水面衝撃荷重による動的弾性応答に関する研究

岡 正義*,高見 朋希*,小沢 匠**,山田 安平*,田中 義照***

Study on Dynamic Elastic Response Based on Water Impact Load

by

Masayoshi OKA, Tomoki TAKAMI, Takumi OZAWA, Yasuhira YAMADA, and Yoshiteru TANAKA

Abstract

The design load for water impact pressure acting on ships has been stipulated based on the two-dimensional wedge approximation by the rule requirements, as the proper evaluation of the three dimensional distribution of water impact (slamming) load is still difficult. As regards the hull girder strength, no clear criteria for the magnitude of the water impact load itself have been prescribed in the current structural rules. It is apparent that more reasonable consideration for the water impact effect is necessary in design of ships which are growing in size and tend to suffer more from the slamming phenomena. Nowadays, the numerical simulation methods based on e.g. the Computational Fluid Dynamics (CFD) or the Finite Element Analysis (FEA) have been attracting attentions as the methods for predicting the three dimensional distribution of water impact loads, and these methods are expected to be introduced at the design stages of ships. Moreover, it is ideal that the slamming induced hydroelastic (whipping) response can also be predicted in a consistent manner, which in turn the reliable safety level assessment of the hull girder may be attained. To this effect, a numerical simulation method for the slamming induced response of ships is developed and validated in this study. The subject ship is a recent container ship. For the wave-induced and water impact induced load analyses, the CFD making use of the Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) equations is adopted. The validity of the CFD in estimating water impact pressure on a 2D wedge is shown first by comparing with the theoretical values and experimental results. A series of estimations of the slamming impact load over the ship hull is then carried out. The slamming induced response is further evaluated by combining the CFD with the dynamic FEA, and then an effectiveness of the current structural rule requirement is investigated.

* 構造安全評価系, ** 構造基盤技術系, *** 研究特命主管
原稿受付 平成30年10月26日
審 査 日 平成30年12月 4日

目 次

1	. まえがき ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
2	. 2次元楔形状物体の衝撃水圧・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
	2.1 CFD モデル	3
	2.2 Deadrise angle を変えた検討結果・・・・・	• 4
	2.3 微小水撃角における検討結果 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	5
3	. 規則波中の3次元船体の衝撃水圧及び構造応答・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
	3.1 CFD モデル	• 7
	3.2 衝撃水圧の計算結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	• 7
	3.3 時刻歴構造応答解析······	9
4	. まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11
羑	\$考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11

記号

[deg]
[m]
[m]
[m]
[m]
[kt]

1. まえがき

水面衝撃は、その現象の複雑さから予測が難しく、現行の構造規則では、船体形状を2次元の楔に近似して簡 易的に設計荷重を与えている¹⁾. また、ハルガーダ強度に対しては、衝撃荷重のレベルを定めておらず、安全率 に包含してきた. 一方近年、CFDや粒子法等、衝撃水圧を解析的に求める手法の研究・開発が進み、設計への導 入が現実的になりつつある. 瞬間的に作用する圧力を入力として強度評価を行うには、設計で行われている FE 解析を静解析から動解析に移行する必要があり、これに衝撃時の流力弾性挙動評価を加えることによって、真の 最終強度に対する安全レベルが明確となり、さらなる合理設計が実現する.

著者らはこれまで,汎用 FE 解析ソフト LS-DYNA の流体構造連成 (Fluid-Structure Interaction: FSI) 解析機能を 用いて楔及び円筒モデルの弾性モデルで FSI 解析と Wagner 衝撃理論及び落下実験との整合を示した²⁾(図1参照). LS-DYNA は, FEA をベースとしていることから構造設計への導入が最も早いと考えられる一方で,計算時間の 膨大さから3次元船体に作用する衝撃水圧評価への拡張が困難であることも判明した.一方で,近年 CFD を用い た船体周りの流場並びに船体運動の解析技術は著しく進歩しており,極限海象中において船体,特に船首フレア 部において発生する水面衝撃 (スラミング)の評価にも有効性が期待できる.

本研究では、規則波中を向波で航行するコンテナ船のフレアスラミングを対象に、流力弾性影響を含む直接強度評価法の確立を目指す.荷重解析には、CFD 解析ソフト STAR-CCM+を用いる.第一に、2次元楔に発生する 衝撃水圧の推定精度に関する検証について述べる.次に対象モデルを3次元船体に拡張し、CFD による船体運動 及び衝撃水圧の推定を実施する.得られる荷重を用いて LS-DYNA による全船 FE 解析を行い、船首フレア部に 発生する構造応答の評価を実施し、既存の船級規則において規定される値の有効性を評価する.



