

油輪耐海性能試驗之數值模擬

陳紀川*¹ 黃建樺* 陳冠臻* 王柏文*

*中國驗船中心

關鍵詞：耐海性能，數值模擬

摘要

本研究透過黏性流數值模擬軟體 STAR-CCM+，計算油輪之靜水阻力與規則波中迎浪之運動反應，並用勢流理論軟體 HydroSTAR 計算油輪在規則波中之運動反應。在 STAR-CCM+計算中，假設油輪在規則波中迎浪時僅有起伏(Heave)與縱搖(Pitch)兩自由度之運動。兩種軟體之計算結果與規則波迎浪之耐海性能船模試驗結果比較，顯示兩種軟體之計算結果趨勢相同，但數值略有差異；試驗之縱搖結果小於數值模擬結果。本研究驗證數值模擬軟體之可靠度與人為使用上之正確性，未來將可應用 STAR-CCM+模擬船隻在極限海況下之運動反應。

前言

船舶於波浪中之運動反應，主要以勢流方法計算其運動反應，勢流方法已可捕抓到其反應之趨勢與數值，鮮少以黏性流方法計算之，因黏性流計算較耗費時間。利用黏性流方法計算波浪中之運動反應，主要為先學習與波浪有關之技巧，於 STAR-CCM+軟體中能正確求解波浪中之運動反應，將可應用於直接分析極限海況下之運動反應與壓力負荷。

船模試驗結果有兩大項，一為靜水中阻力量測，二為頂浪時船模於波浪中之運動反應。靜水中量測阻力以滿載水線進行。波浪中之量測為滿載水線頂浪時船模於不同波長中量測其運動性能，有起伏(Heave)、縱搖(Pitch)、波浪中之阻力、艏部位置與縱向浮心位置之加速度。

本研究以數值模擬軟體 STAR-CCM+計算船模於靜水中滿載時之阻力與滿載時對不同波長之頂浪運動反應，計算起伏反應(Heave)、縱搖反應(Pitch)、波浪中之阻力。並將起伏與縱搖之結果與勢流計算軟體 HydroSTAR 之計算結果與實驗結果比較。

數值方法與網格

本文使用商業黏性流計算軟體 STAR-CCM+，計算船模於靜水中之阻力與規則波迎浪之耐海性能。

1. 數值方法

STAR-CCM+利用有限體積法求解雷諾平均那維爾史托克方程式(Reynolds-averaged Navier-Stokes equation, RANS)，其控制方程式有連續方程式與動量方程式，並對黏性流場中擇以相關的紊流模型與壁面方法(wall treatment)帶入求解，在求解過程中選用隱式非穩態(implicit unsteady)利用時間推進法(time marching method)求得其穩態解，而隱式中有隱含著疊代次數，在計算中使用 5 次疊代，紊流模型為 realizable k- ϵ two-layer 模型，搭配 two-layer all y+ wall treatment 之壁面方法。利用流體體積方法 VOF(volume of fluid)方法擷取自由液面之位置，並可引入 6-DOF(Degree of Freedom)的計算方法，可以計算六個方向之自由度，在本研究中，僅用 2-DOF 之運動，即 z 方向之位移(Heave)與 y 方向旋轉(Pitch)加入計算之中，允許其可以有起伏與縱搖。

2. 計算空間與網格

計算空間以船長為基礎，以船長決定整個計算空間之大小，使用的模型於 2.1 介紹，2.2 介紹計算空間，2.3 介紹網格分佈，2.4 介紹邊界條件與初始條件。

2.1 油輪船模模型

選用船形為一低速油輪，其尺寸為船垂線間長(船長)174 公尺，船寬 32.2 公尺，船深 17.3 公尺，

¹ 聯絡作者 陳紀川 (chichuan@crclass.org.tw)

吃水 11.0 公尺，排水體積 49782.9 立方公尺，浸水表面積 8194.7 平方公尺。

模型縮尺比為 40，模型船垂線間長 4.35 公尺，吃水 0.275 公尺，排水體積 0.7779 立方公尺，浸水表面積 5.122 平方公尺，如表 1 所示。

表 1 油輪船形尺寸資料

	Full scale	Model scale
$L_{bp}(m)$	174	4.35
$L_{wl}(m)$	177.2	4.430
$B(m)$	32.2	0.805
$D(m)$	17.3	0.4325
$t(m)$	11.0	0.275
$Vol(m^3)$	49782.9	0.7779
$S_{wetted}(m^2)$	8194.7	5.122
Scale Ratio	40	
C_B	0.8186	
LCB	2.84%(fwd : +)	

2.2 計算空間

計算空間之原點置於艏垂標(AP)處($x=0$)並以向上游端為正，基線處($z=0$)以向上為正，船舶中心線處($y=0$)以向左舷為正。

以原點為基準，向前 2 倍船長為入流平面，即以艏垂標(FP)之前 1 倍船長處。出口平面為原點下游處 2 倍船長。吃水方向以基線上方 0.5 倍船長處為上表面，向下 1 倍船長處為底面。船舶中心線處為右面(對稱面)， y 為 1.5 倍船長處為左面(滑移平面)。

若是於計算波浪中之運動反應，將下游端之距離又再增加 2 倍船長，即離原點 4 倍船長處。

2.3 網格分佈

STAR-CCM+軟體中之網格分佈有分為邊界層內(prism layer)與邊界層外之設定，邊界層內有厚度、擴展係數(stretch factor)與層數，本研究使用之厚度定為 0.02m、擴展係數 1.3 與 15 層，於不同之速度下使得 y^+ 皆小於 7。邊界層外以一基礎長度(base size)(0.05m)為主要設定，並可於邊界層外使用部分區域進行局部網格加密，網格之佈置主要參考 Perić[1]之設定。

2.4 邊界條件與初始條件

物理模型於 1 數值方法中選定，空間與網格分佈皆完成後，尚須給定邊界條件與初始條件。

邊界條件有入流端、出口端、對稱面、滑移平面與牆邊界，列於表 2。

表 2 邊界條件

邊界條件	所在平面
入流端	入流平面、上表面、底面
出口端	出口平面
對稱面	船模中心線之平面
滑移平面	遠離對稱面之另一平行平面
牆邊界	船模表面

初始條件於入流端給定一入流速度，即船模速度。出口端給定一靜水壓力。

阻力計算時，引用一靜止波(FlatVofWave)，則需另外給定 VOF 之相關設定參數。

於波浪中之計算，則引用一五階波(Fifth-order Stoke Wave)，並有假設一個人為消散區域為距離出口前方 0.5 倍船長處，用於消散出口端之波浪，使其於出口平面時無波浪之反射。波浪中之出口端壓力為引用靜止波之靜水壓，使其為無擾動之波面。

靜水阻力結果

將靜水阻力之計算整理與實驗之結果比較。由圖 1 所示，所有速度之摩擦阻力皆與 ITTC 公式之阻力相近，船模速度 0.81m/s(對應時船速度 10 節， $Fn=0.125$)時約有 -3.57% 之差異，船模速度 1.14m/s(對應時船速度 14 節， $Fn=0.174$)時有 0.22% 之差異，大致上皆符合 ITTC 之趨勢。

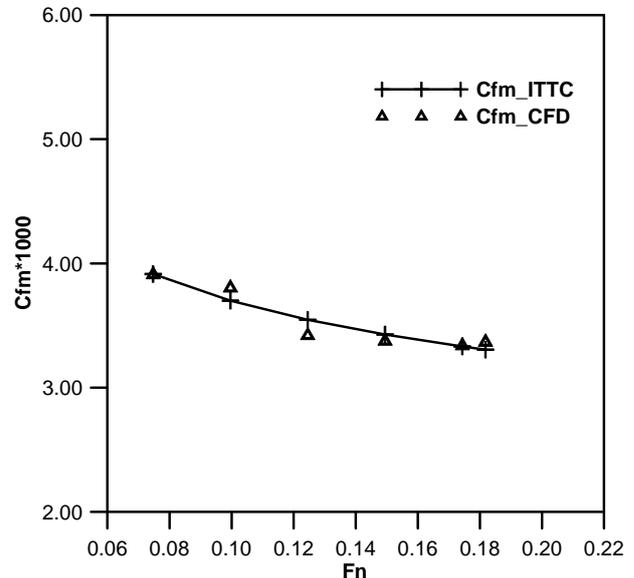


圖 1 不同速度時摩擦阻力比較圖

將計算所得之總阻力與實驗量測之總阻力比較，如圖 2 所示，若以實驗量測之阻力為基準，船模速度 0.976m/s(對應時船速度 12 節， $Fn=0.149$)時，總阻力為 0.36% 之差異，其他速度點之差異約

