

論 文 の 要 旨

題 目 主成分分析に基づく設計変数分類法と実用的な船舶構造最適化システムに関する研究

(Classification method of design variables based on principal component analysis and practical optimization system for ship structures)

氏 名 平川 真一

近年、地球温暖化問題に対する社会的関心の高まりから、地球温暖化ガス(GHG)の削減が急務となっており、国際海運においても GHG 削減スキームを国際海事機関(IMO)において採択するなど GHG 排出削減に向けた規制強化が進められている。また、船舶からの GHG 排出を規制するための指標として、エネルギー効率設計指標(EEDI)等が導入され、これらを用いた省エネ性能の見える化と規制値への適合評価が行われることになった。また、EEDI の規制値は、建造契約日と完工日に応じて段階的に厳しい値になることが決定しており、船舶構造に関しては、同船型での載貨重量(DWT)の増加、すなわち、船殻重量の低減に対する圧力が一層強まることが予想される。

一方、船舶を設計するための規則強化も進められている。1999 年のエリカ号、2002 年のプレステージ号といった重大海洋汚染事故が発生し、これらの事故を契機として、IMO が船舶構造の安全性に関する法制化に乗り出すべきとの機運が高まった。2016 年 7 月 1 日以降に建造契約が結ばれる油タンカー及びばら積み貨物船を対象とする船級協会等の構造規則等に対して目標指向型構造基準(GBS)適合を強制化する SOLAS 条約改正及び GBS の機能要件等を定めた決議が 2010 年に IMO で採択された。

このような状況下で、国際船級協会連合(IACS)は、2003 年に従来の船舶構造強度に関する部分的な IACS 統一規則を超えて、油タンカー及びばら積み貨物船の船舶構造の安全基準全てをカバーする IACS として初めての包括的な共通構造規則(CSR)を開発することを決定した。2005 年に IACS において CSR が採択され、2006 年 4 月 1 日に施行された。しかしながら、CSR が油タンカー版(CSR-T)とばら積み貨物船版(CSR-B)に分かれていることに対して、船種によらず共通して取り扱うことのできる技術的項目については統一すべきとの関連業界からのコメントを受けて、IACS は 2008 年より両規則の調和作業を行ってきた。上述した IMO の動きと連動して、IACS による調和 CSR の開発作業が進められており、2015 年 7 月 1 日に発効されることが決定された。

CSR 及び調和 CSR は、基本的には安全性の高い船舶の建造を目的としているため、従来の船級規則によって建造された船舶よりも強固になり、船殻重量は 10%近く増加することが報告されている。また、CSR は非常に複雑化しているため、CSR に適合した構造設計では、船級協会から提供される設計ツール(船級ソフト)を用いることが不可欠となっている。そのため、従来と比べると設計工数が非常に増大していることが問題となっているが、設計者は限られた設計期間内に CSR に適合した設計をすることだけで手一杯になり、設計作業のブラックボックス化による思考停止や工学的センスの醸成阻害なども懸念されている。

受注環境に目を向けると、韓国や中国では過剰な設備投資によって船舶建造能力を急速に拡大しており、それに起因する船腹の供給過多は熾烈な受注競争及び低価格競争を引き起こしている。その一方で、鉄鋼資源の需給不均衡によって、鋼材費に代表される材料費は高止まりの傾向が伺える。

このように、船舶の受注・設計・建造を取り巻く国際環境は厳しさを増しており、造船会社の構造設計に対しては、各種規制や規則に適合したより低コストな船舶構造を迅速に設計することが求めら

れている。以上の背景から、本研究では、船級規則に適合したより価格競争力のある船舶構造を迅速に設計するための手法を構築することを目的として、それを実現するために必要な研究及び技術開発を行った。本研究によって得られた成果を章毎に纏めて以下に総括する。

第2章「部材寸法計算による構造最適化」では、油タンカーの船体中央横断面の構造最適化を実現するために、CSR-Tの部材寸法要件に適合した構造最適化システムを、PSH-Rules-Excelの改良プログラムと島遺伝的アルゴリズムを組合せて開発した。開発した構造最適化システムを150KDWT油タンカー及び300KDWT油タンカーの船体中央横断面の構造最適化問題に適用した結果、開発した構造最適化システムは、CSR-Tの部材寸法要件に適合しており、また、建造コストや船殻重量を目的関数とした構造最適化が実用的な時間で実現できることを示した。

第3章「制約条件を考慮した設計変数の分類法」では、従来の設計や製造の観点による設計変数の分類法に関する課題を解決するために、設計変数の制約条件に対する影響度と主成分分析に基づく設計変数の分類法を構築した。また、構築した手法を水圧荷重を受ける簡易箱船モデルと300KDWT油タンカーの船体中央横断面の構造最適化問題に適用して構築した手法が有効に機能して従来よりも優れた最適解が得られることを示した。また、構築した手法は、数値最適化の観点から予断のない設計変数グループに分類することが可能であり、経験の浅い設計者が最適設計を行う場合や、新しい構造の最適設計が必要な場合において、有用な手法であることを示した。

第4章「座屈・最終強度評価法」では、CSRに適合した構造最適化に適用可能な座屈・最終強度評価法を構築するための検討を行った。まず、CSRで規定される座屈・最終強度評価法を概観して、それらを構造最適化に適用する場合には、CSR-Tの高度座屈解析法に適合する新たな評価法が必要であることを示した。次に、座屈強度簡易推定式及び原田らが開発した陽表示の最終強度簡易推定式を構造最適化に適用可能な状態まで展開した。後者については、板や防撓材の力学的な特性を表現するパラメータに修正項を乗じて算出する修正係数を導入することにより、CSR-Tの高度座屈解析法に適合することを確認した。更に、修正後の最終強度簡易推定式の計算速度は、船級ソフトを用いる場合と比較して約240倍に高速化されたことを確認した。以上の結果から、座屈強度簡易推定式と修正後の最終強度簡易推定式を用いることにより、CSR-Tに適合した構造最適化に適用可能な座屈・最終強度評価手法が構築できたことを確認した。また、提案した最終強度簡易推定式の修正方法は、最終強度簡易推定式をFEM解析や実験結果に一致させる場合にも応用できることに言及し、その際、修正係数を構成する修正項の数値によって、修正に対する有効性を評価できることを示した。

第5章「FEM解析による構造最適化」では、CSRで規定されるFEM解析に基づく構造強度評価の構造最適化への適用を実現するための検討を行った。まず、設計初期段階における構造最適化に適用可能な構造強度評価システムに必要な機能とそれを実現するための課題を整理して、FEM解析モデルの自動作成手法の構築、複雑なCSRのFEM解析プロセス（荷重境界条件等の解析条件の設定、降伏強度や座屈・最終強度等の解析結果の評価）の自動化及び迅速化が必要であることを示した。FEM解析モデルの自動作成手法については、2次元CADイメージのテンプレートを用いる手法を構築し、CSRで規定されるモデル化法に適合した油タンカーやばら積貨物船の中央部貨物倉のFEM解析モデルを自動生成できるだけでなく、形状変更も容易に行うことができることを示した。また、CSRのFEM解析プロセスを自動化する機能を開発し、その一部に含まれる座屈・最終強度評価機能には第4章で構築した手法を用いた。油タンカーとばら積貨物船を対象に、開発した構造強度評価システムと船級ソフトによる評価結果を比較することにより本システムがCSRへ適合することを示した。最後に、本システムを300KDWT油タンカーの設計最適化問題に適用した結果、通常的设计における船級ソフトを用いた検討では実施不可能だった検討を実用的な時間で行うことが可能になり、設計者の判断に資する定性的かつ定量的に妥当な結果を出力できることが確認できた。以上の検討結果から、開発し

た構造強度評価システムは、CSRで規定されるFEM解析に基づく構造強度評価に適合し、構造最適化へ適用可能であることを確認した。

また、本研究に関連した今後の研究課題を以下に示す。

- (1) CSR-Tの座屈・最終強度評価手法の一部について、適切な簡易評価法を構築できていないため、今後の開発が望まれる。その対象は、防撓パネルの評価法2、非防撓パネルの評価法1及び防撓パネルの評価法1でせん断荷重が加わる場合である。
- (2) 現時点では構造強度評価システムと部材寸法要件に適合した構造最適化システムとの自動接続を実現していないため、設計縦曲げ荷重が変化する主要目や区画配置、構造配置を変更する場合には、手動操作が必要となる。しかしながら、これらの設計パラメータは船舶構造への影響が大きいため、両システムの自動接続を実現する意義は大きい。そのためには、部材寸法要件に適合した構造最適化システム側に、配置データ設定の柔軟性を持たせることや設計縦曲げ荷重の計算機能等を開発する必要がある。
- (3) 開発した構造強度評価システムでは、局部詳細メッシュ構造強度解析及び極詳細メッシュ疲労解析機能は対象外としたが、これらの機能は本研究で開発した機能を拡張することによって比較的容易に実現できると考えられる。