

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656535

研究課題名(和文) 粒子法を用いた薄板構造の圧壊挙動解析に関する研究

研究課題名(英文) Buckling/Post-buckling analysis of stiffened plate structure using particle method

研究代表者

田中 智行 (TANAKA, SATOYUKI)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20452609

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円、(間接経費) 720,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、メッシュフリー/粒子法と呼ばれる新しい数値解析手法を用いた薄板構造物の圧壊解析に関する研究を実施した。薄板構造の幾何学的非線形解析を実施するため Updated Lagrangian 法に基づく定式化を行った。さらに、曲面形状を表現するため曲面座標系を導入した。さらに、防撓板のような薄板の組み合わせ構造の解析を行うため、多点拘束法を導入した。初期不整を有する防撓板構造の解析を行い、従来法との比較を行い、提案法の妥当性の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, meshfree/particle method is employed to solve thin plate problem. To formulate geometrical nonlinear analysis, updated Lagrangian formulation is used. To treat curved surface, convected coordinate system is introduced in the formulation. In addition, to solve stiffened plate structure, multiple point constraint (MPC) technique is introduced to model the stiffener. Buckling/Post-buckling analysis is carried out for the stiffened plate structure including initial imperfection and high accuracy results are obtained in the numerical simulation.

研究分野：船舶海洋工学

科研費の分科・細目：総合工学，船舶海洋工学

キーワード：メッシュフリー/粒子法

1. 研究開始当初の背景

船舶や海洋構造物は、極限海象下においても目的の強度を保つよう設計を行う必要がある。また、経年船などは腐食、疲労による部材の摩耗、損傷の発生により局部的な強度低下が発生し、そのような部材を起点として大規模な構造崩壊、折損事故につながる可能性を持つ。船体構造の二重底部などは板に座屈防止用の防撓材がついた防撓パネル構造になっている。防撓パネル構造は、船体構造において最も基本的な構造単位であり、座屈・最終強度評価、損傷が発生した場合の構造信頼性・安全性評価を高精度に行うことが重要である。

これまでの船体構造解析には、有限要素法が良く用いられてきた。有限要素法では、パネルや防撓パネルに矩形状の要素（メッシュ）に分割して構造解析を実施する。一方、有限要素法によるモデル化ではメッシュを基本単位として解析を行うため、構造物中の任意の位置に存在するき裂やき裂進展現象のモデル化が容易ではない。近年、有限要素法でのメッシュ生成の負荷を軽減する目的として、節点や粒子を用いて解析を行うメッシュフリー/粒子法の研究が行われてきている。これまでに、メッシュフリー/粒子法を用いた板構造解析は、あまり実施されておらず、解析精度や適用可能性に関する基礎検討を十分に行う必要がある。本手法を防撓パネル構造に適用することで、将来的に複雑なき裂進展現象を伴う高精度な圧壊強度評価が期待できる。

メッシュフリー/粒子法を用いて防撓パネルのような薄板構造物の解析を行うためには、節点や粒子単位にカーネル関数と呼ばれる関数を定義して、板構造の変形を近似する。従来型の有限要素法と比較して、この点が大きく異なるため、いくつかの数値解析上の課題をクリアする必要がある。代表的な粒子法である Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法では偏微分方程式を離散化する際に強形式を用いるが、薄板問題に対して強形式を用いた場合、カーネル関数の四階微分形が必要となり関数近似の精度劣化が問題となる。そのため、有限要素法と同様に弱形式を用いた離散化を行うことで、二階の偏微分までを取り扱えばよいことになる。基本的な解析の流れは有限要素法と類似しているが、前述のとおりメッシュフリー/粒子法特有の関数近似や数値積分方法など異なる点があり、安定した構造解析を行うための検討を行う必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、新しい数値解析手法として注目されているメッシュフリー/粒子法を

用いて、防撓パネルなどの薄板構造物の圧壊シミュレーションを行うことである。防撓パネルの圧壊挙動は、パネルの座屈、塑性化、き裂の進展、破断を伴う複雑な非線形現象である。将来的に、このような複雑挙動を高精度に評価するための数値解析手法の基礎的検討を実施した。本研究では、メッシュフリー/粒子法を用いた板構造解析を行うための定式化および離散化を行い、初期不整を有するパネルや防撓パネル構造の圧壊挙動評価を行うことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究は数値解析的研究である。メッシュフリー/粒子法を用いた薄板構造の定式化、離散化を行い、プログラムの作成を行う。提案法の妥当性を検討するため、既存の数値解析手法である有限要素法との比較を行い解析精度の検討を行った。具体的に実施した検討課題は以下の通りである。

