

# 鋁合金雙體船結構碰撞分析

曾郁安<sup>1</sup> 林均達 林宗岳 李雅榮

財團法人驗船中心

關鍵詞：雙體船、船舶碰撞、有限元素法、計算流體力學

## 摘要

航行事故以船舶之間的碰撞為數最多。為了降低船舶在碰撞過程造成的結構破壞，引致貨品損失或人員傷亡，本文旨探討鋁合金高速雙體船之船體結構與他船發生碰撞時之抗撞能力。本文先透過計算流體軟體 Star-CCM+ 模擬撞擊瞬間 600 噸雙體船的附加質量與阻尼係數，並將其配置於船體結構上。接著以有限元素軟體 Abaqus 進行顯式動態分析雙體船左舷結構，並針對碰撞區域細化元素，鋁合金材料的設定則是包含了彈性、塑性和破壞力學模型。他船設定為 100 噸鋼製漁船，碰撞條件假定雙體船舭處側邊遭到漁船以不同船速撞擊，撞擊角則設為穿透破壞現象最大的兩船夾角 90 度。不同碰撞速度下觀察船體結構其外板、橫向艙壁、縱向與橫向大肋骨等構件在撞擊過程的變形與破壞等現象，以此分析撞擊凹陷深度與抗撞能力。

## 前言

根據歐洲海事安全局的統計資料[1]，從 2011 到 2018 年之間，海事意外中航行事故占了 54.4%。當中又以兩船之間的碰撞為數最多，占了 26.2%，也造成了最多的人員傷亡。其次，船舶和其他物體碰撞占了 15.3%，觸礁和擱淺占了 12.9%。由此可知船舶航行的過程中是有相當大的機會由於碰撞造成結構破壞，了解碰撞過程的現象對於提升船體結構抗撞能力是相當重要的。

船舶的運動速度雖不及其他交通工具，但質量卻相對龐大。在碰撞時的動能轉換，可能造成大範圍的結構損壞。尤其是一船之船艏撞擊他船時，由於船艏通常是結構較堅硬且尖銳的地方，常造成他船的損傷；又尤其是鋁合金船與鋼船相撞時，由於材料強度上的差異，常造成鋁合金船相當嚴重的破壞。因此本文針對鋁合金高速雙體船之船體結構遭到鋼製他船以船艏碰撞進行分析。

碰撞條件假定雙體船(以下稱被撞船)左舷船舭處側邊遭到較小噸位鋼船(以下稱撞擊船)船艏撞擊，撞擊角則設為穿透破壞現象最大的兩船夾角 90 度。由於船體結構複雜，且運動時挾帶著流體慣性力，因此建立被撞船完整的左舷結構，並針對碰撞區域細化元素；再透過計算流體軟體模擬被撞船的附加質量與阻尼，並將其配置於船體結構上，撞擊

船再以不同船速撞擊，以此分析撞擊凹陷深度與抗撞能力。

## 船舶碰撞之力學現象

船舶碰撞為一非常複雜的力學問題。在船舶外部系統中，探討碰撞時的力平衡問題，需考慮兩船碰撞時的力傳遞與運動，而且船舶在海上並非固定，也需考慮流體造成的水動力與附加質量。在船舶內部系統中，探討結構受力後的行為，碰撞的能量會導致被撞結構產生大變形和破裂等現象，因此需模擬結構材料的彈性、塑性和破壞力學模型。而能量在整個系統中會不停轉換，從初始的動能逐漸轉變為兩船運動和摩擦消散的能量、結構變形和破壞的內能等。

### 1. 外部動力系統

一般的單自由度運動系統的運動方程式如下：

$$F = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = ma + cv + kx \quad (1)$$

其中， $F$  為外力、 $m$  為質量、 $c$  為阻尼係數、 $k$  為彈性係數， $x$  為位移。在船舶運動中，包含六向自由度且受流體附加質量影響，在不考慮水彈性的條件下，可用以下方程式表示：

$$F = (M + M_A)\dot{U} + cU \quad (2)$$

其中， $F$  為外力矩陣， $M$  為質量和轉動慣量矩陣， $c$  為阻尼和轉動阻尼矩陣， $U$  為速度和角速度矩陣。

<sup>1</sup> yatzeng@crclass.org

由於包含六自由度，式中每一項皆擴充為矩陣，例如 $U$ 的表示如下：

$$U = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4 \ U_5 \ U_6]^T \quad (3)$$

$U_i$ 之定義為 $i$ 方向的速度/角速度， $i$ 為 1、2、3 表示 x、y、z 方向移動，即為縱移、橫移、起伏；為 4、5、6 表示 x、y、z 方向旋轉，即為橫搖、縱搖、平擺。增加的 $M_A$ 為附加質量和附加轉動慣量矩陣，表示如下：

$$M_A = \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{61} & \cdots & m_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中， $m_{ij}$ 之定義為 $j$ 方向的單位加速度造成 $i$ 方向的附加質量/轉動慣量，例如： $m_{62}$ 即為橫移運動所產生平擺方向的附加質量。在 $i$ 和 $j$ 是 1 到 3 的範圍下， $m_{ij}$ 的單位為質量(kg)；在 $i$ 和 $j$ 是 4 到 6 的範圍下， $m_{ij}$ 的單位為轉動慣量(kg·m<sup>2</sup>)；其他項單位皆為質量與長度的乘積(kg·m)。考量撞擊分析過程中受撞擊船初始狀態靜止且兩船碰撞的時間極短，可忽略自由液面效應對附加質量與阻尼係數的影響，並假設船體附加質量與阻尼係數為定值，則上述附加質量矩陣 $M_A$ 視為對稱矩陣，且與船體的對稱性無關：

$$m_{ij} = m_{ji} \quad (5)$$

對於左右對稱的雙體船，任何由於起伏或縱搖的橫截面垂直運動所引起的流場都圍繞中心面對稱，船體兩側水動力的水平分量大小相等方向相反，使得該垂直運動不會產生橫向力，因而可得：

$$m_{32} = m_{34} = m_{36} = m_{52} = m_{54} = m_{56} = 0 \quad (6)$$

並由於附加質量矩陣對稱：

$$m_{23} = m_{43} = m_{63} = m_{25} = m_{45} = m_{65} = 0 \quad (7)$$

縱向運動也可以採用相同的論點，該運動也會產生對稱的流場，因此：

$$m_{12} = m_{21} = m_{14} = m_{41} = m_{16} = m_{61} = 0 \quad (8)$$

此外，碰撞條件假定為雙體船左舷船舭處遭到撞擊，對縱移、起伏和縱搖運動影響較小，且雙體船本身擁有較好的抗橫搖能力，因此在撞擊分析過程中僅考量影響較大的橫移和平擺方向之運動：

$$U_1 = U_3 = U_4 = U_5 = 0 \quad (9)$$

由此，附加質量矩陣元素 $m_{ij}$ 中含有縱移、起伏、橫搖和縱搖方向之項目可忽略不計，上述式(2)可簡化為：

$$\begin{bmatrix} F_2 \\ M_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{22} + \Delta & m_{26} \\ m_{62} & m_{66} + I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{U}_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_2 & 0 \\ 0 & c_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ U_6 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 $F_2$ 為雙體船在橫移方向之受力(N)， $M_6$ 為雙體船在平擺方向所受之力矩(N·m)， $\Delta$ 為雙體船排水量， $I_z$ 為雙體船在平擺方向的轉動慣量；本文將藉由式(10)，使用計算流體力學軟體 STAR-CCM+，對被撞船進行橫移等加速度和平擺等角加速度的強制運動模擬，於運動過程中量測船體受力與船速的相對關係，以此計算船體在該運動方向的附加質量

與阻尼係數，並施加在結構模型上。但橫移和平擺偶合之附加質量 $m_{26}$ 、 $m_{62}$ 無法在有限元素法中模擬，僅對角線項附加質量可以施加在結構模型上，因此在有限元模擬中假設各個方向運動沒有耦合關係。由於忽略了非對角線項的附加質量，因此在這個條件下計算出的運動量會較實際的大，詳細的計算流程參見下一章節。

## 2. 內部材料系統

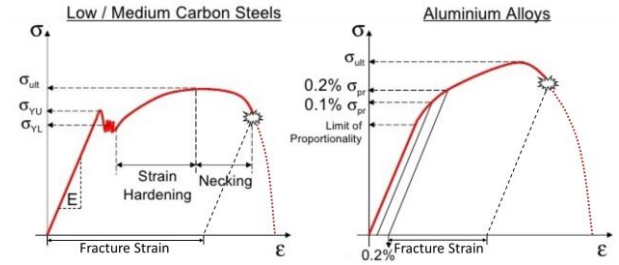


圖 1 鋼與鋁合金的應力-應變曲線

材料特性可以透過單軸拉伸試驗所得的應力-應變曲線(如圖 1)來得到，曲線的不同階段有不同的特性，也有不同的機械性質。第一階段是彈性變形階段，此階段的應力和應變成正比，其斜率即為楊氏模量 $E$ ，此階段的結束是塑性變形的開始，該點的應力即為降伏強度 $\sigma_Y$ 。接下來的塑性變形，包含了第二和第三階段，這兩階段的應變在外力釋放後不能完全恢復，也就是有永久應變產生。而由於鋁合金的降伏點並不明顯，通常以 0.2% 永久應變對應的應力作為降伏強度。第二階段是應變硬化階段(Strain Hardening)，此階段隨著應力上升，斜率逐漸變小，直到極限強度，在相同增加應變下能抵抗更大應力的效應就是應變硬化。第三階段是頸縮階段(Necking)，應力超過極限強度後，會出現頸縮現象，也就是截面積明顯變小，但單軸拉伸試驗無法考慮截面積的變化，因此應力會隨著應變增加而減少，此階段的結束即是材料斷裂。最後的階段即是斷裂階段，材料斷裂時的應變為破裂應變(Fracture Strain)，斷裂後的材料在工程應用上常將可承受位移或能量設為極小值來描述材料破壞後就無法再承受應變或應變能。

然而僅憑一次的單軸拉伸試驗仍有無法考慮到的材料特性。第一是柏松比和頸縮造成截面積的變化。在假設截面積不變的條件下所得的應力-應變曲線稱為「工程應力-應變曲線」，也就是單軸拉伸試驗所得的，而考慮真正截面積變化的應力-應變曲線稱為「真實應力-應變曲線」，也是實際上有限元素法中所需的計算參數，目前常用來轉換工程和真實應力、應變的表達式[2]如下：

$$\sigma_{true} = \sigma_{eng} \cdot (1 + \epsilon_{eng}) \quad (11)$$

$$\epsilon_{true} = \ln(1 + \epsilon_{eng}) \quad (12)$$

其中， $\sigma_{eng}$ 、 $\varepsilon_{eng}$ 分別為工程應力和應變， $\sigma_{true}$ 、 $\varepsilon_{true}$ 分別為真實應力和應變。第二是應變率的影響。應變率定義為單位時間的應變變化量，而應變率對材料影響不盡相同，必須由材料試驗得知。以鋼而言，應變率在彈性階段影響不大，但隨著應變率增加會造成降伏強度與極限強度提高，也對挫曲變得更加敏感。應變率對降伏應力的影響通常由 Cowper-Symonds[3]公式模擬，如下：

$$\frac{\sigma_{Yd}}{\sigma_Y} = 1.0 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^{1/q} \quad (13)$$

其中， $\sigma_{Yd}$ 為動態降伏應力， $\sigma_Y$ 為靜態降伏應力， $\dot{\varepsilon}$ 為應變率， $C$ 和 $q$ 皆為 Cowper-Symonds 係數。第三是應力三軸度的影響。應力三軸度 $\eta$ 是常作為表達應力狀態的參數，也是影響結構失效的參數，其定義如下：

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} = \frac{\text{Hydrostatic Stress}}{\text{Von Mises Stress}} \quad (14)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (15)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} - \sigma_{22}\sigma_{33} - \sigma_{33}\sigma_{11} + 3\sigma_{12}^2 + 3\sigma_{23}^2 + 3\sigma_{31}^2}{2}} \quad (16)$$

是由能反映結構體積改變 (Volumetric Deformation) 的 $\sigma_m$ 和形狀改變(Deviatoric Deformation) 的 $\sigma_{eq}$ 來得到。當難以得到詳細材料參數時常會採用簡化模型，以單軸拉伸試驗，也就是 $\eta = 0.33$ 時之破裂應變，作為整個應力三軸度的破裂應變，如圖 2。

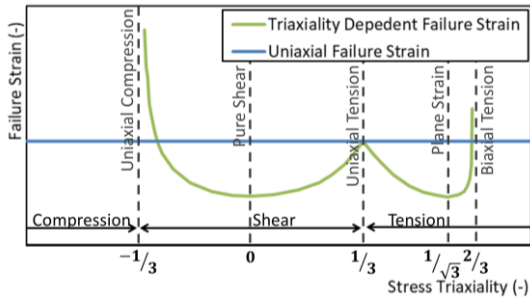


圖 2 應力三軸度對破裂應變的影響

第四是試片大小的影響。單軸拉伸試驗的總應變量 $\varepsilon_t$ 可視為均勻應變 $\varepsilon_u$ 和由於頸縮造成局部變形量 $\delta$ 的局部應變 $\delta/L$ 之和，如式(17)。從式中也可以看到標距長度 $L$ ，也就是試片大小會影響總應變量。

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\varepsilon_u L + \delta}{L} = \varepsilon_u + \frac{\delta}{L} \quad (17)$$

Barba[4]透過半經驗方法得到局部變形量 $\delta$ 的關係式，代入式(17)便可得到單軸拉伸試驗中應變與標距之間的關係稱為 Barba's law，如下式及圖 3：

$$\delta = c\sqrt{A_0} = c\sqrt{Wt} \Rightarrow \varepsilon_t = \varepsilon_u + c\frac{\sqrt{Wt}}{L} \quad (18)$$

其中， $\varepsilon_t$ 為總工程應變， $\varepsilon_u$ 為均勻應變， $c$ 為 Barba 常數， $W$ 為試片寬度， $t$ 為試片厚度， $L$ 為標距長

度。將標距長度換成元素尺寸後，此方程式也可以用來表示有限元素法中元素大小對破裂應變的影響。然而大多的文獻皆是針對鋼材進行元素大小的比較，並沒有找到適合鋁合金的參數，因此本文不考慮元素大小對破裂應變的影響，在這樣條件下的計算結果是較為保守的。

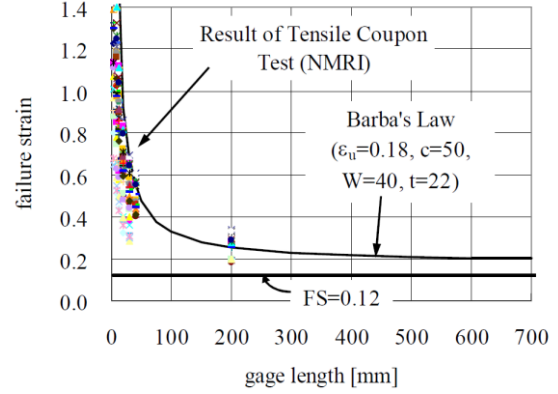


圖 3 元素大小對破裂應變的影響[5]

### 3. 能量守恆系統

在碰撞開始前被撞船為靜止不動，撞擊船以初始船速前進，因此整個計算中的總能即為撞擊初始時撞擊船的動能 $E_{KE,0}$ ，如式(19)，也就是說總能會跟撞擊船質量 $m_{FB}$ 和初始船速 $v_0$ 的二次方成正比。在碰撞過程中，總能維持守恆，撞擊船動能逐漸轉變為結構變形和破壞的內能、阻尼和摩擦消散的能量、被撞船開始運動的動能，如式(20)。其中， $E_{TOT}$ 為總能； $E_I$ 為內能； $E_V$ 為阻尼消散能； $E_{FD}$ 為摩擦消散能； $E_{KE}$ 為動能。在碰撞結束後，摩擦消散能與內能不再變化，剩餘動能由阻尼逐漸消散直到船舶靜止，動能為零。而內能 $E_I$ 包含了材料彈性應變能 $E_E$ 、塑性消散能 $E_P$ 、破壞消散能 $E_D$ 、人造應變能 $E_A$ ，如式(21)。人造應變能是由於沙漏化現象(Hourglass Effect)，為維持計算穩定加入，但應只占內能的小部分，計算結果才可採用。

$$E_{TOT} = E_{KE,0} = \frac{1}{2} \cdot m_{FB} \cdot v_0^2 \quad (19)$$

$$E_{TOT} = E_I + E_V + E_{FD} + E_{KE} \quad (20)$$

$$E_I = E_E + E_P + E_D + E_A \quad (21)$$

沙漏化現象是指當元素只有一個積分點，在受彎時周邊的節點可以隨意變形，此時此元素沒有任何剛度，無法抵抗變形，但該積分點沒有任何的應變，產生有變形卻沒應變的現象，如圖 4 所示，圖 4 為一階減積分和一階全積分元素受彎曲下的比較，圖中紅點為積分點。在有限元素計算軟體中提供人造的沙漏剛度來解決這個現象，因此人造應變能如果太大即表示不符合實際物理現象，此時可以調整和細化網格或使用不同的元素種類，如一階全積分元素或二階元素來避免這個問題。



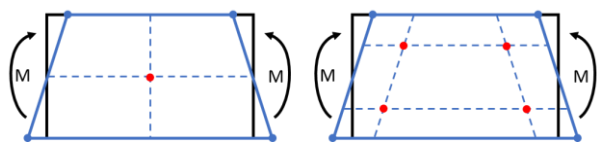


圖 4 一階減積分、全積分元素受彎曲下的行為

## 分析設定

### 1. 分析方法

由於船舶外型各異、結構複雜，而具問題特殊性，必須針對個案進行假設，才能更接近現實進行模擬。因此先以計算流體軟體 Star-CCM+分析，計算撞擊瞬間被撞船的附加質量與阻尼。接著建立被撞船左舷結構及撞擊船船艙結構，針對碰撞區域細化元素，並將附加質量與阻尼配置於船體結構上。最後以有限元素軟體進行分析，由於碰撞是高度非線性的問題，其包含了材料的塑性和破壞、接觸的偵測和分析，因此採用 Abaqus 顯式動態分析進行模擬。Abaqus 顯式動態分析特別適用於模擬高度非線性瞬態動力學問題，因為它擁有處理接觸、材料嚴重變形和失效、其它非線性和不連續行為的能力，且其計算效率高、穩定收斂性高。分析條件包含了計算模型、碰撞、材料係數和流體動力係數的設定，分別在接下來說明。

### 2. 計算模型

被撞船為 600 噸級鋁合金高速雙體船，撞擊船是一艘假想的 100 噸低碳鋼製單體船，兩船的主要尺寸列於表 1。

表 1 兩船主要尺寸

	符號	單位	被撞船	撞擊船
全長	$L_{OA}$	m	65.4	26
垂標間距長	$L_{BP}$	m	62.0	-
水線長	$L_{WL}$	m	60.7	-
模寬	$B$	m	14.8	4.1
模深	$D$	m	6.2	3.5
模吃水	$d$	m	2.1	2
排水量	$\Delta$	ton	666	100
最大船速	$v$	knot	35	-

被撞船的撞擊位置是橫肋號 62(Fr.62)與舷側縱材號 8(S8)下方 30mm，因此以此為中心，網格加密範圍 x-方向從橫肋號 56 到 68(Fr.56-68)、y-方向從船殼到甲板縱材號 11(L11)、z-方向從舷側縱材號 16(S16)到船底縱材號 8(B8)，網格大小每一個嵌板需要 8 個網格，得到加密區域網格大小約 50mm，而在加密區域外可採用每一個嵌板為一個網格，網格皆採用一階全積分元素來避免沙漏化現象，計算模型和詳細的加密網格如圖 5 和圖 6。

撞擊船則針對船艙最前方兩個艙建立細部結構，內部參考相當尺寸船的一般結構佈置，後方船體只有船殼不建立內部結構，計算模型如圖 7。

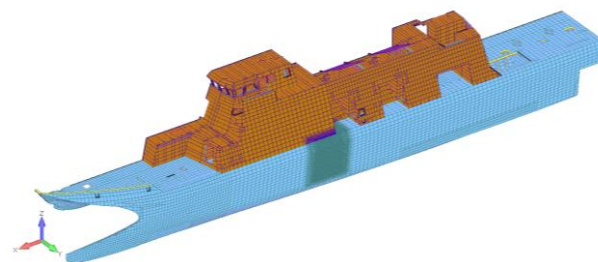


圖 5 被撞船模型與船艙網格加密範圍

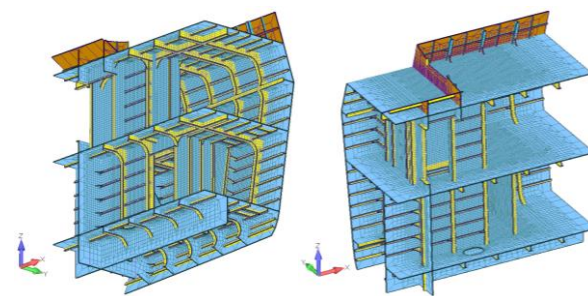


圖 6 被撞船船艙加密網格

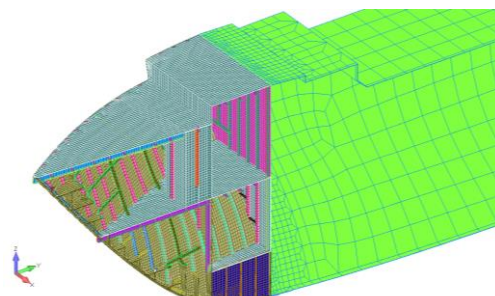


圖 7 撞擊船模型與船艙加密網格

### 3. 撞擊條件

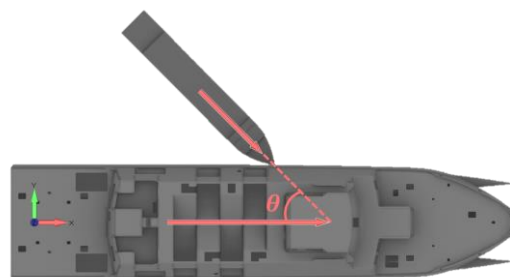


圖 8 撞擊角的定義

撞擊初始條件設定兩船間有 20mm 的距離，被撞船為靜止不動，而撞擊船以初始船速向被撞船船艙前進。被撞船的運動假設僅有橫移(Sway)和平擺(Yaw)，撞擊船則不限制運動方向。撞擊船不考慮其水動力係數，兩船間亦無水動力交互作用。撞擊角的定義為被撞船與撞擊船前進方向的夾角，如圖

8，在本文中設為穿透破壞現象最大的 90 度，兩船之間設定接觸來傳遞受力，並設定鋁合金和鋼之間的摩擦係數為 0.47[6]。

#### 4. 材料係數

被撞船所使用材料是耐蝕鋁合金，撞擊船使用的是低碳鋼。如上一章之材料特性所述，材料的設定須包含彈性、塑性和破壞力學模型，詳細的材料係數列於表 2，當中降伏應力、破裂應力、破裂應變皆是根據 CR 鋼船建造與入級規範[7]定義。鋁合金和低碳鋼的應力-應變比較如圖 9，從圖中可以看到鋁合金採用接近實際應力-應變曲線的模型，低碳鋼採用雙線性模型，兩種材料的降伏係數相差不多，但低碳鋼的極限強度和破裂應變高出許多。

表 2 材料係數

	符號	單位	鋁合金	低碳鋼
密度	$\rho$	ton/mm <sup>3</sup>	2.66E-9	7.85E-9
楊氏模量	$E$	N/mm <sup>2</sup>	71000	210000
柏松比	$\nu$	-	0.33	0.3
降伏應力	$\sigma_Y$	N/mm <sup>2</sup>	220	235
降伏應變	$\epsilon_Y$	-	2E-3	1.12E-3
工程破裂應力	$\sigma_{F Eng}$	N/mm <sup>2</sup>	305	400
真實破裂應力	$\sigma_{F True}$	N/mm <sup>2</sup>	335.5	488
工程破裂應變	$\epsilon_{F Eng}$	-	0.1	0.22
真實破裂應變	$\epsilon_{F True}$	-	0.0906	0.1965
Cowper-Symonds 係數	$C$	1/s	6500	40.4
	$q$	-	4	5

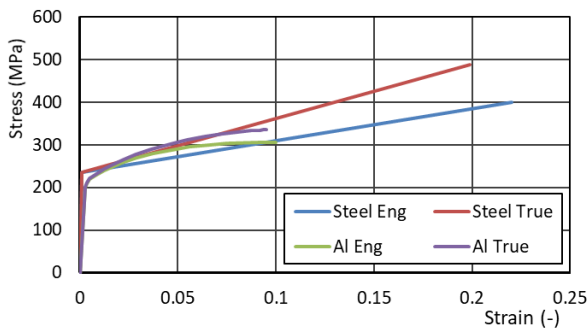


圖 9 鋁合金和低碳鋼的應力-應變曲線比較

#### 5. 流體動力係數

為計算撞擊瞬間受撞擊雙體船的附加質量與阻尼，本研究使用計算流體力學軟體 STAR-CCM+，對被撞船進行等加速度和等角加速度的強制運動模擬，並於模擬過程中量測船體受力與船速的相對關係，再藉由式(10) 計算船體在該運動方向的附加質量與阻尼係數。

##### 5.1 被撞船模型幾何參數

上述表 1 為被撞船計算模型幾何參數，計算上採用全船模型進行。依據原廠提供之線型圖，再利

用 3D 曲面建構軟體 Rhinoceros 所繪製的被撞船全船模型。

##### 5.2 CFD 計算條件設定

計算上依據碰撞條件使靜止於水面上之被撞船強制做一橫移等加速度運動(1 m/s<sup>2</sup>)以及一平擺等角加速度運動(0.04 rad/s<sup>2</sup>)，忽略船體自身慣性影響，並採用無黏性流，排除船體摩擦力對水體的影響，且以流體體積法(Volume of Fraction, VoF) 追蹤流體界面，除此無任何波浪或其他入流干擾，模擬上使用暫態求解器(Transient State Solver)進行求解，考量撞擊分析過程中被撞船初始狀態靜止且兩船碰撞的時間極短，可忽略自由液面效應對附加質量與阻尼係數的影響，假設船體附加質量與阻尼係數為定值。

##### 5.3 CFD 邊界條件設定

本研究在被撞船於靜水下的等加速度運動模擬上採用重疊網格法(Overset Mesh)，並於水面範圍及船體運動範圍進行網格細化，總網格數約為四千五百萬，計算域邊界條件的設定如圖 10 所示。位於船體前後及側方壁面採用速度入流(Velocity Inlet)條件；船體上方壁面採用壓力出口(Pressure Outlet) 條件；計算域下方壁面採用光滑壁面(Slip Wall) 條件；船體表面則採用無滑移壁面條件。

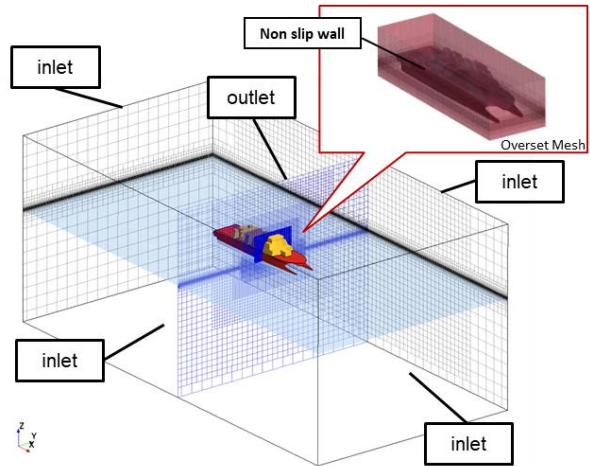


圖 10 邊界條件示意圖

##### 5.4 CFD 附加質量與阻尼係數計算

藉由式(10) 計算船體在該運動方向的附加質量與阻尼係數，以此計算船體在該運動方向的附加質量與阻尼係數；由於模擬過程中僅對單一橫移方向或單一平擺方向做強制等加速度運動，式(10)中可忽略 $\Delta$ 和 $I_z$ 的影響，將其簡化為橫移方向的運動方程式：

$$F_2 = m_{22}\ddot{U}_2 + c_2U_2 \quad (22)$$

以及平擺方向的運動方程式：

$$M_6 = m_{66}\dot{U}_6 + c_6U_6 \quad (23)$$

並於模擬過程中量測被撞船受力與橫移速度，以及被撞船所受力矩與平擺角速度的相對關係，如圖 11-1、圖 11-2 所示：

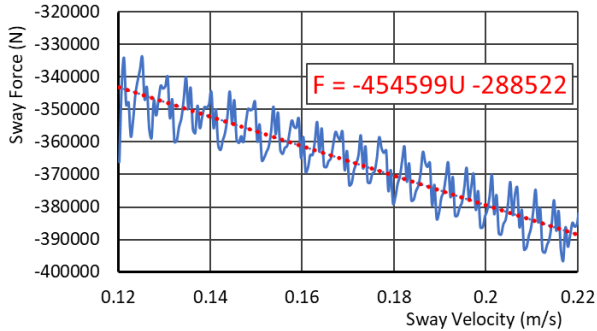


圖 11-1 被撞船橫移方向受力與船速的相對關係

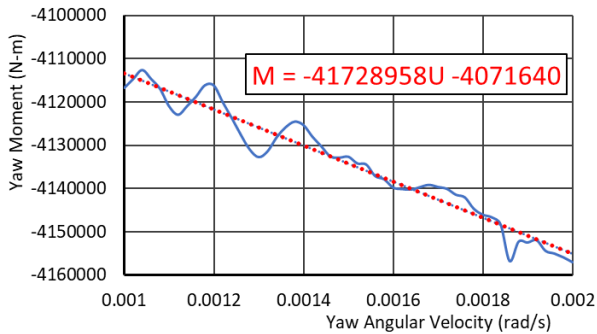


圖 11-2 被撞船平擺方向力矩與角速度的相對關係

圖 11-1 中橫軸為被撞船橫移速度，縱軸為被撞船橫移方向受力，兩者經線性回歸分析後可得：

$$F_2 = -288522 - 454599 U_2 \quad (24)$$

圖 11-2 中橫軸為被撞船平擺角速度，縱軸為被撞船平擺方向所受之力矩，兩者經線性回歸分析後可得：

$$M_6 = -4071640 - 41728958 U_6 \quad (25)$$

將上述式(24)、式(25)以及其加速度( $1 \text{ m/s}^2$ )和角加速度( $0.04 \text{ rad/s}^2$ )代入式(22)、式(23)此時可得到附加質量 $m_{22}$ 、阻尼係數 $c_2$ 、附加轉動慣量 $m_{66}$ 和轉動阻尼係數 $c_6$ ，如下表 3 所示。由於忽略了非對角線項的附加質量，因此在這個條件下計算出的運動量會較實際的大，也就是船舶的結構變形會被低估。

表 3 流體動力係數

		單位	被撞船
y-方向平移	附加質量	ton	288.5
	阻尼	ton/s	454.6
z-方向旋轉	附加轉動慣量	ton·mm <sup>2</sup>	1.018E+11
	轉動阻尼	ton·mm <sup>2</sup> /s	4.173E+10

## 分析結果

### 1. 碰撞過程能量變化

首先觀察碰撞過程的能量變化，以初始船速為 10 節為例，如圖 12，圖 12-1 為計算開始時的細部變化圖，時間為 0 到 0.025 秒；圖 12-2 為整個計算過程的變化圖，時間為 0 到 1 秒，碰撞過程在 1 秒內已經結束，因此 1 秒之後的變化不進行探討。

把碰撞過程分成不同階段來探討碰撞的現象：

第一段：

- ◆ 撞擊船向被撞船移動，但尚未接觸到被撞船，因此能量還沒發生變化。

第二段：

- ◆ 撞擊船開始接觸被撞船，被撞船開始移動，阻尼消散能增加，兩船產生彈性變形，彈性應變能增加，人造應變能也隨之增加，內能增加，總動能開始減少。

第三段：

- ◆ 很快的兩船達到降伏強度，塑性變形開始產生，塑性應變能增加，內能持續增加，總動能持續減少。

第四段：

- ◆ 結構開始產生破壞，破壞消散能增加，彈性應變能因為部分結構斷裂而釋放，但其他結構仍持續產生變形，塑性應變能和內能仍持續增加，總動能持續減少。

第五段：

- ◆ 撞擊船繼續前進，開始和破裂的結構產生摩擦，摩擦消散能增加，因為結構變形和斷裂，彈性應變能不斷起伏，而塑性應變能仍持續增加，內能持續增加，總動能持續減少。

第六段：

- ◆ 凹陷深度到達最深，塑性消散能、破壞消散能維持不變，彈性應變能和部分人造應變能因碰撞過程結束被釋放，結構留下塑性變形和破裂。

第七段：

- ◆ 兩船的相對位移達到穩定，內能包括材料彈性應變能、塑性消散能、破壞消散能、人造應變能和摩擦消散能皆不再變化，剩餘動能由阻尼逐漸消散，直到船舶靜止。



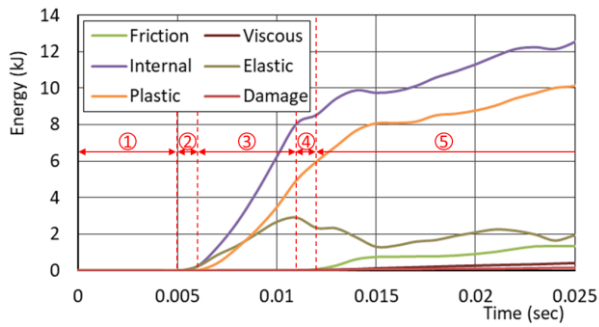


圖 12-1 碰撞過程能量變化

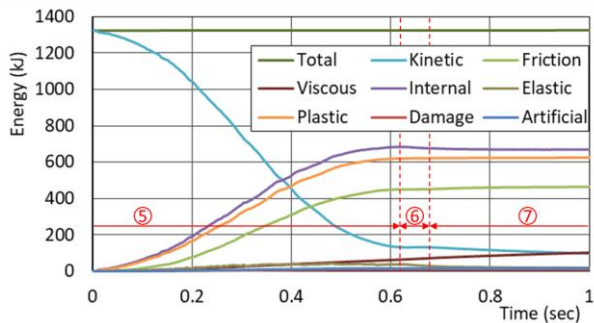


圖 12-2 碰撞過程能量變化

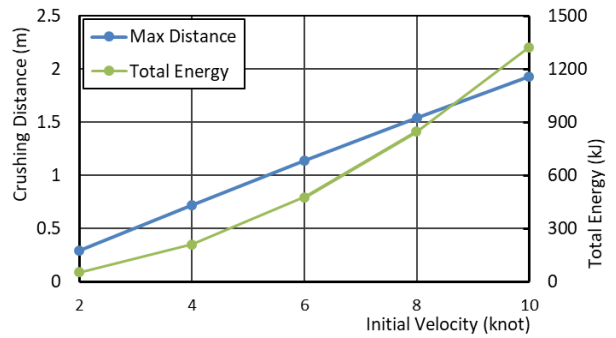


圖 13 最大凹陷深度與總能比較

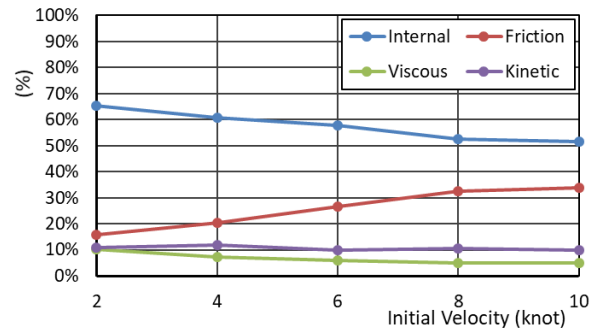


圖 14 總能比例

## 2. 凹陷深度與能量比較

圖 13 為最大凹陷深度與總能的比較。在本文中撞擊船的質量為固定，船速從 2 節至 10 節，以 2 節遞增，因此總能會跟初始船速成二次方增加，然而不同速度下最大的凹陷深度僅跟初始船速成線性增加，而非跟總能量成等比增加。接下來觀察達到凹陷深度最大值時，各個能量的比例，如圖 14 和圖 15。圖 14 為內能、阻尼消散能、摩擦消散能和動能分別占總能的比例，可以看到動能主要被內能和摩擦消散能消耗，且隨著初始速度增加，內能的比例減少，摩擦消散能的比例增加，這可能是造成凹陷深度沒有跟總能量成比例增加的原因。因此若只以結構吸能方式估算破壞範圍，忽略摩擦力的影響，恐會高估實際破壞範圍。圖 15 是彈性應變能、塑性消散能、破壞消散能、人造應變能分別占內能的比例，可以看到由塑性應變能承受最多的能量，其次是彈性應變能，破壞應變能則是最少，且隨著初始速度增加，所占內能的比例變化不大。因為這跟應力-應變曲線下的面積，且將斷裂後的材料可承受的能量設為極小值有關。而人造應變能僅占內能極少部分，可以推斷計算結果是符合實際現象的。從圖 16 中則可以看出應變率的影響，在彈性區的影響不明顯，而在塑性區隨著應變率越高，材料強度提高，便可以吸收更多的能量。因此碰撞的初始速度越高，應變率越高，對於同樣的凹陷深度，就會消耗更多的能量。

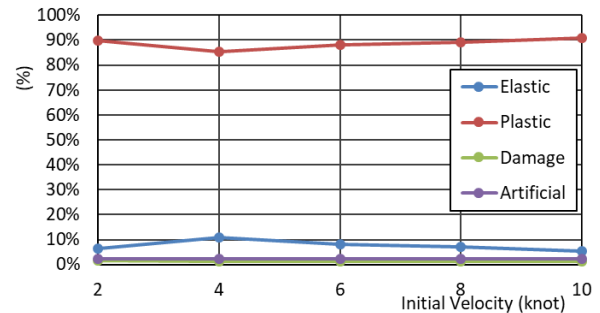


圖 15 內能比例

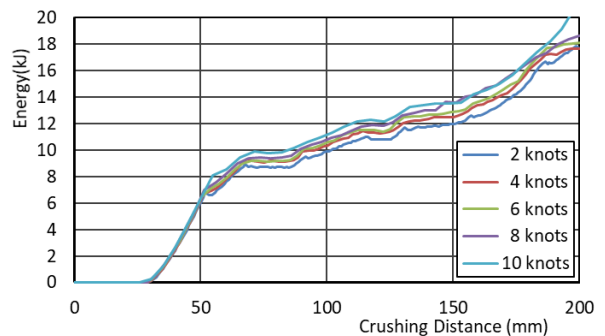


圖 16 應變率對內能的影響

### 3. 破壞範圍

表 4 結構反應分級

代表意義	結構未損壞			結構損壞	
	較低應力	中等應力	較高應力	輕微損壞	嚴重損壞
表示方法	低	中	高	輕	重

表 5 各個初始船速下的損壞範圍

結構區域		初始船速 (節)				
		2	4	6	8	10
外板開口 (mm)	左方	200	500	800	1000	1100
	右方	200	500	800	950	1200
	上方	50	50	100	250	700
	下方	250	650	950	1350	1650
甲板縱肋	L18		高	重	重	重
	L16			低	輕	重
	L15				中	輕
牆壁	L15				輕	重
船側縱肋	S12				低	低
側加強肋	SIDE STRI.		低	中	中	低
船側縱肋	S10	低	中	高	輕	輕
	S9	低	高	高	高	重
甲板	2ND DECK	高	輕	重	重	重
	S6		高	重	重	重
船側縱肋	S5		中	輕	重	重
	S4		低	高	輕	重
	S3			低	中	輕
	S2				中	中
	S1				中	中
甲板	3RD Deck				低	低
橫肋	Fr.58					低
	Fr.60		低	中	高	輕
	Fr.62	輕	輕	重	重	重
	Fr.64		中	中	高	輕
牆壁	Fr.64		低	低	中	中
橫肋	Fr.66					低
腋板	Fr.60/SIDE STRI.上方		低	低	低	中
	Fr.60/SIDE STRI.下方		低	低	低	輕
	Fr.60/2ND DECK 上方		中	中	中	輕
	Fr.60/2ND DECK 下方			中	中	高
	Fr.60/3RD DECK 上方			低	中	低
	Fr.62/SIDE STRI.上方	中	中	高	中	低
	Fr.62/SIDE STRI.下方	高	輕	輕	重	重
	Fr.62/2ND DECK 上方	輕	重	重	重	重
	Fr.62/2ND DECK 下方	中	重	重	重	重
	Fr.62/3RD DECK 上方		中	高	輕	輕
	Fr.64/SIDE STRI.上方		低	低	高	低
	Fr.64/SIDE STRI.下方		低	低	高	中
Fr.64/2ND DECK 上方		中	中	輕	輕	

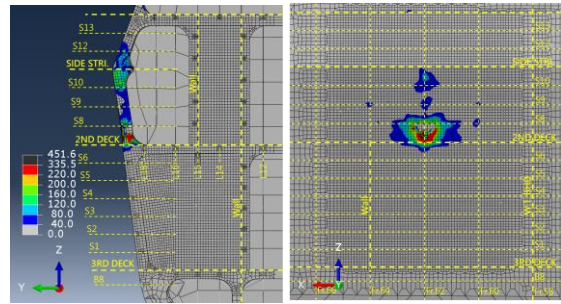


圖 17 船速 2 節之破壞範圍

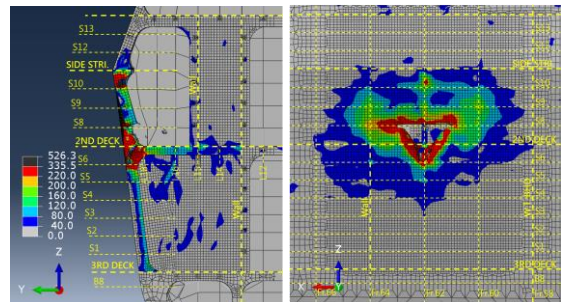


圖 18 船速 4 節之破壞範圍

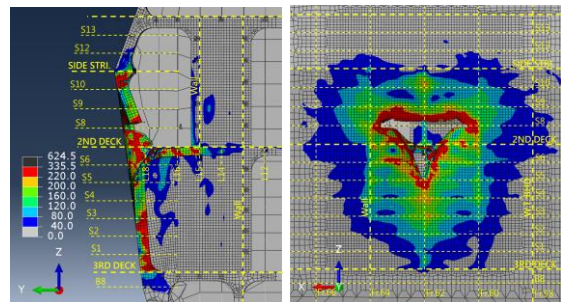


圖 19 船速 6 節之破壞範圍

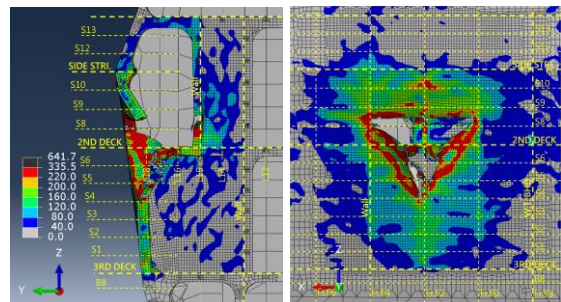


圖 20 船速 8 節之破壞範圍

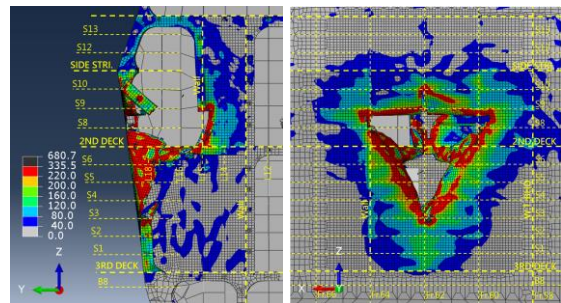


圖 21 船速 10 節之破壞範圍



在各個速度下的損壞範圍整理如表 5，並如圖 17 到圖 21 所示。表 5 中除了外板開口是以從撞擊點遭破壞的範圍表示，其他結構依其應力值或損壞程度分為較低應力、中等應力、較高應力、輕微損壞及嚴重損壞，並分別以底色藍色、綠色、黃色、粉紅色及紅色表示，其分級標準列於表 4。

而圖 17 到圖 21 分別是初始船速 2 到 10 節被撞船於最大凹陷深度時的 Von Mises 應力值和破壞範圍，圖中紅色為鋁合金真實破裂應力 335.5 MPa，降伏強度 220MPa 是黃色。左圖是正對肋骨編號 62(Fr.62)的截面視角，指入紙面是船艏方向、指出紙面是船艉方向。右圖是正對左舷視角，左方是船艏方向、右方是船艉方向。圖上虛線表示內部結構的佈置，包括 S1 到 S13 為船側縱肋、B8 為船底縱肋、SIDE STRI.為側加強肋、2ND 和 3RD DECK 為甲板、L12 到 L18 為甲板縱肋、L13 為縱向隔艙壁、Fr.58 到 66 為橫向肋骨、Fr.58 為一水密隔艙壁、Fr.64 在 2ND 和 3RD DECK 之間為牆壁、Fr. 58 到 62 與 L13 到 L15 在 MAIN DECK 和 2ND DECK 之間為樓梯間，有三面皆為牆壁，尚未損壞的結構可參考圖 6。從圖 17 到圖 21 中可以看到產生破裂和應力較高的部分都在加密區域內，這說明此加密區範圍應已足夠。

在各個速度下的損壞範圍如下所述：

在船速 2 節時：

- 外板從撞擊點左右各 200mm、上方 50mm、下方 250mm 被穿透
- 橫肋 Fr.62 斷裂，且 Fr.62 與 2ND DECK 連接之腋板挫曲破壞
- 縱肋 S8、2ND DECK、連接 Fr.62 及 SIDE STRI. 的橫向腋板有應力和變形產生，但沒有損壞

在船速 4 節時：

- 外板從撞擊點左右各 500mm、上方 50mm、下方 650mm 被穿透、捲曲
- 2ND DECK 和 2ND DECK 下方 Fr.62 捲曲並皺褶，縱肋 S8 扭曲並有些微損壞
- 縱肋 S6、S9、L18 和橫肋 Fr.60、Fr.64 與 2ND DECK 及 Fr.62 與 3RD DECK 連接的腋板有較高的應力和變形

在船速 6 節時：

- 外板從撞擊點左右各 800mm、上方 100mm、下方 950mm 被穿透、捲曲
- 縱肋 S6、S8、L18 斷裂且損壞嚴重
- Fr.62 與 3RD DECK 上方連接的腋板加強材面板應力幾乎到達極限
- 縱肋 S5 扭曲並有些微損壞，S9、S10 有應力和變形產生，但沒有發生破壞

在船速 8 節時：

- 外板從撞擊點左方 1000mm、右方 950mm、上方 250mm、下方 1350mm 被穿透、捲曲
  - 2ND DECK 破裂接近甲板縱肋 L15，而 L15 的牆壁被穿透，穿透範圍約寬 150mm、高 100mm
  - 橫肋 Fr.62 嚴重變形，縱肋 S4 到 S8 斷裂，S9、S10 扭曲，Fr.60、64 應力很高但尚未斷裂
- 在船速 10 節時：

- 外板從撞擊點左方 1100mm、右方 1200mm、上方 700mm、下方 1650mm 被撕裂、捲曲
- 2ND DECK 破裂到甲板縱肋 L15，且 L15 的牆壁被穿透，穿透範圍約寬 600mm、高 500mm，側邊的牆也有凹陷與破裂
- 橫肋 Fr.62 嚴重變形，Fr.62 連接 SIDE STRI. 下方的橫向腋板加強材破壞而失去支撐性，導致在 S9、S10 之間的橫向肋骨變形撕裂了外板
- 橫肋 Fr.60、64 也斷裂，與之連接的腋板應力高，縱肋 S3 到 S10 扭曲並斷裂，甲板縱肋 L16 到 L18 扭曲並斷裂

而雖然撞擊造成船殼的破洞很大，但被撞船水線位於船側縱肋 S2 附近，因此暫時不會造成船舶進水，進而影響船舶穩度問題。從圖中也可以看到除了直接受到衝擊的部分有較高的應力與嚴重的破壞，在離撞擊點較遠的腋板也有較高的應力和破裂的現象，如 SIDE STRI.、3RD DECK 與橫向肋骨連接處的腋板，這說明腋板的設計能有效傳遞並承受較大應力可減少非直接撞擊區域的破裂。

圖 22 是船速 10 節時撞擊船於最大凹陷深度的 Von Mises 應力值，圖中紅色為低碳鋼真實破裂應力 488MPa，降伏強度 235 MPa 則是綠色。可以看到雖然與被撞船接觸的地方有大面積達到降伏應力，小部分有產生較大變形，但皆沒有產生破裂。這說明了材料的極限強度或破裂應變會大幅影響材料破裂的範圍，且在不同材料的碰撞下，破壞幾乎都發生在較脆弱的材料。

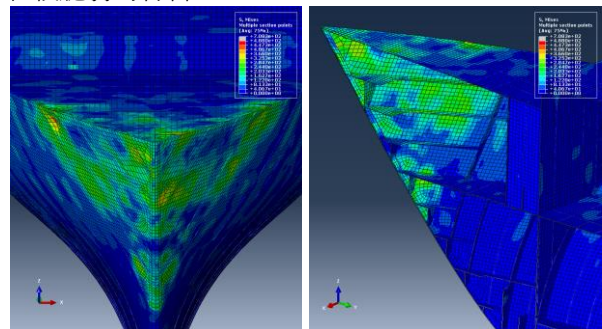


圖 22 船速 10 節之撞擊船應力

## 結論

本文以顯式動態有限元素方法分析鋁合金雙體船左舷結構遭受低碳鋼製他船以船艏碰撞，並包含

船體運動和材料彈性、塑性、破壞的模擬，可以得到以下結論：

1. 總能為撞擊初始時撞擊船的動能，並與初始速度的二次方成正比，但凹陷深度僅跟初始速度呈線性增加。碰撞過程中，動能主要被內能和摩擦消散能消耗，而內能中以塑性應變能承受最多的能量。
2. 隨著初始速度增加，內能所占總能的比例減少，摩擦消散能的比例增加。且隨著初始速度增加，應變率越高，於同樣的凹陷深度，所吸收的內能越多。
3. 隨著初始速度增加，摩擦力的影響也越重要，因此若只以結構吸能方式估算破壞範圍，忽略摩擦的影響，恐會高估實際破壞範圍。
4. 在直接受到衝擊之外的結構仍有可能因結構連續性的變形而破裂。
5. 鋼船與鋁合金船相撞時，鋼船幾乎不會產生破裂，說明材料強度的差異會對破裂的產生造成影響。

船舶的碰撞是非常複雜的問題，從船體結構材料系數的設定、船舶運動模擬的方法，到撞擊時的速度、角度和位置等等，皆會影響計算的結果。撞擊船和被撞船內部結構也會影響，例如有隔艙壁或牆的地方結構比較強，可減少破裂範圍，但如果破裂便會破壞隔艙壁的水密性，引發後續穩度問題。

未來若能有實際且完整的材料試驗結果，便能增進材料係數的設定，更貼近實際材料的特性；另外，增加其他方向的運動自由度，便能分析不同角度下不同速度的碰撞；同時如在有限元素軟體中考量非對角線的附加質量與阻尼，便能更貼近實際船舶的運動，更徹底了解船舶碰撞的問題。

## 參考文獻

1. EMSA, “Annual Overview of Marine Casualties and Incidents” (2019)
2. Abaqus 6.13 User Guide
3. G. R. Cowper, and P. S. Symonds, “Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams”, Technical Report No. 28, Division of Applied Mathematics, Brown University, Providence, RI, USA (1957)
4. M. J. Barba, “Résistance à la traction et allongements des métaux après rupture”, Mem. Soc. Ing. Civils Part I, pp.682, France (1880)
5. Y. Yamada, H. Endo, P. T. Pederson, “Numerical Study on the Effect of Buffer Bow Structure in Ship-Ship Collision”, International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.604-644 (2005)
6. W. G. Beare, and F. P. Bowden, “Physical Properties of Surfaces I-Kinetic Friction”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London Ser.A Vol.234 pp.329-354, London (1935)
7. 財團法人驗船中心, “鋼船建造與入級規範 第 XI 篇 - 材料” (2019)

# COLLISION SIMULATION AND STRUCTURAL ANALYSIS OF AN ALUMINUM CATAMARAN

*Tzeng, Yu-An Lin, Chun-Ta Lin, Tsung-Yueh Lee, Ya-Jung*

CR Classification Society

*Keywords: aluminum catamaran, ship collision, FEM, CFD*

## ABSTRACT

The navigational casualties including collisions represent the most of the marine casualties and incidents. In order to reduce the structural damage caused by collision, resulting in cargo loss or fatalities and injuries, this article aims to discuss the crashworthiness of the high-speed aluminum alloy catamaran hull structure when it collides with other ships. First, the added mass and damping coefficient of the 600-ton catamaran were computed by CFD software Star-CCM+, and deployed it on the hull structure. Next, FEM software Abaqus was used to carry out an explicit dynamic analysis of the starboard structure of the catamaran with refined elements around the collision area. The material setting of aluminum alloy included elastic, plastic and failure mechanics models. The other ship was set to be a 100-ton steel fishing boat. The collision conditions assumed that the side of the catamaran is hit by the fishing boat at different speeds, and the collision angle was set to be the angle of 90 degrees between two boats when the largest penetration damage occurs. Finally, observed the deformation and damage of the hull structure's shell plates, transverse bulkheads, longitudinal and transverse web frames and other components during the impact to obtain the depth of the collision penetration and the impact resistance.