

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560793

研究課題名（和文） ハット型スチフナを有する GFRP 防撓パネルの圧壊強度評価に関する研究

研究課題名（英文） Study on Evaluation of Compressive Strength of GFRP Stiffened Panel with Top-Hat Stiffener

研究代表者

柳原 大輔 (Yanagihara Daisuke)

愛媛大学・大学院理工学研究科・寄附講座准教授

研究者番号：10294539

研究成果の概要（和文）：本研究では、GFRP パネルとハット型スチフナ付き GFRP 防撓パネルの座屈試験結果に基づき、層間はく離の発生を含む基本的な座屈・破壊挙動を明らかにした。BWR 層の圧縮応力が層間はく離発生に寄与すると考え、圧縮材料試験を行って限界応力を求めた。さらに、スチフナの曲り部に生じる層間はく離に関しては、GFRP 曲り帯板の曲げ試験を実施し、曲り部に発生する板厚方向応力に基づいた限界曲げモーメント算式を導出した。これら限界値の検証を通して、層間はく離の発生を予測できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Based on the results obtained by buckling tests for a GFRP unstiffened panel and stiffened panels with a top-hat stiffener, the fundamental buckling/fracture behavior including initiation of delamination is identified. Compressive stress in BWR layers is considered as one of the causes of the delamination, and the critical stress is derived by compressive material tests. To obtain a criterion for delamination produced in the curved part of the top-hat stiffener, four-pointed bending tests for curved band plates are carried out. Based on the through-thickness stress produced in the curved plate, the critical bending moment is derived. Through the validation of the critical values, the possibility to predict the initiation of the delamination is indicated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：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：複合材料, FRP, 座屈, 層間はく離, ハット型スチフナ, 防撓パネル

1. 研究開始当初の背景

繊維強化複合材料である GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) は、比剛性および比強度が高い、磁気を帯びにくい、耐食性が良い、加工が容易であるなどの理由から、

軽量化の必要な高速船や、磁気機雷対策のため鋼を使用できない掃海艇などの構造部材として用いられている。一方、近年の地球環境に対する配慮から、一般の商船においても船体構造重量を軽くして燃費を向上させる

必要性があり、将来的には、船体構造への部分的な GFRP の適用を検討していく必要がある。

GFRP パネルはヤング率が鋼材の $1/10 \sim 1/20$ と低いため、圧縮荷重を受けた場合には座屈が発生しやすい。そのためパネル単体で使用されることはなく、多くの場合、図 1 のようなハット型スチフナによって補剛された防撓パネルが基本構造要素となる。したがって、GFRP 適用構造物の安全性を確保するためには、精度の良い GFRP 防撓パネルの圧壊強度評価が必要になる。

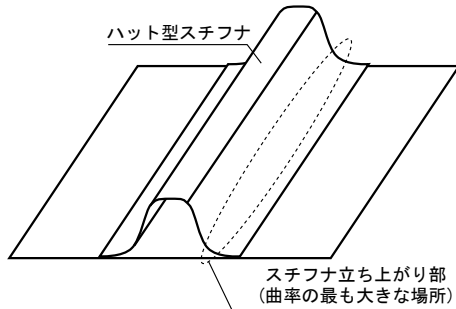


図 1 ハット型スチフナ付 GFRP 防撓パネル

船体構造に用いられる GFRP パネルは、図 2 に示すような 2 種類の繊維材を積層して作られている。ひとつは、短繊維をランダムに配した CSM (Chopped Strand Mat) であり、もうひとつが、長繊維を格子状に織り込んだ BWR (Balanced Woven Roving) である。この GFRP 積層パネルが圧縮荷重を受け座屈が生じると、座屈変形の上昇とともに、層と層が剥がれる、層間はく離が発生する。層間はく離発生後も耐力は若干ながら上昇するものの、はく離の修復は困難であることを考えると、はく離の発生を圧縮崩壊に対するクライテリアとしても良いと言える。つまり、はく離の発生を予測できれば GFRP パネルの圧壊強度を推定できることになる。

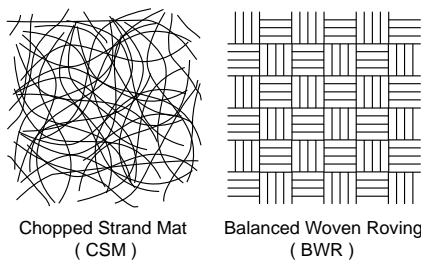


図 2 船体構造に用いられるガラス繊維

2. 研究の目的

本研究では、ハット型スチフナを有する GFRP 防撓パネルがスチフナ方向に面内圧縮荷重を受ける場合を対象として、パネルに層間はく離が生じる場合をクライテリアとして圧壊強度を推定する手法の構築を最終的な目的とする。そのための具体的な目的とし

