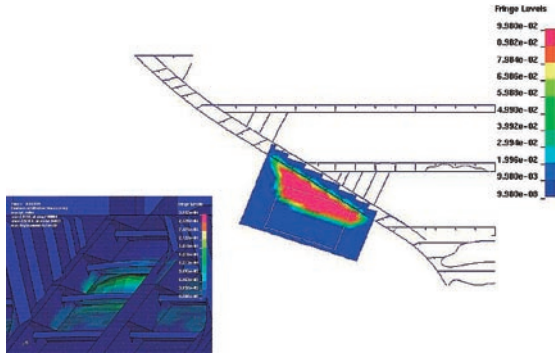


数値シミュレーションを用いた船首部耐波浪衝撃設計手法

Numerical Design Approach against Bow Flare Wave Impact

寺田 伸*¹ 岡藤 孝史*¹
Shin Terada Takashi Okafuji
宮崎 智*²
Satoshi Miyazaki



船首部の耐波浪衝撃設計は、古くより水槽試験や損傷実績から近似した半経験式を用いて実施されてきたが、近似式の前提条件に依存する部分が多い設計手法であった。一方、近年の数値解析技術の向上により、波浪衝撃現象は構造-流体連成数値シミュレーションにより再現することが可能となってきている。当社では、半経験的な従来手法に代わり最新のシミュレーション技術を適用することで、より直接的な現象再現に基づく耐波浪衝撃設計手法を構築し、新造大型コンテナ船の構造設計に適用した。

1. はじめに

船首部の波浪衝撃問題は、昭和40年代に急激に大型化、肥大化した扁平船首部で多数の損傷が報告された事例に始まり、現在までに当社をはじめ船級協会や研究機関においても様々な検討が実施され、多くの設計手法が提案されてきた。これら過去の検討は、理論式を水槽試験結果や当時の損傷実績により補完して近似した半経験的なものがほとんどであり、実用的な設計手法として有効であったが、理論的厳密さにおいては、検討を深める余地を残していた。

一方、最近の数値解析コードの開発や計算機能力の飛躍的向上に伴い、複雑な現象である波浪衝撃問題をより直接的に取り扱うことが可能な環境が整いつつある。当社では近年、製品の構造信頼性向上を目的に最新の構造-流体連成数値シミュレーション技術を船首部の耐波浪衝撃設計手法へ適用する取組みを開始した。

2. 波浪衝撃問題の歴史と当社の取組み

まず、船首部波浪衝撃問題について、現在までの当社をはじめとした国内での主要な研究取組み状況を簡単に紹介する。

2.1 大型肥大船での損傷発生と対策

昭和40年代における低速船舶（主にVLCC：超大型原油タンカー）の急激な大型化・肥大化に伴い、それまでほとんど報告されていなかった扁平船首部の波浪衝撃による損傷が多数報告されるようになった。西部造船会技術研究会では大学・造船関係者からなる小

委員会を設立し、実験や理論的考察と多数の損傷例から強度ガイドラインを設定した⁽¹⁾。その後肥大船での損傷は激減するが、このガイドライン自身には損傷逆解析に基づく大幅な近似が含まれており、船体形状や船速などの面で適用可能範囲は限定的であった。一方、当社では船首模型の落下衝撃試験を実施して、衝撃圧力と構造応答の発生メカニズムを解明し、許容超過発生確率に対応する極限等価静水圧という概念に基づく設計手法を早く提案した⁽²⁾。

2.2 大フレア船での損傷と対策

昭和50～60年代にかけてコンテナ船、自動車運搬船など船首部に大フレア形状を有する中／高速船において、再び損傷が報告されるようになった。西部造船会技術研究会では新たに新船首外板損傷小委員会（以下NBFD）を設立し、コンテナ船、自動車運搬船に対応した新たな強度ガイドラインを設定した⁽³⁾。また、当時当社でも大フレア船を対象とした研究⁽⁴⁾を実施しているが、いずれも研究の主眼は船体運動計算や水槽試験結果に基づく波浪衝突条件の精査であり、等価静水圧と損傷逆解析に基づく強度ガイドラインの設定という経験的アプローチは継承されたままであった。

3. 構造-流体連成解析技術を用いた波浪衝撃シミュレーション

次に波浪衝撃現象における構造応答メカニズムについて簡単に説明し、従来手法との比較から数値解析を設計へ適用した場合の利点を紹介する。さらに、数値解析を用いた場合の現象の再現性についても紹介する。

*¹ 技術本部長崎研究所強度研究室

*² 長崎造船所造船設計部船殻設計課

3. 1 構造応答メカニズムと従来設計手法

船首部の波浪衝撃現象は、波浪が図1に示すように船体構造と、ある相対速度と衝突角度を持って衝突することにより発生する。このとき発生する圧力や構造応答の特性は静水圧の場合とは大きく異なり、図2に示すとおり、局部的に発生した高圧力が構造上を移動しながら短時間で負荷／除荷され、構造はパネルの大きさや板厚などその幾何学的・構造的特性に応じて動的に応答する。

このように複雑な現象を実用的な精度と簡便さを持って理論的に展開することは困難であり、前述のとおり当社従来の設計手法ではより簡便な考え方として等価静水圧という設計荷重を導入し、これと損傷逆解析の結果から部材の部分的降伏を許容した弾塑性設計による強度クライテリアを適用してきた。この従来手法は実用的な設計手法として長年有効に用いられてきたが、弾塑性設計を許容しているにもかかわらず弾塑性領域での構造応答量（例えば残留変形量）が定量的に評価できないなど、理論的厳密さにおいては不十分な部分が残っていた。

3. 2 数値解析による応答シミュレーション

これに対し当社では近年、より厳密な直接計算を設

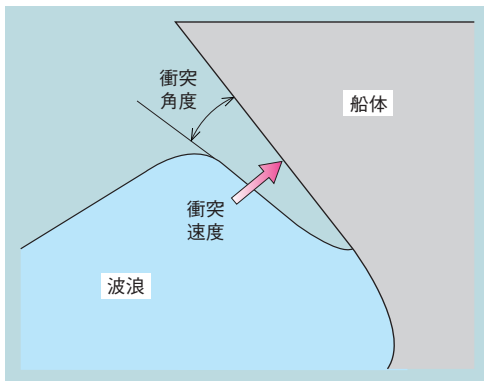


図1 船首部波浪衝撃現象

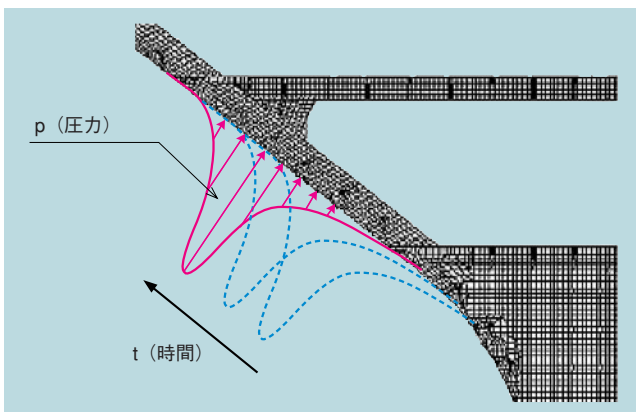


図2 構造応答メカニズム
局部的に発生した高圧力が移動しながら短時間に作用し、構造応答を発生させる。

計手法として導入するため、構造-流体連成解析コードである"LS-DYNA"によるシミュレーションを耐波浪衝撃設計に適用する取組みを開始した。LS-DYNAは米国LSTC社により開発され、現在では世界中で広く用いられている汎用有限要素解析プログラムであり、Eulerian要素により表現された流体モデルとLagrangian要素により表現された構造モデルにより、構造-流体連成問題に対する動的な弾塑性解析が可能である。

