 減.....

-

2

0

圖 S-V-B-1 遲至迴 3

ε 圈.....

-

2

1

圖 S-V-B-2 遲至迴 3

ε 圈 .....

-

2

2

圖 S-V-B-3 遲至迴 3

ε 圈 .....

-

2

ε

圖 S-V-S-1 遲至迴 3

ε 圈 .....

-

2

4

圖 S-V-S-2 遲至迴 3

ε 圈 .....

-

2

5

圖 S-V-S-3 遲至迴 3

ε 圈.....

-

2

6

圖 S-H-B-1 遲至迴 3

ε 圈.....

-

2

7

圖 S-H-B-2 遲至迴 3

ε 圈.....

-

2

8

圖 S-H-B-3 遲至迴 3

ε 圈.....

-

2

3

圖 G-I1 及 G-I2 系列接點 M-θ 3

圖.....

-

3

0

圖 G-P 系列接點 M-θ 3

圖.....

-

3

1

圖 G-P-1 遲至迴 4

圖.....

-

3

2

圖 G-P-2 遲至迴 4

ε 圈.....

-

ε

ε

圖 G-P-3 遲至迴 4

ε 圈.....

-

ε

4

圖 G-I1-1 遲至迴圈..... 4

ε

-

ε

ε

圖 G-I1-2 遲至迴圈..... 4

ε

-

圖 G-I1-3 遲至迴圈..... 4

圖 G-I2-1 遲至迴圈..... 5

圖 G-I2-2 遲至迴圈..... 5

圖 G-I2-3 遲至迴圈..... 5

	ε		
	-		
	4		
圖次	(		
圖	鉤逗樺中遲至迴圈的剛度衰		5
	ε	減.....	
	-		
	4		
	1		
圖	G-P-1 遲至迴		5
	ε	圈.....	
	-		
	4		
	2		
圖	G-P-2 遲至迴		5
	ε	圈.....	
	-		
	4		

ε

圖 G-P-3 遲至迴 5

ε

圈.....

-

4

4

圖 G-I1-1 遲至迴圈..... 5

ε

-

4

ε

圖 G-I1-2 遲至迴圈..... 5

ε

-

4

ε

圖 G-I1-3 遲至迴圈..... 5

ε

-

4

7

圖 G-I2-1 遲至迴圈..... 5

ε

-

4

ε

圖 G-I2-2 遲至迴圈..... 5

ε

-

4

ε

圖 G-I2-3 遲至迴圈..... 5

ε

-

ε

0

圖	S-V-B 系	6
ε	列.....	
-		
E		
1		
圖	G-II 系列.....	6
ε		
-		
E		
2		
圖 4-1	三種不同形式的梁柱接	6
	點.....	
圖 4-2	鐵板與螺絲補強試	6
	體.....	
圖 4-3	板板與螺栓補強試	6
	體.....	
圖 4-4	碳纖板補強試	6
	體.....	

圖 4-5	實驗裝置	6
	置.....	
	...	
圖 4-6	燕尾榫受力情形	7
	形.....	
圖 4-7	利用鐵板與螺絲補強燕尾榫搭接接點 M-	
	$\theta$	7
	圖.....	
	.....	
圖 4-8	利用鐵板與螺絲補強斷開對接接點 M-	7
	$\theta$	
	圖.....	
	.....	
圖 4-9	利用鐵板與螺栓補強燕尾榫搭接接點 M-	7
	$\theta$	
	圖.....	
	.....	
圖	利用鐵板與螺栓補強斷開對接接點 M-	7

4

$\theta$

-

圖.....

1

.....

C

照片次

照片	柱梁接點加斜撐補	5
2	強.....	
-		
1		
照片	斜撐加木板補	5
2	強.....	
-		
2		
照片	直樺與落柱相	9
3	接.....	
-		
1		
照片	踏步燕尾	9
3	樺.....	

-

2

照片 施力後梁逐漸拔 1

3

出.....

-

3

照片 楔子與柱材脫 1

3

離.....

-

4

照片 燕尾榫眼部發生外 1

3

翻.....

-

5

照片 鉤逗部位發生破 1

3

壞.....

-

6

照片	梁鉤逗發生面內剪力破	1
3	壞.....	
-		
7		
照片	固定螺絲與墊	1
3	片.....	
-		
8		
照片	補強用之竹	1
3	釘.....	
-		
9		
照片	竹釘以文火油	1
3	炸.....	
-		
1		
0		
照片	載重後，燕尾榫產生外翻破壞.....	2

3

-

1

1

照片

楔子與柱材分

2

3

離.....

-

1

照片次

2

照片

燕尾榫產生外翻破

2

3

壞.....

-

1

3

照片

柱材榫眼之空

2

3

隙.....

-

1

	4		
照片		柱材燕尾榫產生外翻破	2
	3	壞.....	
	-		
	1		
	5		
照片		楔子產生密壓及開裂破	2
	3	壞.....	
	-		
	1		
	6		
照片		柱材燕尾榫隨纖維走向發生外	2
	3	翻.....	
	-		
	1		
	7		
照片		楔子與梁產生密壓及開裂破	2
	3	壞.....	

-  
1  
8

照片 梁樺眼產生面內密壓破壞..... 3

-  
1  
9

照片 柱材鉤逗產生破壞..... 3

-  
2  
0

照片 柱材鉤逗產生外翻破壞..... 4

-  
2  
1

照片	楔子與柱材分	4
3	離.....	
-		
2		
2		
照片	梁鈎逗產生面內剪力破	4
3	壞.....	
-		
2		
3		
照片	柱材榫眼上下外翻破	4
3	壞.....	
-		
2		
4		
照片	梁鈎部分逗產生面內剪力破	4
3	壞.....	
-		

	2		
	5		
照片		楔子與梁膠合介面破	4
	3	壞.....	
	-		
	2		
	6		
照片		楔子膠合過量與不	4
	3	足.....	
	-		
	2		
	7		
照片		鐵片與螺絲脫	4
	3	離.....	
	-		
	2		
	8		
照片		梁鉤部分逗產生面內剪力破	4

3 壞.....

-

2

9

照片次

照片 鐵片補強鈎逗部位破壞較 4

3 小.....

-

3

0

照片 柱材鈎逗部位破壞較 4

3 小.....

-

3

1

照片 梁鈎逗部位產生較大面內剪力破 4

3 壞.....

-

3

	2		
照片		鐵片補強之效	4
	3	果.....	
	-		
	3		
	3		
照片		鐵板與螺絲補強燕尾榫破壞情	6
	4	形.....	
	-		
	1		
照片		鐵板與螺絲補強中螺絲局部破	6
	4	壞.....	
	-		
	2		
照片		鐵板與螺絲補強中燕尾榫發生破	7
	4	壞.....	
	-		
	3		

照片	鐵板與螺絲補強斷開對接破壞狀	7
4	況……	
-		
4		
照片	鐵片變形狀	7
4	況……………	
-		
5		
照片	鐵板與螺絲補強斷開對接螺絲破壞狀	7
4	況	
-		
6		
照片	鐵板與螺栓補強燕尾榫破壞狀	7
4	況……	
-		
7		
照片	燕尾榫接點破壞狀	7
4	況……………	

-

8

照片 燕尾樺底端方生開 7

4 裂.....

-

9

照片 螺栓並無嚴重破 7

4 壞.....

-

1

0

照片 鐵板與螺栓補強斷開對接破壞狀 7

4 況.....

-

1

1

照片 鐵板與螺栓補強斷開對接中螺栓並無

4 嚴重破 7

	-	壞.....	
	1		
照片次	2		
照片		螺栓孔之變	7
	4	形.....	
	-		
	1		
	3		

## 摘 要

關鍵詞：穿鬪式木構架、接點、補強、足尺實驗

穿鬪式木構架型態是台灣現存為數不少之傳統建築構造類型之一，其所涵蓋之建築用途甚廣，包括：廟宇、宅第及一般民宅等。此類建築具有高韌性、低強度之結構特性，在重大側向力作用時，往往因屋架之傾斜造成垂直載重之偏心作用，以致整體結構之傾斜甚或倒塌，造成若干重要文化資產嚴重破壞及生命財產

之損失。本研究延續第一年及第二年之木接點及編竹泥牆之個別研究成果，在結合實際修復工程之各項考量下，針對整體構造屋架之結構弱點，進一步提出補強措施及技術，並檢討各種不同的補強措施的效果。

本文將補強著重在提升接點的結構行為弱點上，包括鉤逗榫、踏步燕尾榫及梁柱接點的補強。在鉤逗榫與踏步燕尾榫方面，踏步燕尾榫補強效果方面，以楔子所產生之縱向壓縮加上竹釘的補強設計為最佳，在補強構件方面，以竹釘補強的旋轉剛度及楔子纖維的破壞情況來考量，竹釘補強優於螺絲補強。因此建議，日後在面對踏步燕尾榫的補強時，楔子的選擇，應以其纖維方向垂直梁的纖維走向為首要考量，亦即是以縱向壓縮加上竹釘作補強之設計。在鉤逗榫的補強效果方面，以兩塊鐵片補強的設計為最佳，這與柱身之鉤逗榫眼部位產生的開裂破壞影響有關。

而在梁柱接點方面，由於梁柱接點有連續型、斷開對接與燕尾榫搭接等三種，而梁構件為不連續的接點其力學性能有顯著的下降，因此針對斷開對接與燕尾榫搭接兩種接點進行補強。其中發現利用鐵板與螺栓補強的試體不論在旋轉勁度與極限彎矩兩方面皆有顯著的提升作用。

## **ABSTRACT**

Key words : Chuan-Dou timber structures, Joints, Reinforcement, Full-scale experiments

Mechanical behaviors of Timber connections of Chuan-Dou Structures are the most popular and well-known construction structures. These were used for generally places, houses, and temples in the early edge. However, many buildings such as historical sites, old construction ornamental, have been

damaged after 921 earthquakes. However, the researches on timber joints have attracted more attention recently in Taiwan; and Chuan-Dou connections, especially, which are caught people's attention and have more researches on it. So this research is as drawing and tying the function and offering the mechanics characteristic of the other rigidity contact the framework to this kind of contact mainly, to carry on research and analysis.

