

# 穿浪型雙體船在斜浪下的橫跨甲板負荷及結構分析方法

施園丞\*<sup>1</sup> 林宗岳\*\* 李雅榮\*

\*國立臺灣大學 工程科學及海洋工程學系

\*\*財團法人中國驗船中心 研究處 研發組

**關鍵詞：**雙體船，橫跨甲板強度，有限元素分析，縱搖連接力矩

## 摘要

這篇研究以分析一艘具穿浪型艏部高速雙體船在斜浪下波浪負荷、結構響應以及其簡化方法為主題。傳統的計算截面負荷方法為沿著船長方向積分，但對雙體船而言其橫向的負荷就不能用此方法了。因此，本文將雙體船的浸水表面離散化成多個三角形的小板，並直接利用各個板上的靜水壓力疊加，來得到每個任意截面的總負荷，而船的吃水狀況是用整艘船的重量和重心來調整其姿態。接著，將波浪引起的吃水變化用正值或負值的虛擬重量來模擬其在波浪中的姿態，求出橫跨甲板的縱搖連接力矩與並規範值進行比較。在結構分析方面，本研究採用三種方法：全船有限元素模型、格柵式樑元素模型、以及基本材料力學之樑理論，模型複雜度與計算時間依序由高而低。使用上述縱搖連接力矩與三種結構方法分析目標船的橫跨甲板及浮體的連接處在斜浪條件下的強度，並比較三種方法的結果，在連接處的位移與應力值皆可驗證簡化方法的合理性。

## 1. 前言

雙體船相較於傳統單體船有著高速、寬闊的甲板面積、高橫搖穩度以及良好的操縱性等優點，因此多用於客船、巡邏艇和離岸風電安裝船等。但取而代之的是較傳統單體船複雜的結構。由阻力的觀點來看雙體船，可以觀察出：由於其浸水面積大於同級的單體船，摩擦阻力會較單體船大，又其較同級單體船大的長寬比( $L/B$ )和細長比( $L/\nabla^{1/3}$ )，所以興波阻力會較小。一般而言，當雙體船在低速，摩擦阻力主導整個總阻力的情況時，雙體船的總阻力是大於單體船的，而在高速航行，興波阻力大於摩擦阻力時，其總阻力相較單體船可以降低很多。廣義的雙體船還可以再細分成一般雙體船、穿浪型雙體船(Wave Piercing Catamaran, WPC)以及小水面雙體船(Small-Waterplane-Area Twin-Hull, SWATH)等三種船型。[1][2]

由雙體船的發展歷史角度來看，最先發展成熟的是一般雙體船。一般雙體船結構是由兩個片體(demihull)沒水提供浮力並由一個平坦、通常不接觸水面的橫跨甲板(cross-deck)連接，提供橫向強度。接著，為了提升更多的耐波性能，基於一般雙體船發展出了小水面雙體船，其在設計吃水附近的水線面積刻意的縮小，來降低波浪對船體的影響並使得

主要提供浮力的片體體積全部沒水。其相較於一般雙體船有著較好的耐波性能、較小的預留浮力、較佳的推進效率和較複雜的船體結構與控制系統。而最後，基於上述兩者，在 1980 年代初期發展出了穿浪型雙體船。其通常在橫跨甲板艏部的地方，採用龍骨下垂的形式，提供附加的預留浮力，以緩和在高速、大浪高時，艏部所受到的波擊，並防止甲板上浪、艏部沒水等不良情形發生。其同時保留小水面雙體船高速低阻力、高耐波性能等優點，且克服了小水面雙體船的預留浮力小、要求複雜的系統等缺點。

而根據 CR 規範，當考慮雙體船的整體結構強度時，除了傳統單體船的縱向強度外，還需考慮兩種額外的負荷情況：分別為橫浪條件下產生的橫向彎矩以及斜浪條件下產生的縱搖連接力矩[3]。而這兩種負荷，皆對橫跨甲板和兩片體的連接處造成考驗。本文以一艘具有橫跨甲板艏部預留浮力結構之穿浪型雙體船和一艘具有平底橫跨甲板結構的一般雙體船為目標船，以分析其在斜浪條件下，受到縱搖連接力矩時，所產生之結構響應為目標，並提出適用此種負荷之橫跨甲板簡化分析方法。

<sup>1</sup> 施園丞 (r08525021@ntu.edu.tw)

## 2. 研究方法

為了瞭解雙體船在斜浪下的結構響應，我們必須先取得施加在結構模型上的縱搖連接力矩，接著開發橫跨甲板橫向強度之簡化分析方法。縱搖連接力矩負荷條件來自於斜浪中航行，雙船體四個角落形成對角奇對稱負載，進而對橫跨甲板造成扭轉。

### 2.1 縱搖連接力矩

根據規範[3]，縱搖力矩可以由下列兩個公式計算後得出：

$$a_{CG} = \frac{7.6\tau \times 10^{-6}}{dc_b} \left(12H_{\frac{1}{3}} + B_w\right) (50 - \beta_{CG}) \left(\frac{v}{\sqrt{L_w}}\right)^2 g \quad (1)$$

$$M_p = \frac{1}{8} \cdot \Delta \cdot L_{WL} \cdot a_{CG} \cdot g \quad (2)$$

其中  $a_{cg}$  為船舶重心位置之垂向加速度， $M_p$  為縱搖連接力矩。為了驗證此規範計算值的合理性，本文以靜水壓力施加在船殼上造成的靜水負荷來驗證。首先將船殼離散化成三角形網格，如圖 1 所示。接著由重量分布算得全船重量與重心位置和船殼幾何一起船在水中的姿態。最後由簡單的靜水壓力在每一個三角形網格計算所定義之剖面在平衡姿勢下的負荷，如圖 2 所示。剖面上的負荷共有六個自由度 ( $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ )，舉例來說，若要看縱搖連接力矩時，應該觀察的是  $y=0$  的縱剖面，也就是中央線上  $M_y$  的值。

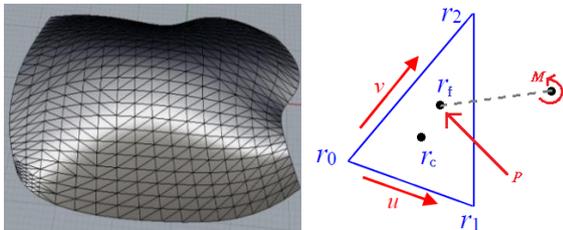


圖 1、船殼曲面網格離散化示意圖(左)及單一三角形網格之靜壓力模型(右)

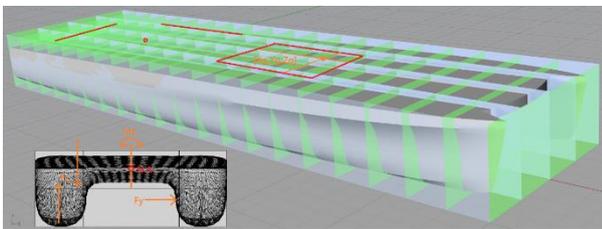


圖 2、剖面定義與重量分布模型

考量上述方法只適用於靜水狀況，無法直接計算由波浪引起的負荷，本文以會造成最大縱搖連接力矩的等效設計靜波近似，也就是當船體的左前、

右後在波峰，且左後、右前在波谷，反之亦然，如圖 3 所示，其波長和波向角計算以式(3)、式(4)表示。接著將雙體船分為左前、左後、右前、右後四個部分，分別計算每個部份在等效設計靜波中與靜水中的沒水體積差，如圖 4。若一個部分在波峰，則沒水體積較在靜水中增加，浮力較在靜水中增加，反之若在波谷時，浮力會較靜水中減少。因此，在波峰的區域放置一個負的質量塊，在波谷的區域放置一個正的質量塊，如圖 5。再執行上一節描述的剖面負荷分析，以模擬在斜浪中變化的浮力造成的內部負荷。

$$\lambda = \frac{2bL}{\sqrt{L^2 + b^2}} \quad (3)$$

$$\theta = 90^\circ + \tan^{-1} \frac{b}{L} \quad (4)$$

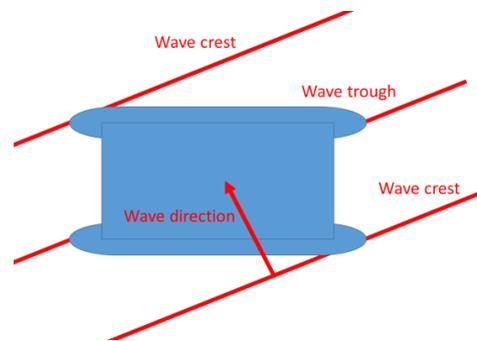


圖 3、造成最大縱搖連接力矩的等效設計波示意圖

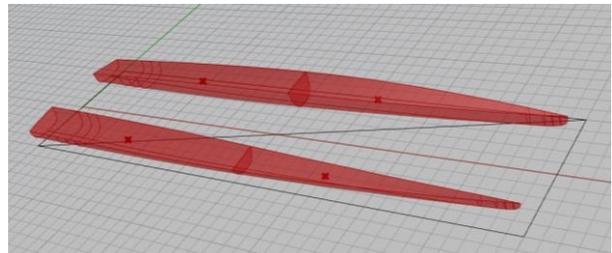


圖 4、等效設計波造成的沒水體積差異示意圖

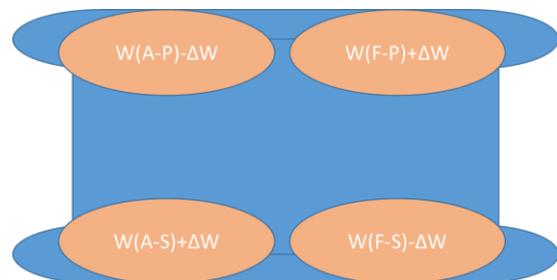


圖 5、以質量塊模擬等效設計波造成的沒水差異

### 2.2 全船結構模型

首先建立全船有限元素(FEM)模型並以其分析結果，橫跨上甲板的橫向應力與垂向位移，當作參

考值。由於本研究欲探討的為橫跨甲板的強度，將實船模型去除上構後，成為新的目標船，如圖 6。實船模型採用均勻的負荷加載方法，如圖 7 所示。依照式(2)所計算之縱搖力矩以式(6)均勻分佈至片體上之垂向力。

$$n \cdot F \cdot \frac{1}{2}L = M_P \quad (5)$$

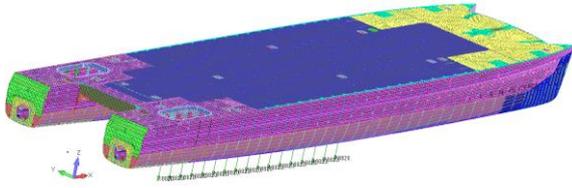


圖 6、全船有限元素模型圖

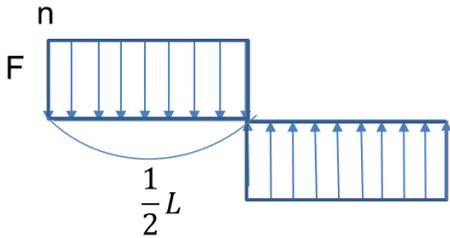


圖 7、均勻負荷加載方法

### 2.3 柵格狀簡化有限元素模型

本節參考規範[4]，建立簡化的橫跨甲板與片體有限元素模型如圖 8。其中，將每一根有橫肋支撐的橫跨甲板以樑元素表示，每一根縱向隔艙壁以樑元素表示，兩者皆與上下甲板連接成為 I 型樑。且將片體外板形狀也計算其剖面係數並以樑元素表示至於片體形狀中心，最後將橫跨甲板與片體樑以剛性元素連接，模擬其不變的相對位移。

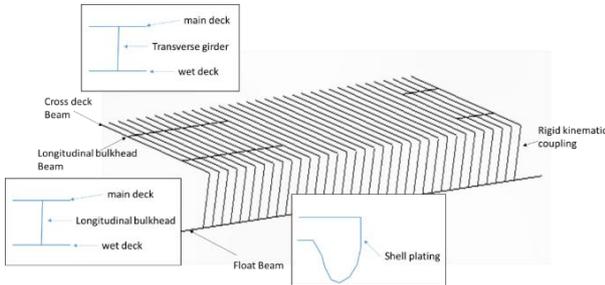


圖 8、簡化的有限元素模型

下一步，設定符合這種簡化模型的邊界條件，如表 1 和圖 9，且將負荷給定方法與全船模型相同。最後就能與實船模型的結果進行比較以驗證其合理性。

表 1、邊界條件設定

	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
port	X	X	X	X	X	X
centerline	X	X	X			
starboard	X					X

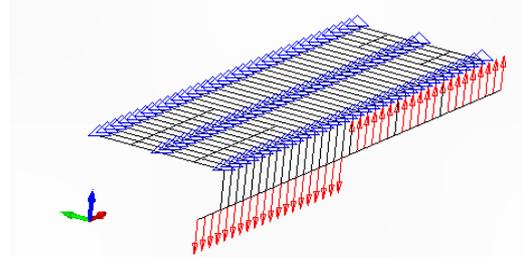


圖 9、簡化模型之邊界條件與負荷加載圖

### 2.4 基本樑元素簡化模型

本節更進一步的，參考規範[5]，跳過有限元素計算，試圖直接從基本的材料力學樑理論，得出橫跨甲板的垂向位移與橫向應力。

首先假設兩個片體為剛體，因此橫跨甲板的模型可以假設如圖 10，兩端點予以強制垂向位移且施加固定連接。由基本的材料力學公式得出每一根樑的彎曲剛性 $r_{i1}$ ，如式(6)，其中 $E_i$ 為楊氏係數， $I_i$ 為剖面二次慣性矩， $S_i$ 為橫跨甲板寬度。考慮樑的剪切剛性 $r_{i2}$ ，如式(7)，其中 $G_i$ 為剪切模數， $A_{webi}$ 為腹板面積。

$$r_{i1} = \frac{12E_i I_i}{S_i^3} \quad (6)$$

$$r_{i2} = \frac{G_i A_{webi}}{S_i} \quad (7)$$

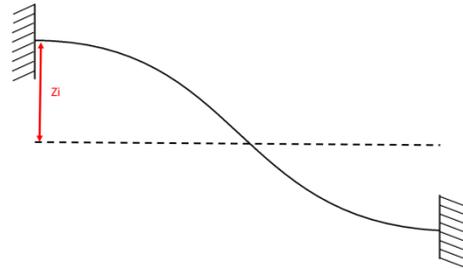


圖 10、基本樑元素模型假設

由於觀察實船模型的結果後，發現橫跨甲板和片體交界處的斜率並不等於零，所以將彎曲剛性乘上一個修正因子 $K$ 。因此整體橫樑剛性為式(8)。

$$r_i = \frac{1}{\frac{1}{K+r_{i1}} + \frac{1}{r_{i2}}} \quad (8)$$

接著求出兩船體在縱搖連接力矩作用下的扭轉中心，也就是甲板的剛性中心縱向座標為 $x_C$ ，其中

$d_i$  為每根橫樑到扭轉中心之距離，如式(9)和式(10)：

$$x_c = \frac{\sum r_i x_i}{\sum r_i} \quad (9)$$

$$d_i = x_i - x_c \quad (10)$$

假設片體為剛體，在受到  $M_p$  力矩下旋轉  $\omega$ ，則可以得到每根橫樑的垂向位移  $z_i = \omega \cdot d_i$ ，又每一橫樑端點所受之垂向剪力  $F_i$  為式(11)，且縱搖連接力矩  $M_p$  與剪力之關係為式(12)。

$$F_i = r_i \cdot z_i = r_i \cdot (\omega \cdot d_i) \quad (11)$$

$$M_p = \sum F_i d_i = \omega \sum r_i d_i^2 \quad (12)$$

結合式(11)和(12)求出片體旋轉角  $\omega$  為式(13)。再套用垂向位移的公式即可求出每一根橫樑之垂向位移。最後每一根橫樑的橫向應力則可由剪應力求出每一根的彎矩，套用彎矩除以剖面模數的公式，就可得到。

$$\omega = \frac{M_p}{\sum r_i d_i^2} \quad (13)$$

### 3. 結果與討論

本研究以前述三種計算方法評估橫跨甲板的強度，後二個簡化方法驗證標的為實船模型相比較垂向位移與橫向應力來驗證其合理性。目標船型以一艘一般雙體船與一艘穿浪型雙體船進行驗證分析，其主要尺寸如表 2。

表 2 兩艘目標船之主要尺寸表

主要尺寸	一般雙體船	穿浪型雙體船
水線長, $L_{WL}$ (m)	39.5	62
排水量, $\Delta$ (tonne)	169.57	690.7
全船寬, $B$ (m)	10	14.8
片體寬度, $B_w$ (m)	2.6	4.08
船深, $D$ (m)	3.4	6.2
吃水深, $d$ (m)	1.33	2.1
方塊係數, $C_B$	0.56	0.62
船體結構元素數	252612	762177
船體結構節點數	233428	34678

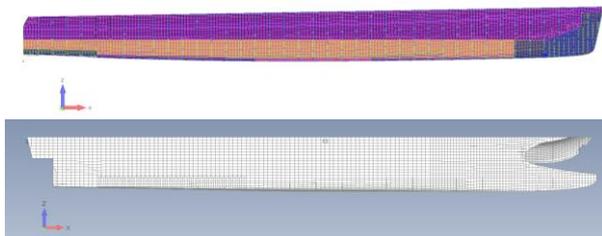


圖 11、有限元素模型側視圖一般雙體船(上)和穿浪型雙體船(下)

### 3.1 縱搖力矩驗證

首先根據上一章驗證縱搖連接力矩之合理性，如圖 12。其中，灰線為 CR 規範所得之值，藍線為直接輸入全船的重量與重心，將全船視為一重量塊，黃線為將全船分割成 298 塊重量塊。可以觀察到，在規範在波高等於零時有一初始的縱搖連接力矩，而當輸入的重量分布為詳細分割的重量塊時，也可觀察到相似的初始縱搖連接力矩，因此可以得出當波高等於零時，會有一因為全船重量分佈不均產生的縱搖連接力矩，而當輸入為一已經均部化後的全船重量與重心時，這種因為內部重量分佈不均而導致的內部負荷則無法顯現出來。另外，值得注意的是在規範值與詳細重量分佈的線之間有一個斜率差，其應為動態壓力造成的力矩。可以觀察到在規範的式(1)中，有一輸入值為船速，而這個在計算靜水負荷，單純考慮靜波造成的沒水體積差時，是沒有考慮到的。

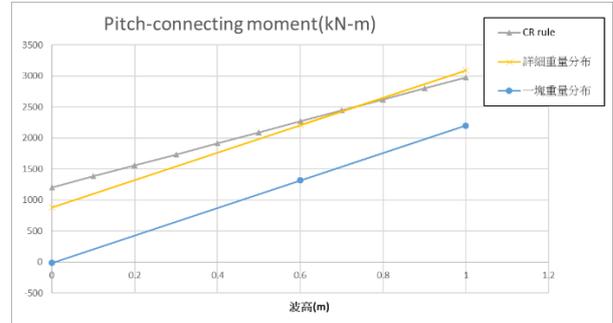


圖 12、縱搖連接力矩在不同波高下之比較

### 3.2 結構計算方法驗證

首先比較一般雙體船在連接處的垂向位移與橫向應力。可以看到不論是垂向位移還是橫向應力，兩種簡化分析方法皆與實船結果十分接近。在垂向位移圖 13 中可以觀察到在艙艙部，假設兩片體為剛體的樑理論簡化模型結果(紅色線)，較實船模型的結果(黃色線)大，這也顯現出這種方法的限制，對於片體的縱向強度變化較大的雙體船，其在計算位移時的誤差就會比較大。而在橫向應力圖 14 中，可以看到實船模型結果(綠色線)有兩處抖動的極端值，根據實船模型的應力分布，可以看到，這種極端值是由甲板上的開口造成結構不連續所導致的應力集中，如圖 16 所示，是局部的應力，與本研究主要評估的整體強度不合。因此，此二圖的結果屬於可以接受的，驗證了兩種簡化法的合理性。

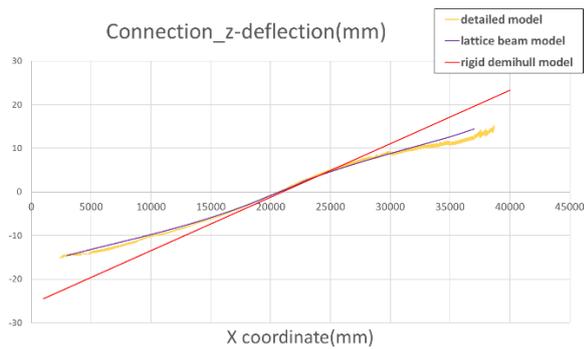


圖 13、一般雙體船三種模型在甲板與片體連接處的垂向位移

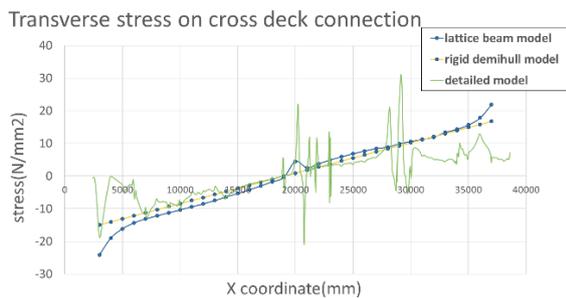


圖 14、一般雙體船三種模型在甲板與片體連接處的橫向應力

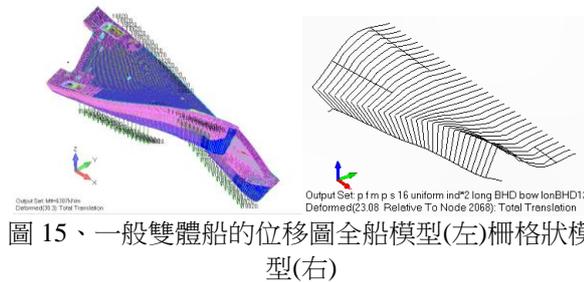


圖 15、一般雙體船的位移圖全船模型(左)柵格狀模型(右)

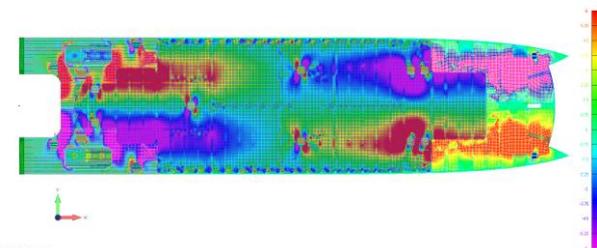


圖 16、一般雙體船實船模型在主甲板上的橫向應力分佈

接著比較穿浪型雙體船的簡化模型結果。由圖 17、圖 18 的實船模型結果可知在船艏的部分，由於片體與橫跨甲板沒有連接，如圖 11 所示，造成艏部橫跨甲板沒有相對垂向位移，而橫向應力

也持續下降，表示艏部結構在這種受力情形下沒有受力。因此，在兩種簡化模型中，皆無考慮到艏部的結構。另外由於其艏部也沒有與片體連接，因此在柵格狀模型中艏部的橫跨甲板採用剛性連接造成圖 17 中艏部位移的低估。另由於柵格狀模型去除了艏部的結構的，造成了靠近艏部的地方，位移與應力的高估，不過在船艏的部分這種模型能精準的模擬時船的位移與應力。而假設兩片體為剛體的樑理論簡化模型則一樣因為在實船位移斜率變化下造成誤差，且在觀察橫向應力時也因實船的結果不為一固定斜率之直線，而造成無法精準模擬之誤差。值得後續作更深入之改良研究。而與一般雙體船一樣，穿浪型雙體船甲板上的橫向應力也因甲板上的開口結構不連續造成有極端值的誤差，如圖 19 所示。

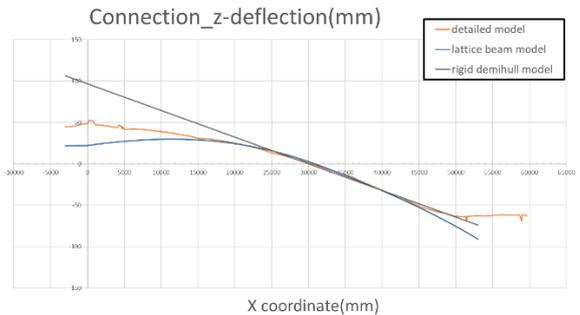


圖 17、穿浪型雙體船三種模型在甲板與片體連接處的垂向位移

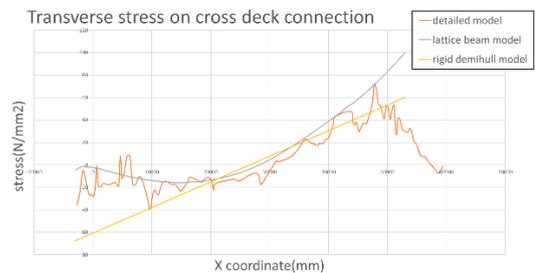


圖 18、穿浪型雙體船三種模型在甲板與片體連接處的橫向應力

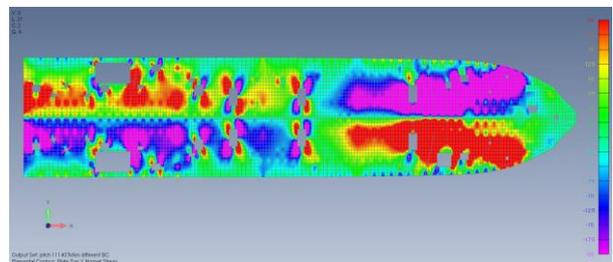


圖 19、穿浪型雙體船甲板橫向應力圖

#### 4. 結論

本文提出了分析雙體船橫跨甲板在斜浪下承受縱搖連接力矩的兩種簡化分析方法，從負荷給定到結構的建模皆作了完整的分析。其中，負荷的給定由 CR 規範中求得，並以靜水中虛擬重量的直接計算法，驗證了規範中縱搖連接力矩的量值。而在結構分析方面，提出了兩種可以估算縱搖力矩作用下，橫跨甲板強度的簡化方法，其中柵格狀模型與假設兩片體為剛體的樑理論簡化模型，在分析一般雙體船時，除去甲板上開口導致的局部應力集中外，皆能準確的反應實船模型的橫向應力大小。而在分析穿浪型雙體船時，柵格狀模型上能模擬出實船模型的應力趨勢，但在兩片體為剛體的模型中，因為實船的應力趨勢變化過大，而導致應力值在艙端高估，而在艏端低估。因此，柵格狀模型基本上已確立其

在不同船型上的通用性，而若使用兩片體為剛體的模型在穿浪型雙體船上，仍需後續的改良研究。

#### 參考文獻

1. 趙連恩，謝永和，*高性能船舶原理與設計*，國防工業出版社，北京(2009)
2. Liang Yun, Alan Bliault, Huan Zong Rong, *High Speed Catamarans and Multihulls\_ Technology, Performance, and Applications*, Springer, New York (2019)
3. *Rules for the Construction and Classification of High-speed Craft*, CR 中國驗船中心 (2008)
4. *Hull Structure and Arrangement for the Classification of Cargo Ships less than 65 m and Non Cargo Ships less than 90 m*, NR600, Bureau Veritas(2014)
5. *Rules for the Classification of High Speed Craft*, NR396, Bureau Veritas(2002)

# CROSS DECK LOAD AND STRUCTURAL ANALYSIS OF WAVE PIERCING CATAMARAN UNDER QUARTERING SEA

*You-Chen SHIH*<sup>1\*</sup> *Tsung-Yueh LIN*<sup>2</sup> *Ya-Jung LEE*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University

<sup>2</sup> R/D Section, Research Department, CR Classification Society

\* Correspondence: [r08525021@ntu.edu.tw](mailto:r08525021@ntu.edu.tw)

*Keywords: catamaran, finite element analysis, cross deck strength, pitch-connecting moment*

## ABSTRACT

This study aims to use analytical method to calculate the pitch-connecting moment of a wave piercing catamaran caused by quartering waves, and to establish two simplified methods to evaluate the cross deck strength without building the full ship finite element model. Traditionally calculation of sectional load by integrating along longitudinal direction; for transverse load calculation for catamarans this integral method is not applicable. In this study, the wetted surface of floating body is discretized into a number of triangular panels, and the hydrostatic pressures on the panels are analytically calculated. The wave induced displacements at fore/aft bodies and port/starboard sides are treated as virtual masses located at centers of buoyancy. The section load can then be calculated provided given weight distribution. The present method assesses the pitch-connecting moment of a catamaran under quartering sea condition, i.e. the torsion of the centerline longitudinal section, and compared with Rules. Since building full ship finite element model takes too much time, two simplified methods are established to evaluate the cross deck strength. One is the lattice beam finite element model, and the other is the direct calculation using beam theory based on the assumption of rigid demihull. The deflection and stress distribution of each method is verified against the results from full ship finite element model.