

# 行政院國家科學委員會補助整合型專題研究計畫期中進度報告

## 潛艦關鍵技術之基礎研究 - 子計畫二：潛艦結構強度分析(2/3)

計劃編號：NSC92-2611-E-002-017

主持人：李雅榮(國立台灣大學工程科學及海洋工程學系)

研究人員：黃建樺、林勁成

### 一、摘要

高性能潛艦之結構系統，應具有極佳之抵抗潛深水壓及水下爆震的能力，因此本子計畫為配合此目標之追求，將以潛艦壓力殼之耐高壓、耐爆震及耐疲勞破壞的能力為重點，而本計畫第二年之進度，以研究壓力殼受爆震負荷下之振動反應及破壞行為為主，並另外探討潛艦整體結構碰撞、壓潰等分析。

本子計畫於第二年度中，使用了前一年度中所建立之 209 型潛艦壓力殼之數值模型與網格，探討該壓力殼受爆震負荷下之振動反應及破壞行為。唯爆震現象所牽扯的現象複雜，爆震負荷的求取就是一項值得深究的課題，所以此部分研究除利用子計畫「潛艦重要裝備之抗震分析」第一年的成果：水中爆震負荷分析，作為設計爆震負荷，分析壓力殼在此負荷下之破壞行為外，亦自行發展出理論解法，作為簡便的外力設定模式。

此外，在潛艦結構動態分析方面，本計畫採用顯性時間積分進行潛艦整體結構碰撞、壓潰等分析，以對此一封閉型壓力殼結構特性有進一步了解。

關鍵字：潛艦、壓力殼、水下爆震、碰撞

### Abstract

The structure system of high capability submarine must have the ability to resist the high pressure under deep water and under water shock loading. Consequently, the aim of this research will be the capability of resisting high pressure, shock loading, and fatigue damage of pressure hull. The achieved percentage of scheduled progress in the second year is to obtain the dynamic response and failure behavior of the pressure hull under shock loading. In addition, we also analyze the crushing behavior of this model.

In the second yearly period, we use the numerical pressure hull model of U209 Submarine accomplished before to make a study of the dynamic response and failure behavior of pressure hull under shock loading. The

phenomenon of under water shock, nevertheless, is so complex that we use the result of another proposal, Analysis on the shock resistant of main equipment, to be the design load. In the long run, we can get the distribution of deflection, stress of this model in dynamic. But in the final, we develop a theoretical method to replace the front one in order to reduce calculating time.

Besides, we comprehend the characteristic of this model further by probing into the collision behavior by using Explicit Time Integral Method.

Key Word : submarine, pressure hull, underwater shock, collision

### 二、緣由與目的

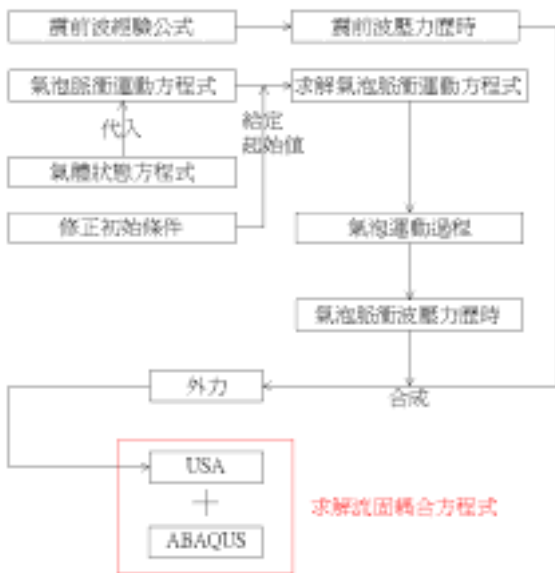
潛艦執行作戰或偵蒐任務時，無可避免的會遭受到敵方反制。深水炸彈與魚雷等常見的反潛武器，會產生強大爆炸，對潛艦造成嚴重的傷害，所以爆震負荷為潛艦設計之必要考量。水下爆震產生的初始爆振波，與緊接在後的高壓氣泡產生的脈衝波均會對船體結構產生傷害，其中初始爆振波向外傳遞時，會使船體產生瞬間加速度、局部肋板結構的扭曲變形，嚴重時會造成船體殼板的皺摺與破裂；而氣泡脹縮產生的壓力峰值雖然比不上主衝擊波，但產生的次衝擊波卻會對船艦結構主要振動模態產生持續擾動，使得內部的基座與設備在承受後續而來的振動中產生構件與裝備間的碰撞、鬆脫。

此外，本文中所探討的潛艦，乃為適應台灣的戰略狀況而必須加以特殊設計者。台灣附近海域除東岸的太平洋海域具水深、區域開闊的特性，與一般潛艦設計狀況無異外，其他如台灣海峽、巴士海峽北方海域、東海海域都是較為狹窄且平均深度小的水域，潛艦在這些水域的作動必須要特別小心，否則很容易有坐底或是碰撞的情形發生。故針對上述問題必須加以考量，分析潛艦發生碰撞後的破壞行為並加以補強。

### 三、基本理論

#### (一) 水下爆震分析相關理論

水下爆震發生後，首先會出現震前波，緊接著才會因為氣泡的運動，傳遞脈衝波至周圍的流體。一般而言，震前波可以由經驗公式準確的預估，而氣泡脈衝波則必須要另外求解，沒有經驗公式可以詳細描述。本文中利用理論解來估計脈衝波的量值後，疊加震前波而得到所需的外力。以下為本研究之求解過程：



#### (二) 碰撞分析相關理論

碰撞分析乃一動態問題，在求解過程中，是以時間  $t$  的物理量為基礎，去求得在時間  $t + \Delta t$  時的物理量。因此，必須將整個時間域 (time duration) 分割成許多時段 (time step)，以 step by step 的方式，來得到時間變數的解。時間積分法分為兩種，一是隱性法 (implicit method)，一是顯性法 (explicit method)。本文使用顯性法，特色如下：

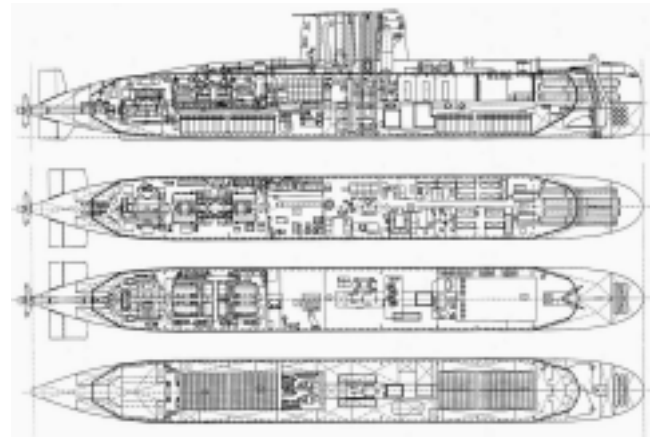
顯性積分法是一種條件穩定 (conditionally stable) 的積分法，這樣的積分法好處是可以求瞬間 (transient) 的問題以及接觸 (contact) 的問題，且具有以下的優點：每個時間增加量所需要的運算時間較少、較容易求解非線性問題、程式執行時不需要很大的儲存空間、結果可靠準確；但缺點則是必須要時間增量分割的相當小，否則不易收斂。

此外，使用套裝軟體如 ABAQUS 或 LS-DYNA 處理接觸問題時，必須要定義接觸的種類，以免發生節點的貫穿。定義了接觸形式之後還必須定義兩物體間發生接觸的主從關係 (master & slave)。接觸的演算法主要是先搜尋發生接觸的節點，然後計算碰撞力 (contact force)，

所以當物體達到接觸的條件時，程式會先計算接觸節點，然後求出接觸力以進行下一步的計算。

### 四、研究對象

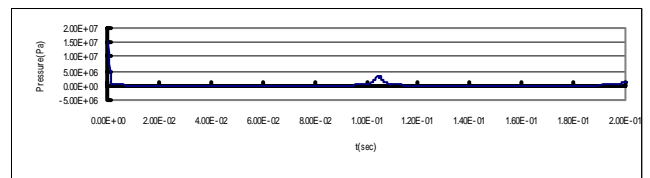
本計畫所探討的對象為德國 HDW 船廠所製之 209-1400 型潛艇。209 級潛艇採用單殼結構，直徑約為 6.2 公尺，壓力殼之材料為 HY-80 高張力鋼，操作潛深可達 250 公尺。



### 五、模型與邊界條件

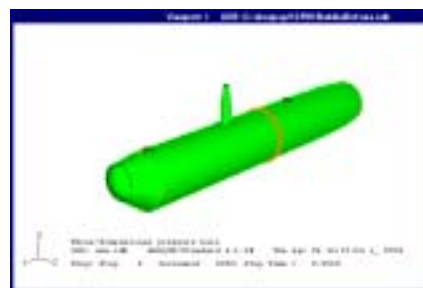
#### (一) 水下爆震分析模型與邊界條件：

##### 1、於 Standoff Point 所觀察到的壓力變化歷時圖：



Standoff Point 指的是潛艦船體上最接近爆炸處的点，上圖 X 軸的  $t = 0$  指的是當壓力波傳到 Standoff Point 的那一刻開始算起。由上圖可以知道，當  $t = 0$  時壓力有最大值為  $1.6034E+7 Pa$ ，接著壓力就迅速衰減，甚至產生相較於脈衝波小很多的負壓 (其絕對值)，而當  $t = 1.055E - 1s$  時，由於氣泡瞬間由壓縮到最小體積改為向外膨脹，會產生出另一個類似爆炸的震波。

##### 2、模型與邊界條件：

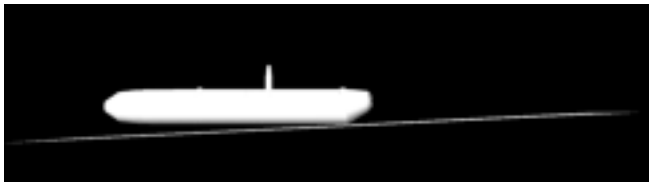


在潛艦舢舨的部分，我們固定住  $x$  方向，使得潛艦不會因為壓差而產生前後方向的位移；在潛艦的兩端，我們則

固定住切線方向，使得潛艦不會發生旋轉，但潛艦仍然可以自由的作半徑方向的變形。

(二) 碰撞分析模型：

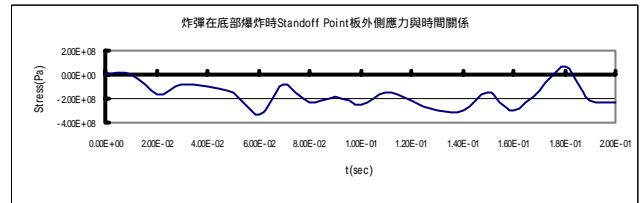
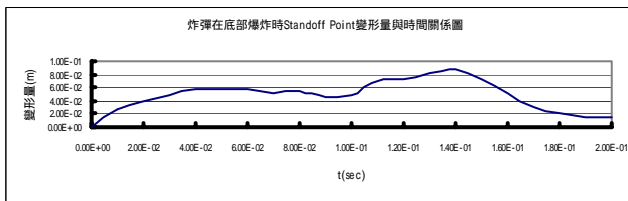
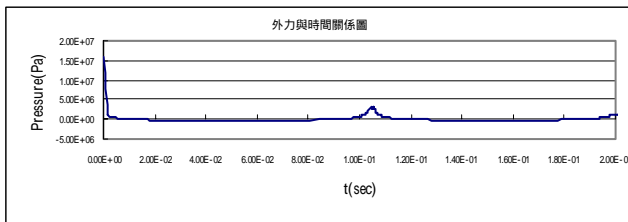
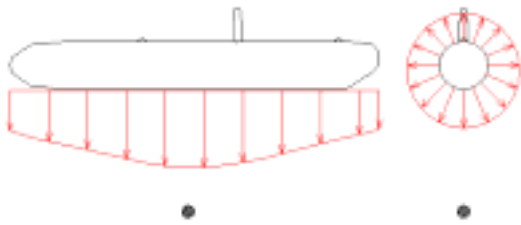
實際產生碰撞行為時，潛艦船艙部分的外殼會先與外物產生撞擊，且船艙外殼的內部包覆著魚雷管、聲納等裝備，都可能因為碰撞而損壞，所以完整的分析中，外殼是不能夠忽略的部分。但由於外殼的形狀複雜，且補強方式與板殼厚度缺乏資料可以使用，故本文所研究的碰撞模型，並沒有將外殼一同考量進去，而是單純的考量壓力殼的部分。所以為了兼顧模擬的真實度，我們不考慮船艙或船艙正面碰撞的情況，而是採取潛艦底部 (U209 潛艦的船側與底部都是單殼) 與海床近似平行的碰撞行為，模擬時控制潛艦與海底底床的夾角，艦艇以預設的速度撞上，近似潛艦採取坐底的行動。



六、計算結果

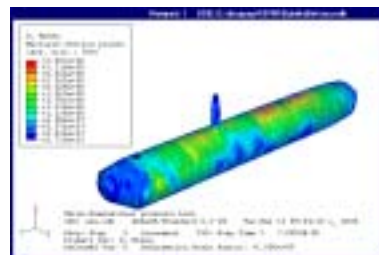
(一) 水下爆震部分計算結果：

以炸藥在船體下方爆炸為例：

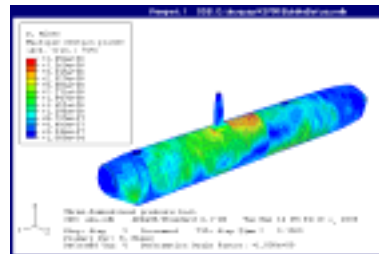


當炸藥在船底爆炸時 (Standoff Point 在船艙數來第五組大肋骨上)，我們可以發現：船體會先向外力作用的方向變形，當時間為 0.05s 時，會產生局部的最大變形量 5.87cm，而後慢慢減少，當第一個氣泡脈衝波產生之後，又會向外力作用方向再產生多一些的變形，最大值約為 9cm，而在此時段前的對大變形量較在船側爆炸時稍大，接著變形量逐漸的縮小，又較之稍小，可說明炸藥在船底爆炸時上下震盪的幅度略大於炸藥在船側爆炸時左右震盪的幅度。而由應力圖中則可以發現，Standoff Point 的應力最大值大約在 300Mpa 上下徘徊，且應力值大時，多半也對應於變形量大時。

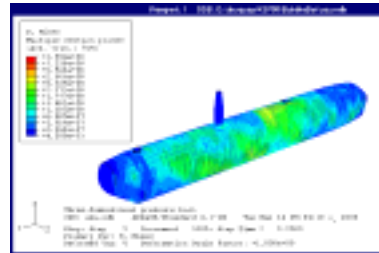
部分應力圖如下：



t=0.07s

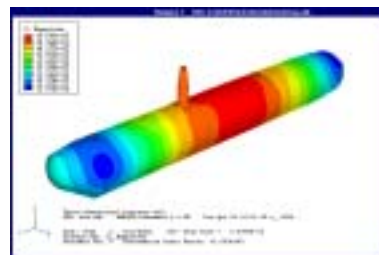


t=0.15s

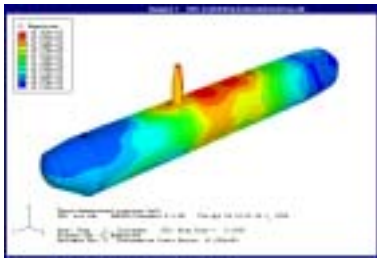


t=0.20s

部分變形圖如下：



t=0.05s

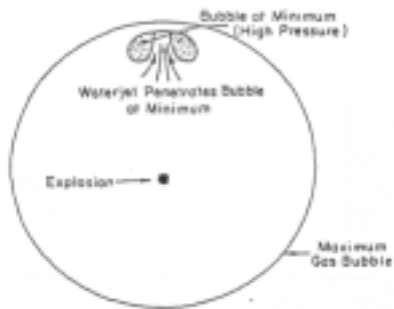


t=0.19s

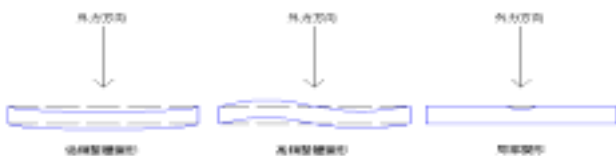
就一般爆炸情形來看，爆震對結構的影響程度視震源位置而定，以潛艦下方之爆震對結構影響最大，然而在本分析例中並沒有看到明顯的差異，只有爆炸後期的第二個震動模態持續時間較長，我們認為差異應在於本分析中，外力與流固邊界較為簡化，無法模擬出噴射水流所造成的損害所致。

對於由魚雷或深水炸彈所引起的巨大爆炸所生成的氣泡，在第一次脈衝運動的期間會因為氣泡頂部與底部的水壓差而逐漸失去球對稱的形狀。而當氣泡開始收縮直到最小體積的這段期間中，位於氣泡底部的水流，向氣泡中心移動的速度會大於兩側的水流，而兩側的水流向氣泡中心移動的速度又會大於氣泡頂部的水流，所以會形成高速的噴射水流向上穿透整個氣泡，如果爆炸點接近船殼，尤其是位於潛艦下方的話，此瞬間噴射水流所造成的衝擊相當嚴重。然而本分析例僅考慮「震波」，且流體部分乃是運用「一層覆蓋於潛艦外殼的流體元素」模擬之，所以並不能充分計算此一現象所造成的傷害。

下圖是氣泡與噴射水流的示意圖：



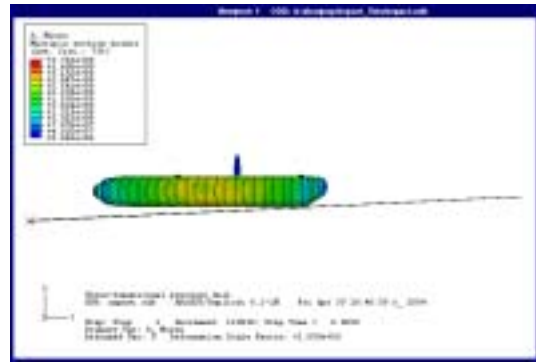
另外由應力與變形圖我們也可以發現，船體的變形與應力可區分為整體(高頻+低頻自由震盪)與局部(次頁示意圖)兩個部分的疊加。



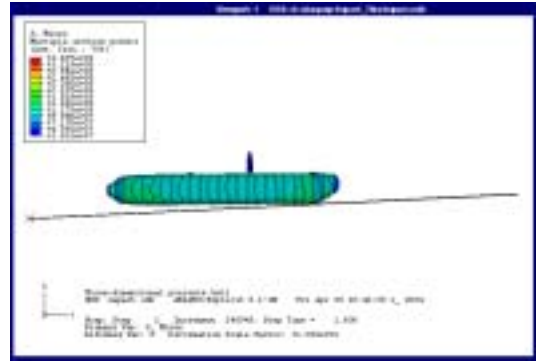
## (二) 碰撞分析部分計算結果：

以【潛艦以 7knots 的船速前進，與海床的夾角為 2°】為例：

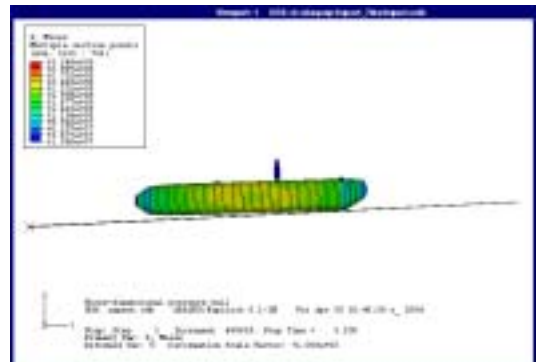
部分應力圖如下：



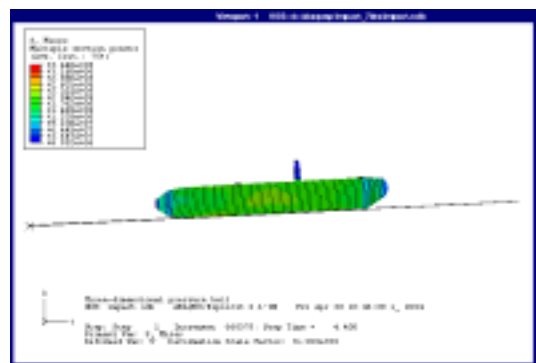
t=0.8s



t=1.6s



t=3.2s



t=4.4s

以分析的結果看來，碰撞前全船的應力與變形乃是受到靜水壓影響，一但產生碰撞，則該部位會先有較高的應力值與變形產生，然後逐漸傳遞到船艙的部位，接著整體應力分佈則隨著時間產生一高一低的狀態，彷彿有一「力波」通過船體，但比較值得注意的地方則是，碰撞處與結構不連續處則較不易觀察到這樣的現象，其應力值一直都較高。當船體慢慢前進，艦部逐漸坐底，船體底部則成為另一個應力較高的部位，推測應該是由大面積的撞擊與摩擦造成。以此分析結果來看，本設計應能安全承受這樣條件下的碰撞。

若將碰撞速度提升到 10Kts 時，則會產生了二次的

反彈與再碰撞、時間拖長到 8 秒鐘才能達成動作。雖然在分析中潛艦的結構並沒有產生損壞（最大應力值約為 450MPa），但長時間且多次的撞擊，應該會對內部的裝備與人員產生巨大的衝擊與傷害。其次，若加大碰撞角度，可以發現：（1）碰撞角度加大，損壞的更加嚴重，且損壞部分在碰撞點、指揮塔底部與船艙底部。（2）碰撞角度加大，坐底時間更長，其中彈跳與碰撞的次數更多。（3）角度若大到  $12^\circ$ ，潛艦業已損壞，故可知潛艦的極限碰撞角度不應大過於此，否則坐底將會發生危險。

## 七、結論

### （一）水下爆震分析部分

- （1）近年來應用有限元素法解析氣泡脈衝行為的方法已頗為成熟準確，但利用此法解完整流場的分析時間及前後處理均很冗長，本文中利用理論求解氣泡運動、週期、流場壓力之結果與有限元素法或實驗所得結果相似，但求解時間遠小於前者，應可較便利的提供外力供作潛艦結構設計基準。
- （2）以設計基準  $KSF=0.8$  作為分析條件下，本艦壓力殼若依前一章所決定之結構設計建造，則絕大部分區域可以承受這樣的衝擊，唯指揮塔與船體交接處需另外補強，否則可預見損傷必由此處產生。
- （3）衝擊波首先會對船體造成一低頻的整體強制震盪，隨著時間的增加，較高頻的其他整體震盪模態與局部震盪模態才會逐漸產生較明顯的影響。
- （4）氣泡脈衝的週期如果約等於船體自然震盪週期的四分之一左右，則對船體而言最具威脅，而影響氣泡週期的因素則是炸藥的裝藥量與爆炸深度。
- （5）由目前的分析結果來看，炸藥在船底爆炸所引起的震盪最大，側邊爆炸次之，在上方爆炸最小，但應力值卻沒有很大的差異。此與一般經驗稍有不同，可能是因為本文未考慮氣泡上浮與崩潰行為所引起的，所以如果要完整模擬真實狀況的話，氣泡崩潰後所引起的噴射水柱應該不可忽略。
- （6）本研究中，深水炸彈爆炸的位置離潛艦有相當距離，所以由縱向與圓周方向的外力分佈圖（參考 P.61、P.70、P.75 示意圖）來看，爆震力的分

部還算得上“均勻”，並沒有發生迎震面震擊力比背震面震擊力大得多（如前者四、五倍以上於後者）的狀況。但如果減低炸藥量，但把爆炸點移近，維持同樣的 KSF 值的話，對船體而言入射波會比較接近球形波，對迎震面的瞬間衝擊也較大、但衰減的較快。兩者相比，對於離開爆炸點的船艙、艙或其他面向而言，遠距離的爆炸反而會有較大的衝擊量，所以這個現象印證了本文計算結果中，強制震盪的量值遠大於局部變形的現象。

### （二）碰撞分析部分

- （1）船速對碰撞結果有很大的影響，船速越高，則碰撞後的反彈次數越多，完全坐底所花費的時間也越長。
- （2）碰撞角度對於碰撞次數、花費時間的增加也有影響，但撞擊角度對於碰撞最大的影響在於船艙段底部的損壞程度。碰撞角度越大，船艙底部區域越有可能損壞。
- （3）以分析結果來看，在小角度且低速的撞擊下，目前的壓力殼設計尚能承受。
- （4）目前的分析為全尺寸、並考慮不同速度、碰撞角度下的分析結果，但並未考慮外殼的影響。一般而言，外殼的強度遠低於壓力殼，所以同樣的碰撞下外殼可能已經損壞，但可以吸收碰撞能量，使壓力殼的損傷更小，故本文的分析應可視為更嚴苛的設計條件。
- （5）顯性法（explicit method）的計算時間很長，所以本文中無法測試所有設想得到的碰撞情況。如果能有更多時間、詳細測試所有因子的變化與碰撞結果間的關係的話，應可建立一設計參考表，使設計時可參考的資料更為完整。
- （6）由碰撞分析中我們可以發現，潛艦在撞擊海床之後，依舊可以自由滑動、反彈，並非硬生生的被海床擋住、壓潰，所以潛艦的碰撞分析不應該被視為靜態的壓潰而簡化計算之，否則可能會高估了損壞程度。

## 八、參考文獻

- 【1】J. S. Coles, E. A. Christian, J. P. Slifko, C. R. Niffenegger and M. A. Rogers, 1946, " Shock wave parameters from spherical TNT charges detonated under

water ” , Underwater Explosion Research Vol.1 , Office of Naval Research , Washington D. C. , 1950。

- 【2】Lord Rayleigh , ” On the Pressure Developed in a Liquid During the Collapse of a Spherical Cavity ” , Philosophical Mag. (Ser. 6)Vol.34 , P.94~P.98 , 1917。
- 【3】 H. Lamb , ” The Early Stages of a Submarine Explosion ” , Philosophical Mag. Vol.45 , P.257~P.265 , 1923。
- 【4】 H. Jones and A. R. Miller , ” The Detonation of Solid Explosives ” , Proc. Roy. Soc. (London) 194A , P.480~P.507 , 1948。
- 【5】 G. I. Taylor , 1942 , ” Vertical Motion of a Spherical Bubble and the Pressure Surrounding It ” , Underwater Explosion Research Vol.2 , Office of Naval Research , Washington D. C. , 1950。
- 【6】 K. S. Hunter , ” Underwater Explosion Bubble Dynamics ” , B. S. , New Mexico State University , 1993。
- 【7】 M. Strasberg , ” Gas Bubbles as Source of Sound in Liquids ” , J. Acoustic Soc. Am.28 , P.20~P.26 , 1956。
- 【8】 Christopher Earls Brennen , ” Cavitation and Bubble Dynamics ” , Ch. 2 , Oxford University , 1995。
- 【9】戴毓修,梁卓中, ” 載具結構及裝備抗震強度之研究 ” , 中正理工學院博士論文 , P.140~P.143 , P.150 , 2002。
- 【10】 C. N. Wang and C. C. Tse , ” The Scattering of an Acoustic Wave Incident on the Rigid Floating Body ” , Applied Acoustics Vol.53 , P.35~P.41 , 1998。
- 【11】任克明,李萬君,林賀新, ” 水中兵器與戰爭 ” , 北京國防工業出版社 , P.183~P.213 , P.309~P.311 , 1997。
- 【12】戴毓修,梁卓中, ” 載具結構及裝備抗震強度之研究 ” , 中正理工學院博士論文 , P.143 , P.151 , 2002。