

波浪荷重設計値推定に関する調査

第200研究部会 第4分科会

昭和53年8月

社団法人
日本造船研究協会

INVESTIGATIONS ON DESIGN VALUE ESTIMATION
OF WAVE INDUCED LOADS ON SHIP HULLS

THE 200TH RESEARCH COMMITTEE - 4TH SUB COMMITTEE

REPORT No. 89

THE SHIPBUILDING RESEARCH ASSOCIATION OF JAPAN
AUGUST 1978

第200研究部会委員名簿

(敬称略、順不同)

部会長	寺沢一雄	
委員	秋田好雄(日本海事協会)	大江卓二(日本造船技術センター)
	石井正夫(住友重機械工業)	眞能創(防衛大学)
	金沢武(東京大学)	八木順吉(大阪大学)
	川上益男(広島大学)	山越道郎(九州大学)
	木下共武(佐世保重工業)	山本善之(東京大学)
	国安常雄(石川島播磨重工業)	安藤文隆(船舶技術研究所)
	熊井豊二	岡田弘昭(佐野安船渠)
	酒井利夫(日立造船)	伊藤剛平(日本造船工業会)
	米倉邦彦(三菱重工業)	仁瓶廉三(川崎重工業)
	松浦一(大阪造船所)	落合一郎(日本鋼管)
	石井信夫(日本郵船)	浜野和夫(三井造船)
	磯貝信(三保造船所)	藤田譲(東京大学)
	渡辺昭二(昭和海運)	高橋幸伯(東京大学)
	三島尙三(名村造船所)	元良誠三(東京大学)
	福田淳一(九州大学)	

第200研究部会第4分科会委員名簿

(敬称略、順不同)

分科会長	福田淳一(九州大学)	
委員	藤井齊(三菱重工業)	永元隆一(三菱重工業)
	高木又男(日立造船)	服部陽一(日立造船)
	日笠則明(日本海事協会)	新開明二(九州大学)

目 次

1. まえがき	1
2. 規則波中の船体に働く変動荷重	2
2.1 規則波中の船体運動	2
2.2 規則波中の船体加速度	10
2.3 規則波中の船体表面に働く変動水圧	13
2.4 規則波中の船体横断面に働く変動荷重	15
3. 不規則波中の船体に働く変動荷重	21
3.1 船体応答短期予測理論	21
3.2 船体応答長期予測理論	23
4. 波浪中の船体に働く変動荷重の統計的予測結果	25
4.1 緒 言	25
4.2 波浪軸力・垂直波浪曲げモーメント・水平波浪曲げモーメント	26
4.2.1 規則波中応答関数計算結果	26
4.2.2 短期不規則波中標準偏差計算結果	26
4.2.3 長期予測計算結果	27
4.3 垂直波浪剪断力・水平波浪剪断力・波浪振りモーメント	29
4.3.1 規則波中応答関数計算結果	29
4.3.2 短期不規則波中標準偏差計算結果	29
4.3.3 長期予測計算結果	29
4.4 波浪変動水圧	31
4.4.1 規則波中応答関数計算結果	31
4.4.2 短期不規則波中標準偏差計算結果	31
4.4.3 長期予測計算結果	32
4.5 船体各部加速度	33
4.5.1 規則波中応答関数計算結果	33
4.5.2 短期不規則波中標準偏差計算結果	33
4.5.3 長期予測計算結果	34
5. まとめ	35
参考文献	36
附録 1	72
附録 2	77

1. まえがき

日本造船研究協会第200研究部会第4分科会は、最近までに実施された「波浪中の船体に誘起される変動荷重の統計的予測に基く設計値推定」に関する研究成果を総合整理して、現在の造船界における船体構造強度設計に有用な資料を提供するとともに、今後のこの分野の研究発展に寄与することを目的として、昭和48年4月に設置された。

本報告書は、日本造船研究協会第131研究部会「波浪外力に関する水槽試験」および第134研究部会「船体構造部材の許容応力に関する研究」の報告書に記載されている研究成果とともに、学会誌等に発表されたこの分野の研究成果、即ち九州大学、日本海事協会、三菱重工業、日立造船その他の研究機関で実施された諸研究成果をとりまとめたものである。

本報告書において対象とした波浪変動荷重は、縦強度応力解析に関連する縦軸方向荷重、垂直曲げモーメント、水平曲げモーメント、垂直剪断力、水平剪断力、捩りモーメント、横強度および局部強度応力解析に関連する波浪変動水圧、さらに局部強度応力解析に関連する船体局部加速度等である。即ち、動的荷重の中で比較的ゆるやかに変動する荷重を取り扱い、波浪衝撃圧、甲板衝撃圧等の荷重は取り扱っていない。

本報告の内容は、まず規則波中の船体に働く変動荷重計算法を説明し、次いで、波浪中の船体に働く変動荷重の短期および長期予測法を説明し、続いて、主として大型油送船船型とコンテナ船型について船体波浪荷重の予測計算を行なった結果を示して、これらの荷重の設計値推定に関する検討を行なっている。

2. 規則波中の船体に働く変動荷重

2.1 規則波中の船体運動

波浪中の船体運動および船体に働く変動荷重の問題を取り扱う場合には、問題の取り扱い方を単純化するため、変動荷重に及ぼす影響があまり大きくなない横漂流を無視して、船は 6 自由度の運動を伴い一定の平均速度と一定の平均進行方向を保って航海するものと仮定する。

すなわち、船は前後揺、上下揺、縦揺、左右揺、船首揺および横揺の運動を伴って一定速度で進行するものとする。

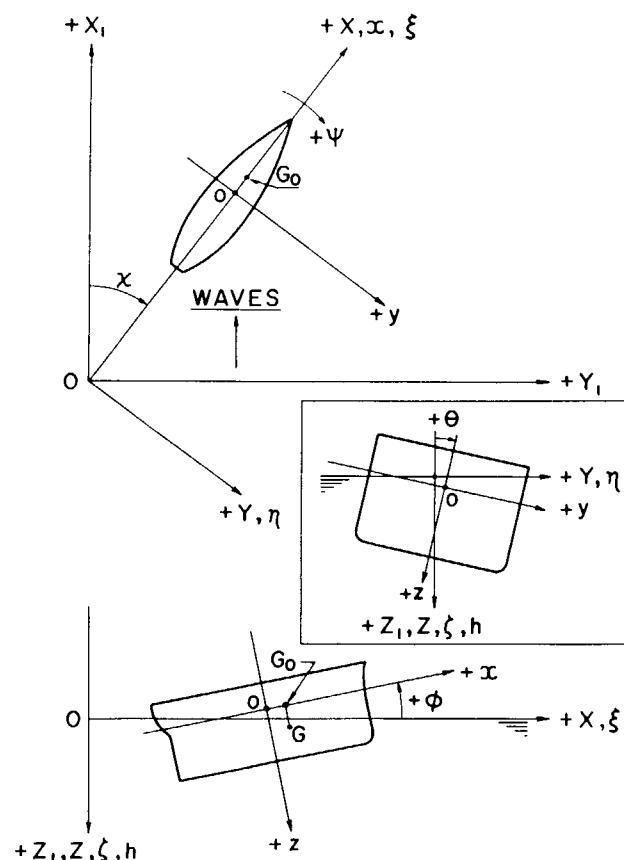


Fig. 2.1-1 Coordinates

Fig. 2.1-1 に示すように、空間固定座標系 O-X Y Z (OX : 船の進行方向) および O-X₁ Y₁ Z₁ (OX₁ : 規則波の進行方向)、並びに船体固定座標系 o-x y z (ox : 船の長さ方向) を定める。

船が出会い規則波の表面の隆起(下向きを正とする)は近似的に次式で表わされる。

$$\begin{aligned} h &= h_0 \cos(kx_1 - \omega t) \\ &= h_0 \cos(kx \cos \chi - ky \sin \chi - \omega_e t) \end{aligned} \quad (2-1)$$

ただし、

h : vertical displacement of surface wave
 h_0 : amplitude of surface wave
 $k = 2\pi/\lambda = \omega^2/g$: wave number
 λ : wave length
 g : acceleration of gravity
 ω : circular frequency of wave
 $\omega_e = \omega - kV \cos \chi$: circular frequency of wave encounter
 V : ship velocity
 χ : average heading angle

また、規則波の深度 Z (近似的には z)における副波の式は近似的に次のように表わされる。

$$h(z) = h_0 e^{-kz} \cos(kx \cos \chi - ky \sin \chi - \omega_e t) \quad (2-2)$$

そして、副波の粒子速度の X 方向 (近似的には x 方向)、Y 方向 (近似的には y 方向) および Z 方向 (近似的には z 方向) の各成分は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} v_x &= -\omega h_0 \cos \chi e^{-kz} \cos(kx \cos \chi - ky \sin \chi - \omega_e t) \\ v_y &= \omega h_0 \sin \chi e^{-kz} \cos(kx \cos \chi - ky \sin \chi - \omega_e t) \\ v_z &= \omega h_0 e^{-kz} \sin(kx \cos \chi - ky \sin \chi - \omega_e t) \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

また、副波の粒子加速度の X 方向 (近似的には x 方向)、Y 方向 (近似的には y 方向) および Z 方向 (近似的には z 方向) の各成分は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{v}_x &= -\omega^2 h_0 \cos \chi e^{-kz} \sin(kx \cos \chi - ky \sin \chi - \omega_e t) \\ \dot{v}_y &= \omega^2 h_0 \sin \chi e^{-kz} \sin(kx \cos \chi - ky \sin \chi - \omega_e t) \\ \dot{v}_z &= -\omega^2 h_0 e^{-kz} \cos(kx \cos \chi - ky \sin \chi - \omega_e t) \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

船が規則波中を前後揺、上下揺、縦揺、左右揺、船首揺および横揺をしながら、一定速度を保って進行している場合に、船長方向 x の位置の単位長さ断面に働く流体力は Froude-Krilloff 理論および運動量理論より次のような。

a) 前後方向の力 (船首方向を正とする)

$$\frac{dF_x}{dx} = \frac{dF_{Wx1}}{dx} \quad (2-5)$$

ただし、

$$\frac{dF_{Wx1}}{dx} = -\rho g k h_o C_x \cos \chi \sin(kx \cos \chi - \omega_e t)$$

$$C_x = \frac{2}{k \sin \chi} \int_0^d e^{-kz} \sin(ky_s \sin \chi) dz$$

y_s : y-coordinate of section contour
 d : draught of section at x

b) 上下方向の力(下向きを正とする)

$$\begin{aligned} \frac{dF_z}{dx} &= \frac{dF_{Bz1}}{dx} + \frac{dF_{Bz2}}{dx} + \frac{dF_{Bz3}}{dx} + \frac{dF_{Bz4}}{dx} \\ &+ \frac{dF_{Wz1}}{dx} + \frac{dF_{Wz2}}{dx} + \frac{dF_{Wz3}}{dx} + \frac{dF_{Wz4}}{dx} \end{aligned} \quad (2-6)$$

ただし、

$$\frac{dF_{Bz1}}{dx} = -2\rho g y_w \{ \zeta - (x - x_G) \dot{\phi} \}$$

$$\frac{dF_{Bz2}}{dx} = -\rho N_z \{ \ddot{\zeta} - (x - x_G) \ddot{\phi} + V \dot{\phi} \}$$

$$\frac{dF_{Bz3}}{dx} = -\rho s_z \{ \ddot{\zeta} - (x - x_G) \ddot{\phi} + 2V \dot{\phi} \}$$

$$\frac{dF_{Bz4}}{dx} = V \frac{d(\rho s_z)}{dx} \{ \ddot{\zeta} - (x - x_G) \ddot{\phi} + V \dot{\phi} \}$$

$$\frac{dF_{Wz1}}{dx} = 2\rho g y_w h_e$$

$$\frac{dF_{Wz2}}{dx} = \rho N_z v_{ze}$$

$$\frac{dF_{Wz3}}{dx} = \rho s_z \dot{v}_{ze}$$

$$\frac{dF_{Wz4}}{dx} = -V \frac{d(\rho s_z)}{dx} v_{ze}$$

ξ : surge, ζ : heave, ϕ : pitch
 ρ : density of sea water
 g : acceleration of gravity
 y_w : half breadth of water line
 x_G : x-coordinate of the ship centre of gravity
 $\rho_N z$: sectional damping coefficient for vertical motion
 ρs_z : sectional added mass for vertical motion

$$\begin{aligned}
 h_e &\doteq C_1 C_2 h = C_1 C_2 h_o \cos(kx \cos \chi - \omega_e t) \\
 v_{ze} &\doteq \omega h_o C_1 C_2 \sin(kx \cos \chi - \omega_e t) \\
 \dot{v}_{ze} &\doteq -\omega^2 h_o C_1 C_2 \cos(kx \cos \chi - \omega_e t) \\
 C_1 &= \sin(ky_w \sin \chi) / ky_w \sin \chi \\
 C_2 &= e^{-kd_m}, \quad d_m = S' / 2y_w, \quad S' : \text{sectional area}
 \end{aligned}$$

c) 重心を通る横方向軸に関するモーメント ($\widehat{z x}$ 方向を正とする)

$$\frac{dM_{zx}}{dx} = - \frac{dF_z}{dx} (x - x_G) \quad (2-7)$$

d) 左右方向の力 (右舷方向の力を正とする)

$$\begin{aligned}
 \frac{dF_y}{dx} &= \frac{dF_{By1}}{dx} + \frac{dF_{By2}}{dx} + \frac{dF_{By3}}{dx} + \frac{dF_{By4}}{dx} \\
 &+ \frac{dF_{Wy1}}{dx} + \frac{dF_{Wy2}}{dx} + \frac{dF_{Wy3}}{dx} + \frac{dF_{Wy4}}{dx}
 \end{aligned} \quad (2-8)$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 \frac{dF_{By1}}{dx} &= 0 \\
 \frac{dF_{By2}}{dx} &= -\rho N_Y \{ \dot{\eta} + (x - x_G) \dot{\psi} - V\psi + (z_G - l_w) \dot{\theta} \}
 \end{aligned}$$

$$\frac{dF_{By3}}{dx} = -\rho s_y \{ \ddot{\eta} + (x - x_G) \ddot{\psi} - 2V\dot{\psi} + (z_G - l_\eta) \ddot{\theta} \}$$

$$\frac{dF_{By4}}{dx} = v \frac{d(\rho s_y)}{dx} \{ \dot{\eta} + (x - x_G) \dot{\psi} - V\psi + (z_G - l_\eta) \dot{\theta} \} - V\rho s_y \frac{dl_\eta}{dx} \dot{\theta}$$

$$\frac{dF_{Wy1}}{dx} = 2\rho gh_o \int_0^d \exp(-kz_s) \sin(ky_s \sin\chi) dz_s \sin(kx \cos\chi - \omega_e t)$$

$$\frac{dF_{Wy2}}{dx} = \rho N_Y v_{ye}$$

$$\frac{dF_{Wy3}}{dx} = \rho s_y \dot{v}_{ye}$$

$$\frac{dF_{Wy4}}{dx} = -v \frac{d(\rho s_y)}{dx} v_{ye}$$

η : sway

ψ : yaw

θ : roll

ρN_Y : sectional damping coefficient for horizontal motion

ρs_y : sectional added mass for horizontal motion

l_w : lever of sectional damping force due to rolling motion with respect to o

l_η : lever of sectional added mass inertia force due to rolling motion with respect to o

$$v_{ye} \doteq \omega h_o \sin\chi e^{-kd/2} \cos(kx \cos\chi - \omega_e t)$$

$$\dot{v}_{ye} \doteq \omega^2 h_o \sin\chi e^{-kd/2} \sin(kx \cos\chi - \omega_e t)$$

e) 重心を通る垂直方向軸に関するモーメント (\curvearrowright 方向を正とする)

$$\frac{dM_{xy}}{dx} = \frac{dF_y}{dx} (x - x_G) \quad (2-9)$$

f) 重心を通る縦方向軸に関するモーメント (\curvearrowright 方向を正とする)

$$\frac{dM_{yz}}{dx} = \frac{dM_{B\theta 1}}{dx} + \frac{dM_{B\theta 2}}{dx} + \frac{dM_{B\theta 3}}{dx} + \frac{dM_{B\theta 4}}{dx} \\ + \frac{dM_{W\theta 1}}{dx} + \frac{dM_{W\theta 2}}{dx} + \frac{dM_{W\theta 3}}{dx} + \frac{dM_{W\theta 4}}{dx} \quad (2-10)$$

ただし、

$$\frac{dM_{B\theta 1}}{dx} = -w(z'_G - z_G) \theta - \rho g S' m'_t \theta \\ \frac{dM_{B\theta 2}}{dx} = -\rho N_Y (z_G - l_w) \{ \dot{\eta} + (x - x_G) \dot{\psi} - V\psi + z_G \dot{\theta} \} + \rho N_Y l_w (z_G - l_w) \dot{\theta} \\ \frac{dM_{B\theta 3}}{dx} = -\rho s_Y (z_G - l_n) \{ \ddot{\eta} + (x - x_G) \ddot{\psi} - 2V\dot{\psi} + z_G \ddot{\theta} \} + \rho s_Y l_n (z_G - l_\theta) \ddot{\theta} \\ \frac{dM_{B\theta 4}}{dx} = V \frac{d\{\rho s_Y (z_G - l_n)\}}{dx} \{ \dot{\eta} + (x - x_G) \dot{\psi} - V\psi + z_G \dot{\theta} \} \\ - V \frac{d\{\rho s_Y l_n (z_G - l_\theta)\}}{dx} \dot{\theta} \\ \frac{dM_{W\theta 1}}{dx} = \frac{dF_{WY1}}{dx} (z_G - l_1) \\ \frac{dM_{W\theta 2}}{dx} = \frac{dF_{WY2}}{dx} (z_G - l_w) \\ \frac{dM_{W\theta 3}}{dx} = \frac{dF_{WY3}}{dx} (z_G - l_n) \\ \frac{dM_{W\theta 4}}{dx} = -V \frac{d\{\rho s_Y (z_G - l_n)\}}{dx} v_{ye}$$

w : sectional weight of the ship

z_G : z-coordinate of the ship centre of gravity

z'_G : z-coordinate of the centre of gravity of w

m'_t : sectional metacentric height

$l_\theta = \rho i / \rho s_Y l_n$

ρi : sectional added mass moment of inertia

$$l_1 = \frac{\int_0^d \exp(-kz_s) \sin(ky_s \sin \chi) z_s dz_s - \int_0^{y_w} \exp(-kz_s) \times}{\int_0^d \exp(-kz_s) \sin(ky_s \sin \chi) dz_s}$$

$$\underline{\sin(ky_s \sin \chi) y_s dy_s}$$

以上の結果を用いて、前後揺の運動方程式

$$\frac{W}{g} \ddot{\xi} = \int_{A.E.}^{F.E.} \frac{dF_x}{dx} dx \quad (2-11)$$

と、上下揺と縦揺の連成運動方程式

$$\left. \begin{array}{l} \frac{W}{g} \ddot{\zeta} = \int_{A.E.}^{F.E.} \frac{dF_z}{dx} dx \\ \frac{I_\phi}{g} \ddot{\phi} = \int_{A.E.}^{F.E.} \frac{dM_{zx}}{dx} dx \end{array} \right\} \quad (2-12)$$

さらに、左右揺、船首揺および横揺の連成運動方程式

$$\left. \begin{array}{l} \frac{W}{g} \ddot{\eta} = \int_{A.E.}^{F.E.} \frac{dF_y}{dx} dx \\ \frac{I_\psi}{g} \ddot{\psi} = \int_{A.E.}^{F.E.} \frac{dM_{xy}}{dx} dx \\ \frac{I_\theta}{g} \ddot{\theta} = \int_{A.E.}^{F.E.} \frac{dM_{yz}}{dx} dx \end{array} \right\} \quad (2-13)$$

が得られる。ただし、

W/g : mass of the ship

I_ϕ/g : moment of inertia of the ship for pitch

I_ψ/g : moment of inertia of the ship for yaw

I_θ/g : moment of inertia of the ship for roll

であって、右辺の積分範囲は船の後端より前端までである。

(2-11), (2-12), (2-13)において、規則波に基く力の項を右辺に残し、その他の項をすべて左辺に移すと、(2-11), (2-12), (2-13)は形式的にはそれぞれ次のように書くことができる^{1~3}。

$$A_{11}\ddot{\xi} + A_{12}\dot{\xi} + A_{13}\xi = F_\xi \quad (2-14)$$

$$\left. \begin{aligned} B_{11}\ddot{\zeta} + B_{12}\dot{\zeta} + B_{13}\zeta + B_{14}\ddot{\phi} + B_{15}\dot{\phi} + B_{16}\phi &= F_\zeta \\ B_{21}\ddot{\zeta} + B_{22}\dot{\zeta} + B_{23}\zeta + B_{24}\ddot{\phi} + B_{25}\dot{\phi} + B_{26}\phi &= M_\phi \end{aligned} \right\} \quad (2-15)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{11}\ddot{\eta} + C_{12}\dot{\eta} + C_{13}\eta + C_{14}\ddot{\psi} + C_{15}\dot{\psi} + C_{16}\psi \\ + C_{17}\ddot{\theta} + C_{18}\dot{\theta} + C_{19}\theta &= F_\eta \\ C_{21}\ddot{\eta} + C_{22}\dot{\eta} + C_{23}\eta + C_{24}\ddot{\psi} + C_{25}\dot{\psi} + C_{26}\psi \\ + C_{27}\ddot{\theta} + C_{28}\dot{\theta} + C_{29}\theta &= M_\psi \\ C_{31}\ddot{\eta} + C_{32}\dot{\eta} + C_{33}\eta + C_{34}\ddot{\psi} + C_{35}\dot{\psi} + C_{36}\psi \\ + C_{37}\ddot{\theta} + C_{38}\dot{\theta} + C_{39}\theta &= M_\theta \end{aligned} \right\} \quad (2-16)$$

(2-14) では、前後揺に関する付加質量と減衰係数は微小であるとして無視し、右辺の強制項は Froude-Kriloff の力のみを考える。(2-15) の左辺の諸係数 $B_{11}, B_{12}, \dots; B_{21}, B_{22}, \dots$ やび右辺の強制力に関する項 F_ζ, M_ϕ は田才⁴⁾ の方法によって計算された断面の付加質量と減衰係数を用いて計算できる。また、(2-16) の左辺の諸係数 $C_{11}, C_{12}, \dots; C_{21}, C_{22}, \dots; C_{31}, C_{32}, \dots$ やび右辺の強制力に関する項 F_η, M_ψ, M_θ は、田才⁵⁾ あるいは田村⁶⁾ の方法によって計算された断面の付加質量、減衰係数等を用いて計算することができる。以上の計算式については附録に示している。ただし、(2-16) の第3式中の横揺減衰係数については、上述の方法で求められた線形造波減衰係数を用いるのは適当ではなく、ここでは、非線形粘性横揺抵抗を導入した藤井・高橋⁷⁾ の半ば実験的な近似法によって計算している。従って、 C_{38} は横揺角振幅の関数となるので、(2-16) の連成運動方程式は逐次近似的に繰返し計算によって解かなければならない。一方、(2-14) やび(2-15) は通常の線形微分方程式および線形連立微分方程式として解けばよい。このようにして、(2-14), (2-15) やび(2-16) を解けば、次の形の解を得る。

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \xi_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_\xi) = \xi_c \cos \omega_e t + \xi_s \sin \omega_e t \\ \zeta &= \zeta_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_\zeta) = \zeta_c \cos \omega_e t + \zeta_s \sin \omega_e t \\ \phi &= \phi_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_\phi) = \phi_c \cos \omega_e t + \phi_s \sin \omega_e t \\ \eta &= \eta_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_\eta) = \eta_c \cos \omega_e t + \eta_s \sin \omega_e t \\ \psi &= \psi_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_\psi) = \psi_c \cos \omega_e t + \psi_s \sin \omega_e t \\ \theta &= \theta_0 \cos(\omega_e t - \varepsilon_\theta) = \theta_c \cos \omega_e t + \theta_s \sin \omega_e t \end{aligned} \right\} \quad (2-17)$$

ただし、

$$\begin{aligned}\xi_c &= \xi_o \cos \varepsilon_\xi, & \xi_s &= \xi_o \sin \varepsilon_\xi \\ \zeta_c &= \zeta_o \cos \varepsilon_\zeta, & \zeta_s &= \zeta_o \sin \varepsilon_\zeta \\ \phi_c &= \phi_o \cos \varepsilon_\phi, & \phi_s &= \phi_o \sin \varepsilon_\phi \\ \eta_c &= \eta_o \cos \varepsilon_\eta, & \eta_s &= \eta_o \sin \varepsilon_\eta \\ \psi_c &= \psi_o \cos \varepsilon_\psi, & \psi_s &= \psi_o \sin \varepsilon_\psi \\ \theta_c &= \theta_o \cos \varepsilon_\theta, & \theta_s &= \theta_o \sin \varepsilon_\theta\end{aligned}$$

$\xi_o, \zeta_o, \phi_o, \eta_o, \psi_o, \theta_o$: amplitudes of surge, heave,
pitch, sway, yaw and roll

$\varepsilon_\xi, \varepsilon_\zeta, \varepsilon_\phi, \varepsilon_\eta, \varepsilon_\psi, \varepsilon_\theta$: phase angles of surge, heave,
pitch, sway, yaw and roll

なお、波浪中船体運動の実用計算法については、日本造船学会第2回耐航性シンポジウム⁸⁾において詳
細に解説されている。

2.2 規則波中の船体加速度⁹⁾

前節で得られた船体の6自由度の運動の解を用いて、規則波中の船体の任意の点 $p(x, y, z)$ に生じる
船体加速度を計算することができる。

まず、船体の任意の点 $p(x, y, z)$ の前後方向運動 (X: 船首方向を正とする)、水平方向運動 (Y: 右
舷方向を正とする) および垂直方向運動 (Z: 下向きを正とする) は次の形で求められる。

$$\left. \begin{aligned} X &= \xi + (z - z_G) \phi - y \psi \\ &= X_o \cos(\omega_e t - \varepsilon_X) = X_c \cos \omega_e t + X_s \sin \omega_e t \\ Y &= \eta + (x - x_G) \psi - (z - z_G) \theta \\ &= Y_o \cos(\omega_e t - \varepsilon_Y) = Y_c \cos \omega_e t + Y_s \sin \omega_e t \\ Z &= \zeta - (x - x_G) \phi + y \theta \\ &= Z_o \cos(\omega_e t - \varepsilon_Z) = Z_c \cos \omega_e t + Z_s \sin \omega_e t \end{aligned} \right\} \quad (2-18)$$

ただし、

$$\begin{aligned} X_c &= X_o \cos \varepsilon_X = \xi_c + (z - z_G) \phi_c - y \psi_c \\ X_s &= X \sin \varepsilon_X = \xi_s + (z - z_G) \phi_s - y \psi_s\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_C &= Y_O \cos \varepsilon_Y = \eta_C + (x-x_G) \psi_C - (z-z_G) \theta_C \\ Y_S &= Y_O \sin \varepsilon_Y = \eta_S + (x-x_G) \psi_S - (z-z_G) \theta_S \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_C &= Z_O \cos \varepsilon_Z = \zeta_C - (x-x_G) \phi_C + y \theta_C \\ Z_S &= Z_O \sin \varepsilon_Z = \zeta_S - (x-x_G) \phi_S + y \theta_S \end{aligned}$$

x_O, y_O, z_O : amplitudes of the motions of X-, Y- and Z- direction

$\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z$: phase angles of the motions of X-, Y- and Z- direction

従って、船体の任意の点 p (x, y, z) の前後方向速度 \dot{X} , 水平方向速度 \dot{Y} および垂直方向速度 \dot{Z} は次の形で得られる。

$$\left. \begin{array}{l} \dot{X} = \dot{x}_O \cos(\omega_e t - \varepsilon_{\dot{X}}) \\ \dot{Y} = \dot{y}_O \cos(\omega_e t - \varepsilon_{\dot{Y}}) \\ \dot{Z} = \dot{z}_O \cos(\omega_e t - \varepsilon_{\dot{Z}}) \end{array} \right\} \quad (2-19)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \dot{x}_O &= |\omega_e| \cdot x_O, & \varepsilon_{\dot{X}} &= \varepsilon_X - \pi/2 : \omega_e > 0 \\ &&&= \varepsilon_X + \pi/2 : \omega_e < 0 \\ \dot{y}_O &= |\omega_e| \cdot y_O, & \varepsilon_{\dot{Y}} &= \varepsilon_Y - \pi/2 : \omega_e > 0 \\ &&&= \varepsilon_Y + \pi/2 : \omega_e < 0 \\ \dot{z}_O &= |\omega_e| \cdot z_O, & \varepsilon_{\dot{Z}} &= \varepsilon_Z - \pi/2 : \omega_e > 0 \\ &&&= \varepsilon_Z + \pi/2 : \omega_e < 0 \end{aligned}$$

$\dot{x}_O, \dot{y}_O, \dot{z}_O$: amplitudes of X-, Y- and Z- component velocity

$\varepsilon_{\dot{X}}, \varepsilon_{\dot{Y}}, \varepsilon_{\dot{Z}}$: phase angles of X-, Y- and Z- component velocity

また、船体の任意の点 p (x, y, z) の前後方向加速度 \ddot{X} 、水平方向加速度 \ddot{Y} および垂直方向加速度 \ddot{Z} は次の形で求められる。

$$\left. \begin{array}{l} \ddot{x} = \ddot{x}_o \cos(\omega_e t - \varepsilon_{\ddot{x}}) \\ \ddot{y} = \ddot{y}_o \cos(\omega_e t - \varepsilon_{\ddot{y}}) \\ \ddot{z} = \ddot{z}_o \cos(\omega_e t - \varepsilon_{\ddot{z}}) \end{array} \right\} \quad (2-20)$$

ただし、

$$\ddot{x}_o = \omega_e^2 x_o, \quad \varepsilon_{\ddot{x}} = \varepsilon_x - \pi$$

$$\ddot{y}_o = \omega_e^2 y_o, \quad \varepsilon_{\ddot{y}} = \varepsilon_y - \pi$$

$$\ddot{z}_o = \omega_e^2 z_o, \quad \varepsilon_{\ddot{z}} = \varepsilon_z - \pi$$

$\ddot{x}_o, \ddot{y}_o, \ddot{z}_o$: amplitudes of X-, Y- and Z- component acceleration

$\varepsilon_{\ddot{x}}, \varepsilon_{\ddot{y}}, \varepsilon_{\ddot{z}}$: phase angles of X-, Y- and Z- component acceleration

(2-20)において、前後方向加速度は前後揺に基く加速度と縦揺に基く加速度および船首揺に基く加速度の前後方向成分を合成したものである。

水平方向加速度は左右揺に基く加速度と船首揺に基く加速度の水平方向成分および横揺に基く加速度の水平方向成分を合成したものである。垂直方向加速度は上下揺に基く加速度と縦揺に基く加速度の垂直方向成分および横揺に基く加速度の垂直方向成分を合成したものである。

さて、今船体の任意の点 p(x, y, z)に質量 m があると仮定したとき、この質量 m に働く力は、上述の運動加速度に基く慣性力と重力を考慮して、次のようになる。

a) 船の縦軸方向の力(船体固定座標系の x 軸方向に働く力)

$$F_{mx} = m(-\ddot{x} \cos \phi - g \sin \phi) \doteq m(-\ddot{x} - g \phi) \equiv m(-\alpha_x) \quad (2-21)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \alpha_x &= \ddot{x} + g \phi = \alpha_{xo} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{\alpha x}) \\ &= \alpha_{xc} \cos \omega_e t + \alpha_{xs} \sin \omega_e t \\ \alpha_{xc} &= \alpha_{xo} \cos \varepsilon_{\alpha x} = -\omega_e^2 x_c + g \phi_c \\ \alpha_{xs} &= \alpha_{xo} \sin \varepsilon_{\alpha x} = -\omega_e^2 x_s + g \phi_s \end{aligned} \quad (2-21)'$$

この場合には、周期的変動力に縦揺に基く重力成分が含まれる。(2-21)' を等価的な縦軸方向加速度と呼ぶこととする。

b) 船体中心線面に垂直な横方向の力(船体固定座標系の y 軸方向に働く力)

$$F_{my} = m(-\ddot{y} \cos \theta + g \sin \theta) \doteq m(-\ddot{y} + g \theta) \equiv m(-\alpha_y) \quad (2-22)$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 \alpha_y &= \ddot{Y} - g\theta = \alpha_{yo} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{ay}) \\
 &= \alpha_{yc} \cos \omega_e t + \alpha_{ys} \sin \omega_e t \\
 \alpha_{yc} &= \alpha_{yo} \cos \varepsilon_{ay} = -\omega_e^2 Y_c - g\theta_c \\
 \alpha_{ys} &= \alpha_{yo} \sin \varepsilon_{ay} = -\omega_e^2 Y_s - g\theta_s
 \end{aligned} \tag{2-22}'$$

この場合には、周期的変動力に横揺角に基く重力の横方向成分が含まれる。(2-22)'の加速度を等価的な横方向加速度と呼ぶことにする。

c) 船の水線面に垂直な上下方向の力(船体固定座標系のz軸方向に働く力)

$$F_{mz} = m(-\ddot{Z} \cos \theta + g \cos \theta) = m(-\ddot{Z} + g) \tag{2-23}$$

この場合には、周期的変動力として垂直加速度 \ddot{Z} に基く慣性力だけを考慮すればよい。

2.3 規則波中の船体表面に働く変動水圧

波浪変動水圧は、船体運動に基く静水圧の変化、Radiation 速度ボテンシャル、Diffraction 速度ボテンシャルおよびFroude-Kriloff の仮定に基く変動水圧をそれぞれ加えあわせることによって求められる。ここでは、いわゆる田才の方法^{10, 11)}に従って波浪変動水圧の計算法を示すが、理論式の誘導等の詳細は文献12)に報告されているので、結果のみを簡単に示すこととする。

2.1で得られた船体運動の解の中で、波浪変動水圧にほとんど影響を及ぼさない前後揺を除いて、上下揺、縦揺、左右揺、船首揺および横揺の解を利用して船体横断面の表面に働く変動水圧を計算することができる。すなわち、変動水圧を

$$P = P_o \cos(\omega_e t - \varepsilon_p) = P_c \cos \omega_e t + P_s \sin \omega_e t \tag{2-24}$$

ただし、

P : hydrodynamic pressure

P_o : amplitude of hydrodynamic pressure

ε_p : phase angle of hydrodynamic pressure

の形で表わせば

$$P = P_V + P_H + P_R + P_W \tag{2-25}$$

ただし、

P_V : pressure due to vertical motion

P_H : pressure due to horizontal motion

P_R : pressure due to rolling motion with respect to 0

P_W : pressure due to regular waves

のような4種類の圧力の和の形で求められる。

ここで、

$$\left. \begin{array}{l} P_V = \rho g h_o \{ \bar{P}_{VC} \cos \omega_e t + \bar{P}_{VS} \sin \omega_e t \} \\ P_H = \rho g h_o \{ \bar{P}_{HC} \cos \omega_e t + \bar{P}_{HS} \sin \omega_e t \} \\ P_R = \rho g h_o \{ \bar{P}_{RC} \cos \omega_e t + \bar{P}_{RS} \sin \omega_e t \} \\ P_W = \rho g h_o \{ \bar{P}_{WC} \cos \omega_e t + \bar{P}_{WS} \sin \omega_e t \} \end{array} \right\} \quad (2-26)$$

