

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420868

研究課題名(和文) 組み合わせ荷重を受ける鋼製サンドイッチパネルの崩壊挙動に関する研究

研究課題名(英文) Collapse Behavior of Steel Sandwich Panels Subjected to Combined Loads

研究代表者

柳原 大輔 (YANAGIHARA, Daisuke)

愛媛大学・理工学研究科・寄附講座准教授

研究者番号：10294539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：コルゲートコアあるいはウェブコアを有する鋼製サンドイッチパネルを対象に、二軸方向の面内荷重ならびに面外分布荷重を受ける場合の崩壊挙動を調査した。面外荷重を受ける場合は支持部のコアパネルが潰れやすく、コアの板厚が十分でない場合は、同程度の曲げ剛性を持つ既存の防撓パネルに比べ崩壊強度が低くなる。一方向内圧縮を受ける場合では、防撓パネルと同程度以上の圧壊強度となる。さらに、長さ方向と幅方向の圧縮、面外荷重がそれぞれ単独に作用する場合を対象に、設計時に強度推定を可能にする簡易的な算式の開発を試みた。さらなる精度改善が必要なものの、提案算式が十分な有用性を持っていることを示すことができた。

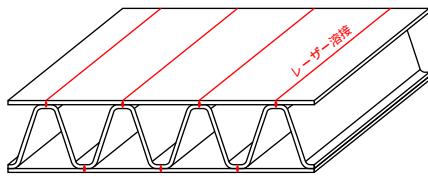
研究成果の概要(英文)：This study targets steel sandwich panels with corrugated or web cores. Collapse behaviors of the sandwich panels subjected to single or combined uniaxial or biaxial in-plane compression and lateral pressure are examined. It is found that local collapse of the core panel easily takes place in the panel under lateral pressure, and smaller ultimate strength is obtained in the sandwich panel with insufficient core-thickness comparing with the stiffened panel with the same bending stiffness. In the panel under in-plane compression, the sandwich panel has the same or larger ultimate strength comparing with the stiffened panel. Simplified equations and methods to estimate the ultimate strength of the sandwich panel under single uniaxial compression and lateral pressure are derived. These are validated through the comparison with the FEA results. It is clarified that improvement is needed to heighten the accuracy of the estimation but these equations and method have a sufficient availability.

研究分野：船体構造力学

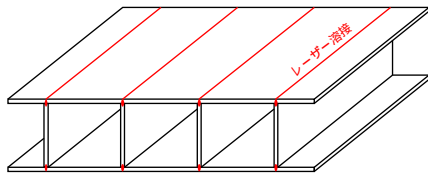
キーワード：鋼製サンドイッチパネル コルゲートコア ウェブコア 面内圧縮荷重 面外分布荷重 最終強度 座屈 有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

近年のレーザー溶接技術の発展により、ある程度の厚さを持った板材に対してもステイク溶接による接合が可能になってきた。これにより、効率的ではあるものの従来は組み立てが不可能であった構造様式を船体構造に適用することも可能となる。このような構造様式のひとつとして、サンドイッチパネル構造がある。鋼製サンドイッチパネルには、図1に示すように、コア材にコルゲートパネルを使用するコルゲートコアサンドイッチパネルや、フラットバーを使うウェブコアサンドイッチパネルなどがある。コア材と上下スキンパネルはスキンパネル側からのレーザー溶接で接合される。



(a) コルゲートコアサンドイッチパネル (CCSパネル)



(b) ウェブコアサンドイッチパネル (WCS パネル)

図1 鋼製サンドイッチパネル

鋼製サンドイッチパネルに対する既存の研究多くは面外分布荷重下の崩壊挙動を議論しているものがほとんどであり、大型の船舶の強度部材であれば必ず想定する、二軸方向の面内圧縮荷重やこれらと面外荷重が同時に作用する場合など、複雑な荷重状態を考慮していない。したがって、既存の防撓パネルに代わり鋼製サンドイッチパネルを一般商船の強度部材に広く使用するためには、組み合わせ荷重下の崩壊挙動を明らかにしておく必要がある。また、1つの荷重成分だけを考えた場合でも、様々な寸法のもとで強度検討を実施して影響を調査し、その結果に基づき、設計時に強度推定を可能にする簡易的な算式の開発をすることも重要と言える。

2. 研究の目的

はじめに、鋼製サンドイッチパネルが二軸方向の面内圧縮荷重と面外分布荷重を同時に受ける場合や、それぞれを単独に受ける場合を対象として、FEMによる弾塑性大たわみ解析 (FEA) を実施する。サンドイッチパネルのコア材として、コルゲートコアとウェブコアの2種類を考える。また比較対象として、同程度の曲げ剛性を有する既存の防撓パネルの解析も実施する。これらの解析を通して、

鋼製サンドイッチパネルの座屈・崩壊挙動の特徴を明らかにする。この場合、パネルの寸法を代表的な1種類にしぼり、基本的な崩壊挙動に把握に努める。

さらに、パネル寸法が崩壊挙動に及ぼす影響を明確にする目的で、パネルが長さ方向または幅方向に面内圧縮荷重を受ける場合を想定して、FEMによる弾性座屈固有値解析と弾塑性大たわみ解析を実施する。解析では、コアパネルやスキンパネルの板厚、およびパネルの長さを変化させ、これらが弾性座屈強度や圧縮崩壊挙動に及ぼす影響も考察する。また、面外分布荷重を単独に受ける場合についても、上記の板厚等が崩壊挙動に与える影響を調べる。

最後に、先の各荷重を単独に受ける場合の崩壊挙動の考察に基づき、鋼製サンドイッチパネルの最終強度を推定する簡易手法を提案して、FEA結果との比較を通してその妥当性を検証する。

3. 研究の方法

本研究では、図1のCCSパネルとWCSパネルを対象として、FEMによる崩壊解析 (FEA) を実施する。また、比較対象のため既存の防撓パネルも対象とする。

(1) 二軸圧縮と面外分布荷重を受ける場合の崩壊挙動解析

ここでは、それぞれのパネルで単位幅当たりの断面2次モーメントがほぼ同じになるような1種類の寸法を採用している。また、サンドイッチパネルのコア間のスキンパネルの細長比と、防撓パネルの防撓材間のパネル細長比をほぼ同じとなるように設定して、パネルの座屈発生やすさを同程度とした。

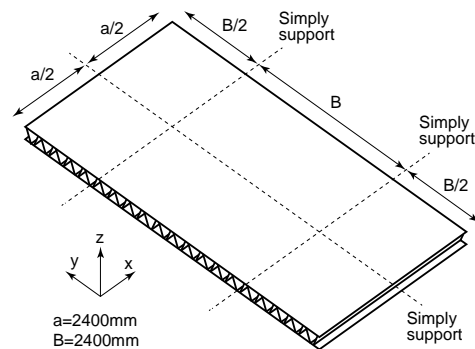


図2 二軸圧縮と面外分布荷重を受けるサンドイッチパネルの解析範囲

図2にサンドイッチパネルの解析範囲を示す。図中の破線の位置にパネルを支持する部材が配置されると仮定し、この線上でz方向の変位(たわみ)を拘束する。境界条件として、解析範囲の長辺上には対称条件を課す。一方、短辺上には周期条件を課す。

荷重として、面外等分布荷重と二軸方向の面内圧縮荷重を考える。面外荷重はボトムス

キンパネルに作用させる。一方、面内圧縮荷重は荷重辺上の上下スキンパネルとコアパネルに負荷する。面外荷重と面内圧縮荷重の両者を考える場合には、はじめに面外荷重を所定の値まで負荷した後、面内荷重を負荷する。また、二軸圧縮では応力比を一定に保持して解析を行う。

(2) 一軸面内圧縮荷重を受ける場合の崩壊挙動の解明と簡易強度推定式の導出

CCSパネル、WCSパネルとも、スキンパネルとコアパネルの板厚を変化させて解析を実施した。また、トランス材間隔 a (図2参照)も変化させ影響を調査した。

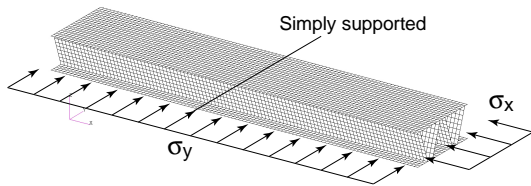


図3 一軸面内圧縮荷重を受けるサンドイッチパネルの解析範囲

図3にCCSパネルの解析モデルを示す。数多く解析を実施することを考慮して、図2に比べて解析範囲を縮小している。モデルの長さ方向端部断面には対称条件を課し、幅方向端部には周期連続条件を与える。WCSパネルも同様の解析範囲と境界条件を考える。このモデルに長さ方向および幅方向に一樣な強制面内圧縮変位を加え、FEMによる弾性座屈固有値解析と弾塑性崩壊解析を実施する。

以上の解析から得られた結果を参考にして、一軸面内圧縮荷重を受けるサンドイッチパネルの最終強度を推定できる簡易算式を導出する。さらに、崩壊解析結果と比較を通してこの算式の妥当性を検証する。

(3) 面外分布荷重を受けるサンドイッチパネルの崩壊挙動の解明と簡易強度推定法の導出

ここでは、WCSパネルのみを対象に面外分布荷重に対する崩壊解析を実施する。先の一軸面内圧縮の場合と同様に、スキンパネル板厚、コアパネル板厚ならびに、支持部材間隔(図2の a と B)を変化させ、これらの崩壊挙動に及ぼす影響を考察する。さらに、後述のように面外荷重がトランス材支持線直下のコアパネルを局部崩壊させる場合があることから、支持線の幅(サポートライン幅)を変化させて局部崩壊に与える影響も調べる。解析には図2に示す範囲を持つモデルを用い、境界条件は(1)に述べた通りとする。

さらに、簡易的に崩壊強度を推定する方法を提案し、崩壊結果との比較を通して推定手法の妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) 二軸圧縮と面外分布荷重を受ける場合の崩壊挙動

面外分布荷重のみを受ける場合、CCS、WCSパネルとも、長さ方向支持線直下のコアパネル近傍で段差変形を生じながらボトムパネル全体が横圧方向に変位する。一方、トップパネル上の支持線が変形を拘束するため、支持線直下のトップパネルならびにコアパネルに局部変形が生じる。そしてコアパネルが潰れて荷重を支えられなくなると、パネル全体が崩壊する。図4に分布荷重の大きさと支持材間パネルの中央点のたわみとの関係を示す。いずれのサンドイッチパネルでもその崩壊荷重は防撓パネルに比べて小さい。これは、防撓パネルがパネル全体で面外荷重を支えているのに対して、サンドイッチパネルでは支持線下のコアパネルのみが荷重を支えており、この部分が潰れやすいことが原因と考えられる。

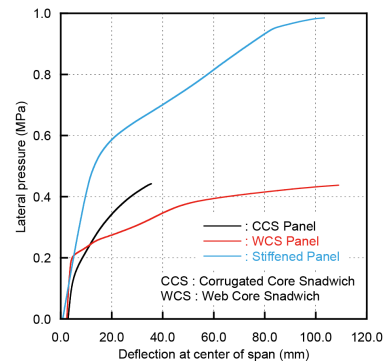


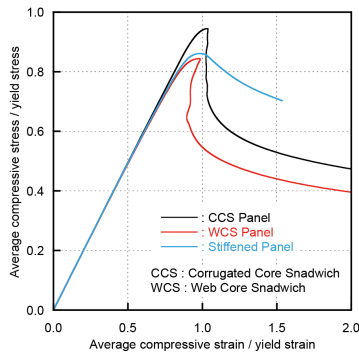
図4 面外分布荷重とたわみの関係

長さ方向に面内圧縮荷重を受けるサンドイッチパネルでは、ある断面の全体にわたって、スキンパネルとコアパネルとが連成した局部座屈が発生し、これによって最終強度を迎える。図5(a)に平均圧縮応力-平均圧縮ひずみ関係を示す。座屈変形が長さ方向には局所的にしか広がらないため、最終強度後の耐力低下が著しい。最終強度はCCSパネルが最も大きくなり、WCSパネルと防撓パネルではほぼ同じ最終強度が得られた。

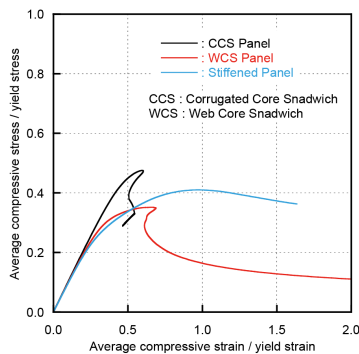
幅方向圧縮を受けるサンドイッチパネルでは、コア間のボトムパネルが無制限を持った板となるため、圧縮荷重が小さな段階で座屈が発生する。その後、トップパネル自体が最終強度を迎えるとパネル全体も最終強度に達し、ある一部分のみに変形が集中していく。図5(b)に平均圧縮応力-平均圧縮ひずみ関係を示すが、幅方向圧縮でも長さ方向圧縮と同様にCCSパネルの最終強度が最も高くなり、WCSパネルが最も低いという結果となった。

面外分布荷重を受けるサンドイッチパネルでは、面外荷重がトップパネルやコアパネルの局部変形を生じさせる。これらの変形が面内圧縮荷重下で崩壊の原因となる局部変形の起点となりやすい。このため、サンドイッチパネルでは面外荷重の上昇による最終

強度の低下が防撓パネルに比べて大きい。



(a) 長さ方向圧縮



(b) 幅方向圧縮

図5 平均圧縮応力-平均圧縮ひずみ関係

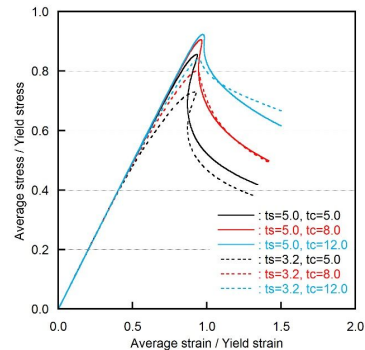
二軸面内圧縮荷重を受ける場合、コア間のボトムパネルでは、その幅方向座屈強度に長さ方向の応力はほとんど影響しない。また、幅方向の座屈強度が低いこともあり、サンドイッチパネルでは、長さ方向圧縮が主体的な場合を除き、最終強度時の幅方向応力はほぼ一定値を保つ。したがって、サンドイッチパネルの二軸強度相関曲線は角張った形状となる。これに対して、防撓パネルでは丸まった相関曲線となる。また、これらの傾向は面外荷重が作用しても変わらない。

(2) 一軸面内圧縮荷重を受ける場合の崩壊挙動の解明と簡易強度推定式の導出

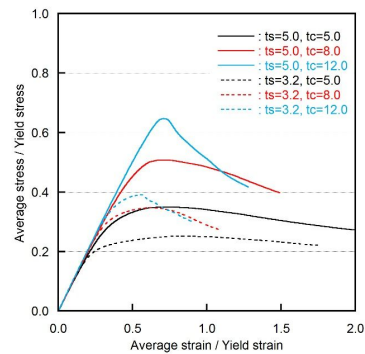
はじめに弾性座屈固有値解析結果について考察すると、スキンパネルの板厚増加によって座屈応力が上昇しているだけでなく、コアパネルの板厚増加も座屈応力の上昇に大きく寄与している。これは、コアパネル曲げ剛性がスキンパネルの変形の成長を妨げているためであり、特にスキンパネルが厚板の場合に顕著となる。

図6に弾塑性崩壊解析より得られたWCSパネルの平均圧縮応力-平均圧縮ひずみ関係を示す。長さ方向圧縮を受けるサンドイッチパネルでは全体座屈が発生して最終強度に達する。この場合、最終強度後の耐力低下は著しい。一方、幅方向の圧縮では幅方向全体に変形が広がるため、耐力の低下は緩やかとなる。ただし図5(b)に示したように多数のコア

パネルを含む領域を考えた場合には、座屈変形が局所化するために耐力の低下は急激になる。



(a) 長さ方向圧縮



(b) 幅方向圧縮

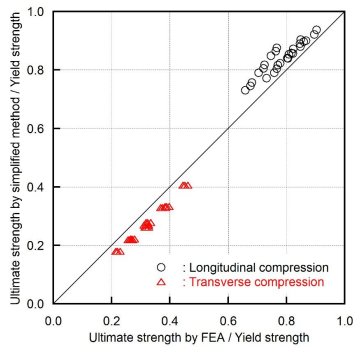
図6 WCSパネルの平均圧縮応力-平均圧縮ひずみ関係

弾性座屈応力の場合と同様に、長さ方向、幅方向の圧縮とも、スキンパネルとコアパネルの板厚の増加によって最終強度が上昇しているのが分かる。特にWCSパネルの幅方向圧縮でこれらの効果が著しい。

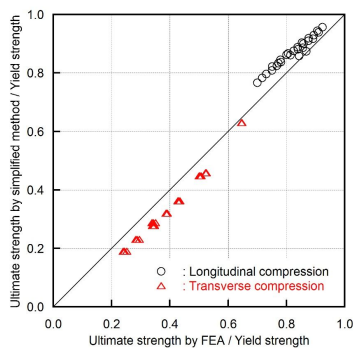
単位幅あたりの断面積と断面2次モーメントがほぼ等しいパネルを比較すると、長さ方向圧縮の場合、防撓パネル、CCSパネル、WCSパネルの順に最終強度が高くなるが、ほぼ同程度の最終強度となる。また、スパン長が長くなると最終強度が低下する。幅方向圧縮の場合でも、の順に最終強度が高くなっているが、WCSパネルの最終強度が著しく高い。また幅方向圧縮では、サンドイッチパネルではスパン長が長くなっても最終強度の低下はほとんど見られない。近年の船体構造では、幅方向にも大きな荷重が作用するようになってきており、この点でサンドイッチパネルでは大きなメリットを持つと言える。

サンドイッチパネルの最終強度を推定する簡易算式を導出し、その妥当性を検証する。長さ方向圧縮に対しては、パネルを1本の梁・柱にモデル化し、その梁・柱の初期降伏強度を最終強度とする手法を採用する。梁・柱へのモデル化に際して、局部座屈による面内剛性の低下の影響を有効断面積の減少で考慮する。有効断面の計算にはスキンパネル

の有効幅とコアパネルの有効高さをを用いる。一方幅方向圧縮の場合，コアパネルで支持されたスキンパネルは，アスペクト比 10 を超える長方形板となるため，幅方向の圧縮を受けるスキンパネルは，長辺支持・短辺自由の板とみなすことができる。過去の研究で，このような板の最終強度を推定する算式を開発しており，これを修正して幅方向の最終強度を推定する。



(a) CCSパネル



(b) WCSパネル

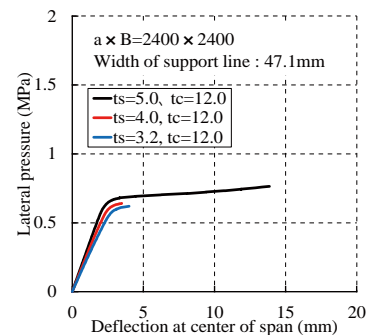
図7 最終強度推定値とFEA結果との比較

図7に，提案算式による最終強度の推定値とFEAにより得られた最終強度とを比較する。CCS，WCSパネルとも，長さ方向圧縮では過大な推定を，幅方向圧縮では過小な推定をしている。中でも，長さ方向圧縮を受けるCCSパネルで，コアパネルの板厚が比較的薄い場合に危険側の推定をしている。この場合，スキンパネルが最終強度に達する前に，コアパネルが最終強度に達している可能性があり，これを考えていない提案手法で過大な推定となったと考えられる。このような問題はあつたものの，推定値とFEA結果はほぼ直線上に分布していることから，提案手法の有用性は十分に確認できる。

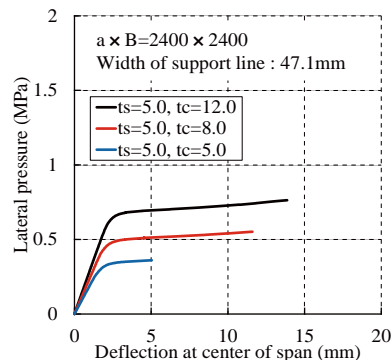
(3) 面外分布荷重を受けるサンドイッチパネルの崩壊挙動の解明と簡易強度推定法の導出

図8に解析によって得られたパネル中央のたわみと面外荷重の関係を示す。スキンパネルの板厚が変化しても崩壊強度に大きな違いが見られないが，コアパネルの板厚増加と

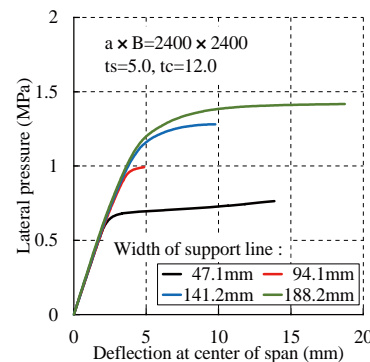
ともに崩壊強度も明らかに増加している。崩壊時には，コアパネルの上部が支持部材のサポートライン幅分だけ局部的に潰れており，このため，コアパネル板厚の影響が大きくなったと考えられる。局所的な潰れを緩和する目的で，サポートラインの幅を2要素分(47.1mm)~8要素分(188.2mm)の範囲で変化させて解析を実施した。この場合の荷重-変位関係を図8(c)に示す。サポートライン幅を広げることで局所的な潰れが緩和され，崩壊強度が上昇することが分かる。支持部材間隔を変化させた場合，長さ方向の間隔 a が長くなるに従い崩壊強度が低下するが，幅方向の間隔 B は崩壊挙動にほとんど影響を与えない。



(a) スキンパネル板厚の影響



(b) コアパネル幅の影響



(c) サポートライン幅の影響

図8 面外分布荷重とたわみの関係

本研究では，等分布荷重を受ける両端固定のI型断面梁を考え，この梁の崩壊挙動がWCSパネルのそれと等価になると仮定して強度推定を行う。梁の強度として，梁理論に基づく固定端でのスキンパネルの初期降伏強度(1Y)と，固定端でのせん断力によって

コアパネル全域が降伏するせん断降伏強度 (SY) を考える。さらに、サポートライン下部での局部的な潰れによる強度を推定するため、この部分だけを取り出した局所モデルを対象にしたFEAを実施し、これから得られる局部強度 (LS) も考える。これら 3 つの強度の最小値を崩壊強度推定値とする。

強度推定値とFEA結果の比較をすると、サポートライン幅が 47.1mm の場合では、局部強度 (LS) が最も小さな強度となり、ほぼFEA結果と一致する。一方、サポートライン幅が大きくなると、多くの場合で梁の初期降伏強度 (IY) が最小の強度を与えているが、FEA結果に比べてかなり低めの強度を推定する例も見られた。これは、スキンパネルが降伏した後も、コアパネルにある程度の降伏が広がるまでは崩壊に至らないためであり、この現象の考慮は今後の課題としたい。

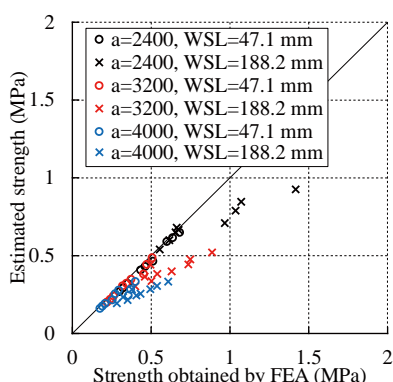


図9 崩壊強度推定結果とFEA結果の比較

全ての解析モデルに対する崩壊強度推定値 (3 つの最小値) とFEA結果を比較したものを図9に示す。過小評価が見られるものの、安全側の強度推定が行われていることが分かる。今後は、推定精度の向上を図るとともに、FEAを使うことなく局部強度を求める算式の開発を試みる。

<引用文献>

M. C. Xu, D. Yanagihara, M. Fujikubo and C. G. Soares, Influence of boundary conditions on the collapse behaviour of stiffened panels under combined loads, Marine Structures, Vol.34, pp.205-225, 2013.

M. Fujikubo, T. Yao, M. R. Khedmati, M. Harada, D. Yanagihara, Estimation of ultimate strength of continuous stiffened panel under combined transverse thrust and lateral pressure Part 1: Continuous plate, Marine Structures, Vol.18, pp.383-410, 2005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計5件)

Daisuke Yanagihara, Elastic Buckling and Ultimate Strength of Steel Sandwich Panels Subjected to Longitudinal or Transverse Compression, The 26th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2016年6月27日, ロドス(ギリシャ共和国)

脇本瑞己, 柳原大輔, 面内分布荷重を受ける鋼製サンドイッチパネルの崩壊挙動に関する研究, 日本機械学会中四国学生会第46回学生員卒業研究発表講演会, 2016年3月8日, 愛媛大学工学部(愛媛県・松山市)

柳原大輔, コルゲートコアまたはウェブコアを持つ鋼製サンドイッチパネルの面内圧縮崩壊挙動, 日本船舶海洋工学会平成27年秋季講演会, 2015年11月17日, 東京大学生産技術研究所(東京都・目黒区)

Daisuke Yanagihara, Buckling/Plastic Collapse Behavior of Steel Sandwich Panel under In-plane Compression and Lateral Pressure, 28th Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, 2014年10月15日, イスタンブール(トルコ共和国)

柳原大輔, 二軸圧縮と横圧を受ける鋼製サンドイッチパネルの座屈・塑性崩壊挙動, 日本船舶海洋工学会平成26年春季講演会, 2014年5月27日, 仙台国際センター(宮城県・仙台市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

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