

Title	船体のラッキング現象に関する研究
Author(s)	服部, 陽一
Citation	大阪大学, 1987, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/1008">https://hdl.handle.net/11094/1008</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

# 船体のラッキング現象に関する研究

昭和61年12月

服部陽一

# 船体のラッキング現象に関する研究

昭和61年12月

服部陽一

# 船体のラッキング現象に関する研究

## 目 次

第1章 緒論	1
第2章 基礎理論	4
2・1 はじめに	4
2・2 ラッキング変形を生ぜしめる荷重成分	5
2・2・1 荷重の分割	5
2・2・2 実船におけるラッキング荷重	9
(1) 水圧によるラッキング荷重	11
(2) 慣性力によるラッキング荷重	13
2・3 理論解析	18
2・3・1 解析モデル	18
2・3・2 箱形梁に対する梁理論を用いたラッキング変形解析	20
(1) 仮定	20
(2) 力の平衡条件	21
(3) 曲げ変形の基礎式	21
(4) 曲げ歪の連続条件	21
(5) 剪断変形の基礎式	21
(6) 横桁リングのバネ定数	22
(7) 変形量の決定	22
2・4 実験による検証	33
2・4・1 実験の概要	33
2・4・2 実験結果と計算結果の比較	36

2・5	有限要素法による検証	42
2・6	考察	48
第3章	自動車船のラッキング変形	51
3・1	はじめに	51
3・2	自動車船の構造的特色	52
3・3	理論の拡張	54
3・3・1	下層甲板の荷重の分担率	54
3・3・2	ラッキング変形解析	61
(1)	横隔壁が存在せず横桁リングが存在する場合	61
(2)	横隔壁及び横桁リングが共に存在する場合	77
(3)	分布荷重を受ける箱形梁のラッキング変形	84
3・4	供試船への適用	85
3・4・1	計算条件	85
3・4・2	船体運動	87
3・4・3	規則波におけるラッキング変形量	87
3・4・4	ラッキング変形量の長期予測	103
(1)	長期予測値の計算法	103
(2)	ラッキング変形量の長期予測値	105
3・5	考察	112
第4章	結言	113
	謝辞	115
	参考文献	116

## 第1章 緒 論

近年輸出用自動車を大量に輸送するいわゆる自動車船が出現した。これら自動車船では、ドライバーが自動車を陸上から直接船倉内所定位置まで搬入するロールオン・ロールオフ方式を採用しているため、従来の船舶に比して著しく横隔壁の少ない構造になっている。従来横隔壁は万一船底や船側が損傷して浸水した場合でもその浸水の範囲を限定し、船の全損を免れるために配置されていたのであるが、この横隔壁は強度上は船体の節としての役割を担う重要な部材である。

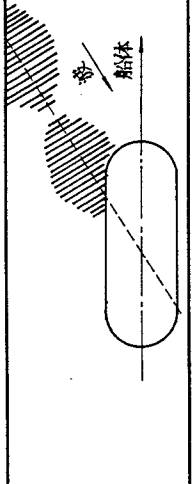
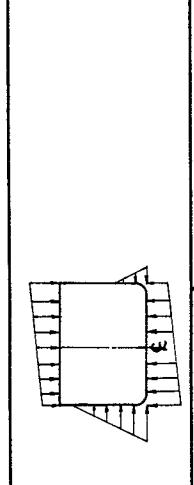
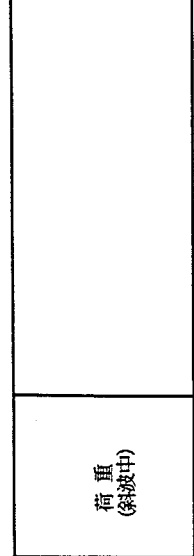
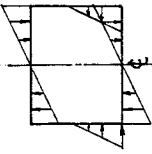
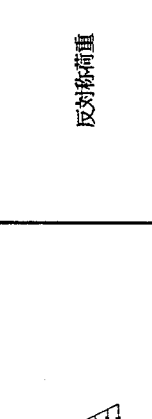
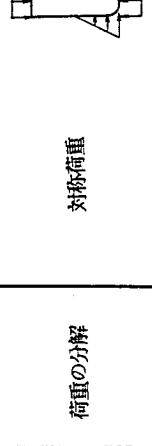
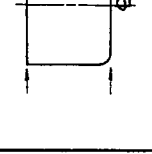
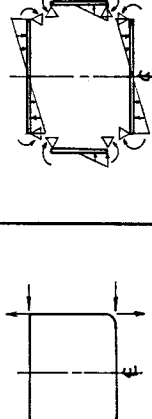
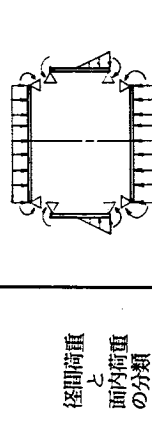
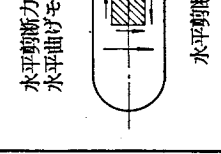
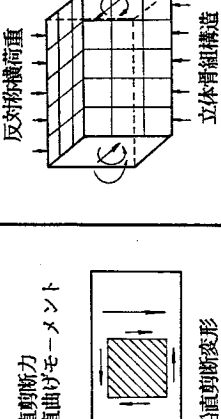
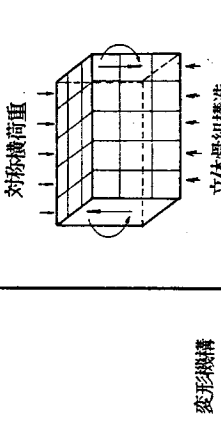





ここで船体に働く荷重と変形モードについて考えてみる。

一般に船体に加わる外力はまず分布荷重として小パネルに作用し、小パネルからこれを支持する小骨に、さらに小骨から大骨に伝達される。大骨の荷重はこれを支持する縦横隔壁を介して、あるいは直接外板及び甲板等の板構造に面内荷重として伝達される。最終的に外板及び甲板等に伝達された面内荷重は船体全体の剪断-曲げ変形、捩れ変形及びラッキング変形を生じさせる。これらの荷重と変形の間関係を整理するとTable 1・1のようになる。ここでラッキング変形とは横断面を菱形に変形させるものであって、その荷重成分は横断面に働く反対称の荷重成分から捩れ変形を生ぜしめる荷重成分を差し引いたものになる。

これらの全体変形のうちラッキング変形についてこれまであまり研究が行われていなかったのは、在来船では区画浸水の方から適当な間隔で横隔壁が配置されていたのでラッキング変形が問題になることがなかったためであろう。

自動車船にあっては前述の如く船の使用上の便宜から横隔壁の数を減らしたためその初期にはラッキング変形に起因する横部材の亀裂発生など損傷が散見された。

Table 1.1 荷重成分と船体の変形機構

荷重 (斜波中)			
荷重の分解	<p>対称荷重</p> 	<p>反対称荷重</p> 	
径間荷重 と 面内荷重 の分類	<p>大骨の支持反力による 面内荷重で横断面を 鉛直方向に移動させる</p> 	<p>大骨の支持反力：甲板・船底 外板に同方向に作用する面内 荷重で横断面を水平方向に移動</p> 	<p>大骨の支持反力による 面内荷重のうち横断面を 回転させる荷重成分</p> 
変形機構	<p>対称横荷重</p>  <p>立体骨組構造 (梁要素 小パネル)</p>	<p>反対称横荷重</p>  <p>立体骨組構造 (梁要素 小パネル)</p>	<p>ラッキング荷重</p> 
強度	<p>対称荷重</p> <p>鉛直剪断力 鉛直曲げモーメント</p>  <p>鉛直剪断変形</p>  <p>鉛直曲げ変形</p>	<p>反対称荷重</p> <p>水平剪断力 水平曲げモーメント</p>  <p>水平剪断変形</p>  <p>水平曲げ変形</p>	<p>ラッキング変形</p> 
対象船	<p>対称荷重</p> <p>縦強度</p> <p>全 船</p>	<p>反対称荷重</p> <p>横強度</p> <p>全 船</p>	<p>ラッキング強度</p> <p>ローレル・ローレル船等の 横隔壁が少なく剛性小の船</p>

本研究は以上のような背景のもとにラッキング変形の発生機構を明らかにするために行われたものである。

まず第2章ではラッキング変形に関する基礎理論を展開した。即ちラッキング変形を生ぜしめる荷重成分について述べ、次に横桁リングや横隔壁を有する箱形梁がそのような荷重を受けたときのラッキング変形の基礎式を導き、その解析解を求めた。また実験や有限要素法による計算結果との比較を行い、本理論の妥当性を確認した。

第3章では第2章で導いた基礎理論を多層甲板を有する自動車船に拡張し、供試船について試算を行った。即ち規則波中での船体運動からラッキング変形量を求め、さらに長期予測も行った。その結果いくつかの知見が得られた。また設計上の指針についても述べた。

第4章では本研究の結果をまとめて記述した。



## 第2章 基礎理論

### 2・1 はじめに

本章では長方形断面を有する箱形梁についてラッキング変形の基礎理論を展開する。

まずラッキング変形を生ぜしめる荷重について2・2で検討する。この場合船体横断面に作用する荷重を対称成分と反対称成分に分け、さらに反対称成分から捩れ変形を生ぜしめる荷重を差し引くことによってラッキング荷重を求める。また実船においてはこのラッキング荷重は船体運動から来るのでそれについても検討する。

次に2・3では2・2で導いたラッキング荷重を箱形梁に加えたときの変形解析を梁理論を用いて行う。この場合甲板あるいは船底外板と船側外板との取合部で曲げ歪を連続ならしめるような剪断流が作用するものと仮定する。

このようにして求めたラッキング変形の理論解の妥当性を確認するため有限要素法による解や実験との比較も行う。

## 2・2 ラッキング変形を生ぜしめる荷重成分

### 2・2・1 荷重の分解

ある時刻において船体に加わる外力に慣性力も含めて考えると、その合力は必ず0になる。従って外力（以下慣性力も外力の一種と考える）が加わった状態での船体の構造応答を求めるには、まず船体を例えば両端で支持し、これに外力を適当に分解して加え、それぞれの構造応答を求め、最後にそれらを重ね合せればよい。

いま船体にFig. 2・2・1 (a) のような外力が加わっているとす。構造は上下対称とし、任意の横断面の外力分布が同図 (b) の如くであるとすると、これにより各板材には同図 (c) の如き面内荷重が働く。(d) の面内荷重によってはラッキング変形は起らないので (e) の反対称荷重成分のみを考えればよい。さらに (e) の反対称荷重は (f) の如き捩れ変形を生ぜしめる荷重成分と (g) の如きラッキング変形を生ぜしめる荷重成分に分けることができる。以下に同図 (c) の  $H_1$  ,  $H_2$  ,  $V_1$  及び  $V_2$  から (g) のラッキング変形を生ぜしめる荷重成分  $P_1$  及び  $P_2$  を求めることとする。

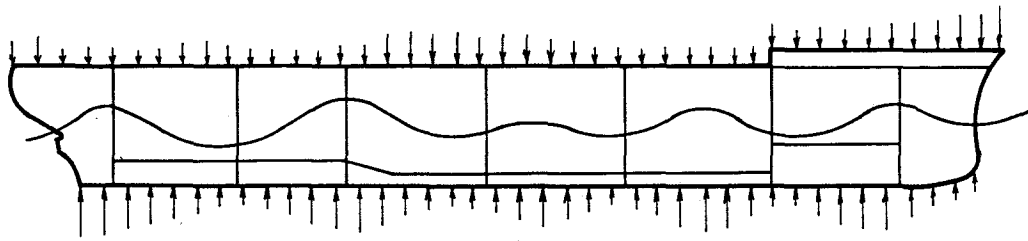
Fig. 2・2・1 (f) と (g) を重ね合せたものが (e) に等しいので次式が成立する。

$$R + P_1 = H \quad \dots (2.2.1)$$

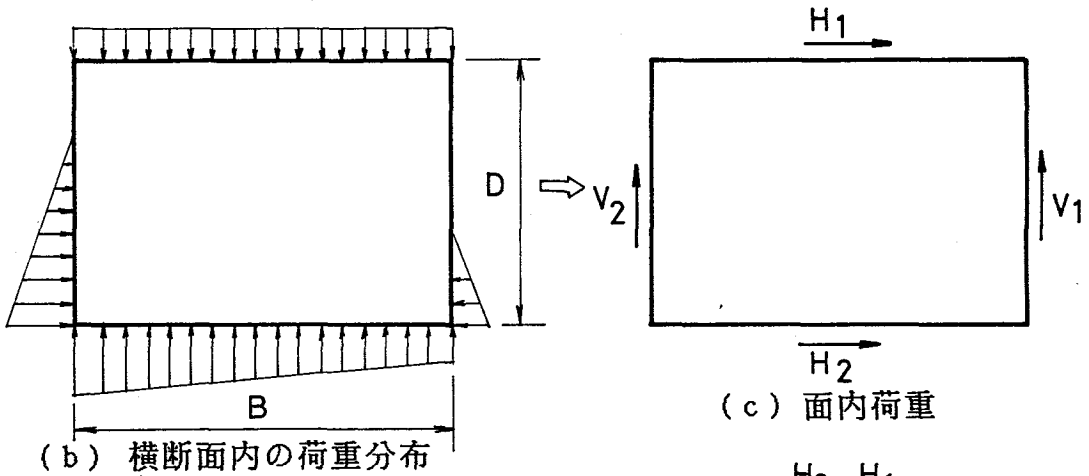
$$P_2 - S = V \quad \dots (2.2.2)$$

ここに、同図 (e) より

$$H = \frac{H_2 - H_1}{2} \quad \dots (2.2.3)$$

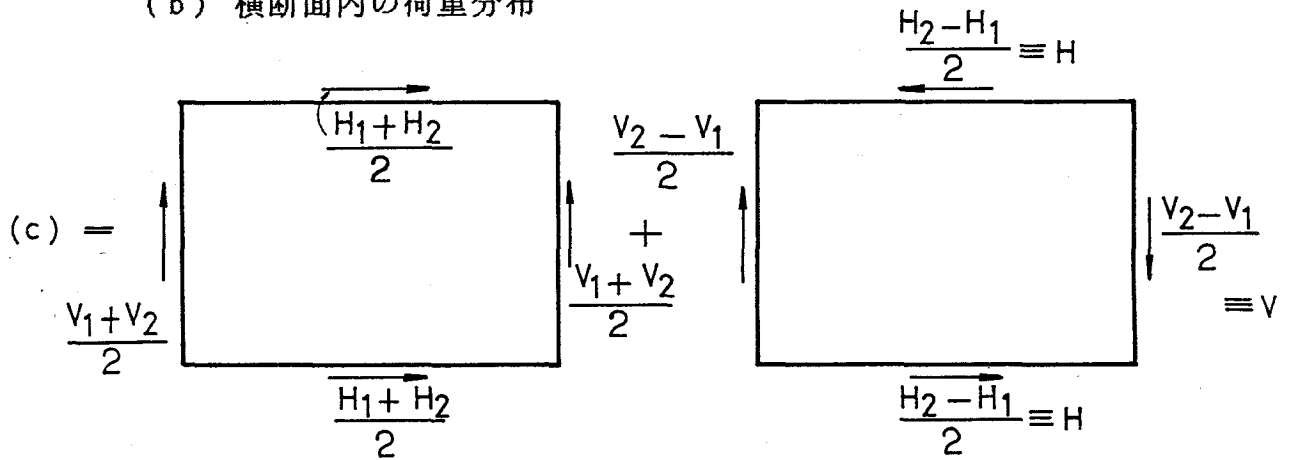


(a) 船体に加わる外力



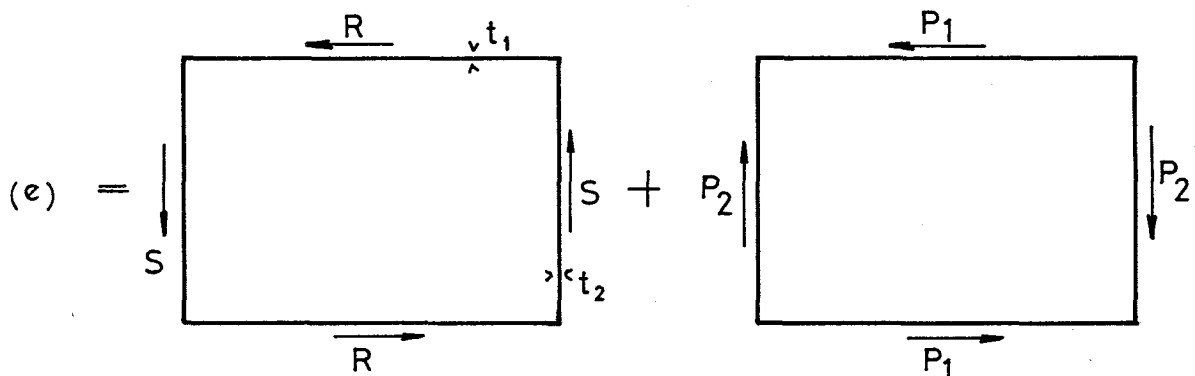
(b) 横断面内の荷重分布

(c) 面内荷重



(d) 対称荷重成分

(e) 反対称荷重成分



(f) 捩れ変形を生ぜしめる荷重成分

(g) ラッキング変形を生ぜしめる荷重成分

Fig. 2・2・1 船体に作用する荷重の分解

$$V = \frac{V_2 - V_1}{2} \quad \dots (2.2.4)$$

Fig. 2・2・1 (f) において剪断流の連続条件より次式が成立する。

$$\frac{R}{B} = \frac{S}{D} \quad \dots (2.2.5)$$

また、Fig. 2・2・1 (f) の振り角を  $\omega$  とすると次式が成立する。

$$\frac{R}{t_1} + \frac{S}{t_2} = BDG\omega \quad \dots (2.2.6)$$

一方、Fig. 2・2・1 (g) のラッキング変形の場合は水平力によるモーメントと垂直力によるモーメントは等しい。従って次式が成立する。

$$P_1 D = P_2 B \quad \dots (2.2.7)$$

H 及び V を既知数と考えると (2・2・1), (2・2・2), (2・2・5) 及び (2・2・7) より  $P_1$  及び  $P_2$  を求めることができる。即ち (2・2・5) より

$$S = \frac{D}{B} R$$

これを (2・2・2) に代入し

$$P_2 - \frac{D}{B} R = V$$

この式と (2・2・1) より R を消去すると次式が得られる。

$$P_2 + \frac{D}{B} P_1 = \frac{D}{B} H + V$$

この式と (2.2.7) より  $P_2$  を消去して

$$2\frac{D}{B}P_1 = \frac{D}{B}H + V$$

$$\therefore P_1 = \frac{1}{2}H + \frac{B}{2D}V \quad \dots (2.2.8)$$

(2.2.7) より

$$P_2 = \frac{D}{2B}H + \frac{1}{2}V \quad \dots (2.2.9)$$

## 2・2・2 実船におけるラッキング荷重

前項までで一つの横断面内でラッキングを生ずる荷重成分について考察したので、ここでは実船におけるラッキング荷重について検討する。

Fig. 2・2・2に示すように静水面をXY-平面に一致させた空間固定座標系O-XYZと船体固定座標系o-xyzとを考える。船の進行方向に対して $\chi$ の角度で進む正弦波は(2・2・10)で表される。

$$\begin{aligned} h &= h_0 \cos(kX - \omega t) \\ &= h_0 \cos(kx \cos \chi - ky \sin \chi - \omega_e t) \end{aligned} \quad \dots (2.2.10)$$

ここに、

$h_0$  : 波振幅

$k = \frac{\omega^2}{g} = \frac{2\pi}{\lambda}$  : 波数

$\lambda$  : 波長

$g$  : 重力加速度

$\chi$  : 波向角

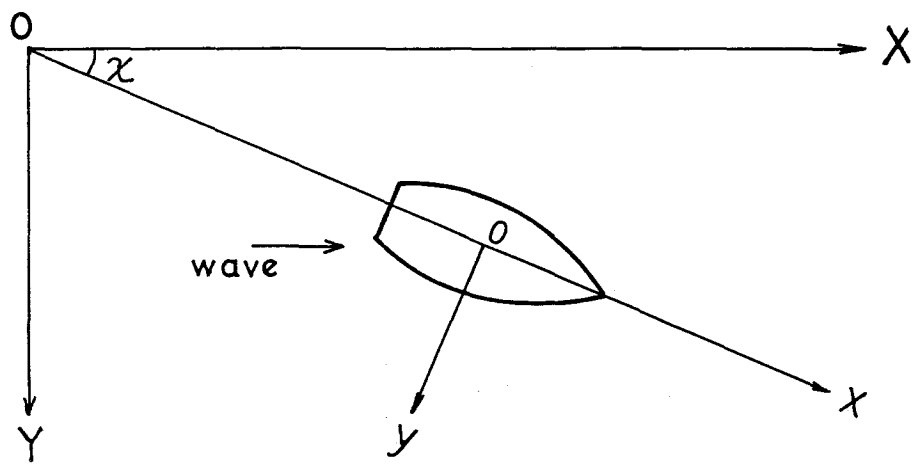
$\omega$  : 波の円周波数

$\omega_e = \omega - KV \cos \chi$  : 船と波の出会いの円周波数

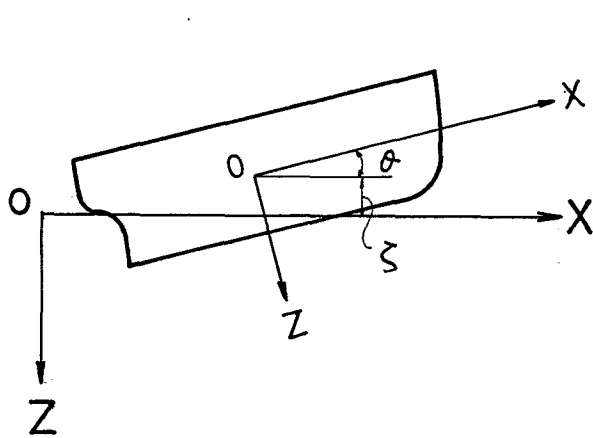
$V$  : 船速

船体は規則波中で6自由度の運動成分を有するが、このうちラッキング荷重を求めるのに考慮しなければならないのは、前後揺れを除いた次の5成分である。

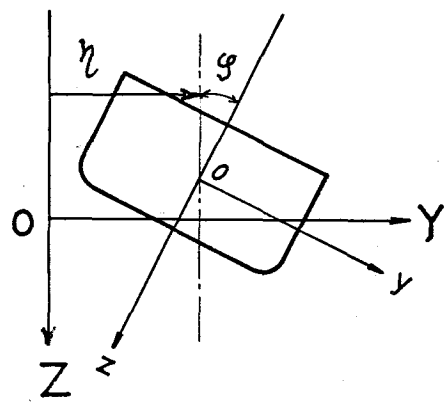
$$\left. \begin{aligned} \text{左右揺れ} &: \eta = \eta_0 \cos(\omega_e t - \alpha_\eta) \\ \text{上下揺れ} &: \zeta = \zeta_0 \cos(\omega_e t - \alpha_\zeta) \\ \text{横揺れ} &: \varphi = \varphi_0 \cos(\omega_e t - \alpha_\varphi) \end{aligned} \right\} \dots (2.2.11)$$



(a) X-Y平面



(b) X-Z平面



(c) Y-Z平面

Fig. 2 · 2 · 2 座標系

$$\text{縦揺れ} \quad : \quad \theta = \theta_0 \cos(\omega_e t - \alpha_\theta)$$

$$\text{船首揺れ} \quad : \quad \psi = \psi_0 \cos(\omega_e t - \alpha_\psi)$$

(2・2・11) で表される規則波中での船体運動が与えられると、ラッキング変形を生ぜしめる反対称荷重は以下に示す方法で求められる。

(1) 水圧によるラッキング荷重

船体の任意横断面における両舷の吃水は、規則波中の船体運動を考慮すると次式で与えられる。

$$d_l = d_m - h_0 \cos(kx \cos \chi + k \frac{B}{2} \sin \chi - \omega_e t)$$

$$+ \zeta - (x - x_G) \theta - \frac{B}{2} \varphi$$

$$d_w = d_m - h_0 \cos(kx \cos \chi - k \frac{B}{2} \sin \chi - \omega_e t)$$

$$+ \zeta - (x - x_G) \theta + \frac{B}{2} \varphi$$

... (2.2.12)

ここに、

$d_m$  : 平均吃水

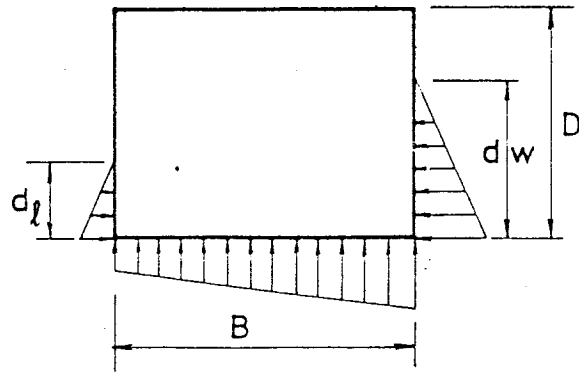
$B$  : 船幅

$x_G$  : 船体中央から重心までの距離 (船首側を正)

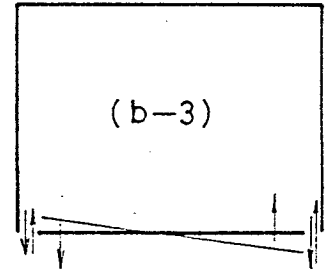
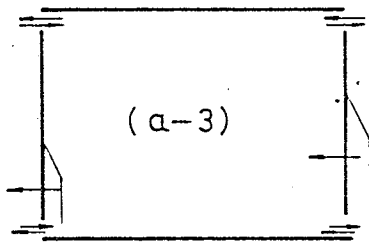
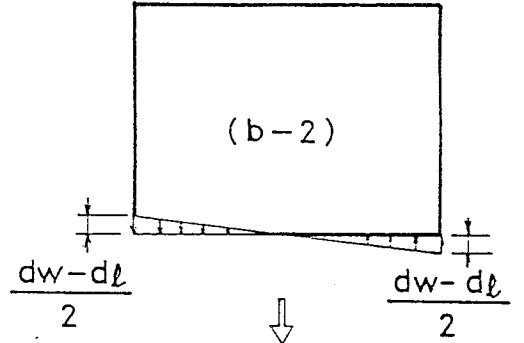
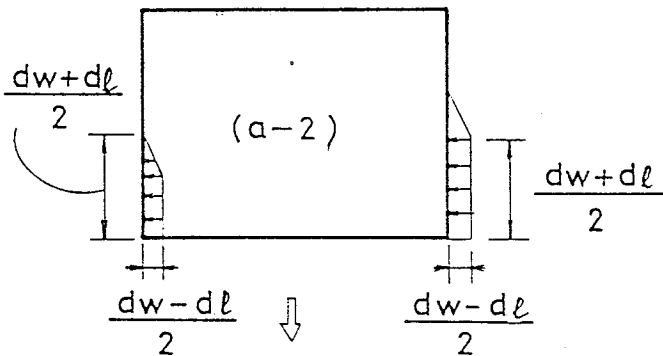
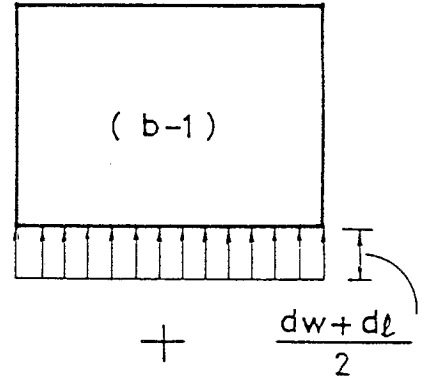
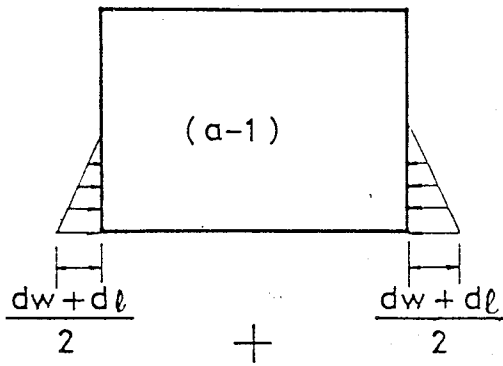
Fig. 2・2・3 に示すように、任意断面に働く水圧を対称成分と反対称成分とに分けて考える。対称成分 (a-1) 及び (b-1) は横荷重及び縦曲げ荷重であり、ラッキング変形を生ぜしめるのは (a-2) 及び (b-2) である。

上甲板、船側外板及び船底外板の面外剛性は面内剛性に比べて無視できる程度に小さいと仮定すると、船側外板に働く水圧の反対称成分 (a-2) は剪断力を介して上甲板と船底外板の面内に働く荷重 (a-3) として伝達される。この荷重はさらに、水平曲げ荷重 (a-4) とラッキング変形を生ぜしめる水



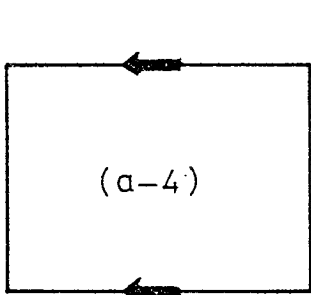


||

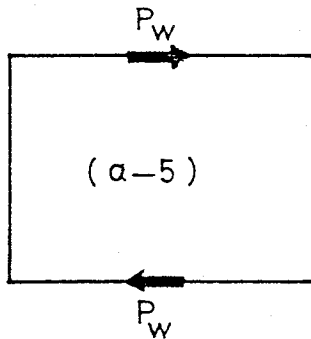


||

||



+



+

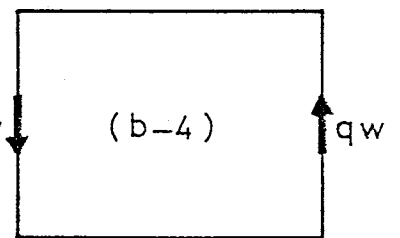


Fig. 2 · 2 · 3 水圧によるラッキング荷重

平方向の反対称荷重  $p_w$  (a-5) とに分けることができる。

同様に、船底外板に働く水圧の反対称成分 (b-2) は船側外板にラッキング変形を生ぜしめる鉛直方向の反対称荷重  $q_w$  として伝達される。

船長方向の単位長さ当りの水圧によるラッキング荷重は (2・2・13) で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} p_w &= \gamma \frac{d_w - d_l}{12} \left\{ 3(d_w + d_l) - \frac{2(d_w^2 + d_w d_l + d_l^2)}{D} \right\} \\ q_w &= \gamma \frac{d_w - d_l}{12} B \end{aligned} \right\} \dots (2.2.13)$$

ここに、 $\gamma$  : 海水の単位体積当りの重量

## (2) 慣性力によるラッキング荷重

規則波中を運動する船体の任意の点  $P(x, y, z)$  の水平方向及び鉛直方向の加速度は (2・2・14) で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} a_y &= -\omega_e^2 \{ \eta + (x - x_G)\psi - (z - z_G)\varphi \} \\ a_z &= -\omega_e^2 \{ \eta - (x - x_G)\theta - (y - y_G)\varphi \} \end{aligned} \right\} \dots (2.2.14)$$

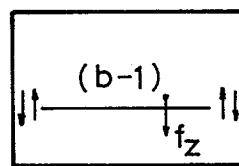
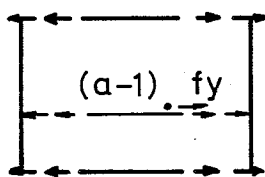
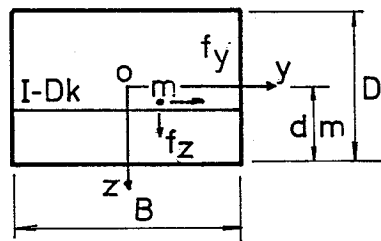
ここに、 $(x_G, y_G, z_G)$  は重心の座標を表す。

点  $P$  の質量  $m$  に働く力は、慣性力と重力との和で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} f_y &= m(-a_y + g \cos \varphi) \\ f_z &= m(-a_z + g \sin \varphi) \end{aligned} \right\} \dots (2.2.15)$$

以下一例として Fig. 2・2・4 に示すような下層甲板 I-Dk 上の質量  $m$  の慣性力によるラッキング荷重の求め方を説明する。

下層甲板上で働く水平方向の力  $f_y$  は (a-1) に示すようにまず船側外板に横荷重として伝達される。



||

||

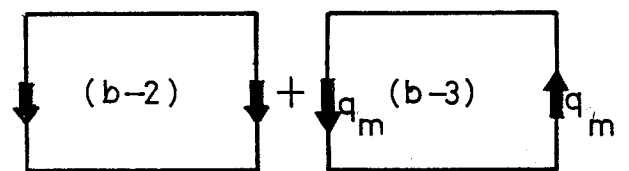
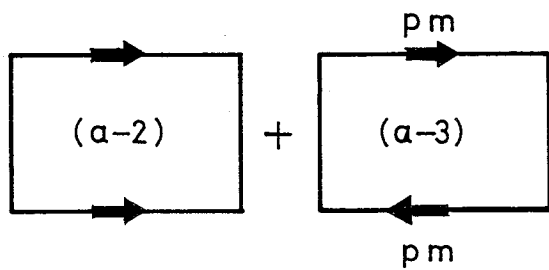


Fig. 2 · 2 · 4 慣性力によるラッキング荷重

船側外板に働く横荷重は上甲板と船底外板の面内荷重として伝達される。この荷重はさらに、水平曲げ荷重 (a-2) とラッキング現象を生ぜしめる水平方向の反対称な荷重  $p_m$  (a-3) とに分けることができる。

同様に下層甲板上で働く鉛直方向の力  $f_z$  は (b-2) に示すように剪断力を介して船側外板に面内に働く荷重として伝達される。この荷重はさらに、縦曲げ荷重 (b-2) とラッキング変形を生ぜしめる鉛直方向の反対称荷重  $q_m$  (b-3) とに分けることができる。

$$\left. \begin{aligned} p_m &= -\left\{ \frac{1}{2} - \frac{d_{m-z}}{D} \right\} f_y \\ q_m &= -\frac{y}{B} f_z \end{aligned} \right\} \dots (2.2.16)$$

ここに、

(y, z) : 質量 m の重心の座標

D : 船の深さ

船体の任意断面に働くラッキング荷重は (2・2・13) 及び (2・2・16) の和で与えられる。船体運動の解 (2・2・12) を (2・2・13) 及び (2・2・16) に代入するとラッキング荷重は次式で与えられる。

水平方向のラッキング荷重

$$\begin{aligned} p(x, t) &= p_w + p_m \\ &= p_0 + p_1 \eta + p_2 \zeta + p_3 \varphi + p_4 \theta + p_5 \psi \\ &\quad + p_6 \zeta^2 + p_7 \zeta \varphi + p_8 \zeta \theta + p_9 \varphi^2 + p_{10} \varphi \theta \\ &\quad + p_{11} \theta^2 + p_{12} \zeta^2 \varphi + p_{13} \zeta \varphi \theta \\ &\quad + p_{14} \varphi^3 + p_{15} \varphi \theta^2 \end{aligned}$$