ただし、

$$\left. \begin{array}{l} \bar{P}_{VC} \\ \bar{P}_{VS} \end{array} \right\} = \frac{\zeta_o}{h_o} [(1+P''_{aH}) \begin{Bmatrix} \cos \varepsilon_\zeta \\ \sin \varepsilon_\zeta \end{Bmatrix} - P''_{dH} \begin{Bmatrix} \sin \varepsilon_\zeta \\ -\cos \varepsilon_\zeta \end{Bmatrix}] \\ - (x-x_G) \frac{\phi_o}{h_o} [(1+P''_{aH}) \begin{Bmatrix} \cos \varepsilon_\phi \\ \sin \varepsilon_\phi \end{Bmatrix} - P''_{dH} \begin{Bmatrix} \sin \varepsilon_\zeta \\ -\cos \varepsilon_\zeta \end{Bmatrix}] \\ - (V/\omega_e) \frac{\phi_o}{h_o} [2P''_{aH} \begin{Bmatrix} \sin \varepsilon_\phi \\ -\cos \varepsilon_\phi \end{Bmatrix} + P''_{dH} \begin{Bmatrix} \cos \varepsilon_\phi \\ \sin \varepsilon_\phi \end{Bmatrix}] \end{array} \right.$$

$$\left. \begin{array}{l} \bar{P}_{HC} \\ \bar{P}_{HS} \end{array} \right\} = \frac{\eta_o}{h_o} [P''_{aS} \begin{Bmatrix} \cos \varepsilon_\eta \\ \sin \varepsilon_\eta \end{Bmatrix} - P''_{dS} \begin{Bmatrix} \sin \varepsilon_\eta \\ -\cos \varepsilon_\eta \end{Bmatrix}] \\ + (x-x_G) \frac{\psi_o}{h_o} [P''_{aS} \begin{Bmatrix} \cos \varepsilon_\psi \\ \sin \varepsilon_\psi \end{Bmatrix} - P''_{dS} \begin{Bmatrix} \sin \varepsilon_\psi \\ -\cos \varepsilon_\psi \end{Bmatrix}] \\ + (V/\omega_e) \frac{\psi_o}{h_o} [2P''_{aS} \begin{Bmatrix} \sin \varepsilon_\psi \\ -\cos \varepsilon_\psi \end{Bmatrix} + P''_{dS} \begin{Bmatrix} \cos \varepsilon_\psi \\ \sin \varepsilon_\psi \end{Bmatrix}] \\ + z_G \frac{\theta_o}{h_o} [P''_{aS} \begin{Bmatrix} \cos \varepsilon_\theta \\ \sin \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} - P''_{dS} \begin{Bmatrix} \sin \varepsilon_\theta \\ -\cos \varepsilon_\theta \end{Bmatrix}] \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_{Rc} \\ \bar{P}_{Rs} \end{aligned} = y_s \frac{\theta_o}{h_o} \begin{Bmatrix} \cos \varepsilon_\theta \\ \sin \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} + y_w \frac{\theta_o}{h_o} [P''_{aR} \begin{Bmatrix} \cos \varepsilon_\theta \\ \sin \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} - P''_{dR} \begin{Bmatrix} \sin \varepsilon_\theta \\ -\cos \varepsilon_\theta \end{Bmatrix}]$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_{Wc} &= -\exp(-kz_s) \cos(kx \cos \chi - ky_s \sin \chi) \\ &\quad -\exp(-kd_m) \left(\frac{\omega}{\omega_e}\right)^2 P''_{aH} \cos(kx \cos \chi) \\ &\quad +\exp(-kd_m) \left(\frac{\omega}{\omega_e}\right) P''_{dH} \sin(kx \cos \chi) \\ &\quad +\exp(-kd/2) \sin \chi \left(\frac{\omega}{\omega_e}\right)^2 P''_{aS} \sin(kx \cos \chi) \\ &\quad +\exp(-kd/2) \sin \chi \left(\frac{\omega}{\omega_e}\right) P''_{dS} \cos(kx \cos \chi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_{Ws} &= -\exp(-kz_s) \sin(kx \cos \chi - ky_s \sin \chi) \\ &\quad -\exp(-kd_m) \left(\frac{\omega}{\omega_e}\right)^2 P''_{aH} \sin(kx \cos \chi) \\ &\quad -\exp(-kd_m) \left(\frac{\omega}{\omega_e}\right) P''_{dH} \cos(kx \cos \chi) \\ &\quad -\exp(-kd/2) \sin \chi \left(\frac{\omega}{\omega_e}\right)^2 P''_{aS} \cos(kx \cos \chi) \\ &\quad +\exp(-kd/2) \sin \chi \left(\frac{\omega}{\omega_e}\right) P''_{dS} \sin(kx \cos \chi) \end{aligned}$$

従って、

$$\begin{aligned} P_c \\ P_s \end{aligned} = \rho g h_o \begin{Bmatrix} \bar{P}_{Vc} + \bar{P}_{Hc} + \bar{P}_{Rc} + \bar{P}_{Wc} \\ \bar{P}_{Vs} + \bar{P}_{Hs} + \bar{P}_{Rs} + \bar{P}_{Ws} \end{Bmatrix} \quad (2-27)$$

$$P_o = \sqrt{P_c^2 + P_s^2}, \quad \varepsilon_p = \tan^{-1}(P_s/P_c) \quad (2-28)$$

P''_{aH} , P''_{dH} , P''_{aS} , P''_{dS} , P''_{aR} , P''_{dR} 等の計算式は田才^{8,9}の論文に詳しく述べられている。

2.4 規則波中の船体横断面に働く変動荷重

規則波中における船体の単位長さ断面に働く変動荷重は(2-5)～(2-10)の各式で表わされる。従って、船体横断面に働く変動荷重、すなわち、縦軸方向荷重(以下波浪軸力と呼ぶことにする)、垂直波浪剪断力、垂直波浪曲げモーメント、水平波浪剪断力、水平波浪曲げモーメントおよび波浪捩りモーメントは、上記の単位長さ断面に働く力、あるいはこの力によるモーメントを船尾端(あるいは船首端)より考えている断面まで積分することによって求められる^{2, 13, 14}。

以下に各変動荷重の計算式を列記する。各変動荷重の正負の符号はFig. 2.4-1に示すように定義している。

a) 波浪軸力²⁾

波浪軸力と関連のある船体運動としては、対称運動である前後揺、上下揺および縦揺のみを考えればよい。船体の x_1 の位置における横断面に誘起される波浪軸力は、圧縮力を正として、前後揺に基く力、上下揺に基く力および規則波に基く力の4種類の力の和として次式のように求められる。

$$F_A = a_{11} \ddot{\xi} + a_{12} \ddot{\zeta} + a_{13} \dot{\phi} + F_{Aw} \quad (2-29)$$

ただし、

$a_{11} \ddot{\xi}$: axial force due to surging motion

$a_{12} \ddot{\zeta}$: axial force due to heaving motion

$a_{13} \dot{\phi}$: axial force due to pitching motion

$F_{Aw} = F_{AwC} \cos \omega_e t + F_{AwS} \sin \omega_e t$: axial force due to regular waves

b) 垂直波浪剪断力¹³⁾

船長方向の任意の位置 x の単位長さ断面に働く垂直方向の力は次式によって与えられる。

$$\frac{dF_V}{dx} = -\frac{w}{g} \ddot{z}_s + \frac{dF_z}{dx} \quad (2-30)$$

ただし、

$\frac{dF_V}{dx}$: vertical component of wave load induced on a strip

$$\ddot{z}_s = \ddot{\zeta} - (x - x_G) \ddot{\phi}$$

船長方向のある位置 x_1 の断面に誘起される垂直剪断力は、断面の前面で上向きあるいは後面で下向きに働く剪断力を正として、次式によって求められる。

$$F_V(x_1) = \int_{A.E.}^{x_1} \left(-\frac{w}{g} \ddot{z}_s + \frac{dF_z}{dx} \right) dx \quad (2-31)$$

積分範囲は船の後端(A.E.)より x_1 までとする。

c) 垂直波浪曲げモーメント¹³⁾

船長方向のある位置 x_1 の断面に誘起される曲げモーメントは、ホギングモーメントを正として、次式によって求められる。

$$M_V(x_1) = \int_{A.E.}^{x_1} \left(\frac{w}{g} \ddot{z}_s - \frac{dF_z}{dx} \right) (x - x_1) dx \quad (2-32)$$

d) 水平波浪剪断力¹⁴⁾

船長方向の任意の位置 x の単位長さ断面に働く水平方向の力は次式によって与えられる。

$$\frac{dF_H}{dx} = -\frac{w}{g} \ddot{Y}_s + \frac{dF_Y}{dx} \quad (2-33)$$

$\frac{dF_H}{dx}$: horizontal component of wave load induced on a strip

$$\ddot{Y}_s = \ddot{\eta} + (x - x_G) \ddot{\psi}$$

船長方向のある位置 x_1 の断面に誘起される水平剪断力は、断面の前面で y の負方向、あるいは後面で y の正方向に働く剪断力を正とすれば、次式によって求められる。

$$F_H(x_1) = \int_{A.E.}^{x_1} \left(-\frac{w}{g} \ddot{Y}_s + \frac{dF_Y}{dx} \right) dx \quad (2-34)$$

e) 水平波浪曲げモーメント¹⁴⁾

船長方向のある位置 x_1 の断面に誘起される水平曲げモーメントは、水平曲げモーメントによる右舷の直応力が引張応力となる状態を正とすれば、次式によって求められる。

$$M_H(x_1) = \int_{A.E.}^{x_1} \left(\frac{w}{g} \ddot{Y}_s - \frac{dF_Y}{dx} (x - x_1) \right) dx \quad (2-35)$$

f) 波浪捩りモーメント¹⁴⁾

船長方向の任意の位置 x の単位長さ断面に働く \widehat{yz} 方向のモーメントは次式によって与えられる。

$$\frac{dM_T}{dx} = -\frac{i_\theta}{g} \ddot{\theta} + \frac{dM_{YZ}}{dx} \quad (2-36)$$

ただし、

$\frac{dM_T}{dx}$: torsional moment induced on a strip

$\frac{i_\theta}{g}$: moment of inertia about x axis for a strip

船長方向のある位置 x_1 の断面に誘起される捩りモーメントは、断面の前面で \widehat{zy} 方向あるいは断面の後面で \widehat{yz} 方向に働くモーメントを正とすれば、次式によって求められる。

$$M_T(x_1) = \int_{A.E.}^{x_1} \left(-\frac{i}{g} \ddot{\theta} + \frac{dM}{dx} YZ \right) dx \quad (2-37)$$

船体横断面の振り強度を検討するためには、その断面の振り中心回りの振りモーメントを求める必要がある。この振りモーメントは(2-34)および(2-37)を用いて次式によって求められる。

$$M_{TC}(x_1) = M_T(x_1) + z_s F_H(x_1) \quad (2-38)$$

ただし、

z_s : distance from centre of gravity of the ship to
shear centre of the section

以上 a) ~ f) に述べた方法によって、船体横断面に誘起される変動荷重は次の形で求められる。

$$\left. \begin{array}{l} F_A = F_{AO} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{FA}) \\ F_V = F_{VO} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{FV}) \\ M_V = M_{VO} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{MV}) \\ F_H = F_{HO} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{FH}) \\ M_H = M_{HO} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{MH}) \\ M_T = M_{TO} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{MT}) \end{array} \right\} \quad (2-39)$$

ただし、

- F_A : wave axial force
- F_{AO} : amplitude of wave axial force
- ε_{FA} : phase angle of wave axial force
- F_V : vertical wave shearing force
- F_{VO} : amplitude of vertical wave shearing force
- ε_{FV} : phase angle of vertical wave shearing force
- M_V : vertical wave bending moment
- M_{VO} : amplitude of vertical wave bending moment
- ε_{MV} : phase angle of vertical wave bending moment
- F_H : horizontal wave shearing force
- F_{HO} : amplitude of horizontal wave shearing force
- ε_{FH} : phase angle of horizontal wave shearing force
- M_H : horizontal wave bending moment

- M_{HO} : amplitude of horizontal wave bending moment
 ϵ_{MH} : phase angle of horizontal wave bending moment
 M_T : wave torsional moment
 M_{TO} : amplitude of wave torsional moment
 ϵ_{MT} : phase angle of wave torsional moment

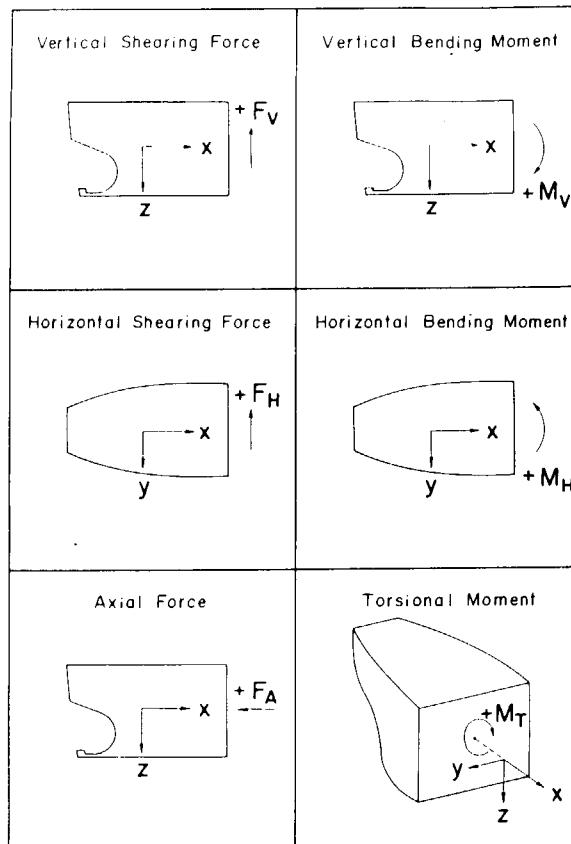


FIG. 2.4-1 SIGN CONVENTIONS FOR WAVE LOADS

なお、各波浪荷重の計算式の詳細については附録 2 に示している。

また、日本造船学会第 2 回耐航性シンポジウム¹⁵⁾において、これらの波浪荷重の計算方法が詳しく説明されている。

3. 不規則波中の船体に働く変動荷重

3.1 船体応答短期予測理論

短期の不規則波浪海面の座標系を Fig. 3.1-1 のように定義し、船は一定の平均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進行しているものと仮定する。

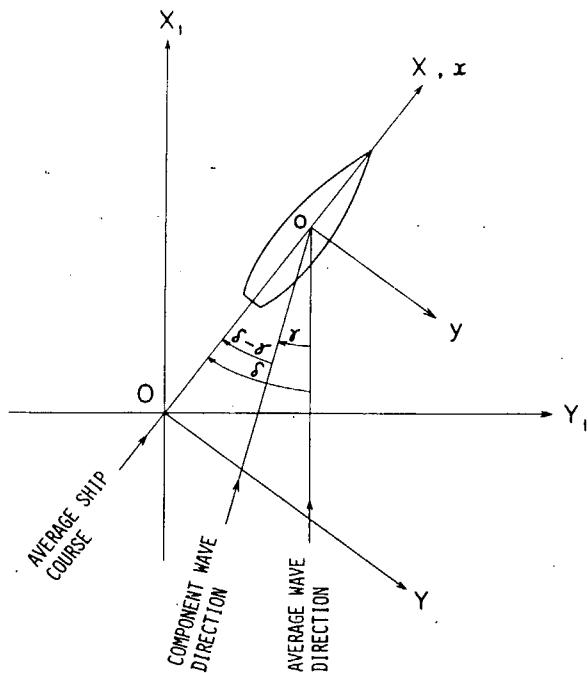


Fig. 3.1-1 Coordinates in Irregular Waves

海面の有義波高 H 、平均波周期 T とすると、海面の波スペクトルは次のような I. S. S. C. スペクトル¹⁶⁾で近似的に表わすことができる。ただし、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 $\pm 90^\circ$ の範囲で (\cosine)² 分布するものと仮定する。すなわち、

$$\begin{aligned} [f(\omega, \gamma)]^2 &= (2/\pi) [f(\omega)]^2 \cos^2 \gamma & : -\pi/2 < \gamma < \pi/2 \\ &= 0 & : \text{elsewhere} \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (3-1)$$

$$[f(\omega)]^2 = 0.11H^2 \omega_T^{-1} (\omega/\omega_T)^{-5} \exp[-0.44(\omega/\omega_T)^{-4}] \quad (3-2)$$

ただし、

ω : circular frequency of a component wave

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

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

H : visual average wave height (significant wave height)

(3-1) および (3-2) で表わされる短期不規則波浪海面を航行している船の船体応答の分散 R^2 は、線形重ね合わせ理論¹⁷⁾に基く応答スペクトル計算によって次のように求められる。

$$\begin{aligned} R^2 &= \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} [A(\omega, \delta - \gamma)]^2 [f(\omega, \gamma)]^2 d\omega d\gamma \\ &= (2/\pi) \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} [A(\omega, \delta - \gamma)]^2 [f(\omega)]^2 \cos^2 \gamma d\omega d\gamma \quad (3-3) \end{aligned}$$

ただし、

R : standard deviation of a ship response in short-crested irregular waves from the direction of δ
 $[A(\omega, \delta - \gamma)]$: response amplitude of a ship response in regular wave from the direction of $(\delta - \gamma)$, which is equal to $[r_o/h_o]$
 δ : average heading angle against the average wave direction

前章で説明した線形ストリップ理論に基く計算法によって規則波中の船体運動は一般に次の形で求められる。

$$r = r_o \cos(\omega_e t - \varepsilon_r) \quad (3-4)$$

あるいは、

$$[r/h_o] = [r_o/h_o] \cos(\omega_e t - \varepsilon_r) \quad (3-5)$$

ただし、

r_o : amplitude of a ship response
 ε_r : phase angle of a ship response

すなわち、(3-4) あるいは (3-5) の形で得られた船体応答が線形応答の場合には応答関数として $[r_o/h_o]$ を採用すればよい。しかしながら、波浪変動水圧、水平波浪剪断力、水平波浪曲げモーメント等の非線形応答の場合には厳密な意味の応答関数は得られないで原理的に、(3-3) の線形重ね合わせ理論の適用はできない。このような場合には比較的大きい一定波高の規則波中で計算された $[r_o/h_o]$ を近似的に等価な応答関数と見なして実用的な意味で (3-3) を適用することが許されるものと仮定する。このような近似を仮定した場合には、著しく苛酷な不規則波浪海面における船体応答の標準偏差は過大評価され、比較的平穏な不規則波浪海面におけるそれは過小評価される傾向となる。次節に説明する大洋の波浪中の船体応答の長期予測結果についても同じことが言える。

さて、(3-1) によって短期不規則波浪海面における船体応答の分散 R^2 が求められれば、船体応答の極大値がある値 r_1 を越える確率 (船体応答の極大値が一定値 r_1 を越える回数と変動回数との比) は次式によって与えられる。¹⁸⁾

$$q(r>r_1) = \exp(-r_1^2/2R^2) \quad (3-6)$$

ただし、

$q(r>r_1)$: exceeding probability for a level r_1 of a ship response in a short-term sea condition

また、下記の各式によって船体応答の短期の統計的予測も可能である。¹⁹⁾

$r_{1/1}$	= 1.25R : mean value
$r_{1/3}$	= 2.00R : 1/3 highest mean value
$r_{1/10}$	= 2.55R : 1/10 highest mean value
$r_{(1/100)}$	= 3.22R : 1/100 expected maximum
$r_{(1/1000)}$	= 3.87R : 1/1000 expected maximum
$r_{(1/10000)}$	= 4.43R : 1/10000 expected maximum

3.2 船体応答長期予測理論 ²⁰⁾

有義波高 H 、平均波周期 T の短期不規則波浪海面において、船が一定平均速度を保ち且つ波の平均進行方向に対して常に一定の平均迎角を保って航海している場合には、船体応答の極大値がある値 r_1 を越える確率は(3-6)によって与えられる。従って、船がある海域において長期間にわたって常に一定の平均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、船体応答の極大値が一定値 r_1 を越える長期累積確率は次式によって与えられる。

$$\begin{aligned} Q(r>r_1) &= \int_0^\infty \int_0^\infty q(r>r_1) P(H, T) dHdT \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty \exp(-r_1^2/2R^2) p(H, T) dHdT \end{aligned} \quad (3-7)$$

ただし、

$Q(r>r_1)$: long-term exceeding probability for a level r_1 of a ship response

$p(H, T)$: long-term probability of occurrence for the sea condition of the average wave height H and the average wave period T

船がある海域を長期間にわたって航海する場合に、平均船速は一定で波の平均進行方向に対する平均迎角 δ の確率密度関数が $0 \sim 2\pi$ の範囲に一様であるとすれば、船体応答の極大値が一定値 r_1 を越える長期累積確率は(3-7)の左辺を $Q(\delta)$ と書けば次式によって与えられる。

$$Q = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} Q(\delta) d\delta \quad (3-8)$$

ただし、

Q : long-term exceeding probability for a level r_1 of
a ship response when all headings are considered

4. 波浪中の船体に働く変動荷重の統計的予測結果

4.1 緒 言

規則波中の船体に誘起される変動荷重の応答関数は、2.で説明した方法によって求められる。従って、3.において説明したように、これらの変動荷重応答関数と短期の波浪海面の波スペクトルを用いて線形重ね合わせの理論に基く不規則波中の船体変動荷重のスペクトル計算を行なうことにより、変動荷重の標準偏差が求められる。

また、その計算結果を用いて、大洋の波浪の長期発現頻度資料を利用することにより、波浪中の船体に誘起される変動荷重の長期予測を行なうことができる。

すなわち、Table 4.1-1にその主要目を示すような巨大型油送船および1軸コンテナ船の2船型を計算適用例として、2.および3.で述べた計算方法によって波浪中の船体に誘起される変動荷重の短期および長期予測計算を行なっている。さらに、縦強度に関連する変動荷重については、これらの船型と幾何学的に相似で船長の異なる船型を数種類仮定して、これらの船型についても同様の計算を行なっている。本章では、その計算結果を示して、それぞれの変動荷重の設計値推定に関する検討を行なっている。

Table 4.1-1 Main Particulars of Oil Tanker,
Container Ship and Ore Carrier

Items	Oil Tanker	Container Ship	Ore Carrier
Length Between Perpendiculars (L)	310.000 m	175.000 m	247.000 m
Breadth (B)	48.710 m	25.400 m	40.600 m
Depth (D)	24.500 m	15.400 m	23.000 m
Draught (d_o)	19.000 m	9.500 m	16.000 m
Displacement (W)	250,540 t	24,742 t	135,666 t
Block Coefficient (C_b)	0.852	0.572	0.825
Midship Coefficient (C_m)	0.995	0.970	0.998
Water Plane Area Coefficient (C_w)	0.903	0.711	0.882
Centre of Gravity before Midship (x_G)	0.0331 L	-0.0142 L	0.0296 L
Centre of Gravity below Water Line (z_G)	0.2879 d_o	-0.0021 d_o	0.2325 d_o
Metacentric Height (GM)	0.3305 d_o	0.1053 d_o	0.2581 d_o
Longitudinal Gyradius (κ_L)	0.2494 L	0.24 L	0.2362 L
Transverse Gyradius (κ_T)	0.3231 B	0.33 B	0.2200 B
Heaving Period (T_H)	11.60 sec	7.50 sec	10.62 sec
Pitching Period (T_p)	10.90 sec	7.15 sec	9.57 sec
Rolling Period (T_R)	14.00 sec	18.00 sec	11.04 sec

変動荷重に関する予測計算は、波浪軸力²⁾、垂直波浪曲げモーメント^{21, 22)}、水平波浪曲げモーメント^{22, 23)}、垂直波浪剪断力^{22, 24)}、水平波浪剪断力^{22, 25)}、波浪振りモーメント^{22, 26)}および波浪変動水圧²⁷⁾の7種類について行なっている。また、局部強度に関連が深い船体加速度についても予測計算を行なっている²⁸⁾。なお、波浪変動水圧および船体加速度については、Table 4.1-1にその主要目を示した鉱石運搬船についても予測計算を行なっている。^{9, 12)}

4.2 波浪軸力・垂直波浪曲げモーメント・水平波浪曲げモーメント

船体縦強度直応力に関連する波浪軸力、垂直波浪曲げモーメントおよび水平波浪曲げモーメントについて、短期予測および長期予測計算を行なっている。計算例として採用された巨大型油送船船型(SR131、タンカー船型)および1軸コンテナ船型(SR108、1軸コンテナ船型)の主要目をTable 4.1-1に示す。これらの2船型を基準船型として、それぞれ幾何学的に相似で長さの異なる数種類の船型(油送船: $L = 190, 250, 310, 370, 430, 490\text{ m}$; コンテナ船: $L = 150, 175, 200, 250, 300, 350\text{ m}$)を仮定して、これらの各船型についても各波浪荷重の長期予測計算を行なっている。

4.2.1 規則波中応答関数計算結果

規則波中の船体に誘起される軸力、垂直曲げモーメントおよび水平曲げモーメントの応答関数の計算はつぎの条件の下に行なわれている。

a) 船速(V)

$$Fr = V / \sqrt{gL} = 0, 0.05, 0.10, 0.15 : \text{油送船}$$

$$= 0, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 : \text{コンテナ船}$$

b) 船の波に対する迎角(χ)

$$\chi = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ (\chi = 0^\circ: \text{追波状態})$$

c) 波長(λ)

$$\sqrt{L/\lambda} = 0.3 \sim 1.8 (0.1 \text{ 間隔})$$

d) 波高(H_w)

$$H_w = 2 h_0 = 10\text{ m}$$

e) 各変動荷重の計算を行なった船体横断面位置

$$A.P., S.S. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, F.P.$$

(船長の10等分位置)

軸力、垂直曲げモーメントおよび水平曲げモーメントの応答関数計算結果をFig. 4.2-1～4.2-3に例示する。各変動荷重の無次元振幅 $F_{AO}/\rho g LB h_0$, $M_{VO}/\rho g L^2 B h_0$ および $M_{HO}/\rho g L^2 B h_0$ を $\sqrt{L/\lambda}$ の関数として表わしている。

4.2.2 短期不規則波中標準偏差計算結果

短期不規則波浪海面をISSCスペクトルで表わし、このような不規則波中の船体に誘起される軸力、垂直曲げモーメントおよび水平曲げモーメントの標準偏差の計算を行なっている。計算条件は次の通りである。

a) 船速は 4.2.1 と同じ条件。

b) 波の平均進行方向に対する船の迎角

$$\delta = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ (\delta = 0^\circ: \text{追波状態})$$

c) 平均波周期(T)

$$T = 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 \text{ sec}$$

d) 各変動荷重の計算を行なった船体横断面位置は 4.2.1 と同じ条件。

短期不規則波中の船体に誘起される軸力、垂直曲げモーメントおよび水平曲げモーメントの標準偏差計算結果を Fig. 4.2-4 ~ 4.2-6 に示す。各変動荷重の標準偏差無次元値 $R_{FA}/\rho g L^2 BH$, $R_{MV}/\rho g L^2 BH$ および $R_{MH}/\rho g L^2 BH$ を $\sqrt{L/\lambda e}$ ($\lambda e = g T^2 / 2 \pi$) の関数として表わしている。また、Fig. 4.2-7 ~ 4.2-9 に各変動荷重の標準偏差無次元値を迎角 δ の関数として表わしている。これらの図には長波頂不規則波中と短波頂不規則波中の計算結果をあわせて示しているが、数値計算上注意すべきこととして、4.2.1 における迎角 χ および 4.2.2 における迎角 δ の間隔を少くとも 22.5° にとらなければ（たとえば 45° 間隔にとれば）、(3-3) の数値積分および (3-7) と (3-8) の数値積分において重大な計算誤差を生じることもあり得ることが明白に示されている。この傾向は水平波浪曲げモーメントの場合に特に著しい。

4.2.3 長期予測計算結果

北大西洋の長期波浪発現頻度資料を用いて、船長 $310m$ の大型油送船および船長 $175m$ の 1 軸コンテナ船について、軸力、垂直曲げモーメントおよび水平曲げモーメントの長期予測計算を行なっている。さらに、これらの船舶と幾何学的に相似で船長の異なる船型数種類を仮定して同様の計算を行なっている。計算条件は次の通りである。

a) 船速は 4.2.1 と同じ条件

b) 船の波に対する迎角(δ)

$\delta = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ$ の各場合およびすべての迎角を考慮した場合。

c) 各変動荷重の計算を行なった船体横断面位置は 4.2.1 と同じ条件。

d) 波浪発現頻度

Walden²⁹⁾ 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³⁰⁾）を用いている。

波浪中の船体に誘起される軸力、垂直曲げモーメントおよび水平曲げモーメントの長期予測計算結果を Fig. 4.2-10 ~ 4.2-28 に示す。各変動荷重の長期予測値は $F_A/\rho g L^2 B$, $M_V/\rho g L^3 B$ および $M_H/\rho g L^3 B$ の無次元値で表わしている。

Fig. 4.2-10 ~ 4.2-12 には、長期超過確率 $Q = 10^{-8}$ に対応する各変動荷重の長期予測値について迎角 δ をパラメータとして船長方向分布を示している。

Fig. 4.2-13 ~ 4.2-15 には、すべての迎角を考慮した場合に $Q = 10^{-5}$ に対応する各変動荷重の長期予測値を、また Fig. 4.2-16 ~ 4.2-18 には、同じ条件で $Q = 10^{-6}$ に対応する長期予測値について、船速をパラメータとしてその船長方向分布を示している。

さらに、Fig. 4.2-19 には、すべての迎角を考慮した場合に $Q = 10^{-4}$, 10^{-6} , 10^{-8} に対応する垂直曲げモーメントの長期予測値の船長方向分布を示すとともに、BV (フランス船級協会、1977 年版規則)、LR (ロイド船級協会、1977 年版規則)、NV (ノルウェー船級協会、1977 年版規則)、AB (アメリカ船級協会、1977 年版規則)、GL (ドイツ船級協会、1977 年版規則)、NK (日本海事協会、昭和 52 年度版規則) の各船級協会の縦強度規定における垂直波浪曲げモーメント設計値をあわせ記入して、相互に比較している。続いて、Fig. 4.2-20 ~ 4.2-22 には、 $Q = 10^{-6}$, 10^{-8} に対応する各変動荷重の長期予測値を、大型油送船とコンテナ船の場合を比較してその船長方向分布を示している。

最後に、Fig. 4.2-23 ~ 4.2-28 には、大型油送船船型とコンテナ船型について、幾何学的に相

似で船長の異なる船型を仮定して各変動荷重の長期予測値を求めた結果を比較して示している。これらの図においては、船体中央部断面に誘起される各変動荷重の $Q = 10^{-8}$ および $Q = 10^{-6}$ に対応する長期予測値を船長の関数として表わしており、さらに SR134 報告書^{31～35)} 等に発表された各種船型の変動荷重長期予測値をも記入して比較している。ただし、これらの資料中には 4.2.2 において述べたような数値計算条件に基く計算誤差が極端に大きいと思われるものもあるので、このような計算値は除外して記入していない。

以上に示した結果より、波浪軸力、垂直波浪曲げモーメントおよび水平波浪曲げモーメントの長期予測値の一般的傾向として次のような結論を得る。

大型油送船の場合には、

- (a) 波浪軸力は、正面迎波状態において最も大きく、追波状態から横波状態の範囲においては比較的小さい。
波浪軸力は一般に船速の低下によって小さくなる。波浪軸力の船長方向分布は、S. S. 9付近において最も大きく、S. S. 9から船体中央部の範囲までは次第に減少し、船体中央部からS. S. 2の範囲はほぼ一様な大きさを示す。
- (b) 垂直波浪曲げモーメントは、追波状態および正面迎波状態において最も大きく、横波状態において最も小さい。垂直波浪曲げモーメントに及ぼす船速の影響はあまり大きくなりない。垂直波浪曲げモーメントの船長方向分布は船体中央に関して前後対称に近く、船体中央部付近において最大値を生じる。
- (c) 水平波浪曲げモーメントは、横波状態において最も大きく、正面迎波状態および追波状態においては比較的小さい。水平波浪曲げモーメントに及ぼす船速の影響は無視し得る程度である。水平波浪曲げモーメントの船長方向分布は船体中央に関して前後対称に近く、船体中央部付近において最大値を生じる。

コンテナ船の場合には、

- (d) 波浪軸力に及ぼす迎角および船速の影響は油送船の場合と同様の傾向を示す。波浪軸力の船長方向分布形状は油送船の場合とかなり異なり、一般に S. S. 6～7付近において最も大きく、船首尾に向って減少している。
波浪軸力長期予測値の無次元値を同一船長で比較すると、コンテナ船の値が油送船のそれよりもやや小さい。
- (e) 垂直波浪曲げモーメントは、正面迎波状態において最も大きく、追波状態から横波状態の範囲においては比較的小さい。垂直波浪曲げモーメントに及ぼす船速の影響は特に低速の場合を除いて無視し得る程度である。垂直波浪曲げモーメントの船長方向分布は船体中央に関して前後対称に近いが、その分布形状は油送船の場合とやや異なる。垂直波浪曲げモーメント長期予測値の無次元値を同一船長で比較すると、コンテナ船の値が油送船のそれよりもかなり小さい。
- (f) 水平波浪曲げモーメントに及ぼす船速および迎角の影響ならびに船長方向分布形状は、油送船の場合と同様の傾向を示す。水平波浪曲げモーメント長期予測値の無次元値を同一船長で比較すると、コンテナ船の値が油送船のそれよりもやや小さい。

また、垂直波浪曲げモーメントの長期予測値を各船級協会の縦強度規定におけるその設計値と比較すると、何れの船級協会における垂直波浪曲げモーメント設計値も北大西洋においてすべての迎角を考慮した場合の長期累積超過確率 $Q = 10^{-8}$ に対応する長期予測値よりは小さく、 $Q = 10^{-4}$ に対応する長期予測値よりは大きい。各船級協会の垂直波浪曲げモーメント設計値は、各船級協会の静水中垂直曲げモーメントに関する規定の相違もあって、相互にかなり相違しているけれども、平均的には $Q = 10^{-6}$ に対応する垂直波浪曲げモーメント長期予測値程度に相当していると言える。

4.3 垂直波浪剪断力・水平波浪剪断力・波浪振りモーメント

船体縦強度剪断应力に関連する垂直波浪剪断力、水平波浪剪断力および波浪振りモーメントについて、短期予測および長期予測計算を行なっている。計算適用船型は4.2の場合と同じ巨大型油送船船型と1軸コンテナ船型である。また、これら二船型を基準船型として、それぞれ幾何学的に相似で長さの異なる数種類の船型を仮定して、これらの各船型について各変動荷重の長期予測計算を行なっている。以上の諸計算において、波浪振りモーメントについては船体重心を通る縦方向軸に関する振りモーメントを計算している。

4.3.1 規則波中応答関数計算結果

規則波中の船体に誘起される垂直剪断力、水平剪断力および振りモーメントの応答関数の計算は4.2.1の場合と全く同じ条件の下に行なわれている。

垂直波浪剪断力、水平波浪剪断力および波浪振りモーメントの応答関数計算結果をFig. 4.3-1～4.3-3に例示する。各変動荷重の無次元振幅 $F_{V0}/\rho g LB h_0$, $F_{H0}/\rho g LB h_0$ および $M_{T0}/\rho g L^3 B h_0$ を $\sqrt{L/\lambda e}$ の関数として表わしている。

4.3.2 短期不規則波中標準偏差計算結果

短期不規則波浪海面をISSCスペクトルで表わし、このような不規則波中の船体に誘起される垂直剪断力、水平剪断力および振りモーメントの標準偏差の計算を行なっている。計算条件は4.2.2の場合と全く同じである。

短期不規則波中の船体に誘起される垂直剪断力、水平剪断力および振りモーメントの標準偏差計算結果をFig. 4.3-4～4.3-6に例示する。各変動荷重の標準偏差無次元値 $R_{FV}/\rho g LB H$, $R_{FH}/\rho g LB H$ および $R_{MT}/\rho g L^3 BH$ を $\sqrt{L/\lambda e}$ ($\lambda e = g T^2 / 2 \pi$) の関数として表わしている。また、Fig. 4.3-7～4.3-9に各変動荷重の標準偏差無次元値を迎角 δ の関数として表わしている。これらの図には長波頂不規則波中と短波頂不規則波中の計算結果をあわせ示しているが、数値計算上注意すべきこととして4.3.1および4.3.2の計算条件としては4.2.1および4.2.2の計算条件と同様に迎角 χ および迎角 δ の間隔を 22.5° にとらなければ、(3-3)の数値積分および(3-7)と(3-8)の数値積分に重大な計算誤差を生じることもあり得ることが明白に示されている。この傾向は水平波浪剪断力と波浪振りモーメントの場合に特に著しい。

4.3.3 長期予測計算結果

北大西洋の長期波浪発現頻度資料を用いて船長 310 m の巨大型油送船および船長 175 m の1軸コンテナ船について垂直剪断力、水平剪断力および振りモーメントの長期予測計算を行なっている。さらに、これらの船型と幾何学的に相似で船長の異なる船型数種類を仮定して同様の計算を行なっている。計算条件は4.2.3の場合と全く同じである。

波浪中における船体に誘起される垂直剪断力、水平剪断力および振りモーメントの長期予測計算結果をFig. 4.3-10～4.3-28に示す。各変動荷重長期予測値は $F_V/\rho g L^2 B$, $F_H/\rho g L^2 B$, $M_T/\rho g L^3 B$ の無次元値で表わしている。

Fig. 4.3-10～4.3-12には、長期超過確率 $Q = 10^{-8}$ に対応する各変動荷重の長期予測値について迎角 δ をパラメータとして船長方向分布を示している。

Fig. 4.3-13～4.3-15には、すべての迎角を考慮した場合に $Q = 10^{-5}$ に対応する各変動荷重の長期予測値を、また Fig. 4.3-16～4.3-18には、同じ条件で $Q = 10^{-4}$ に対応する長期予測値について、船速をパラメータとしてその船長方向分布を示している。

さらに、Fig. 4.3-19には、すべての迎角を考慮した場合に $Q = 10^{-4}$, 10^{-6} , 10^{-8} に対応する

垂直剪断力の長期予測値の船長方向分布を示すとともに、4.2.3の場合と同様に、BV, LR, NV, AB, GL, およびNKの各船級協会の縦強度規定における垂直波浪剪断力設計値をあわせ記入して、相互に比較している。続いて、Fig. 4.3-20～4.3-22には、 $Q = 10^{-6}$, 10^{-8} に対応する各変動荷重の長期予測値を、大型油送船とコンテナ船の場合を比較してその船長方向分布を示している。

最後に、Fig. 4.3-23～4.3-28には、大型油送船船型とコンテナ船型について幾何学的に相似で船長の異なる船型を仮定して各変動荷重の長期予測値を求めた結果を比較して示している。これらの図においては、船体中央部断面に誘起される各変動荷重の $Q = 10^{-8}$ および $Q = 10^{-6}$ に対応する長期予測値を船長の関数として表わしており、さらに、SR134報告書^{31～35)}等に発表された各種船型の変動荷重長期予測値をも記入して比較している。ただし、4.2.3においても指摘したように、これらの資料中には4.2.2において述べたような数値計算条件に基く計算誤差が極端に大きいと思われるものもあるので、このような計算値は除外して記入していない。

以上に示した結果より、垂直波浪剪断力、水平波浪剪断力および波浪振りモーメントの長期予測値の一般的傾向として次のような結論を得る。

巨大型油送船の場合には、

- (a) 垂直波浪剪断力は、追波状態および正面迎波状態において最も大きく、横波状態において最も小さい。垂直波浪剪断力の大きさとその船長方向分布は、船速と波に対する迎角によってかなり影響される。垂直波浪剪断力の船長方向分布は一般に船体中央に関して前後対称に近く、船首尾より船長の $1/4$ の距離付近において極大値を示し、船体中央部付近において極小値を示す。船速低下によって、後半部の極大値の生じる位置はあまり変わらないがその値はやや大きくなり、一方前半部の極大値の生じる位置はやや前方に移動するがその値はあまり変わらない。
- (b) 水平波浪剪断力は、横波状態において最も大きく、迎波状態において最も小さい。水平波浪剪断力の大きさは船速低下によってやや小さくなる。水平波浪剪断力の船長方向分布は船体中央に関して前後対称に近く、船首尾より船長の $1/4$ の距離付近において極大値を示し、船体中央部付近において極小値を示す。
- (c) 波浪振りモーメントは、横波状態において最も大きく、迎波状態において最も小さい。波浪振りモーメントの大きさは船速によってほとんど変化しない。波浪振りモーメントの船長方向分布形状は前後対称ではなく、船体中央よりやや後方において極大値を示し、S. S. 2～7の範囲において大きい値を示す。

コンテナ船の場合には、

- (d) 垂直波浪剪断力は、正面迎波状態において最も大きく、横波状態、斜追波状態および追波状態においては比較的小さい。垂直波浪剪断力の大きさは、特に低速の場合を除いて船速によってほとんど変化しない。垂直波浪剪断力の船長方向分布形状は船体中央に関して前後対称に近いが、油送船の場合とやや異なり、船首尾よりそれぞれ船長の $1/3$ および $1/4$ の距離付近において極大値を示し、前半部の極大値の方がやや大きい。垂直波浪剪断力長期予測値の無次元値を同一船長で比較すると、コンテナ船の値が油送船のそれよりやや小さい。
- (e) 水平波浪剪断力は、横波状態において最も大きく、迎波状態および追波状態において最も小さい。水平波浪剪断力の大きさは船速の低下によってやや大きくなる。水平波浪剪断力の船長方向分布形状は油送船の場合に似ており、船体中央に関して前後対称に近く、船首尾より船長の $1/4$ の距離付近において極大値を示し、船体中央部付近において極小値を示す。水平波浪剪断力長期予測値の無次元値を同一船長で比較すると、コンテナ船の値が油送船のそれよりやや小さい。
- (f) 波浪振りモーメントは、油送船の場合と同様に、横波状態において最も大きく、追波状態において最も小さい。また、波浪振りモーメントの大きさは船速によってほとんど変化しない。波浪振りモーメント

トの船長方向分布形状は前後対称でないが、油送船の場合とやや異なり、船首尾よりそれぞれ船長の $1/4$ および $1/3$ の距離付近において極大値を示し、ゆるやかな双峰状の分布となっている。波浪振りモーメント長期予測値の無次元値を同一船長で比較すると、コンテナ船の値が油送船のそれよりもかなり小さい。

また、垂直波浪剪断力の長期予測値を各船級協会の縦強度規定におけるその設計値と比較すると、何れの船級協会における垂直波浪剪断力設計値も北大西洋においてすべての迎角を考慮した場合の長期累積超過確率 $Q = 10^{-8}$ に対応する長期予測値よりは小さく、 $Q = 10^{-4}$ に対応する長期予測値よりは大きい。各船級協会の設計値は相互にかなり相違しているけれども、平均的には $Q = 10^{-6}$ に対応する垂直波浪剪断力長期予測値程度に相当していると言える。

4.4 波浪変動水圧

波浪中の船体構造強度、特に横強度および局部強度解析に関連する波浪変動水圧について、大型油送船（S R 131 タンカー船型）を計算適用例として、規則波中応答関数計算、短期予測計算および長期予測計算を行なっている。これらの計算結果に基いて、波浪中の船体表面に働く変動水圧予測値の船体横断面に沿った分布、船長方向分布、船の波に対する迎角および船速の変動水圧に及ぼす影響等について大略の傾向を明らかにしている。さらに、このような波浪変動水圧の長期予測値を現在の船級協会の規定等による変動水圧設計値と比較検討して、実際的見地より妥当と考えられる変動水圧設計値推定の基礎資料を与えている。

4.4.1 規則波中応答関数計算結果

規則波中の船体表面に働く変動水圧の計算条件は次の通りである。

a) 船速 (V)

$$Fr = V/\sqrt{gL} = 0, 0.05, 0.10, 0.15$$

b) 船の波に対する迎角 (χ)

$$\chi = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ$$

($\chi = 0^\circ$: 追波状態)

c) 波長 (λ)

$$\sqrt{L/\lambda} = 0.3 \sim 1.6 \text{ (0.1間隔)}$$

d) 波高 (H_w)

$$H_w = 2 h_0 = 10 \text{ m}$$

e) 変動水圧の計算を行なった点

$S_1, S_2, 2 - 1/2, 5$ (midship), $7 - 1/2, 8 + 1/2, 9 - 1/2$ の各断面における両舷の水線、両舷のビルジ部およびキール中心線

フルード数 0.15 (16.08 kt) の場合について、 $S_1, S_2, 8 - 1/2$ の断面上の 5 点、即ち weather side および leeward side の水線、weather side および leeward side のビルジ部並びにキール中心線上の各点に働く変動水圧の応答関数計算結果を Fig. 4.4-1 ~ 4.4-3 に例示する。いずれの図においても、変動水圧の応答振幅無次元値 $P_0/\rho g h_0$ を $\sqrt{L/\lambda}$ の関数として表わしている。

4.4.2 短期不規則波中標準偏差計算結果

4.4.1 において説明したような波浪変動水圧の応答関数を用いて、短期不規則波中における変動水圧の標準偏差の計算を行なっている。計算条件は次の通りである。

a) 船速は 4.4.1 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)

$\delta = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ$

($\delta = 0^\circ$: 追波状態)

c) 平均波周期 (T)

T = 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 sec

d) 変動水圧の計算を行なった点は 4.4.1 の場合と同じ条件

フルード数 0.15 (16.08 kt) の場合について、S. S. 8 - 1/2 の断面上の 5 点、即ち weather side および leeward side の水線、weather side および leeward side のビルジ部ならびにキール中心線上の各点に働く変動水圧の標準偏差計算結果を Fig. 4.4-4 ~ 4.4-6 に例示する。いずれの図においても、変動水圧標準偏差無次元値 $R_p / \rho g H$ を平均波周期 T の関数として示している。

4.4.3 長期予測計算結果

4.4.2 において説明したような短期不規則波浪海面における変動水圧の標準偏差計算結果を用いて、北大西洋の長期波浪発現頻度資料を用いて波浪変動水圧の長期予測計算を行なっている。計算条件は次の通りである。

a) 船速は 4.4.1 と同じ条件

b) 船の波に対する迎角 (δ)

$\delta = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ$ の各場合およびすべての迎角を考慮した場合

c) 変動水圧の計算を行なった点は 4.4.1 の場合と同じ条件

d) 波浪発現頻度

Walden²⁹⁾ による北大西洋の長期波浪発現頻度に関する資料を有義波高 H と平均波周期 T の関数として区分整理した Whole Year の波浪発現頻度表³⁰⁾ を用いている。

巨大型油送船について長期累積超過確率 $Q = 10^{-6}$ および 10^{-5} に対応する波浪変動水圧の長期予測値を水頭で表わし、その船長方向分布を Fig. 4.4-7 ~ 4.4-14 に示す。これらの図中には、 $Q = 10^{-5}$ に対応する変動水圧長期予測値と、N V (ノルウェー船級協会) の規定による波浪変動水圧設計値および三菱重工業のそれを比較して示している。

さらに、Table 4.4-1 の巨大型油送船、鉱石運搬船およびコンテナ船の 3 船型について波浪変動水圧短期予測結果を比較した例¹²⁾ を Fig. 4.4-15 ~ 4.4-20 に示す。

また、各風力階級別に整理された北大西洋の長期波浪発現頻度資料³⁶⁾ を用いて、これらの 3 船型について波浪変動水圧の長期予測を行なった結果¹²⁾ を、Fig. 4.4-21 ~ 4.4-26 に示す。

以上に示した結果によれば、波浪変動水圧の長期予測値の一般的傾向として次のような結論を得る。

- (a) 波浪変動水圧は、一般に水線付近において最も大きく、ビルジ部付近においてはやや小さく、キール中心線上においては最も小さい。
- (b) 迎波状態および斜迎波状態においては、S. S. 7 - 1/2 付近より前方の両舷または weather side にかなり大きい変動水圧が働く。これらの変動水圧は船速低下によりある程度減少させることができる。
- (c) 横波状態および斜迎波、斜追波状態においては、船首尾を除くほぼ全長にわたり weather side にかなり大きい変動水圧が働く。この場合には、船速低下によって変動水圧は減少せず、むしろ増加することがある。
- (d) 現行の船級協会の規定等による波浪変動水圧設計値は、北大西洋において迎波状態にて長期累積超過確率 $Q = 10^{-5}$ に対応する長期予測値程度に相当している。

4.5 船体各部加速度

波浪中の船の倉内載荷が船体構造部材に与える変動荷重の大きさを第一次的に支配すると考えられる「船体運動によって生じる加速度」の長期予測を行なっている。計算適用例として採用した船型は、Table 4.4-1にその主要目を示す巨大型油送船と1軸コンテナ船、および鉱石運搬船（笠木山丸）であって、それぞれ計画満載状態について計算を行なっている。船体各部加速度としては、2.2において説明した4種類の加速度、即ち、縦軸方向加速度、垂直方向加速度、水平方向加速度および横方向加速度を対象としている。

4.5.1 規則波中応答関数計算結果

規則波中の船体各部加速度の計算条件は次の通りである。

a) 船速 (V)

$$\begin{aligned} Fr = V/\sqrt{gL} &= 0, 0.05, 0.10, 0.15 : \text{油送船および鉱石運搬船} \\ &= 0, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 : \text{コンテナ船} \end{aligned}$$

b) 船の波に対する迎角 (x)

$$x = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ$$

($x = 0^\circ$: 追波状態)

c) 波長 (λ)

$$\begin{aligned} \sqrt{L/\lambda} &= 0.3 \sim 1.8 \text{ (0.1間隔)} : \text{油送船およびコンテナ船} \\ \sqrt{L/\lambda} &= 0.3 \sim 1.6 \text{ (0.1間隔)} : \text{鉱石運搬船} \end{aligned}$$

d) 波高 (Hw)

$$H_w = 2 h_0 = 10 \text{ m}$$

e) 船体各部加速度の計算位置

船体各部加速度の計算を行なった位置は、A. P., S. S. $1/2$, $1 - 1/2$, $2 - 1/2$, 5 (midship), $7 - 1/2$, $8 - 1/2$, $9 - 1/2$, F. P. の各断面において、垂直方向加速度については、船体重心を通る縦方向軸上及び船体重心高さの船体両舷側の各位置、その他の加速度については、船体重心を通る縦方向軸上、キール中心線上、甲板中心線上の各位置としている。ただし、コンテナ船については甲板上コンテナ頂部の各位置を追加している。各計算位置の詳細をFig. 4.5-1に示す。

巨大型油送船およびコンテナ船のS. S. $8 - 1/2$ 断面における縦軸方向加速度、垂直方向加速度、水平方向加速度および横方向加速度の応答振幅計算結果をFig. 4.5-2～4.5-7に例示する。いずれの図においても、各船体加速度の無次元振幅、 $\alpha_x o/g(h_0/L)$, $\ddot{Z}_o/g(h_0/L)$, $\ddot{Y}_o/g(h_0/L)$ および $\alpha_y o/g(h_0/L)$ を $\sqrt{L/\lambda}$ の関数として表わしている。

4.5.2 短期不規則波中標準偏差計算結果

4.5.1において説明したような船体各部加速度の応答関数を用いて、船体各部加速度の標準偏差を計算している。計算条件は次の通りである。

a) 船速は4.5.1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)

$$\delta = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ$$

($\delta = 0^\circ$: 追波状態)

c) 不規則波の平均波周期 (T)

$$T = 4, 6, 8, 10, 12, 16, 18 \text{ (sec)}$$

d) 船体各部加速度計算位置は4.5.1と同じ条件

巨大型油送船およびコンテナ船のS. S. $8 - 1/2$ 断面における縦軸方向加速度、垂直方向加速度、水平

方向加速度および横方向加速度の標準偏差計算結果を Fig. 4.5-8 ~ 4.5-13 に例示する。いずれの図においても、船体加速度標準偏差無次元値、 $R\alpha_x/g (H/L)$ 、 $R\ddot{z}/g (H/L)$ 、 $R\ddot{y}/g (H/L)$ および $R\alpha_y/g (H/L)$ を $\sqrt{L/\lambda_e}$ ($\lambda_e = g T^2 / 2\pi$) の関数として表わしている。

4.5.3 長期予測計算結果

4.5.2 において説明したような船体各部加速度の標準偏差計算結果と北大西洋の長期波浪発現頻度資料を用いて、船体各部加速度の長期予測計算を行なっている。計算条件は次の通りである。

a) 船速は 4.5.1 と同じ条件

b) 船の波に対する迎角 (δ)

$\delta = 0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180^\circ$ およびすべての迎角を考慮した場合

c) 船体各部加速度計算位置は 4.5.1 と同じ条件

d) 波浪発現頻度

Walden²⁹⁾による北大西洋の長期波浪発現頻度に関する資料を有義波高 H と平均波周期 T の関数として区分整理した Whole Year の波浪発現頻度表³⁰⁾ を用いている。

巨大型油送船、鉱石運搬船およびコンテナ船について、長期累積超過確率 $Q = 10^{-8}$ および 10^{-6} に対応する、縦軸方向加速度、垂直方向加速度、水平方向加速度および横方向加速度の長期予測値を求め、その船長方向分布を Fig. 4.5-14 ~ 4.5-21 に示している。

以上に示した結果によれば、船体加速度長期予測値の一般的傾向として次のような結論を得る。

- (a) 一般に、垂直方向加速度が最も大きく、次いで横方向加速度、水平方向加速度、縦軸方向加速度の順に小さくなる。ただし、油送船の横方向加速度は垂直方向加速度と同程度の大きさである。
- (b) 垂直方向加速度は、一般に船の重心を通る縦軸上における値よりも両舷側における値の方が大きい。
- (c) 縦軸方向加速度、水平方向加速度および横方向加速度は、一般に甲板に生じる加速度が最も大きく、船の重心を通る縦軸上に生じる加速度、船底に生じる加速度の順に小さくなる。

5. まとめ

ストリップ理論に基く規則波中の船体応答理論、線形重ね合わせの理論に基く短期不規則波浪海面における船体応答理論、大洋の波浪の長期発現頻度資料を利用した波浪中の船体応答長期予測理論等を応用して、主として大型油送船およびコンテナ船を、変動荷重によっては鉱石運搬船をも計算適用例として、波浪中の船体に誘起される変動荷重の短期および長期予測計算が行なわれている。本報告書においては、これらの計算結果を総合整理してまとめている。その結果、船体縦強度、横強度および局部強度の解析に関連する各種変動荷重の設計値推定に関する重要な資料を得た。即ち、波浪軸力、垂直波浪曲げモーメント、水平波浪曲げモーメント、垂直波浪剪断力、水平波浪剪断力および波浪振りモーメントのそれぞれについて北大西洋において長期累積超過確率 $Q = 10^{-8}$ 、 10^{-6} 、 10^{-4} に対応する長期予測値を示して、これらの船長方向分布、波に対する迎角、船速の影響、さらに船型の種類、船型の大きさの影響等を明らかにした。また、波浪変動水圧について、長期累積超過確率 $Q = 10^{-6}$ および $Q = 10^{-5}$ に対応する長期予測値を示して、その船体横断面および船長方向分布、波に対する迎角、船速の影響、船型の相違の影響等を明らかにした。さらに、船体各部加速度について、長期累積超過確率 $Q = 10^{-8}$ および $Q = 10^{-6}$ に対応する長期予測値を示して、その船長方向分布、波に対する迎角、船速の影響、船型の相違の影響等を明らかにした。

各変動荷重についての結論は、前章の各節の文末にまとめて記述している。

参考文献

- 1) 元 良誠三 : Gravity Dynamometer による波浪中抵抗試験および Surging について、造船協会論文集、第 95 号 (1954)
- 2) 福田 淳一、永元 隆一、新開 明二 : 波浪中の船体に働く縦軸方向荷重の設計値推定、西部造船会々報、第 54 号 (1977)
- 3) 福田 淳一、永元 隆一、小沼 守、高橋 実 : 波浪中の船体運動と船体表面に働く変動水圧及び構強度に関する理論計算、日本造船学会論文集第 129 号 (1971)
- 4) 田才 福造 : 船の上下動揺並びに縦動揺における減衰力および附加質量について、造船協会論文集、第 105 号 (1959)
- 5) 田才 福造 : Hydrodynamic Force and Moment Produced by Swaying and Rolling Oscillation of Cylinders on the Free Surface 、九大応力研究所英文報告、Vol. IX、No. 35 (1961)
- 6) 田村 欣也 : The Calculation of Hydrodynamic Forces and Moments Acting on the Two Dimensional Body 、西部造船会々報、No. 26 (1963)
- 7) H. Fujii and T. Takahashi : Study on Lateral Motions of Ship Waves by Forced Oscillation Tests, Mitsubishi Technical Bulletin, No. 87 (1973)
- 8) 高石 敬史、黒井 昌明 : 波浪中船体運動の実用計算法、日本造船学会、第 2 回耐航性に関するシンポジウム (1977)
- 9) 新開 明二、福田 淳一 : 波浪中の船体加速度長期予測、西部造船会々報第 50 号、第 51 号 (1976)
- 10) 田才 福造 : An Approximate Calculation of Hydrodynamic Pressure on the Midship Section Contour of a Ship Heaving and Pitching in Regular Head Waves 、九大応力研究所英文報告、Vol. XV、No. 48 (1966)
- 11) 田才 福造 : Beam Sea Condition にある船体に働く変動圧力、西部造船会々報、第 35 号 (1968)
- 12) SR 131 : 波浪外力に関する水槽実験、日本造船研究協会報告、第 80 号 (1976)
- 13) 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)
- 14) 永元 隆一、小沼 守、飯塚 正文、青木 正生、高橋 雄 : 波浪中の船体が受ける横剪断力、横曲げモーメントおよび振りモーメントの計算、日本造船学会論文集第 132 号 (1972)
- 15) 藤井 斎、菅井 和夫、藤野 正隆 : 船体に働く波浪外力、日本造船学会、第 2 回耐航性シンポジウム (1977)
- 16) W. H. Warnsinck : Report of Committee 1 on Environmental Conditions, Proceedings of 2nd I.S.S.C., Delft (1964)
- 17) M. St. Denis and W. J. Pierson Jr. : On the Motions in Confused Seas, Trans. S.N.A.M.E., Vol. 61 (1953)
- 18) S. O. Rice : Mathematical Analysis of Random Noise, The Bell System Technical Journal Vol. 24 (1945)

- 19) M. S. Longuet Higgins : On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves, Journal of Marine Research, Vol. 11, No. 3 (1952)
- 20) 福田淳一 : 船体応答の統計的予測、日本造船学会、耐航性に関するシンポジウム (1969)
- 21) 新開明二 : 波浪中の船体に働く垂直曲げモーメントの設計値推定、日本造船学会論文集、第138号 (1975)
- 22) 福田淳一、高木又男、黒井昌明、岩本才次 : コンテナ船の波浪荷重設計値推定、西部造船会々報、第54号 (1977)
- 23) 新開明二 : 波浪中の船体に働く水平曲げモーメントの設計値推定、日本造船学会論文集、第140号 (1976)
- 24) 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)
- 25) 福田淳一、永元隆一、塚本修、新開明二 : 波浪中の船体に働く水平剪断力の設計値推定、日本造船学会論文集、第139号 (1976)
- 26) 福田淳一、塚本修、新開明二、上入佐光 : 波浪中の船体に働く振りモーメントの設計値推定、西部造船会々報、第53号 (1977)
- 27) 福田淳一、小沼守、青木正生、森俊哲、大柴隆士、新開明二 : 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)
- 28) 福田淳一、新開明二、岩本才次 : 大型油送船、鉱石運搬船およびコンテナ船の加速度長期予測 (未発表)
- 29) H. Walden : Die Eigenschaften der Meeresswellen im Nordatlantischen Ozean, Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzelveröffentlichungen Nr. 41, Hamburg (1964)
- 30) 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)
- 31) SR 134 : 船体構造部材の許容応力に関する研究、日本造船研究協会資料、第179号 (1973)
- 32) SR 134 : 船体構造部材の許容応力に関する研究、日本造船研究協会資料、第195号 (1974)
- 33) SR 134 : 船体構造部材の許容応力に関する研究、日本造船研究協会資料、第216号 (1975)
- 34) SR 134 : 船体構造部材の許容応力に関する研究、日本造船研究協会資料、第237号 (1976)
- 35) SR 134 : 船体構造部材の許容応力に関する研究、日本造船研究協会資料、第259号 (1977)
- 36) 福田淳一 : 波浪中の船の Deck Wetness に関する長期予測、日本造船学会論文集、第124号 (1968)

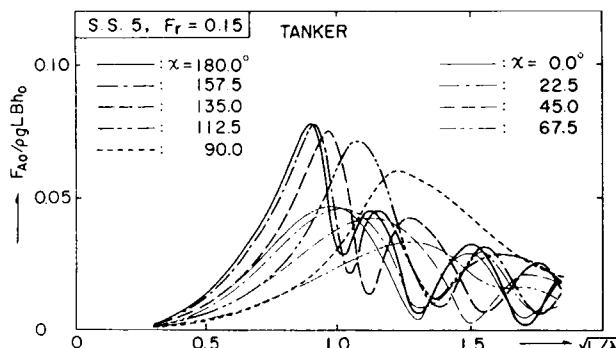


FIG. 4.2- 1A AMPLITUDES OF AXIAL FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A LARGE OIL TANKER IN REGULAR WAVES

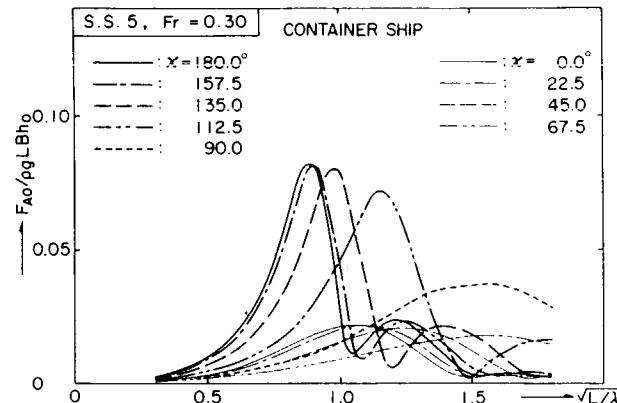


FIG. 4.2- 1B AMPLITUDES OF AXIAL FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A CONTAINER SHIP IN REGULAR WAVES

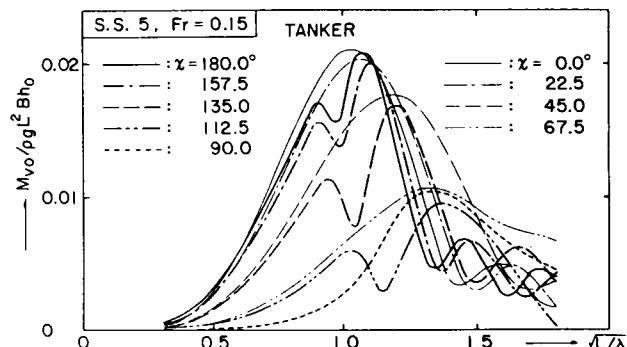


FIG. 4.2- 2A AMPLITUDES OF VERTICAL BENDING MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A LARGE OIL TANKER IN REGULAR WAVES

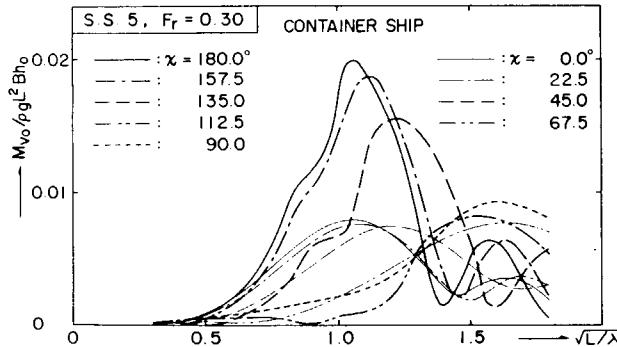


FIG. 4.2- 2B AMPLITUDES OF VERTICAL BENDING MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A CONTAINER SHIP IN REGULAR WAVES

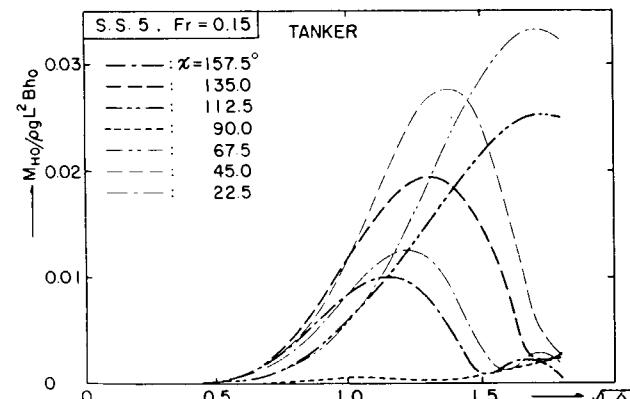


FIG. 4.2- 3A AMPLITUDES OF HORIZONTAL BENDING MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A LARGE OIL TANKER IN REGULAR WAVES

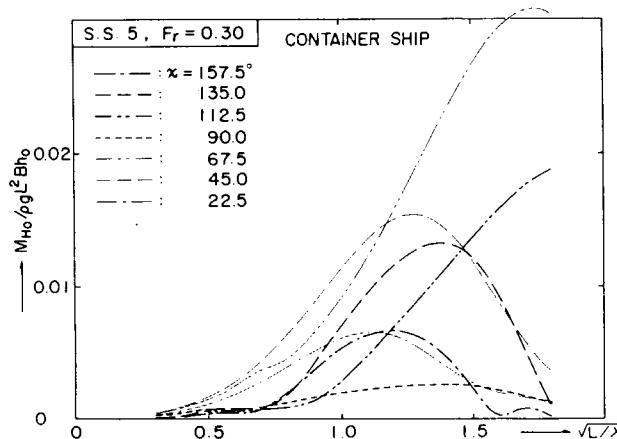


FIG. 4.2- 3B AMPLITUDES OF HORIZONTAL BENDING MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A CONTAINER SHIP IN REGULAR WAVES

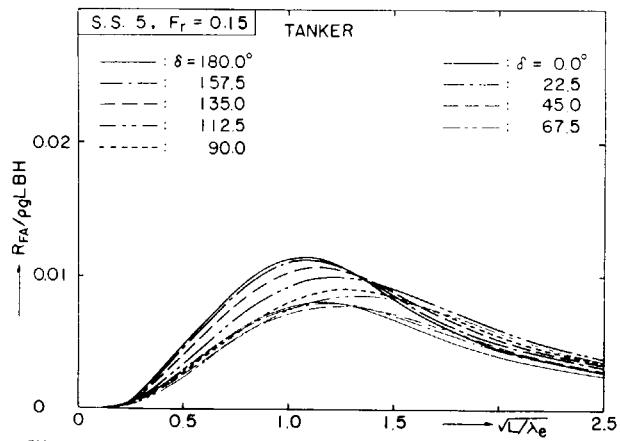


FIG. 4.2- 4A STANDARD DEVIATIONS OF AXIAL FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A LARGE OIL TANKER IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

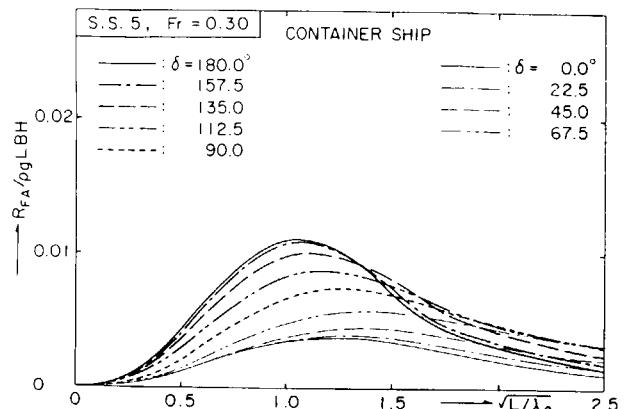


FIG. 4.2- 4B STANDARD DEVIATIONS OF AXIAL FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A CONTAINER SHIP IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

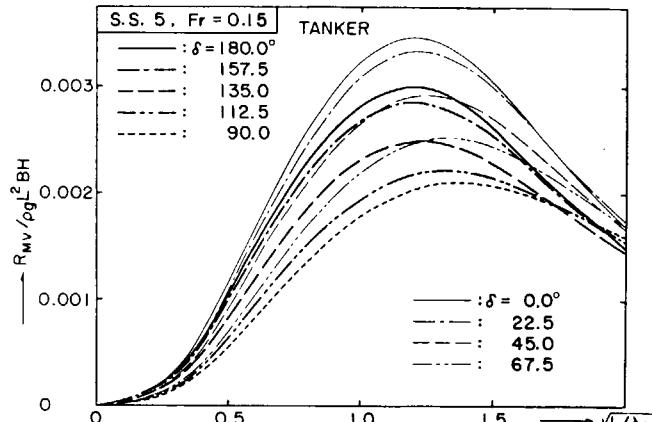


FIG. 4.2- 5A STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL BENDING MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A LARGE OIL TANKER IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

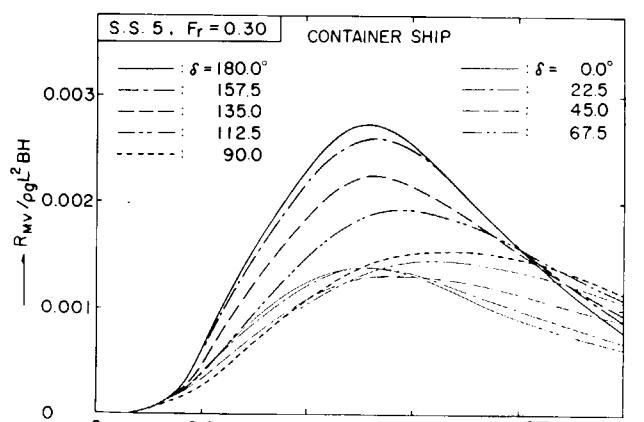


FIG. 4.2- 5B STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL BENDING MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A CONTAINER SHIP IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

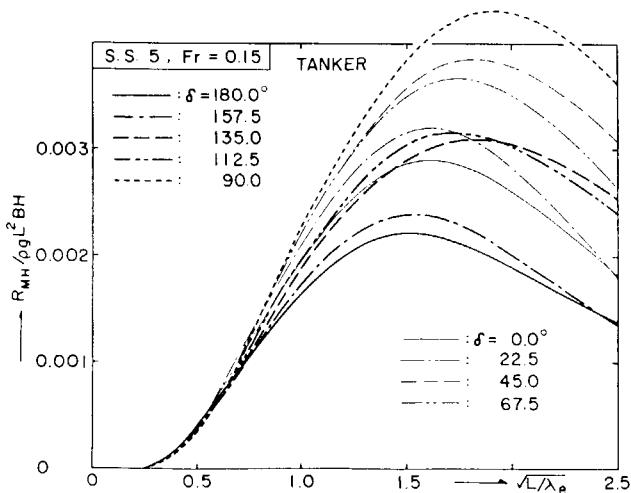


FIG. 4.2- 6A STANDARD DEVIATIONS OF HORIZONTAL BENDING MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A LARGE OIL TANKER IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

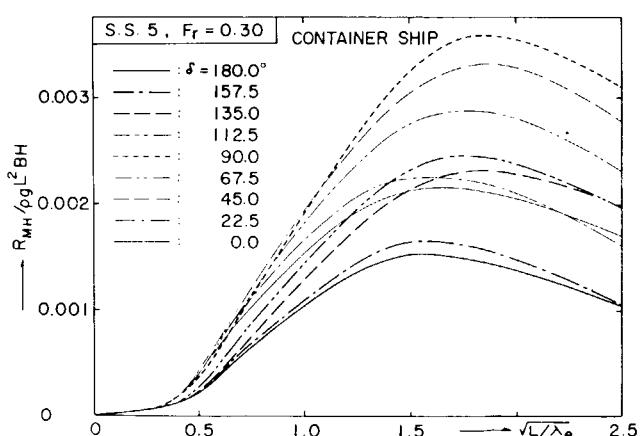


FIG. 4.2- 6B STANDARD DEVIATIONS OF HORIZONTAL BENDING MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A CONTAINER SHIP IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

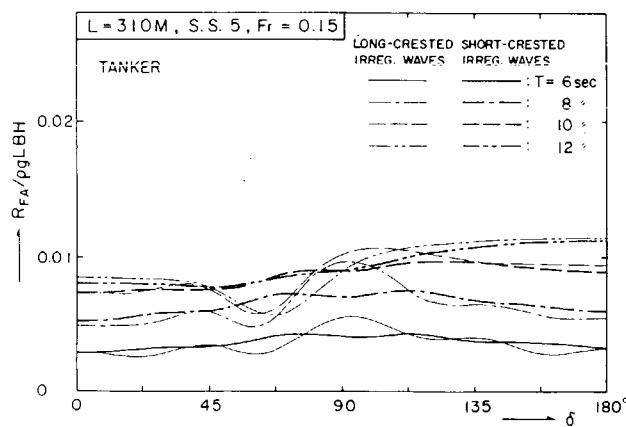


FIG. 4.2- 7 STANDARD DEVIATIONS OF AXIAL FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A TANKER IN IRREGULAR SEAS AS FUNCTIONS OF HEADING ANGLE

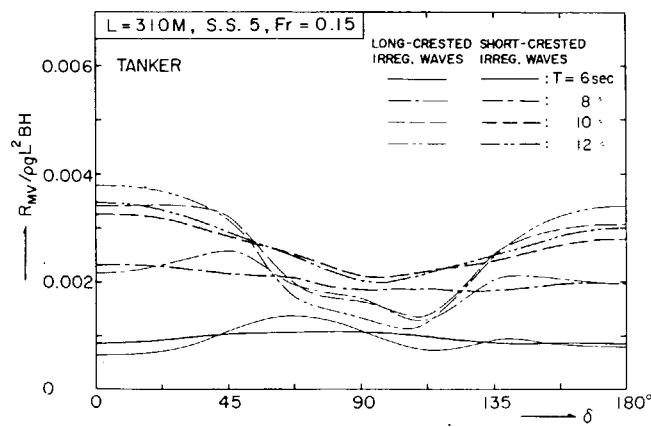


FIG. 4.2- 8 STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL BENDING MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A TANKER IN IRREGULAR SEAS AS FUNCTIONS OF HEADING ANGLE

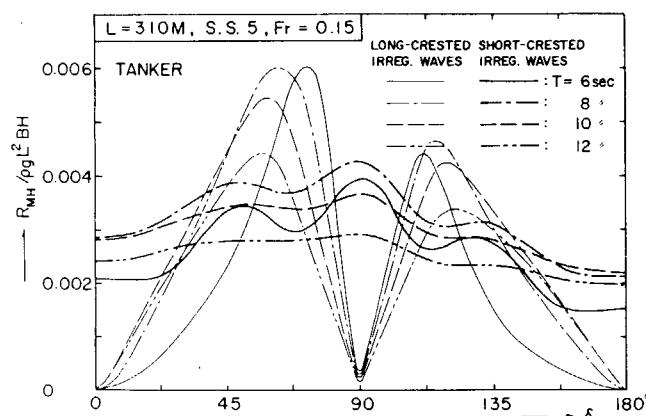


FIG. 4.2- 9 STANDARD DEVIATIONS OF HORIZONTAL BENDING MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A TANKER IN IRREGULAR SEAS AS FUNCTIONS OF HEADING ANGLE

