

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20246126

研究課題名（和文） 船体構造の最終強度とその確率モデルに関する研究

研究課題名（英文） Ultimate strength of ship structure and its uncertainty model

研究代表者

藤久保 昌彦 (FUJIKUBO MASAHIKO)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：30156848

研究成果の概要（和文）：

船体の最終強度とその不確定性に関して以下の成果を得た。(1)き裂損傷を有する防撓パネルの圧縮および横圧荷重下の最終強度とその不確定性を明らかにした。(2)Smith法による船体横断面の逐次崩壊解析で求められる縦曲げ最終強度のモデル不確定性を定量化した。(3) Smith法を、損傷による欠損部が存在する横断面の最終強度解析に適用できるよう拡張した。(4)理想化構造要素法を適用し、損傷時を含むホールド規模の船体構造の効率的な最終強度解析システムを構築した。(5)構造の塑性変形と流体力との相互影響を考慮した船体梁の崩壊挙動解析モデルを開発し、実験との比較よりその有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：The ultimate strength of ship structures in the damaged as well as intact condition is studied including the uncertainty in the strength. The following achievements were made: (1) The ultimate strength of a continuous stiffened panel with crack damage under combined thrust and lateral pressure were investigated; (2) The model uncertainty in the prediction of the ultimate longitudinal bending strength of a hull girder using Smith method was quantified; (3) The Smith method was extended to be applied to the cross section with damages; (4) ISUM system for the efficient analysis of the ultimate strength of a ship structure with and without damages were developed; (5) A dynamical model to predict the collapse behavior of a ship hull girder considering the interaction between plastic deformation and fluid force was developed and verified by the tank test.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2009年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
総計	18,500,000	5,550,000	24,050,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：船体構造；最終強度；不確定性；損傷；リスク解析

1. 研究開始当初の背景

| 近年、老朽化タンカーの折損・油流出事故

が相次いで発生し、甚大な環境被害が引き起こされたことを契機に、国際海事機関 IMO では、船体構造基準が目標とすべき安全レベルを独自に定めることが合意され、目標達成型船体構造基準 (Goal Based Standard for New Ship Construction; GBS) が構築されることになった。最終強度に関する性能要件には、非損傷時の最終強度の他、事故による損傷が生じた後の残存強度に関する要件が含まれた。また GBS には、仕様のアプローチとセイフティーレベルアプローチ (SLA) があり、後者はリスク解析に基づいて安全性を定量的に評価するものである。

GBS は、安全性のゴールを達成すれば、規則に縛られず多様な設計が可能である点で、技術開発を促進するものと期待される。特に SLA は、信頼性に基づく合理的な設計を可能にすると考えられる。しかし、SLA における安全性レベルやその目標値を定めるには、構造強度の面からは、船体構造および構造部材の最終強度とその確率的性質を明らかにする必要がある。また残存強度を評価するためには、各種損傷が全体強度に及ぼす影響を定量化することが必要である。

構造信頼性解析における強度モデルの開発で重要なことは、材料定数、初期不整などの基本不確定因子を物理的に正しい形で考慮できる合理的な強度モデルの開発と、強度モデルにおける各種の工学的近似を補うためのモデル不確定性の定量化である。モデル不確定性パラメータとは推定強度とより高度な解析または実験結果の比であり、これを考慮することにより推定強度の不確定性を補うことができる。

2. 研究の目的

本研究では、GBS/SLA に必要とされる基本技術の確立を目標として、損傷時を含む船体の最終強度解析法とその不確定性について検討する。特に、防撓パネルなど部材レベルの破損を超えて横断面、ホールドなどの構造体としての最終強度評価が重要であること、およびリスク評価では、最終強度だけではなく塑性変形量を含む崩壊挙動の予測が必要であることから、船体の効率的な崩壊挙動解析法の開発に重点を置き、これらと平行して強度の不確定性について検討を加える。具体的には以下の項目を研究目的とする。

- (1) 船体構造部材の最終強度とその不確定性の定量化
- (2) 船体横断面およびホールドの最終強度解析法の開発と強度不確定性の定量化
- (3) 船体梁の波浪中崩壊挙動解析法の開発

3. 研究の方法

- (1) 船体構造部材の最終強度とその不確定性の定量化

連続防撓パネルに板厚貫通のき裂損傷が生じた場合の残存強度を有限要素解析により調べる。き裂の位置、大きさが最終強度に与える影響と強度不確定性を明らかにする。

(2) 船体横断面およびホールドの最終強度解析法の開発と強度不確定性の定量化
船体横断面の最終強度解析に広く使用される Smith 法の簡易計算モデルとしての不確定性を詳細有限要素解析との比較により明らかにする。また衝突や座礁によって断面欠損を生じた船体の最終強度について、Smith 法による横断面解析と理想化構造要素法によるホールド解析のそれぞれを可能にすると共に、解析法の精度を明らかにする。

(3) 船体梁の波浪中崩壊挙動解析法の開発
構造変形と流体との相互作用を考慮した船体梁の崩壊挙動解析モデルを開発し、水槽試験との比較によりその適用性を調べる。

4. 研究成果

- (1) 船体構造部材の最終強度とその不確定性

図 1 に示すような連続防撓パネルの板、防撓材のいずれかに板厚貫通き裂が生じた場合の残存強度を検討した。損傷時の構造冗長度 (structural redundancy) を評価するため、数ベイに亘る領域を取り出して検討した。得られた主な結果はつぎの通りである。スパン中央にき裂が位置する場合に強度低下が最大となる。き裂が防撓材に対して垂直に位置する場合 (TC2 等)、防撓材が分離破断しない範囲では、縦圧縮応力は隣接パネルに流入し一定の荷重再分配が生じるため、損傷部パネルを単純に除去した強度よりも防撓パネル全体としての縦圧縮残存強度は大きい。横圧を伴う場合、横圧による亀裂部の面外変形の増加が圧縮強度に大きく影響を与える。また亀裂面の接触を考慮するか否かによって強度に有意差があり、損傷に応じたモデル化が必要である。これらの不確定性を強度評価に考慮する必要がある。

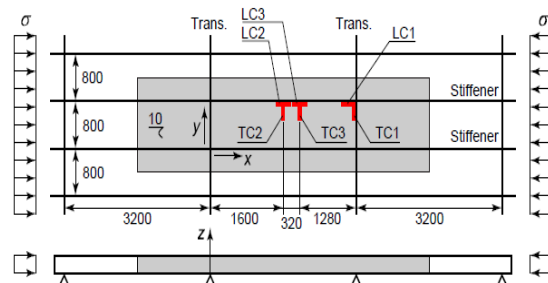


図 1 き裂損傷を有する連続防撓パネル

- (2) 船体横断面の最終強度とその不確定性
船体の縦曲げ最終強度解析には Smith 法が広く用いられる。Smith 法は、防撓材とその

両側のパネルの半幅ずつの範囲を単位要素として船体横断面を分割し、各要素は圧縮・引張の軸力作用下でそれぞれ独立に伸縮するものとしてあらかじめ平均応力～平均ひずみ関係を求めておき、これと断面平面保持の仮定から断面の縦曲げ最終強度を求める方法である。この方法に基づく逐次崩壊解析プログラム HULLST と FEM による詳細解析との比較から、Smith 法に基づく縦曲げ最終強度計算値のモデル不確定性を定量化した。FEM による横断面の逐次崩壊解析では、1 フレームスペースモデルを使用し、パネル、防撓材に現実的な大きさおよび形状の初期たわみを与えた。ただし溶接残留応力の影響は考慮していない。

バルクキャリアおよびタンカーに関する系統的な解析結果から、モデリングパラメータ (=FEM 推定値/Smith 法推定値) の期待値は、バルクキャリアが 1.08、タンカーが 1.09 となった。次にこれらの結果を用いて、バルクキャリアおよびタンカーのコストリスクに基づく目標安全レベルの検討を行った。さらに目標信頼度に対する各種モデリングエラーの感度を明らかにした。詳細は、材料定数を含む各種確率因子の不確定量の調査結果を含めて、発表雑誌論文①に記載されている。図 2 に、タンカーの曲げモーメント～曲率関係の計算結果の一例を示す。

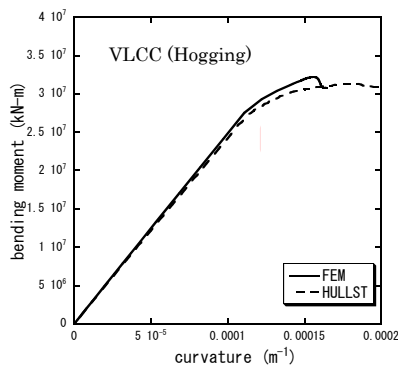


図 2 曲げモーメント～曲率関係

(3) Smith 法の損傷横断面への拡張

船体は、基本的に幅方向に対称な断面であるため、垂直曲げに対する中立軸は水平となる。しかしながら、座礁や衝突により船底あるいは船側に損傷が生じると断面は左右非対称な剛性分布となり、断面の主軸は傾斜する。その結果、垂直曲げモーメントによっても水平曲げ変形が生じるようになる。このような非対称断面に Smith 法を適用できるよう、理論を拡張した。具体的には二軸曲げの一般式から出発して、逐次崩壊の各段階で瞬時中立軸を求めながら曲げモーメント～曲率関係を計算することを可能にした。

本解析法による横断面の最終強度推定値

の不確実性は、(2)の不確定性に加えて、損傷部のモデル化（完全欠損と見なすか残存強度を考慮するか）および損傷に起因する 3次元性の取り扱い（二重底の偏心曲げなど）に依存する。

(4) 船体ホールドモデルの最終強度とその不確定性

損傷を有する船体構造の縦曲げ最終強度を詳細に調べるため、図 3 に示す 3 ホールドモデルによる FEM 解析を実施した。中央ホールドはシェル要素で十分に細く要素分割を行った。一方、両端ホールドは比較的粗いメッシュとし、材料は弾性体を仮定した。要素数は約 28 万要素である。陰解法では解析困難であるため、陽解法解析コード MSC. Dytran を使用した。損傷は座礁による損傷を考え、基本的な場合として船底中央に損傷を仮定した。

本解析より、二重底外板に損傷が生じると、ホギング状態では、船体梁全体としての縦曲げに加えて、前項(3)の偏心曲げによる二重底の局所的な曲げ変形が生じ、これによる圧縮応力が船底外板に付加されることが判明した。その結果、偏心曲げの影響を無視する Smith 法によって得られる最終強度は FEM 解析に比べて高くなる (図 4 の beam (w/o additional stress))。そこで別途、二重底を独立した一本の梁と見なして、この局所梁のひずみを船体はりのひずみに加えて Smith 法により解析を行ったところ、推定値は FEM に比べかなり小さくなった。(図 4 の beam(total)) これは、二重底を単純に梁と見なすと変形を過大に推定することを表す。

以上のことから、ホギング時の損傷時強度をより正確に推定するためには、Smith 法では限界があり、FEM あるいは ISUM (理想化構造要素法) による解析が必要であると判断した。そこで、プリポスト部を含む ISUM システムの充実を図り、損傷を考慮できるようシ

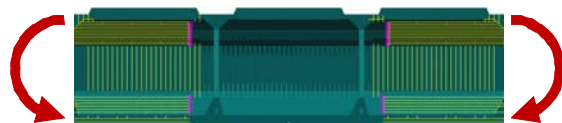


図 3 3 ホールドモデル

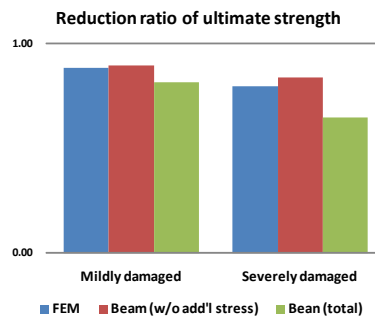


図 4 船底損傷時のホギング最終強度の比較

システムを改良した。なおサギングについては Smith 法により良好な最終強度推定値が得られることを確認した。

(5) 船体梁の波浪中崩壊挙動解析法の開発
リスクに基づく船体梁の安全性評価のためには、最終強度と荷重から決まる破損確率 (Frequency) と共に、事故によりもたらされる結果 (consequence) の予測が必要である。具体的には、最終強度後の塑性変形量を推定することが重要となる。

船体梁が縦曲げ最終強度に達した後は、座屈の影響によって図 5 のように曲げ変形の増加とともに曲げ耐力が低下する。したがって、変形量を含む挙動予測のためには、最終強度後の耐荷力の変化、および塑性変形と流体力の相互作用を考慮した応答解析が必要である。これは損傷状態の船体でも同様である。そこで図 5 に示すような曲げ強度特性を持つ箱船モデルについて過渡水波を与える水槽試験と理論解析を行い、図 6 に示すような変形時系列が実験結果と良好に一致することを示した。

SLA に基づく船体構造の安全性評価のためには、前項までに述べた各種の最終強度解析法とその不確定性評価、および事故シナリオの予測と挙動の推定が総合的に必要とされる。本課題ではその基盤となる研究成果を得ることができた。

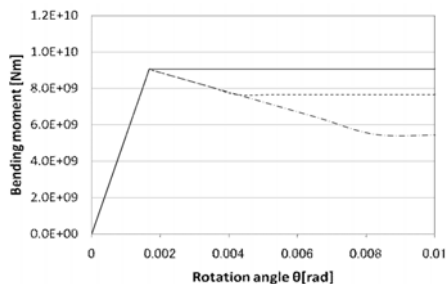


図 5 船体梁の曲げモーメント～曲率関係の例

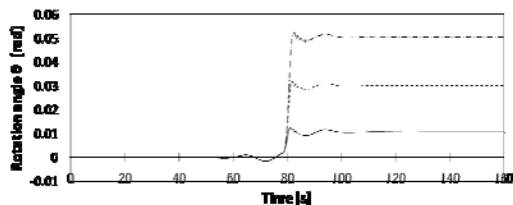


図 6 最終強度後の耐力低下を考慮した変形量の時系列 (図 5 の強度特性を持つ箱船モデルの計算例)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 飯島一博、藤久保昌彦：リスク評価に基づく船体縦曲げ最終強度の目標安全性の検討、日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 13, 2011 (掲載予定), 査読有。

[学会発表] (計 5 件)

- ① K. Iijima, K. Kimura, W. J. Xu and M. Fujikubo: Hydroelasto-plasticity Approach to Predicting the Post-ultimate Strength Behavior of Ship's Hull Girder in Waves, Proc. of Marstruct 2011, Hamburg, Germany, March 29, 2011, 査読有。
- ② 柳原大輔, 三宅良文：き裂損傷を有する防撓パネルの圧壊挙動に関する研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集, 佐世保, 2010 年 11 月 5 日, 査読無。
- ③ Z. Pei, T. Takami, K. Iijima, M. Fujikubo and T. Yao: Development of ISUM Shear Plate Element and Its Application to Progressive Collapse Analysis of Plate under Combined Loading, Proc. of ISOPE 2010, Beijing, China, June 24, 2010, 査読有。
- ④ T. Yao, M. Fujikubo, K. Iijima and Z. Y. Pei: A system for Progressive Collapse Analysis of Ship's Hull Girder in waves with Combined ISUM/FEM and Wave response Analyses, Proc. of ISOPE2009, Osaka, Japan, June 24, 2009, 査読有。
- ⑤ K. Iijima and M. Fujikubo: Change in Safety Level against Collapse of Ship's Hull Girder in Longitudinal Bending According to Change in Design Criteria, Proc. of ICOSSAR2009, Osaka, Japan, September 15, 2009, 査読有。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤久保 昌彦 (FUJIKUBO MASAHIKO)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：30156848

(2) 研究分担者

飯島 一博 (IIJIMA KAZUHIRO)

大阪大学・工学研究科・講師

研究者番号：50302758

岡澤 重信 (OKAZAWA SHIGENOBU)

広島大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10312620

柳原 大輔 (YANAGIHARA DAISUKE)

愛媛大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10294539