

複合材料船艇帽型樑構件合理化設計研究

林輝政* 李應成** 湯川盛**

* 國立台灣大學 造船及海洋工程學系 (hjlin@ccms.ntu.edu.tw)

** 聯合船舶設計發展中心

關鍵詞：複合材料、有限元素法、帽型樑

摘 要

高速船艇的設計船速高，船體重量必須盡量減輕，因此對於材料的需求也相對地要求高強度、高勁度與低比重的高級複合材料。除了由材料選用來達到全船之輕量化外，本文主要針對複合材料船艇常用之帽型樑，探討如何經由幾何尺寸及積層厚度之適當搭配設計，使帽型樑設計最適化，達成全船輕量化之要求。

本文採四點彎曲試驗方式，對不同斷面尺寸及積層方式之帽型樑進行實驗，量測其剛性、變形及應變等特性，另一方面以有限元素法（Finite Element Method, FEM）建立複合材料帽型樑之分析模式，將分析結果與實驗數據比較，以驗證FEM分析之可靠度。

另外以FEM分析之方法，探討帽型樑幾何尺寸及積層厚度之最適化問題，使之既可達成結構剛性及強度之要求，另一方面也可使積層之材料最少、重量最輕，達成船舶輕量化設計之目的。

前 言

近年來隨著造船產業的升級，船舶的設計與製造走向輕量化與高速化。高速船艇的設計船速高，船體重量必須盡量減輕，因此對於材料的需求也相對地要求高強度、高勁度與低比重的高級複合材料。在材料選用上，在台灣之一般中小型船舶結構所用的複合材料均以E級玻璃纖維(E-glass)為主要加強材，樹脂基材(matrix)則為泛用之不飽和聚酯樹脂，而以手工積層法施工者為最多。這種傳統複合材料在現今高強度、高勁度與低比重的要求下實難滿足；此外，為達到船舶高速化與大型化的未來趨勢，高級複合材料的使用與結構型式的改良將是二個優先研發重點。因此，在幾何上，加勁材的應用將提供結構額外強度，且大量減輕結構重量，也因此加勁複合板被廣泛的使用在航空和船體結構上。而以FRP複合材料建造之

船舶、飛機等結構體，由於使用之複合材料無法以焊接方式接合，因此補強板殼大都採用帽型結構方式[1]。

船舶的高速化與大型化，使得船殼所受之負荷增加，而且結構安全係數更需斤斤計較，而如何利用船舶的輕量化來達到船舶的高速化成一重要課題。因此帽型結構的承載能力、變形大小必須加以詳細計算，以掌握精確結構強度。且經由幾何尺寸及積層厚度之適當搭配設計，使帽型樑設計最適化，達成全船輕量化之要求。

實驗試體製作

本文實驗用的試體主要的原料是由纖維加強材和樹脂基材構成，纖維加強材是採用國內造船廠常用的纖維加強材(M300、R600、KBM1308...)，樹脂則採用不飽和聚酯樹脂(Polyester Resin, 157 BQT)。積層過程採用手

積法(hand-layup method)。在積層過程中樹脂必須充分含浸於纖維中，並將氣泡從邊緣趕出，最後在常溫常壓下硬化成型而成。硬化後再裁切出試體所需之尺寸。

針對實驗的需求，在此製作了二類試體，分別為用於作基本材料係數測試的拉伸及剪切試片和用於測試結構抗撓剛性的帽型樑結構。試體之尺寸及積層方式如表1及表2所示。

表1 拉伸及剪切試驗試片積層方式

試片編號	積層方式
T-1, S-1	積層1
T-2, S-2	積層2
T-3, S-3	積層3

表2 帽型結構幾何與積層方式

編號	芯材斷面尺寸(cm)			積層方式	
	長	寬	高	帽型部份	附板部份
B-1	80	5	5	積層1	積層1
B-2	80	5	5	積層2	積層1
B-3	120	8	10	積層3	積層3

積層1: [M/R/M/R/M/R/M]

積層2: [M/R/M/R/M/R/M/UD/M]

積層3: [K/K/K/K/K/K/K/M]

M: M300, R: R600, K: KBM1308

材料係數量測

材料係數的正確掌握是進行數值分析的最先決條件。針對欲分析之帽型樑結構的積層情況，設計相同積層的試驗片，以求得基本之材料特性。本文主要藉由拉伸試驗及平面剪力試驗量測出材料之拉伸極限強度 σ_u 、彈性係數 E 及剪切極限強度 S 、剪切彈性係數 G 等材料特性[2-4]。

拉伸試驗中量得各試片之負荷、位移及應變，負荷除以截面積即可求得應力，最大之應力即為極限強度(σ_u)。以應變為 X 軸、應力為 Y 軸作圖，求得之斜率為彈性係數 E 。量測結果如表3所示。

平面剪力試驗中量得各試片之負荷、位移及縱、橫方向應變，負荷除以截面積即可求得

抗張應力 σ_u 。經由該試驗之公式計算即可求出剪切強度 S 及剪切彈性係數 G 。量測結果如表3所示。

表3 各試體材料係數試驗結果

積層方式	σ_u	E	S	G
積層1	172.4	10221	57.33	3457
積層2	193.9	12148	49.1	4957
積層3	190.1	10245	54.4	3755

σ_u : 拉伸極限強度(Nt/mm²)

E : 彈性係數(Nt/mm²)

S : 剪切極限強度(Nt/mm²)

G : 剪切彈性係數(Nt/mm²)

帽型樑四點彎曲試驗

實驗採四點彎曲方式，兩端以簡支(simple support)方式固定。在樑之彈性變形範圍內，量測樑之負荷、變形及應變等關係。其實驗架構及量測位置如圖1所示。每一根樑均於中心處頂部及底部黏貼一沿長度方向之應變規，用以量測長度方向之應變量。且於中心處底部架設一位移計，用以量測中心處之變形。

實驗過程採位移控制，夾頭壓縮速率為5mm/min。在樑之彈性範圍內，中心點每位移1mm即紀錄一次負荷及應變量，每一施力方式均重複三次以求取平均值，量測結果如表4所示。

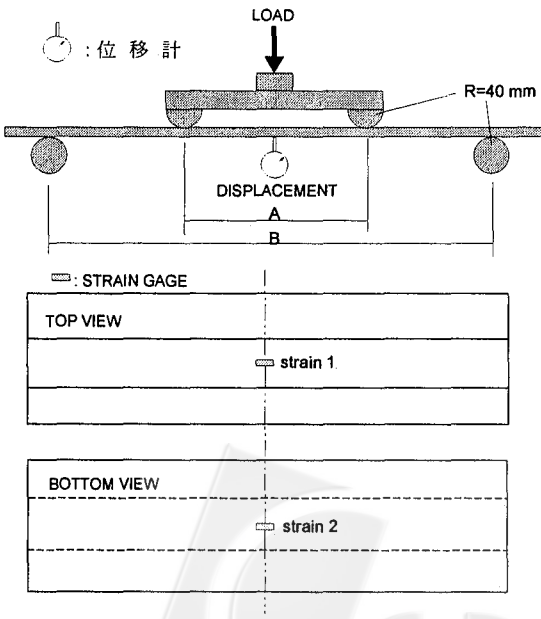


圖1 實驗架構及量測位置圖

表4 帽型樑四點彎曲試驗結果

試體	Displ.	Load	Strain1	Strain2
	mm	kg	$\mu \varepsilon$	$\mu \varepsilon$
B-1	1	222	697	294
	2	441	1410	599
	3	665	2120	902
	4	903	2859	1218
	5	1134	3584	1520
B-2	1	259	713	346
	2	542	1469	715
	3	837	2274	1110
	4	1135	3010	1445
	5	1426	3776	1822
B-3	1	411	516	235
	2	840	1030	478
	3	1261	1562	721
	4	1696	2115	974
	5	2103	2638	1212

數值模擬分析

本文主要以套裝FEM軟體ANSYS來模擬分析帽型樑的特性[7]，帽型樑之外殼以殼元素來模擬，所選用之元素名稱爲SHELL99，該元素具有八個節點，最多可輸入250層不同材料特性之積層組合。每一層可輸入三個方向(X、Y、Z軸)之材料特性，即具有正交性(orthotropic)，故能充分模擬出複合材料之特性。

另外以元素SOLID95來模擬芯材，SOLID95每一元素具有二十個節點，每一節點具有三個自由度(degree of freedom, UX、UY、UZ)。

首先依帽型樑尺寸建立模型(solid model)，因不同位置有不同之積層組合及積層厚度，而有不同之材料特性，故依不同之材料特性將其網格化成FEM model。另外芯材也以元素SOLID95網格化成FEM model，因元素SOLID95之每一面具有八個節點，可與元素SHELL99之每一節點緊密結合，即積層板與芯材之介面間可有效地傳遞力量。

而本FEM model之邊界條件設定乃在模擬四點彎曲試驗，故在兩端施以簡支方式固定，於上端則施以強制變位，如圖2所示。

根據材料試驗結果所得之數據輸入於FEM model中，計算後可得整體帽型樑之變形

及應力、應變分佈等。圖3及圖4爲於B-1試體上端施以強制變位 $U_y=-3\text{mm}$ ，於兩端支點處之結點設定爲簡支樑之邊界條件，即一端之自由度 $U_y=0$ 、 $U_z=0$ ，另一端之自由度 $U_y=0$ 之計算結果，其中X方向爲帽型樑之寬度方向，Y方向爲高度方向，Z方向爲帽型樑之長度方向。

實驗與數值模擬結果比較

數值模擬可於施力點處施以不同之強制變位，計算出施力點處節點之反作用力(reaction force)及變形、應變等關係，再與實驗結果比較。圖5、圖6及表5至表7爲部分結果。

本文主要以實驗方式探討帽型樑之特性，以作爲模擬分析之比較依據，評估數值模擬之合理性，以確保最適化數值模擬結果之可靠度。由結果顯示，數值模擬結果可充分模擬出帽型樑之特性，對於各試體之負荷-變形、應變-變形關係，其數值模擬結果與實驗結果相當吻合，故可確保以帽型樑之FEM model進行最適化分析之合理性。

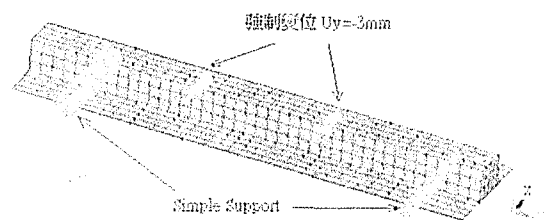


圖2 帽型樑網格化及邊界條件設定

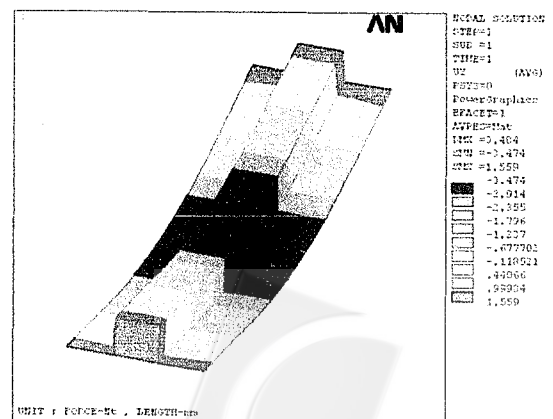


圖3 B-1帽型樑Y方向變形分佈圖

$$30\text{mm} \leq A \leq 100\text{mm} \quad (DV1)$$

$$30\text{mm} \leq B \leq 100\text{mm} \quad (DV2)$$

(2) 狀態變數(state variables, SVs)

狀態變數為最適化設計之束制條件，該變數隨設計變數之改變而變，且有最大值或最小值之限制。在本例中以材料之應力做為狀態變數，而整體帽型樑之應力分佈不均，故最適化分析計算時，取帽型樑上受最大拉伸應力(STRESS1)及最大壓縮應力(STRESS2)之值作為狀態變數，其值不得大於容許應力。本例之容許應力設定為極限應力之1/3。

另外限制帽型樑之變形量(U_y)不得超過長度之1/100，故取最大變形量 $U_{y\max}=10\text{mm}$ ，以此變形量設定為另一狀態變數。其值如下所示。

$$\text{STRESS1} \leq 57.47 \text{ Nt/mm}^2 \quad (SV1)$$

$$\text{STRESS2} \geq -57.47 \text{ Nt/mm}^2 \quad (SV2)$$

$$U_y \leq 10 \text{ mm} \quad (SV3)$$

(3) 目標函數(objective function)

本例中欲設計一高強度、高剛性之結構，但重量最輕、材料最省之帽型樑，故以帽型樑之重量為目標函數，而帽型樑之重量與積層板之體積成正比，故可以整體帽型樑積層板之體積(VTOT)最少為目標。

本例中首先設定 $A=50\text{mm}$ 、 $B=50\text{mm}$ 為起始之設計變數，以亂數技巧(random tool)，在設計變數之範圍內做亂數組合，計算出一組最小之目標函數，再以此組之設計變數作為起始變數，採first order optimization method，計算出一組最小之目標函數，此組結果即為在設計變數及狀態變數之限制條件下最適化之斷面尺寸。

圖8為最適化斷面之應力分佈圖，由圖可知，最大應力發生於帽型樑兩端之頂部及底部，頂部受到壓應力，其值為 55.174 N/mm^2 ，而底部則受到拉應力，其值為 20.917 N/mm^2 ，可知在端點之頂部為整體帽型樑之最大受力點。

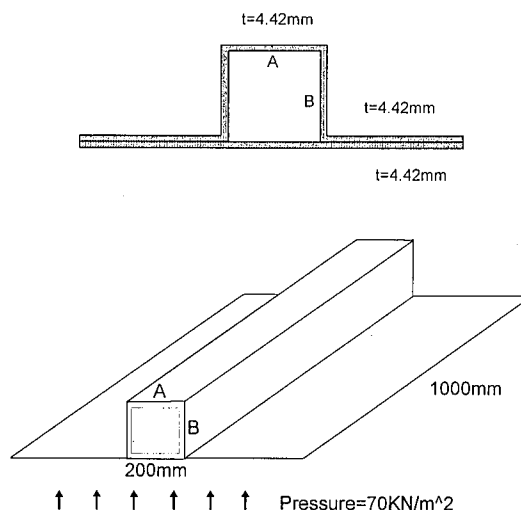


圖7 帽型樑斷面最適化FEM模型尺寸

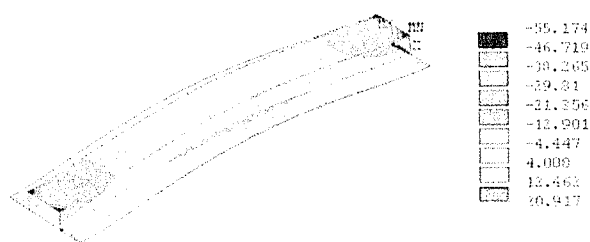


圖8 最適化斷面之應力分佈圖

圖9及圖10為各設計組合與斷面尺寸及積層板體積關係圖，圖中最適化之組合為 $A=8.551\text{mm}$ 、 $B=38.277\text{mm}$ 。

帽型樑積層厚度尺寸最適化

對於船艇加強材之設計，在已知之外加負荷下，除了設計斷面尺寸外，另外可於不同位置設計不同之積層方式，不同之積層種類及層數，致使積層厚度也不同，在斷面尺寸及附板厚度固定的情況下，帽型樑之flange、web及overlap厚度改變，使斷面之轉動慣性矩(moment of inertia)及中性軸位置改變，受力後之應力分佈也隨之改變。本節主要在斷面尺寸及附板厚度固定之情況下，探討如何經由積層之變化，達成最適化之設計。

本FEM模型與前一節所建之模型相同，惟前一節之模型，其帽型樑之高度及寬度為設計變數，積層厚度為固定值；而本節之模型中，

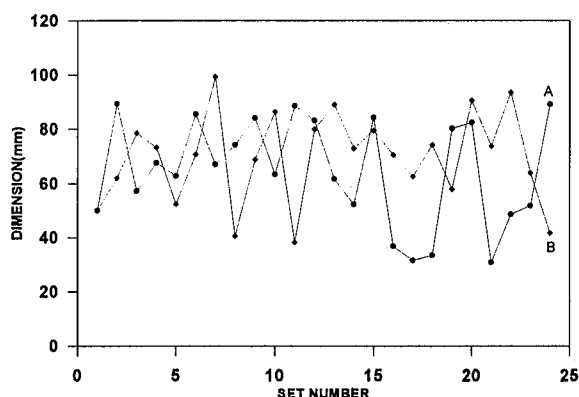


圖9 可行設計組合之斷面尺寸

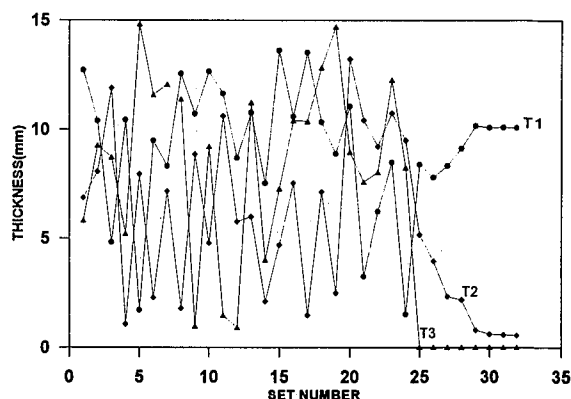


圖11 可行設計組合之各厚度值

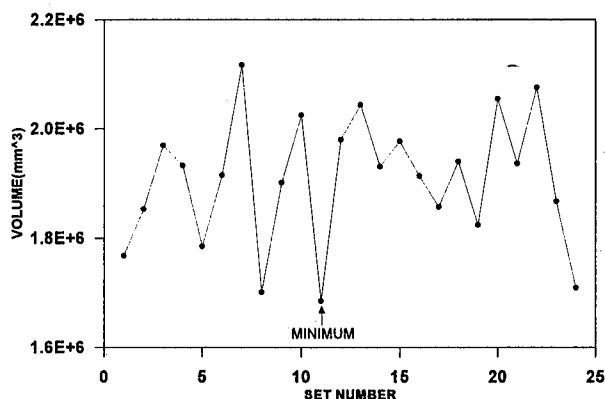


圖10 可行設計組合之積層板體積

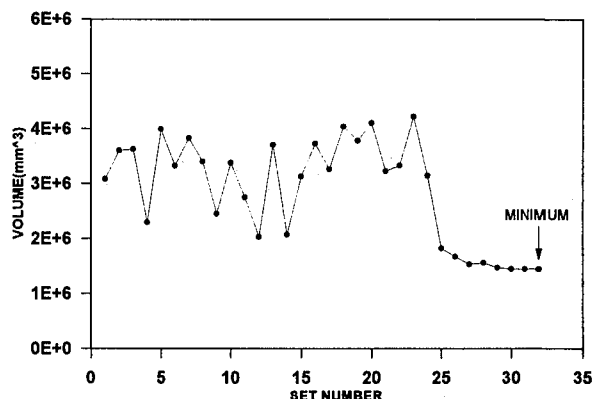


圖12 可行設計組合之積層板體積

帽型樑之高度及寬度則為固定值，積層厚度為設計變數，其餘之材料特性與邊界條件皆相同。

本例中帽型樑之寬度 $A=50\text{mm}$ ，高度 $B=50\text{mm}$ ，另設定其Flange、Web及Overlap之厚度 $T1$ 、 $T2$ 及 $T3$ 皆等於 4.42mm 為最適化之初始條件。

分析模型之積層厚度為設計變數，但假設材料特性不隨積層厚度之改變而變，即材料特性為固定值。

(1) 設計變數(design variables, DVs)

斷面厚度為主要探討之主題，故以帽型樑Flange厚度 $T1$ 、Web厚度 $T2$ 及Overlap厚度 $T3$ 為設計變數，找出最適合之斷面厚度尺寸；而設計變數之最大及最小值設定如下：

$$0\text{mm} \leq T1 \leq 15\text{mm} \quad (DV1)$$

$$0\text{mm} \leq T2 \leq 15\text{mm} \quad (DV2)$$

$$0\text{mm} \leq T3 \leq 15\text{mm} \quad (DV3)$$

(2) 狀態變數(state variables, SVs)

同前一節所述。

(3) 目標函數(objective function)

同前一節所述。

本例中首先以亂數技巧(random tool)，在設計變數之範圍內做30組亂數組合，計算出一組最小之目標函數，再以此組之設計變數作為起始變數，採first order optimization method，再計算出一組最小之目標函數，此組結果即為在設計變數及狀態變數之限制條件下最適化之積層厚度。

圖11及圖12為各設計組合與基層厚度及積層板體積關係圖，圖中最適化之組合為 $T1=0.075\text{mm}$ ， $T2=0.54355\text{mm}$ ， $T3=0.015\text{mm}$ 。

帽型樑斷面尺寸及積層厚度最適化

綜合以上兩節之討論，分別針對斷面尺寸及積層厚度來探討最適化問題。本節將以斷面

尺寸及積層厚度為設計變數，探討帽型樑之最適化問題。而隨設計變數之增加，問題變得較複雜，且FEM之計算時間也相對增加。

本FEM模型與前兩節所建之模型相同。而本節之模型中，帽型樑之高度、寬度及積層厚度等皆為變數，其餘之材料特性與邊界條件皆相同。

(1) 設計變數(design variables, DVs)

以帽型樑斷面尺寸及積層厚度為設計變數，而設計變數之最大及最小值設定如下：

- $30\text{ mm} \leq A \leq 100\text{ mm}$ (DV1)
- $30\text{ mm} \leq B \leq 100\text{ mm}$ (DV2)
- $0\text{ mm} \leq T1 \leq 15\text{ mm}$ (DV3)
- $0\text{ mm} \leq T2 \leq 15\text{ mm}$ (DV4)
- $0\text{ mm} \leq T3 \leq 15\text{ mm}$ (DV5)

(2) 狀態變數(state variables, SVs)

同前一節所述。

(3) 目標函數(objective function)

同前一節所述。

圖13、圖14及圖15為各設計組合與斷面尺寸、基層厚度及積層板體積關係圖，圖中最適化之組合為 $A=60.808\text{mm}$ ， $B=97.355\text{mm}$ ， $T1=6.4934\text{mm}$ ， $T2=0.484\text{mm}$ ， $T3=0.1\text{mm}$ 。

綜合以上三節之探討，原設計之帽型樑可達到之合理最佳化效益如下表所示：

設計變數	體積 mm ³	減少百分比 %
原設計	1.77E6	0
斷面尺寸	1.69E6	4.5
積層厚度	1.44E6	18.6
斷面尺寸及積層厚度	1.39E6	21.5

最適化分析討論

經由幾何尺寸及積層厚度之適當搭配設計，可合理設計出最輕量化之帽型結構，達到設計要求。綜合以上分析，可得結論如下：

1. 設計變數之最適化值隨狀態變數及目標函數之設定而變。

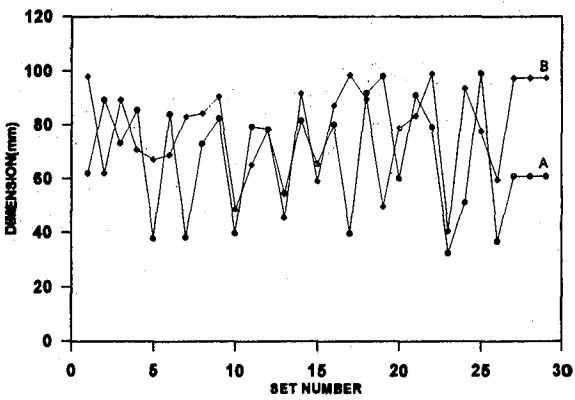


圖13 可行設計組合之斷面尺寸

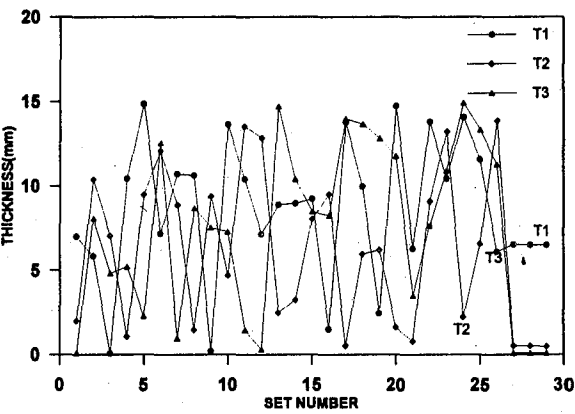


圖14 可行設計組合之各厚度值

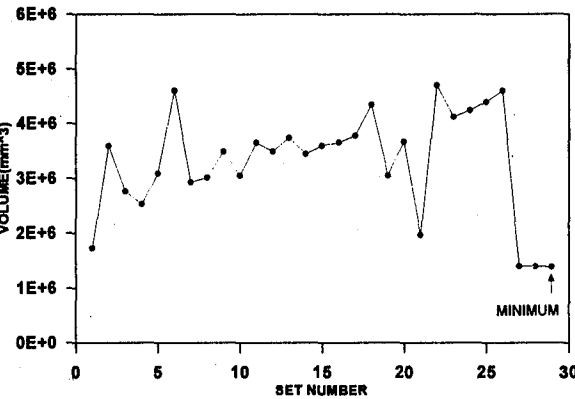


圖15 可行設計組合之積層板體積

- 2. 經最適化計算之值有可能是局部最小值 (local minimum)，為避免此一情形發生，可以不同之起始條件進行計算，以確保計算結果是整體最小值(global minimum)。
- 3. 在斷面尺寸固定之情形下，調整flange、web、overlap及附板之厚度，使形心位置愈接近斷面高度中點，則愈能達到最適化之要求。

結論與展望

本文主要針對複合材料船艇常用之帽型樑，以實驗方式配合數值模擬分析，探討帽型樑之力學特性。另外探討如何經由幾何尺寸及積層厚度之適當搭配設計，使帽型樑設計最適化，其最終目的在建立最適化評估模式，使設計之船舶達輕量化之要求。

而最適化之分析方法可繼續應用於船體其他結構之探討，可使全船之結構達合理化、最適化之設計。

誌謝

本研究計劃承蒙經濟部技術處之“經濟部八十九年度科技專案—船舶技術發展五年計劃”分項計劃下預算經費支援，得以順利完成，特此致謝。

參考文獻

1. “遊艇設計手冊”，聯合船舶設計發展中心 (1996).
2. JIS K 7054, “Testing Method for Tensile Properties of Glass Fiber Reinforced Plastics” (1987).
3. JIS K 7055, “Testing Method for Flexural Properties of Glass Fiber Reinforced Plastics” (1987).
4. ASTM, “ASTM-D3518, In-plane Shear Test Method”
5. LR, “Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft” (1996).

6. Det Norske Veritas, “Rules for Classification of High Speed and Light Craft” (1996).
7. “ANSYS Users Manual for ANSYS 5.6,” ANSYS (1998).

STUDY ON THE OPTIMUM DESIGN OF FRP HAT-TYPE BEAM

H.J. Lin* Y.C. Lee** C.S. Tang**

* Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, National Taiwan University

**United Ship Design & Development Center

Keywords: Composite Material, Finite Element Method, Hat-Type Beam

ABSTRACT

The lighter a ship's weight is, the faster the ship runs. Especially for a high speed craft, it is important to decrease the weight of structure. For most FRP ship, the hat-type beam is the major type of stiffener structure. The purpose of this paper is to study the optimum design of hat-type beams.

The four point bending test was used in the measurement of bending characteristics of hat-type beam. The ANSYS commercial code was also employed in the structural analysis. According to the experimental and numerical results, the reliability of finite element method was verified.

On the other hand, the optimization of hat-type beams was studied by using finite element method. Changing the cross section and laminate properties, we attempt to design the lightest beam with high modulus and strength.

(Manuscript received Sep. 9, 2001,

Accepted for publication Jul. 22, 2002)

