

大型貨櫃船之節能導風罩設計與結構分析

林宗岳*¹ 陳紀川* 廖柏凱*

周欣賢** 林辰岳** 施旻孜**

*財團法人中國驗船中心 研究處研發組

**台灣國際造船股份有限公司 設計處

關鍵詞：導風罩，貨櫃船，節能裝置，結構設計

計畫編號：

摘要

貨櫃船之擋浪牆為消除艙部甲板上浪水壓以保護前排貨櫃，其形狀通常為一直立形平板，未考量非流線形造成高風阻。導風罩安裝於艙部舷牆上方，可兼顧風阻、抗艙甲板上浪與減少人員操作甲板機械落海的風險，作為擋浪牆的替代方案。本計畫以一艘 14000TEU 貨櫃船為目標船，建立導風罩幾何參數化設計程序，並與 CFD 軟體整合成一多目標最佳化執行程式；藉此於較短時間內挑選兼顧全船風阻及導風罩高度最小化之外形。考量導風罩需要承受上浪水壓，本文以四種不同規範針對擋浪牆之設計壓力為結構負荷，搭配有限元素分析，依此決定符合規範之板厚與主支撐構件寸法設計。完成細部結構設計後計算導風罩重量，作為建造成本預估依據。導風罩之整體設計考量需在減阻效果與重量之間妥協；本計畫提出之導風罩能減少風阻力達 9.9%，高度為 6 米；結構設計含導風罩本體鋼板、主支撐構件、加強材等符合 Lloyd's Register 船級規範，局部強度透過艙部 FEM 分析確認於容許應力內；扣除原擋浪牆重量後增加 150 噸。

前言

目前船舶的幾何線形以降低水中阻力、提高螺槳效率為主，一些水下節能裝置，如節能球艙、非對稱舵、舵球、跡流均勻化導罩(WED)、螺槳伸載鰭片(Propeller Boss Cap Fin, PBCF)、渦流產生器(Vortex Generator, VG)等，水下節能附屬物大都已開發完備。水面上之節能裝置較為少見，因水的密度約為空氣密度的 800 倍，使得空氣中減阻效果不明顯。若將空氣中減阻效果轉換到省油效果上，可因船舶營運天數累積的影響，年度節省燃油量可呈現出節能成效。

考量環境風速都相同時，在迎風時，船舶所受之風速為船速加上風速，若此時船速較高速，應會有較好的減阻效果。本研究以減少風阻為主要目標，船速較高之船型為優先選擇，考量一般商船有貨櫃船、散裝船與油輪等，貨櫃船具有較高之船速，選擇以貨櫃船進行導風罩減少風阻研究。本研究以 14000TEU 的貨櫃船為研究母船，以 CFD 模擬水面上之風阻，配合船模試驗之水動力阻力計算導風罩之總減阻效果。此船全長 368 m，船寬 51 m，

船深 29.85 m，吃水 14.5 m，正向投影面積 2350 m²，如表 1 所示。直接以實船尺寸進行計算。

導風罩之外形設計完成並確認其減阻性能後，進行結構設計及分析。導風罩位於船艙最前緣，若將擋浪牆(Break Water)的概念設計成導風罩，可兼顧風阻與上浪水壓，並可減少人員操作甲板機械落海的風險。一般貨櫃船之擋浪牆以消除船舶上浪水壓，保護前排貨櫃為設計要求。導風罩以艙部上浪水壓進行設計，以符合規範之初步結構設計為主要要求，並提供有限元素計算分析。板材和寸法皆需合乎規範，且需增加甲板附近的加強材以確認整體強度足夠。

表 1 計算用船型尺寸資料

Full scale	14000TEU
Scale	1:1
L _{pp}	350 m
B _{moulded}	51 m
D _{moulded}	30 m
T	14.5 m

¹ 林宗岳 (tylin@crlclass.org)

