

論文の要旨

題目 動的陽解法を用いたき裂を含む防撓パネル構造の最終強度評価に関する研究
(Ultimate Strength Evaluation for Cracked Stiffened Panel Structure
using Dynamic Explicit Method)

氏名 瀬戸山 雄

構造物の設計は、製造過程やその供用中に所要の性能を損失しないことを第一の指標として行なわれる。船体や橋梁などの大型の構造物は破損時のリスクが非常に大きく、また一方で部材の数や寸法が建造コストに大きく影響するため、安全かつ合理的な設計と適切な強度評価が必要となる。

船体や橋梁などの鋼構造物は一般的に多数のパネルや防撓パネルなどの部材から構成され、部材間は溶接によって接合される。これらの構造部材は供用中に引張および圧縮の繰返し荷重を受け、疲労き裂や小規模な欠陥が生じることがある。損傷を含む構造は、健全な状態と比較して引張り強度に留まらず曲げや座屈・最終強度に影響を及ぼし、大規模な損傷ひいては構造全体の崩壊に繋がる危険性がある。

IMO (International Maritime Organization) により発行された新造船のための目標指向型の構造基準 GBS (Goal-based Standard for New Ship Construction) は 5 階層から成り、船体構造が有すべき安全目標とその達成に必要な機能要件を定めている。このうち Tier1 では新造船における設計および製造基準、達成すべきゴールが示され、次いで Tier2 においてゴールを達成するために構造規則が持つべき機能要件が示されている。ここで示された構造規則が持つ機能要件の 1 つとして、き裂などの局部損傷が存在してもこれが構造全体の崩壊に繋がらないような、冗長性のある設計を求めている。したがって、船体構造におけるデッキや船底パネルなど、その損傷が船体全体の崩壊につながる重要な構造部材において、き裂などの損傷を有する場合の強度評価は重要な課題である。

き裂損傷を有する防撓パネルの最終強度を局所的に評価する場合、引張荷重における損傷の影響はその欠損面積に比例するため、比較的容易に推定できる。一方、圧縮荷重における挙動は、材料が降伏に至る前のパネルや防撓材の弾性座屈の発生や、き裂面の接触による座屈挙動の変化が最終強度に影響を及ぼすために複雑な現象となる。また、船体構造は多数のパネルを溶接して組み立てられており、残留応力や残留ひずみといった初期不整が存在する。圧縮荷重下では、これらの初期不整が場合により座屈変形を助長することが知られている。このような構造の冗長性を推定、評価するためには、圧縮荷重下における防撓パネルの最終強度にき裂損傷が及ぼす影響を明らかにすることが重要であるが、既往の研究では、1 本の防撓材を含む範囲だけをモデル化しているものが主であり、実構造のようにガーダーで支持された全体防撓パネルを対象とするものは

多くない。さらに、パネルの防撓材の限られた箇所に存在する き裂だけを考慮しており、船体構造全体の強度にも影響を与える可能性を持った広範囲に及ぶ き裂を対象とした研究は見受けられない。き裂による冗長性を議論するためには、大規模な き裂をも視野に入れて検討を進める必要がある。

また、既往の研究においては構造のモデル化はシェル要素で行われている。これは、防撓パネルの板厚が構造全体に対して非常に薄いためであるが、き裂の開閉現象は構造全体に対する局所的な挙動であり、一般的なシェル要素モデルを使用して、構造全体と局所的な挙動を同時に評価することは困難である。すなわち、小さい荷重が繰り返し負荷されて生成された疲労 き裂のように隙間がほとんど無視できる場合、パネルに座屈が発生して横たわみが発生すると、曲げの引張側では き裂面が開口するのに対して圧縮側では接触状態を続け接触圧が増加する。シェル要素のみを用いた解析の場合、き裂を挟むシェル要素間に非線形バネなどを定義することで き裂接触の影響を表現することは可能ではあるが、物理的な意味を持つ形で適切にバネ定数を決定するためには き裂近傍の変形を正確に把握する必要がある。また、シェル要素を用いた解析では、板厚方向の偏心とこれに伴う面外変形の変化を表現するのは困難である。

ここで、従来の有限要素法による防撓パネルの最終強度評価には、MSC.Marc に代表される静的陰解法を適用した解析が行なわれてきた。本研究では、き裂面を含む接触や、座屈崩壊後の挙動に着目した検証を行うため、解析手法に動的陽解法を採用する LS-DYNA を解析ソルバーとし、その精度検証を実施した上で連続防撓パネルの最終強度解析へ適用した。これにより、防撓パネル構造の圧縮崩壊解析への動的陽解法の適性を検証し、今後の大規模かつ複雑現象への展開の可能性を示す。

本論文では、防撓パネル構造が き裂損傷を有する場合の最終強度について、動的陽解法とシェルスリッドモデルを適用してき裂面の接触による挙動の変化を詳細に検証し、引張および圧縮を受ける船体構造において様々な き裂損傷がその最終強度へ及ぼす影響を体系的に示した。動的陽解法の精度検証をはじめとし、最も基礎的な き裂パネルの応答、繰り返し荷重による挙動、防撓パネルに種々の き裂が存在する場合の残存強度の推定方法を示した。これらの一連の検証を通じて、供用中の船体構造に生じたき裂損傷が直ちに修繕すべきものか、あるいは修理ドックまでの運行の在り方を判断する指標の1つを提示した。

第2章では、従来用いられてきた静的陰解法と動的陽解法について、防撓パネルの最終強度解析における解析結果の比較検証を実施した。ここでは、載荷速度に留意が必要となるものの、最終強度解析においても動的陽解法によって妥当な結果が得られることを示した。また、従来の静的陰解法による座屈解析に必須である初期たわみについて、動的陽解法を用いた際にも解析結果の精度の担保には必要となる場合があることを示した。動的解法では意図的な外乱を指定せずとも座屈解析が可能であるが、最終強度が

材料の降伏強度に近い応答を示す場合には初期たわみを指定しない場合には強度を高く推定することがある。

第3章では、最も基礎的な構成である き裂を有する周辺支持パネルを対象に、シェル要素を用いた場合の問題点と、き裂面の接触を表現するための動的陽解法を用いたシェルソリッドモデルのモデル化手法とその有用性を示した。また、様々な き裂長さや き裂位置における接触挙動と最終強度後に至る挙動を考察し、き裂面に隙間が無い状態であれば接触により荷重伝播を保つことで最終強度に及ぼす影響が小さいことを示した。ただし、最終強度後の挙動は、き裂長さや位置によって き裂面のずれが生じ耐力の低下は大きくなる。

第4章では、供用中のパネル構造に対して発生する引張および圧縮の繰返し荷重を想定し、引張り荷重の大きさや、パネルのアスペクト比および板厚の違いによる き裂の開閉口挙動に関する解析結果を示した。その結果から、座屈変形と共に最終強度を迎える寸法パネルでは、繰返し荷重の大きさやパネルのアスペクト比によっては き裂面の接触が発生せずに最終強度を迎えることを示した。したがって、様々な寸法が存在する複雑な構造の最終強度の冗長性を議論するためには、安全側の評価として き裂の接触は考慮しないことが適切であることを示した。

第5章では、前章の結果に従い き裂面の接触は起こらない条件とし、船体構造の一部として使用されることの多い連続防撓パネルを対象に、様々な き裂損傷が存在する場合の最終強度への影響を体系的に示した。ここでは、パネル板厚3ケース、防撓材寸法4ケース、防撓材本数2ケースのそれぞれについて、幅方向ならびに防撓材方向に発生した計24ケースの き裂を想定し、き裂が崩壊挙動に与える影響を力学的に考察した。その結果、き裂損傷の存在によって構造全体の不安定が誘起されることは無く、防撓パネルの最終強度の低下率は き裂面による断面積の減少率で推定できることを示した。

今後の進展課題としては、以下の2点が挙げられる。

1. 提案した強度低下率の推定法は非常に簡便であり、幅方向き裂に関しては十分な精度も有している。したがって、き裂発生寿命や進展予測などと組み合わせることが出来れば、き裂を考慮したパネルの強度信頼性を簡単に予測することも出来ると考えられる。
2. ISSC2009 III.1 Ultimate Strength レポートでは面外荷重が存在する場合に き裂が最終強度に与える影響がより顕著であることが示されている。本研究において、防撓パネルの崩壊挙動に対しては き裂損傷が隣接スパンへ及ぼす影響が小さいことを示したが、面外荷重を考慮した検証により実現象に近い挙動の確認が可能となる。