

不同海況下高速雙體船之水彈性分析

陳楚云* 朱永安** 李綺芳** 林宗岳** 黃心豪*¹

*國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系暨研究所

**財團法人驗船中心 研發處研發組

關鍵詞：高速雙體船、水彈性分析、結構健康監測

摘要

高速雙體船之結構特殊，且長期服役於海洋環境中，經常受到各種負荷的交互作用，如波浪負荷、風負荷等，加上受到環境腐蝕等因素，進而影響船舶的結構健康狀態。船舶航行於環境易變動的海洋中，結構健康狀態會因海洋環境之改變而產生變化，不易藉由定期檢測的方式得知結構健康的變化，因此對船體進行結構健康監測有其必要性。為了提高船舶在航行時的可靠度，本研究採用水彈性分析的方法，模擬高速雙體船在不同波高、波頻、航向角之規則波下的結構響應，選出較嚴苛之海況，再進行結構分析得出應力較大處作為結構健康監測位置之依據。首先，建立雙體船全船結構有限元素模型，並於水線面以下的船殼部份建立水動力小板模型。接著使用水動力結構計算軟體 HOMER 計算波浪負荷，透過積分網格將波浪負荷施加到全船的結構模型上，計算不同波高、波頻、航向角之規則波下的結構響應。從數值模擬結果，可得知於某些海況時，高速雙體船之應力及運動響應較大。再採用擬靜態分析計算該海況時域下的結構應力變化，並整理出應力較大處作為結構健康監測位置之依據。

前言

雙體船比相同排水量的單體船具有較寬敞的露天甲板空間、較佳的橫向穩度及操縱性能。雙體船主要由兩側單船體結構來提供浮力，兩單體船之間則由橫跨甲板結構連結，橫跨甲板結構強度之設計需考慮波浪拍擊所產生的橫向彎矩、剪力、扭矩等負荷。雙船體結構必須能夠充分地承受瞬息萬變的海況所施加的負荷。施加於船體的負荷，種類很多，有經常性的負荷，也有突發性的負荷；前者如浮力和重力之負荷及波浪拍擊結構之變動負荷；後者如碰撞或是人為操作不當等所造成的特殊負荷，因此對於實時監測高速雙體船的結構健康狀態有其必要性，而感測器系統為結構健康監測系統之關鍵設備。須有效的規劃與擺設感測器在全船結構上，在感測器數量有限的情況下能得知船體結構在海上航行時的結構反應，也是近來船舶領域重要的研究議題之一。

研究方法

1. 水動力分析

不規則波的響應利用線性疊加的方式將許多規則波響應疊加而成。基於線性化的假設，水動力(F^H)可分為兩部分：一為船體有關的輻射力(F^R)；二為波浪激振力(F^{DI})。波浪激振力包含不受干擾之入射波與受船體干擾之繞射波效應。

$$F^H = F^R + F^{DI} \quad (1)$$

由線性波浪理論，流場總速度勢可分解為各項速度勢之和：

$$\varphi = \varphi_I + \varphi_D - i\omega \sum_{j=1}^6 \xi_j \varphi_{Rj} \quad (2)$$

其中各項意義如下：

φ_I ：入射波速度勢

φ_D : 繞射波速度勢

φ_{Rj} : 輻射波速度勢

ω : 波浪頻率

ξ_j : 剛體運動振幅

φ_I 可表示如式(3):

$$\varphi_I = -i \frac{ga}{\omega_0} e^{kz + ik(x \cos \beta + y \sin \beta)} \quad (3)$$

水動力壓力，可由白努利方程式求得:

$$P = i\omega\rho g = P_I + P_D + \sum_{j=1}^6 \xi_j \varphi_{Rj} \quad (4)$$

將靜壓力的變化加入式(4)中可得到全部的水動力壓力。

$$P^{hs} = -\rho g [\xi_3 + \xi_4(y - y_g) - \xi_5(x - x_g)] \quad (5)$$

式(5)中， x_g 與 y_g 為相對重心位置及運動方程式之參考點。由於式(6)中的 $[c]$ 不能對 P^{hs} 進行積分運算，也須將船殼在法線上的變化的影響納入考慮。故法線向量表示如下:

$$F^{hs} = [c]\{\xi\} = \iint_{S_B^H} [P^{hs} n - \rho g Z \Omega] n ds \quad (6)$$

式(6)中， S_B^H 為船殼表面浸水之水動力網格， Ω 為向量中之轉動分量。

針對式(6)壓力項對船殼表面浸水的部分進行積分計算，可求得所對應之船體受力情況。

在頻率域下剛體運動方程式可表示為式(7):

$$(-\omega^2([M] + [A(\omega)]) - i\omega[B(\omega)] + [C])\{\xi\} = \{F^{DI}\}$$

各項意義如下:

$[M]$: 質量矩陣

$[A(\omega)]$: 附加質量矩陣

$[B(\omega)]$: 阻尼矩陣

$[C]$: 靜水恢復力矩陣

$\{F^{DI}\}$: 激振力向量

激振力、附加質量及阻尼係數分別如式(8)、式(9):

$$F_i^{DI} = i\omega\rho \iint_{S_B^H} (\varphi_I + \varphi_{DI}) n_i dS \quad (8)$$

$$\omega^2 A_{ij} + i\omega B_{ij} = \rho\omega^2 \iint_{S_B^H} \varphi_{Rj} n_i dS \quad (9)$$

解流場各項速度勢屬一邊界值問題，於船舶前速度為零的條件時，邊界值問題表示如下:

$$\begin{cases} \Delta\varphi = 0 \\ -\frac{\omega^2}{g}\varphi + \frac{\partial\varphi}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial\varphi}{\partial n} = V_n \\ \lim_{R \rightarrow 0} \left[\sqrt{\frac{\omega^2}{g}} R \left(\frac{\partial\varphi}{\partial R} - i \frac{\omega^2}{g} \varphi \right) \right] = 0 \end{cases}$$

其中， V_n 為船殼的法線向量速度。

所考慮的速度勢需分別滿足下列條件：

$$\frac{\partial\varphi}{\partial n} = -\frac{\partial\varphi_I}{\partial n}; \frac{\partial\varphi_{Rj}}{\partial n} = n_j \quad (10)$$

本研究利用 Hydrostar 進行水動力分析的求解。此軟體是利用源點建立的邊界積分方程式來求解邊界值問題，而流場內任一點之速度勢如式(14):

$$\varphi = \iint_{S_B^H} \sigma \cdot G dS \quad (11)$$

式(11)， G 為格林函數， σ 為未知源強度，可由積分方程式如式(12)求得 σ :

$$\frac{1}{2}\sigma + \iint_{S_B^H} \sigma \cdot \frac{\partial G}{\partial n} ds = V_n \quad (12)$$

在水動力分析中需將船殼表面浸水的部位劃分成許多小板，並在各小板上布置源強度，此法稱為小板法。

利用小板法求出各項速度勢之後，所對應之水動力壓力則利用式(13)求得：

$$P = i\omega P\phi - \rho g z \quad (13)$$

式(13)中等號右邊第一項需對船殼浸水表面之水動力網格進行積分，即可算出船殼所對應之外部壓力負荷。

2.壓力轉換

我們可由結構模型之重力，及水動力分析方法求得外部壓力負荷，但此過程是在水動力網格模型上計算，故將負荷轉移至結構網格模型時，需做數值上的轉換，才可進行後續的全船結構分析。由於水動力網格和有限元素網格離散方式的差異甚大，如圖 1 所示，若是單靠內插法把水動力分析得之外部壓力負荷轉移至結構模型上，會使得結構模型無法達到平衡的狀態，因此會採用以下兩點來確保其完整性[2]：

- 重新在結構模型上進行外部壓力計算，取代內插的方式。
- 重新於積分網格進行積分運算，求出附加質量、阻尼、恢復力以及激振力等各項水動力係數。

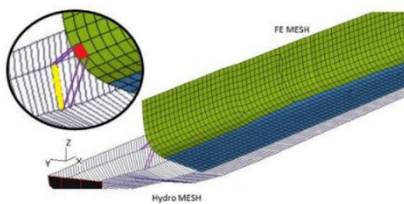


圖 1、不同網格的差異

3.擬靜態分析

將壓力轉換得到的水動力負荷和剛體加速度施加於船體結構上，並確保結構是處於力平衡的狀態，對式(14)進行結構分析的求解。

$$[k] * \{\varepsilon\} = \{f\} \quad (14)$$

式(17)中， $[k]$ 為結構的勁度矩陣， $\{\varepsilon\}$ 為結構節點的自由度， $\{f\}$ 為船體結構所受的負荷(如：靜水壓力、水動力壓力、重力和慣性力)。

結果討論

本研究分析的條件為全船滿載情況，目標船舶為一艘高速雙體船，主要尺寸如表 1 所示。

表 1

項目	尺寸
全長	65.4 M
滿載吃水	2.1 M
船寬	14.8 M
船深	6.2 M
滿載排水量	698.1 MT
最大船速	35KT

1.分析模型

本研究使用三種模型：結構有限元素分析之結構模型、水動力施加於結構模型上時用於中介之積分模型與水動力計算用之水動力模型，三種模型建立方法如下說明。

為了進行全船的應力分析，需要建立全船的有限元素模型，主要是利用薄殼元素和樑元素所組成，本文所使用之結構模型如圖 2 所示。裝備、貨物、燃油、淡水、壓載水等重量分布利用點質量元素放置於重心位置，配合 RBE3 剛體元素將力量傳遞至結構模型上以模擬真實的受力情況，分佈情況如圖 3 所示。全船結構模型共有 49,459 個節點，108854 個元素；殼元素有 55,754 個、梁元素有 52,914 個。

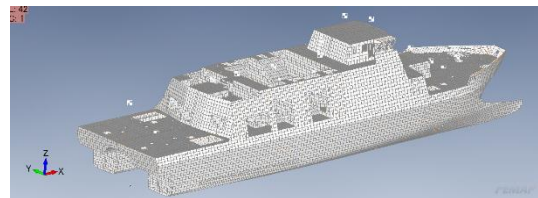


圖 2、全船結構模型

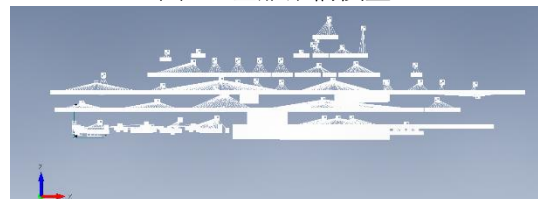


圖 3、點質量和 RBE3 剛體元素

積分模型為船體結構外板的幾何模型，在計算水動力時，積分模型可計算船殼所承受的流體動力壓力，在水彈性的計算時，則是被用來做結構模型的變化量與水動力模型間的相互驗證。

本文利用 FEMAP2HOMER 工具於 FEMAP 軟體中將結構模型之結構外板匯出，於 Homer 讀入如圖 4 所示。

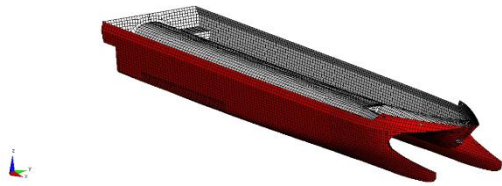


圖 4、積分模型

水動力模型為計算流體力學所使用之模型，首先，在 Rhino 利用船舶線型繪製船舶浸水表面的幾何模型，如圖 5 為高速雙體船在吃水深度為 2.1m 的浸水表面的幾何，再利用網格工具將浸水表面的幾何離散成許多小板，各元素的法線向量則需指向流體的方向，將所有小板的各點座標和各節點所組成的元素資料匯出並製作 BV Homer 可用的.hs0，如圖 6 水動力模型。



圖 5、水動力模型之幾何

圖 5、水動力模型

分析流程

本研究分析主要分為兩大部分：擬靜態分析、線性水彈性力學分析，主要使用之分析工具為：Homer、HydroStar、FEAMP。

擬靜態分析主要使用 BV 所開發之 Homer，主要模組及功能說明如下。

- Mass Properties: 計算全船質量分布及慣性

特性。

- Still Water：計算積分模型的靜水壓，並生成水動力計算所需要的輸入檔案。
- Seakeeping：利用 HydroStar 進行水動力計算。
- Dynamic Load Case：輸出船體運動響應。
- Internal Loads：計算指定截面之內力負荷。
- FE Analysis：水動力負荷施加於結構模型上，產生有限元素分析的輸入檔(.dat)，再利用 FEMAP 進行求解。
- Stress output：輸出指定結構元素的應力響應。
- Spectral Analysis：指定元素進行頻譜疲勞分析。

全船質量及慣性特性

利用 Mass Properties 模組計算，輸入與參數設定為全船的結構模型(.dat 檔)、結構模型使用的單位(mm)、指定截面位置。全船的總重為 682.61MT，計算所得之全船質量分布、重心高度之結果如圖 6 至圖 7。

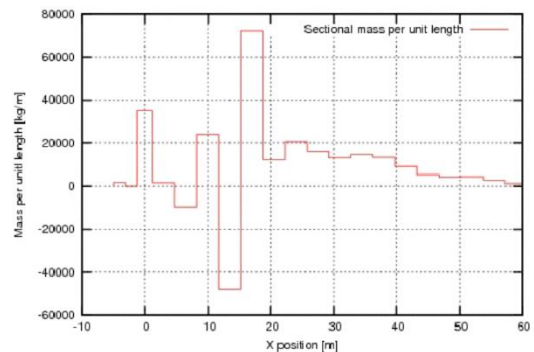


圖 6、全船質量分布

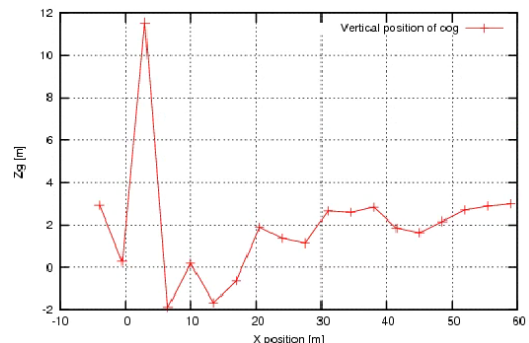


圖 7、縱向重心高度分布

動態負荷

計算動態負荷主要是利用 Still Water、Seakeeping、Dynamic Load Case 三個模組。

輸入與參數設定為: 積分模型(.hs0)、水動力模型(.hs0)、船速、俯仰角、航向角、波浪頻率、水深。

本文所使用的環境參數設定如表 2。

表 2 水動力計算參數

參數	數值
航向角(°)	0~180(間隔 45)
頻率(Hz)	0 ~ 3 (間隔 0.1)
水深(m)	無限水深
船速(KT)	5 ~ 35(間隔 5)

Still Water 模組主要計算船舶在靜水狀態下的壓力分佈情況，如圖 8，同時將水動力模型轉換為結構計算可用的模型，利用積分模型上的壓力分佈來確認積分模型和水動力模型是否正確疊合在一起。

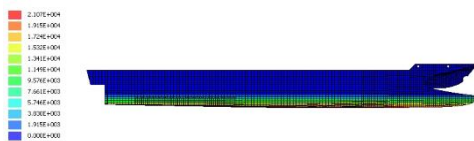
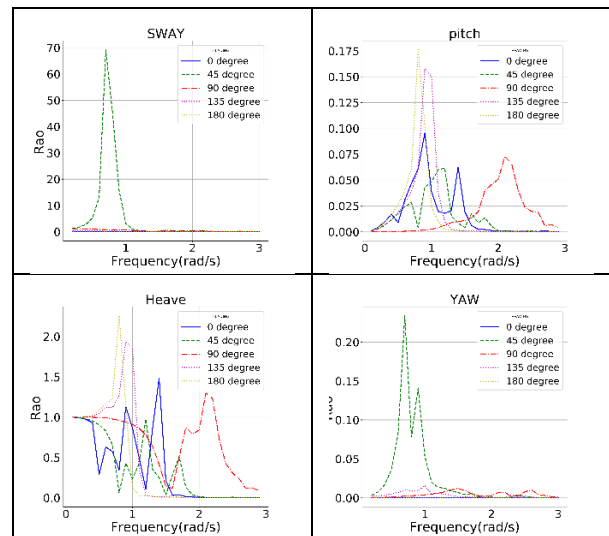
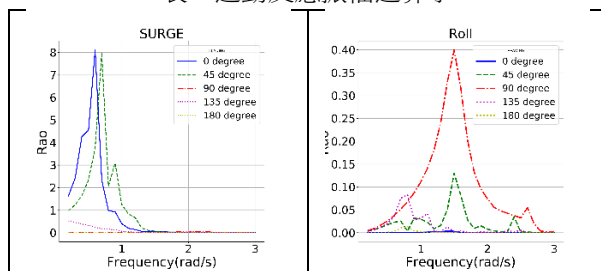


圖 8、靜水壓力分佈

Seakeeping 模組是利用 HydroStar 計算各海況下之水動力壓力分佈，再利用 Dynamic Load Case 模組計算船舶於各頻率、航向角下之運動反應振幅運算子。

表三為船速為 35kt 於各頻率、航向角下船體六自由度方向的運動反應振幅運算子。圖中 X 軸為頻率(rad/s)，Y 軸為所對應 RAO 之數值。

表 3 運動反應振幅運算子



由表 3 圖中可得知目標船型的共振頻率範圍大約落在 0.8~1.5rad/s，其中 Z 方向的位移(Heave)及 Y 方向的轉動(Pitch)再任一航向角下都比其他運動方向的響應來的大，側浪對於 Y 方向的平移運動相較於其他航向角則較為顯著。

內力負荷

計算內力負荷主要是使用 Internal load 模組，輸入與參數設定為: 各截面位置、欲輸出之海況(如航向角、頻率)，靜水下之靜態負荷如 9 圖。各圖中橫座標為船長方向的位置，以後垂標為原點，內力負荷沿著船長的方向分布。本研究結構模型的裝載之重量為非對稱的情況，因此在水平方向的彎矩不為零。

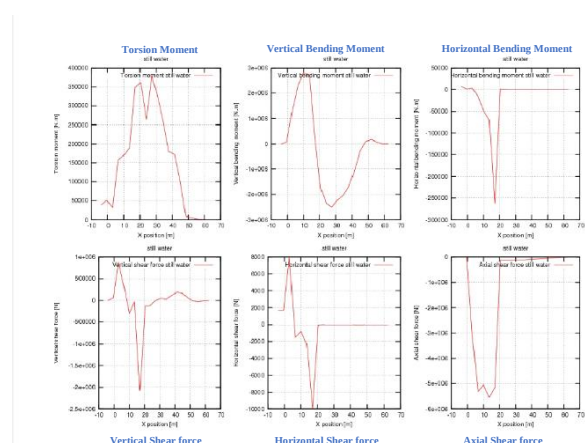


圖 9、靜態負荷

全船有限元素分析

全船結構分析採用簡諧分析(Harmonic Analysis)，透過壓力轉換的方式可將各海況條件下的負荷施加於全船的結構模型，如圖 10 綠色箭頭為在結構模型的節點所受的負荷。

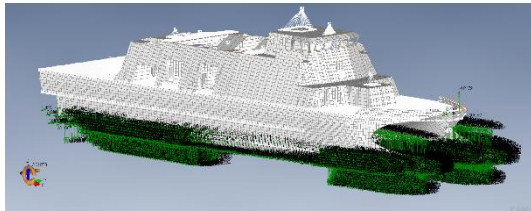


圖 10、節點負荷

邊界條件設定為參考 BV HOMER 技術手冊[3]，如圖 11 黃色圓圈為限制節點在 X、Z 方向的平移運動；黑色圓圈為限制節點在 Y、Z 方向的平移運動。

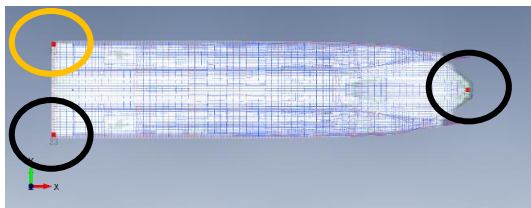


圖 11、邊界條件設定

利用船長與波長的比例關係及表 3 各船體六自由度運動反應振幅運算子，選出高速船雙體船的代表海況，如表 4 所示。

表 4

船長	比例	波長	波數	深水波頻率
65	0.75	48.75	0.12	1.1
65	1	65	0.09	0.9
65	1.25	81.25	0.07	0.8

利用船長的比例來選擇合適波長，再利用波長、波數與頻率三者之間的關係，推導出深水波的頻率。

在結構分析頻率的選擇為 1.1、0.9、0.8(rad/s)。

當船速為 35 節，波長為一倍的船長時，全船有舢垂現象發生，如圖 12 所示；當波長為 1.25 倍的船長時，全船有舢拱現象發生，如圖 13 所示。

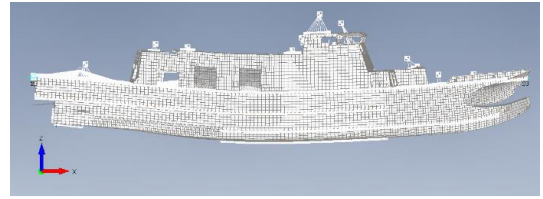


圖 12、舢垂現象

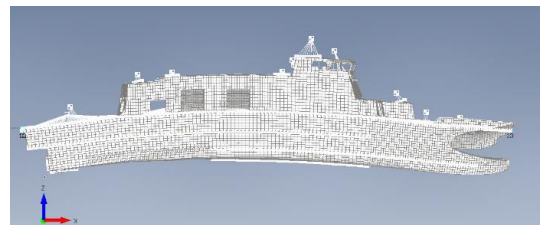
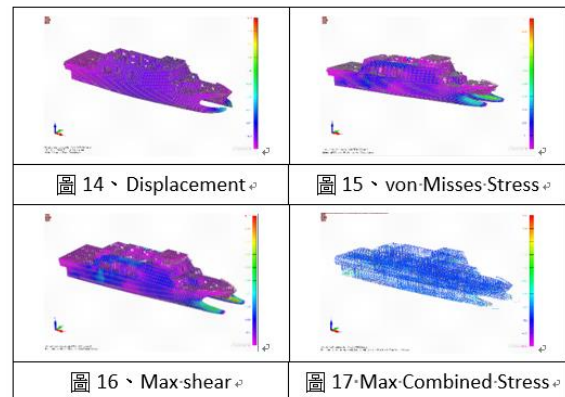


圖 13、舢拱現象

圖 14 至圖 17 為隨浪時，有限元素分析的計算結果，依序為全船的位移(Displacement)、殼元素應力值(von Misses Stress、Max shear)、樑元素應力值(Max Combined Stress)。

