

令和元年5月29日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18321

研究課題名(和文) 局部荷重の影響を考慮した縦曲げ最終強度推定法の確立に向けた研究・開発

研究課題名(英文) Development of Estimation Method of Ultimate Longitudinal Bending Strength of Ship's Hull Girders Considering Effect of Local Loads

研究代表者

辰巳 晃 (Tatsumi, Akira)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：60736487

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では船底に局部荷重(水圧や積み荷)が働く状態のコンテナ船の縦曲げ最終強度を扱った。局部荷重により船の二重底には局部的な曲げ変形が生じ、ホギング状態(船底が曲げの圧縮側となる状態)での縦曲げ最終強度が低下する恐れがある。まず、非線形有限要素法(詳細な構造解析手法)を用いて、局部荷重が縦曲げ最終強度を低下させる要因を明らかにした。得られた知見をもとに、局部荷重が作用する船体の縦曲げ崩壊挙動を推定できる実用的な解析手法(拡張スミス法)の開発を行った。加えて、局部荷重の影響を考慮しつつ縦曲げ最終強度をより簡便に推定できる最終強度相関関係式を導いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船底に働く局部荷重により船体のホギング状態での縦曲げ最終強度が低下することは知られていた。本研究にて行った非線形有限要素法による縦曲げ崩壊解析により、その低下をもたらす主要な原因(船底外板での座屈の加速と内底板の有効性の低下)が明らかとなり、学術的に新しい知見が得られた。一方、非線形有限要素法を用いた詳細な解析には多大な時間を要する。本研究では、局部荷重の影響を考慮して縦曲げ最終強度を推定できる実用的な解析手法ならびに最終強度相関関係式を提案した。これらの提案手法は迅速に縦曲げ崩壊挙動あるいは縦曲げ最終強度を求めることができ、船舶の基本設計にも十分に使用できるものである。

研究成果の概要(英文)：This study investigates ultimate longitudinal bending strength of container ships whose double bottoms are subjected to local loads such as water pressure and cargo load. The upward local loads make convex deflections of the double bottoms which could decrease the ultimate hogging strength of hull girders. The ultimate hull girder strength under combined the hogging moment and the local loads are analyzed by nonlinear finite element method. This analysis clarifies several main causes of ultimate strength reduction of the hull girder due to the local loads. Based on knowledge obtained through the FE analysis, a practical method to analyze progressive collapse behavior of the hull girders subjected to combined the hogging moment and local loads is developed, which is named "extended Smith's method". In addition, a ultimate strength interaction formula is derived to more simply predict the ultimate hogging strength of the hull girder accompanied by the local loads.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：縦曲げ最終強度 縦曲げ逐次崩壊解析 拡張Smith法 簡易推定法 船底局部荷重 二重底曲げ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) コンテナ船の船体中央付近のカーゴホールドでは、局部荷重（水圧やコンテナ重量）により二重底に局部的な曲げ変形が生じる。この二重底の局部曲げ変形は、ホギング状態の船体の縦曲げ最終強度を低下させる可能性がある。2013年6月にインド洋沖にて発生したコンテナ船の折損事故の原因の1つとして、局部荷重の影響（＝二重底曲げの影響）が指摘された[1, 2]が、縦曲げ最終強度を低下させる主要な原因は明らかでなかった。

(2) 局部荷重が作用する船体の縦曲げ最終強度の解析は非線形有限要素法により可能であるが、その計算には多大な時間と労力を要するため、船舶の設計に使用することは困難である。そこで、局部荷重の影響を考慮して縦曲げ最終強度およびその崩壊挙動を推定できる実用的な手法が必要であると考えられた。

2. 研究の目的

(1) 上述の通り、局部荷重によって生じる二重底曲げにより、ホギング状態での縦曲げ最終強度は低下する。本研究では、二重底曲げによってホギング状態での縦曲げ最終強度が低下するメカニズムを明らかにする。

(2) 局部荷重の影響を考慮しつつ、船体の縦曲げ崩壊挙動を推定する実用的な解析手法を開発する。加えて、局部荷重が作用する船体の縦曲げ最終強度をより簡便に推定する算式を提案する。

3. 研究の方法

(1) 2隻の大型コンテナ船（8,000TEU級と14,000TEU級）を解析対象に取り上げ、非線形有限要素法により、局部荷重とホギングモーメントが作用する状態での縦曲げ崩壊挙動を解析する。局部荷重には水圧とコンテナ重量を考慮し、それらの大きさを変化させて解析を行う。船体全体に働く縦曲げモーメントと回転変位の関係だけでなく、二重底を構成する縦強度部材に働く平均応力と平均ひずみの関係を調査し、縦曲げ最終強度の低下をもたらす支配的な因子を特定する。

(2) 純曲げ状態における船体横断面の縦曲げ逐次崩壊解析を行う手法としてスミス法[3]がある。スミス法では、断面を構成する防撓パネルが軸圧縮・引張を受ける場合の平均応力 - 平均ひずみ関係を予め準備することで、座屈および降伏の影響を考慮する。一方、船体横断面の形状は変化せず、かつ平面を保持すると仮定するため、二重底の曲げ変形を考慮することはできない。そこで、スミス法の平均応力 - 平均ひずみ関係の考え方は保持しつつ、二重底の曲げを考慮できるよう変形の自由度を追加することで、スミス法を局部荷重の影響を考慮できるように拡張する（拡張スミス法）。

(3) Amlashi and Moan[4, 5]は隔艙積み状態のバルクキャリアを対象に、局部荷重とホギングモーメントが作用する場合の最終強度相関関係式を提案した。この最終強度相関関係式の考えをもとに、非線形有限要素法および拡張スミス法によるコンテナ船の縦曲げ崩壊挙動解析から得られた知見を活かして、局部荷重が作用するコンテナ船の縦曲げ最終強度を簡便に推定する算式を導く。

4. 研究成果

(1) 解析対象のコンテナ船の船体中央部の $1/2+1+1/2$ ホールド範囲について図1のような有限要素モデルを作成した。の局部荷重（水圧）を初めに与え、その局部荷重を一定に保ったまま、の縦曲げモーメントを増加させることで、縦曲げ崩壊解析を行った。図1は局部荷重を負荷した後の $1/2+1+1/2$ ホールドモデルの変形図である。局部荷重により二重底に局部的な曲げ変形が生じていることが分かる。図2は、図1の状態において横断面に発生する船の長手方向のひずみの分布を模した図であり、船体の全体曲げによるひずみに、二重底の局部曲げによるひずみが重畳したような分布となることを示している。

非線形有限要素法による解析から、局部荷重によって縦曲げ最終強度が顕著に低下するメカニズムが明らかとなった。まず、局部荷重による二重底の曲げ変形により、部分隔壁（図1のPBHD）近傍の船体外板には二軸方向に圧縮ひずみ（応力）が生じる。この二重底曲げによる圧縮ひずみが船体全体の縦曲げによる圧縮ひずみに重畳し、船体外板での座屈崩壊を助長する。船体外板が座屈崩壊すると、二重底の曲げ変形は崩壊部分に局所化する。すなわち、PBHD近傍において、図2に示した局部曲げ変形の成分が急激に増加する。すると、二重底曲げの引張側に位置する内底板では、圧縮ひずみが一時的に減少する。つまり、船体外板の崩壊後の一定期間、内底板がホギングに対する縦強度部材として有効に働かないことを意味する。以上により、局部荷重が作用する状態では、船体外板が座屈崩壊した時点で船体全体として崩壊するため、純曲げ状態と比べて縦曲げ最終強度が顕著に低下する。以上現象は、解析対象とした2隻のコンテナ船の両方で生じ、変位境界条件や局部荷重の大きさを変化させても同様であった。