鉛直方向のラッキング荷重

$$\begin{aligned}
 q(x, t) &= q_w + q_m \\
 &= q_0 + q_1 \zeta + q_2 \varphi + q_3 \theta \\
 &\dots (2.2.17)
 \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 p_0 &= \gamma \frac{h_w - h_l}{12} [3(h_w + h_l - 2d_m) \\
 &\quad + \frac{2\{h_w^2 + h_w h_l + h_l^2 + 3d_m(d_m - h_w - h_l)\}}{D}]
 \end{aligned}$$

$$p_1 = -\omega e^2 \sum_{i=1} \left( \frac{1}{2} - \frac{d_m - z_i}{D} \right) m_i$$

$$p_2 = -\gamma \frac{h_w + h_l}{2} \left( 1 + \frac{h_w + h_l - 2d_m}{D} \right)$$

$$p_3 = -\gamma \frac{B}{4} \left\{ h_w + h_l - 2d_m + \frac{h_w^2 + h_l^2 + 2d_m(d_m - h_w - h_l)}{D} \right\}$$

$$-\omega e^2 \sum_{i=1} \left( \frac{1}{2} - \frac{d_m - z_i}{D} \right) (z_i - z_G - \frac{q}{\omega e^2}) m_i$$

$$p_4 = -p_2(x - x_G)$$

$$p_5 = p_0(x - x_G)$$

$$p_6 = \gamma \frac{h_w - h_l}{2D}$$

$$p_7 = \gamma \frac{B}{2} \left( 1 + \frac{h_w + h_l - 2d_m}{D} \right)$$

$$p_8 = -2p_6(x - x_G)$$

$$p_9 = p_6 \frac{B^2}{4}$$

$$p_{10} = -p_7(x - x_G)$$

$$p_{11} = p_6(x - x_G)$$

$$P_{12} = -\gamma \frac{B}{2D}$$

$$P_{13} = -2P_{12}(x-x_G)$$

$$P_{14} = \frac{1}{24} P_{12} B^2$$

$$P_{15} = P_{12}(x-x_G)^2$$

$$q_0 = -\gamma \frac{h_w - h_l}{12} B - \sum_{i=1} \frac{y_i}{B} g m_i$$

$$q_1 = -\omega e^2 \sum_{i=1} \frac{y_i}{B} m_i$$

$$q_2 = \gamma \frac{B^2}{12} - \omega e^2 \sum_{i=1} \frac{y_i^2}{B} m_i$$

$$q_3 = -q_2(x-x_G)$$

$h_w, h_l$  : 斜め規則波中で船体が直立していると仮定したときの両舷の  
吃水

$$h_w = d_m - h_0 \cos \left\{ \frac{2\pi}{\gamma} (x \cos \chi - \frac{B}{2} \sin \chi) - \omega e t \right\}$$

$$h_l = d_m - h_0 \cos \left\{ \frac{2\pi}{\gamma} (x \cos \chi + \frac{B}{2} \sin \chi) - \omega e t \right\}$$

## 2・3 理論解析

### 2・3・1 解析モデル

Fig. 2・3・1に示すような長さ $L$ 、幅 $B$ 、深さ $D$ の箱形梁の中央に反対称な集中荷重が働く場合の横断面のラッキング変形量を梁理論を用いて求める。

箱形梁を甲板と2枚の船側外板及び船底外板の4個の梁要素に分割する。箱形梁を上下左右対称と仮定すると4個の梁要素のうちFig. 2・3・2に示すように甲板及び片舷分の船側外板の2個の梁要素について考えればよい。

ここで梁理論を用いる理由は次の如くである。第1章で述べたようにラッキング変形を生ぜしめるのは外板や甲板に伝達される面内荷重であり、これが外板や甲板に面内変形を生じさせ、このとき横断面は菱形に変形している。この場合横桁リングや横隔壁は外板や甲板の面内変形を拘束するバネの役割を果しているに過ぎず、主要部材はあくまでも外板や甲板である。従ってラッキング変形量を求めるには外板や甲板の面内変形を求めればよく、その際外板や甲板を横桁リングや横隔壁の影響を表す弾性基礎上の梁とみなしてこれに梁理論を適用することが考えられる。

一方実用面では最終結果に及ぼす各パラメタの影響度を把握することが重要となるが、このような目的に対しては解析解を導くことが有効となる。

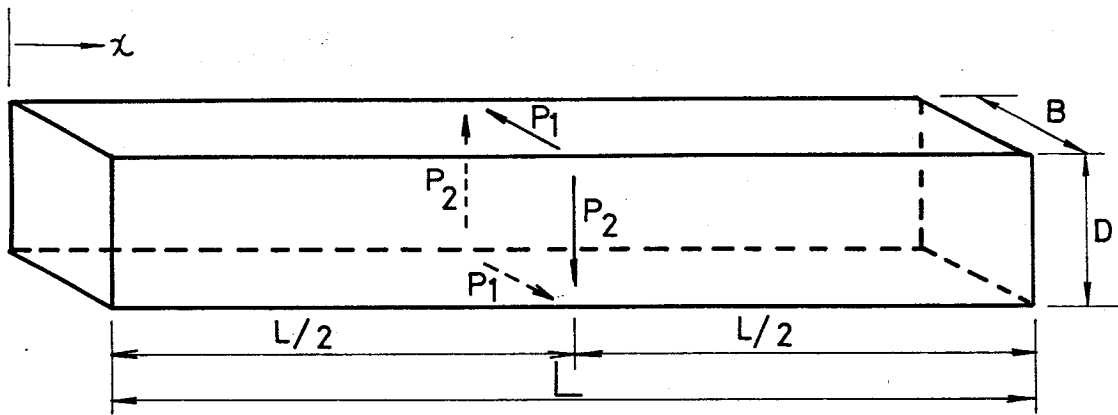


Fig. 2 · 3 · 1 中央集中荷重を受ける箱形梁

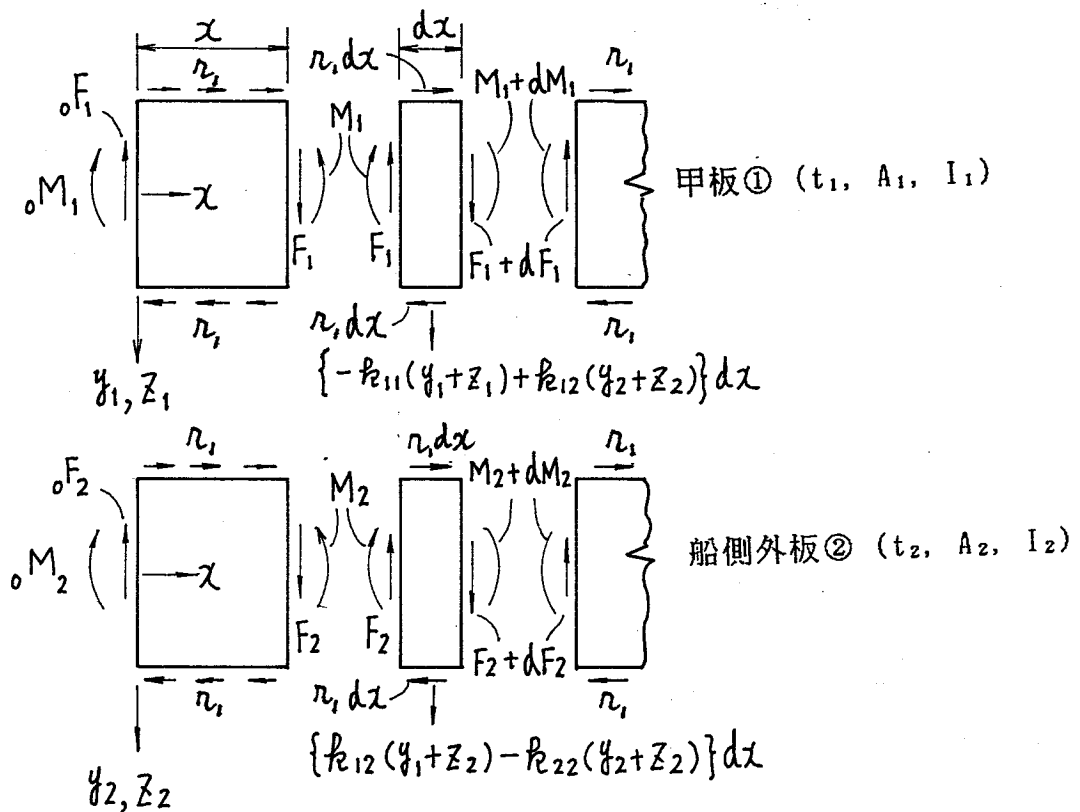


Fig. 2 · 3 · 2 箱形梁の構成要素



## 2・3・2 箱形梁に対する梁理論を用いたラッキング変形解析

### (1) 仮定

解析に当っては次の仮定を設ける。

- (a) 甲板及び船側外板の梁要素は面外剛性は面内剛性に比べて小さいので面内剛性のみを考慮する。
- (b) 横隔壁及び横桁リングは箱形梁横断面の角変位を拘束する集中バネ及び分布バネに置き換える。即ち個々の梁要素は横桁リングの面内剛性から定まるバネ定数を有する弾性基礎にあるものとする。
- (c) 個々の梁要素の結合部では曲げ歪の連続条件が成立する。
- (d) 解析に用いる記号を次のように定義する。

$E I_i$  : 梁要素の曲げ剛性

$G A_i$  : 梁要素の剪断剛性

$y_i$  : 梁要素の曲げ撓み

$z_i$  : 梁要素の剪断撓み

$K_{ij}$  : 横桁リングのバネ定数

$k_{ij} = K_{ij} / S$  : 横桁リングを弾性基礎とみなしたときのバネ定数

$S$  : 横桁心距

$r_i$  : 梁要素の結合部の剪断流

添字  $i = 1$  : 甲板,  $i = 2$  : 右舷側船側外板

(2) 力の平衡条件

Fig. 2・3・2より荷重の作用点より後方では次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dF_1}{dx} &= k_{11}(Y_1+Z_1) - k_{12}(Y_2+Z_2) \\ \frac{dF_2}{dx} &= -k_{12}(Y_1+Z_1) + k_{22}(Y_2+Z_2) \end{aligned} \right\} \dots (2.3.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_1}{dx} &= F_1 + r_1 B \\ \frac{dM_2}{dx} &= F_2 + r_1 D \end{aligned} \right\} \dots (2.3.2)$$

(3) 曲げ変形の基礎式

曲げ撓み  $y_i$  と曲げモーメント  $M_i$  の間には次式が成立する。

$$EI_i y_i'' = -M_i \quad (i=1,2) \quad \dots (2.3.3)$$

(4) 曲げ歪の連続条件

甲板と船側外板の結合部における甲板及び船側外板の曲げ歪をそれぞれ  $\varepsilon_1$  及び  $\varepsilon_2$  とおくと、

$$\varepsilon_1 = -\frac{B}{2} y_1''$$

$$\varepsilon_2 = \frac{D}{2} y_2''$$

曲げ歪の連続条件より  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$  なので次式が成立する。

$$y_2'' = -\frac{B}{D} y_1'' \quad \dots (2.3.4)$$

(5) 剪断変形の基礎式

荷重の作用点の後方では剪断撓み  $z_i$  と  $F_i$  の間に次の関係が存在する。

$$GA_i z_i' = F_i \quad (i=1,2) \quad \dots (2.3.5)$$

(6) 横桁リングのバネ定数

横桁リングのバネ定数はFig. 2・3・3に示されるように横桁リングを骨組構造とみなすことにより容易に求められる。

$$K_{12} = \frac{D}{B} K_{11}, \quad K_{22} = \left(\frac{D}{B}\right)^2 K_{11}, \quad K_{21} = K_{12} \quad \dots (2.3.6)$$

(7) 変形量の決定

本節の目的はこのような考え方の妥当性を実験や有限要素法で検証することにあるので、以下の解析では計算の簡便さのため、 $B/D = 1$ ,  $A_i = A$ ,  $I_i = I$ で両端で固定されている場合を取り扱う。

(a) 横隔壁も横桁リングも存在しない場合

(2・3・3) 及び (2・3・2) より

$$\left. \begin{aligned} EIY_1''' &= -F_1 - r_1 B \\ EIY_2''' &= -F_2 - r_1 B \end{aligned} \right\} \dots (2.3.7)$$
$$\therefore EI(Y_1''' - Y_2''') = -F_1 + F_2$$

(2・3・4) より  $y_2''' = -y_1'''$  なので上式は次のようになる。

$$2EIY_1''' = -F_1 + F_2 \quad \dots (2.3.8)$$

しかるに

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= -\frac{P_1}{2} \\ F_2 &= \frac{P_2}{2} \end{aligned} \right\} \dots (2.3.9)$$

従って (2・3・8) より

$$Y_1''' = \frac{P_1 + P_2}{4EI} \quad \dots (2.3.10)$$

(2・3・10) を解き、境界条件を考慮すると曲げ撓みは次のようになる。

$$Y_1 = -Y_2 = -\frac{P_1 + P_2}{96EI} L^3 \left\{ 3\left(\frac{X}{L}\right)^2 - 4\left(\frac{X}{L}\right)^3 \right\} \quad \dots (2.3.11)$$

一方剪断撓みは (2・3・5) と (2・3・9) より

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= -\frac{P_1 X}{2GA} \\ z_2 &= \frac{P_2 X}{2GA} \end{aligned} \right\} \quad \dots (2.3.12)$$

梁要素間の結合部に働く剪断流は次式で表される。

$$r_1 = \frac{P_1 - P_2}{4B} \quad \dots (2.3.13)$$

外力が  $P_1 = P_2$  の場合箱形梁中央での曲げ撓み  $y_0$ 、及び剪断撓み  $z_0$  は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= \frac{P_1 L^3}{192EI} \\ z_0 &= -\frac{P_1 L}{4GA} \end{aligned} \right\} \quad \dots (2.3.14)$$

またラッキング変形量  $\phi_0$  を Fig. 2・3・4 のように定義すると箱形梁中央では次のようになる。

$$\phi_0 = 4 \frac{Y_0 + Z_0}{B} \quad \dots (2.3.15)$$

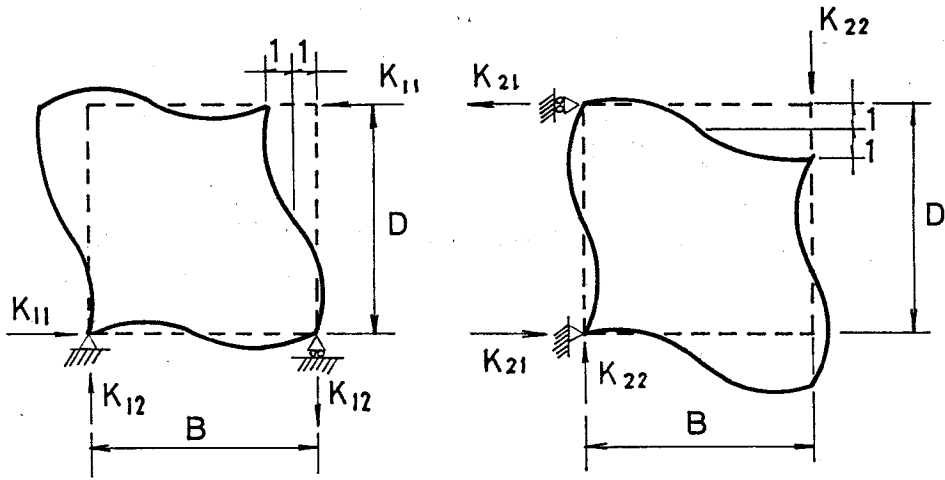


Fig. 2・3・3 横桁リングのバネ定数

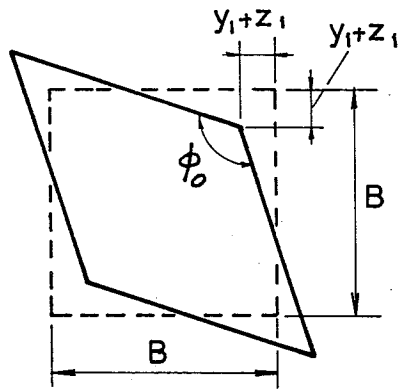


Fig. 2・3・4 ラッキング変形量

(b) 横隔壁が存在して横桁リングが存在しない場合

横隔壁がその設置場所において集中剪断バネとして働く。この場合は横隔壁の剪断変形と箱形梁の各梁要素の面内変形とが等しいことを条件として各梁要素に生じる曲げ撓みと剪断撓みとを求めることができる。

例えば箱形梁中央に1枚の横隔壁が設置されている場合は中央集中荷重が1-λ倍になったのと同じである。

ここに

$$\lambda = 1 - \frac{Y_0 + Z_0}{Y_0 + Z_0 + (P/K_B)} \quad \dots (2.3.16)$$

$$K_B = Gt_B, \quad t_B : \text{横隔壁の板厚}$$

従ってこの場合の箱形梁中央でのラッキング変形量φもまた(a)で求めた横隔壁や横桁リングが存在しない場合のラッキング変形量φ<sub>0</sub>にλを乗じたものになる。

$$\phi = \lambda \phi_0 \quad \dots (2.3.17)$$

(c) 横隔壁が存在せず横桁リングが存在する場合 (厳密解)

ここではB=Dの場合を考えているので横桁リングの断面形状が一定の場合

$$K_{ij} = K = \text{const}$$

となるので

$$k_{ij} = k = \text{const} \quad \dots (2.3.18)$$

またここではP<sub>1</sub> = P<sub>2</sub> の場合について検討する。

(2・3・1) ~ (2・3・3) より

$$EIY_1'''' = k(-Y_1 - Z_1 + Y_2 + Z_2) - r_1' B \quad \dots (2.3.19)$$

$$EIY_2'''' = k(Y_1 + Z_1 - Y_2 - Z_2) - r_1' B \quad \dots (2.3.20)$$

(2.3.4) より

$$y_1'' = -y_2'' \quad \dots (2.3.21)$$

(2.3.5) と (2.3.1) より

$$GAZ_1'' = k(y_1 + Z_1 - y_2 - Z_2) \quad \dots (2.3.22)$$

$$GAZ_2'' = k(-y_1 - Z_1 + y_2 + Z_2) \quad \dots (2.3.23)$$

(2.3.19) ~ (2.3.21) より

$$EIy_1'''' = k(-y_1 - Z_1 + y_2 + Z_2) \quad \dots (2.3.24)$$

(2.3.22) と (2.3.24) より

$$EIy_1'''' = -GAZ_1''$$

$$\therefore Z_1'' = -\frac{EI}{GA} y_1'''' \quad \dots (2.3.25)$$

(2.3.22) 及び (2.3.23) より

$$Z_1'' = -Z_2'' \quad \dots (2.3.26)$$

(2.3.24) を 2 回微分し

$$EIy_1^{VI} = k(-y_1'' - Z_1'' + y_2'' + Z_2'')$$

(2.3.21), (2.3.25) 及び (2.3.26) を代入し、

$$EIy_1^{VI} = k(-2y_1'' + \frac{2EI}{GA} y_1'''')$$

$$y_1^{VI} - \frac{2k}{GA} y_1'''' + \frac{2k}{EI} y_1'' = 0 \quad \dots (2.3.27)$$

この式の解は次式で表される。

$$y_1 = C_{11} + C_{21}x + \Theta_1(x) \quad \dots (2.3.28)$$

ここに、

$$\Theta_1(x) = C_3 X_1(x) + C_4 Y_1(x) + C_5 Z_1(x) + C_6 W_1(x) \quad \dots (2.3.29)$$

$$\left. \begin{aligned} X_1(x) &= \cosh ax \cos \beta x \\ Y_1(x) &= \cosh ax \sin \beta x \\ Z_1(x) &= \sinh ax \cos \beta x \\ W_1(x) &= \sinh ax \sin \beta x \end{aligned} \right\} \dots (2.3.30)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\sqrt{2} \sqrt{b+a}}{2}, \quad \beta = \frac{\sqrt{2} \sqrt{b-a}}{2} \\ a &= \frac{2k}{GA}, \quad b = \frac{2k}{EI} \end{aligned} \right\} \dots (2.3.31)$$

なお、(2・3・27)の解は $a^2$ と $4b$ の大小関係によって異なるが、この問題では $a^2 < 4b$ なのでその場合の解を用いる。

(2・3・21)及び(2・3・28)より

$$Y_2 = C_{12} + C_{22}x - \Theta_1(x) \dots (2.3.32)$$

(2・3・28)を(2・3・25)に代入し、

$$Z_1'' = -\frac{EI}{GA} \Theta_1''(x) \dots (2.3.33)$$

(2・3・31)より $a$ 及び $b$ を $\alpha$ 及び $\beta$ で表すと次のようになる。

$$a = 2(\alpha^2 - \beta^2), \quad b = (\alpha^2 + \beta^2)^2 \dots (2.3.34)$$

同じく(2・3・31)より

$$\frac{EI}{GA} = \frac{a}{b}$$

(2・3・34)より

$$\frac{EI}{GA} = \frac{2(\alpha^2 - \beta^2)}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} \dots (2.3.35)$$

(2・3・33)と(2・3・35)より

$$Z_1'' = \frac{-2(\alpha^2 - \beta^2)}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} \Theta_1''(x)$$



従って  $z_1$  は次のように表される。

$$Z_1 = C_{71} + C_{81}x - \frac{2(\alpha^2 - \beta^2)}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} \Theta_1''(x) \quad \dots (2.3.36)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \Theta_1''(x) = & \{C_3(\alpha^2 - \beta^2) + 2C_6\alpha\beta\} X_1(x) \\ & + \{C_4(\alpha^2 - \beta^2) - 2C_5\alpha\beta\} Y_1(x) \\ & + \{2C_4\alpha\beta + C_5(\alpha^2 - \beta^2)\} Z_1(x) \\ & + \{-2C_3\alpha\beta + C_6(\alpha^2 - \beta^2)\} W_1(x) \end{aligned} \quad \dots (2.3.37)$$

(2.3.26) 及び (2.3.36) より

$$Z_2 = C_{72} + C_{82}x + \frac{2(\alpha^2 - \beta^2)}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} \Theta_1''(x) \quad \dots (2.3.38)$$

(2.3.19), (2.3.20) 及び (2.3.21) より

$$\begin{aligned} r_1' &= 0 \\ r_1 &= D_{11} \end{aligned} \quad \dots (2.3.39)$$

(2.3.28), (2.3.29), (2.3.32), (2.3.36) 及び (2.3.38) の中の積分定数  $C_{1i}$ ,  $C_{2i}$ , ( $i = 1, 2$ );  $C_3$ ,  $C_4$ ,  $C_5$ ,  $C_6$ ;  $C_{7i}$ ,  $C_{8i}$  ( $i = 1, 2$ ) 及び  $D_{11}$  は以下に示す境界条件から定めることが出来る。

この場合の境界条件は次のようになる。

— 端末条件 ( $x = 0$ )

$$y_i(0) = 0, \quad y_i'(0) = 0, \quad z_i(0) = 0,$$

$$GAz_i'(0) = {}_oF_i, \quad F_i(0) = {}_oF_i \quad (i=1, 2)$$

$$EIY''(0) = k\{-y_1(0) - z_1(0) + y_2(0) + z_2(0)\} - r_1'(0)B$$

$$EIY^V(0) = k\{-y_1'(0) - z_1'(0) + y_2'(0) + z_2'(0)\} - r_1''(0)B$$

- 連続条件  $(x = \frac{L}{2} \equiv l)$

$$y_i'(l) = 0, F_i(l) = -(1 - 2\delta_{i2}) \frac{P_i}{2} \quad (i=1,2)$$

これらの条件を用いることにより全ての積分定数が以下の如く定められる。

$$C_{11} = -C_3$$

$$C_{12} = C_3$$

$$C_{21} = C_{22} = 0$$

$$C_3 = \frac{(\alpha^2 - \beta^2)W_1(l)(P_1 + P_2)}{2(\alpha^2 + \beta^2)\{\beta(-3\alpha^2 + \beta^2)T_1(l) + \alpha(\alpha^2 - 3\beta^2)U_1(l)\}EI}$$

$$C_4 = -\frac{\{\alpha(-\alpha^2 + 3\beta^2)Y_1(l) + \beta(3\alpha^2 - \beta^2)Z_1(l)\}(P_1 + P_2)}{8\beta(\alpha^2 + \beta^2)\{\beta(-3\alpha^2 + \beta^2)T_1(l) + \alpha(\alpha^2 - 3\beta^2)U_1(l)\}EI}$$

$$C_5 = \frac{\{\alpha(-\alpha^2 + 3\beta^2)Y_1(l) + \beta(3\alpha^2 - \beta^2)Z_1(l)\}(P_1 + P_2)}{8\alpha(\alpha^2 + \beta^2)\{\beta(-3\alpha^2 + \beta^2)T_1(l) + \alpha(\alpha^2 - 3\beta^2)U_1(l)\}EI}$$

$$C_6 = -\frac{(\alpha^4 - 6\alpha^2\beta^2 + \beta^4)W_1(l)(P_1 + P_2)}{8\alpha\beta(\alpha^2 + \beta^2)\{\beta(-3\alpha^2 + \beta^2)T_1(l) + \alpha(\alpha^2 - 3\beta^2)U_1(l)\}EI}$$

$$C_{71} = -C_{11}$$

$$C_{72} = C_{11}$$

$$C_{81} = C_{82} = \frac{\alpha^2 - \beta^2}{2(\alpha^2 + \beta^2)^2} \frac{-P_1 + P_2}{EI}$$

$$D_{11} = \frac{P_1 - P_2}{4B}$$

... (2.3.40)

ここに、

$$\left. \begin{aligned} T_1(l) &= X_1(l)Z_1(l) + Y_1(l)W_1(l) \\ U_1(l) &= X_1(l)Y_1(l) - Z_1(l)W_1(l) \end{aligned} \right\} \dots (2.3.41)$$

(2.3.28), (2.3.29) 及び (2.3.40) より

$$Y_1(l) = -C_3\{1 - X_1(l)\} + C_4Y_1(l) + C_5Z_1(l) + C_6W_1(l) \dots (2.3.42)$$

(2.3.36), (2.3.37) 及び (2.3.40) より

$$\begin{aligned} Z_1(l) &= C_3 + C_6 X \\ &= \frac{2(\alpha^2 - \beta^2)}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} [ \{ C_3(\alpha^2 - \beta^2) + 2C_6\alpha\beta \} X_1(l) \\ &\quad + \{ C_4(\alpha^2 - \beta^2) - 2C_5\alpha\beta \} Y_1(l) \\ &\quad + \{ 2C_4\alpha\beta + C_5(\alpha^2 - \beta^2) \} Z_1(l) \\ &\quad + \{ -2C_3\alpha\beta + C_6(\alpha^2 - \beta^2) \} W_1(l) ] \end{aligned} \dots (2.3.43)$$

(2.3.28), (2.3.32) 及び (2.3.40) より

$$Y_2(l) = -Y_1(l) \dots (2.3.44)$$

(2.3.36), (2.3.38) 及び (2.3.40) より

$$Z_2(l) = -Z_1(l) \dots (2.3.45)$$

曲げ撓み及び剪断撓みが求められると箱形梁中央でのラッキング変形量 $\phi$ は次式で与えられる。

$$\phi = 4 \frac{Y_1(l) + Z_1(l)}{B} \dots (2.3.46)$$

(d) 横隔壁が存在せず横桁リングが存在する場合 (近似解)

(c) では (2・3・19) などのように曲げ撓みと剪断撓みを相関させながら厳密解を導いたが、これは非常に取扱いが煩雑であるので近似計算法として剪断撓みより生じる横桁リングの反力を無視すると曲げ撓みと剪断撓みとを独立に取扱うことが可能となる。即ち (2・3・19) 及び (2・3・20) において  $z_1$  及び  $z_2$  を無視し、(2・3・21) の関係を用いると次式が導かれる。

$$EIY_1'''' = -k(Y_1 - Y_2) \quad \dots (2.3.47)$$

$$r_1' = 0 \quad \dots (2.3.48)$$

(2・3・47) をさらに2回微分し、(2・3・21) の関係を用いると

$$Y_1^{VI} + 4\beta^4 Y_1'' = 0 \quad \dots (2.3.49)$$

ここに、

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{2EI}} \quad \dots (2.3.50)$$

但しこの  $\beta$  は前出 (2・3・31) の  $\beta$  と同一ではなく、前出  $\alpha$  及び  $\beta$  から求

められる  $\sqrt{\frac{\alpha^2 + \beta^2}{2}}$  を改めて  $\beta$  とおいたものであることに注意を要す

る。以下本論文では横桁リングのバネ定数を代表する値として (2・3・50) の  $\beta$  を用いることにする。

(2・3・49) の解は次のようになる。

$$Y_1 = C_{11} + C_{21}x + \Theta(\beta x) \quad \dots (2.3.51)$$

ここに、 $0 \leq x \leq L/2$ ,  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  は積分定数。

$$\Theta(\beta x) = C_3 X(\beta x) + C_4 Y(\beta x) + C_5 Z(\beta x) + C_6 W(\beta x) \quad \dots (2.3.52)$$

$$\left. \begin{aligned} X(\beta x) &= \cosh \beta x \cos \beta x \\ Y(\beta x) &= \cosh \beta x \sin \beta x \\ Z(\beta x) &= \sinh \beta x \cos \beta x \\ W(\beta x) &= \sinh \beta x \sin \beta x \end{aligned} \right\} \dots (2.3.53)$$

(2・3・21) より

$$Y_2 = -Y_1 \dots (2.3.54)$$

(c) と同様境界条件として端末条件と箱形梁の中央での連続条件から積分定数を決定すると次のようになる。

$$C_{11} = C_{21} = C_3 = 0$$

$$C_4 = \frac{\{Y(\beta l) + Z(\beta l)\} P_1 \beta}{4[\{2 - X(\beta l)\}\{Y_1(\beta l) + Z(\beta l)\} + \{Y(\beta l) - Z(\beta l)\}W(\beta l)]k}$$

$$C_5 = -C_4$$

$$C_6 = -\frac{2W(\beta l)}{Y(\beta l) + Z(\beta l)} C_4$$

一方剪断撓みについては(2・3・22)において $z_1$ 及び $z_2$ を無視し、

(2・3・54)の関係を用いると

$$GAz_1'' = 2ky_1 \dots (2.3.55)$$

この式を解き境界条件を考慮すると剪断撓みが次のように求められる。

$$z_1 = \frac{k}{GA\beta^2} \{C_6(1 - X(\beta x)) + C_5 Y(\beta x) - C_4 Z(\beta x) + C_3 W(\beta x)\} \dots (2.3.56)$$

$$z_2 = -z_1 \dots (2.3.57)$$

曲げ撓み及び剪断撓みが求められると箱形梁中央でのラッキング変形量は

(2・3・46)より求められる。

## 2・4 実験による検証

### 2・4・1 実験の概要

前節で示した理論の妥当性を検討するために、Fig. 2・4・1に示す4種の模型を用いて実験を行った。

Model 1は横隔壁及び横桁リングが存在しない船倉模型であり、Model 2は船倉中央部に横隔壁を設置したもの、Model 3は横桁リングを等間隔に設置したもの、またModel 4は2層の下層甲板を設置したものである。模型の材料がアクリル樹脂であるためFig. 2・4・2に示すように材料の機械的性質は温度により変化する。従ってできるだけ温度を一定(約21℃)に保って実験を行った。

またラッキング現象を生じさせるような反対称荷重を正しく負荷することは実験技術上困難であるためFig. 2・4・3に示すように、船倉を両端で固着し、船倉中央部で1枚の船側外板にdead loadを負荷したときの船倉中央部及び $L/4$ の位置での各梁要素に生じる曲げ歪と剪断歪の分布を標点間2mmの3方向ゲージを使用して計測した。

Fig. 2・4・3はModel 1について船倉中央部での曲げ歪の分布の1例を示す。ラッキングを生じさせるような反対称荷重に対する応答は、Fig. 2・4・4に示すように実験から求められた歪分布((1),(2'),(3'),(4'))を重ね合わせることにより求められる。

また、船倉中央部でのラッキング量 $\phi$ を求めるために1/1000mmまで計測が可能なダイヤル・ゲージを用いて各梁要素の水平及び鉛直方向の変位を計測した。

なお、アクリル樹脂の熱伝導率はおよそ $5 \times 10^{-4} \text{ cal/s cm}^\circ\text{C}$ と鋼の熱伝導率およそ $1 \times 10^{-4} \text{ cal/s cm}^\circ\text{C}$ に比べて極めて小さく多点の歪を計測する場合には歪ゲージに熱がたまり零点が移動する恐れがあるので、通電時間と零点移動量との関係を実験から求め、零点移動が無視できると考えられる約15s以内に歪の計測を終えるように努めた。

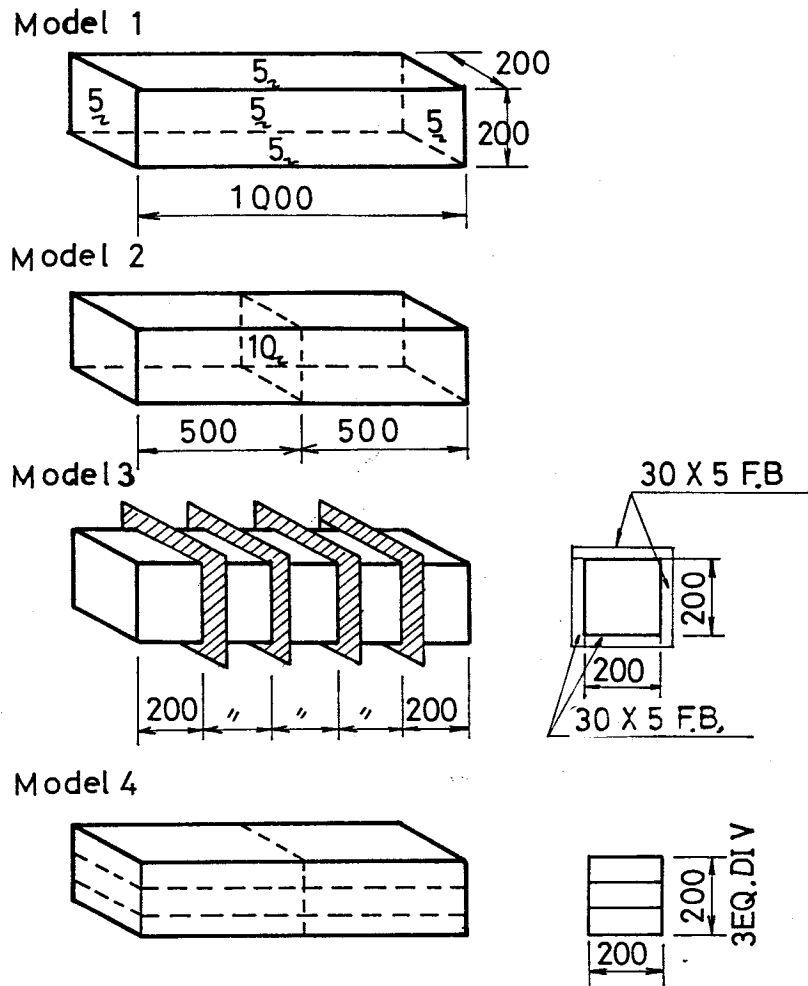


Fig. 2 · 4 · 1 実験模型

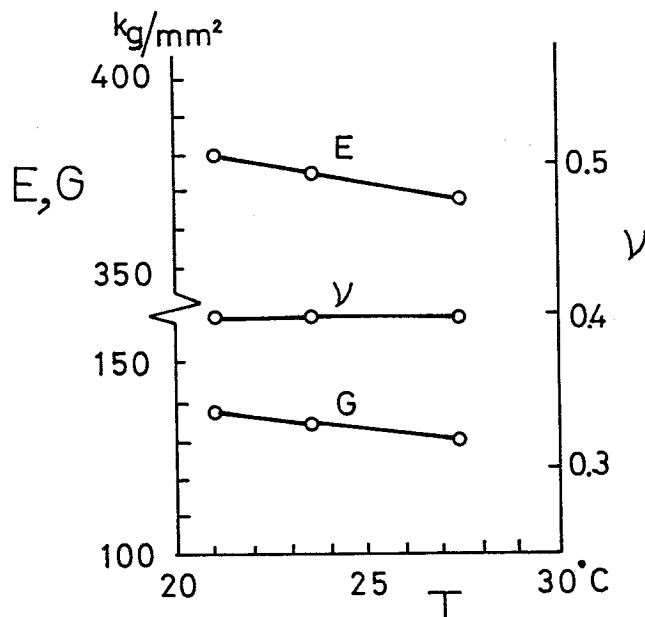


Fig. 2 · 4 · 2 実験模型材料の機械的性質と温度の関係

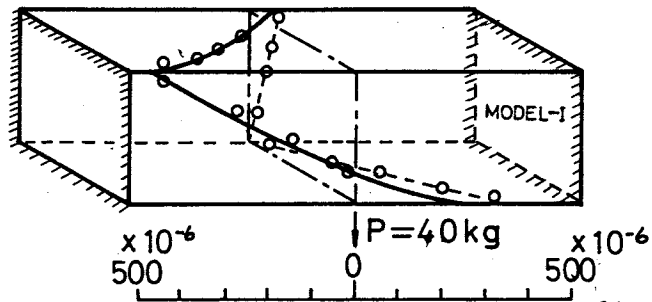


Fig. 2・4・3 曲げ歪の分布

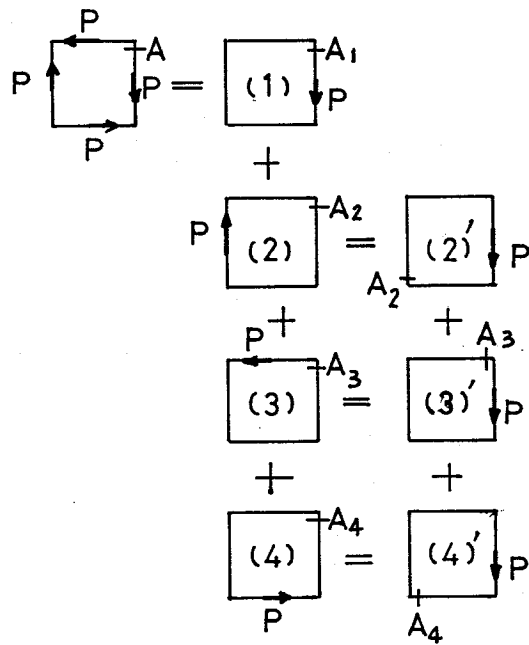


Fig. 2・4・4 ラッキング荷重の重ね合せ



## 2・4・2 実験結果と計算結果の比較

Fig. 2・4・5 はラッキング現象を生じさせるような反対称荷重を負荷したときの甲板について船倉中央部での曲げ歪と  $L/4$  の位置での剪断歪の板幅方向の分布の理論値と実験値とを示す。ここで  $L/4$  の位置での剪断歪を問題とした理由は、横隔壁及び横桁リングが存在しない Model 1 では剪断力が  $L/2$  間で一定であることと、横隔壁が存在せず、横桁リングが等間隔に設置されている Model 3 では船倉中央部での剪断力の大きさが厳密解、近似解いずれの場合も同じ大きさとなるため、両解法の差異が明確に現れる位置を考慮したことによる。