て以下の事項を考える。

(1) GFRP パネルならびにハット型スチフナ付き防撓パネルに対して、層間はく離の発生の有無も含めた座屈・破壊挙動を明らかにする。

(2) GFRP の積層構成を考慮できるシェル要素の開発を行い、精度良く弾性大たわみ解析が実施できる有限要素解析ツールを構築する。

(3) (1) の結果に基づき、BWR 層の圧縮応力が限界値に達した場合に層間はく離が発生すると考え、この限界値を求める。

(4) (3) とは別に、曲りを持つ部材がその曲りを開く方向に曲げモーメントを受けた場合にも層間はく離が生じるとし、この限界曲げモーメントを求める。

(5) 以上の結果に基づき、有限要素法解析で求めた BWR 層の圧縮応力や曲り部の曲げモーメントとそれらの限界値から層間はく離の発生を予測し、はく離強度つまり圧壊強度を求める手法を構築する。さらに GFRP パネルならびに防撓パネルの座屈試験結果との比較を通して、その精度の検証を行う。

3. 研究の方法

上述の研究目的を達成するために、以下の事項を実施する。

(1) GFRP パネルならびにハット型スチフナ付き防撓パネルに対する 1 軸圧縮座屈試験結果を精査することで、これらパネルの座屈変形挙動ならびに層間はく離の発生特性を明らかにする (図 3)。

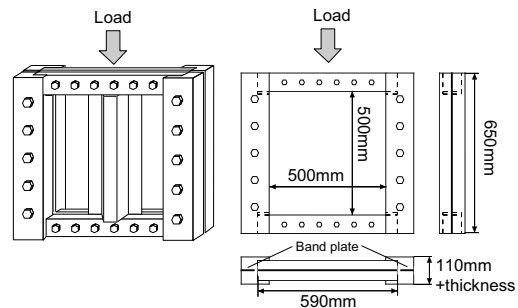


図 3 GFRP 防撓パネルの座屈試験

(2) シェル要素を用いた GFRP パネル用の有限要素解析ツールを構築し、このツールを用いて (1) の座屈試験を再現するとともに、解析ツールの妥当性を検証する。

(3) GFRP 積層板の圧縮材料試験を行い、層間はく離に起因する BWR 層の限界圧縮応力を導く。

(4) 積層数、曲率の異なる曲り GFRP 帯板を製作し、曲り部が開く方向に曲げ荷重受ける 4 点曲げ試験を行い、層間はく離発生曲げモーメントを求める (図 4)。一方、2 次元ソリッド有限要素解析により曲げ試験を再現

し、曲り部に発生する層間応力の限界値を推定するとともに、任意の積層数（板厚）、曲率に対応できるはく離限界曲げモーメント推定式を導く。

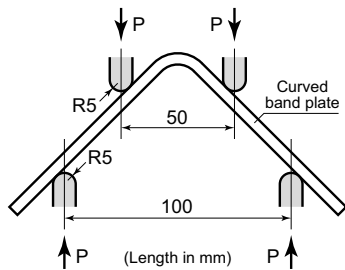


図4 GFRP 曲り帯板の4点曲げ試験

(5) (2) で実施した座屈試験のシミュレーション結果を用いて、(3), (4) の層間はく離発生限界値を使ってはく離の発生を予測する。予測結果と試験結果を比較し、構築した手法の妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) GFRP パネルならびにハット型スチフナ付き防撓パネルの座屈・破壊挙動

スチフナなしの単独パネルの座屈試験では、最初にパネル座屈が発生した後、荷重の上昇とともにたわみが増加する。その後、たわみの最も大きな箇所では表層（曲げの圧縮側）から2層目のBWRと3層目のCSMの間に層間はく離が発生した。直後にこれが幅方向全体に進展して最終的な崩壊に至る。

一方、防撓パネルでは、パネル部に3半波の座屈が発生した後、座屈モードが4半波に変わる2次座屈が発生した。その後、パネルの座屈変形がパネル側に凸となる防撓材の立ち上がり部で層間はく離が発生した。さらに、中心近傍のスチフナ頂部に層間はく離が発生して最終的な崩壊に至る。この時、スチフナ頂部が曲げの圧縮側となる全体座屈変形が生じ始めており、スチフナ頂部には大きな圧縮応力が作用したと考えられる。

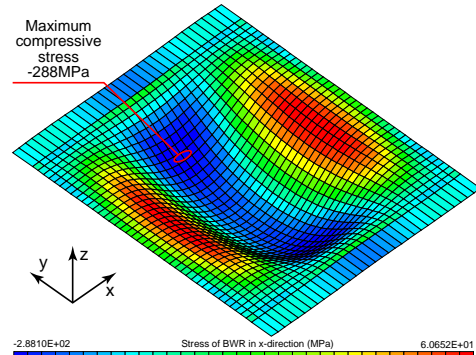
以上の試験結果を層間はく離の発生に注目してまとめると、層間はく離は面内圧縮と座屈たわみによる圧縮応力が最も大きくなる箇所ではく離が発生する。以前に実施した帯板の座屈と層間はく離に関する研究と同様に、パネルでもBWR層の圧縮応力によって層間はく離が発生すると予想される。一方、ハット型スチフナの立ち上がり部のような曲りのきつい箇所では、曲りを開く方向に曲げモーメントを受けた場合に層間はく離が発生する。

(2) シェル要素を用いた有限要素法解析

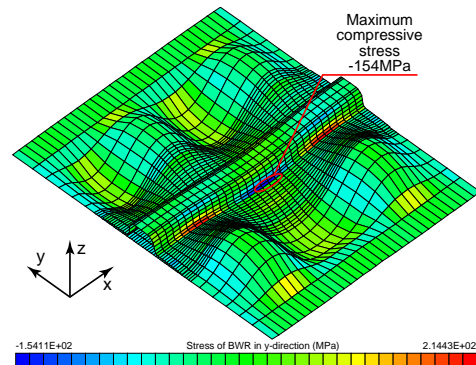
シェル要素を用いた有限要素法解析を実施し、座屈試験の再現を試みた。解析には開発した in-house コードを用いる。この解析コ

ードは大たわみによる幾何学的非線形とともに、材料の直交異方向性が考慮されている。さらに、板厚方向の積分点を各繊維層に必ず1点以上設けることで積層状態を考慮できる。

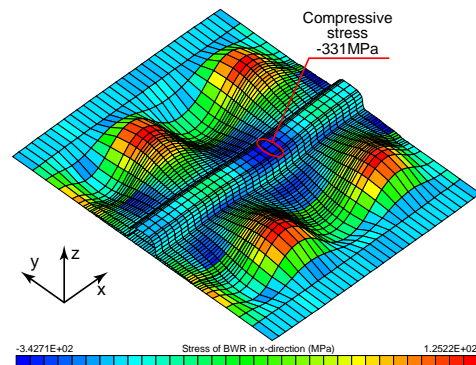
解析より得られた GFRP パネルならびに防撓パネルの変形と応力の分布を図5に示す。試験結果と解析結果との間で座屈モードやそのたわみ量の比較をすると、幾つかの差が見られるものの、シェル要素を用いた FEA が比較的良い精度で GFRP パネルの座屈挙動を再現できていることが分かった。



(a) パネル（はく離発生時、表面近傍 BWR 層の荷重方向応力分布）



(b) 防撓パネル（スチフナ立ち上がり部ではく離発生時、裏面近傍 BWR 層の荷重に垂直な方向の応力分布）



(c) 防撓パネル（スチフナ頂部ではく離発生時、表面近傍 BWR 層の荷重方向応力分布）

図5 解析より得られた GFRP パネルおよび防撓パネルの座屈モードと応力分布

(3) GFRP の圧縮材料試験と BWR 層の限界圧縮応力

座屈が発生し難い厚く短い GFRP パネルの試験片を製作して、圧縮材料試験を実施した。用意したいずれの試験片でも BWR 層に隣接する層間にはく離が生じて耐力の急激な低下が起こった。はく離発生時の荷重から BWR 層の圧縮応力を見積もると 333MPa となり、以後、これを BWR 層の圧縮限界応力とする。

(4) 曲り帯板の曲げ試験と限界曲げモーメント

曲り部の層間にはく離のメカニズムを明らかにするため、曲り帯板が曲りを開く方向にモーメントを受けるような 4 点曲げ試験を実施した。積層数（つまり板厚）と曲り部の曲率半径が異なる試験片を用意し、これらが層間にはく離強度におよぼす影響も調べた。いずれの試験でも層間にはく離の発生による急激な耐力低下が見られた。はく離発生時の限界曲げモーメントは積層数が多くなるほど、また曲率半径が大きくなるほど上昇することが明らかとなった。

2 次元ソリッド要素を用いた有限要素解析を実施して、曲げ試験の再現を行った。その結果、曲りを開く方向に曲げ荷重を受ける曲り帯板は、板厚方向にある程度大きな引張応力が生じることが明らかとなり、この引張応力が層間にはく離を引き起こしていると推測される。曲り部の内径を板厚で除したパラメータと層間にはく離発生時の板厚方向応力の関係を図6に示す。図から分かるようにはく離を引き起こす板厚方向応力の限界値は一定ではなく、上記のパラメータに応じて変化することが分かった。そこで、近似曲線を求め、曲り部内径と板厚から板厚方向限界応力を求める算式を導出した。