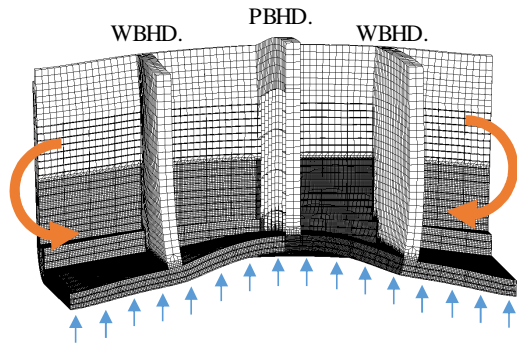


図1 局部荷重負荷後の変形

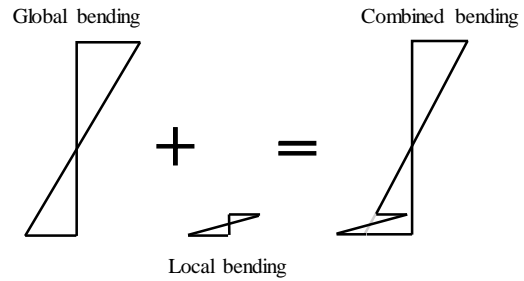


図2 船体横断面上のひずみの分布

(2) 局部荷重の影響を考慮できる実用的な縦曲げ逐次崩壊解析手法として拡張スミス法を開発した。拡張スミス法では図1のように1ホールド範囲を解析対象とする。局部荷重による二重底の局部曲げ変形を考慮するため、二重底は平面格子に理想化する。船側構造は、従来のスミス法と同様に梁としてモデル化する。水密隔壁(WBHD)は十分に剛と仮定し、その位置で二重底を表す平面格子と船側構造を表す梁を剛体的に結合する。PBHDは二重底の曲げ変形に抵抗する働きがあると考え、等価な分布ばねに置き換えて平面格子を支持する。そして、従来のスミス法と同様に、長さ方向の梁要素の断面を構成する防撓パネル要素には座屈・降伏の影響を考慮した平均軸応力 - 平均軸ひずみ関係を与える。平面格子の幅方向の梁要素は弾性要素と仮定する。

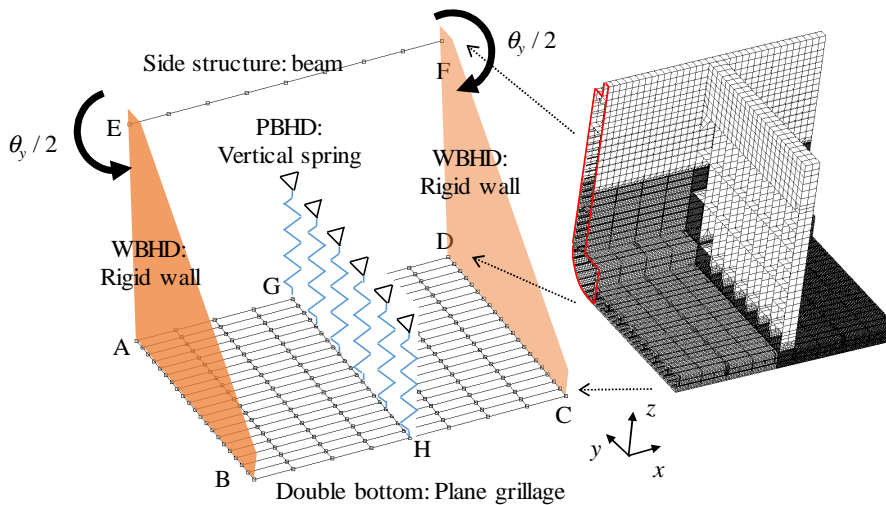
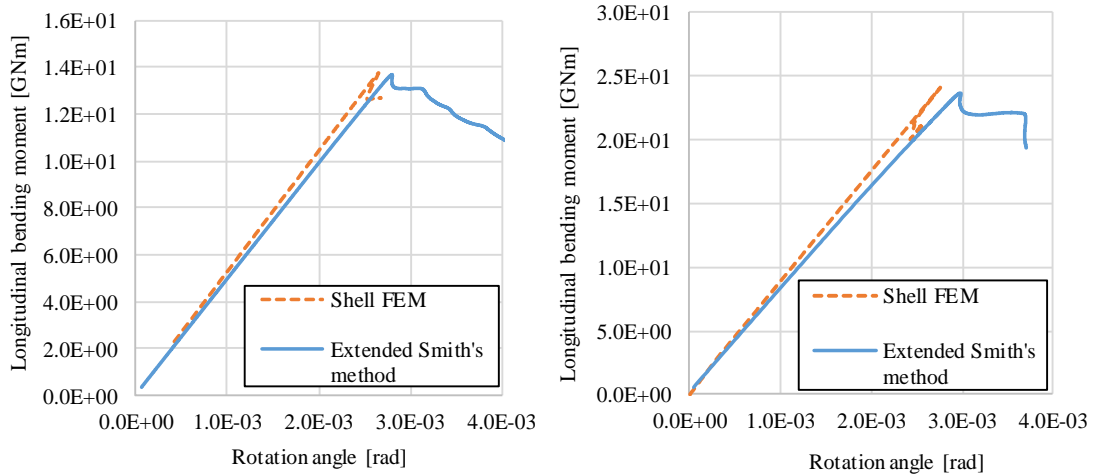


図3 拡張スミス法の解析モデル

図4に非線形有限要素法および拡張スミス法により得た対象船の縦曲げモーメント - 回転角関係を比較する。拡張スミス法は正確に縦曲げ最終強度を推定していることが分かる。拡張スミス法により縦曲げ最終強度時に崩壊していたと推定された部材は、船底外板とガーダーの防撓パネルのみであり、内底板の防撓パネルは最終強度に達していなかった。これは非線形有限要素法の解析で得られた結果と一致し、拡張スミス法が内底板の有効性の低下を考慮できていることを意味する。また、図4から、両手法とも縦曲げ最終強度後に耐荷力が概ね一定となるような挙動を推定している。これは、二重底の曲げ変形の急激な成長に伴い有効性を失った内底板が、二重底の曲げ変形の成長が穏やかになるに従い、ホギングによる圧縮を再び受け持つことを意味している。以上より、拡張スミス法は非線形有限要素法と同様の崩壊挙動を推定していると言える。ただし、縦曲げ最終強度後の耐荷力の低下量は拡張スミス法の方が小さい。これは、拡張スミス法に用いる防撓パネル要素の平均軸応力 - 平均軸ひずみ関係(Gordo-Soaresの式[6])が、最終強度後の圧縮耐荷力の低下量を過小に評価していることが原因と考えられる。平均軸応力 - 平均軸ひずみ関係の高精度化についてはさらなる研究が必要である。

非線形有限要素法では縦曲げ崩壊解析の計算に数日を要するに対し、拡張スミス法では数分で結果を得ることができる(CPU: Intel Core i7-6700, Memory size: 32GB)。よって、拡張スミス法は非線形有限要素法に比べて実用的な解析手法であり、船舶の設計にも使用可能であると考えられる。



(a) 8,000TEU

(b) 14,000TEU

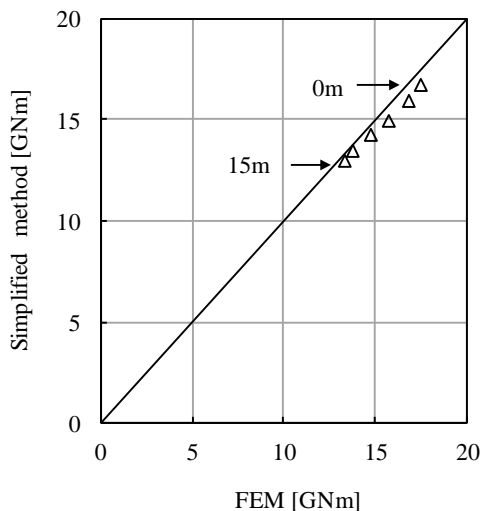
図4 縦曲げモーメント - 回転角関係

(3) 局部荷重が作用する船体のホギング最終強度を簡便に推定する方法を提案した。提案法では次式に示す最終強度相関式を用いる。

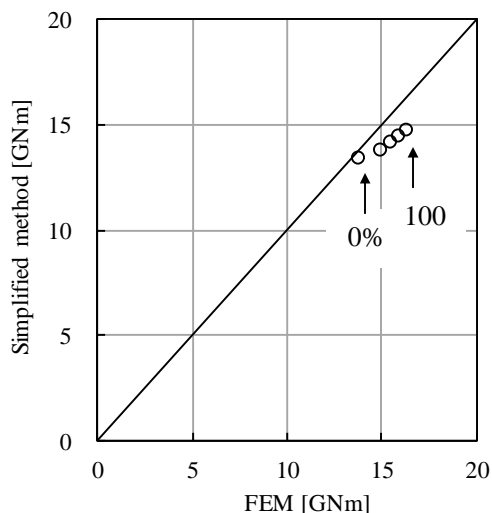
$$\frac{M_h}{M_{uh0}} + \frac{M_{db}}{M_{udb}} = 1 \quad (1)$$

ここで、 M_h は船体桁に働く縦曲げモーメント、 M_{uh0} は純曲げ状態での船体桁の縦曲げ最終強度、 M_{db} は二重底に働く長手方向の曲げモーメント、 M_{udb} は純曲げ状態での二重底の曲げ最終強度である。 M_{uh0} 、 M_{db} 、 M_{udb} をそれぞれ簡便に求め、(1)式を M_h について解けば局部荷重が作用する状態でのホギング最終強度が求まる。 M_{uh0} は従来のスミス法で、 M_{db} は梁理論で、 M_{udb} は二重底の初期破損強度から求める。

図5に簡易推定法と非線形有限要素法により求めた縦曲げ最終強度後を比較する。(a)はコンテナ重量を考慮せず、水圧の大きさ変化させた場合（水頭で0m~15m）の結果であり、(b)は水圧を一定（計画喫水相当）とし、コンテナ重量を変化させた場合（空倉状態~満載状態）の結果である。提案法よる推定値が非線形有限要素法の結果と良い一致を示していることが分かる。ただし、(b)ではコンテナ重量が大きくなるほど差が大きくなっている。僅かであるが同様の傾向が(a)にも見られる。すなわち、水圧が小さい方が差は大きくなる傾向にある。これは、幅方向圧縮により船底外板の防撓パネルの長さ方向の圧縮最終強度が低下する影響を提案法に考慮していないためと考えられる。幅方向圧縮の影響を考慮すると、水圧が大きい場合、あるいは、コンテナ重量が小さい場合において、提案法が縦曲げ最終強度をより低めに評価する。すると、得られる縦曲げ最終強度の点群は図5の対角線とより平行になる。これは提案法と非線形有限要素法の結果の相関が改善することを意味する。幅方向圧縮の考慮を含めて、提案法のさらなる改善は今後の課題である。



(a) 水圧を変更



(b) コンテナ重量を変更

図5 簡易推定法と非線形有限要素法により推定した縦曲げ最終強度の比較（8,000TEU）

(4) 本研究を通じて、局部荷重が作用する船体の縦曲げ崩壊挙動が明らかとなった。純曲げの状態では船底外板の崩壊後に内底板が荷重を受け持つと考えることが一般的であった[3]。しかし、局部荷重が作用する場合は、(1)に述べた通り内底板の有効性が低下するため、船底外板が崩壊しただけで縦曲げ最終強度に達する。これは船体の構造安全性を考えるうえで非常に重要な知見である。

また、(2), (3)に述べた通り局部荷重の影響を考慮しつつ縦曲げ崩壊挙動ならびに最終強度を推定する実用的な手法(拡張スミス法と簡易推定法)を提案した。提案法には改善の余地があるものの、非線形有限要素法と比べて迅速に結果を得ることができ、船体構造設計への活用が見込まれる。

<引用文献>

- [1] 国土交通省海事局：コンテナ運搬船安全対策検討委員会最終報告書, 2015.
- [2] 日本海事協会：大型コンテナ船安全検討会報告書, 2014.
- [3] C. S. Smith: Influence of Local Compressive Failure on Ultimate Longitudinal Strength of a Ship's Hull, Proc. of the International Symposium on Practical Design in Shipbuilding, Tokyo, Japan, pp.73-79, 1977.
- [4] H.K.K. Amlashi and T. Moan: Ultimate Strength Analysis of a Bulk Carrier Hull Girder under Alternate Hold Loading Condition -A Case Study Part1: Nonlinear Finite Element Modeling and Ultimate Hull Girder Capacity, Marine Structures, Vol. 21, pp.327-352, 2008.
- [5] H.K.K. Amlashi and T. Moan: Ultimate Strength Analysis of a Bulk Carrier Hull Girder under Alternate Hold Loading Condition, Part2: Stress Distribution in the Double Bottom and Simplified Approaches, Marine Structures, Vol. 22, pp.522-544, 2009.
- [6] J. M. Gordo, C. Guedes Soares: Approximate Load Shortening Curves for Stiffened Plates under Uniaxial Compression, Proc. of the 5th International Symposium on Integrity of Offshore Structures, Glasgow, U.K., pp.189-211, 1993.

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

辰巳晃, 藤久保昌彦: 船底局部荷重を考慮したコンテナ船の縦曲げ最終強度解析に関する研究 - 第3報: 縦曲げ最終強度の簡易推定法の開発 -, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 25, pp. 133-142, 2017, 査読有.

doi.org/10.2534/jjasnaoe.25.133

辰巳晃, 松井貞興, 藤久保昌彦: 船底局部荷重を考慮したコンテナ船の縦曲げ最終強度に関する研究 - 第2報: 実用的逐次崩壊解析法の開発 -, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 24, pp. 199-210, 2016, 査読有.

doi.org/10.2534/jjasnaoe.24.199

辰巳晃, 藤久保昌彦: 船底局部荷重を考慮したコンテナ船の縦曲げ最終強度に関する研究 - 第1報: 非線形有限要素法による解析 -, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 24, pp. 189-198, 2016, 査読有.

doi.org/10.2534/jjasnaoe.24.189

その他、2件の論文を国際ジャーナル Marine Structure に投稿中(2019年5月現在)。

[学会発表](計5件)

Akira Tatsumi, Kazuhiro Iijima, Masahiko Fujikubo: Ultimate Longitudinal Bending Strength of Container Ship Considering the Effect of Bottom Local Loads and its Simplified Estimation, DFS2018, 2018.

Han Htoo Htoo Ko, Akira Tatsumi, Kazuhiro Iijima, Masahiko Fujikubo: Collapse Analysis of Ship Hull Girder Using Hydro-Elastoplastic Beam Model, OMAE2018, 2018.

[doi:10.1115/OMAE2018-77497](https://doi.org/10.1115/OMAE2018-77497)

Takuya Izaki, Akira Tatsumi, Naoki Matsuo, Kazuki Adachi, Masahiko Fujikubo: Progressive Collapse Analysis of a Container Ship under Combined Longitudinal Bending and Bottom Local Loads, TEAM2017, 2017.

Masahiko Fujikubo, Akira Tatsumi: Progressive Collapse Analysis of a Container Ship under Combined Longitudinal Bending Moment and Bottom Local Loads, MARSTRUCT2017, 2017.

辰巳晃, 藤久保昌彦: 船底局部荷重を考慮したコンテナ船の縦曲げ最終強度の簡易推定法, 平成29年度日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2017.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。