

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246150

研究課題名(和文)大波高下における浮体構造の崩壊挙動解析法の開発と応用に関する研究

研究課題名(英文)Development and application of the method of collapse behavior of floating structures in large waves

研究代表者

藤久保 昌彦(Fujikubo, Masahiko)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30156848

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,600,000円

研究成果の概要(和文)：大波高下における船舶や浮体式海洋構造物の構造安全性評価を目的として、船体運動、流体挙動および構造変形の相互作用を考慮した浮体構造物の崩壊挙動解析法を開発した。具体的には、1次元梁モデルに基づく簡略法と理想化構造要素法(ISUM)に基づくより高精度解析法を開発した。また、縦曲げ崩壊挙動が実船と等価な水槽試験模型を製作し、波浪中崩壊試験を行った。水槽試験結果との比較より、解析法の妥当性を検証するとともに、解析法を用いて、荷重の作用時間が崩壊変形量に及ぼす影響を含めて、浮体構造物の波浪中崩壊挙動特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of structural safety assessment of ships and floating offshore structures in large waves, two methods of collapse analysis of floating structures in waves considering the interaction among motions, fluid behaviors and structural deformation were developed. One is the simplified method based on the one-dimensional beam model and the other the more refined method based on the Idealized Structural Unit Method (ISUM). Collapse tests were performed in wave tank using the models designed so that the longitudinal bending collapse behavior is equivalent to that of proto-type ships. The developed methods of collapse analysis were validated through a comparison with the tank test results. A series of collapse analyses was performed to clarify the characteristics of collapse behavior of floating structures in large waves including the effect of time duration of applied loads on the collapse extent.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船体構造 浮体式海洋構造物 波浪中崩壊挙動 安全性評価 水槽試験 流体構造連成 理想化構造要素法

1. 研究開始当初の背景

近年、構造物の安全性評価の定量的指標としてリスクが広く使用される。構造物の破損リスクは、破損頻度 (frequency) と結果 (人命、環境等の被害; consequence) の積で与えられる。consequence 解析では、最終強度だけでなく、崩壊変形量等の破損程度とその影響度の推定が必要である。特に浮体構造のリスクベース安全性評価においては、大波高下における構造崩壊挙動の予測技術を確立することが重要である。

船体桁の縦曲げ崩壊を例にとると、縦曲げモーメントが船体横断面の最終強度に達した後、曲げ耐荷力は、座屈と降伏の影響により低下する。一方、波浪荷重はこれに合わせて低下しないため、不平衡分は、崩壊変形による浮力分布の変化や慣性力の発生により補われる。すなわち、非線形な構造崩壊挙動と流体挙動の相互影響を考慮した流体・構造連成解析が必要となる。

2. 研究の目的

本研究では、構造耐力の非線形性、流体力の非線形性および構造変形と流体力の相互影響を考慮した実用的な波浪中崩壊挙動解析技術の確立を目的として、次の4項目を具体的な研究目的とする。

- (1) 曲げ/剪断/捩りの複合荷重下の船体桁の効率的かつ高精度の逐次崩壊解析法の開発
- (2) 構造変形と流体力の相互作用を考慮した大波高下の船体桁の非線形動的応答解析法の開発
- (3) 崩壊挙動の相似性を満たす水槽模型試験の実施と提案解析手法の妥当性の検証
- (4) 開発した解析ツールの船舶および浮体式海洋構造物の実問題への適用

3. 研究の方法

- (1) 梁モデルによる複合荷重下の船体桁の逐次崩壊解析法の開発

船体を曲げ、剪断および捩りを考慮できる薄肉断面梁にモデル化し、座屈および塑性崩壊の影響は Smith 法を用いて考慮することにより、船体桁の効率的な逐次崩壊解析法を開発する。Smith 法とは、船体横断面を防撓パネル要素に分割して、横断面の縦曲げ最終強度を求める手法である。これを薄肉断面梁要素と組み合わせることにより複合荷重下の船体桁の解析を可能にする。また、コンテナ船に曲げおよび捩りモーメントが作用する場合の解析を実施し、詳細 FEM 解析との比較より、解析法の精度を検証する。

- (2) 理想化構造要素法による船体桁の非線形動的応答解析法の開発

理想化構造要素法 (Idealized Structural Unit Method; ISUM) と運動・荷重解析を組み合わせた、運動・構造崩壊一体化解析プログラムを開発する。運動・荷重解析と構造崩壊解析の一体化には、直接連成解析と弱連成解析が可能であるが、本研究では既存の

ISUM システムと研究分担者の開発による SSODAC システムを弱連成で結合することにより、波浪中構造崩壊挙動を再現する。解析法の適用性は、(3)に述べる理論解析モデルとの比較により検証する。

- (3) 崩壊挙動の相似性を満たす水槽模型試験の実施と提案解析手法の妥当性の検証

波浪中における船体桁の縦曲げ崩壊挙動を再現すると共に、開発する解析法の適用性を検証するため、実船と縦曲げ崩壊挙動が似た水槽試験模型を製作し、波浪中崩壊試験を実施する。模型製作では、最終強度だけでなく、最終強度後の曲げモーメント・曲率関係を等価にする。また、船体を水槽試験模型と等価な力学モデルに置き換えて崩壊挙動の理論解を求め、解析法の検証に供する。

- (4) 解析法の実問題への適用

開発した解析法およびプログラムを用いて、実船および船型浮体式海洋構造物の波浪中縦曲げ崩壊解析を実施する。また各種積載条件における崩壊挙動を明らかにする。さらに、各解析法で得られる結果を相互比較することにより、各手法の精度、計算効率両面の適用性を明確化する。

4. 研究成果

- (1) 梁モデルによる複合荷重下の船体桁の逐次崩壊解析法の開発

船体の縦曲げ最終強度の実用解析法である Smith 法では、船体横断面を防撓パネル要素に分割し、座屈および降伏を考慮して各要素の平均軸応力～平均軸ひずみ関係を予め求める。つぎにこの関係を材料特性と見なして横断面の曲げモーメント・曲率関係および最終強度を求める。本研究では、船体を薄肉断面梁要素でモデル化し、これに Smith 法を導入して、曲げ・捩りの複合荷重を受ける船体の逐次崩壊解析法 BM-HULLST を開発した。本解析法は、捩りによる剪断応力および反り応力を考慮可能である。図 1 に梁要素によるコンテナ船のモデル化図を示す。実用化のため、プロポストシステムも整備した。

BM-HULLST を用いて、コンテナ船の逐次崩壊解析を行った結果を図 2 に示す。捩りによる反り応力が大きい機関室前方の 3 ホールド範囲を取り上げ、曲げと捩りを負荷した。比較のため、陽解法 FEM コードである Dyna-3D による崩壊解析も実施した。

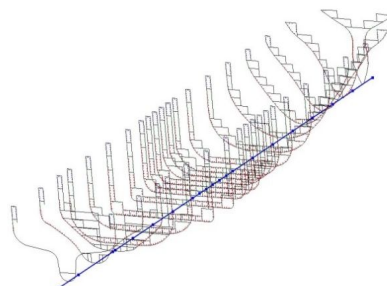
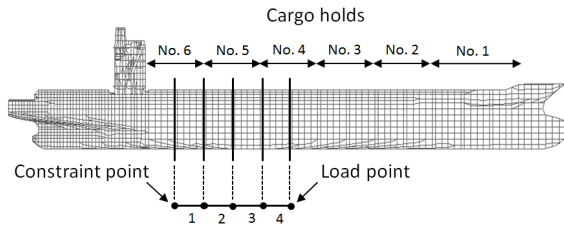
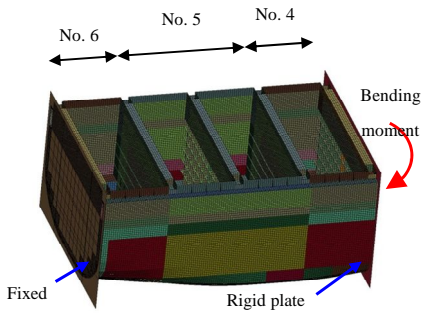


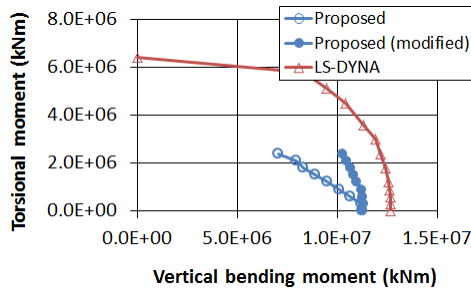
図 1 BM-HULLST によるコンテナ船のモデル化



(a) 対象船とモデル化範囲



(b) FEM モデル



(c) 最終強度相関関係

図 2 曲げと捩りを受けるコンテナ船の解析

図 2(c) に示すように、BM-HULLST の結果は、仮定する反り関数の精度に依存するが、適切な関数を用いると FEM と良い相関を有する結果が得られることを確認した。計算時間は FEM に比べて圧倒的に短い。

(2) 理想化構造要素法による船体桁の非線形動的応答解析法の開発

理想化構造要素法 ISUM と浮体の運動・荷重解析コード SSODAC を組み合わせて、運動、流体力、弾塑性構造変形の相互影響を考慮した縦波中浮体崩壊解析システムを構築した。図 3 のように、構造自由度を剛体変位 $\{x_{RG}\}$ と構造変形 $\{x_D\}$ の和で表し、 $\{x_{RG}\}$ を SSODAC により、また $\{x_D\}$ を ISUM により、両変位による運動と流体力の相互影響を考慮しながら弱連成で解析する。

図 4 に隔倉積みバルクキャリアの縦曲げ崩壊解析結果の一例を示す。変形は拡大して示している。ISUM では、隔倉積み時のホールド変形のような 3 次元変形も正確に考慮でき、かつ通常の FEM に比べて自由度数が少ないため、極めて短時間に解析できる。

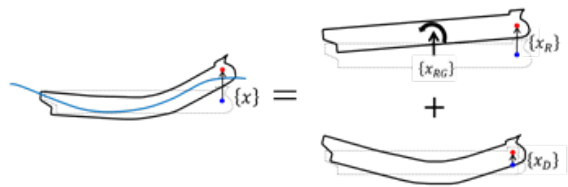
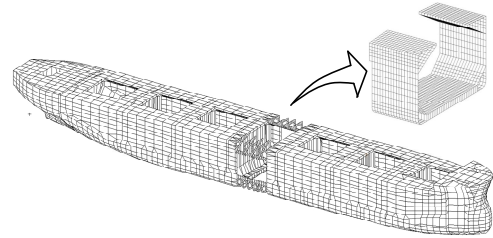
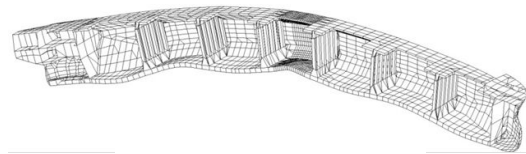


図 3 ISUM/SSODAC システムの自由度



(a) ISUM モデル



(b) 隔倉積みバルクキャリアの崩壊変形例

図 4 ISUM/SSODAC システムによる解析例

(3) 崩壊挙動の相似性を満たす水槽模型試験の実施と提案解析手法の妥当性の検証

縦曲げ崩壊挙動を実験的に再現する場合に重要となるのは、曲げモーメント・曲率関係を、最終強度後の強度低下挙動を含めて実船と模型で相似にすることである。そこで、船体を図 5 に示すように回転ヒンジでつながれた二つの剛体にモデル化し、回転によって口が開く船底部に、犠牲試験片を取り付け、この試験片の形状を工夫することにより、崩壊挙動を再現した。犠牲試験片は、片持ち梁状に変形し、その固定端の部分で曲げ圧縮側が座屈するように設計されている。この座屈部の寸法を調整することにより、最終強度および最終強度後の強度低下の度合いを調節することができる。

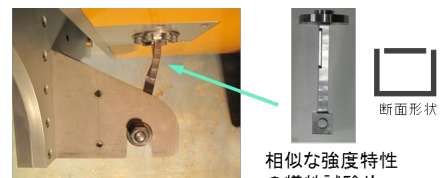
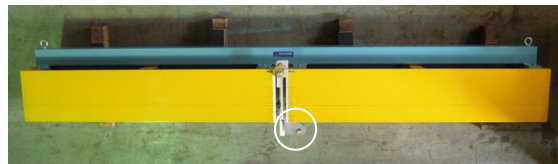


図 5 二剛体・回転バネモデル

水槽試験は、大阪大学船舶海洋試験水槽にて実施した。船体中央で波高が最大となる過渡水波を発生し、運動およびヒンジ部の崩壊変形量（塑性回転角）を計測した。

一方、水槽試験と変更して、二剛体と非線型回転バネからなる力学モデルについて運動方程式を導いた。さらに簡略化した荷重モデルについて、最終強度後の崩壊変形量の解析解を導いた。この理論モデルによる計算結果と上述の水槽試験の結果を比較して、両者が良好な一致を示すことを確認した。さらに、理論モデルを用いて、各種強度および荷重因子が崩壊変形量に及ぼす影響について考察した。その結果、図6に示すように、同じ曲げモーメント振幅であっても、荷重の作用時間が短い場合ほど塑性回転角が小さいことを定量的に明らかにした。このことは、ホイッピング荷重のように作用時間の短い縦曲げ荷重による構造崩壊リスクは、長周期波に比べて相対的に小さいことを示しており、船体の構造安全評価上、重要な結果が得られたと云える。このような知見は、本研究のように最終強度後の挙動に着目し、さらに弾塑性構造変形と流体力の相互影響を考慮して初めて得られたものである。

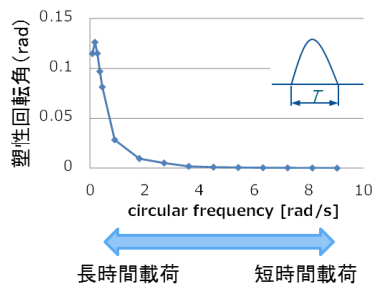


図6 載荷時間と崩壊変形量の関係（理論解析）

(4) 解析法の実問題への適用

本研究で開発した ISUM/SSODAC による弱連成波浪中構造崩壊システムの実船適用にあたり、まず(3)の二剛体・バネモデルによる直接連成解析の結果と比較し、両者の結果が、実用上十分な精度で一致することを確認した。この ISUM/SSODAC システムを各種のバルクキャリア、コンテナ船および船型海洋構造物に適用して、波浪中縦曲げ崩壊挙動の特性を調べた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

- (1) 田中義照, 安藤孝弘, 穴井陽祐, 飯島一博, 藤久保昌彦, 矢尾哲也: 複合荷重下における船体梁の縦曲げ最終強度に関する研究(その1 縮尺模型による逐次崩壊試験), 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.16, 2012, pp.121-130, 査読有.

- (2) W. Xu, K. Iijima and M. Fujikubo: Parametric dependencies of the post-ultimate strength behavior of a ship's hull girder in waves. J of Marine Science and Technology, Vol.17, 2012, pp 203-215, 査読有.
- (3) Z. Pei, K. Iijima, M. Fujikubo, Y. Tanaka, S. Tanaka, S. Okazawa and T. Yao: Collapse behaviour of a bulk carrier under alternate heavy loading conditions, Int. J. of Offshore and Polar Engineers, Vol. 23, 2013, pp. 224-231, 査読有.
- (4) 田中義照, 橋爪豊, 小河寛明, 辰巳晃, 藤久保昌彦: 複合荷重下における船体梁の縦曲げ最終強度に関する研究(その2 簡易解析手法の構築), 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.20, 2014, pp.137-145, 査読有.
- (5) Z. Pei, K. Iijima, M. Fujikubo, S. Tanaka, S. Okazawa and T. Yao: Simulation on progressive collapse behaviour of whole ship model under extreme waves using Idealized Structural Unit Method, Marine Structures, Vol.40, 2015, pp. 104-133, 査読有.
- (6) K. Iijima, Y. Suzaki and M. Fujikubo: Scaled model tests for the post-ultimate strength collapse behaviour of a ship's hull girder under whipping loads, Ships and Offshore Structures, Vol.10, 2015, pp. 31-38, 査読有.
- (7) K. Iijima and M. Fujikubo: Cumulative collapse of a ship hull girder under a series of extreme wave loads, J of Marine Science and Technology, Vol. 20, 2015 (掲載確定), 査読有.

〔学会発表〕(計10件)

- (1) W. Xu, K. Iijima and M. Fujikubo: Investigation into post-ultimate strength behavior of ship's hull girder in waves by analytical solution, Proc. of the 30th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherlands, OMAE2011, June 19-24, 2011, OMAE2011-49617.
- (2) 洲崎優子, 飯島一博, 藤久保昌彦: 衝撃荷重下での船体桁崩壊挙動に関する縮尺模型実験, 日本船舶海洋工学会, 平成24年秋季講演会論文集, 11/26-27, 2012, 柏.
- (3) Z. Pei, K. Iijima, M. Fujikubo, Y. Tanaka, S. Tanaka, S. Okazawa and T. Yao, Progressive collapse behaviour of ship hull girder under oblique wave, Proc. of the 27th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures,

- TEAM2013, Sep. 9-12, 2013, Keelung, Taiwan.
- (4) M. Goto, M. Fujikubo, K. Iijima, Z. Pei and T. Yao: Post-ultimate strength analysis of a hull girder in waves using Idealized Structural Unit Method, Proc. of the 27th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM2013, Sep. 9-12, 2013, Keelung, Taiwan.
- (5) Y. Suzaki, K. Iijima and M. Fujikubo: Post-ultimate strength behavior of ship's hull girder subjected to impact loads, Proc. of the 27th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM2013, Sep. 9-12, 2013, Keelung, Taiwan.
- (6) 後藤 誠, 藤久保昌彦, 飯島一博, 裴 志勇, 矢尾哲也: 理想化構造要素法による波浪中船体桁の時間領域崩壊解析, 日本船舶海洋工学会, 平成 25 年秋季講演会論文集, 11/21-22, 2013, 大阪.
- (7) M. Fujikubo, M. Goto, K. Iijima, Z. Pei and T. Yao: Motion/collapse analysis of a ship's hull girder in waves using Idealized Structural Unit Method (ISUM), Proc. of Int. Conf. on Safety & Reliability of Ship, Offshore & Subsea Structures, Aug. 18-21, 2014, Glasgow, UK.
- (8) K. Iijima, Y. Suzaki and M. Fujikubo: Collapse behaviour of a ship's hull girder under impact load: a comparison between scaled model test and direct numerical simulation, Proc. of Int. Conf. on Safety & Reliability of Ship, Offshore & Subsea Structures, Aug. 18-21, 2014, Glasgow, UK.
- (9) Y. Tanaka, H. Ogawa, A. Tatsumi and M. Fujikubo: Analysis method of ultimate hull girder strength under combined loads, Proc. of Int. Conf. on Thin-Walled Structures, Sep. 28-Oct.2, 2014, Busan, Korea.
- (10) 田中義照, 橋爪豊, 小河寛明, 辰巳晃, 藤久保昌彦: 複合荷重下における船体梁の縦曲げ最終強度に関する研究 - 簡易解析手法の構築と妥当性検証 -, 日本船舶海洋工学会, 平成 26 年秋季講演会論文集, 11/20-21, 2014, 長崎.

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

柳原大輔 (Yanagihara, Daisuke)

愛媛大学・理工学研究科・寄附講座准教授
 研究者番号: 10294539

岡澤重信 (Okazawa, Shigenobu)
 広島大学・工学研究科・准教授
 研究者番号: 10312620

田中義照 (Tanaka, Yoshiteru)
 独立行政法人海上技術安全研究所・構造安全評価系・研究員
 研究者番号: 40373419

飯島一博 (Iijima, Kazuhiro)
 大阪大学・工学研究科・准教授
 研究者番号: 50302758

辰巳晃 (Tatsumi, Akira)
 大阪大学・工学研究科・助教
 研究者番号: 60736487