According to the researches in the past, the lintel, Liang and column, this kind of surface connections shown they are sluggishly returns to the circle, not to have the symmetry. Also, it has a direction to revolve stiffness which is small. Therefore according reference, we can analyse the Stepped Dove-tail and Go-Dou Connections under the function of shortcoming and destruction pattern of ultimate moment capacity and by experiment of actual size instead of the experiment of smaller size; then aims at these destruction patterns and the shortcoming preferment to improve. Also, based on the existing historical sites of preservation of international charter, using the epoxy resin to match the screw, peg, iron sheet, and so on, which invertible the labor laws aims at the contact to carry on making up strongly and then discuss these in the similar foundation to make up the strong measure, the effect and its to revolves the behavior influence.

After 18 tests of reinforced experiment, we discovered two results as below: (1)Improvement of Positive rotational stiffness and ultimate moment. (2)The decrease Positive stiffness of Hysteretic loop more than decrease of Negative stiffness. (3)The change of destruction level. However, according to the whole reinforced effect, (1) Stepped Dove-Tail connections, produces take the wedge the compressive parallel to grain adds on peg makes up the strong design as to be best. (2) Go-Dou connections, makes up the strong design take two iron sheets as to be best. Makes up by this two kinds strongly tries the body the mechanical properties and the destruction pattern looked that, the future following research will be allowed towards the lignin material natural deviancy, the metal to buckle the geometry condition the change and the artificial Shi Tso accuracy, will make the consideration design prediction models for rotational stiffness and ultimate moment capacity.

## 第一章 緒論

本研究案為內政部建築研究所『台灣傳統古蹟及歷史建築耐震能力之基礎研究』之第三年計畫，前兩年分別針對穿鬪式木構造接點系統及編泥牆之力學行為進行調查及足尺力學試驗研究，而今年則主要集中於各種接點的補強與木堵板牆體的調查與實驗研究。

九二一地震至今已逾五年，許多傳統穿鬪式木構架在地震中因為損壞而拆除，造成無法回復的浩劫。雖然在地震過後有許多專家學者針對古蹟及歷史建築的力學行為投入相當多的關注，可是對於相關的補強研究仍相當的缺乏。張紋韶（2005）整理九二一地震後的勘災報告後發現，在許多受到損壞的古蹟及歷史建築中，約有44%的比例為穿鬪式木構架（如圖1-1），而在這為數甚多的受損穿鬪式木構架中，發生局部或整體傾斜的約佔有15%，而局部崩塌或整體崩塌的比例則佔了48%（如圖1-2）。在針對破壞成因進行進一步分析後可以發現，產生傾斜或是崩塌的原因主要在於側向勁度太低而導致過大的位移，再加上屋頂重量所產生的二次彎矩而產生構架的永久變形或崩塌。許多穿鬪式木構架中都會填充牆體（包括木堵板牆及編泥牆），這些牆體元素雖會提高構架的整體勁度，但是接點的勁度或強度過低，卻是另一個弱點。因此欲克服側向勁度過低的一個解決方法即在於提高接點剛度與強度。

上一年度的研究報告將穿鬪式木構架接點分為：(1)梁柱接點、(2)柱材與基礎接點、(3)童柱與穿材接點、(4)門檻門楣與柱材接點、(5)穿材與牆體接點、(6)燈梁與柱材接點及(7)桁條與柱材接點等七種。在這七種接點中，明顯有力學上弱點的包括燈梁與柱材接點及梁柱接點兩種。燈梁與柱材接點一般而言包含了鈎逗榫及踏步燕尾榫等兩種接續方式，而梁柱接點依照穿材形式區分則包含了連續、斷開對接及燕尾榫搭接等三種。因此本研究擬針對此兩種接點提出補強策略並利用實體力學實驗來檢討補強策略是否有效。此兩種接點的力學弱點將於後面章節進行討論。

在研究方法部分，首先檢討並分析前兩年研究結果，檢討傳統穿鬪式木構造在九二一地震中的破壞原因，由於所研究對象為古蹟及歷史建築，因此另外考慮國外針對歷史木構造修復的規範進行討論，並訂出補強對策的指針（Guideline），再參考國內外相關文獻針對這些破壞成因所提出的改善對策，

提出較符合國內現況的補強對策。接著利用足尺力學試驗來探討本研究所提出的補強對策針對強度與剛度是否有效，最後利用結構分析軟體探討所調查的案例在這樣補強的情形下，其側向位移（Story Drift）的差異來檢討這樣補強對於整體構架的效率。

## 第二章 文獻回顧

由國內外相關地震後勘災報告可以發現，在地震中常常會造成木構架接點的脫落或損毀，因為其接合的斷面小，各方向的力量又集中在此，因此傳統的補強方式便是在柱梁接點使用金屬扣件來強化其接合方式以增強其耐震能力。

在台灣木構造接點的補強作法，除了用斜撐(如照片2-1、2-2)、貫道木栓(如圖2-1)等來固定住木接點外，亦常採用螺栓、鐵釘(圖2-2)、角鐵(圖2-3)、螞蝗釘(如圖2-4)、羽子板等金屬扣件來提升木結構接點性能。雖然便於施工，也易產生一些缺點，例如：(1)提昇金屬扣件的強度，但又須同時提高構材之尺寸或搭接之面積以防止脆性之破壞；(2)增加金屬扣件之尺寸，須同時提高構材之尺寸以確保接點之韌性；(3)以金屬或高強度合板補強，雖然強度有限度之提昇，但衍生了其他問題(例如：斷面增加、成本提高、改變設計原意等)。關

國內目前針對金屬扣件補強研究中，葉民權、謝俊雄(1997)曾評估螺栓與大木螺釘對柳杉的接合力，其結果指出在垂直木理方向受力時，隨螺栓直徑的增加，其承受外力亦增加，且距離木材邊距2.5倍直徑距離者較邊距1.5倍者能承受更大的荷重。在釘接方面的補強研究，發現釘的直徑越大時剪力牆能承載水平外力的效果越佳，且剪力牆用釘間距越小則抵抗水平載重能力越佳(葉民權等1997)。葉民權、謝俊雄(1995)曾進行刺鐵板(照片1.3-5)接合研究，發現接合拉伸載重的能力隨刺著鐵板之齒密度的增加而提高，且柳杉的垂直木理接合能力較平行木理來的好。而王怡仁(1998)也研究刺鐵板對柳杉的疲勞行為，其結果顯示疲勞限度的荷重應在荷重基準30%以下。

從過去修復的經驗中發現，大部份古蹟木梁構件有局部損害較嚴重時，往往都是以整根抽換新材來進行修復，這不符合古蹟保存精神，也不符合經濟原則。在文化資產保存法第三十條之規定：「古蹟應保存原有形貌及文化風貌，不得變

更，如因故損毀應依照原有形貌及文化風貌修復，並得依其性質，報經古蹟主管機關許可後，採取不同之保存、維護或再利用方式。」。在此基礎下，陳昶良等（2004）利用高強度碳纖維板與粘結用環氧樹脂來應用於古蹟木梁構件的修復，其主要係利用隱避不影響外觀的方式修復，這對於彩繪木構件保存部份而言甚為重要。在木構架修復強度方面，碳纖維板的彈性模式約為杉木的15倍，木梁可以加嵌碳纖維板來提昇整體慣性矩I值，以增強其承載應力，且可以透過設計來改變碳纖維板的厚度、寬度抑或是數量，以達到所需要的承載應力強度，碳纖維板的高應用性，是新換木梁其強度固定所無法達到之優點。

前述的接點補強方式種類眾多，但有些並沒有考慮到可逆性的問題。當建築物的接點構件局部損壞需補強時，或許經補強後接點的強度會增加，但隨著時間點的拉長，建築物的接點會產生老化而影響強度，若當初補強的工法不具可逆性時，則需以整個抽換新材的方式來修復。

『歷史木造建築保存原則』（Principles for the Preservation of Historic Timber Buildings）對於新工法修復有相當明確的規定：

…若是在技術上可能的話，使用可逆性的工法……。應該要接受置換新的構件與舊的構件，但其與原有構件應是可以區分的...可以使用適當的傳統工法或是經過測試的現代工法配合……。新置入的構件不論是整根或局部皆應分別作記號...使得以後這些部分可以被輕易的識別出來。...

在考慮相關的法規與原則規定後，在此針對本研究中木構造所提出的修復方式設下幾個準則：

1. 考慮可逆性工法。
2. 補強策略從外觀應是可以區別的。

### 第三章 鈎逗榫及踏步燕尾榫弱點與補強策略

#### 第一節 燈梁與柱材接點種類

在經過實際解體調查發現，門檻門楣與柱材接點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（照片3-1）、（2）踏步燕尾榫（照片3-2）；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—鈎逗樺，尤其在現行修復實務中大多使用鈎逗樺，此乃因根據匠師經驗，鈎逗樺強度大過踏步燕尾樺，此三種接法如圖3-1所示。

## 第二節 鈎逗樺與踏步燕尾樺力學弱點

過去的研究發現，門檻、門楣或燈梁與柱材接點這類面外接點其結果發現此類接點的遲滯迴圈(Hysteretic Loop)不具對稱性，且有一方向之旋轉勁度非常的小。當接點在受到彎矩時，原本塞住柱梁接點的楔子會與柱材相互分離，此時如果再有側向力則楔子會有掉落之虞，當楔子發生掉落的情形後，便無法再抵抗反向的彎矩，使得整個接點失去彎矩的抵抗力，而變成類似鉸接的行為。本年度基於上述研究中門檻、門楣或燈梁與柱材接點的結構缺陷進行補強之研究。

上一年度研究針對傳統鈎逗樺及踏步燕尾樺力學特性進行研究，在該研究中規劃30組足尺接點試體，並進行彎矩試驗，並利用統計的方法探討其旋轉勁度、極限彎矩的預測方法，並比較不同接點在往覆載重下的勁度衰減率。在分析實驗資料後，得到鈎逗樺及踏步燕尾樺極限彎矩及旋轉勁度的預測式，並瞭解到踏步燕尾樺較鈎逗樺有較大的極限彎矩，且在梁深較深的情形下旋轉勁度亦會明顯較高。此外，踏步燕尾樺在往覆載重下亦有較低的勁度衰減表現。

其試驗結果發現，由接點的 $\theta$ 、 $M$ 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，由圖3-2可知，這類接點（不論是鈎逗樺或是踏步燕尾樺）的遲滯迴圈中的回覆力（Restoring Force）皆非常的小。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，而且在每一週次的施力結束後，梁會被漸次的拔出（照片3-3），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（照片3-4），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。

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。

2. 鈎逗榫接點的初始勁度及極限彎矩可以表示如：

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

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

且初始旋轉勁度主要來自梁寬的貢獻。

式中  $Ki$ 、 $Mu$ 、 $W$ 、 $H$ 、 $D$  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)。

3. 踏步燕尾榫接點的初始勁度及極限彎矩可以表示如：

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

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

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。

5. 鈎逗榫承受往覆載重時，第二週次剛度衰減約為第一週次的77%，而第三週次又約為第二週次的60%；對踏步燕尾榫而言，第二週次衰減約為第一週次的90%，第三週次約為第二週次的50%。因此踏步燕尾榫在第二週次。

### 第三節 鈎逗榫及踏步燕尾榫補強策略

由於兩種接點的力學特性不同，其破壞模式亦有相當大的差異。就踏步燕尾榫的破壞模式而言主要集中在柱材上，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，如照片3-5所示。而鈎逗榫主要破壞的模式有兩種，在柱材上，破壞模式如照片3-6所示，在梁上則主要在梁鈎逗的部分發生面內剪力破壞，如照片3-7所示。

有鑑於先前研究的破壞模式即彼此間之差異，依其兩種接點的力學特性來提出補強的方式，如下：

### (一) 踏步燕尾榫的補強設計

踏步燕尾榫的補強方式主要乃在於固定住榫眼的部分，使其發揮出抵抗力，避免柱材燕尾榫眼外翻的狀況及梁被拉出。由於榫眼接點空隙部位的不同，因此在楔子的製作上，以楔子木塊能夠完全塞住柱梁接點為止，且以不同纖維的走向(橫、弦切面)來與榫眼受力部位接合。為了便於施工，因此以白膠固定住楔子後，在依據木構造建築物設計及施工技術規範，可知針葉樹側材導引孔的設計為 $0.8d$  ( $d$  螺絲之標稱直徑)，因此在本實驗中的導引孔以 $4\text{ mm}$ 的鑽頭鑽出一孔徑後，再以螺絲、竹釘加以補強，使其柱梁接點受力時，不至於掉落鬆脫，來提高其旋轉勁度。

踏步燕尾榫補強材料的選用：

(1) 膠合劑是採用市售南寶樹脂(聚醋酸乙烯，Polyvinyl Acetate)，為白色或淡黃色乳濁液，PH值 $4.0\sim 5.5$ 。其優點：(a)施作方便，不需添加硬化劑亦不需加熱，沒有可使用時間之限制；(b)硬化靠水分之蒸發和滲透，無溶劑污染問題；(c) 硬化後之膠合層為可撓性，無老化性耐久性佳；(d)於短時間內即可得到高膠合力；(e)常態膠合力大，膠合不需太大壓力；(f)耐乾濕反覆，室內耐久性良好；(g)乾燥膠合模為無色透明，故不產生材面污染。

(2) 螺絲則為平頭鐵板芽，尺寸為 $\text{TP } 5 \times 90$ ，如照片3-8所示。

(3) 竹釘選用竹釘匠師王壬輝所製作(照片3-9)，其材料是選用桂竹(*Phyllostachys makinoi* Hayata; Bamboo)砍伐後的前三節竹節所製成，製成竹釘後需經日曬一週，再經沙拉油文火炸過(照片3-10)亦或用海砂炒過三小時後方可使用，其功能主要使竹材碳化，增加其耐久性。

踏步燕尾榫試體補強，共有三種設計，楔子先以白膠固定再分別以纖維走向的不同而作補強，其補強設計分別為：(1)楔子纖維方向垂直梁纖維走向，再加

上竹釘作補強設計，如圖3-3所示；(2)楔子纖維方向垂直梁纖維走向，再加上螺絲作補強設計，如圖3-4所示；(3)楔子纖維方向平行梁纖維走向，再以竹釘作補強設計，如圖3-5所示。踏步燕尾樺試體補強設計如表3-1所示。

## (二) 鈎逗樺的補強設計

鈎逗樺的補強方式主要在於固定住柱材鈎逗之部位，避免在梁鈎逗的部分發生面內剪力破壞。由於鈎逗樺與踏步燕尾樺構法上的差異，在鈎逗樺梁柱接點部位的空隙較小，無法以螺絲或竹釘來固定住楔子，乃以白膠來加以固定住，使其柱梁接點受力時，不至於掉落鬆脫，以提高其旋轉勁度。在上一年度研究中的鈎逗樺除了在梁鈎逗的部分發生面內剪力破壞外，在柱材上鈎逗的部位也發生破壞，因此分別以鐵片在樺眼接點空隙部份(即以鐵片補強楔子)，及樺眼的下方兩公分處來補強柱材鈎逗的部位，而楔子的製作以木塊能夠塞住柱梁的接點為止。

鈎逗樺補強材料的選用：

- (1)膠合劑是採用市售南寶樹脂(聚醋酸乙烯，Polyvinyl Acetate)，其特性如前所述。
- (2)螺絲為平頭鐵板芽，尺寸如前所述。
- (3)鐵片為鐵工廠所裁切，其厚度為0.3公分，如圖3-6所示。

鈎逗樺試體補強，共有三種設計，楔子先以白膠固定再分別以鐵片來作補強，其補強設計分別為：(1)僅以白膠作膠合固定楔子，如圖3-7所示；(2)以白膠膠合固定楔子後，再以鐵片在樺眼接點空隙部份補強—即以鐵片補強住楔子，如圖3-8所示；(3)以白膠膠合固定楔子後，再分別以鐵片在樺眼接點空隙部份補強—即以鐵片補強楔子，並在樺眼下方兩公分處來補強柱材鈎逗部位，如圖3-9所示。鈎逗樺試體補強設計如表3-2所示。

## 第四節 踏步燕尾榫試驗結果討論

### 一、踏步燕尾榫補強後的整體行為

本研究在針對3種不同補強方式各3組共9組試體進行實驗後發現，9組試體的整體行為皆類似，其 $\theta-M$ 圖接類似圖3-10所示。由圖3-10可知，踏步燕尾榫在補強前後，其遲滯迴圈並不具對稱性，但在經過補強後，其正向旋轉（順時針旋轉）出現抵抗力，且其勁度明顯大於負向旋轉。此外，在楔子經固定補強後，隨著每一周次的施力，柱材燕尾榫的部份會產生壓密破壞，梁逐漸被拔出，如照片3-11所示。

### 二、踏步燕尾榫不同補強方式之破壞模式

踏步燕尾榫在未經補強前，當接點受到正向彎矩時，原本塞住柱梁接點的梯形楔子會與柱材相互分離，如照片3-12所示，且隨著周次的施力，梁會有掉落之慮，其破壞模式主要集中在柱材的燕尾榫眼部分，會產生外翻之破壞，破壞模式如照片3-13所示。以下就個別補強條件之不同而說明。

#### （一）S-V-B-1~S-V-B-3補強設計：

此類補強方式是以竹釘作補強的設計，楔子的纖維方向垂直梁纖維走向，即對楔子產生縱向壓縮。此類試體的楔子在往覆載重中，由於外力方向與纖維走向互相平行，加上竹釘的釘入撐開了楔子，使得楔子與榫眼接點空隙更加密合，且從微觀的角度來看，並未破壞到楔子內部纖維的聚合程度。因此，此類試體的楔子，經周次施力後，仍完全留在柱材榫眼的接點空隙(照片3-14)，僅在柱材燕尾榫部位產生外翻之破壞，破壞模式如照片3-15所示。此系列補強之遲滯迴圈，如圖3-11 ~ 3-13所示。

#### （二）S-V-S-1~S-V-S-3補強設計：

此類補強方式是以螺絲作補強的設計，楔子的纖維方向垂直梁纖維走向，即對楔子產生縱向壓縮。此類試體的楔子在往覆載重中，外力的方向與纖維走向互相平行，在周次施力後，楔子產生壓密及開裂破壞。若從微觀的角度來分析，螺絲在鑽入時，由於螺紋之旋轉，會對楔子內部纖維的聚合狀況產生破壞，使得力

量無法傳遞而產生破壞，破壞模式如照片3-16所示。此類試體的楔子，經螺絲鑽入後固定在柱材榫眼的接點空隙，亦是在柱材燕尾榫的部位產生外翻之破壞，破壞模式如照片3-17所示。此系列補強之遲滯迴圈，如圖3-14 ~ 3-16所示。

### (三)S-H-B-1~S-H-B-3補強設計：

此類補強方式是以竹釘作補強設計，楔子的纖維方向平行梁纖維走向，即對楔子產生橫向壓縮。此類試體的楔子在往覆載重中，外力的方向與木理成垂直，雖經竹釘補強固定，楔子仍會隨著周次的施力，而有拔出之現象，如照片3-18所示。從微觀的角度來看，楔子的纖維方向平行梁纖維的走向，加上周次施力而產生的旋轉角及本身楔子受壓密破壞後所產生的旋轉角，其旋轉角會逐次增加，而燕尾榫眼與柱材的受力面積，也隨著梁逐漸被拔出而減少，在梁榫眼部份產生面內壓縮破壞，破壞模式如照片3-19所示。而此類試體的楔子會隨著梁的拔出而移動，在柱材燕尾榫的部位亦會產生外翻之破壞。此系列補強之遲滯迴圈，如圖3-17 ~ 3-19所示。

### 三、踏步燕尾榫補強措施之比較

在本次踏步燕尾榫補強試體裡，在正向彎矩方面有顯著的貢獻，且其極限強度亦有所增加，在其遲滯迴圈中雖不具對稱性，但在正向旋轉勁度及強度上，有其顯著之效果，踏步燕尾榫的實驗結果如表3-3所示。由表3-3可知踏步燕尾榫補強後的正向旋轉勁度約介於1700~5480 kg-m之間，極限彎矩則介於62~103 kg-m之間，可見本文所建議的補強方式在正向旋轉勁度及強度上，有其顯著的效果。

S-V-B與S-H-B這兩系列的補強試體，在負向方面的旋轉勁度約介於800~1400 kg-m，極限彎矩則介於-87~-138 kg-m之間，與先前研究未補強的踏步燕尾榫負向旋轉勁度1260~1480 kg-m之間及極限彎矩-93~-122 kg-m之間作比較，發現在旋轉勁度上，未有顯著之差異。另外，S-V-S(橫向壓縮+螺絲)這系列補強試體中，其負向的旋轉勁度特別小，甚至小於未補強之試體，其產生的原因可能有兩種：(1)從微觀的角度而言，由於螺絲的鑽入所產生螺紋之旋轉，會對楔子內部纖維的聚合狀況產生破壞，使得力量無法傳遞而產生破壞。(2)在施作時，先以電動螺絲鑽入，其鑽入太深，除破壞楔子內部的纖維外，亦使得螺絲的螺紋無法抓住楔子內部的纖維，以致於楔子無法充分發揮作用。

在不同補強條件對於正向旋轉勁度與極限彎矩來作比較(如表3-4所示)，發現S-V-B的平均旋轉勁度為最佳，其值約為S-V-S的1.6倍、S-H-B的兩倍。而在極限彎矩上，仍以S-V-B的補強方式為最佳，其值約為S-V-S的1.5倍、S-H-B補強方式的1.2倍。

因此，就踏步燕尾樺的補強條件而言，以楔子的縱向壓縮加上竹釘的補強設計為最佳，在補強構件上，仍是竹釘補強的旋轉勁度遠大於螺絲補強，且在試體纖維破壞狀況的考量下，竹釘補強強仍是優於螺絲補強。因此建議，日後在面對踏步燕尾樺的補強時，楔子的選擇，應以其纖維方向垂直梁的纖維走向為首要考量，亦即是縱向壓縮加上竹釘來作補強之設計。

#### 四、補強後，踏步燕尾樺遲滯迴圈之比較

在往覆載重試驗中，當接點受到非常大的外力作用進入非線性階段時，接點的勁度與強度會逐漸衰減。當接點受到外力作用，在較大的變位下時，其接點的結構行為會先產生彈性作用，至最大受力點時即失去彈性進入塑性階段，最後產生破壞。本研究由於對木接點進行往覆載重，經週次的施力後，其變位通常已經進入非線性階段，因此在所有的補強設計中幾乎都有剛度衰減。

以下圖為例，在遲滯迴圈的剛度衰減方面，發現踏步燕尾樺其正向的剛度衰減大於負向的剛度衰減，此外遲滯迴圈中所夾帶的 $\theta$ 角度，在後續的圖3-21 S-V-B-1之遲滯迴圈研究中可以來討論。

##### (一)S-V-B系列補強試體之遲滯迴圈

經觀察此系列之遲滯迴圈(圖3-21 ~ 3-23)後，發現其彎矩約在100 kgf-m、旋轉角約在0.2 rad，惟S-V-B-2的旋轉角只達0.1 rad，經破壞模式發現，施作時電動螺栓的導入太深，致使破壞楔子內部纖維與竹釘的咬合能力不佳。

##### (二) S-V-S系列補強試體之遲滯迴圈

經觀察此系列之遲滯迴圈(圖3-24 ~ 3-26)後，發現其正向彎矩約在50

kgf-m、旋轉角約在0.1rad，其中S-V-S-2的旋轉角達0.2 rad，它的正向勁度亦較其他同系列的佳。

### (三) S-H-B系列補強試體之遲滯迴圈

經觀察此系列之遲滯迴圈(圖3-27 ~ 3-29)後，發現其正向彎矩約在100 kgf-m、旋轉角約在0.2 rad，惟在S-H-B-3的反向旋轉約在0.1 rad外，其遲滯迴圈的表現與S-V-S系列相似。

## 第五節 鉤透樺實驗結果討論

### 一、鉤透樺補強後的整體行為

本研究在針對3種不同補強方式各3組，共9組試體進行實驗後發現，經鐵片補強之G-I1及G-I2系列的試體其整體行為皆為類似，其 $\theta-M$ 圖接點類似圖3-30所示。但在G-P系列僅以白膠補強之試體，在正向旋轉(順時針旋轉)方面，其旋轉勁度皆非常小，甚至是沒有，其 $\theta-M$ 圖接點類似圖3-31所示。由圖3-30可知，踏步燕尾樺在補強前，其遲滯迴圈皆不具對稱性，但在經過補強後，因楔子作用其正向旋轉(順時針旋轉)出現抵抗力，且其勁度明顯大於負向旋轉。另外楔子在經固定補強後，隨著每一周次的施力，楔子隨著梁會有被拔出之慮(如照片3-20所示)，最後在柱材鉤透的部分產生破壞，梁隨即被拔出，如照片3-21所示。

### 二、鉤透樺不同補強方式之破壞模式

鉤透樺在未經補強前，當接點受到正向彎矩時，原本塞住柱梁接點的梯形楔子會與柱材相互分離，且隨著周次的施力，梁會有掉落之慮，其破壞模式有兩種(1)主要集中在梁鉤透的部分產生面內剪力破壞，如照片3-22所示；(2)在柱材部位發生外翻之破壞，其破壞模式如照片3-23所示。以下就各別補強條件之不同而說明。

(一)試體G-P-1~G-P-3：

本系列試體的補強方式，僅以白膠均勻塗佈楔子，使楔子能夠完全塞住柱梁接點空隙為考量，雖與上一年度研究中的梯形楔子設計不同，但其遲滯迴圈皆沒有正向旋轉之貢獻，其破壞模式也相似。此系列楔子在往覆載重中，隨著周次的施力，與梁緊密接合住，並隨著梁的掉落而被拔出。其所產生的破壞，在柱材方面，主要在鈎逗部位發生外翻之破壞，破壞模式如照片3-24所示；而在梁方面，主要在梁鈎逗部分產生面內剪力的破壞，其破壞模式如照片3-25所示。此系列補強之遲滯模式，如圖3-32 ~ 3-34所示。

(二)試體G-II-1~G-II-3：

此系列試體的補強方式，先以白膠膠合固定楔子，再以鐵片在榫眼接點空隙部份補強，即是以鐵片加上螺絲來補強楔子。依據上一年度研究成果，楔子在往覆載重中，會隨著周次的施力與梁的掉落而被拔出，進而影響勁度。因此，設計在楔子的部位以鐵片補強，其補強後可以明顯發現楔子與梁的膠合介面所產生的破壞，其破壞模式如照片3-26所示。

此外在本組補強試體中發現楔子受梁的施力影響導致鐵片與螺絲脫離的狀況，破壞模式如照片3-27所示，由於在此系列中，此破壞狀況有兩種，經觀察後發現，當初施作時由於電動螺絲的導入太深，導致螺絲在鑽入後與楔子的咬合能力不佳所產生的破壞狀況，且從微觀的角度來作分析，由於螺紋的旋轉，會對楔子內部纖維的聚合狀況產生破壞，使得力量無法傳遞，而產生破壞。而在本實驗設計中的楔子，係依各組補強試體榫眼接點的空隙大小來裁切楔子，因此在實際施工上，膠的作用僅在固定楔子之用，塗佈以楔子來單面佈膠，其佈膠會受到榫眼接點空隙的擠壓而有膠塗佈過量抑或是不足之現象。

本系列補強試體所產生的破壞，除前所述外，其他破壞的狀況，在柱材方面，主要在鈎逗部位發生外翻之破壞，破壞模式如照片3-28所示；而在梁方面，主要在梁鈎逗部分產生面內剪力的破壞，其破壞模式如照片3-29所示。此系列補強之遲滯模式，如圖3-35 ~ 3-37所示。

(三)試體G-I2-1~G-I2-3：

此系列試體的補強方式，先以白膠膠合固定楔子後，再以鐵片來補強楔子，並在樁眼下方兩公分處以另一鐵片補強柱材鉤逗部位。除了楔子會隨著周次的施力，與梁的掉落而被拔出外，在柱方面亦會產生開裂之破壞。因此，在楔子的部位以鐵片補強外，亦在樁眼下方兩公分處以另一鐵片補強柱材鉤逗部位。經補強後可以發現勁度有明顯的增加，如照片3-30、3-31，由於在柱鉤逗部份以鐵片補強，因此力的傳遞在梁鉤逗部分亦顯得較劇烈，在梁鉤逗部份產生面內剪力的破壞，其破壞模式如照片3-32所示。

此外在本系列補強試體中，發現在G-I2-2補強試體的正向旋轉勁度值，僅有其他同系列的一半。探其原因，發現其破壞模式與其他同系列不同。在G-I2-2的柱鉤逗部份，由於產生面力剪力破壞，加上施作時電動螺栓導入太深，使螺絲的咬合能力不佳，產生鐵片被柱破壞部份翹起之狀況，並與螺絲脫離，而螺絲被拔出部份，僅在無螺紋之部份，其破壞模式如照片3-33所示。破壞模式經觀察後發現，鐵片翹起之部分，僅在於螺絲無螺紋之後段，因此推斷，電動螺栓導入太深，導致螺絲在鑽入後與楔子的咬合能力不佳所產生的破壞狀況，且從微觀的角度來作分析，由於螺紋的旋轉，會對楔子內部纖維的聚合狀況產生破壞，使得力量無法傳遞，而產生破壞。其勁度與強度會有何影響，在後文在加以敘述，此系列補強之遲滯迴圈，如圖3-38 ~ 3-40所示。

### 三、鉤逗樁補措施之比較

在本次鉤逗樁補強試體中，G-I1系列與G-I2系列的補強試體，其遲滯迴圈雖不具有對稱性，但在正向彎矩及極限強度上有其顯著之效果。而另一G-P系列的試體補強條件（試體楔子僅以膠白膠固定），在受到正向彎矩時幾乎沒有勁度，且其正向極限強度亦是非常小，鉤逗樁的實驗結果如表3-5所示。由表3-5可知鉤逗樁的正向旋轉勁度約介於2090~5490 kg-m之間，而極限彎矩則介於46~70 kg-m之間(未包括G-P系列的補強試體)，可見本文所建議之補強方式在正向旋轉勁度及強度上，有其顯著的效果。

鉤逗樁的補強試體，在負向方面的旋轉勁度約介於950~1800 kg-m，極限彎矩則介於-80~110 kg-m之間，與先前研究的鉤逗樁負向旋轉勁度990~1200 kg-m之間及極限彎矩-84~-106 kg-m之間作比較，發現在旋轉勁度上，未有顯著之差異。

在不同補強條件對於正向旋轉勁度與極限彎矩來作比較(如表3-5所示)，發

現G-I2系列(兩塊鐵片補強)的平均旋轉勁度為最佳，其值約為G-I1系列(一塊鐵片補強)的1.2倍，由於G-P系列未有正向旋轉勁度，因此不作比較。而在極限彎矩上，仍以G-I2系列的補強方式為最佳，其平均值約為G-I1系列的1.4倍、G-P系列補強方式的4.9倍。

因此，在鈎逗樺的補強條件中，由表3-6可知在極限彎矩及旋轉勁度方面，以兩塊鐵片補強的設計為最佳，這與在柱鈎逗部位產生的開裂破壞影響為最大。而在楔子的補強條件，由於鈎逗樺楔子的斷面較小，不論是楔子施力所產生的縱向壓縮抑或是橫向壓縮，皆無法有效的發揮作用，因此以鐵片作為固定楔子及補強用，在其旋轉勁度及極限強度皆有很好的貢獻，惟在木作的精確度須注意，電動螺栓的導入不宜太深，讓螺絲在鑽入楔子後的咬合能力能夠提高，避免咬合能力不佳，導致鐵片被楔子拔出失去補強之作用。而在未來後續研究上，幾何條件的金屬扣件可以在加變化，以進行力學上的分析。

#### 四、鈎逗樺遲補強後滯迴圈之比較

在往覆載重試驗中，當接點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。而當接點受到力作用，在較大的變位下時，其接點的結構行為會先產生彈性作用，而至最大受力點時即失去彈性進入塑性階段，最後產生破壞。本研究由於對木接點進行往覆載重，經週次的施力後，其變位通常已經進入非線性階段，因此在所有的補強設計中幾乎都有剛度衰減。

在遲滯迴圈的剛性衰減方面，發現鈎逗樺的正向剛度衰減大於負向剛度衰減，其遲滯迴圈所夾帶的 $\theta$ 角度，亦是後續研究之重點。而在鈎逗樺補強試體中，還發現其在遲滯迴圈中的第四象限，都有遲滯現象之存在，探其原因發現，在鈎逗樺受正向力後，梁受到破壞而導致梁陷入柱鈎逗處(embedment)，而當反向力作用時，則需要更大的力量才可作用使其分開。

##### (一)G-P系列補強試體之遲滯迴圈

G-P系列的試體補強，在正向彎矩時幾乎沒有勁度，且其正向極限強度亦是非常小，因此在遲滯迴圈上亦沒有表現(圖3-42 ~ 3-44)。由於負向的勁度大於正向，因此可觀察出其負向的彎矩約在80 kgf-m、旋轉角約在0.1 rad，而G-P-3的負向勁度及強度分析出來原本就大於同系列另兩試體，因此在遲滯迴圈的表現

亦較其他兩者佳。

## (二)G-I1系列補強試體之遲滯迴圈

經觀察此系列之遲滯迴圈(如圖3-45 ~ 3-47)後，在正向彎矩約在40 kgf-m、旋轉角約在0.2 rad，在負向彎矩約在100 kgf-m、旋轉角約在0.1 rad，惟G-I1-3的彎矩只達80 kgf-m，觀察其破壞模式發現補強用的鐵片被楔子作用翹起而影響施力。由於施作時電動螺栓導入太深，及螺紋破壞了楔子內部纖維的聚合力，致使與螺絲的咬合能力不佳。

## (三)G-I2系列補強試體之遲滯迴圈

經觀察此系列之遲滯迴圈(如圖3-48~3-50)後，在正向彎矩約在60 kgf-m、旋轉角約在0.15rad，在負向彎矩約在90 kgf-m、旋轉角約在0.1 rad，觀察此系列的破壞模式，發現在G-I1-2的破壞模式中，其在柱鉤逗處補強用的鐵片被梁作用翹起影響施力，從遲滯迴圈中來看，G-I1-2的負向彎矩只達80 kgf-m，較其他同系列小。而鐵片被翹起的原因，是由於施作時螺栓導入太深，及螺紋破壞了楔子內部纖維的聚合力，致使與螺絲的咬合能力不佳。

## 第六節 補強策略之檢討與修正

經過18組補強試體試驗後，在其破壞模式發現，踏步燕尾榫由於楔子的斷面較大，通常在往覆載重後，楔子會與柱接合並與梁脫落，而楔子在漸次失去作用加上梁的脫落，會在柱材燕尾榫眼的部份發生外翻之破壞。而在鉤逗榫方面則由於楔子的斷面較小，其脫落狀況與踏步燕尾榫相反，除楔子被鐵片擋住外，楔子通常會與梁接合而與柱產生脫落，在柱鉤逗榫眼的部份產生外翻破壞，而梁鉤逗榫的部份則產生面內剪力之破壞。

針對補強後的破壞模式作檢討，在踏步燕尾榫及鉤逗榫方面，常會發生螺絲、竹釘亦或是鐵片接合不佳之情況，其原因有二：

- (1) 在施作時，先以電動螺栓預鑽孔，其鑽入太深，除破壞楔子內部的纖維外，亦使得螺絲的螺紋無法抓住楔子內部的纖維，致使楔子無法充分發揮作用。

(2) 從微觀的角度來看，由於螺絲的鑽入所產生螺紋之旋轉，會對楔子內部纖維的聚合狀況產生破壞，使得力量無法傳遞而產生破壞。

而在整體的補強效果方面，踏步燕尾榫以S-V-B系列(縱向壓縮+竹釘)的平均旋轉勁度及極限彎矩為最佳，如圖3-51所示，在補強構件的比較方面，竹釘補強之試體的旋轉勁度遠大於螺絲補強之試體，且在楔子纖維破壞情形的考量下，竹釘補強仍優於螺絲補強。此外，在面對踏步燕尾榫的補強時，楔子的選擇，應以其纖維方向垂直梁的纖維走向為首要考量，亦即是以縱向壓縮加上竹釘作補強之設計。而在鉤逗榫的補強效果方面，以兩塊鐵片補強的設計為最佳，如圖3-52所示，這與柱身之鉤逗榫眼部位產生的開裂破壞影響有關。

## 第七節 初步結論

經過18組試體補強試驗後，發現此兩類試體補強之效果如下：

(一) 旋轉剛度及極限彎矩之提升：

踏步燕尾榫經補強後的正向旋轉勁度約介於1700~5480 kg-m之間，極限彎矩則介於64~103 kg-m之間，而鉤逗榫的正向旋轉勁度約介於2090~5490 kg-m之間，極限彎矩則介於46~70 kg-m之間，可見本文所建議的補強方式在正向旋轉勁度及強度上，有其顯著的效果。

(二) 遲滯迴圈行為之改變：

在遲滯迴圈中的剛性衰減，兩類接點的正向剛性衰減皆大於負向剛性衰減。此外，在鉤逗榫補強試體中，還發現其在其往覆載重圖( $\theta-M$ 圖)中的第四象限有遲滯迴圈之產生，此點與踏步燕尾榫差異甚大。

(三) 破壞程度之改變：

18組補強試體的破壞模式，在踏步燕尾榫方面，楔子經往覆載重後，會與柱接合並與梁脫落，在燕尾榫柱身的部份發生外翻之破壞。在鉤逗榫方面，其楔子的脫落狀況與踏步燕尾榫相反，除楔子被鐵片擋住外，楔子通常會與梁接合而與柱產生脫落，在柱身鉤逗部份產生外翻之破壞及梁身鉤逗處產生面內剪力之破壞。此兩類的破壞模式大致上與未補強試體相似，但是在破壞程度上而言，未補

強試體的破壞程度仍劇烈許多。

(四) 整體的補強效果而言：

1. 踏步燕尾榫補強效果方面，以楔子所產生之縱向壓縮加上竹釘的補強設計為最佳，在補強構件方面，以竹釘補強的旋轉剛度及楔子纖維的破壞情況來考量，竹釘補強優於螺絲補強。因此建議，日後在面對踏步燕尾榫的補強時，楔子的選擇，應以其纖維方向垂直梁的纖維走向為首要考量，亦即是以縱向壓縮加上竹釘作補強之設計。
2. 在鈎逗榫的補強效果方面，以兩塊鐵片補強的設計為最佳，這與柱身之鈎逗榫眼部位產生的開裂破壞影響有關。因此，在未來的後續研究上，具可逆性的工法亦或是金屬扣件幾何條件的變化，都可進一步被討論分析，以改善接點的補強效果。

## 第四章 穿鬪式木構架梁柱接點弱點、補強策略及試驗

### 第一節 穿鬪式木構架梁柱接點種類

根據本研究案第一年研究成果顯示，穿鬪式木構架梁柱接點依梁的構法共分為三類，分別為連續型、斷開對接與燕尾榫搭接等，如圖4-1所示。值得注意的是，此三種接點由外觀來說並沒有辦法區別出來。

根據匠師的經驗，連續型的接點有較強的強度，因此一般來說匠師在建造木構架的過程中，會傾向將接點做成連續型。但在兩種情形下會使匠師製作梁不連續的接點（包括燕尾榫搭接或斷開對接），第一種情形即無法找到適當與足夠長度的梁構件時，匠師不得不使梁在適當的部位斷開，此時可能會製作燕尾榫以搭接，亦有部分匠師則會直接使梁構件斷開，而沒有任何機構連接已斷開的梁。另一個情況是匠師認為斷開對接在木構架的組裝過程中較為容易，因此便會在許多部位用斷開對接的構法。

### 第二節 穿鬪式木構架梁柱接點力學弱點

張紋韶(2005)曾針對穿鬪式木構架梁柱接點進行72組足尺的力學試驗，每一種不同形式共包含了24組試體，並推導其旋轉勁度預測公式，表4-1整理其中三組不同類型試體，此三組試體有相同的幾何尺寸，而材料性不同形式的接點其力學特性有相當大的差異。就旋轉勁度而言，若接點由連續型變成斷開對接，則其旋轉勁度會下降到約僅有原本的10%以下，雖然製作燕尾榫搭接可以使旋轉勁度大量提升至四倍左右，但與連續型接點相較，亦僅約40%不到。就其極限彎矩來看，雖然製作燕尾榫較之對開對接可以提高極限彎矩至40%以上，但是與連續型相較，則分別僅有30%與22%的極限彎矩強度。

由此可以瞭解，當匠師決定將梁構件由連續斷開，製作成燕尾榫或是斷開對接時，其力學性能(旋轉勁度與極限彎矩)皆會產生大量的下降。值得注意的是，這樣的狀況在外關上並沒有辦法區別出來。因此，本研究將針對此項缺點進行補強，儘量提高斷開對接與燕尾榫搭接兩種接點的旋轉勁度與極限彎矩。

### 第三節 穿鬪式木構架梁柱接點補強策略與試驗規劃

為提升斷開對接與燕尾榫搭接兩種穿鬪式木構架梁柱接點的力學性能，本研究利用實體實驗來檢討提出的補強策略的有效性。由於本研究第一年分別已針對連續型、斷開對接與燕尾榫搭接等三種進行足尺力學試驗，因此本年度僅針對補強以後的試體進行試驗，並與第一年為補強前的數據進行比較。

#### 一、補強策略

本研究共提出三種不同的補強策略，包括：(一)鐵板與螺絲補強；(二)鐵板與螺絲補強及(三)碳纖維補強等三種不同的策略。在鐵板與螺絲補強部分，採用厚度3mm的鐵板，並利用四根螺絲藉以固定鐵板與木梁，如圖4-2所示。而在鐵板與螺絲補強方面，分別在梁上柱的兩側值入直徑1.3cm的螺絲，鐵板厚度亦為3mm，再利用螺帽加以固定，試體如圖4-3所示。而碳纖維補強部分，利用厚度為1.5mm的碳纖維加以補強，碳纖維的固定部分則利用環氧樹脂加以固定，試體如圖4-4所示。

採取第一項補強策略(鐵板與螺絲補強)著重在施工的方便性，而第二項策

略(鐵板與螺栓補強)則希望藉由螺栓的力量可以使得鐵板的韌性得以發揮。而利用第三項補強策略係欲利用碳纖板的低厚度與高韌性的特性來補強接點。

## 二、試驗規劃

本研究共提出三種不同補強策略，分別針對斷開對接與燕尾榫搭接兩種不同接點進行補強，而每一組亦進行三次重複試驗，因此共有18組試體，試體編號及相關補強方式如表4-2所示。

在實驗裝置方面，實驗架如圖4-5所示。柱試體固定於底座上，利用油壓機驅使千斤頂，使其施力於樑上，並藉由線性電壓位移轉換計(LVDT)及荷重元(Load Cell)分別量測樑的垂直位移及千斤頂的施力大小。由於柱固定於底座上，因此千斤頂施力的力臂為定值，由此可換算出施加於試體上的彎矩大小。

## 第四節 穿鬩式木構架梁柱接點試驗結果

### 一、破壞模式

#### (一) 鐵板與螺絲補強燕尾榫搭接接點

試體RD-S-1至RD-S-3為利用鐵板與螺絲針對燕尾榫搭接接點補強的案例，由試體破壞狀況可以瞭解破壞主要集中於燕尾榫榫頭與鐵板及螺絲上面。如照片4-1至4-3所示，接點的燕尾榫榫頭會有面內剪力破壞的狀況發生，亦即沿著纖維面發生剪力破壞。會造成這樣破壞的原因主要係因為當榫頭與榫眼開始接觸產生摩擦力時，對於榫頭會有一平行纖維方向分力，當這樣的分力超過木材面內剪力強度時，即會發生這樣的破壞，如圖4-6。

另外，由於僅使用螺絲將鐵片與木材固定，因此在變形過大時，除了鐵片會發生變形以外，螺絲亦會發生嚴重的變形。而在梁部分除了燕尾榫會發生破壞以外，由於梁下端會與另一根梁發生相互擠壓破壞，應力集中於梁下端，而整個梁亦是用面內剪力強度來抵抗，因此亦會造成平行纖維方向的裂縫(如照片4-3)。

## (二) 鐵板與螺絲補強斷開對接接點

試體編號RB-S-1至RB-S-3為鐵板與螺絲補強斷開對接接點的案例，由照片4-4可瞭解，破壞亦主要集中於梁、鐵件與螺絲等。梁的部分，與前一種破壞模式相同的在底端發生平行纖維方向的開裂，而且在梁與柱材接觸之處有嚴重的壓碎破壞 (Embedded failure)。另外，與前面相同的，鐵件與螺絲亦發生嚴重的變形破壞 (如照片4-5與4-6)。

## (三) 鐵板與螺栓補強燕尾榫搭接接點

試體編號RD-B-1至RD-B-3為鐵板與螺栓補強燕尾榫搭接接點的案例，由照片4-7可瞭解，破壞亦主要集中於梁的燕尾榫與補強鐵件上。在燕尾榫方面，與利用螺絲補強的案例相同，有平行纖維方向的剪力破壞發生，推斷其原因亦與前一種破壞模式相同。與前一種破壞模式相同的在底端發生平行纖維方向的開裂 (照片4-8)，另外梁與柱材接觸之處亦有嚴重的壓碎破壞 (Embedded failure，照片4-9)。在補強構件方面，發現補強鐵件有明顯的變形，而觀察螺栓則僅有些微的彎曲發生 (照片4-10)。

## (四) 鐵板與螺栓補強斷開對接接點

試體編號RB-B-1至RB-B-3為鐵板與螺栓補強斷開對接接點的案例，由照片4-11可瞭解，破壞亦主要集中於梁與補強鐵件上。在梁方面，底端發生平行纖維方向的開裂，另外梁與柱材接觸之處亦有嚴重的壓碎破壞。在補強構件方面，發現補強鐵件有明顯的變形，觀察螺栓，雖然僅有些微的彎曲發生 (照片4-12)，但在梁上該孔洞確有相當大的變形 (照片4-13)。

## 二、實驗結果

### (一) 利用鐵板與螺絲補強

表4-3為利用鐵板與螺絲補強燕尾榫搭接與斷開對接等兩種不同試體之實驗結果，而此六組試體之 $\theta$ - $M$ 曲線則如圖4-7與4-8所示。由表4-3可知，利用鐵板與螺絲補強燕尾榫搭接後之試體，其平均旋轉勁度約為3277.82 kg-m/rad，而平均極限彎矩則為158.42 kg-m；標準差則分別為294.33 kg-m/rad與16.69 kg-m。而在補強斷開對接接點部分，所以試體之平均旋轉勁度約為2393.95 kg-m/rad，

而平均極限彎矩則為124.59 kg-m；標準差則分別為149.72 kg-m/rad與9.60 kg-m。

另外由圖4-7與4-8可知，在試體達到最大力量以後會有很明顯的負剛度出現，此時螺絲大多已經遭到嚴重破壞變形。

## (二) 利用鐵板與螺栓補強

表4-4為利用鐵板與螺栓補強燕尾樁搭接與斷開對接等兩種不同試體之實驗結果，而此六組試體之 $\theta$ - $M$ 曲線則如圖4-9與4-10所示。由表4-4可知，利用鐵板與螺絲補強燕尾樁搭接後之試體，其平均旋轉勁度約為3692.62 kg-m/rad，而平均極限彎矩則為212.03 kg-m；標準差則分別為219.59 kg-m/rad與29.05 kg-m。在補強斷開對接接點部分，所以試體之平均旋轉勁度約為3214.02 kg-m/rad，而平均極限彎矩則為199.66 kg-m；標準差則分別為128.97 kg-m/rad與11.47 kg-m。另外由圖4-9與4-10可知，通常試體在達到最大彎矩時，會有一明顯的降服平台出現，且有較佳的韌性，此與利用鐵片與螺絲補強的接點有相當大的差異。

## 第五節 試驗結果討論

### 一、燕尾樁搭接接點補強討論

表4-5為燕尾樁搭接試體在補強前及補強後（兩種不同補強措施）及連續型接點之旋轉勁度與極限彎矩之比較，由該表可以瞭解，補強後不論在旋轉勁度或極限彎矩皆有顯著的提升。利用鐵片與螺絲補強以後，平均旋轉勁度提高約88.6%，極限彎矩則提高約37%；利用鐵片與螺絲補強則可以使平均旋轉勁度提高約112.5%，而使極限彎矩提高83.4%。而在補強以後，鐵片與螺絲補強方式大約可以達到連續型接點的70.66%旋轉勁度，而極限彎矩約可達到54.41%；若採用鐵片與螺栓方式補強，則可分別達到連續型接點79.60%與72.60%的旋轉勁度與極限彎矩。

不論從旋轉勁度或是極限彎矩來觀察，利用鐵片加螺栓來補強燕尾樁搭接類型接點之效率明顯較利用鐵片與螺絲來補強還好；另外從破壞模式來說，利用鐵片與螺絲補強的案例中當螺絲受到嚴重的變形破壞以後，剛度會有明顯的下降，其破壞模式亦較利用鐵片與螺絲補強的案例為差。

## 二、斷開對接接點補強討論

表4-6為斷開對接試體在補強前及補強後（兩種不同補強措施）及連續型接點之旋轉勁度與極限彎矩之比較。由該表可以瞭解，補強後不論在旋轉勁度或極限彎矩皆有顯著的提升。利用鐵片與螺絲補強以後，平均旋轉勁度提高約199.50%，極限彎矩則提高約80.96%；利用鐵片與螺絲補強則可以使平均旋轉勁度提高約300.20%，而使極限彎矩提高190.00%。而在補強以後，鐵片與螺絲補強方式大約可以達到連續型接點的51.61%旋轉勁度，而極限彎矩約可達到42.79%；若採用鐵片與螺栓方式補強，則可分別達到連續型接點69.29%與68.57%的旋轉勁度與極限彎矩。不論從旋轉勁度或是極限彎矩來觀察，利用鐵片加螺栓來補強燕尾榫搭接類型接點之效率明顯較利用鐵片與螺絲來補強還好；另外從破壞模式來說，利用鐵片與螺絲補強的案例中當螺絲受到嚴重的變形破壞以後，剛度會有明顯的下降，其破壞模式亦較利用鐵片與螺絲補強的案例為差。

## 三、小結

由前兩節可瞭解，不管哪一種補強措施，對於斷開對接皆有相當大的幫助；而整體來說，利用鐵片與螺栓補強具有較好的效率。

另外利用碳纖板補強的實驗結果將代結案報告中提出。

# 第五章 結論與建議

## 第一節 結論

### 一、鈎逗榫與踏步燕尾榫

就踏步燕尾榫與鈎逗榫接點的補強方面，在經過18組試體補強試驗後，發現此兩類試體補強之效果如下：

#### （一）旋轉剛度及極限彎矩之提升：

踏步燕尾榫經補強後的正向旋轉勁度約介於1700~5480 kg-m之間，極限彎矩則介於64~103 kg-m之間，而鈎逗榫的正向旋轉勁度約介於2090~5490 kg-m

之間，極限彎矩則介於46~70 kg-m之間，可見本文所建議的補強方式在正向旋轉勁度及強度上，有其顯著的效果。

#### (二) 遲滯迴圈行為之改變：

在遲滯迴圈中的剛性衰減，兩類接點的正向剛性衰減皆大於負向剛性衰減。此外，在鈎逗樺補強試體中，還發現其在其往覆載重圖 ( $\theta.M$ 圖) 中的第四象限有遲滯迴圈之產生，此點與踏步燕尾樺差異甚大。

#### (三) 破壞程度之改變：

18組補強試體的破壞模式，在踏步燕尾樺方面，楔子經往覆載重後，會與柱接合並與梁脫落，在燕尾樺柱身的部份發生外翻之破壞。在鈎逗樺方面，其楔子的脫落狀況與踏步燕尾樺相反，除楔子被鐵片擋住外，楔子通常會與梁接合而與柱產生脫落，在柱身鈎逗部份產生外翻之破壞及梁身鈎逗處產生面內剪力之破壞。此兩類的破壞模式大致上與未補強試體相似，但是在破壞程度上而言，未補強試體的破壞程度仍劇烈許多。

#### (四) 整體的補強效果而言：

踏步燕尾樺補強效果方面，以楔子所產生之縱向壓縮加上竹釘的補強設計為最佳，在補強構件方面，以竹釘補強的旋轉剛度及楔子纖維的破壞情況來考量，竹釘補強優於螺絲補強。因此建議，日後在面對踏步燕尾樺的補強時，楔子的選擇，應以其纖維方向垂直梁的纖維走向為首要考量，亦即是以縱向壓縮加上竹釘作補強之設計。在鈎逗樺的補強效果方面，以兩塊鐵片補強的設計為最佳，這與柱身之鈎逗樺眼部位產生的開裂破壞影響有關。因此，在未來的後續研究上，具可逆性的工法亦或是金屬扣件幾何條件的變化，都可進一步被討論分析，以改善接點的補強效果。

## 二、斷開對接與燕尾樺搭接接點補強

在斷開對接與燕尾樺搭接接點的補強方面，由於利用碳纖板補強結果將在最後報告中提出，因此在此僅提出利用鐵板搭配螺絲及鐵片搭配螺栓補強的初步結論：

### （一）旋轉勁度的提高：

在未補強以前，斷開對接之平均旋轉勁度僅為799.42 kg-m/rad，而利用鐵板搭配螺絲補強後，平均旋轉勁度提高至2393.95 kg-m/rad，而若利用鐵片搭配螺栓補強，則可將平均旋轉勁度提高至3214.02 kg-m/rad。而在燕尾榫搭接部分，未補強前平均旋轉勁度為1737.62 kg-m/rad，而利用鐵板搭配螺絲補強後，平均旋轉勁度提高至3277.82 kg-m/rad，而若利用鐵片搭配螺栓補強，則可將平均旋轉勁度提高至3692.62 kg-m/rad。

### （二）極限彎矩的提高

在未補強以前，斷開對接之平均極限彎矩僅為68.85 kg-m，而利用鐵板搭配螺絲補強後，平均極限彎矩提高至124.59 kg-m，而若利用鐵片搭配螺栓補強，則可將平均極限彎矩提高至199.66 kg-m。而在燕尾榫搭接部分，未補強前平均極限彎矩為115.60 kg-m，而利用鐵板搭配螺絲補強後，平均極限彎矩提高至158.42 kg-m，而若利用鐵片搭配螺栓補強，則可將平均極限彎矩提高至212.03 kg-m。

## 第二節 建議

### 建議一

針對穿鬪式木構架足尺實驗後進行補強研究：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

本研究在今年結束以後已針對傳統穿鬪式木構架之接點及壁體進行完整之研究，至此已可以初步針對不同接點之旋轉勁度、牆體之水平側向勁度等水平力抵抗元件進行力學評估。首先應規劃兩組足尺試體，在分別施以靜態與動態載重且構架遭到破壞後加以補強，以瞭解局部補強對於建築物整體的成效與影響。

### 建議二

編寫修復及補強手冊並舉辦必要之研討：中長期建議

主辦機關：文建會

協辦機關：文化資產保存研究中心

由於國內許多古蹟及歷史建築物皆為穿鬪式木構造，而在本計畫執行的過程

中發現許多匠師對於此類構造的理解與研究成果或有些微差異，因此應針對互有差異的部分舉行研討，並適當的推廣穿鬪式木構造的相關知識。

另在下一年度完成後，國內對於穿鬪式木構造之結構特性及適當的補強方式將具有初步的認識，因此可將本計畫之研究成果編寫成手冊提供相關人士參考。而在手冊編寫結束後，亦可以舉行研討會藉以推廣本研究之研究成果。

## 附錄一 期末簡報會議記錄

內政部建築研究所 94 年度「結構修復技術整合型研究計畫(三)-台灣傳統古蹟及歷史建築耐震能力之基礎研究(三)」案之子計畫 2：穿鬮式木構造之補強技術研究會議記錄。

一、時間：94 年 11 月 23 日（星期三）上午 9 時

二、地點：台北科技大學設計館八樓會議室

三、主持人：內政部台北第二辦公室蘇副主任憲民

四、出席人員：

中國科技大學建築系李教授東明、林建築師鴻志、台北科技大學建築系黃教授德琳、本所毛組長榮等

五、審查意見

- (1) 關於補強材料，採取鐵板、螺絲、螺栓補強，但其中材料會因化學變化進而破壞原構材，因此未來以採用天然材或化學變化較小（如碳纖板等）之材料來進行補強。
- (2) 竹釘的加工，乃是依照匠師訪談結果為主，其用意在於去除竹子多餘之水分，減低竹材對木材本身的破壞，因此在本計畫有關竹釘防腐處理，除經油炸後同時置入烤箱中烘乾，減少竹釘之水氣。
- (3) 有關以圍束方式補強，以鐵板於梁上下以鐵板補強乃是以圍束原理設計，主要是針對以往破壞較嚴重之區域來加強其剛性。
- (4) 梁柱比例問題，試體設計之尺寸乃依照田野調查及拆解案例之資料，梁柱尺寸之選擇以調查範圍較具代表之樣本進行設計。至於各樣本之尺寸於附錄中詳細說明。

## 參考書目

### 中文部分

- [01] 黃斌、許茂雄、蔡明哲(2001)，歷史建築震損及維護方式之研究(一) 木竹構造，行政院文化建設委員會，62~93頁。
- [02] 葉玉祥(2004)，台灣日式木構造火車站簷廊柱梁接點之初探，國立成功大學碩士論文，2-19~3-12頁。。
- [03] 河合直人(2003)，繼手仕口の種類・性能と適切な配置を知る，地震に強い[木造住宅]パーフェクトマニュアル，96~109頁。
- [04] 李蕙吟(2000)，方樺接合與鐵件對日式軸組式歷史建築承重牆側向力改善之探討，國立台灣大學碩士論文，7~12頁。
- [05] 稻山正弘(2003) 地震に強い木造住宅の設計ポイント 地震に強い[木造住宅]パーフェクトマニュアル，10~21頁。
- [06] 葉民權、謝俊雄(1994)，螺栓與大木螺釘對柳杉材之接合，林產工業，第13卷第2期，263~274頁。
- [07] 葉民權、張桂英、林溫章、胡志鋒(1997)，木結構剪力牆釘接方式對水平剪力抵抗之影響，林產工業，第16卷第4期，637~654頁。
- [08] 葉民權、謝俊雄(1995)，省產柳杉材之刺鐵板接合研究，林產工業，第14卷第1期，13~31頁。
- [09] 王怡仁(1998)，柳杉材以刺鐵板接合之疲勞行為，林產工業，第17卷第2期，263~276頁。
- [10] 周群、唐讓雷(1992)，木釘接合之靜曲與拔出強度(一)，林業試驗所研究報告季刊，第7卷第3期，249~257頁。

## 參考書目

- [11] 周群、唐讓雷(1993)，木釘接合之靜曲與拔出強度(二)，林業試驗所研究報告季刊，第8卷第1期，61~83頁。
- [12] 大橋好光、川鍋亞衣子(2003)，軸組構法の展開-構造と生産の合理化から，地震に強い[木造住宅]パーフェクトマニュアル，154~181頁。
- [13] 陳昶良、鄒易軒、閻亞寧(2004)，古蹟木梁構件修復工法之研究，古蹟、歷史建築保存、再利用暨古蹟保存科學學術研討會(七)，台灣、台北，pp. 17。
- [14] 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(三)-穿斗式木構架結構特徵與接點之調查與解析，內政部建築研究所委託研究計畫，台灣、台北。
- [15] 王松永(1993)，木材物理學，台北：徐氏基金會。
- [16] 徐明福、陳啟仁、張紋韶(2003)，傳統磚木混造古蹟及歷史建築數值分析模式之建立，台灣古蹟及歷史建築防震技術研究九十一學年度期末研究成果研討會，台灣、台南，pp. 1~22。
- [17] 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，台灣、台北。
- [18] 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，台灣、台北。
- [19] 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斗式木接點形式之研究，建築學報(已通過)。
- [20] 王天著(1992)，古代大木作靜力初探，北京：文物出版社。
- [21] 徐明福、張紋韶(2004)，台灣傳統古蹟及歷史建築耐震能力之研究-穿斗式木構架接點之實驗與分析，內政部建築研究所委託研究計畫，台灣、台北。
- [22] 黃佩臻(2004)，台南地區民宅穿鬮式架扇之研究，國立成功大學碩士論

文，2-1~2-12頁。

英文部分

- [01] Chen C. J. and Lee, T. L. (2002) “Mechanical Behavior of Timber Joints Using the Finite Element Modeling,” *Proceedings 26th Conference on Applied and Theoretical Mechanics in R.O.C.*, pp.D035.
- [02] R. W. Kennedy, 1968. “Wood in transverse compression influence of some anatomical variables and density on behavior,” *For. prod, J.*, Vol.18, No.3, pp.36~40 .
- [03] Fujita, Kaori., Sakamoto. Isao., Ohash. Yoshimitsu., and 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.
- [04] Fang, D. P. et al., 2001. “Ancient Chinese timber architecture II: dynamic characteristics,” *Journal of structural engineering*, Vol.127, No.11, pp.1358-1364 .
- [05] Greg, C. Foliente., 1997. “Modeling and Analysis of Timber Structures Under Seismic Loads: Stat-of-the-Art,” *Earthquake Performance and Safety of Timber Structures*, pp. 55-73.
- [06] Wen, Y.K., 1980. “Equivalent linearization for hysteretic system under random excitation,” *Journal of Applied Mechanics*, Transactions of the ASME, Vol. 47, pp. 150–154 .
- [07] Constantinou, M.C., and Tadjbakhsh, I.G., 1985. “Hysteretic dampers in base isolation: random approach,” *Journal Structural Engineer*, Vol. 111, No. 4,

## 參考書目

- pp. 705–721.
- [08] Ewing, R.D., T.J. Healey, and M.S. Agbabian. 1980. “Seismic analysis of Workshop on Design of Horizontal Wood Diaphragms,” *Applied Technology Council*, Berkeley, California, 256-276.
- [09] Kivell, B. T., P.T. Moss, and A.J. Carr. 1981. “Hysteretic modeling of moment resisting nailed timber joints,” *Bulletin of New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol.14, No.4, pp.223-245.
- [10] Stewart, W.G. 1987. “The seismic design of plywood-sheathed shear walls,” *PhD thesis, University of Canterbury*, Christ, New Zealand.
- [11] Kamiya, F.1988. “Nonlinear earthquake response analysis of sheathed wood walls by a computer actuator on-line system,”*Proceedings of the 1988 International Conference on Timber Engineering*, Seattle, Washington, Vol.1, pp.838-847
- [12] Dolan, J. D. 1989. “The dynamic response of timber shear walls,” *PhD thesis, University of British Columbia*, Vancouver, British Columbia, Canada.
- [13] Prion, H. and R. Foschi.1994. “Cyclic behaviour of dowel type connections,” *Proceedings of the Pacific Timber Engineering Conference(PTEC '94)*, Gold Coast, Australia. Vol.2, pp.19-25.
- [14] Sakamoto, I. and Ohashi, Y. 1988. “Seismic response and required lateral strength of wooden houses and its applications,” *Proceeding of the 1988 International Conference on Timber Engineering*, Seattle, Washington. Vol.2, pp.243-247.