(昭和 50 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

波浪中の船体に働く 垂直曲げモーメントの設計値推定

正員 新 開 明 二*

Estimating the Design Values of Vertical Bending Moment
Induced on the Ship Hull in Waves

by Akiji Shinkai, *Member*

Summary

The statistical predictions of vertical wave bending moment were made for a gigantic oil tanker of 310 meters length and the similar ships of different lengths, in order to find out the long-term trends of vertical wave bending moment and to examine the design values of those.

Firstly, the response functions of vertical wave bending moment were calculated by the aid of the modified strip theory. Then, the standard deviations of vertical wave bending moment for different short-term sea conditions were evaluated based upon the linear superposition theory, by using the calculated response functions and the formulated wave spectra for given sea conditions. Finally, the long-term predictions of vertical wave bending moment were determined by using the obtained standard deviations of vertical wave bending moment for the individual short-term sea conditions and the wave statistics of the North Atlantic Ocean.

According to the systematic prediction works, the longitudinal distributions of vertical wave bending moment predicted with the exceeding probability of 10^{-8} are investigated in relation to the ship speed and heading angle, and the predicted results were compared with the design values of vertical wave bending moment given by the different classification societies.

1 緒 言

船体縦強度設計においては、船の大型化と船体構造の合理化のために垂直波浪剪断力及び曲げモーメント、水平波浪剪断力及び曲げモーメント、波浪振りモーメント等の波浪荷重について、その設計値の推定が必要になっている。福田等¹⁾は巨大型油送船を計算適用例として、船体に働く垂直波浪剪断力の応答関数の計算、標準偏差の計算、長期予測計算を実施し、これらの計算結果より垂直波浪剪断力設計値推定のための資料を得ている。

そこで、本論文においては、文献 1) で採用された巨大型油送船を計算適用例として、船体に働く垂直波浪曲げモーメントに関して長期予測等を実施して、その設計値推定に関する検討を行なった。

縦強度設計において垂直波浪曲げモーメントが特に重要視されてきたので、垂直波浪曲げモーメントに関する研究は多数報告されている。福田等^{2,3)}による規則波中の高速艦艇及び大型油送船に働く垂直波浪曲げモーメントの計算、島田等⁴⁾による大型油送船に働く垂直波浪曲げモーメントの規則波中及び不規則波中の計算が注目される。また、長期予測に基づいて垂直波浪曲げモーメントの荷重設計値を定めようと試みた研究としては、Nordenström⁵⁾、Abrahamsen^{6,7)}、福田^{8,9,10)}、Lewis¹¹⁾等の研究報告がある。最近、佐藤等¹²⁾は幅広巨大船の構造強度を検討するに際して垂直波浪曲げモーメントの長期予測を行なっている。

しかしながら、以上の多数の研究報告がなされているにもかかわらず、最大値が生じると考えられる船体中央断面に働く垂直波浪曲げモーメントに関する研究が主となっており、垂直波浪曲げモーメントの船長方向分布が

* 九州大学大学院工学研究科

検討されている報告でも、長期予測に基づく荷重設計値の船長方向分布、船速及び波に対する迎角の影響、船型の大きさの影響等の性質を解明するには不十分であると思われる。本論文においては、船長 310m、載荷重量 21 万トンの巨大型油送船について、規則波中の垂直波浪曲げモーメント応答関数の計算、短期不規則波中の垂直波浪曲げモーメント標準偏差の計算、北大西洋における垂直波浪曲げモーメント長期予測計算を実施し、さらに本船型と船長の異なる相似船型を仮定して同様の計算を実施し、これらの計算結果より垂直波浪曲げモーメント設計値の推定に関する検討を行なっている。

2 計 算 方 法

2.1 規則波中の船体に働く垂直波浪曲げモーメント

規則波中において、船が波の進行方向に対して一定の平均針路を保ち一定速度で航行している場合を考えると、線形ストリップ理論を斜波中に拡張応用した計算法^{13,14)}によって、まず、上下揺と縦揺の連成運動方程式を解き、次に、その上下揺と縦揺の解を用いて船体の長さ方向任意の位置の断面に働く垂直波浪曲げモーメントを求めることができる。

