

M404 複合荷重をうける船体梁の 最終強度解析法に関する研究

神山 哲也 (指導教員：正岡)

1. 緒言

船体梁断面には一般的に縦曲げ、水平曲げ、垂直剪断力等の複合荷重が生じるため、船体梁の最終強度は、このような複合荷重を考慮して解析する必要がある。そこで、本研究では、縦曲げと垂直剪断力の複合荷重をうける船体梁の最終強度解析法について検討をおこなった。解析方法には、非線形有限要素法を用い、船体断面の形状に依存しない境界条件、荷重条件を設定した。まず、船体梁の簡易モデルを解析対象として縦曲げのみ、縦曲げおよび垂直剪断力が作用する場合について解析を実施した。さらに実船モデルの適用例としてバルクキャリア断面を解析対象として解析を実施し、垂直剪断力が縦曲げ最終強度に及ぼす影響について検討した。

2. 解析方法の概要

船体梁の最終強度の解析方法として非線形有限要素法を用いている。以下にその概要を示す。

2.1 非線形有限要素法

本研究では、大撓みを考慮した弾塑性有限要素法を用いている。解析対象となる船体梁は、幾何学的非線形性と材料的非線形性を考慮した 4 節点アイソパラメトリックシェル要素でモデル化している。要素内の数値積分には Gauss-Legendre 積分を用い、積分点は面内 2×2 点、板厚方向に 6 点の合計 24 点としている。応力は積分点ごとに評価し、塑性判定は von Mises の降伏条件を用い、完全弾塑性体を仮定して解析をおこなっている。非線形方程式の解法として反復解析手法である Newton-Raphson 法を用いている。また、座屈(後)解析においても安定した解を得るために、弧長増分法を用いている。

2.2 多自由度従属拘束による手法¹⁾

本解析法では、境界条件を設定するために多自由度従属拘束の手法を用いている。以下に、その概要を示す。

節点変位ベクトル $\{u\}$ 、節点力ベクトル $\{f\}$ 、剛性マトリックス $[K]$ の間には、(1)式の剛性方程式が成立する。

$$\{f\} = [K]\{u\} \quad (1)$$

ここで、各節点変位ベクトル $\{u\}$ と変位モードベクトル $\{U\}$ の関係を(2)式で表すことができるとする。

$$\{u\} = [T]\{U\} \quad (2)$$

ただし、 $[T]$ は変換マトリックスである。このとき、各節点力ベクトル $\{f\}$ と変位モードベクトル $\{U\}$ に対応する力 $\{F\}$ の関係は、(3)式で表すことができる。

$$\{F\} = [T]^T \{f\} \quad (3)$$

変位、荷重が(2)、(3)で表すことができるので、変位モードに対応する剛性方程式は(1)、(2)、(3)式より(4)式で表すことができる。

$$\{F\} = [K']\{U\} \quad (4)$$

ここで、 $[K']$ は変位モードに対応する剛性マトリックスであり、変換マトリックス $[T]$ を用いて(5)式のように変換することができる。

$$[K'] = [T]^T [K] [T] \quad (5)$$

2.3 曲げモーメントの作用方法

Fig.1 は、曲げモーメントが作用する断面に平面保持の仮定を適用し、曲げの圧縮側が崩壊することで中性軸がシフトすることを考慮した境界条件を示している。いま、荷重を作用させる断面 A-A が回転中心 C まわりに回転し断面 A'-A' となることを考え、断面 A'-A' 内の X 軸方向の節点変位を 2 種類の変位モードの重ね合わせにより表現している。Mode I は断面が平面を保って並進するモードであり、任意の節点 i における変位は変位モード U_i によって表現される。Mode II は断面

が平面を保って回転するモードであり、任意の節点 i における変位は高さ Z_i と変位モード U_R の積によって表現される。この境界条件のもとで、変位モード U_R のみに軸力を作用させれば、解析モデルに曲げモーメントが作用する。

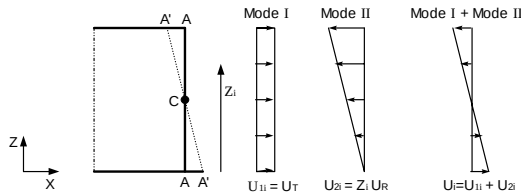


Fig.1 Boundary condition on loaded section

3. 簡易解析モデル

最終強度解析法の検討には、船体梁の簡易モデルを用いた。

3.1 解析対象

西原²⁾の船体梁モデルである単殻構造(MST-3)を解析対象とした。解析対象の寸法をFig.2 に示す。モデルはプレート、スティフナともに板厚は3.05 (mm) であり、 b/t は約 60、防撓板のパネルのアスペクト比は $\alpha = 3$ である。鋼材の材料定数をTable 1 に示す。材料定数についても西原の実験で用いられた値を参照した。

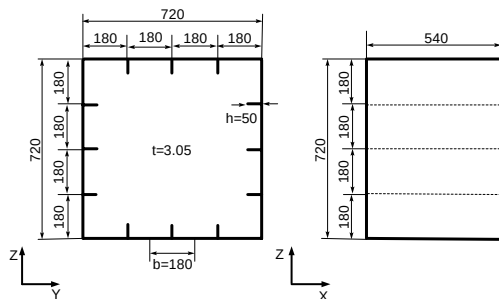


Fig.2 Cross-section and side view of MST-3 model
(unit:mm)

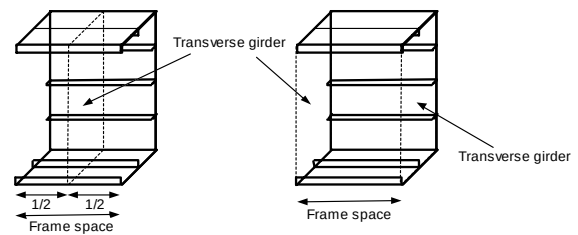
Table 1 Material properties of the model

Yield stress	$\sigma_Y = 287 [\text{MPa}]$
Young's modulus	$E = 207 [\text{GPa}]$
Poisson's ratio	$\nu = 0.277$

3.2 縦方向のモデル化範囲と境界断面

Fig.3 は、解析対象(1/2 断面)のモデル化範囲を示している。(a)はトランス材を挟んで 1/2 フレームスペースずつの 1 スパンをモデル化範囲としたダブルスパンモデルである。一方、(b)はトランス材間の 1 フレームスペースをモデル化範囲とした 1 スパンモデルである。本研究では、この 2 種類のモデル化範囲において検討をおこない、作用する外力とその外力に伴う崩壊挙動を考慮

して、モデル化範囲および境界条件・荷重条件を設定した。



(a) Double half span model (b) One span model between transverse girders

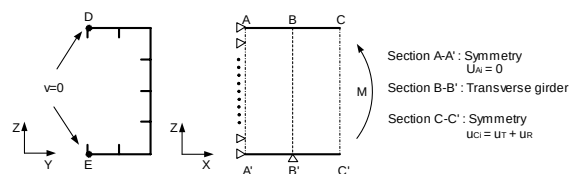
Fig.3 Finite element models
for analyzing hull girder strength

4. 縦曲げ最終強度解析法

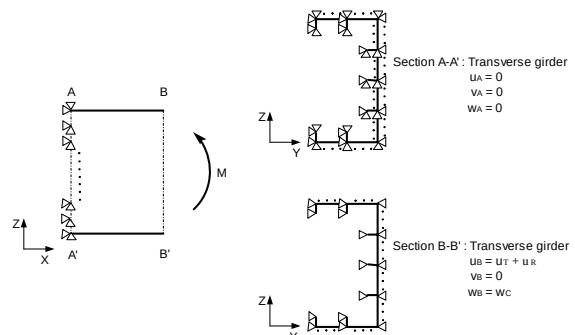
縦曲げ最終強度解析法について検討をおこなった。2 種類のモデル化範囲で解析を実施し、西原の実験値と比較をおこなった。

4.1 境界条件および荷重条件

Fig.4 は、縦曲げのみが作用する場合における境界条件および荷重条件を示している。



(a) Double half span model



(b) One span model between transverse girders

Fig.4 Loading and boundary conditions of analyzed model under pure bending

(a)はダブルスパンモデル、(b)は 1 スパンモデルの条件である。(a)は断面A-A'においてX軸方向の変位を固定し、断面C-C'においては並進モード u_T 、回転モード u_R により曲げを作用させた。トランス材部における断面は、プレート、スティフナが直線を保つようにしている。また、全断面において節点D,E のY軸方向の変位 v を固定し、モデル両端の境界断面において対称条件を加えてい

る。(b)は断面A-A'においてX,Y,Z方向のすべての変位を固定としている。断面B-B'においては、並進モード u_T 、回転モード u_R により曲げを作用させた。また、Z軸方向の変位は、曲げによる撓みを w_C として、断面B-B'内のすべての節点で変位を w_C としている。

4.2 縦曲げ最終強度解析結果

Fig.5 は、モデル化範囲(a),(b)における解析結果であり、曲げモーメントと曲率の関係を示している。曲げモーメントと曲率は全塑性時の値で無次元化している。一点鎖線は西原がおこなった2回の実験の最大曲げモーメントである。実線は1スパンモデル、破線はダブルスパンモデルの解析結果である。解析結果の最終強度値と西原の実験値は比較的良好一致を示すことがわかる。これにより、縦曲げのみの場合における解析手法が確立できたと言える。

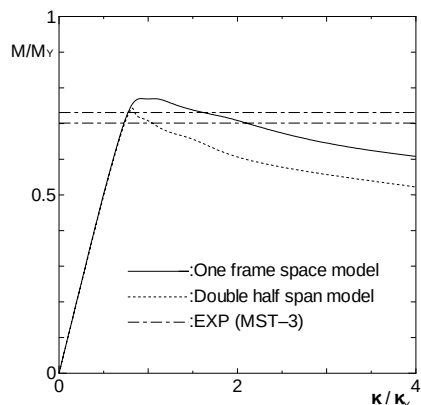


Fig. 5 Bending moment-curvature curves of MST model with each modeling-range

5. 縦曲げおよび垂直剪断力の複合荷重が作用する場合の最終強度解析法

縦曲げ最終強度解析法を剪断と曲げの複合荷重の場合に拡張し、剪断力と曲げモーメントの比率を変えて解析をおこない、垂直剪断力が縦曲げ最終強度に及ぼす影響について調べた。

5.1 垂直剪断力と曲げモーメント

Fig.6 は、各荷重条件におけるモデルの剪断力分布および曲げモーメント分布を示している。(a)は、純曲げ状態、(b)は、純剪断状態、(c)は、曲げおよび剪断の複合荷重状態を表している。ここで、(b)に示す純剪断状態は、モデルの平均曲率がゼロ、すなわち平均曲げモーメントがゼロとなる状態としている。通常、梁に剪断のみを作用させることはできなく、系が安定するためには剛体回転を拘束するために曲げモーメント M_S が作

用する。(c)に示す複合荷重状態において、モデルに作用する曲げモーメントは曲げ(a)による成分と剪断(b)による成分の合モーメントとなる。本解析で得られた結果を評価する際、垂直剪断力は F の値を、曲げモーメントは、モデルの平均曲げモーメントである M の値を用いている。

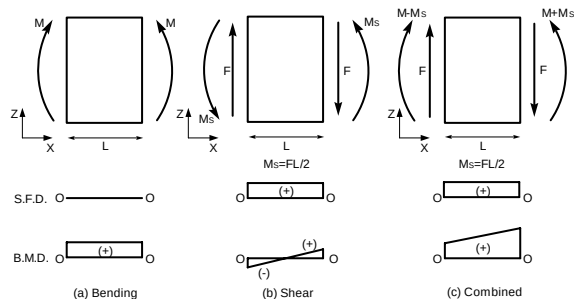


Fig.6 Loading condition, and S.F.D. and B.M.D. under each loading

5.2 境界条件および荷重条件

Fig.7 は、曲げと剪断の複合荷重をうける場合の境界条件および荷重条件を示している。縦曲げのみの場合の1スパンモデルとほぼ同様の境界条件である。剪断力は、断面B-B'内のすべての節点におけるZ軸方向の変位を剪断成分と曲げ成分の撓みの合計 w_S としている。荷重条件は、剪断については断面B-B'のZ軸方向変位 w_S に力作用させている。また、断面A-A'には、反力が働くため、モデルには剪断力および曲げモーメントが作用する。

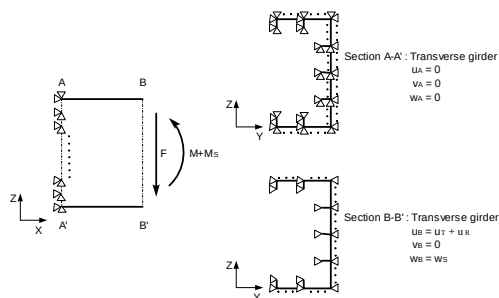


Fig.7 Loading and boundary conditions of analyzed model under bending and shear

5.3 最終強度解析結果

Fig.8 は、剪断および曲げの複合荷重をうける西原の船体梁モデルの初期降伏時および最終強度時における垂直剪断力と曲げモーメントの相関関係を示している。縦軸は曲げモーメントを全塑性時の曲げモーメント $M_Y=417.1$ [kNm]により無次元化した値を表し、横軸は垂直剪断力をモデルの縦材のみがすべて剪断降伏した時の剪断力 $F_Y=468.3$ [kN]により無次元化した値を表している。剪断の比率が大きくなるのにもない、初期

降伏時の強度は直線的に減少し、最終強度は曲線的に減少していることがわかる。

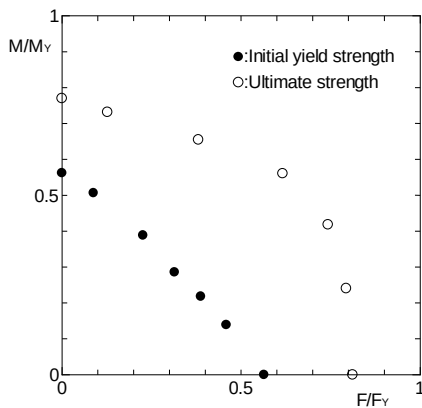


Fig.8 Correlationships between shear force and bending moment at initial yield and ultimate strength

6. バルクキャリアの最終強度解析

本研究で検討した曲げと剪断の複合荷重が作用する最終強度解析法を用い、バルクキャリアの最終強度解析を実施し、検討をおこなった。

6.1 解析対象

解析対象としたバルクキャリアの横断面を Fig.9 に示す³⁾。スティフナはすべてフラットバースティフナとして解析した。鋼材のヤング率は $E=205.8$ [GPa]、ポアソン比は $\nu=0.3$ 、また、トランスバースフレームスペースを $L_{tr}=2610$ [mm]とした。

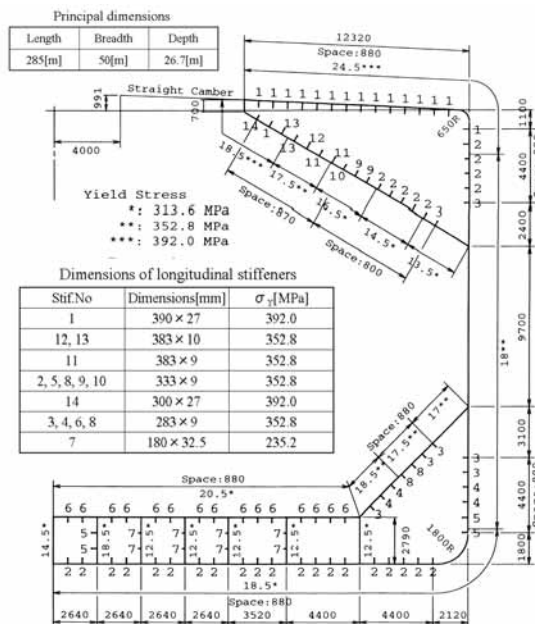


Fig.9 Cross-section of bulk carrier

6.2 バルクキャリアの最終強度解析結果

バルクキャリアの最終強度解析結果を Fig.10 に示す。実線は縦曲げのみの場合、破線は縦曲げ

と剪断の複合荷重の場合における解析結果である。また、1 点鎖線は全塑性モーメント $M_y=9.97$ [MNm] である。縦曲げは船底が圧縮、甲板が引張となるホギング状態として解析した。また、複合荷重の場合における縦曲げモーメントと垂直剪断力の比率は $(M+M_s)/(FL_{tr}) = 15.3$ とした。

縦曲げ最終強度は全塑性モーメントとほぼ一致し、複合荷重の場合の最終強度は縦曲げ最終強度と比べて 24.7%低下した。剪断が作用する場合、船側外板、ホッパータンク斜板、トップサイドタンク斜板および二重底内部の縦桁に高い剪断応力がはたらき、はやい段階で全塑性状態となるため、最終強度が低下したと考えられる。

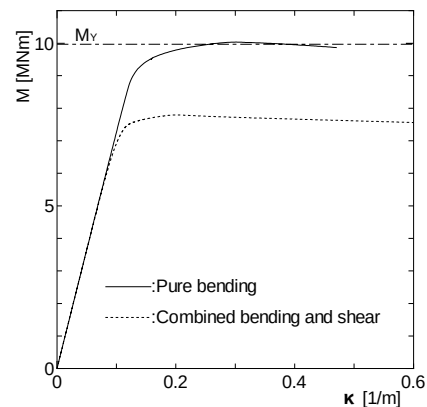


Fig. 10 Bending moment-curvature curves of bulk carrier

7. 結言

本研究では、縦曲げと垂直剪断力の複合荷重をうける船体梁の最終強度解析法について検討をおこない、以下の結論を得た。

1. 境界断面において断面の平面保持の仮定を適用し、縦曲げ崩壊に伴う中性軸の移動を考慮した最終強度解析法を確立した。
2. トランス材間の 1 フレームスペースをモデル化範囲とすることで、縦曲げと垂直剪断力の複合荷重の最終強度解析法を確立し、その有効性を示した。
3. 本解析法によりバルクキャリアの最終強度解析をおこない、剪断力の影響により最終強度が低下することを示した。

<参考文献>

- 1) 正岡孝治, 岡田博雄, 上田幸雄: 連続性を考慮した矩形パネルの剪断座屈崩壊について, 日本造船学会論文集, 第 181 号, 1997, pp.333-340.
- 2) 西原: 防撓矩形板の最終強度解析(第 4 報)―船体崩壊曲げモーメントについて―, 日本造船学会論文集, 第 154 号, 1983, pp.367-374.
- 3) ISSC 2000 Special Task Committee vi.2: Ultimate

hull girder strength. 321-391.