

應用美規 MIL-STD-901D 標準水中爆震平台進行 船艦重裝備之抗震能力分析

梁卓中¹ 陳立賢²

¹大葉大學機械與自動化工程學系

²大葉大學車輛工程研究所

51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

摘要

歐美國家船艦上之裝備一般均根據軍規 MIL-STD-901D 中的水中爆震平台 (floating shock platform) 進行抗爆震評估, 但實驗過程費時、費力且花費金錢, 近年來非線性有限單元法之快速發展, 故利用有限單元軟體建構標準水中爆震平台來進行艦用重裝備抗震能力之探討成爲一可行之方式, 但此方面之研究仍尚未成熟, 其可行性研究仍有其必要性。

本文乃針對標準水中爆震平台上重裝備之抗震能力進行研究, 應用有限單元軟體 ABAQUS 結合水下爆震軟體 USA (underwater shock analysis) 進行考慮流固耦合效應下之水下爆震反應分析, 探討不同重量裝備在不同爆炸點距離和不同炸藥深度下之抗震效果, 研究之裝備重量分別爲 9000 lb、18400 lb 和 35800 lb, 爆炸點距離分別爲 20 ft、30 ft、40 ft、60 ft 和 80 ft, 其炸藥深度分別爲 20 ft 和 30ft。與美國 H.I.-TEST 實驗室之相關實驗和 Kwon 等人 [16] 之 LS-DYNA/USA 的模擬值比較, 誤差值均約在 10-20% 左右, 顯示本文以 ABAQUS/USA 進行裝備抗震之可行性。另由本文研究結果發現隨著重量的增大、爆炸點距離的增長和炸藥深度的加深重裝備之爆震速度下降。本文研究結果應能提供相關單位進行抗爆震評估時之參考使用。

關鍵詞：水中爆震平台, 艦用重裝備, MIL-STD-901D, ABAQUS

Heavyweight Shock-Resistant Shipboard Equipment: A Numerical Study Using an MIL-STD-901D Floating Shock Platform

CHO-CHUNG LIANG¹ and LI-HSIEN CHEN²

¹*Department of Mechanical and Automation Engineering, Da-Yeh University*

²*Institute of Automotive Engineering, Da-Yeh University*

No. 168, University Rd., Dacun, Changhua, Taiwan 51591, R.O.C.

ABSTRACT

In a war, combat survivability of instrumentation is quite significant. Fighting ships must fulfill

their missions under extreme conditions, which often include exposure to various hazards such as shock and vibrations. The US Navy's MIL-STD-901D shock-test standard requires that equipment heavier than a designated weight be tested on a floating shock platform (FSP) barge; however, this test is time-consuming, laborious and quite expensive. Fortunately, finite element modelling and simulation can provide a viable, cost-effective alternative to shock tests. In accordance with the MIL-STD-901D standard floating shock platform (SFSP), a shock-response analysis of an underwater explosion was performed by using a nonlinear finite-element software program. In this research, the accuracy of the analytical results was first examined by comparison with existing test results.

The objective of this study was to measure the responses of various equipment of differing weights and the differences among underwater explosions occurring at various depths when subjected to an explosion simulated by ABAQUS/USA software. Three items of heavyweight equipment weighing 9000lbs, 18400lbs, and 35800lbs, respectively, were tested in stand-offs from five explosive points: 20ft, 30ft, 40ft, 60ft, and 80ft, and from two explosive depths: 20ft, and 30ft. To demonstrate the feasibility of the ABAQUS/USA simulations, comparisons were then made with data obtained from the U.S.H.I.-TEST laboratory and Kwon's LS-DYNA/USA simulations.

In this research, a finite element model of a floating shock platform was constructed, thereby demonstrating the benefits of installing shock mounts on heavyweight equipment. The results can provide a very effective reference for correlative organizations when analyzing shock effects.

Key Words: floating shock platform, shipboard, heavyweight equipment, MIL-STD-901D.

一、緒論

由於艦艇為一複雜之作戰系統，新設計之艦艇於建造完成後，均需進行艦艇之爆震試驗。歐美海軍針對艦艇重要裝備及系統採用爆震軍規 MIL-STD-901D [21] 進行耐衝擊能力評估，但根據軍規 MIL-STD-901D 進行重級裝備需利用標準水中爆震平台及大型水中爆震平台進行測試，過程費時、費力又耗費金錢，現今的非線性有限單元數值軟體分析技術已十分成熟，可有效地模擬船艦受爆震時的情況，以節省實驗成本，只要相關參數確定，並確定適切材料與流體性質、炸藥種類、邊界條件以及分析時間步長，便可有效的模擬標準水中爆震平台上之艦艇裝備承受水下爆炸實際情形。研究水中爆震對艦艇儀裝設備衝擊之方法，一般可歸納為兩類：理論分析方法與實驗方法如圖 1 所示。理論分析方法包括經驗公式法、衝擊反應譜法、動態設計分析法、有限元素法和衝擊隔離優化法；實驗方法包括實品測試法與實船實驗法，其中實品測試法包括墜落測試、衝擊測試及水中爆震平台測試。過去研究文獻中，根據重級裝備抗爆震測試之 MIL-STD-901D 軍規，以有限單元法進行艦用重級裝備之抗爆震模擬並不多見，本文僅就相關文獻探討如下：

美國在 1963 年和 1972 年利用重型設備爆震平台試驗 (floating shock platform, FSP) 對核潛艇透平發電機組和

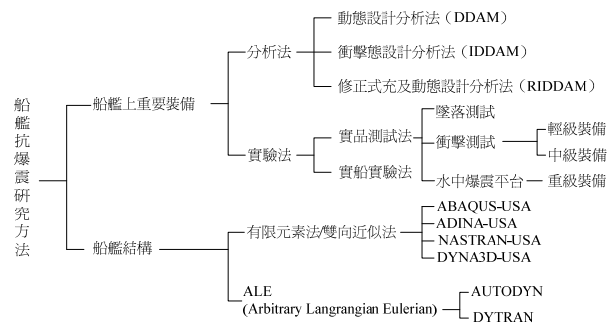


圖 1. 艦艇抗爆震之研究方法

LM2500 燃氣輪船進行了衝擊隔離試驗，並於 1973 年成立了大型水中爆震平台試驗 (large floating shock platform, LFSP)，同年就進行八次校驗性爆炸衝擊系列試驗。實船模型系列試驗的特點是：嚴密，可靠，設備經受綜合性效應考驗；可以具體改進新品薄弱環節和各部分衝擊能力；但具有花費大、規模大、周期長等缺點 [3, 9]。1973 年 Dave [10] 之研究指出對艦艇而言，艦艇上之電子裝備在爆震環境下容易因裝備間相互的碰撞產生變形而導致失效，另一個常見的損壞乃來自於艦艇上裝備的振動。艦艇上之振動主要來自於引擎及螺槳，而其最常見的振動範圍約在 12~33 Hz 左右，因此，為了避免爆震及共振的發生，在設計之初應考慮在裝備

上加裝抗震墊，避免因爆震力或艦艇上裝備的震動造成艦艇裝備的毀壞，而設計抗震墊最適合的材料應具有高降伏點、高強度以及高延展性之特性。由於艦艇上之裝備繁多且差異甚大，故於 1989 年美國海軍對艦艇上之機器、裝備、系統、結構之安裝位置及爆震測試要求均於 MIL-STD-901D 有所定義與規範 [21]，其主要目的是要證實上述之裝備在艦艇承受爆震負荷時之抗爆震能力。在裝備等級方面，將裝備區分為 A、B 及 C 三種等級，裝備重量方面亦區分成輕、中、重三種，並分別利用輕級重量衝擊試驗機、中級重量衝擊試驗機以及水中爆震平台進行實品之爆震測試，水中爆震平台乃是將裝備置於艦艇上以實船爆震之方式來測試。在實品及實船測試乃是經由墜落試驗、衝擊試驗及水中爆震平台來評估艦艇及內部裝備之抗爆震能力。2001 年，Matt [20] 等人針對 CM2019 海洋金屬電子連結器進行水下爆震測試，經由美國 H.I.-TEST 實驗室利用標準水中爆震平台進行測試，測試 CM2019 海洋金屬電子連結器是否通過軍規 MIL-STD-901D，所得到之測試結果可幫助工程師設計能夠抵抗水下爆震試驗之產品。2004 年，Juanito 與 Murphy [13] 針對 A 級裝備進行爆震試驗，經由美國 H.I.-TEST 實驗室利用標準水中爆震平台進行測試，所得到之測試結果可幫助戰鬥艦艇之設計，除了有效節省預算，且可以隨時進行抗震評估，對於戰鬥艦艇裝備是否能抵抗水中爆炸相當有用。2007 年，胡秀英 [2] 針對艦船電子設備高強度衝擊試驗和抗衝擊設計探討，其結果發現隨著水下爆炸量越來越大，艦船電子設備在設計時應採取相應的抗強衝擊措施，在裝艦前對設備進行有效的衝擊試驗，以保證艦船及設備的戰鬥力和生命力。

應用數值方法探討裝備抗震之重要文獻如下所敘：2005 年，Kwon 等人 [15] 利用有限單元軟體 LS-DYNA3D/USA 進行大型水中爆震平台上之艦艇裝備抗震性試驗之模擬，其數值計算結果發現安裝抗震墊之艦艇裝備可有效提升其抗震能力。2005 年，Kwon 等人 [16] 再利用有限單元軟體 LS-DYNA3D/USA 進行標準水中爆震平台於不同重量、炸藥深度及觀測距離下之模擬，其數值計算結果發現相較於 MIL-STD-901D 之試驗結果有其可靠性，亦即模擬之可行性趨近於真實測試。2006 年，Georges [11] 利用有限單元軟體 LS-DYNA3D/USA 進行標準水中爆震平台上之艦艇裝備抗震性試驗之模擬，所得之測試結果發現能有效降低實品測試法耗費之時間及金錢。2006 年，Maltby [19] 針對艦艇上

之裝備和武器進行標準水中爆震平台之抗震性模擬，利用爆震計算系統來有效分析爆震平台，其結果發現爆震計算系統可用於表示抗震之特性。

艦艇內部裝備之抗震能力和艦艇進行作戰時之安全性息息相關，因此艦用抗震墊之安裝相當重要，較重要的文獻如下：1959 年 Charlest [7] 對艦艇上的震動提出改善建議，並指出艦艇上的震動常來自於推進葉片運轉所造成，為了改善艦艇上之裝備長期在爆震環境下所造成的損壞，可利用橡膠墊及隔震裝置來隔離震源，而隔震裝置的安裝位置選擇安裝在裝備的底部或側面以增加隔震效果。1961 年，Keil [14] 指出艦艇遭受攻擊時所產生的破壞不僅有船殼上的破壞，也有重要裝備遭受爆震所產生的損壞，此外，隨著新型艦艇內部系統日益複雜，即使是次結構的破損也將導致嚴重的影響。因此，Keil 針對艦艇損壞的原因及艦艇對於破損的防護提供了一些建議，特別在裝備抗震方面，Keil 認為抗震墊（shock mount）應具有充足之彈性以承受爆震，即使有特殊之爆震輸入，裝備或其支承應能保持在彈性範圍以防止裝備的損壞，但過大之爆震負荷仍允許抗震墊有塑性變形發生。1988 年，Harris 與 Charles [12]，針對艦艇上彈性抗震墊（shock isolators）的應用有以下說明，艦艇上抗震墊的應用歸納如下：艦艇上抗震墊應注意預防敏感性裝備的爆震與振動。艦艇上的震動是屬於低頻範圍，大部份船艦抗震系統的自然頻率範圍約在 5~15 Hz 之間，而抗震墊可預防系統較低的自然頻率。而低頻會使懸吊系統的裝備位移變得很大，有時高達 3~4 英吋，因此抗震墊的選擇應考慮到位移的大小。一般使用在裝備上的彈性抗震墊材料為天然橡膠（rubber）或合成橡膠（neoprene）。2004 年，唐德高等人 [4] 針對普通的鋼絲繩鼓形隔震墊（簡稱 PGG 隔震墊）做靜力試驗，建立了 PGG 隔震墊水平向與垂直向的非線性剛度模型。經衝擊台動力試驗和理論計算分析，表明 PGG 隔震墊具有優良的爆炸衝擊震動性能。2006 年，Lekuch [17] 針對高撓度橡膠隔震墊安裝於雷達基座上進行標準水中爆震平台試驗，其測試結果發現能有效減少艦艇設備因水下爆炸或使用炸彈、火炮攻擊敵艦產生之振動。2006 年，江國和等人 [1] 以理論分析方法和試驗研究方法針對艦船設備衝擊隔震技術進行研究，並對目前已有多種型號之抗衝擊隔震墊如：低頻大阻尼抗衝擊拱型不銹鋼鋼絲繩隔震墊、SU 型隔震墊、大位移剛度橡膠隔震墊、橡膠與金屬黏結而成的 WH 系列減震器、非線性鋼絲繩隔震墊等之應用有所探討。2007

年，Lekuch [18] 針對鋼絲繩隔震墊進行標準水中爆震平台試驗。結果顯示在艦艇衝擊環境下，鋼絲隔震系統能有效降低傳遞給壓縮負載時的加速度幅值，但拉伸時的加速度幅值降低較少。其在承受衝擊載荷時，在衝擊載荷脈寬不變的情況下，隨著衝擊載荷幅值的增加，隔震器吸收的能量也隨之增加。2008 年，Wayne [22] 針對橡膠隔震墊提出是否能同時防護爆震和震動，利用美國 H.I.-TEST 實驗室所模擬之結果來探討橡膠隔震墊防震的情形，其結果發現橡膠隔震墊如果適當選擇，則可以達成同時防護爆震和振動艦艇裝備的功能。

前述文獻之研究大多著重於 MIL-STD-901D 軍規所介紹之重級裝備測試程序及爆震平台上裝備承受爆震後的情形，由於利用實驗法進行抗爆震測試，過程費時、費力又花費金錢。且由於非線性有限單元法之進步，藉由軟體模擬爆震平台安裝抗震墊的研究仍極為稀少，因此本文應用有限單元法 ABAQUS/USA 來進行爆震平台上重裝備之抗震能力之探討。

本文應用公開之文獻資料，針對重級裝備於標準水中爆震平台之抗震性探討，利用有限單元法 ABAQUS/USA 進行重級裝備於爆震平台上之抗爆震模擬，針對不同重級裝備、不同爆炸點距離和不同炸藥深度之垂向、橫向和艏艉向之速度進行探討，研究之成果期能有效減少實驗之時間、人力和金錢。

二、標準水中爆震平台

歐美海軍針對艦艇重要裝備及系統所採用之主要爆震軍規為 MIL-STD-901D，此軍規中對驗證艦用裝備之衝擊試驗機器及衝擊試驗程序均有詳細規定，由於全艦使用的裝備甚多且重量差異甚大，為便利測試執行與精確模擬爆震負荷，此軍規將測試程序依裝備重量區分為輕級、中級和重級，其中分類如下（如表 1 [21] 所示）：輕級重量裝備：裝備重量小於 550 lbs；中級重量裝備：裝備重量介於 550 lbs 至 7400 lbs 者；重級重量裝備：裝備重量大於 7400 lbs 者。

（一）裝備等級

由於船艦之裝備種類甚多，其重要性各有不同，故美海軍基於經濟及各方面之考量，將作戰艦艇依作戰、航行和安全等因素，將船上裝備分為 A、B、C 三個等級，簡述如下：

1. A 級裝備（grade A）：船艦保持安全及連續作戰能力之基本必要設備，此類設備承受爆震負荷時，性能不能有嚴

表 1. MIL-STD-901D 試驗方法

試驗程序	重量限制	試驗方法
輕級	< 550 lbs	利用擺槌式衝擊機加以試驗，利用擺槌高度控制衝擊規格。
中級	< 7.4 klbs	利用擺槌式衝擊機加以試驗，利用擺槌高度控制衝擊規格。
重級	60k~400 klbs	利用水中爆震平台，以炸藥之份量、起炸距離、方位等控制衝擊規格。

重影響，且設備之任何部分，不能有脫離現象，以危害工作人員或維生設備。

2. B 級裝備（grade B）：非船艦保持安全及連續作戰所必須，但這些設備必須能承受爆震負荷，且設備之任何部分，不能有脫離現象，以危害工作人員或維生設備。
3. 3. C 級裝備（grade C）：不需要爆震試驗或設計之設備。

以上述之分類，重要之 A 類裝備如艦艇控制與推進系統、指揮系統、航海系統、通訊系統、偵測系統、反制系統、直昇機起降及加油系統、海上整補系統、武器儲存及裝填系統、掃雷系統、損壞管制系統等。

（二）裝備類別

船上裝備分 A、B、C 三個等級，這些要測試的裝備也在三個類別之內被分類，類別 I、類別 II、類別 III，簡述如下：

1. 類別 I（class I）：船艦裝備需要符合 MIL-STD-901D 軍規震動要求，而不使用抗震墊安裝在船艦設備和船艦結構或基座之間。
2. 類別 II（class II）：船艦裝備需要符合 MIL-STD-901D 軍規震動要求，且需使用抗震墊安裝在船艦設備和船艦結構或基座之間。
3. 類別 III（class III）：所有船艦裝備有無使用抗震墊都能被定義為分類 III。

（三）水中爆震平台

為確保 A 級和 B 級裝備符合爆震之要求，最簡易而直接之方法係將裝備在裝艦前採用實品測試法加以驗證，目前測試法使用的測試機具分為墜落測試機、衝擊測試機及水中爆震平台。而重級重量裝備（裝備重量大於 7400 lbs）則必須利用水中爆震平台，進行測試（如圖 2 所示 [5]），水中爆震平台依其工作空間之大小，分成標準水中爆震平台（standard floating shock platform）及大型水中爆震平台（large floating shock platform）2 類（如圖 3、4 所示），測試裝備依其所佔空間大小，選擇適當水中爆震平台進行測

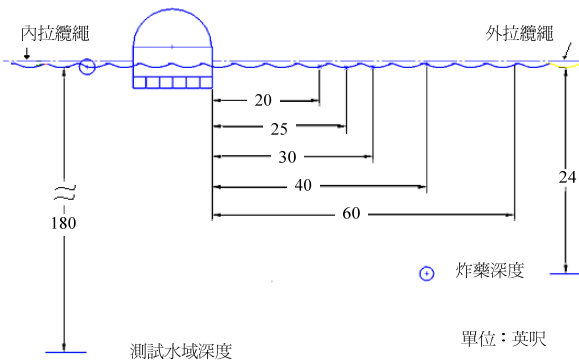


圖 2. 重級重量裝備進行水中爆破平台測試示意圖

表 2. 重級重量裝備於水中爆震平台測試程序分類表

測試條件	標準水中爆震平台	大型水中爆震平台
炸藥距水面深度	24 ft	20 ft
炸藥重量/炸藥成分	60 lbs/HBX-1	300 lbs/HBX-1
爆炸方向	艏艉向	艏艉向
爆點 1~4	橫向	橫向
量測點	如圖 2	
炸點 1	40 ft	110 ft
炸點 2	30 ft	80 ft
炸點 3	25 ft	65 ft
炸點 4	20 ft	50 ft

2. 大型水中爆震平台

將測試裝備依規範之規定固定於爆震平台上，將 300 lbs 之 HBX-1 炸藥置於 20 ft 水深，在此水深下分別依次進行水平距離 110 ft（炸藥置於艏艉向）、80 ft、65 ft 及 50 ft（炸藥置於船舳橫向）等 4 次爆震測試。

本文以上述 MIL-STD-901D 軍規所規範的水中爆震平台測試程序並配合 ABAQUS/USA 有限單元軟體進行爆震平台探討艦上重裝備抗震能力及安裝抗震墊後之反應。

三、ABAQUS/USA 理論基礎

由於非線性有限單元軟體 ABAQUS 之流固耦合問題分析技巧並結合水下爆震分析軟體 USA (underwater shock analysis) 進行水下爆震研究時，對於整個水下爆震環境之參數均有相當明確之定義，如材料與流體性質、炸藥種類、邊界條件以及分析時間步長等參數的輸入，均可滿足水下爆震結構與流場環境所需，因此本文採用“ABAQUS/USA”軟體模擬標準水中爆震平台承受強震波的動態反應。

(一) ABAQUS/USA 之理論基礎 [6]

ABAQUS/USA 具強大的瞬間動力、流體-結構耦合分析功能的基礎，USA 法 [6] 乃 Geer 於 1978 年利用雙向漸進近似法 (double asymptotic approximation, DAA) 為架構發展而得，此種雙向漸進近似法 (DAA) 的特點在於結合平面波近似法 (plane wave approximation, PWA) 與虛質量法 (virtual mass approximation, VMA)，可適用於高頻或低頻範圍的反應，如圖 5 所示。

DAA 法在高頻 (初期) 反應時，採用 PWA 法，在低頻 (末期) 時，採用 VMA 法，以符合流體波動的漸進行為，意即在高頻時，流體採負荷趨向阻尼力；在低頻時，流體則趨向於附加質量的慣性力。並且利用流體性質積分技巧，將

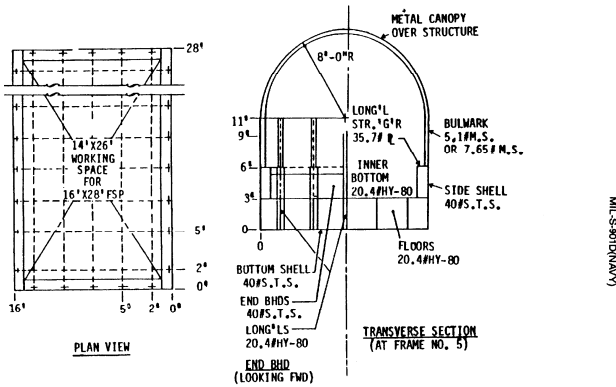


圖 3. 標準水中爆震平台示意圖

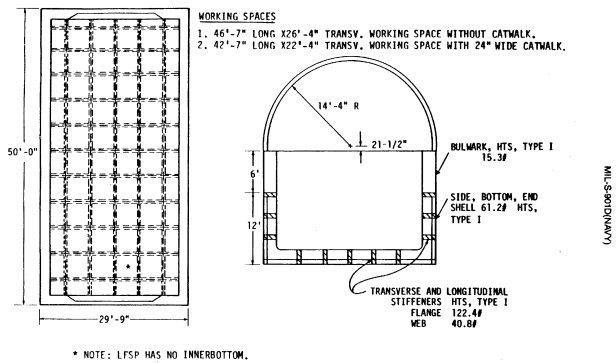


圖 4. 大型水中爆震平台示意圖

試，兩種爆震平台之測試程序如下（如表 2 所示）。

1. 標準水中爆震平台

將測試裝備依規範之規定固定於爆震平台上，將 60 lbs 之 HBX-1 炸藥置於 24 ft 水深，在此水深下分別依次進行水平距離 40 ft（炸藥置於艏艉向）、30 ft、25 ft 及 20 ft（炸藥置於船舳橫向）等 4 次爆震測試。

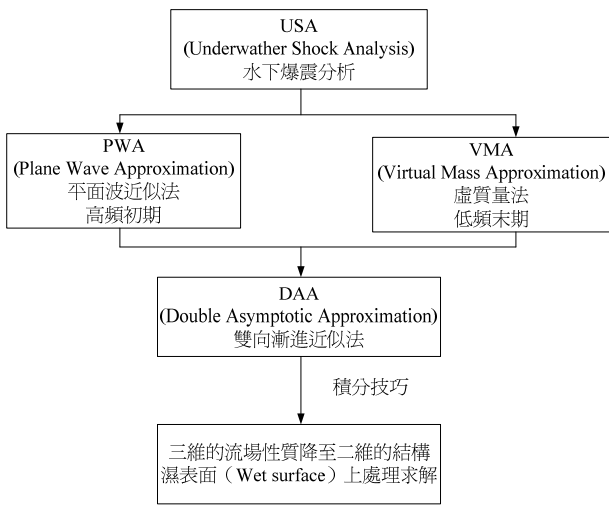


圖 5. 雙向漸進近似法 (DAA) 示意圖

三維的流場性質降階至二維的結構濕表面 (wet surface) 上處理，以模擬計算複雜結構體在考慮流固耦合的爆震環境下所產生的物理現象與相關數據。

在 ABAQUS 中計算流固耦合問題時，必須要搭配 USA 程式，而該程式使用的方法則是雙漸進近似法。在進行計算時，並不是真實使用完整之炸藥、流場與結構模型來加以計算，而是在結構表面外建立一層流體元素，採共同節點方法與結構及外在假設的 DAA 邊界互相銜接。入射波由 DAA 邊界傳入，由 USA 轉換成結構模型浸水面的外力，結構動態反應則以 ABAQUS 進行暫態分析，USA 則利用結構上的結點產生的位移與速度處理流固介面的交互作用問題。

(二) ABAQUS/USA 之應用技巧

本文進行流固耦合數值模擬是採用 ABAQUS/CAE 程式建立有限單元模型，以 ABAQUS/USA 程式為計算核心處理器 (solver)，最後由 ABAQUS/POST 程式為後處理求出需要的相關數據，其數值分析流程如圖 6 所示，以下將針對程式系統及相關之數值運算規則作一描述。

1. 前處理 (pre-processor)

前處理過程中幾何模型是由點、線、面、實體和座標系等特性所建構完成，其功能可滿足各種幾何形狀建立及其網格產生之需求。其建立模型之軟體由 ABAQUS/CAE 來完成。選擇最理想的網格分析、定義材料特性、時間步長、邊界條件、建立流體流域及定義輸出之問題為前處理過程中主要之程序。

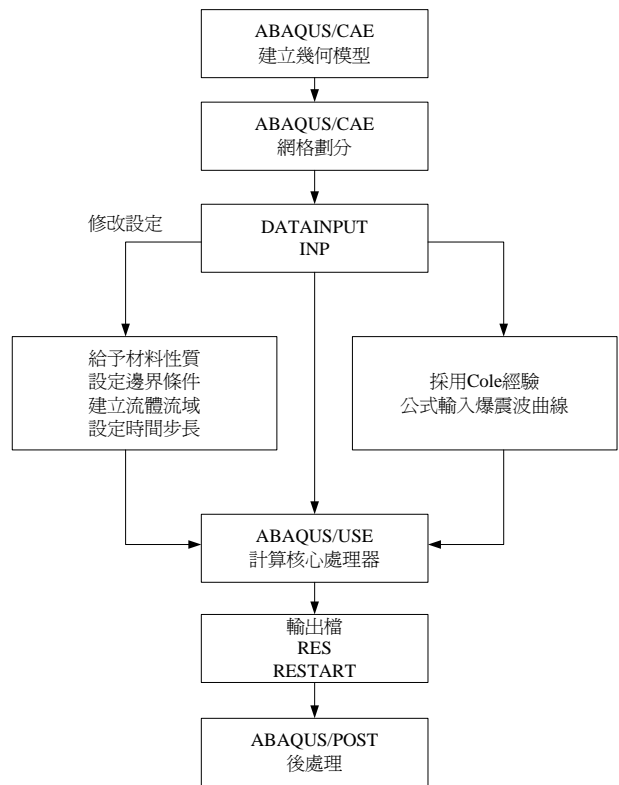


圖 6. ABAQUS/USA 分析流程圖

2. ABAQUS/USA 主程式處理器

ABAQUS/USA 運算時程式為根據軟體內部作計算，其 ABAQUS/USA 計算之流程，如圖 7 所示。

3. 有限元素種類

對於流固耦合研究採用 ABAQUS 之殼元素 (shell) 與固體元素 (solid)，下列將針對本文所採用之元素分別敘述。

標準水中爆震平台部份均採用八節點六面體之固體元素，其固體元素每個節點上有 ux、uy、uz 三個自由度，如圖 8。在一般情況下，在 ABAQUS/Standard 中可壓縮性並不重要，所以採用完全不可壓縮行為；在 ABAQUS/Explicit 中會自動假設為少量的可壓縮性。

在 ABAQUS 軟體中有兩種方法可供設定水流域：對於流體結構採用 DAA 描述法進行分析，此種方法乃採用流體性質積分技巧，將三維的流場性質降階至二維的結構濕表面上，故處理流固介面元素以四節點二次流固介面元素模擬，如圖 9，如此可大大減少電腦儲存空間與運算時間；另一方式為在 ABAQUS/CAE 中直接建立，並採用三維實體流固元素進行水流域之模擬，在 ABAQUS 軟體中三維實體元素具有六面體八節點與四面體節點可供選擇，但本方式必須由較

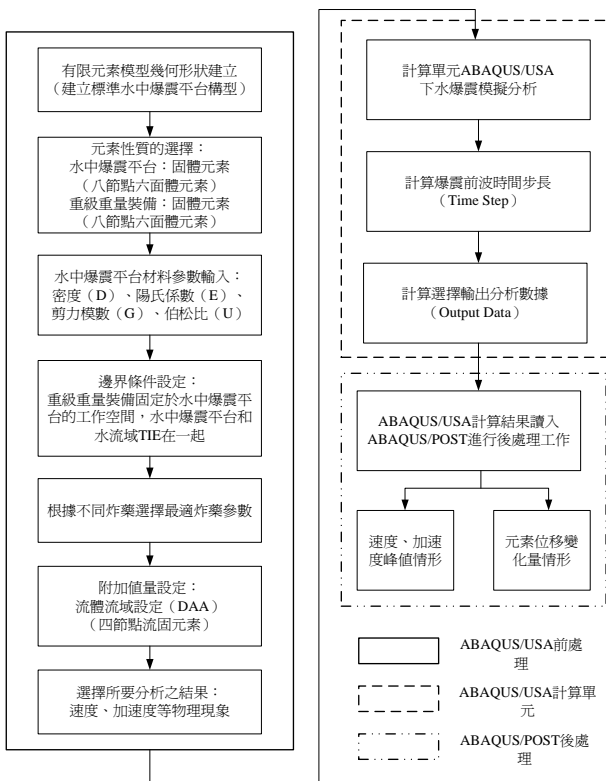


圖 7. ABAQUS/USA 計算流程圖

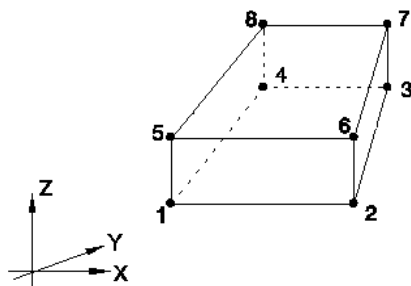


圖 8. 六面體八節點固體元素示意圖

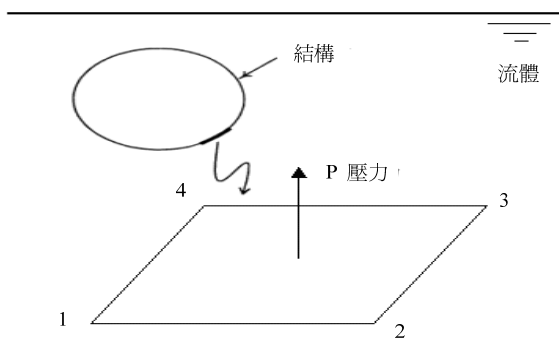


圖 9. 四節點之二次流固介面元素示意圖

高階之處理器與記憶體方可輕易進行運算，而本文乃大多採此方式以四面體四節點流固元素進行模型建構。

4. 邊界條件與網格分割

在分析中其流場邊界條件必須將水流域設定為非反射，首先定義水流域為具有阻抗之材料，並將水流域外表面設為無限域，亦即震波傳遞出去便無法反射回來。

本文在 ABAQUS 軟體中利用特殊之拘束條件 TIE，其運算方式是使用接觸表面主-從演算法，此方法中設定一個表面為主控表面，另一個為從屬表面，當兩物體發生接觸時，根據 (動力學或罰函數) 檢查是否發生穿透並施加接觸約束。簡易的主-從演算法 (不考慮約束增強方法) 僅阻止從屬節點對主控表面的穿透，除非在從屬表面上採取足夠精細的網格以避免來自主控節點的穿透，否則並不會檢查主控節點可能對從屬表面進行穿透如圖 10；另外平衡的主-從演算法是將簡易的方法運算兩次，並且第二次運算時將主從互換，由這兩次運算加權平均獲得一個修正值如圖 11，此功能的優點是介於固體與流體之間允許不對稱之網格以及表面阻抗不完整的耦合，故為一般處理流固耦合常用之方式。因此本文在金屬材料與水流域皆用此方法來做結合。

5. ABAQUS/USA 收斂準則

在非線性分析中，不像線性問題能透過單一方程計算求解，必須以增量的方式施加給定的外力求解，逐步地獲得最

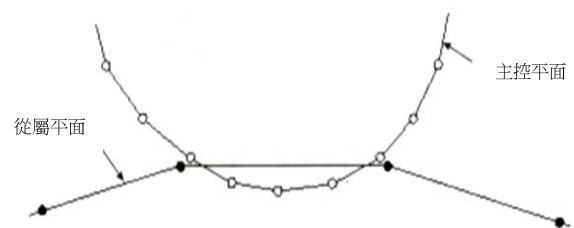


圖 10. 簡易主-從運算中主控節點對從屬表面穿透示意圖

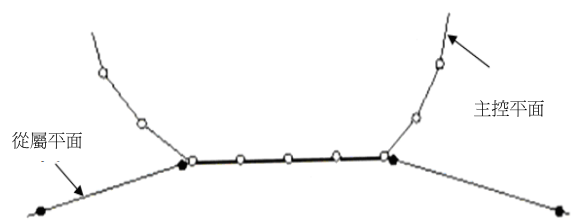


圖 11. 平衡主-從運算法示意圖

終的解答。因此必須將分析模擬劃分為一定數量的負載增量步 (load increment)，並在每個負載增量步結束時尋找近似的平衡構型，對於一個給定的負載增量步，通常需要採取若干次的疊代才能確定一個可接受的答案，而所有這些增量步反應的總和就是非線性分析的近似解答，在 ABAQUS/USA 之計算乃採用 Newton-Raphson 演算法獲得非線性問題的解答。

對於一個小的負荷增量 ΔP ，結構的非線性如圖 12 所示。其運用基於結構初始形狀 U_0 的結構初始勁度 K_0 ，和 ΔP 計算關於結構的位移修正值 (displacement correction) C_a 。利用 C_a 將下一個計算增量步的結構幾何形狀更新為 U_a 。也利用更新的結構幾何形狀計算內部作用力 I_a 。所施加的總負荷 P 和 I_a 之間的差可由下式表示：

$$R_a = P - I_a \quad (1)$$

其中 R_a 是對於疊代的殘留力 (force residual)。

若 R_a 在模型中的每個自由度上均為零，在圖 13 中的 a 點將位於負荷繞度曲線上，並且結構將處於平衡狀態。但在非線性問題分析中， R_a 幾乎不可能為零，因此系統將 R_a 與一個容許值進行比較。若 R_a 小於此殘留力容許值，則系統就接受結構的更新幾何形狀作為平衡結果。當系統同時滿足下列兩個條件，才能達到收斂的狀況。首先為系統預設容許值設置為在整個時間段上作用在結構上的平均力的 0.5%。其次為若 R_a 比目前的容許值小，認為 P 與 I_a 是處於平衡狀態，而 R_a 就是結構在所施加負荷下有效的平衡結構形狀。但在沒接受此結果之前，必須檢查位移修正值 C_a 是否相對小於總增量位移， $\Delta U_a = U_a - U_0$ 。若 C_a 大於增量位移的 1%，系統將會再進行一次疊代。

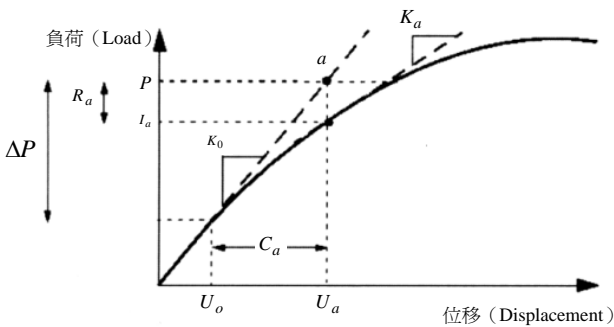


圖 12. 一個增量步之首次疊代圖

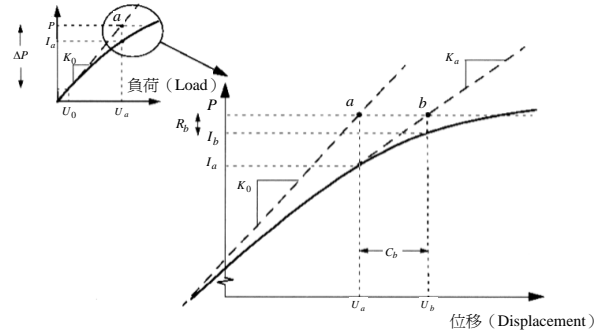


圖 13. 一個增量步之第二次疊代圖

對於非線性問題，每一個典型的增量步需要經過幾次疊代才能獲得滿足給定容許誤差的解答，這也就是說每次疊代等於進行一次完整的線性分析，因此在分析時間上比線性分析時間多出好幾倍。

6. 後處理

本文之後處理利用 ABAQUA/Post 軟體，其此處理步驟主要是用圖形顯示計算結果，再將變形或位移情況、各種物理變數之分佈情形、有關物理變數隨時間變化之歷程曲線以 Corel Draw 軟體將顯示之計算結果繪出。

(三) 水下爆炸效應之半理論半經驗公式

本文對於水下抗震負荷之計算，其爆震前波乃採用 Cole [8] 水下爆炸效應之經驗計算公式，首先計算出水下爆震波之峰值壓力 與時間衰減常數，進而代入下爆震波壓力時間歷程經驗公式以求得壓力時間歷程曲線 (圖 14)。其相關參數與公式如表 3 至表 5 所示。

四、實例驗證與分析

本文針對標準水中爆震平台進行重級裝備之抗震能力的研究，應用有限單元法 ABAQUS/USA 進行標準水中爆震

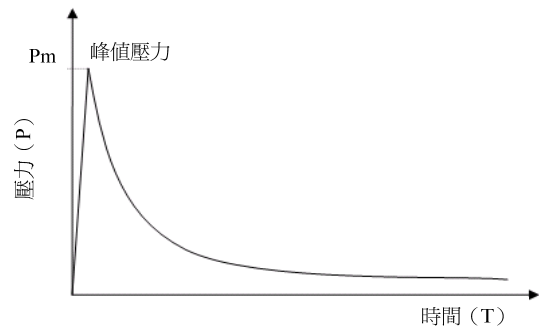


圖 14. 爆震前波之壓力時間歷程示意圖

表 3. 水下爆震波峰值壓力及時間衰減常數之經驗公式

相關文獻	水下爆震波 峰值壓力 P_m 經驗公式	相關參數
Cole [8]	$P_m = K_1 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_1}$ $\theta = K_2 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_2}$	P_m : 爆震波峰值壓力(MPa) θ : 時間衰減常數(msec) W : 炸藥重量(Kg) R : 量測點與炸點之間的距離(m) K_1 、 A_1 、 K_2 、 A_2 : 炸藥常數(如表 5)

表 4. 水下爆震波壓力時間歷程經驗公式

相關文獻	水下爆震波壓力時間 歷程經驗公式	相關參數
Cole [8]	$P(t) = P_m e^{-t/\theta}$	$P(t)$: 壓力 (MPa) P_m : 爆震波峰值壓力 (MPa) t : 時間 (msec) θ : 峰值壓力發生時間 (msec)

表 5. Cole 之爆炸參數表

炸藥 爆炸常數	TNT	HBX-1	PENT
K_1	52.12	53.51	56.21
A_1	1.144	1.180	1.194
K_2	0.0895	0.0920	0.0860
A_2	-0.247	-0.185	-0.257

註：炸藥重量單位：kg

平台之抗震模擬，爲了得到其正確性，採用美國 H.I.-TEST 實驗室與 Kwon 等人 [16] 於 2005 年所進行標準水中爆震平台受水下爆炸之實驗爲驗證例，針對爆震平台上不同重級裝備在垂向、橫向和艏艉向之速度，進行比較有限單元法 ABAQUS/USA 解與文獻解之差異。

(一) 問題描述

Kwon 等人 [16] 於 2005 年採用數值方法模擬爆震平台測試，測量標準水中爆震平台，在不同重級裝備、不同炸藥深度和不同爆炸點之垂向、橫向和艏艉向之爆震速度，並與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室結果進行比較，不同重級裝備置於水深 20 ft (約 6.096 m) 和 30 ft (約 9.144 m) 處，並承受距離 20 ft (約 6.096 m)、30 ft (約 9.144 m)、40 ft (約 12.192 m)、60 ft (約 18.288 m) 和 80 ft (約 24.384 m) 之斜向爆震波威力 (60 lb HBX-1 炸藥) 反應 [21]。美國海軍 H.I.-TEST 實驗室及 Know 之數值模擬研究，對於炸藥安放位置，並未完全依據軍規 MIL-STD-9010 之規定，本論文僅展現 20 ft 及 30 ft 之爆炸點位置之結果。此標準水中爆震平

台的邊界條件示意如圖 2 所示，其標準水中爆震平台規格如圖 3 所示，其相關材料性質與如表 6 所示。

(二) 標準水中爆震平台/重裝備/水流域之有限元素模型

本文以八節點六面體之固體元素模擬標準水中爆震平台，以四面體四節點流固元素 (AC3D4) 模擬水流域，經過多次的模擬測試，較適當之標準水中爆震平台有限元素模型之節點數爲 10122 個，元素數爲 10428 個；測試裝備重量 35800 lb 之有限元素模型之節點數爲 2437 個，元素數爲 2513 個；測試裝備重量 18400 lb 之有限元素模型之節點數爲 1573 個，元素數爲 1621 個；測試裝備重量 9000 lb 之有限元素模型之節點數爲 927 個，元素數爲 1013 個；水流域有限元素模型之節點數爲 11274 個，元素數爲 67142 個，有限元素模型如圖 15 所示。爆震負載乃採用 Cole [8] 之經驗公式求出壓力時間歷程，流體與標準水中爆震平台間使用 TIE 進行結合。

此外，本文處理水流域部份另採 DAA 之方法，將三維的流場性質降階至二維的結構濕表面上，進行相同承受爆震波場景之模擬，其流固介面以四節點二次流固介面元素模擬，流固介面元素爲 6741 個，分析時間與上述相同。分析總時間爲 0.1 秒。

(三) 結果比較與分析

根據 Kwon 等人 [16] 與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室所做出來的結果，進行以下之比較：(1) 35800 lb 重級裝備在不同炸藥深度下之垂向速度比較；(2) 在不同重級裝備、不同炸藥深度下之橫向速度；(3) 在不同重級裝備、不同炸藥深度下之艏艉向速度之比較。

表 6. 標準水中爆炸平台尺寸和 HY-80 材料性質 [21]

標準水中爆震平台	
長度	16 ft(4.8768 m)
寬度	28 ft(8.5344 m)
高度	11 ft(3.3528m)
HY-80 高強度鋼	
密度	0.283 lb/in ³ (7828 kg/m ³)
陽氏係數	2.88×10 ⁸ psi(2.07×10 ¹¹ Pa)
柏桑比	0.282
降伏應力	7.69×10 ⁵ psi(5.52×10 ⁸ Pa)

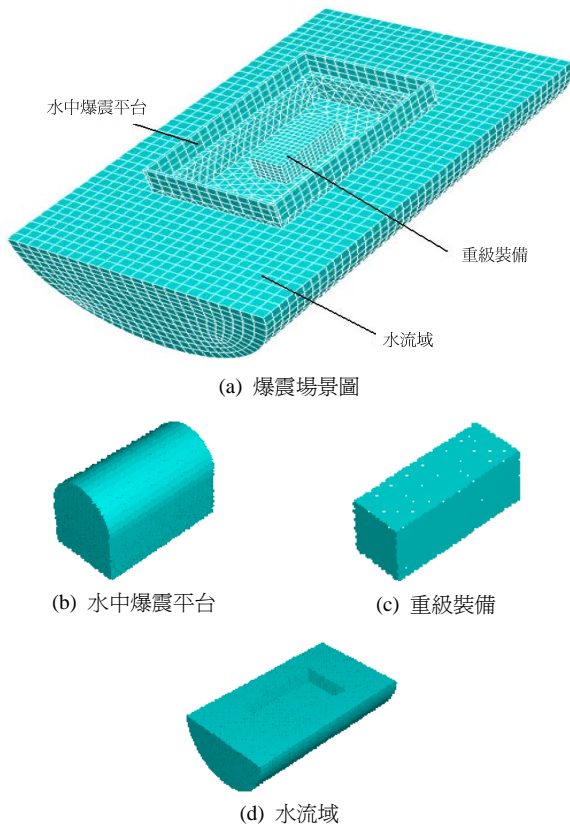


圖 15. 水中爆震場景之有限元素圖

1. 35800 lb 重級裝備在不同炸藥深度下之垂向速度比較

本文探討標準水中爆震平台承受斜向爆震波作用，分析總時間為 0.1 秒，求得標準水中爆震平台在不同炸藥深度下 20 ft (約 6.096 m) 和 30 ft (約 9.144 m) 之垂向速度時間歷程圖，與 LS-DYNA/USA 之數值解及美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值比較其結果如下：

由標準水中爆震平台在炸藥深度 20ft (約 6.096 m) 下的垂向速度時間歷程圖 (圖 16) 和表 7 中可知，ABAQUS

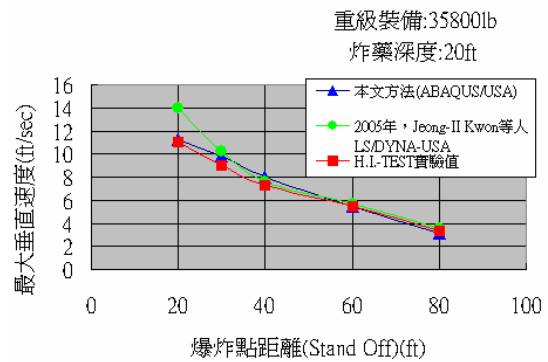


圖 16. 重級裝備 35800 lb 在炸藥深度 20 ft 下的垂向速度時間歷程圖

模擬值與 LS-DYNA/USA 模擬值垂向速度最大在爆炸點距離 (stand off) 20ft 處分別為 11.2 ft/sec 和 14 ft/sec，而實驗值則為 11 ft/sec，故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言，ABAQUS 模擬與 Kwon [16] 所模擬之垂向速度較實驗值來得高，另外模擬值與實驗值當爆炸點距離 達到 80ft 後美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值與 ABAQUS 之垂向速度趨於平緩，但 ABAQUS 與文獻 LS-DYNA/USA 則有較高之垂向速度。文獻中所採用 LS-DYNA/USA 之模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值垂向速度最大為 14 ft/sec 和 11 ft/sec，其實驗誤差約為 27.2%，而本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 11.2 ft/sec 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值誤差約為 1.8%，本文所採用 ABAQUS 較 LS-DYNA/USA 之模擬值和實驗值之比較較為接近。

由標準水中爆震平台在炸藥深度 30ft (約 9.144 m) 下的垂向速度時間歷程圖 (圖 17) 可知，ABAQUS 模擬值與 LS-DYNA/USA 模擬值垂向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處

表 7. 重級裝備：35800 lb 在炸藥深度 20 ft 下不同爆炸點位置之最大垂向速度比較

方法	本文方法 ABAQUS/USA (ft/sec)	Jeong-II Kwon LS/DYNA [16] (ft/sec)	美國 H.I.-TEST 實驗室 [16]	本文方法與 H.I.-TEST 之 誤差值 (%)	Kwon LS/DYNA 與 H.I.-TEST 之 誤差值 (%)
爆炸點距離					
20 ft	11.2	14.0	11.0	1.8	27.3
30 ft	9.8	10.2	9.0	8.9	13.3
40 ft	9.0	7.6	7.3	9.6	4.0
60 ft	5.5	5.7	5.5	0.0	3.6
80 ft	3.1	3.5	3.3	6.6	6.0

註：誤差值 = $\frac{[(\text{本文方法解}) \text{或} (\text{kwon解})] - (\text{美國 H.I. TEST 實驗室解})}{\text{美國 H.I. TEST 實驗室解}}$

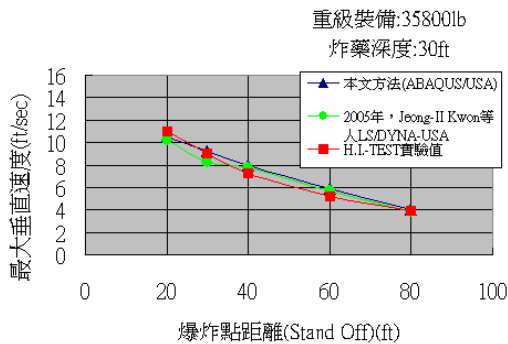


圖 17. 重級裝備 35800 lb 在炸藥深度 30 ft 下的垂向速度時間歷程圖

分別為 10.5 ft/sec 和 10.2 ft/sec，而實驗值則為 11 ft/sec，故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言，ABAQUS 模擬與 Kwon [16] 所模擬之垂向速度較實驗值來得低，另外模擬值與實驗值當爆炸點距離達到 80 ft 後美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值與 ABAQUS 之垂向速度趨於平緩，但 ABAQUS 與文獻 LS-DYNA/USA 則有較低之垂向速度。文獻中所採用 LS-DYNA/USA 之模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值垂向速度最大為 10.2 ft/sec 和 11 ft/sec，其實驗誤差約為 7.3%，而本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 10.5 ft/sec 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值誤差約為 4.5%，本文所採用 ABAQUS 較 LS-DYNA/USA 之模擬值和實驗值之比較較為接近。

2. 不同重級裝備、不同炸藥深度下之橫向速度的比較

本文探討標準水中爆震平台承受斜向爆震波作用，分析總時間為 0.1 秒，求得標準水中爆震平台安裝不同測試重量在不同炸藥深度下 20 ft (約 6.096 m) 和 30 ft (約 9.144 m) 之橫向速度時間歷程圖，與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值比較其結果如圖 18 至圖 23 所示。

由標準水中爆震平台上安裝測試重量 9000 lb 在炸藥深度 20 ft (約 6.096 m) 下的橫向速度時間歷程圖 (圖 18) 和表 8 中可知，ABAQUS 模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值橫向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處分別為 7.7 ft/sec 和 6.5 ft/sec，故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言來的高，另外模擬值與實驗值當爆炸點距離達到 80 ft 後美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值與 ABAQUS 之垂向速度趨於平緩，但 ABAQUS 則有較高之橫向速度。本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 7.7 ft 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值 6.5 ft/sec 誤差約為 18.5%。

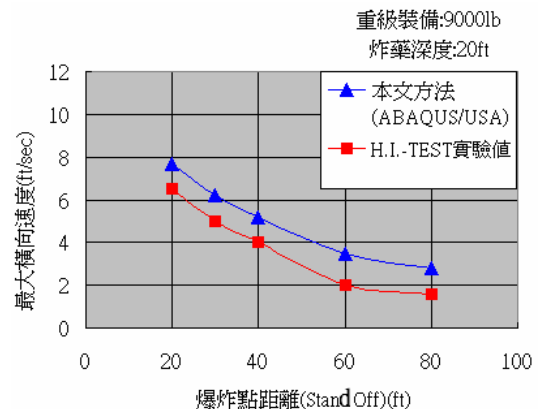


圖 18. 重級裝備 9000 lb 在炸藥深度 20 ft 下的橫向速度時間歷程圖

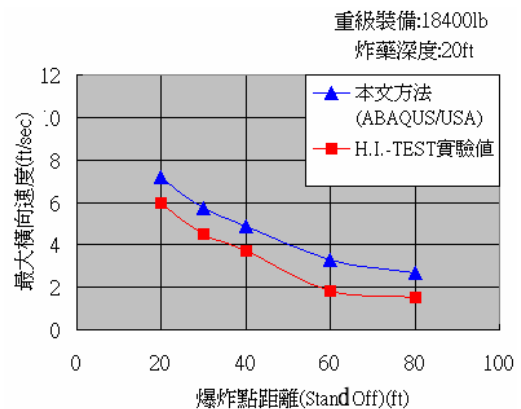


圖 19. 重級裝備 18400 lb 在炸藥深度 20 ft 下的橫向速度時間歷程圖

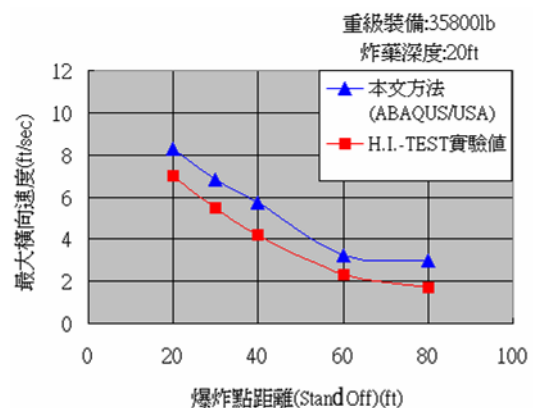


圖 20. 重級裝備 35800 lb 在炸藥深度 20 ft 下的橫向速度時間歷程圖

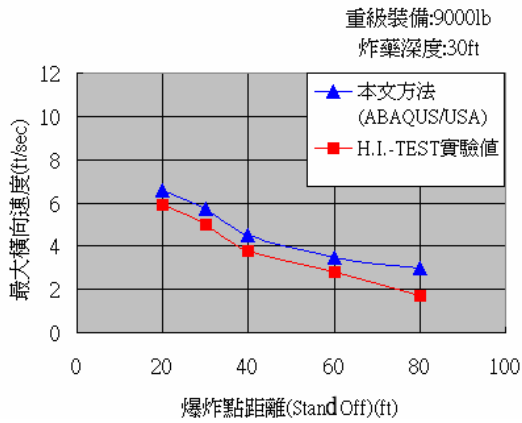


圖 21. 重級裝備 9000 lb 在炸藥深度 30 ft 下的橫向速度時間歷程圖

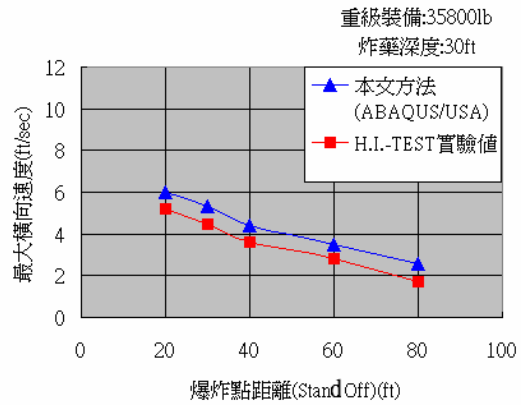


圖 23. 重級裝備 35800 lb 在炸藥深度 30 ft 下的橫向速度時間歷程圖

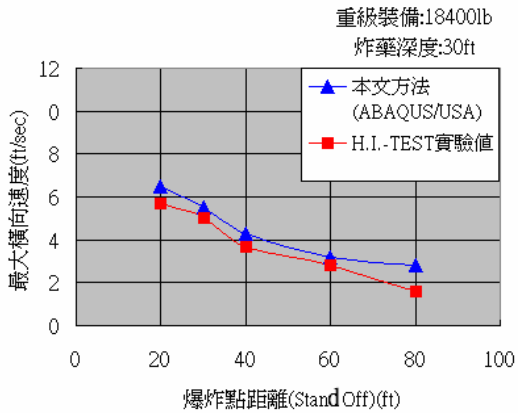


圖 22. 重級裝備 18400 lb 在炸藥深度 30 ft 下的橫向速度時間歷程圖

由標準水中爆震平台上安裝測試重量 18400 lb 在炸藥深度 20 ft (約 6.096 m) 下的橫向速度時間歷程圖 (圖 19) 和表 8 中可知, ABAQUS 模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值橫向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處分別為 7.2 ft/sec 和 6 ft/sec, 故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言來的高, 另外模擬值與實驗值當爆炸點距離達到 80 ft 後美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值與 ABAQUS 之垂向速度趨於平緩, 但 ABAQUS 則有較高之橫向速度。本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 7.2 ft 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值 6 ft 誤差約為 20.0%。

由標準水中爆震平台上安裝測試重量 35800 lb 在炸藥深度 20 ft (約 6.096 m) 下的橫向速度時間歷程圖 (圖 20) 和表 8 中可知, ABAQUS 模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值橫向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處分別為 8.3 ft/sec 和 7 ft/sec, 故標準水中爆震平台承受爆震波相較於

表 8. 不同重級裝備、不同炸藥深度下之最大橫向速度比較

不同炸藥深度之方向	裝備重量 (lb)	本文方法 ABAQUS/USA (ft/sec)	美國 H.I.-TEST 實驗值 [16] (ft/sec)	本文方法與 H.I.-TEST 之誤差值 (%)
炸藥深度 20 ft 之橫向速度	9000	7.7	6.6	18.5
	18400	7.2	6.0	20.0
	35800	8.3	7.0	18.6
炸藥深度 30 ft 之橫向速度	9000	6.6	5.9	11.9
	18400	6.5	5.7	14.0
	35800	6.0	5.2	15.4

註：誤差值 = $\frac{[(\text{本文方法解}) \text{或} (\text{kwon解})] - (\text{美國 H.I. TEST 實驗室解})}{\text{美國 H.I. TEST 實驗室解}}$

實驗值而言來的高，另外模擬值與實驗值當爆炸點距離達到 80 ft 後美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值與 ABAQUS 之垂向速度趨於平緩，但 ABAQUS 則有較高之橫向速度。本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 8.3 ft/sec 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值 7 ft 誤差約為 18.6%。

由標準水中爆震平台上安裝測試重量 9000 lb 在炸藥深度 30 ft (約 9.144 m) 下的橫向速度時間歷程圖 (圖 21) 和表 8 中可知，ABAQUS 模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值橫向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處分別為 6.6 ft/sec 和 5.9 ft/sec，故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言來的高，另外模擬值與實驗值當爆炸點距離達到 80 ft 後美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值與 ABAQUS 之垂向速度趨於平緩，但 ABAQUS 則有較高之橫向速度。本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 6.6 ft 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值 5.9 ft/sec 誤差約為 11.9%。

由標準水中爆震平台上安裝測試重量 18400 lb 在炸藥深度 30 ft (約 9.144 m) 下的橫向速度時間歷程圖 (圖 22) 和表 8 中可知，ABAQUS 模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值橫向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處分別為 6.5 ft/sec 和 5.7 ft/sec，故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言來的高，另外模擬值與實驗值當爆炸點距離達到 80 ft 後美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值與 ABAQUS 之垂向速度趨於平緩，但 ABAQUS 則有較高之橫向速度。本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 6.5 ft 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值 5.7 ft/sec 誤差約為 14.0%。

由標準水中爆震平台上安裝測試重量 35800 lb 在炸藥深度 30 ft (約 9.144 m) 下的橫向速度時間歷程圖 (圖 23) 和表 8 中可知，ABAQUS 模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值橫向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處分別為 6 ft/sec 和 5.2 ft/sec，故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言來的高，另外模擬值與實驗值當爆炸點距離達到 80 ft 後美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值與 ABAQUS 之垂向速度趨於平緩，但 ABAQUS 則有較高之橫向速度。本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 6 ft 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值 5.2 ft/sec 誤差約為 15.4%。

3. 不同重級裝備、不同炸藥深度下之船艦向速度的比較

本文探討標準水中爆震平台承受斜向爆震波作用，分析總時間為 0.1 秒，求得標準水中爆震平台安裝不同測試重量在不同炸藥深度下 20 ft (約 6.096 m) 和 30 ft (約 9.144 m)

之船艦向速度時間歷程圖，與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值比較其結果如圖 24 至圖 29 所示。

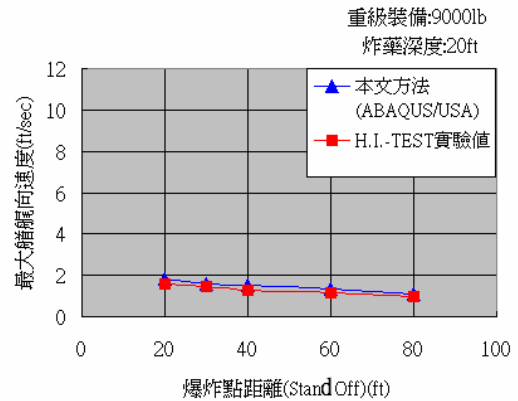


圖 24. 重級裝備 9000 lb 在炸藥深度 20 ft 下的船艦向速度時間歷程圖

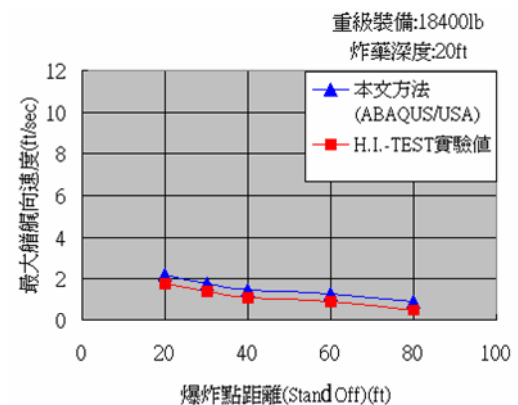


圖 25. 重級裝備 18400 lb 在炸藥深度 20 ft 下的船艦向速度時間歷程圖

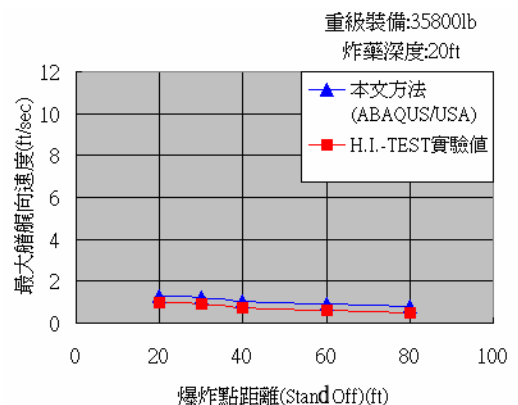


圖 26. 重級裝備 35800 lb 在炸藥深度 20 ft 下的船艦向速度時間歷程圖

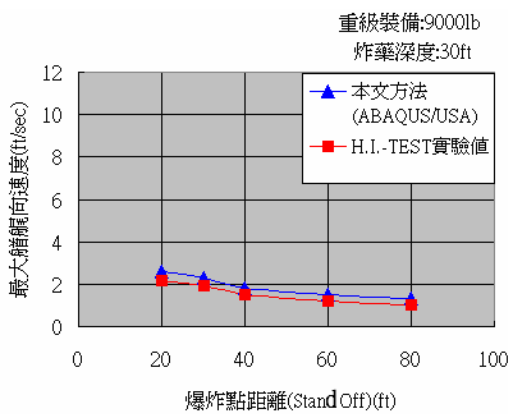


圖 27. 重級裝備 9000 lb 在炸藥深度 30 ft 下的船艙向速度時間歷程圖

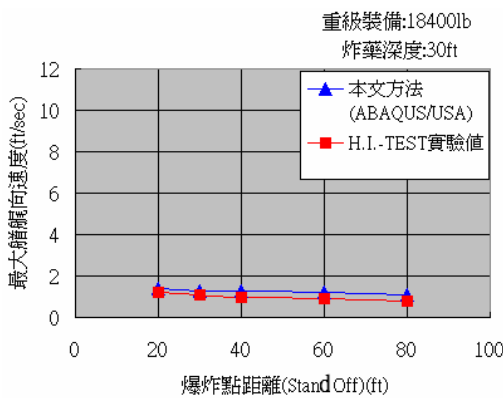


圖 28. 重級裝備 18400 lb 在炸藥深度 30 ft 下的船艙向速度時間歷程圖

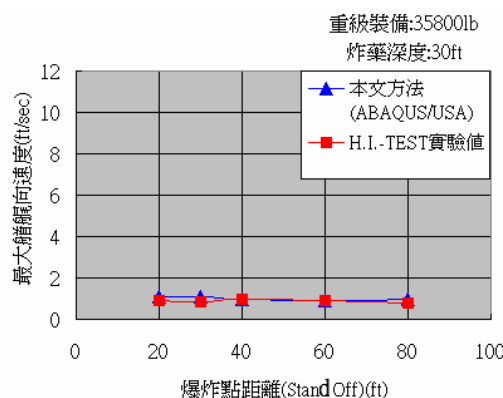


圖 29. 重級裝備 35800 lb 在炸藥深度 30 ft 下的船艙向速度

由標準水中爆震平台上安裝測試重量 9000 lb 在炸藥深度 20 ft (約 6.096 m) 下的船艙向速度時間歷程圖 (圖 24) 和表 9 中可知, ABAQUS 模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實

驗室之測試值船艙向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處分別為 2.6 ft/sec 和 2.2 ft/sec, 故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言來的高, 另外模擬值與實驗值當之船艙向速度在不同爆炸點距離下趨勢平緩, 但 ABAQUS 則有較高之船艙向速度。本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 2.6 ft 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值 2.2 ft/sec 誤差約為 18.2%。

由標準水中爆震平台上安裝測試重量 18400 lb 在炸藥深度 20 ft (約 6.096 m) 下的船艙向速度時間歷程圖 (圖 25) 和表 9 中可知, ABAQUS 模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值船艙向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處分別為 2.2 ft/sec 和 1.8 ft/sec, 故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言來的高, 另外模擬值與實驗值當之船艙向速度在不同爆炸點距離下趨勢平緩, 但 ABAQUS 則有較高之船艙向速度。本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 2.2 ft 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值 1.8 ft/sec 誤差約為 22.2%。

由標準水中爆震平台上安裝測試重量 35800 lb 在炸藥深度 20 ft (約 6.096 m) 下的船艙向速度時間歷程圖 (圖 26) 和表 9 中可知, ABAQUS 模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值船艙向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處分別為 1.3 ft/sec 和 1 ft/sec, 故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言來的高, 另外模擬值與實驗值當之船艙向速度在不同爆炸點距離下趨勢更為平緩, 但 ABAQUS 則有較高之船艙向速度。本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 1.3 ft 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值 1 ft/sec 誤差約為 30.0%。

由標準水中爆震平台上安裝測試重量 9000 lb 在炸藥深度 30 ft (約 9.144 m) 下的船艙向速度時間歷程圖 (圖 27) 和表 9 中可知, ABAQUS 模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值船艙向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處分別為 1.8 ft/sec 和 1.6 ft/sec, 故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言來的高, 另外模擬值與實驗值當之船艙向速度在不同爆炸點距離下趨勢平緩, 但 ABAQUS 則有較高之船艙向速度。本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 1.8 ft 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值 1.6 ft/sec 誤差約為 12.5%。

由標準水中爆震平台上安裝測試重量 18400 lb 在炸藥深度 30 ft (約 9.144 m) 下的船艙向速度時間歷程圖 (圖 28)

表 9. 不同重級裝備、不同炸藥深度下之最大艏艉向速度比較

不同炸藥深度之方向	裝備重量 (lb)	本文方法 ABAQUS/USA (ft/sec)	美國 H.I.-TEST 實驗值 [16] (ft/sec)	本文方法與 H.I.-TEST 之誤差值 (%)
炸藥深度 20 ft 之 艏艉向速度	9000	2.6	2.2	18.2
	18400	2.2	1.8	22.2
	35800	1.3	1.0	30.0
炸藥深度 30 ft 之 艏艉向速度	9000	1.8	1.6	12.5
	18400	1.4	1.2	16.7
	35800	1.1	0.9	22.2

註：誤差值 = $\frac{[(\text{本文方法解}) \text{或} (\text{Kwon解})] - (\text{美國 H.I.-TEST 實驗室解})}{\text{美國 H.I.-TEST 實驗室解}}$

和表 9 中可知，ABAQUS 模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值艏艉向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處分別為 1.4 ft/sec 和 1.2 ft/sec，故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言來的高，另外模擬值與實驗值當之艏艉向速度在不同爆炸點距離下趨勢更為平緩，但 ABAQUS 則有較高之艏艉向速度。本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 1.4 ft 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值 1.2 ft/sec 誤差約為 16.7%。

由標準水中爆震平台上安裝測試重量 35800 lb 在炸藥深度 30 ft (約 9.144 m) 下的艏艉向速度時間歷程圖 (圖 29) 和表 9 中可知，ABAQUS 模擬值與美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值艏艉向速度最大在爆炸點距離 20 ft 處分別為 1.1 ft/sec 和 0.9 ft/sec，故標準水中爆震平台承受爆震波相較於實驗值而言來的高，另外模擬值與實驗值當之艏艉向速度在不同爆炸點距離下趨勢更為平緩，但 ABAQUS 則有較高之艏艉向速度。本文所採用 ABAQUS 之垂向速度最大為 1.1ft 和美國海軍 H.I.-TEST 實驗室之測試值 0.9 ft/sec 誤差約為 22.2%。

本文 ABAQUS/USA 的模擬值與美國 H.I.-TEST 實驗室之相關實驗和 Kwon 等人之比較，垂向速度誤差值約在 10% 左右，橫向速度誤差值約在 15-20% 左右，艏艉向誤差值約在 15-30% 左右，由於水下爆震屬於一高度非線性、瞬間動態之流固耦合問題，前述之誤差在工程應用上應為可接受範圍，顯示本文 ABAQUS/USA 進行裝備抗震之可行性。

五、結論與未來展望

本文應用 ABAQUS/USA 建構 MIL-STD-901D 標準水中爆震平台，進行重裝備抗震能力研究，重要之結論如下：

(一) 水中爆震平台之結論

1. 本文應用非線性 ABAQUS/USA 軟體中之八節點六面體固體元素建構 MIL-STD-901D 軍規標準水中爆震平台結構，另採用三維四面體流固元素建構水域環境，平台結構與水域間之介面採用拘束條件 TIE 方式處理，以及邊界條件與網格分割之尺寸及數值計算之收斂規則，經過驗證已建構一個可用之數值模擬平台，可供未來艦用重裝備 (重量在 6000 lbs-40000 lbs 之間) 抗震能力評估或抗震設計使用。
2. 本文應用 ABAQUS/USA 模擬標準水中爆震平台上之重級裝備抗爆震測試程序之數值模擬結果與美國 H.I.-TEST 實驗室之實驗值和 Kwon 等人 [16] 之 LS-DYNA/USA 的數值模擬值比較，誤差值均約在 10% 左右，顯示 ABAQUS/USA 具有抗爆震分析之能力。
3. 由於斜向爆炸依爆炸點之位置與方位，本文所研究之實例，在垂向分量最大，橫向分量次之，而艏艉向最小，由研究結果得知重級裝備在垂向和橫向方面會有比較大的速度而艏艉向速度值較小，此種關係可為抗震設計之參考。

(二) 未來仍值得進一步深入探討之問題

1. 未來依照 MIL-STD-901D 軍規建構大型水中爆震數值模擬平台及相關爆震水域環境以供大於 40000 lbs 之艦用重裝備抗震能力評估及抗震設計之用。
2. 因艦艇裝備甚多，尤其是 GRADE A 的裝備均必須進行模擬探討通過爆震測試，應用 ABAQUS/USA 模擬爆震平台應可達到避免耗時、耗費人力和經費的問題。
3. 可朝艦用重裝備安置不同的抗震墊進行探討選用最適當之抗震墊，以獲得最佳之抗震能力。
4. 本文中艦用重裝備簡化成一個質量塊，抗震模擬結果雖

可獲得可接受之解，但未來如電腦記憶容量增大、運算功能增強，可建構艦用重裝備之有限單元模型，以更符合實際之狀況。

參考文獻

1. 江國和、沈榮瀛、華宏星、吳慶明 (民 95)，船舶機械設備衝擊隔離技術研究進展，船舶力學學刊，10(1)，135-144。
2. 胡秀英 (民 96)，艦船電子設備高強度衝擊試驗和抗衝擊設計探討，裝備環境工程，4(5)，40-43。
3. 徐敏 (民 70)，船舶動力機械的振動、衝擊與測量，國防工業出版社，北京。
4. 唐德高、盧紅標、張華、嚴東晉 (民 93)，PGG 隔震器性能試驗與分析，振動與衝擊學刊，23(5)，52-54。
5. 鍾慶富 (民 79)，FFG-7 級艦爆震設計與測試之研究，海軍學術月刊，24(10)，80-89。
6. ABAQUS User's Manual (2007).
7. Charles, E. C. (1959) *Vibration and Shock Isolation*, 4th Ed., 314-320. John Wiley & Sons, New York, NY.
8. Cole, R. H. (1948) *Underwater Explosions*, Princeton University Press, Princeton.
9. Crede, C. E. (1959) *Vibration and Shock Isolation*, 4th Ed., John Wiley & Sons, New York, NY.
10. Dave, S. S. (1973) *Vibration Analysis for Electronic Equipment*, 15-18. John Wiley & Sons, New York, NY.
11. Georges, L. C. (2006) *Non-Explosive Environmentally Friendly Multi-Bubble Ship Shock Testing System*, NAVSEA N03-051, Dynaflo, Jessap, MD20794.
12. Harris, C. M. and E. C. Charles (1988) *Shock and Vibration Handbook*, 4th Ed., 34-36. McGraw-Hill, New York, NY.
13. Juanito, D. R. and S. Murphy (2004) Environmental engineering grade a shock tests. *IEEE*, 632-638.
14. Keil, A. H. (1961) The response of ships to underwater explosion. The annual meeting of the society of naval architects and marine engineering, New York, NY.
15. Kwon, J., S. G. Lee and J. H. Chung (2005) Shock response analysis of MIL-S-901D floating shock platform. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(5), 493-498.
16. Kwon, J., S. G. Lee and J. H. Chung (2005) Numerical simulation of MIL-S-901D heavy weight shock test of a double resiliently mounted main engine module. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(5), 499-505.
17. Lekuch, H. (2006) High deflection elastomeric mounts for tests on 8 Hz floating shock platform (part1). *ERI News*, 25.
18. Lekuch, H. (2007) Cable isolators for tests on the floating shock platform (part2). *ERI News*, 26.
19. Maltby, J. D. (2006) Floating platform shock simulation system. U.S. Patent 7051588B1, San Diego, CA.
20. Matt, C. (2001) *Under Water Explosive Shock Testing (UNDEX) of a Subsea Mated Electrical Connector, the CM2000*, SEACON ADVANCED PRODUCTS, Bellville, Texas.
21. Military Specification: Shock Tests High Impact Shipboard Machinery, Equipment, and Systems, Requirement (1989), MIL-S-901D (NAVY).
22. Wayne, T. (2008) The same isolator – Is it capable of providing both shock and vibration protection? *ERI News*, 27.

收件：97.08.27 修正：97.10.20 接受：97.12.10