

碳纖維強化高分子複合材料 (CFRP)  
應用於木構造古蹟建築補強之研究

內政部建築研究所研究報告

中華民國九十四年十一月

09401070000G3002

# 碳纖維強化高分子複合材料 (CFRP) 應用於木構造古蹟建築補強之研究

受委託者：國立台北科技大學土木與防災研究所

研究主持人：毛榮

協同主持人：李有豐、蔡明哲

研究員：李東明

研究助理：謝耀明、魏廷芳、王婉柔、陳顛夫

內政部建築研究所研究報告

中華民國九十四年十一月

ARCHITECTURE AND BUILDING RESEARCH INSTITUTE

MINISTRY OF THE INTERIOR

RESEARCH PROJECT REPORT

A study on wooden historical building  
retrofitted by using carbon fiber  
reinforced plastic

BY

MAU, LUO

LI, YEOU-FONG; TSAI, MING-JER

LI, DONG-MING

SHIE, YAO-MING; WEI, TING-FANG; WANG, WAN-ROU CHEN,

YI-FU

November, 2005

## 目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	XI
第一章 緒論.....	1
第一節 研究背景 .....	1
第二節 研究範圍 .....	2
第三節 研究目的 .....	2
第二章 文獻回顧.....	5
第一節 FRP 彎矩補強文獻回顧 .....	6
第二節 FRP 剪力補強文獻回顧 .....	8
第三節 CFRP 應用於工程上之案例 .....	9
第三章 腐朽木構材以 CFRP 彎矩補強之研究 .....	11
第一節 實驗材料 .....	11
第二節 實驗方法 .....	15
第四章 受損木構材 CFRP 彎矩補強實驗結果 .....	27
第一節 木材靜曲破壞模式 .....	27
第二節 影響木材靜曲性質之因素 .....	29
第三節 彎矩補強測試結果 .....	37
第五章 CFRP 補強木構件短梁之研究 .....	75
第一節 預備實驗方法 .....	75
第二節 預備實驗靜曲試驗結果 .....	78
第三節 長-短梁臨界跨深比破壞模式之探討 .....	86
第四節 CFRP 補強木構件短梁實驗設計.....	92
第六章 CFRP 補強木構件短梁靜曲試驗測試結果 .....	95
第一節 木材物理性質量測 .....	95
第二節 三點抗彎測試結果 .....	96

第七章 結論與建議.....	109
第一節 結論 .....	109
第二節 建議 .....	112
附錄一 審查意見及專家座談 .....	113
附錄二 孔洞對木材強度之影響 .....	119
附錄三 CFRP 應用於木構件彎矩補強之理論推導及實驗 .....	125
參考書目 .....	145

## 表次

表 3-1 碳纖維貼片測試項目規範及規格值 .....	13
表 3-2 底漆測試項目規範及規格值 .....	13
表 3-3 積層樹脂測試項目規範及規格值 .....	14
表 3-4 CFRP 彎矩補強受損（模擬蟲蛀腐朽）木構件實驗 規劃表 .....	15
表 4-1 各木理傾斜角試材之靜曲強度的實測值與推算值	32
表 4-2 木曾產日本扁柏的徑切面與弦切面彎曲比較.....	32
表 4-3 $d/h$ 和靜曲強度 ( $\sigma_{bb}$ ) 之關係 .....	36
表 4-4 荷重點至節為止的距離 (S) 及靜曲強度 ( $\sigma_{bb}$ ) 之 關係 .....	36
表 4-5 B-A、B-B 與 B-C 組試材平均含水率以及密度 ....	38
表 4-6 B-D 與 B-E 組試材平均含水率以及密度 .....	39
表 4-7 B-A 組三點抗彎測試結果以及補強提昇效能.....	44
表 4-8 B-B 組三點抗彎測試結果以及補強提昇效能.....	48
表 4-9 B-C 組三點抗彎測試結果以及補強提昇效能.....	53
表 4-10 B-D 組三點抗彎測試結果以及補強提昇效能.....	57
表 4-11 B-E 組三點抗彎測試結果以及補強提昇效能 ....	62
表 4-12 B-A~B-E 對照組三點抗彎測試結果以及極限載重/ 極限位移提昇（減少）效能 .....	64
表 4-13 B-A~B-E 組包覆 1 層 CFRP 三點抗彎測試結果以 及極限載重/極限位移提昇（減少）效能 .....	66
表 4-14 B-A~B-E 組包覆 2 層 CFRP 三點抗彎測試結果以 及極限載重/極限位移提昇（減少）效能 .....	68
表 4-15 B-A~B-E 組包覆 3 層 CFRP 三點抗彎測試結果以 及極限載重/極限位移提昇（減少）效能 .....	70
表 4-16 各組試材斷面慣性矩計算表 .....	72
表 4-17 對照組與補強組平均極限應力數值 .....	73
表 5-1 預備試驗跨深比實驗規劃表 .....	75
表 5-2 預備實驗各組試材木材物理性質量測表 .....	77

表 5-3 預備實驗各組試材靜曲試驗 MOR 值以及破壞模式 .....	85
表 5-4 長-短梁臨界跨深比實驗規劃表 .....	86
表 5-5 長-短梁臨界跨深比木材物理性質量測 .....	87
表 5-6 長-短梁臨界跨深比靜曲試驗之破壞模式 .....	88
表 5-7 CFRP 補強木構件短梁實驗規劃表 .....	92
表 6-1 木構件短梁各組試材之物理性質量測表 .....	95
表 6-2 C 組靜曲試驗結果 .....	98
表 6-3 P 組靜曲試驗結果 .....	100
表 6-4 U 組靜曲試驗結果 .....	102
表 6-5 UP 組靜曲試驗結果 .....	104
表 6-6 對照組與補強組三點抗彎測試結果以及補強提昇效能 .....	105
表 7-1 B-A~B-E 組相同斷面面積損失百分比及不同 CFRP 包覆層數條件下，CFRP 補強後極限載重以及極限位移增加（減少）百分比 .....	109
表 7-2 B-A~B-E 組在同一 CFRP 包覆層數下，其健全斷面以及非健全斷面極限載重以及極限位移增加（減少）百分比 .....	110

## 圖次

圖 3-1 碳纖維複合材料-碳纖維 .....	13
圖 3-2 B-A 組實驗變因示意圖 .....	16
圖 3-3 B-B 組實驗變因示意圖 .....	17
圖 3-4 B-C 組實驗變因示意圖 .....	18
圖 3-5 B-D 組實驗變因示意圖 .....	19
圖 3-6 B-E 組實驗變因示意圖 .....	20
圖 3-7 萬能強度試驗機以及資料記錄器 .....	21
圖 3-8 木材縱向鑽孔設備 .....	21
圖 3-9 CFRP 貼覆施工流程圖 .....	22
圖 3-10 材料準備 .....	23
圖 3-11 去除劣化層 (砂磨) .....	23
圖 3-12 上底漆 .....	24
圖 3-13 上積層樹脂 .....	24
圖 3-14 試材之養護 .....	25
圖 4-1 引張面之破壞型 .....	27
圖 4-2 彎曲材之破壞類型 .....	28
圖 4-3 RT 面之靜曲破壞路徑 .....	28
圖 4-4 $l/h$ 比和靜曲強度之關係 .....	29
圖 4-5 台灣雲葉之木理傾斜角 ( $\theta$ ) 與靜曲強度值 ( $\sigma_{bp}, \sigma_b, E_b$ ) 之關係 .....	31
圖 4-6 鐵杉材之木理傾斜角 ( $\theta$ ) 與靜曲強度值 ( $\sigma_{bp}, \sigma_b, E_b$ ) 之關係 .....	31
圖 4-7 靜曲彈性係數之變化和含水率之關係荷重木口面， Apitong 材 .....	35
圖 4-8 各組試材之對照組 (下圖由左至右分別為 B-A、 B-B、B-C、B-D 以及 B-E) .....	40
圖 4-9 超音波檢測儀 (Sylvatest Duo) .....	40
圖 4-10 超音波檢測儀 (Sylvatest Duo) 檢測現況圖 .....	40
圖 4-11 B-A 組試材現況圖 (由左至右分別為對照組、1 層	



CFRP、2層 CFRP 與 3層 CFRP)	42
圖 4-12 B-A-0 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5)	42
圖 4-13 B-A-1 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5)	42
圖 4-14 B-A-2 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5)	43
圖 4-15 B-A-3 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5)	43
圖 4-16 B-A 組極限載重提昇 (減少) 效能比較圖	44
圖 4-17 B-A 組極限位移提昇 (減少) 效能比較圖	45
圖 4-18 B-A 組平均載重-位移曲線圖	45
圖 4-19 B-B 組試材現況圖 (由左至右分別為對照組、1層 CFRP、2層 CFRP 與 3層 CFRP)	46
圖 4-20 B-B-0 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5)	47
圖 4-21 B-B-1 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5)	47
圖 4-22 B-B-2 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5)	47
圖 4-23 B-B-3 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5)	48
圖 4-24 B-B 組極限載重提昇 (減少) 效能比較圖	49
圖 4-25 B-B 組極限位移提昇 (減少) 效能比較圖	49
圖 4-26 B-B 組平均載重-位移曲線圖	50
圖 4-27 B-C 組試材現況圖 (由左至右分別為對照組、1層 CFRP、2層 CFRP 與 3層 CFRP)	51
圖 4-28 B-C-0 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5)	51
圖 4-29 B-C-1 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5)	52
圖 4-30 B-C-2 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材	

編號 1~5).....	52
圖 4-31 B-C-3 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5).....	52
圖 4-32 B-C 組極限載重提昇 (減少) 效能比較圖.....	53
圖 4-33 B-C 組極限位移提昇 (減少) 效能比較圖.....	54
圖 4-34 B-C 組平均載重-位移曲線圖.....	54
圖 4-35 B-D 組試材現況圖 (由左至右分別為對照組、1 層 CFRP、2 層 CFRP 與 3 層 CFRP) .....	55
圖 4-36 B-D-0 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5).....	56
圖 4-37 B-D-1 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5).....	56
圖 4-38 B-D-2 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5).....	56
圖 4-39 B-D-3 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5).....	57
圖 4-40 B-D 組極限載重提昇 (減少) 效能比較圖.....	58
圖 4-41 B-D 組極限位移提昇 (減少) 效能比較圖.....	58
圖 4-42 B-D 組平均載重-位移曲線圖.....	59
圖 4-43 B-E 組試材現況圖 (由左至右分別為對照組、1 層 CFRP、2 層 CFRP 與 3 層 CFRP) .....	60
圖 4-44 B-E-0 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5).....	60
圖 4-45 B-E-1 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5).....	61
圖 4-46 B-E-2 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5).....	61
圖 4-47 B-E-3 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材 編號 1~5).....	61
圖 4-48 B-E 組極限載重提昇 (減少) 效能比較圖.....	62
圖 4-49 B-E 組極限位移提昇 (減少) 效能比較圖.....	63
圖 4-50 B-E 組平均載重-位移曲線圖.....	63

圖 4-51 B-A~B-E 對照組極限載重提昇 (減少) 效能比較圖 .....	65
圖 4-52 B-A~B-E 對照組極限位移提昇 (減少) 效能比較圖 .....	65
圖 4-53 B-A~B-E 組貼覆 1 層 CFRP 極限載重提昇 (減少) 效能比較圖 .....	67
圖 4-54 B-A~B-E 組貼覆 1 層 CFRP 極限位移提昇 (減少) 效能比較圖 .....	67
圖 4-55 B-A~B-E 組貼覆 2 層 CFRP 極限載重提昇 (減少) 效能比較圖 .....	69
圖 4-56 B-A~B-E 組貼覆 2 層 CFRP 極限位移提昇 (減少) 效能比較圖 .....	69
圖 4-57 B-A~B-E 組貼覆 3 層 CFRP 極限載重提昇 (減少) 效能比較圖 .....	71
圖 4-58 B-A~B-E 組貼覆 3 層 CFRP 極限位移提昇 (減少) 效能比較圖 .....	71
圖 4-59 平均極限應力與斷面慣性矩損失量關係圖 .....	73
圖 5-1 預備實驗各組試材現況圖 (由下而上分別為 S1~S12 之試材) .....	78
圖 5-2 S1 組試材靜曲破壞現況圖 .....	79
圖 5-3 S2 組試材靜曲破壞現況圖 .....	79
圖 5-4 S3 組試材靜曲破壞現況圖 .....	80
圖 5-5 S4 組試材靜曲破壞現況圖 .....	80
圖 5-6 S5 組試材靜曲破壞現況圖 .....	81
圖 5-7 S6 組試材靜曲破壞現況圖 .....	81
圖 5-8 S7 組試材靜曲破壞現況圖 .....	82
圖 5-9 S8 組試材靜曲破壞現況圖 .....	82
圖 5-10 S9 組試材靜曲破壞現況圖 .....	83
圖 5-11 S10 組試材靜曲破壞現況圖 .....	83
圖 5-12 S11 組試材靜曲破壞現況圖 .....	84
圖 5-13 S12 組試材靜曲破壞現況圖 .....	84
圖 5-14 不同跨深比與 MOR 之關係圖 .....	85

圖 5-15 AS1-1 靜曲破壞現況圖 .....	89
圖 5-16 AS1-2 靜曲破壞現況圖 .....	89
圖 5-17 AS1-3 靜曲破壞現況圖 .....	89
圖 5-18 AS1-4 靜曲破壞現況圖 .....	89
圖 5-19 AS2-1 靜曲破壞現況圖 .....	90
圖 5-20 AS2-2 靜曲破壞現況圖 .....	90
圖 5-21 AS2-3 靜曲破壞現況圖 .....	90
圖 5-22 AS2-4 靜曲破壞現況圖 .....	90
圖 5-23 AS3-1 靜曲破壞現況圖 .....	91
圖 5-24 AS3-2 靜曲破壞現況圖 .....	91
圖 5-25 AS3-3 靜曲破壞現況圖 .....	91
圖 5-26 AS3-4 靜曲破壞現況圖 .....	91
圖 5-27 木構件短梁實驗規劃示意圖 .....	93
圖 6-1 C1 靜曲破壞現況圖 .....	96
圖 6-2 C2 靜曲破壞現況圖 .....	96
圖 6-3 C3 靜曲破壞現況圖 .....	96
圖 6-4 C4 靜曲破壞現況圖 .....	97
圖 6-5 C5 靜曲破壞現況圖 .....	97
圖 6-6 C 組試材平均載重-位移曲線圖 .....	97
圖 6-7 P1 靜曲破壞現況圖 .....	98
圖 6-8 P2 靜曲破壞現況圖 .....	98
圖 6-9 P3 靜曲破壞現況圖 .....	99
圖 6-10 P4 靜曲破壞現況圖 .....	99
圖 6-11 P5 靜曲破壞現況圖 .....	99
圖 6-12 P 組試材平均載重-位移曲線圖 .....	99
圖 6-13 U1 靜曲破壞現況圖.....	100
圖 6-14 U2 靜曲破壞現況圖.....	100
圖 6-15 U3 靜曲破壞現況圖.....	101
圖 6-16 U4 靜曲破壞現況圖.....	101
圖 6-17 U5 靜曲破壞現況圖.....	101
圖 6-18 U 組試材平均載重-位移曲線圖 .....	101
圖 6-19 UP1 靜曲破壞現況圖 .....	102

圖 6-20 UP2 靜曲破壞現況圖 .....	103
圖 6-21 UP3 靜曲破壞現況圖 .....	103
圖 6-22 UP4 靜曲破壞現況圖 .....	103
圖 6-23 UP5 靜曲破壞現況圖 .....	103
圖 6-24 UP 組試材平均載重-位移曲線圖 .....	104
圖 6-25 對照組與補強組極限載重提昇(減少)效能比較圖 .....	106
圖 6-26 對照組與補強組極限位移提昇(減少)效能比較圖 .....	106
圖 6-27 對照組與補強組試材平均載重-位移曲線圖 ....	107

## 摘要

關鍵詞：古蹟及歷史建築物、碳纖維強化高分子複合材料、木構件補強

本研究擬以應用於鋼筋混凝土結構物的補強已臻成熟之碳纖維強化高分子複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)，作為木構造古蹟建築修復補強的材料。研究團隊之先期國科會計畫 (NSC 89-2313-B-002-195) 已經探討過木構件與 CFRP 膠合性質之可行性，並且進行初步之彎矩補強研究，研究成果顯示 CFRP 強化木構件之張力側可提升整體木梁構件的強度、剛性以及韌性，並且建立木梁張力側貼覆 CFRP 之彎矩補強理論模式。因此本計畫進行 CFRP 補強木構件之後續研究，研究項目包含 CFRP 貼覆日式與西式建築物之受損木構件彎矩補強研究、CFRP 貼覆木構件短梁補強研究，並且建立 CFRP 補強木構件之施工流程標準程序 (此工法為一可逆之工法，符合文資法第三十條之規定)。經由本計畫之執行，已完成如下之具體成果：(1) 建立 CFRP 貼覆木構件之施工流程以供業界現場施工之參考；(2) CFRP 彎矩補強木梁構件後續研究，瞭解木梁構件斷面受損 (模擬蟲蛀腐朽) 後之彎矩補強效能，以供古蹟現場大木構件修復補強之參考依據；(3) 探討碳纖維強化高分子複合材料補強木構件短梁之可行性，瞭解不同型式之補強方式對木構件短梁補強效能的影響等。



## 第一章 緒論

木材是可再生的生物材料，且具有許多優良的居住特性，自古以來一直為人類所喜愛而大量選用為建築材料，也由於台灣地區盛產木材，因此以前較傳統的建築中主結構體屬於木構造者佔有相當之比例，隨時光推演成了今日的古蹟與歷史建築物。古蹟與歷史建築為國家重要之文化資產，能為歷史作見證，也為民族傳統文化之表徵，其重要性已被多數進步國家所認可。

### 第一節 研究背景

臺灣地區位於地震頻繁之環太平洋地震帶上，民國八十八年九月二十一日凌晨一點四十七分，發生了百年來規模最大的地震，這次地震不只震垮了台灣地區許多新建的鋼筋混凝土建築物，也震毀了許多以木構架為主的古蹟與歷史建築物。由於以木構架為主的古蹟（木結構古蹟佔國內指定古蹟的六成以上）以及歷史建築物之結構特性與使用材料特性，包括結構體抵抗如地震之水平力較差、木構件長期使用後腐蝕之問題，使得其修復及補強的困難度超過一般的鋼筋混凝土建築物。

基於文化資產保存法第二十一條：「古蹟應保存原有形貌及工法，如因故毀損，而主要構造與建材仍存在者，應依照原有形貌修復，並得依其性質，由所有人、使用人或管理人提出計畫，經主管機關核准後，採取適當之修復或再利用方式。且文化資產保存法施行細則第四十六條：「古蹟修護，應依下列原則為之：一、保存原有之色彩、形貌。二、採用原用或相近之材料。三、使用傳統之技術及方法。四、非有必要不得解體重建」。在八十九年二月九日修正通過的文資法第三十條增列了保存科學的應用技術等文字：「...前項修復計畫之提出，必要時得採用現代科技與工法，以增加其防震、防災、防蛀等機能」。這無疑的被認為國內文化資產保存修復實務引用現代科技與工法，以達到保存目的，為必然之趨勢。

基於此因，本研究構想以碳纖維強化高分子複合材料（CFRP）應用在木



碳纖維強化高分子複合材料(CFRP)應用於木構造古蹟建築補強之研究

構件上之補強，CFRP 具有質量輕、耐腐蝕，強度高等優點，CFRP 補強工法可說是現代科技與工法之結合。CFRP 可貼覆於木材外面，經過磨除後，可以恢復木構造之原有外觀，它亦符合保存科學的應用技術之可逆性。

## 第二節 研究範圍

本研究範圍以台灣日式及西式木構造建築物為對象；其中日式木構造建築又稱為和小屋式建築，這種建築方式為日本傳統木構特點，其在於屋架之構件僅具小柱與大樑，無斜置構件（方仗）；而西式木構造建築多為中柱式洋小屋型，其桁架結構大致為中柱式桁架俗稱正同柱桁架，構面內設置有斜撐材，抵抗橫力作用較抬樑式與穿斗式桁架有利，為今日西式木構造中最常用者。中柱式結構建築在構架上由合掌、真束、陸樑、吊束及方杖等構件組成桁架式屋架，每一個組成構件及其結點由於承重之應力及幾何位相上的不同，各有其對應之構法，此乃因其在不同之幾何位相及受力情況下有不同之力學行為所致。

## 第三節 研究目的

結構物補強一般可分為劣化補強、耐震補強與強度補強等三大類；劣化補強乃因構件腐蝕而做的處理，環氧樹脂灌注修復法等，其目的是在防止結構物繼續劣化；而耐震補強則因為時空的變遷及規範的更新，為了符合現行法規的要求，而必須採用的補強方法，係利用增設隔減震設備或改變結構物的結構系統，來增加結構物的剛性，如複合材料包覆補強；而強度補強則因為強度不足而必須利用補強方式來增加強度的皆屬此類。在舊有傳統補強基礎上，研發新的補強材料與工法，並應用於木構造建築的修復，除了能預防或減少下一個地震來臨時所造成的災情，也能達到保存文化資產之目的。另一方面，對於木構造建築進行修補，不需大量拆除重建木構造建築，不會造成木材此一生態材料的浪費，有助於人類對地球環境之保護。

本計畫的目的為探討 CFRP 應用於木構造古蹟與歷史建築補強之效應。研究方向將從其材料面與力學面來探討 CFRP 應用於木構造古蹟與歷史建築

補強之可行性與實用性。主要工作包括：

1. 針對受損木梁構件（模擬蟲蛀腐朽）進行彎矩補強後續研究；
2. 探討不同補強方式對木構件短梁補強之效能；
3. 建立 CFRP 補強木構件之施工流程標準程序，以供業界現場施工之參考。



## 第二章 文獻回顧

台灣歷史建築物中，木材被大量使用於結構體上，就木構材長期曝露於大氣中使用時容易發生老化或劣化的現象，而減低其利用價值，加上台灣屬於高溫高濕的海島型氣候，木構材如未經處理或定期維護，老化及劣化的現象更容易發生，使木構材的承載力及耐久性縮減，因而在強震侵襲下發生各種不同程度的損傷，其中對於完全倒塌之建築物除非有特殊狀況，否則只有選擇拆除重建。以九二一集集大地震為例，在中部及北部地區造成嚴重的災情，數以萬計的房屋毀損、倒塌，除了鋼筋混凝土建築及鋼造建築外，尚有磚造建築、土塊厝建築及木構造建築等傳統建築，而地震中大部分木造、磚造、土塊厝等傳統建築因缺乏耐震能力而毀損（葉祥海與蔡克銓，1999）。

以古蹟及歷史建築物而言，政府在震後對於文化資產保存法進行修正及增訂，其中不但對於歷史建築列入保護，並修訂古蹟的修復在不損及原有風貌之前提下，**必要時得採用現代科技與工法，以增加其防震、防災以及防蛀等機能**。因此，在顧及古蹟與歷史建築物之原有風貌與安全性下，對於國內古蹟木構件遭受侵蝕損壞之修復補強，乃是防震重點之一，亦是解決安全性問題最經濟的方法。

補強乃視損傷或劣化之嚴重程度，必須將造成損傷或劣化之因素消除或加強其性能之補修（丁育群與陳宗禮，2000）。補強亦稱強化，可分為構造全體的補強與構件的補強，其中構件的補強是在構件上加上木材、金屬、或使用玻璃纖維、碳纖維及合成樹脂等現代化材料進行補強（伊原惠司，2000）。近年來纖維強化高分子複合材料（Fiber Reinforced Plastics, FRP）被應用於鋼筋混凝土（RC）與預力混凝土（PC）結構物的補強材料，以提高其強度與剛性，FRP 補強之主要優點為耐腐蝕性強、強度高、重量輕、剪裁容易、施工容易而且適用於幾何形狀複雜之黏貼面等，FRP 之補強功能主要是靠高強度之纖維（Fiber，如碳纖維、玻璃纖維及克維拉纖維）與基材（Matrix，如環氧樹脂）之共同作用，FRP 中以碳纖維之補強最為普遍，主因在於三種 FRP 中以碳纖維的強度最高，耐腐蝕性亦最佳（徐耀賜，2001）。近年來碳纖維的

應用更擴大到工程及建築上，目前國內將 CFRP 普遍應用於混凝土結構物的補強。在混凝土補強方面，碳纖維主要是作為抗拉力與圍束材料，例如碳纖維用在補強高速公路上，以增加卡車運輸噸數的承受量、抗震並解決鹽腐蝕的問題，因此混凝土以碳纖維補強的需求急速的增加 (Ogawa, 2000)。李有豐等人 (1999, 2000, 2001) 亦從事許多 RC 橋柱以 FRP 補強後之耐震試驗以及理論分析的研究，實驗結果發現以 CFRP 補強後之橋柱其消能能力以及強度、韌性均會提昇。

### 第一節 FRP 彎矩補強文獻回顧

在國外 CFRP 應用於土木結構物之補強技術已經非常的成熟，Shokrieh (2001) 採用 11 根 RC 梁，藉由包覆與未包覆 FRP 複合材料，利用實驗與理論以及數值分析來比較其四點靜曲破壞模式，實驗結果發現：(1) RC 梁藉由 FRP 複合材料強化後，1.5 mm (單層) 增加大約 80%；(2) FRP 不但可以強化未損壞之混凝土梁，也可以強化損壞後之混凝土梁。Beter 等人 (2001) 藉由一層、四層、七層及十層 FRP 來強化 RC 梁，並把試體加載至破壞，實驗結果發現：(1) 在一定之載重下，鋼筋之應力-變形是小於對照梁的；(2) 強化梁之極限載重可以用傳統梁之靜曲理論預測；(3) 混凝土之強度也會影響梁之剛性及極限載重。目前國內將 CFRP 普遍應用於混凝土結構物的補強，以單層 CFRP 圍束補強混凝土圓柱試體 (直徑 15 cm，高度 30 cm)，其平均破壞載重約增加 2.27 倍；雙層圍束補強者之平均破壞載重約增加 3.18 倍 (張寬勇等, 1998)。另外以 90° 走向之 CFRP 補強 RC 梁，其增加剪力強度並提高整體韌性；以 0° 走向之 CFRP 補強可提高 RC 梁抗彎強度，貼覆層數愈高，抗彎矩能力愈強 (李有豐等, 1998)。

在國外應用 CFRP 於木質材料以及木質結構物之強化補強研究的案例也非常的豐富，Bohannan (1962) 探究預力低等級結構木材及未預力低等級結構木材在靜曲性質的製造評估比較得知：(1) 木梁的剛性不會因為預力的效果而增加；(2) 預力梁比未預力梁在破壞前將支承一個較大的載重且測試結果指出，藉由預力的強化會產生一個較大的現存靜曲強度之使用性。Wangaard

(1964) 與 Biblis (1965) 則使用環氧樹脂為膠合劑，膠黏 GFRP 於不同材種的心板兩面，彎曲彈性係數增加 20%~50%。Boehme 與 Schweiz (1974) 以 GFRP 貼面處理粒片板與合板，獲致在抗彎強度與剛性、引張強度與壓縮強度的顯著增加。Plevris 與 Triantafillou (1995) 採用 FRP 以環氧樹脂強化木梁張力側後之潛變行為提供一個基本的認知，其研究發現：(1) FRP 強化梁的潛變行為初始是受到木材潛變的控制；(2) 由實驗驗證，CFRP 在強化木構材靜曲強度為一優良的材料，只要超過 1% 些許的 CFRP 面積，將會減少總構材變形量 40% 以及潛變行為減少 50%。Mosallam 與 Kreiner (1999) 採用 8 根 8 吋×8 吋×10 呎長的花旗松木構件進行抗彎實驗至試材破壞，其研究結果發現：(1) 補強梁和對照梁相較之下，補強梁載重容量增加到 260% 以及剛性是增加到 90%；(2) 針對損壞的預裂縫梁增加額外的 FRP 層數，會增加 180% 的載重彎矩容量以及剛性提升至 150%。Martin 等人 (2000) 使用 GARP (Glass-Aramid Reinforced Polymer) 以及 ARP (Aramid Reinforced Polymer) 兩種型態之 FRP 補強橋面板之張力側，實驗結果顯示 FRP 強化後對橋面板之強度、剛性以及韌性都有提昇之效能。Fave 與 Tingley (2001) 以 FRP 強化集成梁之張力側，其研究結果得到：(1) 針對張力區較高百分比的強化可以減少梁指接強度的影響；(2) 針對延展性的測試方面證實，強化集成梁較未強化集成梁在韌性有特別的增加。Fiorelli 與 Dias (2003) 採用 CFRP 以及 GFRP 針對木梁進行張力側之彎矩補強，從其實驗結果發現採用 FRP 補強可增加梁構件之剛性、強度以及韌性，並且有效預防由於木梁構件之缺點而引起之張力破壞。Borri 等人 (2003) 採用 CFRP 貼片以及 CFRP 棒進行木構件彎矩區域之強化，從其實驗結果發現以 CFRP 貼片強化木梁彎矩區域不論是平貼或是 L 型貼覆，皆能增強其強度、剛性以及韌性，而以 CFRP 棒補強對提升整體之彎矩強度效能卻不顯著。

國內將 CFRP 應用於木材或木質材料補強之相關文獻較少，黃耀富、江吉龍 (1997) 研究發現木材粒片與碳纖維織布複合之製板，成板之比靜曲破壞係數、比靜曲彈性係數、內聚強度及木螺絲保持力等性質均隨結構碳纖維織布層數的增加而提高，並明顯改善粒片板表面之耐燃性，而木材纖維與碳

碳纖維強化高分子複合材料(CFRP)應用於木構造古蹟建築補強之研究

纖維織布複合之製板的成效亦與木材粒片與碳纖維織布複合之製板相同。謝耀明(2002)應用 CFRP 補強鐵杉與杉木之張力側，並進行彎矩補強理論推導，經由補強木梁與未補強木梁實驗結果與理論驗證下，其強度、剛性以及韌性都有提昇之效果。依謝耀明等人(2002)以四種不同佈膠量之底漆以及環氧樹脂應用於木構件膠合性質之可行性研究，藉由拉拔測試來探究最佳之佈膠量，其研究結果發現最佳之佈膠量為  $0.20\sim 0.25\text{kg/m}^2$ ，但在考量不缺膠之情況下，其建議採用  $0.25\text{ kg/m}^2$  環氧樹脂佈膠量。周惠娟(2003)在 CFRP 補強木材複合材靜曲效能改善之研究中，將 CFRP 貼覆於含柳杉等五種試材上，並以浸漬剝離試驗及煮沸剝離試驗兩項劣化流程對 CFRP 與木材之膠合進行試驗，結果顯示 CFRP 與木材間並無剝離現象，此已符合 CNS11031 結構用集成材中之 I 類使用環境者。

## 第二節 FRP 剪力補強文獻回顧

在國外 CFRP 應用於土木以及木質構材之研究如次所述：Triantafillou (1997) 採用 CFRP 當作集成木梁之剪力補強材料，其研究成果發現：(1) 使用 CFRP 補強可加強其剪力效能；(2) 理論分析與實驗測試相較之下，其誤差百分比相近。Triantafillou (1998) 研究發現以 CFRP 貼片或是編織的方式作為混凝土、石材以及木材的剪力補強是一個高效率的技術。使用 FRP 強化混凝土以及石材可以視為典型之桁架類比法來處理並且可以求得有效 FRP 之應變(依 FRP 之規格不同而有差異)；對木材剪力補強而言，以簡單之材料力學的方式即可對 FRP-木複合構材進行分析。Täljsten 與 Carolin (2001) 推導 CFRP 剪力強化 RC 梁之理論，並且進行實驗測試與理論驗證等工作，實驗變因包含 CFRP 貼覆角度以及層數之變化並且應用有限元素分析去證實理論之可靠性。Lopez 等人(2001)測試在  $-29^{\circ}\text{C}$  高振幅循環的靜曲及剪力強化梁，實驗結果顯示：(1) 靜曲循環遲滯載重測試的應變資料顯示，當 CFRP 板在循環次數增加時會有應變重新分配的趨勢；(2) 剪力梁在  $-29^{\circ}\text{C}$  單向載重作用下會發生 CFRP 板的剪力脫膠，且此現象是伴隨著混凝土的剪力破壞而產生的；(3) 在  $-29^{\circ}\text{C}$  循環遲滯載重的作用下，初始破壞是在第一層的強化鋼筋，

然而鋼筋的破壞是歸因於低溫下之脆性破壞。Cao 等人 (2001) 從事 GFRP 貼片以及條狀 GFRP 貼片於 RC 梁之剪力補強，實驗控制變因為 RC 梁剪力跨距以及條狀 GFRP 之間距，實驗結果發現：(1) 不論是用 GFRP 貼片或是條狀 GFRP 都能增加其剪力效能，且使用 GFRP 量越高其增加之效能越大，但其剪力跨距大小並不會影響補強效能；(2) 當載重達到 GFRP 之極限承载力時，條狀 GFRP 逐漸產生脫層，而 GFRP 貼片則產生全面之脫層；(3) FRP 之平均應變是受到 FRP 使用量以及強化之方法影響，當 FRP 使用量越高則在剪力跨之平均 FRP 應變越小。Tascioglu 等人 (2003) 採用 ILSS (Interlaminar Shear Strength) 測試與非破壞評估 (NDE) 的方法探究真菌 (白腐菌與褐腐菌) 對 E-FRP 補強木梁是否造成剪力強度減少以及 E-FRP 面積損失的研究，其研究結果發現：(1) E-FRP 材料的確會遭受木材腐朽菌的危害；(2) 剪力強度損失的原因為真菌在 E-FRP 與木材界面產生代謝物造成界面破壞；(3) 研究結果驗證 ILSS 以及 NDE 的方法可以監測真菌之危害情況。

在國內只收集到 CFRP 應用於 RC 構件剪力補強的研究，至於應用 CFRP 於木質構件之剪力補強文獻相當稀少。曹智強 (2002) 採用 U 型、條狀、面狀、L 型以及前述四種組合變化之補強方式，針對 RC 梁進行剪力補強，在其四點抗彎測試結果發現：(1) 各種補強方式均能增加 RC 梁之剪力強度，因此 CFRP 貼覆梁之側面可有效預防剪力裂縫之發生；(2) 理論上要預防剪力裂縫之產生，必須配置 CFRP 於剪力裂縫之垂直向，但因施工不易，又混凝土強度與圍束狀態有關，因此以 U 型補強效果最佳。

### 第三節 CFRP 應用於工程上之案例

在台灣，FRP 應用於現地古蹟以及歷史建築之強化仍有待開發，雖然 FRP 強化木梁構件符合現代科技與工法，未來若有更適當且可替代之材料時，可將木梁表面之 FRP 磨除並應用新的技術，為一可逆性之材料；但基於許多學者對於古蹟及歷史建築保存之理念不同，應用於目視可及之構架仍會遭受質疑，因此本文建議僅考慮應用於台灣日式以及西式木構架隱蔽處，例如天花板上方之構架，至於有施以彩繪之建築仍有待開發其應用之可行性。在國外，



FRP 應用於歷史建築修復工程上之案例如次所述：

Katsumata等人 (2001) 應用CFRP之技術在歷史建築的強化以及降低價錢，節省時間以及忽略結構外表的改變。Meier (2001) 採用CFRP複合材料去強化以及加勁兩棟歷史建築，強化結果顯示，CFRP是適用於強化以及加勁諸如上述二類的木構造建築。

## 第三章 腐朽木構材以 CFRP 彎矩補強之研究

本章主要目的為探討木構件在遭受蟲蛀腐朽時，以 CFRP 貼片彎矩補強木構件之可行性；並且在 CFRP 貼覆木構件施作過程中拍攝 DV 影片，以建立 CFRP 貼覆木構件之施工標準流程。實驗材料包含 CFRP 貼片、杉木以及環氧樹脂等；實驗以鑽孔機器進行木材縱向全長鑽孔，探討不同斷面面積損失百分比（模擬構材斷面受損程度）在不同 CFRP 貼覆層數下，其彎矩補強之效能。以下分別詳述彎矩補強之實驗材料、實驗方法以及施作流程。

### 第一節 實驗材料

CFRP 彎矩補強受損（模擬蟲蛀腐朽）木梁構件試驗材料包含杉木（*Cunninghamia lanceolata*）、碳纖維強化高分子複合材料，材料之特性以及規格如下所述：

#### 一、杉木

本研究使用常用之材種杉木（*Cunninghamia lanceolata*）來進行實驗測試，含水率為 15~17%。

#### 二、碳纖維強化高分子複合材料

碳纖維強化高分子複合材料（CFRP，見圖 3-1）有三個基本成份：碳纖維（Carbon Fiber）與基材（Matrix）以及纖維－基材之界面（Interface）等。碳纖維為強化材料，使 CFRP 材料具有很高的強度和彈性係數，且使 CFRP 材料承受應力時不致於彎曲或破壞；碳纖維強化材料是決定 CFRP 材料機械性能的主要因素，碳纖維強化材料於 CFRP 材料中之功能綜合歸納成下列五點：(a) 承受主要負載；(b) 限制微裂紋延伸；(c) 提高材料強度與剛性；(d) 改善材料抗疲勞以及抗潛變性能；與 (e) 提高材料使用壽命與可靠性。

CFRP 材料必須證實其製造過程是經過嚴謹的品質控制，製造商需通過 ISO 9000 系列認證或是同等級之認證標準，以確保補強材料符合規範需求，

本研究 CFRP 所採用的規格如表 3-1 所示。基材 (Matrix) 最主要的功能是傳送應力或分散應力到每根纖維中，且使纖維固定在所需要的排列方向，基材亦可以保護纖維免受到摩擦或侵蝕，同時基材也可結合纖維，使複合材料受應力時不致於破壞或變形。基材的性質是決定纖維複合材料最高使用溫度、電氣特性、化學性質之主要因素，大部份的高分子化合物，熱固性樹脂、室溫硬化樹脂或熱塑性塑膠，均可加入纖維強化材料使其性能增加，最常用之熱固性樹脂為不飽和聚酯 (Unsaturated Polyester Resin) 和環氧樹脂 (Epoxy Resin)。纖維—基材的界面是決定複合材料使用壽命之重要因素，在界面處具有很高的局部應力，纖維複合材料可能從界面處先破壞，故纖維—基材界面必須具有良好的物理和化學性質，以便使負荷能夠很順利的由基材傳送到纖維。

在木材表面塗佈底漆的目的主要在於浸透木材表層，以提升木材表面與 CFRP 間之接合性。本研究採用國內財團法人工業技術研究院所研發生產之 MRL-A2 型底漆主劑及 MRL-B2 型環氧樹脂硬化劑，底漆之調配比例為主劑：硬化劑=100：35，其測試規範及規格值如表 3-2 所示。

積層樹脂是用以膠結碳纖維貼片於木材表面，並固定碳纖維貼片在木材表面的位置，本研究係採用國內財團法人工業技術研究院所研發生產之 MRL-A3 型基層樹脂主劑及 MRL-B2 型環氧樹脂硬化劑，積層樹脂之調配比例為主劑：硬化劑=100：35，其測試規範及規格值如表 3-3 所示。

圖 3-1 碳纖維複合材料-碳纖維



表 3-1 碳纖維貼片測試項目規範及規格值

品名	FAW-200	測試規範
單位面積重量 (g/m <sup>2</sup> )	200	CNS13062
抗張強度 (kgf/cm.ply)	460	CNS13555
抗張係數 (kgf/cm.ply)	25,800 以上	CNS13555
設計抗張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	490	—
設計抗張係數 (kgf/cm <sup>2</sup> )	2.35×10 <sup>6</sup>	—
設計厚度 (mm/ply)	0.11	—
伸長率 (%)	1.8	CNS13555
貼片幅寬 (cm)	50	—

表 3-2 底漆測試項目規範及規格值

項目	測試規範	規格值
材質	—	室溫硬化型環氧樹脂
混合後初黏度 (25°C)	CNS13065	600-1,300 cps
可操作時間 (25°C)	溫度上升法	60-120 min.
接著強度 (乾燥表面)	CNS11053	>20 kgf/cm <sup>2</sup> (混凝土破壞)