(a) メッシュフリー/粒子法を用いた薄板構造のモデル化に関する検討、(b) 座屈挙動を表現するための幾何学的非線形解析のための定式化・離散化、(c) 直線保持、周期境界条件を規定するための幾何学的境界条件の処理、(d) 曲面形状を表現するための曲面座標系の導入、(e) 弾塑性解析のための材料非線形性のモデル化、(f) 組み合わせ構造物のモデル化、(g) 破断現象を表現するためのき裂のモデル化

これらの数値解析上の問題を解決し、提案手法の効率化、高精度化を行った。

4. 研究成果

前節で示した検討課題を実施した研究成果を以下に示す。

(a) メッシュフリー/粒子法を用いた薄板構造のモデル化に関する検討

従来用いられている有限要素法とメッシュフリー/粒子法の大きな違いは関数近似の方法にある。カーネル関数と呼ばれる連続関数を用いて物体の変形を近似する。本研究では、通常の SPH で用いるカーネル関数を一般化した Reproducing Kernel (RK) を採用した。RK を採用することで、従来の有限要素法が持つべき性質である、Partition of Unity (PU) 条件を自動的に満足させる定式化を行うことができる。

さらに板曲げ解析を行うために、厚肉板の仮定である Mindlin 板理論に基づき、せん断変形を考慮した板構造の定式化を行った。強形式での定式化に対して、有限要素法と同様に弱形式を導入し、仮想仕事式を導出した。

有限要素法では、関数近似に双一次関数を用いるため、せん断ロッキングを回避するために特別な処理が必要であるが、RK を用いて、Kirchhoff Mode Reproducing Condition (KMRC) を満足させることで、せん断ロッキングを回避することが可能となる。

(b) 座屈挙動を表現するための幾何学的非線形解析のための定式化・離散化

仮想仕事式を用いた弱形式による定式化に基づいて幾何学的非線形解析を行うため、Total/Updated Lagrangian 法による幾何学的非線形問題の定式化を行った。基本的な考え方は、有限要素法と同様であるが、メッシュフリー/粒子法でのカーネル近似を用いるという性質上、離散化が異なってくる。また、通常の有限要素法ではガウス積分を用いて剛性方程式の数値積分を行うが、本研究では、メッシュフリー/粒子法分野で、すでに提案されている Stabilized conforming nodal integration (SCNI) および sub-domain conforming nodal integration (SSCI) を用いた。この数値積分法を採用することで、ガウス積分を使用したために生じる偽の剛体モードの発生を回避することが可能である。

(c) 直線保持、周期境界条件を規定するための幾何学的境界条件の処理

船体構造は薄板と薄板を溶接により接合された組合せ構造となっている。メッシュフリー/粒子法を用いた板解析では、これまで板一枚を取り扱うものが多かった。本研究では、多点拘束法を用いて、幾何学的境界条件を規定する試みを行った。これにより、パネルや防撓パネルの解析を行うための、直線保持や周期境界条件の規定を容易に行うことが可能となった。

これまで、多点拘束法はクロネッカーデルタ特性を持つ有限要素法に対して多く用いられてきたが、メッシュフリー/粒子法で用いる近似関数であるカーネル関数はその特性を持たない。メッシュフリー/粒子法に多点拘束法を用いた際の問題点を指摘し、その回避策について提案を行った。

(d) 曲面形状を表現するための曲面座標系の導入

防撓パネルの解析では、初期不整（初期たわみ）を導入して、座屈解析や最終強度解析を実施する。有限要素法では、曲面形状を表現するために隣り合う要素と要素をつなぎ曲面形状を表現する。一方、メッシュフリー/粒子法では、粒子や点を板構造内に配置するため、板一枚を一つの連続体として取り扱う。そのため、直交座標系の定式化では、曲面形状を表現することができない。そこで、曲面

座標系を導入した定式化を行った。これにより、直交座標系でモデル化した板を曲面座標系へとマッピングすることで解析を行うことが可能となった。

(e) 弾塑性解析のための材料非線形性のモデル化

最終強度解析を行う場合、板構造の塑性変形を考慮する必要がある。幾何学的非線形問題に加え、材料非線形性も取り扱うことができるように拡張を行った。また、板構造解析では板厚方向に積分点を取り、塑性判定を行う必要がある。ニュートンコッツ積分を用いて、板表面から裏面にかけて複数の積分点を配置することで、降伏判定を行った。

(f) 組み合わせ構造物のモデル化

有限要素法では、節点を共有することで防撓パネルような板と板を組み合わせモデルを作成する。(c) で述べたようにカーネル関数は有限要素法の形状関数をもついわゆるクロネッカーデルタ特性を持たない。そこで、(c) と同様に多点拘束法を導入することで板構造物の解析を実施した。線形問題、幾何学的非線形問題の解析を行い、精度的に問題ないことを確認した。

(g) 破断現象を表現するためのき裂のモデル化

メッシュフリー/粒子法では、連続関数で変形を近似するためせん断ロッキングが発生しない高精度な解析を行うことができる。一方、き裂のような変位不連続を表現する場合に工夫が必要となる。近年、新しく提案されている X-FEM に基づき、き裂先端での激しい応力集中および不連続を表現するための拡充関数を導入することで、き裂形状を表現することが可能となった。

以上の (a)-(g) に示した開発項目について、それぞれ独立に開発を行った。それぞれの問題を組み合わせることで、初期たわみを考慮した防撓パネル構造の解析を行うことが可能となった。弾塑性解析、き裂のモデル化などは今後、さらなる検討を進めていく必要がある。

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2件)

1. 貞本将太, 田中智行, 岡澤重信, メッシュフリー法を用いた板構造物のモデル化に関する研究 (第1報: モデル化と線形解析の定式化), 日本機械学会論文集 A 編,

79-802, pp. 891-904,
(2013.6). (<http://ci.nii.ac.jp/naid/130003374671>) (査読有)

2. 貞本将太, 田中智行, 岡澤重信, メッシュフリー法を用いた板曲げ解析における数値積分法に関する一考察, 日本計算工学会論文集, Paper No. 20130008 (<http://dx.doi.org/10.11421/jscses.2013.20130008>), (2013.4). (査読有)

[学会発表](計 10 件)

1. Shota Sadamoto, Satoyuki Tanaka, Shigenobu Okazawa, Nonlinear analysis of stiffened plate structures using meshfree approach, Proceedings of 5TH ASIA PACIFIC CONGRESS ON COMPUTATIONAL MECHANICS & 4TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL MECHANICS, (CD-ROM), December 11-14, 2013, Singapore. (2013.12.11) (査読有)
2. 貞本将太, 田中智行, 岡澤重信, メッシュフリー法を用いた防撓パネルの非線形解析に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol. 17, pp. 61-64, 2013A-GS2-3, (USB), 大阪府立大学. (2013.11.21) (査読無)
3. 貞本将太, 田中智行, 岡澤重信, メッシュフリー法を用いた板構造物の弾性座屈解析に関する研究, 第 18 回計算工学講演会論文集, Vol. 18, E-7-2 (CD-ROM), 東京大学. (2013.6.19) (査読無)
4. 貞本将太, 田中智行, 岡澤重信, メッシュフリー法を用いた防撓パネルの線形座屈解析に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, Vol. 16, pp. 159-162 (CD-ROM), 広島市. (2013.5.27) (査読無)
5. 貞本将太, 田中智行, 岡澤重信, メッシュフリー法を用いた薄板組合せ構造物の幾何学的非線形解析に関する研究, 第 62 回理論応用力学講演会講演論文集, OS-04-05 (CD-ROM), 東京都. (2013.3.6) (査読無)
6. 貞本将太, 田中智行, 岡澤重信, メッシュフリー法を用いた補剛板の座屈/後座屈解析に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第 15 号, pp. 503-506 (CD-ROM), 東京大学柏キャンパス. (2012.11.26). (査読無)
7. Shota Sadamoto, Satoyuki Tanaka, Shigenobu Okazawa, Geometrical Nonlinear Analysis of Plates subjected

to Uni-axial Thrust using Meshfree Mindlin-Reissner Formulation, Proceedings of JSME-CMD ICMS2012 MS1-4-2, (CD-ROM), October, 9-11, Kobe, Japan. (2012.10.9) (査読有)

8. Shota Sadamoto, Satoyuki Tanaka, Shigenobu Okazawa, Buckling/Post-Buckling Analysis of Plates using Meshfree Approach, Proceedings of the 26 th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM 2012), pp. 405-410. Fukuoka, September 3 - 6, (2012.9.3) (査読有)
9. Shota Sadamoto, Satoyuki Tanaka, Shigenobu Okazawa, An enforcement technique of essential boundary conditions for nonlinear plate bending problem employing reproducing kernel approximation, Proceedings of 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM2012), CD-ROM, Sao Paulo, Brazil, July, 8-13, (2012.7.8). (査読有)
10. 貞本将太, 田中智行, 岡澤重信, 粒子法を用いた板構造解析における幾何学的境界条件の規定に関する考察, 第 17 回日本計算工学会講演会講演論文集, C-1-3 (CD-ROM), 京都府. (2012.5.29).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 智行 (TANAKA SATOYUKI)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 20452609

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: