面内せん断及び圧縮を受ける連続防撓パネルの 最終強度推定法に関する研究

高見 朋希*,小河 寛明**,辰巳 晃***,安藤 孝弘*, 田中 義照*,平川 真一**,藤久保 昌彦***

Study on Estimation Method of Ultimate Strength for Continuous Stiffened Panel under In-plane Shear and Thrust

by

Tomoki TAKAMI, Hiroaki OGAWA, Akira TATSUMI, Takahiro ANDO, Yoshiteru TANAKA, Shinichi HIRAKAWA, and Masahiko FUJIKUBO

Abstract

Upper part of a longitudinal bulkhead of a ship is frequently subjected to in-plane shear in addition to in-plane thrust. Despite the importance of buckling design on this part, the shear buckling collapse behavior of a longitudinal bulkhead that can be regarded as some continuous stiffened panels is not well known. This is mainly due to the difficulty of modelling method in Finite Element Analysis (FEA) considering variable shear stress distribution at the edge associating with buckling deformation. In this study, we proposed a buckling collapse test method using continuous stiffened panels under in-plane shear, and a series of buckling collapse tests under combined in-plane shear and thrust were performed to clarify their shear buckling collapse behaviors. Furthermore, we proposed FEA modelling method of them with clarifying physical meanings. The proposed method is validated by comparing ultimate strength with experimental results, full scale collapse analysis results using a bulkhead FE model and Harmonized Common Structural Rules (H-CSR) for the purpose of practical application.

* 構造安全評価系, ** ジャパン マリンユナイテッド(株), *** 大阪大学工学研究科

原稿受付 平成28年5月20日

審查日 平成28年6月22日

| 1. | まえがき ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 30 |
|----|---|----|
| 2. | 連続防撓パネル試験体の座屈崩壊試験 | 31 |
| | 2.1 試験方法及び試験条件 | 31 |
| | 2.2 初期不整の計測 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 32 |
| | 2.2.1 初期変形 | 32 |
| | 2.2.2 溶接残留応力 | 32 |
| | 2.3 試験結果及び考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 33 |
| | 2.3.1 検証のための FE 解析モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 33 |
| | 2.3.2 面内せん断荷重が支配的な場合 | 33 |
| | 2.3.3 面内せん断及び圧縮の複合荷重が作用する場合 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ | 34 |
| 3. | 最終強度評価法 | 35 |
| | 3.1 評価法概要 | 35 |
| | 3.2 座屈試験との比較検証 ······ | 35 |
| | 3.3 実船縦隔壁への適用性検証 | 36 |
| 4. | まとめ | 38 |
| 参 | ⇒⇒⇒→ 考文献 | 38 |
| | | |

記号

| Q: 面内せん断荷重 | [kN] |
|--------------------|-------|
| P: 面内圧縮荷重 | [kN] |
| $	heta_s$: せん断変形 | [rad] |
| σ_Y :降伏応力 | [MPa] |
| τ_Y : せん断降伏応力 | [MPa] |

1. まえがき

縦曲げ荷重を受ける船体の縦隔壁は上甲板や船底外板に比べて大きなせん断荷重を受け,特に縦隔壁の上下中 央部は圧縮荷重よりもせん断荷重が支配的となる.縦隔壁の部材寸法は構成されている連続防撓パネルの座屈・ 最終強度によって決定されることが多く,せん断荷重下での評価法の確立は構造設計上重要な項目となっている.

防撓パネルの座屈・最終強度評価法としては、有限要素法(Finite Element Method,以下 FEM)を用いた数値 解析が広く用いられている.これまでの防撓パネルの FE 解析法としては、Yao ら¹⁾の防撓パネルの周期性を考慮 した上での面内圧縮荷重下での FE 解析法に始まり、この手法を拡張した正岡ら²⁾による座屈変形の連続性を考慮 した FE 解析法が提案されている.しかしながら、実設計への適用には生じる荷重の物理的特性の解明と実現象 に即した境界条件の設定が必要である.

