

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06632

研究課題名(和文) き裂を有するパネルの圧壊挙動メカニズムの解明

研究課題名(英文) Collapse Behavior of Rectangular Panel with Crack Damage.

研究代表者

村上 睦尚 (MURAKAMI, Chikahisa)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：90392688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：通常シェル要素では考慮できないき裂部での接触や局所変形を考慮したFEMモデルを構築し、座屈・最終強度解析を行った。さらに、構築したFEMモデルを用いて、き裂面の接触、繰返し荷重、矩形板のアスペクト比、板厚が最終強度に与える影響について明らかにした。主な知見としては、き裂面の接触を考慮することで、圧縮最終強度は無き裂の場合と同程度となることを示したが、座屈変形が生じやすい薄板の場合は、最終強度後の荷重低下はパネルのアスペクト比が大きくなるほど顕著になることが分かった。繰返し荷重を受ける場合、き裂の存在により引張荷重時に応力集中、開口の開きが影響し、剛性が低下することが分かった。

研究成果の概要(英文)：We perform Nonlinear Finite Element Analyses to examine influence of crack damages on collapse behavior of continuous stiffened panels under longitudinal compression. The FEA models of the continuous panel are imposed have the periodic boundary conditions at all the edges. As the results of the FEA, in the cases of Transverse Cracks, the rate of the reduction of ultimate strength due to the crack is almost same as the reduction of actual cross-sectional area, except in some cases with small stiffeners that collapse with a global buckling mode. In the cases of Longitudinal Cracks, the ultimate strength is reduced with the increase in length of crack, but the reduction reaches the ceiling, except in the cases which have small stiffeners. The influence of the Longitudinal Crack on the compressive collapse behavior is smaller than the Transverse Crack.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：材料・構造力学 座屈・最終強度 FEM解析 シェル-ソリッドモデル き裂

1. 研究開始当初の背景

2013年6月に大型コンテナ船の折損事故が発生した。この事故は船体中央ボトム部での座屈が起点となり、その後の繰返し荷重により座屈部が損傷、その損傷が船体サイドから上甲板に発展、最終的に船体が折損するというものであった。近年の省エネ船の需要から軽量かつ高強度な船体構造設計が要求されている。一方で、き裂などの局部損傷があったとしてもそれが全体崩壊に繋がらないような構造強度に対する冗長性 (Structural Redundancy) や、船体が損傷した場合の残存強度の定量的評価が必要である。

目標指向型の新造船構造基準 (GBS: Goal-Based New Ship Construction Standard) では、構造規則が持つ機能要件として、き裂などの局部損傷があったとしてもそれが全体崩壊に繋がらないような強度余裕を持たした設計が要求されている。船体構造にはさまざまな理由によりき裂損傷が発生・成長し、構造強度の低下を招くため、その定量的評価が必要となるが、実用的な数値解析手法が確立しておらず、十分な知見が得られていない。

船体構造はパネルに座屈防止用の防撓材が付した周期及び的構造 (防撓パネル構造) となっている。船体構造では、防撓材フランジに取り付けられるブラケットやウェブスチフナの先端から防撓材と直角方向に発生した疲労き裂がフランジに進展し、最終的に、溶接線に沿う形で、あるいは外板を貫通する形で進展することが報告されている。それらの局所的なき裂損傷は防撓パネル構造の座屈変形に影響を及ぼす程度に拡大し、座屈強度や最終強度の低下を招く危険性がある。さらに、構造部材が引張り・圧縮の繰返し荷重を受けることで、き裂損傷が進展し大規模損傷に発展する危険性を持つ。大型船の座屈による損傷事故や GBS など新基準の策定により、パネルや防撓パネルに発生したき裂損傷の評価、及び船体構造全体に対する残余寿命の定量的評価に対する国際的な気運が高まってきている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、き裂損傷を有する船体構造パネルの座屈・塑性崩壊挙動および残存強度を定量的に評価するための FEM モデルの構築と、その検証を行うことである。荷重と直角方向にき裂が存在する場合、圧縮荷重を受けたパネルが座屈して横たわみが生じると、曲げの引張側ではき裂面が開口し圧縮側では閉口する。また、複合荷重下においてき裂が荷重方向と平行に存在する場合、き裂面が接触するか否かは座屈や後座屈挙動に大きく影響を与える可能性がある。通常シエル要素を用いた FEM では、き裂を単なる不連続として取り扱うためこのようなき裂のモデル化は容易ではない。そこで、き

裂部での接触や局所変形を考慮した FEM モデルを構築し座屈・最終強度解析及び検証実験を行う。さらに、構築した FEM を用いてき裂の位置、大きさや向きを変化させシリーズ計算を行い、き裂接触や開閉口挙動がパネルの座屈・最終強度に与える影響について明らかにする。

3. 研究の方法

き裂を有するパネルのシェル・ソリッドモデル化を行い、本アプローチの有効性を確認する。

シェル・ソリッドモデルの線形座屈解析を行い、き裂長さや角度がパネルの座屈強度におよぼす影響について明らかにする。

き裂接触や開閉口挙動がパネルの曲げ変形、及び座屈・最終強度に及ぼす影響について明らかにする。

上記からを目的として、シェルモデル、シェル・ソリッドモデルを用いてき裂を有する矩形パネルのモデル化、パラメトリックスタディを行う。解析ソフトとして汎用 FEM ソフト MSC、MARC、LS-DYNA 及び in-house FEM コード ULSAS を用いる。ULSAS は ISO 委員会等、防撓パネルの最終強度解析で多くの実績を持つプログラムである。シェル・ソリッドモデルではき裂面で接触解析機能を導入する。パネルサイズ、板厚、き裂位置、長さ、角度などを変化させた線形座屈解析、最終強度解析のシリーズ計算を実施し、き裂によるパネルの最終強度への影響度を定量的に明らかにするとともに、これまでの研究例との比較も行う。

検証実験としてき裂を有する矩形パネルの座屈・最終強度試験を実施する。

健全なパネルの検証実験も同様に実施し、き裂接触や開閉口挙動がパネルの座屈・最終強度に及ぼす影響を明らかにする。具体的な目標は以下の通りである。i) 初期たわみの計測、ii) 座屈荷重、座屈モードの計測、iii) 最終強度及びモードの計測、iv) き裂開口変位、き裂面での接触状態の測定である。実験対象は境界条件の影響とき裂の影響を分けるためにパネル構造とする。

4. 研究成果

(1) FEM 要素及びモデルの開発 (シェル・ソリッドモデル化、平面シェルのフリーメッシュ法)

「き裂を有するパネルのシェル・ソリッドモデル化」、「平面シェルのフリーメッシュ法適用」を行った。「シェル・ソリッドモデルの線形座屈解析を行い、き裂長さの座屈強度におよぼす影響」及び「き裂接触や開閉口挙動がパネルの曲げ変形、及び座屈・最終強度に及ぼす影響」について調査するとともに、本アプローチの有効性を確認した。

き裂面の接触を考慮しない場合、パネルの座屈荷重はき裂長さに従って大きくなることが分かった。しかしながら、実現象に即し

て接触を考慮したパネルでは、き裂面での荷重の伝播により無き裂のパネルと同等の座屈荷重となることがわかった。

き裂面の接触を考慮しない場合、き裂の存在により最終強度は大幅に低下するが、接触を考慮することで無き裂パネルと同等の最終強度が得られた。よって、従来のShellモデルによる最終強度解析では、過度に安全側の評価を与えている可能性がある。また、これらの挙動はき裂面の接触如何で大きく変化するため、存在するき裂幅の把握が最終強度の評価には重要となることがわかった。

(2) 圧縮荷重下での開発要素及びモデルの実用性検証

前年度に弾性解析への有用性を確認したシェル-ソリッドモデルを適用し、き裂を有するパネルの弾塑性崩壊解析への適用を可能にした。これにより、き裂面が接触する解析が可能となり、矩形板のアスペクト比、板厚、き裂の長さ・位置をパラメータとしシリーズ計算を実施し、き裂が最終強度の低下へ及ぼす影響を明らかにした。主な知見としては、従来のシェルモデルによるき裂面の接触を考慮しない解析では、最終強度を過度に低く（安全側に）評価している場合があることがわかった（図1参照）。き裂面の接触を考慮することで、圧縮最終強度は無き裂の場合と同程度となることを示したが、座屈変形が生じやすい薄板の場合は、最終強度後の荷重低下はパネルのアスペクト比が大きくなるほど顕著になることがわかった。また、き

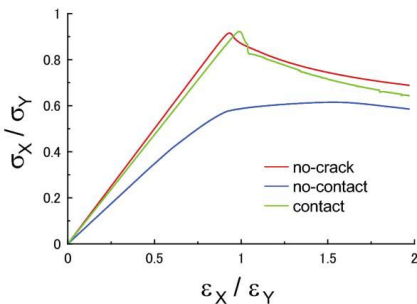


図1 き裂の接触条件が最終強度に与える影響

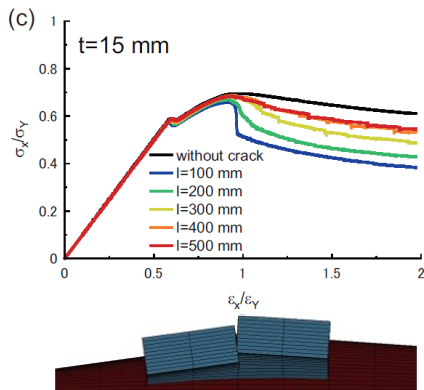


図2 き裂位置による圧壊強度低下

裂の位置がパネルの端部に近づくほど、き裂接触面のズレが大きくなることにより、荷重伝播面積が小さくなることで、最終強度及びその後の耐力を低下させることが分かった（一例として図2参照）。

次に、1/2+1+1/2 スパン、1/2+1+1/2 ガーダースペースの連続防撓パネルを対象に板厚、き裂の長さ・向きをパラメータとし、弾塑性崩壊解析を実施した（一例として図3参照）。主な知見としては、幅方向のき裂では、き裂による最終強度の低下率は、き裂による断面積の低下率とほぼ等価となる。一方、長さ方向のき裂では、最終強度の低下率は、き裂の長さにより一割程度の低下はするが、ある一定の長さになると、頭打ちになることがわかった。

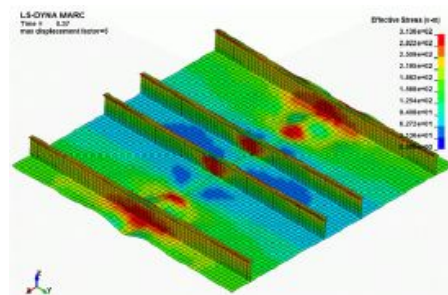


図3 き裂を有する連続防撓パネルの最終強度時のミーゼス応力の分布

最後に、開孔などの不連続を有するパネルを対象に平面シェルのフリーメッシュ法の適用が可能であることを確認した（一例として図4参照）。

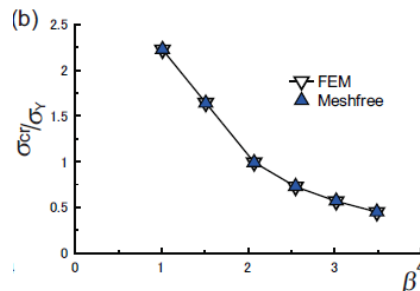


図4 フリーメッシュ法のFEMとの比較による精度確認

(3) 繰返し荷重下での開発要素及びモデルの実用性検証

繰返し荷重、き裂面の接触、矩形板のアスペクト比、板厚が最終強度に与える影響について明らかにした。具体的には、繰返し荷重を想定し、き裂を有するパネルが一定量の引張ひずみを受けた後の圧縮崩壊挙動を解析した。主な知見としては、アスペクト比が小さい場合、き裂の存在により引張荷重時に応力集中が生じて剛性は低下し、続く圧縮荷重時にもこの影響が見られる。しかしながら一定の圧縮ひずみの後にはき裂面の接触が発生することで剛性は回復し、圧縮のみの最

終強度と同程度となる。一方、アスペクト比が大きい場合には、き裂近傍での変形の局所化が見られ、特に薄板のパネルではき裂面の接触が発生せず最終強度を迎え、その低下量は顕著になることが分かった(図5参照)。

あわせて、試験体及び試験治具の設計及び製作を行い、代表的なケースを対象にき裂を有する矩形板が受けるき裂長さ、繰返し荷重の影響を実験により検証し、数値解析の有用性の確認を行った。

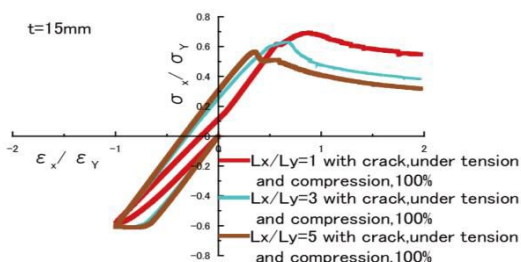


図5 繰返し荷重下でのき裂を有する矩形板へのアスペクト比の影響

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 3 件)

貞本将太、田中智行、谷口公洋、M.OZDEMIR、T.Q.BUI、村上睦尚、柳原大輔、Buckling analysis of stiffened plate structures by an improved meshfree flat shell formulation、Thin-Walled Structures、査読有、117巻、2017、PP.303-313

吉田健一郎、貞本将太、瀬戸山雄、田中智行、Tinh Bui-Quoc、村上睦尚、柳原大輔、Meshfree Fat-shell Formulation for Evaluating Linear Buckling Loads and Mode Shapes of Structural Plates、Journal of Marine Science and Technology、査読有、22巻、2017、pp.501-512

DOI: 10.1007/s00773-017-0433-2

瀬戸山雄、田中智行、村上睦尚、柳原大輔、き裂を有するパネルの有限要素法によるモデル化と最終強度解析に関する研究、日本計算工学会論文集、査読有、2017、論文番号 20170014

[学会発表](計 5 件)

喻霽、瀬戸山雄、田中智行、村上睦尚、柳原大輔、引張及び圧縮荷重を受けるき裂損傷を有する矩形パネルの崩壊挙動に関する研究、日本船舶海洋工学会、2017秋

瀬戸山雄、柳原大輔、田中智行、村上睦尚、Influence of Various Crack Damages

on Compressive Collapse Behavior of Continuous Stiffened Panel、31st Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM2017)、2017

瀬戸山雄、田中智行、村上睦尚、柳原大輔、種々のき裂が連続防撓パネルの圧壊強度に及ぼす影響、日本船舶海洋工学会、2016秋

瀬戸山雄、田中智行、松田英紀、村上睦尚、柳原大輔、き裂損傷を有するパネルのモデル化と座屈・最終強度に関する研究、日本船舶海洋工学会、2016春

吉田健一郎、谷口公洋、瀬戸山雄、田中智行、村上睦尚、柳原大輔、Buckling analysis of plate structures using meshfree method、Proceedings of 3rd International Conference on Violent Flows 2016、2016

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

村上睦尚 (MURAKAMI Chikahisa)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 構造安全評価系 基準開発グループ長

研究者番号: 90392688

(2)研究代表者

安藤孝弘 (ANDO Takahiro)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 構造安全評価系 構造解析研究グループ 主任研究員

研究者番号: 30425756

(3)研究分担者

田中智行 (TANAKA Satoyuki)

国立大学法人 広島大学 大学院 工学研究院 助教

研究者番号: 20452609

(4)研究分担者

柳原大輔 (YANAGIHARA Daisuke)

国立大学法人 九州大学 工学研究院 准教授

研究者番号: 10294539

(5)研究協力者

瀬戸山雄 (SETOYAMA Yu)

株式会社 富士通九州システムズ