

纏繞式桁架之研製

研究生：林 彥 方

指導教授：金 大 仁 博士

國立交通大學工學院精密與自動化工程學程

中 文 摘 要

本文目的在於使用纖維纏繞製程，研製一新型桁架結構所使用之圓桿、接頭及連接機構。研製過程除了強度考量外亦同時兼顧整體桁架組裝的便利性。文中介紹桁架製造的過程及方法，依據桁架載重需求設計圓桿之直徑、長度、纏繞角度及疊層數後再加以製作。藉由分析軟體來模擬預測圓桿受一軸向力狀況下的機械行為，再與理論計算值及實驗結果作比較驗證。其中在理論模擬上，使用有限元素法軟體-ANSYS 建構有限元素模型進行分析，其抗拉強度使用兩種破壞準則來加以預測。實驗部份則是使用 MTS 拉伸試驗機對圓桿測定拉伸和壓縮強度。驗證結果證明理論模擬的方式可以合理的表現出圓桿的受力行為。此外接頭與連接機構之研製過程亦經多次設計改良，配合重量輕、強度高之圓桿，使得整體桁架組裝更為快速、精確及便利，為實際應用時程向前邁進一步。

Manufacture & Analysis of Filament Wound Truss

Student : Yen-Fang Lin

Advisor : Professor Tai-Yan Kam

Automation and Precision Engineering

National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan

Republic of China

ABSTRACT

The purpose of this study was to develop methods for fabricating and analyzing links, connectors, and connecting mechanism of filament wound truss structures. The production process was concerned about the strength as well as the convenience in assembling the trusses. The truss fabrication process and method began from the determination of the diameter, length, winding fiber direction, and number of layers for the links. Analytical software was used to simulate the mechanical behavior of the links under axial force. Then comparison validation was conducted on the theoretical values and actual results. For the theoretical simulation, Finite Element Method software, ANSYS, was used to construct the finite element model of the links for analysis, and two failure criteria were used to predict the tensile strength of the links. In the experiment, MTS testing machine was used to test the stretching and compressive strengths of the links. The comparison showed that the theory-based simulation when coupled with actual measurement data could predict the force endurance behavior of the links in a rational manner. The connector and connecting mechanism were improved for a number of times and when used with lightweight and high strength links, can make the assembling of the truss much faster, more accurate and convenient. The present study is a step forward to the actual application.

誌 謝

本文承蒙指導教授金大仁博士的熱心指導與教誨方能順利完成，在此致上無限的感激與敬意。

在這三年的學習與研究過程中，還要感謝偉芬學姐、清榮學長、增堯學長、仁忠學長、有洸學長在學習上的協助與指導；同學巧鈴、鎮隆、志鴻、國晉在同窗的歲月中一起奮鬥與勉勵，還有學弟維成不疲不厭的協助以及實驗室其他學弟的友情幫忙；另外要感謝土木研究所張簡嘉賞學長於桿件試驗方面的配合，合作廠商「巨亞機械」林老板及蕭工程師於心軸製作過程的配合與協助，同事鍾燕光、戴文峰及胡錕明於設計研究過程之協助加工與修改，長官徐忠仁主任於進修期間的支持與鼓勵，才使得研究工作得以順利進行。

最後要感謝我的父母親、姊姊、妹妹及老婆給我的支持與鼓勵，讓我能在工作之餘心無旁騖的完成學業並取得學位，僅以此文獻給所有關心我與我關心的人。

目 錄

中文摘要	.....	i
英文摘要	.....	ii
誌謝	.....	iii
目錄	.....	iv
表目錄	.....	vii
圖目錄	.....	viii
第一章	緒論.....	1
1.1	前言.....	1
1.2	文獻回顧.....	2
1.3	本文研究方向.....	3
第二章	纖維纏繞法.....	4
2.1	纖維纏繞法之介紹.....	4
2.2	纖維纏繞的方式.....	4
2.3	纖維纏繞的參數設定.....	4
2.3.1	螺旋型繞線介紹.....	5
2.3.2	螺旋型繞線各項參數設定的意義.....	5
2.4	影響纖維纏繞結果的變因.....	6
2.5	纖維纏繞結構之疊層假設.....	7
第三章	纏繞式桁架圓桿基本力學分析.....	8
3.1	圓管位移的基本假設.....	8
3.2	複合材料積層板的力學性質.....	9
3.3	積層複合材料圓管的分析.....	13
3.4	破壞準則.....	14
3.4.1	最大應力破壞準則.....	15

3.4.2	Tsai-Wu 破壞準則	15
3.5	材料常數之計算	15
3.5.1	縱向楊氏模數 E_1	15
3.5.2	浦松比 (Poisson's ratio) ν_{12}	16
3.5.3	橫向楊氏模數 E_2	16
3.5.4	剪力模數 G_{12}	17
第四章	纏繞式桁架之製程	18
4.1	簡介	18
4.2	製程設備介紹	18
4.2.1	纏繞機	18
4.2.2	烤箱	19
4.3	圓桿製程所使用之材料	20
4.4	圓桿心軸之製作	20
4.5	圓桿之纏繞	22
4.6	桁架球形接頭之製作	24
4.7	桁架組立	24
第五章	纏繞式桁架之設計與改良	25
5.1	前言	25
5.2	圓桿接頭部份	25
5.3	纏繞部份	27
5.4	圓桿與球形接頭銜接部份	28
5.5	球形接頭部份	29
第六章	強度試驗與有限單元模型分析	31
6.1	實驗設計與準備工作	31
6.2	圓桿之材料性質	32

6.3	圓桿之強度試驗.....	33
6.4	圓桿之有限單元模型分析.....	35
6.4.1	圓桿心軸和纏繞疊層規格.....	35
6.4.2	圓桿有限單元分析與邊界束制條件.....	35
6.5	理論計算及實驗討論.....	37
第七章	結論與未來展望.....	39
參考文獻	.....	41



表 目 錄

表 5-1	各階段之球形接頭重量與抗拉強度紀錄.....	43
表 6-1	纏繞纖維之材料常數.....	43
表 6-2	纏繞纖維之材料強度.....	43
表 6-3	預浸材纖維材料性質試驗結果紀錄.....	44
表 6-3(A)	0°預浸材拉伸試驗.....	44
表 6-3(B)	90°預浸材拉伸試驗.....	44
表 6-3(C)	45°預浸材拉伸試驗.....	44
表 6-4	材料性質驗證之 MTS 基本設定.....	45
表 6-5	預浸材疊層厚度之量測紀錄.....	45
表 6-6	纏繞疊層厚度之量測紀錄.....	45
表 6-7	纏繞纖維厚度不均勻修正於 ANSYS 之 Real Constants...	46
表 6-7(A)	各區平均厚度.....	46
表 6-7(B)	修飾後之厚度.....	46
表 6-7(C)	轉換為 Real Constants 設定.....	46
表 6-7(D)	各 Real Constants 設定明細.....	46
表 6-8	各種方法求得之破壞強度比較.....	47
表 6-9	ANSYS 模擬強度試驗之受力與應變數據.....	47

圖目錄

圖 2-1	基本的纏繞機示意圖	48
圖 2-2	纖維纏繞法之流	48
圖 2-3	環狀、螺旋、軸對稱纏繞示意圖	49
圖 2-4	螺旋形繞線基本模型	49
圖 2-5	基本螺旋形繞線花式	49
圖 3-1	圓柱殼元素的座標系統	50
圖 3-2	材料纖維方向的旋轉圖	50
圖 3-3	圓殼受應力之合力圖	50
圖 3-4	圓殼受應力之合力矩圖	51
圖 3-5	圓桿受力示意圖	51
圖 3-6	0°試片負荷施加示意圖	51
圖 3-7	應力應變關係示意圖	52
圖 3-8	90°試片負荷施加示意圖	52
圖 3-9	45°試片負荷施加示意圖	52
圖 4-1	纏繞機	52
圖 4-2	張力機構	53
圖 4-3	纏繞機之樹脂槽	53
圖 4-4	纏繞機之四軸關係圖	53
圖 4-5	出眼口幾何圖(a)俯視圖(b)正視圖(c)側視圖	54
圖 4-6	心軸成形用烤箱之外觀	54
圖 4-7	心軸成形用烤箱之內部構造	54
圖 4-8	纏繞用烤箱之外觀	55
圖 4-9	纏繞用烤箱之內部構造	55
圖 4-10	剪好之預浸材 0°及 90°	55
圖 4-11	木質圓棒、真空袋、離形布、脫模臘	56
圖 4-12	離形布上塗抹一層脫模臘	56

圖 4-13	依序貼預浸布.....	56
圖 4-14	模具內側塗抹一層脫模蠟.....	56
圖 4-15	貼完 10 層預浸材從心模上取下.....	57
圖 4-16	將氣袋放入預浸材圓管柱內.....	57
圖 4-17	心軸接頭.....	57
圖 4-18	預浸材圓管置於模具中.....	58
圖 4-19	心軸成形氣袋壓力變化曲線.....	58
圖 4-20	合模後送入烤箱加熱.....	58
圖 4-21	設定加熱溫度及時間.....	59
圖 4-22	圓桿心軸製作流程圖.....	59
圖 4-23	圓桿心軸成品及調好之環氧樹脂.....	60
圖 4-24	準備妥開始上線纏繞.....	60
圖 4-25	纏繞程序完成.....	60
圖 4-26	第一層離形布抹脫模蠟.....	61
圖 4-27	第二層 peel ply.....	61
圖 4-28	第三層小棉布.....	61
圖 4-29	第四層厚棉布.....	62
圖 4-30	送入旋轉烤箱.....	62
圖 4-31	將包覆材拆下.....	62
圖 4-32	包覆材拆卸完成.....	63
圖 4-33	纏繞圓桿成品.....	63
圖 4-34	桁架組立圖.....	63
圖 5-1	圓桿之外形尺寸圖(草稿).....	64
圖 5-2	圓桿之外形尺寸圖.....	64
圖 5-3	模具之設計圖.....	65
圖 5-4	複材(BMC)接頭設計圖.....	65
圖 5-5	鋁合金接頭設計圖(階段 2).....	66

圖 5-6	鋁合金接頭設計圖(階段 3)	66
圖 5-7	鋁合金接頭設計圖(階段 4)	67
圖 5-8	鋁合金接頭設計圖(階段 5)	67
圖 5-9	鋁合金接頭設計圖(階段 6)	68
圖 5-10	纏繞機相關變數示意圖.....	68
圖 5-11	連接方式第一階段示意圖.....	69
圖 5-12	連接方式第二階段示意圖.....	69
圖 5-13	連接用正反牙螺栓設計圖.....	70
圖 5-14	連接方式第三階段示意圖.....	70
圖 5-15	連接方式第四階段示意圖.....	71
圖 5-16	第四階段詳細設計圖.....	71
圖 5-17	第四階段接頭實體分解零件圖.....	72
圖 5-18	第四階段接頭實體分解圖.....	72
圖 5-19	第四階段接頭實體圖.....	72
圖 5-20	鋁合金球形接頭設計圖.....	73
圖 5-21	各階段複材球形接頭設計圖.....	73
圖 5-22	MTS 夾具設計圖.....	74
圖 5-23	Ball Type2 製作過程紀錄.....	74
圖 5-24	Ball Type3、4 使用之錐體設計圖.....	75
圖 5-25	Ball Type3 拉伸試驗曲線.....	75
圖 5-26	Ball Type4 拉伸試驗曲線.....	76
圖 5-27	Ball Type5 設計圖.....	76
圖 5-28	Ball Type5 製作過程紀錄.....	77
圖 5-29	Ball Type5 拉伸試驗曲線.....	77
圖 6-1	MTS 兩種試驗型態.....	78
圖 6-2	MTS 上、下夾具設計圖.....	78
圖 6-3	MTS 校正用試片.....	79

圖 6-4	兩台 MTS 精度校正試驗曲線	79
圖 6-5	材料試驗試片尺寸示意圖	80
圖 6-6	材料試驗試片 (90° 、 45° 、 0°)	80
圖 6-7	材料試驗試開始及結束	81
圖 6-8	應變規黏貼方式及應變計	81
圖 6-9	材料性質驗證(1)	82
圖 6-10	材料性質驗證(2)	82
圖 6-11	材料性質驗證(3)	83
圖 6-12	強度試驗曲線(拉力)	83
圖 6-13	強度試驗曲線(壓力)	84
圖 6-14	破壞之桿件切割示意圖	84
圖 6-15	預浸材與纏繞部份已脫離	85
圖 6-16	右端預浸材開裂紀錄	85
圖 6-17	中段預浸材開裂紀錄	86
圖 6-18	圓桿受壓力破壞紀錄(1)	86
圖 6-19	圓桿受壓力破壞紀錄(2)	86
圖 6-20	ANSYS 座標轉換之相對關係說明	87
圖 6-21	邊界外力條件及邊界束制條件	88
圖 6-22	元素分割數量的收斂情形(標準厚度)	88
圖 6-23	各元素發生最大破壞情況下之 X 及 Y 方向應力分佈情形	89
圖 6-24	Failure Index 分佈圖(標準厚度)	89
圖 6-25	Layered Model Showing Dropped Layer	90
圖 6-26	ANSYS 模擬分析 2 之各區段切割情形	90
圖 6-27	元素分割數量的收斂情形(實際厚度)	91
圖 6-28	各元素發生最大破壞情況下之 X 方向應力分佈情形	91
圖 6-29	各元素發生最大破壞情況下之 Y 方向應力分佈情形	92
圖 6-30	Failure Index 分佈圖(實際厚度)	92

圖 6-31 ANSYS 模擬強度試驗 vs 實際強度試驗之比較圖…………… 93

