

遠洋鮪漁船の損傷対策について

輸送高度化研究領域 * 橋爪 豊
研究統括主幹 宮本 武
客員研究員 竹本 博安

1. はじめに

近年、遠洋鮪漁船、特に隆起甲板を有する船舶において、船体中央よりの上甲板ナックル部に亀裂損傷が発生する事例が見られ、その対策が求められている。そのため原因究明と損傷対策について、遠洋鮪漁船の実態調査を含め、総合的な検討が行われた。

ここでは、FEM による構造解析を行い、上甲板の補強対策について検討した。

2. 解析モデル

2.1 供試船主要目

解析に用いたのは 439 型鮪漁船である。主要目を表 - 1 に示す。

表 - 1 供試船主要目

長さ	幅	深さ	喫水	総トン	船速
51m	9m	3.95m	3.6m	439ton	11.5kt

2.2 FEM 解析モデル

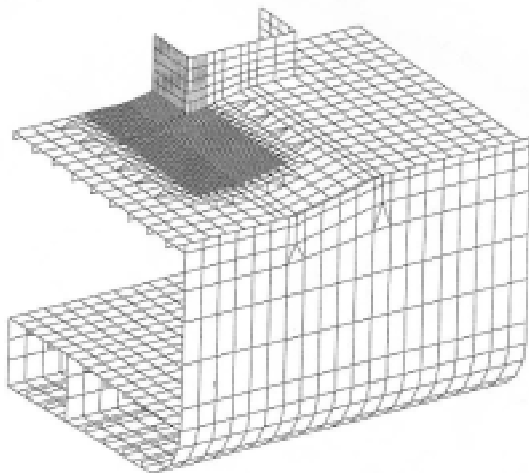


図 - 1 FEM 解析モデル

図 - 1 に FEM 構造解析モデルを示す。船体中央

部から長さ 6m の右舷半分をモデル化した。隆起甲板があるため船体中央部から前方 270cm と 420cm の位置に 2 箇所のナックル部を有している。隆起部の段差は 30cm である。上甲板には 50cm の間隔で縦梁が通っており、中心から 3 本目 150cm の位置に縦桁が通っている。この図は補強等がないオリジナルモデルである。

2.3 境界条件

モデルの船尾側の断面の節点を固定端とし、前端の断面に曲げモーメントと剪断力を負荷した。

前端の荷重負荷断面は、変形の前後を通じて平面を保つと仮定している。

2.4 荷重

モデル前端部の断面に、船体縦曲げモーメントと縦剪断力を与えた。荷重の値を表 - 2 に示す。これは波浪長期予測による出現頻度 $Q=10^{-6}$ に相当する値である。荷重の向きはサギング状態、即ち上甲板が圧縮側になるように剪断力、サギングモーメントを作用させた。

表 - 2 荷重設定値

位置	モーメント	剪断力
Fr.50	1336.5ton-m	28.4ton

3. 解析結果と考察

3.1 隆起甲板による断面剛性の低下

隆起甲板を有する上甲板の船側縦桁は、前後にナックルを持つ構造をしている。ナックルを有する縦桁は軸力により曲げ変形を生じるために、軸荷重に対する剛性が低下する。船体縦曲げ強度においては、これは甲板の有効断面積の減少とみなせる。甲板縦桁や甲板梁等の上甲板縦部材の有効断面積が減少すると、船体縦曲げに対する中立軸が低下し、断面 2 次モーメント、断面係数が減少する。上甲板の剛性

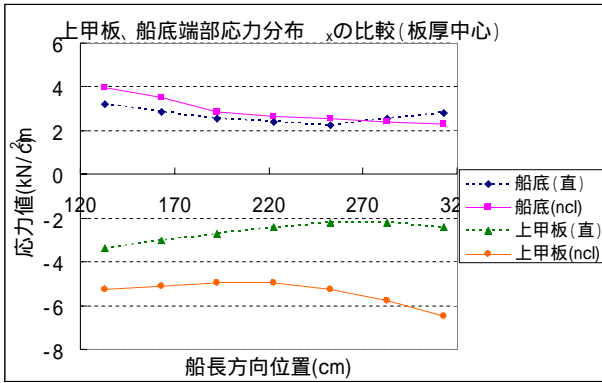


図 - 2 上甲板及び船底端部応力 σ_x の比較
(直：甲板隆起なしモデル、ncl：甲板隆起あり)

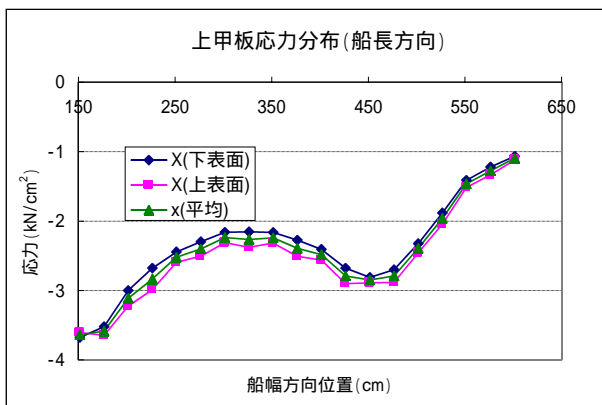


図 - 3 上甲板船長方向応力 σ_x の船幅方向分布

が低下すれば、結果的に甲板舷側部の応力が増加する。これによりブルワーク、舷門周辺の応力が増加し、損傷の原因となる可能性がある。

図 - 2 は甲板隆起がない場合と甲板隆起がある場合の上甲板舷側部と、船底船側部の外板の応力分布を比較したものである。横軸は解析モデル後端からの距離を示しており、320cm の位置にナックル部がある。船底外板の応力は両者で余り差がないが、上甲板舷側部の応力は、甲板隆起がある場合の方がかなり高くなっており、上甲板の断面効率が落ちていることが推測される。

図 - 3 はモデル後端部位置の上甲板パネルの船長方向応力 σ_x の船幅方向の分布を示している。図の左端 (150) が船側、右端 (600) が船体中心線位置である。甲板隆起がない上甲板では幅方向にほぼ一般的な応力分布となるはずであるが、ここでは船側部から船体中心線に向かって応力が低下しており、縦

桁位置で少し盛り返すものの、船体中心線ではさらに低下している。この図から上甲板の断面剛性が低下していることが分かる。

3.2 隆起甲板ナックル部の高応力発生メカニズム

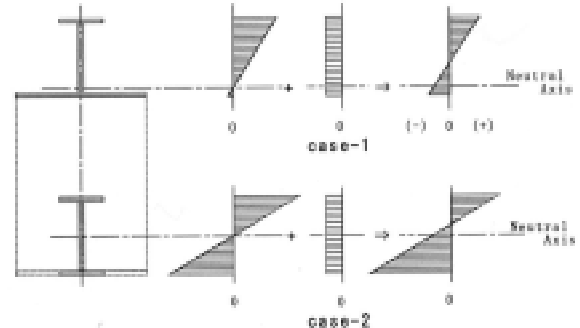


図 - 4 桁のパネルの有効幅減少による曲げ応力の増加模式図

図 - 4 に、桁のパネルの有効幅減少による曲げ応力の増加するメカニズムを模式的に示す。隆起甲板により縦桁はナックル部を持つため、船体縦曲げモーメントによる甲板の軸圧縮 (or 引張り) 荷重により縦桁の曲げ変形が生じる。縦桁に生じる曲げモーメントはナックル部で最大となる。甲板パネルが有効に働く場合は、図 - 4 の case-1 に示すように、甲板縦桁の中立軸は甲板パネルに近いところにあり、縦桁の断面 2 次モーメントも大きく、この曲げによる縦桁基部 (甲板パネルとの接合部) の応力はあまり大きくなる。しかし実際には甲板パネルは甲板縦桁と同じようにナックルを構成しており、軸荷重により面外変形を生じるため、曲げを受ける縦桁の面材としての有効幅が減少する。図 - 4 の case-2 に示すように、パネルの有効幅が狭くなると、甲板縦桁の断面 2 次モーメントは大幅に低下し、中立軸も甲板パネル面から離れる。結果的に曲げモーメントによる縦桁基部の応力は非常に大きくなる。

3.3 上甲板ナックル部の応力分布

図 - 5 にオリジナルモデルの船長方向応力 σ_x の全体モデルの分布を示す。上甲板の後側ナックル部位置で、縦梁、縦桁の位置で船幅方向に応力が増減を繰り返している。図 - 6 に上甲板の縦桁基部の高応力部分の拡大図を示す。甲板との接合部に 19.7kN/cm^2 の高い圧縮応力が生じている。

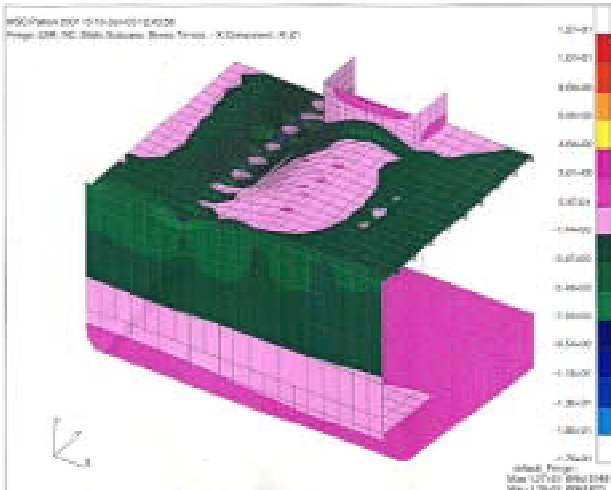


図 - 5 船長方向応力 σ_x の分布 (全体モデル)

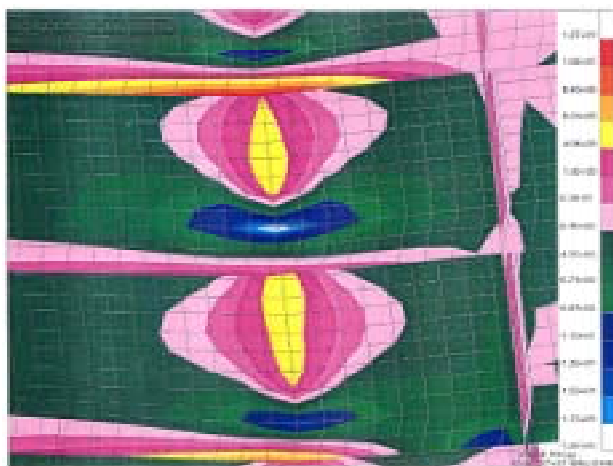


図 - 6 上甲板と縦桁、縦梁の σ_x 応力分布

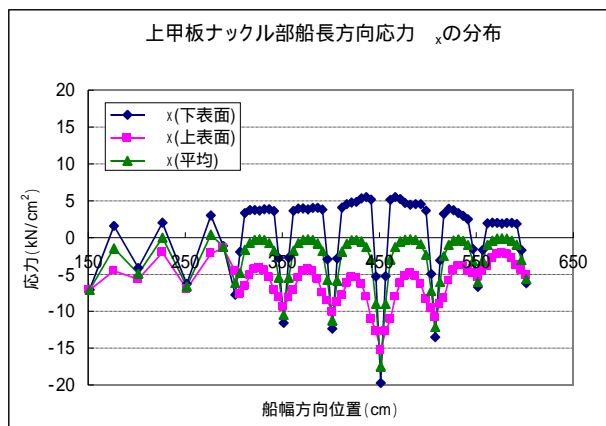


図 - 7 上甲板パネルナックル部応力分布 (船長方向応力 σ_x)

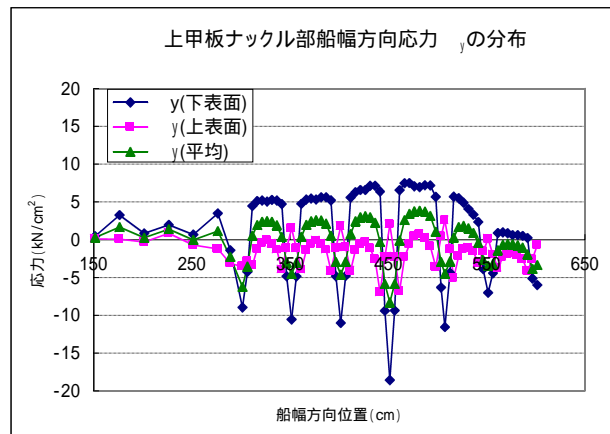


図 - 8 上甲板パネルナックル部応力分布 (船幅方向応力 σ_y)

図 - 7 は同じく上甲板パネルナックル部の船長方向応力の詳細な分布を示す。図の横軸は船幅方向位置を示し、左端 (150) が船側、右端 (600) が船体中心線位置である。板の上下表面と中心の応力値を示す。図に負の応力のピークが 9 点あるが、この位置に縦梁、縦桁が通っている。内側の 4 本の応力が比較的高いが、縦桁の基部の応力が特に高く 19.7kN/cm^2 の圧縮応力が生じている。

図 - 8 は同じ位置の船幅方向応力 σ_y の分布を示す。船幅方向応力もやはり縦桁基部で 19kN/cm^2 の高い圧縮応力が生じている。これは縦桁や縦梁基部でパネルが下側に曲げ変形しているためである。

3.4 上甲板開口部の影響

ハッチ開口部が縦桁ナックル部の応力に影響することが予想されたので、その影響について調べた。

開口部を周囲と同じ板厚、梁部材で塞いだものと、ハッチコーミングを除去したものの計 4 ケースについて比較した。図 - 9 はオリジナルモデル、図 - 10 は開口部を塞いだ場合の von Mises 応力分布を示す。上甲板ナックル部と縦桁の交差部の応力差は 0.9kN/cm^2 と非常に小さかった。表 - 3 に 4 ケースの縦桁基部の応力を示す。この結果から、開口、ハッチコーミングの有無で、ナックル部縦桁基部の高応力は殆ど変化しないことがわかった。

開口部の近くに縦桁とナックル部の交差部があることが、高応力の原因かもしれないという当初の予想はあたらなかった。

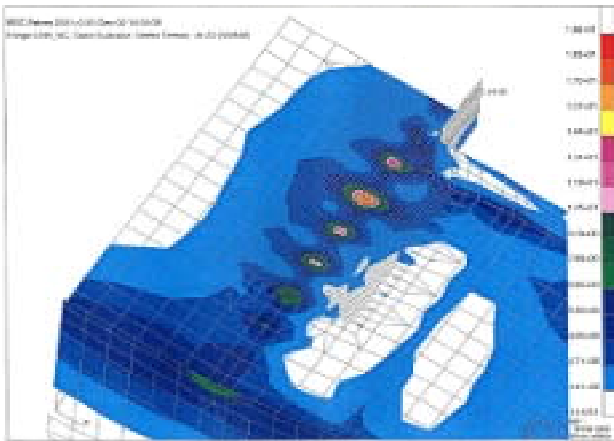


図 - 9 オリジナルモデル von Mises 応力分布
(縦桁基部ナックル交差部応力：19.6kN/cm²)

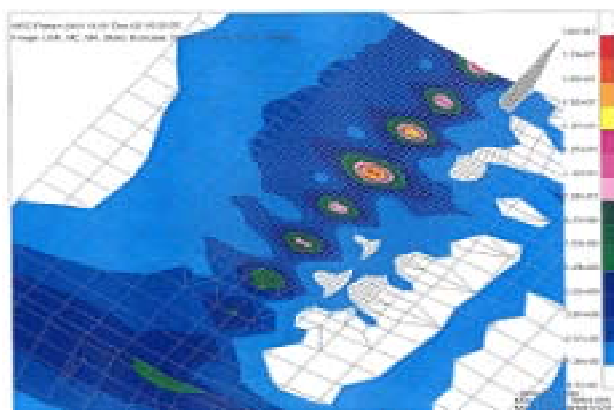


図 - 10 開口閉鎖モデル von Mises 応力分布
(縦桁基部ナックル交差部応力：18.7kN/cm²)

表 - 3 開口、ハッチコーミングの有無による
縦桁とナックル交差部応力の比較

開口	有	無	有	無
H.C.	有	有	無	無
応力	19.6	18.7	20.1	18.9

H.C.：Hatch Coaming

応力：von Mises 応力 単位：kN/cm²

この解析では、モデル前端部に「変形の前後で断面が平面を保つ」という条件で、船体縦曲げモーメント、縦剪断力を与える変位型の荷重設定をしている。そのため開口により局部的に甲板面内の剛性が落ちてても、その部分が分担するはずの荷重が、近くの部材に再配分されることはなく、単にその部分の応力が低下し、その分は全体に平均的に分配されることになる。

開口の有無により縦桁基部と上甲板ナックル部の交点の応力が影響を受けないのは、この変位型の荷重設定法のためかもしれない。

4．損傷対策

4.1 ナックル部損傷

上甲板パネルナックル部の縦桁基部との交線上に高い応力が発生し、これが亀裂損傷の大きな原因になっている。これは遠洋鮪漁船が隆起甲板を有するためである。上甲板ナックル部と縦桁基部に高応力が発生するメカニズムは、3.2節に示すように、ナックル部の甲板パネルが軸荷重により面外変形を生じるために、縦桁の中立軸が移動し、縦桁の断面2次モーメントと断面係数が減少する。そのために上甲板ナックル部に高応力が生じるということである。従って甲板パネルのナックル部付近の面外変形を抑えれば、桁の曲げ剛性を上げることができ、応力を緩和できると考えられる。

図 - 11 に示すように、寸法が 50mm*50mm で板厚が 7mm のアングル材を後側のナックル部から、50mm 離れた前後位置に幅方向に平行に付加した。この防撓材の本数と船幅方向の長さを変えて応力解析を行い、防撓効果を検討した。

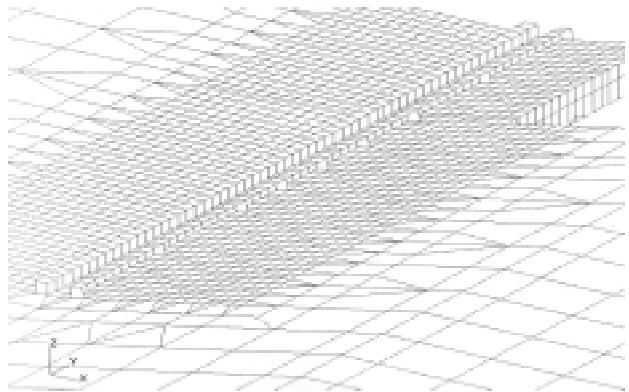


図 - 11 防撓材モデル (50mm*50mm*7mm)

4.1.1 防撓材2列設置

図 - 12 は船側縦桁を中心に左右に3ロング・スペースの範囲に設置している。その結果、縦桁と甲板パネル接合部の最大応力が補強前の約 20kN/cm² から 11.6kN/cm² となり、補強前の約半分に低下した。図 - 13 は同じく2列の防撓材を縦桁を挟んで1ロング・スペースとした場合の計算結果である。

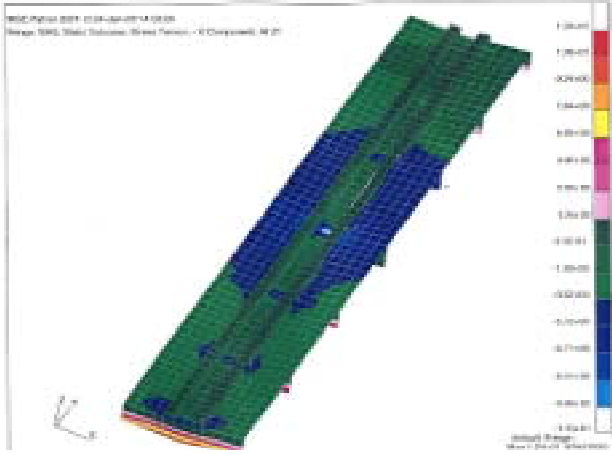


図 - 1 2 上甲板パネルナックル部船長方向応力分布 (防撓材 2 本、縦桁両側 3 ロンジ・スペース)

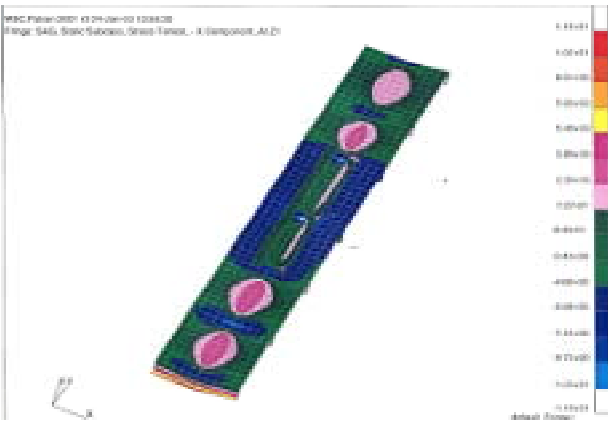


図 - 1 3 上甲板パネルナックル部船長方向応力分布 (防撓材 2 本、縦桁両側 1 ロンジ・スペース)



図- 1 4 上甲板パネルナックル部船長方向応力分布 (防撓材 1 本、縦桁両側 3 ロンジ・スペース)

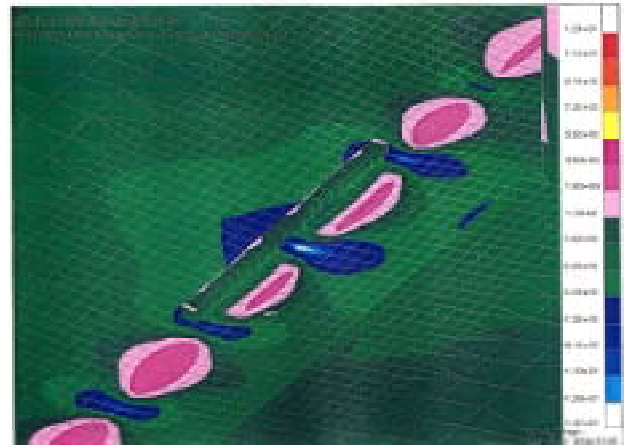


図- 1 5 上甲板パネルナックル部船長方向応力分布 (防撓材 1 本、縦桁両側 1 ロンジ・スペース)

表 - 4 ナックル部防撓材と縦桁基部応力の比較

本数	両側 2	両側 2	後 1	後 1
longi space	両側 3	両側 1	両側 3	両側 1
応力	11.6	11.9	14.2	14.7

応力単位：kN/cm²

最大応力は 11.9kN/cm² となり、縦桁の近傍のパネルの補強で十分であることが分かった。

4. 1. 2 防撓材 1 列設置

次に防撓材をナックル部の船尾側 50mm の位置に 1 列設置した場合を図 - 1 4 に示す。船幅方向には図 - 1 3 と同様に甲板縦桁を中心に 3 ロンジ・スペースの範囲に設置している。最大応力は 14.2kN/cm² であった。

図 - 1 5 は設置幅を 1 ロンジ・スペースとした場合であるが、最大応力は 14.7kN/cm² であり、防撓材 2 列の場合と同様、縦桁の両側のパネルの防撓で十分であることが分かった。

表 - 4 に防撓材の効果をまとめて示す。

図 - 6 の FEM 応力解析の結果に示すように、縦桁基部の応力が約 20kN/cm²、隣の縦梁基部の応力が約 15kN/cm² である。実船では縦桁基部の損傷は多数報告されているが、縦梁基部の損傷報告はないため、応力解析で応力を 15kN/cm² 以下にできれば、疲労亀裂損傷を防止できると考えられるから、防撓材 1 列を縦桁を挟む両側の 1 ロンジ・スペースに補強することで、損傷防止が期待できる。

4.2 船体曲げ剛性の確保

縦肋骨方式の場合、ナックルを有する桁材のパネルが、軸力により面外変形を生じるために面材としての有効幅が減少する。そのため船体縦曲げに対する断面剛性が低下することが明らかになったが、これをナックルを有する縦桁の補強で回復することは現実的ではない。むしろ船側外板上部の増厚や船側上部へ縦強度部材の補強を追加することが考えられる。

図 - 16 に補強の1例として、ナックル部の船側の上甲板から30cm下に幅20cm、板厚15mm、長さ4.8mの補強板を取り付けた図を示す。

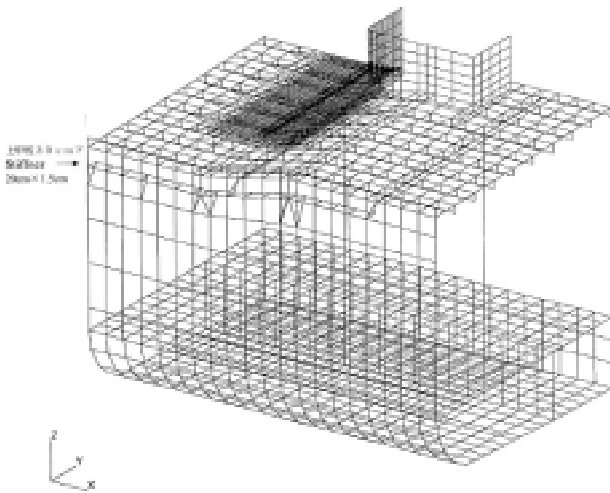


図 - 16 ナックル部補強材及び船側外板スティフナー付きモデル

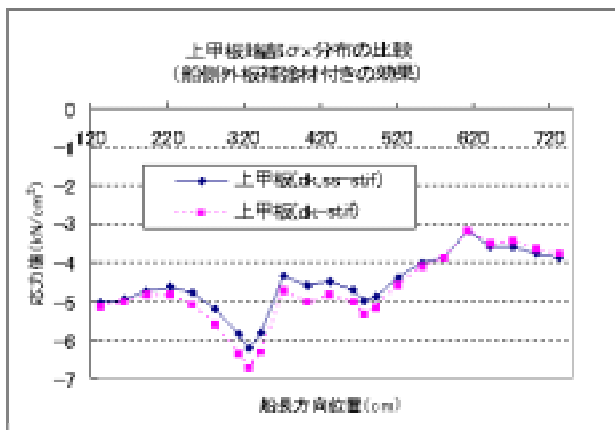


図 - 17 上甲板端部船長方向応力 σ_x 分布の比較 (実線：船側外板補強材付、破線：補強材なし)

図 - 17 は上甲板端部の縦曲げ応力について、船側外板補強材つきの効果を示したものである。図の横軸 320cm の位置にナックル部が存在する。実線が船側外板補強材付き、破線が補強なしの場合である。この補強により応力に高いナックル部の応力が最も大きく低下し、約 0.5kN/cm^2 の応力低下が期待できる。これは約7%の応力低下であり、ある程度の効果が期待できる。

5.まとめ

今回の解析で以下のことが明らかになった。

1. 隆起甲板構造の基本的な特性及び上甲板ナックル部の損傷原因が明らかになった。直接的な損傷原因は、ナックル部の甲板パネルの面外変形による有効幅の減少と、屈曲した縦桁に生じる曲げモーメントによるナックル部の高応力である。

屈曲した縦桁の曲げ変形による上甲板の断面効率の低下は、結果として上甲板舷側部の応力を上げる為、ブルワークや舷門周辺の損傷の原因になりうる。

2. 上甲板ハッチ開口部の有無が、上甲板の応力分布に与える影響は殆どない。

3. 損傷対策としては、甲板パネルナックル部の面外変形を抑えるための防撓材を配置することで、当該部分の高応力を大幅に低下させることができる。

縦桁の後側の甲板パネルのナックルラインに沿って、1ロング・スペース分だけ小さな防撓材を1本設置すれば良い。

4. 船側外板上部にスティフナーを付加することにより、上甲板の応力を緩和することができる。

本報告は、海事局からの受託研究として実施した調査研究の一部である。詳細な構造解析に基づく強度評価を行い、合理的、かつ安価な補強対策を提案した。