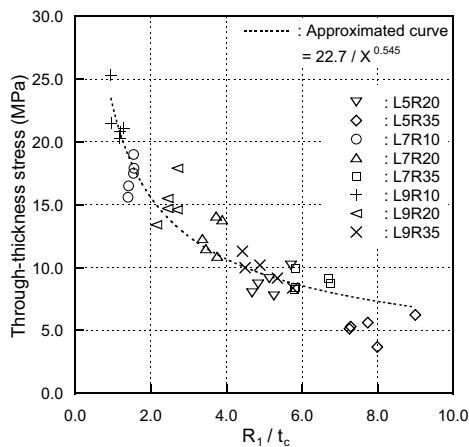


図6 曲り帯板の内径/板厚の比と

板厚方向限界応力との関係

さらに、既存の研究結果である、曲げモーメントと曲り部寸法から板厚方向応力を導く算式を利用して、曲り部寸法から限界曲げモーメントを導出する算式を導出した。曲げ試験より得られた限界曲げモーメントと算式により推定された曲げモーメントとを図7に比較する。若干ばらつきが大きいものの、導出した算式により限界曲げモーメントを推定可能であることが分かった。

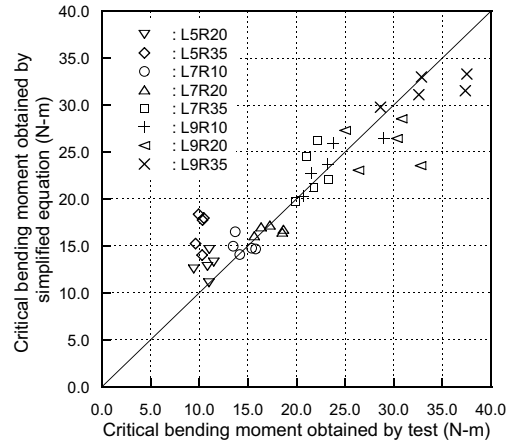


図7 曲げ試験より得られたはく離発生限界曲げモーメントとその推定値との関係

(5) 層間にはく離の発生予測

先に述べた BWR 層の限界圧縮応力ならびに、曲り部に作用する限界曲げモーメントに基づく層間にはく離の発生条件の検証を行う。

はじめに、BWR 層の圧縮限界応力の妥当性を検証するため、座屈試験に対する有限要素解析結果との比較を行った。GFRP パネルで生じた層間にはく離 (図5(a)) と、GFRP 防撓パネルのスチフナ頂部で生じた層間にはく離 (図5(c)) については、はく離が生じた荷重下の BWR 層の最大圧縮応力はそれぞれ、288MPa と 331MPa と概ね限界応力である 333MPa に一致した。一方で、スチフナの立ち上がり部に生じた層間にはく離 (図5(b)) については、BWR 層の圧縮応力は 154MPa となり、限界応力に達する前にはく離が発生していることが分かった。以上の結果から、パネル部やスチフナ頂部のような平板部では、BWR 層の圧縮応力から層間にはく離の発生を予測できることが明らかとなった。一方、スチフナの立ち上がり部のような曲り部では別の予測手法が必要であることが分かった。

次に、曲り部の層間にはく離発生限界曲げモーメントについて検証する。図5(b)に示した座屈試験で立ち上がり部に層間にはく離が生じた時の有限要素解析結果では、はく離箇所の単位幅当たりの曲げモーメントが

528N-mm/mm となった。一方、この部分の寸法から推定される限界曲げモーメントは 502N-mm/mm となり、両者はほぼ一致することが分かる。また、別の寸法を有する防撓パネルでは、有限要素解析での曲げモーメントが 480N-mm/mm、限界曲げモーメント推定値が 618N-mm/mm となった。この場合は低めの推定値となったが、GFRP パネルの寸法の不確かさを考えると、両者は比較的一致していると言える。以上の結果から、本研究で提案した手法により層間はく離の発生を予測可能であることが明らかとなった。

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)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 柳原大輔, Buckling/Fracture Behavior of GFRP Stiffened Panel with Top-Hat Stiffener under Compression and Prediction of Initiation of Delamination, The 23rd International Offshore and Polar Engineering Conference, 2013 年 7 月 2 日, Anchorage Convention Center (Anchorage, Alaska, USA), 査読有.
- ② 柳原大輔, ハット型防撓材を有する GFRP パネルの圧壊挙動に関する研究, 日本船舶海洋工学会平成 23 年春季講演会, 2011 年 5 月 19 日, 福岡県中小企業振興センター, 査読無.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳原 大輔 (Yanagihara Daisuke)
愛媛大学・大学院理工学研究科・寄附講座
准教授
研究者番号：10294539

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし