

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13945

研究課題名（和文）溶接残留応力が防撓パネルの最終強度に及ぼす影響に関する研究

研究課題名（英文）The effect of the welding residual stress on the ultimate strength of the stiffened panel

研究代表者

小森山 祐輔（Komoriyama, Yusuke）

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：90805110

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：溶接残留応力分布がパネル・防撓パネルに及ぼす影響を調査するために、荷重載荷による溶接残留応力分布の変化を実験的に検証した。はじめに、溶接継手試験片を製作し、残留応力分布の計測法としてX線残留応力測定装置を行うための鉄板表面の処理方法について検討した。次に、溶接継手試験片に引張・圧縮荷重を載荷する実験を行い、残留応力分布の変化が大きくないことを確認した。また、引張・圧縮荷重の繰返し荷重を載荷する実験も行い、同様に残留応力分布の変化が大きくない結果を得た。また、防撓パネルで構成されるボックスガーターとパネルを対象に溶接残留応力を考慮したFEMを用いた解析を行い、溶接残留応力の影響を調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

疲労強度を対象に溶接線の周りに発生するき裂に関する研究は多く実施されているが、最終強度を対象に荷重載荷による溶接残留応力分布の変化を実験的に調査した研究は数少なく、本研究で得られた知見は大きな価値があると考えられる。塑性ひずみが生じない荷重レベルで引張・圧縮荷重を載荷しても溶接残留応力分布に大きな変化が確認されなかった、また繰返し荷重を載荷した場合も大きな変化がなかったことは最終強度を検討する際の溶接残留応力分布の設定の参考になる知見である。また、FEM解析で得られた荷重条件による最終強度の違いは、最終強度が荷重履歴に依存することを示唆する知見であり、今後検討していく価値があるものだと考える。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate the effect of the welding residual stress distribution on the panel and the stiffened panel, the change in the welding residual stress distribution due to the load was experimentally verified. First, a welded joint test piece was produced, and a method for treating the iron plate surface for performing an X-ray residual stress measuring device as a method for measuring the residual stress distribution was examined. Next, an experiment was conducted in which a tensile / compressive load was applied to the welded joint test piece, and it was confirmed that the change in the residual stress distribution was not large. We also conducted an experiment in which repeated loads of tensile and compressive loads were applied. In addition, we conducted an analysis using FEM considering the welding residual stress for the box girder composed of the stiffened panel and the panel, and investigated the effect of the welding residual stress.

研究分野：最終強度

キーワード：溶接残留応力分布 最終強度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

船体の縦曲げ最終強度は、極限海象時における船舶の survivability に関係する最も重要な強度評価項目である。近年、FEM によるホールドモデルの逐次崩壊解析が実行可能になってきたが、設計段階においては簡易解析法である Smith 法に基づく増分反復法が主流である。Smith 法では、評価対象断面をパネル・防撓パネル要素に分割して、断面の曲げモーメント - 曲率関係を評価するため、要素毎の平均応力 - 平均ひずみ関係の精度が重要となる。この平均応力 - 平均ひずみ関係を精度良く表すためには最終強度の推定精度が重要である。最終強度は初期不整である溶接残留応力の影響を受けるが、現行のルールでは平均応力 - 平均ひずみ関係に溶接残留応力の影響は陽に考慮されていない。また、パネル・防撓パネルの溶接残留応力は、荷重を受けることで分布形状が変化するが、どのように変化し、変化後の残留応力がどのように最終強度に影響を与えるかについてはあまり研究が実施されていない。以上より、より合理的なパネル・防撓パネル要素の最終強度を推定するため、溶接残留応力分布がどのように変化するのか、それが最終強度にどのように影響するか知る必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、溶接残留応力分布が荷重を受けることで、どのように変化するかを実験的に検証する。また、溶接残留応力を考慮した FEM を用いた解析を行い、溶接残留応力が最終強度にどのような影響を及ぼすかを検証する。

3. 研究の方法

3.1 荷重載荷による溶接残留応力分布の変化の実験的解明

はじめに、溶接継手試験片を用いて、X 線残留応力測定装置(図 1)を用いた計測法の精度を調査した。X 線残留応力測定装置を用いて鉄板の残留応力を計測する際、鉄板表面の酸化被膜を除去する必要がある。この表面処理として、界面活性剤(図 2)による方法と、電解研磨(図 3)による方法を用いた。界面活性剤による方法では、表面処理を施す場所を堰で囲み界面活性剤を満した。電解研磨による方法では、同様に処理を施す場所を堰で囲み図 3 に示すように電解研磨を実施した。両者処理後に X 線残留応力測定装置を用いて残留応力を計測した。また、ひずみゲージを設置した周りを切断し、その時に解放されるひずみを計測することで残留応力を計測する、切り出し法(図 4、図 5)による計測も実施した。



図 1 X 線残留応力測定装置



図 2 界面活性剤

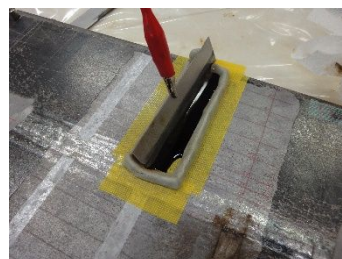


図 3 電解研磨



図 4 切り出し法 (切断前)



図 5 切り出し法 (切断後)

次に、荷重載荷試験装置(図 6)と溶接継手試験片を用いて、引張・圧縮荷重載荷による残留応力分布の変化について調査した。荷重載荷試験装置に溶接継手試験片を設置した様子を図 7 に示す。溶接線に対して平行に引張・圧縮荷重を載荷し、除荷後の残留応力分布を計測した。3本の試験片を用いて 3 種類の荷重条件で試験を実施した。1 つ目の荷重条件では、引張荷重を載荷・除荷して溶接残留応力を計測することを各荷重レベルに対して実施した。2 つ目の荷重条件では、圧縮荷重で 1 つ目と同様な計測を実施した。3 つ目の荷重条件では、引張・圧縮の繰返し荷重を載荷し、除荷後の残留応力分布を計測した。



図6 荷重載荷装置



図7 試験片

3.2 FEMによる溶接残留応力が最終強度に与える影響の解明

ボックスガーダーを用いた4点曲げ試験(図8)の結果と、FEM解析(図9)の結果の比較し、溶接残留応力が最終強度に与える影響について調査した。また、溶接残留応力を考慮したパネルの座屈崩壊のFEM解析(図10)を実施し、溶接残留応力が最終強度に与える影響について調査を行った。



図8 ボックスガーダーの4点曲げ試験

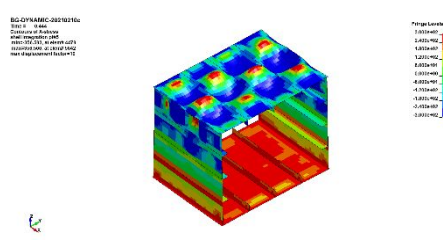


図9 ボックスガーダーのFE結果

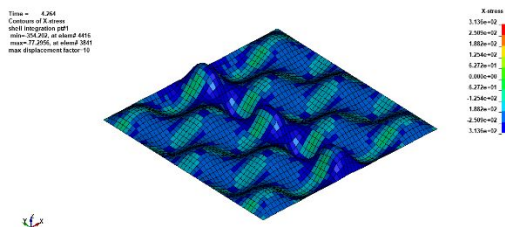


図10 パネルのFEM解析結果

4. 研究成果

4.1 荷重載荷による残留応力分布の実験的解明

界面活性剤、電解研磨(1回実施、2回実施)の3種類の表面処理後、X線残留応力測定装置で計測した残留応力分布を図11に示す。図11より、中央の溶接線周りでは、界面活性剤による結果が、電解研磨による結果に比べて引張の残留応力大きい。それ以外の範囲では、両者の表面処理後の残留応力はほぼ同等な結果が得られた。さらに、界面活性剤による結果と切り出し法による結果(図12)についても、ほぼ同等な結果が得られることが確認できた。以上から、処理に手間が必要な電解研磨ではなく、比較的処理の手間が少ない界面活性剤による表面処理を採用し、荷重載荷試験時の残留応力を計測することにした。

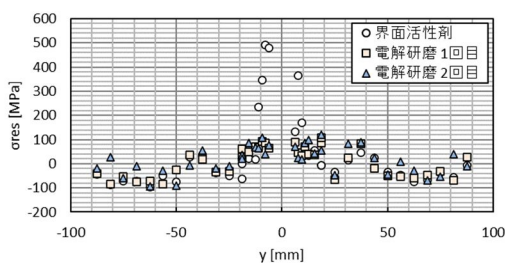


図11 界面活性剤と電解研磨後の比較

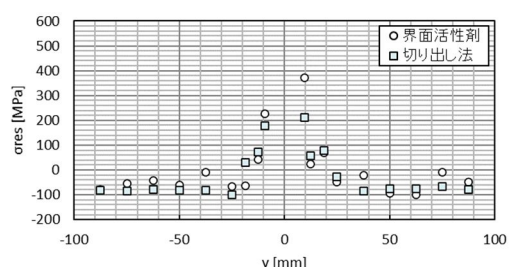


図12 界面活性剤と切り出し法の比較

次に、溶接継手試験片を用いて、引張・圧縮荷重を載荷した時の残留応力分布の変化を調査した。図 13 に引張荷重を載荷した試験結果を示す。図 13(a) に荷重 - 変位曲線を示しており、5 回の載荷試験 (Load1 ~ Load5) を実施し、其々の荷重除荷後の残留応力分布 (After1 ~ After5) を図 13(b) に示している。なお、図 13(b) の Before は荷重載荷試験前に計測した残留応力分布である。Load1 ~ Load3 は 94kN、188kN、282kN の引張荷重を載荷している。Load4 はひずみが大きくなった時点で除荷した結果、Load5 は崩壊まで引張荷重を載荷した結果である。図 13(b) より、残留応力分布は溶接線周りで引張応力、離れるほど圧縮応力となっており、妥当な結果であると考えられる。また、崩壊までの荷重を与えた After1 ~ After4 の結果を見ると、大きな残留応力分布の変化は確認されなかった。一方、After5 では溶接残留応力が両端付近で緩和されていることが分かるが、この時点では塑性ひずみによる残留応力が発生しているので、元々の溶接による残留応力分布の変化とは一概に言うことができない。以上から、引張荷重を各段階で与えることによる溶接残留応力分布の変化は大きくないことが分かった。

次に図 14 に圧縮荷重を載荷した試験結果を示した。荷重条件としては、-94kN、-188kN、-282kN、そして崩壊まで荷重を与える 4 種類 (Load1 ~ Load4) の荷重条件毎に載荷・除荷を行い、除荷後の残留応力分布 (After1 ~ After4) を計測した。After2 までは残留応力分布の変化は大きくない。一方、After3 以降は、残留応力分布がかなり変化しているが、図 14(a) の荷重 - 変位曲線 Load3 を見ると既に塑性ひずみが発生しており、塑性により残留応力分布が変化したと考えられる。塑性ひずみが生じた要因としては、圧縮荷重を載荷することで試験片に曲げが生じたことが考えられる。今後、曲げの影響が小さくなるような試験方法を検討する必要がある。なお、Load2 程度の荷重を載荷しても残留応力分布にはそれほど変化がないことが分かった。

最後に、図 15 に引張・圧縮の繰返し荷重を載荷した結果を示した。初めに、引張荷重を載荷 (Load1)、次に圧縮荷重 (Load2)、その後、10 回の繰返し荷重、10000 枚の繰返し荷重、最後に崩壊まで繰返し荷重を与え 27000 回程度繰返し荷重を与えた時点で試験片の試験機に固定した近傍で破断した。荷重としては、崩壊荷重の 2/3 程度の荷重で繰返し荷重を与えたが、残留応力分布が大きく変化することはなかった。なお、繰返し荷重を載荷するほど残留応力分布の緩和が多少見られるが、試験機の破断に至ったき裂が進展したことも考えられるため、今後、き裂が生じないような試験片固定部分の処理が必要である。

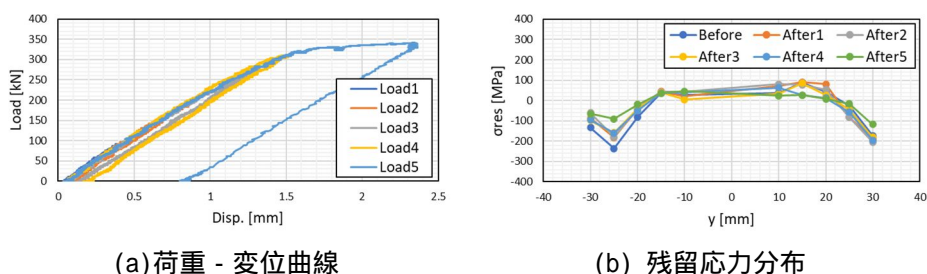


図 13 引張荷重載荷試験

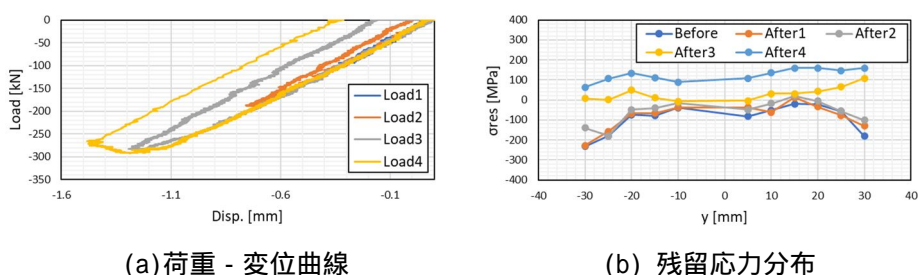


図 14 圧縮荷重載荷試験

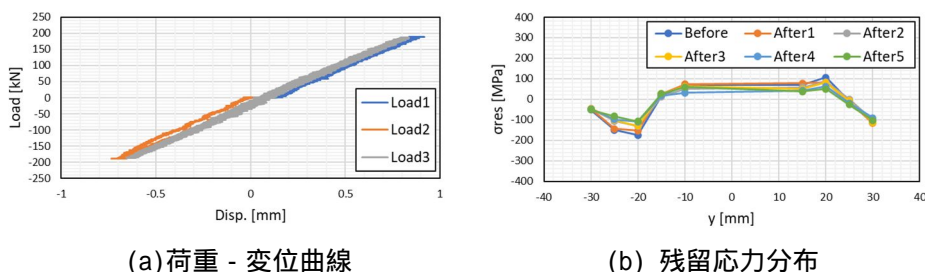


図 15 引張・圧縮繰返し荷重載荷試験

4.2 FEMによる溶接残留応力が最終強度に与える影響の解明

ボックスガーダーの4点曲げ試験結果と、溶接残留応力を考慮していない場合とした場合のFEM解析結果の最終強度の比較を実施した。結果として、溶接残留応力を考慮した場合の方が試験結果と良い一致を示している。また、防撓材の荷重とひずみの関係を示しており、溶接残留応力を考慮することで座屈による接線剛性の低下などの現象を再現できることが分かった。

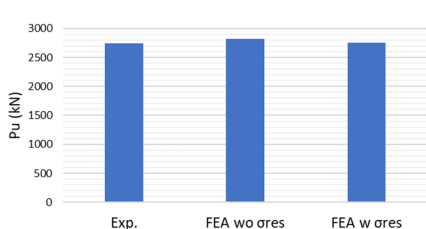


図 16 最終強度の比較

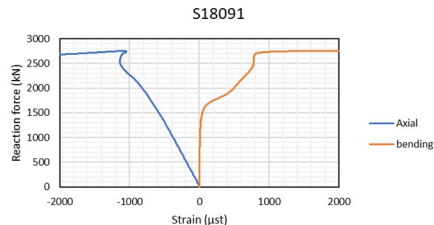
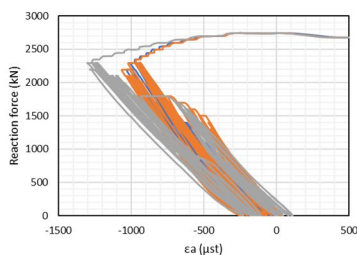
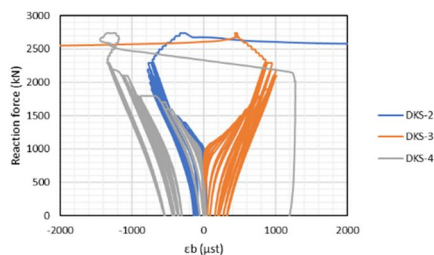


図 17 防撓材の荷重とひずみの関係 (FEM 解析結果)



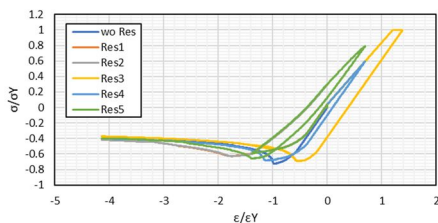
(a) axial strain



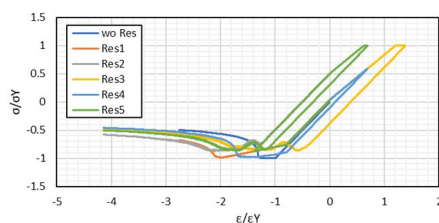
(b) bending strain

図 18 防撓材の荷重とひずみの関係 (実験結果)

溶接残留応力を考慮し荷重条件を変化させたパネルの平均応力と平均ひずみの関係を図 19 に示す。なお、平均応力は降伏応力で、平均ひずみは降伏ひずみで除して無次元化をしている。2種類の板厚 $t_p=15\text{mm}$, 25mm のパネルに対して、溶接残留応力を考慮せず単調に圧縮荷重を与えた条件 (wo Res) と、溶接残留応力を考慮して荷重条件を変化させた条件で解析 (Res1 ~ Res5) を実施した。図 19 より溶接残留応力を考慮すると接線剛性が低下する平均応力が減少することが分かる。また、荷重条件を変化させることで最終強度も変化する事が確認された。この荷重条件による最終強度の変化は今後検討する必要がある。



(a) $t_p=15\text{mm}$



(b) $t_p=25\text{mm}$

図 19 防撓材の平均応力と平均ひずみの関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------