在 4.2% 以內，僅較低之兩個速度點，會有較大之差異。

最低速度點，船模速度 0.488m/s(對應實船速度 6 節，Fn=0.075)時因無實驗之資料故無法比較。

船模速度 0.651m/s(對應實船速度 8 節，Fn=0.100)時，有 14% 之差異，因其船模總阻力之數值也很小，導致其差異百分比擴大，在圖 1 船模速度 0.651m/s，Fn=0.100 時其摩擦阻力與 ITTC 之差異僅為 2.79%。

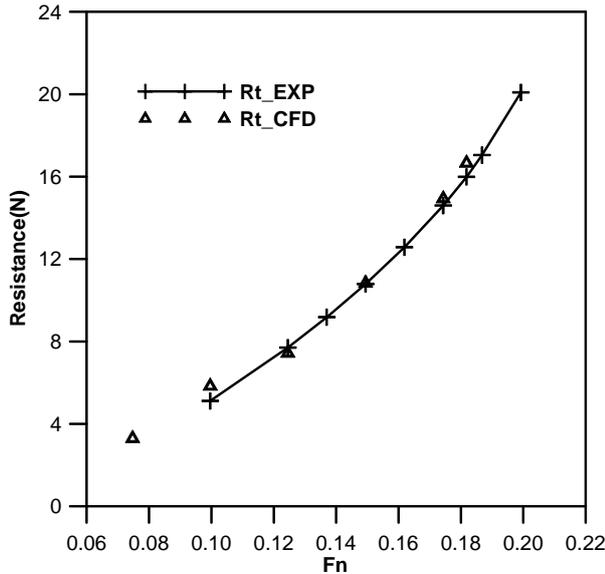


圖 2 總阻力比較圖

將量測之總阻力無因次化，如公式(2)，比較其總阻力係數如圖 3 所示，在船模速度 0.813m/s(對應實船速度 10 節，Fn=0.125)以上，總阻力係數與實驗之差異約為 0.4% 至 4.3%，僅在最低的兩個速度之總阻力係數偏高與其他速度之趨勢不符合，較不合理。

$$C_{tm} = \frac{R_m}{0.5\rho V^2 S} \quad (2)$$

其中 C_{tm} 為總阻力係數， ρ 為密度， V 為速度， S 為浸水表面積。

將總阻力係數與摩擦阻力係數相減可得剩餘阻力係數，如公式(3)所示。

$$C_{rm} = C_{tm} - C_{fm} \quad (3)$$

圖 4 為剩餘阻力係數比較圖，速度愈低時，剩餘阻力係數應愈小，最低的兩個速度與此趨勢不合。僅船模速度 0.813m/s(對應實船速度 10 節，Fn=0.125)之剩餘阻力係數與實驗之差異約為 2.7%，船模速度 0.976m/s(對應實船速度 12 節，

Fn=0.149)以上，剩餘阻力係數與實驗之差異約為 14.1% 至 16.9%，船模速度 0.651m/s(對應實船速度 8 節)其差異為 65.8%，有較大比例之差異存在。

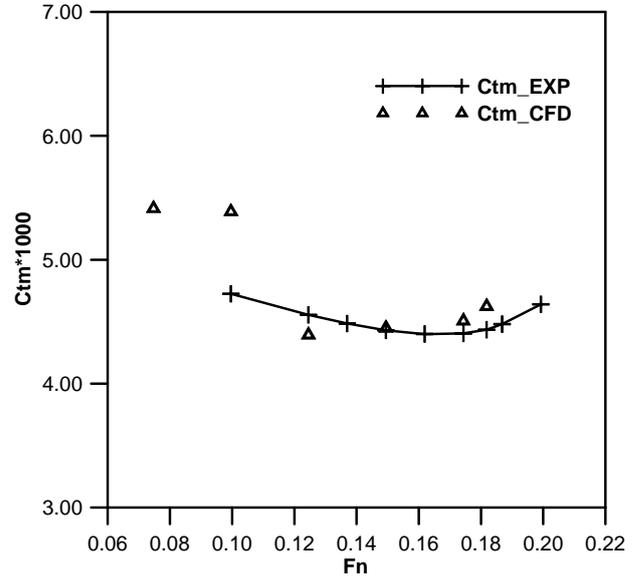


圖 3 總阻力係數比較圖

最低的兩個速度對應實船速度為 6 節與 8 節，對應之福勞德數低於 0.1，在摩擦阻力的部分如圖 1 所示，其差異在可接受範圍內(約 5%)，但其剩餘阻力的部份就有較大之差異存在，需另特別研究其剩餘阻力計算，方能改善其總阻力之結果。

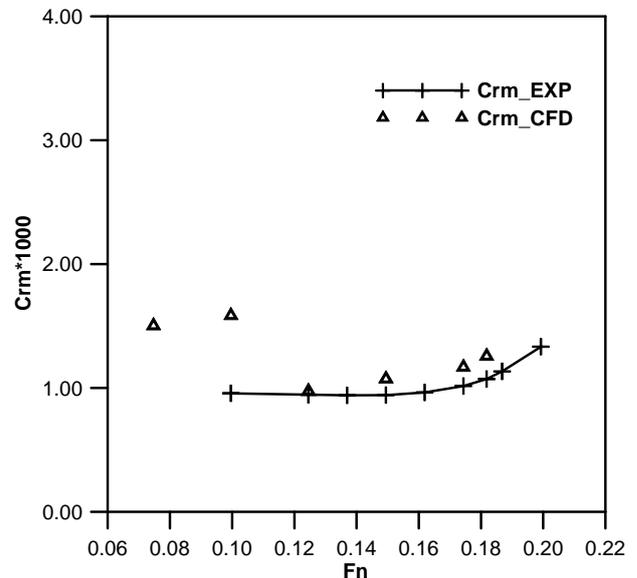


圖 4 剩餘阻力係數比較圖

靜水阻力計算中，有引入 2-DOF 運動計算，即浮沉量(Sinkage)與俯仰角(Trim)。所得之結果如圖 5

所示，俯仰角之結果計算與實驗相同。計算之浮沉量與實驗之趨勢相同，數值在實驗之 95%可信區間內，計算與實驗有一致之結果。

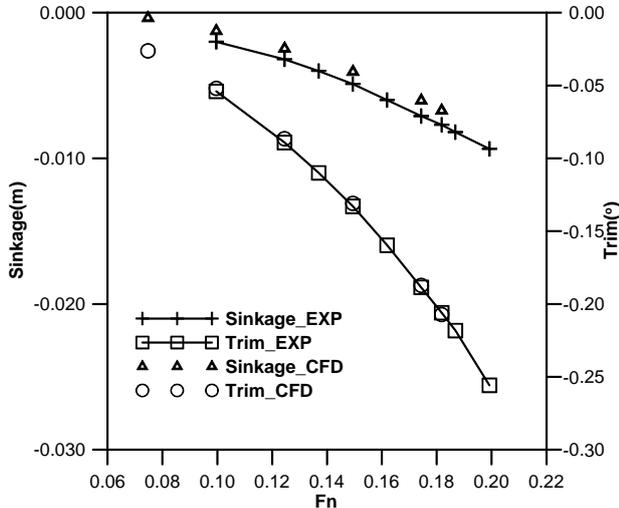


圖 5 浮沉量與俯仰角比較圖

波浪中耐海性能結果

波浪中之計算結果先探討時間步之影響。

1. 數值計算結果

波浪中頂浪之運動反應除實驗結果外，有 2 種數值計算結果可進行比較，一為使用勢流計算 (HydroSTAR)，以 10 節計算實船之運動反應，二為 STAR-CCM+ 以船模速度 0.81m/s (對應實船速度 10 節) 計算波浪中船模運動反應。

在 STAR-CCM+ 之波浪中計算，尚有一些設定上之要求，方可得到較精確之運動反應數值。在相同之紊流模型下，有時間上與空間上的要求，時間上有使用時間步大小之差異與使用一階與二階離散方法之差異，空間上則為網格之疏密。

1. 時間上一階離散方法求解過程較穩定，但其求解精度較二階離散方法差；相反地，二階離散方法有較佳之求解精度，但是其迭算過程不穩定，較易發散。使用二階離散方法時，空間上之網格疏密與時間步皆需配合，使得計算過程較不易發散，可參照 CD-adapco reference[2]。

2. 時間步之大小與入射波之週期相關，參考 [2][3] 建議約一個入射波之週期需有 200 個時間步以上，希望於一個時間步，波前進的距離於格點中僅前進一半格點之距離。

3. 網格之疏密與入射波之波長與波高有相關，參考 [2] 建議，於波前進方向，一個波長至少需有 80

個網格，於波高方向，一個波高至少需有 20 個網格。

綜合以上 3 點，模擬之波浪有較少波高消散，會較為精確，即波高隨著波前進，波高仍維持一致。

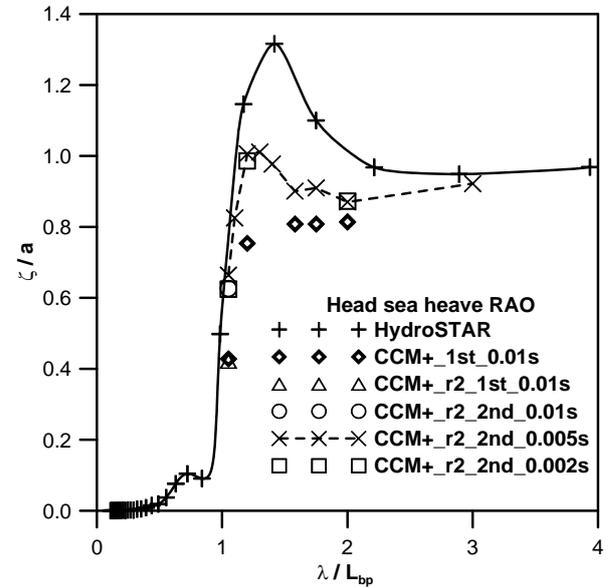


圖 6 起伏反應振幅運算子數值模擬比較圖

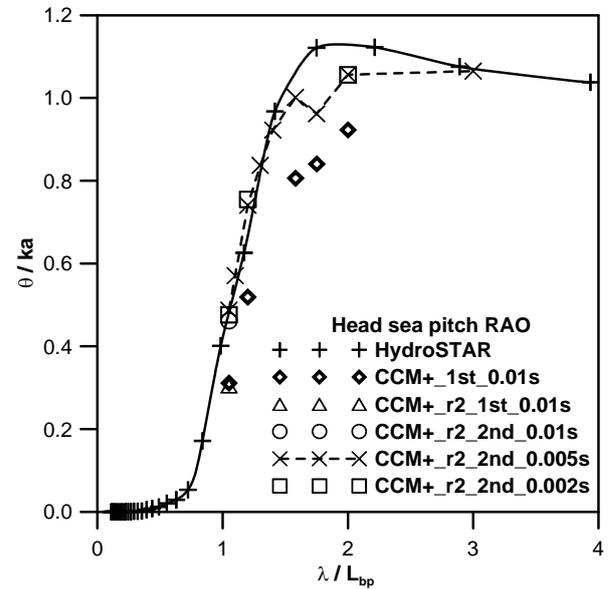


圖 7 縱搖反應振幅運算子數值模擬比較圖

更改之參數對結果之影響如圖 6 與圖 7 所示，圖中 a 為波之振幅， k 為波數， ζ 為起伏 (heave) 之反應， θ 為縱搖 (pitch) 之反應， λ 為波長，圖中實線為 HydroSTAR 之結果，1st 為一階時間離散，2nd 為二階時間離散，r2 為部分區域網格加密，0.01s

或 0.005s 為時間步，整個測試過程如以下 5 點所列：

1. 初步沿用靜水阻力之設定，以一階時間離散與 $dt=0.01s$ 計算，所得結果如圖 10 與圖 11 中菱形點(\diamond)所示，其結果偏低。

2. 測試計算僅有一個測試點。以相同時間上之設定，水面附近區域之網格加密(於圖中以 $r2$ 表示)，如圖中三角點(\triangle)所示，其結果與菱形點(\diamond)差異不大，表示於局部加密之網格影響不大。