Model 1 については曲げ歪の分布及び剪断歪の分布のいずれも理論値と実験値とは極めてよい一致を示すことがわかる。Model 3 については曲げ歪の分布は厳密解、近似解ともに実験値とよく一致しているが、剪断歪の大きさは厳密解と比較しても実験値はなお低目である。

この理由は理論値を求めるに当っては横桁リングのバネ定数を船長方向にならして考えているため、 $L/4$  の位置での剪断力は横桁リングがその設置位置で集中バネとして働く場合に比較して若干大き目に評価されることに起因する。従って横桁リングが本実験の場合よりもさらに密に設置される場合には厳密解は実験値とさらによく一致することになると考えられる。

Table 2・4・1 は横桁リングのバネ定数を表す無次元値  $\beta L$  を変化させたときの剪断力  $F/(-P)$ 、曲げモーメントの無次元値  $M/\frac{PL}{4}$ 、曲げ撓みの無次元値  $y/y_0$ 、剪断撓みの無次元値  $z/z_0$  及びラッキング変形量の無次元値  $\phi/\phi_0$  について厳密解（上段に示す）と近似解（下段の（ ）内に示す）を表したものである。

前述のように近似解法では梁要素の剪断変形により横桁リングのバネから生じる反力を無視しているため厳密解に比べて梁要素に生じる剪断力、曲げモー



Tabl 2・4・1  $\beta L$ と $F/(-P)$ ,  $M/\frac{PL}{4}$ ,  $y/y_0$ ,  $z/z_0$  及び $\phi/\phi_0$  の関係

	$\beta L$ $2x/L$	0.0000	2.2430	2.6674	3.1415	3.5000
$F/(-P)$	0.00	1.0000	0.6994 ( 0.7812 )	0.5162 ( 0.6263 )	0.3185 ( 0.4345 )	0.1957 ( 0.2988 )
	0.25	1.0000	0.7601 ( 0.8217 )	0.6107 ( 0.6946 )	0.4438 ( 0.5355 )	0.2911 ( 0.4207 )
	0.50	1.0000	1.0000 ( 1.0000 )	1.0000 ( 1.0000 )	1.0000 ( 1.0000 )	1.0000 ( 1.0000 )
$M/\frac{PL}{4}$	0.00	1.0000	0.7419 ( 0.8101 )	0.5828 ( 0.6753 )	0.4083 ( 0.5074 )	0.2960 ( 0.3876 )
	0.25	0.0000	0.0247 ( 0.0182 )	0.0393 ( 0.0308 )	0.0541 ( 0.0463 )	0.0830 ( 0.0568 )
	0.50	-1.0000	-0.8413 (-0.8829 )	-0.7419 (-0.7992 )	-0.6296 (-0.6941 )	-0.5521 (-0.6179 )
$y/y_0$	0.25	0.5000	0.3804 ( 0.4117 )	0.3063 ( 0.3489 )	0.2244 ( 0.2705 )	0.1581 ( 0.2143 )
	0.50	1.0000	0.7794 ( 0.8371 )	0.6423 ( 0.7210 )	0.4897 ( 0.5759 )	0.3836 ( 0.4714 )
$z/z_0$	0.25	0.2496	0.1790 ( 0.1977 )	0.1356 ( 0.1608 )	0.0901 ( 0.1151 )	0.0588 ( 0.0826 )
	0.50	0.4992	0.3952 ( 0.4226 )	0.3303 ( 0.3680 )	0.2637 ( 0.2999 )	0.2057 ( 0.2510 )
$\phi/\phi_0$	0.50	1.0000	0.7834 ( 0.8402 )	0.6489 ( 0.7263 )	0.5025 ( 0.5842 )	0.3964 ( 0.4818 )

メントの大きさは若干大となるため、曲げ撓み、剪断撓みも若干大となり、その結果ラッキング量もまた若干大となる。なお、横桁リングがさらに密に設置され、バネ定数が大になると両解析法の差異は若干大となる傾向が認められる。

Fig. 2・4・6は横隔壁を船倉中央部に1枚及び等間隔に2枚、3枚と設置した場合の船倉中央部でのラッキング量 $\phi$ を横隔壁と横桁リングとが存在しない場合の値 $\phi_0$ で除した無次元値 $\phi/\phi_0$ と隔壁の板厚 $t_B$ と船倉の板厚 $t_s$ との比 $t_B/t_s$ との関係を示したものである。 $t_B/t_s = 0$ は横隔壁が存在しない場合を表し、図中の白丸はModel 1について求められた実験値 $\phi_{0EX}$ を(2・3・46)式から求められた理論値 $\phi_{0TH}$ で除した値を示す。この値がほぼ1に等しいこと、及び図中の黒丸で示す船倉中央部に横隔壁を1枚設置したModel 2についての実験値 $\phi_{EX}$ を理論値 $\phi_{0TH}$ で除した値が図中の横隔壁枚数が1枚の場合の理論値とほぼ等しいことから2・3で述べた理論が有効であることがわかる。

Fig. 2・4・7はラッキング量の無次元値 $\phi/\phi_0$ と横桁リングのバネ定数を表す無次元値 $\beta L$ の関係を表す。実験値は厳密解と近似解のほぼ中間の値を示している。図から明らかなように、梁要素の剪断変形により生じる横桁リングのバネによる反力を無視しているため結果的には横桁リングのバネ定数を若干低目に評価したことになる近似解法を用いても、かなりよい精度の解が得られることがわかる。

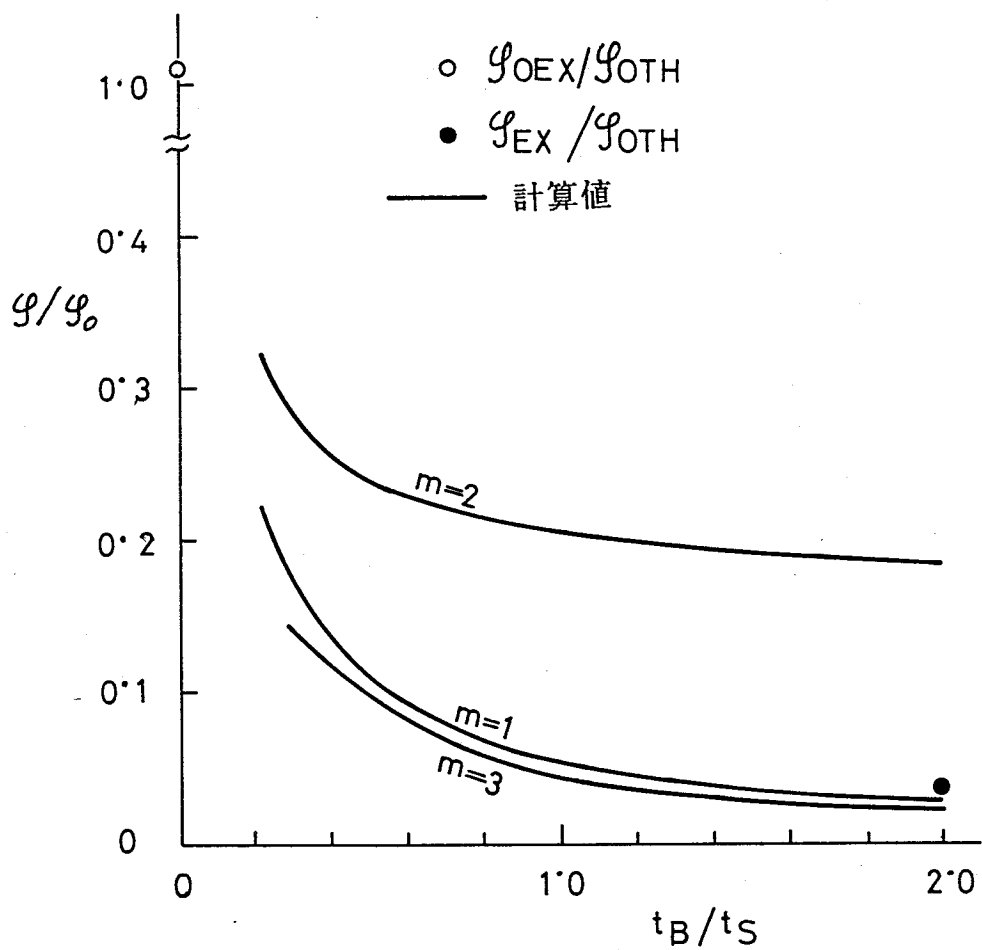


Fig. 2.4.6 横隔壁の枚数  $m$ ,  $t_B/t_s$  と  $\varphi/\varphi_0$  の間の関係

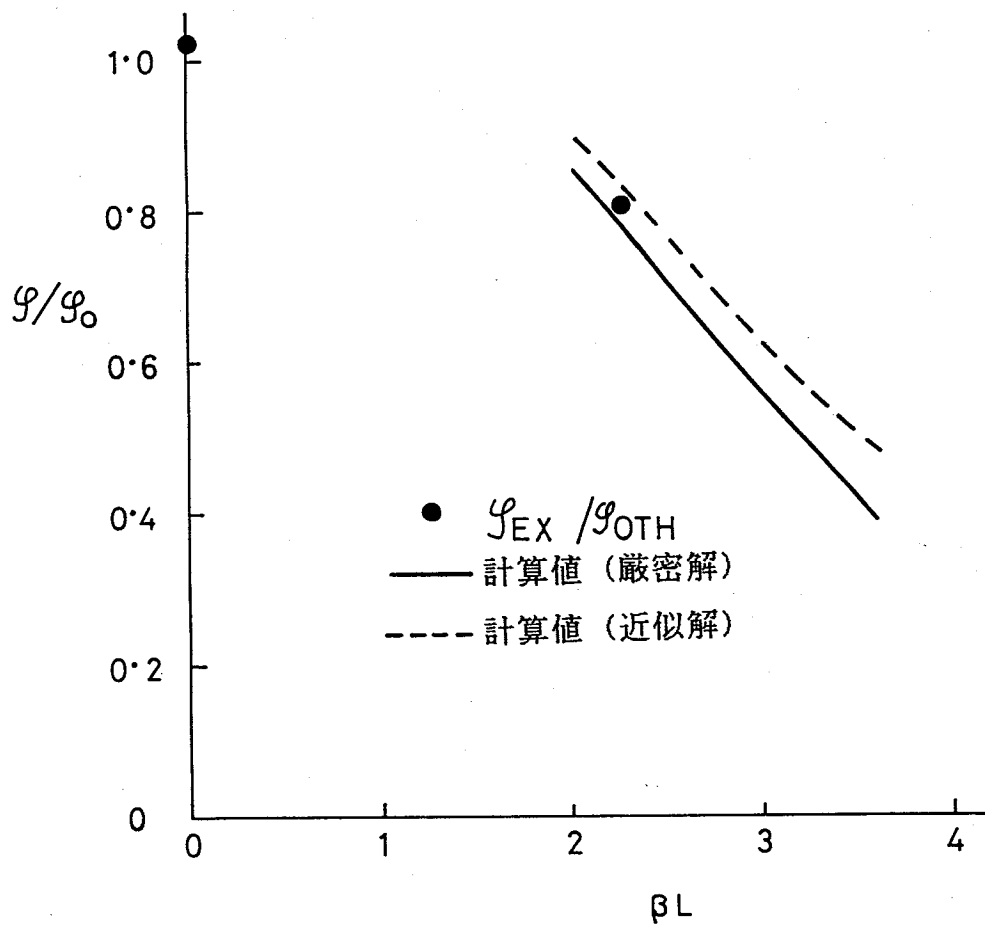


Fig. 2・4・7  $\beta L$ と $\phi/\phi_0$ の関係

## 2. 5 有限要素法による検証

実船の上甲板及び船底外板の面内に反対称な等分布荷重 $100\text{t/m}$ を負荷した場合について有限要素法による解を求め2・3で導いた理論式<sup>\*)</sup>による解と比較を行う。ここに実船の船倉部の長さ、幅及び深さは次の通りである。

$$\text{船倉長さ} \quad L_h = 80 \text{ m}$$

$$\text{船倉幅} \quad B = 20 \text{ m}$$

$$\text{船倉深さ} \quad D = 10 \text{ m}$$

また境界条件はFig. 2・5・1に示すように船倉端で船側外板と船底外板とが支持されるものとする。

Fig. 2・5・2に船体横断面の面内変形の船長方向の分布を示す。船体横断面のラッキング変形量 $\phi$ に関しては破線で示す有限要素法の解と実線で示す理論解析解とは極めてよく一致しているといえる。

またFig. 2・5・3には船体中央付近の曲げ応力の分布を、Fig. 2・5・4には甲板及び船底外板の船長方向応力分布を、Fig. 2・5・5には船側外板の船長方向応力分布を示す。応力についても本理論による計算値は有限要素法による計算値と平均的には合っているといえる。

---

\*) 実際には2・3・2で導いた式を長方形断面に拡張したものをを用いる。

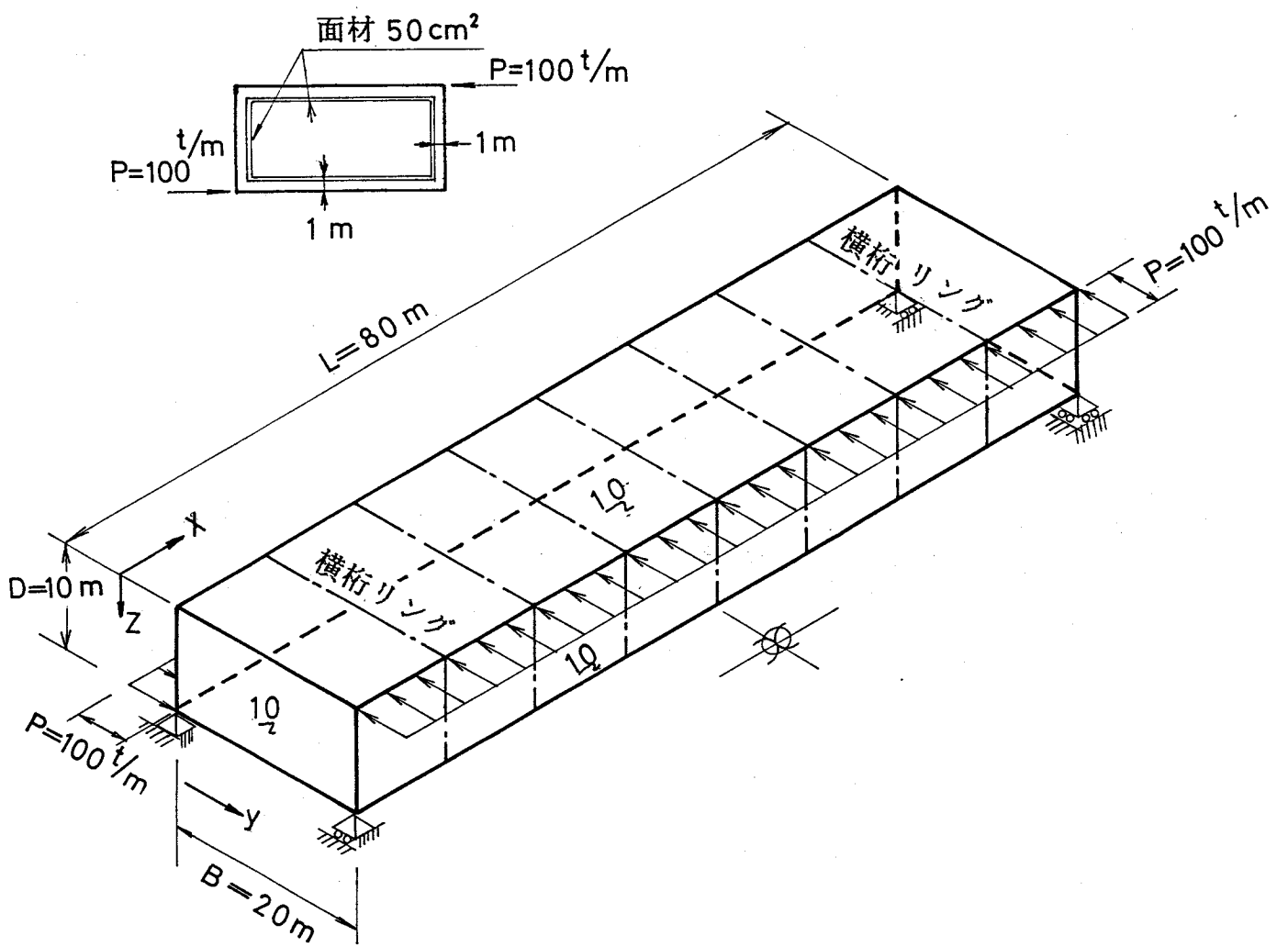


Fig. 2・5・1 計算モデル



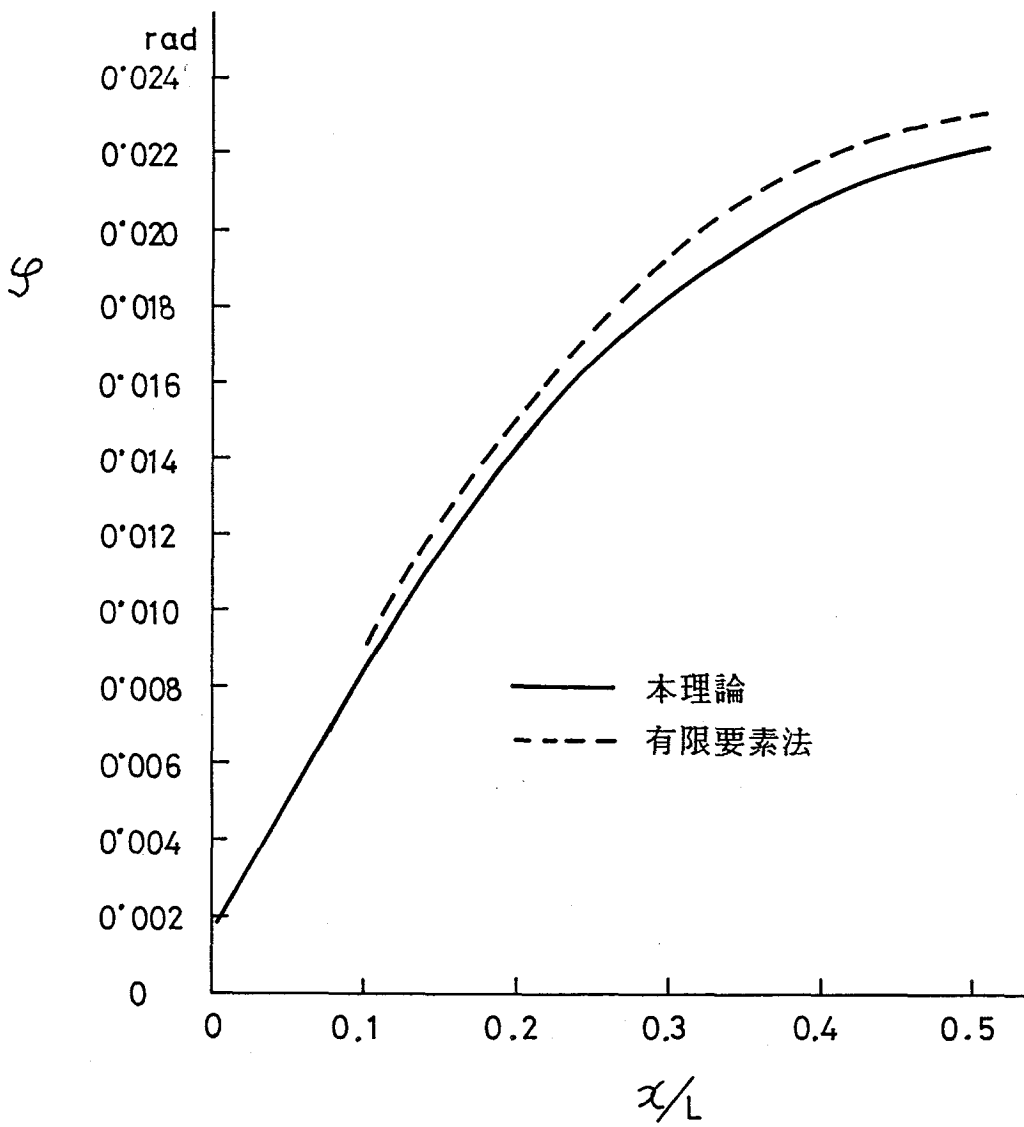


Fig. 2・5・2 ラッキング変形量

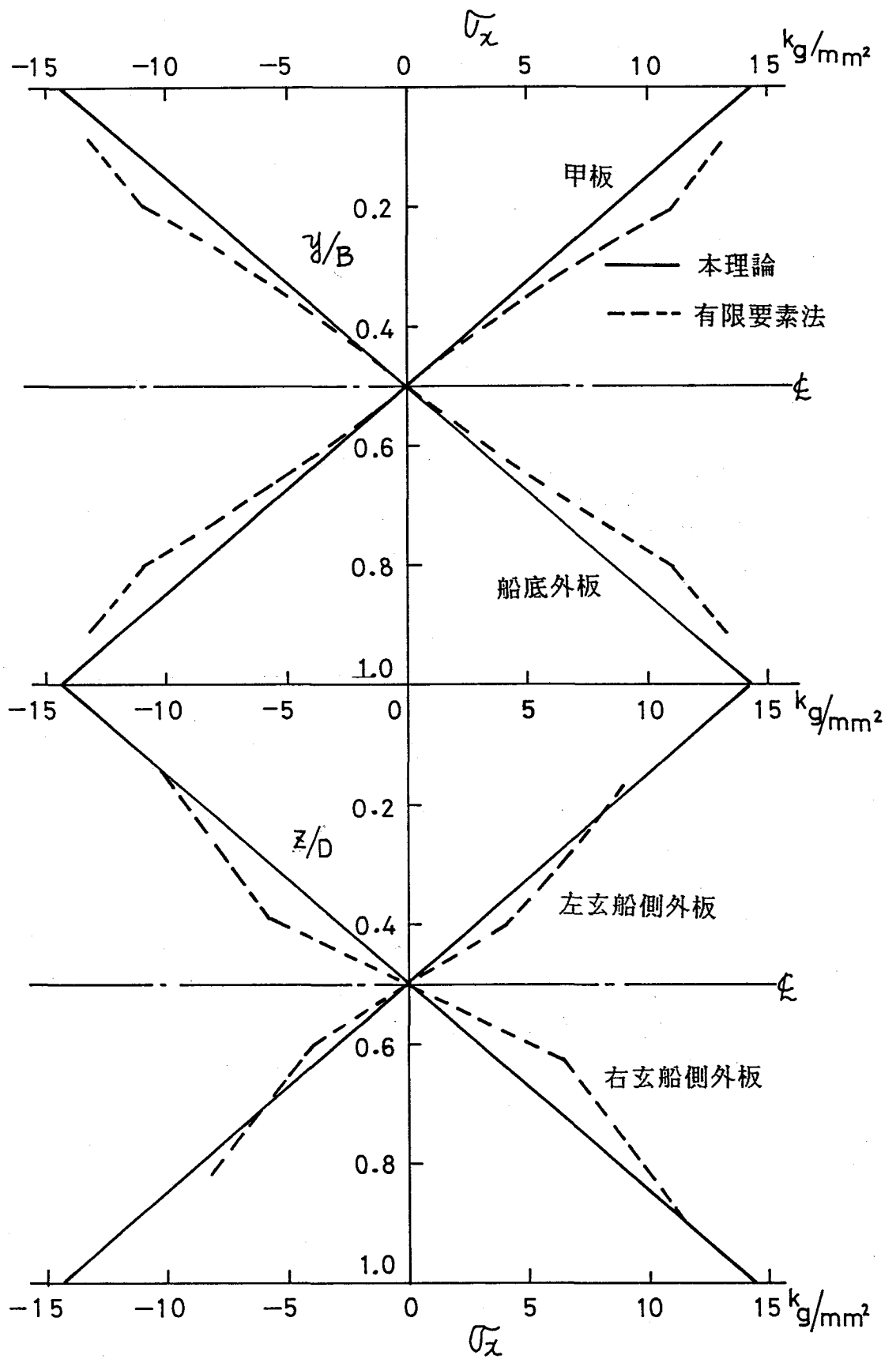


Fig. 2 · 5 · 3 箱形梁の応力分布 ( $x/L = 0.469$ )

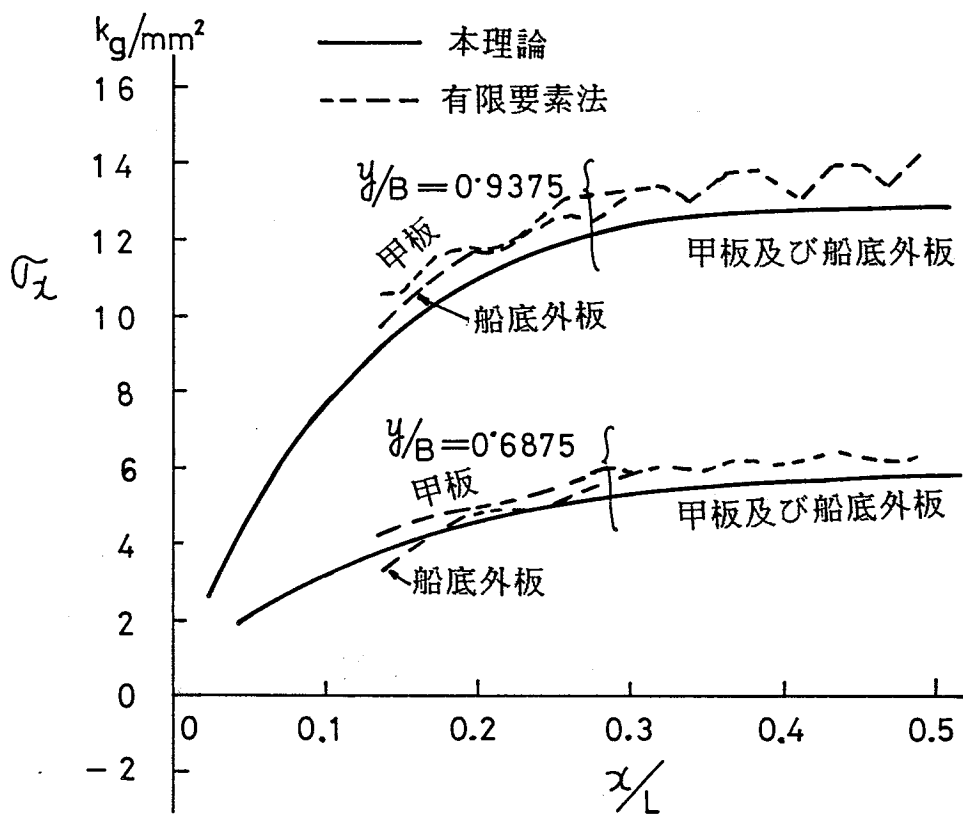


Fig. 2 · 5 · 4 甲板および船底外板の船長方向応力分布

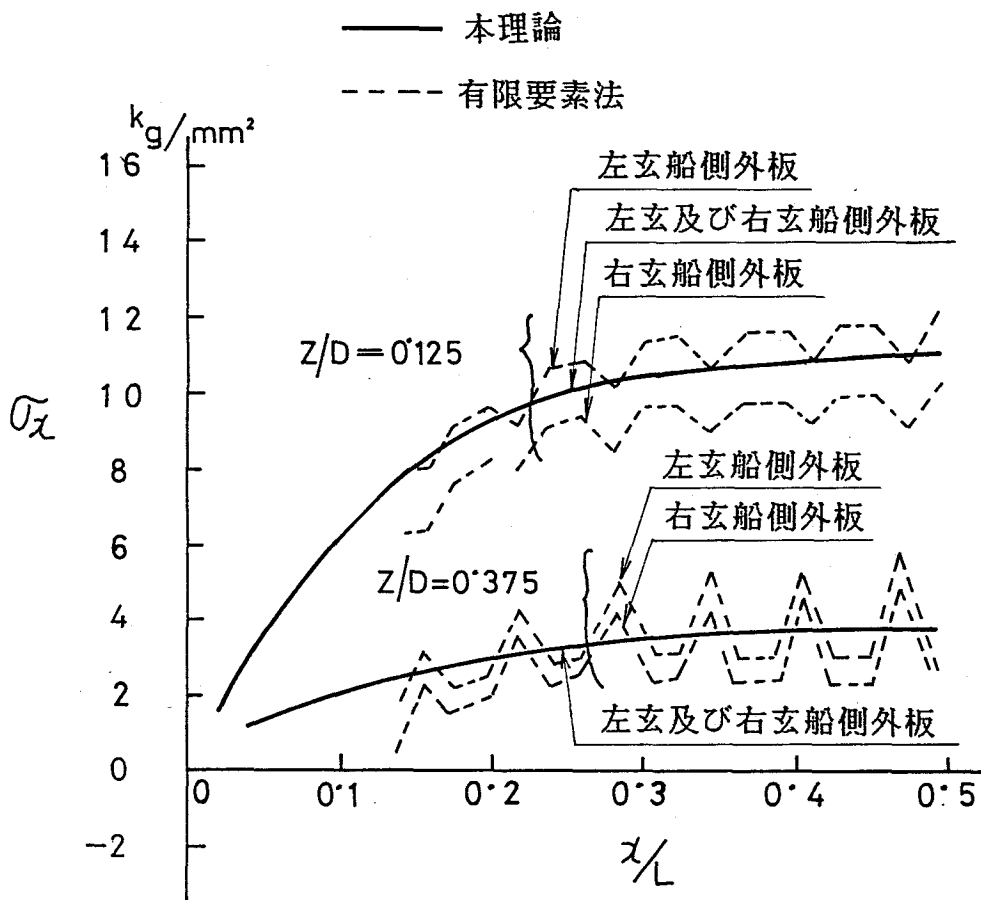


Fig. 2 · 5 · 5 船側外板の船長方向応力分布

## 2・6 考察

2・4及び2・5で述べたように2・3で導いた理論式は実験及び有限要素法とも比較的良好に合っており、理論の妥当性が確認された。またFig. 2・4・7に見るように近似解の精度もまずは十分実用に供しうるものであることが判明した。

そこで次のような箱形梁で横桁リングのバネ定数を種々に変えて近似計算法を適用しラッキング変形量を求める。

箱形梁  $L = 1 \text{ m}$ ,  $B = D = 0.2 \text{ m}$ ,  $t = 0.005 \text{ m}$

$E = 0.375 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ ,  $\nu = 0.4$

甲板数  $n = 1$  (下層甲板なし) 及び  $n = 2$  (下層甲板2層)

$n = 2$  のときは下層甲板は深さを3等分する位置に配置する。

荷重 中央集中荷重

その結果をFig. 2・6・1に示す。即ち横軸に横桁リングのバネ定数を表す無次元値  $\beta L$  をとり、これとラッキング変形量の無次元値  $\phi/\phi_0$  の関係を示す。ここに  $\phi_0$  は下層甲板も横桁リングもないときのラッキング変形量を示す。この図より  $\beta L$  が3程度になるとラッキング変形量は15%~25%に低下しそれなりの効果があることがわかる。但しその効果は次に述べる横隔壁の効果に比べるとかなり小さい。

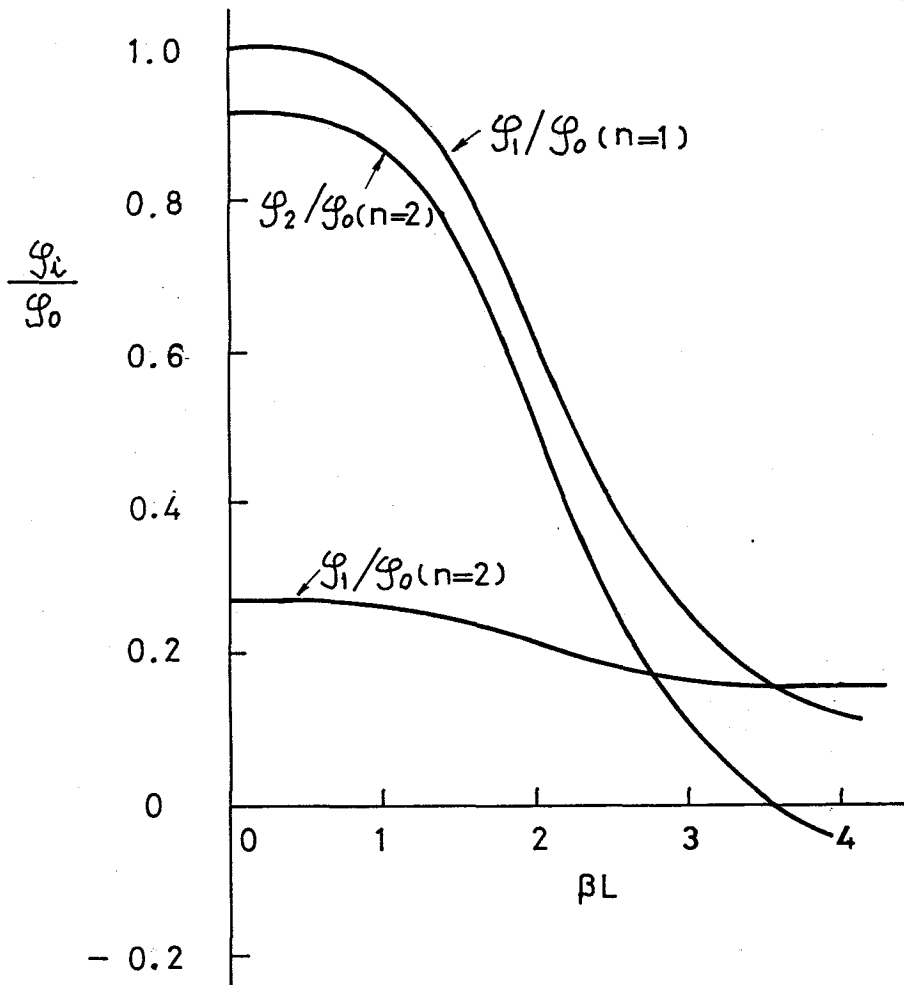


Fig. 2・6・1 横桁リングのバネ定数の無次元値  $\beta L$  と  
ラッキング変形量の無次元値  $\varphi/\varphi_0$  の関係

次に横隔壁がラッキング変形量軽減に及ぼす効果を知るため上述の箱形梁に全長を2等分及び4等分する位置に板厚0.005mの横隔壁を設置した場合のラッキング変形量の無次元値  $\phi_i / \phi_0$  を求め、その結果をTable 2・6・1に示す。これより横隔壁を入れたことによりラッキング変形量が5%以下に低下することがわかり、横隔壁の設置がラッキング変形の減少にきわめて有効であることがわかる。

Table 2・6・1 横隔壁枚数とラッキング変形量

横隔壁枚数 m	$\phi_1 / \phi_0$	$\phi_2 / \phi_0$
1	0.0142	0.0206
3	-0.0025	0.0173

また一方さきの実験との対比で示したFig. 2・4・6より横隔壁の枚数が3枚の場合がラッキング変形量が最も小さく、ついて1枚、2枚の順に大きくなっているが、これは横隔壁枚数が2枚の場合は箱形梁の曲げ撓みが最大となる箱形梁中央に横隔壁が設置されていないためである。

これらの検討結果からラッキング変形の減少のためには横桁リングよりも横隔壁を、それも曲げ撓みや剪断撓みが最大となる箇所に設置するのが有効であることがわかる。

## 第3章 自動車船のラッキング変形

### 3・1 はじめに

第2章では梁理論を用いてラッキング変形量の理論式を導き、実験や有限要素法等によりその妥当性を確認した。そこで本章では実際の自動車船にこの理論を適用する。まず3・2で自動車船の構造的特色について述べ、次に3・3ではそのような構造的特色を勘案しながら第2章で導いた基礎理論を拡張して自動車船に適用できるようにする。3・4では供試船についてまず船体運動を計算し、次に3・3で拡張した理論を用いて規則波中でのラッキング変形量を求め、船体運動や波高の影響について考察する。さらに規則波中でのラッキング変形量をもとにしてラッキング変形量の長期予測を行い、設計の指針についても述べる。



### 3・2 自動車船の構造的な特色

自動車船は自動車を大量に輸送できるように種々の配慮がなされている。まず荷役はドライバーが自動車を陸上から直接船倉内所定まで搬入するロールオン・ロールオフ方式を採用しているため一般船舶に比べて横隔壁の数が著しく少なくなっている (Fig. 3・2・1 参照)。このことがラッキング変形を生じやすくしていることは緒論で述べた通りである。

さらに自動車船では Fig. 3・2・2 に示すように船倉内に多層の甲板を設け、できるだけ多くの自動車を積載できるような構造が採用されている。これまでの自動車船のうち甲板の層数の最も多いものは 13 層である。ただこれら多層甲板のうち船側外板に強固に結合されているものはたかだか 4 層であり (これを有効甲板と呼ぶ)、他の下層甲板は Temporary 甲板と呼ばれ船体主構造に結合された梁上に板厚 5 mm 程度の薄板をスロット溶接したものであり、一般船の甲板に比して極めて軽い構造となっている。そこで 3・3 ではこのような多層甲板を有する箱形梁に第 2 章の基礎理論を拡張する。なお実際には Temporary 甲板は船側外板からの荷重を十分に伝達しないと思われるので計算上はこれを無視することにする。

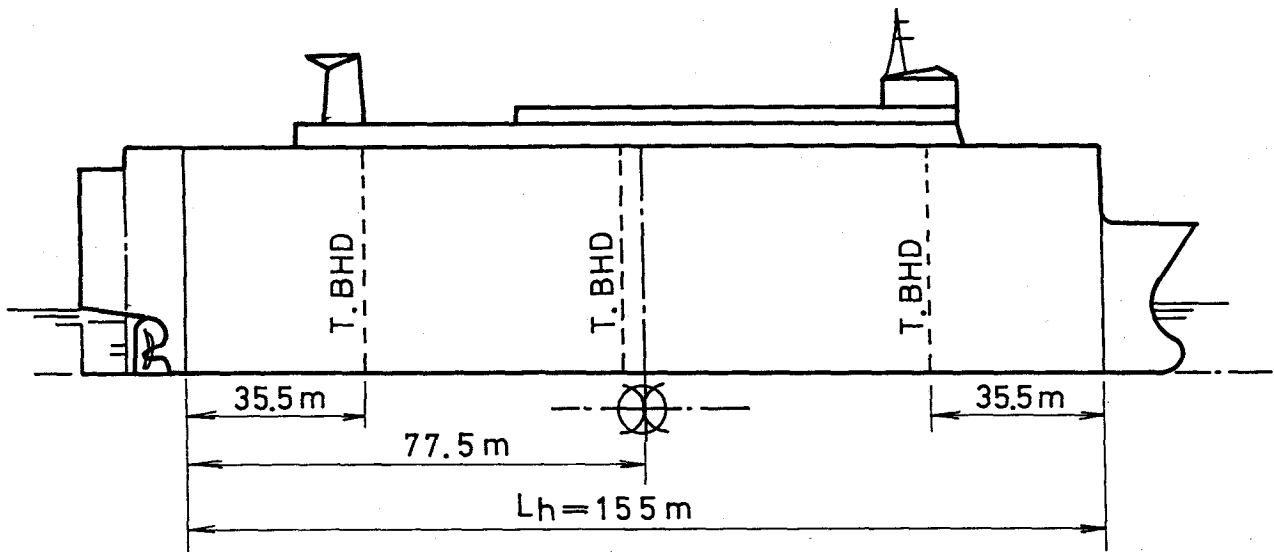


Fig. 3・2・1 船倉の配置

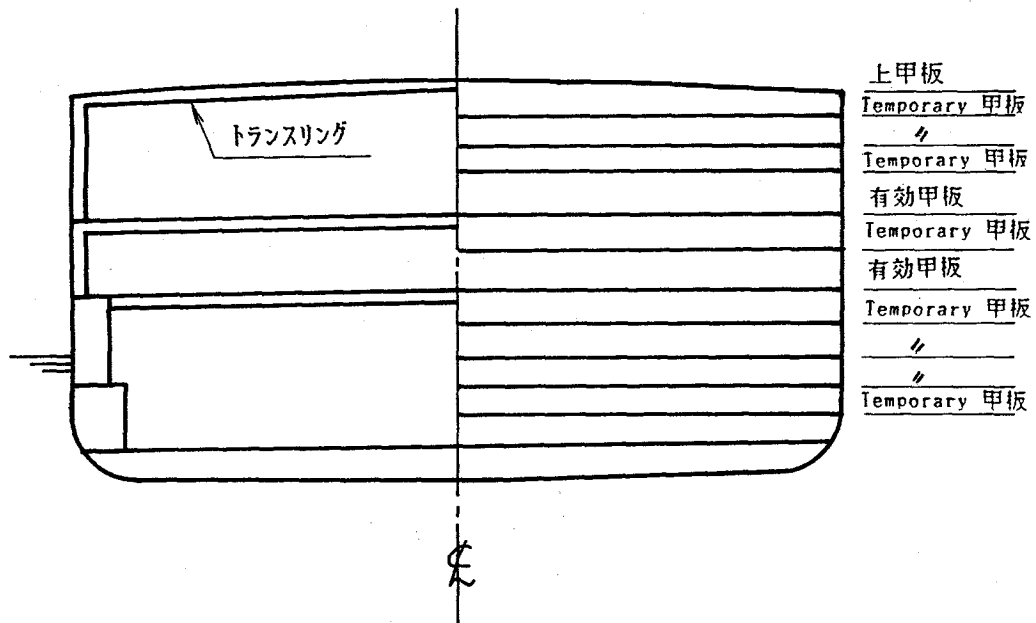


Fig. 3・2・2 中央横断面

### 3・3 理論の拡張

#### 3・3・1 下層甲板の荷重の分担率

Fig. 3・3・1の如く多層の甲板を有する上下左右対称な構造について考える。この場合も2・2・1の場合と同様、Fig. 3・3・1 (b)の面内荷重を(c)の対称荷重成分と(d)の反対称荷重成分とに分け、反対称荷重成分は(e)の換れ変形を生ぜしめる荷重成分と(f)のラッキング変形を生ぜしめる荷重成分に分けることができる。以下に同図(b)の $H_{11}$ ,  $H_{21}$ ,  $\dots$ ,  $H_{n1}$ ,  $H_{12}$ ,  $H_{22}$ ,  $\dots$ ,  $H_{n2}$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ から(f)のラッキング変形を生ぜしむる荷重成分 $P_1$ ,  $P_2$ ,  $\dots$ ,  $P_n$ ,  $P_{n+1}$ を求めることとする。

$$R_i + P_i = H_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.1)$$

$$P_{n+1} - 2 \sum_{i=1}^n S_i = V \quad \dots (3.3.2)$$

ここに、

$$H_i = \frac{H_{i2} - H_{i1}}{2} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.3)$$

$$V = \frac{V_2 - V_1}{2} \quad \dots (3.3.4)$$

$$P_{n+1} = 2 \sum_{i=1}^n Q_i \quad \dots (3.3.5)$$

Fig. 3・3・1 (e)において剪断流の連続条件より次式が成立する。

$$\frac{R_1}{B} = \frac{S_1}{\alpha_1 D} \quad \dots (3.3.6)$$

$$\frac{R_i}{B} + \frac{S_{i-1}}{\alpha_{i-1} D} = \frac{S_i}{\alpha_i D} \quad (n \geq 2 \text{ のとき } , i=2, 3, \dots, n) \quad \dots (3.3.7)$$

但し、 $\alpha_n$  は次のように定義する。

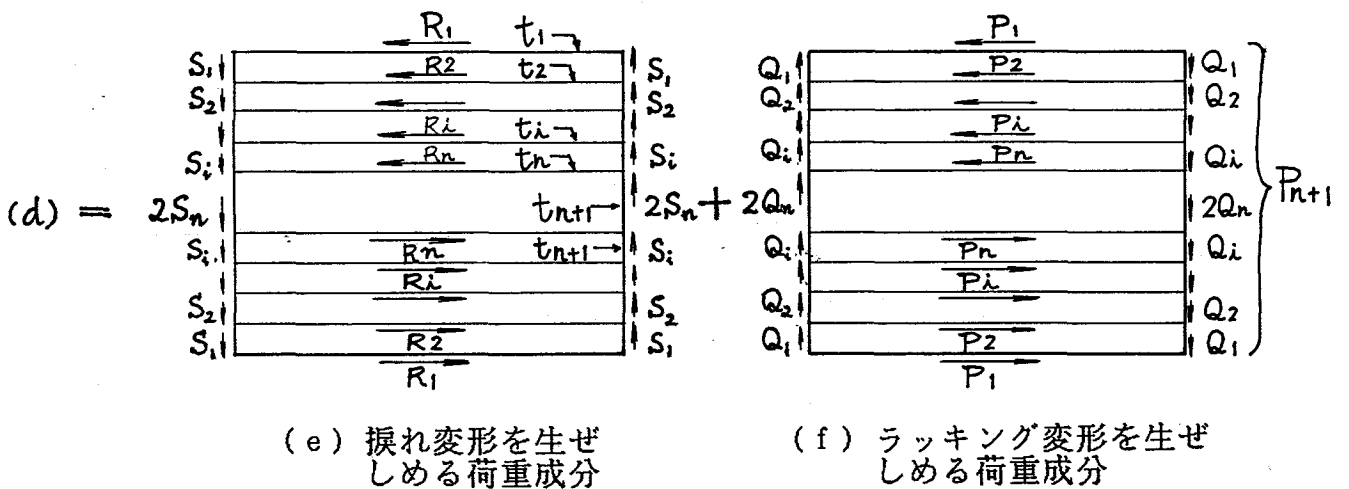
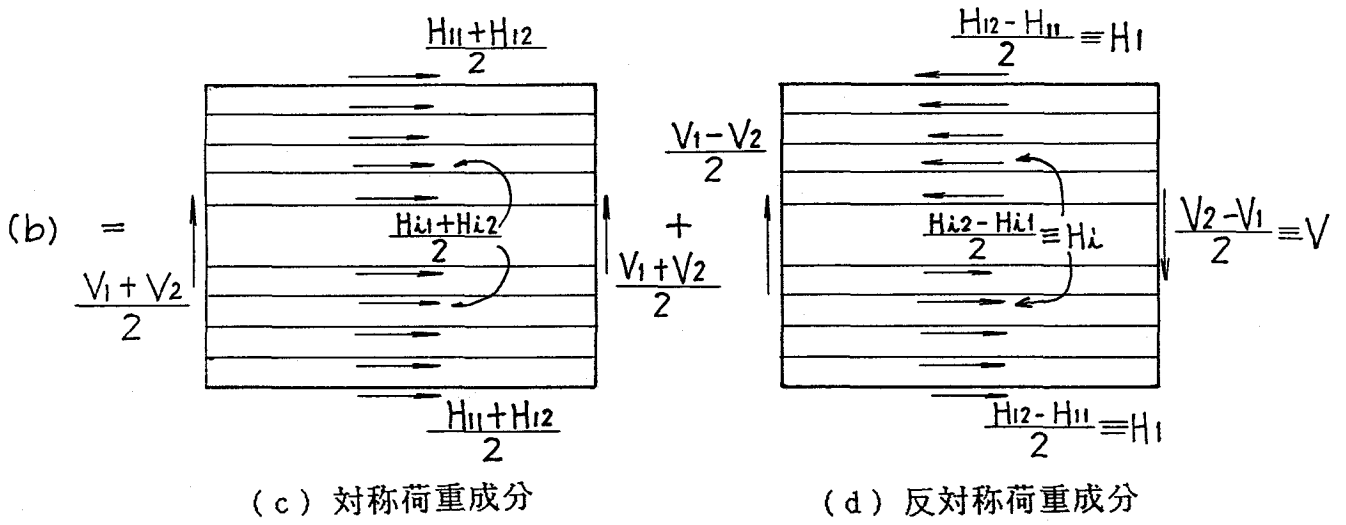
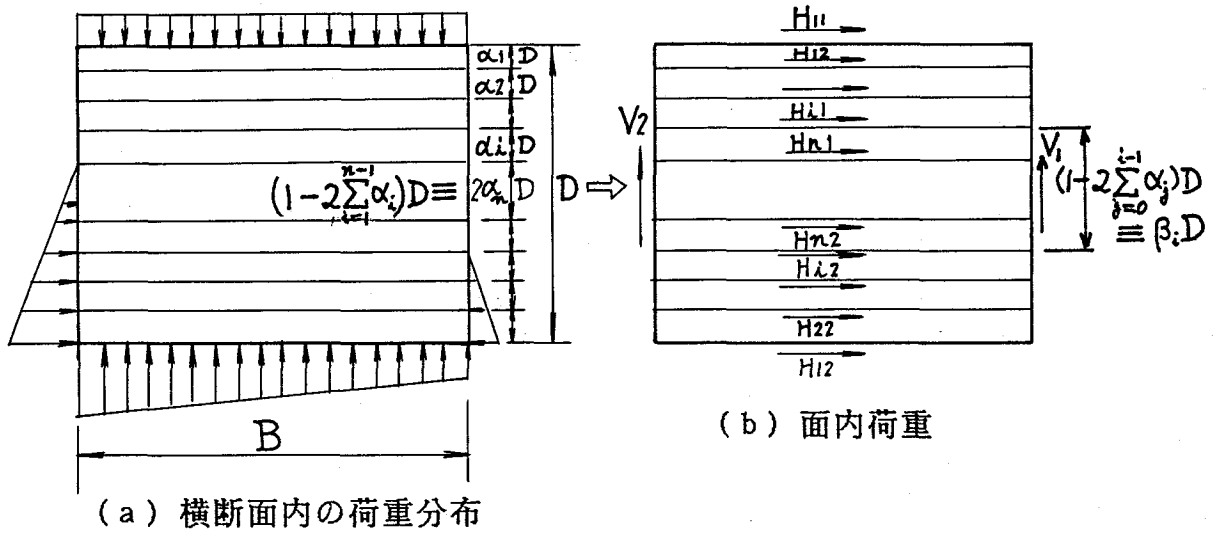


Fig. 3・3・1 多層甲板を有する船体横断面内の荷重の分解

$$\alpha_n = \frac{1}{2} - \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i \quad \dots (3.3.8)$$

ここに、

$$\alpha_0 = 0 \quad \dots (3.3.9)$$

とおく。(従って  $n=1$  のときは  $\alpha_1 = 0.5$  となる。)

また Fig. 3・3・1 (e) の振り角を  $\omega$  とすると次式が成立する。

$$\frac{R_i}{t_i} + 2 \frac{S_i}{t_{n+1}} - \frac{R_{i+1}}{t_{i+1}} = 2\alpha_i BDG\omega$$

( $n \geq 2$  のとき  $i=1, 2, \dots, n-1$ )  $\dots (3.3.10)$

$$\frac{R_n}{t_n} + 2 \frac{S_n}{t_{n+1}} = 2\alpha_n BDG\omega \quad \dots (3.3.11)$$

一方 Fig. 3・3・1 (f) のラッキング変形の場合は水平力によるモーメントと垂直力によるモーメントは等しい。即ち  $P_n$  によるモーメントと  $2Q_n$  によるモーメントの釣合より

$$\beta_n P_n D = 2Q_n B$$

同様に

$$\beta_i P_i D = 2Q_i B \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.12)$$

ここに、

$$\beta_i = 1 - 2 \sum_{j=0}^{i-1} \alpha_j \quad \dots (3.3.13)$$

$\beta_i$  は第  $i$  番目の甲板からこれと深さの 2 等分線に関して対称な位置にある甲板に至る距離と  $D$  との比を表す。

$H_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 及び  $V$  を既知数と考えると未知数は  $R_i$ ,  $P_i$ ,  $S_i$ ,  $Q_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),  $P_{n+1}$  及び  $\omega$  の  $4n+2$  個であり、式の数も (3・3・1), (3・3・2), (3・3・5) ~ (3・3・7), (3・3・10) ~ (3・3・12) の  $4n+2$  個であるから解くことができる。

(3.3.6) 及び  $i = 2, 3, \dots, i$  のときの (3.3.7) を辺々相加え  
ると、

$$\frac{1}{B} \sum_{j=1}^i R_j = \frac{S_i}{\alpha_i D}$$

$$S_i = \frac{\alpha_i D}{B} \sum_{j=1}^i R_j \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.14)$$

(3.3.5) 及び (3.3.12) より

$$P_{n+1} = \frac{D}{B} \sum_{i=1}^n \beta_i P_i \quad \dots (3.3.15)$$

(3.3.14) より

$$\sum_{i=1}^n S_i = \frac{D}{B} \{ \alpha_1 R_1 + \alpha_2 (R_1 + R_2) + \dots + \alpha_n (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \}$$

$$\text{右辺} = \frac{D}{B} \sum_{i=1}^n R_i \sum_{j=i}^n \alpha_j = \frac{D}{B} \sum_{i=1}^n R_i \left( \frac{1}{2} - \sum_{j=0}^{i-1} \alpha_j \right) = \frac{D}{2B} \sum_{i=1}^n \beta_i R_i$$

$$\therefore \sum_{i=1}^n S_i = \frac{D}{2B} \sum_{i=1}^n \beta_i R_i \quad \dots (3.3.16)$$

(3.3.15) 及び (3.3.16) を (3.3.2) に代入し、

$$\frac{D}{B} \sum_{i=1}^n \beta_i (P_i - R_i) = V \quad \dots (3.3.17)$$

(3.3.1) より

$$R_i = H_i - P_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.18)$$

(3.3.18) を (3.3.17) に代入し、

$$\frac{D}{B} \sum_{i=1}^n \beta_i (2P_i - H_i) = V$$

$$\frac{D}{B} \sum_{i=1}^n \beta_i P_i = \frac{1}{2} \left( V + \frac{D}{B} \sum_{i=1}^n \beta_i H_i \right) \quad \dots (3.3.19)$$

(3.3.15) と (3.3.19) より

$$P_{n+1} = \frac{1}{2} \left( V + \frac{D}{B_i} \sum_{i=1}^n \beta_i H_i \right) \quad \dots (3.3.20)$$

(3.3.14) を (3.3.10) 及び (3.3.11) に代入し、

$$\frac{R_i}{t_i} + \frac{2\alpha_i D}{B t_{n+1}} \sum_{j=1}^i R_j - \frac{R_{i+1}}{t_{i+1}} = 2\alpha_i B D G \omega$$

(n ≥ 2 のとき, i=1, 2, ..., n-1)      ... (3.3.21)

$$\frac{R_n}{t_n} + \frac{2\alpha_n D}{B t_{n+1}} \sum_{j=1}^n R_j = 2\alpha_n B D G \omega \quad \dots (3.3.22)$$

未知数は  $R_i$ ,  $P_i$ ,  $S_i$ ,  $Q_i$ , 及び  $\omega$  の  $4n+1$  個であり、式の数も (3.3.1), (3.3.12), (3.3.14), (3.3.19), (3.3.21) 及び (3.3.22) の  $4n+1$  個なので解くことができる。(3.3.21) 及び (3.3.22) は次のように書き表すことができる。

$$A X = B \cdot G B D t_{n+1} \omega \quad \dots (3.3.23)$$

ここに、

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{pmatrix} \quad \dots (3.3.24)$$

$$X = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ R_n \end{pmatrix} \quad \dots (3.3.25)$$

$$B = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ B_n \end{pmatrix} \quad \dots (3.3.26)$$

$$A_{ij} = \frac{2\alpha_j D}{B} \quad (j=1,2, \dots, i-1)$$

$$A_{ii} = \frac{t_{n+1}}{t_i} + \frac{2\alpha_i D}{B}$$

$$A_{i,i+1} = -\frac{t_{n+1}}{t_{i+1}}$$

... (3.3.27)

$$A_{ni} = \frac{2\alpha_n D}{B}$$

$$A_{nn} = \frac{t_{n+1}}{t_n} + \frac{2\alpha_n D}{B}$$

( $i=1,2, \dots, n-1$  但し  $n \geq 2$  の場合のみ)

上記以外の  $A_{ij}=0$

$$B_i = 2\alpha_i \quad (i=1,2, \dots, n)$$

(3.3.23) より

$$\mathbf{X} = \text{GBDt}_{n+1} \omega \cdot \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \quad \dots (3.3.28)$$

$$\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_n \end{pmatrix}$$

... (3.3.29)

とおくと

$$R_i = \text{GBDt}_{n+1} \omega \lambda_i \quad (i=1,2, \dots, n) \quad \dots (3.3.30)$$

(3.3.1) 及び (3.3.30) より

$$P_i = H_i - \text{GBDt}_{n+1} \omega \lambda_i \quad (i=1,2, \dots, n) \quad \dots (3.3.31)$$



(3.3.31) を (3.3.19) に代入し

$$\frac{D}{B} \sum_{i=1}^n \beta_i H_i - \frac{D}{B} \text{GBDt}_{n+1} \omega \sum_{i=1}^n \beta_i \lambda_i = \frac{1}{2} \left( V + \frac{D}{B} \sum_{i=1}^n \beta_i H_i \right)$$

$$\therefore \text{GBDt}_n \omega = \frac{1}{2 \sum_{i=1}^n \beta_i \lambda_i} \left( \sum_{i=1}^n \beta_i H_i - \frac{B}{D} V \right) \dots (3.3.32)$$

(3.3.32) を (3.3.31) に代入し

$$P_i = H_i + = \frac{\lambda_i}{2 \sum_{j=1}^n \beta_j \lambda_j} \left( \frac{B}{D} V - \sum_{j=1}^n \beta_j H_j \right) \\ (i=1, 2, \dots, n) \dots (3.3.33)$$

### 3・3・2 ラッキング変形解析

第2章では下層甲板のない箱形梁に中央集中荷重が加わる場合のラッキング変形に関する基礎理論を展開し厳密解のみならず近似解でも十分に実用に供しうることを示した。ここではこの近似解を多層甲板を有する箱形梁に拡張する。

#### (1) 横隔壁が存在せず横桁リングが存在する場合

##### (a) 計算モデル

Fig. 3・3・2の如く両端で単純支持され、多層甲板を有する上下対称の箱形梁にラッキング変形を生ぜしめる荷重 $P_1, P_2, \dots, P_{n+1}$ が加わっているとす。またこの箱形梁は横桁リングで防撓されているが横隔壁はないものとする。

横桁リングの影響を考慮するためこれを分布バネにおきかえる。即ち1横桁心距の輪切り断面をとり、これをFig. 3・3・3 (a)の如く支持し、甲板①につく横桁に $N_i$ なる水平力を加えたときこの甲板横桁の変位を $\delta_i$ 、甲板②につく横桁の支点に生ずる反力を $N_j$ とし、横桁心距を $S$ とすると、次のようなバネ定数が定義される。

$$\left. \begin{aligned} k_{ii} &= \frac{N_i}{S\delta_i} \\ k_{ij} &= \frac{N_j}{S\delta_i} \end{aligned} \right\} \dots (3.3.34)$$

ここに $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n+1$

また船側横桁については同じ輪切り断面をFig. 3・3・3 (b)の如く支持し、船側横桁に垂直力 $N_{n+1}$ を加えたとき、作用点の変位を $2\delta_{n+1}$ 、甲板③につく横桁の支点に生ずる反力を $N_j$ とすると、次のようなバネ定数が定義される。

$$\left. \begin{aligned} k_{n+1, n+1} &= \frac{N_{n+1}}{S\delta_{n+1}} \\ k_{n+1, j} &= \frac{N_j}{S\delta_{n+1}} \end{aligned} \right\} \dots (3.3.35)$$

ここに  $j = 1, 2, \dots, n$

Fig. 3 · 3 · 3 (a) の  $N_i$  及び同図 (b) の  $N_{n+1}$  を既知数として他のパラメタを求め、これらを (3 · 3 · 34) 及び (3 · 3 · 35) に代入するとバネ定数  $k_{ij}$  を求めることができる。即ちバネ定数を  $E$  で除した無次元値  $k_{ij}/E$  は次の行列式より求めることができる。

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} \dots (3.3.36)$$

ここに

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \frac{k_{i_1}}{E} \\ \frac{k_{i_2}}{E} \\ \vdots \\ \frac{k_{i, n+1}}{E} \\ \frac{V_1}{ES\delta_i} \\ \frac{V_2}{ES\delta_i} \\ \vdots \\ \frac{V_n}{ES\delta_i} \end{bmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1, 2n+1} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2, 2n+1} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{2n+1, 1} & \dots & A_{2n+1, 2n+1} \end{bmatrix} \dots (3.3.37)$$

$$\dots (3.3.38)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_2 \\ B_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ B_{2n+1} \end{bmatrix} \quad \dots (3.3.39)$$

ここに  $A_i$  及び  $B_i$  は次のようになる。

$$A_{1,n+1} = -1$$

$$A_{1,n+1+j} = 2 \quad (j=1,2,\dots,n)$$

$$B_1 = 0$$

$$A_{2j} = \frac{D}{B} (1-2\delta_{i,n+1})(1-2\delta_{ji})B_j \quad (j=1,2,\dots,n)$$

$$A_{2,n+1} = 1$$

$$B_2 = 0$$

$$A_{2+m,\ell} = \frac{D^2}{B^2} (1-2\delta_{\ell i}) \sum_{j=p}^n \frac{b^{I_n}}{b^{I_{n+1},j}} \alpha_j$$

$$\times \left\{ 6 \left( \sum_{k=\ell-1}^{j-1} \alpha_k - \alpha_{\ell-1} \right) (-\beta_m \delta_{jn} + 2 \sum_{k=m-1}^{j-1} \alpha_k - 2\alpha_{m-1}) \right.$$

$$\left. + 3\alpha_j (-\beta_m \delta_{jn} + 2 \sum_{k=m-1}^{j-1} \alpha_k - 2\alpha_{m-1} + 2 \sum_{k=\ell-1}^{j-1} \alpha_k - 2\alpha_{\ell-1}) \right.$$

$$\left. + 4\alpha_j^2 \right\}$$

$$A_{2+m,n+1+\ell} = (1-2\delta_{i,n+1}) \left\{ \frac{6D}{B} \sum_{j=p}^n \frac{b^{I_n}}{b^{I_{n+1},j}} \alpha_j (-\beta_m \delta_{jn} \right.$$

$$\left. + 2 \sum_{k=m-1}^{j-1} \alpha_k - 2\alpha_{m-1} + \alpha_j \right\} - \beta_m \delta_{\ell n}$$

$$B_{2+m} = -\frac{24b^{I_n}}{B^2DS} \delta_{mi} + \frac{24b^{I_n}}{B^3S} \beta_m \delta_{i,n+1}$$

$$(m=1,2,\dots,n ; \ell=1,2,\dots,n)$$

$$A_{2+n+m, \ell} = 3 \frac{D^2}{B^2} (1-2\delta_{i, n+1}) (1-2\delta_{\ell i})$$

$$\times \sum_{j=p}^n \frac{b^I_n}{b^{I_{n+1}, j}} (1-\delta_{j_n}) \alpha_j (2 \sum_{k=\ell-1}^{j-1} \alpha_k - 2\alpha_{\ell-1} + \alpha_j)$$

$$A_{2+n+m, n+1+\ell} = 6 \frac{D}{B} \sum_{j=p}^n \frac{b^I_n}{b^{I_{n+1}, j}} (1-\delta_{j_n}) \alpha_j + \frac{b^I_n}{b^{I_m}} \delta_{\ell m} - \delta_{\ell n}$$

$$B_{2+n+m} = 0$$

( $n \geq 2$  のとき,  $m=1, 2, \dots, n-1; \ell=1, 2, \dots, n$ )

上記以外の  $A_{ij} = 0$

$$p = m \dots 1 \leq \ell \leq m$$

$$= \ell \dots m+1 \leq \ell \leq n$$

... (3.3.40)

ここに  $\delta_{ij}$  は Kronecker の記号である。  $i = i$  として (3.3.36) より  $k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{i, n+1}$  が得られ、  $i$  を 1 から  $n+1$  まで変えて同様の手順を繰り返せばすべての  $k_{ij}$  が求められる。

相反定理により  $k_{ij} = k_{ji}$  ... (3.3.41)

Fig. 3.3.3 は箱形梁から横桁リングが受ける力を表すが、作用反作用の法則により、箱形梁は横桁リングから Fig. 3.3.3 とは逆向きの力を受ける。従って Fig. 3.3.2 の箱形梁を各要素に分割したとき上方の甲板 (i) 及び右舷側船側外板 (n+1) に加わる内力は Fig. 3.3.4 のようになる。上下・左右の変形は反対称になるので、今後は上半分右舷側のみを考えることとする。

(b) 力の平衡条件

Fig. 3.3.4 にて横桁リングの反力中剪断撓みからくる成分を無視すると次式が成立する。

$$\frac{dF_i}{dx} = - \sum_{j=1}^{n+1} (1-2\delta_{ji}) k_{ji} Y_j \quad (i=1, 2, \dots, n+1)$$

... (3.3.42)

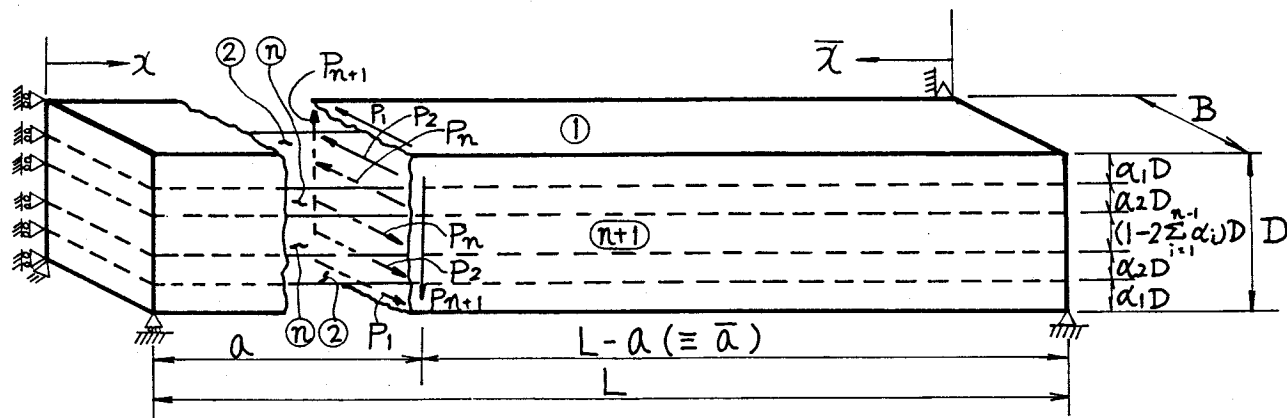


Fig. 3.3.2 多層甲板を有する上下対称の箱形梁

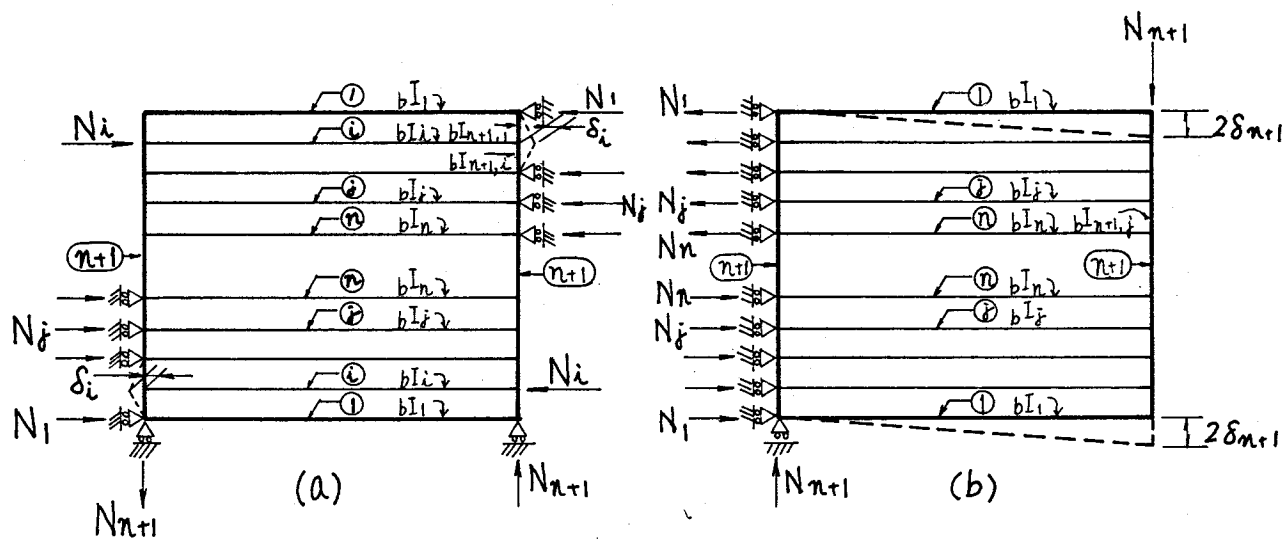


Fig. 3.3.3 横桁リングの等価バネ定数

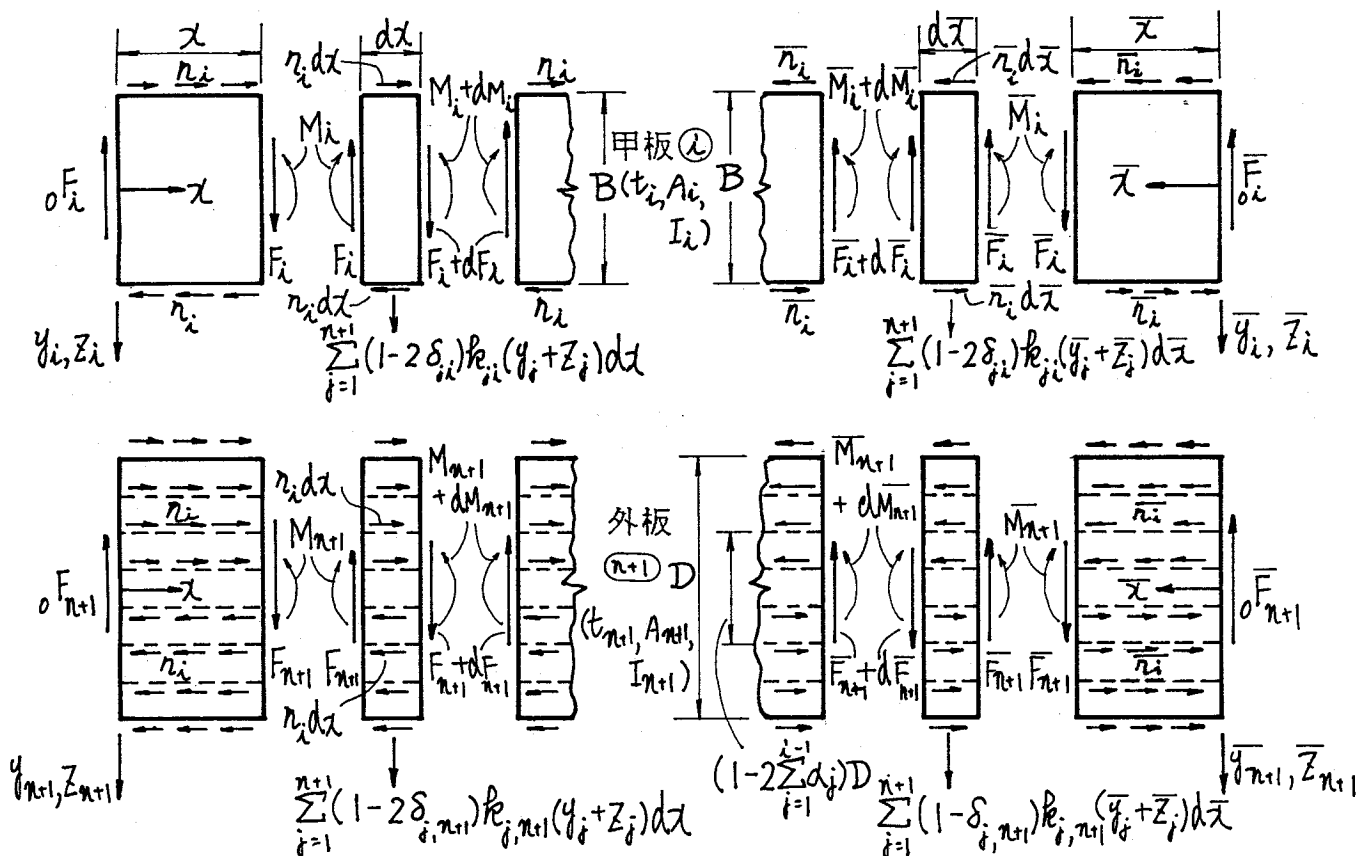


Fig. 3.3.4 箱形梁の構成要素

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_i}{dx} &= F_i + r_i B, \quad (i=1, 2, \dots, n) \\ \frac{dM_{n+1}}{dx} &= F_{n+1} + \sum_{i=1}^n \beta_i r_i D \end{aligned} \right\} \dots (3.3.43)$$

