

FRP 艦艇結構之積層設計與抗爆震驗證(III)

徐慶瑜*¹ 江家慶** 羅光閔*** 陳雅惠* 楊武松** 袁裕鈞*** 鄭淑慧***

*海軍軍官學校 船舶機械學系
**國立高雄科技大學 機械工程系
***國立高雄科技大學 造船及海洋工程學系

關鍵詞：玻璃纖維強化塑膠，厚殼積層，三明治結構，水下爆炸試驗，FRP 艦艇結構

國科會計畫編號：MOST 112-2221-E-012-001

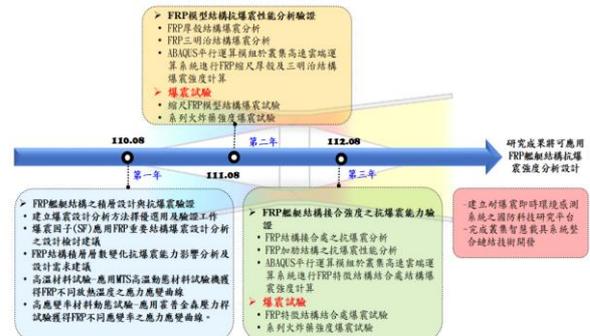
摘要

本計畫採用真空輔助樹脂轉注成型法(Vacuum assisted resin transfer molding, VARTM)製程原理進行厚殼積層及三明治結構之 FRP 半圓殼模型製作，針對這 2 種積層結構，進行爆震分析。本計畫設 16 層 LT800/M225 製成厚殼結構、三明治結構則為 6 層 LT800/M225 搭配 10 mm 之 PVC 芯材製作而成，並且兩者皆使用對稱積層法，並進行水下爆震試驗，量測各式 FRP 積層板在承受水下爆震負荷下的結構響應，並與數值模擬結果驗證，結果顯示爆壓計量測結果約為 2.14 MPa，數值分析結果為 2.38 MPa；距炸藥最近點之應變量測，厚殼及三明治結構應變值皆約為 10^{-3} 附近，且厚殼結構之變形量皆大於三明治結構，由實驗結果可初步推估此案例之三明治結構的抗爆震效果較優於厚殼結構。本計畫之研究成果未來可應用於 FRP 艦艇設計、建造及後勤維保階段，可提昇國內在相關領域之技術水準。

前言

現今世界各國大量使用 FRP(Fiber-reinforced plastic, FRP)做為新一代軍艦的建造材料，台灣具優異 FRP 製程技術，能自主生產 FRP 原物料及周邊耗材，惟缺乏 FRP 應用於艦艇之爆震分析、實驗及製造經驗；本計畫透過水下爆炸試驗與爆震分析及監測系統的開發，針對爆震環境下，FRP 應用於艦艇結構積層設計與實驗及製造等關鍵問題進行研究水下爆震實驗驗證。本計畫之執行，可促進國艦國造成果推廣及應用，並獲得 FRP 艦艇結構的抗爆震模擬及爆震試驗之整合規劃及執行經驗，未來可應用於 FRP 艦艇設計、建造及後勤維保階段，並可提昇國內在相關領域之技術水準。希望透過水下爆炸試驗與爆震分析及監測系統的開發，針對爆震設計下 FRP 應用於艦艇結構的積層設計與實驗及製造等關鍵問題，以三年的時間來建立 FRP 艦用參數資料庫、計算抗爆震強度與爆震實驗驗證並開發即時應力-應變光纖感測系統。本計畫各年度重點研究路線圖詳如圖 1。

FRP 材料由於質輕、強度高及低磁性等特性，可應用於大多數軍事艦艇，本計畫考量衝擊波負荷下，探討 FRP 艦艇結構之積層設計與抗爆震驗證分



析技術。在 FRP 艦艇結構之積層設計與抗爆震設計，將涉及 FRP 艦艇結構之應用、相關文獻說明如下：

1. FRP 艦艇結構之應用

本計畫所探討的厚殼積層概念來自於獵雷艦，其結構的佈置方式放諸其他的艦體結構也能適用，因此探討獵雷艦的積層結構強度問題，有其代表性。國內先前於義大利建造的獵雷艦採用厚殼積層的方式設計，希望藉由纖維與樹脂的緊密接合，達

¹ 徐慶瑜 (hsuchingyu@gmail.com)

到抗爆震的效果。然而，不同的設計概念搭配不同的製程造就不同的結構呈現方式，瑞典海軍在獵雷艦的結構設計上便採用三明治結構，並搭配 PVC 的芯材，經測試驗證，PVC 芯材可以有效地提升結構的抗衝擊性與疲勞強度。同一時期，澳洲海軍亦使用三明治結構製作獵雷艦的船殼結構，主要結構採用 60mm 的 PVC 芯材搭配 8mm 的 FRP 面材，並使用切股氈 (Mat) 與編織氈 (Roving) 來增加纖維的層間強度[1]。

除了獵雷艦外，瑞典海軍的維士比級 (Visby-class) 護衛艦是複合材料應用在軍艦結構上的最佳範例，全艦採用玻璃纖維與碳纖維搭配乙烯基樹脂製造，亦使用了 PVC 芯材來提升結構剛性，因此全艦總長來到了 210 呎，可應用於監視、巡航、掃雷與反潛作戰。其中，維士比級艦艇結構中的碳纖維除了讓結構有效減重 30% 外，更主要的功能是提供電磁屏蔽功能，讓自身不易被偵測到[2]。FRP 軍艦所使用樹脂必須具有良好的熱性能以及機械特性，同時必須具備於室溫下加工，可常溫硬化及與纖維緊密接合的特性[3]。以目前常用的熱固性樹脂而言，乙烯基樹脂是最佳的選擇，其機械特性、價格以及與纖維的接合強度，均比一般不飽和聚酯樹脂優異，而其具備常溫硬化的特性，又比環氧樹脂更適合應用於艦艇結構的建造上。然而，乙烯基樹脂在硬化時的放熱相當明顯，若單次積層的厚度過厚時，最高溫度可達 200°C，因此在製程上，如何有效地改善樹脂放熱，以及降低樹脂的固化熱變形，如何達到爆震設計之要求，將是後續試研製時的重要議題。

2. 壓力殼承受水下爆震動態負荷之流固耦合效應

壓力殼承受爆震動態負荷時，必需考慮流體及結構體之間之耦合效應，有關流固耦合理論的研究，最早是從 1950 年代開始受到重視，主要是針對水面船隻或水下工程結構物之動態反應來探討。由於流體與結構間的交互作用至為複雜，早期是先以變數分離法、級數法或積分轉換技巧 (包括傅立葉/漢克轉換、傅立葉轉換及拉普拉斯轉換) 等解析技巧，推導波動方程式及殼運動方程式，再以解析方法解之，但此僅適用於簡單幾何構型 (如平板、球殼與圓筒殼)。而利用實驗法進行結構物之爆震試驗時，因屬破壞性試驗且必須反覆進行多次試驗，方能有效掌握各項參數，往往耗費巨大，故進行試驗前仍必須經由數值方法先期多次模擬計算，方可進行；在近年的發展趨勢中，利用數值方法，已可解決構型較複雜結構物與流體之間耦合問題。進行爆震分析之數值法可分類成空間離散法 (Spatial Discretization) 及表面近似法 (Surface

Approximation)，此二類方法各有優缺點，在圓柱殼與音響流耦合作用的研究方面有，1951 年 Carrier[4] 近期發展之模組化流固耦合分析軟體均結合以上的方法來進行數值模擬分析。

國內相關之研究，較重要的有中正理工學院船研所廖清照教授等在 1989 年之「壓力殼之彈塑性動態分析」[5]，係利用二維軸對稱元素及板殼元素進行壓力殼結構承受爆震負荷時之動態反應。2001 年梁卓中等人[6]利用有限元素法結合克希荷夫延遲勢能積分方程式，推導出壓力殼表面積分方程式，用以分析壓力殼承受水下爆震波後之彈塑性反應；2009 洪振發等人[7]採用 LS/DYNA，比較主爆震波衝擊與後續氣泡脈衝不同階段，結構的彈塑性暫態反應與破損狀況，分析結果採用簡化爆震波衝擊壓估算模型與有限元素分析近距離水下爆炸過程之衝擊負荷以及 FEM 模型的合理性。2020 年徐慶瑜等人[8]針對台船公司製造之全尺寸壓力殼船段，進行海上實地爆震試驗，並對焊接結構承受爆震之焊後及焊前之變形進行探討。

綜合以上的文獻回顧，FRP 用於艦艇結構是 21 世紀的主要趨勢，國內在推動「國艦國造」政策時，除了協助作戰單位建造所需的艦艇外，對於新材料的特性掌握與使用，也應有超前佈局的作為。本計畫以三年的時間，藉由材料測試以及與其他子計畫的搭配，共同確認 FRP 艦艇的材料適用性與製程。第一年探討樹脂的硬化速率、放熱程度、收縮性、與纖維的搭配等議題，並藉由靜態與動態的材料試驗，獲得靜態與動態材料參數。第二年探討製程不同對機械強度的影響，主要根據樹脂反應速率與硬化狀況提出標準製程，並製作出爆震實驗用之平板與曲板試片。第三年則是進一步設計並製作 FRP 接合模型，並進行爆震實驗，確認 FRP 結構的耐爆震能力。

研究方法

本計畫執行過程所需應用之研究方法可分為試驗模型設計、設計條件、水下爆震現象等方法進行研究，分析理論敘述如下：

1. 試驗模型設計

本計畫參考水面艦結構來決定試驗模型的外型，依據世界各國獵雷艦之結構佈置，一般可分為厚殼積層結構、三明治結構與肋骨補強單板結構等，如圖 2 所示。其中義大利使用厚殼結構，瑞典與澳洲使用三明治結構，英國與法國則使用肋骨補強單板結構；因此可知複合材料積層方法於軍艦結構並無確切的設計標準，通常以強度足夠為主要設

計目標，本計畫主要依據實驗與數值模擬等方式，探討厚殼及三明治結構之抗水下爆震能力。



(a)厚殼結構 (b)三明治結構 (c)肋骨補強單板結構

圖 2 常見的船舶積層結構

2. 設計條件

試驗場域為長、寬、深皆為 4m 的測試水槽，本計畫之試驗標的物為水面結構，安全試驗水深為 2.85 m。炸藥類型為 TNT 炸藥，炸藥重量為 1.2 g。為了減少水域邊界造成的反射效應，將水域寬度設計為模型寬度的 6 倍以上，因此試驗模型設計尺寸為半圓直徑 0.55 m、長 0.6 m 的曲板，前後隔板部分使用厚度為 8 mm 之 10 層 FRP 平板，搭配結構膠作為隔艙壁，並且為避免尖端邊界造成之集中應力，兩側隔板皆距離邊界 0.05 m，吃水位置約為 0.15 m。厚殼及三明治結構之殼厚(T)皆由層數設計而定，完整結構尺寸示意圖如圖 3 所示。

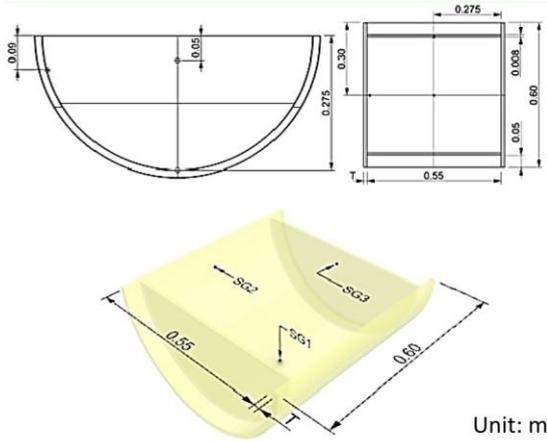


圖 3. 模型幾何尺寸

3. 水下爆震現象

水下爆炸對艦船是一種相當複雜過程，涉及爆炸力學、流體力學、結構力學、材料動力學等，水下爆炸加載包含入射衝擊波、氣泡脈動及空化等的效應，爆炸所產生壓力、溫度遠大於周邊海水，會劇烈壓縮周邊海水，造成水壓力突然上升，而形成爆震波傳遞之目標上，爆震波產生之水壓隨時間呈現指數衰減，其公式如下[9]：

$$P(t) = P_{max} e^{-\frac{t}{\lambda}} \quad (1)$$

其中 P_{max} 為爆震波壓力峰值(Peak pressure)， t 為爆炸波通過觀測點後時間(ms)， λ 為時間衰減常數。

水下爆炸時，能量瞬間釋放，產生爆震波及高壓、高溫之氣泡球體(Gas bubble)，氣泡球體內部能量使氣泡以球狀向外膨脹，將周圍海水向外推出，隨氣泡球體逐漸變大，內部壓力下降，當達到最大體積時，氣泡內部低於外部靜水壓力時，氣泡球體瞬間收縮，當收縮至極限時，此時產生水槌效應(Water hammer effect)之壓力波，此現象在爆炸後不斷在發生，其峰值壓力亦隨之減少，即為氣泡脈衝現象(Bubble pulse)。

爆震波壓力峰值 P_{max} 及時間衰減常數 λ ，可利用下列公式進行計算。

$$P_{max} = K_1 \left[\frac{W^{1/3}}{R} \right]^{A_1} \quad (2)$$

$$\lambda = K_2 W^{1/3} \left[\frac{W^{1/3}}{R} \right]^{A_2} \quad (3)$$

R 為觀測點與爆炸位置距離(m)， A_1 、 A_2 、 K_1 、 K_2 為炸藥相關經驗參數， W 為炸藥總重(kg)。

對於水下載具及水面艦船，在爆震環境下之量測標準使用潛艇所適用殼板爆震因子(HSF)及龍骨爆震因子(KSF)(如圖 4)，可決定爆炸之距離及炸藥總量，不同船體結構需求訂定不同爆震因子，軍艦作戰時會承受敵軍攻擊，因此爆震因子要求相較一般船舶高，殼板爆震因子及龍骨爆震因子計算方式如下式[10-11]：

$$HSF = \frac{\sqrt{W}}{R} \quad (4)$$

$$KSF = \frac{\sqrt{W}}{R} \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) \quad (5)$$

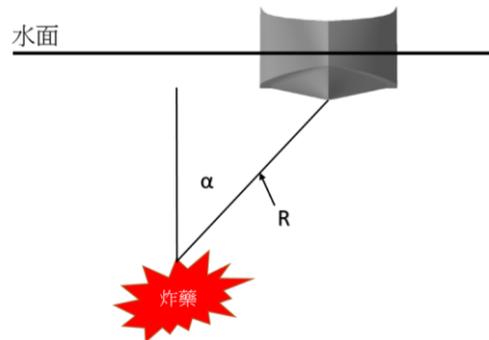


圖 4. 龍骨爆震因子

本計畫選用 ABAQUS 中 Acoustic-Structure Coupling Method 方法進行水下爆炸模擬[12]，此方法可應用於水下爆炸中爆炸震波與結構的分析計算。本年度為計畫執行之第 3 年，計畫執行過程所需應用之研究方法可分為試驗模型設計、設計條件、水下爆震現象等方法進行研究，研究流程圖如圖 5 所示。

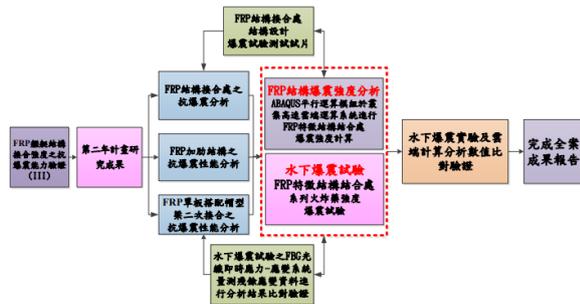


圖 5. 第 3 年計畫流程圖

研究成果

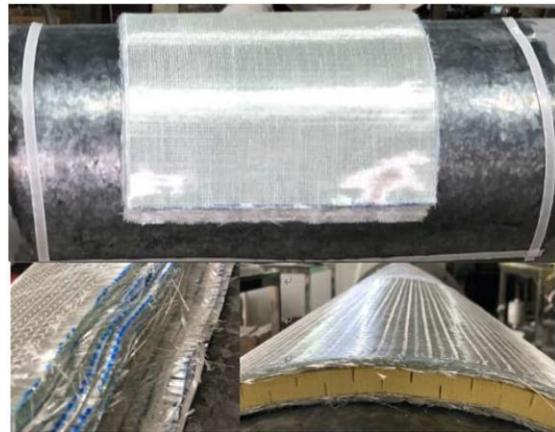
本計畫第 1 年為 FRP 船艇結構之積層設計與抗爆震能力分析，計畫內容已完成 FRP 結構之材料調質與製程實驗、測試 FRP 試片在不同溫度下的拉伸強度，並使用 FBG 感測器進行即時量測、確認 FRP 結構在考慮爆震負荷時，最適之積層層數，並透過數值模擬分析不同積層層數之抗爆震強度等。第 2 年執行 FRP 結構之材料調質與製程實驗、抗水壓之強度、扭曲模擬分析及 FBG 感測器製造及最佳化技術，並以厚殼結構及三明治結構製作一水面載具進行水下爆震試驗，以驗證製程技術、機械強度試驗、水下爆震模擬、爆震實驗、FBG 感測器最佳化、高穩定度之感測訊號調解等專業技術。本計畫第 3 年延續第 2 年的計畫，接續探討需要接合的 FRP 船艇結構接合處抗爆震強度探討，並針對 FRP 結構接合處進行水下爆震試驗以驗證數值模擬分析成果。

1. FRP 積層製造

本次實驗主要以真空輔助轉注成型法(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding, VARTM)作為實驗模型的主要成型方式，本實驗使用 16 層 LT800/M225 製成厚殼結構、三明治結構則為 6 層 LT800/M225 搭配 10 mm 之 PVC 芯材製作而成，並且兩者皆使用對稱積層法，如圖 6 所示。

VARTM 所使用的輔助耗材如圖 7 及表 1 所示。依灌注需求設計樹脂注入管及真空抽氣管之擺設位置，完成上述所有耗材鋪設步驟後，即可開啟真空泵浦將空氣抽出，確認纖維完全含浸樹脂即灌

注完成後，用鉗子將入料管即抽氣管夾住，保持工作範圍內的真空度，避免硬化前有過多的空氣流入影響成品品質。熱固性樹脂成型硬化後仍需 7 至 10 天才會完全硬化，因此本計畫之試驗模型皆於離模後靜置室溫中 3 週以上，由 Rudawska 研究中可知，結構膠接效果會受接合處之表面粗糙度影響，因此在曲殼內表面欲搭接端板之接合處用砂紙磨至粗糙，以提升結構膠之接著效果。並以長興化工提供之 ETERSET 2968PT-68 結構膠塗抹於曲殼與端板上，完成接著後依照其產品技術手冊所規範之硬化時間靜置於室溫中 96 小時以上，使結構膠達最佳黏結強度。將試驗模型靜置於室溫中 4 天以上之後，放入簡易水槽中測試接合處之水密性後完成最後成品，如圖 8 所示。



(a)厚殼結構 (b)三明治結構

圖 6. 纖維鋪設方式

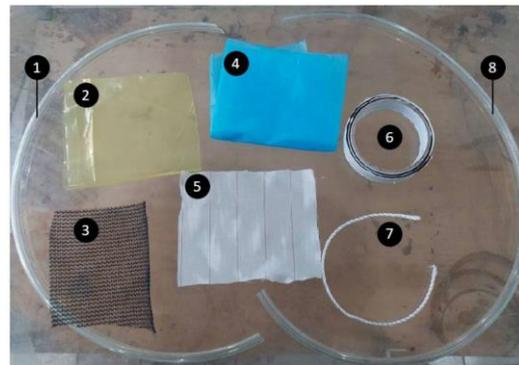


圖 7. 真空耗材

表 1 真空耗材表

1	樹脂入料管	5	離模布
2	真空袋	6	密封膠條
3	導流黑網	7	煞車/尼龍繩
4	離模紙	8	真空抽氣管



圖 8. 試驗成品

本次試驗所使用的應變規為 Micro Measurements 公司之 062WW 三軸應變規，此種應變規可讀取三個方向性(0°/45°/90°)之訊號，其中取 0°/90° 方向量測本次使用纖維之 LT 方向，應變規佈設位置如圖 9 所示。

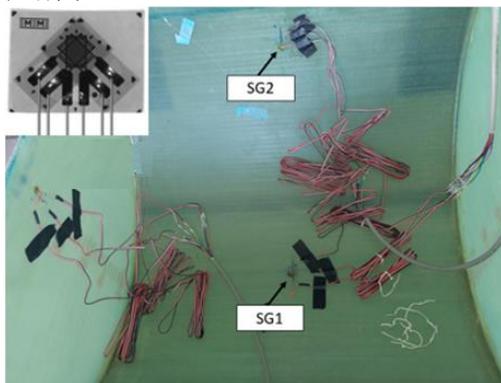


圖 9. 應變規佈置位置

2. 水下爆震試驗

2.1 試驗場景

本實驗將兩種 FRP 製程（厚殼結構及三明治結構）所製造之半圓筒殼型結構置於水槽進行水下爆震試驗，結合光纖監測技術，量測各式 FRP 積層板在承受爆震負荷下的結構響應。試驗場域為長、寬、深皆為 4m 的測試水槽，但由於試驗水槽頂部為鋼筋 I 型樑，而本計畫之試驗標的物為水面結構，因此為安全考量，試驗水深為 2.85 m。炸藥類型為 TNT 炸藥，炸藥重量為 1.2 g；試驗模型設計尺寸為半圓直徑 0.55 m、長 0.6 m 的曲板，前後隔板部分使用厚度為 8 mm 之 10 層 FRP 平板，搭配結構膠作為隔艙壁，並且為避免尖端邊界造成之集中應力，兩側隔板皆距離邊界 0.05 m，吃水位置約為 0.15 m。厚殼及三明治結構之殼厚(T)皆由層數設計而定，本實驗架構圖如圖 10 所示。

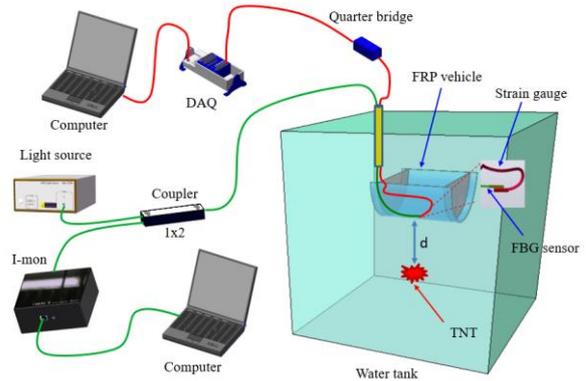


圖 10. 水下爆震試驗架構圖

2.2 感測器量測

為量測 FRP 積層板在承受爆震負荷下的結構響應，本計畫水下爆震試驗之感測器佈設種類計有三軸應變規×2 組（編號 SG-1、SG-2）、單軸加速規×1 組（編號 A）、FBG 應變感測器×2 組（編號 FBG-1、FBG-2）。感測器佈設示意圖如圖 11 所示。

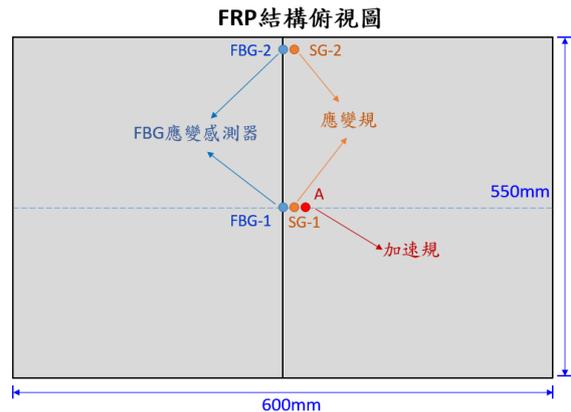


圖 11. 感測器佈設示意圖

2.3 試驗流程

本計畫之水下爆震試驗規劃，使用 FRP 製程之厚殼結構模型及三明治結構模型，使用 TNT 炸藥 1.2 g，爆震距離採用 40 cm 及 30 cm 炸點，共 4 次試驗。

2.4 結果與討論

本次試驗結構分別以水下爆震炸點距離 40 cm 及 30 cm 進行實驗，並量測動態響應相關數據，分述如下：

2.4.1 爆壓量測結果

爆壓計量測結果在距炸點 40 公分處為 2.14 psi，如圖 12 所示。

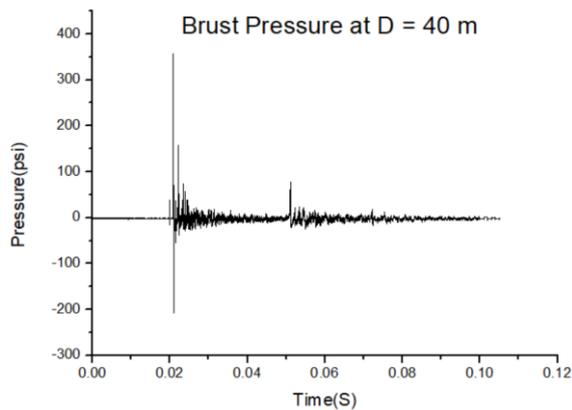


圖 12. 炸點距離 40 cm 爆壓量測結果

2.4.2 應變規量測結果

(1) 厚殼結構距離炸藥 40 公分結果，感測器 SG1 在 0° 方向測量值為 5.54×10^{-3} 、 45° 方向測量值為 1.29×10^{-3} 、 90° 方向測量值為 0.83×10^{-3} ，感測器 SG2 在 0° 方向測量值為 6.17×10^{-3} 、 45° 方向測量值為 5.72×10^{-3} 、 90° 方向測量值為 3.34×10^{-3} ，如圖 13 所示：

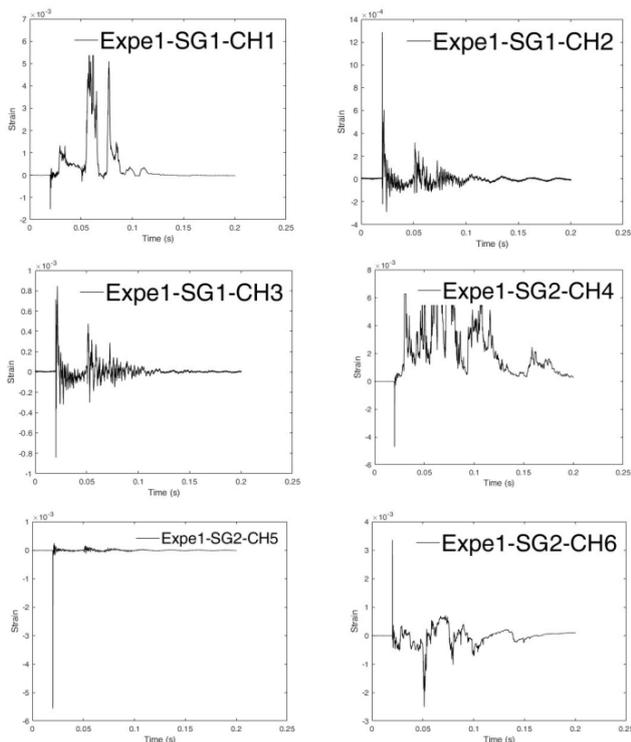


圖 13. 厚殼結構距離炸藥 40 公分應變量量測

(2) 三明治結構距離炸藥 40 公分結果，感測器 SG1 在 45° 方向測量值為 4.23×10^{-3} 、 90° 方向測量值為 1.48×10^{-3} ，感測器 SG2 在 0° 方向測量值為 3.81×10^{-3} 、 45° 方向測量值為 3.85×10^{-3} 、 90° 方向測量值為 2.97×10^{-3} ，如圖 14 所示：

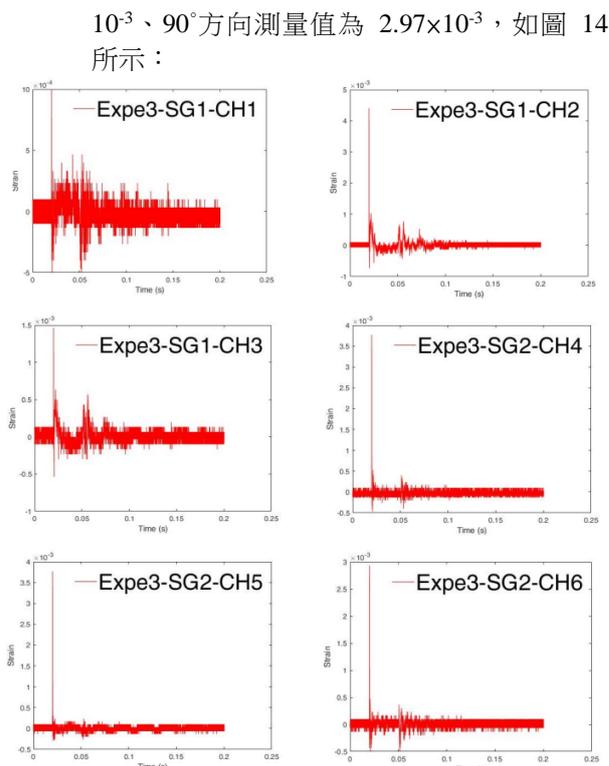


圖 14. 三明治結構距離炸藥 40 公分應變量量測

2.4.3 加速規量測結果

在距炸點 40 公分加速規量測結果，處厚殼結構量測值約為 18000 G，三明治結構量測值約為 18000 G，如圖 15 示。

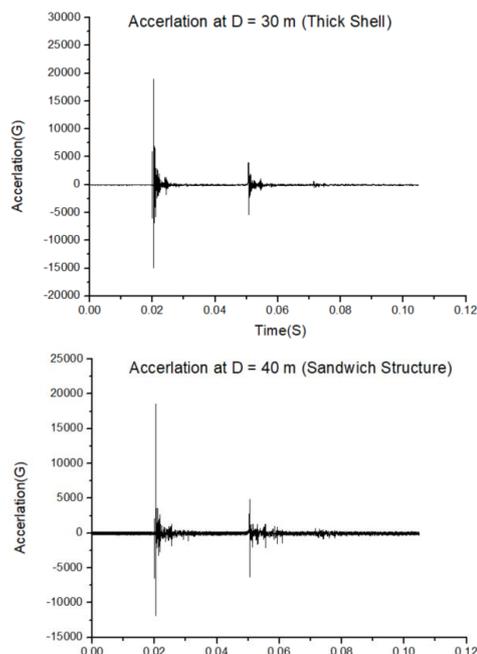


圖 15. 距離炸藥 40 公分加速度量測

2.4.4 高速攝影結果

從 0 秒至 83ms 高速攝影中，可看出氣泡脹縮過程約 4 次，如圖 16 所示，。

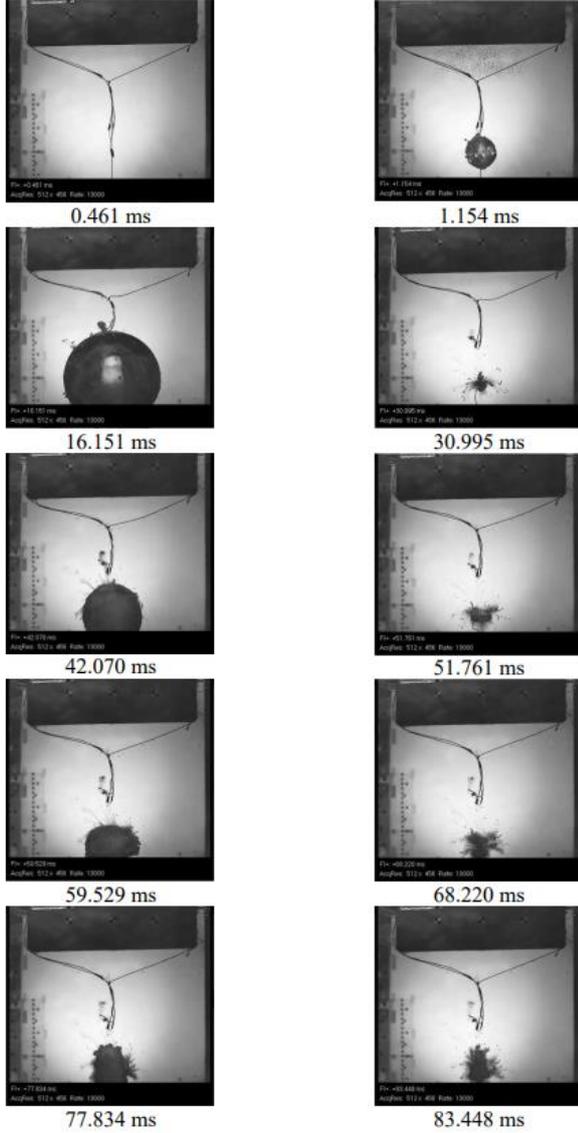


圖 16. 水下爆震高速攝影結果

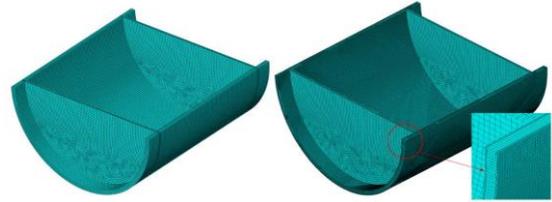
3. 數值分析

水下爆炸模擬在 ABAQUS 中主要常見的有 Acoustic-Structure Coupling Method、CEL、UNDEX 模擬等方法，本計畫在水下爆炸模擬使用 ABAQUS 中 UNDEX 進行水下爆炸模擬。

3.1 數值模型及材料參數

本實驗 FRP 曲殼及端板材料皆為玻璃纖維 LT800/M225，以水為介質進行爆震分析與試驗，並使用聲-固耦合方法(Acoustic-Structure Coupling Method, ASC)，建模時水域網格選用 AC3D4，結構

網格則選用 SC8R 和 C3D8R。FRP 定義材料性質時使用 Continuum Shell 作積層堆疊設定，並將三明治結構中間層芯材以模型分割(Partition)功能切出芯材部分，因此厚殼曲殼、三明治上下兩層面板與端板皆採用 SC8R 元素建立；芯材部分則以 C3D8R 元素建立；厚殼曲板網格數量為 60,564 個、三明治曲板網格數量為 590,940 個、端板網格數量為 11,058 個，模型網格分布如圖 17 所示。水域與曲殼模型之間以綁定各向自由度方式將兩者設定為緊密約束。



(a)厚殼結構網格 (b)三明治結構網格

圖 17. 半圓筒殼結構網格

本計畫之 FRP 參數係利用 Compose-IT 獲得單一層纖維方向(0°)之靜態材料參數(如表 2)，並於 ABAQUS 中以定義角度的方式滿足設計需求。此外，水下爆炸屬於結構瞬間受到劇烈衝擊並產生變形之高應變率現象，對於結構受到高速衝擊時，亦須考慮應變率的影響，因此本計畫另外參考朱富成 [13]以霍普金森桿所測得之動態材料參數(如表 3-表 4)進行爆震分析。

表 2 LT800/M225 靜態材料參數

密度 (kg/m ³)	1834.52
E1 (MPa)	21721.7
E2 (MPa)	21721.7
G12 (MPa)	3739.3

表 3 LT800/M225 動態材料參數[13]

應變率(s ⁻¹)	3,000
密度 (kg/m ³)	1834.52
E1 (MPa)	11,010
E2 (MPa)	11,010

表 4 PVC 芯材材料參數

密度 (kg/m ³)	60
楊氏係數 (MPa)	95

試驗時曲殼與端板間使用 2968PT-68 結構膠接著，數值模擬時曲殼與端板間利用膠合界面法 (Cohesive Surface) 定義接觸面，此方法基於 Traction-Separation 準則進行建模，因此須定義 Traction-Separation law 所需之破壞參數，包含拉伸剛性(K_{nn})、拉伸破壞強度(σ_{nn})、拉伸破壞能量(G_{IC})、剪切剛性($K_{ss} = K_{tt}$)、剪切破壞強度($\sigma_{ss} = \sigma_{tt}$)、剪切破壞能量($G_{IIC} = G_{IIIC}$)等參數。本計畫所使用的結構膠界面破壞參數係參考林則佑[14]依據材料試驗所測之研究成果，本計畫所使用的 2968PT-68 結構膠與林則佑研究的結構膠相同，2968-PT 之膠合破壞界面參數如表 5 所示。

表 5 LT800/M225 材料破壞參數[14]

拉伸破壞參數	$K_{nn}(\text{N/m}^3)$	156.28
	$\sigma_{nn}(\text{N/m}^2)$	17.27
	$G_{IC}(\text{N/m})$	118.91
剪切破壞參數	$K_{ss}=K_{tt}(\text{N/m}^3)$	231.1
	$\sigma_{ss}=\sigma_{tt}(\text{N/m}^2)$	18.1
	$G_{IIC}=G_{IIIC}(\text{N/m})$	21.1

本次試驗設置於試驗模型上佈置 2 個應變規，分別量測炸藥正上方的筒殼內側，稱之為 SG1；與 SG1 同剖面且靠近舷邊處，稱之為 SG2，應變輸出位置如圖 18 所示。爆壓值輸出位置為距離筒殼正中央之 x、y 軸方向各 1.3 m，高度則距離自由液面 0.35 m，如圖 19 所示並將其命名為 PG，觀測歷時為 0s~0.05s。

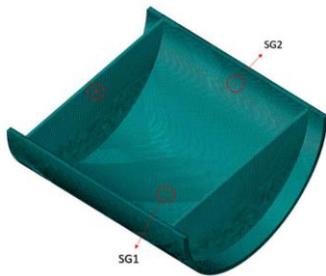


圖 18. 應變之分析結果觀測點

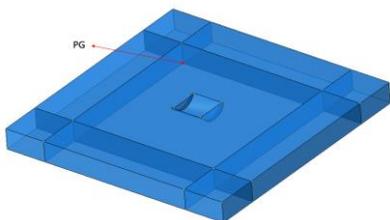


圖 19. 爆壓值觀測點

3.2 邊界條件與負荷設定

ABAQUS 中定義爆震負荷常見的方式分為壓力型及加速型負荷，而其中壓力型負荷又分為壓力振幅 (Pressure Amplitude) 及氣泡負荷 (Bubble Loading)。壓力振幅僅考慮爆炸時最初之爆震衝擊波，但由於水下爆炸現象的總負荷為衝擊波及後續的氣泡脈衝，因此氣泡負荷於爆震分析中亦為重要。本計畫選用 ABAQUS 之 UNDEX 模型來定義氣泡負荷，此模型可有效模擬衝擊波和氣泡脈衝的加載。本計畫根據 Cole 半理論經驗公式及實驗條件指定爆震負荷，詳如表 6、表 7。

表 6 分析場域條件

炸源與結構距離(m)	0.4
炸源與爆壓計距離(m)	1.85
炸藥重量(kg)	1.2×10^{-3}
介質密度(kg/m^3)	1,000
介質聲速(m/s)	1,500
介質體積模數(Pa)	2.2×10^9

表 7 氣泡負荷參數[15]

炸藥材質之熱容比	1.3
重力加速度(m/s^2)	9.81
大氣壓力(Pa)	101,325
流體阻力係數	0.42
炸藥參數(K_1)	52.12×10^6
炸藥參數(K_2)	8.95×10^{-5}
炸藥參數(A_1)	0.18
炸藥參數(A_2)	0.185
炸藥密度(kg/m^3)	1,630

此外，本實驗之模型尺寸寬度為 0.58m，而水域寬度為試驗水槽寬 4m，水域寬度為模型寬度之 6.9 倍，因此模擬邊界假設水槽之邊界不會受到反射，將水槽邊界定義為無反射邊界(Acoustic Impedance)，水面則透過靜水壓力將其定義為自由液面。其中 ABAQUS 之無反射邊界可為單一或多種簡單幾何組合而成，其可定義的幾何種類有平面 (Planar)、圓柱型 (Circular)、球型 (Spherical)、橢圓柱型 (Elliptical) 等，因此須注意水域不可是過於複雜曲面，無反射邊界之定義如圖 20 所示。

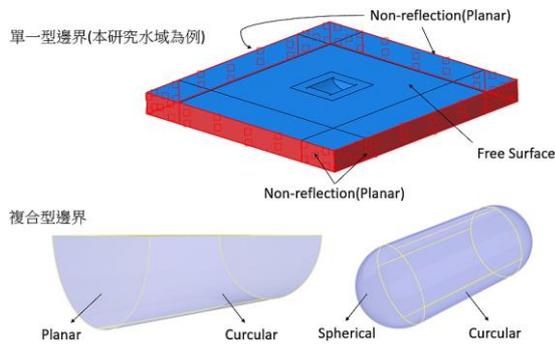


圖 20. 指定無反射邊界

3.3 分析結果

3.3.1 爆壓量測結果

爆壓計觀測位置(PG)分析結果顯示，爆震負荷以壓力振幅(Acoustic Pressure)施加負荷時，此方法僅定義單一振幅作用於參考點，只能模擬參考點受到衝擊波之作用，並無考慮後續氣泡之影響，因此爆震波壓力負荷僅 0.31 MPa。而 UNDEX[14]模型則將氣泡因素納入考量，可有效模擬衝擊波階段和單個氣泡現象，其爆震波壓力負荷為 2.38 MPa。由圖 21 顯示 PG 位置的爆壓傳遞為 UNDEX 模型之分析結果較為接近理論值，因此本計畫選用此方法作為後續探討爆震現象之負荷條件。

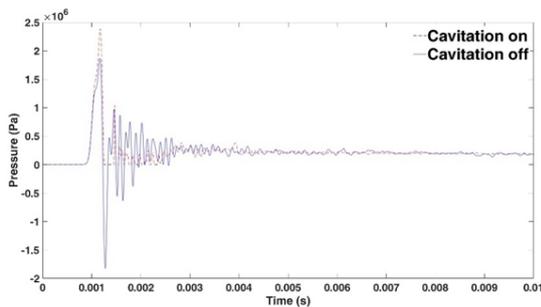


圖 21. 指定無反射邊界

3.3.2 厚殼結構應變分析結果

分析結果如圖 22 所示，可看出厚殼結構於 2 個應變規位置的應變值皆落在 10^{-3} 區間，而高應變率之動態材料參數則因剛性較小導致應變值大於靜態結果，且應變皆在受到初始爆壓作用產生較大的變形量後逐漸消散。其中炸藥正上方的 SG1 由於較優先受到一向上的衝擊波，其 0° 方向之結果受到較 90° 大的壓應變，而衝擊波藉由結構傳遞至靠近舷邊處的 SG2 亦是產生 0° 壓應變大於 90° 的形變。由於爆震波在傳遞過程的消散，在 0° 和 90° 的應變結果皆為 SG1 略大於 SG2。

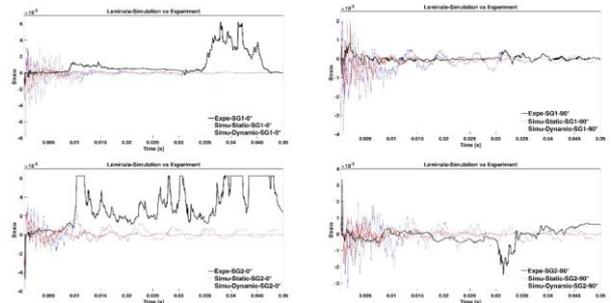


圖 22. 厚殼結構之實驗與分析結果比較

3.3.3 三明治結構變分析結果

三明治實驗結果如圖 23 所示，由結果可知三明治結構的應變值雜訊較多，研判是因其應變值極小，導致應變值落在雜訊範圍附近，因此三明治結構之應變範圍落在 10^{-3} ~ 10^{-4} 區間，由此可知三明治結構的抗爆震能力優於厚殼結構，此結果與模擬結果相同。而在結果中亦可看出 SG2 的變形量皆大於 SG1 位置，此結果與厚殼結構相同。由結果可知除了前述提到的實驗製程誤差之外，另一影響數值誤差的主因則為實驗模型中的 PVC 芯材為發泡材質，此種芯材具有孔洞及切槽可達到吸震的效果，但在數值模擬中是將芯材部分是為連續體，並無法設定材料中的孔洞，因此可以看出模擬結果之能量消耗較慢。

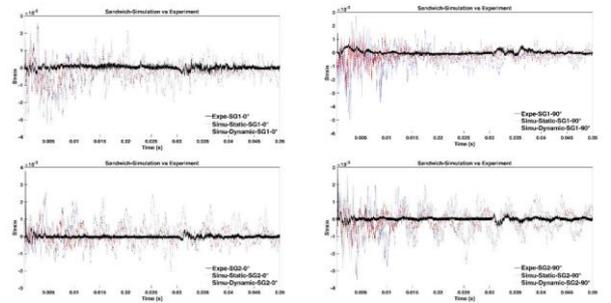


圖 23. 厚殼結構之實驗與分析結果比較

3.3.4 結果與討論

由實驗之數據圖可看出 FRP 曲殼承受爆震之數值與模擬結果，本計畫研判有幾種可能的原因。

- (1) 環境因素影響爆震波之傳遞，炸藥產生的衝擊波傳遞致結構表面的過程中可能受到水域中的樑柱反射或結構受到風吹、水波動導致不穩定等影響，使爆震波的傳遞不完全。
- (2) 本次實驗在貼設應變規時未注意到應變規貼設位置的影響，使得應變規 Sensor 的位置沒有對應到纖維絲束上，而是橫跨於纖維束絲之間。但在分析時應變則是假設為相對位置上纖維束絲所產生的應變，因此研判本次實驗所量測到

的數值為樹脂吸收振幅後的應變響應，而非纖維絲束的應變。

- (3) 三明治結構的應變值落差除了應變規貼設位置的影響外，另一主因則為數值模擬時無法設定芯材中的孔洞及切槽，因此模擬是將芯材是做連續體，導致能量消耗較慢。

另外，雖然數值模擬方法無法有效模擬出結構響應，但仍能看出幾種相同趨勢。厚殼及三明治結構的應變值範圍皆落在 10^{-3} 左右，並且厚殼結構的變形量皆高於三明治結構，以及透過最大應力破壞準則與實驗模型比對後，得出結構在實驗及分析結果中皆不會發生破壞，因此在未來分析時建議可利用強度評估的方式進行設計。

結論

本計畫主要透過數值模擬及實驗驗證兩種方式，探討不同 FRP 積層結構承受爆震時的結構響應，首先經由理論公式估算實驗之最大爆壓負荷，將其作為強度設計依據，並透過 ABAQUS 數值模擬軟體初步估算以厚殼結構承受設計負荷所需的層數後，再由等效彎曲剛性的方式計算出三明治結構所對應的層數，並建立完整的實驗條件後，藉由數值模擬算出水域中產生的爆震壓力及結構之應變響應。實驗方面則藉由 VARTM 製作兩種不同積層方法的試驗模型，並至實驗水槽進行爆震試驗，最終以實驗結果與模擬結果比對，得出以下幾點結論：

- (1) 根據爆震壓力之理論值、模擬結果與實驗結果比對，證明本研究已成功的建立了完整的流固耦合方法和負荷條件進行水下爆炸之分析，未來需探討水下爆震時，皆可透過本研究所建立之爆震負荷及邊界設定進行數值模擬，即可省下大量的時間成本。
- (2) 炸藥引爆於結構底部時必定對材料產生大量的變形，而透過模擬結果和實驗結果皆可知，雖然兩者於應變值落差較大，但有相同的趨勢結果為三明治結構於承受水下爆炸時，因其彎曲剛性較大，因此三明治結構的應變響應相較厚殼結構緩和。
- (3) 參考朱富成[13]以霍普金森桿所測得之動態材料參數，分別輸入靜態與動態材料參數進行數值模擬分析比較。結果顯示，不論是厚殼或三明治結構，動態材料參數之模擬結果皆因整體剛性下降，導致其結構應變值上升，而經實驗結果驗證，由靜態材料參數所計算出的結果較符合實際狀況。

希望透過本計畫之研究成果水下爆震試驗與爆震分析及監測系統的開發，針對爆震設計下 FRP 應用於艦艇結構的積層設計與實驗及製造等關鍵問題，作為設計研發之參考。

參考文獻

1. Mathijssen, D. Now is the time to make the change from metal to composites in naval shipbuilding. *Reinf.Plast.* 60, 289–293 (2016).
2. Hasson, D. F.; Crowe, C.R. (Eds.) *Materials for Marine Systems and Structures*, 1st ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA; ISBN 9781483218328 (1988).
3. Marsh, G. Vinyl ester –the midway boat building resin. *Reinforced Plastic*, 51, 20–23 (2007).
4. Carrier, G. E., “The Interaction of an Acoustic Wave and an Elastic Cylindrical Shell,” Contract N7 Nonr-35810, Tech. Rep. No.4, Brown University, Providence, R. I. (1951).
5. 廖清照，張東山，“壓力殼之彈塑性動態分析”，中正理工船研所 (1989)。
6. Cho-Chung Liang, Ching-Yu Hsu and Wen-Hao Lai “A Study of Transient Responses of Submerged Spherical Shell under Shock Waves”, *Ocean Engineering*, Vol.28, pp.71-94 (2001).
7. 洪振發，林邦俊，鄭貴華，“嵌板受近距離水下爆震衝擊的損壞分析”，*中國造船暨輪機工程學刊*，第二十八卷，第一期，頁 17-28 (2009)。
8. 徐慶瑜，江家慶，陳楷霖等，潛艦國造原型艦試製船段爆炸試驗研究計畫”，*台船公司計畫成果報告(合約編號:AD 108047)* (2020)。
9. Core, Robert H., “Underwater Explosive”, Princeton University Press, New York, 1948.
10. W. D. Reid, “The Response of Surface Ships to Underwater Explosions”, *DEFENCE SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANIZATION CANBERRA (AUSTRALIA)* (1996).
11. N. Burman, D. Saudners, B. Walsh, and R. Woodward, “Dynamic Loading in Manufacturing and Service”, *DEFENCE SCIENCE AND TECHNOLOGY ORGANISATION CANBERRA (AUSTRALIA)*, 1993.
12. G. Abaqus, “Abaqus 6.11”, Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA (2011).
13. 109. 朱富成，“FRP 動態材料參數應用於水面艦承受水下爆炸之分析”，*碩士論文-國立高雄科技大學造船及海洋工程研究所* (2022)。
14. 117. 林則佑，“FRP 聲納護罩承受拍擊之接合強度研究”，*碩士論文-國立高雄海洋科技大學造船及海洋工程研究所* (2020)。
15. 116. Hibbit, Karlsson, and Sorensen, 2011, *ABAQUS Theory Manual*, Version 6.11.1, Inc., Pawtucket, RI.

MULTILAYER DESIGN AND ANTI-UNDERWATER SHOCK VERIFICATION OF FRP NAVAL STRUCTURE (III)

*C. Y. Hsu** *C. C. Chiang*** *G. M. Luo**** *Y. H. Chen** *W. S. Yang*** *Y. J. Yuan**** *S. H. Cheng****

* Department of Marine Mechanical Engineering, R.O.C. Naval Academy

** Department of Mechanical Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

*** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

Keywords: FRP, thick shell laminations, sandwich structure, underwater explosion test, FRP ship structure

ABSTRACT

This project uses the principle of Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process to produce FRP semicircular shell models with thick shell lamination and sandwich structure. Underwater explosion analysis was carried out for these two laminated structures. This project designs 16 layers of LT800/M225 to make a thick shell structure. The sandwich structure is made of 6 layers of LT800/M225 with a 10 mm PVC core. Both use the symmetrical layering method and conduct underwater explosion tests. The structural response of various FRP laminates under underwater detonation load was measured and verified with numerical simulation results. The results show that the explosion pressure measurement is about 2.14 MPa, and the numerical analysis is 2.38 MPa. When measuring the strain at the closest point to the explosive, the strain values of both the thick shell and the sandwich structure are approximately 10^{-3} , and the deformation of the thick shell structure is greater than that of the sandwich structure. From the experimental results, it can be preliminarily estimated that the shock-resistant effect of the sandwich structure in this case is better than that of the thick shell structure. The results of this project can be applied to the design, construction and logistics maintenance stages of FRP ships in the future, which can improve domestic technical standards in related fields.