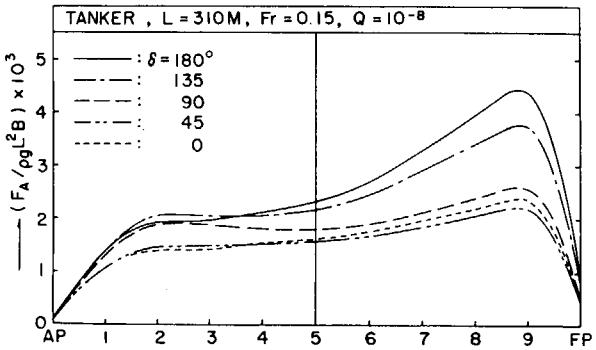


FIG. 4.2-10A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE AXIAL FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR DIFFERENT HEADING (TANKER)

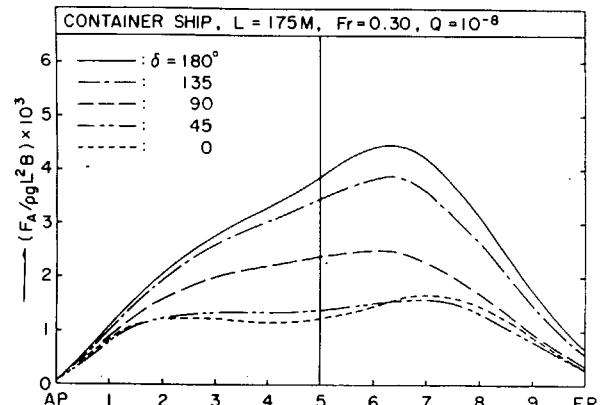


FIG. 4.2-10B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE AXIAL FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR DIFFERENT HEADING (CONTAINER SHIP)

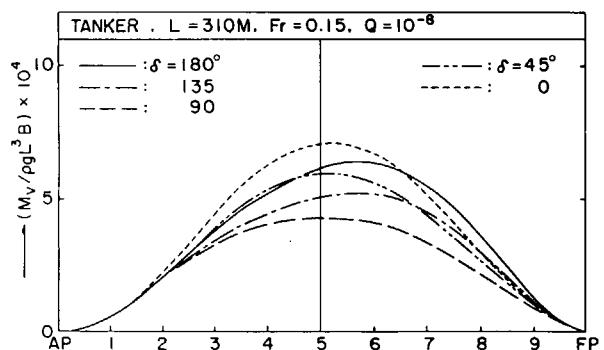


FIG. 4.2-11A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR DIFFERENT HEADING (TANKER)

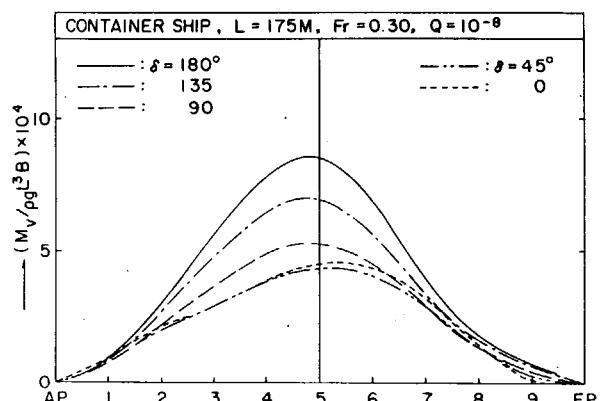


FIG. 4.2-11B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR DIFFERENT HEADING (CONTAINER SHIP)

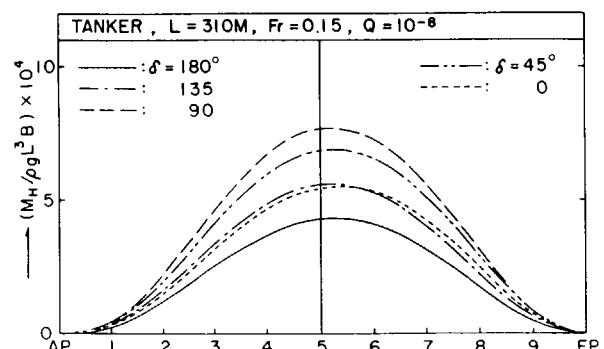


FIG. 4.2-12A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR DIFFERENT HEADING (TANKER)

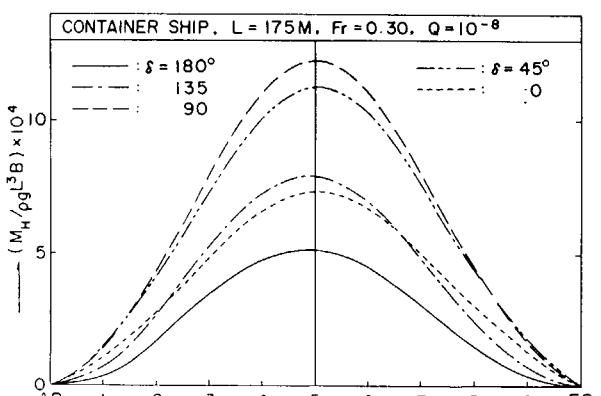


FIG. 4.2-12B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR DIFFERENT HEADING (CONTAINER SHIP)

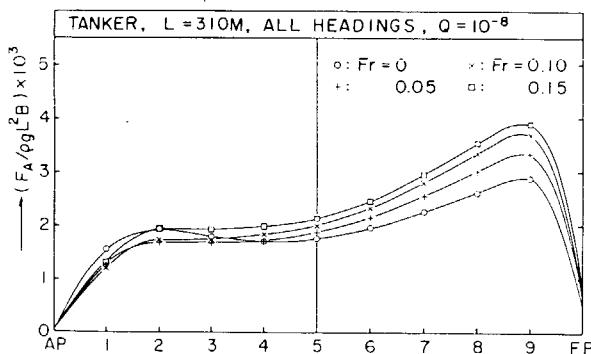


FIG. 4.2-13A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE AXIAL FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (TANKER)

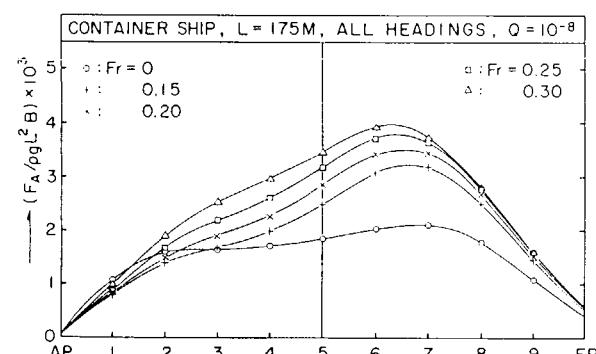


FIG. 4.2-13B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE AXIAL FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (CONTAINER SHIP)

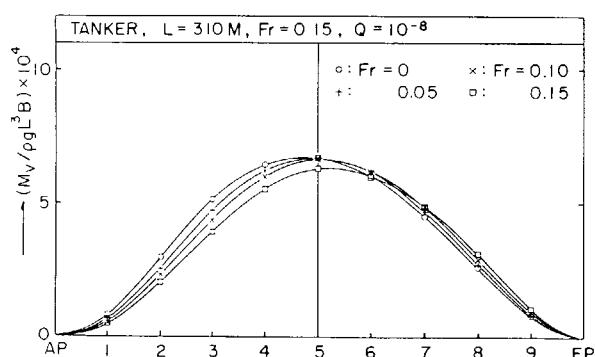


FIG. 4.2-14A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (TANKER)

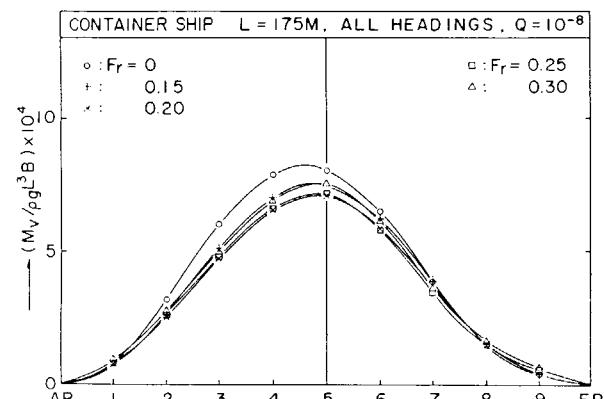


FIG. 4.2-14B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (CONTAINER SHIP)

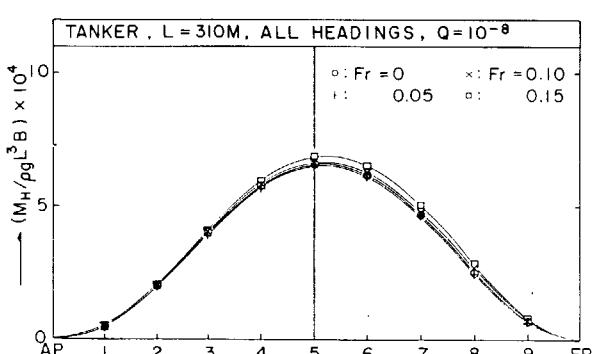


FIG. 4.2-15A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (TANKER)

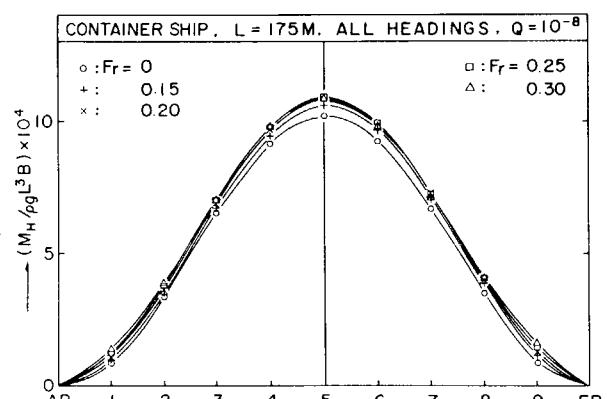


FIG. 4.2-15B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (CONTAINER SHIP)

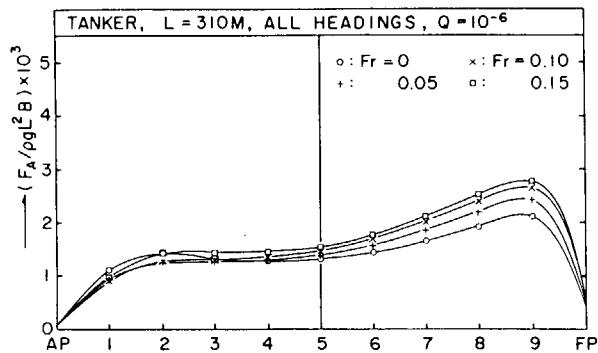


FIG. 4.2-16A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE AXIAL FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER)

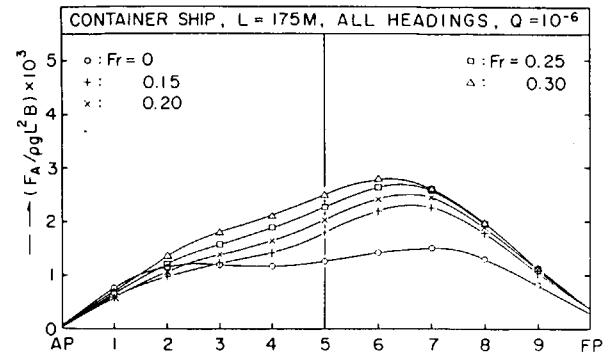


FIG. 4.2-16B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE AXIAL FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (CONTAINER SHIP)

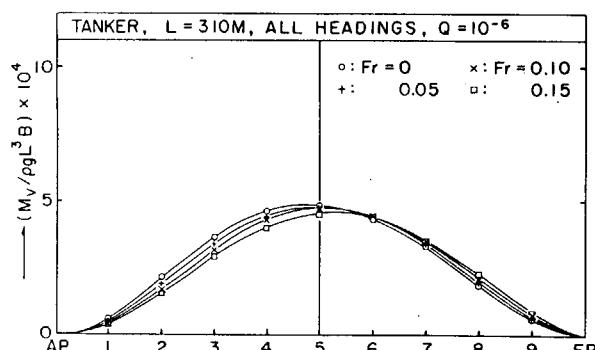


FIG. 4.2-17A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER)

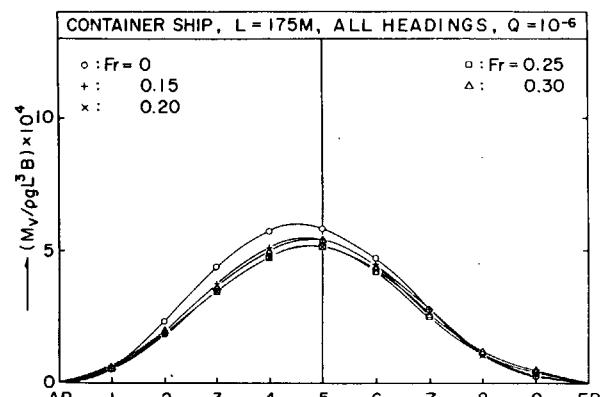


FIG. 4.2-17B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (CONTAINER SHIP)

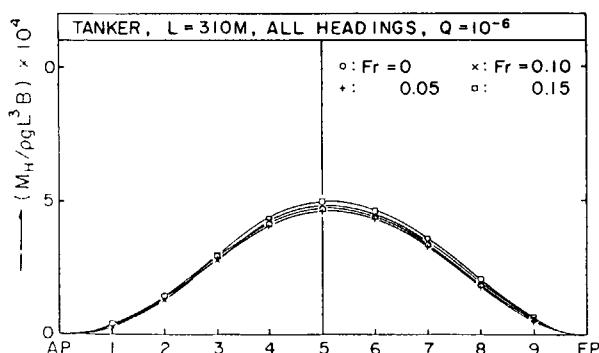


FIG. 4.2-18A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER)

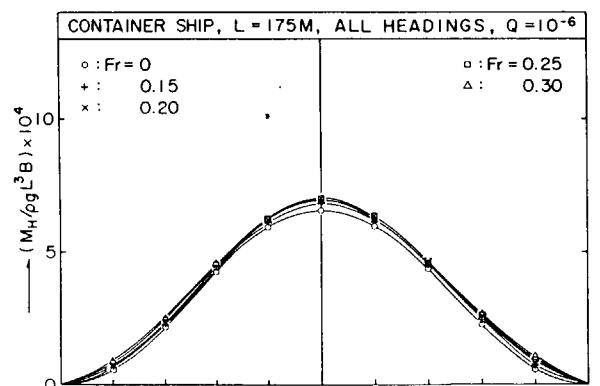


FIG. 4.2-18B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (CONTAINER SHIP)

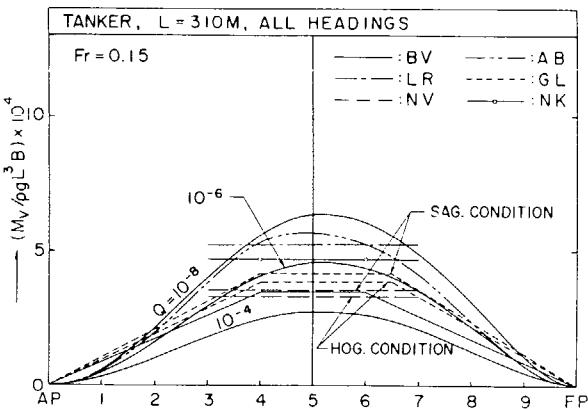


FIG. 4.2-19A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER)

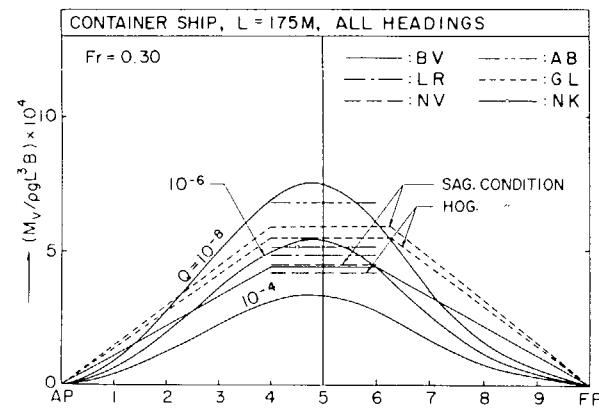


FIG. 4.2-19B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (CONTAINER SHIP)

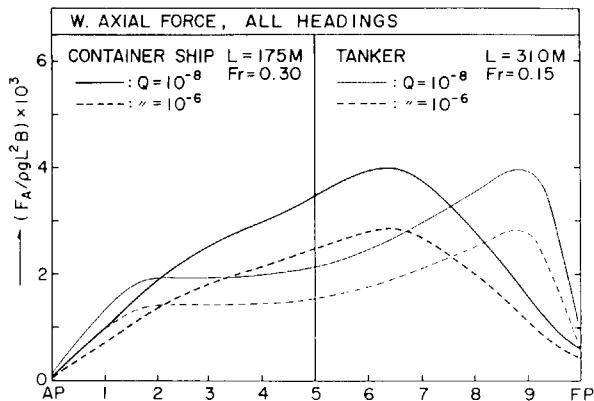


FIG. 4.2-20 LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE AXIAL FORCE PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER AND CONTAINER SHIP)

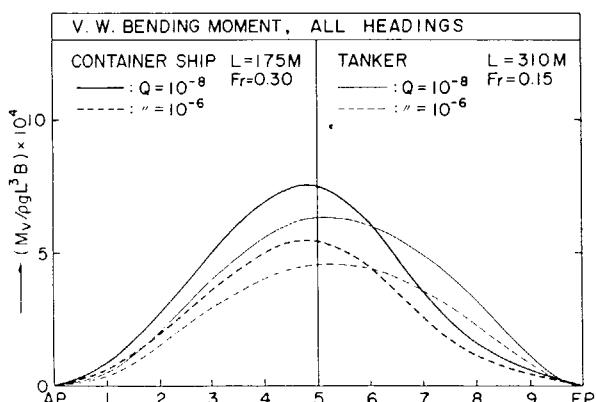


FIG. 4.2-21 LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER AND CONTAINER SHIP)

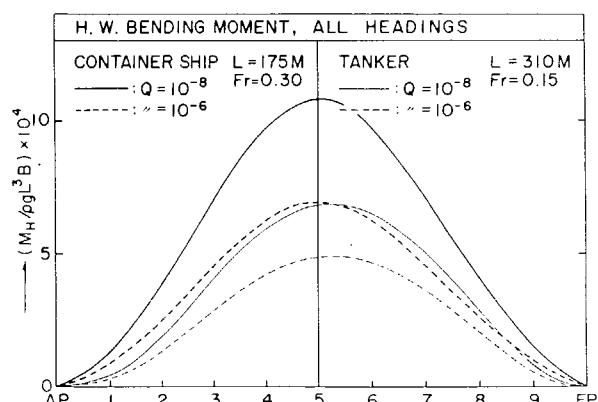


FIG. 4.2-22 LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE BENDING MOMENT PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER AND CONTAINER SHIP)

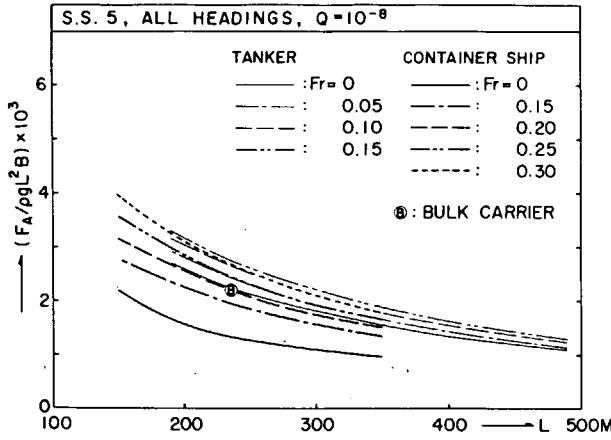


FIG. 4.2-23 WAVE AXIAL FORCE AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN, AS FUNCTION OF SHIP LENGTH

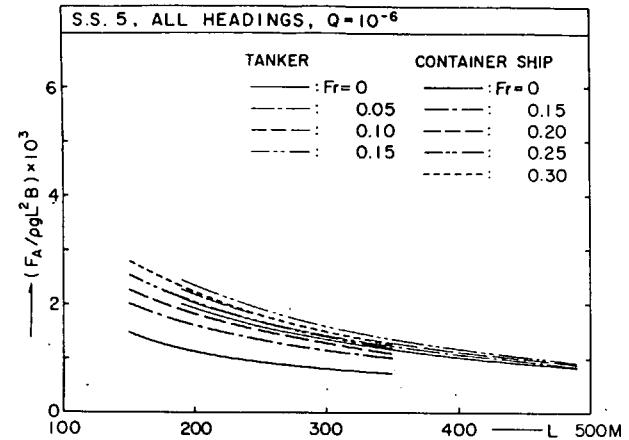


FIG. 4.2-26 WAVE AXIAL FORCE AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN, AS FUNCTION OF SHIP LENGTH

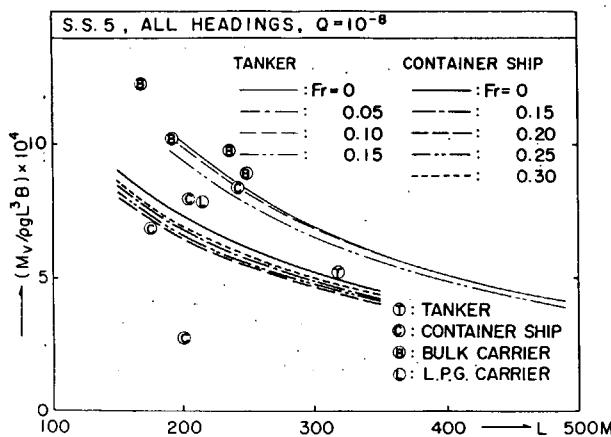


FIG. 4.2-24 VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN, AS FUNCTION OF SHIP LENGTH

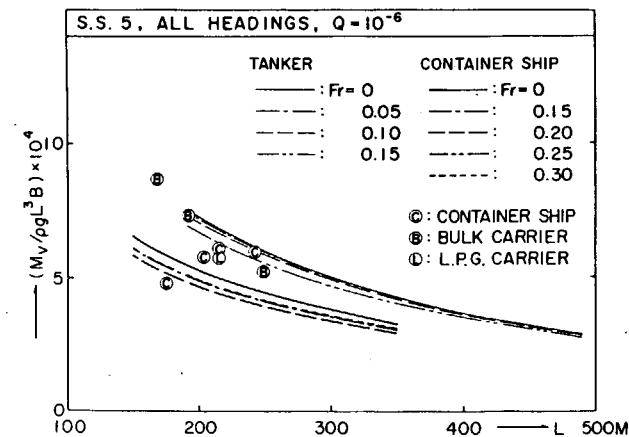


FIG. 4.2-27 VERTICAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN, AS A FUNCTION OF SHIP LENGTH

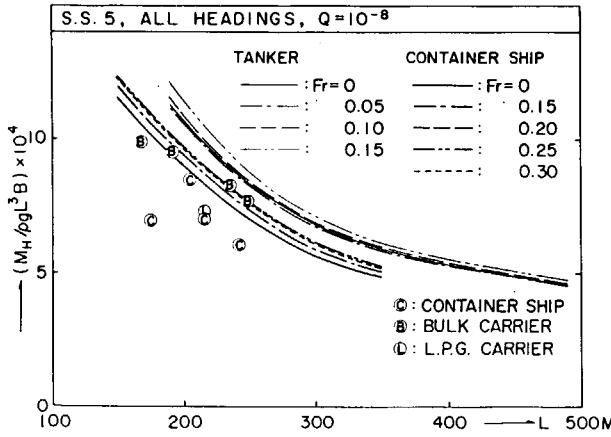


FIG. 4.2-25 HORIZONTAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN, AS FUNCTION OF SHIP LENGTH

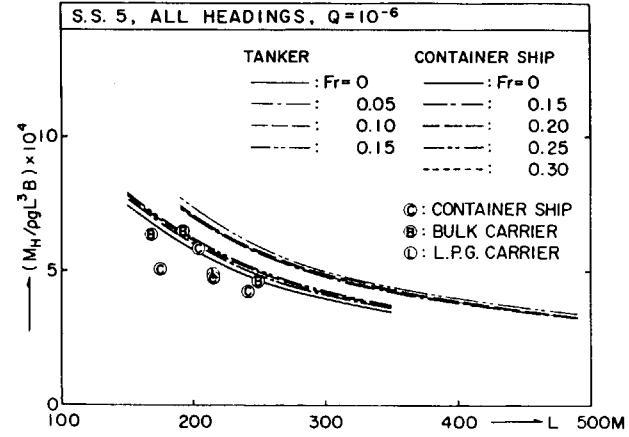


FIG. 4.2-28 HORIZONTAL WAVE BENDING MOMENT AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN, AS FUNCTION OF SHIP LENGTH

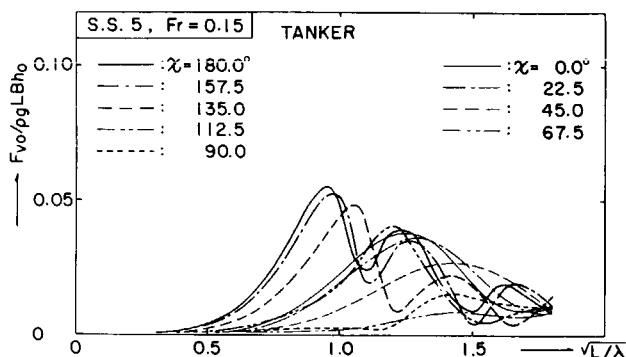


FIG. 4.3- 1A AMPLITUDES OF VERTICAL SHEARING FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A LARGE OIL TANKER IN REGULAR WAVES

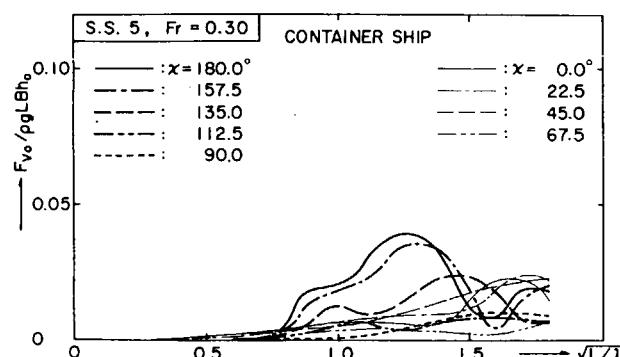


FIG. 4.3- 1B AMPLITUDES OF VERTICAL SHEARING FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A CONTAINER SHIP IN REGULAR WAVES

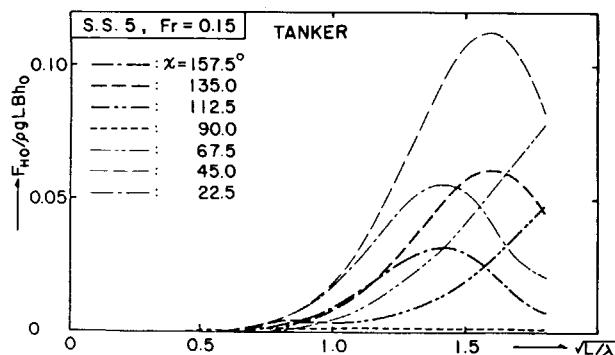


FIG. 4.3- 2A AMPLITUDES OF HORIZONTAL SHEARING FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A LARGE OIL TANKER IN REGULAR WAVES

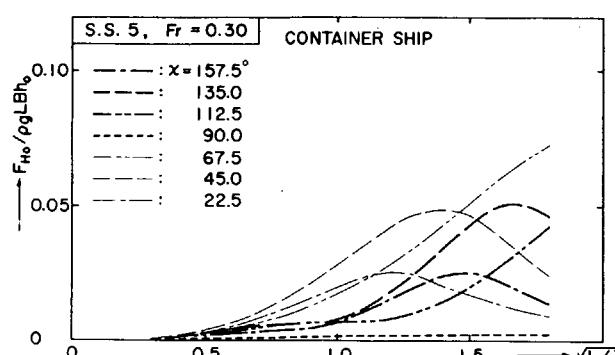


FIG. 4.3- 2B AMPLITUDES OF HORIZONTAL SHEARING FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A CONTAINER SHIP IN REGULAR WAVES

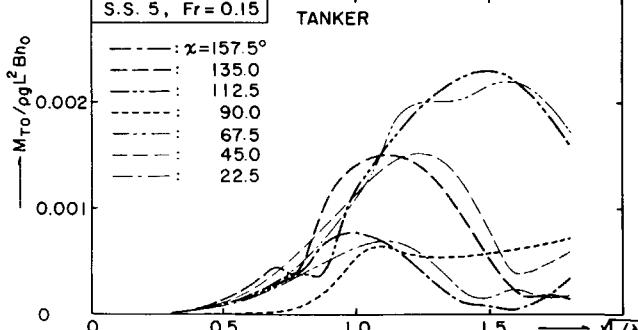


FIG. 4.3- 3A AMPLITUDES OF TORSIONAL MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A LARGE OIL TANKER IN REGULAR WAVES

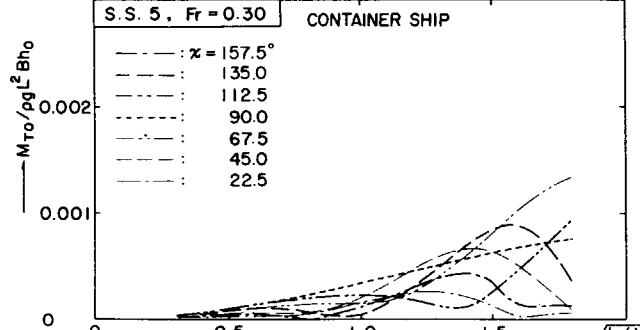


FIG. 4.3- 3B AMPLITUDES OF TORSIONAL MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A CONTAINER SHIP IN REGULAR WAVES

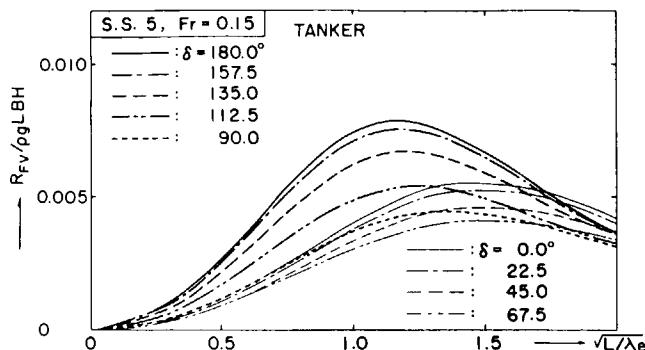


FIG. 4.3-4A STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL SHEARING FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A LARGE OIL TANKER IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

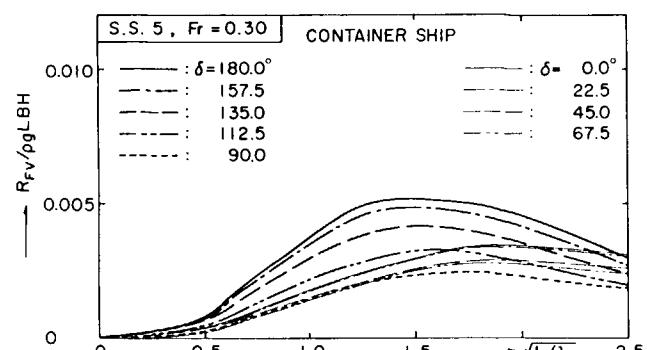


FIG. 4.3-4B STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL SHEARING FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A CONTAINER SHIP IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

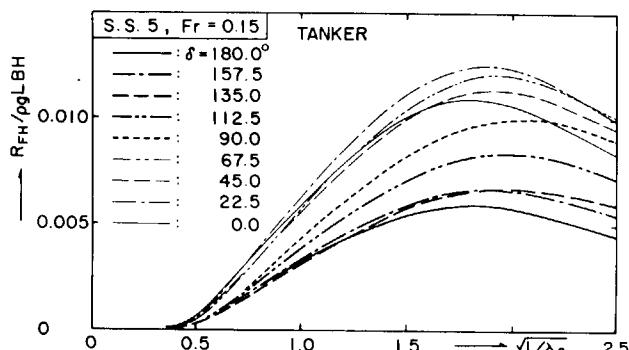


FIG. 4.3-5A STANDARD DEVIATIONS OF HORIZONTAL SHEARING FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A LARGE OIL TANKER IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

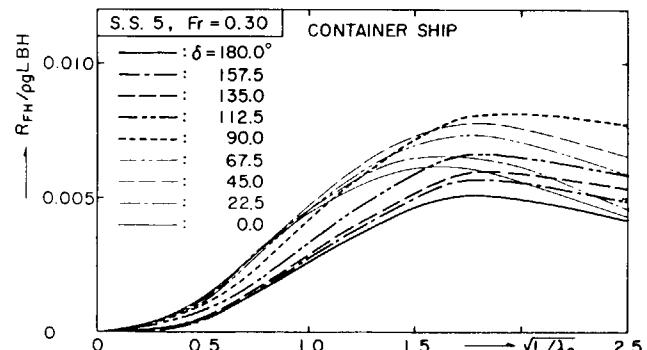


FIG. 4.3-5B STANDARD DEVIATIONS OF HORIZONTAL SHEARING FORCE INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A CONTAINER SHIP IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

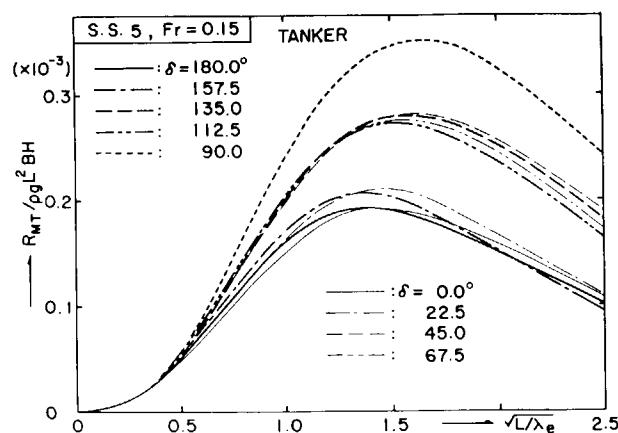


FIG. 4.3-6A STANDARD DEVIATIONS OF TORSIONAL MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A LARGE OIL TANKER IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

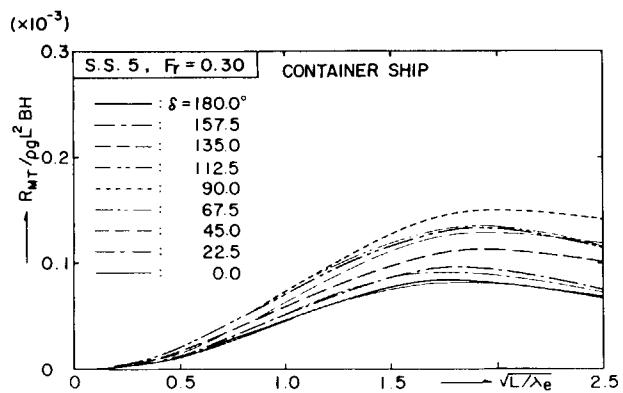


FIG. 4.3-6B STANDARD DEVIATIONS OF TORSIONAL MOMENT INDUCED ON THE MIDSHIP SECTION OF A CONTAINER SHIP IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

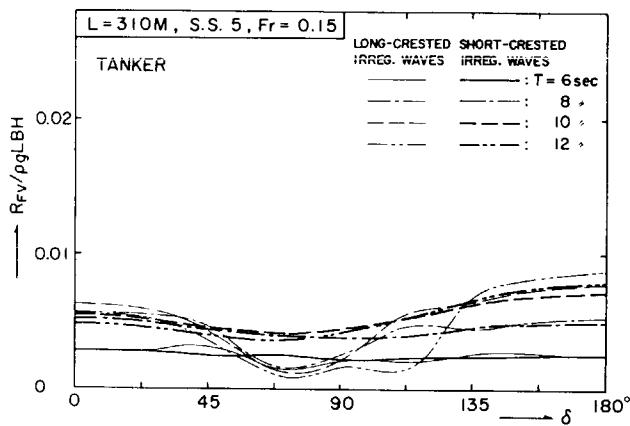


FIG. 4.3- 7 STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL SHEARING FORCE INDUCED ON THE MIDSHP SECTION OF A TANKER IN IRREGULAR SEAS AS FUNCTIONS OF HEADING ANGLE

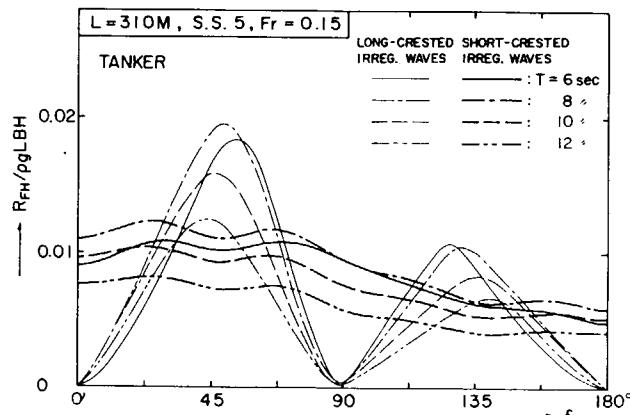


FIG. 4.3- 8 STANDARD DEVIATIONS OF HORIZONTAL SHEARING FORCE INDUCED ON THE MIDSHP SECTION OF A TANKER IN IRREGULAR SEAS AS FUNCTIONS OF HEADING ANGLE

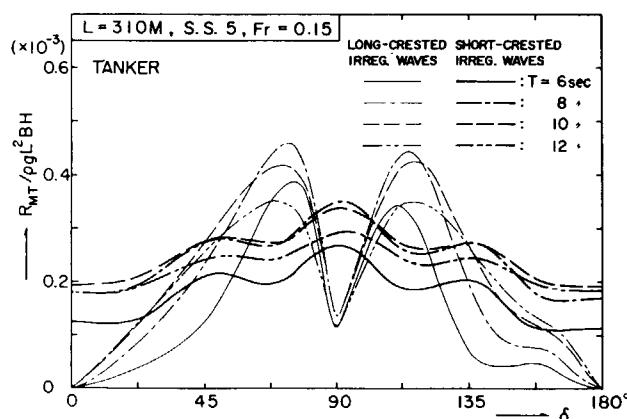


FIG. 4.3- 9 STANDARD DEVIATIONS OF TORSIONAL MOMENT INDUCED ON THE MIDSHP SECTION OF A TANKER IN IRREGULAR SEAS AS FUNCTIONS OF HEADING ANGLE

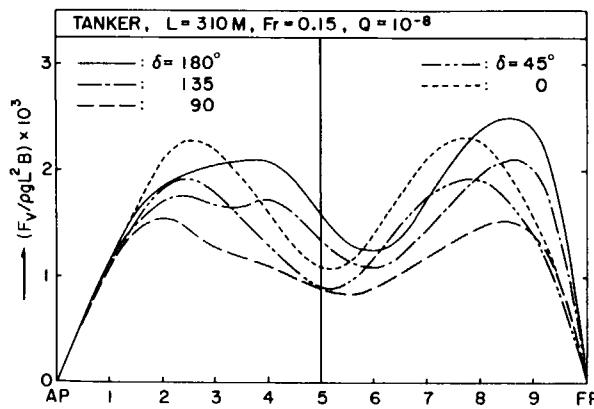


FIG. 4.3-10A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR DIFFERENT HEADING (TANKER)

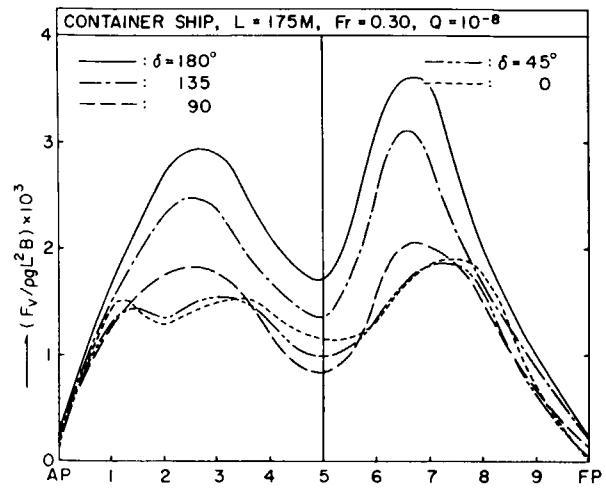


FIG. 4.3-10B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR DIFFERENT HEADING (CONTAINER SHIP)

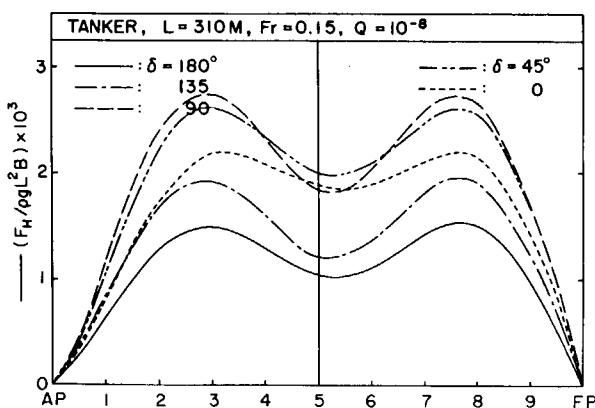


FIG. 4.3-11A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR DIFFERENT HEADING (TANKER)

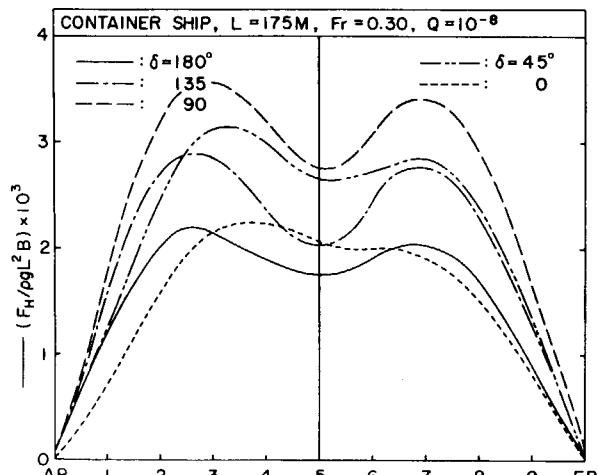


FIG. 4.3-11B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR DIFFERENT HEADING (CONTAINER SHIP)

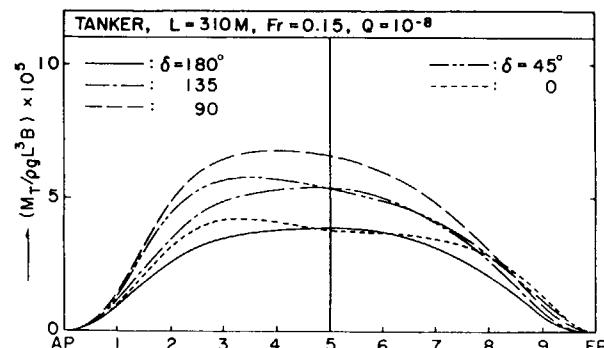


FIG. 4.3-12A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE TORSIONAL MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR DIFFERENT HEADING (TANKER)

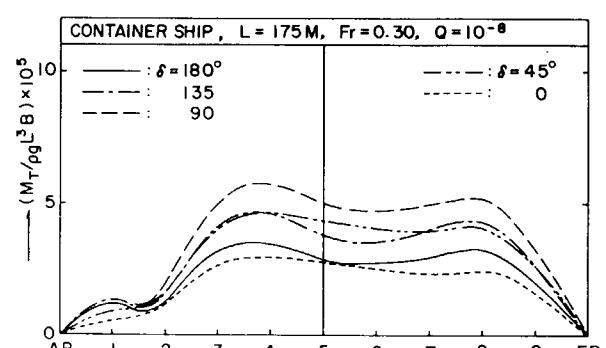


FIG. 4.3-12B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE TORSIONAL MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR DIFFERENT HEADING (CONTAINER SHIP)

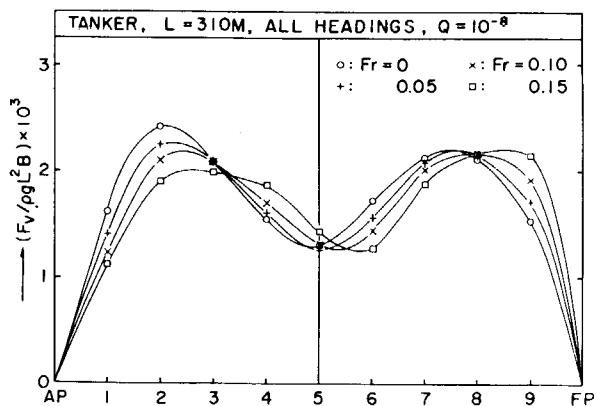


FIG. 4.3-13A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (TANKER)

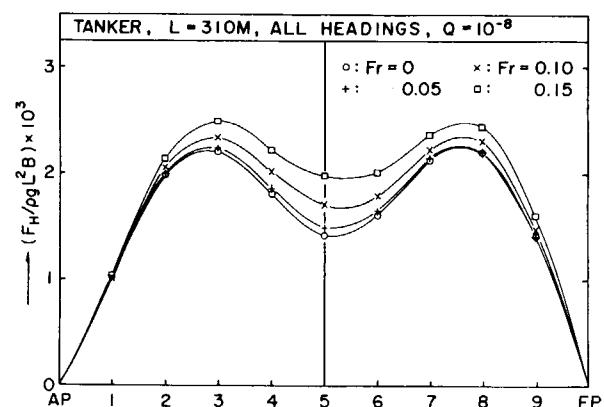
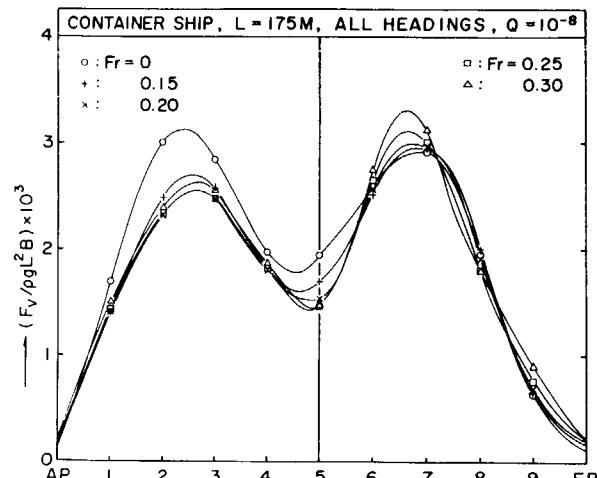


FIG. 4.3-14A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER)

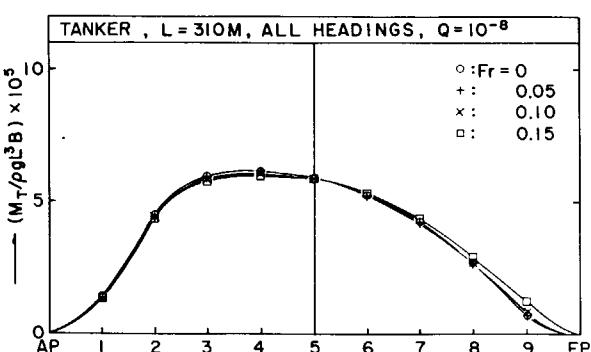
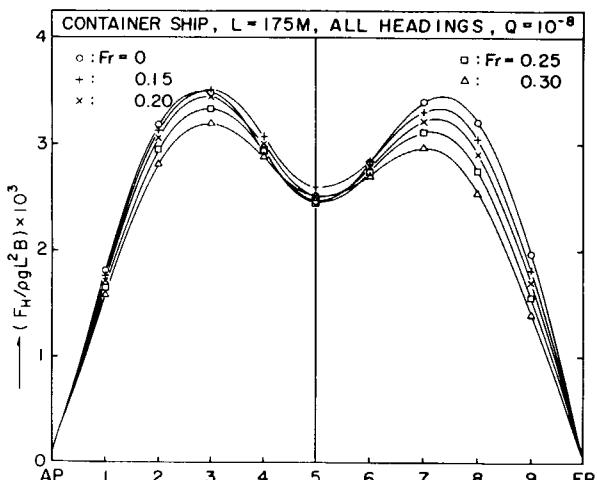
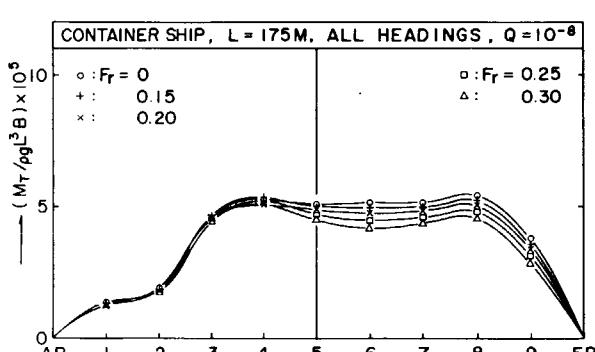


FIG. 4.3-15A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE TORSIONAL MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER)



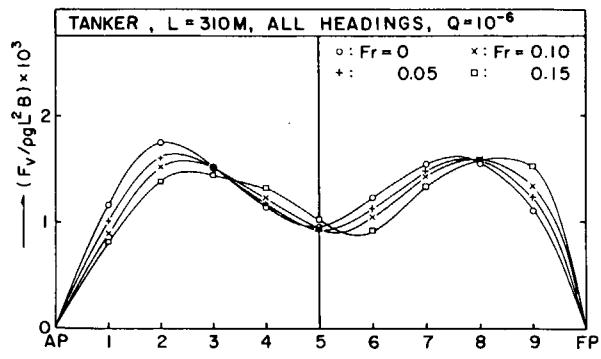


FIG. 4.3-16A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (TANKER)

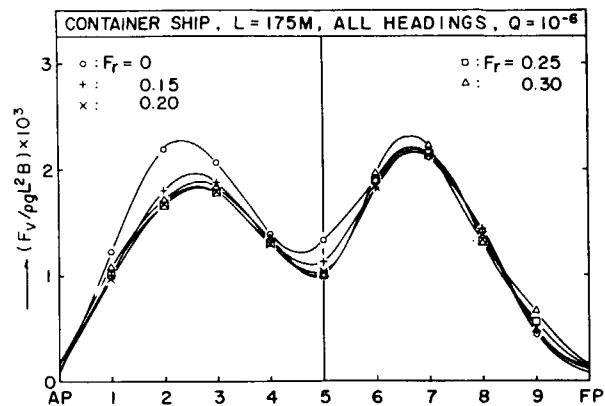


FIG. 4.3-16B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (CONTAINER SHIP)

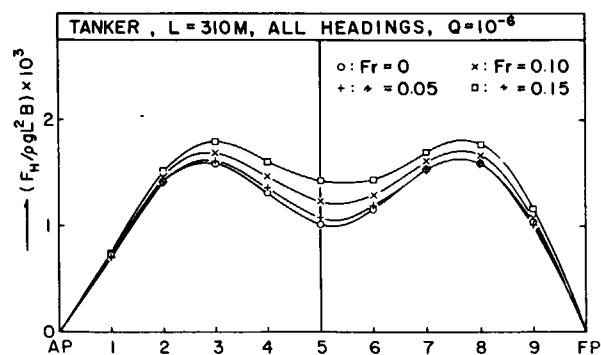


FIG. 4.3-17A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER)

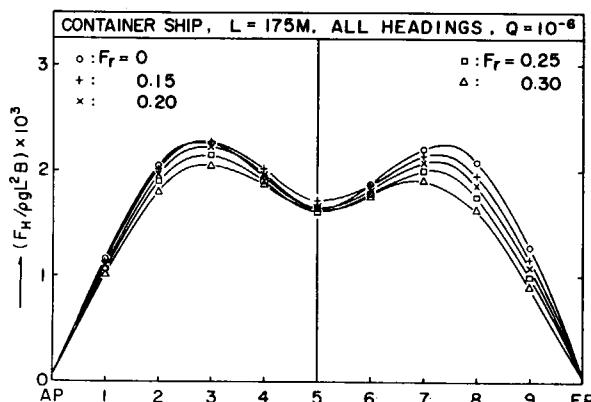


FIG. 4.3-17B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (CONTAINER SHIP)

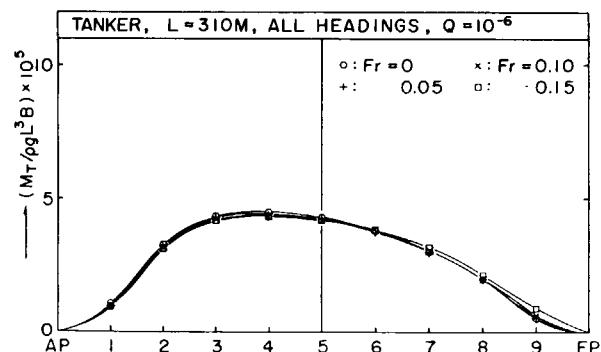


FIG. 4.3-18A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE TORSIONAL MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER)

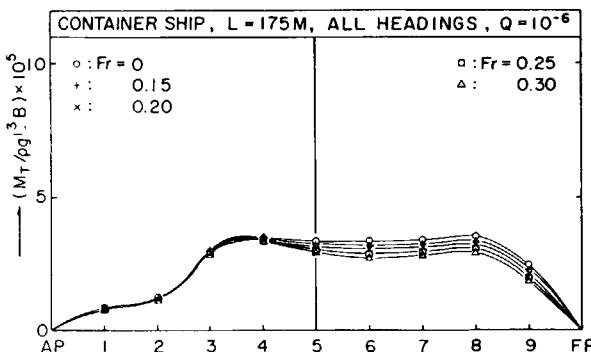


FIG. 4.3-18B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE TORSIONAL MOMENT PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (CONTAINER SHIP)

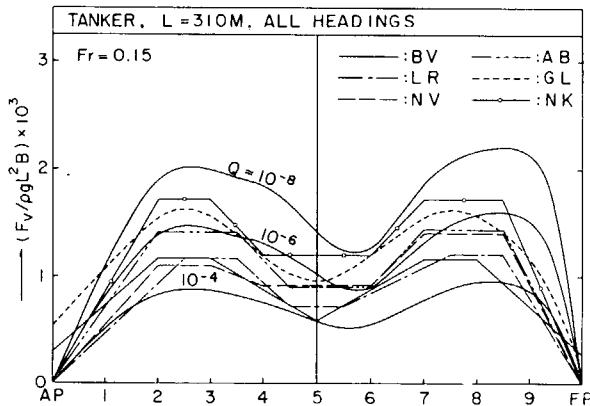


FIG. 4.3-19A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (TANKER)

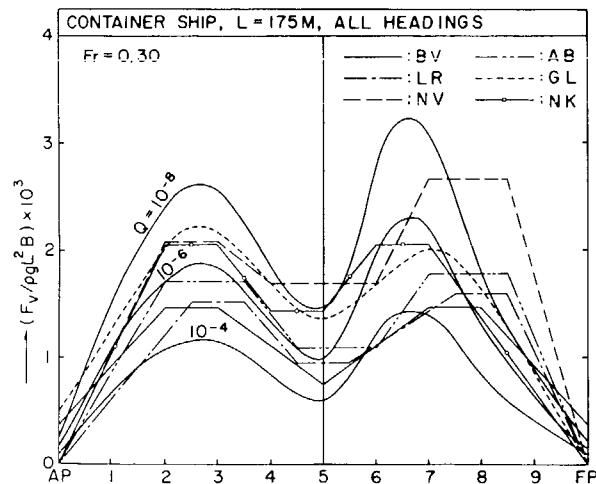


FIG. 4.3-19B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (CONTAINER SHIP)

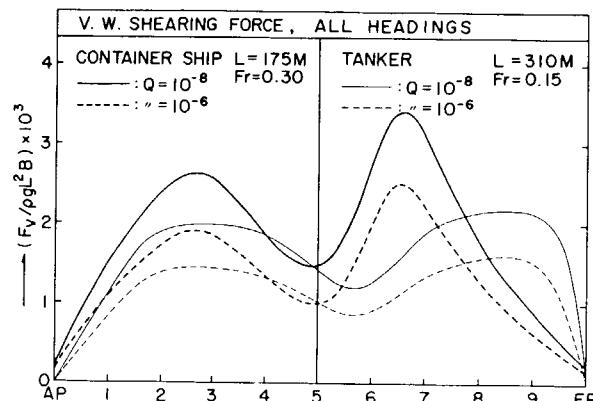


FIG. 4.3-20 LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (TANKER AND CONTAINER SHIP)

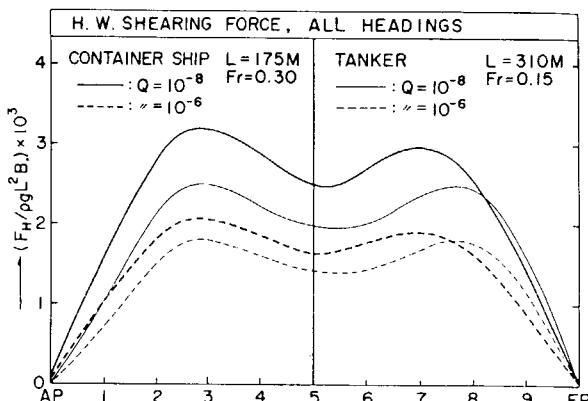


FIG. 4.3-21 LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL WAVE SHEARING FORCE PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (TANKER AND CONTAINER SHIP)

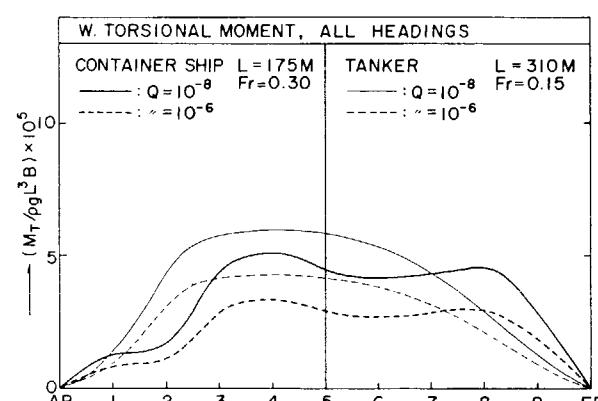


FIG. 4.3-22 LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF WAVE TORSIONAL MOMENT PREDICTED WITH DIFFERENT EXCEEDING PROBABILITIES IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADING (TANKER AND CONTAINER SHIP)

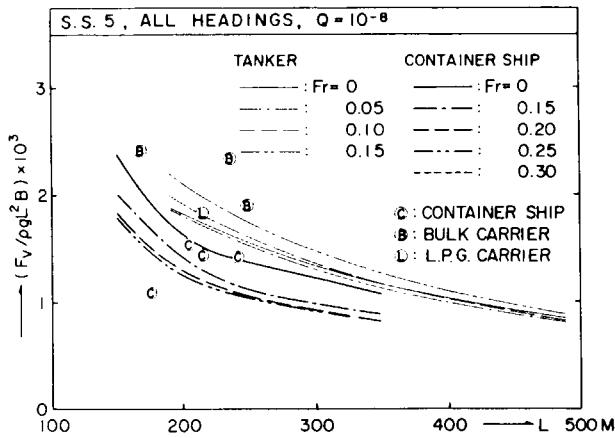


FIG. 4.3-23 VERTICAL WAVE SHEARING FORCE AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN, AS FUNCTION OF SHIP LENGTH

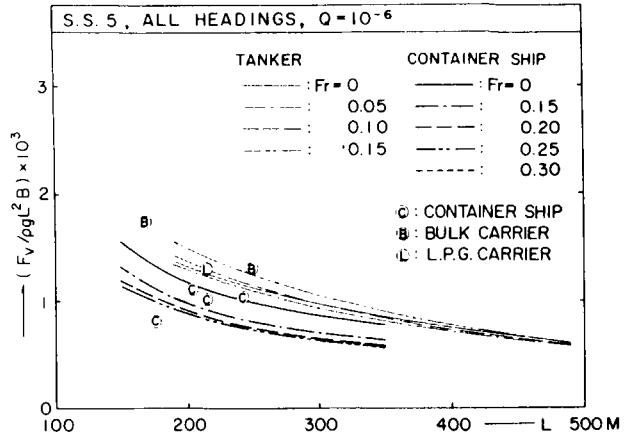


FIG. 4.3-25 VERTICAL WAVE SHEARING FORCE AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN, AS FUNCTION OF SHIP LENGTH

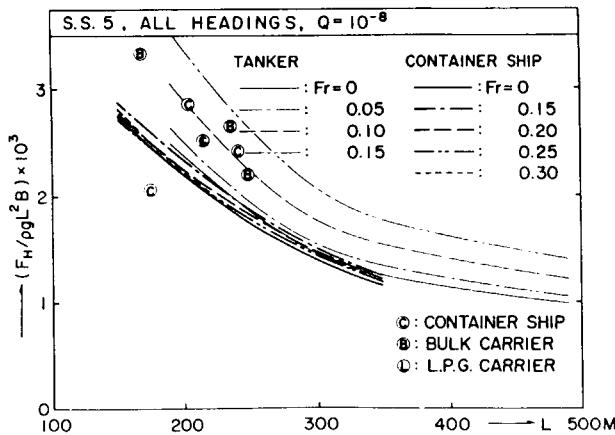


FIG. 4.3-24 HORIZONTAL WAVE SHEARING FORCE AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN, AS FUNCTION OF SHIP LENGTH

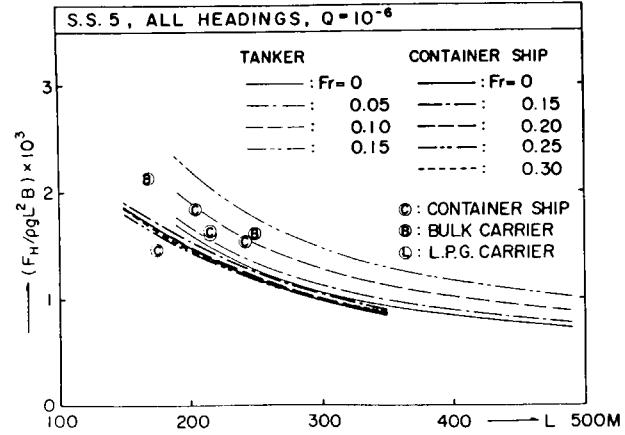


FIG. 4.3-26 HORIZONTAL WAVE SHEARING FORCE AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN, AS FUNCTION OF SHIP LENGTH

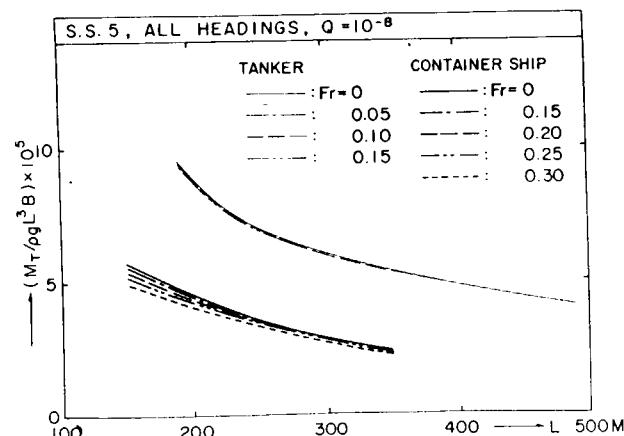


FIG. 4.3-25 WAVE TORSIONAL MOMENT AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN, AS FUNCTION OF SHIP LENGTH

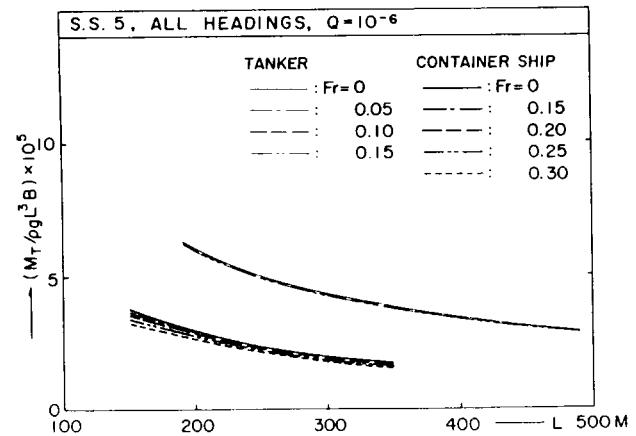


FIG. 4.3-28 WAVE TORSIONAL MOMENT AT S.S. 5 PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN, AS FUNCTION OF SHIP LENGTH

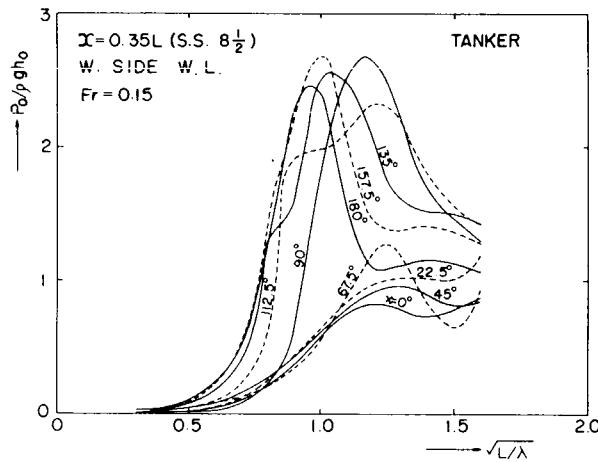


FIG. 4.4- 1A AMPLITUDES OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WEATHER SIDE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 IN REGULAR WAVES (TANKER)

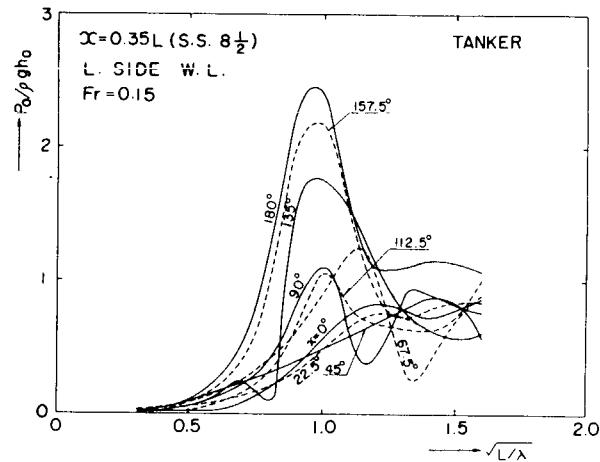


FIG. 4.4- 1B AMPLITUDES OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE LEEWARD SIDE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 IN REGULAR WAVES (TANKER)

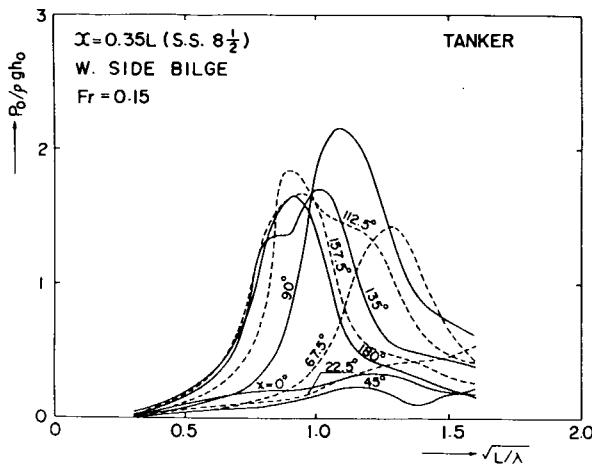


FIG. 4.4- 2A AMPLITUDES OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WEATHER SIDE BILGE AT S.S. 8-1/2 IN REGULAR WAVES (TANKER)

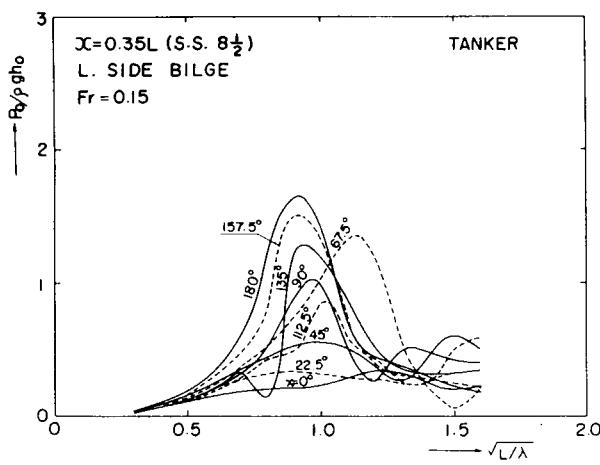


FIG. 4.4- 2B AMPLITUDES OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE LEEWARD SIDE BILGE AT S.S. 8-1/2 IN REGULAR WAVES (TANKER)

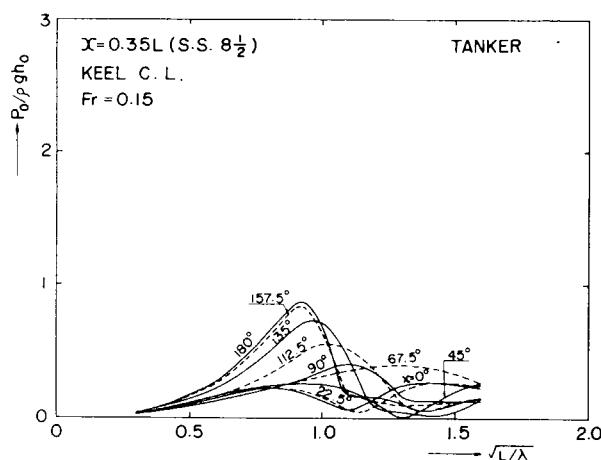


FIG. 4.4- 3 AMPLITUDES OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE KEELE CENTRE LINE AT S.S. 8-1/2 IN REGULAR WAVES (TANKER)

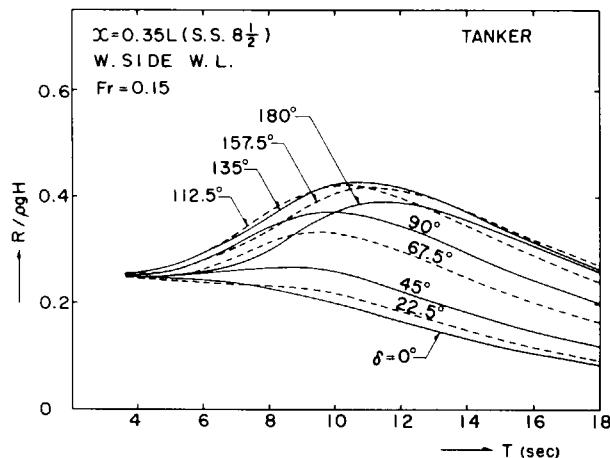


FIG. 4.4- 4A STANDARD DEVIATIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WEATHER SIDE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS (TANKER)

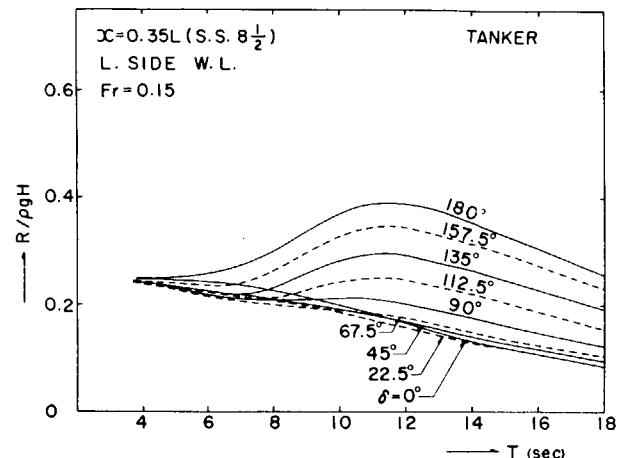


FIG. 4.4- 4B STANDARD DEVIATIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE LEEWARD SIDE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS (TANKER)

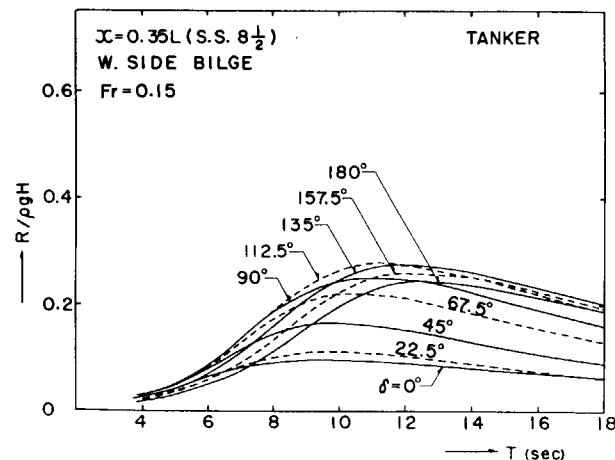


FIG. 4.4- 5A STANDARD DEVIATIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WEATHER SIDE BILGE AT S.S. 8-1/2 IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS (TANKER)

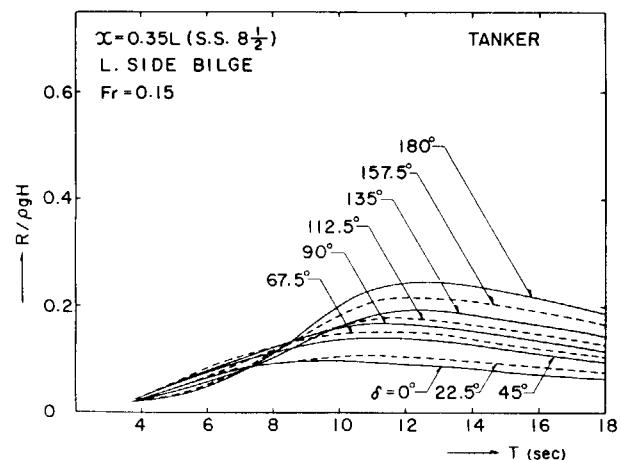


FIG. 4.4- 5B STANDARD DEVIATIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE LEEWARD SIDE BILGE AT S.S. 8-1/2 IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS (TANKER)

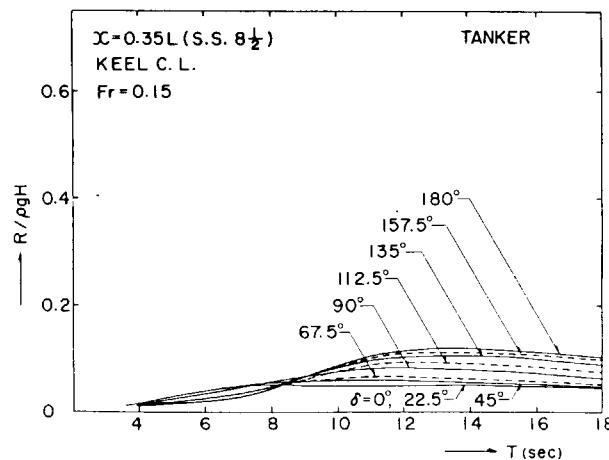


FIG. 4.4- 6 STANDARD DEVIATIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE KEEL CENTRE LINE AT S.S. 8-1/2 IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS (TANKER)

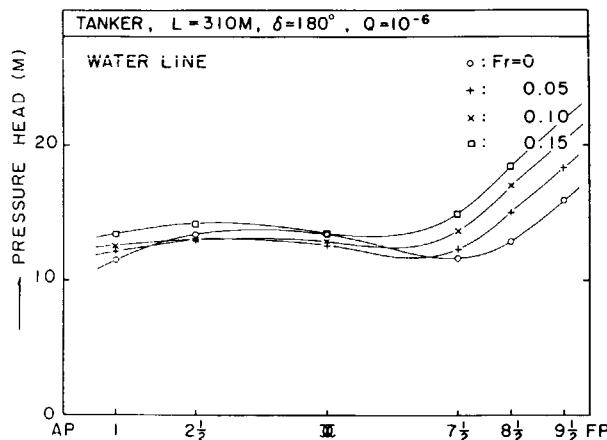


FIG. 4.4-7A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR HEAD SEAS (TANKER)

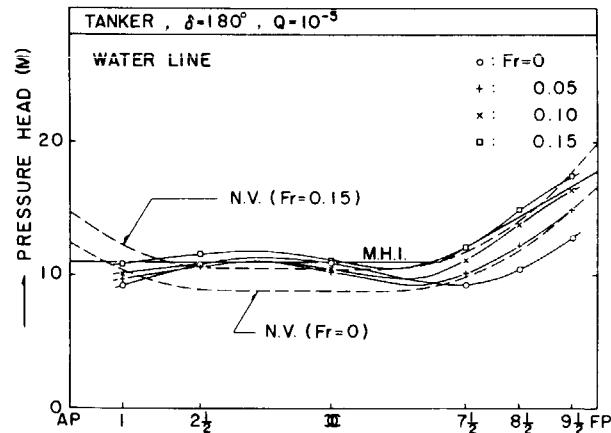


FIG. 4.4-7B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-5} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR HEAD SEAS (TANKER)

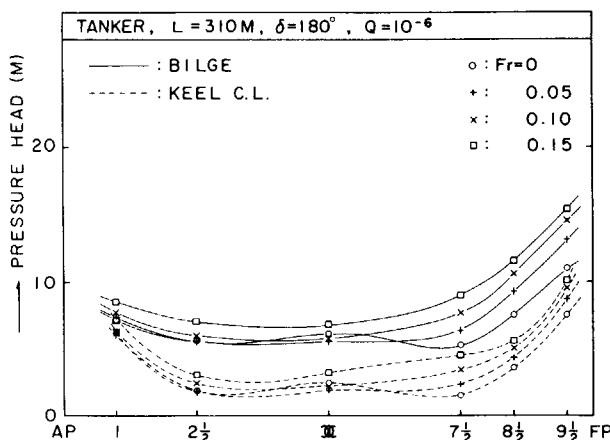


FIG. 4.4-8A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE BILGE AND KEEL CENTRE LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR HEAD SEAS (TANKER)

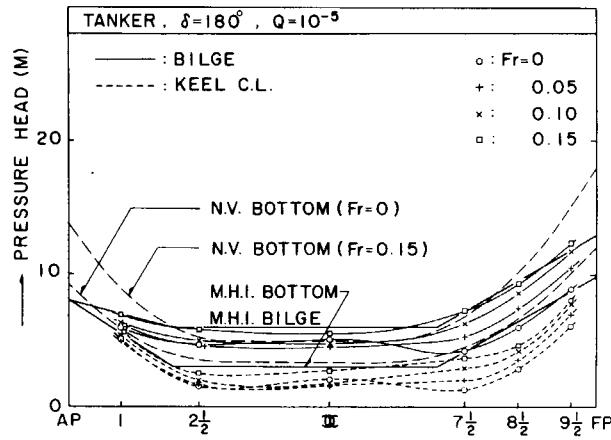


FIG. 4.4-8B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE BILGE AND KEEL CENTRE LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-5} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR HEAD SEAS (TANKER)

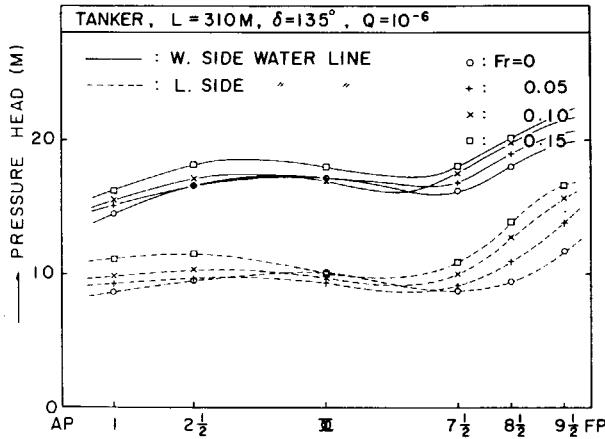


FIG. 4.4-9A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR BOW SEAS (TANKER)

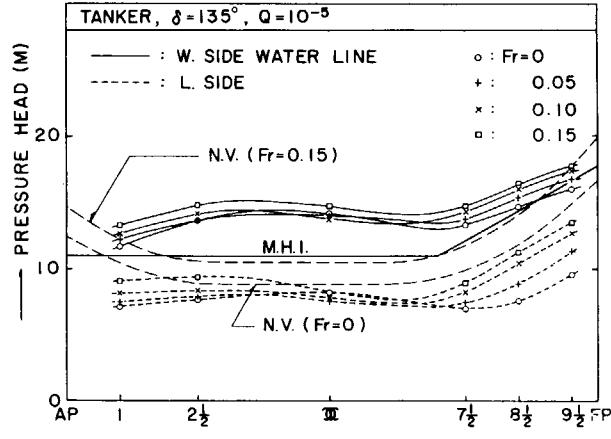


FIG. 4.4-9B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-5} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR BOW SEAS (TANKER)

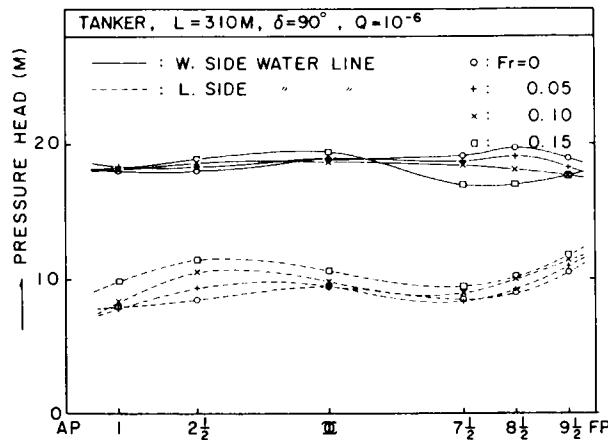


FIG. 4.4-10A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR BEAM SEAS (TANKER)

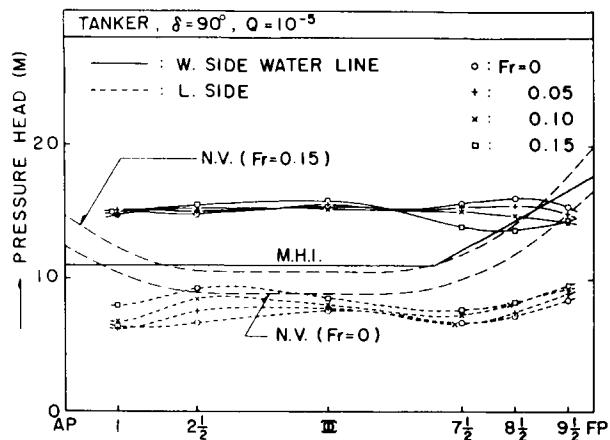


FIG. 4.4-10B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-5} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR BEAM SEAS (TANKER)

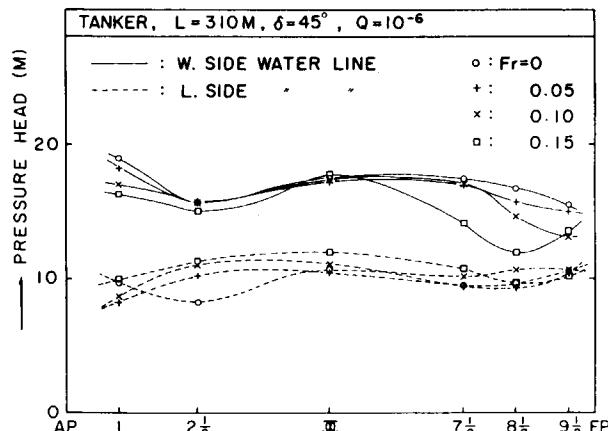


FIG. 4.4-11A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR QUARTERING SEAS (TANKER)

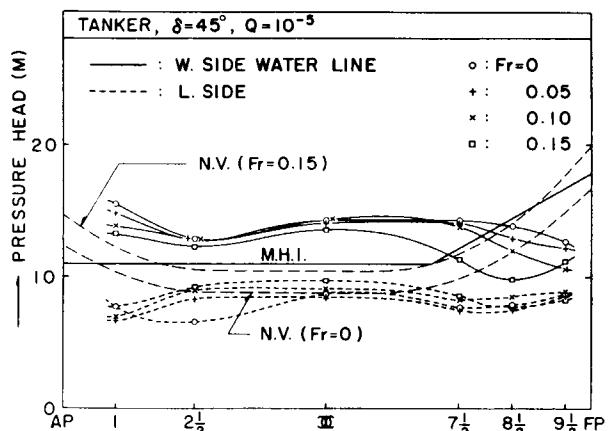


FIG. 4.4-11B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-5} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR QUARTERING SEAS (TANKER)

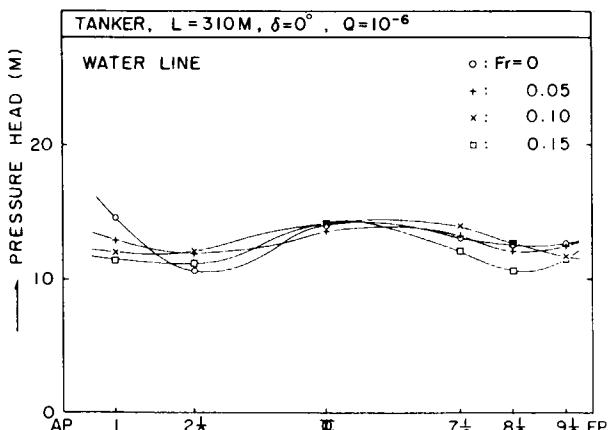


FIG. 4.4-12A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR FOLLOWING SEAS (TANKER)

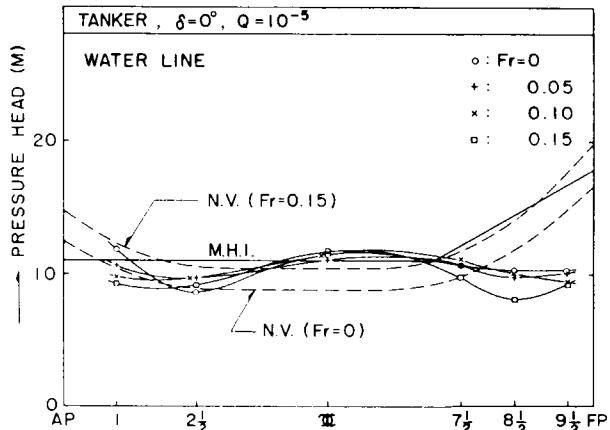


FIG. 4.4-12B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-5} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR FOLLOWING SEAS (TANKER)

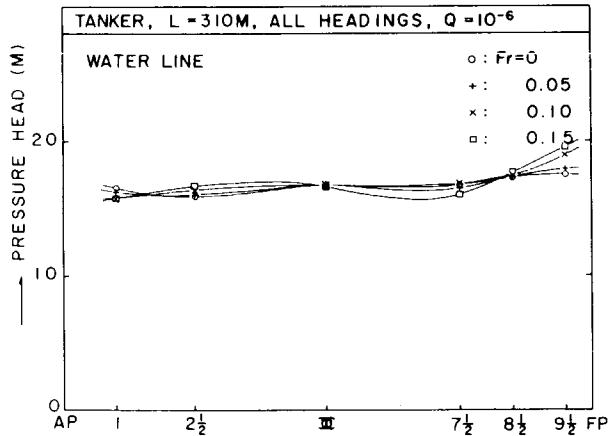


FIG. 4.4-13A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER)

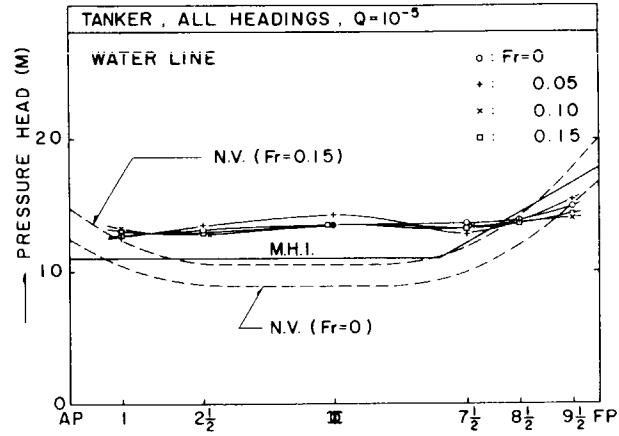


FIG. 4.4-13B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-5} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER)

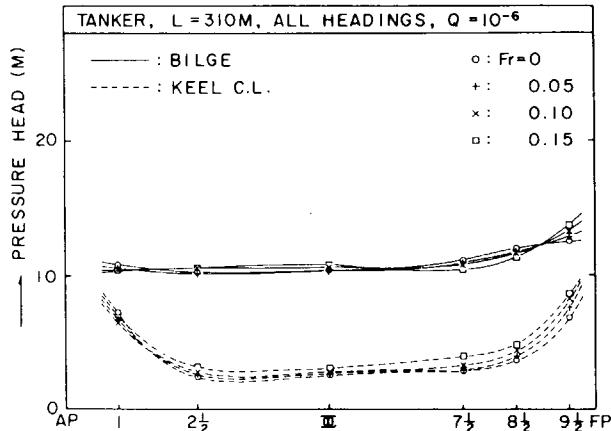


FIG. 4.4-14A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE BILGE AND KEEL CENTRE LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER)

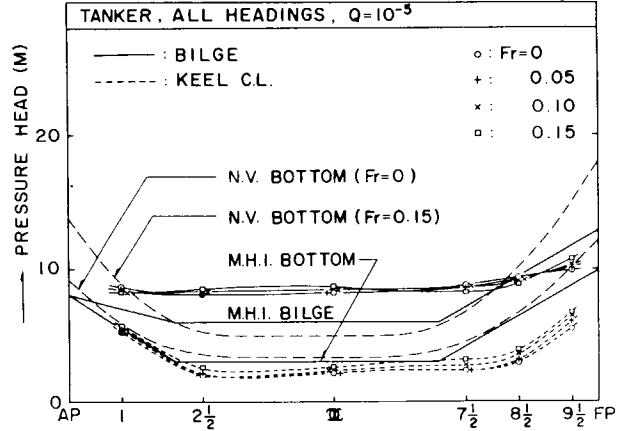


FIG. 4.4-14B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE BILGE AND KEEL CENTRE LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-5} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN FOR ALL HEADINGS (TANKER)

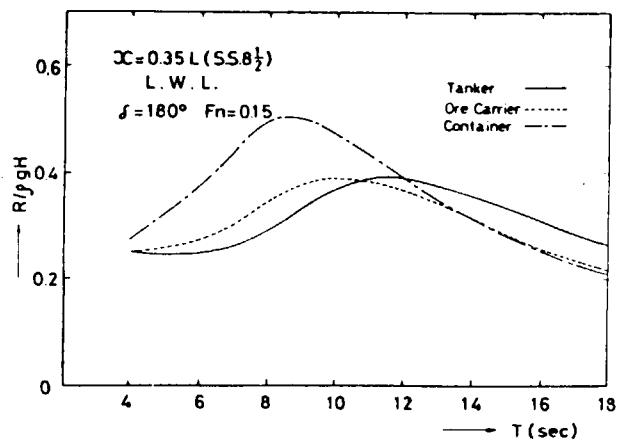


FIG. 4.4-15 STANDARD DEVIATIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 IN SHORT-CRESTED IRREGULAR BOW SEAS (TANKER, ORE CARRIER AND CONTAINER SHIP)

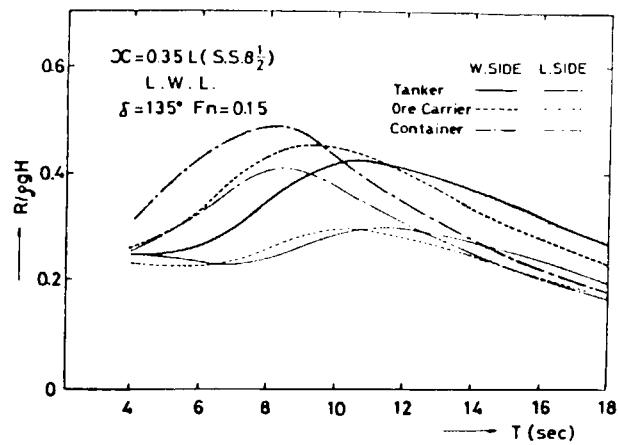


FIG. 4.4-18 STANDARD DEVIATIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 IN SHORT-CRESTED IRREGULAR HEAD SEAS (TANKER, ORE CARRIER AND CONTAINER SHIP)

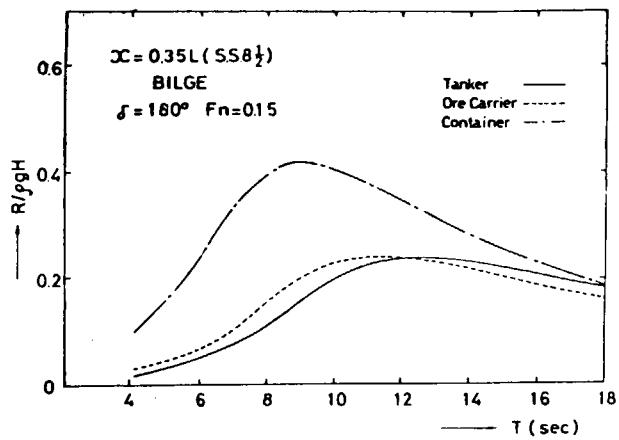


FIG. 4.4-16 STANDARD DEVIATIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE BILGE AT S.S. 8-1/2 IN SHORT-CRESTED IRREGULAR HEAD SEAS (TANKER, ORE CARRIER AND CONTAINER SHIP)

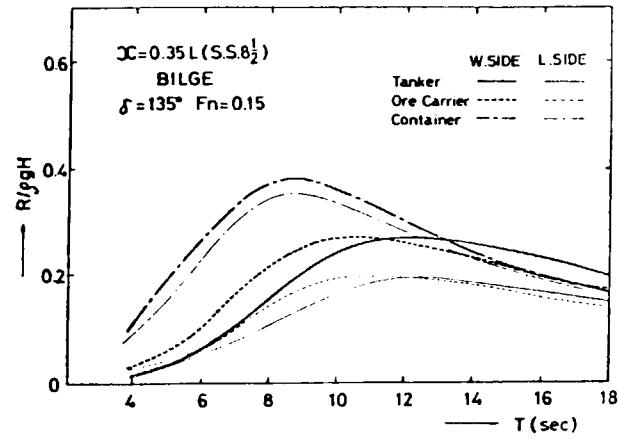


FIG. 4.4-19 STANDARD DEVIATIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE BILGE AT S.S. 8-1/2 IN SHORT-CRESTED IRREGULAR BOW SEAS (TANKER, ORE CARRIER AND CONTAINER SHIP)

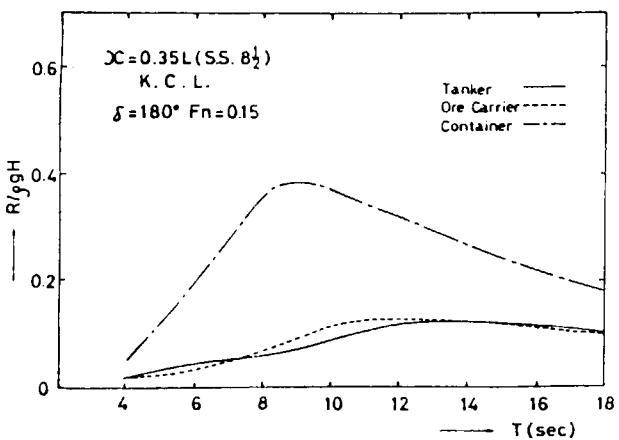


FIG. 4.4-17 STANDARD DEVIATIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE KEEL CENTRE LINE AT S.S. 8-1/2 IN SHORT-CRESTED IRREGULAR HEAD SEAS (TANKER, ORE CARRIER AND CONTAINER SHIP)

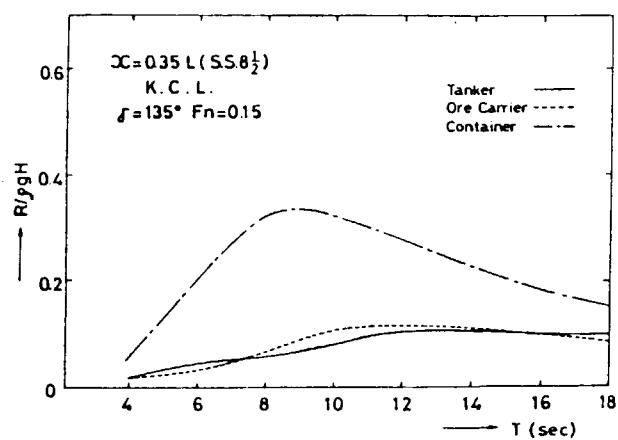


FIG. 4.4-20 STANDARD DEVIATIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE KEEL CENTRE LINE AT S.S. 8-1/2 IN SHORT-CRESTED IRREGULAR BOW SEAS (TANKER, ORE CARRIER AND CONTAINER SHIP)

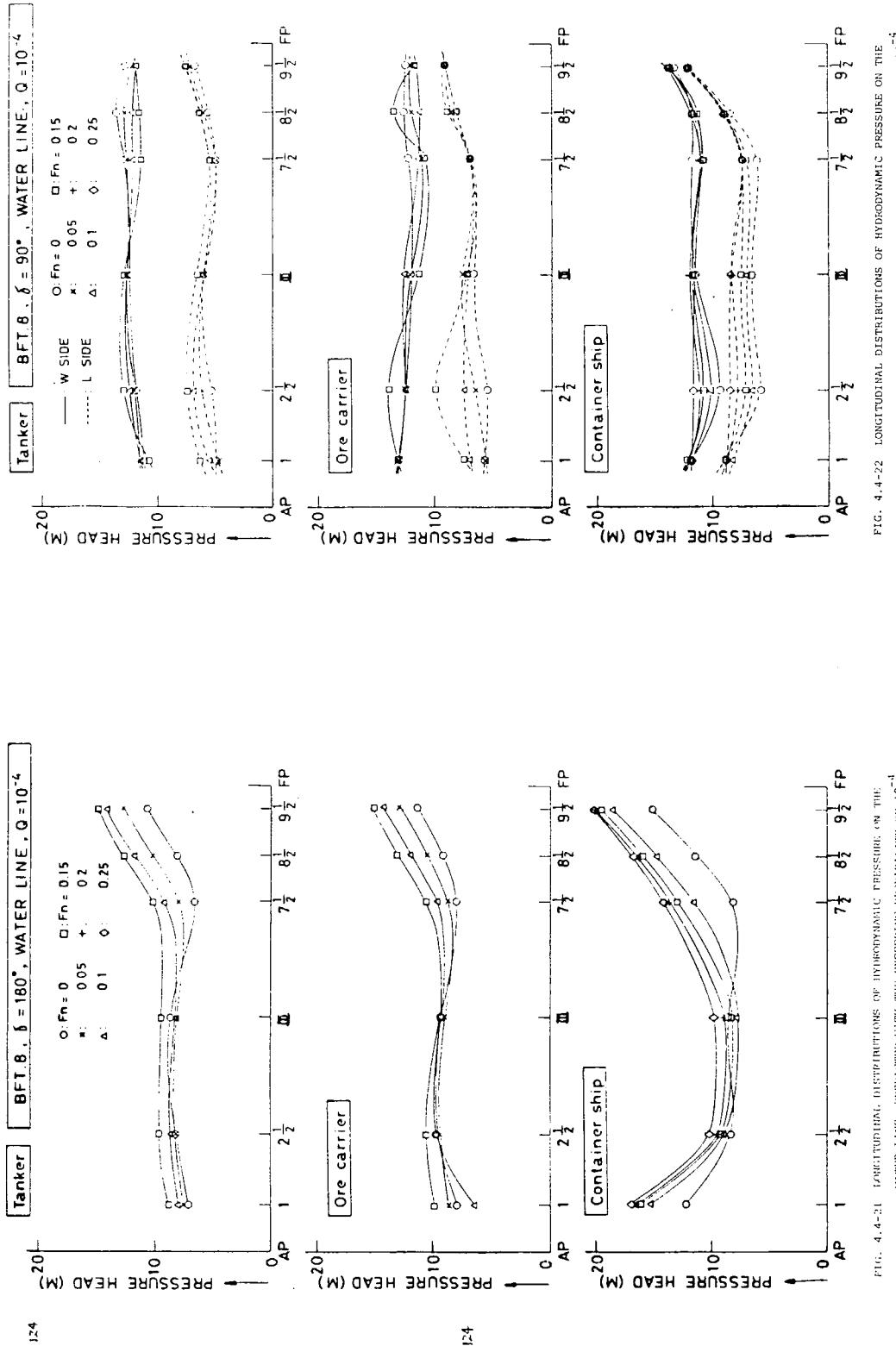


FIG. 4-4-21 LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, COMPUTED WITH THE EXCITATION FREQUENCY FLOWABILITY OF 10^{-4} FOR HEAD SEAS

FIG. 4-4-22 LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HYDRODYNAMIC PRESSURE ON THE WATER LINE, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-4} FOR BEAM SEAS

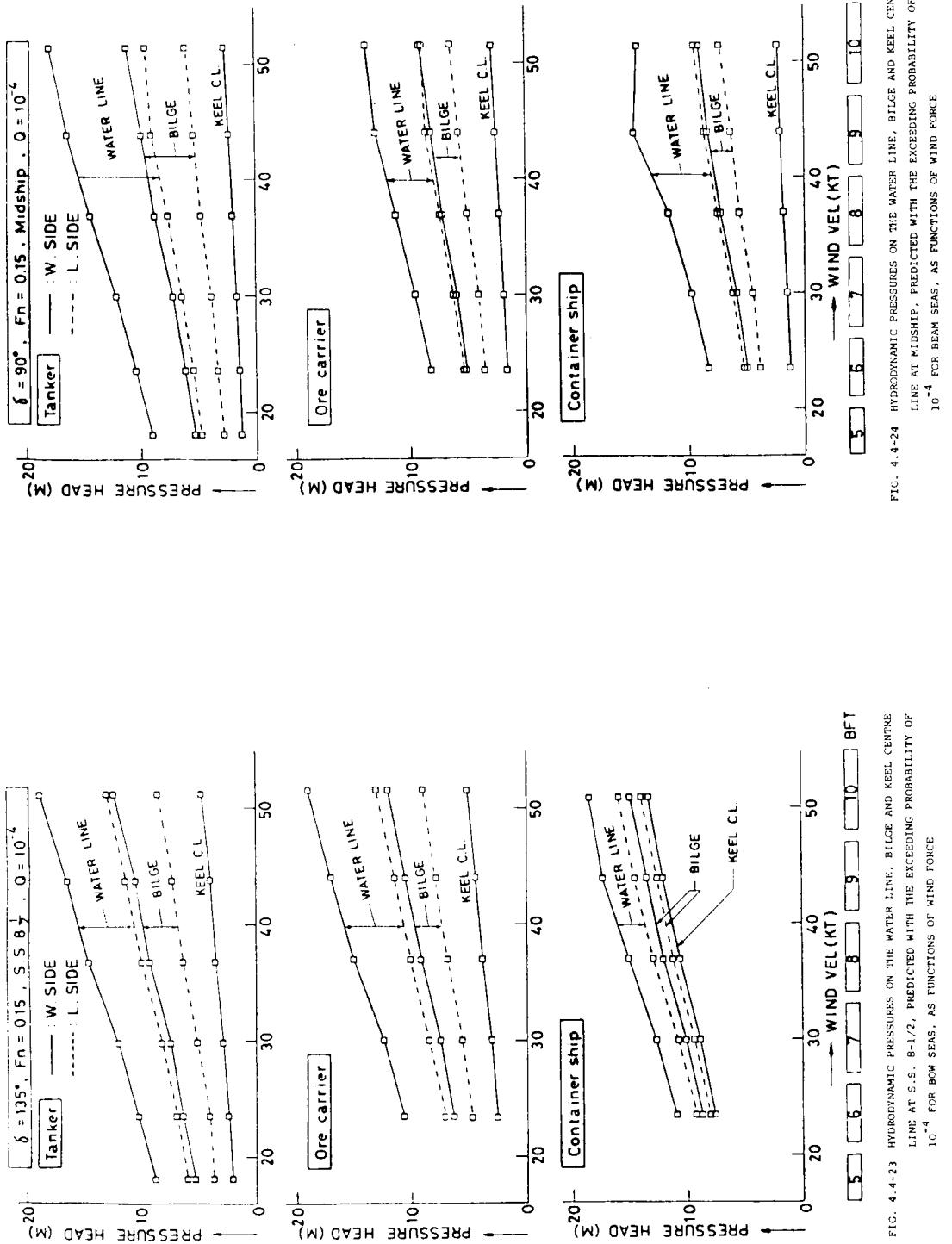


FIG. 4.4-24 HYDRODYNAMIC PRESSURES ON THE WATER LINE, BILGE AND KEEL CENTRE LINE AT MIDSHIP, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-4} FOR BEAM SEAS, AS FUNCTIONS OF WIND FORCE

FIG. 4.4-24 HYDRODYNAMIC PRESSURES ON THE WATER LINE, BILGE AND KEEL CENTRE LINE AT MIDSHIP, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-4} FOR BEAM SEAS, AS FUNCTIONS OF WIND FORCE

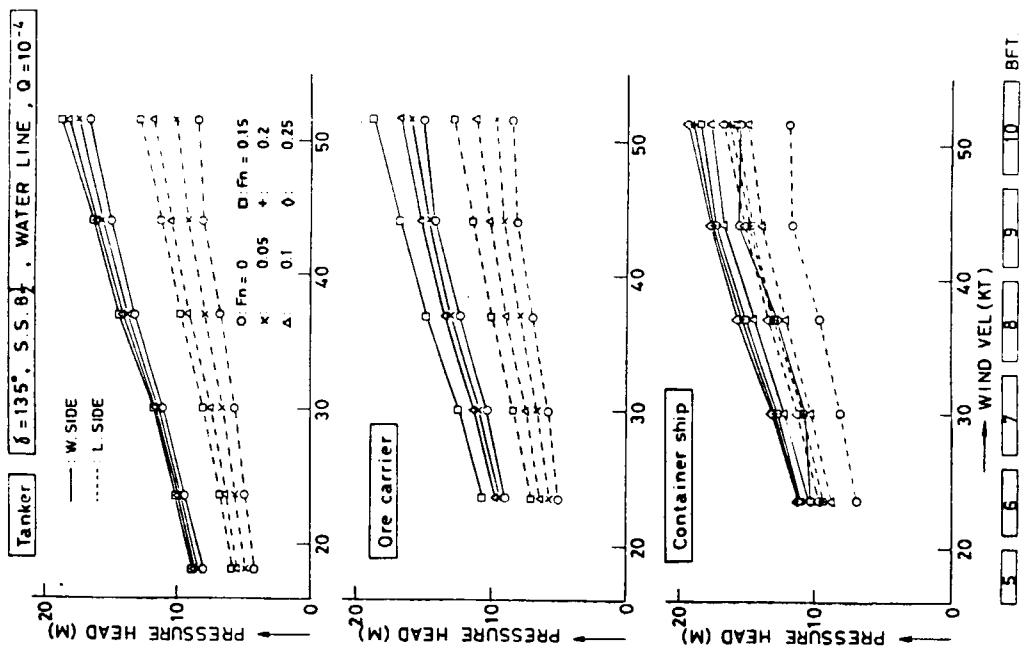


FIG. 4-4-25 HYDRODYNAMIC PRESSURES ON THE WATER LINE AT S.S. 8-1/2, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-4} FOR NOW 5FTS. AS A FUNCTION OF WIND FORCE.

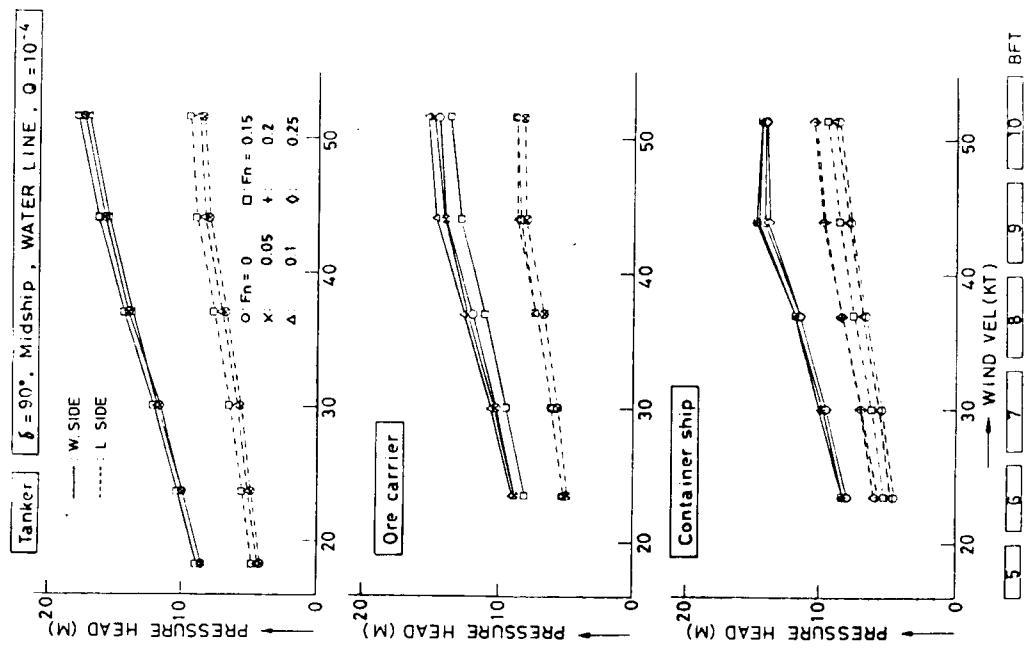


FIG. 4-4-26 HYDRODYNAMIC PRESSURES ON THE WATER LINE AT MIDSHIP, PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-4} FOR BEAM SEAS, AS FUNCTIONS OF WIND FORCE

OIL TANKER

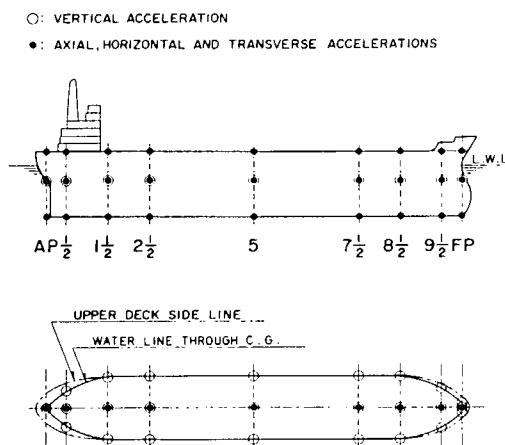


FIG. 4.5- 1A LOCATIONS FOR PREDICTING THE ACCELERATIONS (TANKER)

CONTAINER SHIP

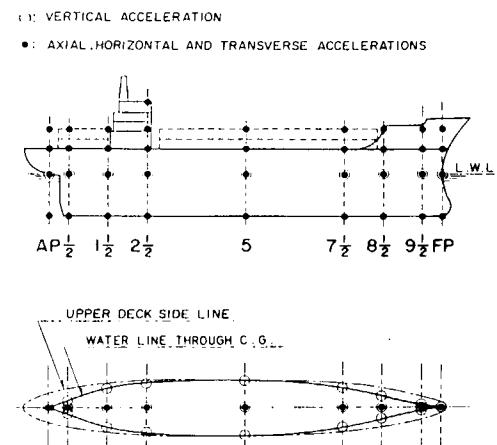


FIG. 4.5- 1B LOCATIONS FOR PREDICTING THE ACCELERATIONS (CONTAINER SHIP)

ORE CARRIER

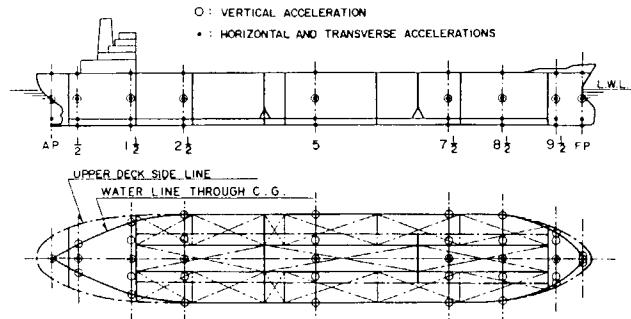


FIG. 4.5- 1C LOCATIONS FOR PREDICTING THE ACCELERATIONS (ORE CARRIER)

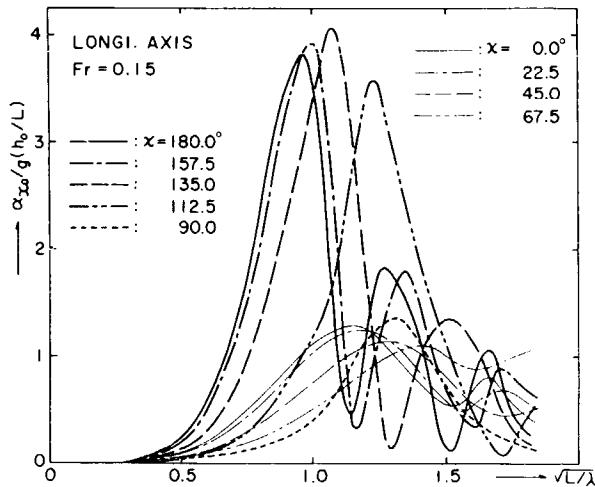


FIG. 4.5- 2A AMPLITUDES OF AXIAL ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS OF A TANKER IN REGULAR WAVES

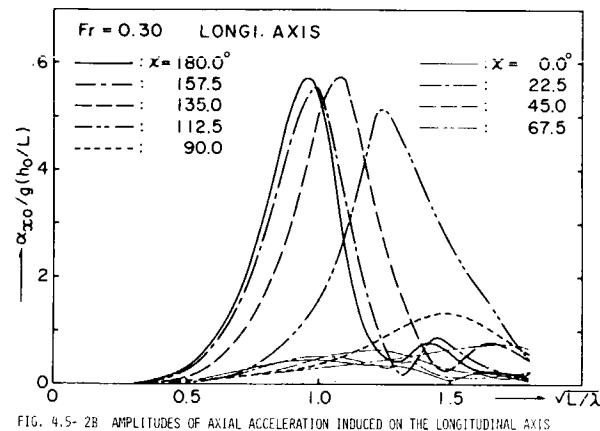


FIG. 4.5- 2B AMPLITUDES OF AXIAL ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS OF A CONTAINER SHIP IN REGULAR WAVES

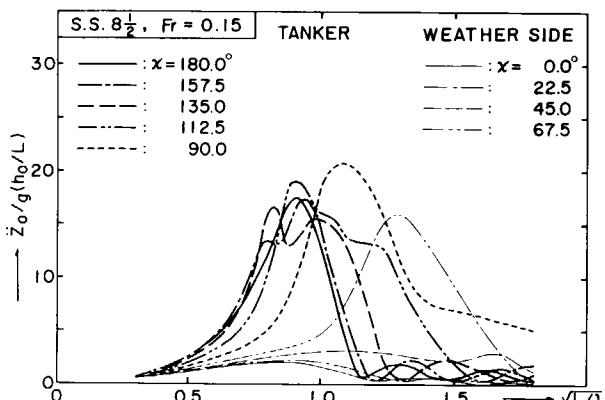


FIG. 4.5- 3A AMPLITUDES OF VERTICAL ACCELERATION INDUCED ON THE WEATHER SIDE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 OF A TANKER IN REGULAR WAVES

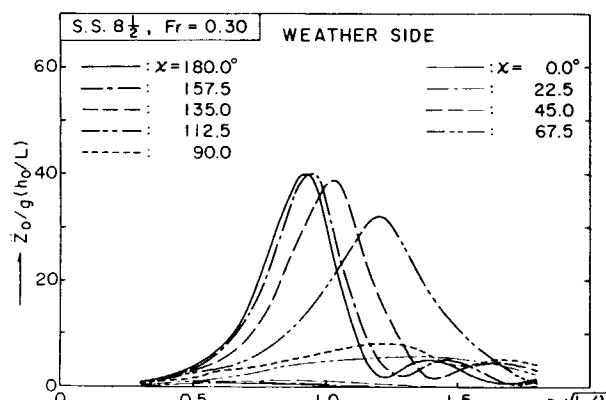


FIG. 4.5- 3B AMPLITUDES OF VERTICAL ACCELERATION INDUCED ON THE WEATHER SIDE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 OF A CONTAINER SHIP IN REGULAR WAVES

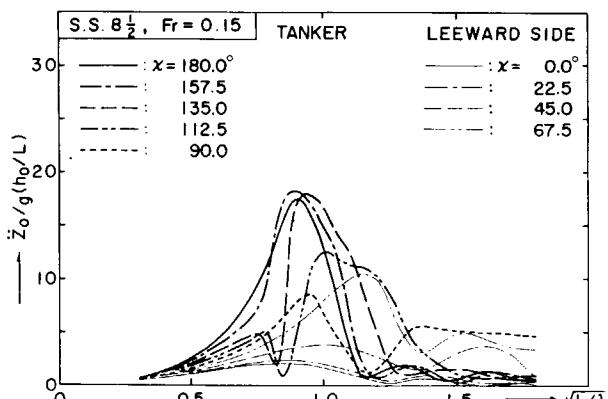


FIG. 4.5- 4A AMPLITUDES OF VERTICAL ACCELERATION INDUCED ON THE LEEWARD SIDE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 OF A TANKER IN REGULAR WAVES

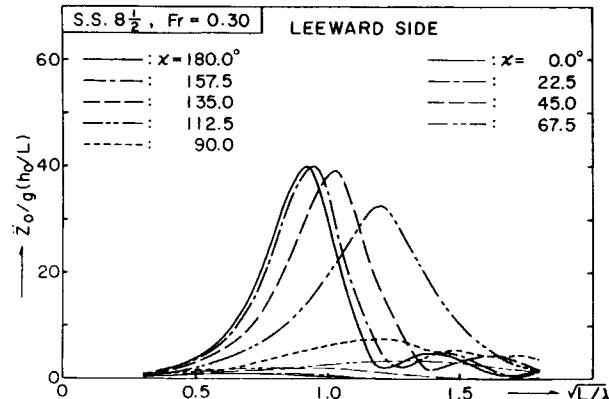


FIG. 4.5- 4B AMPLITUDES OF VERTICAL ACCELERATION INDUCED ON THE LEEWARD SIDE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 OF A CONTAINER SHIP IN REGULAR WAVES

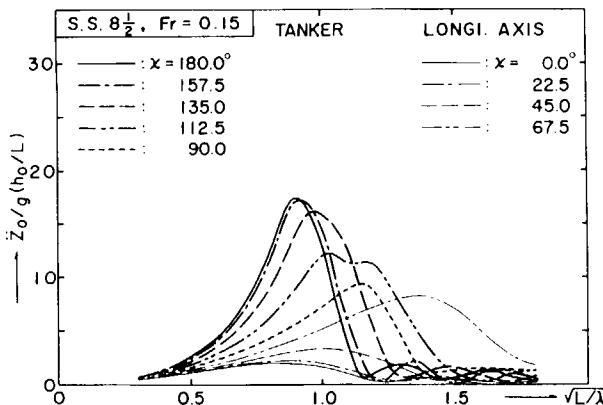


FIG. 4.5-5A AMPLITUDES OF VERTICAL ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS AT S.S. 8-1/2 OF A TANKER IN REGULAR WAVES

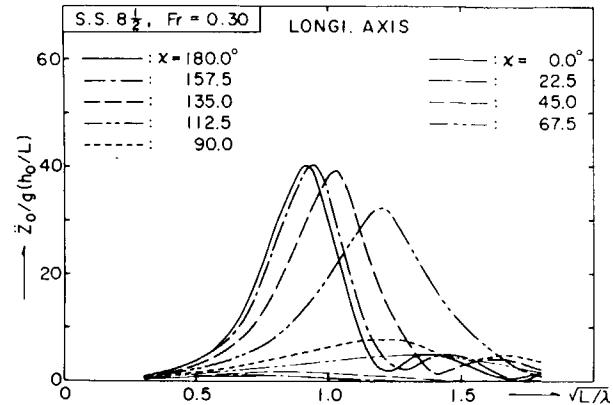


FIG. 4.5-5B AMPLITUDES OF VERTICAL ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS AT S.S. 8-1/2 OF A CONTAINER SHIP IN REGULAR WAVES

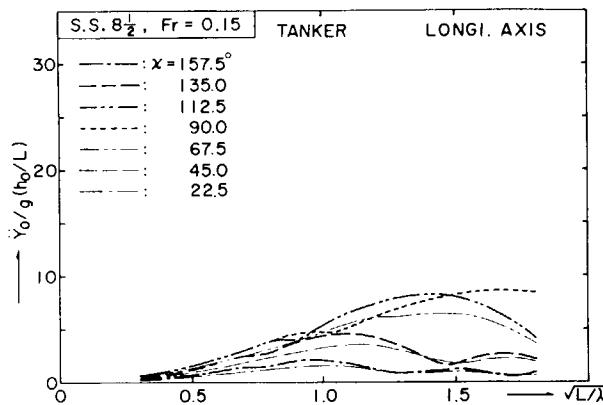


FIG. 4.5-6A AMPLITUDES OF HORIZONTAL ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS AT S.S. 8-1/2 OF A TANKER IN REGULAR WAVES

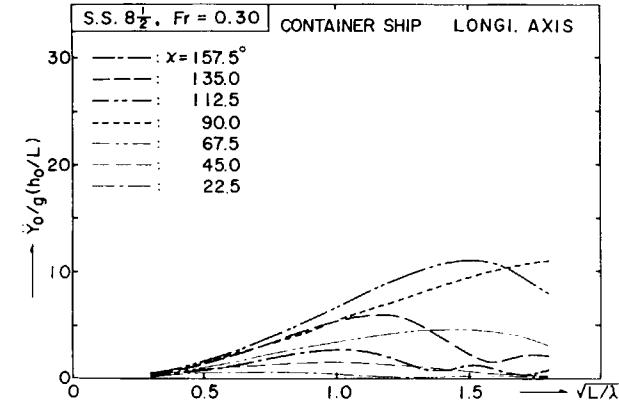


FIG. 4.5-6B AMPLITUDES OF HORIZONTAL ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS AT S.S. 8-1/2 OF A CONTAINER SHIP IN REGULAR WAVES

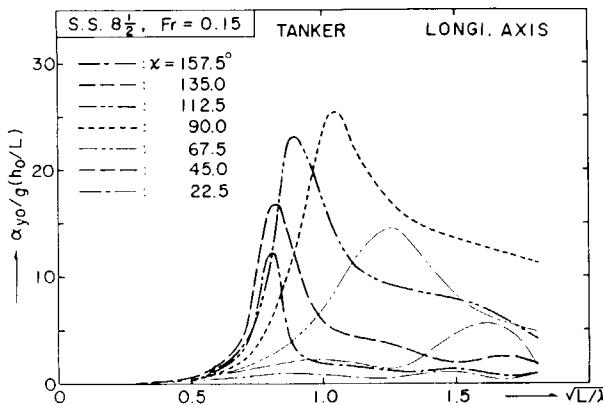


FIG. 4.5-7A AMPLITUDES OF TRANSVERSE ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS AT S.S. 8-1/2 OF A TANKER IN REGULAR WAVES

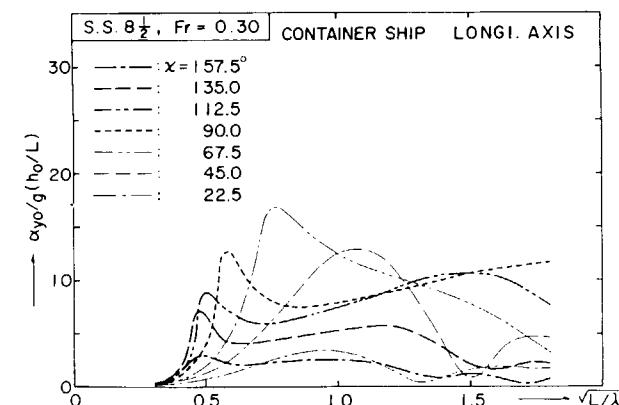


FIG. 4.5-7B AMPLITUDES OF TRANSVERSE ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS AT S.S. 8-1/2 OF A CONTAINER SHIP IN REGULAR WAVES

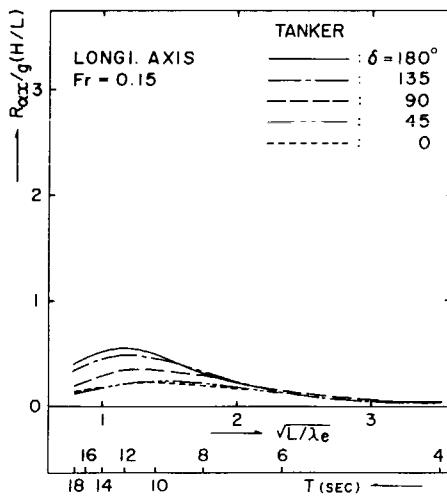


FIG. 4.5- 8A STANDARD DEVIATIONS OF AXIAL ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS OF A TANKER IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

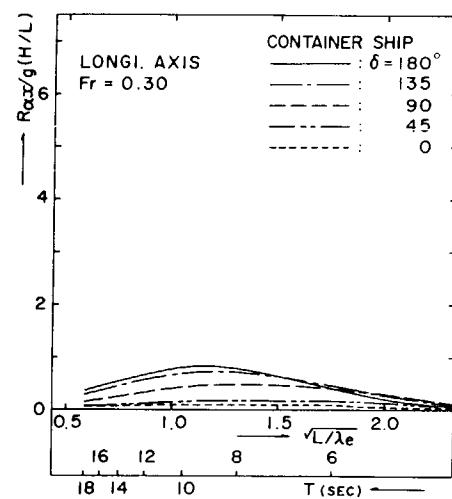


FIG. 4.5- 8B STANDARD DEVIATIONS OF AXIAL ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS OF A CONTAINER SHIP IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

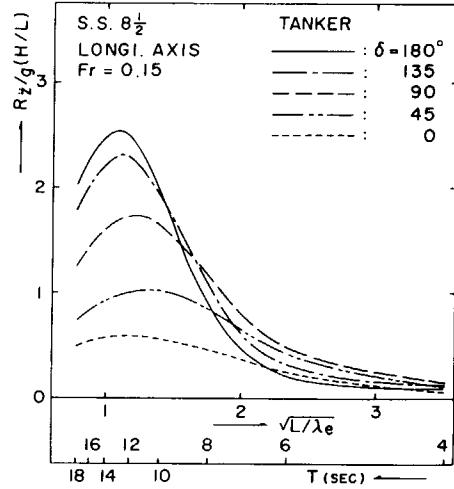


FIG. 4.5- 9A STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS AT S.S. 8-1/2 OF A TANKER IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

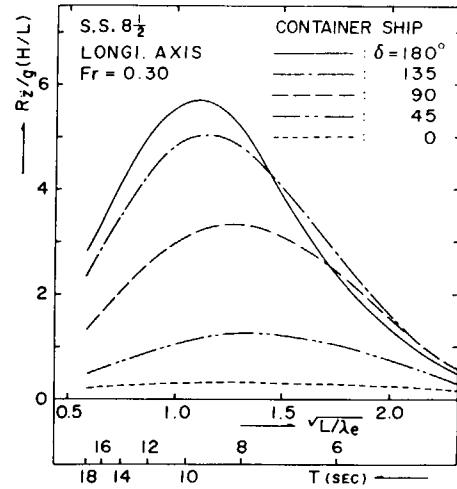


FIG. 4.5- 9B STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS AT S.S. 8-1/2 OF A CONTAINER SHIP IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

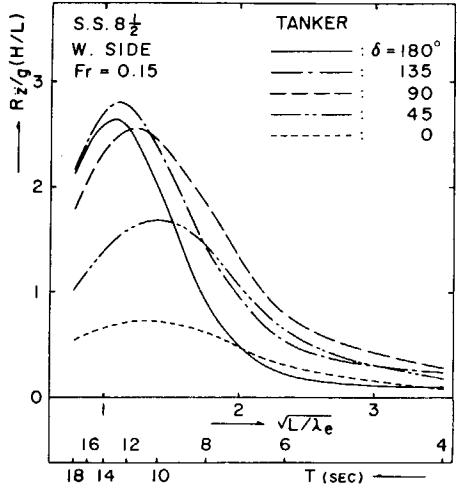


FIG. 4.5- 10A STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL ACCELERATION INDUCED ON THE WEATHER SIDE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 OF A TANKER IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

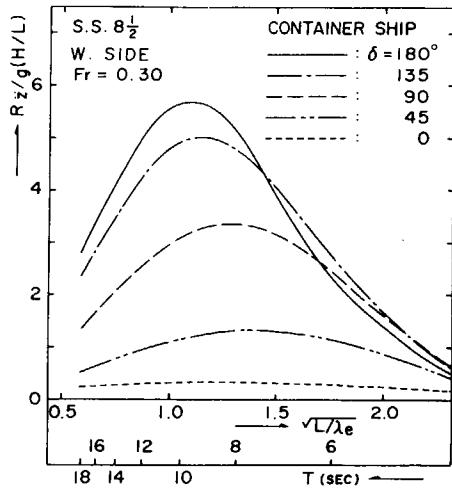


FIG. 4.5- 10B STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL ACCELERATION INDUCED ON THE WEATHER SIDE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 OF A CONTAINER SHIP IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

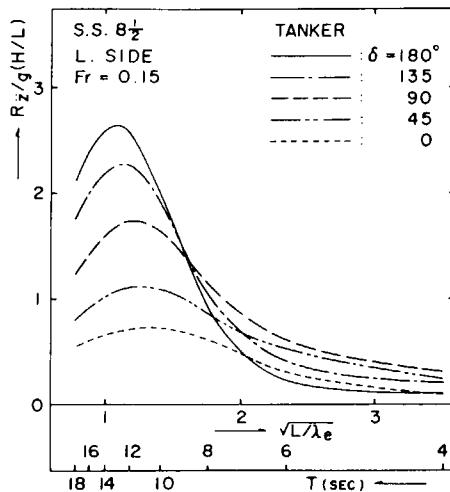


FIG. 4.5-11A STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL ACCELERATION INDUCED ON THE LEEWARD SIDE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 OF A TANKER IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

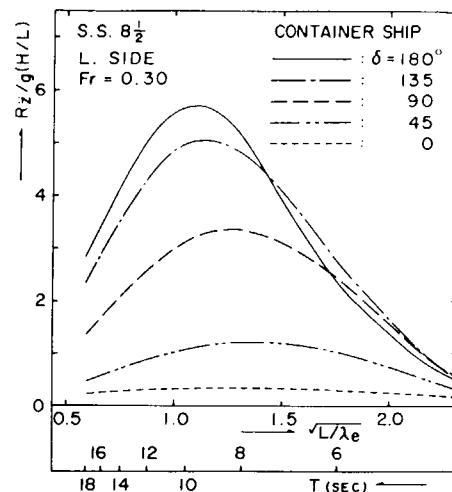


FIG. 4.5-11B STANDARD DEVIATIONS OF VERTICAL ACCELERATION INDUCED ON THE LEEWARD SIDE WATER LINE AT S.S. 8-1/2 OF A CONTAINER SHIP IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

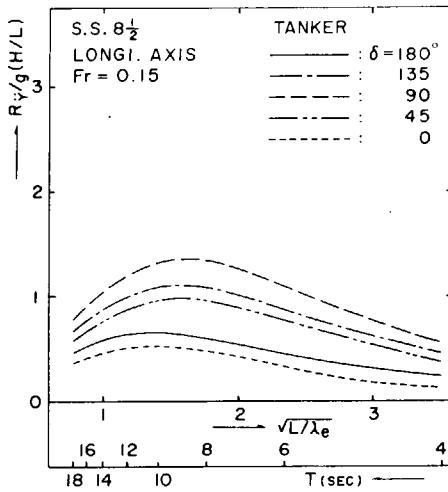


FIG. 4.5-12A STANDARD DEVIATIONS OF HORIZONTAL ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS AT S.S. 8-1/2 OF A TANKER IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

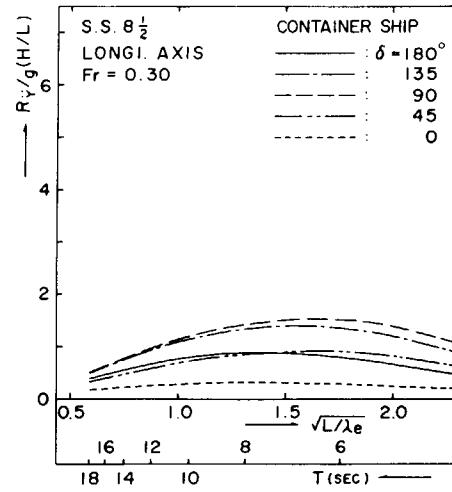


FIG. 4.5-12B STANDARD DEVIATIONS OF HORIZONTAL ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS AT S.S. 8-1/2 OF A CONTAINER SHIP IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

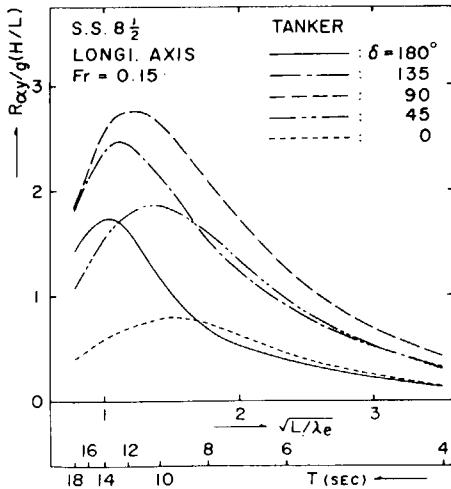


FIG. 4.5-13A STANDARD DEVIATIONS OF TRANSVERSE ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS AT S.S. 8-1/2 OF A TANKER IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

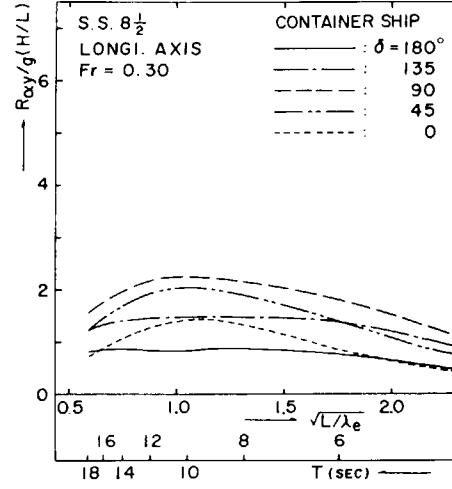


FIG. 4.5-13B STANDARD DEVIATIONS OF TRANSVERSE ACCELERATION INDUCED ON THE LONGITUDINAL AXIS AT S.S. 8-1/2 OF A CONTAINER SHIP IN SHORT-CRESTED IRREGULAR SEAS

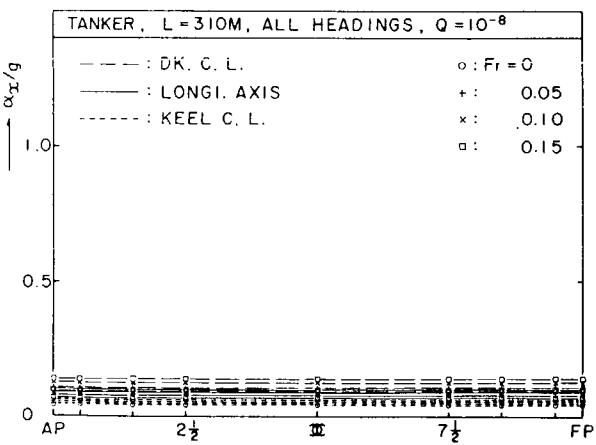


FIG. 4.5-14A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF AXIAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10⁻⁸ IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (TANKER)

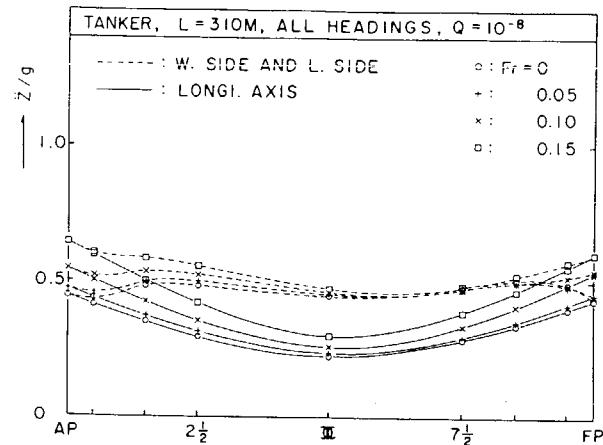


FIG. 4.5-15A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10⁻⁸ IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (TANKER)

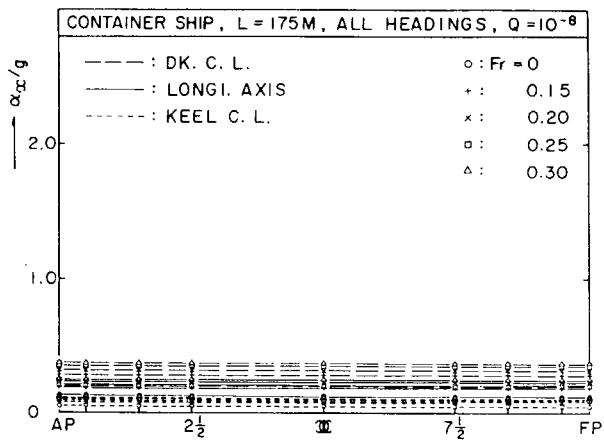


FIG. 4.5-14B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF AXIAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10⁻⁸ IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (CONTAINER SHIP)

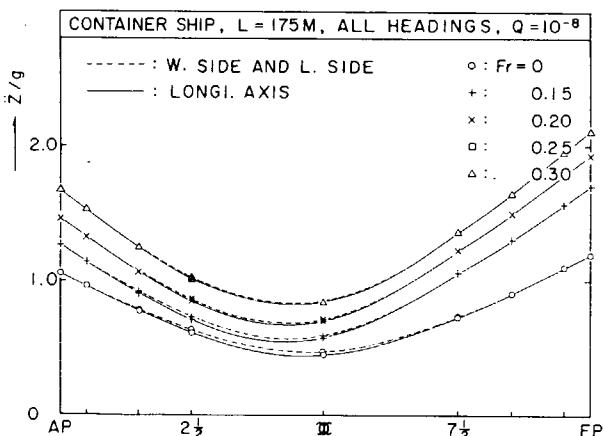


FIG. 4.5-15C LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10⁻⁸ IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (CONTAINER SHIP)

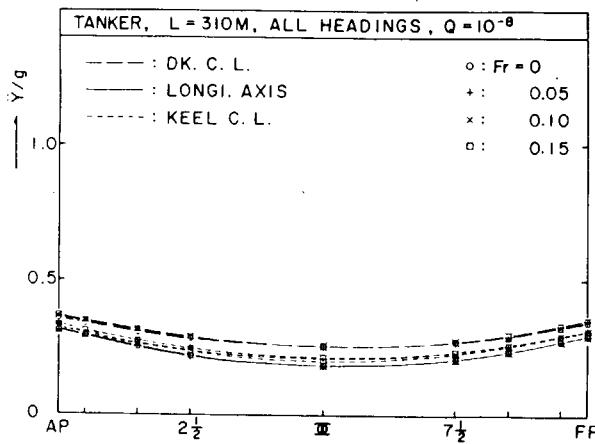


FIG. 4.5-16A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (TANKER)

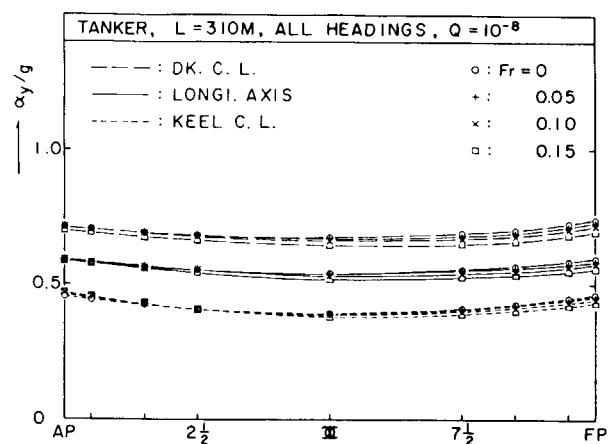


FIG. 4.5-17A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF TRANSVERSE ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (TANKER)

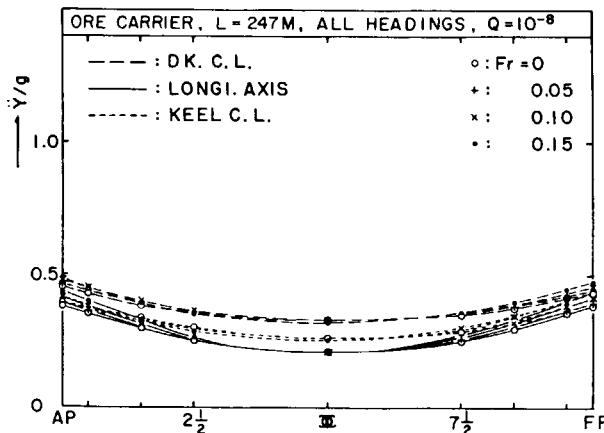


FIG. 4.5-16B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (ORE CARRIER)

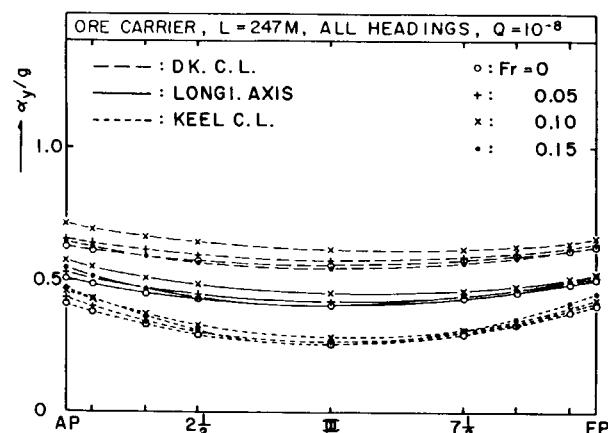


FIG. 4.5-17B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF TRANSVERSE ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (ORE CARRIER)

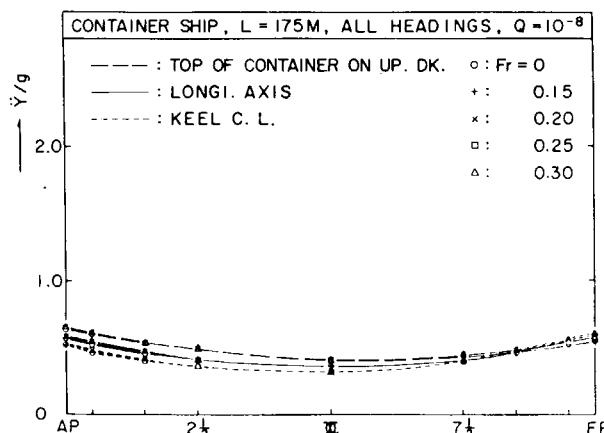


FIG. 4.5-16C LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-3} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (CONTAINER SHIP)

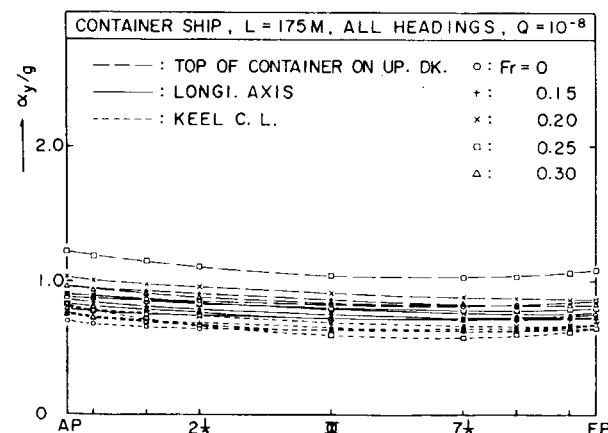


FIG. 4.5-17C LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF TRANSVERSE ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-8} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (CONTAINER SHIP)

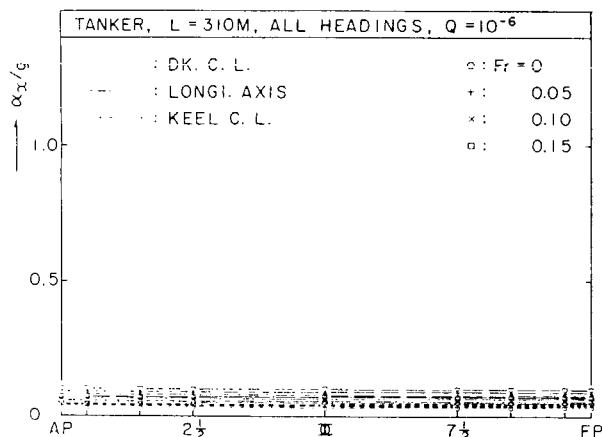


FIG. 4.5-18A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF AXIAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (TANKER)

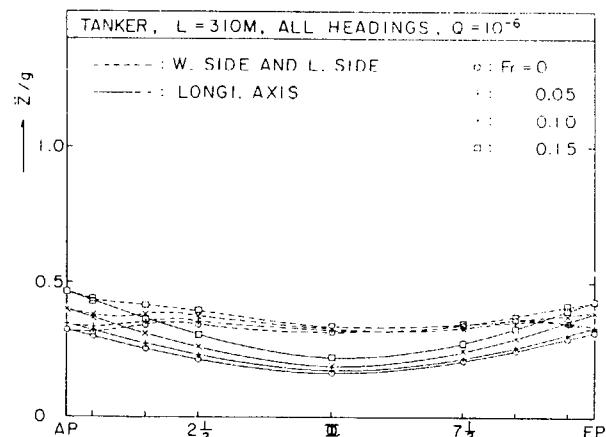


FIG. 4.5-19A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (TANKER)

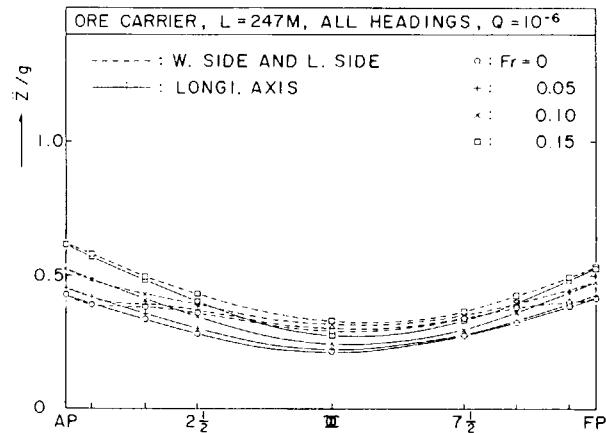


FIG. 4.5-18B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (ORE CARRIER)

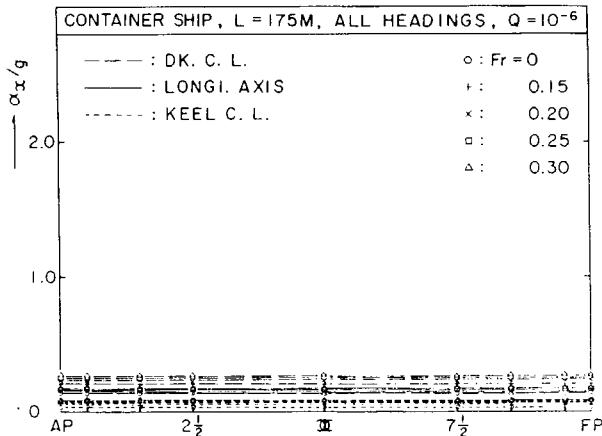


FIG. 4.5-18B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF AXIAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (CONTAINER SHIP)

