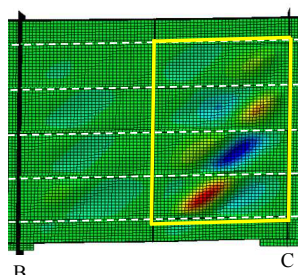


せん断と圧縮荷重を受ける

防撓パネルの座屈最終強度評価法の開発

Development of Buckling Ultimate Strength Assessment
of Stiffened Panel under Shear and Thrust

ジャパン マリンユナイテッド(株) 技術研究所 構造研究 G

小河 寛明 OGAWA Hiroaki

平川 真一 HIRAKAWA Shinichi

大阪大学大学院 工学研究科

藤久保 昌彦 FUJIKUBO Masahiko

辰巳 晃 TATSUMI Akira

海上・港湾・航空技術研究所

高見 朋希 TAKAMI Tomoki

田中 義照 TANAKA Yoshiteru

安藤 孝弘 ANDO Takahiro

概 要

座屈最終強度を精度良く推定する技術は、船体設計において非常に重要な項目となっている。特に、大きなせん断荷重を受ける原油タンカーの縦隔壁に対しては、せん断座屈に対する評価が重要となる。当社は、規則算式による評価だけでなく、変形状や崩壊挙動も含めたより詳細なせん断座屈強度検討を行うことを目的として、今まで十分に確立されていなかった FEM によるせん断座屈評価法を開発した。さらに、せん断座屈試験を実施し、提案手法による推定結果と比較検証することで、提案手法で精度良く座屈最終強度を推定できることを確認した。

Summary

It is important to estimate buckling ultimate strength of a ship accurately in design. Especially, longitudinal bulkheads of a crude oil carrier are mainly subjected to shear force, so the evaluation of shear buckling strength is essential for this part. In order to analyze the detail of shear buckling strength considering the buckling deformation and collapse behavior in addition to rule calculation, we developed the evaluation method of shear buckling strength by FEM that has not been well established. Moreover, it is confirmed that the buckling ultimate strength is accurately estimated by the proposed method through the comparison with the shear buckling test.

1. 緒 言

船体は板に骨部材（防撓材）を組み合わせた防撓パネル構造として、縦曲げによる引張/圧縮荷重や水圧荷重を受け持っている。板に圧縮荷重が作用するとき、ある一定限度を超えると急に横たわみが生じて強度が低下する現象、いわゆる座屈が生じる可能性がある。

座屈が連続して生じると、船体の最終強度が急激に低下するため、座屈強度を精度良く推定して強度評価する技術は、船体設計において非常に重要な項目の一つである。圧縮荷重を受ける防撓パネルの座屈強度については、研究例¹⁾が数多く存在し、信頼性の高い評価技術が確立されている。

一方、原油タンカーのカーゴタンクに設けられる縦

隔壁（左舷/中央/右舷区画を分けるための船長方向の隔壁）もまた防撓パネルであるが、船体の縦曲げによる圧縮荷重だけでなく、隔倉積等のカーゴ積載（図1）によって比較的大きなせん断荷重が作用する（図2）。そのため、圧縮座屈だけでなく、せん断荷重による座屈（せん断座屈、図3）に対する評価も必要となる。当社では、規則算式に基づいてせん断座屈評価を行っているが、変形状や崩壊挙動をより詳細に把握するには、FEMを用いたシミュレーションを行う必要がある。しかしながら、FEMを用いた防撓パネルのせん断座屈評価に関する研究例は少なく、その評価技術が確立しているとは言えない。

そこで、当社、大阪大学、海上技術安全研究所の3者で共同研究を行い、合理的かつ実用的なFEMによる防撓パネルのせん断座屈評価法を提案した^{2,3)}（以下、提案手法）。さらに、船体を模擬した構造試験体のせん断座屈試験を行い、提案手法の妥当性を検証した^{4,5)}。本稿では、提案手法の概要を紹介するとともに、せん断座屈試験との比較により、その有効性を示す。

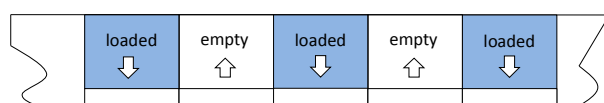


図1 隔倉積の例

Fig.1 Example of alternative loading condition

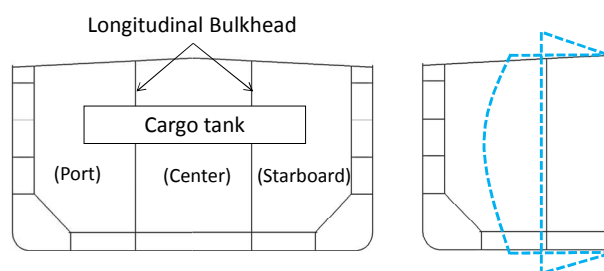


図2 船体横断面とせん断応力分布図

Fig.2 Section and shear stress distribution



図3 せん断座屈の例

Fig.3 Example of shear buckling

2. せん断座屈評価法

本章では、提案手法の概要について紹介する。

一般的に構造設計における座屈評価は、図4のabcdで示すような防撓材とトランスフレームで囲まれた1パネル（以下、座屈パネル）を対象として行う。この座屈パネルの強度をFEMで解析する際は、実現象が再現できるように、モデル化範囲の選択および荷重/境界条件の設定を行う必要がある。防撓パネルに座屈が生じる際は、図4に示すように隣接パネルに連続した変形となるため、隣接パネルの影響を考慮した評価を行う必要がある。また、図5に示すような圧縮とせん断荷重による複合的な変形や、座屈によって非一様となる荷重分布や曲線状となる面内変形も考慮する必要がある。そこで、提案手法では圧縮座屈評価の手法⁶⁾をベースに、以下に示すモデル化範囲と荷重/境界条件を設定することにより、せん断の影響についても適切に考慮できるようにした。

- (1) 図6のABCDで示すような1+1トランスフレームと1+1ロンジスチフナスペースをモデル化範囲とする。これは連続する座屈波形の影響を考慮できる最低限の範囲となる。FEMモデルの例を図7に示す。
- (2) モデル境界辺には、座屈変形がモデル対辺で等しいとする境界条件（周期条件）を課すことで、モデル境界での変形の連続性を考慮する（図6）。
- (3) 図8に示すように面内変形状態を4つのモード（縦圧縮変形、横圧縮変形、せん断変形、周期条件下の面内変形）に分けて、各モードの重ね合わせで、変形を再現する（図9）。圧縮およびせん断変形は、代表変位 U_D 、 V_A 、 U_A に基づく一様変位で与えており、その条件下で座屈に伴う荷重変化を考慮する。また、周期条件下で曲線状となる変形を考慮する。

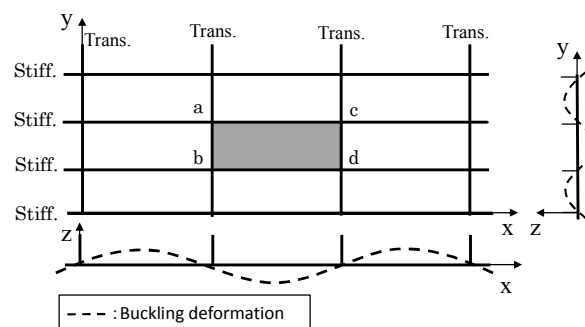


図4 座屈パネルと防撓パネル間の座屈変形

Fig.4 Buckling panel and buckling deformation between stiffened panels

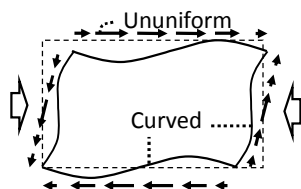


図5 せん断と圧縮荷重下の座屈パネルの変形状態

Fig.5 Deformation of buckling panel under shear and thrust

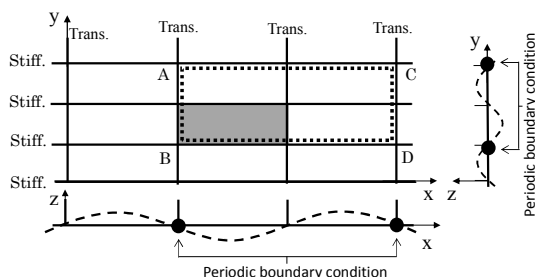


図6 FEMモデル化範囲と境界条件

Fig.6 Region of FEM model and boundary condition

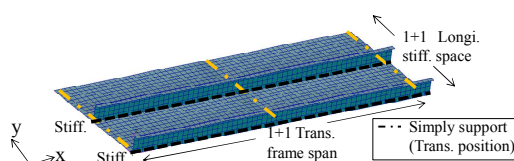
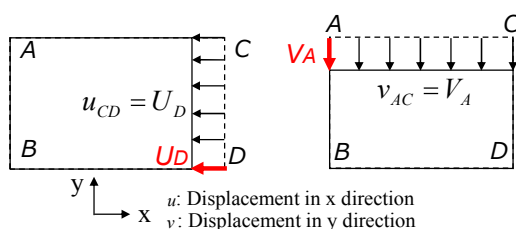


図7 提案手法のFEMモデル

Fig.7 FEM model of proposed method



(a) 縦圧縮変形

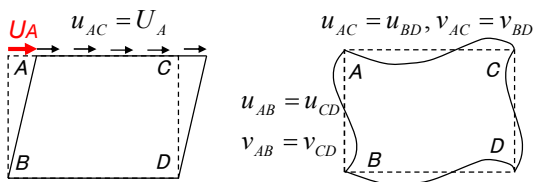
(b) 横圧縮変形

(a) Longitudinal

(b) Transverse

compressive deformation

compressive deformation



(c) せん断変形

(d) 周期条件下の変形

(c) shear deformation

(d) Periodic boundary deformation

図8 面内変形の各モード

Fig.8 Component modes of in-plane deformation

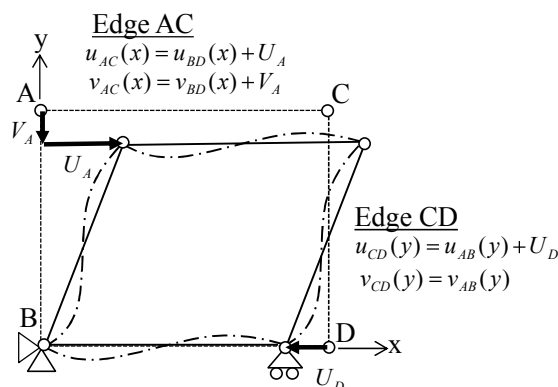


図9 面内変形の境界条件

Fig.9 In-plane boundary condition

3. せん断座屈試験との比較

3.1 概要

本来、提案手法の妥当性は、実構造レベルの連続防撓パネルでの座屈・最終強度試験との比較によって論じられるべきであるが、その規模の試験は現実的には実施できない。そこで、以下の手順で検証を行った。図10に示すように、まず、船体の防撓パネル構造を部分的に模擬した試験体でせん断座屈試験を行った。次に、試験状態のFEM解析（以下、試験FEM）を行い、再現性を確認した上で、座屈パネルの最終強度を抽出した。最後に、試験FEMで得られた座屈パネルの最終強度と、提案手法で得られた最終強度を比較することにより、提案手法の妥当性を検証した。

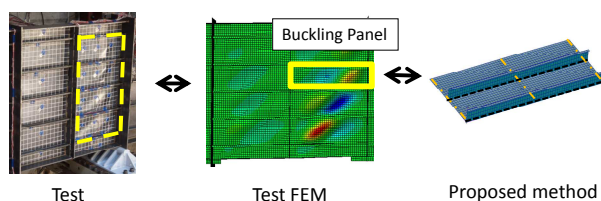


図10 検証フロー

Fig.10 Flow of validation

3.2 試験方法

せん断座屈試験の実施要領を図11に示す。I型断面のウェブに防撓材を取り付けて防撓パネルとし、鈴木らの方法⁷⁾を参考に、曲げせん断荷重を載荷した。A,C点を支持し、B点に1.5Q、D点に0.5Qの引張荷重を載荷することで、評価対象範囲（BC間）に最大せん断荷重（1.0Q）を載荷した。同時にE点には圧縮荷重を載荷し、せん断変形を許容するために、F点には回転治具を取り付けた。また、A～Dの面外変

形を支持した。荷重は単調増加させながら载荷した。

図 12(a), (b)にそれぞれ試験体の断面図と側面図を示す。FEM 解析による事前検討を行い、試験機容量内で、評価対象範囲である試験体中央部 (BC 間) で確実に座屈が生じるよう、試験体寸法を決定した。評価対象範囲である試験体中央部の板厚は 3.2mm (最薄)、防撓材間隔は 300mm である。

本試験は、海上技術安全研究所の複合荷重試験装置を用いて実施した。試験実施状況を図 13 に示す。

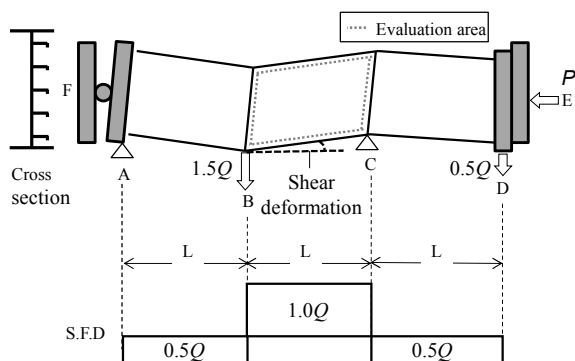
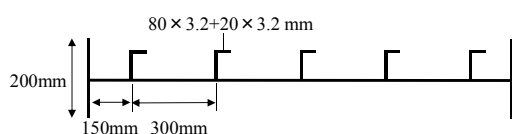


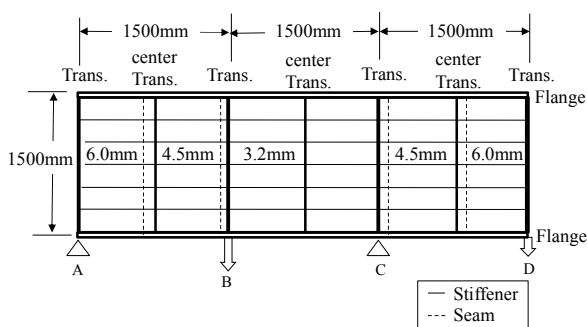
図 11 せん断座屈試験の実施要領

Fig.11 Method of shear buckling test



(a) 断面図

(a) Cross section



(b) 側面図

(b) Profile

図 12 試験体の寸法
Fig.12 Plan of specimen

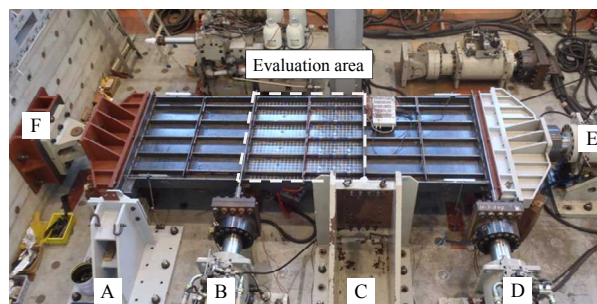


図 13 試験実施状況

Fig.13 Test condition

試験 FEM のモデルを図 14 に示す。シェル要素を使用し、防撓材間を 15 分割、防撓材ウェブを 4 分割した。境界条件と荷重条件を図 15 に示す。A 点、C 点の y 方向変位を支持し、トランス位置の z 方向変位を支持した。また、圧縮荷重に対する支持点となる F 側は中心点の x 方向変位を支持し、試験体両端 (D、F 側) を直線保持したまま z 軸回りに回転するよう多点拘束を課した。解析には、汎用解析ソルバ ABAQUS を用いた。

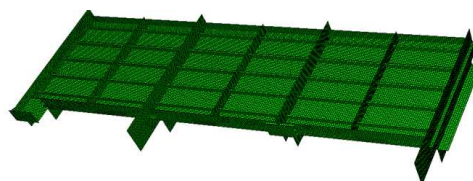


図 14 試験体の FEM モデル

Fig.14 FEM model of specimen

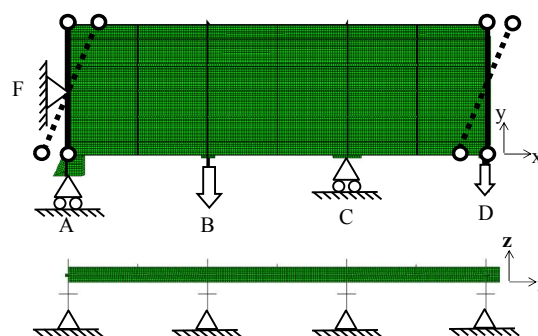


図 15 試験 FEM の境界条件

Fig.15 Boundary condition of Test FEM

3.3 試験結果 及び 試験 FEM との比較

本試験では、せん断と圧縮の荷重比を変えて複数の試験を実施したが、本稿では特にせん断が支配的な条件での試験結果について述べる。

評価範囲のせん断荷重とせん断変形の関係を、試験 FEM の解析結果とともに図 16 に示す。せん断変形

は C 点に対する B 点の相対変位量とし、せん断荷重は B 点と D 点の載荷荷重から算出した。

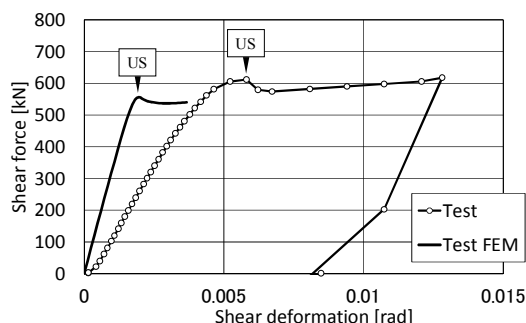
試験体は、評価対象範囲にせん断座屈が生じて崩壊した。最終強度は、図 16 に示すように約 610 kN である。図中に示した試験 FEM の結果と比較すると、最終強度については概ね良い一致を示していることが分かる。

一方、変形量については、試験 FEM よりも試験の方が大きい。これは、計測変位は、試験体のみならず載荷治具のボルト等の変形も含んでしまったためと考えられる。そこで、弾性範囲でのせん断ひずみ分布について、試験と試験 FEM の比較を行った (図 17)。

両者は良く一致しており、試験体自体の変形については両方で差がないことを確認した。

次に、最終強度到達時の座屈変形を図 18 に示す。試験と試験 FEM とともに、支持点の圧縮荷重が重畳する C 点付近から最初に座屈変形が生じ、試験体幅方向に座屈変形が広がっていき、崩壊に至った。図 18 より、試験と試験 FEM で、変形状態も良い一致を示していることがわかる。

以上のことから、試験 FEM で試験を再現できていることが確認できた。



(US : Ultimate strength)

図 16 評価範囲のせん断荷重～せん断変形の関係

Fig.16 Relationship between shear force and shear deformation in evaluation area

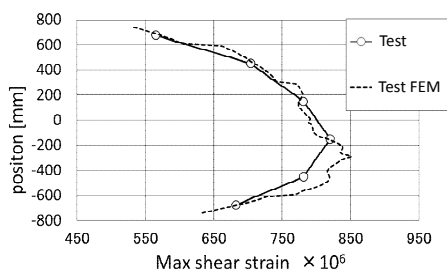


図 17 弾性範囲のせん断ひずみ分布

Fig.17 Shear strain distribution in elastic range

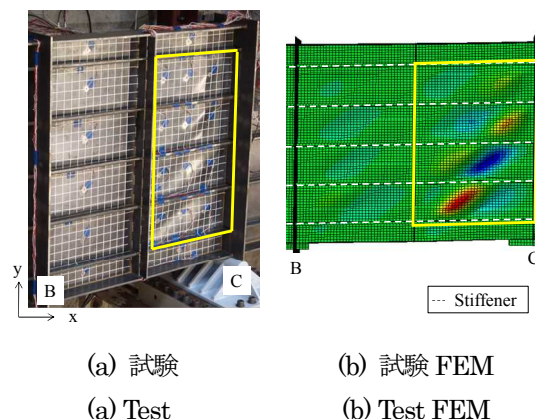


図 18 最終強度時のせん断座屈変形

Fig.18 Shear buckling deformation at ultimate strength

3.4 提案手法の検証

提案手法の最終強度と、試験 FEM の座屈パネルの最終強度を比較することで、提案手法の妥当性を検証した。図 19 に比較対象とした座屈パネルを示す。このパネルは試験体の中央部に位置するため、支持点付近の局所的な応力集中の影響が小さい箇所である。試験 FEM において、対象の座屈パネルに生じた平均せん断応力と平均せん断ひずみの関係を図 20 に示す。その最終強度は 0.94 (せん断降伏応力に対するせん断応力の比) であった。提案手法で得られた平均せん断応力と平均せん断ひずみの関係 (図 20) と比較すると、提案手法の最終強度は 0.95 であり、試験 FEM の結果と良い一致を示していることが分かる。

さらに、圧縮とせん断の複合荷重下における最終強度を比較検証するため、試験 FEM の圧縮荷重とせん断荷重の比率を変えて解析を実施し、座屈パネルの最終強度を提案手法と比較した。各ケースの試験 FEM と提案手法の最終強度を図 21 に示す。圧縮とせん断の複合荷重下においても、提案手法で精度よく最終強度を推定できることが分かる。

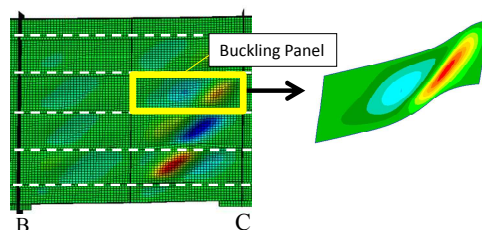


図 19 比較対象の座屈パネル

Fig.19 Buckling panel for comparison

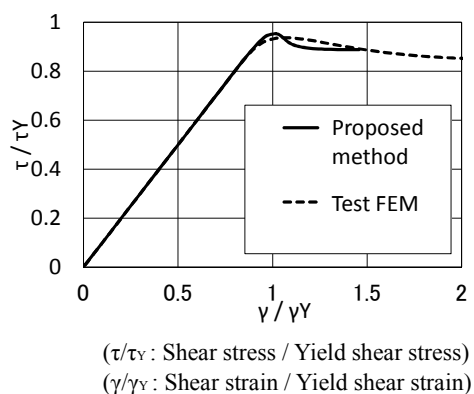


図 20 対象の座屈パネルのせん断応力～ひずみ関係
Fig.20 Relationship between shear stress and strain of target buckling panel

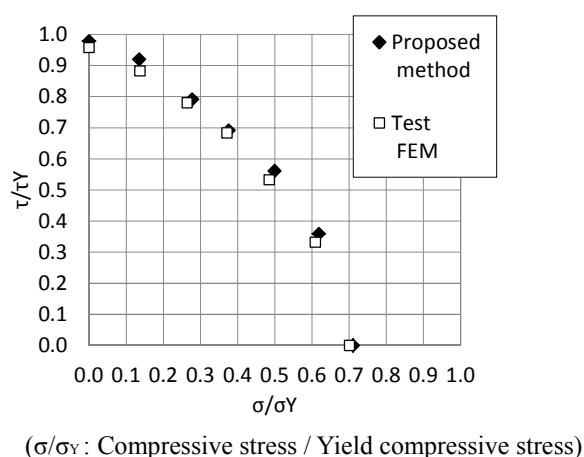


図 21 せん断と圧縮荷重下の最終強度
Fig.21 Ultimate strength under combined shear and thrust

4. 結言

せん断荷重を受ける縦隔壁の座屈評価技術の構築を目的として、FEM による防撓パネルのせん断座屈評価法を提案した。

周期条件で連続する座屈変形の影響を考慮するとともに、変形モードを重ね合わせた境界条件を適用することで、圧縮とせん断荷重下の解析を可能とした。

さらに、防撓パネルのせん断座屈試験と試験を模擬した FEM 解析の結果をもとに、提案手法の有効性を比較検証し、防撓パネルの座屈最終強度を精度よく推定できることを確認した。

参考文献

- 1) 矢尾哲也、藤久保昌彦、柳原大輔、大野禎久：防撓パネルの圧壊挙動に関する研究（第 1 報）、日本造船学会論文集、第 178 号、pp451-462、(1995)
- 2) 宇田翔吾、藤久保昌彦、辰巳晃、飯島一博、小河寛明、高見朋希：面内剪断および面内圧縮を受ける連続防撓パネルの座屈・塑性崩壊解析のための有限要素モデル化法に関する研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 17 号、pp435-436、(2013)
- 3) Fujikubo M., Tatsumi A., Iijima K., Ogawa H., Takami T. : Boundary Condition for Buckling/Plastic Collapse Analysis of Continuous Stiffened Panel under Combined Thrust and Inplane Shear, ICTWS 2014 -1003, Busan, Korea, (2014)
- 4) 小河寛明、高見朋希、藤久保昌彦、田中義照、安藤孝弘、平川真一、宮田知明、宇田翔吾：せん断及び圧縮荷重を受ける連続防撓パネルの最終強度評価法に関する研究 —防撓パネルのせん断座屈崩壊試験—、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 18 号、pp467-470、(2014)
- 5) 小河寛明、高見朋希、藤久保昌彦、田中義照、安藤孝弘、平川真一、宮田知明、辰巳晃：せん断及び圧縮荷重を受ける連続防撓パネルの最終強度評価法に関する研究(第 2 報) —せん断座屈崩壊挙動の解明と最終強度評価法—、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 19 号、pp471-474、(2014)
- 6) Yao T., Fujikubo M., Yanagihara D. : On Loading and Boundary Conditions for Buckling/Plastic Collapse Analysis of Continuous Stiffened Plate by FEM, TEAM98, Kanazawa, Japan, pp305-314, (1998)
- 7) 鈴木敏郎、五十嵐規矩夫、常木康弘：H 形鋼梁ウェブ要素の弾塑性せん断座屈挙動に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 556 号、pp151-158、(2002)



小河 寛明 平川 真一