

最先端の船体縦曲げ最終強度評価法構築にかかる予備的検討 －大型コンテナ船の安全対策に向けて－

田中 義照*, 小森山 祐輔*, 橋爪 豊*, 高見 朋希*, 安藤 孝弘*, 岡 正義*

Preliminary Study for an Advanced Evaluation Method of Ultimate Hull Girder Bending Strength - For Ensuring the Safety of Large Container Ships -

by

Yoshiteru TANAKA, Yusuke KOMORIYAMA, Yutaka HASHIZUME,
Tomoki TAKAMI, Takahiro ANDO and Masayoshi OKA

Abstract

This report summarizes the results of “Preliminary study on the construction of the most advanced evaluation method for the ultimate hull girder strength (leading research)” conducted in FY2015. This research was conducted as a preliminary study of “Development of advanced safety assessment methods for ships and further systematization of rational safety regulations (priority research)” started in FY2016. These studies were started to review the evaluation method of the ultimate bending strength specific to large container ships, triggered by the collapse of the container ship MOL COMFORT. For this reason, this report also touches on the results of discussions by the committees of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism and the classNK, which were conducted for the purpose of investigating the cause of the accident. In this report, we numerically elucidate the generation mechanism of buckling deformation observed in the outer bottom plates of the sister ships of the collapsed ship. However, we are also going to experimentally investigate its effect on the ultimate longitudinal bending strength in the above priority research in the near future.

* 構造安全評価系

原稿受付 令和元年10月30日

審査日 令和元年11月25日

目 次

1. まえがき	42
2. 大型コンテナ船の折損事故と安全対策の検討	42
3. FEM 解析による船底外板における座屈変形の再現	45
3.1 解析方法	45
3.2 解析結果	47
4. あとがき	48
謝辞	48
参考文献	48

1. まえがき

インド洋沖を航行中の大型コンテナ船 MOL COMFORT 号は、2013 年 6 月に折損を生じ、分断・漂流後に沈没した。事故船は、バハマ船籍であったが、建造造船所、運航会社、船級協会とも我が国の機関であったため、事故後直ちに国土交通省に検討委員会が設置され、事故原因の究明と大型コンテナ船の安全対策に関する提言について議論され、2015 年 3 月に最終報告書が出された。

本稿では、事故後に実施された検討状況の概要を示すとともに、検討委員会での要請を踏まえて実施した、船底外板座屈変形の有限要素法 (FEM) 解析による再現の結果 (2015 年度先導研究「最先端の船体縦曲げ最終強度評価法構築にかかる予備的検討」においても継続実施) を示す。なお、この先導研究は、2016 年度に開始された重点研究「船舶の先進的な安全性評価手法の開発及び更なる合理的な安全規制の体系化」(現重点研究「船舶の新構造基準作成に資する先進的な荷重・構造強度評価及び船体構造モニタリングシステムの開発に関する研究」) の先行研究として実施されたものである。

2. 大型コンテナ船の折損事故と安全対策の検討

インド洋沖を航行中の大型コンテナ船 MOL COMFORT 号 (8,110TEU) が、船体中央部で折損したのは 2013 年 6 月 17 日であった (図 1 参照)。その後、同船は前半部と後半部に分断され、漂流の後に沈没した。国土交通省海事局は、造船所、船社、船級協会、学識経験者、及び、研究機関を委員とする「コンテナ運搬船安全対策検討委員会」を組織し、事故時の状況に基づく作用荷重、並びに、同型船の安全点検結果も踏まえたハルガーダー縦曲げ最終強度を推定し、事故発生シナリオ解明を目指した¹⁾。海上技術安全研究所からは、一連の安全対策に係る検討委員会に、田村兼吉海難事故解析センター長 (当時) が委員として参加した他、主著者 (同センター上級海難分析研究員) 他 1 名がオブザーバーとして参加し、事故船の運動・荷重解析、及び、FEM 構造解析の実務を担当した。

まず、事故から半年後の 2013 年 12 月には、速報としての中間報告書²⁾ が纏められた。その主な検討結果を以下に示す。

- 事故船は、建造当時の NK 規則に適合しており、引き渡し後の船級検査にもすべて合格していたことが確認された。
- 船体折損の起点は、船体中央部 No.6 カーゴホールド直下の船底外板 (バット継手部) の座屈崩壊と推定された。
- 積載されていたコンテナが申告値通りの重量であったと仮定した場合、船体自重及び外水圧を含めた静水中縦曲げモーメントは、 $M_s = 6.0 \times 10^6 \text{ kN-m}$ と推定された。また、事故当時の海象状況として、長波頂不規則

波（有義波高 $H_{1/3} = 5.5 \text{ m}$ ，平均波周期 $T = 10.3 \text{ sec}$ ，出会い波向き 114 度（左斜め向かい波））を仮定した場合，波浪中縦曲げモーメントは， $M_w = 3.4 \times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ と推定された（ホイッピング成分を含む）．その結果，船体に作用する縦曲げモーメントは， $9.4 \times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ と推定された．

- 一方，折損したホールドを含む 3 ホールドをモデル化（1/2+1+1/2 ホールドの片舷）した有限要素モデルによる縦曲げ逐次崩壊解析は，商用の動的陽解法 FEM プログラム LS-DYNA を用いて実施された（第 3 章参照）．船底外板の初期たわみとして，片振幅 4mm の 4 半波座屈モードを仮定した場合，縦曲げ最終強度は $14.0 \times 10^6 \text{ kN}\cdot\text{m}$ であった．
- 以上の結果，事故時には縦曲げ最終強度の約 67% の荷重しか作用しておらず，折損には至らない結果となった．そのため，荷重及び強度に関するシミュレーション計算に不確実要因を含めた検証作業が要求されることとなった．
- また，事故後に行われた事故船の同型船に対する安全点検結果によると，船体中央部の船底外板で，船体横断面の中心線付近に高さ 20 mm 程度の座屈変形が見られたことが判明した（図 2 参照）．この原因を究明するため，3 ホールドモデルに縦曲げ最終強度に近い荷重（最終強度の 98.7%）を負荷した後，静水中の状態まで除荷する解析を行ったが，座屈変形の再現はできなかった（高さ 1.07mm の変形が残留したのみ）ことから，その発生メカニズム及び最終強度に及ぼす影響の解明が必要と考えられた．