導風罩外型設計方法

本研究使用 Rhinoceros 3D 建模軟體製作導風罩幾何模型。導風罩搭建於艙部舷牆上方，考慮曲面平滑要求而使用高階 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)曲面理論。NURBS 是由參數域 u 向及 v 向之架構線所鋪設而成，亦即必需先定義四個邊界曲線如圖 1：底部由舷牆上緣抽離曲線、上方由此抽離曲線縮放定位(Scaled Orientation)至頂點及端點、前方使用三階平順混合方程式形成剖面曲線、後方則用直線連接。NURBS 曲面即能使用此四條邊界線和雙軌掃掠方式成形。

為了使幾何建模更精確、系統化和快速，本研究使用 Rhinoceros 和其外掛套件 Grasshopper 進行幾何參數化，以導風罩之頂點高度(TH)、頂點縱距(TL)、頂點角度(TA)、底部長度(BL)、端點高度(EH)、端點縱距(EL)與端點寬度(EW)等參數進行設計。TH 和 TL 定義頂點位置，TA 定義剖面曲線形狀，BL 定義舷牆曲線範圍，EH、EL、EW 則定義上方曲線端點；共七個參數，詳見圖 2。一個導風罩之幾何設計即能使用這七個參數來表示。

此外，透過使用 Python 外部控制碼，讀入外部給定之七個參數組合，自動執行前述流程輸出幾何檔，同時加入偵測不合理設計，如曲面與船體任何部分相交、曲面超出船型方塊之外、或曲面自交等狀況，給予使用者警告訊號以排除；若為合格的設計則計算曲面面積，做後續性能分析。

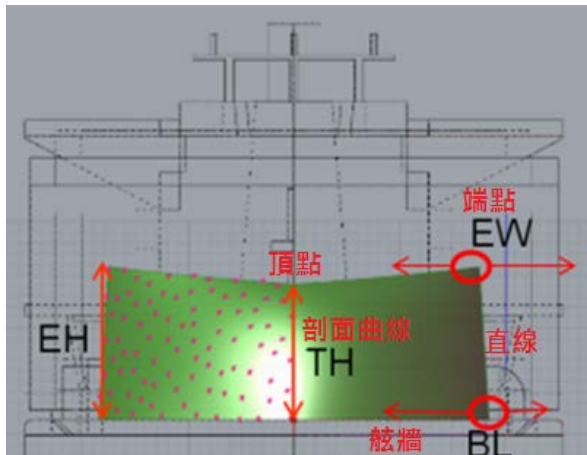


圖 1 NURBS 曲面之邊界線定義

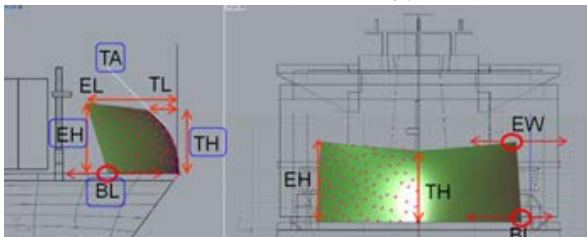


圖 2 導風罩設計之幾何參數

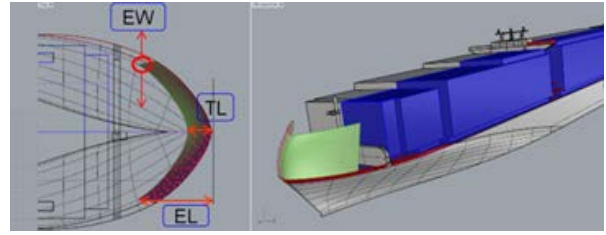


圖 2 導風罩設計之幾何參數(續)

導風罩性能分析

1. 幾何參數分析

透過程式語言可將 Rhinoceros 之參數化導風罩幾何生成與 STAR-CCM+計算軟體兩者整合，配合亂數產生幾何參數和自動執行架構，自動化流程如圖 3 所示。導風罩幾何搭配幾何參數與 Rhino 語法，自動產生曲面，匯入 STAR-CCM+並以 JAVA 語法自動化產生網格與流場物理設定，設定疊代步數，疊代完，產生導風罩風阻力與船體風阻力，作為導風罩減阻比較基礎。此架構可在不需要人為操作下自動計算數百個導風罩設計，評估面積、全船風阻與導風罩風負荷等。將風阻與參數間繪成 XY 圖，如圖 4 所示，即可找出影響風阻的關鍵參數。自動化流程分析 298 個導風罩外形之氣動力性能後，圖 4 顯示關鍵參數為導風罩的高度，7 m 高度有最低的風阻，再加高反而有增阻的不良影響。

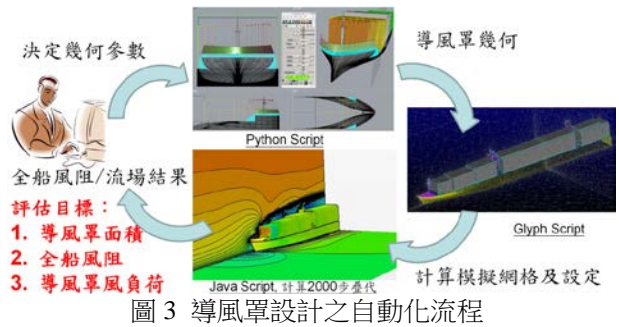


圖 3 導風罩設計之自動化流程

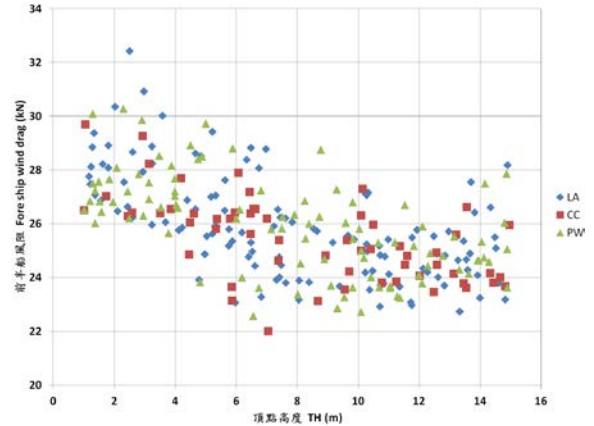


圖 4 導風罩設計之端點參數

2. CFD 設定條件

依計算經驗，入流風速設定為位高靜水面高度 10 m 處之風速為 10 m/s。船體周圍網格如圖 5 所示。在船舶前端入流區有增設加密區，高度方向加密間距為 1 m，船體半船寬 25.5 m，在 Y 方向兩側寬度各 80 m，足以包覆船體寬度，網格分布如圖 5。風速設定是以迎風入流速度為考量，風向是往-X 方向，風速量值在高度方向有指數律公式的分布。圖 6 為偵測點在不同 Y 位置的風速分布，為 X = 555 平面與 Z = 31 平面相交之直線所對應之速度分布。圖 7 為 X=555 平面與不同 Y 平面(Y=0、Y=35 與 Y=100)相交直線的風速數值與指數公式計算數值的比較。位於 Y=0 與 Y=35 平面之數值於圖 4-5 中重疊，僅在 Z 方向介於 15 至 20 間，與公式數值有些微差異，可能原因為底部邊界層影響與靠近底部(Z = 14.5)之網格太疏。Y = 100 平面之數值與公式有較大差異，其原因是 Y=100 平面不在 Z 方向加密區中。依指數公式在 Z = 31 處速度為 10.619 m/s，圖 7 中顯示之平均速度為 10.569 m/s，與公式之誤差為 0.47%。此網格佈置，在靠近船體附近，偵測點之風速分布與公式之風速分布相符。

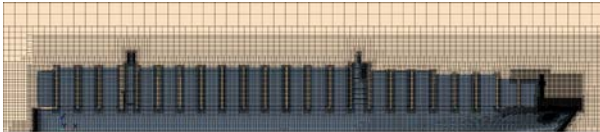


圖 5 船體周圍網格佈置

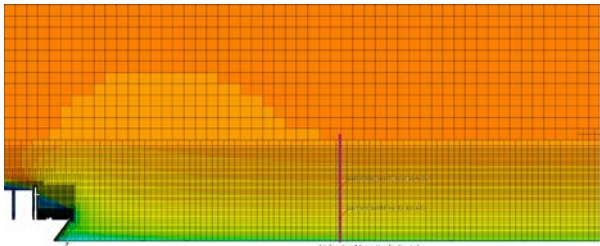


圖 6 入流場速度分布與 Z 方向網格分布圖

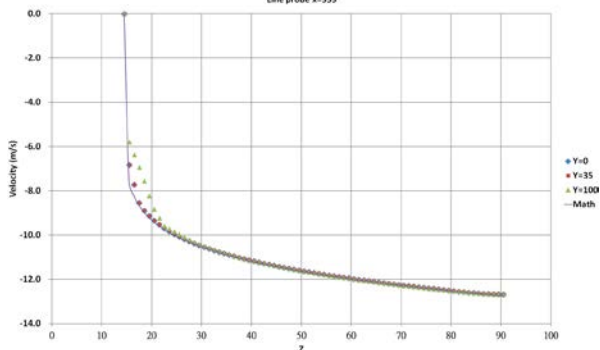


圖 7 不同高度之風速分布圖

導風罩性能計算結果

從自動化設計中發展出兩系列，WS013 與 WSCC04。自動化設計中發現頂點與端點的高度與端點內縮為減風阻重要的影響參數。導風罩 WS51-WS55 系列變化頂點高度與端點高度及頂點角度，側視圖、俯視圖與風阻減阻效果如圖 8 所示。此系列中 WS51 減少風阻有 11.1%，但其頂點高度有 9.5 m，速度風佈與船體壓力如圖 9(上)所示。WS54 減少風阻有 9.9%，頂點高度為 6.75 m。可以發現頂點高度可減少至 6 m 附近，但其減阻效果下降不多，速度風佈與船體壓力如圖 9(中)所示。若頂點高度下降至 5.06 m，WS52 減少風阻僅有 5.5%，減阻效果減少 50%。以頂點高度考量的話，9.5 m 太高，不符合船廠施工需求，因此需以 6 m 的導風罩重新考量。以 WS54 為基礎，討論頂點角度的影響，變化出 WS57 至 WS59。如圖 10 所示，將頂點高度降為 6 m。在此高度下，頂點角度拉接近垂直，對於減少風阻有些微幫助，如 WS58 與 WS59，約有減風阻 7.7%，其風場如圖 9(下)所示。

WS	TH(m)	Wind Drag Reduction (%)
WS51	9.50	11.1
WS52	5.06	5.5
WS53	6.44	7.7
WS54	6.75	9.9
WS55	4.75	4.9

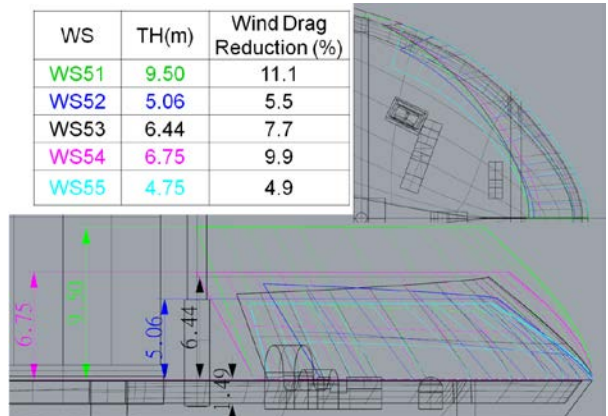


圖 8 WS51 - WS55 導風罩幾何與減阻效果

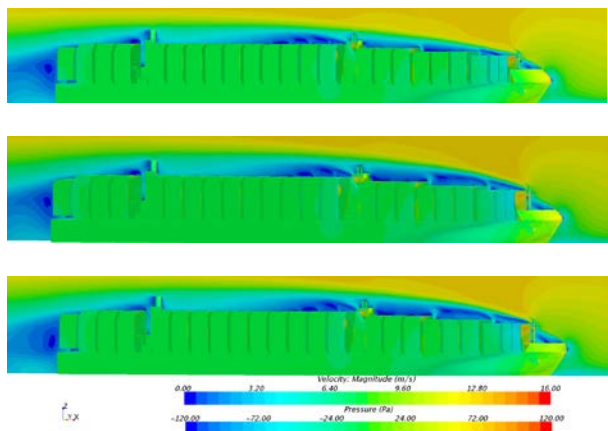


圖 9 WS51 (上)、WS54(中)、WS58(下) 速度分布與船體壓力

從自動化設計中發現 WS013 與 WSCC04 有較好的減風阻效果，皆為端點內縮，分別有 11.9%與 9.8%，但 WS013 端點高度太高，有 11.77 m，如圖 11 所示。降低頂點與端點的高度，變成 WS013-1，其減風阻效果有 8.9%。WSCC04 為端點內縮，但端點高度較頂點高度低，可減少導風罩面積，其減風阻效果 9.8%。將端點做改變，端點加高，變成 WSCC04-1，其減風阻效果 9.9%；端點加高與等寬，即無內縮效果，變成 WSCC04-2，其減風阻效果 7.0%。從此結果可以發現內縮對於減風阻為重要影響參數。各導風罩幾何之減阻效果比較如圖 12 所示。最大減風阻效果約在 12%附近，但限制頂點高度後，最大減風阻效果約在 10%。

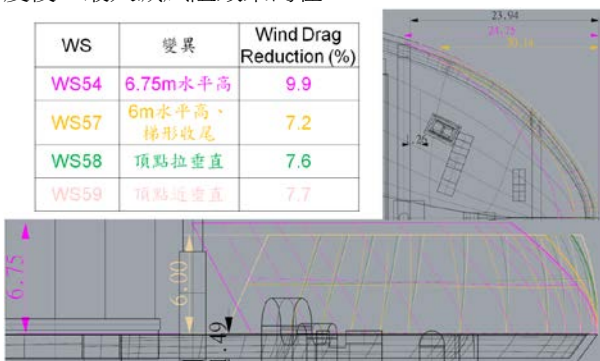


圖 10 WS57-WS59 導風罩幾何與減阻效果

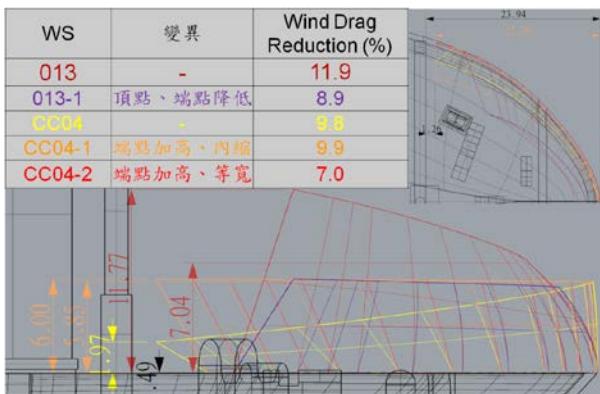


圖 11 WS013 與 WSCC04 導風罩幾何與減阻效果

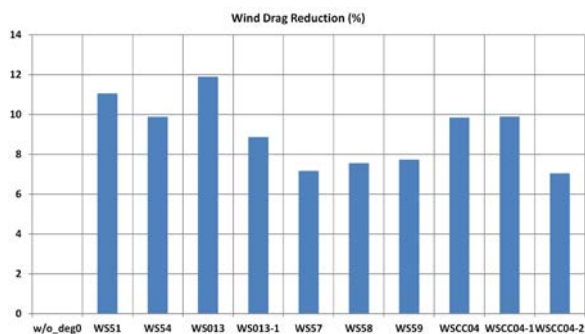


圖 12 迎風 0° 導風罩減風阻效果

將所得設計，重新計算迎風 30° 後，比較如圖 13，選擇 WSCC04-1 導風罩，進行後續不同迎風角度與不同裝載條件之減風阻計算，並以此版本之幾何進行結構規劃與分析。

規範負荷比較

船級規範以船舶安全為主要考量，以船舶生命週期為評估週期，在文獻[1]中提及其量測擋浪牆之壓力範圍為 155 kN/m² ~ 575 kN/m²，若以週期 20 年為考量，可能會高估上浪壓力；若以週期 5 年考量有低估上浪壓力之慮。因此可搭配量測設備，預先以預報警器，提早警示船長修改航向或降低船速，則可以較小的上浪壓力設計擋浪牆強度。

評估完導風罩風阻減阻效果後，結構需符合船級規範之設計壓力要求。以下對多家船級規範進行調查，並比較其設計壓力差異。各船級規範，有兩種相關的規定，一為引用上構(Superstructure)的規定，一為擋浪牆(Breakwater or Wave breaker)的規定。各船級規範在上構的規定均相同。在 DNV-GL、LR、BV 的規範中有擋浪牆的規定；其設計壓力以 DNV-GL 最大，LR 次之，BV 最小，比較如圖 14，圖中 BW 代表擋浪牆。

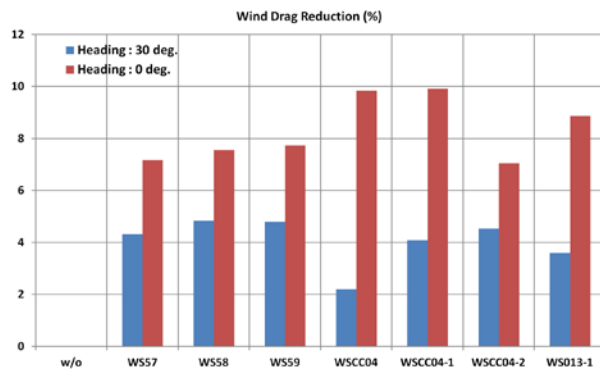


圖 13 迎風 0° 與迎風 30° 導風罩減風阻效果

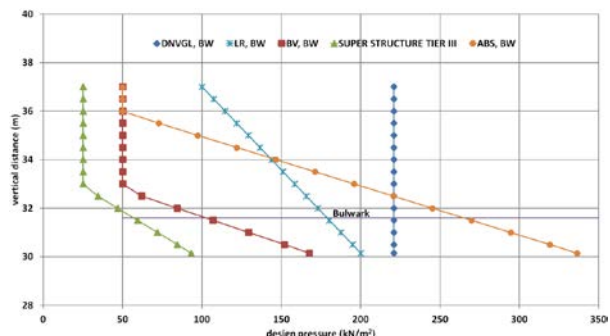


圖 14 不同船級規範之設計壓力比較

結構設計與分析

考量現成船改裝需求，本研究以 LR 擋浪牆負荷進行結構設計，並進行重量估算。由於導風罩所在位置有大量甲板機械，設計時以不影響甲板機械布置為原則。

1. 結構有限元素模型

由於船艙為對稱結構，建立模型時以半邊模型，並於船艙設定對稱之邊界條件。導風罩的板及主支撐構件腹板使用板元素，導風罩上的加強材及主支撐構件面板使用樑元素。導風罩模型建立如圖 15。選擇於 FR150 (擋浪牆位置處)及 NO.2 ADD STR1 為結構較強處設定為固定，船艙處設定為對稱。垂直施加 LR 擋浪牆負荷於導風罩板元素，頂端負荷為 0.0981 N/mm^2 ，底端為 0.1962 N/mm^2 ，如圖 16。

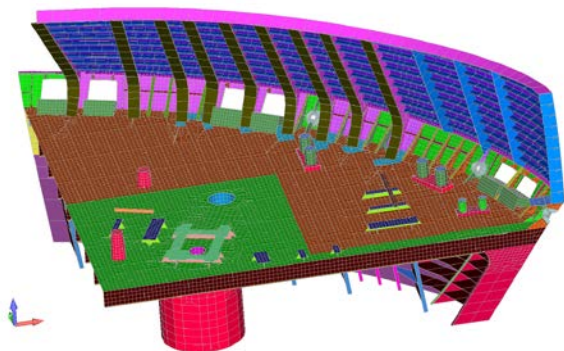


圖 15 導風罩板與樑元素模型

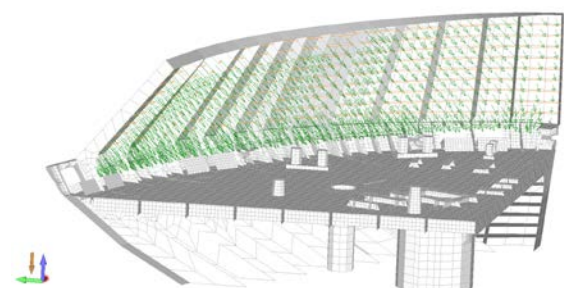


圖 16 LR 規範之擋浪牆負荷

2. 結構分析結果

目標船的船艙及舷牆結構在原先設計時，並無考量到其上方會增加導風罩結構重量。在將導風罩有限元素模型建立在舷牆及甲板上後，舷牆、甲板及下方結構強度明顯不足，必須增加許多結構補強來支撐導風罩的重量及負荷。

主支撐構件寸法為依照 LR 擋浪牆設計程序，使用有限元素法進行結構計算後決定，容許應力為 0.92 倍鋼板降伏強度。導風罩板元素模型應力分布如圖 17，應力皆小於容許應力 289.9 N/mm^2 。

確認主支撐構件寸法後，進行甲板、甲板下方及舷牆的結構加強，加強方式為，先試著增加支撐結構，若無效果，則換板。首先補強位於 18 支後方較大之主支撐構件下方之結構，其作用為承受主支撐構件受彎矩作用下，施加於甲板的面外力，並將負荷傳遞至強度較強之船側板上，如圖 17 紅圈圈選處。

確認主支撐構件下方補強結構腹板厚及面板寸法後，檢視甲板下其餘結構應力值，進行大範圍的縱樑、大肋骨的結構補強，以最低施工與空間變動為原則。補強方式為先加深深度以提高面外剖面模數，若無效果，再進行換板。舷牆及甲板上應力過大處，換成淨厚度 24 mm 及 36 mm 之鋼板。舷牆上前五個開口四周加上淨厚度 $150 \times 14 \text{ mm}$ 之面板以減少洞口變形。結構加深及換板處如圖 18 橘紅色元素。補強後甲板下方結構應力分布皆小於容許應力 289.9 N/mm^2 。

所有新增結構皆使用 AH32 高張力鋼板，以提高容許應力。導風罩本體和主支撐構件之結構重量及增加補強結構重量如表 2。

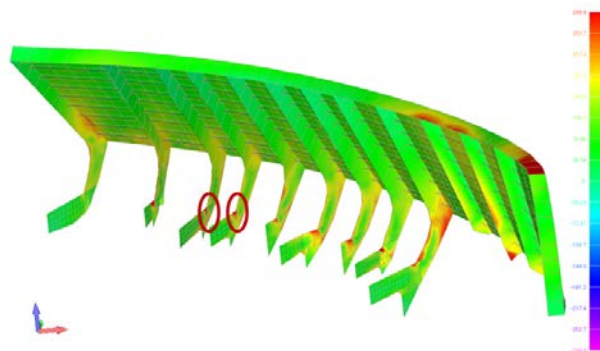


圖 17 主支撐構件下方補強結構應力分布

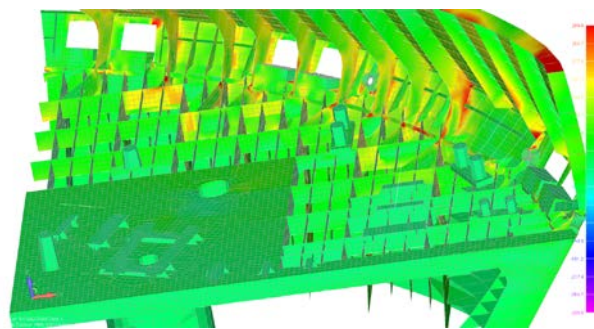


圖 18 甲板下方結構應力分布

結論

本研究母船為 14000TEU 貨櫃船，將導風罩幾何參數、面網格生成與 STAR-CCM+計算整合成一自動執行程式，藉此於短時間內比較較多導風罩幾何。導風罩的頂點高度與頂點角度是兩個關鍵參數，頂點高度愈高，減阻效果愈好，礙於重量限制，需在減風阻效果與結構重量間取捨。導風罩外形設計定案於頂點高度 6 m，設計導風罩 WSCC04-1，在迎風 0 度時，其減風阻效果約有 10%；在迎風 30 度時，其減風阻效果約有 4%。綜合各種迎風角度與不同貨櫃裝載條件，導風罩在 14000TEU 貨櫃船上的總阻力減阻約有 1%~3%的效果。

表 2 導風罩重量及增加補強重量

導風罩重量	177.32 t
增加補強重量	36.67 t
總增加重量	213.99 t

以擋浪牆負荷設計導風罩，使導風罩兼具減阻及擋浪的能力，則可考慮拆除現有擋浪牆，使得重量不致增加太多。針對兩個版本的導風罩進行結構分析。考量研究母船之現有船級，使用 LR 擋浪牆

負荷進行導風罩結構設計與分析。LR 擋浪牆負荷僅次於 DNV-GL，在結構上使用 18 支後方較大之主支撐構件及前方 7 支較小之主支撐構件，並於甲板下方及舷牆增加補強結構，導風罩結構重量達 177.32 t，增加的補強結構重量為 36.67 t，總重量為 213.99 t。扣除船上原有擋浪牆重量後淨增加約 150 t。此結構計算結果，尚無進行輕量化結構分析，實際建造須採用時，可再進一步探討結構輕量化，以獲取更佳之結構設計。若須確認細部設計如主支撐構件的端部連接及導風罩與舷牆連接處的強度，可再建立局部細網格模型來進行結構分析。

參考文獻

1. L. J. M. Adegeest, B. E. Hoogerbrugge, M. Schiere, "Breakwaters on containerships: case study to estimate loads and strength," SNAME annual meeting & Expo and Ship Production Sym., 2009.
2. DNV-GL Rules for Classification: Ships, 2016.
3. BV Rules for Classification of Steel Ships, 2016. (NR467)
4. LR Rules and Regulations for the Classification of Ships, 2016.
5. CR Rules for the Construction and Classification of Steel Ships, 2013.

Energy-saving Wind Shield Design and Structural Analysis for a Large Containership

Tsung-Yueh Lin^{*1} *Chi-Chuan Chen*^{*} *Po-Kai Liao*^{*}
Hsin-Hsien Chou^{**} *Chen-Yue Lin*^{**} *Min-Mei Shih*^{**}

^{*}R/D Section, Research Department, CR Classification Society, Taiwan

^{**}Department of Design, CSBC Corporation, Taiwan

Keywords: Wind Shield, Containership, Energy-saving Device, Structural Design

ABSTRACT

Breakwaters on containerships are intended to block green water on the deck and protect fore containers. The shape is usually a simple vertical plate, thus having high wind resistance due to being unstreamlined. The proposed wind shield, which may be an alternative to breakwaters, is equipped on the bulwark and designed to reduce wind drag, block green water, and prevent workers on fore deck from falling down. This project uses a 14000TEU containership as the target, and builds up a parametric geometry design procedure, which is integrated with CFD software to conduct a parametric study. An optimal design was selected based on its performance and minimum height. Regarding the green water loads on the wind shield, this study collected design loads for breakwaters from four rules and used finite element analysis to determine the plate thickness and dimensions of the primary supports. After finishing the detailed design, including the wind shield body, primary support members and stiffeners, which comply with Lloyd's Register Rules, the total weight was then calculated for construction cost prediction. As a compromise between aerodynamic performance and weight, the final design, with 6 m height, can reduce wind drag by 9.9%, and subtracting the original breakwater, the weight gain is 150 tons.