すなわち、上下揺 ζ と縦揺 ϕ の運動方程式は次式のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} A_{11}\ddot{\zeta} + A_{12}\ddot{\phi} + A_{13}\dot{\zeta} + A_{14}\dot{\phi} + A_{15}\phi + A_{16}\phi &= F_{\zeta} \\ A_{21}\ddot{\zeta} + A_{22}\ddot{\phi} + A_{23}\dot{\zeta} + A_{24}\dot{\phi} + A_{25}\phi + A_{26}\phi &= M_{\phi} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

上下揺と縦揺の解は、運動方程式 (1) を解いて次式の形で得られる。

$$\left. \begin{aligned} \zeta &= \zeta_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_{\zeta}) \\ \phi &= \phi_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_{\phi}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、

ζ_0, ϕ_0 : amplitudes of heave and pitch

$\varepsilon_{\zeta}, \varepsilon_{\phi}$: phase angles of heave and pitch

ω_e : circular frequency of wave encounter

t : time

(2) で得られた運動の解を用いて垂直波浪曲げモーメントを計算すれば、次式の形で求められる。

$$M = M_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_M) \quad (3)$$

あるいは、

$$[M/h_0] = [M_0/h_0] \cos(\omega_e t - \varepsilon_M) \quad (4)$$

ただし、

M_0 : amplitude of vertical wave bending moment

ε_M : phase angle of vertical wave bending moment

h_0 : amplitude of surface wave

2.2 不規則波中の船体に働く垂直波浪曲げモーメント

有義波高 H 、平均波周期 T の短期不規則波浪海面の波スペクトルを ISSC スペクトル¹⁵⁾で近似的に表わし、波スペクトルの方向性分布は波の平均進行方向に対して $\pm 90^\circ$ の範囲に $(\cosine)^2$ 分布をすると仮定する。

すなわち、

$$\left. \begin{aligned} [f(\omega, \gamma)]^2 &= (2/\pi) [f(\omega)]^2 \cos^2 \gamma : -\pi/2 < \gamma < \pi/2 \\ &= 0 : \text{elsewhere} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$[f(\omega)]^2 = 0.11 H^2 \omega_T^{-1} (\omega/\omega_T)^{-5} \exp[-0.44 (\omega/\omega_T)^{-4}] \quad (6)$$

ただし、

ω : circular frequency of a component wave

γ : angle between the average wave direction and a component wave direction

H : visually estimated average wave height

$\omega_T = 2\pi/T$, T : visually estimated average wave period

(5) 及び (6) で表わされる短期不規則波浪海面において船が一定速度を保ち且つ波の平均進行方向に対し一定の針路を保って航行している場合を考えると、船体に働く垂直波浪曲げモーメントの分散 R^2 は (4) で得られた

応答関数 $\bar{M}_0(\omega, \delta + \gamma) (= [M_0/h_0])$ を用いて、線形重ね合わせの理論¹⁶⁾に基づくエネルギースペクトル計算により次式のように求められる。

$$R^2 = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\infty [f(\omega, \gamma)]^2 [\bar{M}_0(\omega, \delta + \gamma)]^2 d\omega d\gamma \quad (7)$$

ただし、

R : standard deviation of vertical wave bending moment

$[f(\omega, \gamma)]^2$: directional wave spectrum

$\bar{M}_0(\omega, \delta + \gamma)$: response amplitude of vertical wave bending moment in regular waves from the direction of $\delta + \gamma$

δ : average heading angle against the average wave direction

2.3 垂直波浪曲げモーメントの長期予測

短期の不規則波浪海面において、船が平均進行方向に対して一定の針路を保ち一定の速度で航行している場合に、船体に働く垂直波浪曲げモーメントの極大値がある一定値 M_1 を超える確率は次式で与えられる¹⁷⁾。

$$q(M > M_1) = \exp[-M_1^2/2R^2] = \exp\left[-\frac{(M_1/\rho g L^3 B)^2}{2(R/\rho g L^2 B H)^2} \frac{L^2}{H^2}\right] \quad (8)$$

ただし、

ρ : density of sea water

g : acceleration of gravity

L : ship length

B : ship breadth

従って、有義波高 H 、平均波周期 T の波浪海面の長期発現確率密度関数 $p(H, T)$ が与えられている海域を、船が長期間にわたって常に一定の速度を保ち且つ波の平均進行方向に対して一定の平均迎角を保って航海するものと仮定すれば、船体に働く垂直波浪曲げモーメントの極大値がある一定値 M_1 を超える長期の累積確率は次式によって求められる^{8, 9, 10)}。

$$\begin{aligned} Q(M > M_1) &= \int_0^\infty \int_0^\infty q(M > M_1) p(H, T) dH dT \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(M_1/\rho g L^3 B)^2}{2(R/\rho g L^2 B H)^2} \frac{L^2}{H^2}\right] p(H, T) dH dT \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、

$Q(M > M_1)$: long-term exceeding probability for a level M_1 of vertical wave bending moment at heading δ

そこで、船がある海域を長期間にわたって航海する場合に、波の平均進行方向に対する船の平均迎角 δ の確率密度関数が海面状態、船速等にかかわらず常に $0 \sim 2\pi$ の範囲に一樣であると近似し得るならば、すべての迎角を考慮した場合に船体に働く垂直波浪曲げモーメントの極大値がある値 M_1 を超える長期の累積確率は (9) で得られた $Q(M > M_1)$ を改めて $Q(\delta)$ と定義しなおして、次式で与えられる。

$$Q = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} Q(\delta) d\delta \quad (10)$$

ただし、

Q : long-term exceeding probability for a level M_1 of vertical wave bending moment when all headings are considered

3 計算結果及び考察

上記の計算方法により、巨大型油送船船型について、まず規則波中の船体に働く垂直波浪曲げモーメントの応答関数の計算を行ない、次に短期不規則波中の垂直波浪曲げモーメント標準偏差を計算し、最後に北大西洋の長期波浪発現頻度を用いて垂直波浪曲げモーメントの長期予測を行なった。計算例として採用した船型の主要目を Table 1 に示す。また、この船型を基準船型とし、これと幾何学的に相似で船長が異なる数種類の船型を仮定して、同様の計算を実施し垂直波浪曲げモーメントの長期予測を行なった。

3.1 垂直波浪曲げモーメントの応答関数

規則波中の船体に働く垂直波浪曲げモーメントの応答関数の計算条件は次の通りである。

- a) 船速 (V)
 $F_r = V/\sqrt{gL} = 0, 0.05, 0.10, 0.15$
- b) 波に対する船の迎角 (χ)
 $\chi = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ$ (追波状態を $\chi = 0^\circ$ とする)
- c) 波長 (λ)
 $\sqrt{L/\lambda} = 0.3 \sim 1.8$ (0.1 間隔)
- d) 垂直波浪曲げモーメントの計算を行なった断面位置
 $S. S. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ (船長の 10 等分位置)

Fig. 1 及び 2 に、垂直波浪曲げモーメントの応答関数計算結果を例示する。垂直波浪曲げモーメントの無次元振幅 $M_0/\rho g L^2 B h_0$ を $\sqrt{L/\lambda}$ の関数として表わしており、Fig. 1 には、 $F_r = 0.15$ の場合に迎角 χ をパラメータとした図を、Fig. 2 には、 $\chi = 180^\circ$ (迎波状態) の場合にフルード数 F_r をパラメータとした図を示した。

3.2 垂直波浪曲げモーメントの標準偏差

(7) によって短期不規則波中の船体に働く垂直波浪曲げモーメントの標準偏差の計算を行なった。計算条件は次の通りである。

- a) 船速は 3.1 の場合と同じ条件
- b) 波の平均進行方向に対する船の迎角 (δ)
 $\delta = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ$ (追波状態を $\delta = 0^\circ$ とする)
- c) 平均波周期 (T)
 $T = 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 \text{ sec}$
- d) 垂直波浪曲げモーメントの計算を行なった断面位置は 3.1 の場合と同じ条件

垂直波浪曲げモーメントの標準偏差計算を行なうにあたっては、垂直波浪曲げモーメントの応答スペクトル数値積分は文献 18) に説明した方法によって行なった。

Fig. 3 及び 4 に、垂直波浪曲げモーメントの標準偏差計算結果を例示する。垂直波浪曲げモーメントの標準偏差無次元値 $R/\rho g L^2 B H$ を $\sqrt{L/\lambda_e}$ ($\lambda_e = gT^2/2\pi$) の関数として表わしており、Fig. 3 には、 $F_r = 0.15$ の場合に迎角 δ をパラメータとした図を、Fig. 4 には、迎角 $\delta = 180^\circ$ (迎波状態) の場合にフルード数 F_r をパラメータとした図を示した。

3.3 垂直波浪曲げモーメントの長期予測結果

北大西洋の長期波浪発現頻度資料を用いて船長 310m の巨大型油送船船型及びこれと幾何学的に相似で船長の異なる船型 ($L = 190, 250, 310, 370, 430, 490 \text{ m}$) について垂直波浪曲げモーメントの長期予測を行なった。計算条件は次の通りである。

- a) 船速は 3.1 の場合と同じ条件
- b) 船の波に対する迎角 (δ)
 $\delta = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ$ の各場合及びすべての迎角を考慮した場合
- c) 垂直波浪曲げモーメントの計算を行なった断面位置は 3.1 の場合と同じ条件
- d) 波浪発現頻度

Walden¹⁹⁾ による北大西洋の長期波浪発現頻度資料 (北大西洋において 1950 年 1 月 1 日より 1959 年 12 月 31 日までの 10 年間にわたる 227,497 観測数の資料を、有義波高 H と平均波周期 T の関数として区分整理した波浪発現頻度表¹⁰⁾) を用いた。

Fig. 5 に、船長 310m の船型について垂直波浪曲げモーメントの長期分布を求めた例を、Fig. 6 に、船長 190 ~ 490m の 6 種類の船型について垂直波浪曲げモーメントの長期分布を求めた例を示す。Fig. 5 及び 6 に例示されたような長期分布図より、長期超過確率 $Q = 10^{-10}, 10^{-8}, 10^{-6}, 10^{-4}$ に対応する垂直波浪曲げモーメントの長期予測値を読みとって、これらの値を船速及び船の迎角をパラメータとして整理し、船長方向分布及び船長の関数として示した。

Fig. 7~9 に、船長 310m の船型について求められた垂直波浪曲げモーメントの長期予測値を $M/\rho g L^3 B$ の形

の無次元値として、その船長方向分布を示す。Fig. 7 には、フルード数 $F_r=0, 0.05, 0.10, 0.15$ の各場合にすべての迎角を考慮に入れた垂直波浪曲げモーメントの長期予測値が、NK（日本海事協会、1967 年版規則に対する改正規則）、GL（ドイツ船級協会、1970 年版規則）、BV（フランス船級協会、1971 年版規則）、LR（ロイド船級協会、1966 年版規則）、NV（ノルウェー船級協会、1962 年版規則）の各船級協会の縦強度規定による垂直波浪曲げモーメント設計値^{20,21)}と比較されている。ここで、BV (current case) は 1 年間に 5~6 回遭遇する波浪を考慮した場合、BV (excep. case) は船の一生に 1 回遭遇すると思われる波浪を考慮した場合を意味する。これらの図に示した結果によれば、各船級協会の規定による垂直波浪曲げモーメント設計値は大幅に異なっているが、その平均的な値は、 $Q=10^{-7}$ に対応する長期予測値、あるいは、 $Q=10^{-8}$ に対応する長期予測値に相当するとみなせるようである。なお、長期超過確率 $Q=10^{-8}$ に対応する垂直波浪曲げモーメントの長期予測値について、フルード数 $F_r=0, 0.05, 0.10, 0.15$ の各場合に迎角 δ をパラメータとする長期予測値の船長方向分布図を Fig. 8 に、また、すべての迎角を考慮した場合にフルード数 F_r をパラメータとする長期予測値の船長方向分布図を Fig. 9 に示す。Fig. 9 には、各船級協会の規定による垂直波浪曲げモーメント設計値も示されている。

Fig. 10 には、S. S. 7, 5, 3 の各断面に働く垂直波浪曲げモーメントの $Q=10^{-10}, 10^{-8}, 10^{-6}, 10^{-4}$ に対応する長期予測値を $M/\rho g L^3 B$ の形の無次元値として船長の関数として示し各船級協会の規定による垂直波浪曲げモーメント設計値と比較している。また、Fig. 11 には、 $Q=10^{-8}$ に対応する垂直波浪曲げモーメントの長期予測値をフルード数 F_r をパラメータとして船長の関数として表わした図を示している。

Fig. 7~11 に示された結果によれば、垂直波浪曲げモーメント長期予測値の一般的傾向について次のような結論を得る。

(i) 垂直波浪曲げモーメント長期予測値は正面迎波状態及び追波状態で最も大きく（追波状態の方がわずかに大きい）、横波状態で最も小さい。

(ii) 垂直波浪曲げモーメント長期予測値の船長方向分布は船体中央に関して前後対称に近く、船体中央部付近に最大値が生じる。

(iii) 垂直波浪曲げモーメント長期予測値の最大値が生じる位置は、正面迎波状態及びこれに近い状態では船速の増大によって船体中央より船首方向に移動し、その場合最大値はやや小さくなり、追波状態及びこれに近い状態では船速の減少によって船体中央より船尾方向に移動し、最大値はやや大きくなる。横波状態では船速の変化により最大値の生じる位置及びその大きさはほとんど変化しない。

(iv) 垂直波浪曲げモーメント設計値としては、各船級協会の縦強度規定の現状にかんがみ Fig. 7~9 においてすべての迎角を考慮した場合の長期超過確率 $Q=10^{-8}$ に対応する長期予測値を参考とすればよいと思われる。垂直波浪曲げモーメントの最大値としては船体中央の長期予測値を採用して差し支えない。また、最大値を船長の関数として設計値を定めるには、Fig. 10~11 においてすべての迎角を考慮に入れて $Q=10^{-8}$ に対応する長期予測値を参考とすればよいと思われる。

船体中央部に働く垂直波浪曲げモーメントの設計値を設定する場合には「北大西洋においてすべての迎角を考慮に入れて長期超過確率 $Q=10^{-8} \sim 10^{-7}$ に対応する長期予測値」を基準とするのが一般的な考え方となっているが、このことは、(iv) に述べた結果と合致する。

さて、福田等⁷⁾は、垂直波浪剪断力設計値として、「北大西洋においてすべての迎角を考慮した場合の長期超過確率 $Q=10^{-6}$ に対応する長期予測値」を基準とするように提案しているが、本論文の垂直波浪曲げモーメント設計値に関する結論と比較して、設計値が同一レベルの危険率に対応する値となっていないことがわかる。しかし、波浪荷重設計値設定の際に、危険率の絶対値を必ずしも同一レベルとすべきか否かは、構造強度計算法、許容応力に対する考え方との関連があり、簡単には結論を下し難い。この問題については今後十分の検討が必要である。

4 結 言

線形ストリップ理論に基づく規則波中の船体応答理論、線形重ね合わせの理論に基づく短期不規則波中の船体応答理論及び大洋の波浪の長期発現頻度資料を利用した船体応答の長期予測法等を総合して、巨大型油送船船型を例として波浪中の船体に働く垂直波浪曲げモーメントの長期予測を行ない、その結果を整理検討して垂直波浪

曲げモーメントの設計値推定に関する重要な資料を得た。即ち、垂直波浪曲げモーメントの長期予測値について、船長方向分布、船速の影響、波に対する船の迎角の影響、船型の大きさの影響等を明らかにし、また世界の主要船級協会の規定による垂直波浪曲げモーメント設計値と比較して、次のような結論を得た。

(i) 垂直波浪曲げモーメント長期予測値は正面迎波状態及び追波状態で最も大きく(追波状態の方がわずかに大きい)、横波状態で最も小さい。

(ii) 垂直波浪曲げモーメント長期予測値の船長方向分布は船体中央に関して前後対称に近く、船体中央部付近に最大値が生じる。

(iii) 垂直波浪曲げモーメント長期予測値の最大値が生じる位置は、正面迎波状態では船速の増大によって船体中央より船首方向に移動し、その場合最大値はやや小さくなり、追波状態では船速の減少によって船体中央より船尾方向に移動し、その場合最大値はやや大きくなる。横波状態では船速の変化により最大値の生じる位置及びその大きさはほとんど変化しない。

(iv) 垂直波浪曲げモーメント設計値としては、北大西洋においてすべての迎角を考慮した場合の長期超過確率 $Q=10^{-8}$ に対応する長期予測値に基づいて設定すればよいと思われる。この問題については、他の波浪荷重設計値との関連から今後も十分な検討が必要である。

終りに臨み、本論文に対し終始ご指導を賜った九州大学福田淳一教授に謹んで感謝の意を表します。また、本研究の遂行に当りご協力を頂きました三菱重工長崎造船所造船設計部船体設計課長永元隆一氏、同課塚本 修氏、森 俊哲氏に深く感謝します。なお、計算結果の整理、図表作製にご協力を得ました九州大学造船学教室西川真理子嬢、吉原真里子嬢に謝意を表します。最後に、本研究の計算は三菱重工長崎研究所の電算機“IBM-360”及び九州大学大型計算機センターの電算機“FACOM 230-60”によって行なわれたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 福田淳一, 永元隆一, 塚本 修, 新開明二: 波浪中の船体に働く垂直剪断力の設計値推定, 日本造船学会論文集, 第136号 (1974).
- 2) 福田淳一, 柴田 実, 豊田久夫, 星隈明吉: 規則波中の高速艦艇に働く曲げモーメント, 造船協会論文集, 第112号 (1962).
- 3) 福田淳一, 柴田 実, 豊田久夫: 規則波中の大型油送船の縦強度に関する研究, 西部造船会々報, 第26号 (1963).
- 4) 島田博之, 緒方源信, 小沼 守: 巨大船の波浪縦曲げモーメントおよび剪断力の長さ方向の分布について, 造船協会論文集, 第121号 (1967).
- 5) N. Nordenström: Calculations of wave-induced motions and loads, Progress report No.4, A pilot study with the computer program NV 403, Report No.66-11-S, Det Norske Veritas Research Department (1966).
- 6) E. Abrahamsen: Recent development in the practical philosophy of ship structural design, Publication No.60, Det Norske Veritas (1967).
- 7) E. Abrahamsen: Structural design analysis of large ships, Trans. SNAME, Vol.77 (1969).
- 8) J. Fukuda: Theoretical determination of design wave bending moments, Japan Shipbuilding & Marine Engineering, Vol.2, No.3 (1967).
- 9) 福田淳一, 飯塚正文, 緒方源信, 小沼 守: 巨大船に働く波浪曲げモーメントの長期分布について, 西部造船会々報, 第34号 (1967).
- 10) 福田淳一: 長期の波浪曲げモーメント異常値の傾向について, 日本造船学会論文集, 第123号 (1968).
- 11) E. V. Lewis: Predicting long-term distributions of wave-induced bending moment on ship hulls, SNAME Spring Meeting (1967).
- 12) 佐藤 茂, 中村一郎, 他7名: 幅広船の構造強度に関する研究, 日本造船学会論文集, 第134号 (1973).
- 13) 福田淳一: 規則波中の船の縦曲げモーメント(続), 造船協会論文集, 第111号 (1962).
- 14) 福田淳一: ストリップ理論とその応用, 日本造船学会誌, 第485号 (1969).
- 15) W. H. Warnsinck: Report of Committee 1 on environmental conditions, Proceedings of 2nd ISSC, Delft (1964).
- 16) M. St. Denis and W. J. Pierson Jr.: On the motions of ships in confused seas, Trans. SNAME, Vol.61 (1953).
- 17) S. O. Rice: Mathematical analysis of random noise, The Bell System Technical Journal, Vol.24 (1945).

- 18) 福田淳一, 新開明二: 不規則波中の船体応答スペクトル計算における二, 三の問題, 西部造船会々報, 第50号 (1975).
- 19) H. Walden: Die Eigenschaften der Meereswellen im Nordatlantischen Ozean, Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzerveröffentlichungen 2, Nr. 41, Hamburg (1964).
- 20) 関西造船協会: 関西造船協会ルール検討委員会報告 (第1報) (1966).
- 21) SR 134: 船体構造部材の許容応力に関する研究, 日本造船研究協会研究資料, No. 179 (1973).

Table 1 Main Particulars of a Gigantic Oil Tanker

Length between Perpendiculars (L)	310.00 m
Breadth (B)	48.71 m
Depth (D)	24.50 m
Draught (d)	19.00 m
Displacement (W)	250,540 t
Block Coefficient (C_b)	0.852
Water Plane Coefficient (C_w)	0.903
Midship Coefficient (C_m)	0.995
Centre of Gravity before Midship (X_G)	0.0331L
Longitudinal Gyradius (κ_L)	0.2494L

FIG. 1a AMPLITUDES OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 7 ON THE SHIP IN REGULAR WAVES FROM DIFFERENT DIRECTIONS

FIG. 2a AMPLITUDES OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 7 ON THE SHIP IN REGULAR HEAD WAVES

FIG. 1b AMPLITUDES OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 5 ON THE SHIP IN REGULAR WAVES FROM DIFFERENT DIRECTIONS

FIG. 2b AMPLITUDES OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 5 ON THE SHIP IN REGULAR HEAD WAVES

FIG. 1c AMPLITUDES OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 3 ON THE SHIP IN REGULAR WAVES FROM DIFFERENT DIRECTIONS

FIG. 2c AMPLITUDES OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 3 ON THE SHIP IN REGULAR HEAD WAVES

FIG. 3a STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 7 ON THE SHIP IN IRREGULAR WAVES FOR DIFFERENT HEADINGS

FIG. 4a STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 7 ON THE SHIP IN IRREGULAR HEAD WAVES

FIG. 3b STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 5 ON THE SHIP IN IRREGULAR WAVES FOR DIFFERENT HEADINGS

FIG. 4b STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 5 ON THE SHIP IN IRREGULAR HEAD WAVES

FIG. 3c STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 3 ON THE SHIP IN IRREGULAR WAVES FOR DIFFERENT HEADINGS

FIG. 4c STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 3 ON THE SHIP IN IRREGULAR HEAD WAVES

FIG. 5 LONG TERM DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 5 ON THE SHIP OF 310 METERS LENGTH IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN

FIG. 6 LONG TERM DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 5 ON SIMILAR SHIPS OF DIFFERENT LENGTHS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN

 FIG. 7a LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES FOR ALL HEADINGS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN ($Fr=0$)

 FIG. 8a LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} FOR DIFFERENT HEADINGS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN ($Fr=0$)

 FIG. 7b LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES FOR ALL HEADINGS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN ($Fr=0.05$)

 FIG. 8b LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} FOR DIFFERENT HEADINGS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN ($Fr=0.05$)

 FIG. 7c LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES FOR ALL HEADINGS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN ($Fr=0.10$)

 FIG. 8c LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} FOR DIFFERENT HEADINGS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN ($Fr=0.10$)

 FIG. 7d LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES FOR ALL HEADINGS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN ($Fr=0.15$)

 FIG. 8d LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} FOR DIFFERENT HEADINGS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN ($Fr=0.15$)

FIG. 9 LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} FOR ALL HEADINGS AT DIFFERENT SPEEDS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN

FIG. 10A VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 7 PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES ON SIMILAR SHIPS OF DIFFERENT LENGTHS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN

FIG. 11A VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 7 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} ON SIMILAR SHIPS OF DIFFERENT LENGTHS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN

FIG. 10B VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 5 PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES ON SIMILAR SHIPS OF DIFFERENT LENGTHS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN

FIG. 11B VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} ON SIMILAR SHIPS OF DIFFERENT LENGTHS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN

FIG. 10C VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 3 PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES ON SIMILAR SHIPS OF DIFFERENT LENGTHS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN

FIG. 11C VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 3 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} ON SIMILAR SHIPS OF DIFFERENT LENGTHS IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN