

壓力殼於水域中之自然振動頻率探討

羅光閔, 陳仕宸, 許益銓

國立高雄海洋科技大學 造船及海洋工程系

摘要

本研究考慮壓力殼結構在不同水壓作用下之自然振動頻率，並使用水域模型模擬水域附加質量對壓力殼自然振動頻率的影響。研究結果顯示，不同水壓作用下，幾乎不影響壓力殼結構的自然振動頻率，因此未來在考慮壓力殼振動特性時可忽略水壓的影響；但是水域所產生的附加質量卻對壓力殼的自然振動特性影響很大，本研究使用水域模型進行數值模擬，並與文獻比對驗證分析之正確性，最終確定壓力殼在水中振動時之頻率與空氣中相比，約會減少40~50%。

關鍵字：壓力殼、自然振動頻率、附加質量

ABSTRACT

In this study, we discussed the natural vibration frequency of pressure hull subjected to various water pressures. Besides, the influence of the water added mass was considered and simulated using the water model. The research results show that natural frequency of pressure hull almost the same when it subjected to different pressures. So the influence of water pressure can be ignored when discuss the vibration characteristics of pressure hull in the future. But the added mass produced by the water has a great influence on the vibration characteristics of pressure hull. In this study, we used water model to simulate and compared with the literatures to verify the correctness. Finally, we determined that the vibration frequency in water will be 40~50% lower than air.

Keywords: pressure hull, natural vibration frequency, added mass

一、緒論

壓力殼為潛艦主要的結構，而壓力殼的振動會影響潛艦的匿蹤性，因此潛艦結構設計時，需考慮壓力殼的振動頻率，做為主機選擇以及隔振設計之參考。

考慮到水域與水深壓力的影響，本研究使用 ABAQUS 線性攝動的分析技巧，給定不同水深壓力當做自然振動時之初始條件，藉此模擬不同水深對壓力殼自然振動頻率的影響，並證實壓力殼的自然振動與水深壓力無關。此外，在確認振動頻率與水深壓力無關的情況下，利用建立水域的方式，模擬壓力殼在水域中的自然振動情形，評估水域附加質量對壓力殼自然振動頻率的影響。

二、文獻回顧

近年來，有一些研究針對壓力殼結構的自由振動進行探討，其中 Kim[1]針對圓筒殼結構進行主動振動控制分析及實驗評估，其研究結果顯示圓筒殼於空氣與水中間之

頻率有所差異。Hopmann[2]用簡單的支撐端點，透過解析解與實驗去瞭解加勁圓筒殼的自由振動問題。Shariati 等人[3]則是研究不同加肋之圓筒殼於不同環境下的振動情形，並使用有限元素法及 ANSYS 軟體進行圓筒殼的結構振動分析，建立潛艦結構的分析方法。Ma 等人[4]研究錐殼的自由振動和強迫振動比較分析。

除了 Kim[1]以及 Shariati [3]的研究外，其他相關研究並沒有將水域及水壓的影響納入考慮，因此所評估之自然振動頻率均忽略了水域附加質量以及水壓對壓力殼軸向剛性的影響。本研究主要利用 ABAQUS 線性攝動以及水域模型的分析方法，探討壓力殼結構在水中的自然振動情況，並評估水壓以及附加質量對壓力殼自然振動的影響。

三、數值模擬方法

當求解水壓作用下之壓力殼自然振動時，無法將水壓負荷與自然振動同時求解，

因此本研究使用線性攝動的方式模擬不同壓力對壓力殼自然振動的影響。線性攝動為多子步分析技巧，可以將前一個子步受力後的結構響應當做下一個分析步的初始條件，此一分析方法相當適合模擬水壓作用下之壓力殼結構的自然振動。

此外，壓力殼在水中振動時，水的附加質量會影響壓力殼振動的動能，進而降低自然振動頻率。不同形狀之物體在水中運動所產生的附加質量不同，一般討論自然振動受水域附加質量影響時，常使用水動力方式計算物體的附加質量係數。本研究再不探究附加質量係數的情況下，直接使用 ABAQUS 在分析的壓力殼模型外建立水域，並給定水域參數，利用數值模擬的方式直接評估水域對自然振動的影響。本研究建立之水域模型如圖 1 所示。綜合以上說明，本研究數值模擬流程詳如圖 2 所示。

四、水壓對壓力殼振動的影響

結構的振動與結構的質量與剛性有關，一般結構受外力作用變形時，質量與剛性矩陣可以表示為：

$$m^* = \text{general mass} = \int m(x)\phi'^2(x)dx$$

$$k^* = \text{general stiffness} = \int k\phi'^2(x)dx + \int N(x)\phi'^2(x)dx$$

而自然振動頻率可以表示為：

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k^*}{m^*}}$$

其中受壓下所產生的軸向力 $N(x)$ 會改變壓力殼結構的剛性，進而影響壓力殼的自然振動頻率。理論上，不同壓力負荷下， $N(x)$ 會不同，所以在不同水壓力作用下，壓力殼的自然振動頻率應該有所不同才是。

根據 Shariati [3] 的研究，結構在水中與空氣中的自然振動頻率不會相同，但是水深並不太會影響結構的自然振動頻率，特別是低模態時，自然振動頻率幾乎相同，只有在高模態時，較大的水壓會使些微影響振動頻率，Shariati 的研究曲線如圖 3 所示。

本研究建立一壓力殼局部模型進行數值模擬，並使用線性攝動的分析方法探討壓力殼在不同水壓作用下的自然振動頻率狀況，並與 Shariati 的結論比較。負荷部分，除了無負荷下的自然振動外，另考慮壓力殼承受 100m、200m 以及 300m 水壓作用下之

自然振動狀況。

不同負荷下之頻率計算結果如表 1 所示。本研究取前 5 個模態進行比較，根據模擬結果顯示，外力作用下並不會改變結構的振動模態，模態計算結果如圖 4~圖 7 所示。此外，根據表 1 所計算之頻率，所有模態在 100m、200m 以及 300m 水壓作用下，自然振動頻率均相同。此研究結果顯示壓力殼受壓時，軸向變形造成的剛性變化相較於壓力殼本身的剛性而言相當小，因此未來在考慮壓力殼自由振動頻率時，可以忽略水深的影響。

五、水域對壓力殼振動之影響

證實水壓對壓力殼自然振動沒有影響後，接下來使用水域模型探討水域附加質量對壓力殼結構自然振動的影響。

結構在水域中振動時，需要推動水域產生的附加質量，因此自然振動頻率會降低，結構在空氣中振動，動能可以表示為：

$$T_{Air} = \frac{1}{2}m(\delta \cdot \omega_n)^2 \times C$$

其中 δ 為振幅、 C 為模態相關參數。

反觀結構在水中振動，因為需考慮附加質量的影響，因此動能表示為：

$$T_{Water} = \frac{1}{2}(m + m_f) \cdot (\delta_f \cdot \omega_f)^2 \times C = T + T_f$$

其中 T 結構於水中振動的動能、 T_f 為被推動流體的動能。將上兩式相除，即可獲得結構在水域中自然振動頻率 ω_f 與空氣中自然振動頻率 ω_n 的差異，即：

$$\omega_f = \frac{\omega_n}{\sqrt{1 + \frac{m_f}{m}}}$$

其中 m_f/m 稱為附加質量係數 C_m 。

一般圓筒殼在水中運動的附加質量係數 C_m 為 1，若結構不是簡單幾何，則需要另行計算。例如，根據 Dong 的研究[5]，若是長寬比在 5 倍以上的潛艦外型在水中運動時，一般可以將 m_f 表示為：

$$m_f = 0.818 \times \pi \rho b^2 \times 2a$$

其中 $2a$ 為艇長， $2b$ 為艇寬。

本研究藉由水域的建立，利用分析軟體自行計算出壓力殼振動時需推動的流體質量，進而評估水域附加質量對壓力殼自然振動頻率的影響。此外本研究建立的水域分析方法將先與 Kim[1] 的研究進行驗證，以確

保分析方法之可靠性

Kim 使用實驗與模擬的方式探討結構在水中與空氣中的振動頻率，本研究使用 ABAQUS 建立與 Kim 相同的數值模型，並進行數值模擬，模擬結果比較如表 2 所示。

根據表 2 的結果，本研究使用 ABAQUS 進行模擬的結果與 Kim 的實驗量測結果相近，前三個模態在水域中的自然振動模擬結果均與實驗相差 5% 以內，顯示本研究使用 ABAQUS 進行分析具有一定的可靠性。

驗證數值模擬方法的正確性後，本研究接著利用圖 1 的水域模型進行數值模擬，水的密度假設為 1000kg/m³，水中聲速則假設為 1500m/s。計算結果如表 3 所示。根據表 3 的結果，本研究所探討之壓力殼結構在空氣中與水中的自然振動頻率有明顯的差異，第一模態的水中自然振動頻率約比空氣中低 51%。此研究結果顯示水域的附加質量對壓力殼的振動有相當明顯的影響。

圖 8 為水域中的自然振動模態，根據模態計算結果，考慮附加質量後，壓力殼的振動模態有些許變化，與空氣中的振動相比，第一模態與第二模態互換。

六、結論與未來展望

本研究成功使用 ABAQUS 的線性攝動技巧模擬壓力殼在不同水壓下的自然動頻率，並證實水壓對自然振動頻率的影響不大。此外，在忽略水壓影響下，本研究直接使用水域模型模擬水附加質量對壓力殼自然振動頻率的影響。

研究結果證實，研究所用的壓力殼在水域中的自然振動頻率比在空氣中低了 51%，此降低比例與相關文獻之研究結果接近，因此未來在探討壓力殼結構的自然振動特性時，可使用本研究模擬之方式進行探討。

七、參考文獻

[1]H. S. Kim, J. W. Sohn, J. Jeon, S. B. Choi. "Reduction of the Radiating Sound of a Submerged Finite Cylindrical Shell Structure by Active Vibration Control," ISSN 1424-8220, 13, 2131-2147, 2013.
 [2]B. A. J. Mustafa, R. Ali. "An energy method for free vibration analysis of stiffened circular cylindrical shells". Computer & Structures, 32, 2, 335-363, 1989.
 [3]S. K. Shariati, S. M. Mogadas. "Vibration

analysis of submerged submarine pressure hull". THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2011.

[4]X. L. Ma, G. Jin, Y. Xiong, Z. G. Liu. "Free and forced vibration analysis of coupled conical cylindrical shells with arbitrary boundary conditions". International Journal of Mechanical Sciences, 2014.
 [5]R. G. Dong. "Effective mass and damping of submerged structures," UCRL-52342, 1978.

八、表格

表 1 壓力殼在不同負荷下之自然振動頻率

mode	100m	200m	300m
1	24.3	24.3	24.3
2	27.4	27.4	27.4
3	38.2	38.2	38.2
4	50.0	50.0	50.0

Unit : Hz

表 2 本研究與 Kim 的研究比較

Mode	解析解		文獻		解析解	文獻
	空氣	水域	空氣	水域	折減率	折減率
1	652	182	587	193	72%	67%
2	739	210	617	215	71%	65%
3	817	335	830	351	59%	58%
4	1117	410	1109	617	63%	44%

Unit : Hz

表 3 水域與空氣中之自然振動頻率

mode	數值模擬			文獻
	空氣	水域	折減率	折減率
1	24.3	11.7	51%	67%
2	27.4	12.7	53%	65%
3	38.2	20.4	46%	58%
4	50.0	28.4	43%	44%

Unit : Hz

九、圖片

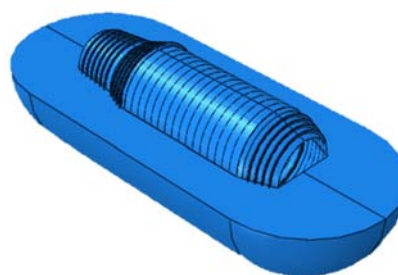


圖 1 壓力殼模擬水域模型

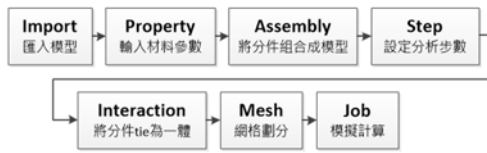


圖 2 研究分析流程

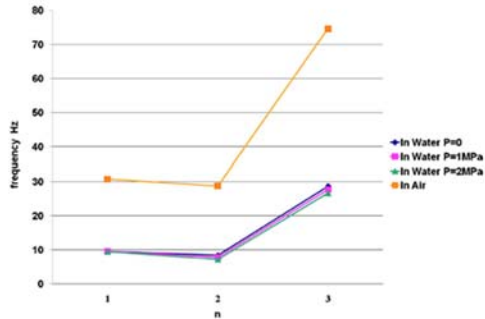


圖 3 水壓與自然振動頻率關係[3]

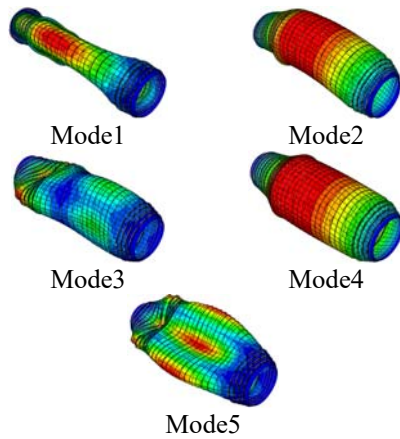


圖 4 空氣中之自然振動模態

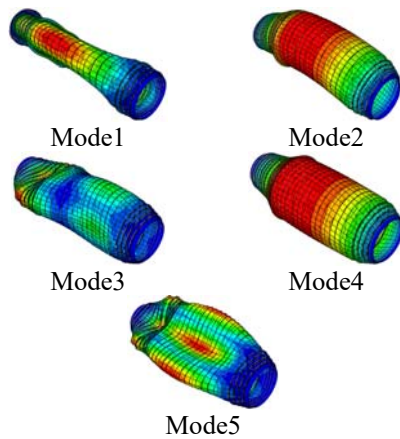


圖 5 100m 水壓下之自然振動模態

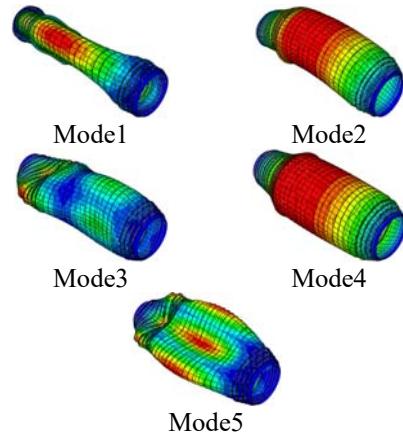


圖 6 200m 水壓下之自然振動模態

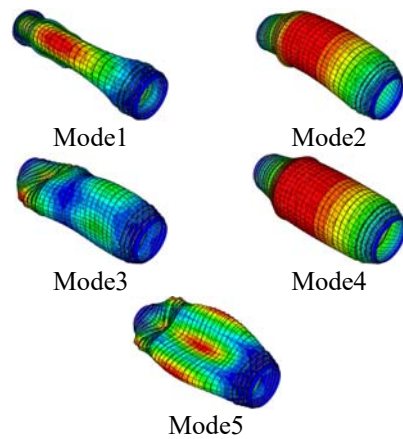


圖 7 300m 水壓下之自然振動模態

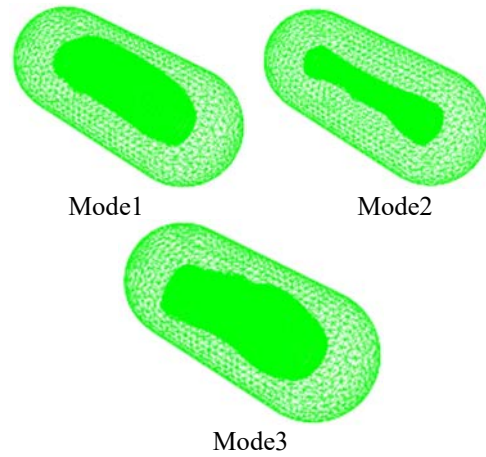


圖 8 水域中自然振動模態