ここに、

$y_j$  : 曲げ変位

$z_j$  : 剪断変位

$\delta_{ij}$  : Kronecker の記号

$$\beta_i = (1 - 2 \sum_{j=0}^{i-1} \alpha_j) (1 - \delta_{i, n+1}) - \frac{B}{D} \delta_{i, n+1} \dots (3.3.44)$$

なお (3.3.42) 及び (3.3.43) とも  $0 \leq x \leq a$  に対して成立する。  
 $a < x \leq L$  に対しては (3.3.42) 及び (3.3.43) において  $x \rightarrow \bar{x}$ ,  $a \rightarrow \bar{a}$ ,  $F_i \rightarrow \bar{F}_i$ ,  $M_i \rightarrow \bar{M}_i$ ,  $y_i \rightarrow \bar{y}_i$ ,  $z_i \rightarrow \bar{z}_i$ ,  $r_i \rightarrow \bar{r}_i$  とおきかえればよいので、しばらくは  $0 \leq x \leq a$  に対する式を展開することとする。

### (c) 曲げ変形の基本式

まず曲げ変位  $y_i$  と曲げモーメント  $M_i$  の間には次式が成立する。

$$EI_i y_i'' = -M_i \quad (i=1, 2, \dots, n+1) \dots (3.3.45)$$

$$\therefore EI_i y_i'''' = -M_i'' \quad (i=1, 2, \dots, n+1)$$

(3.3.42) 及び (3.3.43) を代入し、

$$\left. \begin{aligned} EI_i y_i'''' &= \sum_{j=1}^{n+1} (1 - 2\delta_{ji}) k_{ji} y_j - r_i B \quad (i=1, 2, \dots, n) \\ EI_{n+1} y_{n+1}'''' &= \sum_{j=1}^{n+1} (1 - 2\delta_{j, n+1}) k_{j, n+1} y_j - \sum_{i=1}^n \beta_i r_i D \end{aligned} \right\} \dots (3.3.46)$$

(d) 曲げ歪の連続条件

船体の中立面より上方にある甲板 (i) の右舷船側における曲げ歪は次のようになる

$$\epsilon_i = -\frac{B}{2} y_i'' \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

また右舷側船側外板 (n+1) の船体中立面より上方の甲板 (i) の位置における曲げ歪  $\epsilon_{n+1, i}$  は次のようになる。

$$\epsilon_{n+1, i} = \frac{1}{2} \beta_i D y_{n+1}'' \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

曲げ歪の連続条件より  $\epsilon_i = \epsilon_{n+1, i}$  なので次式が成立する。

$$-\frac{B}{2} y_i'' = \frac{1}{2} \beta_i D y_{n+1}'' \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.47)$$

i = 1 のときの上式より

$$y_{n+1}'' = -\frac{B}{D} y_1'' \quad \dots (3.3.48)$$

(3.3.47) を (3.3.48) に代入し、

$$y_i'' = \beta_i y_1'' \quad (i=2, 3, \dots, n)$$

上式と (3.3.47) をまとめて次のように表すことができる。

$$y_i'' = \beta_i y_1'' \quad (i=1, 2, \dots, n+1) \quad \dots (3.3.49)$$

(e) 曲げ変形量の決定

(3.3.46) を 2 回微分して

$$EI_i y_i^{VI} = \sum_{j=1}^{n+1} (1-2\delta_{ji}) k_{ji} y_j'' - r_i'' B \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

$$EI_{n+1} y_{n+1}^{VI} = \sum_{j=1}^{n+1} (1-2\delta_{j, n+1}) k_{j, n+1} y_j'' - \sum_{i=1}^n \beta_i r_i'' D$$



(3.3.47) 及び (3.3.48) を代入し、

$$\left. \begin{aligned} \beta_i EI_i Y_1^{VI} &= \left\{ \sum_{j=1}^n (1-2\delta_{ji}) k_{ji} \beta_j - k_{n+1,i} \frac{B}{D} \right\} Y_1'' - r_i' B \\ &\quad (i=1,2,\dots,n) \\ -\frac{B}{D} EI_{n+1} Y_1^{VI} &= \left\{ \sum_{j=1}^n k_{j,n+1} \beta_j + k_{n+1,n+1} \frac{B}{D} \right\} Y_1'' - \sum_{i=1}^n \beta_i r_i' D \\ &\quad \dots (3.3.50) \end{aligned} \right\}$$

Fig. 3.3.3 (a) においてモーメントの平衡条件より次式が成立する。

$$\sum_{j=1}^n (1-2\delta_{ji}) N_j \beta_j D = -N_{n+1} B \quad (i=1,2,\dots,n)$$

(3.3.35) より

$$\sum_{j=1}^n (1-2\delta_{ji}) k_{ij} \beta_j D = -k_{i,n+1} B \quad (i=1,2,\dots,n)$$

(3.3.41) より

$$\sum_{j=1}^n (1-2\delta_{ji}) k_{ji} \beta_j = -k_{n+1,i} \frac{B}{D} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad \dots (3.3.51)$$

同様に Fig. 3.3.3 (b) より

$$\sum_{j=1}^n N_j \beta_j D = N_{n+1} B$$

(3.3.35) より

$$\sum_{j=1}^n k_{n+1,j} \beta_j D = k_{n+1,n+1} B$$

(2.2.41) より

$$\sum_{j=1}^n k_{j,n+1} \beta_j = k_{n+1,n+1} \frac{B}{D} \quad \dots (3.3.52)$$

(3.3.50) の第1式及び第2式にそれぞれ (3.3.51) 及び (3.3.52) を代入し、

$$\beta_i EI_i Y_1^{VI} = -2k_{n+1,i} \frac{B}{D} Y_1'' - r_i' B \quad (i=1,2,\dots,n) \dots (3.3.53)$$

$$-\frac{B}{D} EI_{n+1} Y_1^{VI} = 2k_{n+1,n+1} \frac{B}{D} Y_1'' - \sum_{i=1}^n \beta_i r_i' B \dots (3.3.54)$$

(3.3.53) より

$$r_i' = -\beta_i \frac{EI_i}{B} Y_1^{VI} - 2 \frac{k_{n+1,i}}{D} Y_1'' \quad (i=1,2,\dots,n) \dots (3.3.55)$$

(3.3.55) を (3.3.54) に代入し、

$$-\frac{B}{D} EI_{n+1} Y_1^{VI} = 2k_{n+1,n+1} \frac{B}{D} Y_1'' + \frac{D}{B} \sum_{i=1}^n EI_i Y_1^{VI} + 2 \sum_{i=1}^n k_{n+1,i} \beta_i Y_1''$$

$$\left( \frac{B}{D} EI_{n+1} + \frac{D}{B} \sum_{i=1}^n \beta_i^2 EI_i \right) Y_1^{VI} + 2 \left( \sum_{i=1}^n k_{n+1,i} \beta_i + k_{n+1,n+1} \frac{B}{D} \right) Y_1'' = 0$$

(3.3.52) を代入し

$$\left( \frac{D}{B} \sum_{i=1}^n \beta_i^2 EI_i + \frac{B}{D} EI_{n+1} \right) Y_1^{VI} + 4 \frac{B}{D} k_{n+1,n+1} Y_1'' = 0$$

従って次のように表すことができる。

$$Y_1^{VI} + 4\beta^4 Y_1'' = 0 \quad \dots (3.3.56)$$

ここに、

$$\beta^4 = \frac{k_{n+1,n+1}}{EI_e} \quad \dots (3.3.57)$$

$$I_e = \left( \frac{D}{B} \right)^2 \sum_{i=1}^n \beta_i^2 I_i + I_{n+1} \quad \dots (3.3.58)$$

(3.3.55) を (3.3.56) より、

$$r_i'' = (4\beta^4 \beta_i \frac{EI_i}{B} - 2 \frac{kn+1, i}{D}) Y_i'' \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

(3.3.57) を代入し、

$$r_i'' = \gamma_i Y_i'' \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.59)$$

ここに、

$$\gamma_i = 4\beta_i \frac{I_i}{I_e} \frac{kn+1, n+1}{B} - 2 \frac{kn+1, i}{D} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.60)$$

(3.3.56) の解は次のようになる。

$$y_1 = C_{11} + C_{21}x + \Theta(\beta x) \quad \dots (3.3.61)$$

ここに、 $0 \leq x \leq a$ ,  $C_{11}$ ,  $C_{21}$  は積分定数

$$\Theta(\beta x) = C_3 X(\beta x) + C_4 Y(\beta x) + C_5 Z(\beta x) + C_6 W(\beta x) \quad \dots (3.3.62)$$

$$\left. \begin{aligned} X(\beta x) &= \cosh \beta x \cos \beta x \\ Y(\beta x) &= \cosh \beta x \sin \beta x \\ Z(\beta x) &= \sinh \beta x \cos \beta x \\ W(\beta x) &= \sinh \beta x \sin \beta x \end{aligned} \right\} \quad \dots (3.3.63)$$

(3.3.49) に (3.3.61) を代入して解くと

$$Y_i = C_{1i} + C_{2i}x + \beta_i \Theta(\beta x) \quad (i=1, 2, \dots, n+1) \quad (3.3.64)$$

ここに、 $0 \leq x \leq a$ ,  $C_{1i}$ ,  $C_{2i}$  は積分定数

(3.3.59) より

$$r_i = D_{1i} + D_{2i}x + D_{3i}x^2 + \frac{Y_i}{2\beta} \Phi(\beta x) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.65)$$

ここに、 $0 \leq x \leq a$ ,  $D_{1i}$ ,  $D_{2i}$ ,  $D_{3i}$ は積分定数

$$\begin{aligned} \Phi(\beta x) = & (-C_4 + C_5)X(\beta x) + (C_3 + C_6)Y(\beta x) \\ & + (C_3 - C_6)Z(\beta x) + (C_4 + C_5)W(\beta x) \quad \dots (3.3.66) \end{aligned}$$

以上は  $0 \leq x \leq a$  に対する式であるが、 $a < x \leq L$  即ち  $0 \leq \bar{x} < \bar{a}$  に対しては次式が成立する。

$$\bar{y}_i = \bar{C}_{1i} + \bar{C}_{2i}\bar{x} + \beta_i \bar{\Theta}(\beta \bar{x}) \quad (i=1, 2, \dots, n+1) \quad \dots (3.3.67)$$

$$\begin{aligned} \bar{r}_i = & \bar{D}_{1i} + \bar{D}_{2i}\bar{x} + \bar{D}_{3i}\bar{x}^2 + \frac{\gamma_i}{2\beta} \bar{\Phi}(\beta \bar{x}) \\ & (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.68) \end{aligned}$$

ここに、

$$\bar{\Theta}(\beta \bar{x}) = \bar{C}_3 X(\beta \bar{x}) + \bar{C}_4 Y(\beta \bar{x}) + \bar{C}_5 Z(\beta \bar{x}) + \bar{C}_6 W(\beta \bar{x}) \quad \dots (3.3.69)$$

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}(\beta \bar{x}) = & (-\bar{C}_4 + \bar{C}_5)X(\beta \bar{x}) + (\bar{C}_3 + \bar{C}_6)Y(\beta \bar{x}) \\ & + (\bar{C}_3 - \bar{C}_6)Z(\beta \bar{x}) + (\bar{C}_4 + \bar{C}_5)W(\beta \bar{x}) \quad \dots (3.3.70) \end{aligned}$$

以上の算式中には次の  $10n + 12$ 個の積分定数が含まれている。

$$C_{1i}, C_{2i} (i=1, 2, \dots, n+1); C_3, C_4, C_5, C_6$$

$$D_{1i}, D_{2i}, D_{3i}, (i=1, 2, \dots, n)$$

$$\bar{C}_{1i}, \bar{C}_{2i} (i=1, 2, \dots, n+1); \bar{C}_3, \bar{C}_4, \bar{C}_5, \bar{C}_6$$

$$\bar{D}_{1i}, \bar{D}_{2i}, \bar{D}_{3i}, (i=1, 2, \dots, n)$$

これらの積分定数は以下に示す端末条件及び  $x = a$  と  $\bar{x} = \bar{a}$  の連続条件から定めることができる。

(i) 端末条件 ( $x = 0$ )

$$Y_i(0) = 0, \quad M_i(0) = 0, \quad F_i(0) = {}_0F_i \quad (i=1, 2, \dots, n+1)$$

(3.3.46) より

$$EI_i Y_i''(0) = \sum_{j=1}^{n+1} (1-2\delta_{ji}) k_{ji} Y_j(0) - r_i'(0) B \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

$$EI_{n+1} Y_{n+1}''(0) = \sum_{j=1}^{n+1} (1-2\delta_{j,n+1}) k_{j,n+1} Y_j(0) - \sum_{i=1}^n \beta_i r_i'(0) D$$

$$EI_i Y_i^V(0) = \sum_{j=1}^{n+1} (1-2\delta_{ji}) k_{ji} Y_j'(0) - r_i''(0) B \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

$$EI_{n+1} Y_{n+1}^V(0) = \sum_{j=1}^{n+1} (1-2\delta_{j,n+1}) k_{j,n+1} Y_j'(0) - \sum_{i=1}^n \beta_i r_i''(0) D \quad \dots (3.3.71)$$

(ii) 端末条件 ( $\bar{x} = 0$ )

$$\bar{Y}_i(0) = 0, \quad \bar{M}_i(0) = 0, \quad \bar{F}_i(0) = {}_0\bar{F}_i \quad (i=1, 2, \dots, n+1)$$

$$EI_i \bar{Y}_i''(0) = \sum_{j=1}^{n+1} (1-2\delta_{ji}) k_{ji} \bar{Y}_j(0) - \bar{r}_i'(0) B \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

$$EI_{n+1} \bar{Y}_{n+1}''(0) = \sum_{j=1}^{n+1} (1-2\delta_{j,n+1}) k_{j,n+1} \bar{Y}_j(0) - \sum_{i=1}^n \beta_i \bar{r}_i'(0) D$$

$$EI_i \bar{Y}_i^V(0) = \sum_{j=1}^{n+1} (1-2\delta_{ji}) k_{ji} \bar{Y}_j'(0) - \bar{r}_i''(0) B \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

$$EI_{n+1}\bar{Y}_{n+1}^V(0) = \sum_{j=1}^{n+1} (1-2\delta_{j,n+1})k_{j,n+1}\bar{Y}_j'(0) - \sum_{i=1}^n \beta_i \bar{r}_i''(0)D \dots (3.3.72)$$

(iii) 連続条件 ( $x = a, \bar{x} = \bar{a}$ )

$$y_i(a) = \bar{y}_i(\bar{a}), \quad y_i'(a) = -\bar{y}_i'(a) \quad (i=1,2,\dots,n+1) \dots (3.3.73)$$

$$M_i(a) = \bar{M}_i(\bar{a}), \quad F_i(a) + \bar{F}_i(\bar{a}) + (1-2\delta_{i,n+1})P_i = 0 \quad (i=1,2,\dots,n+1) \dots (3.3.74)$$

これらのうち  $M_i(0) = 0$  ( $i = 1, 2, \dots, n+1$ ) は1個の式に帰着する。 $\bar{M}_i(0) = 0$  ( $i = 1, 2, \dots, n+1$ ) も別の1個の式に帰着する。また (3.3.74) は (3.3.71) ~ (3.3.73) より自動的に導かれる。従って上記 (3.3.71) ~ (3.3.74) の式の数  $10n+12$  となり、未知数の数に一致する。これを解くと次のようになる。

$$C_{1i} = \bar{C}_{1i} = 0 \quad (i=1,2,\dots,n+1) \dots (3.3.75)$$

$$C_{3i} = C_{6i} = \bar{C}_{3i} = \bar{C}_{6i} = 0 \quad (i=1,2,\dots,n) \dots (3.3.76)$$

$$C_i = -\frac{DBP_{n+1} T_i}{2Bk_{n+1,n+1} T_0} \quad (i=4,5) \dots (3.3.76)$$

$$\bar{C}_i = -\frac{DBP_{n+1} \bar{T}_i}{2Bk_{n+1,n+1} T_0} \quad (i=4,5) \dots (3.3.77)$$

$$D_{1i} = \frac{\bar{a}}{LB} \left( P_i - \frac{k_{n+1,i}}{k_{n+1,n+1}} P_{n+1} \right) \quad (i=1,2,\dots,n) \dots (3.3.78)$$

$$\bar{D}_{1i} = \frac{a}{LB} \left( P_i - \frac{k_{n+1,i}}{k_{n+1,n+1}} P_{n+1} \right) \quad (i=1,2,\dots,n) \dots (3.3.79)$$

$$\begin{aligned}
T_0 &= \sinh^2 \beta L + \sin^2 \beta L \\
T_i &= (-1)^{i-1} \cosh \beta L \cos \beta a \cosh \beta \bar{a} + \sinh \beta L \sin \beta a \cosh \beta \bar{a} \\
&\quad + (-1)^i \cos \beta L \cosh \beta a \cos \beta \bar{a} - \sin \beta L \sinh \beta a \cos \beta \bar{a} \\
\bar{T}_i &= (-1)^{i-1} \cosh \beta L \cosh \beta a \cos \beta \bar{a} + \sinh \beta L \cosh \beta a \sin \beta \bar{a} \\
&\quad + (-1)^i \cos \beta L \cos \beta a \cosh \beta \bar{a} - \sin \beta L \cos \beta a \sinh \beta \bar{a}
\end{aligned}
\quad (i=4,5) \quad \dots \quad (3.3.80)$$

(f) 剪断変形

$0 \leq x \leq a$  の範囲では剪断変位  $z_i$  と剪断力  $F_i$  の間に次の関係が存在する。

$$GA_i Z_i' = F_i \quad (i=1, 2, \dots, n+1) \quad \dots \quad (3.3.81)$$

これを解くと次のようになる。

$$\begin{aligned}
Z_i &= -\frac{B}{\beta^2 GA_i D} k_{n+1, i} (1 - 2\delta_{i, n+1}) \psi(\beta x) \\
&\quad - \frac{\bar{a}}{GA_i L} \left( P_i - \frac{k_{n+1, i}}{k_{n+1, n+1}} P_{n+1} \right) (1 - \delta_{i, n+1}) x \\
&\quad (i=1, 2, \dots, n+1) \quad \dots \quad (3.3.82)
\end{aligned}$$

ここに、

$$\psi(\beta x) = C_6 X(\beta x) - C_5 Y(\beta x) + C_4 Z(\beta x) - C_3 W(\beta x) \quad \dots \quad (3.3.83)$$

$a < x \leq L$  に対しては次のようになる。

$$\begin{aligned}
Z_i &= -\frac{B}{\beta^2 GA_i D} k_{n+1, i} (1 - 2\delta_{i, n+1}) \bar{\psi}(\beta \bar{x}) \\
&\quad - \frac{a}{GA_i L} \left( P_i - \frac{k_{n+1, i}}{k_{n+1, n+1}} P_{n+1} \right) (1 - \delta_{i, n+1}) \bar{x} \quad 0 \leq \bar{x} < \bar{a} \\
&\quad (i=1, 2, \dots, n+1) \quad \dots \quad (3.3.84)
\end{aligned}$$

ここに、

$$\bar{\psi}(\beta \bar{x}) = \bar{C}_6 X(\beta \bar{x}) - \bar{C}_5 Y(\beta \bar{x}) + \bar{C}_4 Z(\beta \bar{x}) - \bar{C}_3 W(\beta \bar{x}) \quad \dots \quad (3.3.85)$$

(g) 横断面の変形

Fig. 3・3・5 (a) の実線の如き断面が変形して破線のようになる。この時断面の変形を表す角として各甲板と船側外板のなす角の角変位  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$  をとる。

各甲板及び船側外板は曲げ変形及び剪断変形を生ずる。従って任意の横断面の甲板 (i) の変位は次のように表される。

$$w_i = y_i + z_i \quad (i=1, 2, \dots, n+1) \quad \dots (3.3.86)$$

ここに

$y_i$  : (3・3・64) で表される曲げ変位

$z_i$  : (3・3・84) で表される剪断変位

Fig. 3・3・5 (b) 及び (c) の如く単位ベクトル  $\mathbf{j}$  及び  $\mathbf{k}$  を定義する。A'B' 及び A'D' の属するベクトルを  $\mathbf{a}$  及び  $\mathbf{b}$  とすると次のようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \alpha_i D \mathbf{j} + (w_i - w_{i+1}) \mathbf{k} \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \\ &= 2\alpha_n D \mathbf{j} + 2w_n \mathbf{k} \quad (i=n) \end{aligned} \quad \dots (3.3.87)$$

$$\mathbf{b} = -2w_{n+1} \mathbf{j} + B \mathbf{k} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.88)$$

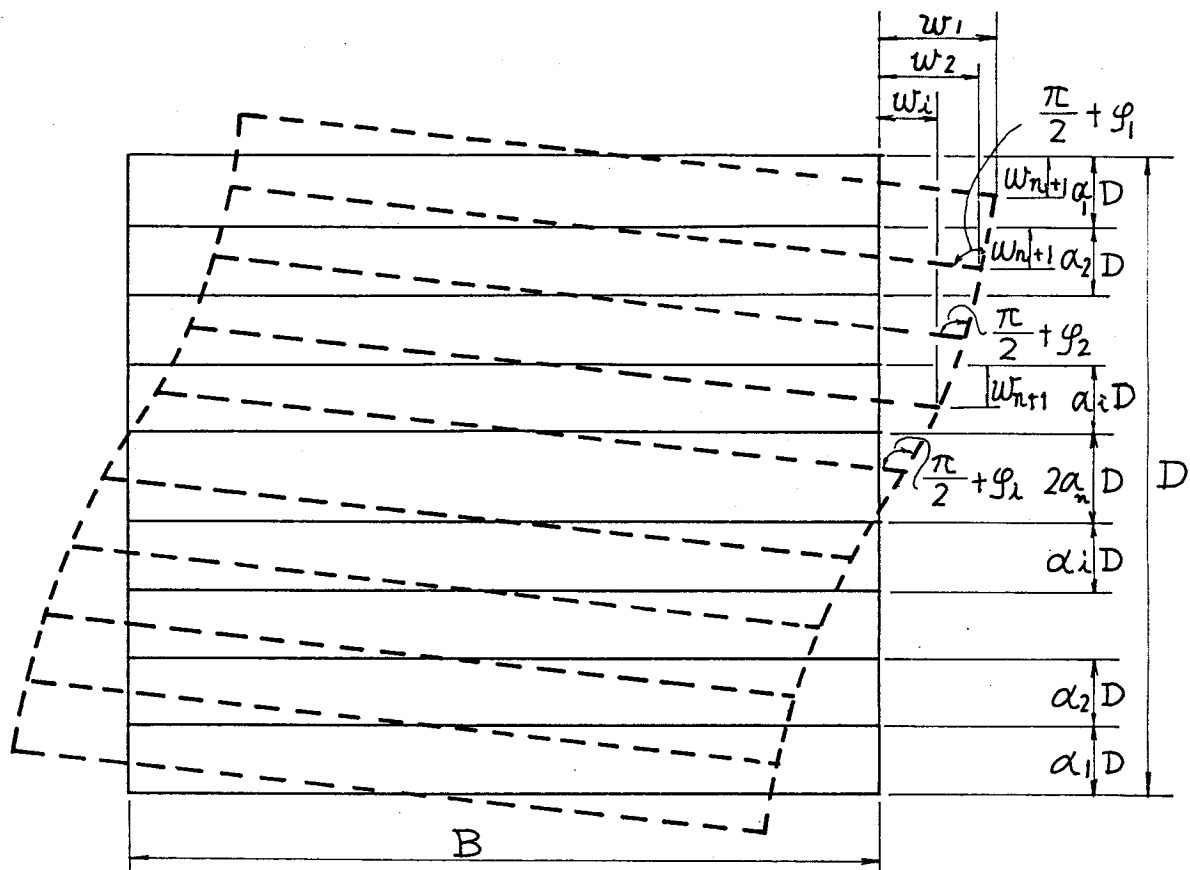
従って

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} &= -2\alpha_i D w_{n+1} + B(w_i - w_{i+1}) \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \\ &= -4\alpha_n D w_{n+1} + 2B w_n \quad (i=n) \end{aligned} \quad \dots (3.3.89)$$

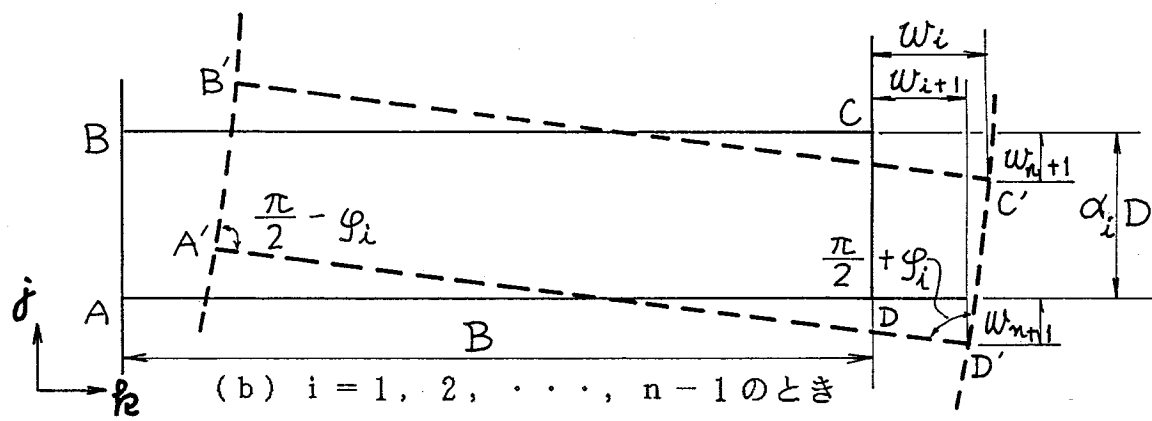
しかるに

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} &= |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi_i\right) \\ \therefore \varphi_i &\doteq \sin \varphi_i = -\frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}}{|\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}|} \\ \therefore \varphi_i &= \frac{1}{\alpha_i D} (w_i - w_{i+1}) - \frac{2}{B} w_{n+1} \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \\ &= \frac{1}{\alpha_n D} w_n - \frac{2}{B} w_{n+1} \quad (i=n) \end{aligned} \quad \dots (3.3.90)$$

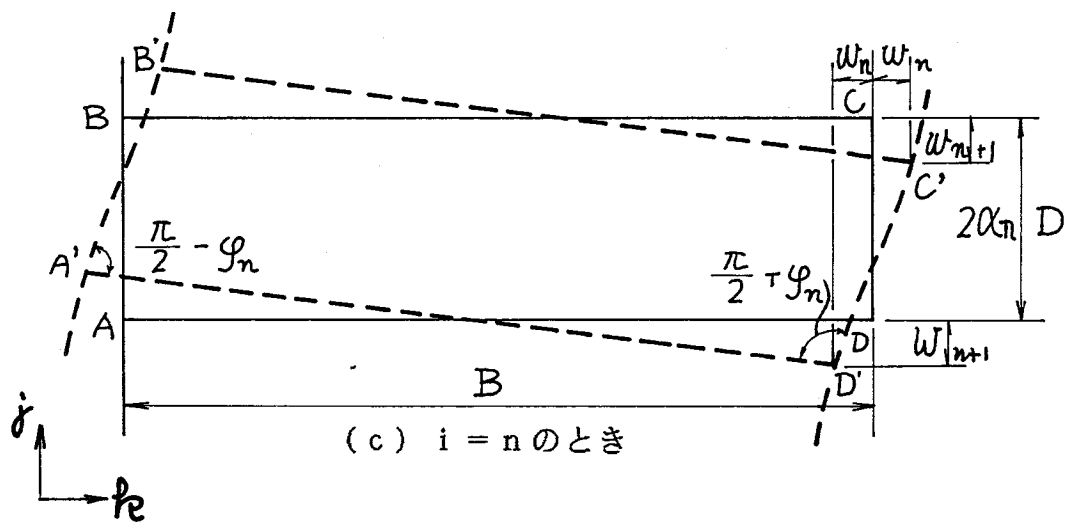




(a) 横断面全体の变形



(b)  $i = 1, 2, \dots, n-1$  のとき



(c)  $i = n$  のとき

Fig. 3 · 3 · 5 横断面の变形

(2) 横隔壁及び横桁リングが共に存在する場合

Fig. 3・3・6のように横隔壁 (j) が  $x = s_j$  の位置に設けられているとする。この状態は横隔壁をとり除き、その代わりに横隔壁からこの箱形梁に加えられる未知の相互反力  $Q_{1j}, Q_{2j}, \dots, Q_{n+1,j}$  をかけた Fig. 3・3・7 の如き状態であると見ることができる。但し横隔壁は  $j = 1, 2, \dots, m$  の  $m$  枚あるものとする。

Fig. 3・3・6から横隔壁を除いた Fig. 3・3・2の如き箱形梁において  $P_1, P_2, \dots, P_{n+1}$  のうち  $P_k = 1$  で他の全ての外力を 0 としたときの  $x = x$  における横隔壁第  $i$  層のラッキング変形量を  ${}_i\hat{\varphi}_k(x, a)$  とおくと全ての外力  $P_1, P_2, \dots, P_{n+1}$  が加わるときのラッキング変形量は次のように表される。

$$\varphi_i = {}_i\hat{\varphi}_1(x, a)P_1 + {}_i\hat{\varphi}_2(x, a)P_2 + \dots + {}_i\hat{\varphi}_{n+1}(x, a)P_{n+1} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

ここで影響関数  ${}_i\hat{\varphi}_k(x, a)$  を求めるため (1) で導いた結果を利用する。この場合は  $P_1, P_2, \dots, P_{n+1}$  は全て独立ではなく、(3・3・12) 及び Fig. 3・3・1 (f) よりこれらの間には次の関係がある。

$$P_{n+1} = \frac{D}{B} \sum_{i=1}^n P_i \beta_i \quad \dots (3.3.91)$$

即ち  $P_1, P_2, \dots, P_n$  を独立変数と見なすと  $P_{n+1}$  はこれから (3・3・91) によって求められる。従って  $P_1, P_2, \dots, P_n$  の  $n$  個の独立変数  $D$  のうち  $P_k = 1$  で他は 0 とすると  $P_{n+1} = \frac{D}{B} \beta_k$  となる。即ち  $P_k = 1, P_{n+1} = \frac{D}{B} \beta_k$  で他は 0 の場合を考え、このときの  $x = x$  における横断面第  $i$  層のラッキング変形量を  ${}_i\hat{\varphi}_k(x, a)$  とおくと全ての独立の外力  $P_1, P_2, \dots, P_n$  が加わるときのラッキング変形量  $\varphi_i$  は次のようになる。

$$\varphi_i = i\hat{\varphi}_1(x,a)P_1 + i\hat{\varphi}_2(x,a)P_2 + \dots + i\hat{\varphi}_n(x,a)P_n$$

$$(i=1,2,\dots,n) \quad \dots (3.3.92)$$

なおこのとき部材  $(n+1)$  には  $\sum_{k=1}^n \frac{D}{B} P_k \beta_k$  なる外力が加わり、(3.3.91) よりこれは  $P_{n+1}$  に等しい。

一方Fig. 3.3.7の  $x = s_\ell$  ( $\ell = 1, 2, \dots, m$ ) に加わる力  $Q_{1\ell}, Q_{2\ell}, \dots, Q_{n+1,\ell}$  ( $\ell = 1, 2, \dots, m$ ) の間にも後述の如く  $P_1, P_2, \dots, P_{n+1}$  と同じ関係があるので、これらが同時に加わったときの  $x = s_j$  における横断面第  $i$  層の角変位  $\varphi_i$  は次式で表される。

$$\varphi_i = i\hat{\varphi}_1(s_j,a)P_1 + i\hat{\varphi}_2(s_j,a)P_2 + \dots + i\hat{\varphi}_n(s_j,a)P_n$$

$$+ \sum_{\ell=1}^m i\hat{\varphi}_1(s_j,s_\ell)Q_{1\ell} + \sum_{\ell=1}^m i\hat{\varphi}_2(s_j,s_\ell)Q_{2\ell}$$

$$+ \dots + \sum_{\ell=1}^m i\hat{\varphi}_n(s_j,s_\ell)Q_{n\ell}$$

$$(i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad \dots (3.3.93)$$

一方横隔壁にはFig. 3.3.8の如き力が加わっている。

横隔壁  $(j)$  の第  $i$  層の板厚を  $t_{ji}$  とおくとこの横隔壁の角変位  $\varphi_i$  は次式で表される。

$$\varphi_i = \sum_{k=1}^i \frac{Q_{kj}}{GBt_{ji}} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m)$$

$$\dots (3.3.94)$$

また  $T_{ji}$  は次式で表される。

$$T_{ij} = \frac{\alpha_i D}{B} \sum_{k=1}^i Q_{kj} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m)$$

そして

$$Q_{n+1,j} = 2 \sum_{i=1}^n T_{ij}$$

であるから

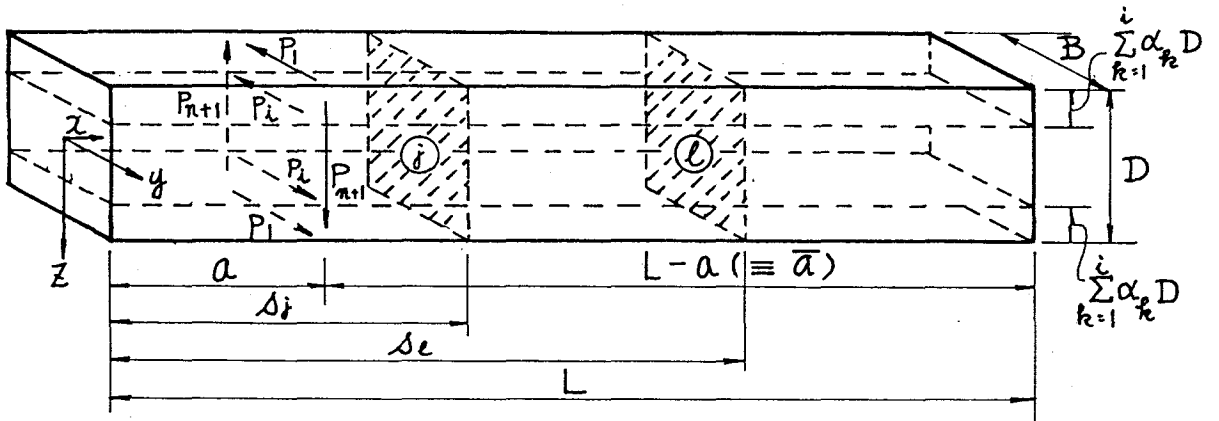


Fig. 3 · 3 · 6 横隔壁を有する箱形梁

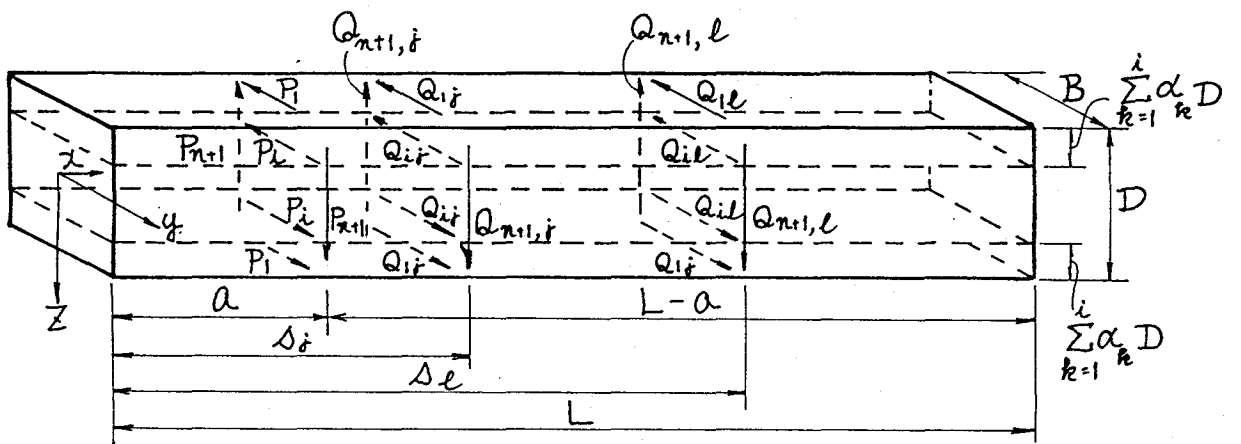


Fig. 3 · 3 · 7 横隔壁をとり除いた箱形梁

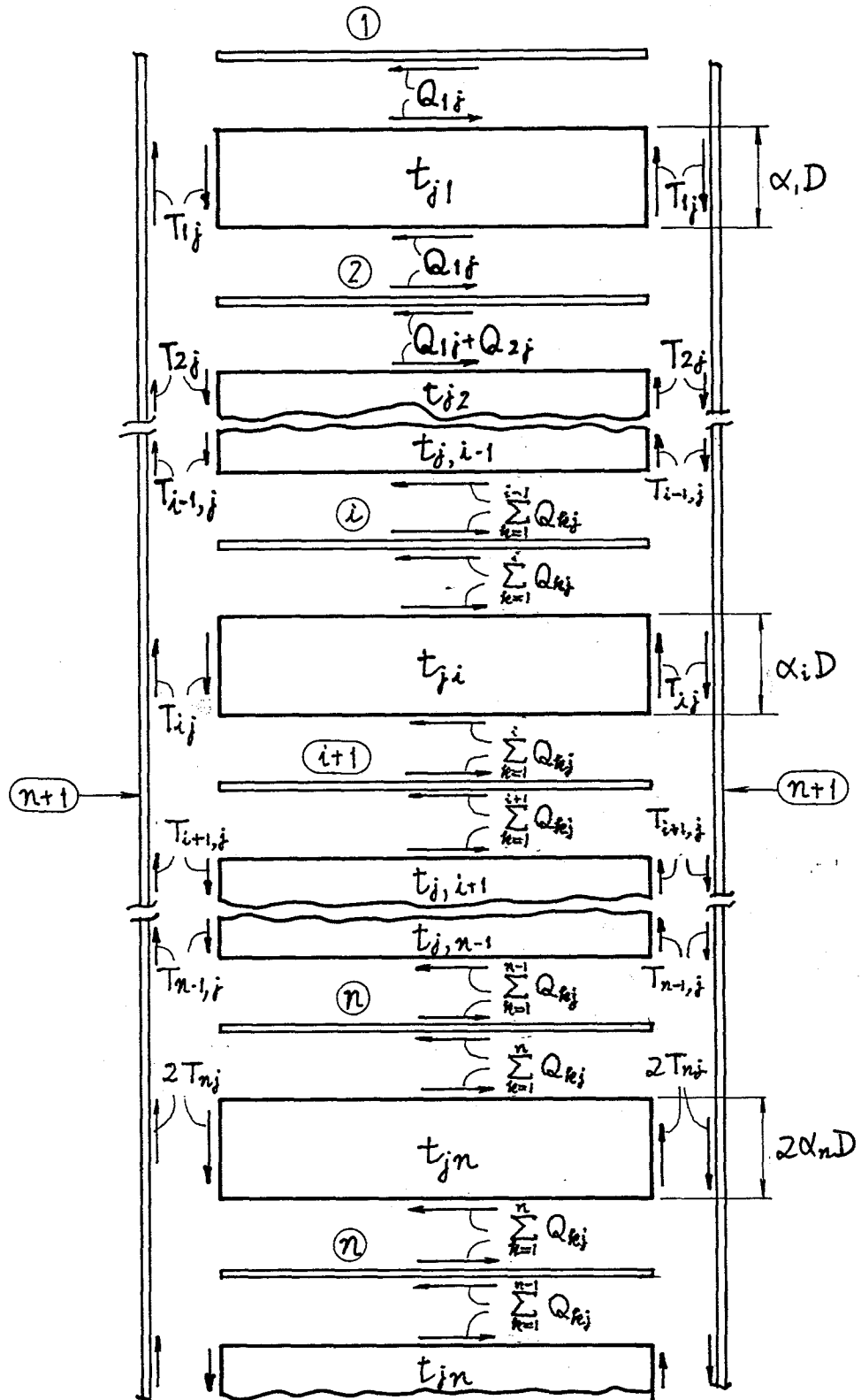


Fig. 3 · 3 · 8 横隔壁 (j) に働く力

$$Q_{n+1,j} = \frac{2D}{B} \sum_{i=1}^n \alpha_i \sum_{k=1}^i Q_{kj} \quad (j=1,2,\dots,m) \quad \dots (3.3.95)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \alpha_i \sum_{k=1}^i Q_{kj} \\ &= \alpha_1 Q_{1j} + \alpha_2 (Q_{1j} + Q_{2j}) + \dots + \alpha_k (Q_{1j} + Q_{2j} + \dots + Q_{kj}) \\ & \quad + \dots + \alpha_n (Q_{1j} + Q_{2j} + \dots + Q_{nj}) \\ &= (\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n) Q_{1j} + (\alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_n) Q_{2j} \\ & \quad + \dots + \alpha_n Q_{nj} \\ &= \sum_{k=1}^n \sum_{\ell=k}^n \alpha_\ell Q_{kj} \end{aligned}$$

(3.3.13) より

$$\beta_k = 1 - 2 \sum_{\ell=0}^{k-1} \alpha_\ell$$

(3.3.8) より

$$\sum_{\ell=0}^n \alpha_\ell = \frac{1}{2}$$

これらより

$$\sum_{\ell=k}^n \alpha_\ell = \sum_{\ell=0}^n \alpha_\ell - \sum_{\ell=0}^{k-1} \alpha_\ell = \frac{1}{2} - \sum_{\ell=0}^{k-1} \alpha_\ell = \frac{1}{2} \beta_k$$

$$\therefore \sum_{i=1}^n \alpha_i \sum_{k=1}^i Q_{kj} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \beta_k Q_{kj}$$

(3.3.94) より

$$Q_{n+1,j} = \frac{D}{B} \sum_{k=1}^n \beta_k Q_{kj} \quad (j=1,2,\dots,m) \quad \dots (3.3.96)$$

(3.3.91) と比較すると  $Q_{1j}, Q_{2j}, \dots, Q_{nj}$  と  $Q_{n+1,j}$  の間の関係は

$P_1, P_2, \dots, P_n$  と  $P_{n+1}$  の間にある関係と同じであることがわかる。

(3.3.93) の右辺と (3.3.94) の右辺を等置し、

$$-\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m i \hat{\varphi}_k(s_j, s_l) Q_{kl} + \sum_{k=1}^i \frac{Q_{kj}}{GB^T_{ji}} = \sum_{k=1}^n i \hat{\varphi}_k(s_j, a) P_k$$

( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ ) ... (3.3.97)

(3.3.97) において未知数  $Q_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ ) の  $nm$  個であり、式の数も  $nm$  個であるから解くことができる。 $Q_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ ) が定められると (3.3.96) より  $Q_{n+1, j}$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) も求められる。(3.3.97) 及び (3.3.96) は行列を用いて次のように表すことができる。

$$AX = B \quad \dots (3.3.98)$$

ここに  $A, X$  及び  $B$  を次のようにおく。

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{(n+1)m, 1} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{(n+1)m, 2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{(n+1)m, 1} & A_{(n+1)m, 2} & \dots & A_{(n+1)m, (n+1)m} \end{pmatrix} \quad \dots (3.3.99)$$

$$X = \begin{pmatrix} Q_{11} \\ Q_{12} \\ \vdots \\ Q_{1m} \\ Q_{21} \\ Q_{22} \\ \vdots \\ Q_{2m} \\ \vdots \\ Q_{n+1, 1} \\ Q_{n+1, 2} \\ \vdots \\ Q_{n+1, m} \end{pmatrix} \quad \dots (3.3.100)$$

$$B = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_{(n+1)m} \end{pmatrix} \quad \dots (3.3.101)$$

(3.3.97) 及び (3.3.96) より  $A_{ij}$  及び  $B_i$  は次のようになる。

$$A_{(i-1)m+j, (k-1)m+j} = -i\hat{\varphi}_k(s_j, s_j) + \frac{1}{GBt_{ji}}$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m;$$

$$k = 1, 2, \dots, n \text{ で且つ } k \leq i \text{ のとき})$$

$$A_{(i-1)m+j, (k-1)m+l} = -i\hat{\varphi}_k(s_j, s_l)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m;$$

$$k = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, m$$

$$\text{且つ } j \neq l \text{ 又は } k \geq i + 1 \text{ のとき})$$

$$B_{(i-1)m+j} = \sum_{k=1}^n i\hat{\varphi}_k(s_j, a)P_k$$

$$(i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$$

$$A_{nm+j, (k-1)m+j} = \frac{D}{B} \beta_k$$

$$(j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n)$$

$$A_{nm+j, nm+j} = -1 \quad (j=1, 2, \dots, m)$$

$$B_{nm+j} = 0 \quad (j=1, 2, \dots, m)$$

$$\text{上記以外の } A_{ij} = 0$$

... (3.3.102)

(3.3.98) より

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} \quad \dots (3.3.103)$$

このように  $\mathbf{X}$  即ち  $Q_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n+1; j = 1, 2, \dots, m$ ) が求められれば Fig. 3.3.6 の如く  $m$  枚の横隔壁を有する箱形梁の  $x = x$  における横断面第  $i$  層のラッキング変形量  $\varphi_i(x, a)$  は次式より求められる。

$$\varphi_i(x, a) = \sum_{k=1}^n \{i\hat{\varphi}_k(x, a)P_k + \sum_{j=1}^m i\hat{\varphi}_k(x, s_j)Q_{kj}\}$$

$$(i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.104)$$



(3) 分布荷重を受ける箱形梁のラッキング変形

(1) 及び (2) で求めた集中荷重に対する解を用いて、重ね合せの原理により分布荷重に対する解を求めることができる。

Fig. 3・3・6 の如き  $m$  枚の横隔壁を有する箱形梁において  $P_1, P_2, \dots, P_{n+1}$  のうち  $P_k = 1$  で他の全ての外力を 0 としたときの  $x = x$  における横断面第  $i$  層のラッキング変形量を  ${}_k\bar{\varphi}_i(x, a)$  とおくと Fig. 3・3・9 の如き分布荷重が加わったときの  $x = x$  における横断面第  $i$  層のラッキング変形量を  $\varphi_i(x)$  は次のように表される。

$$\varphi_i(x) = \sum_{k=1}^{n+1} \int_0^L {}_k\bar{\varphi}_i(x, a) p_k(a) da \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (3.3.105)$$

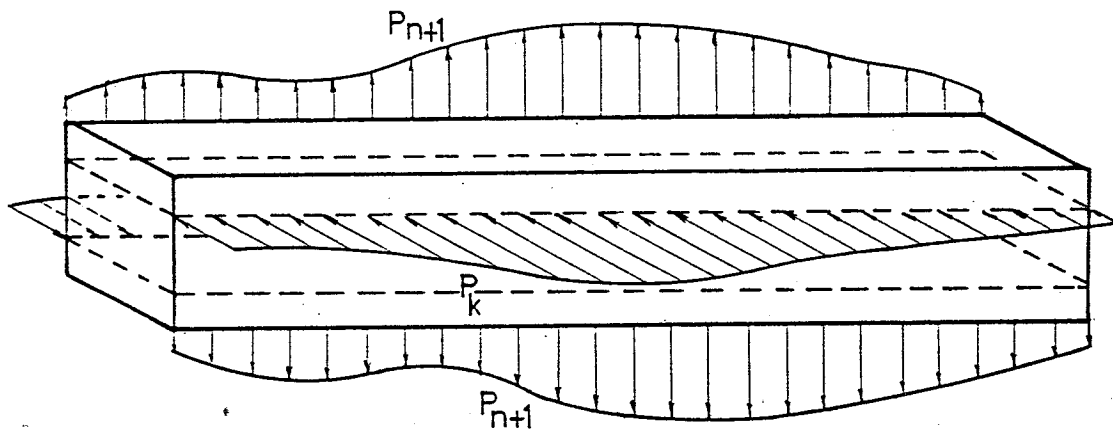


Fig. 3・3・9 分布荷重を受ける箱形梁

### 3・4 供試船への適用

#### 3・4・1 計算条件

Fig. 3・2・1およびFig. 3・2・2に示した自動車船に3・3で導いた理論を適用する。まず供試船の主要目をTable 3・4・1に示す。

また計算条件を次に示す。

##### (a) 船 速

本船の計画速力18.8knを用いる。これはフィールド数 $F_n = 0.23$ に対応する。

##### (b) 波 長

船体運動は波長を種々に変えて求めるが、ラッキング変形はそれらのうち $\sqrt{L/\lambda} = 1.0$ の場合、即ち波長が船長に等しい場合について計算する。

##### (c) 波向角

$\alpha = 90^\circ, 120^\circ$ 及び $150^\circ$ の3通り。正面迎え波を $\alpha = 180^\circ$ とする。

##### (d) 波 高

$H_w = 2.5\text{m}, 5\text{m}, 7.5\text{m}, 9\text{m}$ 及び $10\text{m}$ の5通りに変える。

##### (e) ラッキング変形の計算点

船倉の20等分点の値を求める。

Table 3 · 4 · 1 供試船の主要目

垂線間長	L	180.0	m
幅	B	32.2	m
深さ	D	29.2	m
吃水	d	8.5	m
排水量	W	28,170	t
方形係数	$C_b$	0.544	
中央横断面係数	$C_M$	0.912	
水線面係数	$C_w$	0.726	
重心位置 (船長方向)	$x_G$	5.22	m
重心位置 (船深方向)	$z_G$	-4.59	m
メタセンタ径	GM	1.76	m
船長方向慣動半径	$K_L$	45.76	m
船幅方向慣動半径	$K_T$	45.76	m
横揺周期	$T_\phi$	19.74	s

### 3・4・2 船体運動

Fig. 3・4・1～Fig. 3・4・6に船体運動6成分の応答関数を横軸に $\sqrt{L/\lambda}$ をとって示す。これら6成分のうち前後揺れはラッキングには無関係なので残りの5成分の1出会周期の間の変化をFig. 3・4・7～Fig. 3・4・9に示す。ただしここでは $\sqrt{L/\lambda} = 1$ ,  $H_w = 10\text{ m}$ とする。

### 3・4・3 規則波中におけるラッキング変形量

横桁リングの影響を考慮した場合の船倉中央におけるラッキング変形量 $\phi_T$ の1出会周期間の変化の様子を $\sqrt{L/\lambda} = 1$ ,  $H_w = 10\text{ m}$ の場合についてFig. 3・4・10及びFig. 3・4・11に示す。ラッキング変形量 $\phi_T$ は波高に比例する成分 $\phi_{H1}$ 、波高の2乗に比例する成分 $\phi_{H2}$ 及び波高の3乗に比例する成分 $\phi_{H3}$ を合成したものである。Fig. 3・4・10に $\phi_{H1}$ 及び $\phi_{H2}$ と $\phi_{H3}$ の和を、Fig. 3・4・11にはそれらを合成した $\phi_T$ を示す。なお $\phi_T$ は波向角 $\chi$ の斜め規則波中で船体が直立していると仮定したときの成分、即ち船体運動を考慮しないときの成分 $\phi_{Ts}$ と船体運動を考慮したときの成分 $\phi_{TD}$ に分けられるが、Fig. 3・4・12にはこれらのうち $\phi_{Ts}$ を示す。

Fig. 3・4・10の $\phi_{H1}$ と $\phi_{H2} + \phi_{H3}$ を比較すると後者が非常に小さく、実用上波高に比例する成分のみを考慮すればよいといえる。

船体運動を考慮した場合のラッキング変形量は各波向角とも船体運動を考慮しない静的ラッキング変形量の1.5倍程度であることがわかる。

Fig. 3・4・13に船倉中央のラッキング変形量が最大になる時刻のラッキング荷重の船長方向の分布を示す。Fig. 3・4・14には船体運動を考慮しない場合の静的ラッキング荷重の船長方向分布を示す。Fig. 3・4・13とFig. 3・4・14を比較すると静的ラッキング荷重は船体運動を考慮したラッキング荷重の半分程度であることがわかる。

Fig. 3・4・15には波高と船倉中央のラッキング変形量の関係を示す。この図からもラッキング変形量は波高にほぼ比例することがわかる。

Fig. 3・4・16は横桁リングの効果を考慮した場合の船倉中央でのラッキング変形量 $\phi_r$ を、横隔壁と横桁リングとが存在しない場合の値 $\phi_0$ で除した無次元値 $\phi_r / \phi_0$ と横桁リングのバネ定数を表す無次元値 $\beta L_h$ との関係を示す。図中の白丸は今回解析した自動車船の値であり、 $\beta L_h = 1.29$ 、 $\phi_r / \phi_0 = 0.90$ である。

Fig. 3・4・17は横桁リングと横隔壁の相乗効果を考慮した場合のラッキング変形量の船長方向分布を示し、波向角 $90^\circ$ でラッキング変形量が最大になる時刻の分布である。今回解析した3枚の横隔壁を有する自動車船の値及び船倉中央の横隔壁の効果を評価するために、これを取り除いたときの値を参考までに併記する。これより船倉中央の横隔壁を取り除いた場合のラッキング変形量は3枚横隔壁を有する場合の約3倍にも達し、船体中央の横隔壁がラッキング変形を減少する上で大きな効果を有するることがわかる。

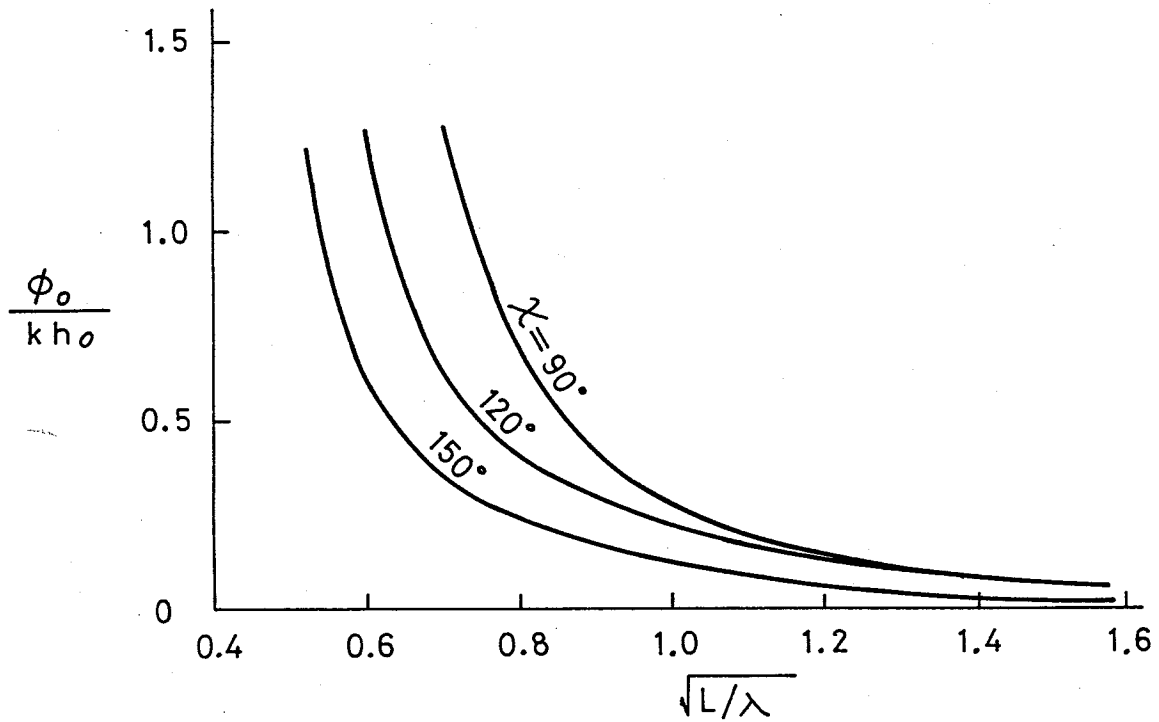


Fig. 3 · 4 · 1 横揺れの応答関数 ( $F_n = 0.23$ )

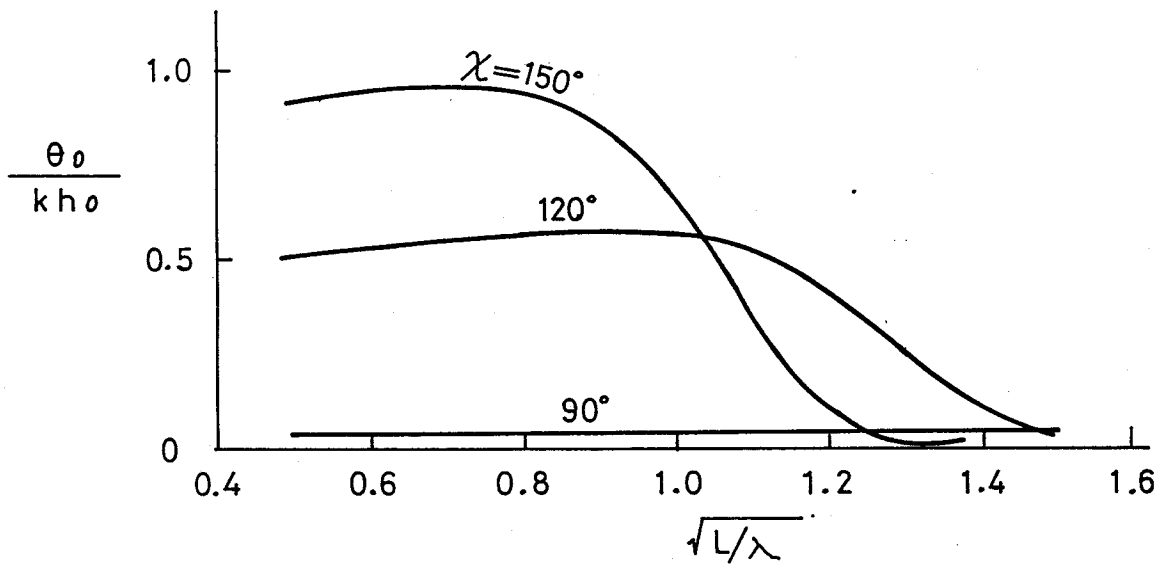


Fig. 3 · 4 · 2 縦揺れの応答関数 ( $F_n = 0.23$ )

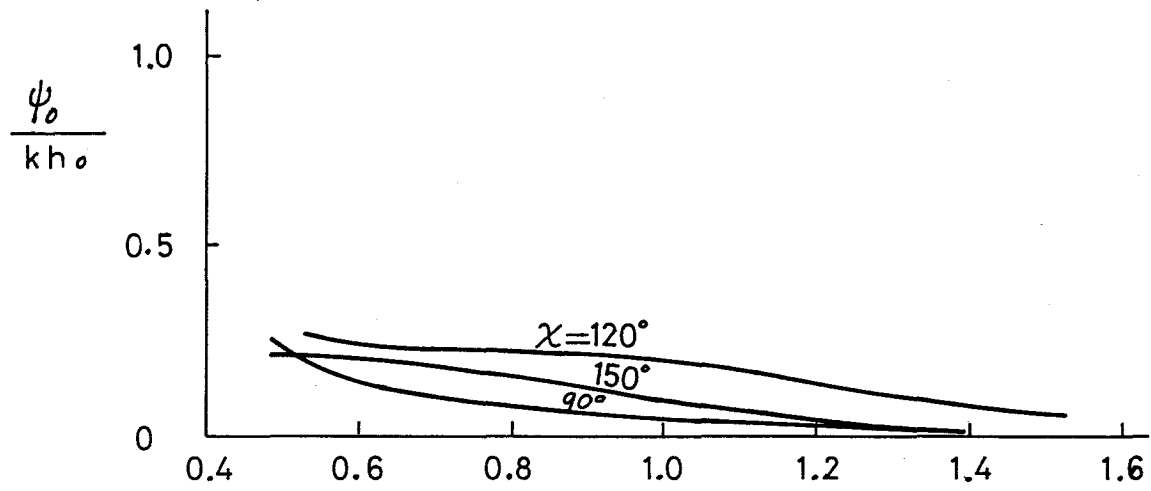


Fig. 3 · 4 · 3 船首揺れの応答関数 ( $F_n = 0.23$ )

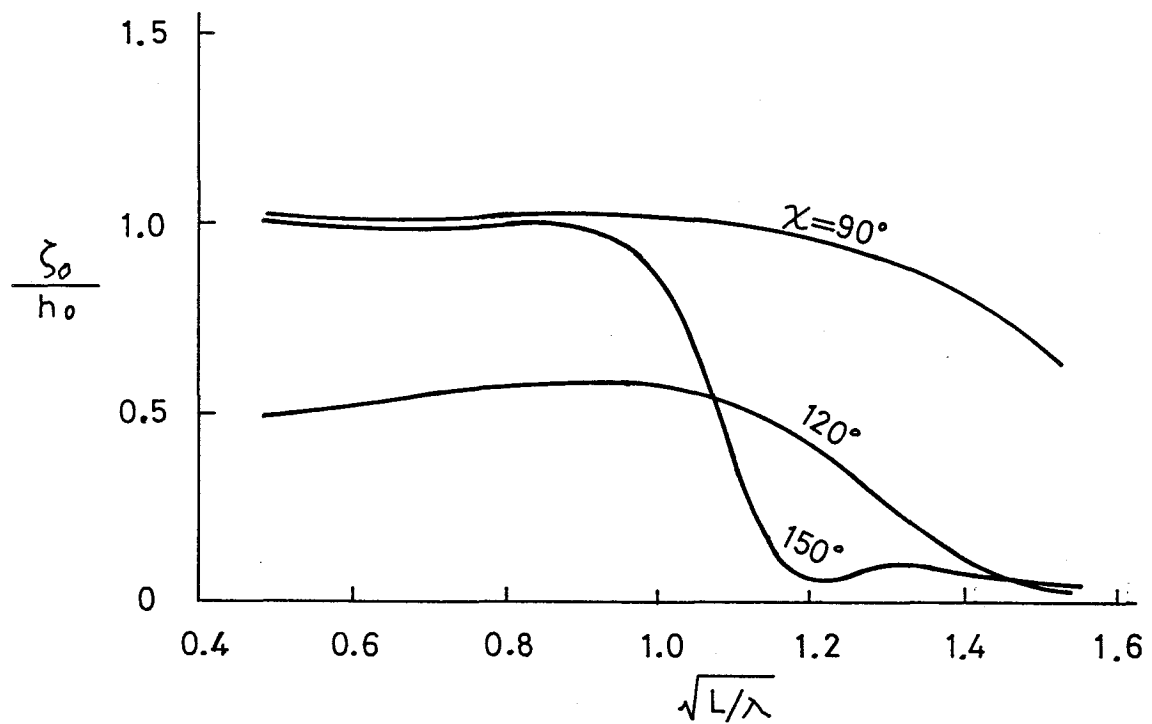


Fig. 3 · 4 · 4 上下揺れの応答関数 ( $F_n = 0.23$ )

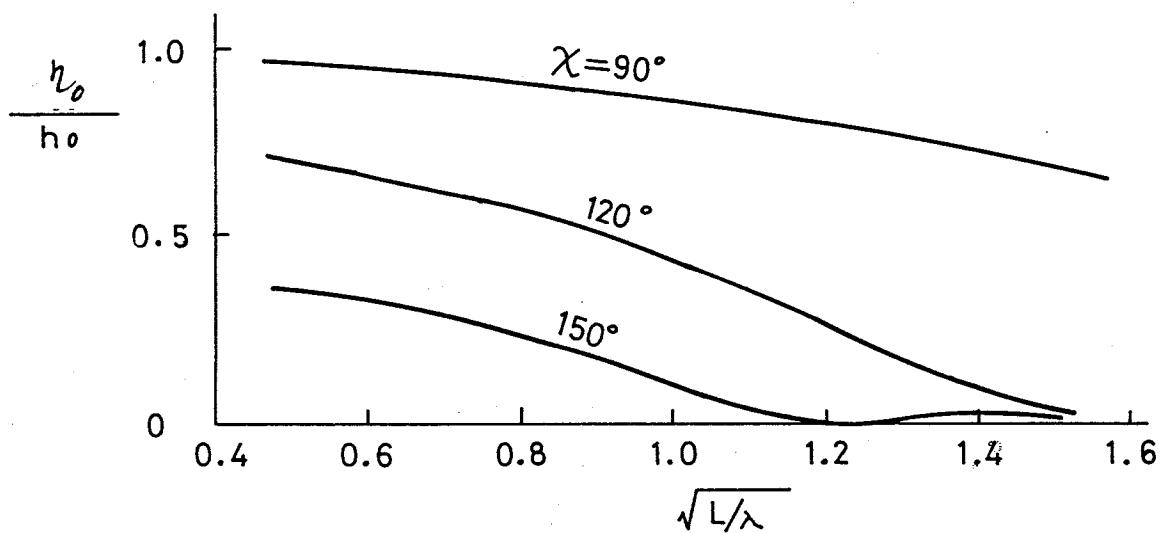


Fig. 3 · 4 · 5 左右揺れの応答関数 ( $F_n = 0.23$ )

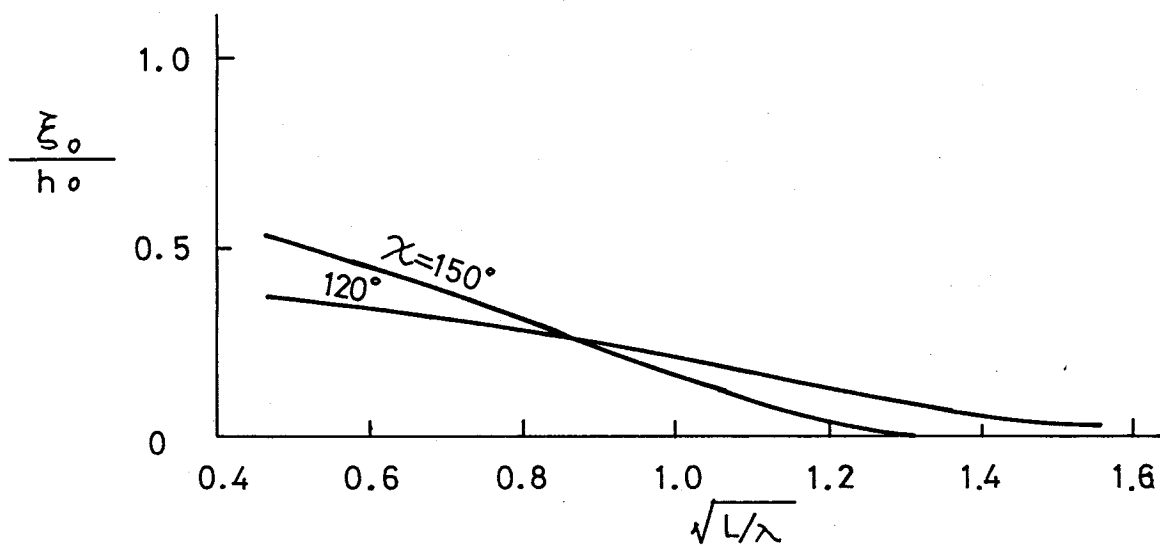
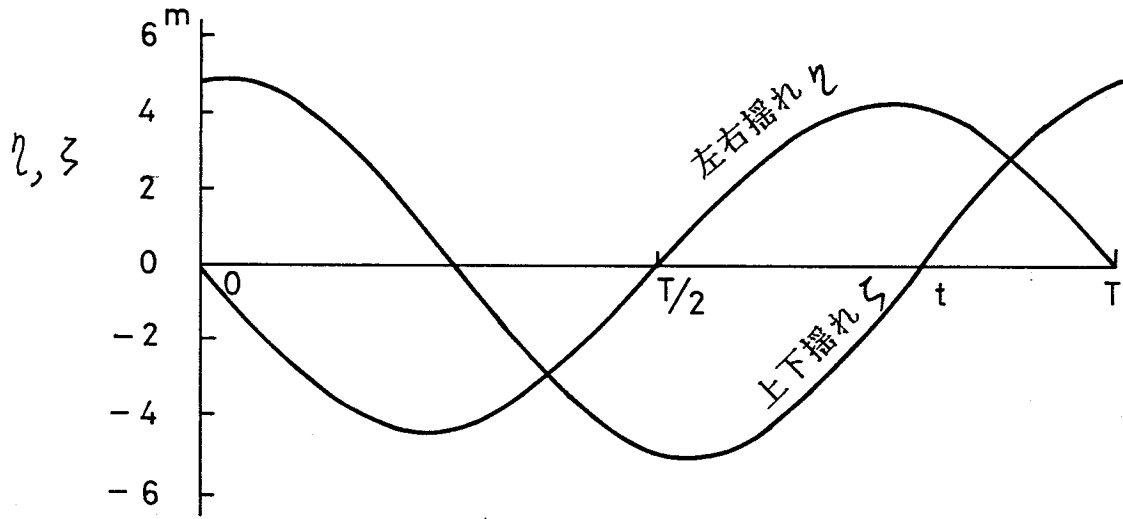
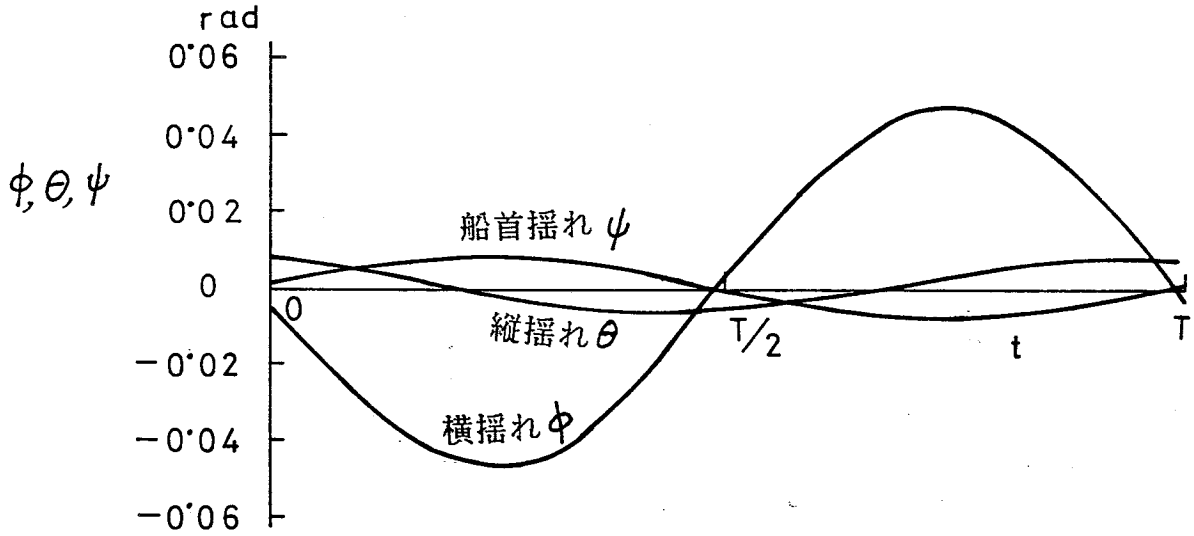


