

FRP壓力殼於臨界挫曲下之破壞模式探討

羅光閔*¹ 徐慶瑜** 陳雅惠** 鄭淑慧*

*國立高雄科技大學 造船及海洋工程系
**海軍軍官學校 船舶機械學系

關鍵詞: 複合材料、非線性挫曲、破壞準則、數值模擬

摘要

壓力外殼為潛艦主要的耐壓結構，主要承受外在嚴苛的水壓負荷，因此壓力殼結構須經過縝密且謹慎的設計，其中以材料種類及性質的影響最為重要，目前潛艦或水下載具大多仍以鋼材等金屬材料作為壓力外殼之結構材料，但考慮到金屬材料在面對深海環境時仍需經過許多防蝕、消磁等處理程序及整體重量問題，而複合材料因其材料特性，運用於壓力殼結構材料的相關研究逐漸受重視，但複合材料為脆性材料，若壁厚過薄容易發生局部挫曲使結構因不穩定性而失效，因此需與金屬配合達成輕量化需求，而現今為使壓力外殼於水壓作用下仍保有幾何完整性，常使用環狀肋骨進行結構加固補強以增加其抗挫曲強度及靜水壓負荷，使潛艦等水下載具可至所需之工作深度，對於複合材料完全包覆於金屬圓柱在靜水壓力下的挫曲性能研究較少，因此本研究主要以GFRP厚殼結構及GFRP薄殼搭配金屬內膽兩種不同數值模型進行數值模擬，並觀察在設計水深300米的外壓下，兩者結構的應力大小及抗挫曲強度，並依據分析結果訂定出最適當的積層數。

¹ 責任作者(gmluo@webmail.nkmu.edu.tw)

前言

現今世界各國對於海洋資源的研究越發積極，關於水下載具的研究也越發受到重視，其中壓力外殼為潛艦負責承受水壓之主要結構，因此壓力殼結構須經過縝密且謹慎的設計，其中外殼的幾何形狀、材料種類的選擇及性質為影響載具耐壓強度最重要的因素之一。

目前潛艦、水下載具大多仍以鋼材等金屬材料作為壓力外殼之結構材料，但考慮到金屬材料在面對深海環境時的嚴苛水壓及複雜地形，因此仍需經過許多防蝕、消磁等處理程序、整體重量、乘載量及成本問題，因此輕量化及選擇耐腐蝕、無磁性之材料作為壓力殼結構材料為首要考量。

而玻璃纖維強化塑膠(glass fiber reinforced plastics, GFRP)因其重量輕、耐腐蝕且不會產生電磁感應等優勢，故十分適合運用在軍事用途的水下載具殼體，從J. L. Thomason[1]的研究中得知，玻璃纖維(Glass Fiber)因其有重量輕、低阻尼、良好的電氣絕緣性能，在複材產業中做為增強材料用途的佔比高達95%，Sergio Neves Monteiro[2]等人指出，相較於金屬壓力容器，由FRP複合材料製成的壓力容器除了重量輕，還具高強度和剛度、較好的耐腐蝕性及良好的疲勞強度，因此適合用於壓力容器的製造，而 Juan Francisco Sánchez-Pérez[3]等人指出，專門消除水雷用之水下載具須確保於任務執行期間不被偵測，故其對於船隻訊號的減少包含熱訊號、聲納訊號及磁場訊號等有極高度的要求，為了最大限度地減少潛水器的熱特徵，使用船體替代材料，例如使用複合材料為一大重點，利用複合材料導熱性低等特性可協助降低水下載具無人載具之熱特徵。Blachut[4]等人研究了纖維張力對複合材料壓力容器力學性能的影響，發現纖維張力的增加使鋼襯的抗壓力也隨之增加，但複合材料製造成本較金屬材料高且為脆性材料，若壁厚過薄容易發生局部挫曲使結構因不穩定性而失效 [5]-[7]，因此耐壓性能大幅下降，Hee Chul Kim[8]等人則提出複合材料需與金屬配合可滿足輕量化和低成本的需求，而此組合同時也具有優異的機械性質。

水下載具於海底執行任務時，其壓力殼主要承受外在嚴苛的靜水壓負荷，且作業時須裝載相關儀器，如傳感器、推進系統等載重裝置作為提供載具浮力及壓載使用，故壓力殼的結構設計須考量到多種層面，包含靜水壓力所帶來的應力響應、抗挫曲的能力、材料的失效及選擇，幾何缺陷的影響性及安全性，其中壓力殼面對靜水壓時需考慮尺寸效應及挫曲(buckle)問題，Cho[9]等人的研究中確定了結構失效後的結果，包括殼體降伏、環形加強肋之間的局部殼體挫曲、殼體與加強肋的整體挫曲以及結合局部屈挫曲和整體挫曲的交互挫曲模式，並用耐壓試驗結果驗證了設計公式和數值預測的準確性和可靠性。而尺寸比例與幾何外型為影響挫曲性能的一大重要因素。

與尺寸比例有關的相關研究中，Aghajari [10]等人在研究中表示，圓筒殼在均勻外壓作用下，其臨界負荷能力取決於長徑比(L/R)和徑厚比(R/T)兩個幾何比例，關於細長比，Cho[11]利用特徵壓力比和細長比判斷可用於預測環加強筒結構的失效模式。細長比

越大、殼厚越薄者越容易因挫曲而崩塌，反之則容易因降伏而失效。

除尺寸比例外，幾何缺陷對於抗挫曲強度的影響是最顯著的，Zhun Li[12]等人則認為於靜水壓作用下複合材料壓力殼體的挫曲行為受到多種因素的影響，其中以初始幾何缺陷的影響最大，於是特別針對圓筒殼的各種不同橢圓度及厚度進行探討，其結果顯示，橢圓度和厚度變化對挫曲壓力的影響規律。但相較之下，橢圓度對挫曲壓力的影響比厚度變化更大。

Ghanbari Ghazijahani[13]等人的研究中表示，設計壓力殼結構時抗挫曲能力為最重要之考量因素，如壓力殼本體之形狀，當壓力殼的幾何形狀越簡單、對稱、無銳角、無明顯邊緣(如球形、圓柱體等)時，壓力殼的抗挫曲能力越佳，因此設計時應避免複雜幾何形狀且不對稱之結構形式。綜合上述各研究結果，徑長比及殼壁厚度影響的是模型的失效模式，對於抗挫曲能力的影響較幾何形狀小。

為使壓力外殼於水壓作用下仍保有幾何完整性，常使用環狀肋骨進行結構加固補強以增加其抗挫曲強度及靜水壓負荷，使潛艦等水下載具可至所需之工作深度。

Özer Zeybek[14]對於在圓柱殼內中間增添肋進行了研究，經過分析及數值研究發現，於圓柱殼結構內部中間安裝加強肋使抗挫曲能力提高了50%以上，在Ross[15]的研究中提及潛艦耐壓船體常為以環型加勁肋骨(ring stiffener)圓筒殼作為設計，使圓筒殼結構能夠有效承受嚴苛水壓、擁有高於球體結構的容積空間、更佳地對接其餘結構件等優勢。

但根據Chiara Bisagni[16]等人所描述，纖維增強複合材料在拉伸及壓縮負荷下會以脆裂的方式失效。如玻璃纖維強化塑膠(GFRP)及碳纖維(CFRP)分別僅有2-3%及1-2%的彈性區域，而複合材料的失效是由不穩定的層間裂紋擴展所引起，因此複合材料的耐衝擊性較差，但與金屬材料配合不僅可補足此缺點亦可獲得較優秀之機械性質，適合運用於水下載具之壓力殼結構。

現今研究除加筋肋骨作為壓力殼補強結構之外，有關複合材料加固金屬殼體的研究大多集中金屬殼體的局部加固及修補，如H.S. daCosta Mattos[17]等人採用不同的複合材料修復了腐蝕管道並進行了長期現場的水壓試驗，其結果顯示，腐蝕管道經複合材料修補有助於提高耐壓性，Goran Vukelic[18]團隊將兩個鋼製容器進行水壓試驗並觀察其失效情形，並實際進行非破壞檢測，根據檢查結果，鋼製壓力容器底部過度的腐蝕使其產生裂縫，故使用複合材料試片包覆的修復方法來防止靜水壓力作用下金屬壓力容器的裂紋擴展，並確定可以優化複合材料試片的長度、厚度和層方向，確定修復後壓力容器的承壓能力。從上述研究可知複合材料在高壓鋼管的修補及加固上不僅可承受來自管內的內壓，還可增強鋼管的耐壓能力，因此確定複合材料對於局部加固存在一定顯著效果。

目前對於複合材料全範圍包覆金屬圓柱殼在靜水壓力下的挫曲性能的相關研究仍舊很少。Weili Wang[19]等人針對CFRP包覆鋁合金圓柱殼及於鋁合金圓柱殼內鋪設CFRP兩種結構進行研究，並討論了碳纖維和金屬殼體的失效模式，其結果發現，當鋁

合金表面上鋪設4層及7層碳纖維時，期極限載重分別提高了65%和101%。而鋁合金內表面鋪設7層CFRP時，極限載重可提高至134%，因此於鋁合金內表面鋪設CFRP具有更好的加強效果。Xinlong Zuo[20]等人對鋼及鋼的複合圓柱體進行了研究，其研究的成果發現，於鋼的外表面包覆CFRP可明顯提高鋼筒約83%的載荷能力，且兩者的後挫曲模式也幾乎相同。

綜合以上文獻回顧，複合材料的材料特性適合應用於水下載具之壓力殼結構，尤其搭配金屬更可獲得輕量化、低成本且更為優秀的機械性質，接著發現影響挫曲模式最重要的因素之一即為徑厚比、細長比及初始幾何缺陷，且本研究觀察到目前複合材料於壓力殼結構設計的應用多為使用金屬加勁肋骨作為FRP外殼的加固，以複合材料包覆於金屬圓柱殼的相關研究較少，且所使用的複合材料幾乎皆為CFRP，以GFRP作為包覆層的相關研究則非常稀少，因此本研究為了解GFRP厚殼結構及含有金屬內膽兩者於設計水深300m的外壓下的挫曲強度及應力分布，首先尺寸設計的部分使用陳泊宗[21]所參考之水下載具REMUS-300的圓筒殼段，並利用ABAQUS進行靜水壓及挫曲分析，最終利用分析結果決定適當的積層設計，並觀察其挫曲模式。

研究流程

本研究首先以REMUS-300的圓筒殼段作為參考模型，並以此模型為基礎定義GFRP厚殼結構及含金屬內膽之壓力殼結構，並搭配我國壓力容器標準CNS制定金屬內膽厚度，接著使用ABAQUS進行結構強度分析，分析壓力殼結構在設計水深300m水深靜水壓下

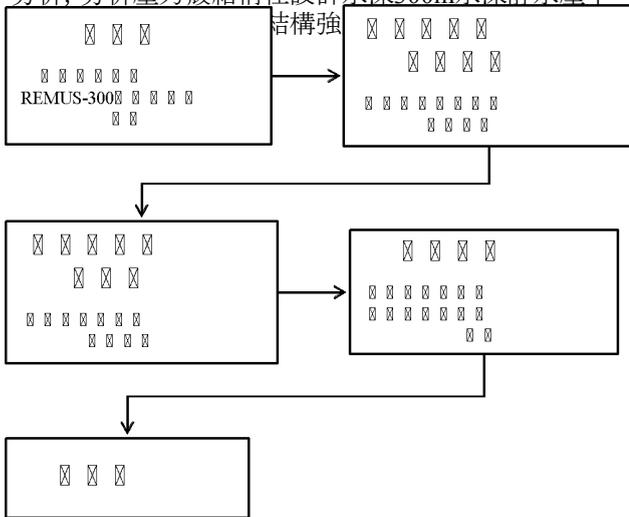


圖1 研究流程圖

1. CNS中華民國國家標準CNS 9788, 壓力容器 (通則)

CNS規範內容分為4大章節，其各章節分別針對壓力容器材料的選擇、結構設計、製造、檢驗及水壓試

驗標準訂定出一系列規定，而第兩章為針對第一種壓力容器訂定出的規範，第三章則是針對第二種壓力容器而定出的規範，而本研究主要以第一種壓力容器標準作為此次金屬內膽之厚度設計參考。

2. 壓力殼厚度設計

結構鋼金屬內膽厚度設計則參照我國壓力容器規範CNS，根據沈育霖[22]針對美日英壓力容器標準與國內的比較，並將PD-5500規範有關計算厚度公式的部分與CNS第一種容器之規範進行比較，如表(1)所示，以相同計算條件(設計壓力、材料降伏應力等)情況下，計算厚度和CNS完全相同、幾近相同。故本研究以第一種壓力容器標準為依據進行金屬內膽厚度的設計，而PD-5500設計厚度方式為根據PD-5500-3.6.2.1 “cylinder thickness”，其決定版厚的方式與傳統設計經驗公式是以材料降伏強度及壓力殼尺寸來決定較為不同，而是使用初始分析版厚(analysis thickness)的概念並搭配環肋間平均應力 P_y 、臨界挫曲壓力 P_m 、外部壓力設計參數K及 Δ 等參數，最後使用分析厚度的倍數配合內差的方式確定最終設計板厚，數值模型圖如圖2所示。

表1 各國法規針對筒身、端板計算厚度比較表

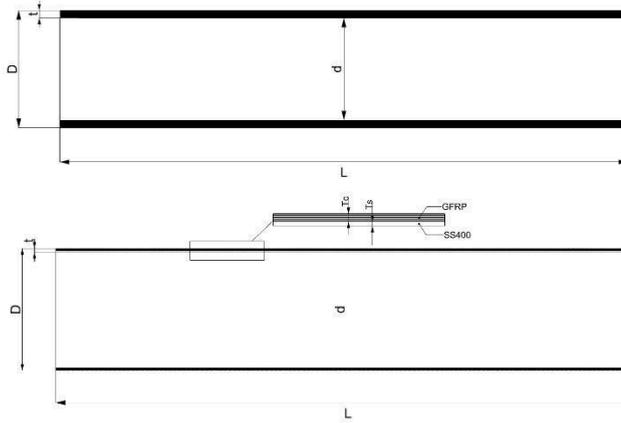
法規	JIS B 8265	JIS B 8266	BS	ASME Sec. VIII, div. 1
計算部位				
圓筒形	= CNS 2, 3	= CNS 1	= CNS 1	= CNS 2, 3
球	= CNS 2, 3	= CNS 1	= CNS 1	= CNS 2, 3
全半球形	= CNS 2, 3	= CNS 1	= CNS 1	= CNS 2, 3
碟形端板	= CNS 2, 3	= CNS 1	< CNS 1	= CNS 2, 3
正半橢圓形端板	= CNS 2, 3	= CNS 1	> CNS 1	= CNS 2, 3

表2 我國壓力容器法規規定之最小厚度(單位:mm)

法規	CNS 1	CNS 2, 3
材料		
碳鋼及低合金鋼	6	2.5
高合金鋼及非鐵金屬	3	1.6
調質高強度鋼	-	6

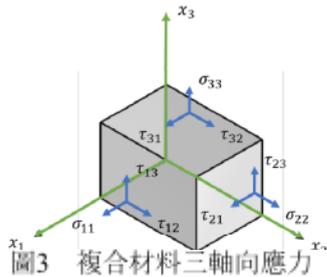
確定了金屬內膽的厚度後，本研究所使用的金屬材質為結構用碳鋼SS400，便以此厚度為固定基準，並搭配不同層數的GFRP，接著使用ABAQUS進行結構強度分析，再假設水深為300m的靜水壓負荷下，確認設計結構是否具備足夠下潛至作業水深之強度。

關於GFRP的結構設計，由於FRP屬非均質材料，代表各個主軸方向皆有不同的彈性及剪切模數，故本研究採用古典積層板理論計算其材料參數，。



3. 古典基層板理論

在古典積層板理論中，各主軸方向的彈性及剪切模數，可以直接以 Q_{ij} 表示，三軸方向則是以1、2、3表示，其分別代表平行於纖維方向、垂直於纖維方向及厚度方向。且每個面皆有一平行於主軸面的拉伸應力及兩個垂直於主軸面的剪切應力，如圖3所示。



此外還需考慮蒲松比的影響，如式1，此計算式用以表示結構受力時所產生的應力應變。而式中不同 Q_{ij} 所對應的攻勢，可藉由式2-7獲得。

$$\begin{bmatrix} Q_{44} & Q_{45} & Q_{46} & Q_{55} & Q_{56} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{22} & \epsilon_{33} & \gamma_{23} & \gamma_{31} & \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Q_{11} = \frac{E_1}{(1-\nu_{12}\nu_{21})} \quad (2)$$

$$Q_{12} = \frac{E_2\nu_{21}}{(1-\nu_{12}\nu_{21})} \quad (3)$$

$$Q_{11} = \frac{E_2}{(1-\nu_{12}\nu_{21})} \quad (4)$$

$$Q_{44} = Q_{23} \quad (5)$$

$$Q_{55} = Q_{13} \quad (6)$$

$$Q_{66} = Q_{12} \quad (7)$$

因纖維厚度遠小於先為長度與寬度，故選擇忽略厚度方向的應力應變，因厚度方向為3方向，故便將式1簡化為式8

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{22} & \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{16} & Q_{22} & Q_{26} & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{22} & \gamma_{12} \end{bmatrix}$$

古典積層板理論最主要之目的為獲得FRP平板的積層方程式，根據此理論，FRP單板於積層時建議以對稱基層的方式來避免拉彎耦合效應 (tension-bending coupling effects)。而由於對稱積層的關係，故纖維的層數皆為偶數，由古典積層板理論之計算結果由表3所示。

表3 LT800材料參數對照表

圖2 古典積層板理論	
E_x (MPa)	23117.3
E_y (MPa)	23117.3
E_z (MPa)	3364.9
G_{xy} (MPa)	2355.4
G_{yz} (MPa)	3364.9
G_{xz} (MPa)	3364.9
ν	0.076

4. 積層設計

積層設計為本研究之重點，根據前面文獻回顧之成果，水下載具下潛深度越深，其壓力殼板後就越厚，整體重量也會隨著增加，因此降低重量最有效的方法並不是追求採用楊氏模數更高的材料，而是使用FRP這類擁有較高比強度的材料，蕭宏哲[23]於研究中使用FRP單板等效PD-5500之金屬加勁肋結構，為了日後方便將本研究之結果與加勁肋結果做比較，故於本研究中參考其積層設計作為本研究之純複合材料圓筒壓力殼模型之初始積層設定，纖維種類為LT800，LT800為0/90度之正交纖維，違常使用於船舶建造設計之纖維種類之一。

本研究首先假設以20層LT800為初步積層設計之基準，20層玻璃纖維的徑厚比R/T大約為7.66，屬厚殼結構，並使用乙烯基樹脂搭配積層，積層設定如古典基層板所建議，為對稱積層。

根據前面所敘述，FRP材料的楊氏係數相對於金屬材料來說較低，若單純由複合材料所構成之結構會比金屬結構厚，楊氏係數越大的材料，抗挫曲能力越佳，但殼體越厚使載具乘載空間越小，整體重量提升，於是本研究的壓力外殼採用複合材料搭配金屬內膽作為外殼結構設計，本研究首先減少複合材料之積層厚度，再將純複合材料圓筒殼結構之徑厚比提升至兩倍，並使用結構鋼內膽作為加固以增加抗挫曲能力，兩者的接合方式則假設為將FRP複合材料以真空製程積層於鋼製金屬內膽上，且假設纖維重量含有率皆為最理想之70%。

本研究將根據上述假設之積層設計進行有限元素分析，觀察兩者結構在上述積層設計且水深300米的

水壓下的靜水壓力及抗挫曲強度，並對分析結果進行評估，最後得到最適當之積層層數。

有限元素分析

1. 數值模型設計與邊界條件

本研究所使用的FRP材料參數所對應之個別母材為E-glass纖維搭配乙烯基樹脂，在纖維重量含有率70%、破壞應變2%的假設下，根據古典積層板理論可獲得單一積層的破壞應力強度為462MPa。有限元素分析軟體則使用ABAQUS建立數值模擬模型，並進行壓力殼的耐壓與臨界挫曲分析。

負荷及邊界條件部分，本研究之兩種模型尺寸皆參考為直徑190mm、長1000mm，含金屬內膽汁內膽厚度為6mm，殼體分析的部分使用一階減積分殼元素S4R於ABAQUS中間力數值分析模型，S4R可在不影響分析計算精度下減少計算量且可快速指定疊層方式。金屬內膽則選擇一階六面體實體元素C3D8R作為網格元素類型，在耐壓強度分析中將假設FRP與結構鋼金屬內膽為緊密接合，並指定兩者接觸以Tie方式連接，進行耐壓強度及臨界挫曲計算，網格尺寸則參考過往文獻透過網格收斂性分析所建議之尺寸5mm。

本研究透過數值模擬的方式得到壓力殼結構之應力與應變，並判斷所設計之結構是否發生破壞，而針對FRP所訂定之破壞準則有許多種，包括最大應力-應變準則及二次式破壞準則等，其中一般研究較常用的Tsai-Wu破壞準則與Tsai-Hill破壞準則即屬於較嚴密之二次式破壞準則，本研究將使用Tsai-Wu破壞準則來判斷複合材料的失效。

Tsai-Wu準則因考慮積層板的抗拉及抗壓強度如式9所示，故為應用最普遍之準則之一。

$$F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{\sigma\sigma}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} \leq 1.0 \quad (9)$$

上式中F為強度因子，需由拉伸及壓縮強度定義，因此屬於二次式破壞準則。

邊界條件的部分為假設兩端為剛性法蘭，故於兩端施予固定邊界(ALL Fixed)，如圖4所示。

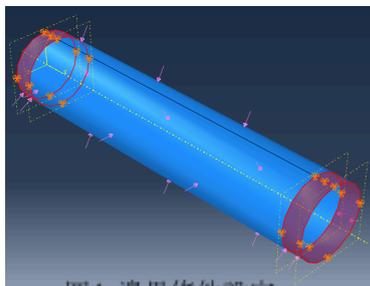
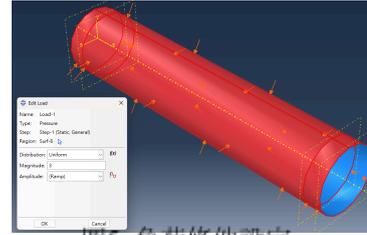


圖4 邊界條件設定

負荷的部分則是於圓筒殼外表面施予3MPa之均佈壓力，相當於300米水深之壓力，如圖5所示。

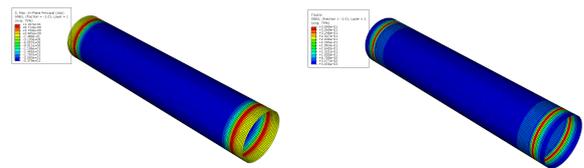


數值模型命名以纖維種類放於名稱前端，後面數值則為積層數，如：GFRP-20即為玻璃纖維積層數20層之壓力殼結構，而含金屬內膽之命名規則與前者相同，金屬種類與厚度則放置於積層數之後，因金屬種類及厚度皆假設為固，故將於積層數後以S6表示，如，GFRP-10-S6，即為於厚度6mm之結構鋼製金屬內膽外表面包覆10層玻璃纖維。

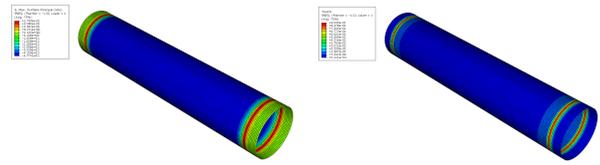
2. 分析結果

數值計算時，由輸入的材料參數可計算出積層板的結構剛性，若能獲得積層板的變形則可計算結構的應變，並可透過面內彈性係數與矩陣的轉換，獲得積層板的應力響應。

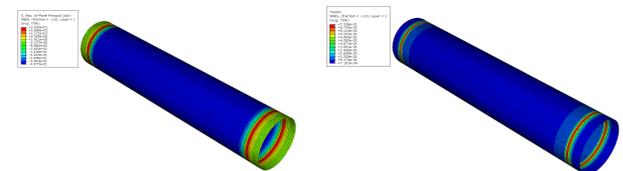
純FRP外壓殼之初始積層設計經數值模擬後之應力響應結果如圖6-9所示。



GFRP-20之應力響應 GFRP-20之Tsai-Wu結果
圖6 GFRP-20壓力殼分析結果



GFRP-10之應力響應 GFRP-10之Tsai-Wu結果
圖7 GFRP-10壓力殼分析結果



GFRP-12之應力響應 GFRP-12之Tsai-Wu結果
圖8 GFRP-12壓力殼分析結果

本研究使用數值模擬的方式進行變形與應力響應的計算。根據分析結果顯示，不管是任何層數之積層設計，結構的最大響應均發生於邊界處，其中GFRP-20的最大應力有11.67MPa，且出現於邊界處，而Tsai-Wu的分析結果，Failure Index最大值为0.389，遠低於1。因此判斷此積層設計於邊界及負荷條件下，為安全可靠的，而GFRP-20的臨界挫曲分析結果如圖9所示，由分析

結果可知，GFRP-20於水深約1400m處才會發生材料失效，遠大於設計水深300m，因此為減少重量及厚度，便將徑厚比提升至2倍，即為GFRP-10並進行靜水壓及扭曲分析。

由圖7可知，GFRP-10的最大響應同樣出現於邊界，為27.09MPa，Tsai-Wu的分析結果，Failure Index=0.9030，相當接近1，故GFRP-10於此邊界及負荷下較有安全性之顧慮，且由扭曲分析結果可知，GFRP-10於水深約270m左右材料即發生失效，未達設計水深300米，因此便將層數增加兩層，並繼續觀察其最大響應及Tsai-Wu結果。

由圖8可知，GFRP-12的最大響應同樣出現於邊界，為22MPa，Tsai-Wu的分析結果，Failure Index=0.7336，較小於1，故GFRP-12於此邊界及負荷下較為安全，且由扭曲分析結果圖10可知，GFRP-12於水深390m左右發生材料失效，超於設計水深，故初步判斷由此積層設計結構開始即為安全積層。

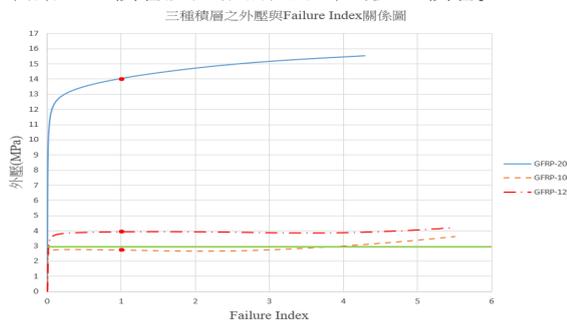


圖9 三種積層之模擬比較結果

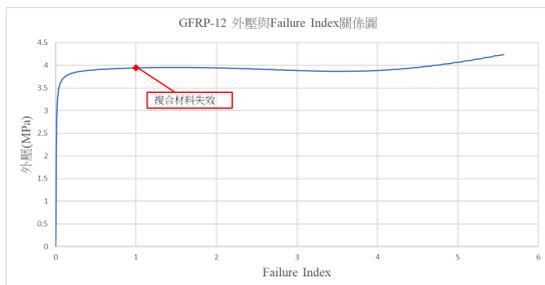


圖10 GFRP-12之模擬結果

金屬內膽結構之應力響應同純FRP壓力殼結構，皆發生於邊界，其中GFRP-10-S6的最大應力響應有26.54MPa，略小於GFRP-10之最大應力響應，而Tsai-Wu的分析結果，Failure Index最大值为0.1243，遠低於1。因此判斷此積層設計於邊界及負荷條件下，為安全可靠的，而GFRP-10-S6的臨界扭曲分析結果如圖11所示，由分析結果可知，GFRP-10-S6於水深約1900m處才會發生材料失效，遠大於設計水深300m，因此為減少重量及厚度，這邊便選擇直接以最小積層開始考慮，即為GFRP-2-S6，進行靜水壓及扭曲分析。

FRP-2-S6的最大響應同樣出現於邊界，為5.746MPa，Tsai-Wu的分析結果，Failure Index=0.2125，同樣遠小於1，故GFRP--2-S6於此邊界及負荷下仍為較安全即可靠之設計，且由扭曲分析結果圖12可知，GFRP--2-S6於水深約400m左右材料發生失效，超於

設計水深，故初步判斷由此積層設計結構開始即為安全積層。



圖11 GFRP-10-S6之模擬結果



圖12 GFRP-2-S6之模擬結果

3. 綜合討論

依目前初步之分析結果顯示，徑厚比越小殼厚越厚，重量也會隨之增加，根據分析結果，GFRP-20於300米水深作用下，其最大應力響應仍舊非常小，於臨界扭曲分析時甚至可達1400米水深，但基於本研究之設計水深為300米之前提下GFRP-20結構遠強於當前設計條件，因此便嘗試將徑厚比增加為兩倍，繼續觀察其最大應力響應即臨界扭曲結果，其結果顯示，最大應力響應仍舊遠小於FRP之降伏應力，於臨界扭曲之結果顯示則發現GFRP-10只可下至水深270m，小於設計水深300m，故判斷GFRP-10之安全性較少，於是便以GFRP-10為基礎開始增加積層數。

增加2層積層數後之積層設計結構即為GFRP-12，具靜水壓分析結果來看，最大應力響應為安全，臨界扭曲分析結果則顯示，GFRP結構約於400 m左右材料發生失效，因此判斷GFRP-12開始即為安全積層。

金屬內膽方面分析同樣以靜水壓及臨界扭曲為主，因有金屬內膽作為加固，因此便將徑厚比提升為GFRP-20的兩倍做為初始積層設計，分析結果顯示，GFRP-10-S6之最大應力響應相較於純FRP圓筒殼結構來說小非常多，故含金屬內膽之結構皆以臨界扭曲之分析之結果為主，根據GFRP-10-S6之臨界扭曲分析結果可發現，GFRP-10-S6直到1900 m水深才發生材料失效，遠超於設計水深，因此判斷GFRP-10-S6為極安全之設計，但仍超出設計條件太多，故接下來選擇以最小積層數2層作為基準。

根據GFRP-2-S6的臨界扭曲分析結果發現，GFRP-2-S6於400 m發生材料失效，故從GFRP-2-S6開始即為安全積層設計。

未來展望

因本研究尚於假設階段，需要考慮之細節還非常多，若要使此研究擁有更好之完整性，還需以實際之水壓試驗驗證，實際的貢獻方面希望未來能夠與含加勁筋骨之結構做比較，並依比較結果判斷何種設計較

為符合經濟成本及結構強度、輕量化，因此本研究目前只提出初步之構想及分析方法，未來希望能夠提高此方面研究的完整性。

參考文獻

- J. L. Thomason, "Glass fibre sizing: A review", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 127. Elsevier Ltd, 2019..
- Sergio Neves Monteiro et al., "A Promising Reinforcement for Polymer Composites", *Polymers* 2018, 10(3), 246
- Juan Francisco Sánchez-Pérez et al., "Study of the application of PCM to thermal insulation of UUV hulls using Network Simulation Method" *Alexandria Engineering Journal*, Volume 60, Issue 5, October 2021, Pages 4627-4637.
- Aleksander Blachut et al., "Influence of fiber tension during filament winding on the mechanical properties of composite pressure vessels", *Composite Structures*, Volume 304, Part 1, 15 January 2023, 116337
- Özer Zeybek, "The stability of anchored cylindrical steel tanks with a secondary stiffening ring". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 198, August 2022, 104661
- Zhun Li et al., "Buckling of composite cylindrical shells with ovality and thickness variation subjected to hydrostatic pressure" *Defence Technology*, Volume 18, Issue 5, May 2022, P. 862-875
- H. Hernández-Moreno et al., "Influence of winding pattern on the mechanical behavior of filament wound composite cylinders under external pressure," *Composites Science and Technology*, Volume 68, Issues 3–4, March 2008, P.1015-1024
- Hee Chul Kim, Dong Kil Shin, Jung Ju Lee, "Characteristics of aluminum/CFRP short square hollow section beam under transverse quasi-static loading," *Composites Part B: Engineering* Volume 51, August 2013, P. 345-358
- S. R. Cho, T. Muttaqie, Q. T. Do, S. Kim, S. M. Kim, and D. H. Han, "Experimental investigations on the failure modes of ring-stiffened cylinders under external hydrostatic pressure," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 10, no. 6, pp. 711–729, Nov. 2018
- . Aghajari, K. Abedi, and H. Showkati, "Buckling and post-buckling behavior of thin-walled cylindrical steel shells with varying thickness subjected to uniform external pressure," *Thin-Walled Structures*, vol. 44, no. 8, pp. 904–909, Aug. 2006
- Sang-Rai Cho, Teguh Muttaqie, Quang Thang Do, Ha Young So, Jung-Min Sohn, "Ultimate strength formulation considering failure mode interactions of ring-stiffened cylinders subjected to hydrostatic pressure", *Ocean Engineering*. Volume 161, 1 August 2018, P.242-256
- Sang-Rai Cho, Teguh Muttaqie, Quang Thang Do, Ha Young So, Jung-Min Sohn, "Ultimate strength formulation considering failure mode interactions of ring-stiffened cylinders subjected to hydrostatic pressure", *Ocean Engineering*. Volume 161, 1 August 2018, P.242-256
- Sang-Rai Cho, Teguh Muttaqie, Quang Thang Do, Ha Young So, Jung-Min Sohn, "Ultimate strength formulation considering failure mode interactions of ring-stiffened cylinders subjected to hydrostatic pressure", *Ocean Engineering*. Volume 161, 1 August 2018, P.242-256
- C. T. F. Ross, "A conceptual design of an underwater vehicle," *Ocean Engineering*, vol. 33, no. 16, pp. 2087–2104, Nov. 2006.
- Chiara Bisagni., "Experimental investigation of the collapse modes and energy absorption characteristics of composite tubes", *International Journal of Crashworthiness*, Volume 14, 2009 - Issue 4, P. 365-378
- H.S. da Costa Mattos et al., "Long-term field performance of a composite pipe repair under constant hydrostatic pressure," *Engineering Failure Analysis* Volume 130, December 2021, 105765.
- Goran Vukelic, Goran Vizentin, Reza Bakhtiari, "Failure analysis of a steel pressure vessel with a composite wrap repair proposal," *International Journal of Pressure Vessels and Piping* Volume 193, October 2021, 104476.
- Weili Wang et al ., "Buckling characteristics of carbon fiber composite/aluminium alloy combined cylindrical shells under external hydrostatic pressure", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 208, April 2024, 105125
- Xinlong Zuo et al ., "Buckling behavior of steel and steel-composite cylinders under external pressure", *Thin-Walled Structures*, Volume 181, December 2022, 110011
- 陳泊宗, "纖維複合材料應用於水下無人載具之結構設計," 國立高雄科技大學造船及海洋工程系暨研究所碩士畢業論文, 2023.
- 沈育霖, "美日英壓力容器標準與國內之比較"
- 蕭宏哲, "FRP複合材料應用於微型水下載具之強度探討," 國立高雄科技大學造船及海洋工程系暨研究所碩士畢業論文, 2022.

Failure Mode for FRP Pressure Hull Subjected to Critical Buckling

G. M. Luo C. Y. Hsu** Y. H. Chen** S.H. Cheng**

*Department of Naval Architecture and Marine Engineering, National Cheng Kung University

**Department of Marine Mechanical Engineering ROC Naval Academy,

Keywords: composite materials, non-linear buckling, failure criteria, Numerical Simulation

ABSTRACT

The pressure shell is the main pressure-resistant structure of the submarine. It mainly withstands severe external water pressure loads. Therefore, the pressure shell structure must be carefully and carefully designed. Among them, the type and nature of the material are the most important. Currently, submarines or water Most downloading tools still use metal materials such as steel as the structural material of the pressure shell. However, considering that metal materials still need to go through many anti-corrosion, degaussing and other processing procedures and overall weight issues when facing the deep sea environment, composite materials due to their material characteristics, related research on pressure shell structural materials has gradually attracted attention, but composite materials are brittle materials. If the wall thickness is too thin, local buckling may occur easily, causing the structure to fail due to instability. Therefore, it needs to be combined with metal to achieve lightweight requirements. Nowadays, in order to maintain the geometric integrity of the pressure shell under the action of water pressure, ring-shaped ribs are often used for structural reinforcement to increase its buckling strength and hydrostatic load resistance, so that underwater vehicles such as submarines can reach wherever they are. Required working depth, there are few studies on the buckling performance of composite materials completely covering metal cylinders under hydrostatic pressure. Therefore, this study mainly uses two different numerical models of GFRP thick shell structure and GFRP thin shell with metal liner. Simulate and observe the stress magnitude and buckling strength of the two structures under the external pressure of a design water depth of 300 meters, and determine the most appropriate number of layers based on the analysis results.