本解析コードを用いて計算した構造部材の波浪荷重に対する応答（変形量）時刻歴イメージを図3に示す。このシミュレーションを用いた設計の特徴は、解析対象の構造物に発生する残留変形量を定量的に計算することができる事である。すなわち、本解析を設計に適用することにより、一般に（確率論的極限荷重対応であるが故に）弾塑性設計を許容する結果になる波浪衝撃問題に対し、残留変形量の許容値を具体的に設定しながら構造寸法を決定することが可能となる。

さらには本解析を損傷解析に適用すれば、損傷船での残留変形実績から実船で発生した波浪荷重を精度良く逆推定することも可能である。

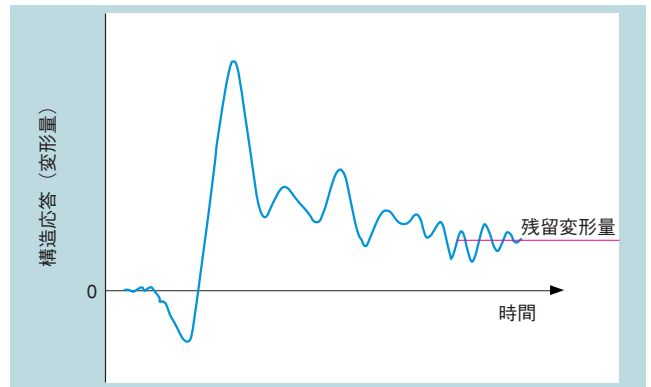


図3 “LS-DYNA”による応答時刻歴解析結果例
解析対象構造物に発生する残留変形量を定量的に計算できる。

3. 3 シミュレーション精度の検証

本解析コードの設計適用に先立ち、数値計算の精度検証を目的として、前述した船首模型落下衝撃試験の再現を試みた。

落下衝撃試験は図4に示すとおり、船首構造を部分的に模擬した実験モデルを様々な高さから水槽に落下させ、発生圧力及び構造応答を計測したものである。

この実験に対応する解析モデルを図5に示す。解析では、実験を模擬して落下速度を構造モデルに与え、静止した水面に衝突させる計算を実施した。

実験値と解析値における構造応答量比較を図6に示す。図に見られるとおり、解析は実験結果を十分な精

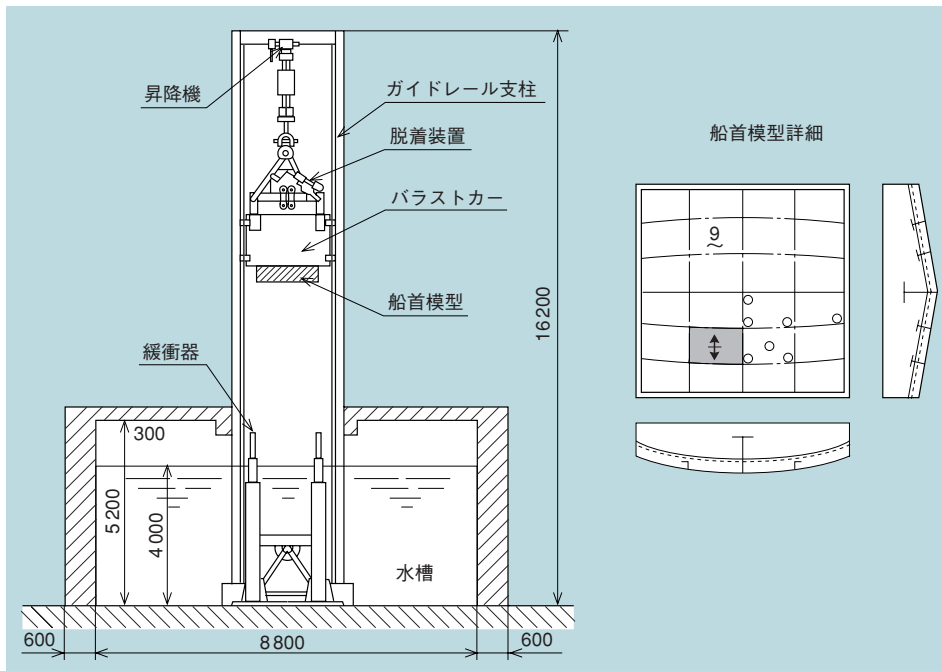


図4 船首模型落下衝撃試験
実験モデルを水槽に落下させ、発生圧力及び構造応答の時刻歴を計測した。

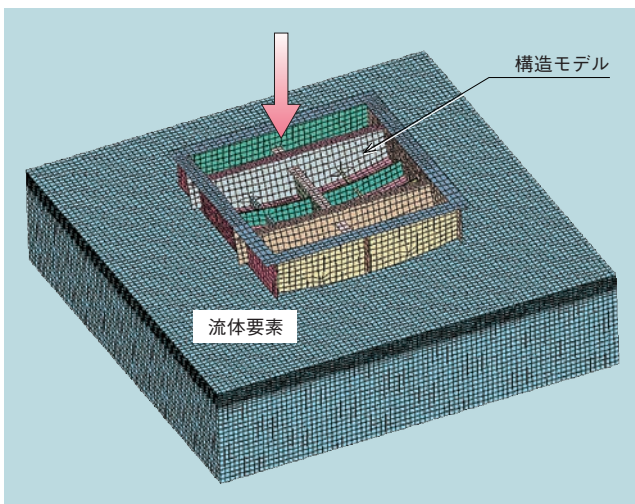


図5 模型落下実験対応の数値解析モデル
落下速度を構造シミュレーションモデルに与え、静止した水面に衝突させる。

度で再現できていることを確認した。

さらに本シミュレーションの計算精度は、当社が実施した自動車運搬船での実船計測結果からも検証されている。図7は実船計測により得られた船体外板パネルの発生応力と、対応するパネルに設計波浪荷重（前述のNbfdの方法から算出される波浪条件による）を負荷して計算された構造応答時刻歴を比較したものである。図に見られるとおり、解析は実船で計測された応力値を再現できている。

以上のように今回導入した数値解析手法は、波浪衝撃の実現象を精度良く推定し設計へ適用するために十分な精度を有していることが確認された。

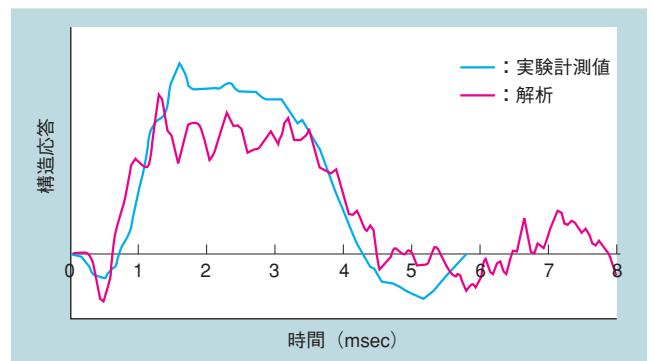


図6 構造応答量の実験値－解析値比較
解析は実験結果を十分な精度で再現できている。



図7 実船計測応答量と時刻歴解析結果の比較
解析は実船で計測された応力値を再現できている。

4. 新造コンテナ船設計への適用

数値解析による波浪衝撃シミュレーションの妥当性が確認されたため、本手法を当社長崎造船所で建造した最新コンテナ船の船首部構造設計に適用した。本章

では本船構造設計における数値解析シミュレーションの適用状況について紹介する。

4. 1 直接計算による構造設計例

図8には実際に本船の船首部部分構造モデルを用いて実施した解析モデル図を示す。設計荷重としては、代表的な設計荷重推定法であるNbfd法から算出される衝突速度、衝突角度の条件を用いた。計算結果の例として、図9には代表時刻での応力分布図を示す。

ここで前述のとおり、本解析では対象構造物に発生する残留変形量を定量的に計算することができるので、任意の構造に対してあらかじめ設定された残留変形許容量を満足するように構造寸法を決定することができる。

ただし、実際に新造船の構造設計に際しては、荷重条件や構造配置の異なる全ての部材に対して本直接計

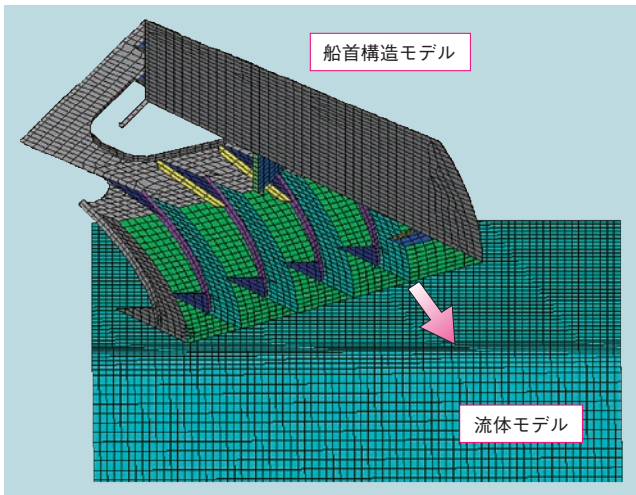


図8 新造コンテナ船の船首部解析モデル
波浪衝撃シミュレーションを新造コンテナ船の設計へ適用した。

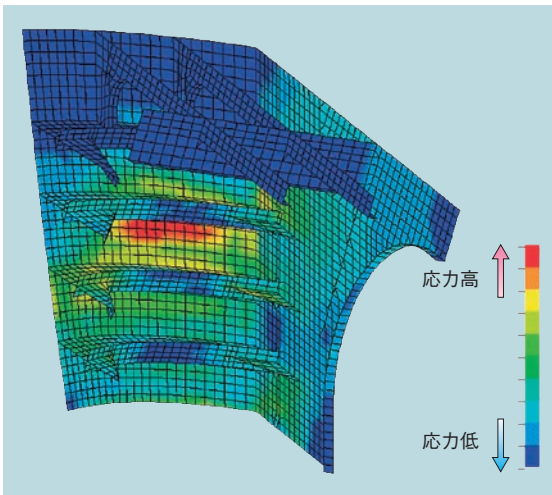


図9 代表時刻での応力分布図
本解析の適用により、このような応力分布が時刻歴で解析できる。

算を実施することは計算コスト及び設計期間の観点から現実的ではなく、本船の設計に際しては数値解析結果に基づいた、より簡便な設計手法を考案し、適用した。

4. 2 数値解析に基づく簡易設計手法

本船設計に適用した数値解析結果に基づく簡易設計手法のフローを図10に示す。本手法の概要と従来設計手法に対する有効性は概略以下のとおりである。

- 従来設計手法の技術的問題点は弾塑性領域での構造応答を評価できない点である。これは波浪衝撃応答において、弾塑性応答量は水圧の作用時間・範囲や衝突する水の質量、構造部材の振動特性などのパラメータに依存するが、従来手法ではこれを個別の衝突事象ごとに考慮できないことに起因する。
- これを補うために、新たな簡易設計手法では、弾塑性応答量を支配する上記パラメータを代表的な幾つかのタイプに区分し、各々のタイプについての荷重-弾塑性応答の関係をあらかじめ数値解析を実施して求めておく。
- 実際の構造設計作業においては、検討対象部材に対応するタイプについて与えられた荷重-弾塑性応答の関係を、対象部材の設計荷重と許容残留変形量の関係に当てはめる事で寸法を決定する。

図11には上述の荷重と弾塑性領域での応答量の関係についての一例を示す。

以上のように本船では、直接計算に加えて数値解析に基づく簡易手法も併用することで、より信頼性の高い船首部構造設計を実現している。

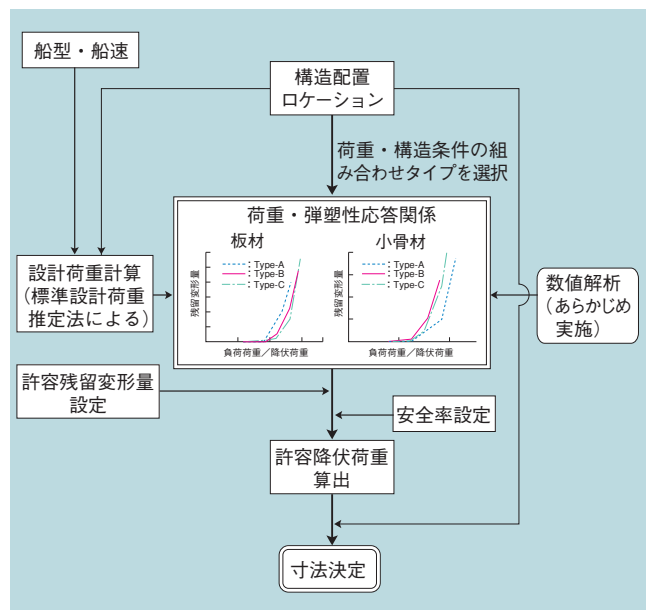


図10 数値解析結果に基づく簡易設計手法のフロー
あらかじめ実施した数値解析結果に基づき、構造寸法を精度良く簡易的に算出する。

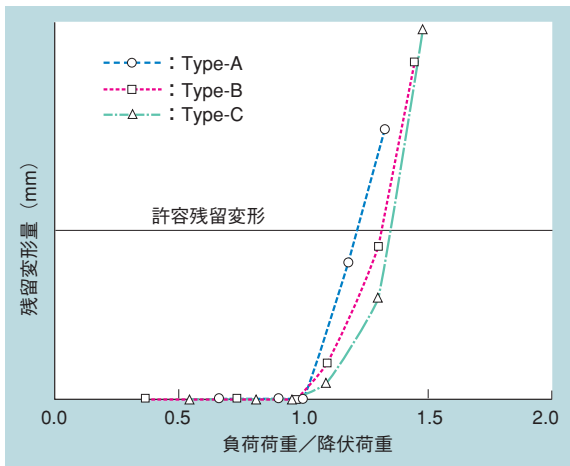


図 11 負荷荷重－弾塑性応答量の関係
部分的に降伏応力を超える荷重に対する部材の残留変形量を数値解析で定量的に評価した。

5. ま と め

船首部の波浪衝撃問題は、荷重発生から構造応答までの現象メカニズムが極めて複雑であり、本質的にばらつきの大きい確率論的問題である。そのため、これまで数多くの研究が実施され推定手法が提案されているが、実績との関係などから推定に大幅な近似を含むものが多い。本報では主に構造応答のメカニズムに焦点を絞り、最新のシミュレーション技術を適用した精度の高い構造設計手法を紹介した。一方、波浪衝撃荷

重の発生メカニズムについては、近年の船型や運航形態の変化に伴い、過去の推定手法における前提条件が必ずしも適合しないケースも考えられ、現在も船級協会や大学を始めとする研究機関により、様々な研究が継続されている。当社も今後実際の就航状況の反映や最新解析技術の広範な適用に一層注力し、引き続き構造信頼性の高い船舶を提供するよう努めていく計画である。

参 考 文 献

- (1) 西部造船会技術研究会構造部会, 船体の損傷に会
する調査研究 (4) - 波浪による船首外板の損傷
とその対策 - 西部造船会技術研究会研究報告第
16号 (1974)
- (2) 萩原孝一ほか, 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) p.90
- (3) 西部造船会技術研究会構造部会, 船体の損傷に会
する調査研究 (5) - 波浪による船首外板の損傷
とその対策 (2) - 西部造船会技術研究会研究報
告第 18号 (1987)
- (4) 萩原孝一ほか, 大フレアー船の船首部波浪衝撃水
圧, 三菱重工技報 Vol.23 No.1 (1986) p.45



寺田伸



岡藤孝史



宮崎智