3. 以前次之網格設定，換變動時間上之設定，變更為二階時間離散方法， dt 維持不變，如圖中之圓點(\circ)，僅有一個測試點之結果，此結果明顯大於前次之結果。顯然地二階時間離散方法較一階時間離散方法有更精確之結果。

4. 以前次之設定，僅變更時間步 $dt=0.005s$ ，如圖中叉叉點(\times)，其結果些微大於前次之結果。

5. 最後僅將時間步縮小為 0.002s，如圖中方形點(\square)所示，其結果於前次結果相近。

以 $dt=0.005s$ 為計算時間步，可節省計算時間，且所得結果相近，以此設定計算於波浪中不同波長之運動反應。

在網格之需求上，受限於總網格數之限制(不希望以太多的網格數進行計算)，僅於水面附近增加一六面體區塊(局部之 z 方向， xy 方向為全區域)，用於局部加密網格，確保於波前進方向保有 80 個網格，於波高方向有 10 個網格，如上述第 2 點，在此網格測試下，發現網格之影響不大。

於 STAR-CCM+ 中用到不同波長之週期(T)為 1.71s 至 2.89s，估算一週期內有多少時間步 dt ，

1. 若 $dt=0.01s$ ， $T/dt = 171\sim 289$ ；
2. 若 $dt=0.005s$ ， $T/dt = 342\sim 578$ ；
3. 若 $dt=0.002s$ ， $T/dt = 855\sim 1445$ 。

$dt=0.01s$ 約略符合建議值， $dt=0.005s$ 與 0.002s 皆高出建議值許多，實際之案例可能也要先進行初步測試，方可決定適合的時間步大小。

2. 實驗結果比較

圖 8 與圖 9 為實驗與數值計算之結果比較，STAR-CCM+ 皆為 $dt=0.005s$ 之結果，於圖中標示為 CFD。HydroSTAR 之結果為最大，STAR-CCM+ 之結果次之，實驗之結果最小。

波浪中之數值模擬(STAR-CCM+ 與 HydroSTAR) 皆假定轉動半徑 $R_{yy}=0.25L_{BP}$ ，但實驗於水中量測之 $R_{yy}=0.32L_{BP}$ 。實驗由於壓載重量之配置使得垂向重心高度與轉動慣量皆與計算不相合，影響縱搖反應之結果，起伏反應於波長為船長之 1 倍~1.75 倍之間，皆小於數值模擬結果，且並無共振反應之現象。

HydroSTAR 運動反應結果之趨勢與 STAR-CCM+ 之結果相近，但在數值上，HydroSTAR 之結果較 STAR-CCM+ 之結果大，在縱搖反應上較相近，使用 HydroSTAR 分析運動反應，可較快速得到結果，若以此運動反應估算其結構強度，則其結構強度偏保守。

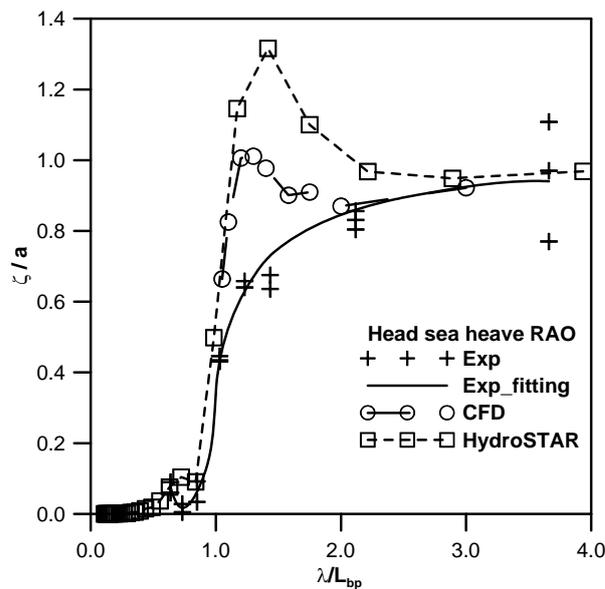


圖 8 起伏反應振幅運算子比較圖

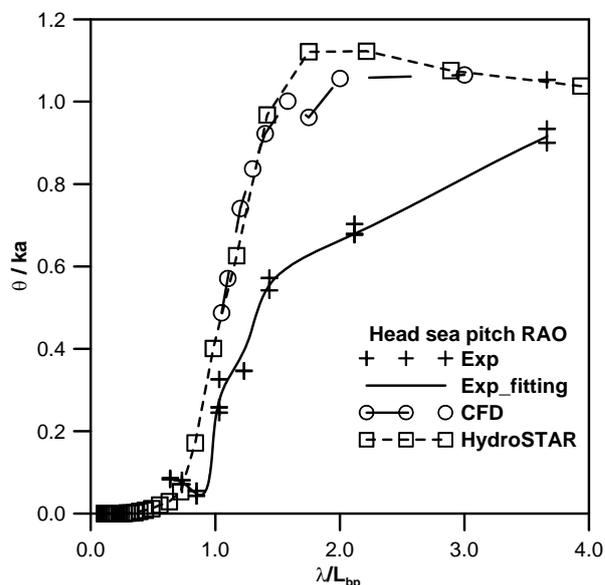


圖 9 縱搖反應振幅運算子比較圖

STAR-CCM+ 之結果介於實驗與 HydroSTAR 兩者結果之間，透過相關之設定如時間步、二階時間離散方法與空間上網格搭配，方可求得適當之結果。以黏性流數值方法求解波浪中之運動反應，較

勢流方法費時，但以此程序未來可應用於船舶極限海況下之運動反應。

結論

本研究以 STAR-CCM+分析船模於靜水中阻力與波浪中之運動反應，其達成結果如下：

1.完成油輪於靜水中阻力之計算模擬，其浮沉量與俯仰角與實驗相當吻合，阻力除了兩個低速點外，其他速度點與實驗結果之差異在 5%內。

2.完成油輪船模於波浪中之計算模擬，更改與波浪相關之計算設定，有較佳之結果，但與實驗之結果略有差異。

3.船模試驗因壓載因素，使得垂向重心高度與 y 方向(右舷方向)之轉動慣量與計算之設定值不同，實驗之結果皆小於數值結果。

4.船模於波浪中之計算技巧，未來可應用於極限海況下之運動反應，期望能正確地評估其運動反應與壓力。

5.HydroSTAR 之結果較快速，但於某些波長下(1 至 2 倍船長)其頂浪之起伏與縱搖運動反應之數值皆較大。

未來以完整試驗資料之模型，進行計算比較，可驗證軟體之準確性。

參考文獻

1. Sven Enger, Milovan Perić, Robinson Perić, "Simulation of flow around KCS-hull." Germany, 2010, from http://www.cd-adapco.com/includes/ajax/tech_refs.html.
2. Milovan Perić, "Wave Impact, Body Motion and Overset Grids in STAR-CCM+", STAR South East Asian Conference, 2012.
3. Guo, B.J., Steen, S., Deng, G.B., "Seakeeping prediction of KVLCC2 in head waves with RANS," Applied Ocean Research, 35, pp.56-67, 2012.

Numerical simulations for an oil tanker's seakeeping test

C. C. Chen* C. H. Huang* K. C. Chen* P. W. Wang*

*China Corporation Register of Shipping, Taipei, Taiwan (ROC)

Keywords: Seakeeping, Numerical Simulation

ABSTRACT

An oil tanker resistance in calm water and in wave for seakeeping tests were simulated by a viscous solver STAR-CCM+ and tested by the model test. A potential solver HydroSTAR also solved the oil tanker seakeeping response. The calm water resistance test results were close to STAR-CCM+ results besides the lower two speed($Fn < 0.1$) and the sinkage and trim results were the same . The seakeeping test results were compared with two software STAR-CCM+ and HydroSTAR. Two software results were the same trend but HydroSTAR results were larger than STAR-CCM+ results. The seakeeping results of the model test were the least result among these numerical results. The study validated the accuracy of STAR-CCM+ software usage in simulating motion in wave and in the future the procedure of STAR-CCM+ will apply to the simulations of ship motion responses in extreme sea loads conditions.