# FRP船體結構力學之探討

# 李雅榮

國立台灣大學 船舶技術研究中心 關鍵詞:FRP、船體結構

## 摘 要

纖維強化塑膠(Fiber Reinforced Plastics,簡稱 FRP)材料具有質量輕、強度大、不腐蝕、易成型等優點, 已廣泛成為漁船、遊艇、快艇等小型船舶之主要材料,唯此種材料力學性質較為奇特,依各種纖維、樹脂 之組合、製程方式變化多端,特別是受外力作用下,其變形、破壞過程、極限強度均不易掌握,以致於設 計者均很保守地使用此材料,使得船隻過於笨重,無法發揮 FRP 材料特性,此有賴更多專家學者在此方面 上研究。本文為作者多年來之研究主題,將部分研究成果彙整於造船學會專題演講中發表,與專家先進們 分享。本文內容包括:1.FRP 船之原料及製程,2.FRP 材料之力學特性,3.FRP 材料強度,4.FRP 結構強 度:(1)船舶整體強度,(2)波擊破壞強度,(3)夾芯材之衝擊強度,(4) 殼板之衝擊強度,(5)螺栓接合 強度,(6)挫曲強度。1、2項屬於一般性介紹,3、4項爲個人之研究成果。期望此內容有助於國內船舶設 計者對 FRP 材料及結構之瞭解,進而設計建造出更輕快且安全之 FRP 船。

## FRP船之原料及製程

### 1. FRP船舶

FRP製船舶具有質量輕、易製造及維護之優點, 常見於遊艇、漁船、快艇、工作船等小型船舶,圖1 為嘉鴻遊艇廠建造之82呎豪華快艇,圖2為海釣船,圖 3為一般之FRP漁船,圖4與5是快艇及海洋巡防艇。

#### 2. 原材料

FRP之原材料包括纖維、樹脂、硬化劑、芯材等。 一般FRP船舶使用之纖維是玻璃纖維,即由玻璃紗(圖 6,yam)製成無向性之切股氈(mat)(圖7)、0°及90°編織 之編織布(roving)(圖8)、兩單向(0°、90°)相疊之LT、 四單向(0°、±45°及90°)相疊之DBLT,或切股氈與編 織布(mat+roving)之組合(圖9)等。但有些特殊部位為增 加強度或韌性,而採用單向高強度、高剛性之碳纖維 及高韌性、耐衝性之克維拉纖維(kevlar),或採用玻璃 /克維拉(glass/kevlar)、玻璃/碳(glass/carbon)之混編纖 維。另一方面,一般樹脂雖有熱固性及熱塑性兩類之 分,但用於FRP船舶上乃以經濟實用之不飽和聚酯樹 脂(polyester)為主。而在FRP夾心板製造上,其芯材常 採用輕量之PVC發泡材(foam,圖10)或具相當強度之 巴杉木(圖11)。

# 3. 製程

FRP有各式各樣之成型方法,但使用於FRP船舶, 還是以最簡便之手積法為主(圖12),即用刷子、滾輪 等簡單器具,以人的手將樹脂含浸於舖在船殼母模上 之纖維基材,依序重覆積層至所需要厚度,在適當之 溫度管理下,使樹脂硬化,而後將硬化物脫模即得成 品之方法。此種成型方法,使用於船殼等少量多樣之 大型結構,施工方法簡單,唯工廠設備、工人手藝、 生產管理之良否影響成型品之品質與生產性,且樹脂 成型過程溢出之刺激性氣體,對施工環境及人員均有 不良效應。針對於此,近年來特別在遊艇製造上,已 大量採用封閉式之真空袋法及SCRIMP法。其中SCRIMP (圖13)是由Seemann Composite Resin Infusion Molding Process縮寫而成。SCRIMP技術相似於RTM (樹脂轉注 成型法)的方法,其最大的不同點在於SCRIMP方法是 利用真空將液熊樹脂引進於已排列佈置完成的纖維之 中,而非使用正壓力的方法將液態樹脂灌進纖維當中。

在SCRIMP製程中,所有纖維、芯材和填充物, 在乾燥的狀況下被放置和排列於模具之上。一但放置 完成之後,真空袋即可放置於構件上方並將此構件封 閉,此時可將真空袋中空氣抽出保持真空,此即完成

<sup>†</sup> 責任作者(yjlee@ntu.edu.tw)

了樹脂注入前之準備。當樹脂開始被引進到構件時, 會經由預先安排好之樹脂管路,和一連串的通道逐漸 擴散至纖維中,直到材料被完全含浸而達飽和為止。 使用真空壓力至構件中具有三個目的。第一,它可增



圖1 嘉鴻遊艇82呎豪華快艇



圖2 海釣船



圖3 一般FRP漁船



圖4 快艇

加纖維與纖維之間的緊密度,也因爲這個原因,由 SCRIMP技術所生產的構件具有相當高的纖維含量。 標準的SCRIMP構件通常具有大約67~75%的纖維含 量,依據纖維的種類、纖維的編織方式和使用樹脂的 種類而定。第二,在樹脂灌注之前,真空將停留於纖 維中的空氣移出,如此可使構件不含有空洞(使用標準 的ASTM測試方法測試構件,幾乎測不出空洞率),最



圖5 海洋巡防艇



圖6 玻璃紗(yarn)





後所得到的是有效率的、輕量化的構件並具有很好的 機械特性。第三,則是利用大氣壓力與真空之間的壓 力差產生一驅動力使之能順利的將樹脂引進於佈置好 的纖維材料中。整個SCRIMP技術過程中的關鍵在於 設計樹脂灌注計畫,也就是如何使用正確的方法注入 樹脂,並且在計畫的時間內使樹脂完全地含浸在構件 的纖維材料之中。樹脂注入的設計流程依據許多不同 的變數,而這些變數也必須小心地加以考慮。這些變 數包含了環境溫度、樹脂的黏性、纖維的編織方式和 構件外型的複雜性等等。



圖8 0°及90°編織之編織布(roving)

SCRIMP之優缺點如表1所示,強度上之比較分析 將於後述,目前面臨到的最大問題是表面不平滑而導 致折光之問題(圖14),船廠需對整個船殼表面重新研 磨才能光亮不折光,耗時費工,增加不少成本及困擾, 此有待儘速研討改善之道。



圖10 PVC發泡材(foam)



圖9 切股氈與編織布(mat+roving)之組合



圖11 巴杉木



# 4. 主要成品

最基本之FRP構件是積層板及三明治夾芯板(圖 15),進而由此組成之甲板、隔艙壁(圖16)及船殼等, 亦有小型螺槳為減輕重量而採用FRP者。



# 圖13 SCRIMP施工法



# 圖14 左圖為折光現象,右圖為硏磨過後,表面較平 整而可呈現單向反射



圖15 左圖為積層板,右圖為三明治夾芯板



圖16 隔艙壁

#### 表1 SCRIMP之優缺點

優點	缺點
● 有毒氣體溢散量少。	<ul> <li>●衝撃、疲勞等動強度較差</li> </ul>
<ul> <li>● 成品均匀無氣泡、纖維含</li> </ul>	(有待進一步研究)。
有率高(70%),厚度較小	●在真空袋內一體成型,樹
且均勻,成品品質佳。	脂成型發熱量大,熱漲冷
● 重量輕、強度高。	縮致使膠殼表面不很平
● 模具成本低,適合中大型	整,呈折光現象(Print
構件。	through),需再研磨加工,
<ul> <li>構件幾何自由。</li> </ul>	很費功夫。

表2 FRP與金屬材料之機械性質比較

機械性質	軟鋼 (SS41)	鋁合金 (5083)	GFRP(MR玻纖含 有率40%+不飽和 聚酯樹脂)	CFRP(一方向碳 纖維+環氧樹脂)
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	7.8	2.7	1.5	1.7
彈性係數 (GPa)	210	72	10	140
拉張強度 (MPa)	410	280	160	1500

#### 表3 原材料之種類

類別	編號	型 號	材 料 說 明		
	1	R800	E-glass woven roving		
	2	R600	E-glass woven roving		
	3	M450	E-glass mat		
加	4	M300	E-glass mat		
	5	C72K	E-glass/Kevlar/Mat Hybrid		
	6	C77K	E-glass/Kevlar/Mat Hybrid		
	7	K-1350	Kevlar woven roving		
強	8	S-4533	S2-glass woven roving		
	9	S-4522	S2-glass woven roving		
	10	GA045	Carbon woven roving		
	11	G282	Carbon woven roving		
材	12	DBM1708	E-glass/Mat knitted fabric		
	13	DBM2408	E-glass/Mat knitted fabric		
	14	CDM1808	E-glass/Mat knitted fabric		
	15	CDM2408	E-glass/Mat knitted fabric		
樹	1	157BQT	Polyester resin		
脂	2	R802	Vinylester		

# FRP材料之力學特性

FRP之主要機械性能與鋼、鋁等常用金屬材料之 比較如表2所示,具有優良之比強度,特別是碳、克維 拉纖維之FRP,其比強度已打破一般單一材料無法超 過4之境界(圖17),但對比剛性而言,船用之GFRP是 遠小於一般鋼材(只有1/4而已),故只適用於製造較小 型船舶(小於50 m長),但可使用三明治夾芯構造或混 編CFRP來強化之。FRP具有脆性破壞之特性,其應力 -應變關係圖(圖18)與金屬材料(圖19)相比,幾乎無塑 性行爲可言,且由於纖維之方向性,使其在空間上呈 異向性(圖20),在使用上要儘量配合結構之受力方 向,安排纖維之方向來抵抗之,例如船殼上之主應力 線,如圖21所示,故在舯要舖0°、90°方向纖維,而在 1/4、3/4船長處,要舖設±45°方向纖維。

#### FRP材料強度

將表3所列之原材料(不同種類之纖維及樹脂)所 製成之FRP試片,進行拉張、壓縮、彎曲、剪切及衝 擊試驗,其結果之比較如圖22所示,碳纖維具有較高 之強度,而克維拉纖維具有較優良之耐衝擊特性。

其次對手積FRP及SCRIMP FRP之材料強度作一 比較,由表4可知,SCRIMP FRP成品較薄(樹脂含有率 較低),但總承載負荷變化不大,因而單位面積之承載 力(強度)大幅提升,可使船殼重量減輕,有利於遊艇 等高性能船舶之製造。但在動態、疲勞強度方面,如 圖23所示,反而由於SCRIMP FRP所含之樹脂量較 少,對於堅硬纖維間碰撞磨耗引起疲勞破壞之緩衝能 力減低,致使疲勞等動態強度較不理想,此乃今後需 進一步研究之課題。







拉伸試 片編號	施工法 (寬度 25mm)	厚度t (mm)	最大 負荷 (kg)	破壞 強度 (kg/mm²)	最大 應變 (10 <sup>3</sup> µɛ)	彈性 係數 (kg/mm <sup>2</sup> )
LT800*5	Scrimp	3.01	2301.07	30.98	16.24	2454
LT800*5	Hand Lay Up	3.91	2388.59	24.66	16.31	1872
KBM280 8*2+M3	Scrimp	2.59	1983.02	30.57	19.77	2094
KBM280 8*2+M3	Hand Lay Up	3.70	2235.13	24.41	17.99	1588
M3*3+C OT2004* 9+M3	Scrimp	8.46	5907.95	27.12	16.66	1862
M3*3+C OT2004* 9+M3	Hand Lay Up	14.34	5949.06	16.03	16.14	1219
M3*3+L T800*7+ M3	Scrimp	7.24	4006.89	21.60	11.57	2125
M3*3+L T800*7+ M3	Hand Lay Up	11.38	4670.56	16.01	13.06	1481
M3*3+A HL800*6 +M3	Scrimp	6.65	5506.87	32.29	21.06	1961
M3*3+A HL800*6 +M3	Hand Lay Up	10.09	5089.59	19.27	17.27	1469

表4 手積及SCRIMP FRP之材料強度

彎曲試片	施工法	厚度t	最大負荷	破壞強度	彈性係數
編號	(寬度15mm)	(mm)	(kg)	(kg/mm2)	(kg/mm <sup>2</sup> )
LT800*5	Scrimp	2.98	89.02	51.95	2524
LT800*5	Hand Lay Up	3.77	129.45	46.81	1823
KBM280 8*2+M3	Scrimp	2.70	54.56	29.78	1379
KBM280 8*2+M3	Hand Lay Up	3.86	75.23	30.72	1080
M3*3+C OT2004* 9+M3	Scrimp	8.51	243.14	45.59	2107
M3*3+C OT2004* 9+M3	Hand Lay Up	13.75	493.56	35.63	1680
M3*3+LT 800*7+M 3	Scrimp	7.06	159.94	32.25	1559
M3*3+LT 800*7+M 3	Hand Lay Up	10.82	292.97	34.46	2046
M3*3+A HL800*6 +M3	Scrimp	6.58	164.67	36.94	1466
M3*3+A HL800*6 +M3	Hand Lay Up	10.28	315.29	40.65	1767

#### 表5 設計FRP結構之流程



# FRP結構強度

設計FRP結構時,如表5所示,與一般金屬材料不同,需將原材料之選擇及纖維之排列方向一起列入考慮,故其設計參數較多、變化彈性較大,可設計出更經濟有效之結構物,但相對地,其力學特性較複雜,分析設計方法較困難,一般需靠FEM等數值解析,並輔以實驗來驗證其結果。

FRP結構之基本構件是積層板、積層殼、夾芯粱、 夾芯板等,此等構件均由圖24所示之層(layer)所組 成,各層上之纖維方向(θ)不同,主宰結構之力學特 性。通常單一層稱為單片(lamina),無方向性之Mat可 視為等向性材,其他Roving或單向材可視為正交異向 性材。許多單片組合成積層板(laminate),此種積層材 料呈非等向性,但其可依積層理論建立力(N、M)與 變形(ε<sup>°</sup>、k)之關係如下:

$$\begin{cases} N \\ M \end{cases} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon^0 \\ k \end{cases}$$
 (1)

式中[A]為面內剛性矩陣,[D]為彎曲剛性矩陣,[B]為 耦合剛性矩陣。矩陣[B]表示耦合效應,包括面內正向 與剪切之耦合,及面內、外之平面與彎曲之耦合(圖 25)。

由(1)式推導出積層板之基礎方程式如下:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{12} & L_{22} & L_{23} \\ L_{13} & L_{23} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ P \end{cases}$$
(2)

式中,

$$\begin{split} L_{11} &= A_{11} \left( \right)_{,xx} + 2 A_{16} \left( \right)_{,xy} + A_{66} \left( \right)_{,yy} \\ L_{12} &= A_{16} \left( \right)_{,xx} + \left( A_{12} + A_{66} \right) \left( \right)_{,xy} + A_{26} \left( \right)_{,yy} \\ L_{22} &= A_{66} \left( \right)_{,xx} + 2 A_{26} \left( \right)_{,xy} + A_{22} \left( \right)_{,yy} \\ L_{13} &= -[B_{11} \left( \right)_{,xxx} + 3B_{16} \left( \right)_{,xxy} + (B_{12} + 2B_{66} \right) \\ &\qquad \left( \right)_{,xyy} + B_{26} \left( \right)_{,yyy} ] \\ L_{23} &= -[B_{16} \left( \right)_{,xxx} + (B_{12} + 2B_{66} \right) \left( \right)_{,xxy} + 3B_{26} \\ &\qquad \left( \right)_{,xyy} + B_{22} \left( \right)_{,yyy} ] \end{split}$$



$$\begin{split} L_{33} &= D_{11} \Big( \Big)_{,xxxy} + 4 D_{16} \Big( \Big)_{,xxxy} + 2 \Big( D_{12} + 4 D_{66} \Big) \\ & \Big( \Big)_{,xxyy} + 4 D_{26} \Big( \Big)_{,xyyy} + D_{22} \Big( \Big)_{,yyyy} \end{split}$$

其中的*u、v、w*為三個方向之變位,*P*為面外負荷,*A、 B、D*分別是面內、耦合、彎曲剛性矩陣

理論上,由此基礎方程式可解析出結構物之力學 反應,但由於式子之複雜性,真正能獲得解答的只限 於單純邊界條件、單純均佈負荷、線性材料、幾何變 形微小等特殊狀況而已,大部分之問題,還是要借用 FEM等數值分析方法,才能得到所期待的答案。一般 探討結構強度所採用之FEM的主要元素(element)種類 如圖26,而本文在分析FRP結構常採用8節點之shell element及21或27節點之實體元素(solid element,圖



27),另外,考慮厚度方向材料之不同,需以特殊之積 層元素加以配合(圖28),才能得到合理結果。現將以 FEM分析FRP船體構件之實例加以說明。

### 1. 船舶整體強度

以既有船18m之FRP快速艇為例,進行整體結構分 析與尺寸檢討。該船之剖面線圖如圖29所示,由於屬 快艇,艏底部之波擊力(slamming force)為重要負荷, 其沿船長方向之代表性分佈負荷,如圖30所示,而FEM 之分析模型(圖31)主要由板及梁元素組成。針對各種 負荷分佈,經過適當的結構尺寸安排與計算,可得到 在最大變形量幾乎不變下,結構總重量比原設計減少 20%之結果(表6)。





圖31 FEM分析模型



圖32 滑航快艇

表6	結構尺寸變化下之變形量及重量增減率
~ ~	

變化條件	最變形量	增減率(%)	船重增減率(%)
Original Ship	53.73 MM	0.000	0.000
BL1 -50.0% H	57.25 MM	6.551	-6.012
<b>BL2</b> Deletion	54.11 MM	0.707	-6.877
BL3 -20.0% H	56.28 MM	4.746	-1.621
<b>BL5</b> Deletion	54.49 MM	1.414	-1.531
Plate -30% T	63.98 MM	19.077	-4.084
Spacing 2-2	40.52 MM	24.586	0.000
Modified Ship	53.05 MM	-1.266	-20.125

船重增減率: -20.125%

Component: Maximum Y Displacement



圖33 船用FRP積層材料之拉張與彎曲試驗結果



圖34 將樹脂層與纖維層分開考慮

### 2. 波擊破壞強度

FRP船具有重量輕、速度快之優點,但相對地如 滑航快艇(如圖32)於高速航行時,承受巨大之波擊負 荷,此時,船底FRP板是否能承受得了此巨大波擊負 荷,乃為結構設計分析之重要課題。但有關此方面之 研究並不多,大多僅限於航空用之CFRP,對於以切股 氈(mat)、編織布(roving)組合之GFRP為主之船底板, 其力學特性更為複雜,有深入探討之必要。

圖33是船用FRP積層材料之拉張與彎曲試驗結 果,由圖可知,MR積層板不僅兩者之強度(X)不同, 連剛性(彈性係數E)亦有差異,在等向性之金屬材料 上,拉張與彎曲之剛性是相同的,但對兩種不同材質 (1、2)組合之積層梁而言,其拉張與彎曲剛性(E<sub>t</sub>、E<sub>b</sub>) 各為:

$$E_{t} = \frac{E_{1}t_{1} + E_{2}t_{2}}{t}$$
$$E_{b} = \frac{E_{1}I_{1} + E_{2}I_{2}}{I}$$

(3)

式中, E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>、t<sub>1</sub>、t<sub>2</sub>及I<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>為各層之彈性係數、厚度 及慣性矩, 而t、I分別為整體積層樑之厚度及慣性矩。 針對於此, 在FEM解析時, 需將GFRP中之纖維與樹脂 層分離計算(圖34), 才能得到較精確的結果。

在破壞分析上,需先訂出各層材料之破壞準則及破損 後材料強度及剛性之修正方式。考慮各材料之方向 性,破壞準則在樹脂及mat上採用Von Mises法則,而 roving用Tsai-Wu法則。另外,由於顧及材料破損後應 力會重新分配,變化很不規律,而應變較單純地增大, 故破壞法則及破損後之剛性修正採用應變爲計量標 準,經過各種試驗與分析結果,切股氈(mat)及編織布 (roving)之修正法則如圖35所示。

將上述破壞法則及剛性修正方式應用於M300、 R800及M-R積層板之彎曲及拉張試驗,其結果如圖36 所示,可準確地預測試驗結果。其次,將此應用於承



受均佈水壓或波浪衝擊之積層板的破壞分析。在試驗 驗證上,由於需要很大的負荷才能破損,故自行設計 一油壓控制裝置,如圖37所示之test rig,由上端之作 動桿施力或衝擊活塞,經內部之水壓傳遞至試片(積層 板)上,圖38為均佈靜水壓之試驗及FEM的分析結果, 數値計算可正確地模擬均佈水壓下FRP板之破壞過



圖36 M300、R800之模擬



程。圖39為動態衝擊水壓下FRP板之破壞實驗與數值 模擬結果,雖數值模擬只能計算到最高負荷,其後之 變形路徑因數值發散而無法追蹤,但結果亦相近似。

#### 3. 夾芯材之衝擊強度

夾芯材是由上下兩片薄面材(Face Plate)及中央厚 芯材(Core)組成,面材具有薄、高強度的特性,可為 薄金屬片或FRP積層材(FRP船),而中央之芯材則是 厚、質量輕、剛性及強度較低,因而夾芯材具有重量 輕、強度及剛性佳之優點,常用於FRP船上。

由於夾芯材之面材與芯材材質差異很大,故整體 夾芯材所表現出來的力學特性較複雜,如圖40所示, 當芯材之剪切剛性較大,足夠傳遞上下面材間之力量 時,其變形類似均質梁,合乎梁之彎曲理論,呈現整 體變形之趨勢,但若芯材之剪切剛性很小,無法傳遞 上下面材間之力量時,則其彎曲變形呈現上下面材、





The progressive failure pattern in core of sandwich beam



Photo of Mode I failure pattern obtained by experiments



Comparison on experimental and numerical F-d curves of sandwich beam





Photo of Mode II failure pattern obtained by experiments

圖44 芯材局部壓潰凹陷(芯材密度較高)



Comparison on the experimental and numerical F-d curves of sandwich beam with core density 0.2

圖45 力-位移圖(芯材密度較高)



The impact force history of sandwich beam with core density 0.1





The impact force history of sandwich beam with core density 0.2

圖47 衝擊力之時間歷程(芯材密度較高)

芯材各自為政,類似重疊梁之行為。如此之夾芯材承 受衝擊時,其破壞形式亦隨面材及芯材之厚度、剛 性、強度而變化,現象更形複雜,針對於此,以試驗 配合FEM數值解析,進行系列之研究。

圖41是衝擊試驗之裝置,試片採用兩種不同芯材 密度(或剛性、強度),密度低者,呈現芯材剪切龜裂 而破損(圖42),而密度高者,於衝頭正下方之芯材呈 壓潰凹陷而破壞(圖44)。針對此現象,採用FEM (ABAQUS)配合破壞剛性修正(UMAT),可得到很好之 模擬結果(圖43、圖45),其衝擊力之時間歷程亦很一 致(圖46,圖47)。

#### 

FRP積層板雖具有優良之面內強度,但由於層間 並無纖維貫穿,受面外負荷時,易生層間脫層而失去 強度,特別是承受面外衝擊時,其破損強度為重要課 題。

通常為強化平板之面外強度,除了增加板厚外, 最好的方法是彎成有曲度之殼(圖48)。但對承受衝擊 負荷之板殼而言,殼雖具有較強之剛性,但在同樣衝 擊速度下所承受之衝擊力亦較高,故其破壞強度反而 較平板差(圖49、50),針對於此,以強度較佳之單向 CFRP積層板殼為對象加以探討。

FEM數值分析時,對單向CFRP材之破壞法則及 破損後之剛性修正如表7及圖51所示,所採用之試片 及試驗裝置如圖52,而FEM元素分割示於圖53,其分 析及實驗結果示於圖54、圖55,不管力-位移關係或破 壞形式均相吻合。

## 5. 螺栓接合強度

FRP構件之接合有黏著及螺栓結合兩種形式,黏 著之強度、環境效應等因素,可靠性較低,一般船用 FRP還是以螺栓接合為主,但螺栓接合時,FRP板需





表7 CFRP之破壞判斷準則









挖孔而後再鎖螺栓,當其受力時(圖56),螺栓孔易生 應力集中而破損,而其破損方式隨螺栓孔徑、間距等 幾何尺寸呈現不同之破壞形式(圖57),且螺栓上螺帽 之鎖緊力量亦會改變接合強度。

在此,取出圖58所示之螺栓接合FRP板探討其接 合強度。FEM之分析模型如圖59,由於此分析涉及螺 栓與FRP材之接觸問題,故採用增量型之聯立式如下

Υ <sub>c</sub>	0	$(C_{sc})^T$	$\left[\Delta\delta_{\rm c}\right]^{(\rm n-1)}$	$\left[\Delta F_{c}\right]^{(n)}$	$\left(F_{R_{c}}\right)$	(n-1)
0	$\overline{K_{b}}$	$(C_{sb})^T$	$\left\{ \Delta \delta_{\mathrm{b}} \right\}$	$= \left\{ \Delta F_b \right\}$	$-\left\{F_{R_b}\right\}$	(4)
$C_{sc}$	$\mathrm{C}_{\mathrm{sb}}$	0	[	[0]	0	

式中 $[K_c]$ 及 $[\overline{K_b}]$ 分別表示積層板及螺栓之整體組合剛 性矩陣; $[C_s]$ 爲變位束制條件式之係數矩陣; $\{\Delta\delta_c\}$ 及  $\{\Delta\delta_b\}$ 分別表示積層板及螺栓之整體節點變位增量向 量; $\{\Delta F_c\}$ 及 $\{\Delta F_b\}$ 分別表示積層板及螺栓之整體外力增 量向量; $\{F_{R_c}\}$ 及 $\{F_{R_b}\}$ 則分別表示積層板及螺栓至前一 增量階段為止之整體內、外負荷修正向量(不平衡量)。

以S-500 GFRP積層板為例,探討螺栓間距(W)對 接合強度之影響,由圖60可知,不管FEM計算或實驗 結果均顯示,當W達到某一寬度後,強度可保持不變, 而其破壞形式呈螺栓孔周圍之局部破壞,此有利於整 體接合強度。以同樣方式,系列分析螺栓孔及間距等 幾何尺寸與接合強度之關係,由表8可得到要形成軸







幾何尺寸與破壞形式及強度之關係

4

2

6

承(bearing)破壞形式亦即較佳接合強度所需之幾何尺 寸,此可供施工者於挖孔時之依據。另外,由圖61可 知,螺帽上之鎖緊力可防止孔緣FRP材之脫層而提升



圖60-1 以螺栓接合之S-500 GFRP積層板於不同W/d 下接合強度之有限元素分析與實驗結果比較



 $[0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}]_{s}$  (Free pin) [90°/45°/0°/-45°]s (Free pin)

Damage zones (photos) of the pin joint in S-500 GFRP laminates.

圖60-2 破壞型式



Effect of lateral clamping torque on the bolted joint strength of the S-500 GFRP laminate:  $[0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}]_{s}$ .

圖61 鎖緊力矩對接合強度之影響

接合強度,唯力量達某個程度即達飽和,再大會使表 面板壓潰反而有不良影響。

由上可知,因螺栓挖孔,致使孔緣應力集中,降 低接合強度,特別是FRP材料支撐力量之纖維被切 斷,應力呈不連續使集中現象更嚴重,針對於此,可 考慮將孔緣之纖維採繞孔安排,如圖62所示,其結果 示於圖63,確實有相當差距,可提升螺栓之接合強度。





Comparison of actual fiber configuration with stream line.

圖62 纖維繞孔FRP





Buckling strength of antisymmetric angle-ply square plate with boundary condition of four edges simply supported: (a)  $[\theta/-\theta]$ ; (b)  $[\theta/-\theta/\theta/-\theta]$ ; (c)  $[\theta/-\theta/\theta/-\theta/-\theta/-\theta/-\theta/-\theta]$ .



#### 6. 挫曲強度

細長或單薄結構承受壓縮負荷,常於材料未破壞 前,結構發生面外變形(突變),使原來壓縮變形呈不 穩定現象,結構因幾何不穩定而破壞稱之為挫曲破 壞。FRP板由於其上之纖維方向左右材料性質,故挫 曲強度隨配向角θ變化之情形如圖64所示,如能適當 的選擇配向角,可得較高之挫曲強度。

另外,FRP夾芯材之挫曲現象又更複雜,隨著芯 材之剪切彈性係數及壓縮彈性係數之高低,呈現圖65 所示(a)Euler挫曲(b)剪切挫曲(c)對稱挫曲(d)反對稱挫 曲(e)小波挫曲,其中(a)(b)之整體挫曲又如圖66所示, 隨著剪切剛性(G<sub>c</sub>)及芯材厚度(t<sup>c</sup>)而變化。

## 結 論

FRP為中小型船舶之主要材料,其材料特性遠較 一般金屬材料複雜,隨各種原材料之種類、配方、製 程等而有所不同,但相對地,其材料、結構之設計自 由度將會更多。因此,如能確實了解,進而掌握FRP 之材料特性,充分發揮其在力學上之優點,將可建造 出優良性能之FRP船。

# 參 考 文 獻

- 李雅榮,"複合材料力學", 台大工程科學及海洋工程 系所教材 (2004)。
- 李雅榮、俞君俠, "夾心板結構挫曲強度之探討", 中 國機械工程學刊, 第七卷, 第一期, pp.41-51 (1986)。
- Lee, Y.J. and W.H. Chen, "Failure Process and Bolted Joint Strength of Composite Laminates," *J. Chinese Soc. Mech. Engineers*, Vol.9, No. 3, pp.169-182 (1988).
- Lee, Y.J., H.J. Lin and C.C. Lin, "Buckling Analysis of Composite Laminates," *Comp. Struct.*, Vol.12, pp.133-148 (1989).
- Lee, Y.J., H.J. Lin and C.C. Lin, "Study on the Buckling Behavior of Orthotropic Square plate with a Central Circular Hole," *Compos. Struct.*, Vol.13, pp.173-188 (1989).
- Lin, H.J. and Y.J. Lee, "On the Inelastic Impact of Composite Laminated Plate and Shell Structures," *Comp. Struct.*, Vol.14, pp.89-111 (1990).
- Lin, H.J. and Y.J. Lee, "Use of Static Indentation Laws in the Impact Analysis of Composite Laminated Plates and Shells," *J. Appl. Mech.*, Vol.57, pp.787-789 (1990).
- Lin, H.J. and Y.J. Lee, "Impact-Induced Fracture in Laminated Plates and Shells," *J. Comp. Mater.*, Vol.24, pp. 1179-1199 (1990).
- 9. Chen, W.H. and Y.J. Lee, "The Effects of Clearance and Pin Elasticity on the Bearing Strength of Composite La-

minates," J. Chinese Soc. Mech. Engineers, Vol.11, No.3, pp.147-157 (1990).

- 李雅榮、林輝政、許首雄,"船用FRP材料剝離發生之 基礎研究",中國造船暨輪機工程學刊,第九卷,第二 期,pp.61-80 (1990)。
- Lee, Y.J. and W.H. Chen, "Study on the Failure Behavior of Bolted Connections in Vessel Made of GFRP Laminates," *J. Soc. Nav. Archit. Jpn.*, Vol.169, pp.467-476 (1991).
- Chen, W.H. and Y.J. Lee, "Failure Process and Pin-Bearing Strength of Laminated Composites at Elevated Temperature," *J. Reinf. Plast. Comp.*, Vol.11, pp.743-771 (1992).
- Chen, W.H. and Y.J. Lee, "Effect of Temperature on the contact Stresses and Residual Bearing Strength of Pin-Loaded Composite Laminates," *J. Therm. Stresses*, Vol.15, pp.419-437 (1992).
- Lin, H.J. and Y.J. Lee, "Strength of Composite Laminates with Continuous Fiber around a Circular Hole," *Comp. Struct.*, Vol.21, pp.155-162 (1992).
- 15. 李雅榮、林輝政、劉康俊,"幾何參數對螺栓接合積層 板疲勞強度之影響",中國造船暨輪機工程學刊,第十 二卷,第一期,pp.1-9(1993)。
- Lee, Y.J., H.J. Lin and Y.J. Liou, "The Dynamic Buckling Strength of Spherical Caps," *Comput. Struct.*, Vol.48, pp. 517-521 (1993).
- Lee, Y.J., H.J. Lin and Y. Shyu, "The Impact Behavior of Composite Sandwich Used in Ship Structures," *J. Soc. Nav. Archit. Jpn.*, Vol.174, pp.447-456 (1993).
- 李雅榮、林輝政、林俊吉,"鉚釘接合複材結構之挫曲 強度分析與實驗", *力學學刊*, Vol.10, pp.237-243 (1994)。
- 李雅榮、李俊興, "FRP滑航快艇之結構強度分析", 中 <u>國造船暨輪機工程學刊</u>, 第十四卷, 第一期, pp.36-46 (1995)。
- 20. 李雅榮、鍾承憲,"FRP快艇船底結構之耐波擊強度分析",中國造船暨輸機工程學刊,第十五卷,第一期, pp.31-47 (1996)。
- Lee, Y.J., and Y. Shyu, "Low Velocity Impact Behavior Analysis of Sandwich Beam Used in Ship Structures," J. Soc. Nav. Archit. Jpn., Vol.182, pp.631-638 (1997).
- 李雅榮、徐堯,"複合夾心材料低速衝擊特性之數値分 析",國立台灣大學工程學刊,第七十二期,pp.1-15 (1998)。
- 23. Lee, Y.J., C.F. Lee and W.S. Fuo, "Study on the Compressive Strength of Laminated Composite with Through

the Width Delaminations," *Comp. Struct.*, Vol.41, pp.229-241 (1998).

- 24. 李雅榮、徐堯,"船用複合夾心材衝擊特性之探討", 中國造船暨輪機工程學刊,第十八卷,第二期,pp.1-13 (1999)。
- Lee, Y.J., H.J. Lin and C.C. Lin, "Study on the Post-Buckling Behavior of Laminates Connected by Rivets," *J. Reinf. Plast. Comp.*, Vol.20, pp.902-920 (2001).
- Huang, C.H. and Y.J. Lee, "A Quasi-Static Method for the Simulation of Composite Laminated Plates Subjected to Low-Velocity Impact," J. Soc. Nav. Archit. Mar. Engineers, R.O.C., Vol.21, pp.83-91 (2002).
- Lee, Y.J. and C.H. Huang, "Ultimate Strength and Failure Process of Composite Laminate Plates Subjected to Low-Velocity Impact," *J. Reinf. Plast. Comp.*, Vol.22, pp. 1059-1081 (2003).
- 李雅榮、鍾承憲, "GFRP船底板破壞行為之探討", 中 國造船暨輪機工程學刊, 第22卷, pp.87-94 (2003)。
- 29. Huang, C.H. and Y.J. Lee, "Experiments and Simulation of the Static Contact Crush of Composite Laminated Plates," *Comp. Struct.*, Vol.61, pp.265-270 (2003).
- 30. Lee, Y.J. and C.H. Chung, "Study on the Mechanical Properties of the Marine FRP Laminates," *J. Comp.*

Mater., Vol.37, pp.967-983 (2003).

- Lee, Y.J. and C.C. Lin, "Regression of the Response Surface of Laminated Composite Structures," *Comp. Struct.*, Vol.62, pp.91-105 (2003).
- Lee, Y.J. and C.C. Lin, "Optimized Design of Composite Propeller," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, Vol.11, pp.17-30 (2004).
- Huang, C.H. and Lee, Y.J., "Static Contact Crushing of Composite Laminated Shells," *Comp. Struct.*, Vol.63, pp. 211-217 (2004).
- Lin, C.C. and Y.J. Lee, "Stacking Sequence Optimization of Composite Laminates Using Genetic Algorithm with Local Improvement," *Comp. Struct.*, Vol.63, pp.339-345 (2004).
- Huang, C.H. and Y.J. Lee, "Quasi-static Simulation of Composite Laminated Shells Subjected to Low-Velocity Impact," *J. Reinf. Plast. Comp.*, Vol.24, pp.763-774 (2005).
- Chung, C.H. and Y.J. Lee, "Progressive Failure of Marine GFRP Laminated Plates under Static Water Pressure", J. Comp. Mater., Vol.39, pp.1081-1102 (2005).
- Lee, Y.J., C.C. Lin and J.J.S. Chen, "Optimization of a Composite Rotor Blade Using a Genetic Algorithm with Local Search", *Mech. Adv. Mater. Struct.*, (2005). (Accepted).

# STRUCTURE MECHANICS FOR FRP SHIPS

#### Y.J. Lee

Ship Technology Research Center National Taiwan University, Taipei, Taiwan Keywords: FRP, Ship Structure

#### ABSTRACT

Having the advantages of lightweight, high strength, anticorrosion and easy mold, Fiber Reinforced plastics (FRP) has widely acted as an major material for yacht, fishing boat and speed boat. FRP has versatile mechanical characteristics due to different fibers, matrixes and producing processes. Their deformation, fracture and ultimate strength owing to external loads are hard to predict. Consequently, designers conservatively employ FRP's capabilities and make ships overweighed. FRP's advantages are not brought into full play. Experts' detailed studies are necessary then. This subject is the speaker's research field for years and some achievements are summarized into this demonstration. The report outlines are: 1. FRP ships' materials and producing processes, 2. FRP materials' mechanical characteristics, 3. FRP materials' strength, 4. FRP structures' strength: (1) Global strength of ships, (2) Fracture strength of FRP plates subjected to slamming, (3) Impact strength of FRP sandwiches, (4) Impact strength of FRP plates and shells, (5) Strength of FRP plates with bolted joints, (6) Buckling strength of FRP laminated plates. Topics 1 and 2 are general introductions; topics 3 and 4 are personal research achievements. Hopefully, the contents are helpful to ship designers in the fields of FPR materials and structures while building FRP ships.

(Manuscript received Aug. 21, 2005, Accepted for publication Nov. 21, 2005)