図 1 事故発生時における事故船の状況（商船三井殿ご提供）¹⁾

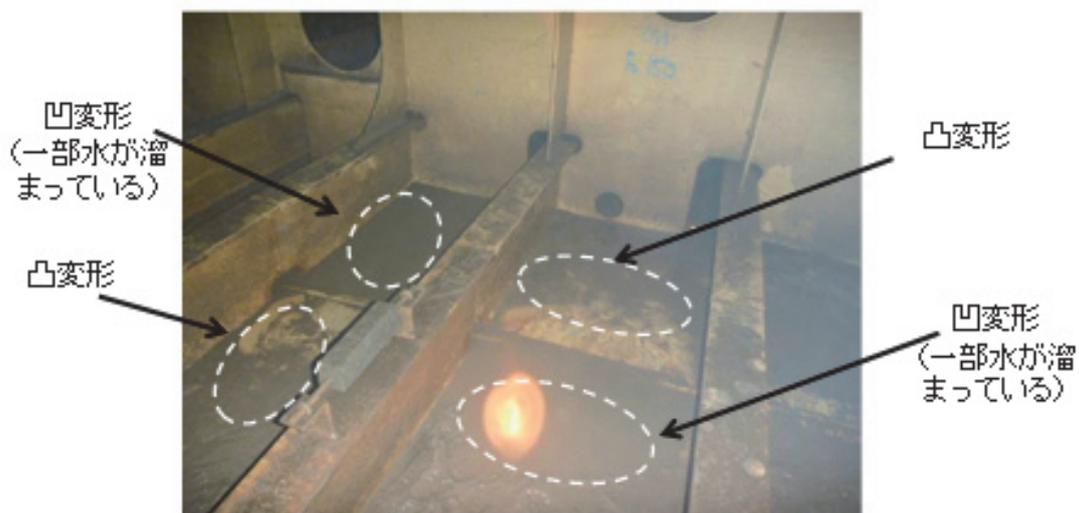


図 2 事故船の同型船で観察された船体中央部船倉二重底外板の座屈変形の例（商船三井殿ご提供）¹⁾

事故後約半年間にわたる検討委員会では、いわゆる確定値に基づく作用荷重及び船体強度の評価が行われたが、事故原因の究明には至らなかったため、その後、日本海事協会に「大型コンテナ船安全検討会（NK 検討会）²⁾」が設置され、さらなる検討が実施された。この検討会では、当該船の折損事故発生の可能性について、鋼材降伏点や事故当時の海象条件、コンテナ申告重量と実重量の差といった不確実性要素のばらつきを考慮した荷重と強度の検討が実施された。主な調査検討結果を以下に示す²⁾。

- 折損事故発生の可能性については、鋼材降伏点や事故当時の海象条件、コンテナ申告重量と実重量の差といった不確実性要素のバラツキを考慮した強度と荷重の検討が行われた。その結果、非常に低い確率ではあるが、荷重が強度を上回る可能性があるという結論が得られた（図3参照）。
- IACS (International association of classification societies) 規則で規定する波浪中縦曲げモーメントを基準として、3 ホールドモデル弾塑性解析による縦曲げ最終強度の余裕度（外水圧等のローカル荷重の影響あり）を事故船と他の大型コンテナ船とで比較したところ、事故船の余裕度が小さいことが確認された。
- 一方、縦強度関連の IACS 規則要求値や Smith の方法（IACS CSR (Common structural rules) の方法に準拠）による縦曲げ最終強度に対する余裕度（ローカル荷重の影響なし）を事故船と他の大型コンテナ船とで比較したところ、差異は認められなかった。
- これらの事実から、船底外板防撓パネルに作用する面外荷重による二重底ローカル応力と縦曲げ圧縮応力の重畳を考慮した座屈崩壊（二軸圧縮）の発生可能性の差が事故船と他船にあったと推察された。したがって、類似事故の防止のためには、面外荷重の影響を適切に考慮した縦曲げ最終強度の評価及びホールド中央部近傍における船底外板防撓パネルの座屈崩壊強度評価を行うことが必要であると結論付けられた。

以上のように、NK 検討会において、事故船に作用する荷重が強度を上回る可能性のあることが示されたものの、事故船同型船の船底外板に見られた座屈変形の生成メカニズムについては言及されなかった。

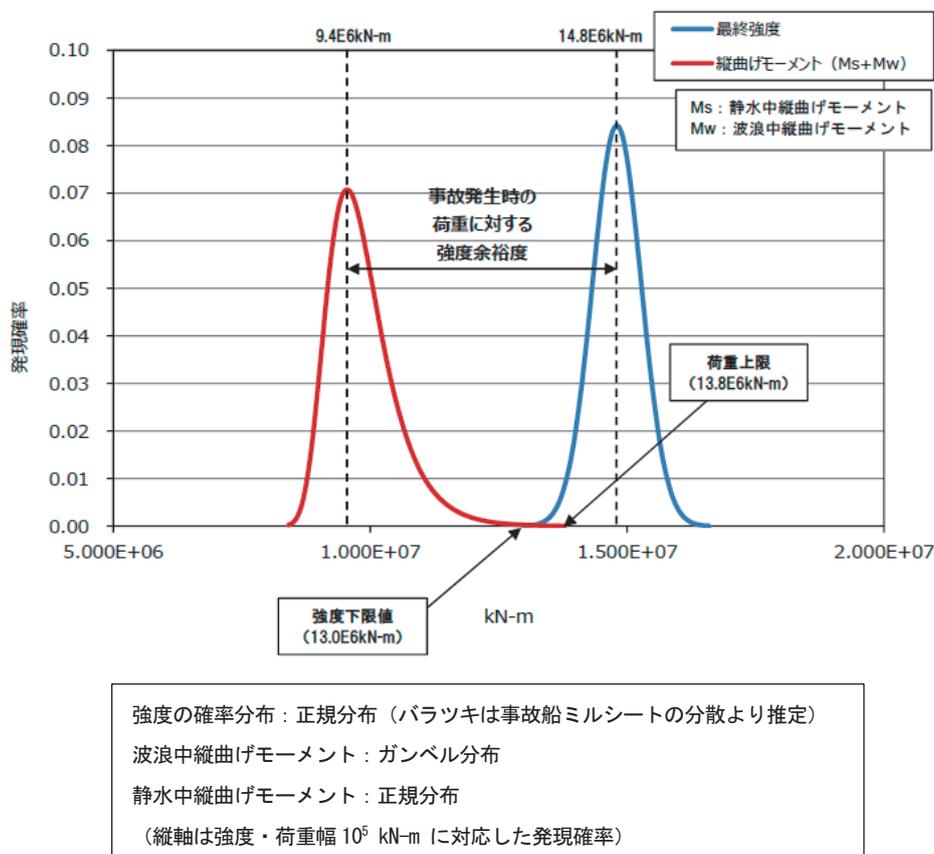


図3 事故当時の強度と荷重の関係²⁾

NK 検討会の結果を受け、国土交通省海事局の「コンテナ運搬船安全対策検討委員会」が再スタートされ、2015年3月に最終報告書³⁾が纏められた。約1年半にわたる検討会での審議を経て、当該コンテナ船が折損事故に至った原因として、以下が結論付けられた。

- 波浪衝撃で生じるホイッピング荷重により、船体に加わる力が増大した。
- 横荷重（外水圧等、横方向から船体に作用する力）の影響により、船体の縦曲げ最終強度が低下した。

また、検討結果に基づき、

- 横荷重による影響は、船体縦曲げ最終強度に密接に関係しているため、船底構造における応力の2軸性を含む横荷重の影響を考慮した船体縦曲げ最終強度の規則とすること。
- ホイッピング応答の影響を直接的に考慮した船体縦曲げ強度の規則とすること。
- 縦強度に関する規則の技術的背景（海象条件等）の提示の在り方を検討すること。

の提言がなされ、IACSの共通規則改正⁴⁾にも繋がった。

一連の検討委員会の終了後、日本船舶海洋工学会においても学術的立場から、大型コンテナ船の縦曲げ最終強度に関して、解明できている部分とできていない部分を明らかにすることを目的として、ストラテジー研究委員会「S-14 コンテナ船最終強度検討FS委員会（委員長：藤久保昌彦）」が設置され、2016年7月に最終報告書⁵⁾が纏められた。同委員会では、検討内容を

- (1) 海象・運航条件と荷重
- (2) 縦曲げ逐次崩壊挙動と最終強度
- (3) 荷重・強度の不確実性と安全性評価
- (4) モニタリングと収集データの安全対策への適用

の4項目に分類し、研究動向の調査・分析結果、並びに、今後実施すべき研究課題が示された。委員会の提言として、「操船判断支援技術」や「構造モニタリング技術」に関する技術力と経験の不足が指摘されたが、この指摘に対応すべく、超高精度船体構造デジタルツインの研究開発（2018～2019年度）⁶⁾や大型コンテナ船の船体構造ヘルスマニタリングに関する研究開発（2017～2020年度）⁷⁾が、船社、造船所、大学及び研究機関の共同プロジェクトとして実施されている。

3. FEM解析による船底外板における座屈変形の再現

第2章でも示したように、大型コンテナ船の折損事故の原因には直接結び付けられてはいないが、事故船の同型船において見られた、船体中央付近の船底外板の面外塑性変形（高さ20mm程度の座屈変形）に関して、コンテナ運搬船安全対策検討委員会において、その生成メカニズムの検討が要請された。JSQSの基準によると、建造時の外板パネルの面外変形（初期たわみ）は4mm以下に抑制されているはずであるため、何らかの外力の作用によりこの変形が生成されたと考えられる。検討会では、

- 縦曲げ最終強度に近い有限エネルギーを持つホイッピング荷重（曲げモーメントの大きさは縦曲げ最終強度に近いが、周期すなわち作用時間が波浪曲げモーメントと比べて短い）を受けた。
- 横荷重の影響により縦曲げ最終強度が低下したため、縦曲げ最終強度に近い曲げモーメントを繰り返すこととなり、座屈変形が累積した。

を仮説として立てたが、本研究では後者に基づき、FEM解析による検証を行うこととした。

本章では、検討委員会期間中に実施した³⁾事故船3ホールドモデルのLS-DYNAによる弾塑性逐次崩壊解析の方法、並びに、同型船の船底外板で発見された高さ20mm程度の座屈変形の再現結果を示す。

3.1 解析方法

解析に用いたFEモデルを図4に示す。2つの横隔壁間の詳細メッシュ部は、板材及び骨材ともシェル要素により100mm×100mm程度に分割されている。また、解析に用いた鋼材の真応力-真ひずみ関係の一例を図5に示す。

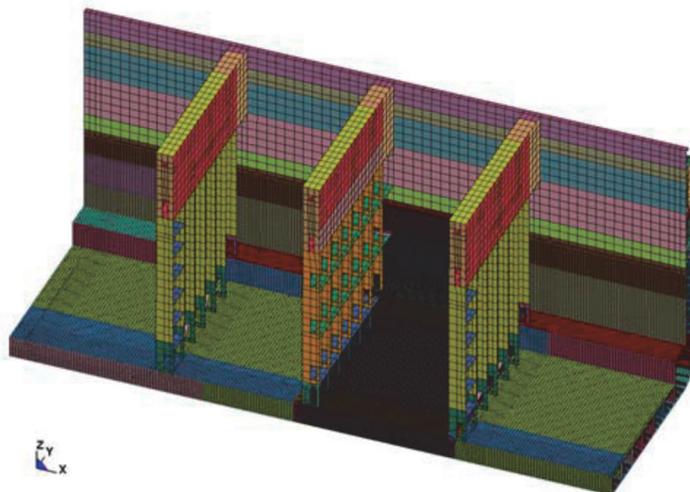


図4 事故船の3ホールドモデル²⁾

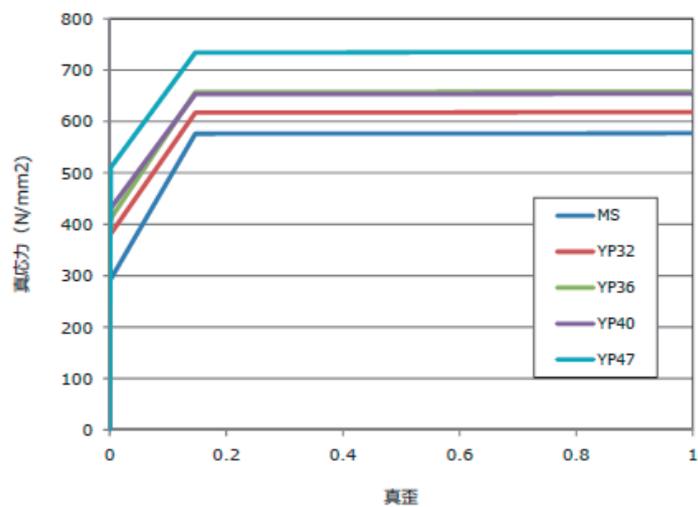


図5 真応力-真ひずみ線図²⁾

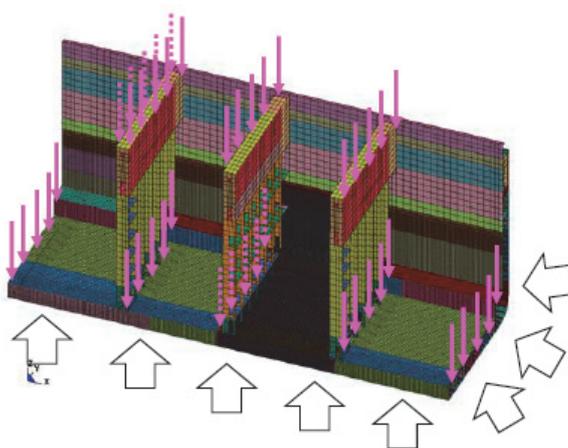


図6 ローカル荷重（コンテナ荷重及び外水圧）の負荷方法²⁾

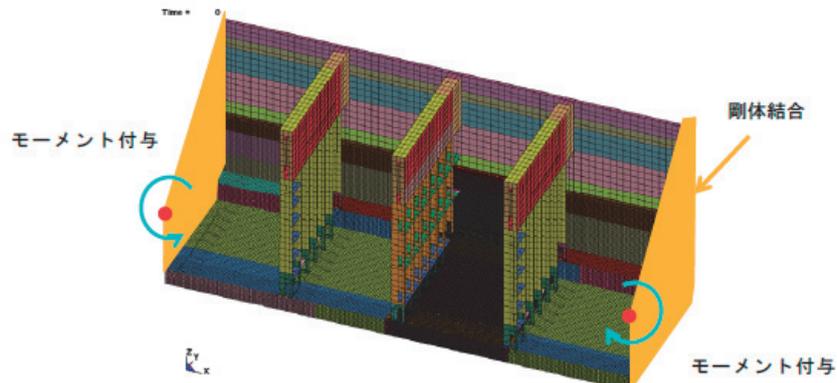


図7 縦曲げモーメントの載荷方法²⁾

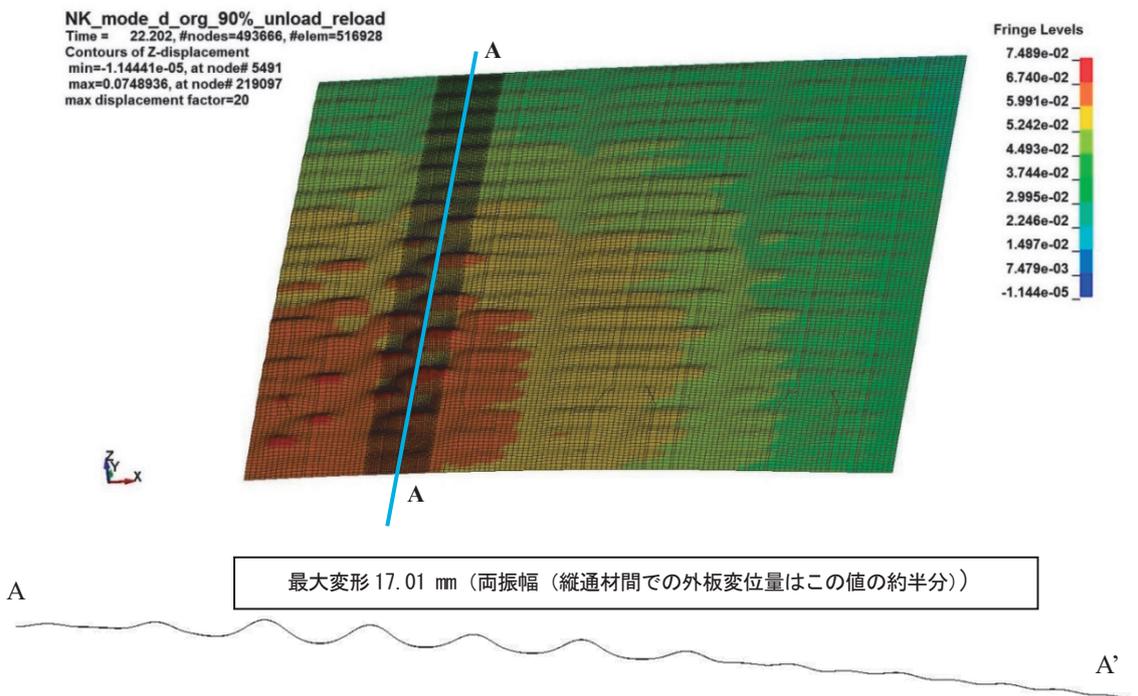


図8 船底座屈変形のシミュレーション計算による再現例
(微小初期変形を与えた場合の船体縦曲げ最終強度の95.2%を繰り返し、4回目の除荷をした時点)

境界条件は、モデルの両端を単純支持とした（別途、片持ち条件での解析によっても同等の結果が得られることを確認した）。また、船幅方向については、船体中心線で左右対称条件とした。

荷重は、①二重底自重、②静水圧、③コンテナ荷重、④静水中縦曲げモーメント（ホギング）、⑤波浪変動圧、⑥波浪中縦曲げモーメント（ホギング）、⑦追加の縦曲げモーメント（ホギング）をモデルに順次負荷した。ローカル荷重と縦曲げモーメントの負荷点をそれぞれ、図6及び図7に示す。

3.2 解析結果

前述の3ホールドモデルにローカル荷重を負荷した後、波浪中縦曲げモーメントに相当する追加曲げモーメントをモデル両端断面の図心位置にホギングモーメントとして徐々に増大させた。このとき、船底外板の初期たわみとして、片振幅4mmの4半波座屈モードを仮定し、コンテナ荷重を申告値通りと仮定した。その結果、縦曲げ最終強度として、 14.0×10^6 kN-m が得られた¹⁾。

一方、事故船同型船の船底外板で見られた座屈変形の再現においては、最も厳しい積み付け状態として1ベイ・エンプティ状態（バラスト漲水なし）とし、船底外板の長辺（3600mm）方向に、板厚の1/50の1半波から5半波の微小初期変形を重畳させた（二軸応力下では、応力比に応じて様々な半波数の座屈が生じ得るため、各モードを均一に加算した）。その結果、縦曲げ最終強度として、 13.7×10^6 kN-m が得られた³⁾。この最終強度の95.2%を上限として、追加曲げモーメントの負荷及び除荷を4回繰り返した結果、図8に示すような残留変形が船底外板に再現された。最大変形（両振幅）は約17mmに達し、事故船同型船で確認された船底外板の面外変形とほぼ等価な（約85%）残留変形が得られた。

以上のように、動的陽解法 FEM 解析プログラムによる3ホールドモデルの負荷・除荷繰り返し解析によっては、事故船同型船の船底外板に見られた座屈変形をある程度再現することができた。しかしながら、検討会においても指摘されたように³⁾、陽解法 FEM 解析プログラムの特性によって座屈変形が累積した可能性もあるため、今後、実験等により検証する必要がある。加えて、このような船底外板の座屈変形が事故船やその同型船の縦曲げ最終強度にどのように影響するかについても詳細に検討する必要がある。

4. あとがき

本稿は、2016年度開始の重点研究「船舶の先進的な安全性評価手法の開発及び更なる合理的な安全規制の体系化」の先行研究として、2015年度に実施された先導研究「最先端の船体縦曲げ最終強度評価法構築にかかる予備的検討」の結果をまとめたものである。これらの研究は、大型コンテナ船 MOL COMFORT 号の折損沈没事故をきっかけとして、縦曲げ最終強度評価手法を見直すために開始された研究であるため、折損事故の原因究明を目的とした国土交通省及び日本海事協会の検討委員会での議論の概要について触れることとした。今後、上記重点研究において、事故船同型船の船底外板に見られた座屈変形の生成メカニズム、及び、それが船体縦曲げ最終強度に及ぼす影響を実験的および数値的に解明していく予定である。

謝 辞

本研究は、国土交通省のコンテナ運搬船安全対策検討委員会（座長：角洋一横浜国立大学名誉教授）、並びに、日本海事協会の大型コンテナ船安全検討会（座長：同）において実施された検討結果の一部を含む。関係各位に御礼申し上げます。また、座屈変形再現のためのシミュレーション計算を実施するに当たり、藤久保昌彦博士（大阪大学大学院教授）に多大のご助言・ご指導をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) コンテナ運搬船安全対策検討委員会：コンテナ運搬船安全対策検討委員会最終報告書（2013年12月）。
- 2) 大型コンテナ船安全検討会：大型コンテナ船安全検討会報告書（2014年9月）。
- 3) コンテナ運搬船安全対策検討委員会：コンテナ運搬船安全対策検討委員会最終報告書（2015年3月）。
- 4) 松本俊之、河邊寛、石橋公也：大型コンテナ船の構造強度に関するNKの取組み、ClassNK 技術セミナー資料（2016）。
- 5) 藤久保昌彦：大型コンテナ船の最終強度に関する研究動向—S-14委員会報告—、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第24号（2017）、pp.1-6。
- 6) 日本船舶技術研究協会：超高精度船体構造デジタルツインの研究開発委員会 2018年度成果報告書、（2019）。
- 7) 岡田哲男他 11名：14,000TEU 大型コンテナ船における船体構造ヘルスマニタリングに関する研究開発の概要、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第24号（2017）、pp.31-35。