油槽船の波浪中船体横強度解析について

正員 永 元 隆 一* 正員 船 岡 宏一郎*
 正員 松 山 道* 正員 末 岡 英 利*
 正員 田 口 義 明** 正員 湯 原 哲 夫**

On the transverse strength of oil tanker in irregular seas

by Ryuichi Nagamoto, *Member* Koichiro Funaoka, *Member*
 Michi Matsuyama, *Member* Hidetoshi Sueoka, *Member*
 Yoshiaki Taguchi, *Member* Tetsuo Yuhara, *Member*

Summary

The techniques of structural analysis of a ship hull, namely, the theoretical estimation of ship motion and wave-induced dynamic pressure and the statistical estimation of ship responses, are generally accepted as very useful tools, and reports have been made on long term distributions of wave-induced dynamic pressure, longitudinal stresses of a ship hull, etc. in irregular seas.

The authors have made an attempt at the total analyzing system on the transverse strength of an oil tanker in order to rationalize the technique of the ship structure analysis. The system involves many consistent programs concerned with ship motion, wave-induced dynamic pressure, overall structural analysis of tank part and statistics.

The present paper gives an outline of the system and examples of calculation. This method will be utilized to improve initial design calculations and to make ship structures safer by introducing the knowledge gained by analysis of actual ships with this system.

1 緒 言

船体にとってその構造強度は、積荷および乗務員の安全にかかわる重要な条件であり広く研究が行なわれてきている。最近の研究としては、各分野における解析理論の精密化と電子計算機の大形化・高速化によって初めて可能となった船体構造解析トータルシステムの開発がある^{1),2),3)}。これらのトータルシステムは、海洋波中を航行する船体に生じる応力値の異常値を予測するもので、規則波中における船体運動、変動荷重、船体強度部材の応力解析を行ない、更に不規則波中の統計解析まで一貫して計算するものである。

構造設計に当っては縦強度、横強度および局部強度等に分けて検討するのが一般的であるが、その縦強度および横強度計算においては、船体に生じる応力値を求めるのに、不規則波浪中における変動荷重のある長期予測値を設計荷重とし、その設計荷重によって生じる応力値と、就航船の損傷実績等から設定された許容応力との関係から、強度部材の寸法を決定している。船体構造解析

の精密化のためには、このような設計荷重を用いた計算結果と各種の波浪条件下の応力値そのものの長期予測結果との関係について検討しておく必要がある。またこの設計荷重を設定する場合、縦強度と横強度とは設定する荷重の確率レベルが異なっているのではないかという点も指摘されており⁴⁾、これらの点についても検討を進めておく必要がある。

先に著者等はまず縦強度トータルシステムを開発し従来の縦強度計算法の検討を行なった²⁾。さらに今回、同様の考えにもとづき横強度トータルシステムを開発し、20 万 DWT 級タンカーを供試船として計算およびいろいろの検討を行なった。本論文はそのうちシステムの概要、解析方法、計算結果の一部とその考察をとりまとめ報告する。また波浪変動圧の長期予測値を用いた簡易計算を行ない本トータルシステムによる結果との比較についても述べている。

2 横強度解析トータルシステムの概要

本システムの概要は Fig.1 に示すように大別して三つの計算過程で構成されている。

(1) Phase ①：規則波中における船体運動計算、波

* 三菱重工業(株)長崎造船所

** 三菱重工業(株)長崎研究所

浪外力計算を行ない船体構造解析に必要な時々刻々の外荷重を求める。

- (2) Phase Ⅱ: 時々刻々の作用荷重に対して立体強度計算を行ない、船体構造部材の応答の時間的変動および応答振幅を求める。
- (3) Phase Ⅲ: 各規則波中での応答関数と、波浪スペクトル、海象データを用いて不規則波中での応答の短期および長期の予測値を求める。

Phase Ⅱはばう大な荷重ケース数の計算を効率よく処理しさらに非対称荷重の立体強度計算を可能ならしめるために新たにプログラムを開発したもので、Phase ⅠおよびⅢは従来、他の研究で別途開発されたプログラムを本システムに組込んだものである。

Fig. 1 Flow chart of total analysis system

3 計 算 法

3.1 船体運動および波浪外力

船体運動計算には福田、田才等の Ordinary strip method を用いた。なお Roll damping については、半ば実験的に非線形の影響を考慮している^{2),5)}。船体運動の解が得られれば、次に流体力および慣性力に moment lever を掛けて端部から積分することにより任意断面の水平方向および垂直方向の船体曲げモーメントが計算される。また、田才の理論を用いて福田と著者等が展開した方法により⁶⁾ 船体表面に働く変動水圧が計算される。このようにして得られた船体運動加速度はタンク内変動圧に変換され、また水平方向および垂直方向の曲げモーメントは構造解析対象部両端の境界モーメントとして用いられる。

3.2 船体構造解析

(1) 計算法の概要

船首、船尾部を除くタンクパート全体の計算ができるようにすることと計算費用の低減を考慮して、ここでは油槽船の立体強度計算法⁷⁾を、両舷を含めた全体構造について船体の垂直曲げ、水平曲げ解析が行なえるように拡張して使用した。これにより左右舷の非対称荷重およびラッキングの影響をも計算できるようになった。

主縦強度部材のモデル化の例を Fig.2 および Fig.3 に示している。横桁および横隔壁で相互に連結された合成梁の計算によって、主縦強度部材間の垂直方向および水平方向の相対変位が求められる。横桁の解析は変断面梁の面内骨組計算によった。また横桁コーナー曲り部の応力計算は楔理論によった。

Fig. 2 Longitudinal members for the vertical bending

Fig. 3 Longitudinal members for the horizontal bending

(2) 荷重ベクトル

一般に規則波中における横桁の構造応答の時間変動は完全な正弦波形にならないので、各瞬間ごとの値を求め適当な方法で統計解析のための応答関数を計算する必要がある。従って荷重ケース数が非常に増大するので、単位荷重に対する影響係数をあらかじめ求めておき荷重ベクトルとの重ね合せによって規則波中での応答を計算することとした。その場合の荷重ベクトルとしては、船体運動計算から得られた5成分の運動加速度（前後揺は省略している）と、構造解析対象部の前後端に作用する境界曲げモーメント、および船体外表面に作用する水圧荷重（静水圧+波浪変動圧）から成っている。運動加速度5成分によるタンク内圧は、タンク中央点の垂直・左右方

Fig. 4 Distribution of internal dynamic pressure due to ship motion

Fig. 5 Patterns and the combination of unit load for external pressure

Fig. 6 Boundary condition of the transverse frame analysis

Fig. 7 Coordinate system

向の加速度に対するタンク内変動圧が Fig. 4 に示すように分布するものとして与えている。勿論、縦揺および横揺の場合の船体傾斜に対するタンク内圧の静的変化分については考慮している。船体外表面の水圧荷重については船体外表面を長さ方向にはタンク長さ、横方向には、Fig. 5 のように、船底を 3 分割、船側を 6 分割した矩形の領域に分け、その各領域について単位水圧荷重を設定した。なお各領域内での船体長さ方向の水圧分布は一樣分布を仮定している。

(3) 横桁の面内骨組計算

横桁を構成する各部材は剛体部、変断面部および一様断面部から成るものとし、下記のような条件の下で面内骨組解析を行なう。

- (a) Fig. 6 のように主縦強度部材相当位置で個々に単位変位を与える場合。
 (b) Fig. 5 のように主縦強度部材位置の変位を拘束して単位分布荷重を加える場合。

前者の支点反力を $R_{ij}^{(1)}$ (j 点に単位変位を与えたとき i 点に生じる反力)、後者の場合の i 点の反力を $R_i^{(2)}$ で表わすと、これらは横桁によって相互に結合された主縦強度部材すなわち合成梁に対する等価な分布力に置換される。これに関しては次に述べる。

(4) 主縦強度部材の相対変位計算

垂直曲げ、水平曲げにおける主縦強度部材の相対変位計算理論には、部材数の違い以外に本質的な差はないのでここでは一般的な形で説明する。座標系と符号の定義を Fig. 7 に示している。

主縦強度部材 i に関する部材力と変位の関係は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \text{せん断力と変形: } S_i &= GA_{st} \left(\frac{dz_i}{dx} - \varphi_i \right) \\ \text{曲げモーメントと曲率: } M_i &= -EI_i \frac{d\varphi_i}{dx} \\ \text{軸力と軸方向変位: } N_i &= EA_i \frac{du_i}{dx} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

前項で述べた横桁の支点反力 $R_{ij}^{(1)}$, $R_i^{(2)}$ は主縦強度部材に集中荷重として負荷されるものであるが、横桁間隔 L_f で除して船体長さ方向に分布する荷重に置換している。従って平衡条件式は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dS_i}{dx} &= \sum_j z_j R_{ij}^{(1)} / L_f + R_i^{(2)} / L_f - w_i \\ \frac{dM_i}{dx} &= S_i + e_{iu} q_{iu} - e_{iL} q_{iL} \\ \frac{dN_i}{dx} &= -q_{iu} - q_{iL} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

e は中立軸からの距離、 w は単位長さ当りの自重を表わしている。 q_{iu} , q_{iL} は Fig. 7 に示すように甲板または外板に作用する単位長さ当りのせん断力であって、主縦強度部材間の x 方向変位 u および回転角 φ の差によって表わされる。

以上を整理して、 z , dz/dx , φ , $d\varphi/dx$, u , du/dx で表わされた主縦強度部材の基礎方程式が得られる。なお横隔壁の位置では、主縦強度部材は横隔壁のせん断変形パネによって相互に支持されており、また横隔壁に作用するタンク内圧荷重は軸力や曲げモーメントの平衡条件に考慮されている。前後端の境界条件は、上下曲げの場合両舷の side shell 位置で、水平曲げの場合には船底

および甲板位置で単純支持としている。荷重ベクトルの一つである端部の境界曲げモーメントは、各主縦強度部材の断面二次モーメントに比例して配分し負荷した。なお、これらの解析法の詳細は参考文献 7) に示した方法と同様である。

以上により、各単位荷重に対する主縦強度部材の相対変位計算および横桁の平面骨組計算結果から、各部の部材力、応力、変位等の影響係数が得られる。別途、船体運動計算、変動水圧計算で求められた荷重ベクトルと掛け合わせるによって、構造応答の瞬間の値が得られる。統計解析に用いる構造の応答関数は、出合周期を n 等分した (n は最大 12 まで) 各瞬間の値を (3) 式のように最小二乗近似して求めている。

$$\left. \begin{aligned} f(t) &= a \sin \omega_e t + b \cos \omega_e t + c \\ \text{振幅} &= \sqrt{a^2 + b^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

統計解析の方法は文献 8) の方法によった。

4 供試船と計算条件

計算例として採用したタンカーの主要目を Table 1 に、積付状態を Fig. 8 に、また Fig. 9 には供試船の船体中央断面の寸法を示している。規則波中での各応答関数の計算条件は以下の通りである。

- (1) 積付状態 Full load condition
- (2) 波高 (H_w): 10 m
- (3) 船速 (F_n): 0.15 (フルード数)
- (4) 出合角 (χ): $0^\circ \sim 180^\circ$ (30° 間隔)
- (5) 波長: $\sqrt{L/\lambda} = 0.6 \sim 1.8$ (0.2 間隔)
- (6) 波スペクトラム: ISSC スペクトラム
- (7) 波浪発現頻度: 北大西洋の Walden の資料

Table 1 Main particulars of oil tanker

Length between perpendiculars (L)	310.00 m
Breadth moulded (B _s)	48.71 m
Depth moulded (D)	24.50 m
Draught (d _s)	19.00 m
Displacement (W)	250,536 t
Block coefficient (Cb)	0.8519
Midship coefficient (Cm)	0.9947
Water plane area coefficient (Cw)	0.9031
Center of gravity from midship (X _G)	10.26 m
Center of gravity below water line (Z _G)	5.47 m
Metacentric radius (GM)	6.28 m
Longitudinal gyradius (K _L)	0.2494L
Transverse gyradius (K _T)	0.3231B.
Rolling period (T _r)	14.0 sec.

Fig. 8 Loading pattern

Fig. 9 Midship section

5 計算結果および考察

5.1 波浪変動圧とタンク内圧の変動について

航行中船体に作用する荷重は、波浪および船体運動によっておこる波浪変動圧とタンク内圧であるが、従来、横強度を考える場合これらの荷重の同時性を厳密に考慮したものは少なく、これらの荷重の severe なものどうしの組合せあるいはタンク内変動圧を無視するなどの形で処理されている。このトータルシステムでは、それぞれ時々刻々の荷重分布を求め、現象に忠実に荷重を作用させている。その一例として、 $\sqrt{L/\lambda}=1.0$ なる真横波 ($\chi=90^\circ$) 中で、船体中央断面近くの横桁に作用する波浪変動圧およびタンク内圧の時間変動を Fig. 10 に示している。center tank の内圧は計算の仮定上 rolling 加速度に依存せず、またこの波の条件下では他の加速度成分による内圧変動が小さいので、結果的には rolling 傾斜角の変動分の影響が支配的になっており、波浪変動圧とタンク内圧の位相はほぼ一致して互いに打消し合う作用をしている。

5.2 垂直・水平方向の相対たわみについて

立体構造の影響として主縦強度部材間に垂直・水平方向の相対たわみを生じ、この相対たわみによって横桁に応力が誘起される。

船体中央断面近傍の横桁位置における、規則波中での縦通隔壁間の垂直方向相対たわみの応答関数を Fig. 11 に、また垂直・水平方向相対たわみの長期予測値を Fig. 12 に示している。これによれば、両舷対称な荷重条件を用いる従来の横強度計算では現われなかった縦通隔壁

Fig. 10 External and internal fluctuating pressure in a wave period

Fig. 11 Relative deflection between longitudinal bulkhead in regular wave

間の垂直方向相対たわみの変動が最も大きくなっている。

水平方向相対たわみは小さく、 10^{-8} 確率レベルでもたかだか 4mm 程度である。なお本船の場合、船底と甲板間の水平方向相対たわみ 1mm によって舷側タンクの side trans 面材に誘起される直応力は約 0.5 kg/mm^2 程度である。従ってラッキング現象は大略無視してよいと考えられる。

5.3 波浪中横強度部材に生ずる変動応力について

横桁に生じる応力は静水圧、波浪変動圧、タンク内圧等の直接荷重によるものと、相対たわみによって誘起されるものから成っているが、直接荷重の内、静水圧に波浪変動圧を加えた値が負圧になる部分では荷重を零としているので、横桁の応力の時間変動は必ずしもきれい

Fig. 12 Long-term distribution of relative deflection

な正弦波形にならない。これは水線面近傍の構造部材に顕著に現われる。Fig. 13 は $\sqrt{L}/\lambda = 1.0$, $\chi = 90^\circ$ (真横波) の場合の weather side における side trans. および縦通隔壁付 vertical web のスパン中央位置での面材の直応力の時間変動を示している。その規則波中応答関数を Fig. 14, Fig. 15 に示している。また、その短波頂不規則波中における長期予測値は Fig. 16, Fig. 17 のようになる。これによれば、例えば波浪変動圧の影響が大きい side trans. では、 $\chi = 90^\circ$, 120° 等の出角で相対的に大きな応力を生じる傾向が見られる。また縦通隔壁付 vertical web の応力は $\chi = 30^\circ$, 60° , 120° 等で大きくなっている。このように部材位置によって応力が大きくなる波の条件が変化することが考えられ、従って横桁の応力にどのような単一波がもっとも大きな影響を及ぼすかは、もう少し詳細な検討が必要である。

5.4 簡易計算法との比較

横強度に関してはいろいろの簡易計算法が考えられるが、ここでは下記のような横桁の平面骨組計算による簡易計算とトータルシステム計算との比較を行なった。

- (1) 垂直・水平方向の相対たわみは零とする。
- (2) タンク内圧の変動成分は無視する。
- (3) 外圧は長期予測された波浪変動圧と静水圧を考慮する (ここでは 10^{-4} 確率レベルの波浪変動圧を用いた)。
- (4) 外圧が最大および最小となる 2 種類の荷重状態における応力値から、応力振幅を求める。

Fig. 18 に $Q = 10^{-4}$ 確率レベルの横桁面材直応力を比較している。各部材の応力振幅は center tank の横桁を除き比較的よく一致した応力分布となっており、このような簡易計算法でもかなりよい近似を与えるようで

る。center tank の横桁については、相対変位、タンク内変動圧の影響によって差を生じたものと考えられる。今回は満載状態における結果のみであるので、今後バラスト状態における解析を実施し相対変位、タンク内変動圧の影響を簡易計算法の精度向上をはかる上で検討していく必要がある。

Fig. 13 Stress profile in a wave period

Fig. 14 Stress amplitude in regular wave of 10m wave height

Fig. 15 Stress amplitude in regular wave of 10m wave height

Fig. 16 Long-term distribution of normal stress in face plate

Fig. 17 Long-term distribution of normal stress in face plate

6 結 言

油槽船の波浪中における船体横強度を解析するために、規則波中船体運動計算から構造応答の統計解析にいたる一貫計算プログラムを作成した。これによって、相対たわみ、波浪変動圧、タンク内圧等の時間変動を考慮したタンクパート全体の構造解析を行ない、不規則波中の応答を推定できるようになった。ここでは横強度ト

Fig. 18 Distribution of normal stress amplitude calculated by total system and approximate method

タルシステムの概要と、20万DWTタンカーに対する水平方向・垂直方向相対たわみや横桁に生ずる応力の長期予測値、簡易計算法との比較例などについて述べた。

今後はこれらトータルシステム計算結果を基にして波浪中において横強度部材に誘起される応力の諸検討を行なうとともに、さらに精度の高い横強度簡易計算法を検討する予定である。最後に本システムの開発、計算結果の検討に際して、終始有益な御討論をいただいた日本造船研究協会第134部会の委員の方々に対し厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 秋田好雄 他：船体縦強度解析に関するトータルシステム，日本造船学会論文集，第135号（1974）
- 2) 永元隆一，愛川展功，塚本修，松山道：波浪中の船体縦強度解析および縦強度に関する考察（油槽船について），西部造船会々報，第51号（1976）
- 3) 秋田好雄 他：船体横強度のトータルシステムについて，日本造船学会論文集，第139号（1976）
- 4) 福田淳一 他：波浪中の船体に働く変動水圧の設計値推定，西部造船会々報，第49号（1975）
- 5) 藤井齊，高橋雄：斜め波中における船体運動，変動水圧の計算法に対する実験的検証，西部造船会々報，第49号（1975）
- 6) 福田淳一 他：波浪中の船体運動と船体表面に働く変動水圧及び横強度に関する理論計算，日本造船学会論文集，第129号（1971）
- 7) 森 他：On the transverse strength of oil tanker，造船協会論文集，第121号（1967）
- 8) 福田淳一：船体応答の統計的予測，耐航性に関するシンポジウム（昭和44年）