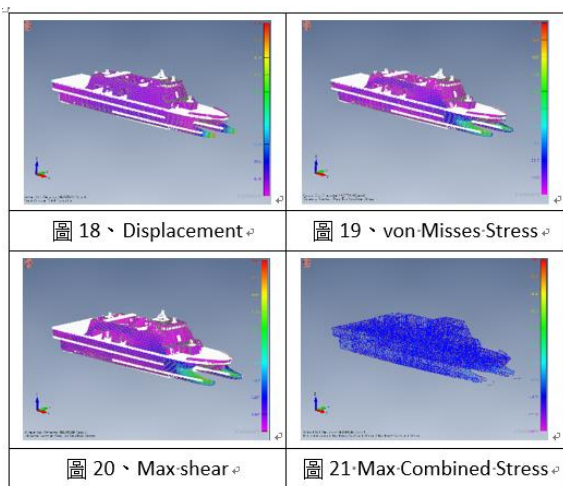


隨浪情況下，全船最大值結果如表 5 所示。

表 5

物理量	極值	編號	位置
位移	28.08mm	33420	位於船長 1/4 處
應力 (殼元素)	55.53Mpa	108631	傳動主機附近的底板
剪切應力 (殼元素)	21.04Mpa	108631	傳動主機附近的底板
應力 (樑元素)	89.72Mpa	28443	位於 1/4 甲板處與上構結構連接之加強材

圖 18 至圖 21 為航向角 45 度斜浪時，有限元素分析的計算結果。



側浪情況下，全船最大值結果如表 7 所示。

表 7

物理量	極值	編號	位置
位移	34.66mm	4	側體艏端的最前段
應力(殼元素)	44.79Mpa	108631	傳動主機附近的底板
剪切應力(殼元素)	16.98Mpa	108631	傳動主機附近的底板
應力(樑元素)-(Max)	90.9Mpa	28443	位於 1/4 甲板處與上構結構連接之加強材

航向角 45 度斜浪情況下，全船最大值結果如表 6 所示。

表 6

物理量	極值	編號	位置
位移	62.23mm	4	側體艏端的最前段
應力(殼元素)	46.34Mpa	108564	噴水推進器附近的船板
剪切應力(殼元素)	18.53Mpa	868	外側體艏端吃水線上方 1.2 米處
應力(樑元素)	124.22Mpa	40224	內側體艏端之加強材，吃水線上方 1 米處

圖 26 至圖 29 為航向角 135 度斜浪時，有限元素分析的計算結果。

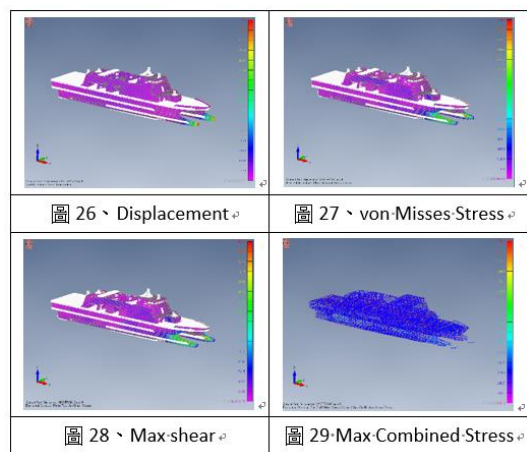
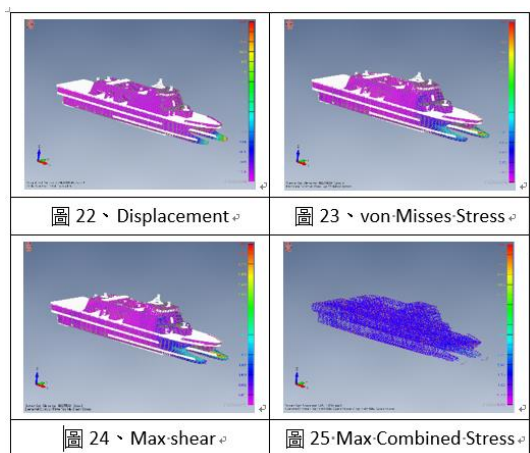


圖 22 至圖 25 為側浪時，有限元素分析的計算結果。

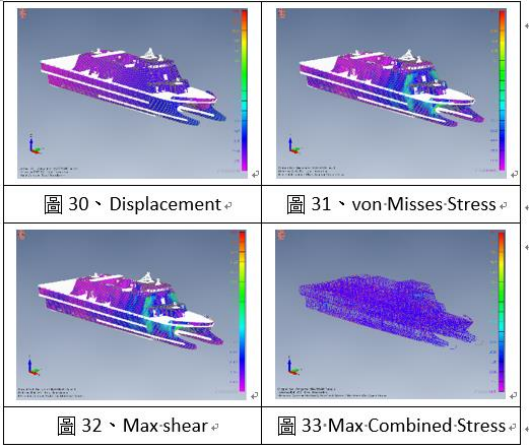


航向角 135 度斜浪情況下，全船最大值結果如表 8 所示。

表 8

物理量	極值	編號	位置
位移	130.64mm	4	側體艏端的最前段
應力(殼元素)	97.73Mpa	108096	內側體艏端，吃水線上方 1.7 米處
剪切應力(殼元素)	51.32Mpa	108096	內側體艏端，吃水線上方 1.7 米處
應力(樑元素)	377.86Mpa	40244	側體艏端沒水處之加強材

圖 30 至圖 33 為頂浪時，有限元素分析的計算結果。



頂浪情況下，全船最大值結果如表 9 所示。

表 9

物理量	極值	編號	位置
位移	84mm	5	側體艏端的最前段
應力(殼元素)	73.17Mpa	108096	內側體艏端，吃水線上方 1.7 米處
剪切應力(殼元素)	37.93Mpa	108096	內側體艏端，吃水線上方 1.7 米處
應力(樑元素)	249.6Mpa	40244	側體艏端沒水處之加強材

結論

利用水動力分析及擬靜態分析的方式，可得到目標船舶在各海況條件下的結構響應。當航向角為頂浪、斜浪(135°)的情況時，相較於其他航向角其對目標船舶的結構響應影響較大。目標船舶的兩個側體艏端、傳動主機和噴水推進器附近的船殼底板、甲板與上部結構連接處之加強材於不同海況條件下，相較於其他全船的局部位置有免顯受力較大的現象。可針對這些局部位置進行實時的監測，確保整體結構在海上航行時的安全性及可靠性。

參考文獻

[1] P. Pien, "Calculation of non-lifting potential flow about arbitrary three dimensional bodies based on doublet distributions," *Final Report Naval Ship Research and Development Center*, 1975.

[2] Š. Malenica *et al.*, "HOMER–Integrated hydro-structure interactions tool for naval and offshore applications," in *International Conference on Computers Application in Shipbuilding*, 2013.

[3] "Homer_Kernel_Manual.pdf," 2010.

HYDROELASTIC ANALYSIS OF HIGH-SPEED CATAMARAN IN DIFFERENT SEA CONDITIONS

Chu-Yun Chen * Yung-An Chu Chi-Fang Lee** Tsung-Yueh Lin** Hsin-Haou Huang ***

* Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

** CR Classification Society

Keywords: High-speed catamaran, Hydroelastic analysis, Structural health monitoring

ABSTRACT

The high-speed catamaran is a special structure in the marine environment for a long time. It is often subjected to the interaction of various loads, such as wave load and wind load, plus environmental corrosion and other factors, which affect health of the ship structure. It is not easy to know that ship structural is health or not through regular inspections. Therefore, it is necessary to monitor the structural health of the hull. In order to improve the reliability of the ship during navigation, this research adopts the method of hydroelastic analysis to simulate the structural response of the high-speed catamaran under regular waves of different wave heights, wave frequencies, and heading angles, and select the more severe sea conditions before proceeding. The structural analysis shows that the place with greater stress is used as the basis for the structural health monitoring position. First, establish a finite element model of the entire catamaran structure, and use Panel Method to describe hull surface geometry data below the waterline. Then use the hydrodynamic structure calculation software HOMER to calculate the wave load, and apply the wave load to the entire ship's structural model through the integration grid to calculate the structural response under regular waves with different wave heights, wave frequencies, and heading angles. From the numerical simulation results, it can be known that the stress and motion response of high-speed catamarans are relatively large in certain sea conditions. The quasi-static analysis is then used to calculate the structural stress changes in the time domain of the sea state, and the larger stresses are sorted out as the basis for the structural health monitoring position.