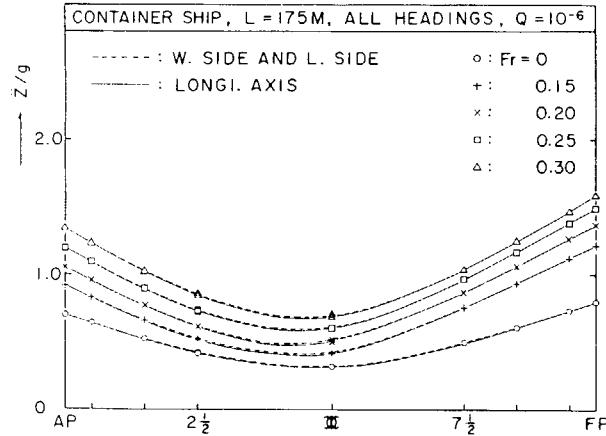


FIG. 4.5-19C LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF VERTICAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (CONTAINER SHIP)

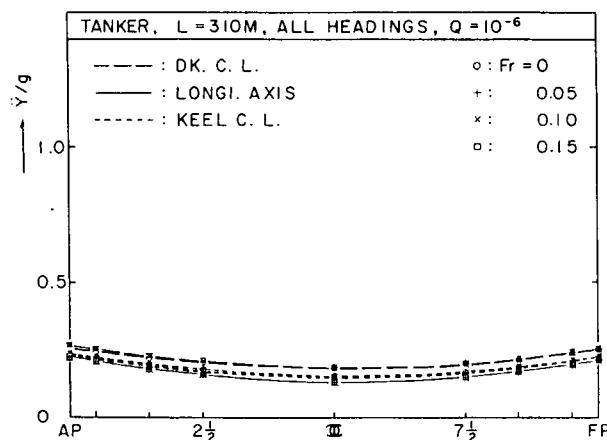


FIG. 4.5-20A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (TANKER)

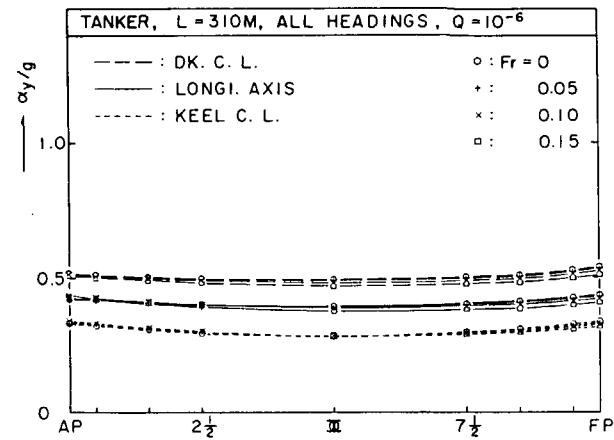


FIG. 4.5-21A LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF TRANSVERSE ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (TANKER)

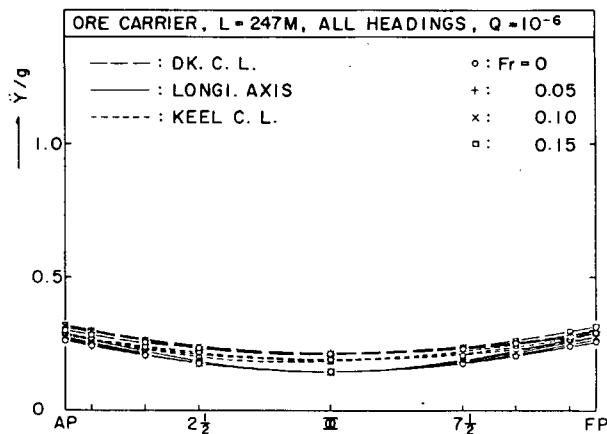


FIG. 4.5-20B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (ORE CARRIER)

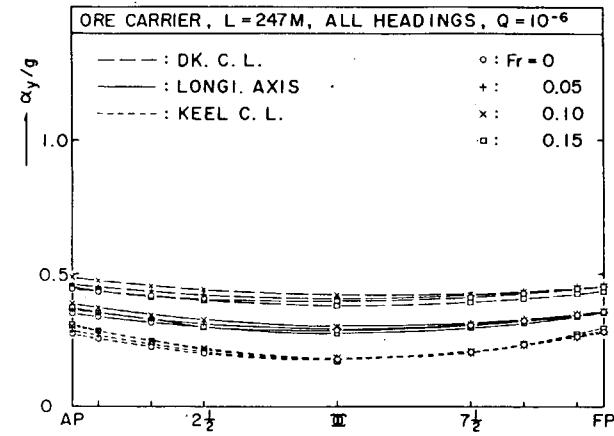


FIG. 4.5-21B LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF TRANSVERSE ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (ORE CARRIER)

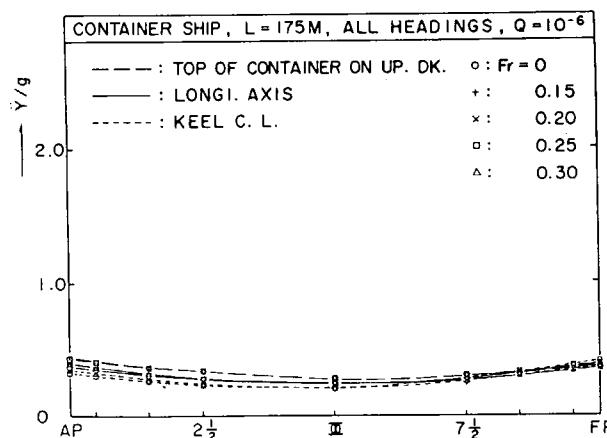


FIG. 4.5-20C LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF HORIZONTAL ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (CONTAINER SHIP)

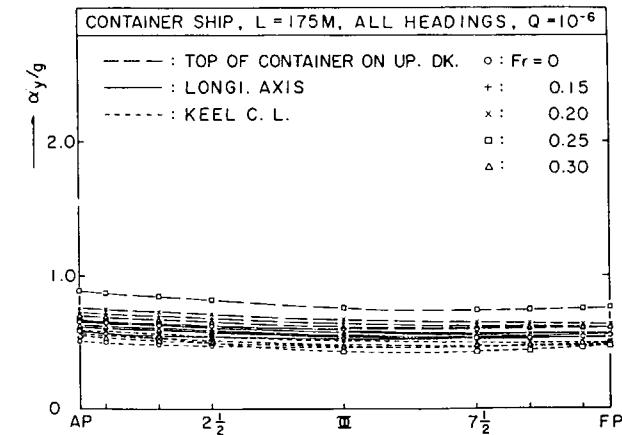


FIG. 4.5-21C LONGITUDINAL DISTRIBUTIONS OF TRANSVERSE ACCELERATION PREDICTED WITH THE EXCEEDING PROBABILITY OF 10^{-6} IN THE NORTH ATLANTIC OCEAN (CONTAINER SHIP)

附録 1 規則波中の船体運動計算式

規則波中の船の前後揺の運動方程式は 2.1において次式によって与えられている。

$$A_{11}\ddot{\xi} + A_{12}\dot{\xi} + A_{13}\xi = F_\xi \quad (2-14)$$

ただし、

$$A_{11} = W/g + \Delta M \doteq W/g \quad (W : \text{displacement})$$

ΔM_ξ : added mass for surge

$$A_{12} \doteq 0, \quad A_{13} = 0$$

$$\begin{matrix} F_{\xi c} \\ F_{\xi s} \end{matrix} \left. \right\} = h_0 \left\{ \begin{matrix} f_{\xi 1c} \\ f_{\xi 1s} \end{matrix} \right\}$$

$$\begin{matrix} f_{\xi 1c} \\ f_{\xi 1s} \end{matrix} \left. \right\} = \rho g k^* \int C_x \left\{ \begin{matrix} \sin(k^*x) \\ -\cos(k^*x) \end{matrix} \right\} dx$$

ここで、
 $k^* = k \cos \chi$

$$C_x = \frac{2}{k \sin \chi} \int_0^d e^{-kz} \sin(ky_s \sin \chi) dz$$

d : draught of the section

y_s : y-coordinate of the section contour

規則波中の船の上下揺と縦揺の運動方程式は 2.1においてつきの形で与えられている。

$$\begin{aligned} B_{11}\ddot{\zeta} + B_{12}\dot{\zeta} + B_{13}\zeta + B_{14}\ddot{\phi} + B_{15}\dot{\phi} + B_{16}\phi &= F_\zeta \\ B_{21}\ddot{\zeta} + B_{22}\dot{\zeta} + B_{23}\zeta + B_{24}\ddot{\phi} + B_{25}\dot{\phi} + B_{26}\phi &= M_\phi \end{aligned} \quad \left. \right\} (2-15)$$

ただし、

$$B_{11} = \frac{W}{g} + \int \rho s_z dx, \quad B_{12} = \int \rho N_z dx$$

$$B_{13} = 2\rho g \int Y_w dx, \quad B_{14} = - \int \rho s_z (x - x_G) dx$$

$$B_{15} = - \int \rho N_z (x - x_G) dx + V \int \rho s_z dx$$

$$B_{16} = -2\rho g \int Y_w (x - x_G) dx + VB_{12}$$

$$B_{21} = B_{14}, \quad B_{22} = - \int \rho N_z (x - x_G) dx - V \int \rho s_z dx$$

$$B_{23} = -2\rho g \int Y_w (x - x_G) dx$$

$$B_{24} = \frac{I_\phi}{g} + \int \rho s_z (x - x_G)^2 dx$$

$$B_{25} = \int \rho N_z (x - x_G) dx$$

$$B_{26} = 2\rho g \int Y_w (x - x_G)^2 dx + VB_{22}$$

$$\begin{aligned} F_{\zeta C} \\ F_{\zeta S} \end{aligned} \left. \right\} = h_O \left\{ \begin{array}{l} f_{\zeta 1C} + f_{\zeta 2C} + f_{\zeta 3C} \\ f_{\zeta 1S} + f_{\zeta 2S} + f_{\zeta 3S} \end{array} \right\}$$

$$\begin{aligned} M_{\phi C} \\ M_{\phi S} \end{aligned} \left. \right\} = h_O \left\{ \begin{array}{l} m_{\phi 1C} + m_{\phi 2C} + m_{\phi 3C} \\ m_{\phi 1S} + m_{\phi 2S} + m_{\phi 3S} \end{array} \right\}$$

次に、

$$\begin{aligned} f_{\zeta 1C} \\ f_{\zeta 1S} \end{aligned} \left. \right\} = 2\rho g \int C_1 C_2 Y_W \left\{ \begin{array}{l} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{array} \right\} dx$$

$$\begin{aligned} f_{\zeta 2C} \\ f_{\zeta 2S} \end{aligned} \left. \right\} = \omega \int C_1 C_2 \rho N_z \left\{ \begin{array}{l} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{array} \right\} dx$$

$$\begin{aligned} f_{\zeta 3C} \\ f_{\zeta 3S} \end{aligned} \left. \right\} = -\omega \omega_e \int C_1 C_2 \rho s_z \left\{ \begin{array}{l} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{array} \right\} dx$$

$$\begin{aligned} m_{\phi 1C} \\ m_{\phi 1S} \end{aligned} \left. \right\} = -2\rho g \int C_1 C_2 Y_W \left\{ \begin{array}{l} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{array} \right\} (x - x_G) dx$$

$$\begin{aligned} m_{\phi 2C} \\ m_{\phi 2S} \end{aligned} \left. \right\} = -\omega \int C_1 C_2 \rho N_z \left\{ \begin{array}{l} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{array} \right\} (x - x_G) dx$$

$$\begin{aligned} m_{\phi 3C} \\ m_{\phi 3S} \end{aligned} \left. \right\} = \omega \omega_e \int C_1 C_2 \rho s_z \left\{ \begin{array}{l} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{array} \right\} (x - x_G) dx$$

$$-\omega V \int C_1 C_2 \rho s_z \left\{ \begin{array}{l} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{array} \right\} dx$$

また、規則波中の船の左右揺、船首揺および横揺の運動方程式は 2.1においてつきの形で与えられている。

$$\left. \begin{aligned} c_{11}\ddot{\eta} + c_{12}\dot{\eta} + c_{13}\eta + c_{14}\ddot{\psi} + c_{15}\dot{\psi} + c_{16}\psi \\ + c_{17}\ddot{\theta} + c_{18}\dot{\theta} + c_{19}\theta = F_\eta \\ c_{21}\ddot{\eta} + c_{22}\dot{\eta} + c_{23}\eta + c_{24}\ddot{\psi} + c_{25}\dot{\psi} + c_{26}\psi \\ + c_{27}\ddot{\theta} + c_{28}\dot{\theta} + c_{29}\theta = M_\psi \\ c_{31}\ddot{\eta} + c_{32}\dot{\eta} + c_{33}\eta + c_{34}\ddot{\psi} + c_{35}\dot{\psi} + c_{36}\psi \\ + c_{37}\ddot{\theta} + c_{38}\dot{\theta} + c_{39}\theta = M_\theta \end{aligned} \right\} \quad (2-16)$$

ただし、

$$\begin{aligned} c_{11} &= \frac{W}{g} + \int \rho s_y dx, \quad c_{12} = \int \rho N_y dx \\ c_{13} &= 0, \quad c_{14} = \int \rho s_y (x - x_G) dx \\ c_{15} &= \int \rho N_y (x - x_G) dx - V \int \rho s_y dx \\ c_{16} &= -Vc_{12}, \quad c_{17} = \int \rho s_y (z_G - l_\eta) dx \\ c_{18} &= \int \rho N_y (z_G - l_w) dx, \quad c_{19} = 0 \\ c_{21} &= c_{14}, \quad c_{22} = \int \rho N_y (x - x_G) dx + V \int \rho s_y dx \\ c_{23} &= 0, \quad c_{24} = \frac{I_\psi}{g} + \int \rho s_y (x - x_G)^2 dx \\ c_{25} &= \int \rho N_y (x - x_G)^2 dx, \quad c_{26} = -Vc_{22} \\ c_{27} &= \int \rho s_y (z_G - l_\eta) (x - x_G) dx \\ c_{28} &= \int \rho N_y (z_G - l_\eta) (x - x_G) dx + Vc_{17} \\ c_{29} &= 0 \\ c_{31} &= c_{17}, \quad c_{32} = c_{18}, \quad c_{33} = 0, \quad c_{34} = c_{27} \\ c_{35} &= \int \rho N_y (z_G - l_\eta) (x - x_G) dx - Vc_{17}, \quad c_{36} = -Vc_{18} \\ c_{37} &= \frac{I_\theta}{g} \int \rho i dx + 2z_G c_{17} - z_G^2 \int \rho s_y dx \\ c_{38} &= c_{38w} + c_{38v} + c_{38v}, \quad c_{39} = Wm_t \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} c_{38w} &= \frac{1}{2} \int \rho N_y (z_G - l_w)^2 dx \\ c_{38v} &= \left(\frac{1}{2} N_{NH} + N_{BK} \right) \frac{2\theta_0}{\pi} B_{37} \omega e \\ c_{38v} &= \frac{V}{L} \left(\frac{d}{2} \right)^2 \int \rho s_y dx \end{aligned}$$

m_t : metacentric height of the ship

また、

$$\begin{aligned} F_{\eta c} \\ F_{\eta s} \end{aligned} = h_o \sin x \left\{ \begin{array}{l} f_{\eta 1c} + f_{\eta 2c} + f_{\eta 3c} \\ f_{\eta 1s} + f_{\eta 2s} + f_{\eta 3s} \end{array} \right\}$$

$$\begin{aligned} M_{\psi c} \\ M_{\psi s} \end{aligned} = h_o \sin x \left\{ \begin{array}{l} m_{\psi 1c} + m_{\psi 2c} + m_{\psi 3c} \\ m_{\psi 1s} + m_{\psi 2s} + m_{\psi 3s} \end{array} \right\}$$

$$\begin{aligned} M_{\theta c} \\ M_{\theta s} \end{aligned} = h_o \sin x \left\{ \begin{array}{l} m_{\theta 1c} + m_{\theta 2c} + m_{\theta 3c} \\ m_{\theta 1s} + m_{\theta 2s} + m_{\theta 3s} \end{array} \right\}$$

$$\begin{aligned} f_{\eta 1c} \\ f_{\eta 1s} \end{aligned} = \rho g \int s_y \left\{ \begin{array}{l} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{array} \right\} dx$$

$$\begin{aligned} f_{\eta 2c} \\ f_{\eta 2s} \end{aligned} = \omega \int C_3 \rho N_Y \left\{ \begin{array}{l} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{array} \right\} dx$$

$$\begin{aligned} f_{\eta 3c} \\ f_{\eta 3s} \end{aligned} = \omega \omega_e \int C_3 \rho s_y \left\{ \begin{array}{l} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{array} \right\} dx$$

$$\begin{aligned} m_{\psi 1c} \\ m_{\psi 1s} \end{aligned} = \rho g \int s_1 \left\{ \begin{array}{l} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{array} \right\} (x - x_G) dx$$

$$\begin{aligned} m_{\psi 2c} \\ m_{\psi 2s} \end{aligned} = \omega \int C_3 \rho N_Y \left\{ \begin{array}{l} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{array} \right\} (x - x_G) dx$$

$$\begin{aligned} m_{\psi 3c} \\ m_{\psi 3s} \end{aligned} = \omega \omega_e \int C_3 \rho s_y \left\{ \begin{array}{l} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{array} \right\} (x - x_G) dx$$

$$+ \omega V \int C_3 \rho s_y \left\{ \begin{array}{l} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{array} \right\} dx$$

$$\begin{aligned} m_{\theta 1c} \\ m_{\theta 1s} \end{aligned} = \rho g \int s_1 \left\{ \begin{array}{l} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{array} \right\} (z_G - l_1) dx$$

$$\begin{aligned} m_{\theta 2c} \\ m_{\theta 2s} \end{aligned} = \omega \int C_3 \rho N_Y \left\{ \begin{array}{l} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{array} \right\} (z_G - l_w) dx$$

$$\left. \begin{array}{l} m_{\theta 3c} \\ m_{\theta 3s} \end{array} \right\} = \omega \omega_e / C_{3\rho} s_y \left\{ \begin{array}{l} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{array} \right\} (z_G - l_n) dx$$

ただし、

$$s_1 = \frac{2}{\sin \chi} \int_0^d e^{-kz} s \sin(ky_s \sin \chi) dz_s$$

$$C_3 = e^{-kd/2}$$

なお、上記の各式における積分範囲は船の後端より前端までである。

附録 2 規則波中の船体横断面に働く変動荷重計算式

2.4において説明したように、規則波中の船体横断面に働く変動荷重は船体運動の解を用いて(2-38)のような形で求められるが、(2-38)の各式はつきのような形で表わされる。

$$\left. \begin{aligned}
 F_A &= F_{AO} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{FA}) \\
 &= F_{AC} \cos \omega_e t + F_{AS} \sin \omega_e t \\
 F_V &= F_{VO} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{FV}) \\
 &= F_{VC} \cos \omega_e t + F_{VS} \sin \omega_e t \\
 M_V &= M_{VO} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{MV}) \\
 &= M_{VC} \cos \omega_e t + M_{VS} \sin \omega_e t \\
 F_H &= F_{HO} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{FH}) \\
 &= F_{HC} \cos \omega_e t + F_{HS} \sin \omega_e t \\
 M_H &= M_{HO} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{MH}) \\
 &= M_{HC} \cos \omega_e t + M_{HS} \sin \omega_e t \\
 M_T &= M_{TO} \cos(\omega_e t - \varepsilon_{MT}) \\
 &= M_{TC} \cos \omega_e t + M_{TS} \sin \omega_e t
 \end{aligned} \right\} \quad (A-1)$$

上記の各式はつきのようにして計算される。

a) 波浪軸力

$$\left. \begin{aligned}
 F_{AC} \\
 F_{AS}
 \end{aligned} \right\} = -\omega_e^2 a_{11} \begin{Bmatrix} \xi_C \\ \xi_s \end{Bmatrix} + a_{12} \begin{Bmatrix} \zeta_C \\ \zeta_s \end{Bmatrix} + a_{13} \begin{Bmatrix} \phi_C \\ \phi_s \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{AwC} \\ F_{AwS} \end{Bmatrix} \quad (A-2)$$

$$a_{11} = -\frac{1}{g} \int w dx$$

$$a_{12} = \rho g (s_x)_{x=x_1}$$

$$a_{13} = \rho g \left\{ \int s_x dx - (s_x)_{x=x_1} (x_1 - x_G) - \frac{1}{\rho g} \int w dx \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 F_{AwC} \\
 F_{AwS}
 \end{aligned} \right\} = h_o \begin{Bmatrix} P_{A1C} + P_{A2C} \\ P_{A1S} + P_{A2S} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} P_{A1c} \\ P_{A1s} \end{array} \right\} &= -\rho g k^* \int C_x \begin{Bmatrix} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{Bmatrix} dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} P_{A2c} \\ P_{A2s} \end{array} \right\} &= -\rho g (C_x)_{x=x_1} \begin{Bmatrix} \cos k^* x_1 \\ \sin k^* x_1 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

b) 垂直波浪剪断力

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} F_{Vc} \\ F_{Vs} \end{array} \right\} &= -\omega_e^2 b_{11} \begin{Bmatrix} \zeta_c \\ \zeta_s \end{Bmatrix} + \omega_e b_{12} \begin{Bmatrix} \zeta_s \\ \zeta_c \end{Bmatrix} + b_{13} \begin{Bmatrix} \zeta_c \\ \zeta_s \end{Bmatrix} \\ &\quad -\omega_e^2 b_{14} \begin{Bmatrix} \phi_c \\ \phi_s \end{Bmatrix} + \omega_e b_{15} \begin{Bmatrix} \phi_s \\ -\phi_c \end{Bmatrix} + b_{16} \begin{Bmatrix} \phi_c \\ \phi_s \end{Bmatrix} \\ &\quad + \begin{Bmatrix} F_{Vwc} \\ F_{Vws} \end{Bmatrix} \end{aligned} \tag{A-3}$$

$$b_{11} = - \int \frac{w}{g} dx - \int \rho s_z dx$$

$$b_{12} = - \int \rho N_z dx + V(\rho s_z)_{x=x_1}$$

$$b_{13} = -2\rho g \int Y_w dx$$

$$b_{14} = \int \frac{w}{g}(x-x_G) dx + \int \rho s_z(x-x_G) dx$$

$$b_{15} = \int \rho N_z(x-x_G) dx - V(\rho s_z)_{x=x_1}(x_1-x_G) - V \int \rho s_z dx$$

$$b_{16} = 2\rho g \int Y_w(x-x_G) dx + V b_{12}$$

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} F_{Vwc} \\ F_{Vws} \end{array} \right\} &= h_o \begin{Bmatrix} P_{V1c} + P_{V2c} + P_{V3c} \\ P_{V1s} + P_{V2s} + P_{V3s} \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} P_{V1c} \\ P_{V1s} \end{array} \right\} &= 2\rho g \int C_1 C_2 Y_w \begin{Bmatrix} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{Bmatrix} dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} P_{V2c} \\ P_{V2s} \end{array} \right\} &= \omega \int C_1 C_2 \rho N_z \begin{Bmatrix} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{Bmatrix} dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{P_{V3C}}{P_{V3S}} \right\} &= -\omega \omega_e \int C_1 C_2 \rho s_z \begin{Bmatrix} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{Bmatrix} dx \\ &- \omega V (C_1 C_2 \rho s_z)_{x=x_1} \begin{Bmatrix} \sin k^* x_1 \\ -\cos k^* x_1 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

c) 垂直波浪曲げモーメント

$$\begin{aligned} \left. \frac{M_{Vc}}{M_{Vs}} \right\} &= -\omega_e^2 b_{21} \begin{Bmatrix} \zeta_c \\ \zeta_s \end{Bmatrix} + \omega_e b_{22} \begin{Bmatrix} \zeta_s \\ -\zeta_c \end{Bmatrix} + b_{23} \begin{Bmatrix} \zeta_c \\ \zeta_s \end{Bmatrix} \\ &- \omega_e^2 b_{24} \begin{Bmatrix} \phi_c \\ \phi_s \end{Bmatrix} + \omega_e b_{25} \begin{Bmatrix} \phi_s \\ -\phi_c \end{Bmatrix} + b_{26} \begin{Bmatrix} \phi_c \\ \phi_s \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{Bmatrix} M_{Vwc} \\ M_{Vws} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (A-4)$$

$$b_{21} = \int \frac{w}{g} (x-x_1) dx + \int \rho s_z (x-x_1) dx$$

$$b_{22} = \int \rho N_z (x-x_1) dx + V \int \rho s_z dx$$

$$b_{23} = 2\rho g \int y_w (x-x_1) dx$$

$$b_{24} = - \int \frac{w}{g} (x-x_G) (x-x_1) dx - \int \rho s_z (x-x_G) (x-x_1) dx$$

$$b_{25} = - \int \rho N_z (x-x_G) (x-x_1) dx - V(x_1-x_G) \int \rho s_z dx$$

$$b_{26} = -2\rho g \int y_w (x-x_G) (x-x_1) dx + V b_{22}$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{M_{Vwc}}{M_{Vws}} \right\} &= h_o \begin{Bmatrix} Q_{V1c} + Q_{V2c} + Q_{V3c} \\ Q_{V1s} + Q_{V2s} + Q_{V3s} \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{Q_{V1c}}{Q_{V1s}} \right\} &= -2\rho g \int C_1 C_2 y_w \begin{Bmatrix} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{Bmatrix} (x-x_1) dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{Q_{V2c}}{Q_{V2s}} \right\} &= -\omega \int C_1 C_2 \rho N_z \begin{Bmatrix} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{Bmatrix} (x-x_1) dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} Q_{V3C} \\ Q_{V3S} \end{array} \right\} &= \omega \omega_e \int C_1 C_2 \rho s_z \begin{Bmatrix} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{Bmatrix} (x - x_1) dx \\ &\quad - \omega V \int C_1 C_2 \rho s_z \begin{Bmatrix} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{Bmatrix} dx \end{aligned}$$

d) 水平波浪剪断力

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} F_{HC} \\ F_{HS} \end{array} \right\} &= -\omega_e^2 c_{11} \begin{Bmatrix} \eta_C \\ \eta_S \end{Bmatrix} + \omega_e c_{12} \begin{Bmatrix} \eta_S \\ -\eta_C \end{Bmatrix} + c_{13} \begin{Bmatrix} \eta_C \\ \eta_S \end{Bmatrix} \\ &\quad -\omega_e^2 c_{14} \begin{Bmatrix} \psi_C \\ \psi_S \end{Bmatrix} + \omega_e c_{15} \begin{Bmatrix} \psi_S \\ -\psi_C \end{Bmatrix} + c_{16} \begin{Bmatrix} \psi_C \\ \psi_S \end{Bmatrix} \\ &\quad -\omega_e^2 c_{17} \begin{Bmatrix} \theta_C \\ \theta_S \end{Bmatrix} + \omega_e c_{18} \begin{Bmatrix} \theta_S \\ -\theta_C \end{Bmatrix} + c_{19} \begin{Bmatrix} \theta_C \\ \theta_S \end{Bmatrix} \\ &\quad + \begin{Bmatrix} F_{HwC} \\ F_{Hws} \end{Bmatrix} \end{aligned} \tag{A-5}$$

$$c_{11} = - \int \frac{w}{g} dx - \int \rho s_y dx$$

$$c_{12} = - \int \rho N_Y dx + V(\rho s_y)_{x=x_1}, \quad c_{13} = 0$$

$$c_{14} = - \int \frac{w}{g} (x - x_G) dx - \int \rho s_y (x - x_G) dx$$

$$c_{15} = - \int \rho N_Y (x - x_G) dx + V(\rho s_y)_{x=x_1} (x_1 - x_G) + V \int \rho s_y dx$$

$$c_{16} = -V c_{12}$$

$$c_{17} = - \int \frac{w}{g} (z_G - z'_G) dx - \int \rho s_y (z_G - l_\eta) dx$$

$$c_{18} = - \int \rho N_Y (z_G - l_w) dx + V \rho s_y (z_G - l_\eta)_{x=x_1}$$

$$c_{19} = 0$$

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} F_{HwC} \\ F_{Hws} \end{array} \right\} &= h_o \sin \chi \begin{Bmatrix} P_{H1C} + P_{H2C} + P_{H3C} \\ P_{H1S} + P_{H2S} + P_{H3S} \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} P_{H1C} \\ P_{H1S} \end{array} \right\} &= \rho g \int s_1 \begin{Bmatrix} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{Bmatrix} dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} P_{H2C} \\ P_{H2S} \end{array} \right\} &= \omega \int C_3 \rho N_Y \left\{ \begin{array}{l} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{array} \right\} dx \\ \left. \begin{array}{l} P_{H3C} \\ P_{H3S} \end{array} \right\} &= \omega \omega_e \int C_3 \rho s_Y \left\{ \begin{array}{l} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{array} \right\} dx \\ &\quad - \omega V (C_3 \rho s_Y) \Big|_{x=x_1} \left\{ \begin{array}{l} \cos k^* x_1 \\ \sin k^* x_1 \end{array} \right\} \end{aligned}$$

e) 水平波浪曲げモーメント

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} M_{HC} \\ M_{HS} \end{array} \right\} &= -\omega_e^2 c_{21} \left\{ \begin{array}{l} \eta_C \\ \eta_S \end{array} \right\} + \omega_e c_{22} \left\{ \begin{array}{l} \eta_S \\ -\eta_C \end{array} \right\} + c_{23} \left\{ \begin{array}{l} \eta_C \\ \eta_S \end{array} \right\} \\ &\quad -\omega_e^2 c_{24} \left\{ \begin{array}{l} \psi_C \\ \psi_S \end{array} \right\} + \omega_e c_{25} \left\{ \begin{array}{l} \psi_S \\ -\psi_C \end{array} \right\} + c_{26} \left\{ \begin{array}{l} \psi_C \\ \psi_S \end{array} \right\} \\ &\quad -\omega_e^2 c_{27} \left\{ \begin{array}{l} \theta_C \\ \theta_S \end{array} \right\} + \omega_e c_{28} \left\{ \begin{array}{l} \theta_S \\ -\theta_C \end{array} \right\} + c_{29} \left\{ \begin{array}{l} \theta_C \\ \theta_S \end{array} \right\} \\ &\quad + \left\{ \begin{array}{l} M_{HWC} \\ M_{HWS} \end{array} \right\} \end{aligned} \tag{A-6}$$

$$c_{21} = - \int \frac{w}{g} (x-x_1) dx - \int \rho s_Y (x-x_1) dx$$

$$c_{22} = - \int \rho N_Y (x-x_1) dx - V \int \rho s_Y dx, \quad c_{23} = 0$$

$$c_{24} = - \int \frac{w}{g} (x-x_G) (x-x_1) dx - \int \rho s_Y (x-x_G) (x-x_1) dx$$

$$c_{25} = - \int \rho N_Y (x-x_G) (x-x_1) dx - V (x_1-x_G) \int \rho s_Y dx$$

$$c_{26} = V c_{22}$$

$$c_{27} = - \int \frac{w}{g} (z_G - z'_G) (x-x_1) dx - \int \rho s_Y (z_G - l_\eta) (x-x_1) dx$$

$$c_{28} = - \int \rho N_Y (x_G - l_w) (x-x_1) dx - V \int \rho s_Y (x_G - l_\eta) dx$$

$$c_{29} = 0$$

$$\begin{aligned} \left. \begin{array}{l} M_{HWC} \\ M_{HWS} \end{array} \right\} &= h_o \sin \chi \left\{ \begin{array}{l} Q_{H1C} + Q_{H2C} + Q_{H3C} \\ Q_{H1S} + Q_{H2S} + Q_{H3S} \end{array} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \left. \begin{aligned} Q_{H1C} \\ Q_{H1S} \end{aligned} \right\} &= \rho g \int s_1 \begin{Bmatrix} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{Bmatrix} (x-x_1) dx \\
 \left. \begin{aligned} Q_{H2C} \\ Q_{H2S} \end{aligned} \right\} &= \omega \int C_3 \rho N_Y \begin{Bmatrix} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{Bmatrix} (x-x_1) dx \\
 \left. \begin{aligned} Q_{H3C} \\ Q_{H3S} \end{aligned} \right\} &= \omega \omega_e \int C_3 \rho s_Y \begin{Bmatrix} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{Bmatrix} (x-x_1) dx \\
 &\quad + \omega V \int C_3 \rho s_Y \begin{Bmatrix} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{Bmatrix} dx
 \end{aligned}$$

f) 波浪振りモーメント

$$\begin{aligned}
 \left. \begin{aligned} M_{TC} \\ M_{TS} \end{aligned} \right\} &= -\omega_e^2 c_{31} \begin{Bmatrix} \eta_C \\ \eta_S \end{Bmatrix} + \omega_e c_{32} \begin{Bmatrix} \eta_S \\ -\eta_C \end{Bmatrix} + c_{33} \begin{Bmatrix} \eta_C \\ \eta_S \end{Bmatrix} \\
 &\quad -\omega_e^2 c_{34} \begin{Bmatrix} \psi_C \\ \psi_S \end{Bmatrix} + \omega_e c_{35} \begin{Bmatrix} \psi_S \\ -\psi_C \end{Bmatrix} + c_{36} \begin{Bmatrix} \psi_C \\ \psi_S \end{Bmatrix} \\
 &\quad -\omega_e^2 c_{37} \begin{Bmatrix} \theta_C \\ \theta_S \end{Bmatrix} + \omega_e c_{38} \begin{Bmatrix} \theta_S \\ -\theta_C \end{Bmatrix} + c_{39} \begin{Bmatrix} \theta_C \\ \theta_S \end{Bmatrix} \\
 &\quad + \begin{Bmatrix} M_{TWC} \\ M_{TWS} \end{Bmatrix} \tag{A-7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c_{31} &= - \int \rho s_Y (z_G - l_\eta) dx, \quad c_{32} = c_{18} \\
 c_{33} &= 0, \quad c_{34} = - \int \rho s_Y (x-x_G) (z_G - l_\eta) dx \\
 c_{35} &= - \int \rho N_Y (x-x_G) (z_G - l_w) dx \\
 &\quad + V \int \rho s_Y (z_G - l_\eta) dx + V \{ \rho s_Y (z_G - l_\eta) \}_{x=x_1} (x_1 - x_G) \\
 c_{36} &= -V c_{18} \\
 c_{37} &= - \int \frac{i}{g} \theta dx - \int \rho s_Y (l_\eta l_\theta - 2l_\eta z_G + z_G^2) dx \\
 c_{38} &= -\frac{1}{2} \int \rho N_Y (z_G - l_w)^2 dx \\
 &\quad + V \{ \rho s_Y (l_\eta l_\theta - 2l_\eta z_G + z_G^2) \}_{x=x_1} \\
 &\quad + \int c'_{38} v dx + \frac{V}{L} \left(\frac{d}{2} \right)^2 \int \rho s_Y dx
 \end{aligned}$$

$$C_{39} = \int w(z_G - z'_G) dx - \rho g \int s'm't dx$$

$$\begin{matrix} M_{TWC} \\ M_{TWS} \end{matrix} \left\} = h_O \sin \chi \left\{ \begin{matrix} R_{T1C} + R_{T2C} + R_{T3C} \\ R_{T1S} + R_{T2S} + R_{T3S} \end{matrix} \right\}$$

$$\begin{matrix} R_{T1C} \\ R_{T1S} \end{matrix} \left\} = \rho g \int s_1 \left\{ \begin{matrix} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{matrix} \right\} (z_G - l_1) dx$$

$$\begin{matrix} R_{T2C} \\ R_{T2S} \end{matrix} \left\} = \omega \int C_3 \rho N_Y \left\{ \begin{matrix} \cos k^* x \\ \sin k^* x \end{matrix} \right\} (z_G - l_w) dx$$

$$\begin{matrix} R_{T3C} \\ R_{T3S} \end{matrix} \left\} = \omega \omega_e \int C_3 \rho s_Y \left\{ \begin{matrix} \sin k^* x \\ -\cos k^* x \end{matrix} \right\} (z_G - l_n) dx$$

$$-\omega V(C_3 \rho s_Y)_{x=x_1} \left\{ \begin{matrix} \cos k^* x_1 \\ \sin k^* x_1 \end{matrix} \right\} (z_G - l_n)_{x=x_1}$$

ただし、

C_{38}' : (2.16)における $C_{38}v$ の船長方向分布を表わす関数であって、 $C_{38}v$ の成分の中で裸船の N_{NH} の船長方向分布は水線下の横断面積に比例するとし、ビルジキールによる N_{BK} の船長方向分布はビルジキールの範囲に一様であるとする。

なお、上記の各式における積分範囲は船の後端より考へている断面位置 x_1 までである。