本研究では、面内せん断を受ける連続防撓パネルの座屈崩壊挙動を明らかにするために、海上技術安全研究所 の所有する複合荷重試験装置³⁾において連続防撓パネルの縮尺試験体を用いた座屈崩壊試験を実施した.また、 せん断と圧縮の荷重比を変えて複数の座屈試験を実施し、防撓パネルに連続的に生じる座屈崩壊挙動を確認する とともに、試験体の座屈・最終強度を抽出することができた.同時に、試験と同等の条件を課した FEM 解析に より試験の崩壊挙動を再現できることを確認した.

一方,最適なFE解析法の構築のため,過去の研究で著者らは防撓パネルのFE解析に適用される面内強制変位と,それを与えるに要する荷重の物理的意味を剛性方程式とエネルギー論により明らかにした⁴⁾.これに基づき,境界条件を明確にしたうえで,せん断及び圧縮荷重を受ける連続防撓パネルの合理的なFEMモデル化手法を提

案している⁵(以下,提案評価法).本研究では提案評価法の実船評価への適用性について検討するために,上述の座屈試験結果,及び実船隔壁モデルの崩壊解析結果との比較を実施した.せん断と圧縮荷重比を変更した数ケースの比較を行い,提案評価法により実船の防撓パネルの最終強度も精度良く推定できることを確認し,崩壊挙動を再現する適当な境界条件を提案した.

2. 連続防撓パネル試験体の座屈崩壊試験

大規模な防撓パネルの面内せん断荷重下での崩壊試験事例はほとんどなく、今回、実船縦隔壁を想定して面内 せん断及び圧縮の複合荷重を負荷する試験方案から検討を行った。崩壊試験により、防撓パネルのせん断座屈崩 壊挙動を明らかにするとともに、FEM 解析を用いた再現性についても検討した。本編ではこれら試験準備及び試 験結果について述べる.

2.1 試験方法

タンカーの縦通隔壁を想定し、防撓パネルの面内せん断による座屈崩壊試験方案を検討した. 試験体は、藤久 保らⁿの文献を参考とし、I型断面のウェブ部に防撓材を有する防撓パネルを対象とすることにした. 載荷方法は、 複合荷重試験装置(1,000kN型油圧ジャッキ4本)の使用を前提として、瀬戸ら⁸⁰の文献を参照した. すなわち、 図1に示すように、I型断面梁に曲げせん断を負荷することにより、中央部防撓パネルに対して面内せん断荷重 を負荷し、座屈崩壊させる方法とした. この試験方法では、梁中央の評価対象部に大きさ*Q*の面内せん断荷重, 大きさ*P*の面内圧縮荷重が作用することになる. 製作した座屈試験体の上面図及び諸寸法は図2に示す. 図2に 示すように、座屈評価対象部となる試験体中央スパンには SPHC3.2mm 鋼を使用し、その他のパネル部分は SS400 鋼として 4.5mm, 6.0mm と連続的に増厚することにより、評価対象部以外での応力集中による座屈崩壊を防ぐ構 造とした. 本研究では、面内せん断/圧縮の荷重比を変えるため、2体の試験体を製作し、表1に示す荷重比で載 荷して試験を実施した.

| | 面内せん断荷重 Q | 面内圧縮荷重 P |
|--------|-----------|----------|
| Test 1 | 1 | 0 |
| Test 2 | 1 | 0.5 |



表1 座屈発生部(evaluation area)に作用させる面内せん断/圧縮荷重比



2.2 初期不整の計測

2.2.1 初期変形

試験体の初期撓みは、海技研所有のレーザー変位計測装置を用いて計測した.初期撓みは試験体の中央スパン を裏面から治具との干渉のない図3に示す範囲内とし、50mm間隔で計測原点を撓みゼロとした相対変位の計測 を行った.案6試験体の初期撓み波形を図4に示す.後述するFE解析には、計測した初期撓みをFEモデルに反 映し、計測を行わない領域は線形補間をして初期撓みを与えた.



2.2.2 溶接残留応力

試験体のパネル表面に生じる溶接残留応力は、試験体に使用した SPHC3.2mm 鋼板を用いて座屈評価部と同一 断面を有する残留応力試験体(長さ750mm)を製作し、切出法による測定を行った.残留応力試験体の残留応力 計測結果を図5に示す.後述するFE解析による座屈試験の検証の際には,2.2.1の初期変形に加えて,パネル裏表における溶接残留応力の計測値を平均化して図5実線に示す値をFEモデルに与えた.



図5 パネルの溶接残留応力計測結果

2.3 試験結果及び考察

2.3.1 検証のための FE 解析モデル

試験体の座屈崩壊現象を検証するため,汎用 FEM 解析プログラム ABAQUS を用いた弾塑性大たわみ解析による座屈試験の再現を行った.FE モデル及び荷重・境界条件を図6に示す.試験体は1辺約20mmのシェル要素でモデル化し,防撓材間を15分割,防撓材ウェブを4分割した.要素数は45,540,節点数は45,510となった.試験体の荷重条件は試験状態に近づけるように,B点に1.5Q,D点に0.5Q,E点にPの荷重を負荷し,荷重比を保ちながら,弧長増分法によって荷重を増加させていった.図6に示す通り,面内せん断荷重のみ作用させる Testlにおいては,E辺のxy平面における回転が許されるが,Test2においては,圧縮荷重の負荷によりE辺の回転が拘束されるため,FE 解析の境界条件にこの影響を反映した.



図6 FE モデル外観及び荷重・境界条件

2.3.2 面内せん断荷重が支配的な場合

座屈試験 Testl について,座屈評価部における面内せん断荷重 Q とせん断変形 θ_s の関係を FE 解析結果と比較して図 7 に示す. せん断ひずみ θ_s は,図 1 中に示すように座屈評価部の傾きを示す.図 7 より,座屈試験における最大せん断荷重 Q_{max} は 612kN である. SPHC 鋼板の降伏応力は引張試験結果から σ_y =220MPa とし,パネル部断面積 (A_p =4800mm²) から最大せん断荷重時の中央部のせん断応力 τ とせん断降伏応力 τ_y との比は,

$$\tau / \tau_{Y} = \frac{Q_{\text{max}}}{A_{p}} / (\sigma_{Y} / \sqrt{3}) = 0.99$$
 (2.1)

となり、パネル部がほぼせん断降伏応力に達した時点で最終強度に至っていることがわかる. FEM の結果では弾 性範囲の荷重~変位関係の傾きが大きく異なっている. これは、アクチュエータとボルト締めしている定盤や試 験体の間で滑りが生じていたため、FEM 結果に比べて試験結果のストローク変位量が大きくなったことが原因と 考えらえる.一方でFEM 結果の最大せん断荷重は 556kN となり,試験結果と比較して差が生じている.これは FEM において荷重・境界条件の理想化に起因すると考えられる.主な要因として,図6中D点においてFEM で は端部の傾斜を許容している一方で,試験時はD点にはアクチュエータが取り付けられているため,厳密には試 験体D点のx軸方向変位が弾性拘束される境界条件となる事などが考えられる.この荷重・境界条件の相違によ る違いはあるが,その影響は10%程度にとどまっており,FEM により近しい最終強度が得られていると判断でき る.さらに,図8に示すように,最終強度時において実験,FEM 共にせん断座屈波形が座屈評価部に現れており, 防撓パネルのせん断座屈の再現に成功したといえる.

2.3.3 面内せん断及び圧縮の複合荷重が作用する場合

座屈試験 Test2 について, 座屈評価部における面内せん断荷重 Q とせん断変形 Q の関係を FE 解析結果と比較し て図9に示す. 図9より,座屈試験における最大せん断荷重 Omax は 670kN (Pmay=335kN) となる. これは断面の せん断降伏強度を超える値となっているが、圧縮端部でのモーメントの発生により、試験体中央部に作用してい るせん断力はこの値より少なくなっていると考えられる.また,FEM 結果には明確なピークが現れず,せん断荷 重が約 650kN の A 点で一時的なピークが現れ、再度荷重が増加している.これは、A 点において座屈評価部が崩 壊した後,試験体の厚板部に荷重再分配が発生したためである. FEM 結果はせん断/圧縮荷重比が逐次保たれて いるのに対し、実験時は図9に示すB点において座屈評価部において崩壊現象が発生したため、試験終了に向け て圧縮荷重を一定に保ってせん断荷重のみを負荷する試験方法に切り替えている.これにより,B点以降はせん 断/圧縮荷重比が保たれておらず、このことが試験体の崩壊後の挙動に差が生じた原因の一つとして考えられる. さらに、Test2のFE解析においては図6中E点において圧縮荷重の負荷による回転拘束の影響を考慮するため、 圧縮荷重載荷辺の傾きを完全拘束しており、この影響で評価部の座屈崩壊後に試験体フランジ部に圧縮荷重の再 分配が発生している、一方で試験時は圧縮荷重載荷辺の傾きは完全固定されずに弾性支持されるため、試験体フ ランジ部への荷重再分配が発生していない. この差異もまた Test2 と FE 解析において最終強度後の挙動が異なる 原因と考察される.一方,図10にはA点及びB点における両者の座屈変形の比較を示すが,Test2とFEM共に A 点, B 点において座屈評価部が崩壊しており, 座屈評価部のみに着目すれば, 複合荷重下においても座屈変形 を実験,FEMで再現できたことが確認できる.





図7 座屈評価部におけるせん断荷重~せん断変形の関係(Test1)



図9 座屈評価部におけるせん断荷重~せん断変形の関係(Test2)



図 10 座屈変形の比較(Test2)

3. 最終強度評価法

著者らは,FEM を用いた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を提案している^{4,5}. 本章では,提案評価法の概要及び提案評価法を用いた連続防撓パネルのFE モデル化について述べる.

3.1 評価法概要

提案評価法は Yao ら¹⁾の連続防撓パネルに対する面内圧縮座屈の評価法を拡張したものであり、以下の特徴を 有する.

- (1) 2トランススパン+2ロンジスパンをモデル化範囲とし、その境界辺に周期条件を課すことで、トランス/ ロンジ間に生じる座屈変形の連続性を考慮することができる.
- (2) 選択した FE モデルの境界に面内圧縮及びせん断荷重を想定した変形モードの拘束条件及び面内の周期対称条件(図11)を課すことで、せん断変形と圧縮変形を同時に考慮しながら、周期条件下で曲線形状となる境界辺の変形を考慮することができる(図12).結果、図12中のU₁、V₁、U₂の3パラメータのみを用いた変位制御によりせん断及び圧縮荷重下の座屈評価が可能となる.
- (3) 周辺の節点は周期対称条件のもとで任意に移動することができ、座屈変形に伴って生じる非一様な応力分 布も再現することができる.

なお、図11及び図12中のU₁, V₁, U₂はそれぞれ連続防撓パネルの長手方向変位,幅方向変位及びせん断変形による変位を示す.これらの導出過程及び物理的特性は文献⁴⁾に詳述する.

3.2 座屈試験との比較検証

提案評価法の適用性について検討するため,第2章で示した座屈試験との比較検証を実施した.提案評価法に よる座屈試験体のモデル化範囲を図13に示す.実験時は試験体のTrans 材及びスチフナにより座屈変形が拘束さ れる現象が確認されたため、モデル化領域の縮小のため2トランススパン+2ロンジスパン(2TS-2LS)とした. さらに、モデル化領域の周縁4辺の変形を直線的に拘束するため、図11(d)の周期対称条件は保ちながら、図12 の各辺の拘束条件に加えて各辺に直線保持条件を与えた.



図 14 に,提案評価法を使用して汎用 FEM ソフト MSC.Marc により計算した結果と座屈試験 Test1, Test2 について,図 13 中 Panel 1 (*ABCD*)における平均せん断応力~平均せん断ひずみ関係の比較を示す.前記第2章において実験と相関を示した FE 解析(ABAQUS)の結果と本提案手法を適用した FE 解析の結果の比較を図 14 に示す.図 14 中のせん断応力及びせん断ひずみは,Panel 1 中の全要素における値の平均値を示し,せん断降伏応力及びせん断降伏ひずみは以下の式により導出される.図 14 より,提案評価法によって試験体パネルの平均せん断応力~平均せん断ひずみ関係をほぼ再現出来ており,提案評価法の妥当性を確認できた.

3.3 実船縦隔壁への適用性検証

提案評価法の実船構造評価における適用性について検討するため,提案評価法を用いたダブルハルタンカーの 縦隔壁のモデル化を行い,実船の座屈崩壊挙動の再現性を確認した.対象とした縦隔壁の全体 FE モデル及び比 較対象としたパネル位置を図 15 に示す.比較対象は実船においてせん断荷重が支配的と考えられる上側の連続防 撓パネルとした.モデル化範囲は 3.2 章と同様に 2TS-2LS とし,せん断/圧縮の荷重比を変化させ提案評価法によ り得られた最終強度を H-CSR に規定される座屈応力及び縦隔壁全体の FE 解析結果とそれぞれ比較した.

図 16 に最終強度相関関係の比較を示す.実船縦隔壁の FE 解析については、圧縮荷重が支配的となるとせん断荷重が支配的な場合と崩壊モードが異なり、比較対象としたパネルとは別の部位が崩壊する現象が現れたため、

圧縮荷重が支配的な荷重比のプロットは示していない. せん断荷重が支配的な荷重条件下において, 提案評価 法と縦隔壁全体の FE 解析結果の最終強度は同等の値を示しており, 提案評価法により縦隔壁全体の連続防撓パ ネルとしての崩壊挙動を精度良く推定できることが分かる. 加えて, H-CSR との比較により, ある程度せん断荷 重が加わると H-CSR は安全側の結果となっていることが分かる. このように, 実崩壊挙動と安全率を考慮した船 級規則では, 最終強度に差が生じる可能性があり, その差を確認するのにも提案評価法は有用な手法であるとい える.



図 13 提案評価法を用いた面内せん断座屈評価のための FE モデル化領域







図 15 ダブルハルタンカーの縦隔壁 FE モデル(左図)及び比較対象パネル(右図)



4. まとめ

本研究では、面内せん断及び圧縮を受ける連続防撓パネルの実用的な座屈・最終強度評価法の構築を行った. 海上技術安全研究所の所有する複合荷重試験装置による模型試験を行い、防撓パネルに連続的に生じる座屈崩壊 挙動を確認するとともに、試験体の座屈・最終強度を計測した.また連続防撓パネルの周期性を考慮した新しい 最終強度評価法を提案し、その適用性について実験と比較検証したFE解析結果と比較した.その結果、せん断荷 重が支配的な荷重条件下において提案評価法により防撓パネルの最終強度を精度良く推定できることを確認し、 著者らの提案する最終強度評価法の有用性を示すことができた.

参考文献

- Yao, T., Fujikubo, M. and Yanagihara, D. : On Loading and Boundary Conditions for Buckling/Plastic Collapse Analysis of Continuous Stiffened Plate by FEM, Proc. Twelfth Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, TEAM'98, Kanazawa, Japan (1998), pp.305-314.
- 正岡考治,吉岡典恭,岡田博雄,上田幸雄:複合荷重をうける船体防撓板構造の崩壊挙動解析法,関西造船協 会誌,第232号(1999),pp.127-133.
- 3) 田中義照:構造材料寿命評価研究施設,海上技術安全研究所報告,第9巻第2号(2009), pp. 61-66.
- 4) Fujikubo, M., Uda, S., Tatsumi, A., Iijima, K., Ogawa, H. and Takami, T. : Finite Element Modeling of a Continuous Stiffened Panel under Combined Inplane Shear and Thrust, Proc. of 27th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (2013).
- 5) 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, Proceedings of the ICTWS 2014 7th International Conference on Thin-Walled Structures (2014).
- 6) 日本海事協会: CSR-B&T 編 ばら積貨物船及び油タンカーのための共通構造規則(2015).
- 7) 藤久保昌彦,山村和弘,肖桃云:防波堤被災を考慮したポンツーン型メガフロートの構造安全性評価に関する 研究,日本造船学会論文集,第190号(2001),pp.337-345.
- 8) 瀬戸康平, 鈴木敏郎, 五十嵐規矩夫, 常木康弘, 大西浩: H 形鋼梁ウェブ板要素のせん断座屈挙動に関する研 究, 日本建築学会大会学術講演便概集, C-1, 構造 III, 木質構造, 鉄骨構造, 鉄骨鉄筋コンクリート構造, (2001), pp.581-582.