Fig. 3 · 4 · 6 前後揺れの応答関数 ( $F_n = 0.23$ )



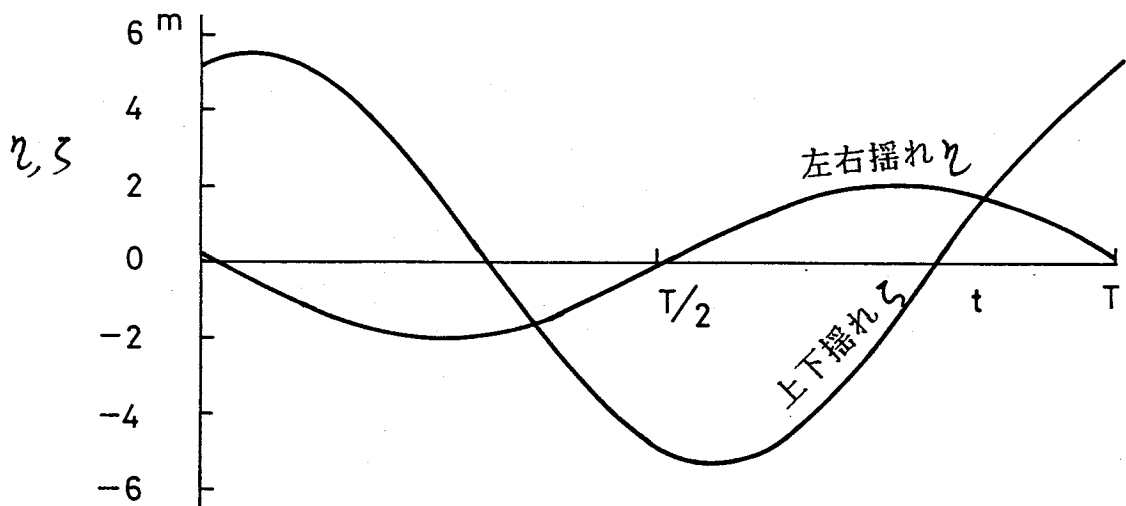


(a) 上下揺れ・左右揺れ

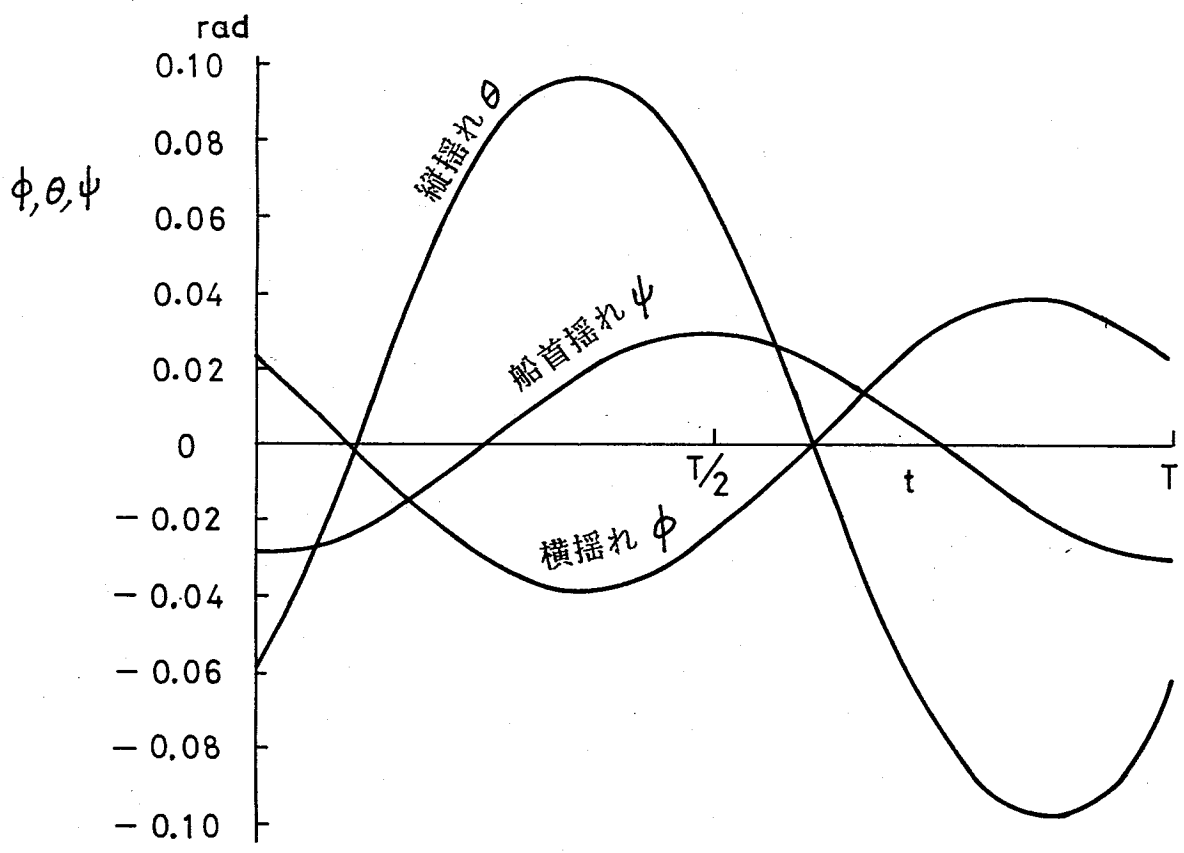


(b) 縦揺れ・横揺れ・船首揺れ

Fig. 3・4・7 1 出会周期間の船体運動  
( $\alpha = 90^\circ$ ,  $H_w = 10\text{ m}$ ,  $T = 10.7\text{ s}$ )

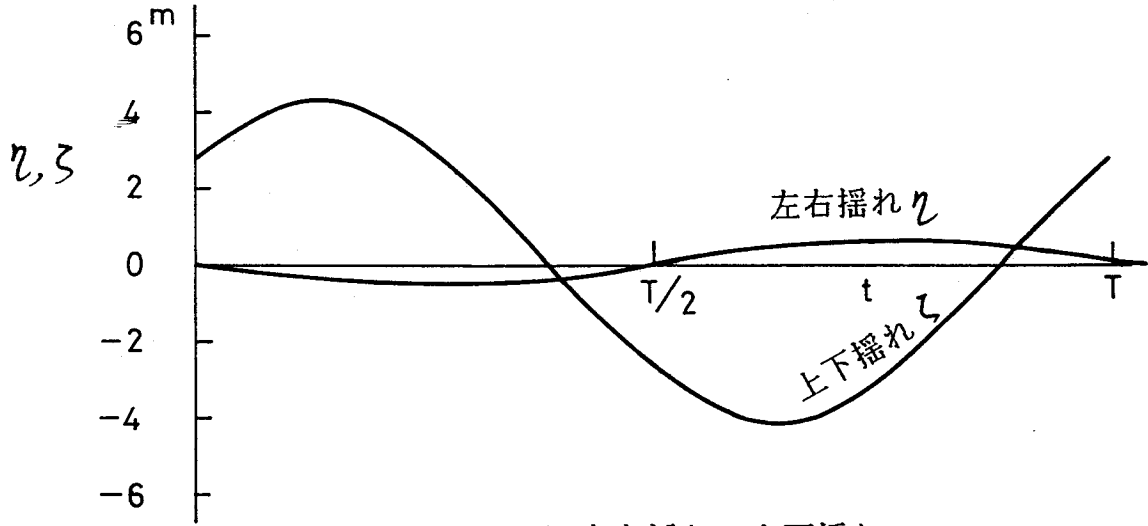


(a) 左右揺れ・上下揺れ

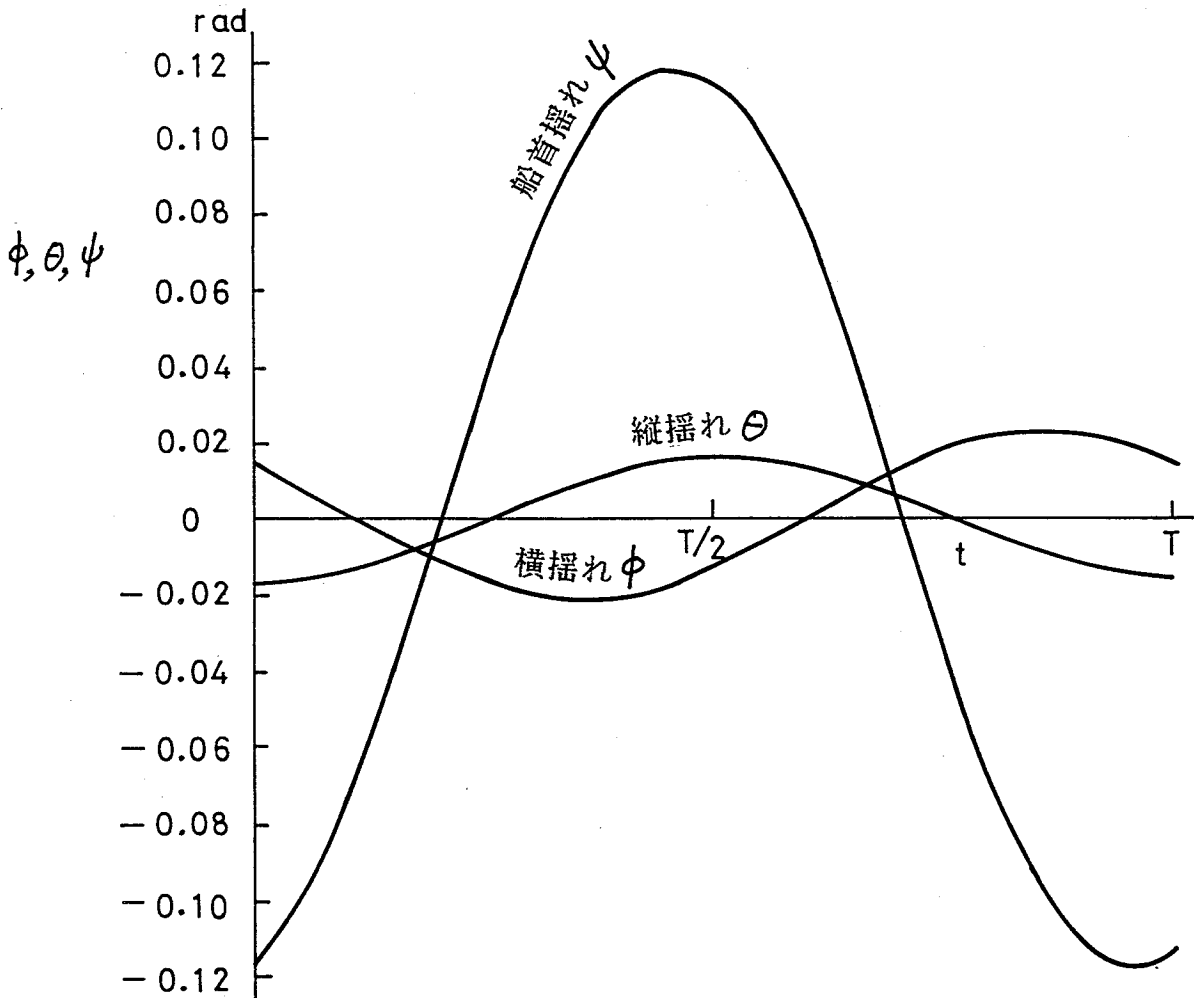


(b) 縦揺れ・横揺れ・船首揺れ

Fig. 3・4・8 1 出会周期間の船体運動  
 ( $\chi = 120^\circ$ ,  $H_w = 10\text{ m}$ ,  $T = 8.3\text{ s}$ )



(a) 左右揺れ・上下揺れ



(b) 縦揺れ・横揺れ・船首揺れ

Fig. 3・4・9 1 出会周期間の船体運動  
 ( $\chi = 150^\circ$ ,  $H_w = 10\text{ m}$ ,  $T = 7.1\text{ s}$ )

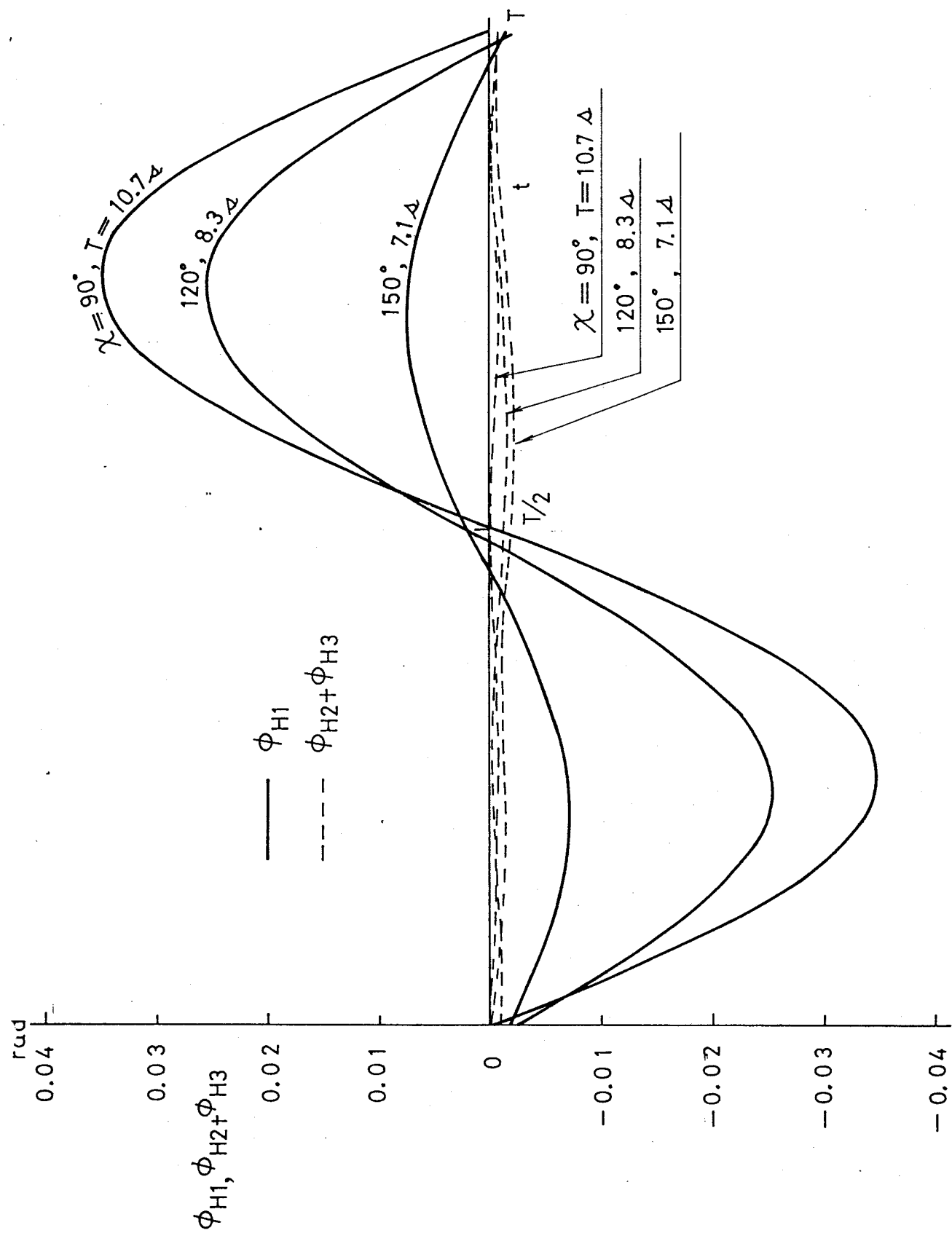


Fig. 3 · 4 · 10 1 出会周期間のラッキング変形量の1次成分及び  
2次成分と3次成分の和の変動 (横桁リングのみ,  $H_w = 10 \text{ m}$ )

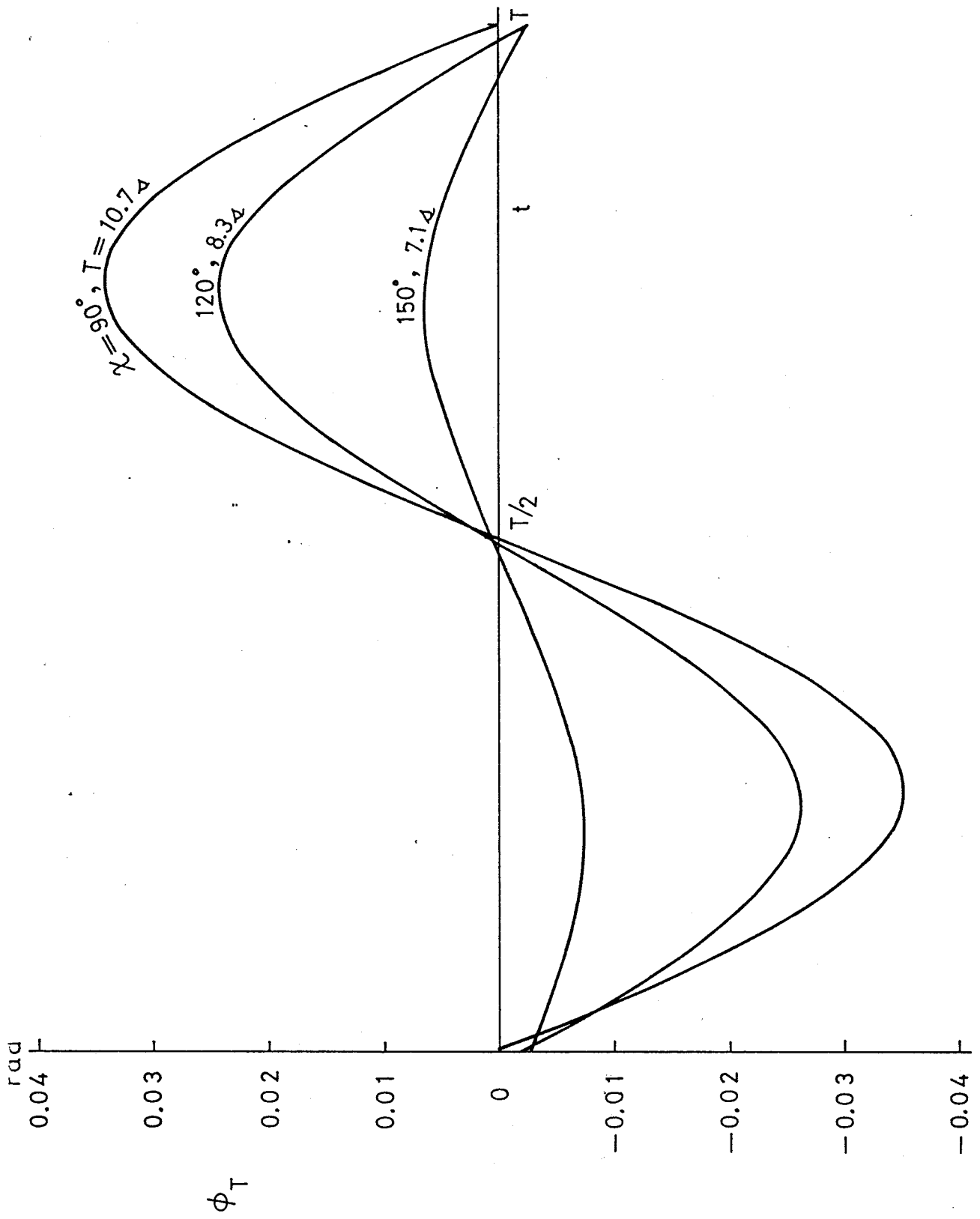


Fig. 3 · 4 · II 1 出会周期間のラッキング変形量の変動  
 (横桁リングのみ,  $H_w = 10\text{ m}$ )

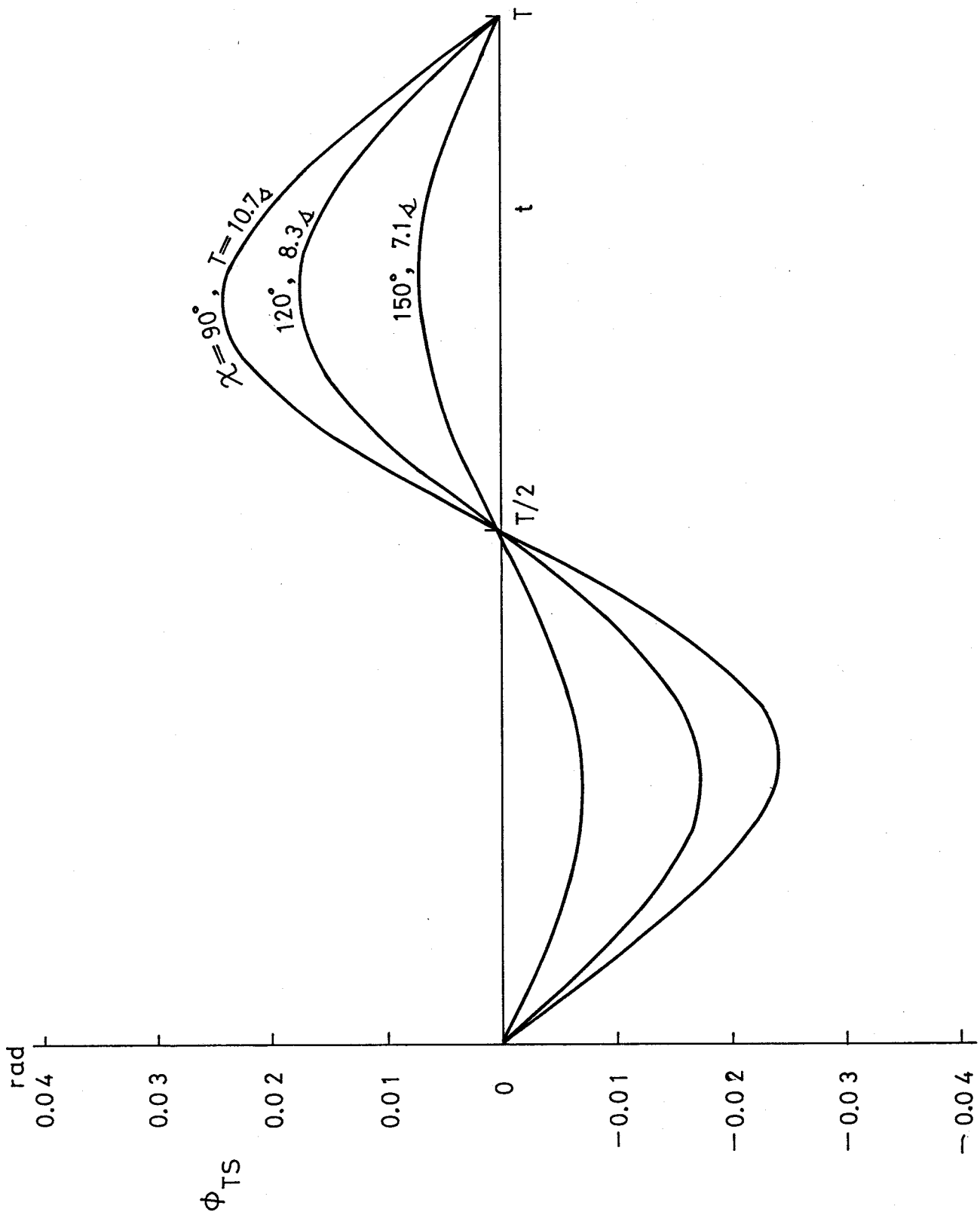


Fig. 3.4.12 静的ラッキング変形量  $\phi_{TS}$  (横桁リングのみ,  $H_w = 1.0\text{ m}$ )



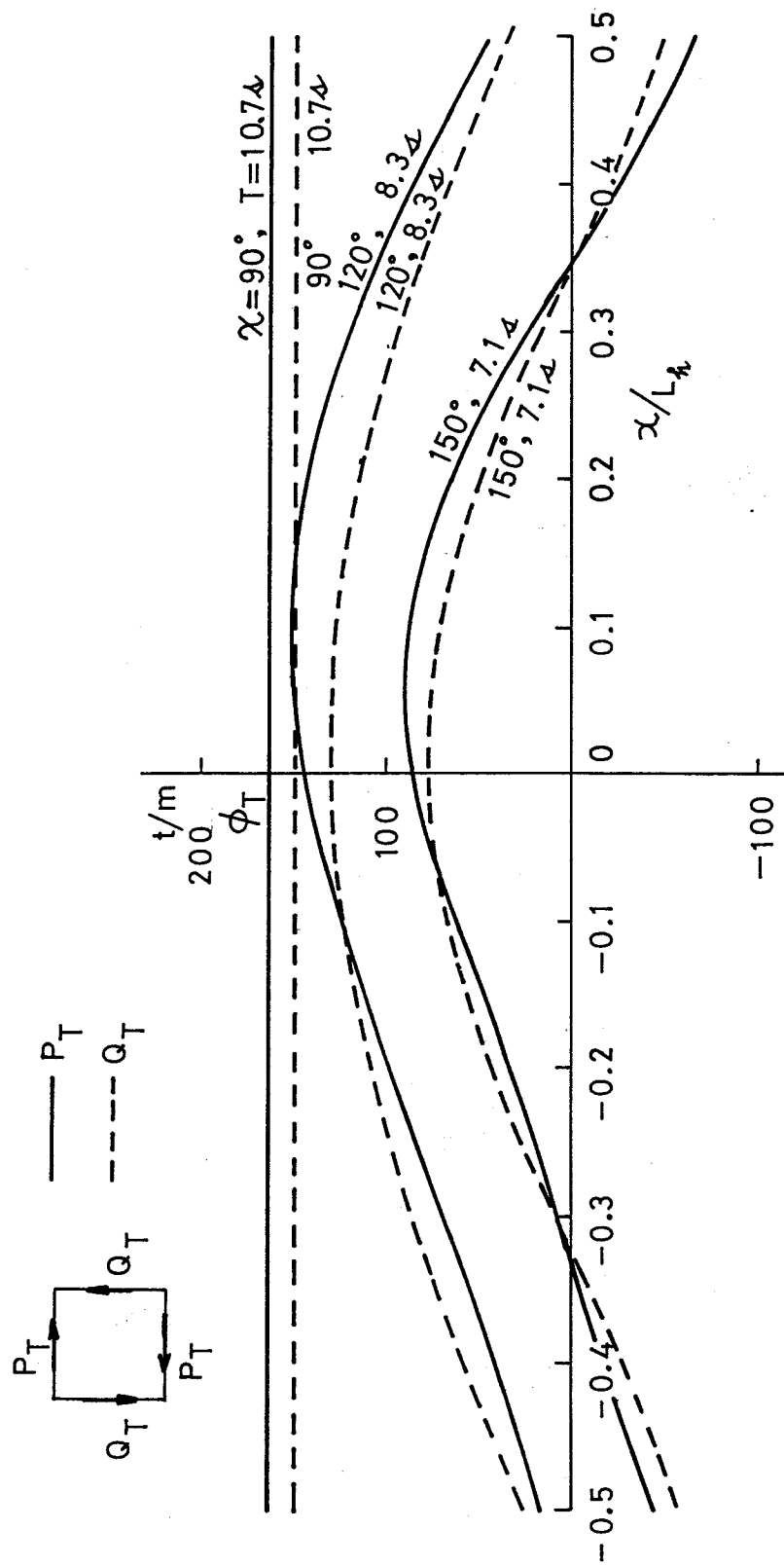


Fig. 3 · 4 · 14 静的ラッキング荷重の船長方向分布 (横桁リングのみ,  $H_w = 10\text{ m}$ .)



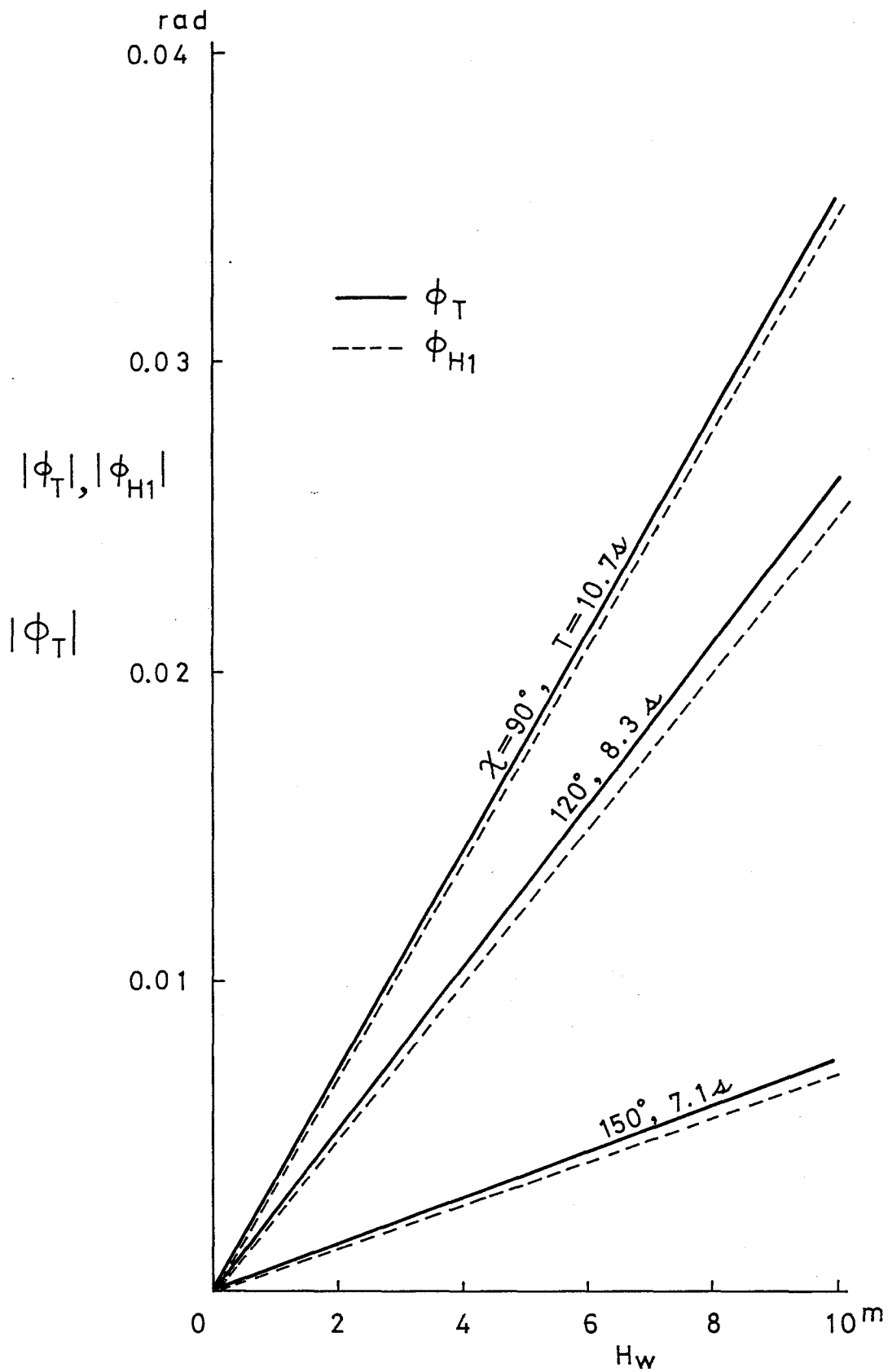


Fig. 3 · 4 · 15 波高とラッキング変形量の関係  
(横桁リングのみ)

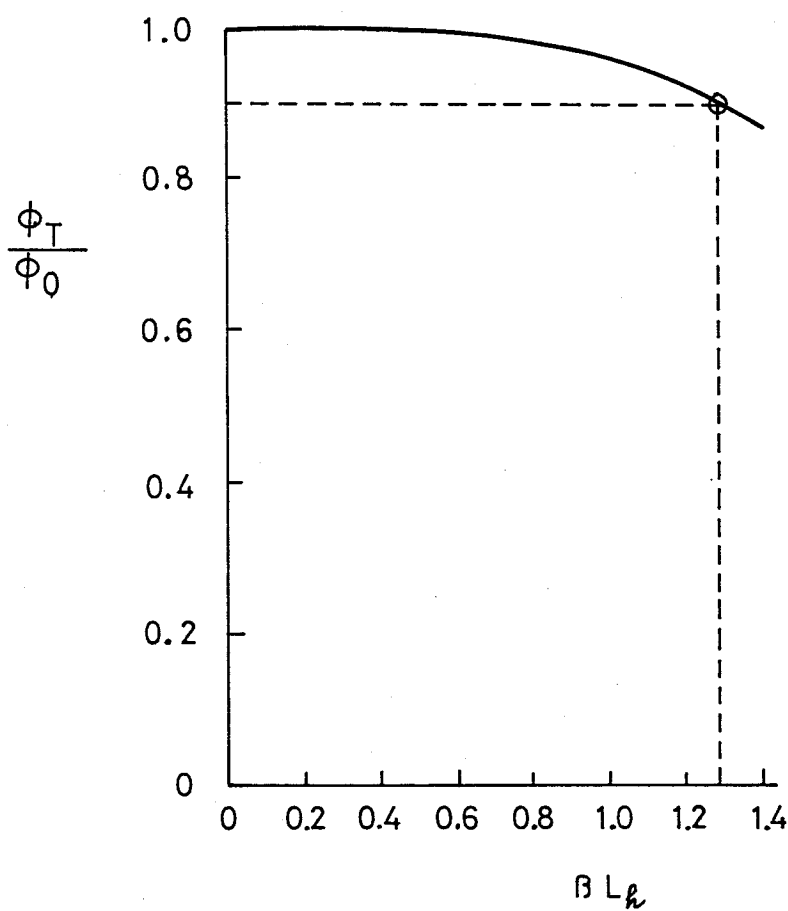


Fig. 3 · 4 · 16 ラッキング変形量とバネ定数の無次元値との関係

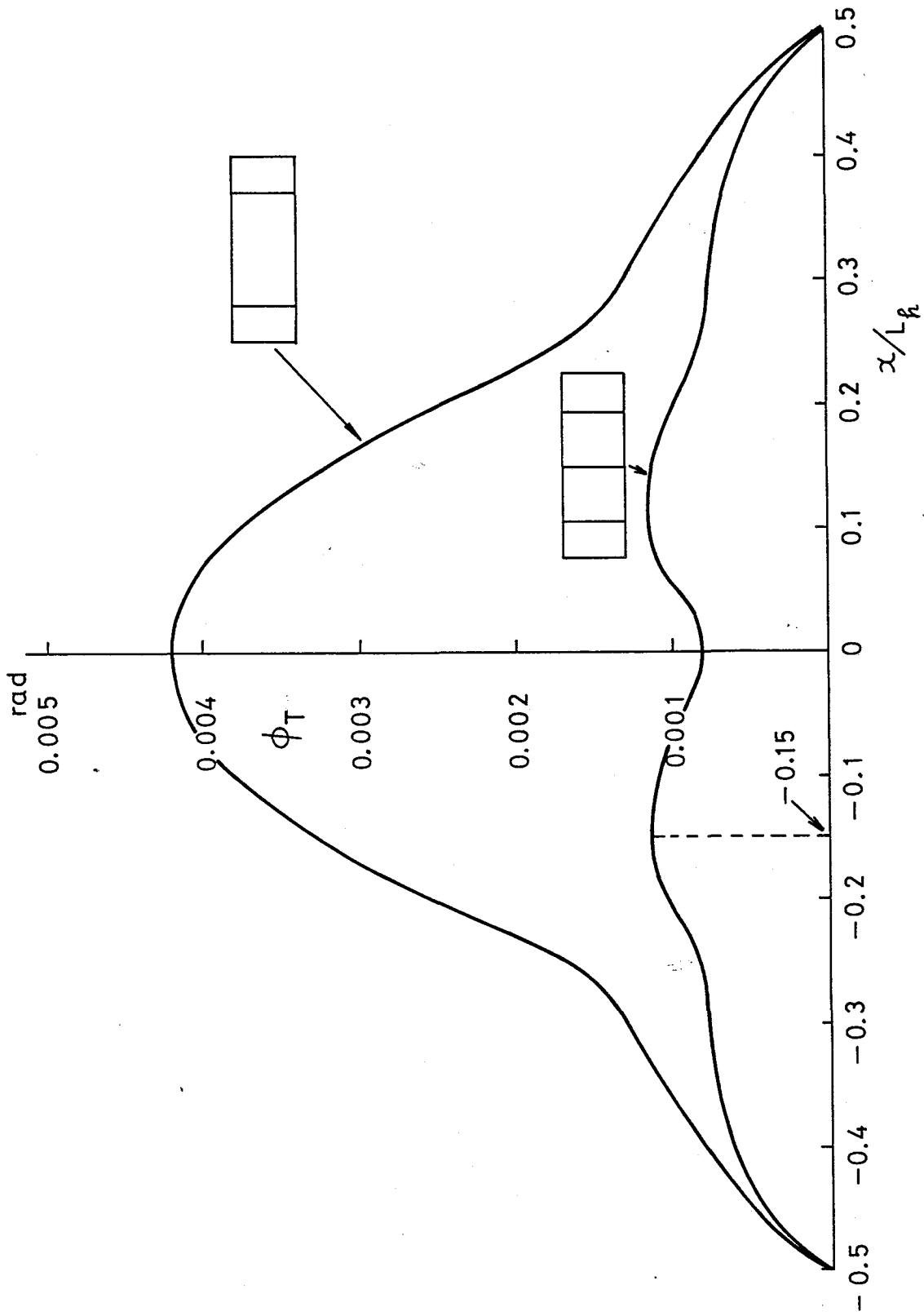


Fig. 3·4·17 ラッキング変形量の船長方向分布 (横隔壁及び横桁リング)

( $\alpha = 90^\circ$ ,  $H_w = 10\text{ m}$ ,  $T = 10.7\text{ s}$ ,  $t = T/4$ )

### 3・4・4 ラッキング変形量の長期予測

#### (1) 長期予測値の計算法

3・4・3に述べたようにラッキング変形量は波高にほぼ比例するのでラッキング変形量の応答関数 $F(\omega, \chi)$ は次のように表される。

$$F(\omega, \chi) = \phi(\omega, \chi) / \zeta_0 \quad \dots (3.4.1)$$

ここに、

$\phi(\omega, \chi)$  : ラッキング変形量

$\zeta_0$  : 波振幅

$\omega$  : 円周波数

$\chi$  : 波の進行方向と船の進行方向のなす角 (Fig. 2・2・2参照)

ラッキング変形量 $\phi$ の極大値が $\phi_1$ を越える確率は $Q_1$ は次式で表される。

$$Q_1 = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{\phi_1^2}{2R^2}\right) p(H, T) dHdT \quad \dots (3.4.2)$$

ここに、

$R$  : 不規則波海面におけるラッキング変形量の標準偏差

$p(H, T)$  : 波浪の長期発現確率

$H$  : 有義波高

$T$  : 平均波周期

(3・4・2)中の標準偏差 $R$ は次式より求められる。

#### (a) 長波頂不規則波海面

$$R^2 = \int_0^{\infty} [F(\omega, \chi)]^2 [f(\omega)]^2 d\omega \quad \dots (3.4.3)$$

ここに、

$[f(\omega)]^2$  : 波スペクトラム

有義波高 $H$ , 平均波周期 $T$ なる海面の波スペクトラムとして1964年ISSCでは有義波高 $H$ , 平均波周期 $T$ なる海面の波スペクトラムとして次の如き

Modified Pierson - Moskowitz型のスเปクトラムを提案している。

$$[f(\omega)]^2 = 0.11H^2 \omega_1^{-1} (\omega/\omega_1)^{-5} \exp\{-0.44(\omega/\omega_1)^{-4}\} \dots (3.4.4.)$$

ここに、

$$\omega = \sqrt{2\pi g/\lambda} \quad : \quad \text{成分波の円周波数}$$

$$\omega_1 = 2\pi/T$$

$$\lambda \quad : \quad \text{波長}$$

(b) 短波頂不規則波海面

$$R^2 = \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [F(\omega, \chi - \theta)]^2 (2/\pi) [f(\omega)]^2 \cos^2 \theta d\theta d\omega \dots (3.4.5)$$

ここに、

$\theta$  : 短波頂不規則波海面の平均進行方向と成分波の進行方向のなす角

$\chi$  : 船の進行方向と波の平均進行方向のなす角

(3.4.4) 又は (3.4.5) より与えられたH及びTに対して標準偏差Rが求められ、波浪の長期発現確率p (H, T) が与えられると (3.4.2) よりラッキング変形量が与えられた値 $\phi_1$  を越える確率 $Q_1$  が求められる。

著者は他の共著者と共に長期予測値の近似計算法を導いた。<sup>5), 6)</sup> それを要約すると次の如くである。

(i) 応答関数をFig. 3.4.18の如く2本の放物線と2本の直線で近似する。

(ii) Fig. 3.4.18のA, B及びCの3点より標準偏差を最大ならしめる平均波周期 $T_0$ 。とそのときの標準偏差 $R_{max}$  が求められる。

(iii)  $R_{max}$  と $T_0$  から海域に応じて累積確率 $Q = 10^{-8}$ に対応するラッキング変形量 $\phi$ が求められる。

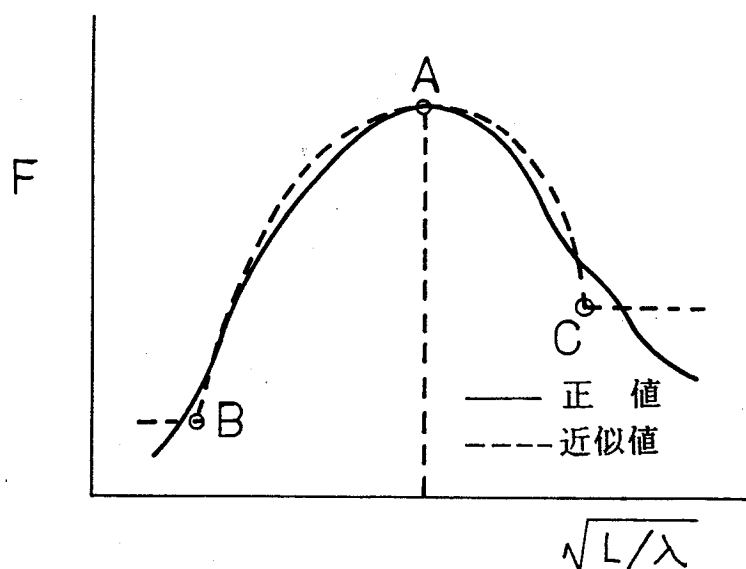


Fig. 3 · 4 · 18 応答関数の近似化

(2) ラッキング変形量の長期予測値

Fig. 3 · 4 · 17に示すように3枚の横隔壁を有する対象船が波向角 $\alpha = 90^\circ$ , 出会周期 $T = 10.7$  sの規則波を航行するときのラッキング変形量は $x/L_h = -0.15$ で最大値をとる。また横隔壁位置は $x/L_h = -0.28, -0.01$ 及び $0.28$ である。

そこで $x/L_h = -0.28, -0.15$ 及び $-0.01$ におけるラッキング変形量の応答関数を求めるとFig. 3 · 4 · 19~Fig. 3 · 4 · 21のようになる。これらをもとにして、Waldenの北大西洋冬期の波浪発現頻度に対する近似値計算法<sup>5), 6)</sup>を適用するとFig. 3 · 4 · 22~Fig. 3 · 4 · 24の如き短波頂不規則波海面でのラッキング変形量の長期分布が求められる。

これら長期分布の中ではFig. 3 · 4 · 23に示す $x/L_h = -0.15$ の場合が最大であり、その値は船の進行方向に対して波の平均進行方向が均等に分布するものとして累積確率 $10^{-9}$ に対して $0.001$  rad程度である。これは3 · 4 · 3で求めた波高10 mの規則波中のラッキング変形量にほぼ等しい。

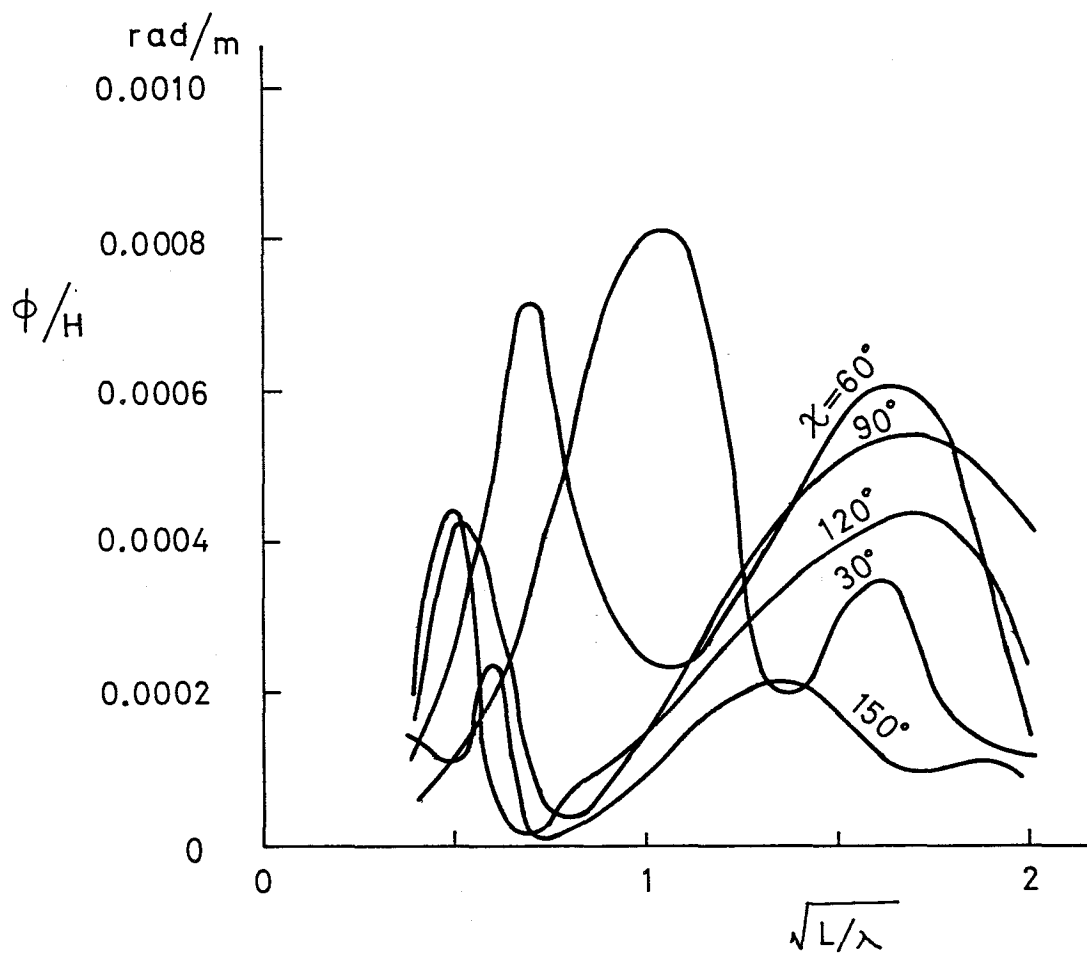


Fig. 3 · 4 · 19 ラッキング変形量の応答関数  
 ( $x/L_h = -0.28$ )

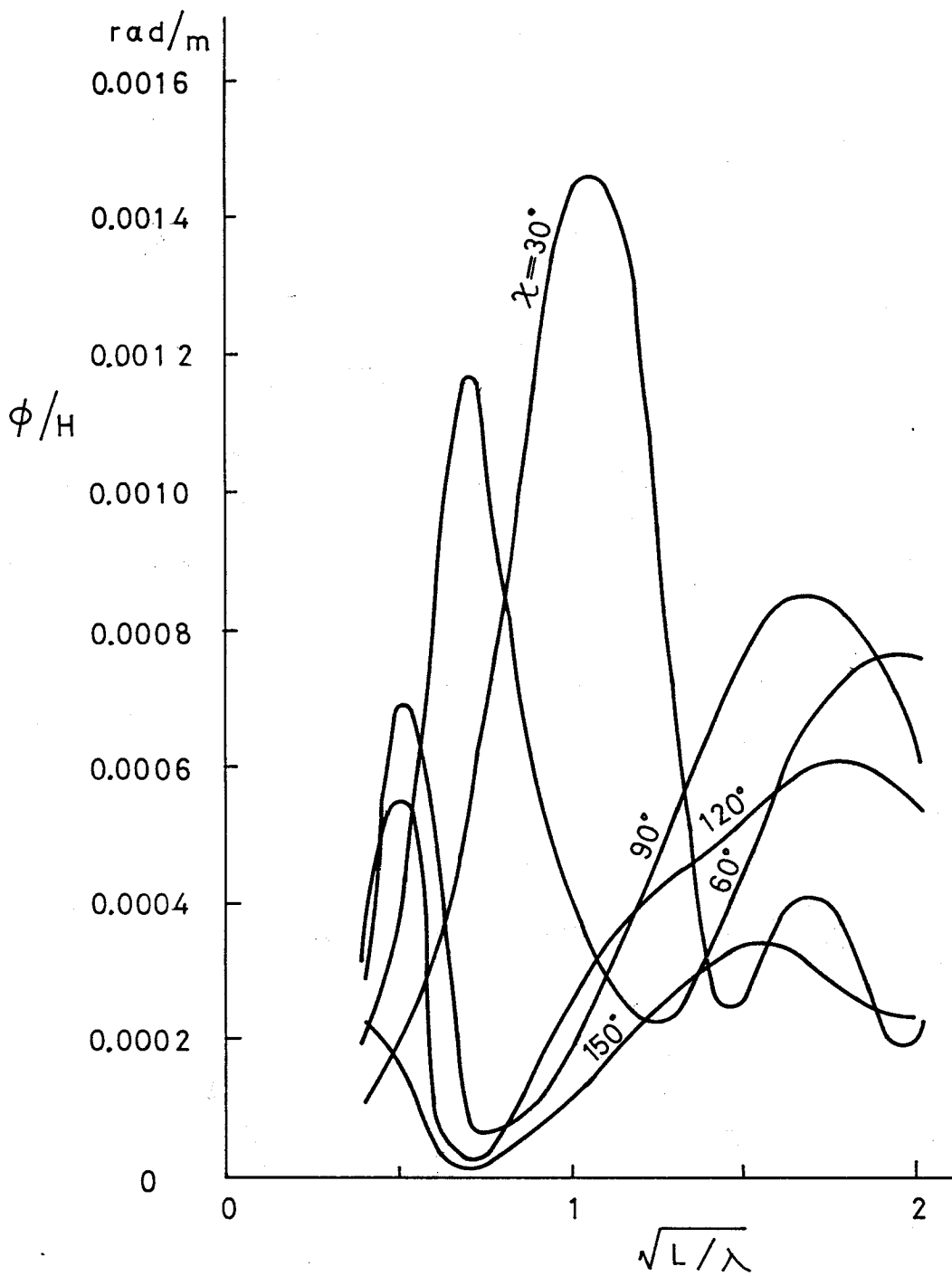


Fig. 3 · 4 · 20 ラッキング変形量の応答関数  
 ( $x/L_h = -0.15$ )



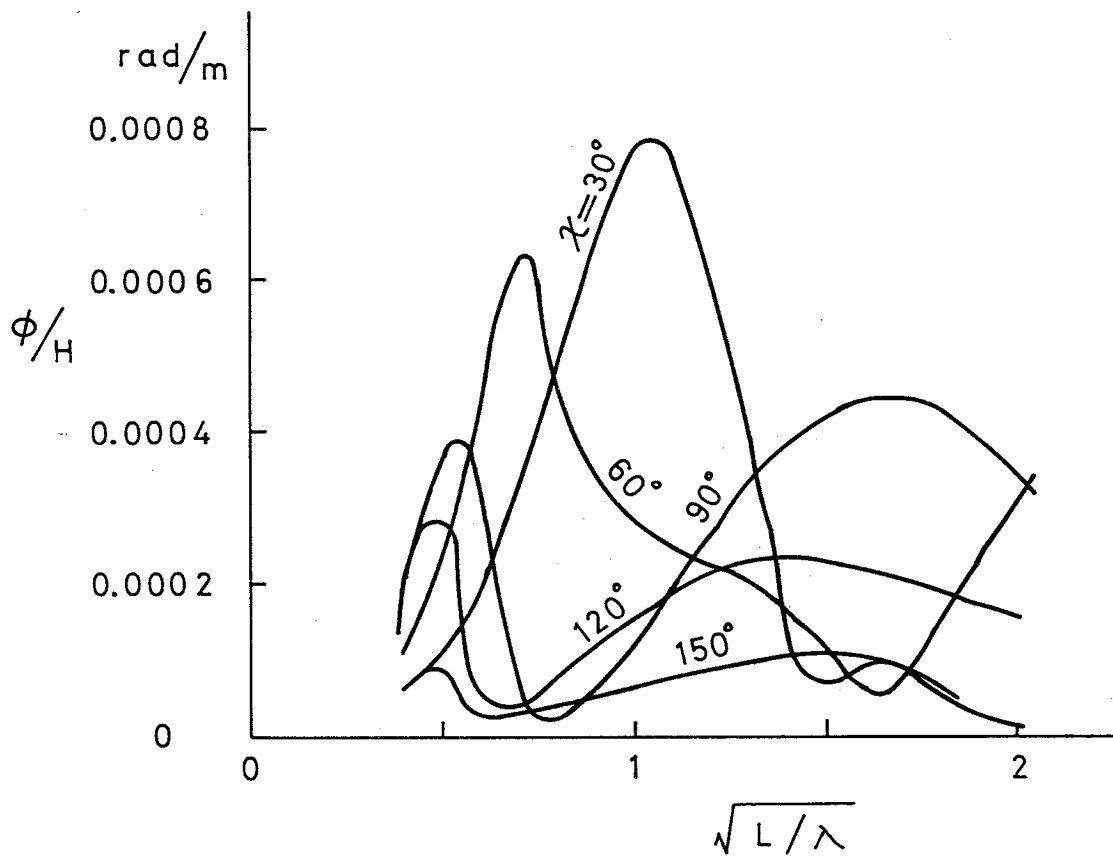


Fig. 3 · 4 · 21 ラッキング変形量の応答関数  
 ( $x/L_h = -0.01$ )

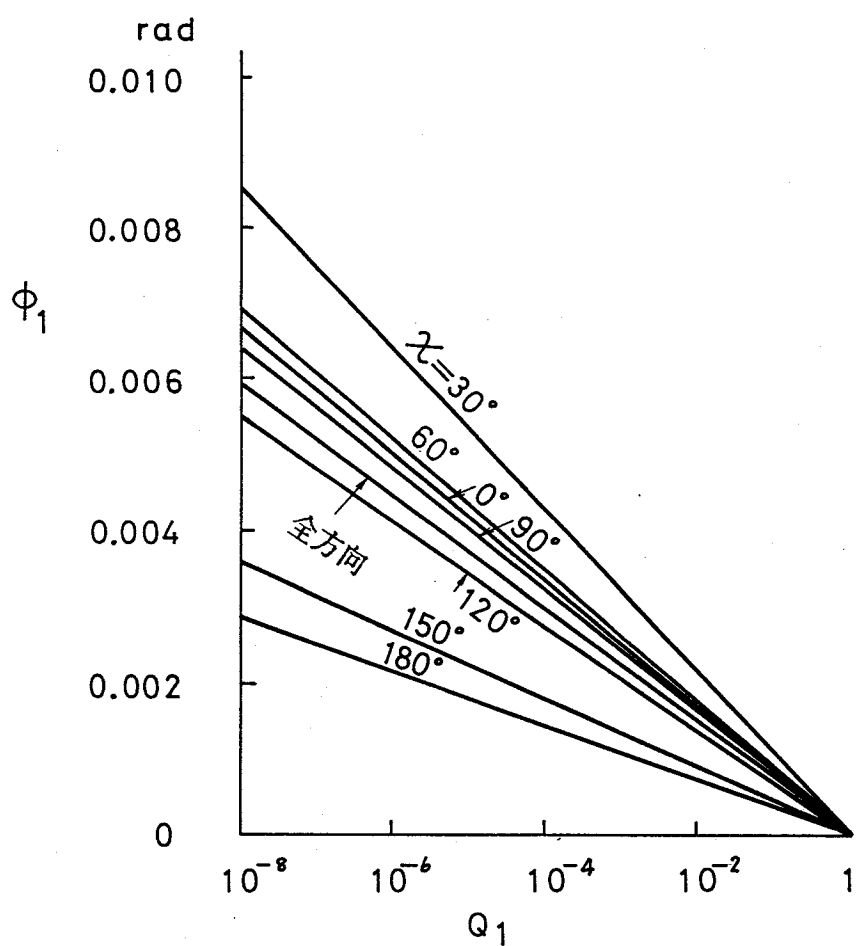


Fig. 3 · 4 · 22 北大西洋冬期の短波頂不規則波  
海面におけるラッキング変形量の長期分布  
(  $x / L_h = - 0.28$  )

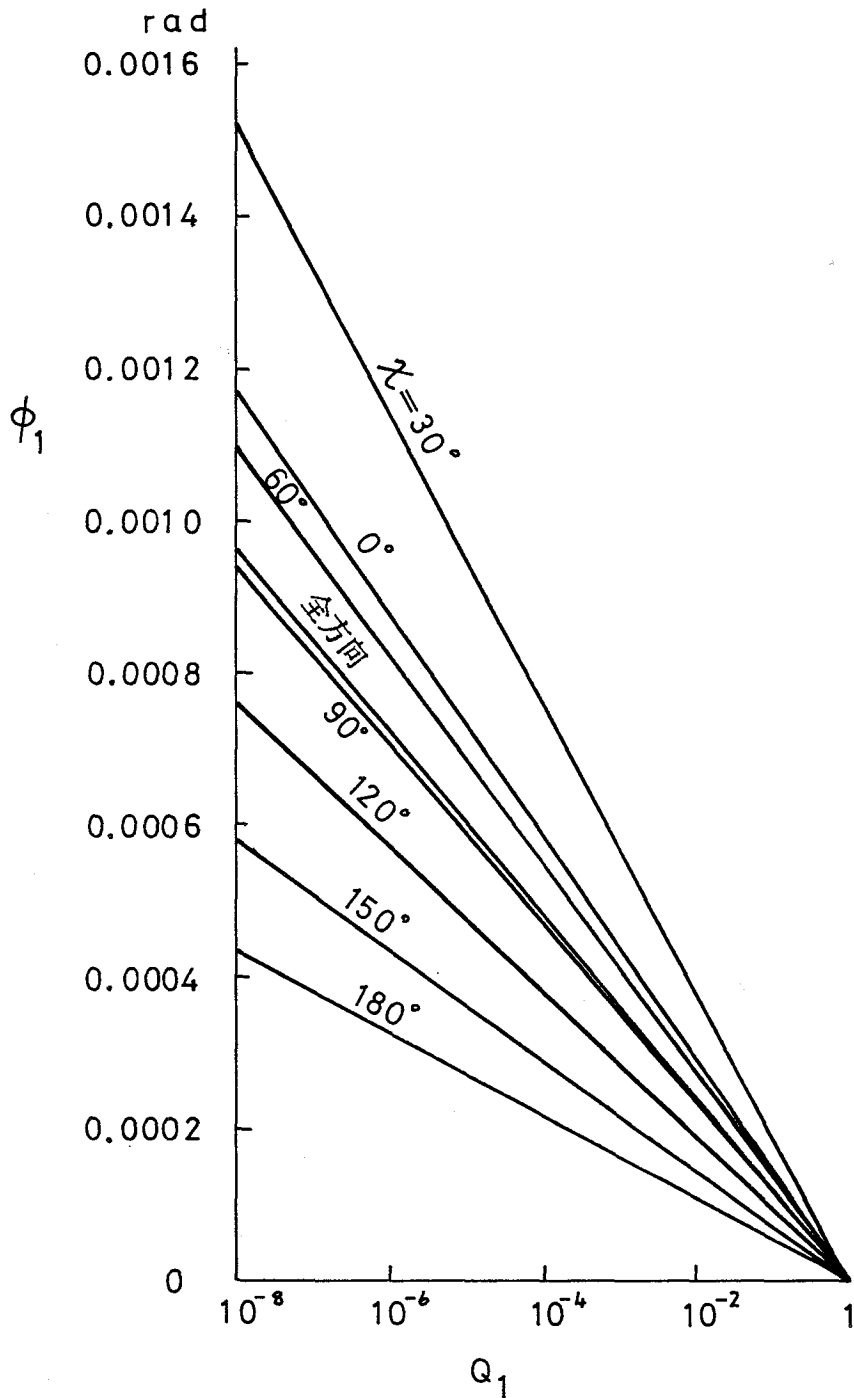


Fig. 3 · 4 · 23 北大西洋冬期の短波頂不規則波  
海面におけるラッキング変形量の長期分布  
(  $x / L_h = -0.15$  )

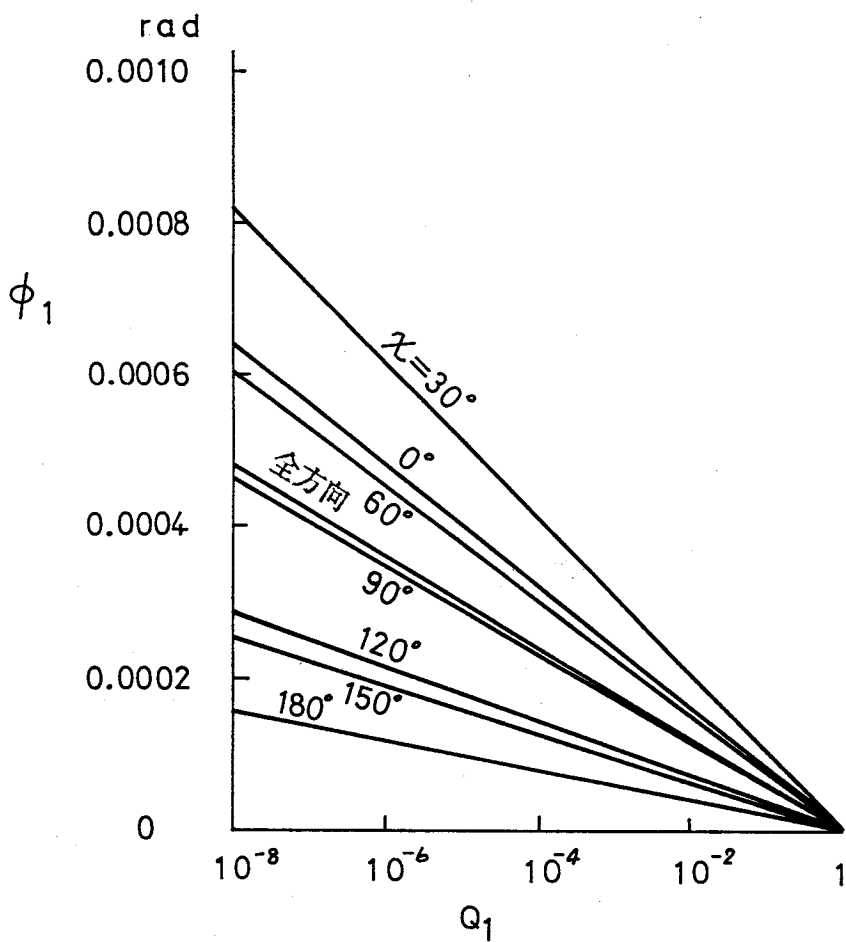


Fig. 3 · 4 · 24 北大西洋冬期の短波頂不規則波  
海面におけるラッキング変形量の長期分布  
(  $x / L_h = -0.01$  )

### 3・5 考察

供試船に対して3・3の計算法を適用した結果次のことが判明した。

- (a) 船体運動との関係では横揺が大きくなるとラッキング変形量が大きくなり、横揺が小さくなるにつれてラッキング変形量も小さくなるのでラッキング変形量に大きな影響を与えるのは横揺であることがわかる。
- (b) ラッキング変形量は波高にほぼ比例する。
- (c) 船体運動を考慮したラッキング変形量は船体運動を考慮しない静的ラッキング変形量の約1・5倍である。
- (d) ラッキング変形量を減少させるには船体中央付近に横隔壁を設置することが極めて有効である。
- (e) Waldenの北大西部冬期の波浪発現頻度に対する長期予測を行うと累積確率 $10^{-8}$ に対応するラッキング変形量は0.001rad程度となる。これは波高10mの規則波中のラッキング変形量にほぼ等しい。即ち累積確率 $10^{-8}$ に対応するラッキング変形量の等価波高は10mであるが、これは同じ累積確率の下での波浪曲げモーメントの等価波高とほぼ同じである。

以上の結果から今後の自動車船の設計に対する指針として次のことがいえる。

- (a) この供試船の場合ラッキング変形に起因する損傷は起っていない。従って今後の船についても波浪曲げモーメントの等価波高と同じ波高の下でのラッキング変形量が0.001 rad程度ならばラッキング変形に起因する損傷の心配はまずないといえる。
- (b) 初期の自動車船でラッキング変形に起因する亀裂損傷が起ったがこの場合は船倉に横隔壁がなく供試船に比べて横剛性が低く、このため亀裂損傷を起こした横桁リングを局部的に補強しても殆ど効果がなかった。このような場合には例えば船体中央付近に横隔壁を設置するなど横剛性を高めることが損傷防止に有効である。

## 第4章 結 言

以上ラッキング変形の発生機構を明らかにすることを目的として研究を行ったが、ここで得られた結論は次の如くである。

第1章では研究の背景及び船体全体に加わる荷重と変形機構を分類したときラッキング変形がどのような位置を占めるかを示した。

第2章ではラッキング変形に関する基礎理論を展開した。即ちまずラッキング変形を生ぜしめる荷重成分について述べ、次に横桁リングや横隔壁を有する箱形梁がそのような荷重を受けたときのラッキング変形の基礎式を導いた。その際横桁リングからの反力を取扱いに関し、箱形梁の各要素の剪断撓みを考慮した厳密解とこれを無視した近似解の2通りの解を導いた。

さらに実験結果や有限要素法による計算結果との比較を行い、ここで導いた理論の妥当性を確認した。また近似解でも十分実用に供しうることが明らかになった。

第3章では自動車のラッキング変形について検討した。まず自動車船には多層の甲板が設置されていることを考慮して第2章で導いた理論を多層甲板を有する場合に拡張した。

次に供試船について規則波中で船体運動を計算し、またそれに伴うラッキング変形量を求めた。その結果ラッキング変形に大きな影響を与えるのは横揺であること、またラッキング変形量は波高にほぼ比例することが判明した。

さらにWaldenの北大西洋冬期の波浪発現頻度に対する長期予測を行った。その結果累積確率 $10^{-8}$ に対応するラッキング変形量は $0.001$  rad程度となりこれは波高 $10$  mの規則波中のラッキング変形量にほぼ等しいことが判明した。

なおラッキング変形量を減少させるには船体中央付近に横隔壁を設けることが極めて有効であることが明らかになった。

今後の自動車船の設計指針として波浪曲げモーメントの等価波高と同じ波高の下でのラッキング変形量が0.001 rad程度ならばラッキング変形に起因する損傷を防止できるといえる。

## 謝 辞

本研究を遂行するに終始ご懇篤なるご指導を賜った大阪大学工学部  
八木順吉教授・船木俊彦助教授に深く感謝の意を表すものである。

また、日立造船（株）大阪工場 副工場長酒井利夫博士及び柰中勝氏には  
終始有益なご示唆と激励を頂いた。ここに厚く御礼申し上げる。



## 参考文献

- 1) 八木 順吉, 服部 陽一 : 船体のラッキング現象について,  
関西造船協会誌, 第161号, 昭51. 6
- 2) 八木 順吉, 船木 俊彦, 服部 陽一, 太田 三千雄 :  
船体のラッキング現象について (第2報), 関西造船協会誌, 第170号,  
昭53. 9
- 3) 八木 順吉, 船木 俊彦, 服部 陽一, 太田 三千雄, 西本 正一 :  
船体のラッキング現象について (第3報), 関西造船協会誌, 第170号,  
昭53. 9
- 4) 八木 順吉, 船木 俊彦, 服部 陽一, 太田 三千雄, 本間 茂 :  
船体のラッキング現象について (第4報), 関西造船協会誌, 第174号,  
昭54. 9
- 5) 中村 一郎, 片笠 泰治, 杵中 勝, 服部 陽一 :  
変動する物理量の長期予測値の近似計算法, 関西造船協会誌, 第157号,  
昭50. 6
- 6) 中村 一郎, 片笠 泰治, 杵中 勝, 服部 陽一 :  
変動する物理量の長期予測値の近似計算法 (第2報), 関西造船協会誌,  
第159号, 昭50. 12
- 7) 本間 茂, 吉川 均 : 船体のラッキング現象について,  
大阪大学大学院工学研究科特別研究, 昭52. 3

- 8) 西本 正一 : 船体のラッキング現象について,  
大阪大学大学院工学研究科特別研究, 昭53. 3
- 9) 本間 茂 : 自動車運搬船のラッキング強度に関する研究,  
大阪大学大学院工学研究科特別研究, 昭54. 3
- 10) 伊藤 英生 : 自動車運搬船のラッキング強度に関する研究, 昭55. 3