表 3-3 積層樹脂測試項目規範及規格值

項目	測試規範	規格值
可操作時間 (25°C)	溫度上升法	60-120 min.
混合後初黏度 (25°C)	CNS13065	900-3,000 cps
抗張強度 25°C、R.H.65%硬化 7 天	CNS4396	>400 kgf/cm <sup>2</sup>
抗張係數 25°C、R.H.65%硬化 7 天	CNS4396	>30,000 kgf/cm <sup>2</sup>
抗彎強度 25°C、R.H.65%硬化 7 天	CNS4392	>800 kgf/cm <sup>2</sup>
剪切強度 25°C、R.H.65%硬化 7 天	CNS5606	>100 kgf/cm <sup>2</sup>

## 第二節 實驗方法

### 一、彎矩補強實驗設計

本項實驗目的為探究以 CFRP 彎矩補強受損（模擬蟲蛀腐朽）木梁構件之可行性，參照 CNS454 木材靜曲試驗法進行試驗，試材為正方體橫斷面柱體，斷面邊長（a）=20~40mm，長度（L）=跨距+2a，跨距為 a 之 14 倍。採中央集中載重（三點載重）方式進行抗彎測試。

彎矩補強試驗之試材尺寸為長×寬×高等於 48 cm×3 cm×3 cm，實驗變因包含在木材縱向全長進行不同孔徑大小之鑽孔以及採用不同 CFRP 層數貼覆在木材之張力側，探究木梁構件在斷面損失狀況下，彎矩補強所提昇之效能。彎矩補強受損（模擬蟲蛀腐朽）木構件實驗規劃如表 3-4 所示，對照組以及補強組示意圖如圖 3-2~圖 3-6 所示。

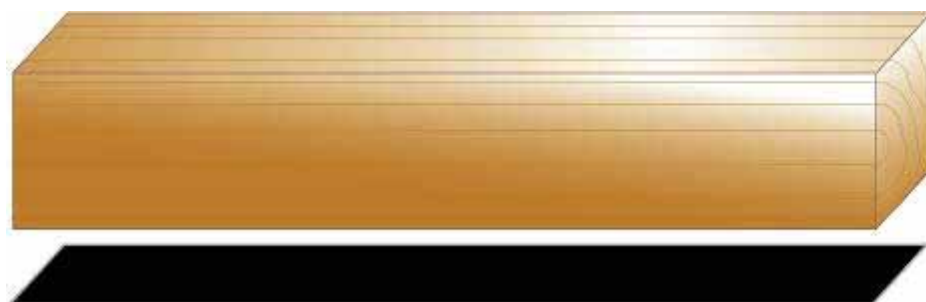
表 3-4 CFRP 彎矩補強受損（模擬蟲蛀腐朽）木構件實驗規劃表

組別 內容	B-A B-B B-C B-D B-E																			
	B-A				B-B				B-C				B-D				B-E			
孔徑 (cm)	0				1.2				1.5				1.8				2.2			
斷面面積損失 百分比 (%)	0				13				20				28				42			
斷面慣性矩損 失百分比 (%)	0				1.5				3.8				7.7				17			
CFRP 張力側 貼覆層數	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
試材數量	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

圖 3-2 B-A 組實驗變因示意圖



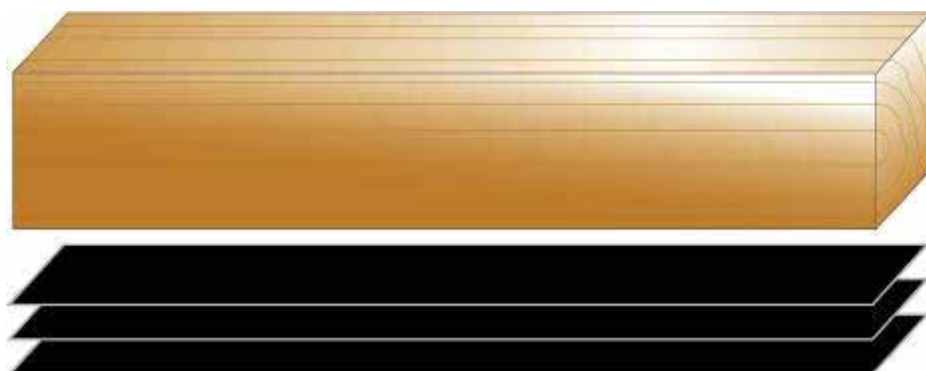
(a) 未貼覆 CFRP



(b) 引張側貼覆 1 層 CFRP



(c) 引張側貼覆 2 層 CFRP

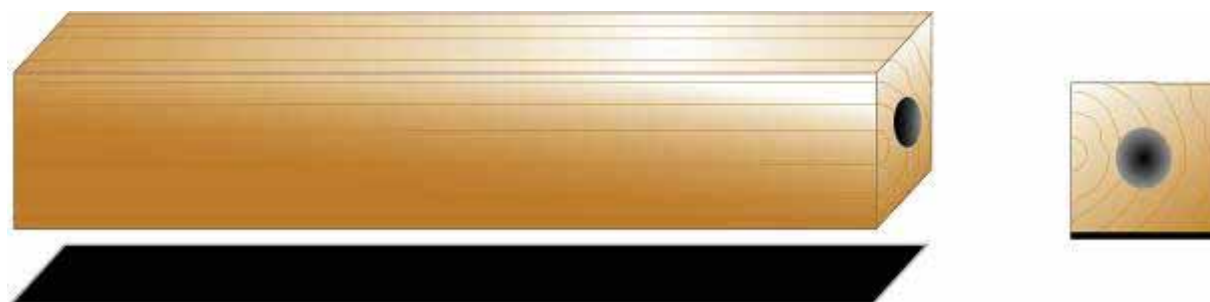


(d) 引張側貼覆 3 層 CFRP

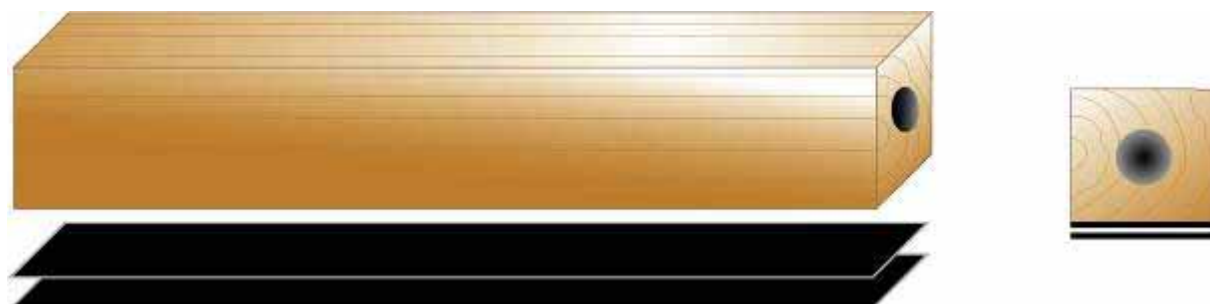
圖 3-3 B-B 組實驗變因示意圖



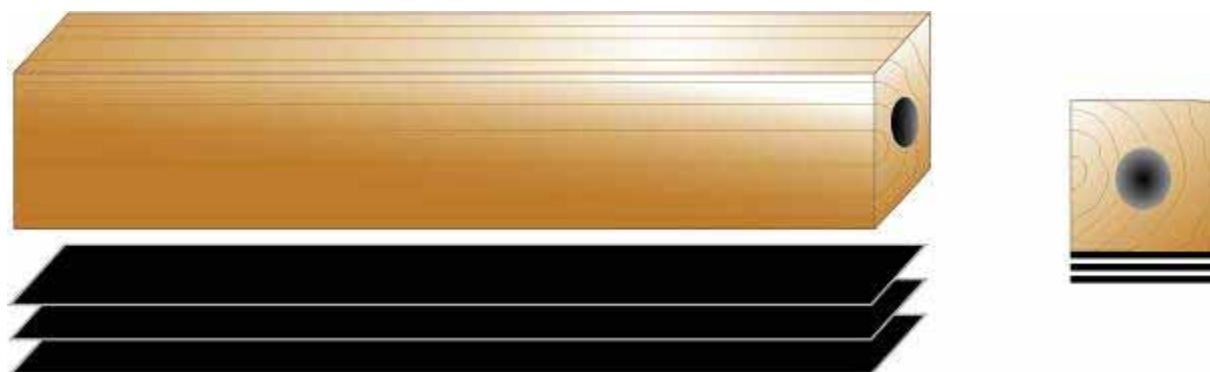
(a) 未貼覆 CFRP、鑽孔直徑 1.2 cm 貫穿全長



(b) 引張側貼覆 1 層 CFRP、鑽孔直徑 1.2cm 貫穿全長



(c) 引張側貼覆 2 層 CFRP、鑽孔直徑 1.2 cm 貫穿全長



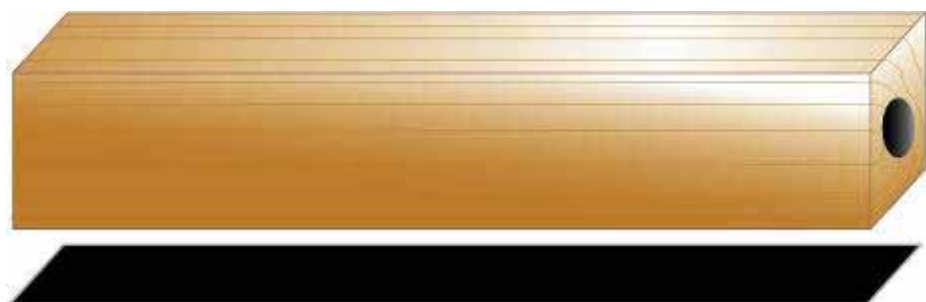
(d) 引張側貼覆 3 層 CFRP、鑽孔直徑 1.2 cm 貫穿全長



圖 3-4 B-C 組實驗變因示意圖



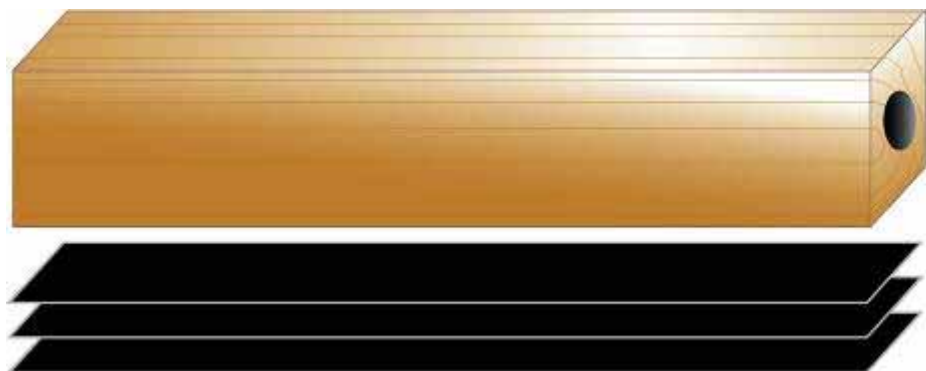
(a) 未貼覆 CFRP、鑽孔直徑 1.5 cm 貫穿全長



(b) 引張側貼覆 1 層 CFRP、鑽孔直徑 1.5 cm 貫穿全長



(c) 引張側貼覆 2 層 CFRP、鑽孔直徑 1.5 cm 貫穿全長



(d) 引張側貼覆 3 層 CFRP、鑽孔直徑 1.5 cm 貫穿全長

圖 3-5 B-D 組實驗變因示意圖



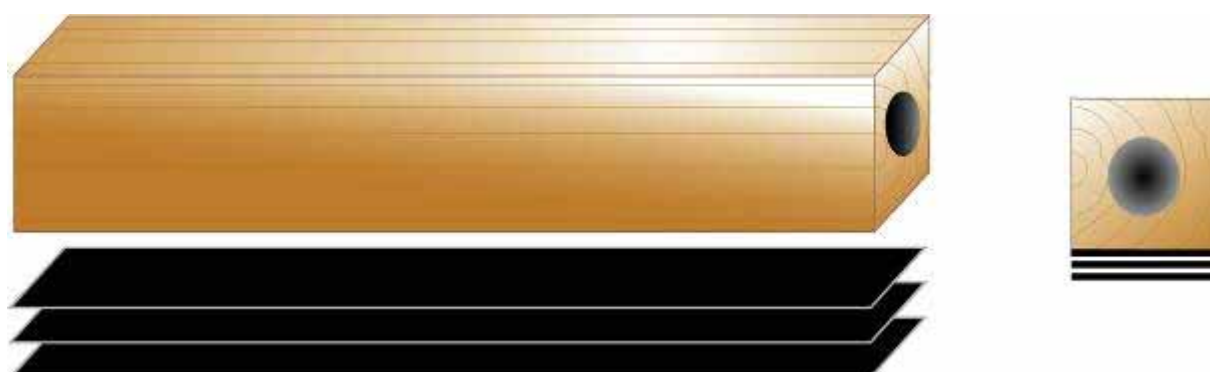
(a) 未貼覆 CFRP、鑽孔直徑 1.8 cm 貫穿全長



(b) 引張側貼覆 1 層 CFRP、鑽孔直徑 1.8 cm 貫穿全長



(c) 引張側貼覆 2 層 CFRP、鑽孔直徑 1.8 cm 貫穿全長

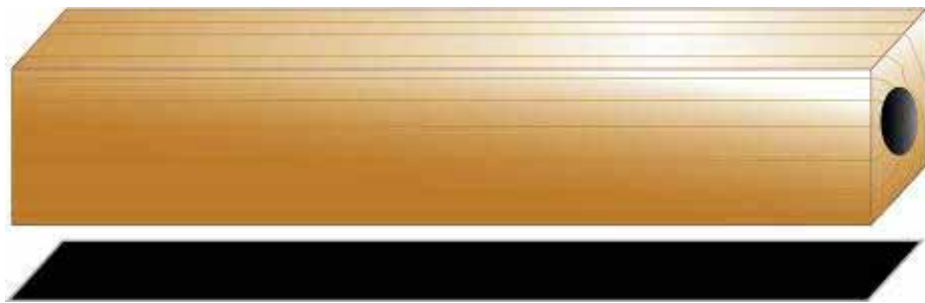


(d) 引張側貼覆 3 層 CFRP、鑽孔直徑 1.8 cm 貫穿全長

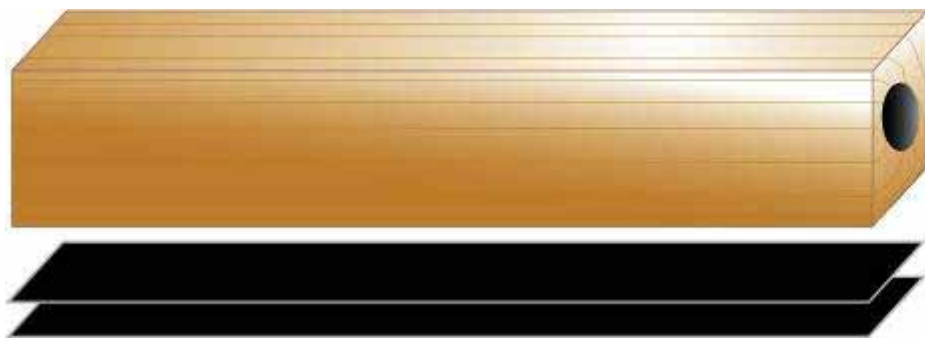
圖 3-6 B-E 組實驗變因示意圖



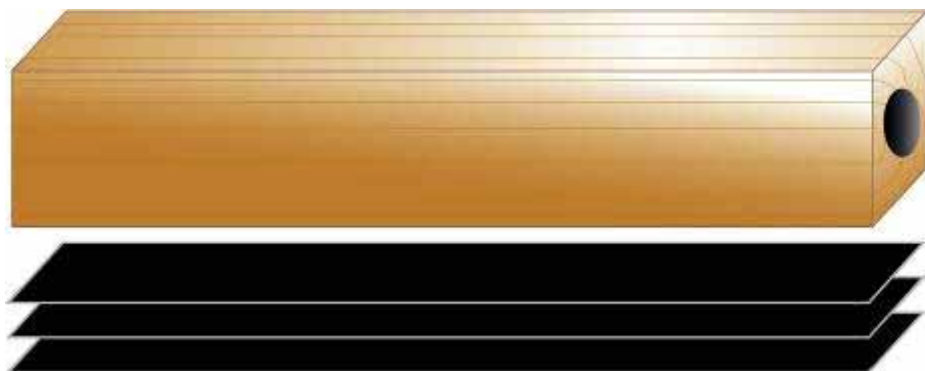
(a) 未貼覆 CFRP、鑽孔直徑 2.2 cm 貫穿全長



(b) 引張側貼覆 1 層 CFRP、鑽孔直徑 2.2 cm 貫穿全長



(c) 引張側貼覆 2 層 CFRP、鑽孔直徑 2.2 cm 貫穿全長



(d) 引張側貼覆 3 層 CFRP、鑽孔直徑 2.2 cm 貫穿全長

## 二、實驗設備

- (1) 10 噸萬能強度試驗機及支承反力座 (圖 3-7)。
- (2) 資料記錄器以及實驗資料顯示器 (圖 3-7)。
- (3) 鑽孔設備 (圖 3-8)。

圖 3-7 萬能強度試驗機以及資料記錄器



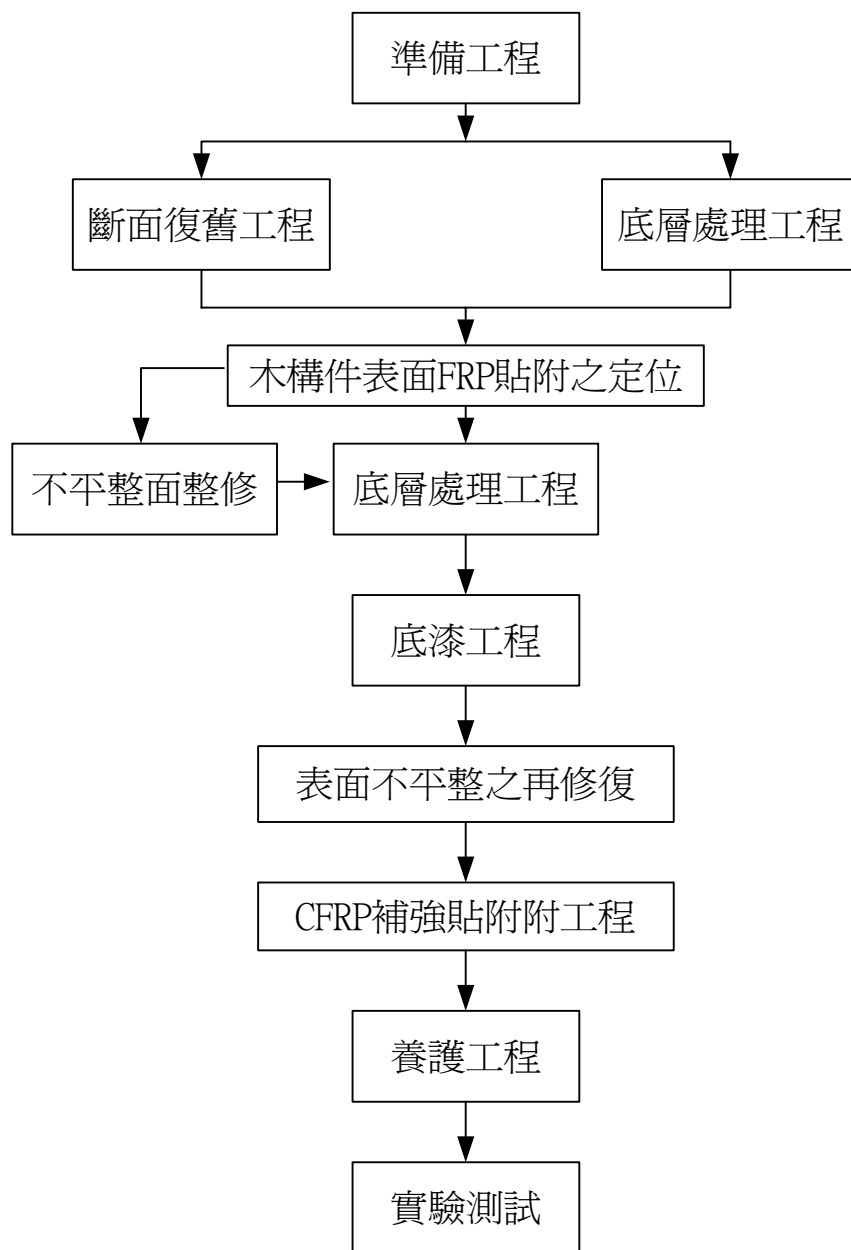
圖 3-8 木材縱向鑽孔設備



## 三、CFRP 貼覆木構材施工流程

本實驗參考工法為工研院工業材料研究所參照國外的補強工法與經驗以及國內成功案例之經驗歸納後，所研發之碳纖維貼片補強混凝土結構物之規範，此工法應用於木構件時，稍做變化，其步驟如下 (CFRP 貼覆施工流程圖如圖 3-9)，並以文字說明如後。

圖 3-9 CFRP 貼覆施工流程圖



• 準備工作

試驗前各種材料及工具之準備，使用之材料包括木材、CFRP 貼片、底漆及積層樹脂等，使用工具包括剪刀、毛刷、滾筒、砂紙、攪拌容器、紙杯、手套以及尺等，如圖 3-10 所示。

圖 3-10 材料準備



• 底層（面層）處理

- (1) 使用砂紙或磨光機將木材表面的劣化層除去（圖 3-11）；
- (2) 研磨完後以毛刷或高壓空氣鎗將粉塵及已鬆動的物質去除掉；
- (3) 若補強施工之構件為具有銳利的隅角時，必須將其磨成圓弧 R 角，目的為使應力能夠傳遞，但若補強位置僅為單面時可不需磨成 R 角。

圖 3-11 去除劣化層（砂磨）



• 底漆（Primer）工程



底漆工程係採用工研院所研發生產之 MRL-A2 底漆主劑及 MRL-B2 環氧樹脂硬化劑，主劑：硬化劑配比为 100：35（圖 3-12）。

圖 3-12 上底漆



• CFRP 補強貼覆工程

本研究 CFRP 補強貼覆工程係採用工研院所研發生產之 MRL-A3 積層樹脂主劑及 MRL-B2 環氧樹脂硬化劑，主劑：硬化劑配比为 100：35，貼覆照片如圖 3-13 所示。

圖 3-13 上積層樹脂



• 養護工程

室外施工時為不使雨水、砂、灰塵等附著於貼片上，須使用塑膠布養護。溫度 20°C 時須養護 1 週，溫度 10°C 時須養護 2 週，平均溫度在 20°C 以上，初

期硬化養護時間約 1 天，本研究之試材於台大森林系林產館二樓之調濕室進行養護（圖 3-14）。

圖 3-14 試材之養護







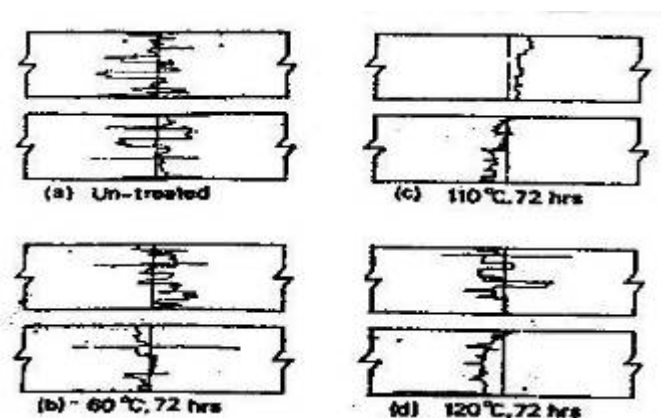
## 第四章 受損木構材 CFRP 彎矩補強實驗結果

在探討實驗結果之前，先將木材靜曲破壞模式以及影響靜曲性質之因子作一回顧，這些前人的經驗足以當作本研究參考的借鏡。

### 第一節 木材靜曲破壞模式

平井信二(1953)是使用以肉眼從試材側面觀察的分類法。ASTM(1980)是將引張面肉眼的破壞模式區分為：與纖維垂直方向成平滑折斷的平滑狀破壞，和將纖維包含在內刺刺的齒狀破壞兩種。前者為脆弱材，後者是為高堅韌木材會出現者，圖 4-1 為靜曲破壞引張側之肉眼破壞型之一例。

圖 4-1 引張面之破壞型



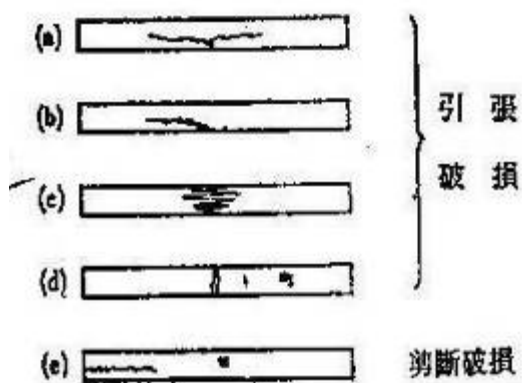
(平井信二，1953)

杉山英男(1971)依木材之易碎性、粘性、木理方向等，而將木材之一般破壞型態，分成圖 4-2 所示的五種型態。當然其中亦有二、三型之破壞會同時發生的。

- (1) 單純引張破壞：此類型破壞是發生在木理通直的乾燥木材；
- (2) 斜走木理引張破壞：此類型破壞是當木梁的引張側存在有斜走木理，螺旋木理時會發生；
- (3) 破裂性引張破壞：此類型破壞會發生在易碎，而且較堅韌的木材；
- (4) 脆性引張破壞：此類型破壞會發生在脆性木材，其會像折斷白粉筆一樣的狀態；

- (5) 剪斷破壞：此類型破壞會在  $l/h$  (跨距與厚度比) 較小之木梁的場合，其會沿著跨距方向作水平剪斷的破壞。

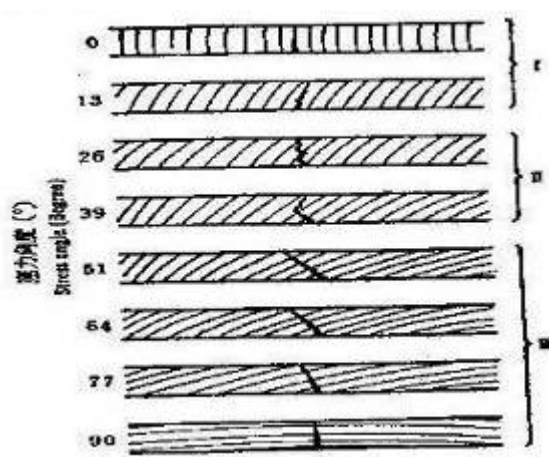
圖 4-2 彎曲材之破壞類型



(杉山英男，1971)

Suzuki 等人 (1979) 將 Ramin 之破壞型態 (如圖 4-3 所示)，依破壞路徑與解剖構造之關係區分為三種：

圖 4-3 RT 面之靜曲破壞路徑



(Suzuki 等人，1979)

- (1) 破壞是向著弦向發展者，即破壞是沿著生長輪成直線狀發展；
- (2) 破壞路徑會表示無秩序線狀者，此係應力度為  $26^\circ$  及  $39^\circ$  試材，其龜裂最初是發生在徑向，然後會獨自的沿著木質線組織方向及生長輪方

向進展；

- (3) 破壞會向著徑向發展者，此係應力度為  $51^\circ$ 、 $64^\circ$ 、 $77^\circ$  及  $90^\circ$  試材，其破壞大部分會沿著徑向發展，隨著應力度之減小，會增加其鋸齒狀的範圍。

## 第二節 影響木材靜曲性質之因素

### 一、木梁之形狀大小

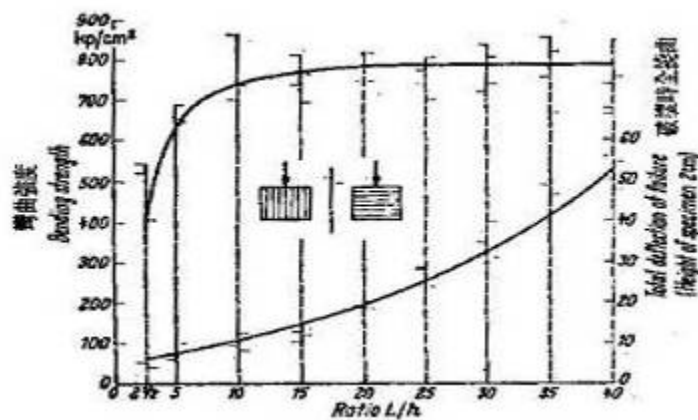
#### (1) 靜曲強度

當在木梁上加以荷重，使發生彎曲力矩時，靜曲強度 ( $\sigma_{bb}$ ) 和最大水平剪力 ( $\tau_b$ ) 之比與  $l/h$  之間有次式關係：

$$\frac{\sigma_{bb}}{\tau_b} = \frac{2l}{h} \quad (4-1)$$

式 (4-1) 中， $l$  為跨距， $h$  為梁厚。由此式可知， $l/h$  愈小時，其  $\sigma_{bb}/\tau_b$  值會愈小。即木梁並非破壞於  $\sigma_{bb}$ ，而是因  $\tau_b$  而引起的破壞。一般因  $\sigma_{bb}$  較  $\tau_b$  為大，因此當  $\tau_b$  所引起破壞，就當作為  $\sigma_{bb}$  破壞。藉式 (4-2) 加以計算時，則其  $\sigma_{bb}$  值會偏小。即當  $l/h$  變小時，木梁之  $\tau_b$  會減低其  $\sigma_{bb}$  值。圖 4-4 表示  $\sigma_{bb}$  和  $l/h$  之關係。當其  $l/h \geq 20$  以上時，其靜曲強度才會成一定值。

圖 4-4  $l/h$  比和靜曲強度之關係



(Kollmann, 1967)

$$\sigma_{bb} = \frac{3pl}{2bh^2} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4-2)$$

當將  $l/h \geq 40$  之長木梁的靜曲性質當作  $\sigma_{bb}$ ，而  $l/h < 40$  之長木梁的靜曲強度為  $\sigma_{bb'}$ ，兩者之關係為：

$$\sigma_{bb'} = \sigma_{bb} \frac{1}{1+h/l} = \sigma_{bb} \frac{l}{l+h} \quad (4-3)$$

Tanaka 指出，靜曲強度的計算式由式 (4-4) 表示

$$\sigma_{bb} = \frac{3pl}{2bh^n} \quad (4-4)$$

依 Tanaka,  $n$  大於或小於 2 是依樹種而定，依多數試驗其  $n$  值是依木材而定。①一級：無缺點木材， $n=11/6 \sim 10/6$ 、②二級：商品木材（構造木材）， $n=10/6 \sim 9/6$ 、③三級：含有多數節之廢材， $n=9/6 \sim 8/6$ 。

## (2) 木構材之撓度

當木材受彎時，其撓度是由兩種型式之撓度所形成者。即，由彎曲力矩和垂直剪力所引起的撓度。由彎曲力矩所引起之撓度以  $\delta_1 = \frac{pl^3}{4bh^3E_b}$  表示，而由垂直剪力所產生的撓度以  $\delta_2 = \frac{3pl}{10Gbh}$  表示，其中  $G$  為剛性係數，因此全撓度  $\delta$  可由式 (4-5) 表示。

$$\delta = \frac{pl^3}{4bh^3E_b} + \frac{3pl}{10Gbh} = \frac{pl^3}{4E_bbh^3} \left[ 1 + 1.2 \frac{E_b}{G} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \right] \quad (4-5)$$

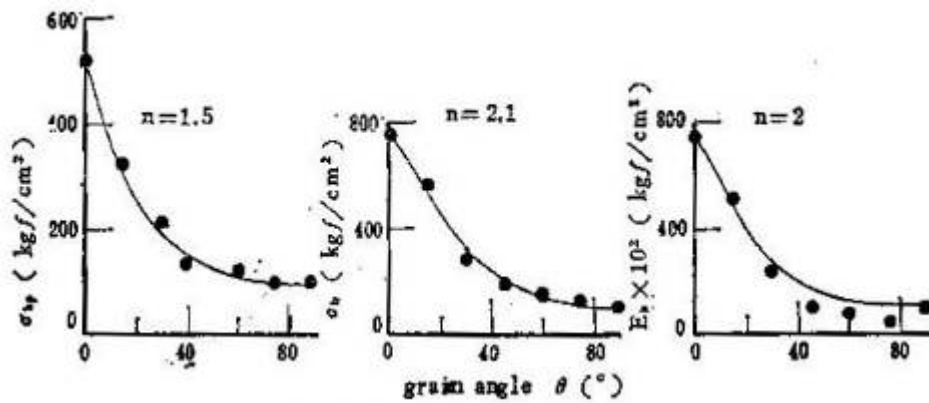
## 二、木理傾斜角

木材靜曲強度是以材軸和木理方向成平行，即木理方向和跨距方向成平行時 ( $\theta = 0^\circ$ ) 為最大，亦即  $\sigma_{//}$  值為最大。而木理方向和跨距方向成垂直時 ( $\theta = 90^\circ$ ) 為最小，即  $\sigma_{\perp}$  值為最小。各種木理傾斜角之木材靜曲強度可以依 Hankinson 之式子表示：

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_{//} \cdot \sigma_{\perp}}{\sigma_{//} \sin^n \theta + \sigma_{\perp} \cos^n \theta} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4-6)$$

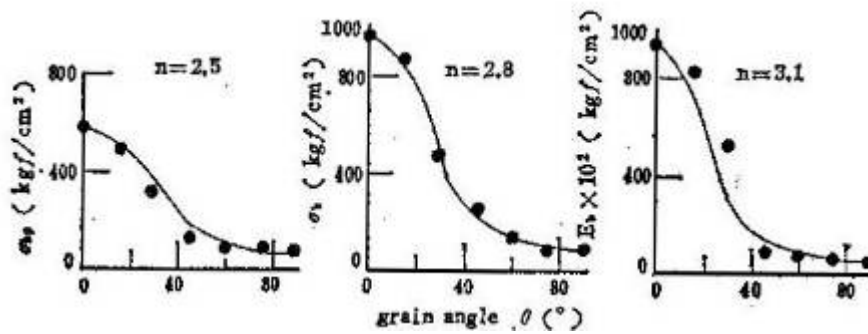
式(4-6)中， $n$  為常數。一般木材之  $n$  值是取 2。根據王松永(1974, 1975, 1983) 對於台灣雲葉及鐵杉所得靜曲強度受木理傾斜角之影響，如圖 4-5、圖 4-6 以及表 4-1 所示。可以看出木理傾斜角和靜曲強度性質間的關係亦可以式(4-6) 表示。

圖 4-5 台灣雲葉之木理傾斜角 ( $\theta$ ) 與靜曲強度值 ( $\sigma_{bp}, \sigma_b, E_b$ ) 之關係



(王松永，1974、1975、1983)

圖 4-6 鐵杉材之木理傾斜角 ( $\theta$ ) 與靜曲強度值 ( $\sigma_{bp}, \sigma_b, E_b$ ) 之關係



(王松永，1974、1975、1983)

表 4-1 各木理傾斜角試材之靜曲強度的實測值與推算值

樹種	木理傾斜角 $\theta^\circ$	$\sigma_{bp}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )		$\sigma_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> )		$E_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	
		實測值	推算值	實測值	推算值	實測值	推算值
台灣雲葉樹	0	516.6	516.6	756.8	756.8	74620	74620
	15	325.5	318.1	566.7	556.9	52250	49670
	30	210.0	197.3	284.7	308.9	24220	25960
	45	134.4	141.9	191.0	188.1	8840	15710
	60	113.0	115.2	146.8	133.0	6890	11260
	75	98.7	103.4	109.1	110.1	4130	9330
	90	100.8	100.8	103.0	103.2	8780	8780
鐵杉	0	567.0	567.0	974.9	974.9	93920	93920
	15	483.0	494.3	872.2	853.0	82170	76710
	30	321.0	299.8	485.8	452.2	51670	29790
	45	121.8	174.0	148.4	226.5	8280	12200
	60	96.6	116.0	116.2	137.9	5640	6750
	75	84.0	91.0	91.0	103.7	3720	4850
	90	84.0	84.0	94.1	94.1	4360	4360

(王松永，1974、1975、1983)

在針葉樹材其春材和秋材的比重有顯著的差異。當然其對外力的抵抗亦會有不同。松材之春材彈性模數  $E_b$  約為 75,000 kgf/cm<sup>2</sup>，而秋材之  $E_b$  約為 300,000 kgf/cm<sup>2</sup> 時，則徑切面和弦切面之靜曲外力抵抗是應該會不相同的。但實際上，是無明顯差異。就日本木曾產日本扁柏的徑切面彎曲（荷重為徑切面），弦切面彎曲（荷重面為弦切面）所得結果，則如表 4-2 所示。

表 4-2 木曾產日本扁柏的徑切面與弦切面彎曲比較

彎曲方向	$\sigma_{bb}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_b$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
徑切面	679	74,500
弦切面	632	69,700

(王松永，1974、1975、1983)

### 三、木材比重

依春秋材之密度與其靜曲強度之關係可得次式：

$$\sigma_{bb2} = \frac{1}{\rho_{l1} - \rho_{e1}} [(\sigma_{bbe2} \cdot \rho_{l1} - \sigma_{bb12} \cdot \rho_{e1}) + (\sigma_{bb11} - \sigma_{bbe2})\rho_1] \quad (4-7)$$

式(4-7)中 $\sigma_{bb2}$ 為木材在含水率 $u_2$ 時之破壞係數。 $\sigma_{bbe2}$ 為春材在含水率 $u_2$ 時之破壞係數。 $\sigma_{bb12}$ 為秋材在含水率 $u_2$ 時之破壞係數。 $\rho_1$ 為木材在 $u_1$ 含水率時的密度， $\rho_{e1}$ 為 $u_1$ 含水率時春材之密度， $\rho_{l1}$ 為 $u_1$ 含水率時秋材之密度，由此可知，木材靜曲強度會隨其秋材率增加而呈直線狀的增大。

木材比重與其靜曲強度間，可當作比例關係加以考慮。即可以用 $\sigma_{bb} = b\gamma$ 之形式表示。 $b$ 值是依樹種以及含水率而異。一般氣乾材之平均值 $b=2900$ 。王松永(1976)對於25種南洋材之氣乾材，氣乾比重為0.35~1.05之間，得到比重( $\gamma_u$ )和靜曲強度之間有次述之直線迴歸式關係：

$$\sigma_{bp} = 1204.1\gamma_u - 152.2 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4-8)$$

$$\sigma_{bp} = 1204.1\gamma_u - 152.2 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4-9)$$

$$\tau_b = 69.3\gamma_u - 6.3 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4-10)$$

$$E_b = 182308.2\gamma_u - 84.8 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (4-11)$$

### 四、木材含水率

在纖維飽和點以內，木材靜曲強度會隨含水率增加而減低，而在纖維飽和點以上時會成一定。含水率由5%至纖維飽和點為止可以直線式或二次式關係表示之。在含水率5%以下，3~5%時，其靜曲強度會表示最大值。

木材含水率每增減1%會使其靜曲強度減增的百分率會依強度種類而異。概算時是靜曲強度( $\sigma_{bb}$ )為4%，靜曲比例限度纖維應力( $\sigma_{bp}$ )為5%，靜曲彈性係數( $E_b$ )為2%，比例限度為止靜曲功為8%，破壞為止靜曲功為0.5%。 $E_b$ 和含水率( $u$ )之間可以次式表示：

$$E_b = 122000 - 1090u \quad (4-12)$$



上式為北韓產松材， $\gamma_0 = 0.39 \sim 0.42$ ， $u = 0 \sim 30\%$ 之範圍。

## 五、木材溫度

木材之溫度對於靜曲性質強度之影響已是眾所週知的。通常強度會隨溫度增高而減低。Kollmann (1967) 研究發現溫度對不同比重及含水率的松材靜曲強度的影響，所得結果：

- (1) 木材靜曲強度會隨溫度的增加及比重的減低而減低；
- (2) 靜曲強度在  $0^\circ\text{C}$  以上時，會隨含水率的增加而減低；
- (3) 靜曲彈性係數會隨溫度及含水率的減低，比重之增加而增大；
- (4) 最大破壞變形會發生在  $0^\circ\text{C}$ ，因此破壞荷重功亦在  $0^\circ\text{C}$  時會達最大。

## 六、蒸煮加熱處理

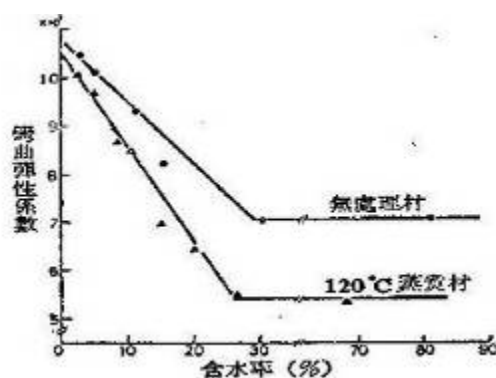
蒸煮材於乾燥後，其強度是否會較無處理材為小，此是極為重要的問題。寺澤真 (1974) 就含水率 7~10% 之古魯音 (Keruing) 無處理材，試驗時比重為 0.66，試體大小為  $2 \times 2 \times 25 \text{ cm}^3$ ，跨距為 20 cm，進行木理平行方向之靜曲試驗，得知隨蒸煮溫度增高，其靜曲強度會增大，但在蒸煮處理 4 小時者，是以  $120^\circ\text{C}$  為最大後會再次下降。古魯音 (Keruing) 蒸煮材是收縮率會增大，比重會增大。因此當將靜曲強度除以比重，而以比強度 ( $\sigma_{bb}/\gamma$ ) 表示時，則蒸煮溫度或時間之影響會更顯著。蒸煮溫度是以  $100 \sim 120^\circ\text{C}$  時對於無處理材之增加比率為最高，其最大為 1.2。

以往對於加熱和強度之關係的研究，加熱處理和強度試驗時均使含水率在同一狀態下加以比較者，於是含水率高時，處理材之強度是較無處理材為低 (Kubinsky, 1971)，但當將含水率材加熱處理，其後再乾燥時，其強度是較無處理材為高。

圖 4-7 是表示木理垂直方向之靜曲彈性係數和含水率之關係。就 Apitong 蒸煮材與無處理材加以比較者，蒸煮材是在  $120^\circ\text{C}$  以下，處理 1.5 小時者。試體是分為生材，及蒸煮後即刻取出，製成  $1 \text{ cm (L)} \times 1 \text{ cm (R)} \times 14 \text{ cm (T)}$

之試體，再緩慢的邊乾燥邊選出 6~8 個適當含水率之試體，再由木口面加上荷重，以求出其變形量，從該時之斷面尺寸求出彈性係數者，其跨距為 10 cm 試體之絕乾比重在無處理材為 0.69，蒸煮材為 0.7 程度，兩者差異不大，比強度之關係亦和圖 4-2.4 相似。可看出隨含水率減低而引起彈性係數之上昇率在蒸煮材是較無處理材為大，即使至低含水率為止亦不能達一致。

圖 4-7 靜曲彈性係數之變化和含水率之關係荷重木口面，Apitong 材



至一定溫度為止蒸煮乾燥後木材強度之上昇或高溫長時間蒸剪所引起強度之減低，是可以利用加熱引起木材結晶領域之增加以及纖維素等受熱所引起崩壞現象來加以說明。含水率之減低引起蒸煮材強度之增加只考慮為收縮增大所引起比重之增加，不如考慮為加熱所引起變化之細胞壁構造是在結合水損失過程中，其會與無處理材表示不同舉動有關。

所以，比較強度時是依含水率或蒸煮時間以及溫度等之不同，蒸煮材和無處理材之強度比會不同。細胞構造及化學成分不同之闊葉樹與針葉樹材，又木理垂直方向與平行方向之加熱處理之結果是不同的。針葉樹材是較闊葉樹材，又木理平行方向是較其垂直方向不容易受到加熱處理之影響。

## 七、木材的節

木材靜曲時，缺點對其強度的影響程度，是當該缺點存在於引張側時，會較存在於壓縮側者為大。節對強度之影響亦相當大，而生節有時存在於壓

縮側反而會增大其強度。

當一個節從一個側面貫通側另一側時，梁之厚度 ( $h$ ) 與節之直徑 ( $d$ ) 之比，即  $d/h$  和靜曲強度 ( $\sigma_{bb}$ ) 之關係如表 4-3 所示。而荷重點至節為止的距離 ( $S$ ) 及靜曲強度 ( $\sigma_{bb}$ ) 之關係如表 4-4 所示。

表 4-3  $d/h$  和靜曲強度 ( $\sigma_{bb}$ ) 之關係

$d/h$	靜曲強度 $\sigma_{bb}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$d/h$ 每增加 0.01 時 $\sigma_{bb}$ 相對的減少率%
0	622	—
0.12	606	1.33
0.28	579	2.45
0.39	464	8.44

表 4-4 荷重點至節為止的距離 ( $S$ ) 及靜曲強度 ( $\sigma_{bb}$ ) 之關係

$S$ (cm)	$d/h$	$\sigma_{bb}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	對無節材的百分率%
無節材	—	622	100.0
0	0.17	553	88.9
0.1~10.0	0.21	594	95.5
10.1~20.0	0.15	598	96.1
20.1~30.0	0.29	569	91.5
30.1~40.0	0.19	599	96.3
40.1~50.0	0.23	644	103.5

## 八、荷重速度

荷重速度對木材靜曲強度的影響可以  $P = A - B \cdot \log t$  表示。 $P$  為強度對標準荷重速度或荷重時間的比， $t$  為至破壞為止的時間， $A$  及  $B$  各為常數。靜曲強度之場合， $A=120.7\sim 124.0$ ， $B=7.56\sim 8.75$ 。又含水率為 6~12% 之花旗松 (Douglas-fir) 有次述之實驗式關係。

$$P = \frac{18.4}{x^{0.4635}} + 183 \quad (4-13)$$

式 (4-13) 中  $x$  為外力的作用時間。

### 第三節 彎矩補強測試結果

#### 一、木材物理性質量測

彎矩補強測試前先針對各組試材（圖 4-8 與表 3-4 為各組試材之對照組）之含水率、密度以及外觀進行量測以及記錄（儀器設備如圖 4-9 與圖 4-10 所示），其中 B-A 組密度介於  $0.31\sim 0.54\text{ g/cm}^3$ ，平均密度為  $0.39\text{ g/cm}^3$ ，平均含水率為 14.7%；其中 B-B 組密度介於  $0.29\sim 0.56\text{ g/cm}^3$ ，平均密度為  $0.42\text{ g/cm}^3$ ，平均含水率為 14.3%；其中 B-C 組密度介於  $0.30\sim 0.52\text{ g/cm}^3$ ，平均密度為  $0.40\text{ g/cm}^3$ ，平均含水率為 13.8%；其中 B-D 組密度介於  $0.35\sim 0.48\text{ g/cm}^3$ ，平均密度為  $0.42\text{ g/cm}^3$ ，平均含水率為 13.9%；其中 B-E 組密度介於  $0.32\sim 0.48\text{ g/cm}^3$ ，平均密度為  $0.40\text{ g/cm}^3$ ，平均含水率為 11.1%，各組試材之平均含水率值以及密度如表 4-5 與表 4-6 所示。

表 4-5 B-A、B-B 與 B-C 組試材平均含水率以及密度

	B-A		B-B		B-C	
	平均含水率 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	平均含水率 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	平均含水率 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
0-1	12.1	0.35	11.3	0.29	10.6	0.30
0-2	16.0	0.31	15.4	0.48	11.8	0.34
0-3	13.0	0.33	10.7	0.33	11.4	0.35
0-4	11.9	0.36	13.6	0.36	10.4	0.36
0-5	12.1	0.34	11.2	0.33	12.3	0.36
1-1	14.3	0.35	12.6	0.39	13.5	0.37
1-2	14.8	0.35	12.1	0.36	10.7	0.37
1-3	13.1	0.36	11.0	0.37	14.2	0.37
1-4	14.5	0.36	12.6	0.38	11.0	0.38
1-5	11.4	0.36	11.7	0.39	14.8	0.38
2-1	13.5	0.37	12.3	0.39	13.5	0.39
2-2	12.7	0.36	11.6	0.40	14.8	0.39
2-3	13.3	0.36	12.4	0.40	16.2	0.39
2-4	12.7	0.38	16.9	0.47	14.3	0.41
2-5	15.6	0.36	15.6	0.50	12.5	0.41
3-1	18.6	0.48	17.1	0.52	11.4	0.42
3-2	14.4	0.41	16.5	0.53	12.2	0.47
3-3	20.6	0.50	20.5	0.52	23.8	0.50
3-4	17.9	0.54	17.3	0.56	16.2	0.52
3-5	21.7	0.53	23.2	0.53	20.0	0.52
平均值 (m/s)	14.7	0.39	14.3	0.42	13.8	0.40
變異係數 (%)	19.8	17.3	24.0	19.3	24.3	14.9

表 4-6 B-D 與 B-E 組試材平均含水率以及密度

	B-D		B-E	
	平均含水率 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	平均含水率 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
0-1	10.2	0.35	9.9	0.36
0-2	10.4	0.39	10.4	0.32
0-3	11.8	0.39	9.8	0.35
0-4	13.5	0.37	9.6	0.35
0-5	13.5	0.36	10.4	0.36
1-1	14.2	0.43	10.1	0.39
1-2	11.5	0.41	10.0	0.39
1-3	14.3	0.40	10.1	0.38
1-4	15.1	0.40	9.7	0.38
1-5	12.9	0.40	10.6	0.37
2-1	14.4	0.43	11.3	0.42
2-2	15.5	0.44	10.9	0.43
2-3	14.4	0.44	10.7	0.42
2-4	15.6	0.43	9.8	0.41
2-5	14.2	0.43	12.2	0.41
3-1	15.1	0.48	12.3	0.45
3-2	14.7	0.46	13.5	0.45
3-3	16.3	0.46	13.0	0.44
3-4	15.1	0.45	13.6	0.48
3-5	15.4	0.44	14.1	0.46
平均值 (m/s)	13.9	0.42	11.1	0.40
變異係 數 (%)	12.4	8.4	13.2	10.7

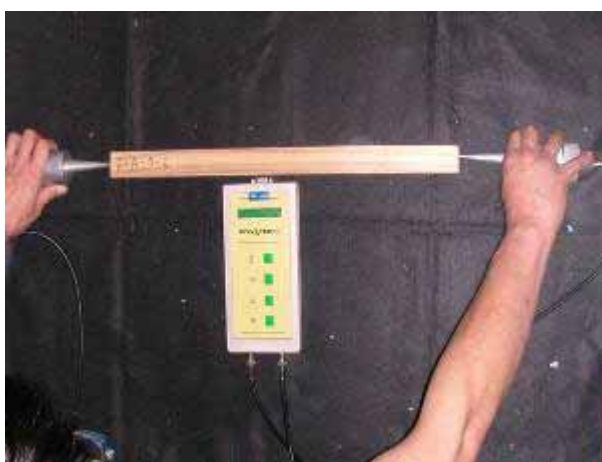
圖 4-8 各組試材之對照組 (下圖由左至右分別為 B-A、B-B、B-C、B-D 以及 B-E)



圖 4-9 超音波檢測儀 (Sylvatest Duo)



圖 4-10 超音波檢測儀 (Sylvatest Duo) 檢測現況圖



彎矩補強各組試材尺寸為長×寬×高等於 48×3×3 cm，根據 CNS454 木材靜曲試驗法進行三點抗彎測試結果如次所述：

### 二、B-A 組彎矩補強實驗測試結果

B-A 組三點抗彎測試（現況圖如圖 4-11）後，B-A-0 組試材之極限載重介於 167.00~208.00 kgf，平均值為 187.75 kgf，極限載重所對應之位移介於 8.47~14.35 mm，平均值為 12.20 mm；B-A-1 組試材之極限載重介於 207.00~253.00 kgf，平均值為 236.20 kgf，極限載重所對應之位移介於 12.21~23.99 mm，平均值為 18.32 mm；B-A-2 組試材之極限載重介於 236.00~284.00 kgf，平均值為 264.40 kgf，極限載重所對應之位移介於 16.68~25.89 mm，平均值為 20.81 mm；B-A-3 組試材之極限載重介於 318.00~376.00 kgf，平均值為 349.64 kgf，極限載重所對應之位移介於 19.25~24.57 mm，平均值為 21.55 mm。

實驗數據分析結果發現試材張力側平貼 1~3 層 CFRP 補強組與對照組相較之下，其極限載重分別提昇（減少）25.81%、40.83%以及 86.23%，極限位移則分別提昇（減少）50.16%、70.57%以及 76.64%。

B-A 組各組試材之彎矩補強極限載重與極限位移提昇（減少）比較圖表、試材靜曲破壞模式以及平均載重-位移曲線圖如表 4-7 以及圖 4-12~圖 4-18 所示。



圖 4-11 B-A 組試材現況圖 (由左至右分別為對照組、1 層 CFRP、2 層 CFRP 與 3 層 CFRP)

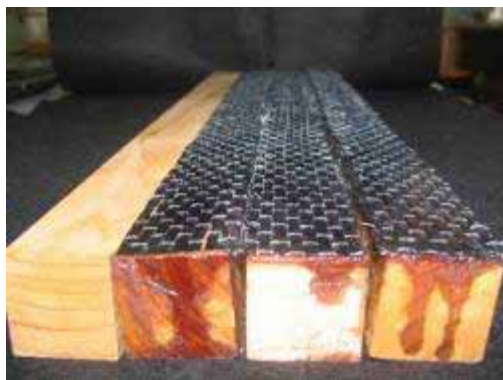


圖 4-12 B-A-0 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-13 B-A-1 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-14 B-A-2 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-15 B-A-3 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



表 4-7 B-A 組三點抗彎測試結果以及補強提昇效能

組別	Pu (kgf)	COV (%)	PuP (%)	PuV (kgf)	Du (mm)	COV (%)	DuP (%)	DuV (mm)
B-A-0	187.75	12.2	—	—	12.20	21.7	—	—
B-A-1	236.20	7.6	25.81	48.45	18.32	29.9	50.16	6.12
B-A-2	264.40	7.2	40.83	76.65	20.81	17.5	70.57	8.61
B-A-3	349.64	6.0	86.23	161.89	21.55	9.5	76.64	9.35

上表符號【Pu】代表極限載重平均值；【COV】代表變異係數；【PuP】代表極限載重增加（減少）百分比；【PuV】表極限載重增加量；【Du】代表極限位移平均值；【DuP】代表極限位移增加（減少）百分比；【DuV】代表極限位移增加量。

圖 4-16 B-A 組極限載重提昇（減少）效能比較圖

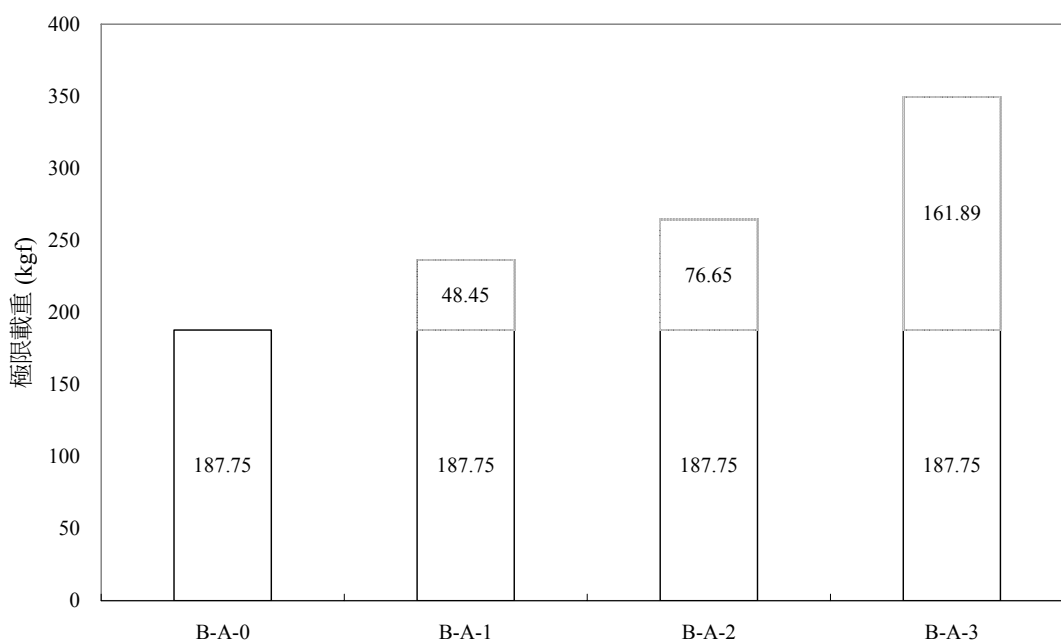


圖 4-17 B-A 組極限位移提昇 (減少) 效能比較圖

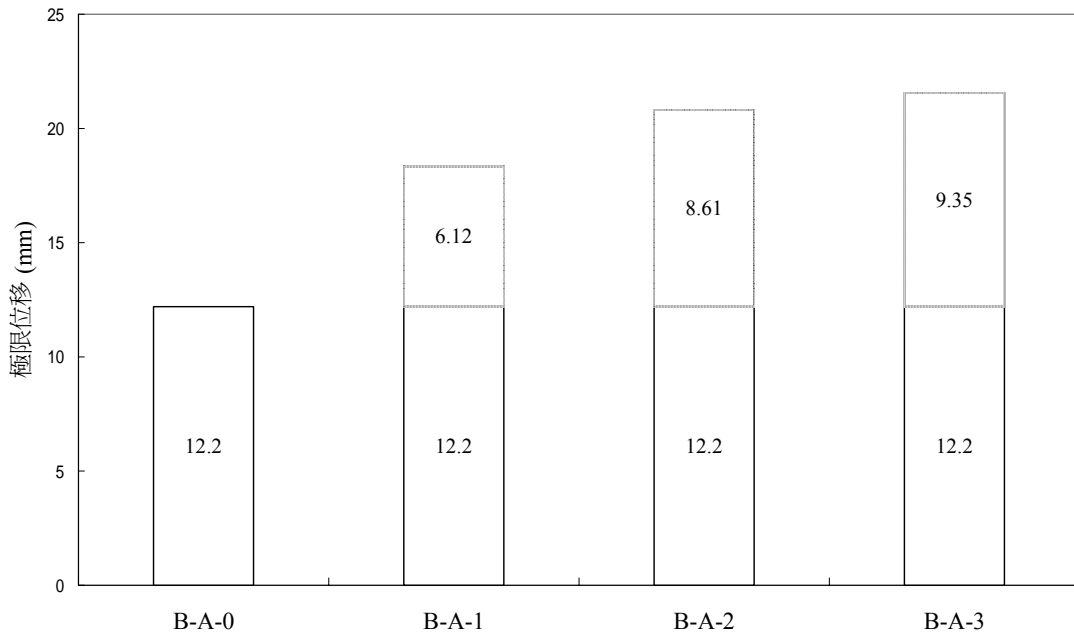
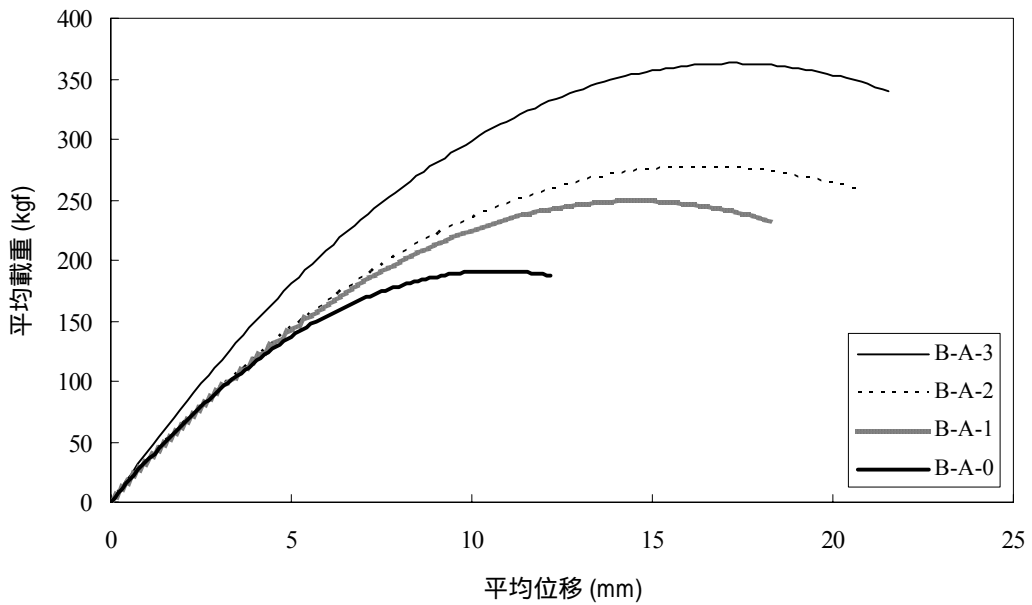


圖 4-18 B-A 組平均載重-位移曲線圖



### 三、 B-B 組彎矩補強實驗測試結果

B-B 組三點抗彎測試(現況圖如圖 4-19)後，B-B-0 組試材之極限載重介於 120.00~197.00 kgf，平均值為 148.20 kgf，極限載重所對應之位移介於 7.07~17.37 mm，平均值為 11.77 mm；B-B-1 組試材之極限載重介於 212.00~266.00 kgf，平均值為 248.00 kgf，極限載重所對應之位移介於 14.9~18.40 mm，平均值為 16.74 mm；B-B-2 組試材之極限載重介於 218.00~265.00 kgf，平均值為 246.20 kgf，極限載重所對應之位移介於 12.09~16.84 mm，平均值為 14.75 mm；B-B-3 組試材之極限載重介於 218.00~295.00 kgf，平均值為 263.00 kgf，極限載重所對應之位移介於 12.00~15.35 mm，平均值為 13.97 mm。

實驗數據分析結果發現試材張力側平貼 1~3 層 CFRP 補強組與對照組相較之下(該組試材鑽孔孔徑為 1.2 cm，斷面面積損失百分比為 13%)，其極限載重分別提昇(減少) 67.34%、66.13%以及 77.46%，極限位移則分別提昇(減少) 42.23%、25.32%以及 18.69%。

B-B 組各組試材之彎矩補強極限載重與極限位移提昇(減少)比較圖表、試材靜曲破壞模式以及平均載重-位移曲線圖如表 4-8 以及圖 4-20~圖 4-26 所示。

圖 4-19 B-B 組試材現況圖(由左至右分別為對照組、1 層 CFRP、2 層 CFRP 與 3 層 CFRP)



圖 4-20 B-B-0 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-21 B-B-1 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-22 B-B-2 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-23 B-B-3 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



表 4-8 B-B 組三點抗彎測試結果以及補強提昇效能

組別	Pu (kgf)	COV (%)	PuP (%)	PuV (kgf)	Du (mm)	COV (%)	DuP (%)	DuV mm
B-B-0	148.20	20.5	—	—	11.77	32.7	—	—
B-B-1	248.00	10.0	67.34	99.8	16.74	10.3	42.23	4.97
B-B-2	246.20	7.6	66.13	98	14.75	13.5	25.32	2.98
B-B-3	263.00	11.7	77.46	114.8	13.97	9.1	18.69	2.2

圖 4-24 B-B 組極限載重提昇 (減少) 效能比較圖

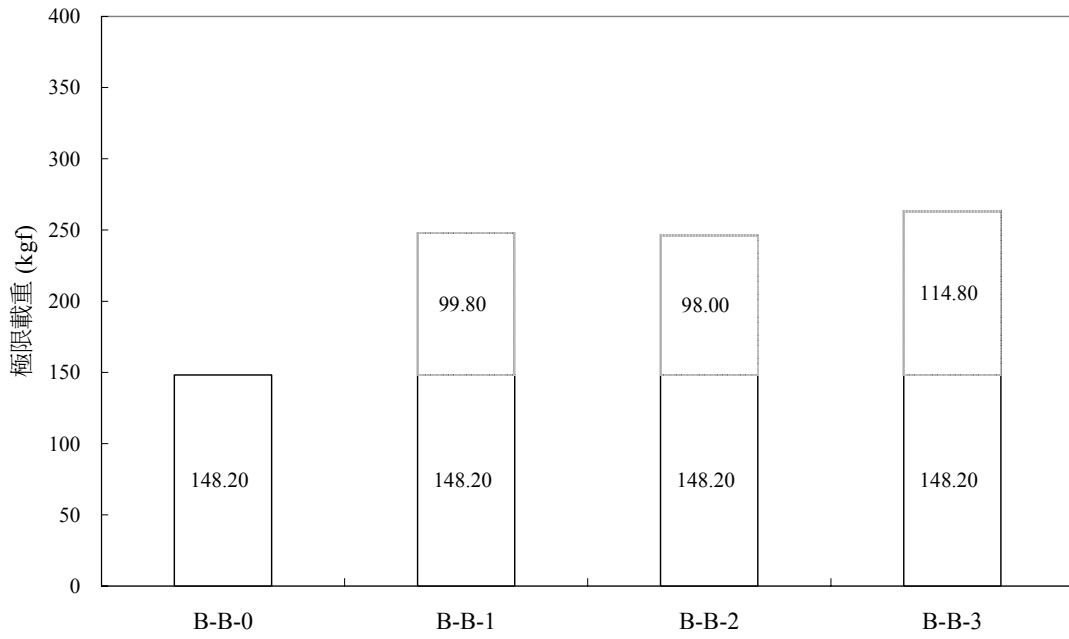


圖 4-25 B-B 組極限位移提昇 (減少) 效能比較圖

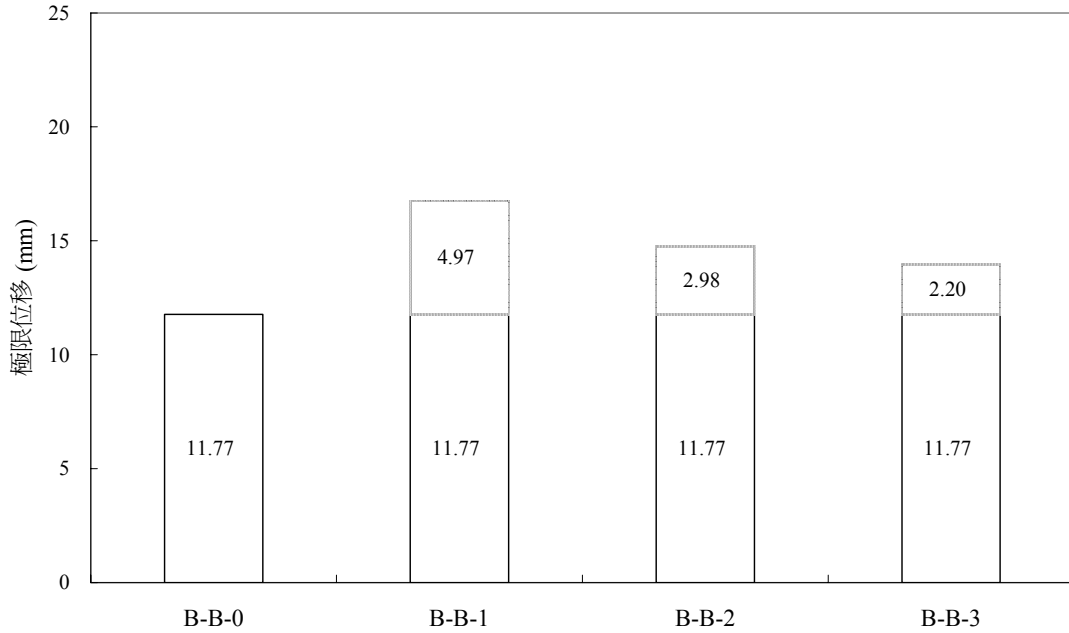
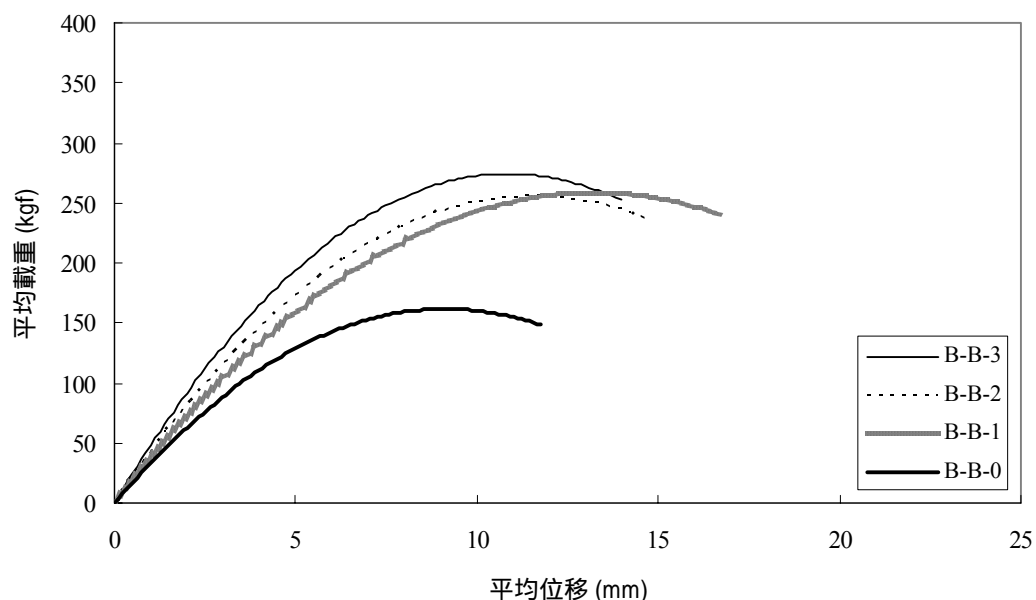




圖 4-26 B-B 組平均載重-位移曲線圖



#### 四、 B-C 組彎矩補強實驗測試結果

B-C 組三點抗彎測試（現況圖如圖 4-27）後，B-C-0 組試材之極限載重介於 154.60~186.40 kgf，平均值為 171.85 kgf，極限載重所對應之位移介於 10.71~15.09 mm，平均值為 12.44 mm；B-C-1 組試材之極限載重介於 171.80~219.60 kgf，平均值為 204.64 kgf，極限載重所對應之位移介於 13.16~18.70 mm，平均值為 15.12 mm；B-C-2 組試材之極限載重介於 177.20~243.00 kgf，平均值為 206.12 kgf，極限載重所對應之位移介於 10.66~15.66 mm，平均值為 13.51mm；B-C-3 組試材之極限載重介於 234.20~337.80 kgf，平均值為 276.60 kgf，極限載重所對應之位移介於 14.58~16.62 mm，平均值為 15.26 mm。

實驗數據分析結果發現試材張力側平貼 1~3 層 CFRP 補強組與對照組相較之下（該組試材鑽孔孔徑為 1.5 cm，斷面面積損失百分比為 20%），其極限載重分別提昇（減少）19.08 %、19.94 %以及 60.95 %，極限位移則分別提昇（減少）21.54 %、8.60 %以及 22.67 %。

B-C 組各組試材之彎矩補強極限載重與極限位移提昇(減少)比較圖表、試材靜曲破壞模式以及平均載重-位移曲線圖如表 4-9 以及圖 4-28~圖 4-34 所示。

圖 4-27 B-C 組試材現況圖 (由左至右分別為對照組、1 層 CFRP、2 層 CFRP 與 3 層 CFRP)



圖 4-28 B-C-0 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-29 B-C-1 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-30 B-C-2 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-31 B-C-3 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



表 4-9 B-C 組三點抗彎測試結果以及補強提昇效能

組別	Pu (kgf)	COV (%)	PuP (%)	PuV (kgf)	Du (mm)	COV (%)	DuP (%)	DuV mm
B-C-0	171.85	8.3	—	—	12.44	15.2	—	—
B-C-1	204.64	9.5	19.08	32.79	15.12	13.9	21.54	2.68
B-C-2	206.12	13.8	19.94	34.27	13.51	15.3	8.60	1.07
B-C-3	276.60	14.4	60.95	104.75	15.26	5.2	22.67	2.82

圖 4-32 B-C 組極限載重提昇（減少）效能比較圖

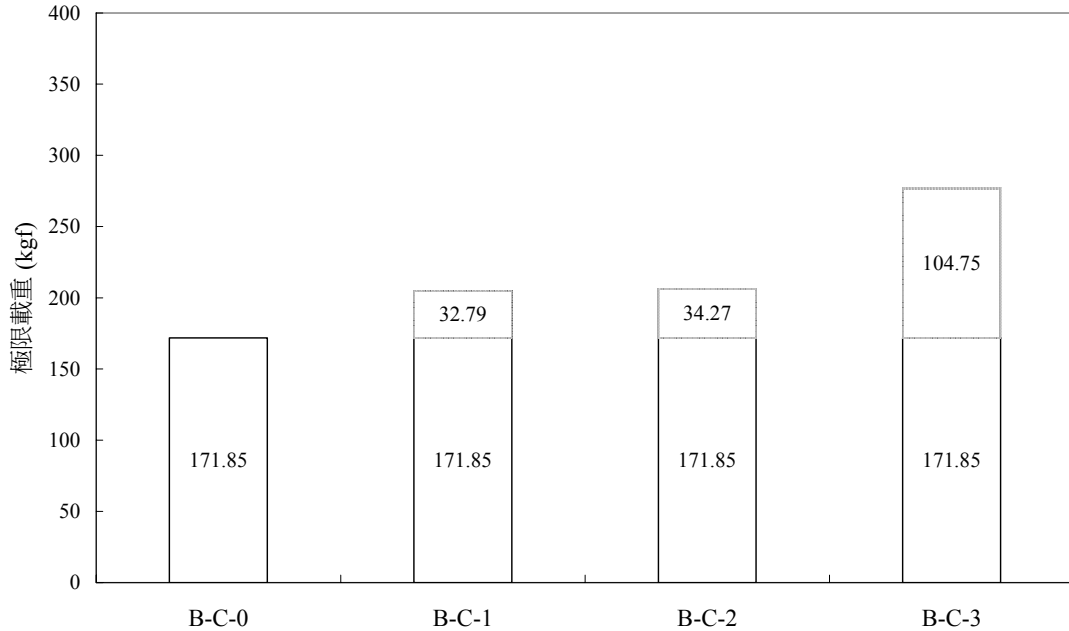


圖 4-33 B-C 組極限位移提昇（減少）效能比較圖

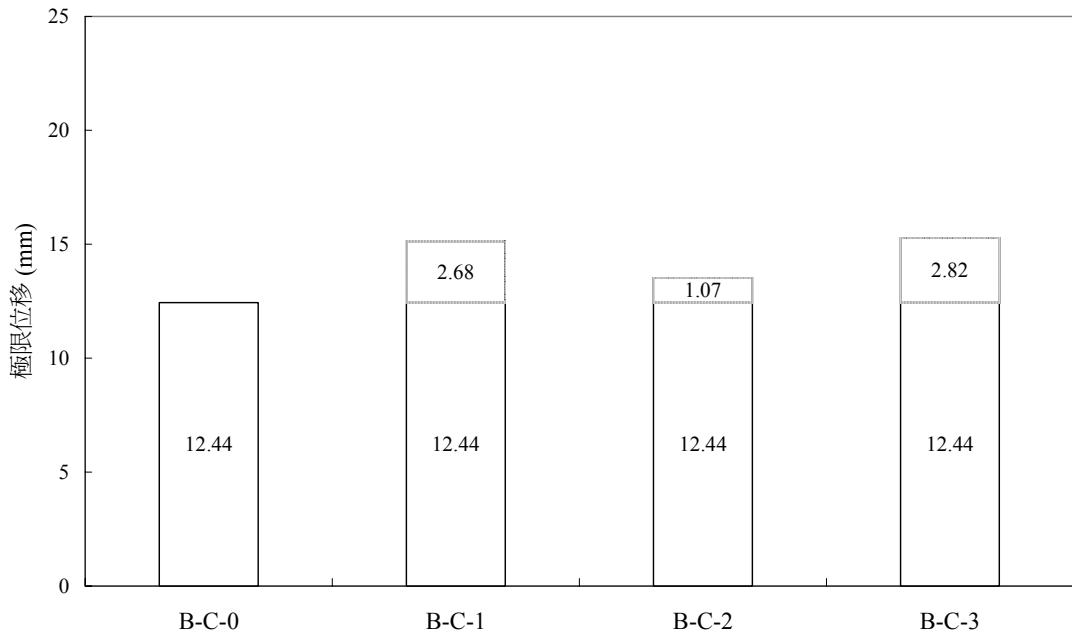
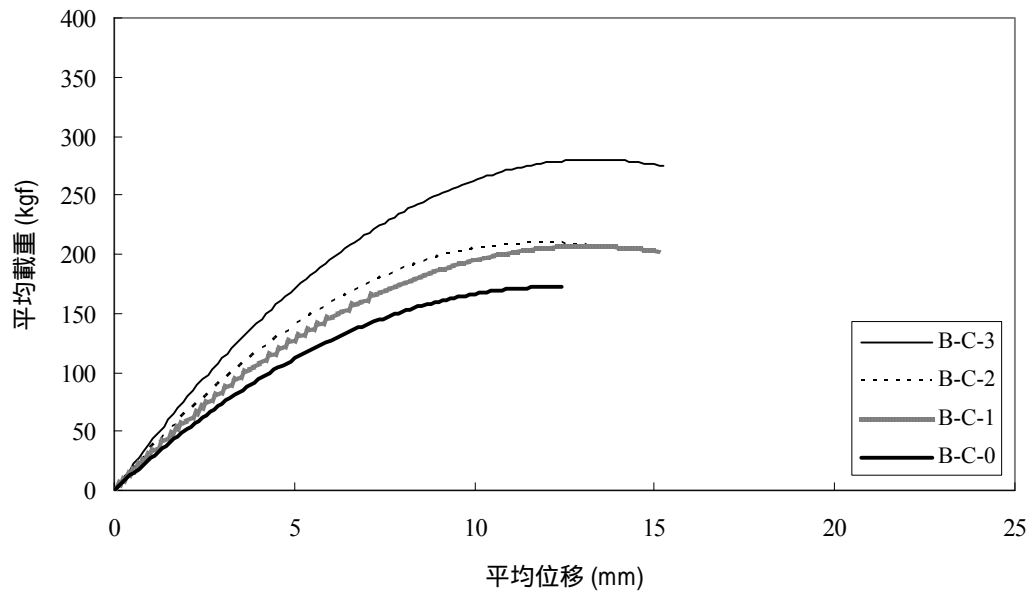


圖 4-34 B-C 組平均載重-位移曲線圖



### 五、 B-D 組彎矩補強實驗測試結果

B-D 組三點抗彎測試（現況圖如圖 4-35）後，B-D-0 組試材之極限載重介於 132.6~179.4 kgf，平均值為 151.68 kgf，極限載重所對應之位移介於 8.94~14.80 mm，平均值為 11.59 mm；B-D-1 組試材之極限載重介於 159.60~186.80 kgf，平均值為 173.88 kgf，極限載重所對應之位移介於 11.77~16.82 mm，平均值為 14.16 mm；B-D-2 組試材之極限載重介於 165.00~210.00 kgf，平均值為 182.88 kgf，極限載重所對應之位移介於 12.18~15.60 mm，平均值為 14.18 mm；B-D-3 組試材之極限載重介於 184.20~235.00 kgf，平均值為 208.96 kgf，極限載重所對應之位移介於 11.04~14.38 mm，平均值為 12.77 mm。

實驗數據分析結果發現試材張力側平貼 1~3 層 CFRP 補強組與對照組相較之下（該組試材鑽孔孔徑為 1.8 cm，斷面面積損失百分比為 28 %），其極限載重分別提昇（減少）14.64 %、20.57 %以及 37.76 %，極限位移則分別提昇（減少）22.17 %、22.35 %以及 10.18 %。

B-D 組各組試材之彎矩補強極限載重強度與極限位移提昇（減少）比較圖表、試材靜曲破壞模式以及平均載重-位移曲線圖如表 4-10 以及圖 4-36~圖 4-42 所示。

圖 4-35 B-D 組試材現況圖（由左至右分別為對照組、1 層 CFRP、2 層 CFRP 與 3 層 CFRP）



圖 4-36 B-D-0 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-37 B-D-1 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-38 B-D-2 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-39 B-D-3 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



表 4-10 B-D 組三點抗彎測試結果以及補強提昇效能

組別	Pu (kgf)	COV (%)	PuP (%)	PuV (kgf)	Du (mm)	COV (%)	DuP (%)	DuV mm
B-D-0	151.68	12.0	—	—	11.59	19.1	—	—
B-D-1	173.88	6.7	14.64	22.2	14.16	14.5	22.17	2.57
B-D-2	182.88	9.2	20.57	31.2	14.18	9.2	22.35	2.59
B-D-3	208.96	8.9	37.76	57.28	12.77	10.0	10.18	1.18



圖 4-40 B-D 組極限載重提昇 (減少) 效能比較圖

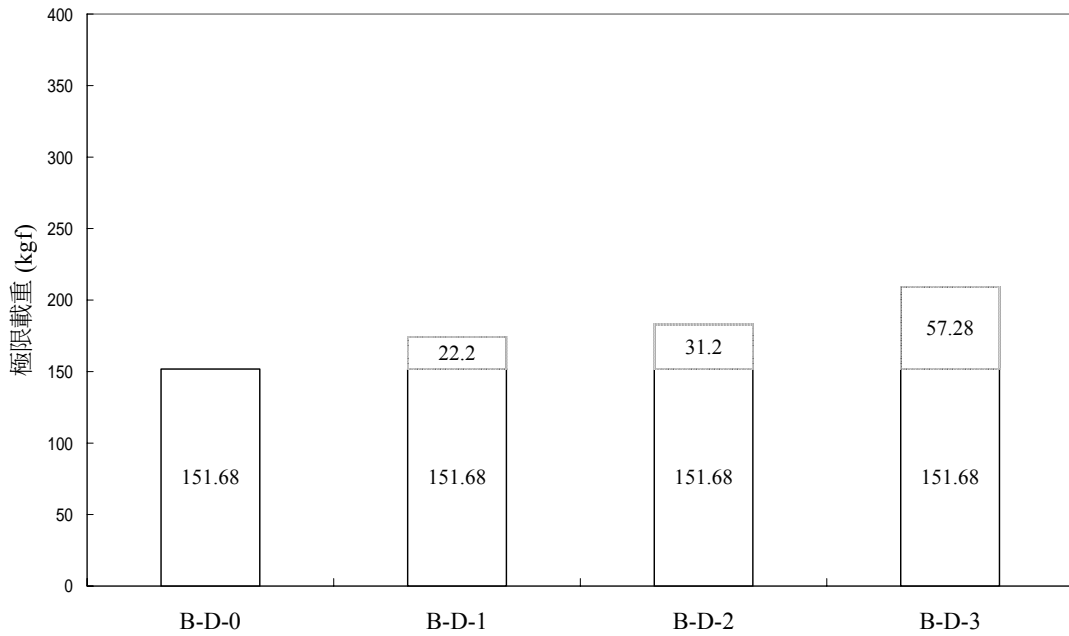


圖 4-41 B-D 組極限位移提昇 (減少) 效能比較圖

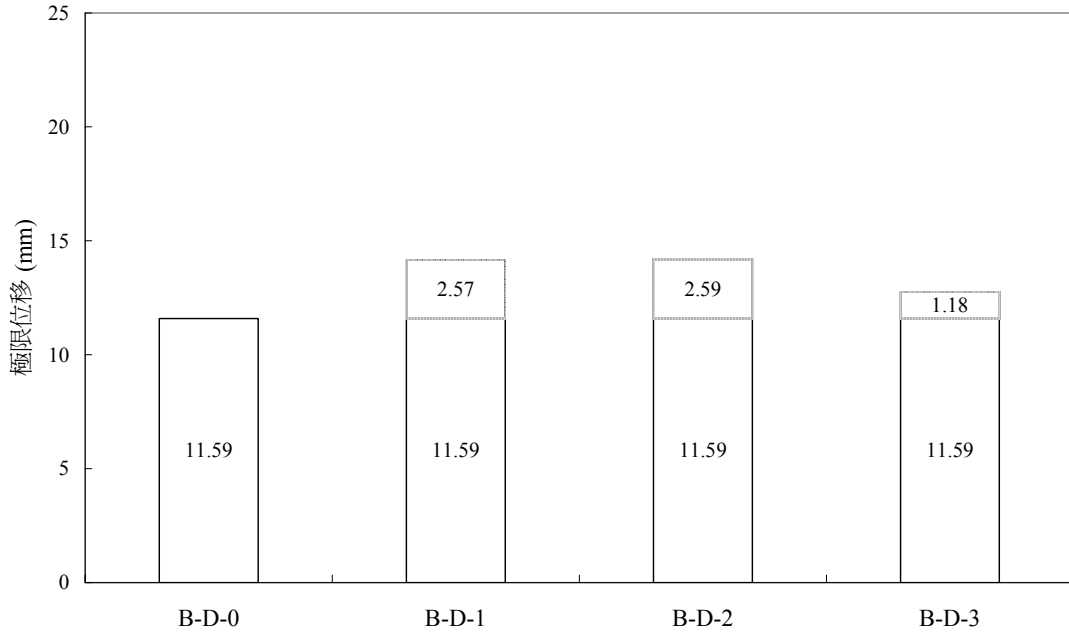
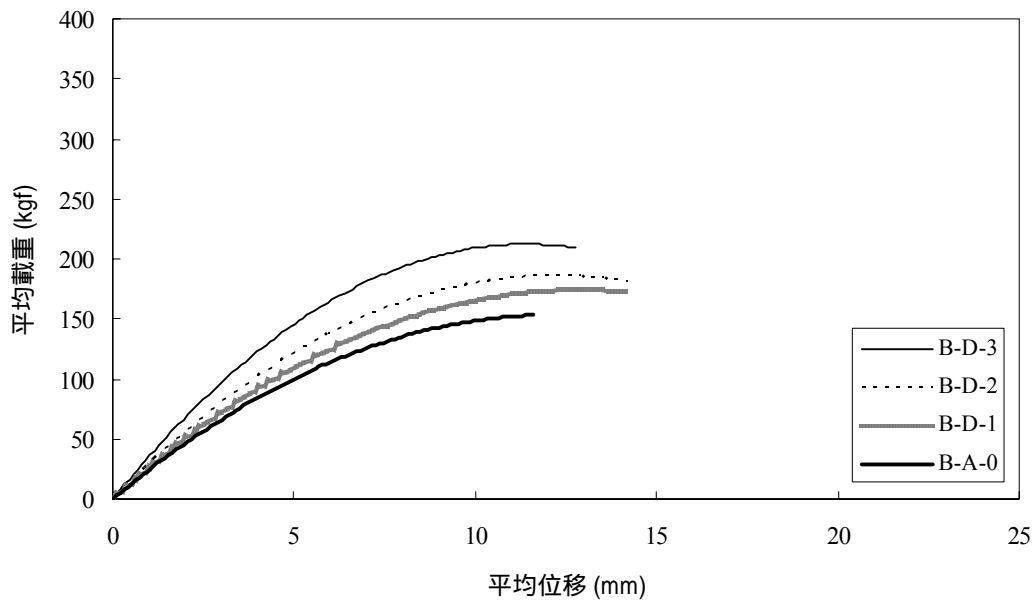


圖 4-42 B-D 組平均載重-位移曲線圖



#### 六、B-E 組彎矩補強實驗測試結果

B-E 組三點抗彎測試（現況圖如圖 4-43）後，B-E-0 組試材之極限載重介於 108.60~145.00 kgf，平均值為 132.44 kgf，極限載重所對應之位移介於 12.34~13.27 mm，平均值為 12.88 mm；B-E-1 組試材之極限載重介於 101.40~173.60 kgf，平均值為 150.84 kgf，極限載重所對應之位移介於 9.32~15.00 mm，平均值為 11.40 mm；B-E-2 組試材之極限載重介於 162.40~189.60 kgf，平均值為 177.92 kgf，極限載重所對應之位移介於 7.82~13.77 mm，平均值為 10.63 mm；B-E-3 組試材之極限載重介於 157.00~215.60 kgf，平均值為 183.12 kgf，極限載重所對應之位移介於 9.38~13.16 mm，平均值為 11.01 mm。

實驗數據分析結果發現試材張力側平貼 1~3 層 CFRP 補強組與對照組相較之下（該組試材鑽孔孔徑為 2.2 cm，斷面面積損失百分比為 42 %），其極限載重分別提昇（減少）13.89 %、34.34 %以及 38.27 %，極限位移則分別提昇（減少）（11.49 %）、（17.47 %）以及（14.52 %）。

B-E 組各組試材之彎矩補強極限載重強度與極限位移提昇（減少）比較圖表、試材靜曲破壞模式以及平均載重-位移曲線圖如表 4-11 以及圖 4-44~圖 4-50 所示。

圖 4-43 B-E 組試材現況圖（由左至右分別為對照組、1 層 CFRP、2 層 CFRP 與 3 層 CFRP）

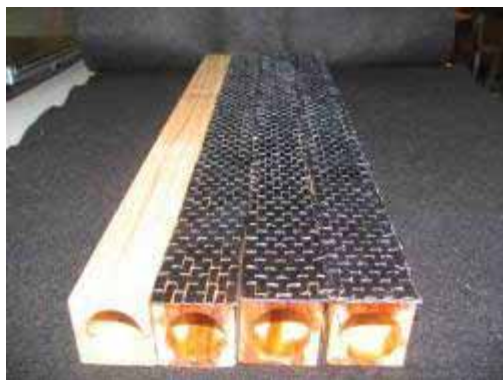


圖 4-44 B-E-0 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-45 B-E-1 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-46 B-E-2 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



圖 4-47 B-E-3 組試材抗彎測試結果(由上至下分別為試材編號 1~5)



表 4-11 B-E 組三點抗彎測試結果以及補強提昇效能

組別	Pu (kgf)	COV (%)	PuP (%)	PuV (kgf)	Du (mm)	COV (%)	DuP (%)	DuV mm
B-E-0	132.44	10.6	—	—	12.88	2.9	—	—
B-E-1	150.84	19.4	13.89	18.40	11.40	27.5	(11.49)	(1.48)
B-E-2	177.92	6.2	34.34	45.48	10.63	21.1	(17.47)	(2.25)
B-E-3	183.12	13.1	38.27	50.68	11.01	13.4	(14.52)	(1.87)

圖 4-48 B-E 組極限載重提昇（減少）效能比較圖

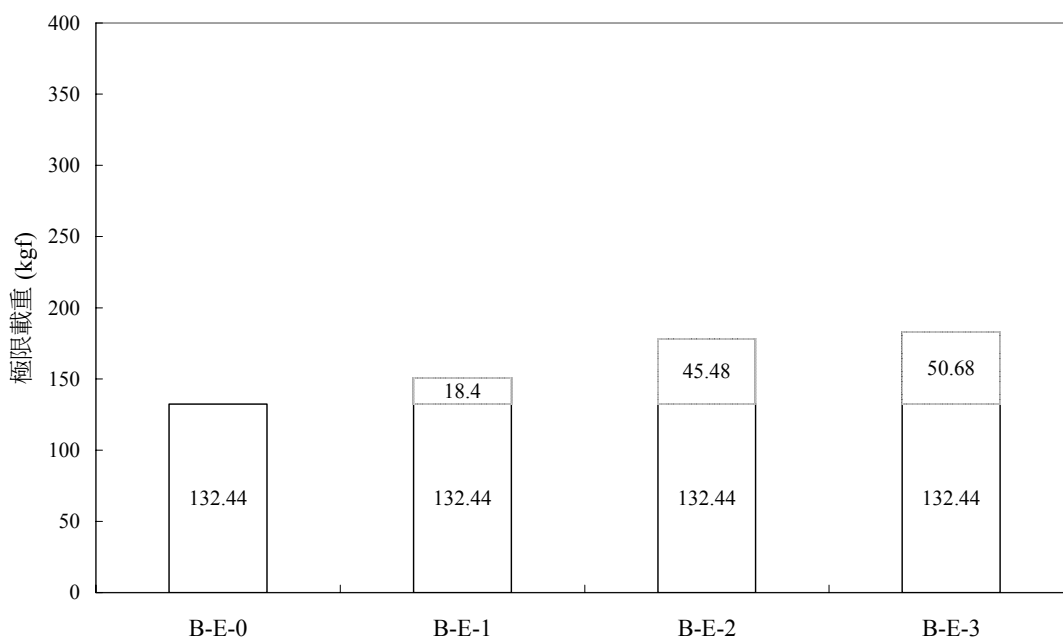


圖 4-49 B-E 組極限位移提昇 (減少) 效能比較圖

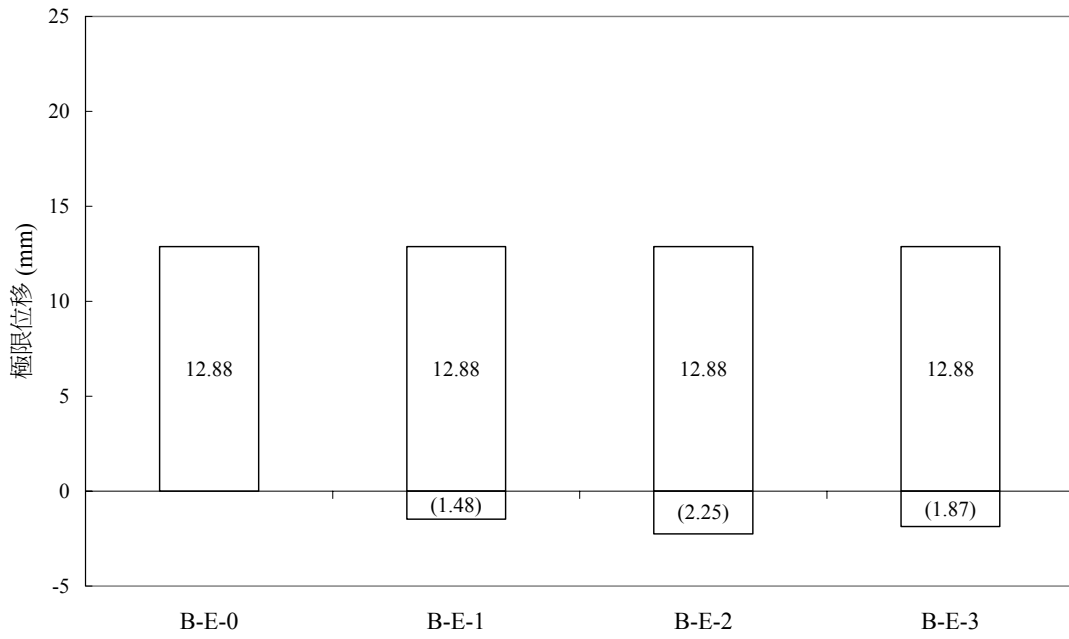
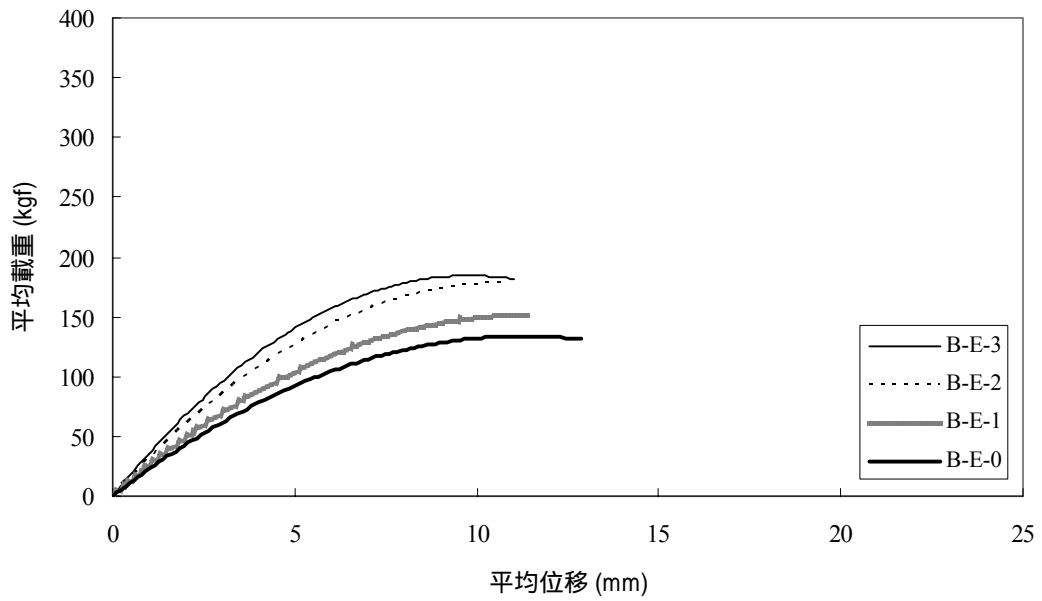


圖 4-50 B-E 組平均載重-位移曲線圖



除了探討在同一鑽孔孔徑 (包含對照組) 變因下, CFRP 彎矩補強木構件

對試材極限強度以及極限位移所增加（或減少）之效能外，本文繼續探討在同一 CFRP 包覆層數下（包含對照組），不同鑽孔孔徑對彎矩補強之強度以及位移增加（或減少）效能之探討，詳細結果如次所述：

### 七、B-A~B-E 對照組極限載重以及極限位移效能比較

針對不同孔徑之 B-A~B-E 對照組，其三點抗彎測試載重以及位移增加（或減少）之原因進行探討。實驗數據分析結果發現，有進行鑽孔試體（斷面面積損失百分比分別為 13%、20%、28%以及 42%）之極限位移與不進行鑽孔之試體相較下，其極限位移提昇（減少）百分比分別為 (3.52)%、1.97%、(5.00)% 以及 (5.57)%。

比較鑽孔試體（斷面面積損失百分比分別為 13%、20%、28%以及 42%）之極限載重與不進行鑽孔之試體，其極限載重提昇（減少）百分比分別為 (21.07)%、(8.47)%、(19.21)% 以及 (29.46)%。

B-A~B-E 組各組試材之極限載重強度與極限位移提昇（減少）比較圖表以及平均載重-位移曲線圖如表 4-12 以及圖 4-51~4-52 所示。

**表 4-12 B-A~B-E 對照組三點抗彎測試結果以及極限載重/極限位移提昇（減少）效能**

組別	Pu (kgf)	COV (%)	PuP (%)	PuV (kgf)	Du (mm)	COV (%)	DuP (%)	DuV (mm)
B-A-0	187.75	12.2	—	—	12.20	21.7	—	—
B-B-0	148.20	20.5	(21.07)	(39.55)	11.77	32.7	(3.52)	(0.43)
B-C-0	171.85	8.3	(8.47)	(15.90)	12.44	15.2	1.97	0.24
B-D-0	151.68	12.0	(19.21)	(36.07)	11.59	19.1	(5.00)	(0.61)
B-E-0	132.44	10.6	(29.46)	(55.31)	12.88	2.9	5.57	0.68

圖 4-51 B-A~B-E 對照組極限載重提昇（減少）效能比較圖

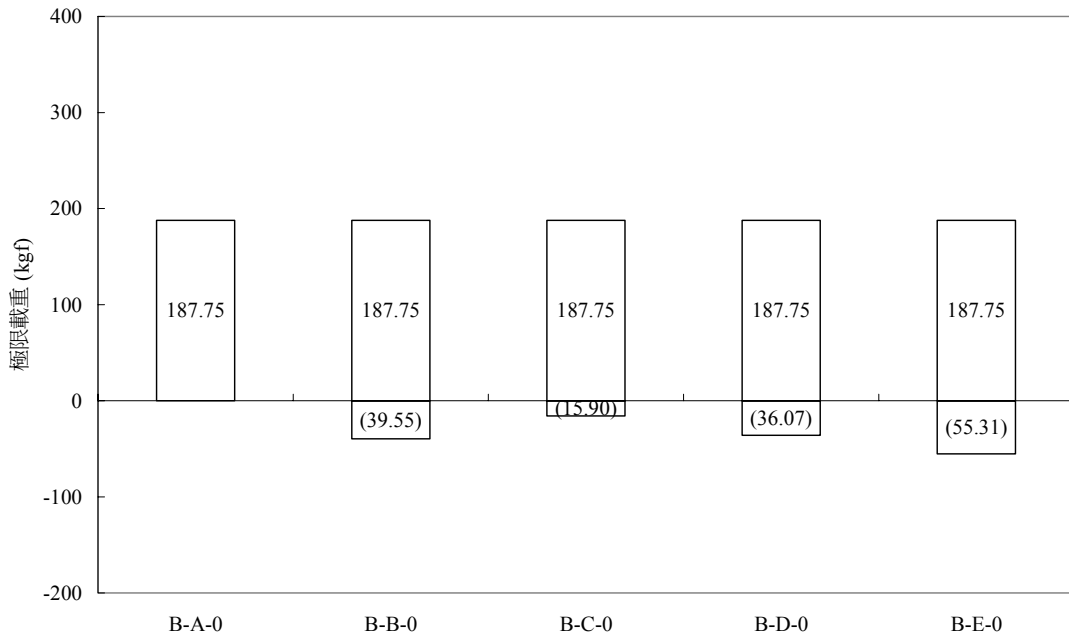
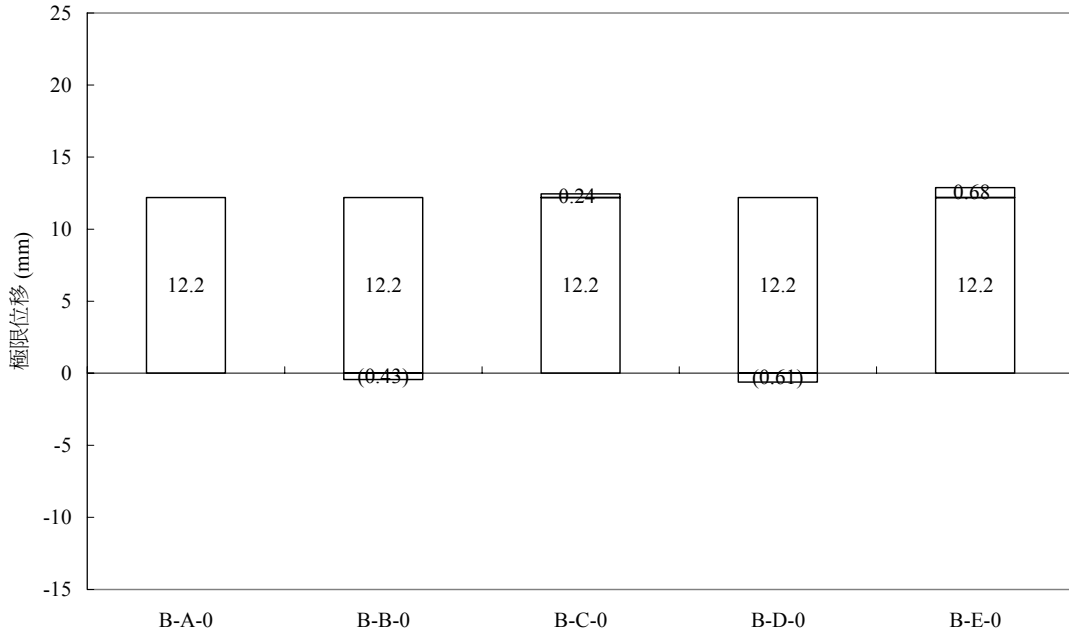


圖 4-52 B-A~B-E 對照組極限位移提昇（減少）效能比較圖





### 八、B-A~B-E 組貼覆 1 層 CFRP 極限載重以及極限位移提昇效能比較

針對不同孔徑之 B-A~B-E 組，在其張力側補強 1 層 CFRP，其三點抗彎測試載重以及位移增加（或減少）之原因進行探討。

實驗數據分析結果發現，有進行鑽孔試體（斷面面積損失百分比分別為 13%、20%、28%以及 42%）之極限位移與不進行鑽孔之試體相較下，其極限位移提昇（減少）百分比分別為 (8.62)%、(17.47)%、(22.71)%以及 (37.77)%；在進行鑽孔試體（斷面面積損失百分比分別為 13%、20%、28%以及 42%）之極限載重與不進行鑽孔之試體相較下，其極限載重提昇（減少）百分比分別為 5.00%、(13.36)%、(26.38)%以及 (36.14)%。

B-A~B-E 組各組試材之彎矩補強極限載重強度與極限位移提昇（減少）比較圖表以及平均載重-位移曲線圖如表 4-13 以及圖 4-53~4-54 所示。

**表 4-13 B-A~B-E 組包覆 1 層 CFRP 三點抗彎測試結果以及極限載重/極限位移提昇（減少）效能**

組別	Pu (kgf)	COV (%)	PuP (%)	PuV (kgf)	Du (mm)	COV (%)	DuP (%)	DuV mm
B-A-1	236.2	7.6	—	—	18.32	29.9	—	—
B-B-1	248.00	10.0	5.00	11.80	16.74	10.3	(8.62)	(1.58)
B-C-1	204.64	9.5	(13.36)	(31.56)	15.12	13.9	(17.47)	(3.20)
B-D-1	173.88	6.7	(26.38)	(62.32)	14.16	14.5	(22.71)	(4.16)
B-E-1	150.84	19.4	(36.14)	(85.36)	11.40	27.5	(37.77)	(6.92)

圖 4-53 B-A~B-E 組貼覆 1 層 CFRP 極限載重提昇 (減少) 效能比較圖

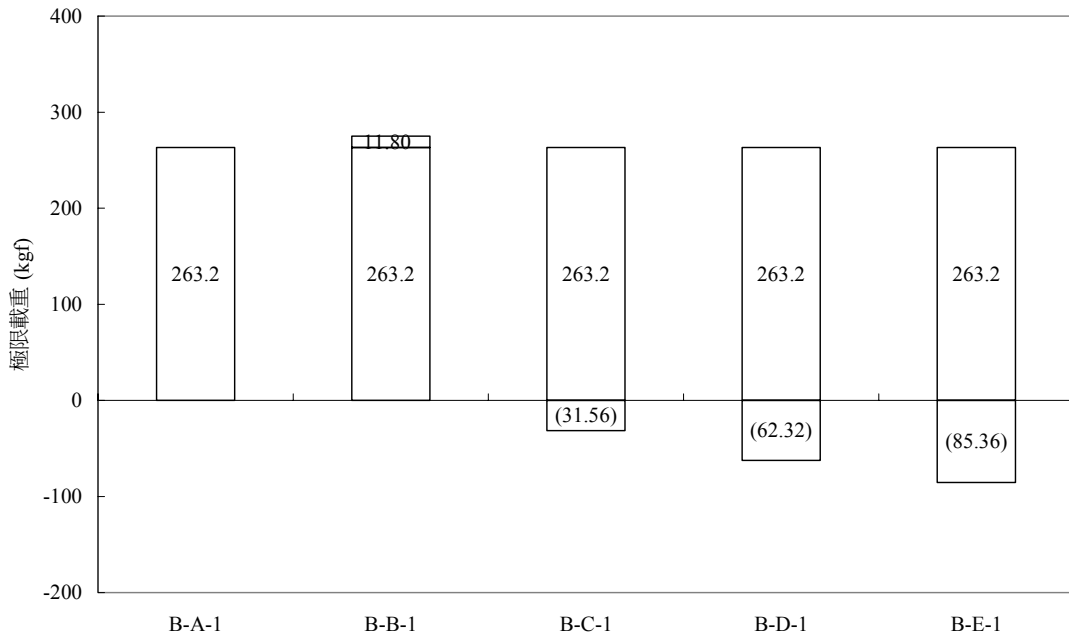
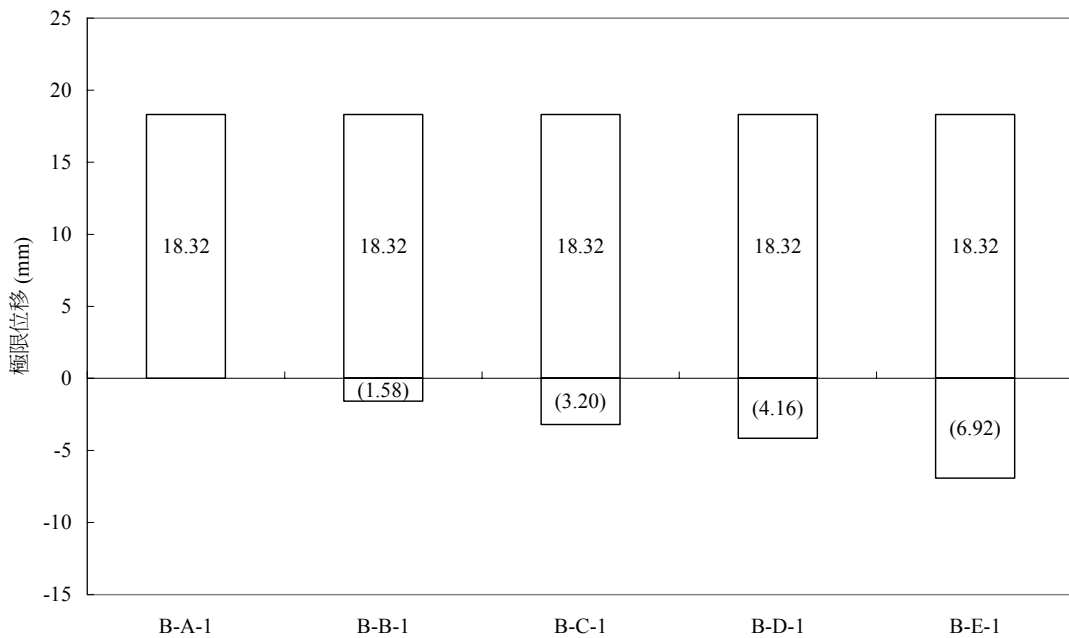


圖 4-54 B-A~B-E 組貼覆 1 層 CFRP 極限位移提昇 (減少) 效能比較圖



九、B-A~B-E 組貼覆 2 層 CFRP 極限載重以及極限位移提昇效能比較

針對不同孔徑之 B-A~B-E 組，在其張力側補強 2 層 CFRP，其三點抗彎

測試載重以及位移增加（或減少）之原因進行探討。

實驗數據分析結果發現，有進行鑽孔試體（斷面面積損失百分比分別為 13%、20%、28%以及 42%）之極限位移與不進行鑽孔之試體相較下，其極限位移提昇（減少）百分比分別為(29.12)%、(35.08)%、(31.86)%以及(48.92)%；在進行鑽孔試體（斷面面積損失百分比分別為 13%、20%、28%以及 42%）之極限載重與不進行鑽孔之試體相較下，其極限載重提昇（減少）百分比分別為(6.88)%、(22.04)%、(30.83)%以及(32.71)%。

B-A~B-E 組各組試材之彎矩補強極限載重強度與極限位移提昇（減少）比較圖表以及平均載重-位移曲線圖如表 4-14 以及圖 4-55~圖 4-56 所示。

**表 4-14 B-A~B-E 組包覆 2 層 CFRP 三點抗彎測試結果以及極限載重/極限位移提昇（減少）效能**

組別	Pu (kgf)	COV (%)	PuP (%)	PuV (kgf)	Du (mm)	COV (%)	DuP (%)	DuV (mm)
B-A-2	264.4	7.2	—	—	20.81	17.5	—	—
B-B-2	246.2	7.6	(6.88)	(18.20)	14.75	13.5	(29.12)	(6.06)
B-C-2	206.12	13.8	(22.04)	(58.28)	13.51	15.3	(35.08)	(7.30)
B-D-2	182.88	9.2	(30.83)	(81.52)	14.18	9.2	(31.86)	(6.63)
B-E-2	177.92	6.2	(32.71)	(86.48)	10.63	21.1	(48.92)	(10.18)

圖 4-55 B-A~B-E 組貼覆 2 層 CFRP 極限載重提昇 (減少) 效能比較圖

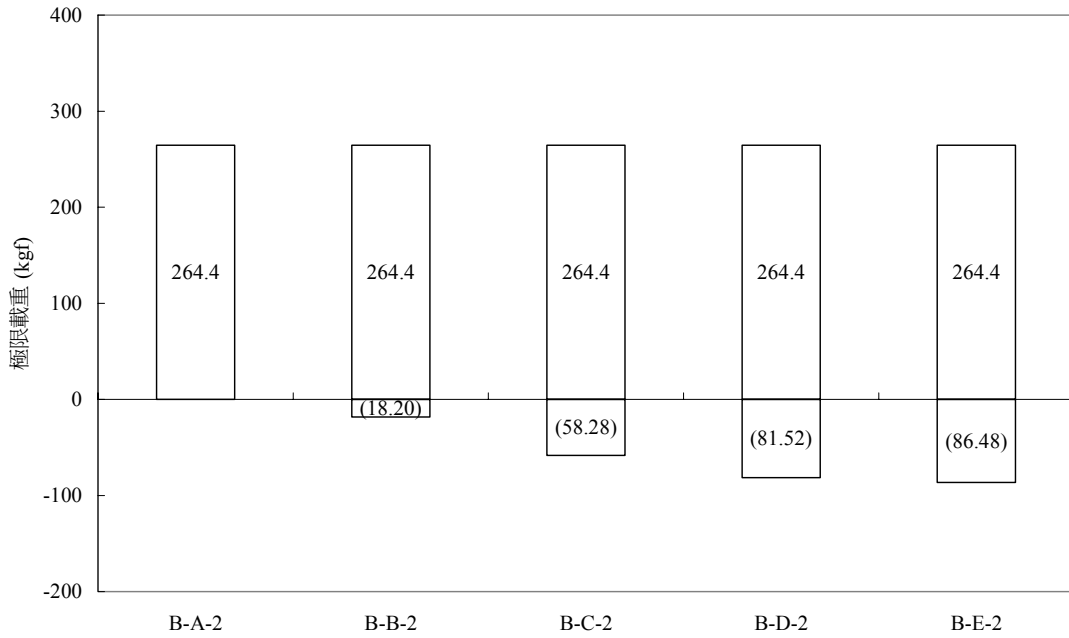
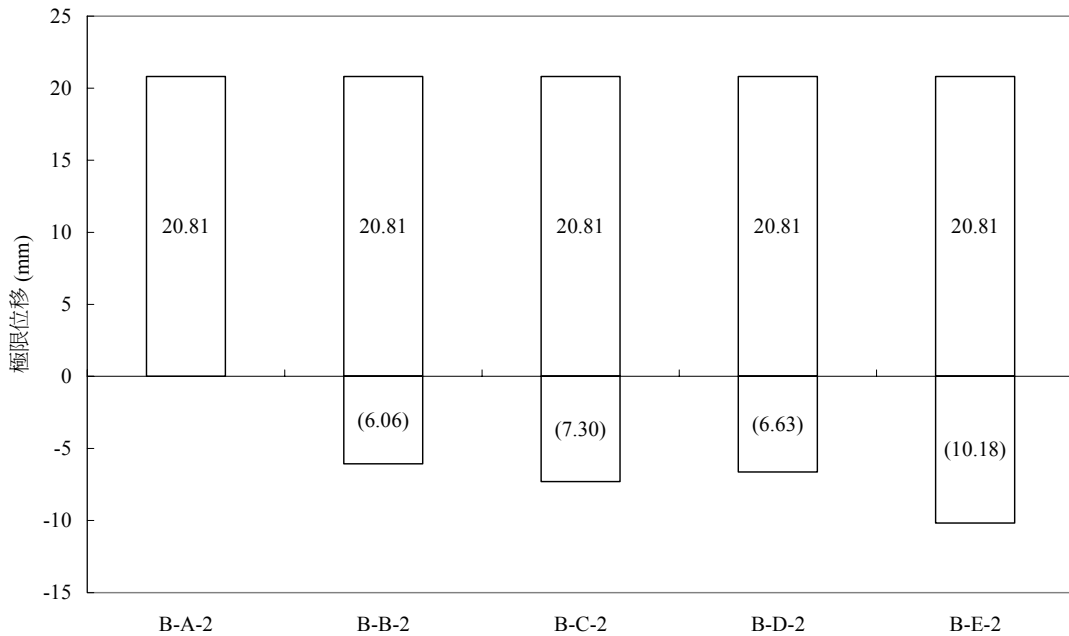


圖 4-56 B-A~B-E 組貼覆 2 層 CFRP 極限位移提昇 (減少) 效能比較圖



### 十、B-A~B-E 組貼覆 3 層 CFRP 極限載重以及極限位移提昇效能比較

針對不同孔徑之 B-A~B-E 組，在其張力側補強 3 層 CFRP，其三點抗彎測試載重以及位移增加（或減少）之原因進行探討。

實驗數據分析結果發現，有進行鑽孔試體（斷面面積損失百分比分別為 13%、20%、28%以及 42%）之極限位移與不進行鑽孔之試體相較下，其極限位移提昇（減少）百分比分別為 (24.78)%、(20.89)%、(40.24)%以及 (47.63)%；在進行鑽孔試體（斷面面積損失百分比分別為 13%、20%、28%以及 42%）之極限載重與不進行鑽孔之試體相較下，其極限載重提昇（減少）百分比分別為 (35.17)%、(29.19)%、(40.74)%以及 (48.91)%。

B-A~B-E 組各組試材之彎矩補強極限載重強度與極限位移提昇（減少）比較圖表以及平均載重-位移曲線如表 4-15 以及圖 4-57~圖 4-58 所示。

**表 4-15 B-A~B-E 組包覆 3 層 CFRP 三點抗彎測試結果以及極限載重/極限位移提昇（減少）效能**

組別	Pu (kgf)	COV (%)	PuP (%)	PuV (kgf)	Du (mm)	COV (%)	DuP (%)	DuV (mm)
B-A-3	349.64	6.0	—	—	21.55	9.5	—	—
B-B-3	263.00	11.7	(24.78)	(86.64)	13.97	9.1	(35.17)	(7.58)
B-C-3	276.6	14.4	(20.89)	(73.04)	15.26	5.2	(29.19)	(6.29)
B-D-3	208.96	8.9	(40.24)	(140.68)	12.77	10.0	(40.74)	(8.78)
B-E-3	183.12	13.1	(47.63)	(166.52)	11.01	13.4	(48.91)	(10.54)

圖 4-57 B-A~B-E 組貼覆 3 層 CFRP 極限載重提昇 (減少) 效能比較圖

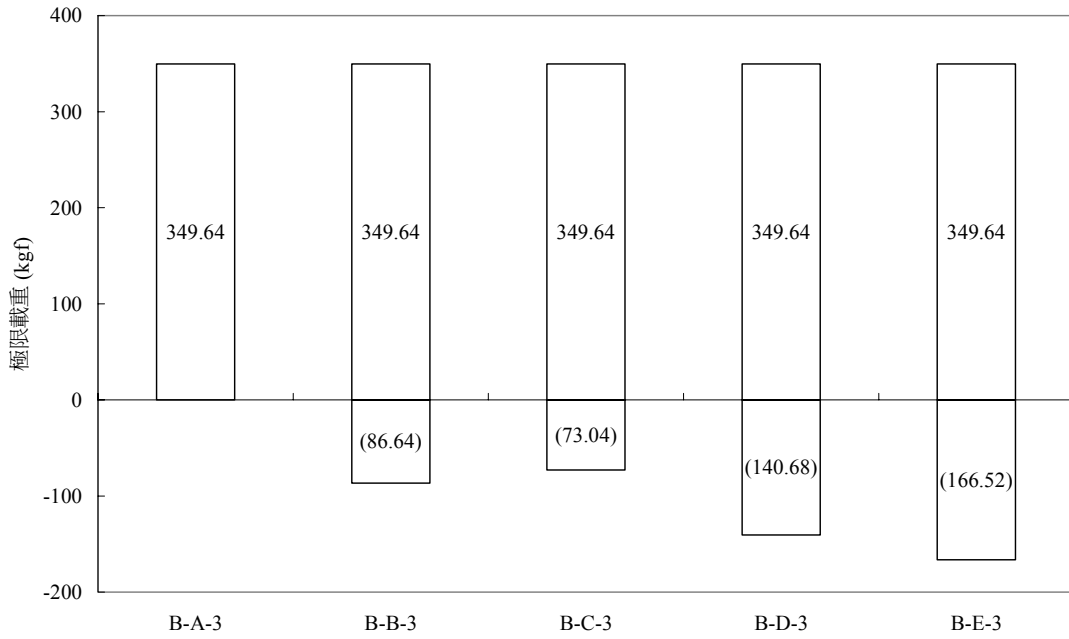
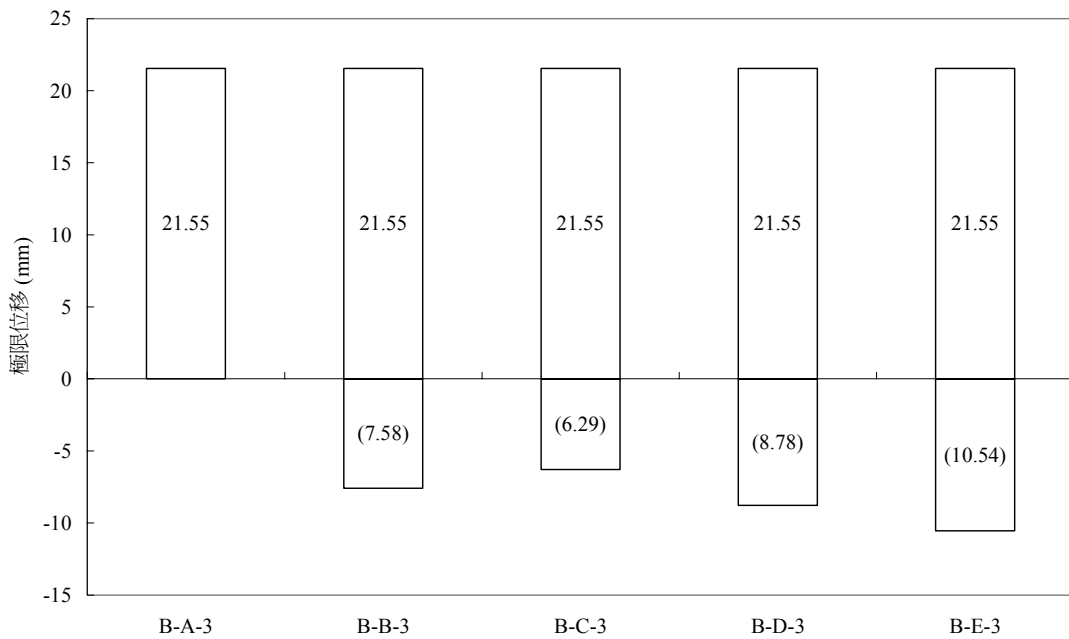


圖 4-58 B-A~B-E 組貼覆 3 層 CFRP 極限位移提昇 (減少) 效能比較圖



### 十一、斷面慣性矩 (Moment of Inertia) 損失量與極限應力之探討

B-A~B-E 組試材對照組與補強組相較之下，其平均極限應力均隨著 CFRP 補強層數增加而增加。從各組試材對照組與補強組之平均極限應力與斷面慣性矩損失量關係圖 (圖 4-59) 可以發現斷面慣性矩減少範圍在 0~3.68% (I 值介於 6.75~6.50  $\text{cm}^4$ ) 之平均極限應力值變動較大；斷面慣性矩減少範圍在 3.68%~7.63% (I 值介於 6.50~6.23  $\text{cm}^4$ ) 之範圍平均極限應力有下降之趨勢；斷面慣性矩減少範圍在 7.63%~17.04% (I 值在 5.6  $\text{cm}^4$  以下) 之平均極限應力趨於平緩。各組試材斷面慣性矩計算表如表 4-16 所示；對照組與補強組試材平均極限應力數值如表 4-17 所示。

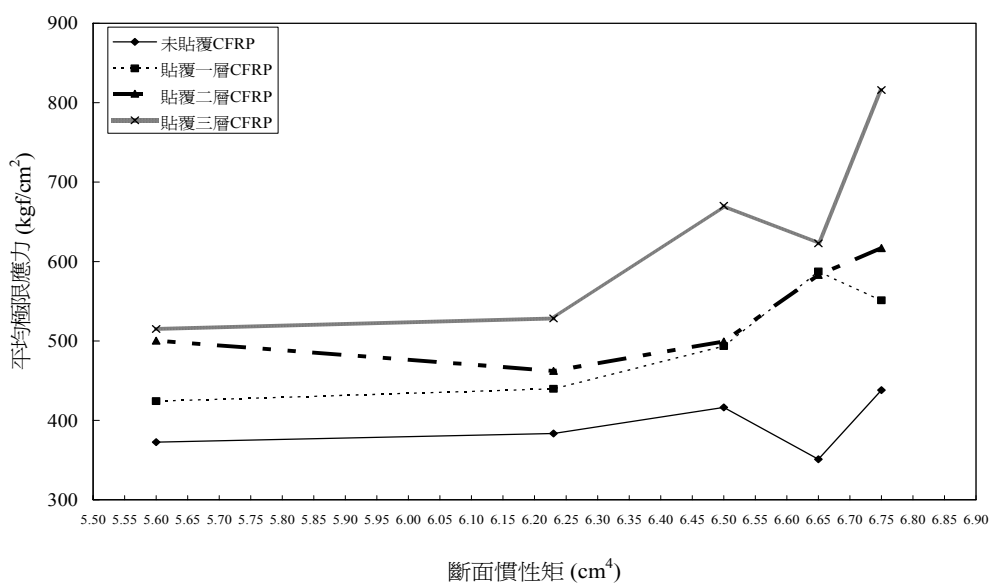
表 4-16 各組試材斷面慣性矩計算表

組別	孔洞直徑 (cm)	孔洞面積 ( $\text{cm}^2$ )	面積 ( $\text{cm}^2$ )	面積減少 百分比 (%)	I 值 ( $\text{cm}^4$ )	I 值減少 百分比 (%)
A 組	0.00	0.00	9.00	0.00	6.75	0.00
B 組	1.20	1.13	7.87	12.57	6.65	-1.51
C 組	1.50	1.77	7.23	19.63	6.50	-3.68
D 組	1.80	2.54	6.46	28.27	6.23	-7.63
E 組	2.20	3.80	5.20	42.24	5.60	-17.04

表 4-17 對照組與補強組平均極限應力數值

平均極限應力 (kgf/cm <sup>2</sup> ) 組別	未貼覆 CFRP	1 層 CFRP	2 層 CFRP	3 層 CFRP
B-A	438.08	551.13	616.93	815.83
B-B	351.00	587.37	583.11	622.89
B-C	416.41	493.46	499.44	670.22
B-D	383.46	439.58	462.34	528.27
B-E	372.49	424.24	500.40	515.03

圖 4-59 平均極限應力與斷面慣性矩損失量關係圖







## 第五章 CFRP 補強木構件短梁之研究

本項實驗目的為探究 CFRP 補強木構件短梁之可行性，為了探討短梁試材之破壞模式，本研究參照 CNS454 木材靜曲試驗法之標準長度為基準（試材破壞模式為靜曲破壞），以逐漸縮短木梁跨深比直至破壞模式發生變化為止，再針對破壞模式發生變化之臨界範圍內進行破壞模式之分類，如此便可依破壞之模式進行不同之 CFRP 補強措施，詳細試驗規劃如次節所述。由於實驗材料與 CFRP 貼覆木構件流程以及儀器設備在第三章已經有說明，故本章不再贅述，僅以預備試驗方法、預備試驗測試結果、長-短梁臨界跨深比破壞模式之探討以及木構件短梁補強實驗規劃作說明。

### 第一節 預備實驗方法

#### 一、預備實驗規劃

在進行木構件短梁以 CFRP 補強前，必須確認在那一個跨深比，其破壞模式發生變化（破壞模式可能由靜曲破壞轉變成剪力破壞、水平剪斷破壞、壓縮破壞以及前述破壞同時發生等模式），並依木構件短梁的破壞模式規劃不同之 CFRP 補強方式，預備實驗設計如表 5-1 所示。

表 5-1 預備試驗跨深比實驗規劃表

試體編號	跨深比 $l/h$	試體長度 (含支承外長度: cm)	試體橫斷面 (寬×深:cm×cm)	試體數量
S1	14:1	48	3×3	2
S2	13:1	45	3×3	2
S3	12:1	42	3×3	2
S4	11:1	39	3×3	2
S5	10:1	36	3×3	2
S6	9:1	33	3×3	2
S7	8:1	30	3×3	2
S8	7:1	27	3×3	2
S9	6:1	24	3×3	2
S10	5:1	21	3×3	2
S11	4:1	18	3×3	2
S12	3:1	15	3×3	2

## 二、預備實驗木材物理性質量測

預備實驗前，針對各組試材（圖 5-1）之含水率、密度以及外觀進行量測以及記錄，其中 S1 組密度介於 0.49~0.50 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.50 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 17.8 %；S2 組密度介於 0.39~0.45 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.42 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 16.9 %；S3 組密度介於 0.38~0.39 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.39 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 15.1 %；S4 組密度介於 0.50~0.51 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.51 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 20.0 %；S5 組密度介於 0.40~0.43 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.42 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 18.2 %；S6 組密度介於 0.40~0.44 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.42 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 14.4 %；S7 組密度介於 0.43~0.44 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.44 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 13.9 %；S8 組密度介於 0.44~0.44 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.44 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 17.2 %；S9 組密度介於 0.48~0.50 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.46 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 19.9 %；S10 組密度介於 0.37~0.49 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.43 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 16.7 %；S12 組密度介於 0.40~0.46 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.43 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 18.8 %；S12 組密度介於 0.46~0.48 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.47 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 16.6 %。預備實驗各組試材之平均含水率值以及密度如表 5-2 所示。

表 5-2 預備實驗各組試材木材物理性質量測表

組別	跨深比 $l/h$	平均含水率 (%)	密度 ( $\text{g/cm}^3$ )
S-1-1	14:1	20.4	0.50
S-1-2		15.2	0.49
S-2-1	13:1	16.2	0.39
S-2-2		17.6	0.45
S-3-1	12:1	14.0	0.38
S-3-2		16.1	0.39
S-4-1	11:1	15.9	0.50
S-4-2		24.0	0.51
S-5-1	10:1	18.0	0.43
S-5-2		18.3	0.40
S-6-1	9:1	18.2	0.40
S-6-2		16.5	0.44
S-7-1	8:1	12.0	0.43
S-7-2		15.7	0.44
S-8-1	7:1	17.9	0.44
S-8-2		16.5	0.44
S-9-1	6:1	21.5	0.50
S-9-2		18.3	0.43
S-10-1	5:1	15.7	0.37
S-10-2		17.7	0.49
S-11-1	4:1	19.2	0.40
S-11-2		18.4	0.46
S-12-1	3:1	16.6	0.46
S-12-2		16.5	0.48
平均值	—	17.4	0.44
變異係數 (%)	—	14.0	9.6

圖 5-1 預備實驗各組試材現況圖(由下而上分別為 S1~S12 之試材)



## 第二節 預備實驗靜曲試驗結果

按照規劃之不同跨深比試體以 CNS454 木材靜曲試驗法進行三分點抗彎測試，測試結果如表 5-3 所示，由表 5-3 以及圖 5-2~圖 5-13 發現試材在 6:1 以下(含 6:1)之跨深比其破壞模式產生改變，由原來之靜曲破壞模式變成水平剪斷破壞模式、壓縮破壞模式等，且從不同跨深比與 MOR 關係圖中(圖 5-14)發現在跨深比 7:1 以下之 MOR 明顯大幅下降，因此本研究選擇 6:1、5:1 以及 4:1 之跨深比進行大量測試，來更進一步確認其破壞模式，以作為 CFRP 補強方式之參考依據。

圖 5-2 S1 組試材靜曲破壞現況圖

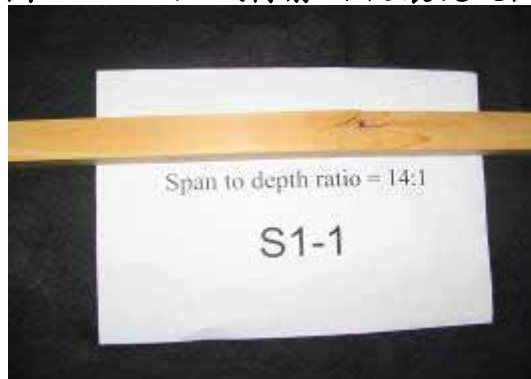


圖 5-3 S2 組試材靜曲破壞現況圖



圖 5-4 S3 組試材靜曲破壞現況圖



圖 5-5 S4 組試材靜曲破壞現況圖



圖 5-6 S5 組試材靜曲破壞現況圖

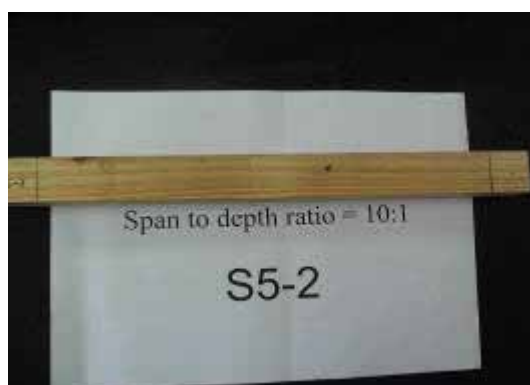


圖 5-7 S6 組試材靜曲破壞現況圖

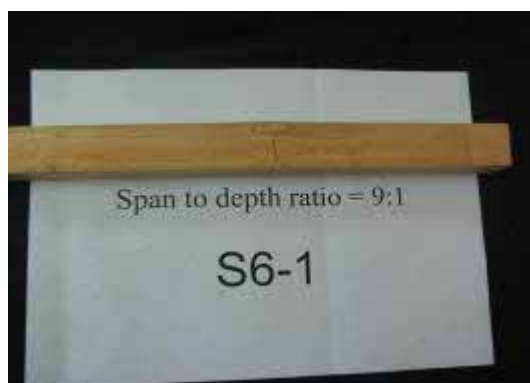




圖 5-8 S7 組試材靜曲破壞現況圖

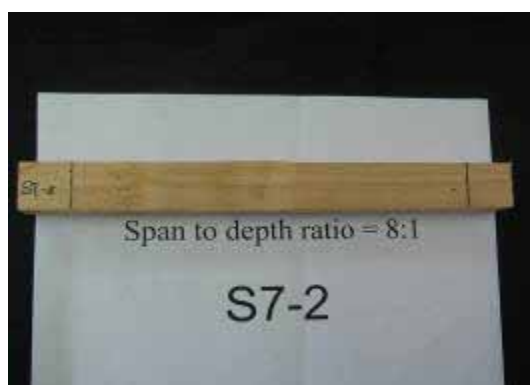


圖 5-9 S8 組試材靜曲破壞現況圖

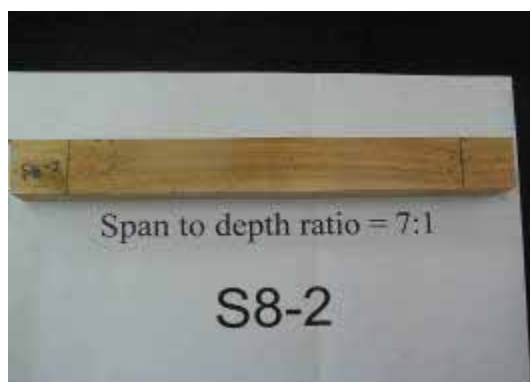


圖 5-10 S9 組試材靜曲破壞現況圖

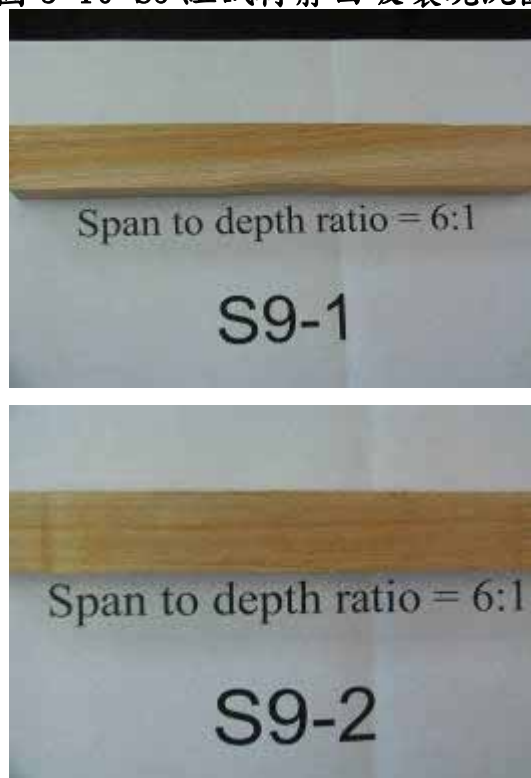


圖 5-11 S10 組試材靜曲破壞現況圖

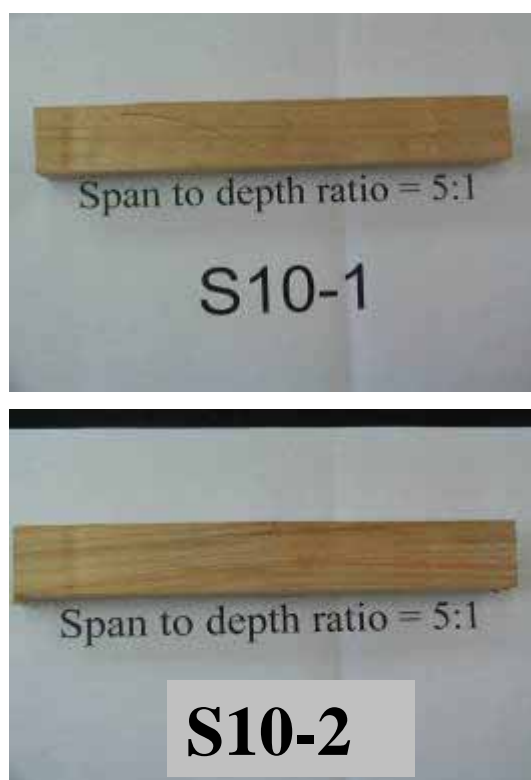


圖 5-12 S11 組試材靜曲破壞現況圖

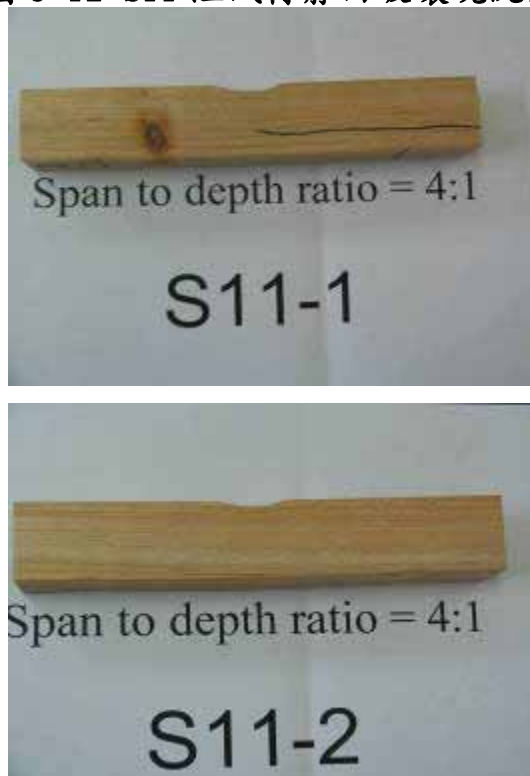


圖 5-13 S12 組試材靜曲破壞現況圖

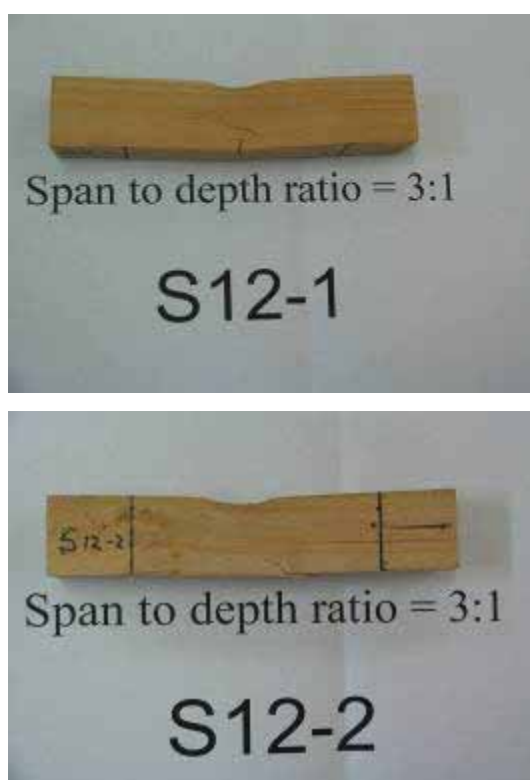


圖 5-14 不同跨深比與 MOR 之關係圖

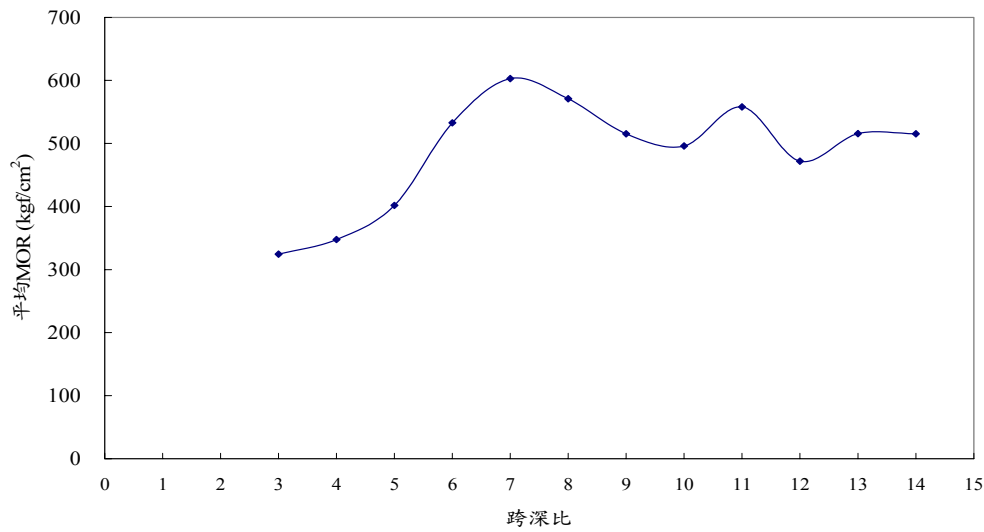


表 5-3 預備實驗各組試材靜曲試驗 MOR 值以及破壞模式

試體編號	跨深比 <i>l/h</i>	靜曲試驗 MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	靜曲試驗平均 MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	破壞模式
S1-1	14:1	483.00	515.43	撓曲破壞
S1-2		547.87		撓曲破壞
S2-1	13:1	507.43	515.67	撓曲破壞
S2-2		523.90		撓曲破壞
S3-1	12:1	428.60	471.90	撓曲破壞
S3-2		515.20		撓曲破壞
S4-1	11:1	587.77	558.16	撓曲破壞
S4-2		528.55		撓曲破壞
S5-1	10:1	482.33	495.92	撓曲破壞
S5-2		509.50		撓曲破壞
S6-1	9:1	515.70	515.25	撓曲破壞
S6-2		514.80		撓曲破壞
S7-1	8:1	573.73	570.87	撓曲破壞
S7-2		568.00		撓曲破壞
S8-1	7:1	607.37	602.82	撓曲破壞
S8-2		598.27		撓曲破壞
S9-1	6:1	467.40	532.80	壓縮破壞
S9-2		598.20		撓曲破壞+斜走 木理破壞

S10-1	5:1	334.17	401.67	撓曲破壞+斜走 木理破壞
S10-2		469.17		撓曲破壞+斜走 木理破壞
S11-1	4:1	323.47	347.73	水平剪斷破壞
S11-2		372.00		壓縮破壞
S12-1	3:1	310.80	324.40	撓曲破壞+斜走 木理破壞
S12-2		338.00		撓曲破壞+水平 剪斷破壞

### 第三節 長-短梁臨界跨深比破壞模式之探討

根據前節所述 MOR 開始大幅下降之跨深比 (6:1~4:1)，研究團隊開始著手進行更細部確認其破壞模式，以茲作為 CFRP 補強之依據。各組試材長-短梁臨界跨深比實驗規劃、各組長-短梁臨界跨深比試材木材物理性質量測、各組試材長-短梁臨界跨深比靜曲試驗結果如次所述：

#### 一、長-短梁臨界跨深比實驗規劃

由圖 5-4 可以發現在跨深比 6:1~4:1 之尺度，其靜曲試驗之 MOR 數值大幅下降，為了瞭解在此範圍內之破壞模式，研究團隊選定 6:1、5:1 以及 4:1 之跨深比範圍，並藉由靜曲試驗來確認在何種跨深比會產生破壞模式改變，實驗設計如表 5-4 所示。

表 5-4 長-短梁臨界跨深比實驗規劃表

試體編號	跨深比 $l/h$	試體長度 (含支承外長度: cm)	試體橫斷面 (寬×深:cm×cm)	試體 數量
AS1	6:1	16	2×2	4
AS2	5:1	14	2×2	4
AS3	4:1	12	2×2	4

## 二、長-短梁臨界跨深比木材物理性質之量測

研究團隊針對各組試材之含水率、密度以及外觀進行量測以及記錄，其中 AS1 組密度介於  $0.31\sim 0.34\text{ g/cm}^3$ ，平均密度為  $0.33\text{ g/cm}^3$ ，平均含水率為 14.8 %；AS2 組密度介於  $0.31\sim 0.33\text{ g/cm}^3$ ，平均密度為  $0.32\text{ g/cm}^3$ ，平均含水率為 14.5 %；AS3 組密度介於  $0.33\sim 0.34\text{ g/cm}^3$ ，平均密度為  $0.33\text{ g/cm}^3$ ，平均含水率為 15 %，各組試材之平均含水率值以及密度如表 5-5 所示。

表 5-5 長-短梁臨界跨深比木材物理性質量測

組別	跨深比 $l/h$	平均含水率 (%)	密度 ( $\text{g/cm}^3$ )
AS1-1	6:1	14.9	0.33
AS1-2		14.9	0.31
AS1-3		14.9	0.34
AS1-4		14.6	0.33
AS2-1	5:1	14.9	0.33
AS2-2		14.8	0.33
AS2-3		14.0	0.32
AS2-4		14.2	0.31
AS3-1	4:1	14.4	0.33
AS3-2		15.2	0.33
AS3-3		15.5	0.33
AS3-4		14.9	0.34
平均值	—	14.8	0.33
變異係數 (%)	—	2.8	3.1

### 三、長-短梁臨界跨深比靜曲試驗結果

按照表 5-4 規劃之試體以 CNS454 木材靜曲試驗法進行三分點抗彎測試，測試結果如表 5-6 所示，由表 5-6 以及圖 5-15~圖 5-26 發現試材在 5:1 以下 (含 5:1) 之跨深比其破壞模式產生改變，由原來之撓曲破壞模式部分變成撓曲與剪力同時發生之破壞模式等。

表 5-6 長-短梁臨界跨深比靜曲試驗之破壞模式

試體編號	跨深比 l/h	靜曲試驗 MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	靜曲試驗平均 MOR (kgf/cm <sup>2</sup> )	變異係數 (%)	破壞模式
AS1-1		448.20			撓曲破壞
AS1-2	6:1	371.70	441.79	11.2	撓曲破壞
AS1-3		486.00			撓曲破壞
AS1-4		461.25			撓曲破壞
AS2-1		388.50			撓曲破壞
AS2-2		406.50			撓曲破壞
AS2-3	5:1	463.50	402.38	11.6	撓曲破壞 + 剪力破壞
AS2-4					351.00
AS3-1		365.10			撓曲破壞 + 剪力破壞
AS3-2	4:1	380.10	353.55	7.7	撓曲破壞
AS3-3					352.80
AS3-4		316.20			剪力破壞

圖 5-15 AS1-1 靜曲破壞現況圖



圖 5-16 AS1-2 靜曲破壞現況圖



圖 5-17 AS1-3 靜曲破壞現況圖



圖 5-18 AS1-4 靜曲破壞現況圖





圖 5-19 AS2-1 靜曲破壞現況圖



圖 5-20 AS2-2 靜曲破壞現況圖



圖 5-21 AS2-3 靜曲破壞現況圖



圖 5-22 AS2-4 靜曲破壞現況圖



圖 5-23 AS3-1 靜曲破壞現況圖



圖 5-24 AS3-2 靜曲破壞現況圖

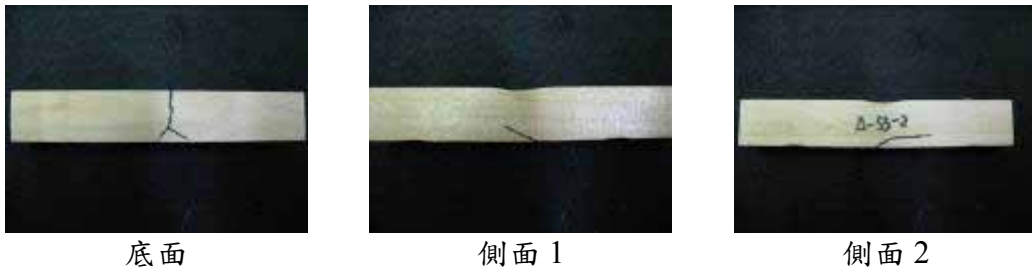


圖 5-25 AS3-3 靜曲破壞現況圖

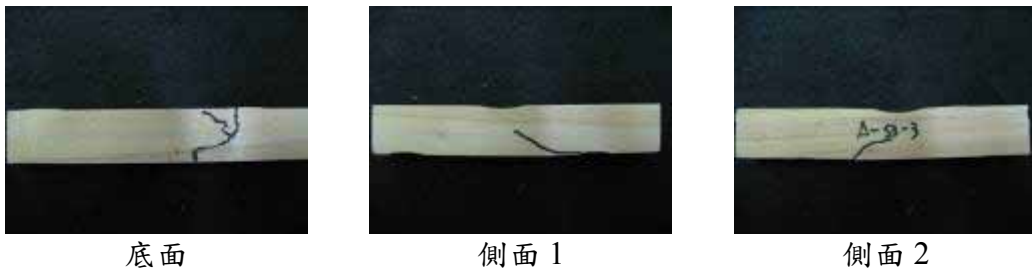


圖 5-26 AS3-4 靜曲破壞現況圖



#### 第四節 CFRP 補強木構件短梁實驗設計

CFRP 補強木構件短梁之實驗變因仍根據長-短梁臨界跨深比靜曲試驗測試後，選定 5:1 之跨深比作為長-短梁臨界跨深比，並依其破壞模式進行 CFRP 補強措施（包含張力側平貼、張力側 U 字型貼覆以及張力側 U 字型貼覆+平貼），然後以 CNS454 靜曲試驗進行三分點抗彎測試的方法探討木構件短梁以 CFRP 強化所提昇之效能。CFRP 補強木構件短梁實驗規劃表如表 5-7 所示，對照組以及補強組示意圖如圖 5-27 所示。

表 5-7 CFRP 補強木構件短梁實驗規劃表

組別 內容	C	P	U	UP
CFRP 貼覆方式	未貼覆	張力側平貼	張力側 U 字型貼覆	張力側 U 字型貼覆+平貼
CFRP 貼覆層數	0	1	1	U 1 P 1
試材數量	5	5	5	5

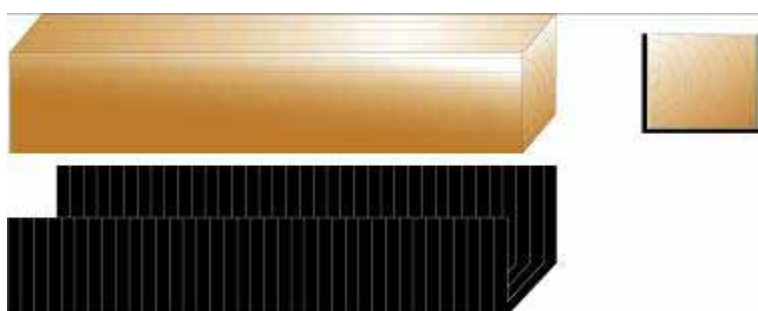
圖 5-27 木構件短梁實驗規劃示意圖



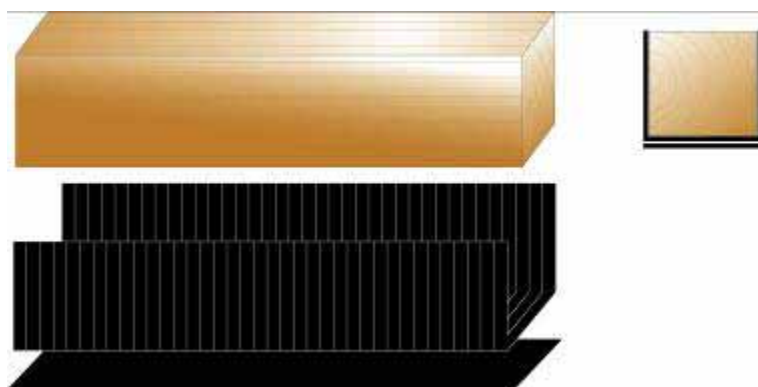
(a) 對照組 (未貼覆 CFRP)



(b) 張力側平貼一層



(c) U 字型貼覆 (1 層 CFRP)



(d) U 字型貼覆+張力側平貼 (1 層 CFRP)



## 第六章 CFRP 補強木構件短梁靜曲試驗測試結果

## 第一節 木材物理性質量測

針對各組試材之含水率、密度以及外觀進行量測以及記錄，其中 C 組密度介於 0.32~0.33 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.32 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 11.97%；P 組密度介於 0.33~0.34 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.33 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 11.07%；U 組密度介於 0.34~0.36 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.35 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 10.19%；UP 組密度介於 0.32~0.35 g/cm<sup>3</sup>，平均密度為 0.34 g/cm<sup>3</sup>，平均含水率為 9.33%，各組試材之平均含水率值以及密度如表 6-1 所示。

表 6-1 木構件短梁各組試材之物理性質量測表

組別	跨深比 $l/h$	含水率 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
C-1		11.4	0.32
C-2		11.8	0.32
C-3	5:1	11.9	0.33
C-4		12.7	0.33
C-5		12.0	0.33
平均值	-	12.0	0.33
變異係數 (%)	-	3.9	1.7
P-1		10.9	0.33
P-2		11.2	0.33
P-3	5:1	11.2	0.33
P-4		11.2	0.33
P-5		10.8	0.34
平均值	-	11.1	0.33
變異係數 (%)	-	1.8	1.3
U-1		10.1	0.34
U-2		10.2	0.35
U-3	5:1	10.3	0.35
U-4		10.1	0.36
U-5		10.3	0.34
平均值	-	10.2	0.35
變異係數 (%)	-	1.0	2.4
UP-1	5:1	9.5	0.34

UP-2		9.2	0.34
UP-3		9.4	0.35
UP-4		9.5	0.35
UP-5		9.0	0.32
平均值	-	9.3	0.34
變異係數 (%)	-	2.3	3.6

## 第二節 三點抗彎測試結果

### 一、C 組三點抗彎試驗結果

C 組為未貼覆 CFRP 之對照組，其三點抗彎測試現況圖如圖 6-1~圖 6-5 所示，C 組試材之極限載重介於 202.40~270.40 kgf，平均值為 240.16 kgf，極限載重所對應之位移介於 5.93~7.44 mm，平均值為 6.65 mm；C 組平均載重位移曲線圖如圖 6-6 所示、靜曲試驗結果如表 6-2 所示。

圖 6-1 C1 靜曲破壞現況圖



圖 6-2 C2 靜曲破壞現況圖



圖 6-3 C3 靜曲破壞現況圖



圖 6-4 C4 靜曲破壞現況圖



圖 6-5 C5 靜曲破壞現況圖



圖 6-6 C 組試材平均載重-位移曲線圖

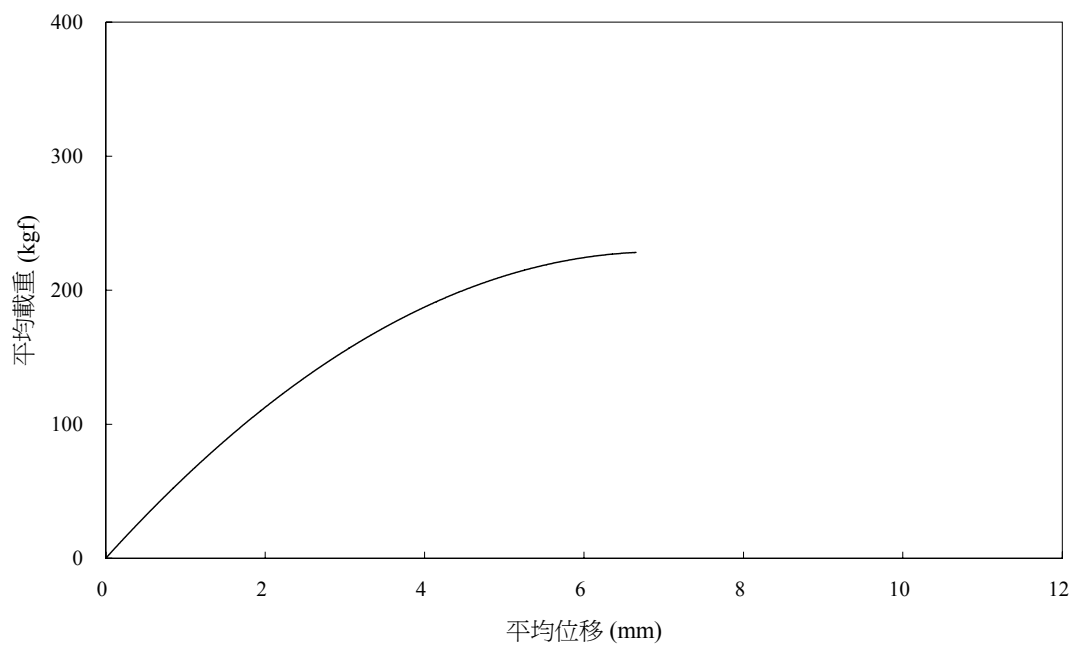




表 6-2 C 組靜曲試驗結果

試體編號	靜曲試驗極限載重 (kgf)	靜曲試驗平均極限載重 (kgf)	靜曲試驗極限位移 (mm)	靜曲試驗平均極限位移 (mm)	破壞模式
C-1	270.40		6.38		撓曲破壞
C-2	202.40		7.44		撓曲+水平剪斷破壞
C-3	224.00	240.16	6.85	6.65	撓曲+水平剪斷破壞
C-4	266.80		6.67		撓曲破壞
C-5	237.20		5.93		撓曲破壞

## 二、P 組三點抗彎試驗結果

P 組（張力側平貼一層 CFRP）三點抗彎測試（現況圖如圖 6-7~圖 6-11 所示），P 組試材之極限載重介於 236.40~380.00 kgf，平均值為 303.52 kgf，極限載重所對應之位移介於 9.10~13.90 mm，平均值為 11.25 mm；P 組平均載重位移曲線圖如圖 6-12 所示、靜曲試驗結果如表 6-3 所示。

圖 6-7 P1 靜曲破壞現況圖



圖 6-8 P2 靜曲破壞現況圖



圖 6-9 P3 靜曲破壞現況圖



圖 6-10 P4 靜曲破壞現況圖



圖 6-11 P5 靜曲破壞現況圖



圖 6-12 P 組試材平均載重-位移曲線圖

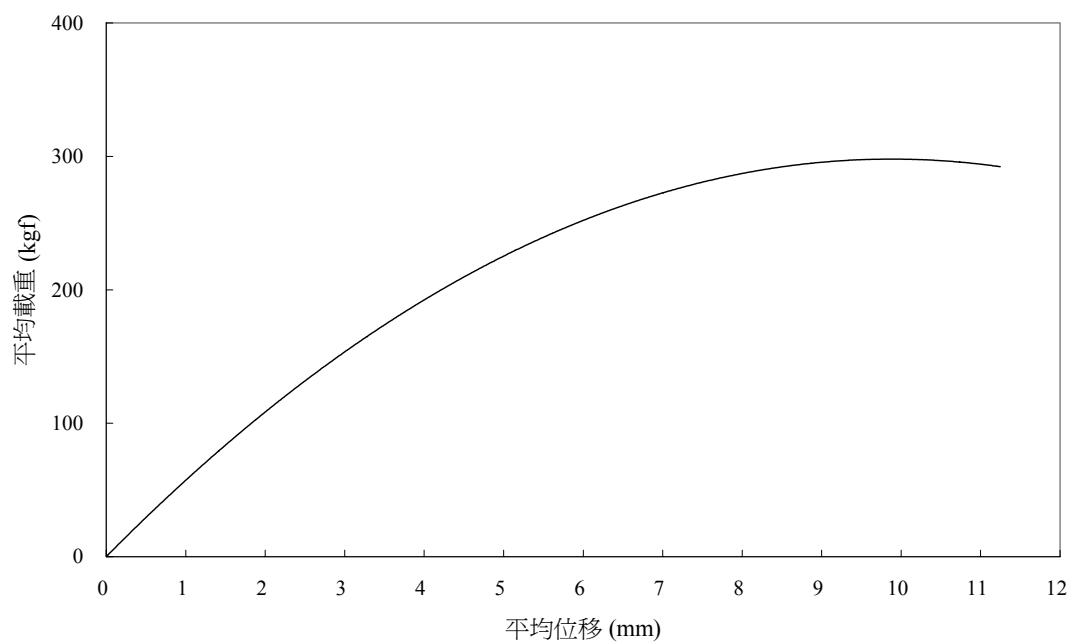


表 6-3 P 組靜曲試驗結果

試體編號	靜曲試驗極限載重 (kgf)	靜曲試驗平均極限載重 (kgf)	靜曲試驗極限位移 (mm)	靜曲試驗平均極限位移 (mm)	破壞模式
P-1	304.00		10.74		撓曲+水平剪斷破壞
P-2	236.40		10.74		撓曲+水平剪斷破壞
P-3	314.80	303.52	9.10	11.25	撓曲+水平剪斷+剪力破壞
P-4	380.00		13.90		撓曲+水平剪斷+剪力破壞
P-5	282.40		11.76		撓曲+水平剪斷破壞

### 三、U 組三點抗彎試驗結果

U 組 (張力側 U 字型貼覆一層 CFRP) 三點抗彎測試 (現況圖如圖 6-13~圖 6-17 所示), U 組試材之極限載重介於 300.00~376.00 kgf, 平均值為 336.24 kgf, 極限載重所對應之位移介於 9.04~12.75 mm, 平均值為 11.18 mm; U 組平均載重位移曲線圖如圖 6-18 所示、靜曲試驗結果如表 6-4 所示。

圖 6-13 U1 靜曲破壞現況圖



圖 6-14 U2 靜曲破壞現況圖



圖 6-15 U3 靜曲破壞現況圖



圖 6-16 U4 靜曲破壞現況圖



圖 6-17 U5 靜曲破壞現況圖



圖 6-18 U 組試材平均載重-位移曲線圖

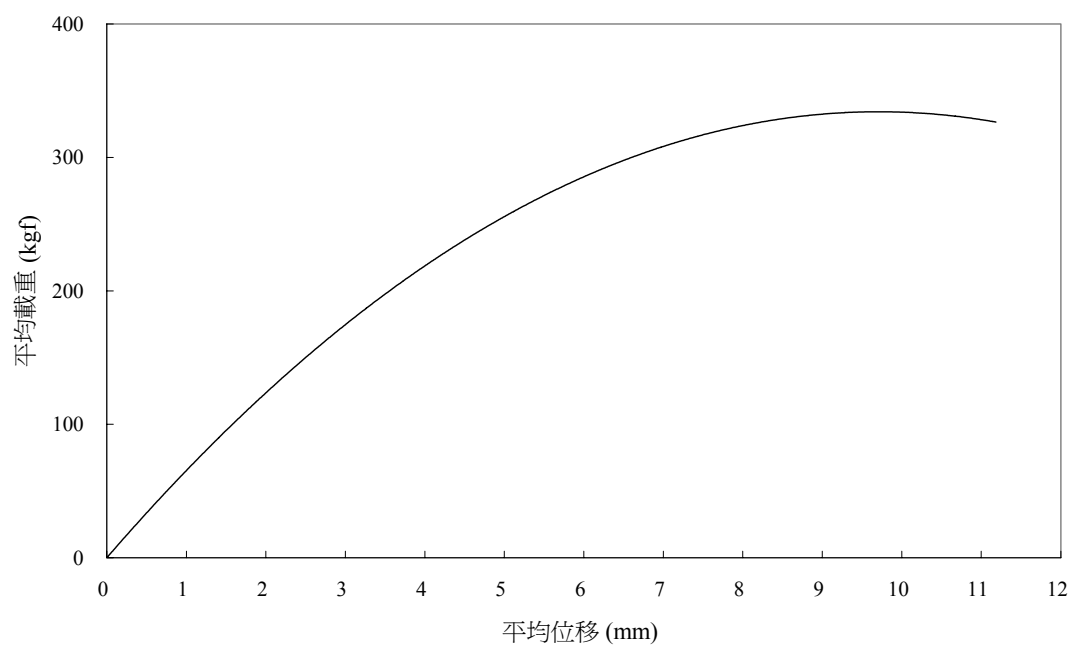


表 6-4 U 組靜曲試驗結果

試體編號	靜曲試驗極限載重 (kgf)	靜曲試驗平均極限載重 (kgf)	靜曲試驗極限位移 (mm)	靜曲試驗平均極限位移 (mm)	破壞模式
U-1	300.00		9.04		水平剪斷破壞(水平剪斷破壞處 CFRP 斷裂)
U-2	376.00		12.75		撓曲+水平剪斷破壞 (水平剪斷破壞處 CFRP 斷裂)
U-3	324.80	336.24	9.61	11.18	水平剪斷破壞(水平剪斷破壞處 CFRP 斷裂)
U-4	359.20		12.38		水平剪斷破壞(水平剪斷破壞處 CFRP 斷裂)
U-5	321.20		12.13		水平剪斷破壞(水平剪斷破壞處 CFRP 斷裂)

#### 四、UP 組三點抗彎試驗結果

UP 組 (張力側 U 字型貼覆一層 CFRP 後再平貼一層 CFRP) 三點抗彎測試 (現況圖如圖 6-19~圖 6-23 所示), UP 組試材之極限載重介於 348.40~460.00 kgf, 平均值為 394.56 kgf, 極限載重所對應之位移介於 9.83~13.96 mm, 平均值為 11.20 mm; UP 組平均載重位移曲線圖如圖 6-24 所示、靜曲試驗結果如表 6-5 所示。

圖 6-19 UP1 靜曲破壞現況圖



圖 6-20 UP2 靜曲破壞現況圖



圖 6-21 UP3 靜曲破壞現況圖



圖 6-22 UP4 靜曲破壞現況圖



圖 6-23 UP5 靜曲破壞現況圖



圖 6-24 UP 組試材平均載重-位移曲線圖

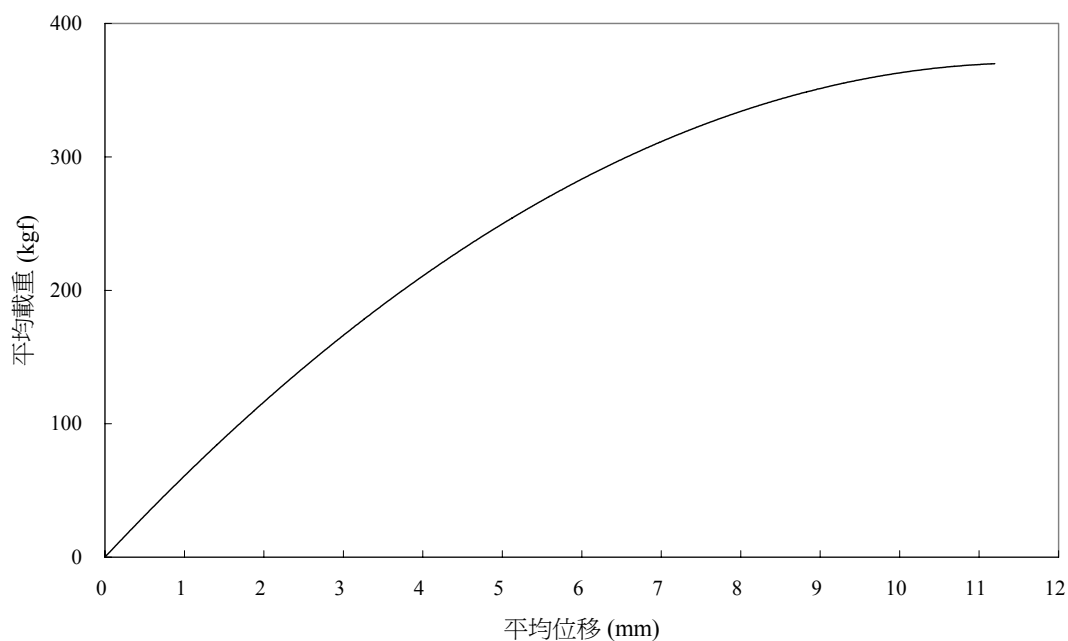


表 6-5 UP 組靜曲試驗結果

試體編號	靜曲試驗極限載重 (kgf)	靜曲試驗平均極限載重 (kgf)	靜曲試驗極限位移 (mm)	靜曲試驗平均極限位移 (mm)	破壞模式
UP-1	436.40		13.96		撓曲破壞(撓曲破壞處 CFRP 斷裂)
UP-2	351.20		10.17		水平剪斷破壞(水平剪斷破壞處 CFRP 斷裂)
UP-3	376.80	394.56	9.83	11.20	水平剪斷破壞(水平剪斷破壞處 CFRP 斷裂)
UP-4	460.00		12.12		水平剪斷破壞(水平剪斷破壞處 CFRP 斷裂)
UP-5	348.40		9.90		壓縮破壞

## 五、對照組與補強組三點抗彎試驗綜合比較

## ●補強效益探討

木構件短梁（長-短梁臨界跨深比為 5:1）對照組（C 組）與補強組（U 組、P 組以及 UP 組）相較之下，P 組（張力側平貼一層 CFRP）、U 組（張力側 U 字型貼覆一層 CFRP）以及 UP 組（張力側 U 字型貼覆一層 CFRP 後再平貼一層 CFRP）極限載重提昇百分比分別為 26.38%、40.01%以及 64.29%；極限位移增加百分比分別為 69.17%、68.12%以及 68.42%；各組試材極限載重與極限位移提昇（減少）比較圖表如圖 6-25、圖 6-26、圖 6-27 以及表 6-6 所示。

由表 6-6、圖 6-25、圖 6-26 以及圖 6-27 可以發現補強組與對照組相較之下，極限載重以及極限位移均會提昇，極限載重提昇效能以 UP 組>U 組>P 組，探究其原因為 U 字型貼覆增加部分圍束之力量而使極限載重有提高之現象；極限位移提昇效能在 UP 組、U 組以及 P 組間之差異性不大。

表 6-6 對照組與補強組三點抗彎測試結果以及補強提昇效能

組別	Pu (kgf)	COV (%)	PuP (%)	PuV (kgf)	Du (mm)	COV (%)	DuP (%)	DuV mm
C	240.16	12.0	—	—	6.65	8.4	—	—
P	303.52	17.2	26.38	63.36	11.25	15.7	69.17	4.60
U	336.24	9.1	40.01	96.08	11.18	15.4	68.12	4.53
UP	394.56	12.9	64.29	154.4	11.20	16.2	68.42	4.55



圖 6-25 對照組與補強組極限載重提昇（減少）效能比較圖

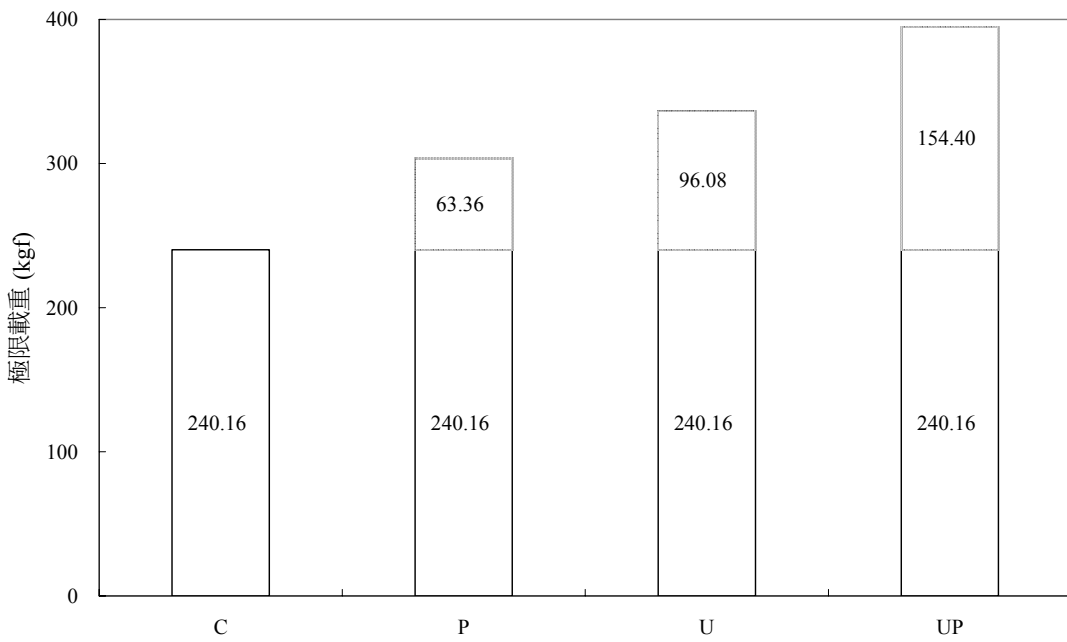


圖 6-26 對照組與補強組極限位移提昇（減少）效能比較圖

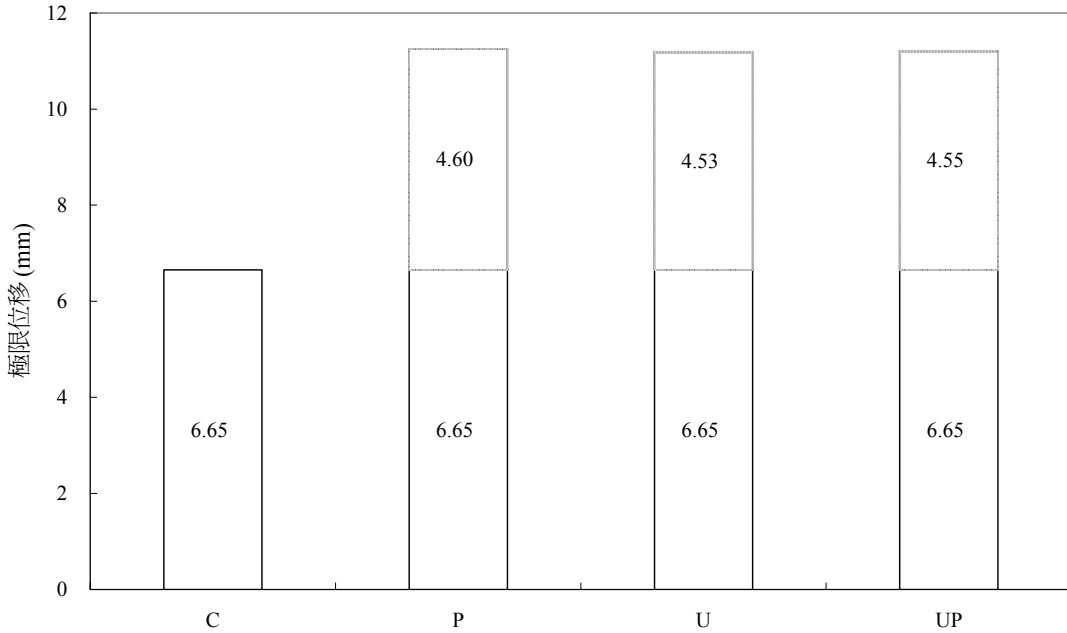
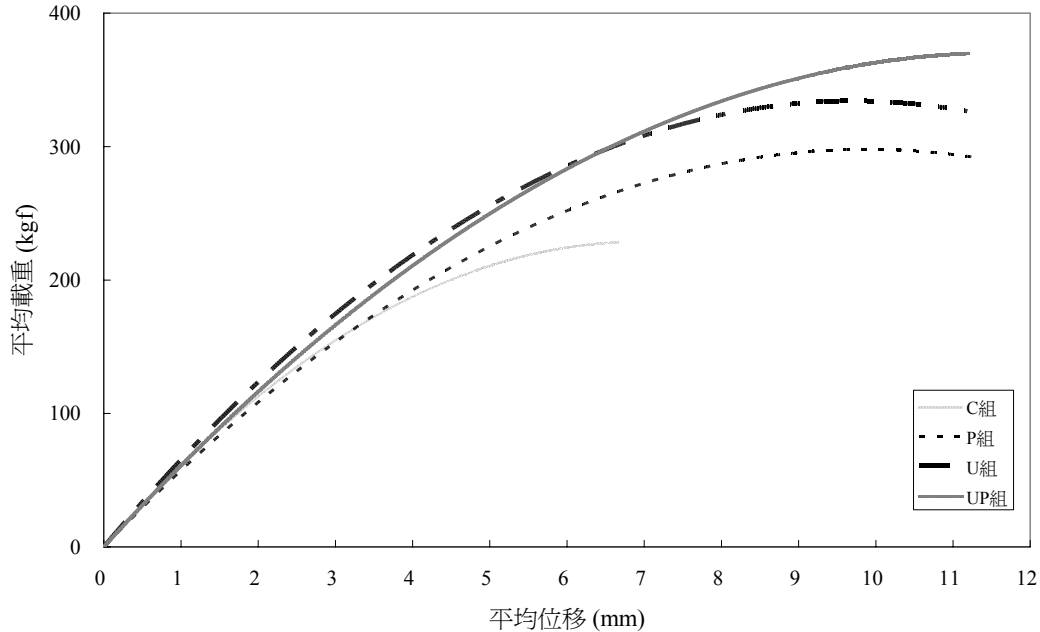


圖 6-27 對照組與補強組試材平均載重-位移曲線圖



#### ● 靜曲試驗後破壞模式探討

對照組（C組）之破壞模式分別為撓曲破壞模式以及撓曲-水平剪斷破壞混合模式；經由張力側平貼 CFRP（P組）後其破壞模式共計有撓曲破壞模式、撓曲破壞-水平剪斷破壞混合模式、撓曲破壞-水平剪斷破壞-剪力破壞混合模式；經由張力側 U 字型貼覆一層 CFRP 後（U組）其破壞模式皆為水平剪斷破壞（水平剪斷處 CFRP 斷裂）；經由張力側 U 字型貼覆一層 CFRP 後再張力側平貼一層 CFRP（UP組），其破壞模式共計有撓曲破壞（撓曲處 CFRP 斷裂）、水平剪斷破壞（水平剪斷處 CFRP 斷裂）以及壓縮破壞等三種且大部分為水平剪斷破壞。

由 P 組之破壞模式可以看出由 CFRP 平貼木構件短梁之張力側可有效抗彎（木構件張力側平貼處之 CFRP 仍未斷裂），最後應力集中於木構件弱面而產生水平剪斷破壞；由 U 組之破壞模式可以看出由 U 字型貼覆 CFRP 於木構件短梁之張力側可有效抗彎（木構件張力側範圍之 CFRP 仍未斷裂），最後應力集中於木構件弱面而產生水平剪斷破壞且水平剪斷處 CFRP 斷裂，探究其原因為 CFRP 纖維方向與木構件木理方向平行之貼覆方式不能有效抗水平剪

斷力；由 UP 組之破壞模式可以看出由 U 字型貼覆 CFRP 後再由張力側平貼一層 CFRP 於木構件短梁可有效抗彎；最後應力集中於木構件弱面而產生水平剪斷破壞且水平剪斷處 CFRP 斷裂，探究其原因與 U 字型貼覆相同，為 CFRP 纖維方向與木構件木理方向平行之貼覆不能有效抗水平剪斷力。

## 第七章 結論與建議

## 第一節 結論

## 一、彎矩補強

彎矩補強抗彎測試後分別探討：(1) 相同斷面面積損失百分比以及不同 CFRP 包覆層數條件下，B-A~B-E 組補強組與對照組相較下，在強度、剛性以及韌性之提昇（減少）效能（表 7-1）；(2) 相同 CFRP 包覆層數以及不同斷面面積損失百分比條件下，B-A~B-E 組損失斷面與健全斷面比較下，在強度、剛性以及韌性之提昇（減少）效能（表 7-2）；(3) 不同斷面慣性矩與平均極限應力之探討（表 4-17、圖 4-59），以下分別詳述分析結果：

**表 7-1 B-A~B-E 組相同斷面面積損失百分比及不同 CFRP 包覆層數條件下，CFRP 補強後極限載重以及極限位移增加（減少）百分比**

補強效能 組別	對照組		1 層 CFRP		2 層 CFRP		3 層 CFRP	
	Pu (%)	Du (%)	Pu (%)	Du (%)	Pu (%)	Du (%)	Pu (%)	Du (%)
B-A	0.00	0.00	25.81	50.16	40.83	70.57	86.23	76.64
B-B	0.00	0.00	67.34	42.23	66.13	25.32	77.46	18.69
B-C	0.00	0.00	19.08	21.54	19.94	8.60	60.95	22.67
B-D	0.00	0.00	14.64	22.17	20.57	22.35	37.76	10.18
B-E	0.00	0.00	13.89	(11.49)	34.34	(17.47)	38.27	(14.52)

表 7-2 B-A~B-E 組在同一 CFRP 包覆層數下，其健全斷面以及非健全斷面極限載重以及極限位移增加（減少）百分比

補強效能 組別	對照組		1 層 CFRP		2 層 CFRP		3 層 CFRP	
	Pu (%)	Du (%)	Pu (%)	Du (%)	Pu (%)	Du (%)	Pu (%)	Du (%)
B-A	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
B-B	(21.07)	(3.52)	5.00	(8.62)	(6.88)	(29.12)	(24.78)	(35.17)
B-C	(8.47)	1.97	(13.36)	(17.47)	(22.04)	(35.08)	(20.89)	(29.19)
B-D	(19.21)	(5.00)	(26.38)	(22.71)	(30.83)	(31.86)	(40.24)	(40.74)
B-E	(29.46)	5.57	(36.14)	(37.77)	(32.71)	(48.92)	(47.63)	(48.91)

1. B-A~B-D 組之對照組與補強組相較之下，補強組其強度、剛性以及韌性均會提昇（參照表 7-1、圖 4-18、圖 4-26、圖 4-34、圖 4-42）。
2. B-E 組之對照組與補強組相較之下，補強組其強度與剛性均會提昇而韌性卻減少（參照表 7-1、圖 4-50），其原因乃斷面孔洞太大時，會造成試材在靜曲試驗中在壓力側產生壓潰破壞，且經由觀察試體破壞現況得知 B-E 組於張力側有包覆 CFRP 以及未包覆 CFRP 之試材有 16 支產生壓力側壓潰破壞；4 支（張力側未貼覆 CFRP 佔 1 支；張力側貼覆 1 層 CFRP 佔 2 支；張力側貼覆 3 層 CFRP 佔 1 支）產生水平剪斷破壞。
3. 以彎矩補強效益而言，CFRP 補強層數越多，木梁構件極限強度以及中點垂直變位增加之效能有減緩之趨勢。
4. 從實驗數據分析結果以及平均載重-位移曲線圖表發現，在同一 CFRP 貼覆層數以及不同斷面面積損失百分比之條件下，貼覆 1~3 層 CFRP 之極限載重以及中點垂直變位均隨著斷面面積損失百分比增加而減少量有增加之趨勢，探究此現象為以 CFRP 強化木梁張力側而造成木梁底部剛性過大，而在抗彎測試時應力會集中於孔洞邊緣，且孔洞大小與極限載重、中點垂直變位減少量成正比之關係。
5. 從各組試材對照組與補強組之平均極限應力與斷面慣性矩損失量關係圖

(圖 4-59) 可以發現斷面慣性矩減少範圍在 0~3.68% (I 值介於 6.75~6.50  $\text{cm}^4$ ) 之平均極限應力值變動較大; 斷面慣性矩減少範圍在 3.68%~7.63% (I 值介於 6.50~6.23  $\text{cm}^4$ ) 之範圍平均極限應力有下降之趨勢; 斷面慣性矩減少範圍在 7.63%~17.04% (I 值在 5.6  $\text{cm}^4$  以下) 之平均極限應力趨於平緩。

## 二、木構件短梁補強

1. 本研究以 CNS454 木材靜曲試驗法之標準長度為基準 (不包含支承外長度之跨深比為 14:1), 進行木構件 (杉木: *Cunninghamia lanceolata*) 力學行為之測試, 靜曲試驗後發現在跨深比為 5:1 之狀況下, 木構件之破壞模式由撓曲破壞轉為水平剪斷、剪力以及前述破壞模式之混合模式, 並經實驗多種材種, 而決定出 5:1 之跨深比為長-短梁之臨界跨深比。
2. 木構件短梁藉由張力側平貼一層 CFRP (P 組)、張力側 U 字型貼覆一層 CFRP (U 組) 以及張力側 U 字型貼覆一層 CFRP 後再平貼一層 CFRP (UP 組) 後進行三點抗彎測試, 測試結果與對照組 (未貼覆 CFRP) 相較之下可以發現, 木構件短梁之極限載重增加百分比為 26.38%、40.01% 以及 64.29%; 中點極限位移增加百分比分別為 69.17%、68.12%、68.42%。
3. 補強組極限載重增量以 UP 組 > U 組 > P 組, 探究其原因為 U 字型貼覆增加部分圍束作用而增加極限載重; 而極限位移增量相差不遠。
4. 由對照組與補強組破壞模式相較之下發現, 補強組均可有效抗彎且應力會沿木構件之弱面產生應力集中而造成水平剪斷破壞, 水平剪斷處之 CFRP 有產生斷裂之現象, 探究其原因為 CFRP 纖維方向與木構件木理方向平行之 U 字型貼覆方式不能有效抵抗水平剪斷力。

## 三、CFRP 貼覆木構件施工標程序

1. 彎矩補強木構件同時, 全程進行 DV 之拍攝, 影片中有施工步驟及施工注意事項之講解。
2. 詳細文字說明已記載於報告書中。

## 第二節 建議

### 一、彎矩補強

1. 靜曲試驗時會因為木構件底部進行碳纖維的補強而使得剛性過大，造成應力集中於孔洞邊緣，而造成木構件破壞；且孔洞越大，其補強效益越差；建議後續進行環氧樹脂填補孔洞或是使用碳纖維棒的技術來增加木構件補強效能之研究。
2. 由斷面慣性矩減少量與平均極限應力關係圖（圖 4-59）發現斷面慣性矩損失的幅度在 7.63%~17.04%之範圍時，其平均極限應力有趨於平緩的趨勢，建議後續進行木構件孔洞與平均極限應力之關係進行更深入之探討；並且建立不同樹種之資料庫，往後就可依據資料庫查得在那一個斷面慣性矩損失百分比幅度下，木構件底部彎矩補強效益不大，得採用其它的工法來克服。

### 二、木構件短梁補強

1. 由於木構件短梁補強後之最終破壞模式為水平剪斷破壞佔大部分，因此建議 CFRP 纖維方向與木構件方向成垂直之貼覆方式來增加其抵抗水平剪斷之能力。
2. 本研究已經建立杉木之長-短梁臨界跨深比，往後可進行其它材種之測試，以瞭解不同材種間與長-短梁臨界跨深比之關係。

## 附錄一 審查意見及專家座談

## 一、期中審查意見

	審查意見	說明
文建會 廖委員	木料損壞程度不一，使用CFRP修復工法是否不同？	木料損壞類型、程度、範圍不同均可能影響CFRP修復使用之層數與貼附方向。本研究尚屬基礎研究，主要研究CFRP補強木構件之可行性與有效性，未來可朝委員建議方向繼續推動實務研究。
張委員 崑振	古蹟與歷史建築木料損壞與補強之部位大多在樑頭，所以CFRP補強木梁研究對古蹟之助益、侷限性（如彩繪、新舊木料適用情形）須澄清說明。	謝謝委員寶貴建議。日式與西式木構造建築物於梁中亦有受力，因此梁有可能發生彎矩或剪力破壞。至於樑頭部份將是往後研究重點。
黃委員 德琳	研究應明示所用木料、Epoxy，並提簡單補強範例。	遵照辦理，謝謝委員。
符委員 宏仁	CFRP補強圓形斷面木梁是否進行？	日式與西式木構造建築物之木構件大多是矩形斷面。本研究由於考慮到CFRP須補強於古蹟不外露之部位（如日式木構天花以上之木料），因日式木構很多為矩形斷面，所以實驗初步僅進行矩形斷面木梁之CFRP補強。CFRP補強適用範圍於期末會加以說明。
符委員 宏仁	木料試體不均質是否以材等來規範，使得實驗變異變小。	遵照辦理，謝謝委員寶貴建議。
符委員 宏仁	建議本案期末舉辦說明會。	謝謝委員寶貴建議。研究團隊會配合建研所辦理。



## 二、期末審查意見

專家學者	審查意見	回覆
李東明 博士	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 碳纖維強化高分子複合材料有做在實際木構件的案例上嗎?</li> <li>2. 碳纖維強化高分子複合材料其適用性以及 SOP 如何?</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 國外有使用在集成梁及歷史建築上 (如第二章第三節所示), 國內則尚無案例。</li> <li>2. 適用性有待開發, 如應用在日式以及西式木構架隱蔽處, 例如天花板上方之木構件。</li> </ol>
林鴻志 建築師	<p>內文之破壞模式很多, 其中的撕裂乃因 CFRP 受拉很大, CFRP 與 RC 間的介面若是撕裂, 在 RC 可加鋼釘、鋼板來加強; 但 CFRP-木材發生部位不在介面, 而在木材本身, 木材破壞原因解說可加強</p>	<p>由於木材為異方性材料, 又會因為含水率變化、木材的節、木理傾斜角、密度等而造成強度有變異性, 因此本研究大部分將試材裁切成無缺點小試材且含水率控制在 12%~15% 之間, 因此先天存在之缺點在肉眼可及的部分已經去除; 然木材又會因組織之變異性而在抗彎測試時產生弱面之應力集中現象, 往後研究會注意木材本身所造成之影響因素。</p>

三、專家座談 (綜合二次)

專家學者	審查意見	回覆
陳清泉教授	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 該研究實驗結果對學術有不少之貢獻。</li> <li>2. 表 7-1 發現 E 組試材 (鑽孔孔徑為 2.2 cm) 之韌性沒有提昇之原因是否為壓力側之破壞模式?</li> <li>3. 建議後續研究進行鑽洞處填補材料以增加斷面之慣性矩, 看補強效益為何。</li> <li>4. 該研究木構件長-短梁臨界跨深比為 5:1 與鋼筋混凝土梁之深梁有相似之結果。</li> <li>5. 內文之圖標號置於上方與一般常用之格式不符。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 謝謝審查委員誇獎。</li> <li>2. 觀察試材破壞處發現, 試材的確為壓力側之破壞模式; 並以文字於內文中說明。</li> <li>3. 往後會進行環氧樹脂或是 CFRP 棒的方式來填補孔洞, 瞭解其補強效益。</li> <li>4. 本研究之臨界跨深比為經多種樹種實驗而決定之比例, 雖為不同之材料, 但與鋼筋混凝土深梁之跨深比有相似之比例。</li> <li>5. 本文所引用之格式為內政部建築研究所規定之格式。</li> </ol>
王松永教授	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 木材之特性係抗張 (拉) 強度 (<math>\sigma_{tb}</math>) 大於抗壓強度 (<math>\sigma_{cb}</math>), 而撓曲則是抗壓撓曲大於抗張 (拉) 撓曲, 因此在抗彎載重時, 抗壓變形會先發生, 壓潰也會較早產生, 使得其中立軸會向抗張側下移 (相關式及資料如表 1、圖 1 及式 1 所示)。本試驗在抗張側貼附 CFRP 等於將在抗張側之變形由 CFRP 薄片承受, 在理論上是合理, 只是所設計之缺點 (中空) 之位置是在斷面中央, 如能向下移至靠近抗張側, 其補強效果亦可更明顯。</li> <li>2. 抗彎試驗採中央集中載重, 如缺點設計在載重點下方, 其補強效果將可明顯表現出; 在此似乎看不到剪力破壞情形? 如能採四點載重, 其情況又如何? 因在兩載重點之間會顯現出純彎矩 (Pure Bending) 特性。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 往後研究將進行木梁抗張側斷面損壞之補強研究, 以驗證其補強成效。</li> <li>2. 往後會進行木梁構件以 CFRP 補強之三點與四點抗彎測試相關研究, 並設計缺點在載重元下方, 且驗證在不同補強成效下其補強效益是否可更明確突顯出來。</li> <li>3. 遵照辦理。</li> <li>4. 由於本研究木構件短梁跨距為 10 cm 左右, 使用超音波檢定儀有儀器本身之侷限性, 研究團隊往後會進行相關之實驗測試, 看是否能進行修正。由於內文未進行超音波修正之探討, 短梁之物理性質量測部分已將超音波數據去除不用。</li> <li>5. 本試驗彎矩補強試材與木構件短梁補強構件在抗彎測試時, 大部分斷面均控制在徑切面。</li> </ol>

	<ol style="list-style-type: none"> <li>3. 內文各種試驗數據均以平均值表示，希望附上其標準差，以瞭解其變異性。</li> <li>4. 木材縱向超音波一般在4000~5500 m/s 之間，但在本實驗部分達 6000~7000 m/s (表 5-2~表 5-5)，有些偏高。</li> <li>5. 木材抗彎性質會受徑切面或弦切面載重之影響，如日本扁柏其徑切面載重大於弦切面 7.4% (<math>\sigma_{bb}</math>)，6.9% (MOE)；而在弦切面載重時，則木裏面載重會大於木表面載重 2%~5%。而本實驗是否有控制其載重面？</li> <li>6. 在試材中央有孔洞很大時，可以用同樹種或類似之木棒或木條；較小者可以用木片或木屑混合以環氧樹脂填充之。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>6. 謝謝委員建議，往後研究團隊將進行一系列增加孔洞斷面慣性矩之補強措施。</li> </ol>
<p>高健章 教授</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 文內常提到撕裂破壞，認為語意有不清楚之感覺，若能以力學觀念詳加解釋，如剪力、撕拉裂等應力觀念說明，更為完美。</li> <li>2. 文內也提到應力集中現象之破壞，也有解釋不明之感覺，若是該破壞處已有先天之缺陷存在，就明確指出。</li> <li>3. 該研究對木梁之補強已有試驗結果，若能舉出一實例之可應用方向給做參考，更可加強本研究之實用價值。</li> <li>4. 將來進一步應用時，可能補強時要有預拱之觀念，以利用本研究之彎曲變位數據。</li> <li>5. 與文獻相較之下，本研究之特色是否可以強調？</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 全文之撕裂破壞均按照林產用語改成水平剪斷破壞。</li> <li>2. 由於木材為異方性材料，在進行強度測試時會因為含水率變化、木材的節、木理傾斜角、密度等而有變異性，因此本研究大部分將試材裁切成無缺點小試材且含水率控制在 12%~15%之間，因此先天存在之缺點在肉眼可及的部分已經克服；然木材又會因組織之變異性而在抗彎測試時產生弱面之應力集中現象，從肉眼實在很難以辨識出來。</li> <li>3. 研究團隊會儘量收集相關文獻以及案例。</li> <li>4. 謝謝委員建議，後續研究將會考慮。</li> <li>5. 謝謝委員建議，內文將儘量進行文獻與本研究之比對，強調本研究之特色。</li> </ol>
<p>林至聰</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 是否能舉一些案例來說明 CFRP 之適用性？</li> <li>2. 地震力的影響是否引申？</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 如內文第二章第三節所示。</li> <li>2. 地震力影響木構架最嚴重的部分為接頭部位，本研究為基礎研</li> </ol>

<p>教授</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>3. 木構件短梁之 P 組 (張力側平貼一層 CFRP), 是否探討在張力側平貼二~三層之比較?</li> <li>4. 本研究之補強效益都是用以百分比來表示, 建議加入增加值之方式來比對補強效益; 又圍束補強之方式與構件之尺寸有關。</li> <li>5. 木材之變異性大, 各組試材均是用平均值之方式來表示, 是否在內文中加入標準差來表示其變異性?</li> <li>6. 全文格式統一</li> </ol>	<p>究, 往後在國家地震中心有一系列探討足尺寸木構架接頭抗震力之研究以及補強措施。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>3. 本研究附錄三為前期之研究成果, 該研究中已經建立木梁-CFRP 彎矩補強之理論模式, 往後只要將材料基本性質輸入該程式中, 即可決定 CFRP 補強之效益。</li> <li>4. 遵照辦理。</li> <li>5. 遵照辦理。</li> <li>6. 遵照辦理。</li> </ol>
<p>蔡仁惠教授</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 建立施工標準程序對學術及業界貢獻良多。</li> <li>2. 若能在引張或壓力側進行挖洞, 並以 CFRP 補強, 則補強之效益更為明顯。</li> <li>3. 現地之蟲蛀不可能那麼均質, 是否往後的研究可進行現地木構材之蟲蛀損壞進行分類, 並進行相關之補強措施, 將使得學理跟實務結合。</li> <li>4. 是否考慮尺寸效應? 如小梁補一層 CFRP 就夠了, 大梁需補一層以上。</li> <li>5. 本研究 5:1 之跨深比數據可與 Wood Structure Design 互相比較。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 謝謝委員誇獎。</li> <li>2. 謝謝委員建議, 後續研究將會考慮。</li> <li>3. 後續研究將到現地調查, 進行古蹟木構件蟲蛀損壞現況調查, 並進行損壞模式分類且依不同之損壞模式進行補強措施。</li> <li>4. 本研究附錄三為前期之研究成果, 該研究中已經建立木梁-CFRP 彎矩補強之理論模式, 往後只要將材料基本性質輸入該程式中, 即可決定 CFRP 補強之層數。</li> <li>5. 謝謝委員建議。</li> </ol>



## 附錄二 孔洞對木材強度之影響

當建構木構造結構時，通常都必需鑽孔穿過其構件，經由像是鉚釘和螺栓等扣件工具來結合在一起。在木構造構件上的這些孔洞必須檢查以避免應力集中。為確保構件有適當設計為將來利用抵抗力量是非常重要的設計原則。

孔洞可能有兩種情況會造成減少構件的強度。一為減少構件斷面部份的材料面積；二為可能會有好幾倍之平均應力之應力分佈在孔洞的邊緣（此現象稱為應力集中）和這種應力集中造成構件強度減弱效果比斷面減少造成構件強度減弱之效果還要明顯。由於木材為可塑性之材料，局部應力集中將可能因此材料而被緩和。假若這個推論正確，孔洞造成的構件強度減弱效果可由減少構件斷面而被計算出，構件剩餘強度能容易地被決定。如果一定要考慮壓力集中，而設計問題變得更複雜。以下將提出一套計算有孔洞木構件的強度計算公式（線彈性範圍）。

當一個斷面有孔洞穿過的時候，梁因為孔洞減少材料斷面時，必需考慮中性軸和慣性矩兩者的改變。沒有鑽孔洞梁的破裂模數（Modulus of Rupture, MOR）表示如下式：

$$\text{MOR} = \frac{M}{I} \bar{y} \quad (1)$$

其中  $M$  = 極限彎矩

$\bar{y}$  = 中性軸到底端纖維之距離

$I$  = 梁慣性矩

如果我們假定沒有應力集中在孔洞的周圍，那麼有孔洞的梁它的破裂模數被發現有相似的公式（下標  $H$  表示梁有孔洞）；即

$$\text{MOR}_H = \frac{M}{I_H} \bar{y}_H \quad (2)$$

其中  $M_H$  = 有孔洞木梁的極限彎矩

$\bar{y}_H$  = 有孔洞木梁中性軸到梁底端纖維之距離

$I_H$  = 有孔洞木梁慣性矩

假定一支有孔洞和無孔洞的木梁在破裂模數上是數值相等的，也就是

$$MOR_H = MOR$$

如果一支提供極限載重梁的集中載重能被忽略，那麼預期的彎矩比值為

$$\frac{M_H}{M} = \frac{I_H}{I} \times \frac{\bar{y}}{y_H} \quad (3)$$

如此一塊有孔洞斷面木材構件與一塊實心斷面木材構件之彎矩比，是與斷面的慣性矩成正比和中性軸到底端纖維的距離成反比例。

決定一個有孔洞在裡面的梁的剩餘應力比例，必需去計算  $I_H$ ， $\bar{y}_H$  和  $y_H$ ，並代入方程式 (3) 求解。

在這個研究上我們以矩形梁為例，有關梁的中性軸，和

$$\bar{y} = \frac{h}{2}$$
$$\frac{bh^3}{12}$$

其中  $b$  = 梁斷面寬度

$h$  = 梁斷面高度

只有能計算出  $I_H$  和  $\bar{y}_H$ ， $MOR_H$  即可求得。

以下考慮下列兩個類型。第一種類型為構件之孔洞是平行於應力載重作用線；第二種類型為構件之孔洞是垂直於載重軸線。在一些情形中，舉例來說，孔洞可能全部或部分穿過構件。這兩個情形連同上述兩種類型變化，將分述如下。

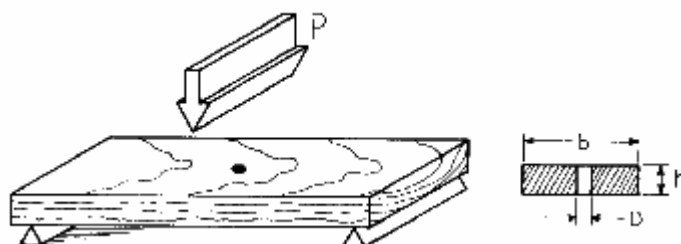
### ● Case 1a

當一個孔洞被鑽孔過一塊平行於載重作用線上的木材如圖 1a，當是一個實心梁時， $\bar{y}_H$  保持相等於  $h/2$ ；計算新慣性矩如

$$I_H = \frac{bh^3}{12} - \frac{Dh^3}{12} = \frac{(b-D)h^3}{12} \quad (5)$$

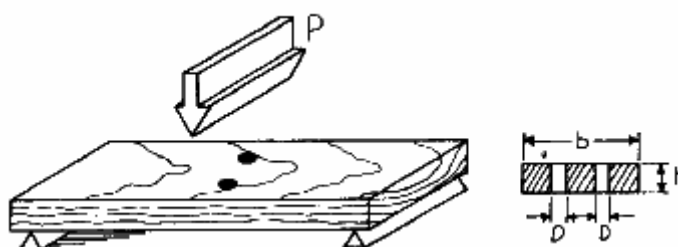
其中  $D$  = 孔洞的直徑

圖 1a 木梁試體平放位置和載重作用線平行



換句話說，對於這個特別的情形，損失的慣性矩與減少的彎矩力量對於孔洞的直徑是成比例的；也就是剩餘交叉斷面比例。這說明也陳述如有一個以上的孔洞鑽孔過構件在一已知斷面上，如圖 1b；在這情形，D 和孔洞的直徑總數相等。

圖 1b 有鑽兩孔洞的木梁試體，平放位置和載重作用線平行



**Case 1b**

如果一個孔洞經過構件，不是被鑽孔過所有地方，然而，計算變的更複雜。這情況表示如圖 2（顯示一個構件上的交叉斷面）。我們利用一點在任何面積上的力矩原理相等於代數量上的組成面積力矩總和來找中性軸。因此，如圖 3 所示，如果我們對一點取力平衡有關於底部的交叉面積，我們得到

$$(bh - Dd) \bar{y}_H = bh^2/2 - Dd^2/2 \tag{6}$$

或

$$\bar{y}_H = \frac{bh^2 - Dd^2}{2(bh - Dd)} \tag{7}$$



其中  $D$ =孔洞之直徑

$d$ =孔洞之深度

圖 3，一旦中性軸已經決定，慣性矩  $I_H$  可表示成中性軸之關係如下：

$$I_H = \frac{bh^3}{12} + bh(\bar{y}_H - h/2)^2 - \frac{Dd^3}{12} - Dd(\bar{y}_H - d/2)^2 \quad (8)$$

圖 2 鑽孔洞於梁底部與載重作用線示意圖 (Case 1b)

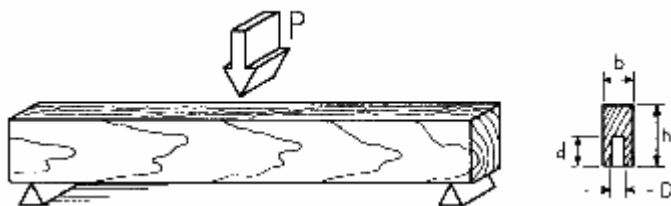
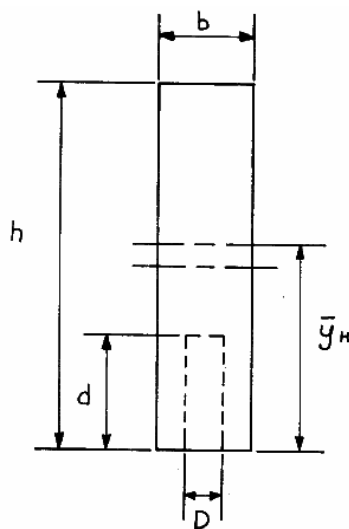


圖 3 鑽孔洞於梁底部斷面之示意圖 (Case 1b)



### Case 2a

當一個孔洞被鑽孔過一塊垂直於應力作用線上，如圖 4，發現中性軸和慣性矩需要一組新的表達方式。在梁腹版處鑽孔洞穿越斷面之示意圖 (如圖 5 所示)，如果我們對底部交叉面積取力平衡，我們獲得

$$(bh - bD) \bar{y}_H = bh \times \frac{h}{2} - bDw \quad (9)$$

其中  $w$ =從塊的底部到孔洞的中心距離。再重新整理得

$$\bar{y}_H = \frac{h^2 - 2Dw}{2(h-D)} \quad (10)$$

最後，解決有關中性軸  $I_H$

$$I_H = \frac{bh^3}{12} + (h/2 - \bar{y}_H)^2 - \frac{bD^3}{12} - bD(w - \bar{y}_H)^2 \quad (11)$$

圖 4 在梁腹版處鑽孔洞穿越斷面與載重作用線示意圖

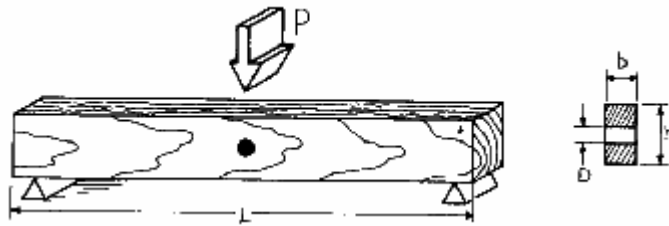
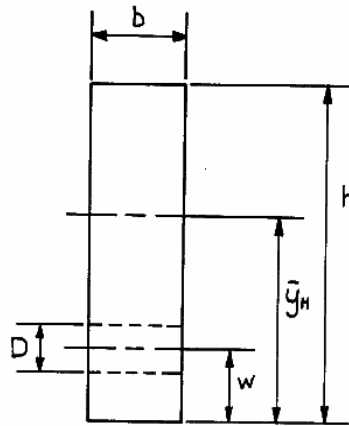


圖 5 在梁腹版處鑽孔洞穿越斷面之示意圖



**Case 2b**

當一個孔洞位於腹版處，但是不完全穿過斷面（如圖 6），在梁腹版處鑽部分孔洞斷面之示意圖如圖 7 所示，當

$$(bh - aD) \bar{y}_H = bh(h/2) - aDw \quad (12)$$

其中  $a$  = 孔洞在構件中的穿透深度

解出

$$\bar{y}_H = \frac{bh^2 - 2aDw}{2(bh - aD)} \quad (13)$$

計算有關這中性軸的新慣性矩

$$I_H = \frac{bh^3}{12} + bh(\bar{y}_H - h/2)^2 - \frac{aD^3}{12} - aD(\bar{y}_H - w)^2 \quad (14)$$

圖 6 在梁腹版處鑽部分孔洞與載重作用線示意圖

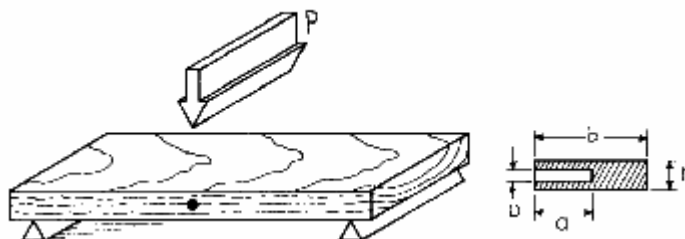
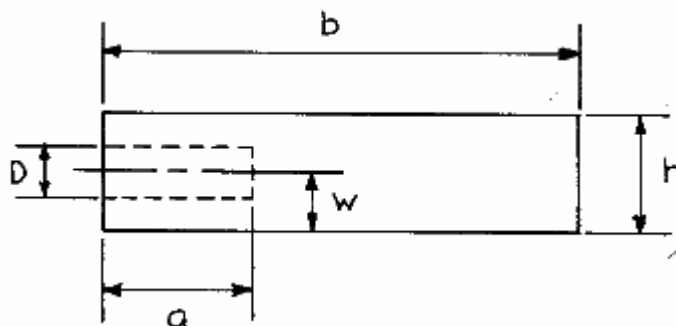


圖 7 在梁腹版處鑽部分孔洞斷面之示意圖



本附錄之圖片摘取於

Carl A. Eckelman, "Effect of Holes on Bending Strength of Wood and Particleboard Parts," Research Bulletin No. 922, June 1975, Wood Research Laboratory, Purdue University.

## 附錄三 CFRP 應用於木構件彎矩補強之理論推導及實驗

### 一、彎矩補強測試

本試驗主要的目標為選用適當的補強材料與膠合技術後，探討不同的 CFRP 貼片補強層數對木梁在強度以及垂直變位的影響，提出一個最好的補強方式。經四點抗彎試驗後，探究木梁構件之破壞模式，並以木梁彎矩補強理論分析結果與四點抗彎測試值作驗證比較，以提供往後木梁修復補強之可行性參考依據，以下詳述彎矩補強測試結果。

#### 1.1 彎矩補強測試結果

木構件梁為異方性材料，再加上木材有天然之缺點等，實驗時會造成不良的影響，因此本研究將四點抗彎測試得到不良數值的木梁剔除。由於木構件梁在實驗施測時，只達氣乾狀態，每一試材之含水率並不一致，因含水率將影響試材之強度，故本研究將所有試材之含水率調整成 12% 來進行比對。四點抗彎測試得之各組木梁構件之最大載重 (kgf) 以及最大載重對應之變位量 (mm) 整理如表 1 所示。

表 1 各試材極限載重及相對應之變位

組別	變位 (mm)	極限載重 (kgf)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	
A	A-1	26.00	675.13	0.61
	A-2	22.86	629.55	0.61
	A-3	16.92	542.73	0.61
B	B-1	52.00	837.72	0.61
	B-2	46.14	881.85	0.60
	B-3	52.25	947.45	0.60
C	C-1	38.00	840.40	0.56
	C-2	47.47	954.17	0.61
	C-3	53.39	1067.94	0.60
D	D-1	44.00	966.28	0.60
	D-2	49.80	987.85	0.59
	D-3	36.00	969.93	0.61
E	E-1	25.43	635.6	0.39
	E-2	17.96	441.43	0.40
F	F-1	34.65	702.34	0.43
	F-2	38.06	878.24	0.41
	F-3	52.00	810.82	0.40
G	G-1	42.73	918.43	0.45

	G-2	30.81	746.24	0.38
	G-3	38.64	819.02	0.44
H	H-1	36.00	908.06	0.45
	H-2	38.00	915.60	0.37
	H-3	37.17	945.65	0.44

本研究針對不同材種之木梁採用不同層數的 CFRP 進行張力側之彎矩補強，經由四點抗彎測試結果顯示如表 2 所示。

表 2 各組試材破壞模式之統整

組別	試材編號	破壞模式	圖片
A 組梁	A-1	撓曲破壞	1
	A-2	撓曲破壞	2
	A-3	撓曲破壞	3
B 組梁	B-1	撓曲破壞與碳纖維破裂	4
	B-2	撓曲破壞與碳纖維破裂	5
	B-3	撓曲破壞與碳纖維破裂	6
C 組梁	C-1	撓曲破壞與碳纖維脫層	7
	C-2	撓曲破壞與碳纖維脫層	8
	C-3	撓曲破壞與碳纖維破裂	9
D 組梁	D-1	撓曲破壞	10
	D-2	撓曲破壞	11
	D-3	撓曲破壞	12
E 組梁	E-1	撓曲破壞	13
	E-2	撓曲破壞	14
F 組梁	F-1	撓曲破壞	15
	F-2	撓曲破壞與木破率 50%之碳纖維脫層	16
	F-3	撓曲破壞與碳纖維斷裂	17
G 組梁	G-1	撓曲破壞	18
	G-2	撓曲破壞	19
	G-3	撓曲破壞	20
H 組梁	H-1	撓曲破壞	21
	H-2	撓曲破壞	22
	H-3	撓曲破壞	23

圖 1 撓曲破壞 (A-1)

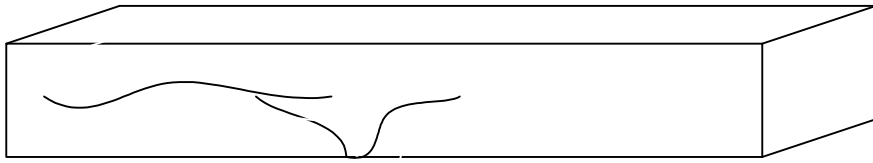


圖 2 撓曲破壞 (A-2)

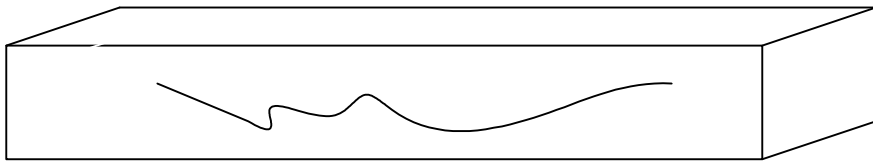


圖 3 撓曲破壞 (A-3)



圖 4 撓曲破壞+CFRP 斷裂 (B-1)

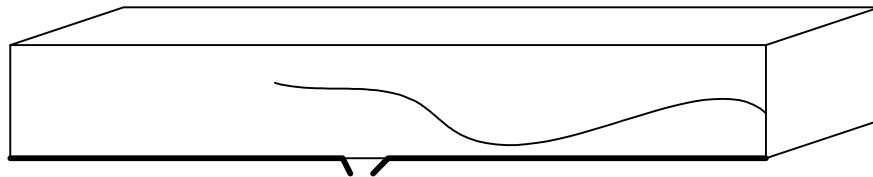


圖 5 撓曲破壞+CFRP 斷裂 (B-2)

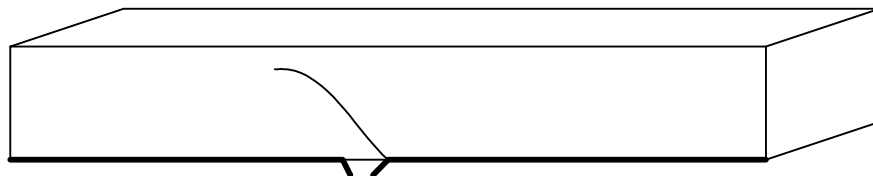


圖 6 撓曲破壞+CFRP 斷裂 (B-3)

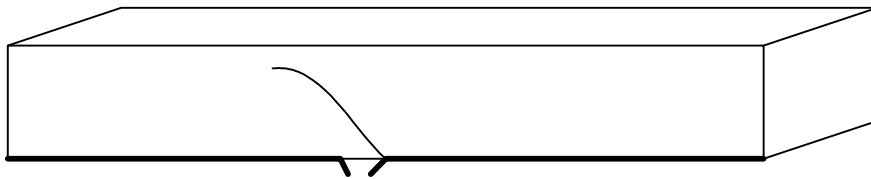


圖 7 撓曲破壞+CFRP 脫層 (C-1)

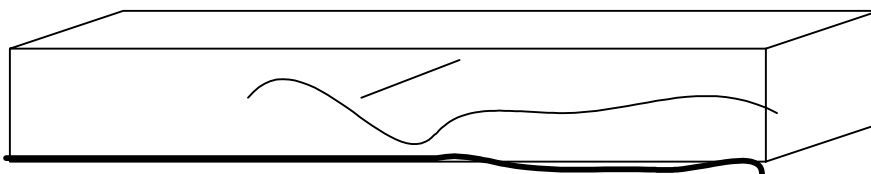


圖 8 撓曲破壞+CFRP 脫層 (C-2)

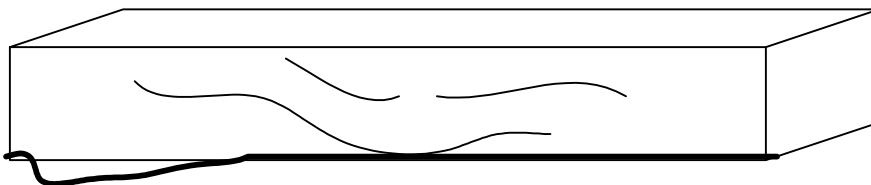


圖 9 撓曲破壞+CFRP 斷裂 (C-3)

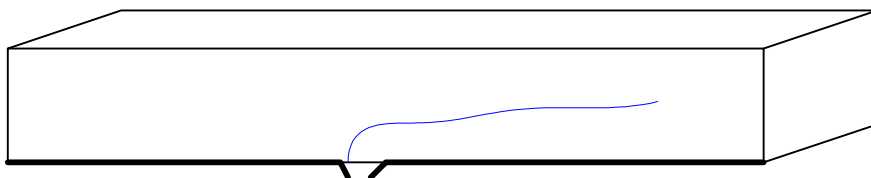


圖 10 撓曲破壞 (D-1)

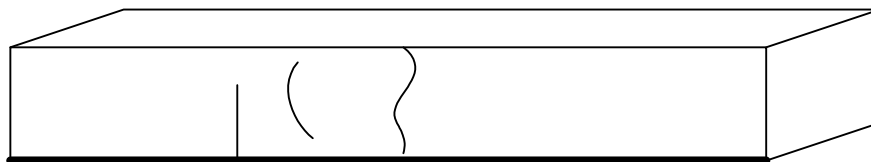


圖 11 撓曲破壞 (D-2)

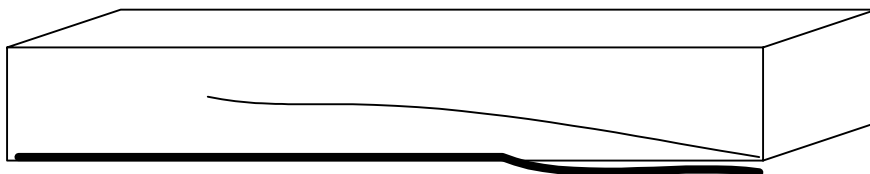


圖 12 撓曲破壞 (D-3)

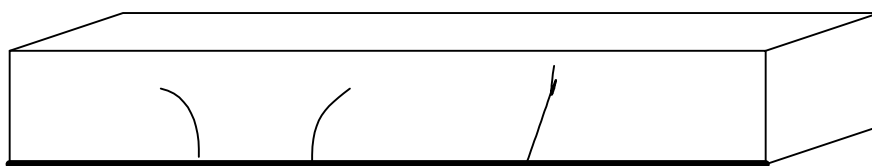


圖 13 撓曲破壞 (E-1)

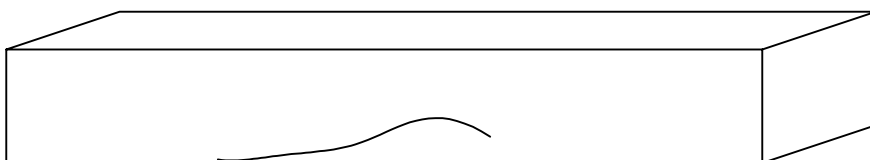


圖 14 撓曲破壞 (E-2)

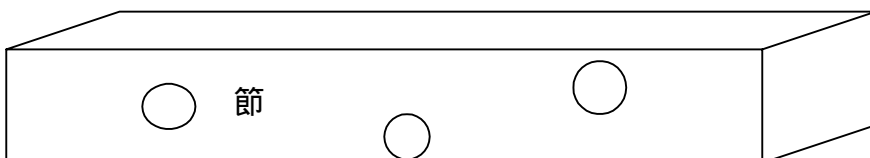


圖 15 撓曲破壞 (F-1)

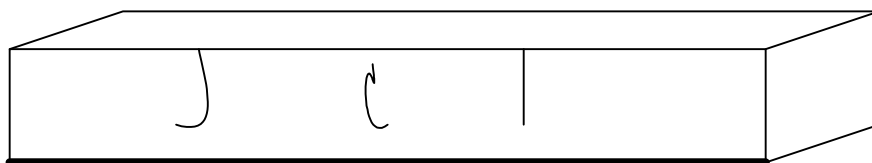




圖 16 撓曲破壞 (木破率 50%之 CFRP 脫層) (F-2)

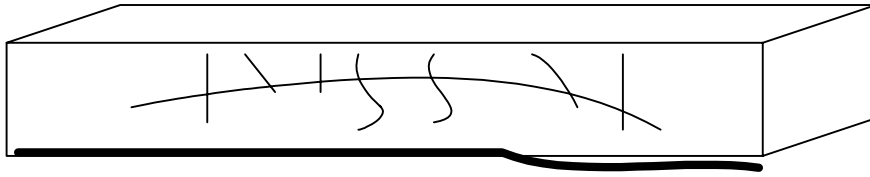


圖 17 撓曲破壞+CFRP 斷裂 (F-3)

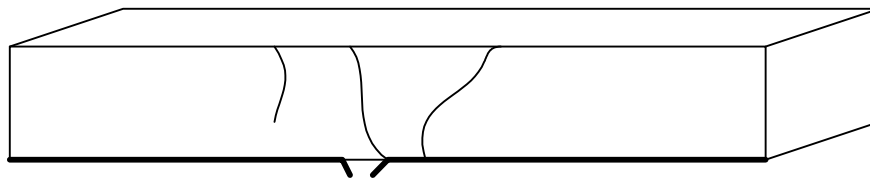


圖 18 撓曲破壞 (G-1)

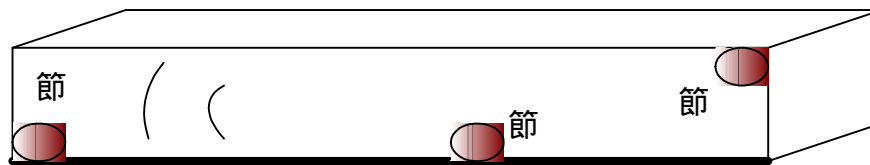


圖 19 撓曲破壞 (G-2)

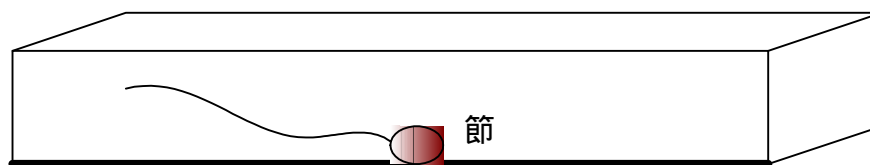


圖 20 撓曲破壞 (G-3)

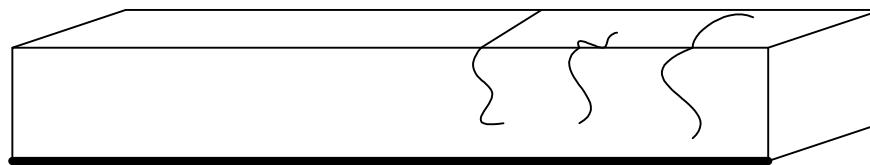


圖 21 撓曲破壞 (H-1)

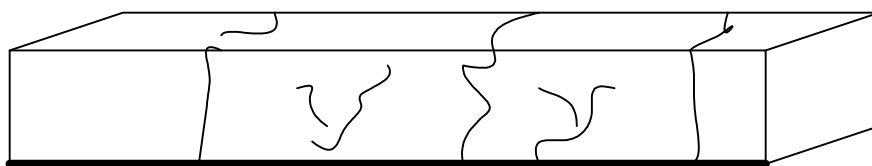


圖 22 撓曲破壞 (H-2)

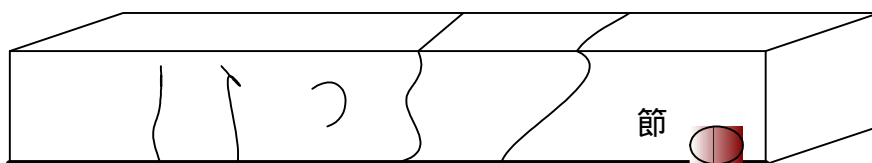


圖 23 撓曲破壞 (H-3)



## 二、彎矩補強實驗與理論驗證比較

彎矩補強理論推導式為模擬木梁受彎曲性質，此一性質受到木構材之壓力強度以及拉力強度所控制，因此必需要進行木構材的抗壓以及抗拉測試，才能得到材料的力學基本性質。以下各別詳述木構材基本材料力學性質的測試以及理論與實驗之驗證比較。

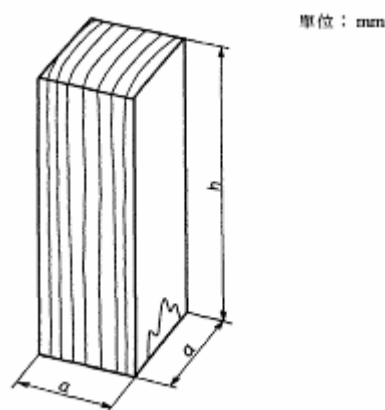
### 2.1 木構材壓縮與拉力性質測試

根據 CNS453 木材壓縮試驗法進行木構材縱向壓縮性質之測試，其內容如下：試體之邊長（厚度）為  $a=20\sim 40\text{mm}$  之正方形直六面體，高（ $h$ ）為  $2a\sim 4a$ ，如圖 24 所示。

- (1) 試體取其材軸與纖維向平行，其兩端面須注意與其長度方向成垂直或平行。
- (2) 將試體置於平面鋼板間，加壓載重，如認為有必要可使用球座。
- (3) 載重方向與纖維方向平行。

- (4) 平均載重速度為每分鐘 100 kgf/cm<sup>2</sup>。
- (5) 縮小測定之標點距離為距試體兩端 a/2 以上之距離。

圖 24 縱向壓縮試體



本研究進行杉木與鐵杉的壓縮測試，其尺寸皆為 3×3×6 (cm) 之試體 (圖 4.32)，將試材以 10 噸之萬能試驗機進行測試，在杉木與鐵杉之應力-應變圖如圖 25 及圖 26 所示；以往國外之學者 (Baumann 等人) 所研究的木構材壓縮與拉力之應力-應變曲線圖的關係得知，木構材之拉力彈性模數值比壓縮彈性模數值還大，因此本研究根據以往學者的經驗，利用壓縮所得之數值乘以所需的倍數，木構材之拉力性質即可推得。本研究之拉力降伏點應力為壓縮降伏點應力乘以 2.54 倍，拉力降伏點應變為壓縮降伏點應變乘以 1.73 倍，將上述之資料整理如表 3 所示。

杉木



鐵杉



圖 25 杉木之壓縮應力-應變曲線

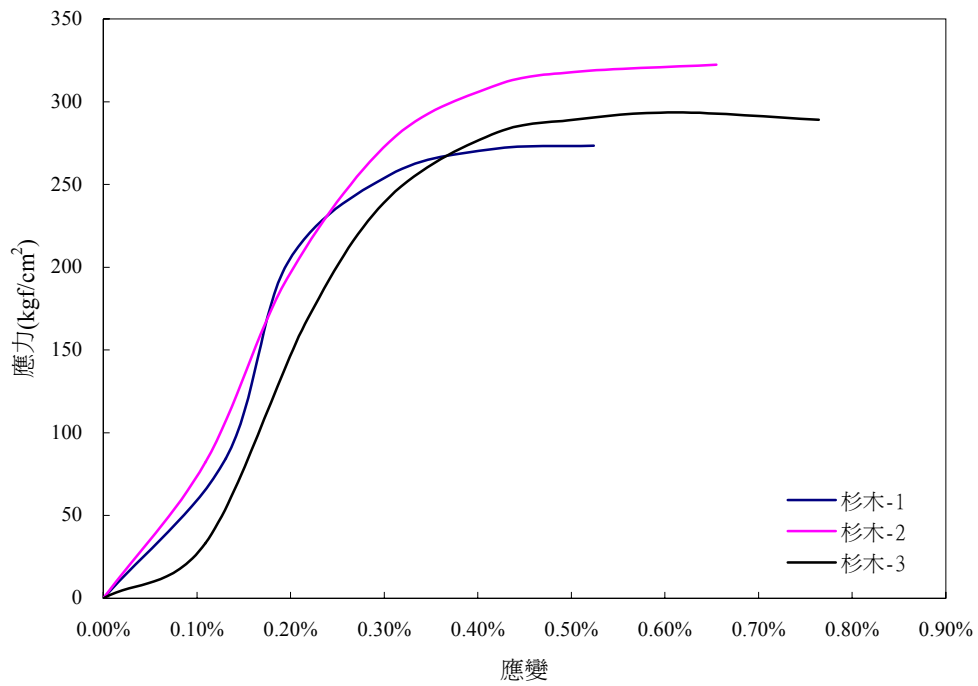


圖 26 鐵杉之壓縮應力-應變曲線

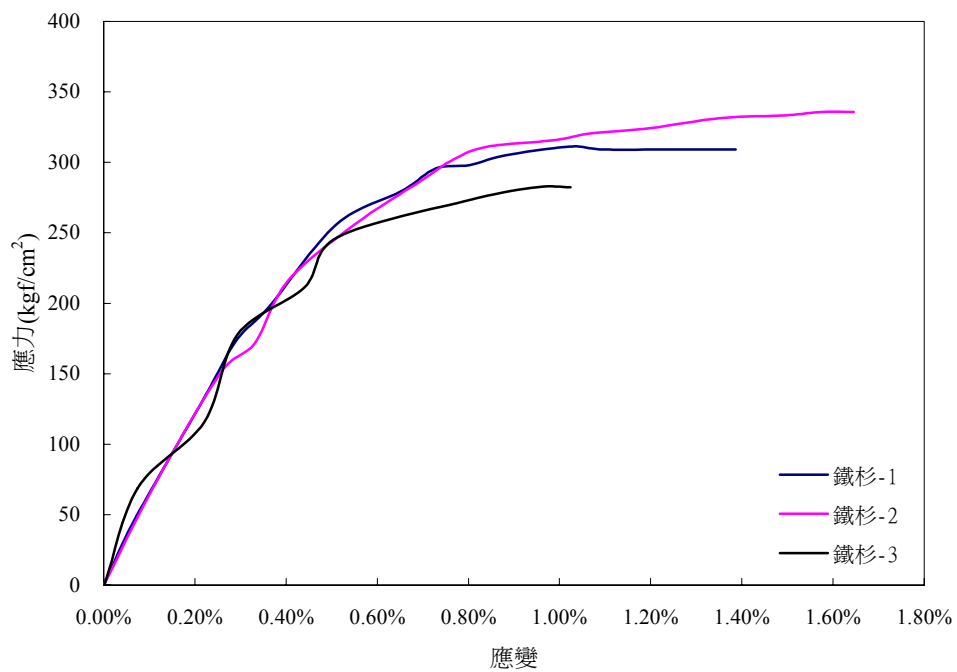


表 3 木構材之基本力學材料性質

壓縮性質	杉木	鐵杉
平均比例限度應力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	258	253
平均比例限度應變	0.003057	0.0052
平均壓縮彈性模數 (kgf/cm <sup>2</sup> )	84384	48213
平均最大極限應力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	295	309
平均最大極限應變	0.008	0.0135
拉力換算數值	杉木	鐵杉
平均拉應力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	655	619
平均拉應變	0.005298	0.0091
平均拉力彈性模數 (kgf/cm <sup>2</sup> )	123657	68148

## 2.2 彎矩補強理論與實驗驗證

依據表 3 之基本力學性質，利用迴歸的方法可以把彎矩補強理論所需之二次曲線方程式求出，杉木之迴歸方程式如圖 27 所示，程式分析整理之杉木理論彎矩-曲率圖（包覆 0~3 層 CFRP）如圖 28 所示、理論載重-變位圖（包覆 0~3 層 CFRP）如圖 29 所示、杉木之理論與實驗載重-變位比較圖如圖 30~圖 33 示。鐵杉之理論彎矩-曲率圖、理論載重-變位圖、理論與實驗之載重-變位比較圖如圖 34~40 所示。本研究所採用的萬能試驗機施力系統因屬於力量控制，因此要比較理論與實驗之載重-變位數值之誤差值，其誤差百分比的數值應採用實驗與理論極限載重之數值為依據。經由理論計算與四點抗彎測試之載重數值相較下，杉木與鐵杉之載重絕對誤差百分比均在 10% 以內，杉木及鐵杉理論與實驗測試之載重誤差百分比計算結果整理如表 4 所示。

圖 27 理論計算之杉木非線性階段二次曲線方程式圖

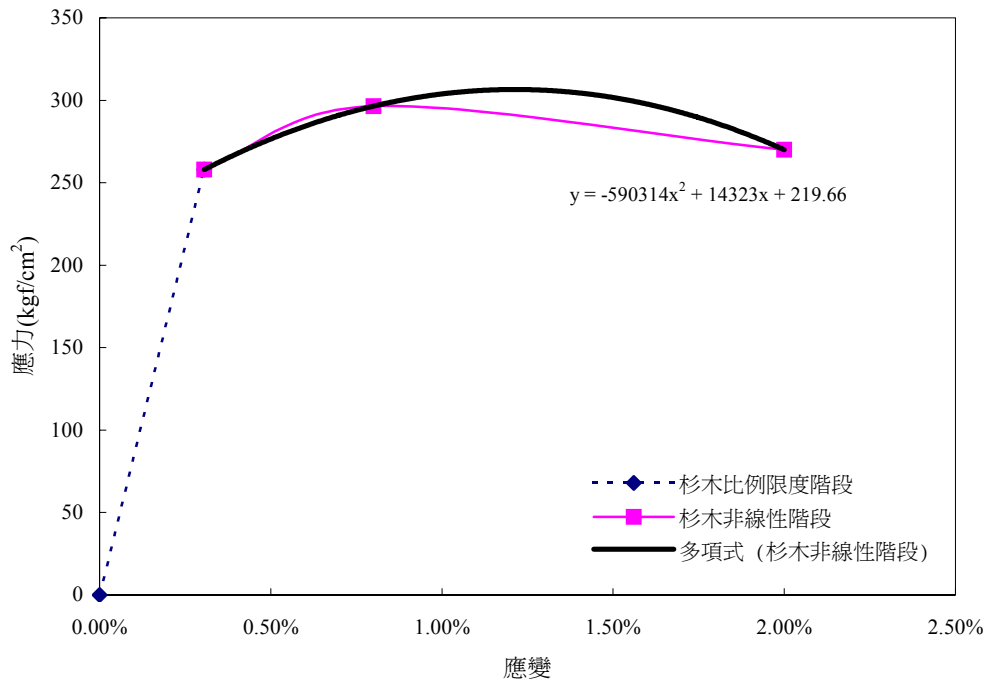


圖 28 理論計算之杉木彎矩-曲率圖 (包覆 0 層~3 層 CFRP)

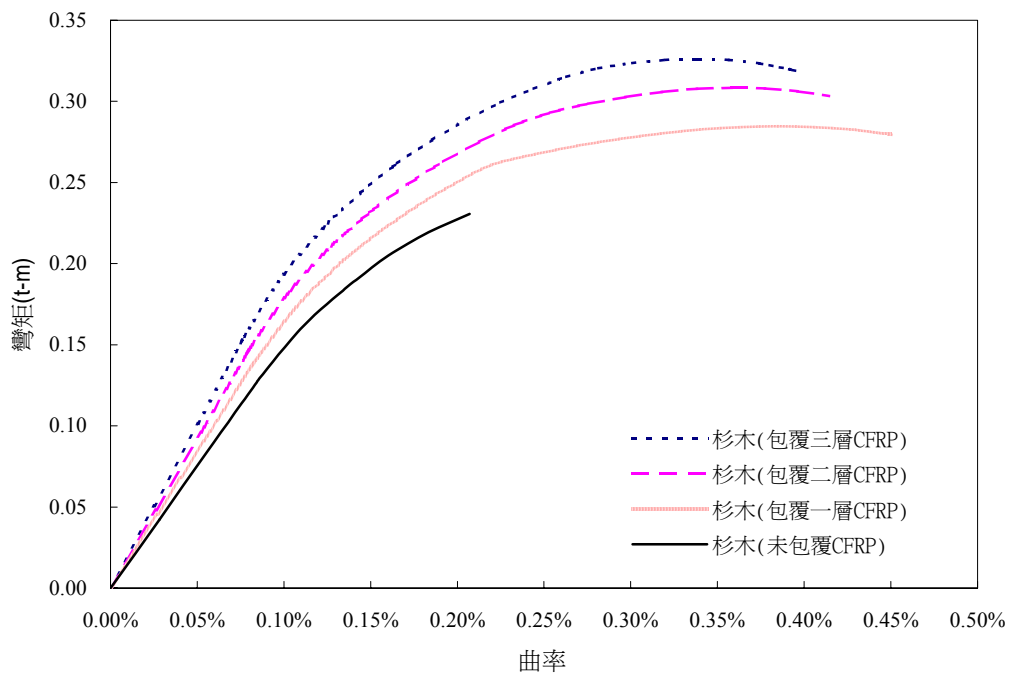


圖 29 理論計算之杉木載重-變位圖 (包覆 0 層~3 層 CFRP)

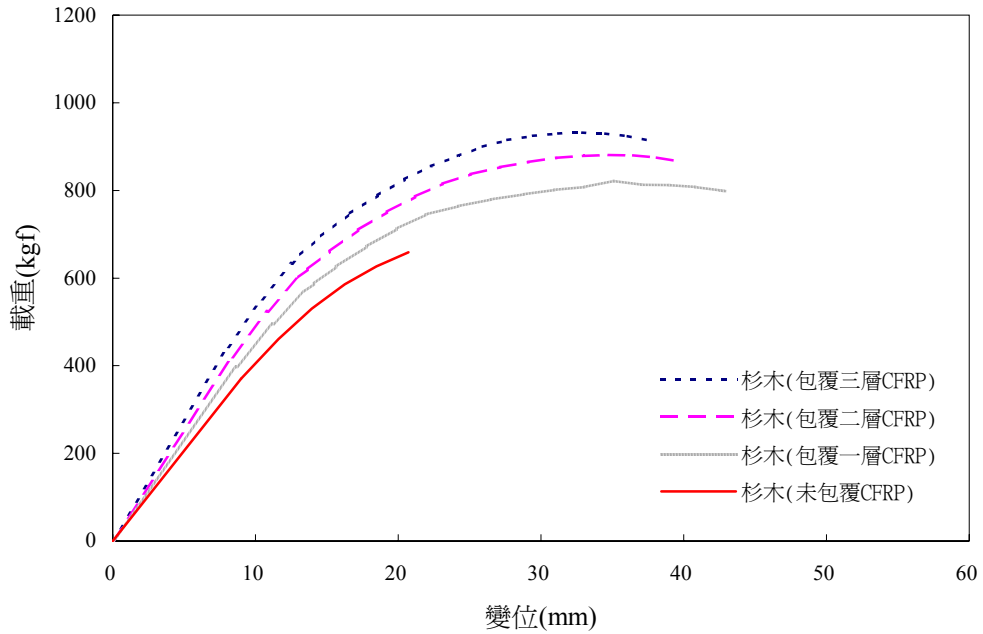


圖 30 杉木未包覆 CFRP 梁與理論計算未包覆 CFRP 梁載重-變位比較圖

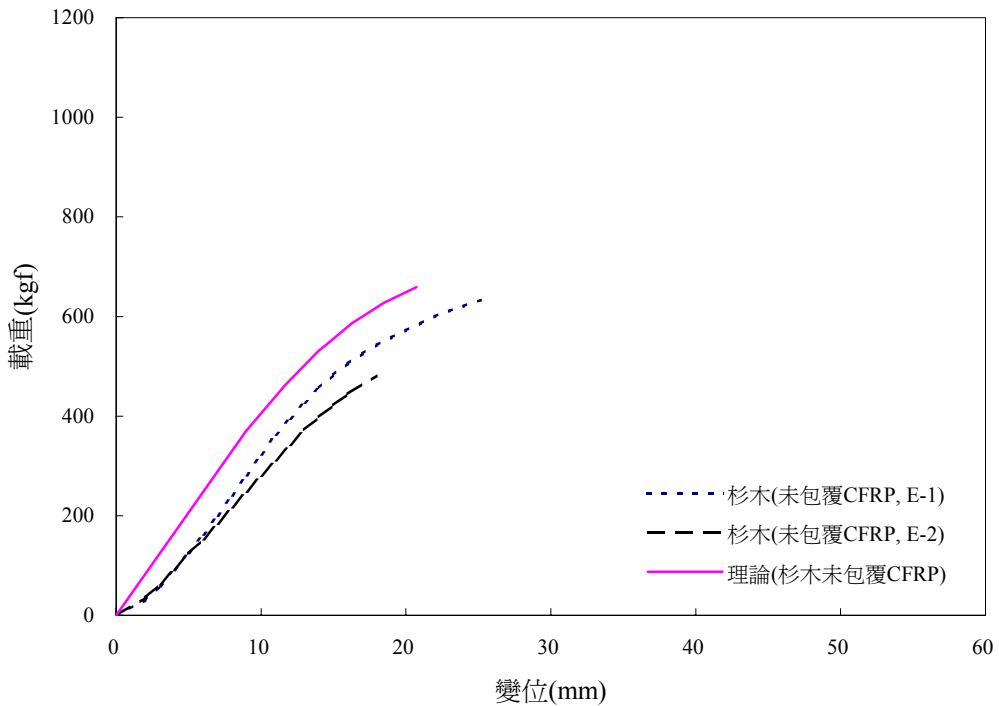


圖 31 杉木包覆一層 CFRP 梁與理論計算包覆一層 CFRP 梁載重-變位比較圖

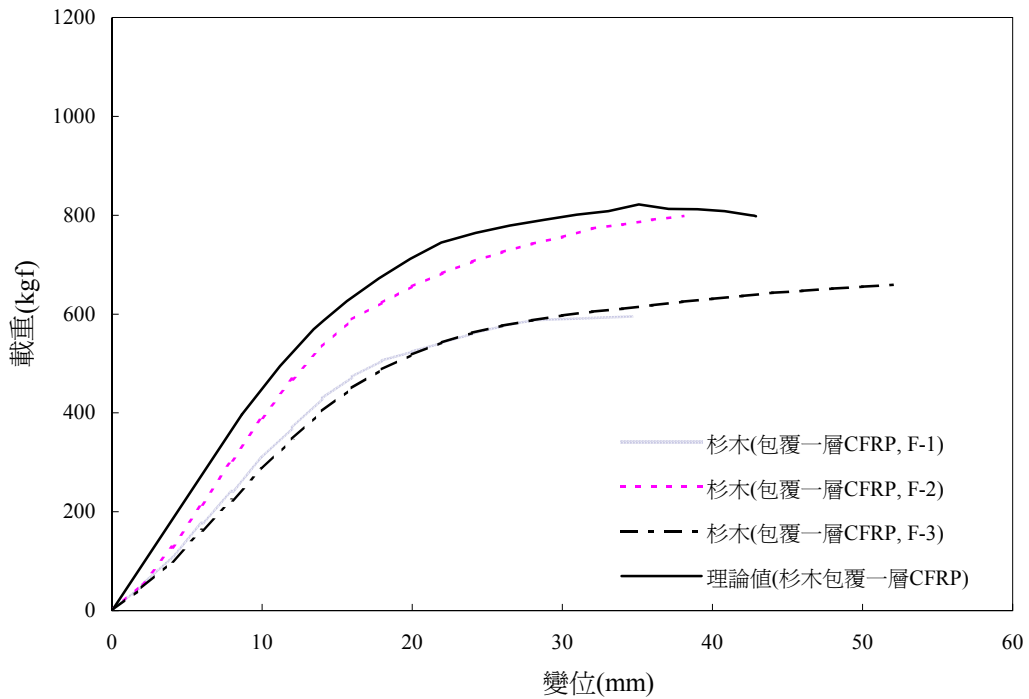


圖 32 杉木包覆二層 CFRP 梁與理論計算包覆二層 CFRP 梁載重-變位比較圖

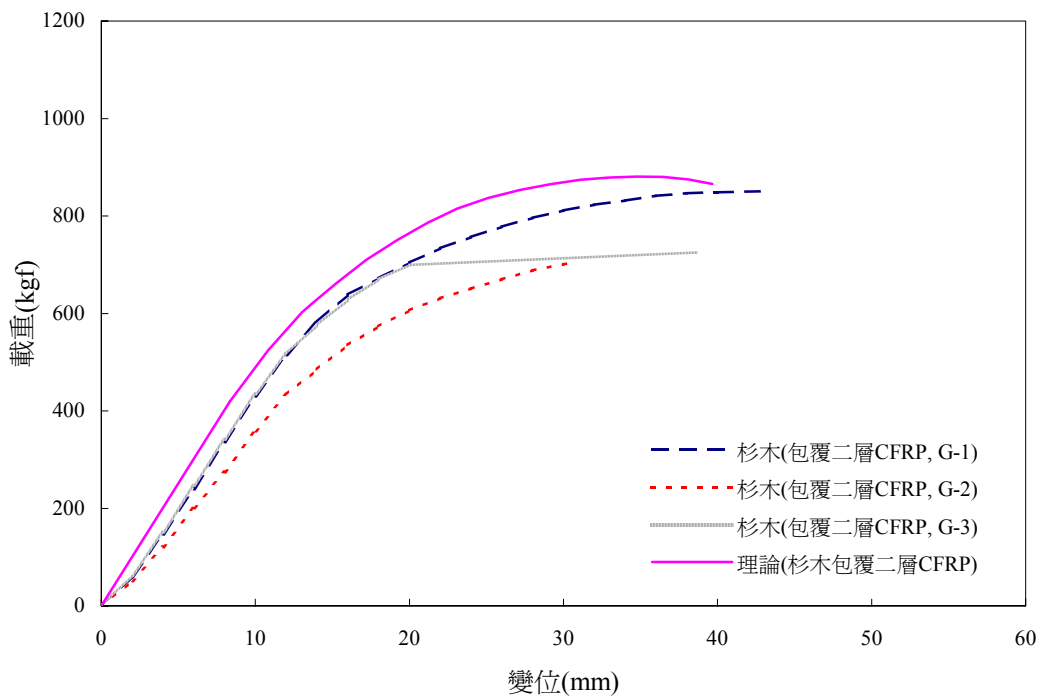




圖 33 杉木包覆三層 CFRP 梁與理論計算包覆三層 CFRP 梁載重-變位比較圖

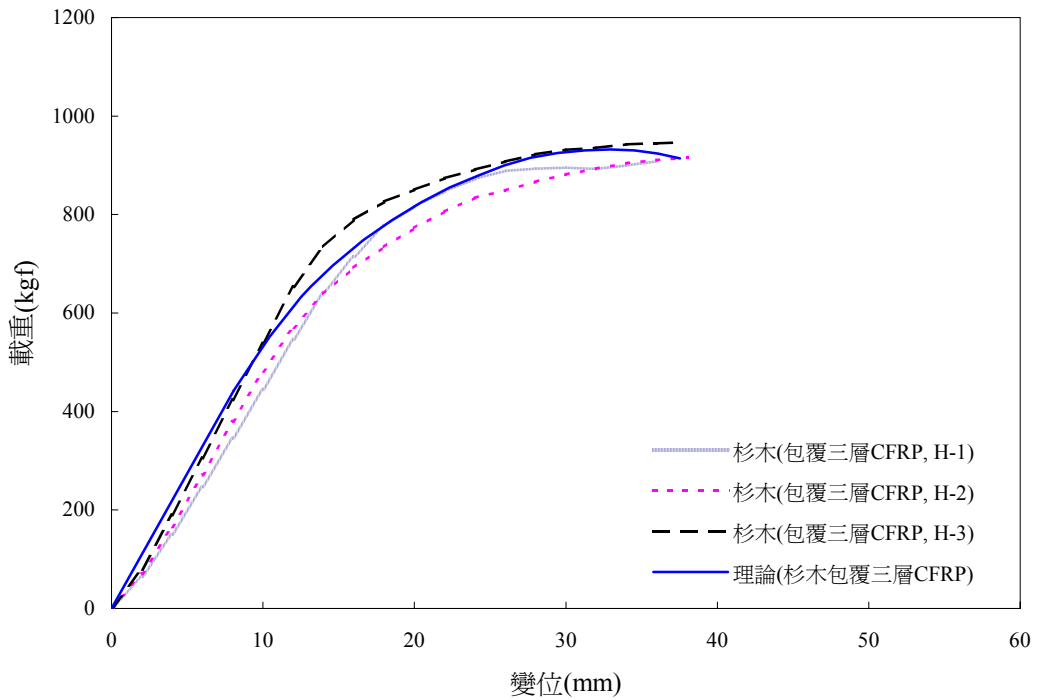


圖 34 理論計算之鐵杉非線性階段二次曲線方程式圖

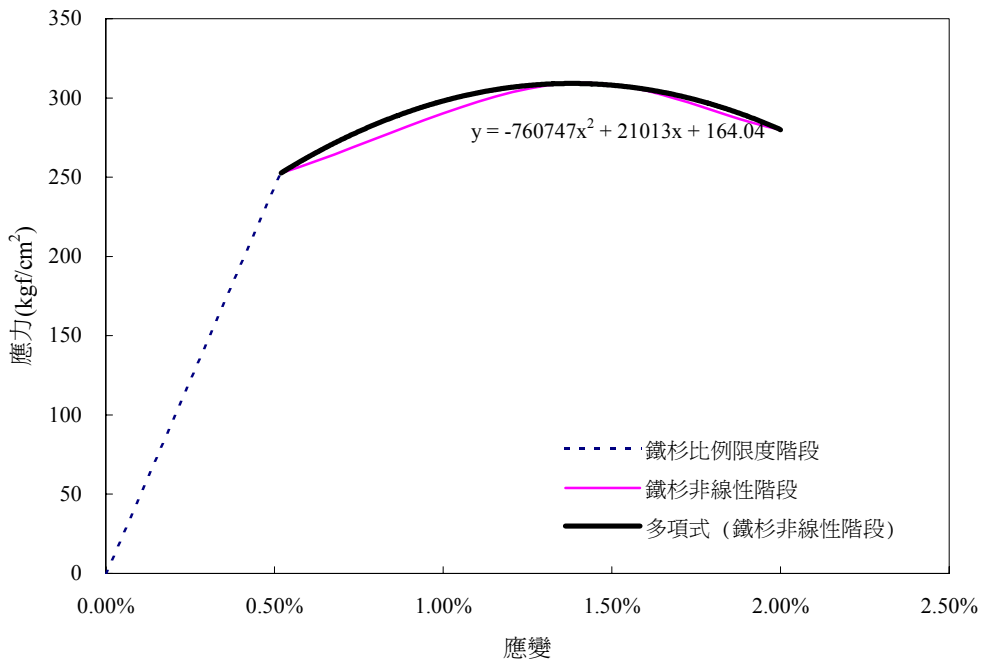


圖 35 理論計算之鐵杉彎矩-曲率圖 (包覆 0 層~3 層 CFRP)

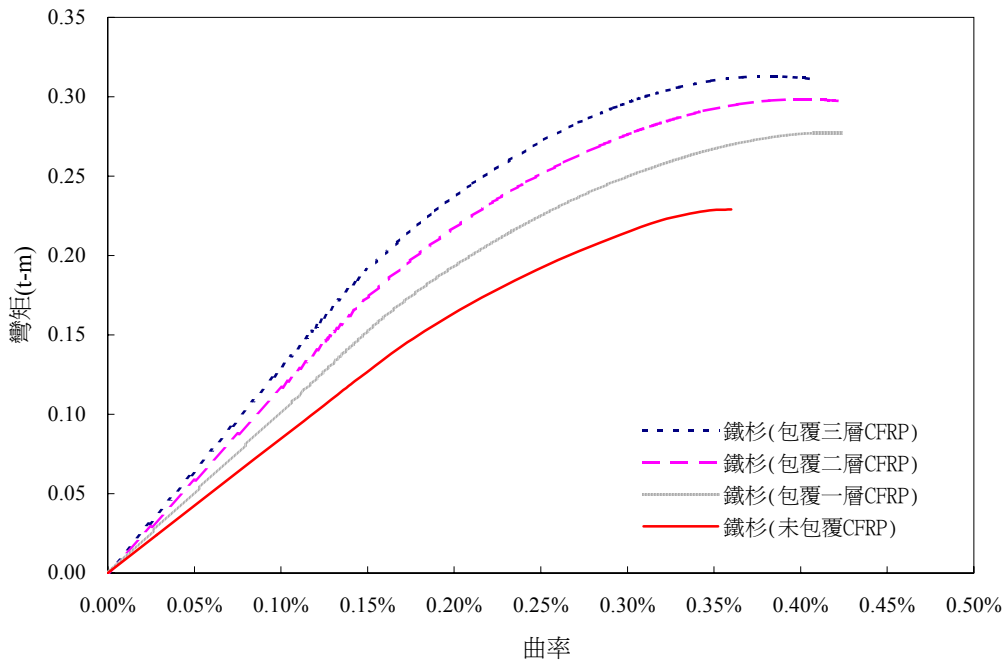


圖 36 理論計算之鐵杉載重-變位圖 (包覆 0 層~3 層 CFRP)

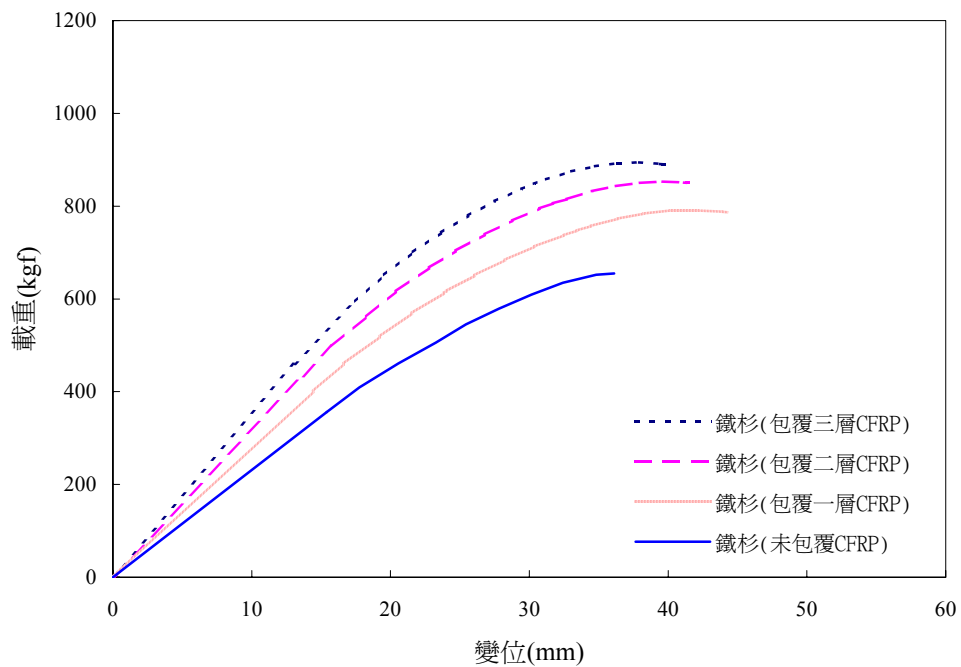


圖 37 鐵杉未包覆 CFRP 梁與理論計算未包覆 CFRP 梁載重-變位比較圖

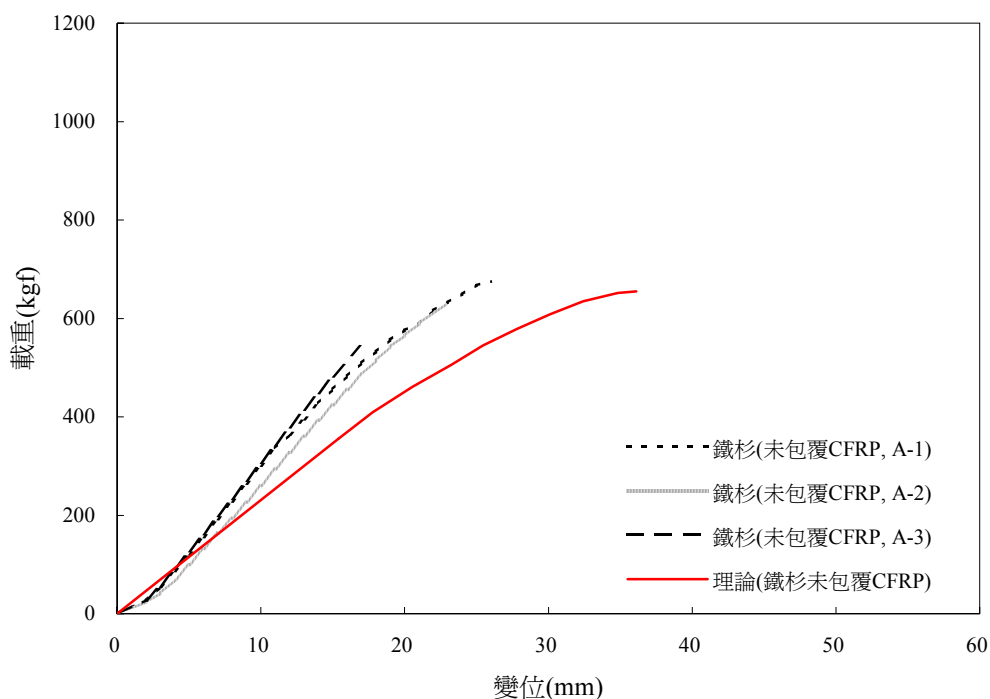


圖 38 鐵杉包覆一層 CFRP 梁與理論計算包覆一層 CFRP 梁載重-變位比較圖

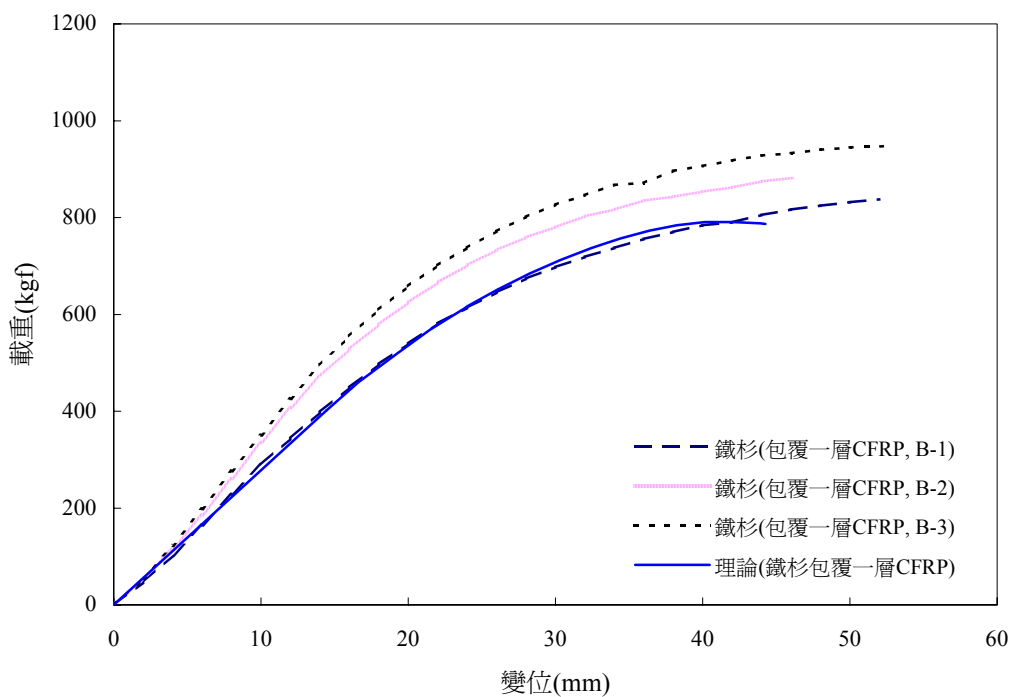


圖 39 鐵杉包覆二層 CFRP 梁與理論計算包覆二層 CFRP 梁載重-變位比較圖

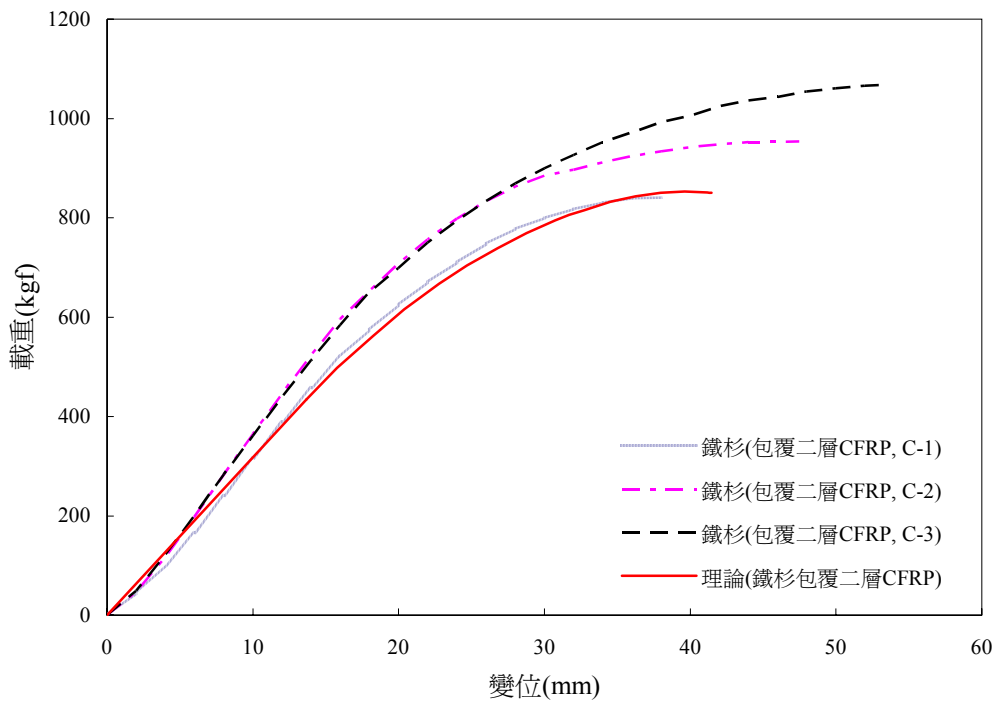


圖 40 鐵杉包覆三層 CFRP 梁與理論計算包覆三層 CFRP 梁載重-變位比較圖

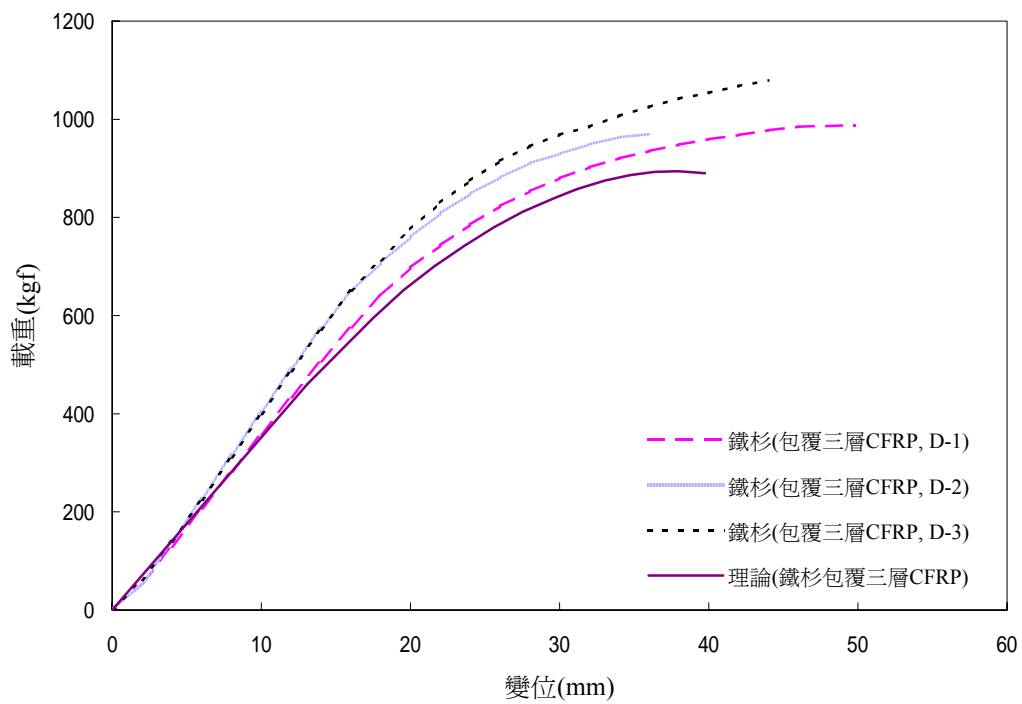


表 4 彎矩補強測試值與理論值之誤差百分比

組別		理論極限載重 (kgf)	極限載重(kgf)	載重絕對誤差 (%)
A	A-1	659.00	675.13	2.45
	A-2		629.55	4.47
	A-3		542.73	17.64
B	B-1	798.00	837.72	4.98
	B-2		881.85	10.51
	B-3		947.45	18.73
C	C-1	866.00	840.40	2.96
	C-2		954.17	10.18
	C-3		1067.94	23.32
D	D-1	914.00	966.28	5.72
	D-2		987.85	8.08
	D-3		969.93	6.12
鐵杉絕對平均誤差 (%)			9.60	
E	E-1	655.00	635.6	2.96
	E-2		441.43	32.61
F	F-1	787.00	702.34	10.76
	F-2		878.24	11.59
	F-3		810.82	3.03
G	G-1	850.00	918.43	8.05
	G-2		746.24	12.21
	G-3		819.02	3.64
H	H-1	890.00	908.06	2.03
	H-2		915.60	2.88
	H-3		945.65	6.25
杉木絕對平均誤差 (%)			8.73	

由上述之理論與實驗之載重-變位圖觀察得知，各材種之理論與實驗載重-變位關係圖（圖 41 以及圖 42）得知補強梁與未補強梁相較之下，其強度以及垂直變位都有提升的趨勢。以 1~3 層 CFRP 補強鐵杉，其強度增加量分別提升至 44.37%、54.95%以及 58.28%，而以 1~3 層 CFRP 補強杉木，其強度增加量分別提升至 48.03%、53.74%以及 71.42%，鐵杉以及杉木強度增加百分比整理如表 5。

圖 41 實驗測試之杉木載重-變位比較圖

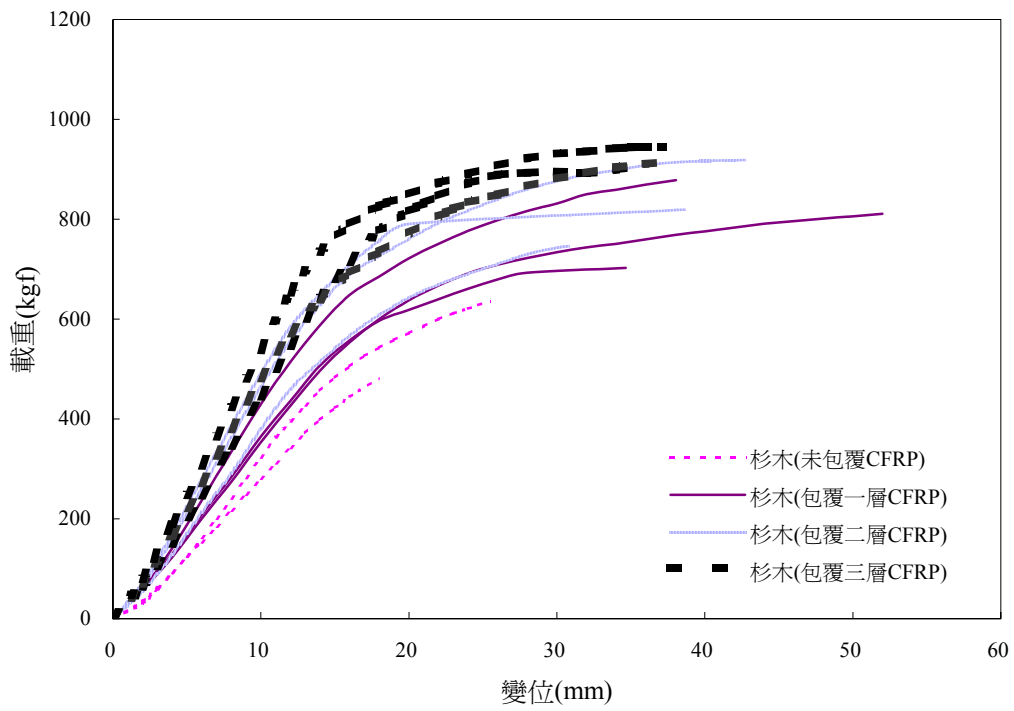


圖 42 實驗測試之鐵杉載重-變位比較圖

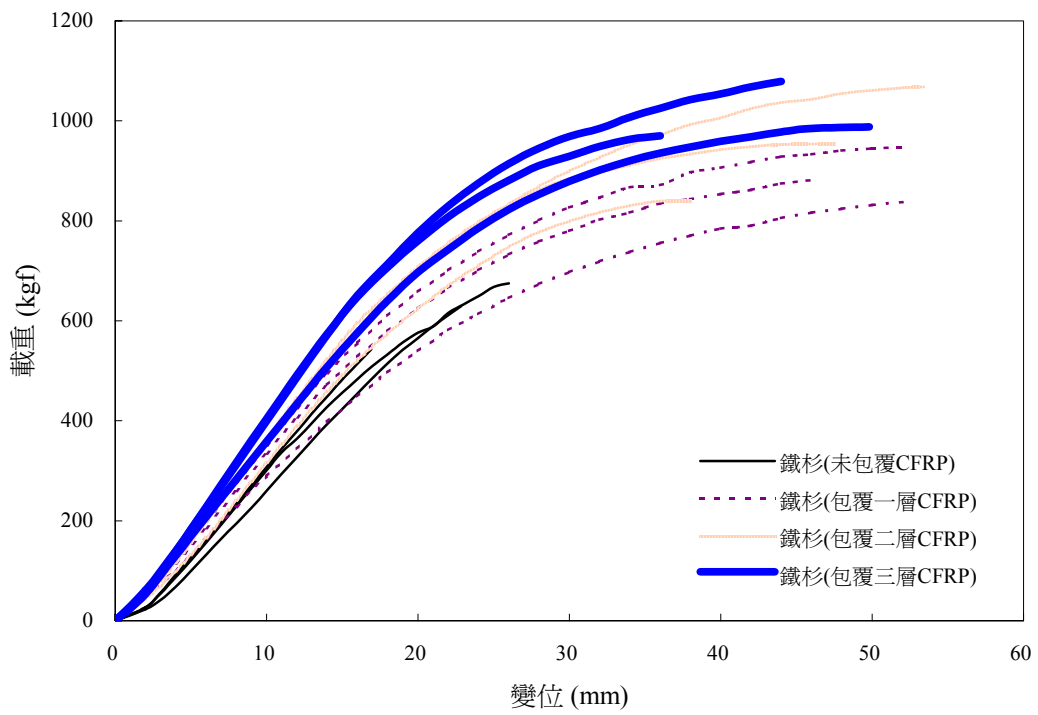


表 5 鐵杉以及杉木強度提升百分比

鐵杉 (編號)	實驗平均載重 (kgf)	強度提升百分比 (%)
未貼覆 CFRP (A)	615.80	-
貼覆一層 CFRP (B)	889.01	44.37
貼覆二層 CFRP (C)	954.17	54.95
貼覆三層 CFRP (D)	974.69	58.28
杉木 (編號)	實驗平均載重 (kgf)	強度提升百分比 (%)
未貼覆 CFRP (E)	538.51	-
貼覆一層 CFRP (F)	797.13	48.03
貼覆二層 CFRP (G)	827.90	53.74
貼覆三層 CFRP (H)	923.10	71.42

本附錄之圖片摘取於

謝耀明 (2002) 碳纖維強化高分子複合材料 (CFRP) 應用於木構件彎矩補強之研究，國立台北科技大學碩士論文。

## 參考書目

### 中文部分

丁育群、陳宗禮。鋼筋混凝土建築物之修復與補強技術彙編(二)。財團法人台灣營建研究院：頁 12，民國八十九年。

王松永。木材粘彈性之研究(第一報)木理走向度對抗彎潛變性質之影響。中華林學季刊 7(2)：頁 61-86，民國六十三年。

王松永。木材粘彈性之研究(第二報)木理走向度對抗彎潛變性質之影響。台大實驗林研究報告 155：頁 85-100，民國六十四年。

王松永。南洋材之物理性質以及機械性質的研究。台大森林學系合作研究報告 13：頁 183-225，民國六十五年。

王松永。木材之動力學及音響性質之研究(第 1 報)木材音速影響因子之研究。台大實驗林報告 150：頁 1-23，民國七十二二年。

李有豐、彭添富、施邦築、韓茂樹、張寬勇、林至聰、鄭育祥、陳志宏、黃哲群、朱國棟、邱佑宗、盧廷鉅。纖維強化高分子複合材料(FRP)應用於鋼筋混凝土結構補強之介紹。1998 建築物防災檢測與補強技術研討會論文集/國立台北科技大學土木與防災研究所：頁 492，台北，民國八十七年。

李有豐。RC 橋柱耐震補強對策之研究與應用-圓形橋柱之複合材料(FRP)耐震補強研究。國科會工程科技 40：頁 69-76，民國八十七年。

李有豐、宋奕穎、朱育正。圓形橋柱以碳纖維強化高分子複合材料耐震補強之研究。土木工程技術 4(3)：頁 1-32，民國八十九年。

李有豐、張國鎮、黃震興、宋奕穎。碳纖維強化高分子複合材料於圓形橋柱



碳纖維強化高分子複合材料(CFRP)應用於木構造古蹟建築補強之研究

剪力補強設計與試驗。土木技術 37：頁 155-170，民國九十年。

周惠娟。CFRP 補強木材複合材靜曲效能改善之研究。國立台灣大學碩士論文，民國九十二年。

徐耀賜。複合材料 (FRP) -混凝土橋梁結構補強加固之利器。土木技術：頁 135-154，民國九十年。

曹智強。碳纖維強化高分子複合材料應用於 RC 梁之剪力補強。國立台北科技大學碩士論文，民國九十一年。

張寬勇、林至聰、施邦築、彭添富、李有豐、韓茂樹、鄭育祥、陳志宏、黃哲群、朱國棟、邱佑宗、盧延鉅。RC 構件以 CFRP 貼片補強之受往復力作用與耐久性試驗研究。1998 建築物防災檢測與補強技術研究討會論文集/國立台北科技大學土木與防災研究所：頁 193-214，台北，民國八十七年。

黃耀富、江吉龍。木材粒片與玻璃纖維或碳纖維織布複合之成板性質。林產工業 16 (2)：頁 231-248，民國八十六年。

葉祥海、蔡克銓。921 集集大地震建築物震害調查初步報告。財團法人台灣營建研究院：頁 19-33，民國八十八年。

謝耀明。碳纖維強化高分子複合材料(CFRP)應用於木構件彎矩補強之研究。國立台北科技大學碩士論文，民國九十一年。

謝耀明、李有豐、周惠娟、蔡明哲。CFRP 與木構件介面黏著效果之研究。國立台北科技大學學報 35 (2)：頁 87-102，民國九十一年。

日文部分

平井信二。東京大學演習林報告 44：頁 139，民國四十二年。

寺澤真、小林拓治郎。木材乾燥にあける高温蒸煮の影響（その2） 完。  
日本木材工業 29（9）：頁 7-11，民國六十三年。

伊原恵司。修理技法。原台南州廳修復技術研討暨研習資料彙編/國立文化資產保存研究中心籌備處：頁 250，民國八十九年。

杉山英男。建築構造學大系 22。木構造：26-27 頁，彰國社，民國六十年。

英文部分

American Society for Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standard.  
ASTM D143-22, 1980.

Biblis, E. J. Analysis of Wood-fiberglass Composite Beams Within and Beyond the Elastic Region. Forest Products Journal 15（2）：81-88, 1965.

Boehme, C. and Schweiz, G. Load-bearing Behavior of a GFRP（Glass-fiber Reinforced Plastic） Sandwich. Holz als Roh und Werkstoff 32: 250-256, 1974.

Beter, A. J.; Fillho, A. C. and Campagnolo, J. L. CFRP in the Strengthening of Reinforced Concrete Beams. Proceeding of the International Conference on FRP Composite in Civil Engineering 1, Hong Kong, China: 391-398, 2001.

Bohannan, B. Prestressed Wood Members. Forest Products J. 12（12）：596-602, 1962.

Borri, A.; Corradi, M. and Grazini, A. FRP Reinforcement of Wood Elements under Bending Loads. Structural Faults Repair, 10th Inter. Conf., London, UK,

2003.

Cao, S. Y.; Chen, J. and Pan, J. W. Experimental Study on the Shear Performance of R.C. Beams Retrofitted by Bonding GFRP Strips. Proceeding of the International Conference on FRP Composite in Civil Engineering 1, Hong Kong, China: 677-684, 2001.

Fave, P. A. and Tingley, D. A. Compression Design of FRP Reinforced Glulam Beams. Proceeding of the International Conference on FRP Composite in Civil Engineering 2, Hong Kong, China: 1379-1386, 2001.

Fiorelli, J. and Dias, A. A. Analysis of Strength and Stiffness of Timber Beams Reinforced with Carbon Fiber and Glass Fiber. Materials Research 6 (2): 193-202, 2003.

Kubinsky, E. Influence of Steaming on the Properties of *Quercus Rubra* Wood. Holzforschung Bel 25: 78-83, 1971.

Kollmann, F. F. P. and Côté, W. A. Principles of Wood. Science and Technology 1, Solid Wood: 359-379, 1967.

Katsumata, H.; Kimura, K. and Murahashi, H. Experience of FRP Strengthening for Japanese Historical Structural. Proceeding of the International Conference on FRP Composite in Civil Engineering 2, Hong Kong, China: 1001-1008, 2001.

Lopez, M. M.; Naaman, A. E.; Pinkerton, L. and Till, R. D. Behavior of RC Beams Strengthened with FRP Laminates and Tested under Cyclic Loading at Low Temperatures. Proceeding of the International Conference on FRP Composite in Civil Engineering 1, Hong Kong, China: 415-422, 2001.

Martin, Z. A.; Stith, J. K. and Tingley, D. A. Strength and Stiffness Performance of FRP Reinforced White Oak. World Conference on Timber Engineering, Whistler

Resort, British Columbia, Canada, 2000.

Mosallam, A. S.; Kreiner, J. Repair and Rehabilitation of Wood Members With Carbon/Epoxy Composite Laminates. Sixth Annual International Conference on Composites Engineering ICCE/6, Florida, 1999.

Meier, U. Strengthening and Stiffening of Historic Wooden Structure with CFRP. Proceeding of the International Conference on FRP Composite in Civil Engineering 2, Hong Kong, China: 967-974, 2001.

Ogawa, H. Architectural Application of Carbon Fibers Development of New Carbon Fiber Reinforced Glulam. Carbon 38: 211-226, 2000.

Plevris, N.; Triantafillou, T. C. Creep Behavior of FRP-reinforced Wood Members. Journal of Structural Engineering 121 (2) : 174-186, 1995.

Suzuki, S.; Okuyama, T. and Terazawa, S. Effect of Temperature on Orthotropic Properties of Wood II/Proportion of the Transwall Failure. Mokuzai Gakkaishi 25 (3) : 177-183, 1979.

Shokrieh, M. M. Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Composite Laminates. Proceeding of the International Conference on FRP Composite in Civil Engineering 1: 507-515, 2001.

Triantafillou, T. C. Shear Reinforcement of Wood Using FRP Materials. J. Materials in Civil Engineering, ASCE 9 (2) : 65-69, 1997.

Triantafillou, T. C. Composite: A New Possibility for the Shear Strengthening of Concrete, Masonry and Wood. Composite Science and Technology 58: 1285-1295, 1998.

Täljsten, B. and Carolin, A. Strengthening of Concrete Beams in Shear-theory and

碳纖維強化高分子複合材料(CFRP)應用於木構造古蹟建築補強之研究

Test. Proceeding of the International Conference on FRP Composite in Civil Engineering 1: 657-667, 2001.

Tascioglu, C.; Goodell, B.; Lopez-Anido, R. and Peterson, M. Monitoring Fungal Degradation of E-glass Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites Used in Wood Reinforcement. International Biodeterioration and Biodegradation 51: 157-165, 2003.

Wangaard, F. F. Elastic Deflection of Wood-fiberglass Composite Beams. Forest Products Journal 14 (6) : 256-260, 1964.