図1 先行研究における FSI 解析 (弾性円筒)と荷重予測の例²⁾

2. 2次元楔形状物体の衝撃水圧

本章では CFD を用いて 2 次元楔形状物体に作用する衝撃水圧を推定するためのモデル化を行い, 設計のベース となっている Wagner 理論³⁾, Chuang の実験式⁴⁾, 及び LS-DYNA を用いた FSI(流体構造連成)解析³⁾と比較す ることによる予測精度の検証を行う.さらに,空気圧縮の再現性及び発生のメカニズムを解明するため,水撃角 (Deadrise angle)の小さいケースで衝撃水圧の推定を実施する.

2.1 CFD モデル

図2にCFD解析モデルを示す.図2中斜線部分が解析領域であり、落下速度V(m/s)一定の条件の下で解析領域を落下させる.静水面はZ=0の位置とし、壁面境界条件とした楔表面での衝撃水圧を抽出した.衝撃水圧は1メッシュ面積内の平均圧力として取得する.また壁面近傍にはプリズムレイヤーメッシュを設定し、メッシュを一様に分布させるため、図2下図に示すように楔の端部をフィレット径R5mmとした.CFD解析条件は表1に従う.陰解法非定常解析における時間ステップは10⁻⁵~10⁶秒の間で計算の安定性を保つように調整し、衝撃水圧は各タイムステップにおける値とした.

入「 CID 府彻末日			
自由表面	VOF 法		
物理モデル(Water 部)	密度一定(非圧縮性)		
物理モデル(Air 部)	理想気体(圧縮性)		
乱流モデル	SST K-ωモデル		
メッシュ	トリムメッシュ		
	(衝撃付近は1辺1mm)		
セル数	約 52 万セル		
解法	陰解法非定常解析		

表1 CFD 解析条件



2.2 Deadrise angle を変えた検討結果

実コンテナ船に発生するスラミングの衝撃速度の最大値としては、発生確率 10⁸の長期予測結果によると約 19m/s となる ⁵. このことから、実船船首部の半幅を 20m とおくと図 2 のモデルの半幅 300mm からフルード相似 則に従うと衝撃速度のスケール比は 1/8.2 となり、本モデルにおける発生確率 10⁸の衝撃速度は約 2.5m/s となる. このことから、落下速度 V=2.5m/s として Deadrise angle β を変えた CFD 解析を行い、Wagner 理論、Chuang の実 験式及び LS-DYNA を用いた FSI 解析 ²⁾の衝撃水圧との比較検証を行った.

 β =30deg, 20deg, 10deg とした計算結果について,図2中のP3 における衝撃水圧の時刻歴を図3に示す.図3 において,FSI 解析結果は空気部分は空隙(Void)として空気影響を無くしている.また,数値振動による衝撃 水圧の高周波成分を除去するため,FSI 解析結果はWagner 理論に基づく衝撃水圧の立ち上がり周波数成分をカッ トしない領域でローパスフィルタを用いている.図3より,Deadrise angle β が 10deg まで,CFD 計算結果はWagner 理論とほぼ同等の衝撃水圧値を示している.FSI 結果は β が小さくなると数値振動成分が大きく,フィルタ処理 により衝撃水圧のピーク値が下がっていることが確認される.図4にはP3 における衝撃水圧のピーク値の比較 を示す. Chuang の実験結果によると、 β =18deg 未満で衝撃水圧に空気影響が現れ,Wagner 理論よりピーク値は 低くなるとされている.図4より,CFD 計算結果は $\beta \geq$ 5deg までは Chuang の実験式と同等のピーク値を与えて いる. β =0~3deg では CFD 計算結果は全体的に Chuang の式より衝撃水圧が高い値を示している. β =3deg 未満 の場合,衝撃水圧は楔表面の位置によってピーク値が低く作用時間の長い空気圧縮型,ピーク値が高く作用時間 の短いWagner 型,及びこれらの中間型に分類されると言われているが⁶,CFD 計算結果も楔表面の位置による 計算結果のばらつきが大きくなっていると考えられる.

5





2.3 微小水撃角における検討結果

Deadrise angle β が 0deg(平板)の楔の衝撃水圧を,落下速度一定(V=1.56m/s)の条件下で実験を行った宮本ら⁷の実験結果と比較を行った.図2中のP1~P4における衝撃水圧の比較結果を図5に示す.図5より,平板中央部付近のCFD計算結果の衝撃水圧は実験結果より若干高いピーク値を示すが,P4における衝撃水圧のピーク値及びP1~P4の第1波周期は実験結果と同等であり,CFD計算は落下実験における衝撃水圧を良く捉えているといえる. β =0deg, 2degとした時の衝撃水圧のピーク値を 0.5 ρ V²(ρ :水密度)で無次元化した値と落下速度との関係を Chuangの実験式と比較して図6に示す.図6より, β =0deg では V=2m/s 以上で衝撃水圧のピーク値の楔表面の位置によるばらつきが大きくなる.さらに β =2deg では楔先端付近のP1 及びP2についてはピーク値の

(273)

変動が小さいが、P3 及び P4 については落下速度によってピーク値が大きく変動する. これらのばらつきは、楔 表面位置によって衝撃水圧がピーク値の低い空気圧縮型の領域とピーク値の高い Wagner 型の領域に分かれてい ることを示している. さらに、衝撃速度によってもこれらの領域が変化していると考えられる. 微小水撃角の場 合は、空気影響を含む衝撃水圧の特性を Deadrise angle 及び衝撃速度ごとに明確にし、構造応答に与える影響につ いて検証することが今後必要であると言える.



図5 平板(*β*=0deg)の衝撃水圧の比較



図6 衝撃水圧のピーク値と落下速度との比較

3. 規則波中の3次元船体の衝撃水圧及び構造応答

本章では CFD を用いて 3 次元船体に作用する衝撃水圧を推定するためのモデル化を行い, 次いで船首部における構造応答の評価を行う.得られた衝撃水圧の値と応力値を船級規則における要求値と比較し,現行規則の妥当性を検証する.対象戦は約 6000TEU の POST PANAMAX 型コンテナ船とした.

3.1 CFD モデル

図7にCFD 解析に用いたメッシュを示す. CFD 計算は模型スケールで実施し、図7上図が解析領域、図7下 図がコンテナ船のCFDメッシュである.実船及び模型スケールにおける主要目を表2に示す.波浪条件は規則波 中の曳航式実験を想定し、過去の水槽試験^のにおいて最も高い衝撃水圧が計測された条件として、実船スケール で波高15m,波の出会い角180deg(正面向波)、波長船長比1.0とした. CFD 解析に用いる物理モデル、乱流モ デル及び解法は表1と同一である.計算の時間ステップは0.001secとした.本モデルの総セル数は約100万セル となり、8core で総計算時間は約48h である.



図7 3次元船体の衝撃水圧評価に用いる CFD メッシュ

	実船	CFD
L _{pp}	283.8	5.0
В	42.8	0.754
D	24.0	0.423
df	14.0	0.247
Vs	18.5	2.4

表2 対象船の主要目

3.2 衝撃水圧の計算結果

図8に示すSS9.75, SS9.25, SS9.0及びSS8.0上において,0.0W.L.,5.0W.L.,11.0W.L.,17.0W.L.及び22.0W.L. の各点における衝撃水圧の計算結果を図9に示す.衝撃水圧はCFD計算結果にフルード相似則を適用し,実船ス ケールで示している.図9より,フレア角の大きいSS9.75及びSS9.25の17.0W.L.及び22.0W.L.においては作用 時間が短く,ピーク値が高いWagner型の衝撃水圧が発生している.17.0W.L.及び22.0W.L.においては作用 時間が短く,ピーク値が高いWagner型の衝撃水圧が発生している.17.0W.L.及び22.0W.L.における衝撃水圧波形 は船尾側になるにつれピーク値の立ち上がりが顕著ではなくなり,SS8.0ではほぼ波浪成分のみが作用している. また,船底部に近い計算点では全ての横断面において同等の作用時間とピーク値を示しており,水圧は没水頭高 さの変動分のみが作用していることが確認できる.衝撃水圧波形はWagner型に類似しており,今回シミュレー ションを実施した波浪条件では,大規模な空気巻込みは発生していないと考えられる.図9のSS9.75結果図内の 点線は,日本海事協会鋼船規則において規定されるSS9.75各点における衝撃水圧値¹⁾を示す.鋼船規則に規定さ れる衝撃水圧値はCFD計算結果の示す衝撃水圧ピーク値と同等あるいはそれ以上の値をとなっていることが確認 認でき,規則荷重は安全側の評価値を与えていると言える.

SS9.75 の 2 次元断面形状の静水面に対する水面衝撃解析を 2 章と同じ手法で CFD により行い,得られる衝撃 水圧を 3 次元 CFD 及び規則荷重と比較した.2 次元 CFD 解析実施時の落下速度は,3 次元 CFD 計算で得られた Pitch 及び Heave 時刻歴により求めた船首速度として,模型スケールで 1.62m/s の一定速度とした.図 10 に SS9.75 における衝撃水圧ピーク値の比較を示す.フレア部付近に作用する Wagner 型の衝撃水圧は,作用時間が比較的 短いため,鋼船規則においては最小構造単位(パネル及びロンジ)の構造応答に影響を及ぼす等価静水圧⁸とし て衝撃水圧値が評価されている.図10から,SS9.75 衝撃水圧ピーク値の高さ方向分布は3次元 CFD と規則荷重 でほぼ同等の傾向を示していることが分かる.一方で,2次元 CFD 結果は全体的にピーク値を高く評価しており, 構造強度の観点からは過度に安全側の評価を与える可能性があることが伺える.2次元モデルを用いた数値シ ミュレーションを援用する場合,衝撃荷重を定量的に評価するには3次元影響が大きく寄与することに留意する 必要があろう.



図9 衝撃水圧の評価結果



図10 規則における規定値と2次元及び3次元 CFD 計算結果から得られる圧力ピーク値の比較(SS9.75)

3.3 時刻歴構造応答解析

汎用 FEM ソフトウェア LS-DYNA を用い、3 次元 CFD 計算で得られた衝撃水圧波形を入力として時刻歴構造 応答解析を実施した.3 次元 CFD 計算において衝撃成分を含む水圧を FP, SS9.75, SS9.5, SS9.25, SS9.0, SS8.5 において W.L.2m 間隔で出力し、深さ及び長手方向に圧力値の線形補間処理を行って外板 FE 要素に作用させた. FE モデルは図 11 に示すように、SS8.5 より前方から FP までをモデル化し、ZY 平面に対する対称性を考慮して 半幅モデルとした.境界条件として FP 断面及び SS8.5 断面全接点の6自由度を拘束した.要素数は約85000 であ り、8core で総計算時間は約24h である.

船首スラミング現象が発生した際に衝撃水圧が最大となる時刻における,外板の Von-Mises 応力分布を図 12 に 示す. Von-Mises 応力は各要素内積分点における最大値を抽出している. コンター図の最大値は 250MPa としてい る. 図 12 中, FP 端及び SS8.5 端付近にて局部的に発生している高応力部は FE モデルの拘束による影響と見られ, 実現象では発生しないと考えられるが, FP より SS9.75 付近に至るまでのフレア部において高応力部が発生して いることが確認できる. 図 13 には, SS9.75 の各水圧計算箇所における外板の Von-Mises 応力時刻歴と衝撃水圧時 刻歴を比較して示す. 図 13 より, 11.0W.L.より上方の外板では, 150MPa 程度の Von-Mises 応力が一時的に発生 していることが確認できる. 一方, SS9.75 の 11.0W.L.より上方の外板では Wagner 型の水面衝撃現象が発生し, デッキ側ほどピーク値も高くなるが, Von-Mises 応力のピーク値は 150MPa 前後と同程度の値である. 作用時間が 極端に短い衝撃水圧成分は構造の過渡応答に対しての影響が小さいことが伺えた.









図 13 SS9.75 断面における作用圧力と時刻歴構造応答解析により得られる Von-Mises 応力のプロット

4. まとめ

本研究では、3次元船体に作用する衝撃水圧の定量的評価を目的として、数値流体力学(CFD)に基づく数値 シミュレーションによる検討を行った.2次元水面衝撃問題をCFDにより精度良く評価可能であることを第一に確 認した.次に規則波中を航行するコンテナ船をターゲットとしてスラミング衝撃荷重を算出し、2次元計算及び規 則荷重と比較した.結果,船体3次元性の影響により衝撃圧力ピーク値が大幅に変化することが確認された.また、 有限要素法と組み合わせることにより船首部の構造応答評価を行い、極端に作用時間の短い衝撃荷重が外板パネ ルの応力値に与える影響が小さいことが確認できた.なお本研究では船体の2節振動を考慮しておらず、スラミン グ衝撃に起因する船体梁の流力弾性応答(ホイッピング)の定量的評価法の構築が今後望まれる.

参考文献

- 1) 日本海事協会:鋼船規則C編船体構造及び船体艤装(2014)
- 2) 高見朋希,岡正義,山田安平:流体構造連成解析の水面衝撃問題への適用性に関する一考察,日本船舶海洋工 学会論文集,第16巻(2012), pp.99-107.
- 3) Wagner, V.H.: Über Stoß und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten, Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Band 12, Heft 4 (1932), pp.193-215.
- 4) Chuang, S.L. : Investigation of Impact of Rigid and Elastic Bodies in the Water, NSRDC Rep.3248 (1970) .
- Yasuhira Yamada, Tomoki Takami, Masahiro Oka: Numerical Study on the Slamming Impact of Wedge Shaped Obstacles considering Fluid-Structure Interaction (FSI), 21st International Offshore and Polar Engineering Conference (2012), pp1008-1016.
- 6) 角洋一,岡田真三,向井広樹,井上弘一:微小水撃角における弾性平板の水面衝撃の研究,日本造船学会論文 集,第182号(1991), pp.639-646.
- 7) 宮本武, 谷澤克治:船首部に作用する衝撃荷重について(第2報),日本造船学会論文集,第158号(1985), pp.270-279.
- 8) 萩原孝一, 湯原哲夫: 巨大船の船首波浪衝撃に対する強度, 三菱重工技報, Vol.11 No.6 (1974-11) (1974), pp.858-865.