(昭和 35 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

油槽船の横強度の計算例について

正員 西 牧 興*

Some Examples of the Calculations on the Transverse Strength of Oil Tanker

By Ko Nishimaki, *Member*

Summary

The paper on the stress measurements of the transverse members of three actual tankers were already reported by the author, and after them, similar experiments were carried out on the two tankers under the auspices of the 38th. Research Committee of the Shipbuilding Research Association of Japan.

In this paper, were described an approximate calculation method on the transverse strength of tanker by use of Slope-deflection method and the examples of the calculations to be compared with some data of the experiments.

I. 緒 言

油槽船の横強度についての実船計測資料は全く見当たらないのかんがみ、著者はさきに 3 隻の油槽船に対してその試運転時を利用して実船実験を行ない、その結果はすでに報告した⁽¹⁾。またその後、日本造船研究協会主催の下に、さらに 2 隻の油槽船の横強度計測実験も実施された。ここにこれらの資料の一部について行なつた近似計算の方法、ならびにその結果を報告する。

油槽船の横強度の計算方法は、従来数種発表されている⁽²⁾。これらはいずれも極めて優れたものであるが、実際にその使用を試みる場合に相当煩雑な手数を要する場合が多く、あるいはまた設けられた仮定についても、2, 3 疑問の点がうかがえるものもあるように見受けられる。著者は、できるだけ機械的な操作によつて計算を行うことができることを目標として、撓角法による計算方式を採つた。また、厳密な計算を行なうことは、いたなずらに問題を複雑化するのみである恐れがあるので、実験の結果をもとになるべく適当な仮定を設けることによつて、計算方法を簡易化するように努めた。

II. 剪断および部材の端部肘板等の影響を考慮に入れた撓角法の基本式について

従来主として建築構造等の計算に使用されている撓角法においては、剪断あるいは部材端部肘板等の影響などは含まれていないのが一般のように見受けられる。しかし、油槽船の Transverse Web Frame のごとくに、その部材長に対して部材深さが大きく、且大きな肘板を持つような構造部材に対しては、これらの影響を考慮に入れる必要があるものと思われる。この部材端部構造の影響を考えるには、もしなんらかの方法でいわゆる Span Point を決定することが可能であるならば、各部材に対して Span Point を設けて、端部にそれだけの剛体長さを持つような構造の梁に対する撓角法の基本式を求めておけば、以後の計算は画一的に実施することが可能となつてはなはだ便利である。ゆえにここでは、先ず Span Point が既に決定されたものとして、剪断の影響を考慮に入れた、両端にある長さの剛体部を持つ梁に対する撓角法の基本式を求めることにする。梁の曲げに対する剪断の影響については松浦氏が発表されている⁽³⁾ので、これを参考にして剪断の影響を考慮に入れた均一断面梁の基本式を求め、これに両端剛部の影響を加えて目的の撓角法基本式を導出する。

(1) 均一断面梁の撓角法基本式

いま第 1 図のごとくに任意の分布荷重 $w(x)$ が働き、材端に曲げモーメントを受けて両端面がそれぞれ θ_c , θ_d だけ回転した均一断面梁 CD を考える。それぞれは図中に示すものを正とする。任意断面における曲げモーメントおよび剪断力は次のごとくに表わされる。

原稿受付 昭和 35 年 6 月 20 日

* 日立造船技術研究所

Fig. 1

(1), (2) を (3) に代入し, 且つ

$$\eta = 6EI_0/AGl^2 \quad (4)$$

と置いて整理すれば,

$$\left. \begin{aligned} M_C &= -\frac{2EI_0}{(2\eta+1)l} \{(\eta+2)\theta_C + (1-\eta)\theta_D - 3\phi_0\} + \frac{1}{2\eta+1} \{-(\eta+2)C_1 + C_2\} \\ M_D &= -\frac{2EI_0}{(2\eta+1)l} \{(1-\eta)\theta_C + (\eta+2)\theta_D - 3\phi_0\} + \frac{1}{2\eta+1} \{(\eta-1)C_1 + C_2\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} R_C &= -\frac{6EI_0}{(2\eta+1)l^2} (\theta_C + \theta_D - 2\phi_0) + \frac{3C_1 - 2C_2}{(2\eta+1)l} + \frac{W}{l}(l-a) \\ R_D &= -\frac{6EI_0}{(2\eta+1)l^2} (\theta_C + \theta_D - 2\phi_0) + \frac{3C_1 - 2C_2}{(2\eta+1)l} - \frac{aW}{l} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= Wa - \frac{1}{l} \int_0^l w(x) \cdot x^2 dx \\ C_2 &= Wa - \frac{1}{l^2} \int_0^l w(x) \cdot x^3 dx \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

第2図のごとき集中荷重の場合については, 任意の断面における曲げモーメントおよび剪断力は

$$0 \leq x \leq l_1 :$$

$$\left. \begin{aligned} M_x &= -M_C \left(1 - \frac{x}{l}\right) + M_D \frac{x}{l} - \sum_{i=1}^n P_i \left(1 - \frac{l_i}{l}\right) x \\ F_x &= -\frac{1}{l} (M_C + M_D) + \sum_{i=1}^n P_i \left(1 - \frac{l_i}{l}\right) \\ l_p \leq x \leq l_{p+1} \\ M_x &= -M_C \left(1 - \frac{x}{l}\right) + M_D \frac{x}{l} - \sum_{i=1}^p P_i \frac{l_i}{l} (l-x) - \sum_{i=p+1}^n P_i \frac{x}{l} (l-l_i) \\ F_x &= -\frac{1}{l} (M_C + M_D) - \sum_{i=1}^p P_i \frac{l_i}{l} + \sum_{i=p+1}^n P_i \left(1 - \frac{l_i}{l}\right) \\ l_n \leq x \leq l \\ M_x &= -M_C \left(1 - \frac{x}{l}\right) + M_D \frac{x}{l} - \sum_{i=1}^n P_i \frac{l_i}{l} (l-x) \\ F_x &= -\frac{1}{l} (M_C + M_D) - \sum_{i=1}^n P_i \frac{l_i}{l} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

前と同様にして端部モーメントおよび反力は

Fig. 2

$$M_C = \frac{2EI_0}{(2\eta+1)l} \left\{ (\eta+2)\theta_C + (1-\eta)\theta_D - 3\phi_0 \right\} - \frac{1}{(2\eta+1)l^2} \sum_{i=1}^n P_i l_i (l-l_i) (l+\eta l-l_i) \right\} \quad (8)$$

$$M_D = \frac{2EI_0}{(2\eta+1)l} \left\{ (1-\eta)\theta_C + (\eta+2)\theta_D - 3\phi_0 \right\} + \frac{1}{(2\eta+1)l^2} \sum_{i=1}^n P_i l_i (l-l_i) (\eta l+l_i) \right\}$$

$$R_C = -\frac{6EI_0}{(2\eta+1)l^2} (\theta_C + \theta_D - 2\phi_0) + \frac{1}{(2\eta+1)l^3} \sum_{i=1}^n P_i l_i (l-l_i) (l-2l_i) + \sum_{i=1}^n P_i \left(1 - \frac{l_i}{l}\right) \right\} \quad (9)$$

$$R_D = -\frac{6EI_0}{(2\eta+1)l^2} (\theta_C + \theta_D - 2\phi_0) + \frac{1}{(2\eta+1)l^3} \sum_{i=1}^n P_i l_i (l-l_i) (l-2l_i) - \sum_{i=1}^n P_i \frac{l_i}{l} \right\}$$

(2) 両端に剛体部長を有する梁の撓角法基本式

第3図のごとき梁を考える。C, D点をそれぞれ Span Point とすると, $\overline{AC}$, $\overline{DB}$ 部はそれぞれ剛性が無限大である。いま $\overline{CD}$ 部については前節の結果がそのまま適用されるので次に $\overline{AC}$, $\overline{DB}$ 部について考える。この剛体部の力系をそれぞれ第4図のごとくすると, $M_C' = -M_C$, $M_D' = -M_D$ であるので,

Fig. 3

Fig. 4

$$\left. \begin{aligned} R_A &= R_C + W_A & M_A &= M_C - R_C l_A - W_A a_A \\ R_B &= R_D - W_B & M_B &= M_D - R_D l_B + W_B (l_B - a_B) \end{aligned} \right\}$$

$$\text{ただし } W_i = \int_0^{l_i} w(x_i) dx_i$$

$$a_i = \frac{\int_0^{l_i} w(x_i) x_i dx_i}{W_i} \quad i = A, B \quad (10)$$

また, 次の関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \theta_C &= \theta_A, & \theta_D &= \theta_B \\ \phi_0 &= \frac{1}{l} (L\phi - l_A \theta_A - l_B \theta_B) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(10), (11)に前節で求めた各値を代入して整理すれば, 求める式が得られる。集中荷重の場合にも同様にして, 剛体部の釣合の条件を考えることにより解くことができる。

これらの結果を整理し, 且, 今後の計算に便利のように各部材寸法等を一般化して第5図のごとく表わすと, 撓角法基本式は次のごとくなる。

Fig. 5

$$\left. \begin{aligned} M_{mn} &= 2EK_0 k_{mn} (2\alpha_{mn} \theta_{mn} + \beta_{mn} \theta_{nm} - 3\delta_{mn} \phi_{mn}) + C_{mn} \\ M_{nm} &= 2EK_0 k_{mn} (\beta_{mn} \theta_{mn} + 2\alpha_{nm} \theta_{nm} - 3\delta_{nm} \phi_{mn}) + C_{nm} \\ Q_{mn} &= -6EK_0 \gamma_{mn} (\mu_{mn} \theta_{mn} + \mu_{nm} \theta_{nm} - 2\nu_{mn} \phi_{mn}) + D_{mn} \\ Q_{nm} &= -6EK_0 \gamma_{nm} (\mu_{mn} \theta_{mn} + \mu_{nm} \theta_{nm} - 2\nu_{nm} \phi_{nm}) + D_{nm} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここに

$$\alpha_{mn} = \frac{1 + \frac{\eta_{mn}}{2} + 3a_{mn} + 3a_{mn}^2}{2\eta_{mn} + 1}$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{nm} &= \frac{1 + \frac{\eta_{mn}}{2} + 3b_{mn} + 3b_{mn}^2}{2\eta_{mn} + 1} \\ \beta_{mn} &= \frac{1 - \eta_{mn} + 3(a_{mn} + b_{mn}) + 6a_{mn}b_{mn}}{2\eta_{mn} + 1} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \delta_{mn} &= \mu_{mn} \cdot d_{mn} & \delta_{nm} &= \mu_{nm} \cdot d_{nm} \\ \mu_{mn} &= \frac{1 + 2a_{mn}}{2\eta_{mn} + 1} & \mu_{nm} &= \frac{1 + 2b_{nm}}{2\eta_{nm} + 1} & \nu_{mn} &= \frac{d_{mn}}{2\eta_{mn} + 1} \\ a_{mn} &= l'_{mn}/l_{mn} & b_{mn} &= l'_{nm}/l_{nm} & d_{mn} &= L_{mn}/l_{mn} \\ \gamma_{mn} &= k_{mn}/l_{mn} & k_{nm} &= \frac{I_{mn}/l_{mn}}{K_0} & \eta_{mn} &= \frac{6EI_{mn}}{Aw_{mn} \cdot Gl_{mn}^2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ただし $I_{mn} \dots \overline{MN}$ 部材の中間部の断面 2 次モーメント

$Aw_{mn} \dots$ " " Web の断面積

$k_{mn} \dots \overline{MN}$ 部材の剛比。任意の標準部材の断面 2 次モーメント I_0 と中間部長さ l_0 との比を K_0 とするとき (14) のごとくに表わされる。

M_{mn} , M_{nm} はそれぞれ、部材の N 端および N 端に働く材端モーメントで、その働く材端に対して時計方向に回転するものを正とし、 Q_{mn} , Q_{nm} はそれぞれの端く働く材端剪断力で、その働く材端に対して、時計方向に回転しようとするものを正とする。さらに θ_{mn} , θ_{nm} および ϕ_{mn} はそれぞれ節点角および部材角を表わし、いずれも時計方向回転を正する。また C_{mn} , C_{nm} , D_{mn} , D_{nm} はそれぞれ荷重項であり、一般に次のごとくに表わされる。

分布荷重の場合：

$$\left. \begin{aligned} C_{mn} &= -\frac{1}{2\eta_{mn} + 1} \{ (1 + 2a_{mn})C_2 - (\eta_{mn} + 2 + 3a_{mn})C_1 \} - a_{mn}(l_{mn} - g_{mn})W_{mn} - g'_{mn}W'_{mn} \\ C_{nm} &= -\frac{1}{2\eta_{nm} + 1} \{ (1 + 2b_{nm})C_2 - (1 - \eta_{nm} + 3b_{nm})C_1 \} - b_{nm}g_{nm}W_{nm} + (l'_{nm} - g'_{nm})W'_{nm} \\ D_{mn} &= -\frac{3C_1 - 2C_2}{(2\eta_{mn} + 1)l_{mn}} + \frac{W_{mn}}{l_{mn}}(l_{mn} - g_{mn}) + W'_{mn} \\ D_{nm} &= -\frac{3C_1 - 2C_2}{(2\eta_{nm} + 1)l_{nm}} - \frac{g_{nm}}{l_{nm}}W_{nm} - W'_{nm} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= W_{mn}g_{mn} - \frac{1}{l_{mn}} \int_0^{l_{mn}} w(x) \cdot x^2 dx \\ C_2 &= W_{mn}g_{mn} - \frac{1}{l_{mn}^2} \int_0^{l_{mn}} w(x) \cdot x^3 dx \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ただし、 W_{mn} , W'_{mn} , W'_{nm} はそれぞれ $M'N'$, MM' , $N'N$ 部の荷重の合計を、また g_{mn} , g'_{mn} , g'_{nm} はそれぞれの部分の左端から荷重の重心位置までの距離を示す。また (16) における x 座標の原点は M' 点をとる。集中荷重の場合：

$$\left. \begin{aligned} C_{mn} &= -\frac{1}{(2\eta_{mn} + 1)l_{mn}^2} \sum_i P_i u_i (l_{mn} - u_i) (l_{mn} + \eta_{mn}l_{mn} - u_i) \\ &\quad - \frac{l'_{mn}}{(2\eta_{mn} + 1)l_{mn}^3} \sum_i P_i u_i (l_{mn} - u_i) (l_{mn} - 2u_i) \\ &\quad - \frac{l'_{mn}}{l_{mn}} \sum_i P_i (l_{mn} - u_i) \\ C_{nm} &= -\frac{1}{(2\eta_{nm} + 1)l_{nm}^2} \sum_i P_i u_i (l_{mn} - u_i) (\eta_{mn}l_{mn} + u_i) \\ &\quad - \frac{l'_{nm}}{(2\eta_{nm} + 1)l_{nm}^3} \sum_i P_i u_i (l_{mn} - u_i) (l_{mn} - 2u_i) + \frac{l'_{nm}}{l_{mn}} \sum_i P_i u_i \\ D_{mn} &= -\frac{1}{(2\eta_{mn} + 1)l_{mn}^3} \sum_i P_i u_i (l_{mn} - u_i) (l_{mn} - 2u_i) + \sum_i \frac{P_i}{l_{mn}} (l_{mn} - u_i) \\ D_{nm} &= -\frac{1}{(2\eta_{nm} + 1)l_{nm}^3} \sum_i P_i u_i (l_{mn} - u_i) (l_{mn} - 2u_i) - \sum_i \frac{P_i}{l_{mn}} u_i \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

ここに P_i は i 番目の集中荷重を、また u_i は M' 点と P_i の作用点との距離を示す。

以上の各式から判るように、このような構造の梁に種々なる横荷重が作用する場合においても、材端モーメント

Table 1

	C_A	C_B	D_A	D_B
	$-\frac{wl^2}{12}(1+6a+6a^2)$	$\frac{wl^2}{12}(1+6b+6b^2)$	$\frac{wl}{2}(1+2a)$	$-\frac{wl}{2}(1+2b)$
	$-\frac{w_0 l^2}{1+2\eta} \left(\frac{1+7a}{20} + \frac{1+8a}{12} \eta \right)$ $-\frac{w_b l^2}{1+2\eta} \left(\frac{2+9a}{60} + \frac{1+4a}{12} \eta \right)$ $-W_A g_A$	$-\frac{w_b l^2}{1+2\eta} \left(\frac{2+9b}{60} + \frac{1+4b}{12} \eta \right)$ $+\frac{w_0 l^2}{1+2\eta} \left(\frac{1+7b}{20} + \frac{1+8b}{12} \eta \right)$ $+W_B (l_b - g_b)$	$\frac{l}{1+2\eta} \left(\frac{7w_0+3w_b}{20} + \frac{2w_0+4w_b}{3} \eta \right)$ $+W_A$	$-\frac{l}{1+2\eta} \left(\frac{3w_b+7w_0}{20} + \frac{4w_0+2w_b}{3} \eta \right)$ $-W_B$
	$-\frac{wl^2}{d} \left[\frac{a^2}{6}(2a+3) + \frac{1}{1+2\eta} \left(\frac{1+7a}{30} + \frac{1+6a}{12} \eta \right) \right]$	$\frac{wl^2}{d} \left[\frac{b^2}{6}(3d-2b) + \frac{b}{12}(1+6b) + \frac{1}{1+2\eta} \left(\frac{1+7b}{20} + \frac{1+8b}{12} \eta \right) \right]$	$\frac{wl}{d} \left[\frac{a}{2}(a+1) + \frac{1}{1+2\eta} \left(\frac{3}{20} + \frac{\eta}{3} \right) \right]$	$-\frac{wl}{d} \left[db - \frac{b^2}{2} + \frac{a}{2} + \frac{1}{1+2\eta} \left(\frac{7}{20} + \frac{2}{3} \eta \right) \right]$
	$-\frac{wl^2}{d-\lambda} \left[\frac{a-\lambda}{12} \{ 2(a-\lambda)(2a+\lambda) + 1+6a \} + \frac{1}{1+2\eta} \left(\frac{2+9a}{60} + \frac{1+4a}{12} \eta \right) \right]$	$\frac{wl^2}{d-\lambda} \left[\frac{b}{6}(3-2b) + \frac{b}{12} \left(\frac{b}{2} + \frac{1}{12} \right) + \frac{1}{1+2\eta} \left(\frac{1+7b}{20} + \frac{1+8b}{12} \eta \right) \right]$	$\frac{wl}{d-\lambda} \left[\frac{a-\lambda}{2}(a-\lambda+1) + \frac{1}{1+2\eta} \left(\frac{3}{20} + \frac{1}{3} \eta \right) \right]$	$-\frac{wl}{d-\lambda} \left[\frac{1}{2}(1-b^2) + \frac{a-\lambda}{2} - \frac{1}{1+2\eta} \left(\frac{3}{20} + \frac{1}{3} \eta \right) \right]$
	$-\frac{wl^2}{60(d-a-\lambda)} (1-\lambda)^2 (2+3\lambda) + \frac{9a+6a\lambda}{1+2\eta}$ $-\frac{wl^2}{12(d-a-\lambda)} (1+\lambda) + \frac{9a}{1+2\eta}$	$\frac{wl^2}{2} + \frac{wl^2}{d-a-\lambda} \left[-\frac{b}{3} + \frac{b(1-\lambda)}{2} \right]$ $+\frac{(1-\lambda)^3}{60} (3+4\lambda+3\lambda^2-9b) + \frac{3b\lambda+6b\lambda^2}{1+2\eta}$ $+\frac{(1-\lambda)^3}{12} (1+\lambda-4b) \frac{\eta}{1+2\eta}$	$\frac{wl}{d-a-\lambda} \left[\frac{(1-\lambda)^2(3+2\lambda)}{20(1+2\eta)} + \frac{(1-\lambda)^3}{3} \frac{\eta}{1+2\eta} \right]$	$-\frac{wl}{d-a-\lambda} \left[\frac{b^2}{2} - \frac{(1-\lambda)^2}{20} + \frac{(1-\lambda)^2(3+2\lambda)}{20(1+2\eta)} + \frac{(1-\lambda)^3}{3} \frac{\eta}{1+2\eta} \right]$
	0	$\frac{wl^2}{6}(b-\lambda)^2$	0	$-\frac{wl^2}{2}(b-\lambda)^2$

Fig. 6

トならびに材端剪断力は、荷重項のみを重畳すれば良く、あらゆる場合に重畳の法則が成立する。

これらの荷重項の一般式について、実際の油槽船に生ずると思われる種々の荷重状態に対する計算を行なつた結果を第1表に示す。

III. 撓角法の油槽船横強度計算への応用

前章に求めた撓角法の基本式を用いて、撓角法によつて油槽船の横強度の計算を行なう。

第6図は実験に供した油槽船の内の1例として、47,000 D. W. T. 型船の油槽内見取図、また第7図はその中

Fig. 7

央断面図である。すなわち1油槽長を4等分した位置に3枚の Transverse Web Frame が配置され、その船首側のものは、3層の Horizontal Girder によつて、横隔壁に結合されている。Longitudinal Girder は船体中心線上のみにしか配置されておらず、横強度に関しては、Transverse Web Frame を補強の主体とした構造を採っている。従つて Transverse Web Frame に対する縦通部材の影響としては、これらの Center Girder および縦通隔壁のみを考えればよい。

いま、3ヶの Transverse Web Frame を船首側からそれぞれ F.M.A. の添字を付して表わすこととする。

また外板の面内荷重に対する剛性は極めて大きいものとして、外板位置での各 Transverse Web Frame の垂直方向の相対的な変位はないものと仮定する。

それぞれの Transverse Web Frame の節点番号および部材番号を第 8 図のごとくに定める。ここに上述の仮定に基づき、節点①および⑤はその変位が拘束されているものとする。1 枚の Transverse Web Frame に対して、節点方式および層方程式を求めると、次のごとくなる。

$$\left. \begin{aligned} M_{12} + M_{16} &= 0 & M_{61} + M_{67} + M_{6.11} &= 0 \\ M_{21} + M_{27} + M_{23} &= 0 & M_{76} + M_{72} + M_{7.8} &= 0 \\ M_{32} + M_{38} + M_{34} &= 0 & M_{87} + M_{83} + M_{8.9} &= 0 \\ M_{43} + M_{49} + M_{45} &= 0 & M_{9.8} + M_{9.4} + M_{9.10} &= 0 \\ M_{54} + M_{5.10} &= 0 & M_{10.9} + M_{10.5} + M_{10.12} &= 0 \\ Q_{23} + Q_{78} - Q_{21} - Q_{76} &= 0 \\ Q_{34} + Q_{89} - Q_{87} - Q_{32} &= 0 \\ Q_{45} + Q_{9.10} - Q_{9.8} - Q_{4.3} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

また未知数である節点角および部材角は、各部材の伸縮を無視すれば

$$\left. \begin{aligned} \theta_{12} &= \theta_{16} = \theta_1, & \theta_{61} &= \theta_{67} = \theta_{6.11} = \theta_6 \\ \theta_{21} &= \theta_{23} = \theta_{27} = \theta_2, & \theta_{76} &= \theta_{72} = \theta_{7.8} = \theta_7 \\ \theta_{32} &= \theta_{34} = \theta_{38} = \theta_3, & \theta_{87} &= \theta_{83} = \theta_{89} = \theta_8 \\ \theta_{43} &= \theta_{45} = \theta_{49} = \theta_4, & \theta_{9.8} &= \theta_{94} = \theta_{9.10} = \theta_9 \\ \theta_{54} &= \theta_{5.10} = \theta_5, & \theta_{10.9} &= \theta_{10.5} = \theta_{10.12} = \theta_{10} \\ \phi_{16} &= \phi_{27} = \phi_{38} = \phi_{49} = \phi_{5.10} = \phi_1 \\ \phi_{12} &= \phi_{67} = \phi_2, & \phi_{23} &= \phi_{78} = \phi_3 \\ \phi_{34} &= \phi_{89} = \phi_4, & \phi_{45} &= \phi_{9.10} = \phi_5 \\ \phi_{6.11} &= \phi_6, & \phi_{10.12} &= \phi_7 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

すなわち未知数は 1 油槽長間において合計 $17 \times 3 = 51$ ケであり、これに対して節点および層方程式は $13 \times 3 = 39$ であり、その他に部材角間の関係として次のものが得られる。

$$\phi_2 L_{1.2} + \phi_3 L_{2.3} + \phi_4 L_{3.4} + \phi_5 L_{4.5} = 0 \quad (20)$$

Fig. 9

したがって、すべての未知数を決定するために必要なあと 9 ケの条件は、縦通隔壁および 2 ケの Center Girder の変形との関連において求めなければならない。

1 例として船底中心線縦桁について考えると、その構造並びに負荷状態は第 9 図のごとくに表わされる。ここに集中荷重 $-P_B$ は Transverse Web Frame から受ける反力を表わす。この梁の両端の条件は隣接油槽の載荷状況も併せ考えて、本来なれば船の長さ方向にわたる連続梁として取扱わなければならないが、問題を簡単化するために両端の横隔壁位置で固定として扱う。しかるときは(12)より、材端モーメントは荷重項のみで表わされる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} M_{BF} &= \frac{l_B}{1+2\eta_B} \sum_i \left\{ \left(\frac{l_{Bi}}{l_B} - 1 \right) \left(\frac{l_{Bi}}{l_B} - \eta_B - 1 \right) \frac{l_{Bi}}{l_B} + \frac{l_{Bi}}{l_B} \cdot \frac{l_{Bf}}{l_B} \left(1 - \frac{l_{Bi}}{l_B} \right) \left(1 - 2 \frac{l_{Bi}}{l_B} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{l_{Bf}}{l_B} (1 + 2\eta_B) \left(1 - \frac{l_{Bi}}{l_B} \right) \right\} P_{Bi} - \frac{w_B l_B}{12} \left(1 + 6 \frac{l_{Bf}}{l_B} + 6 \frac{l_{Bf}^2}{l_B^2} \right) \\ &= f_{BF} (P_{BF}, P_{BM}, P_{BA}) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

同様にして

$$M_{Ba} = f_{Ba}(P_{BF}, P_{BM}, P_{BA})$$

$i = F, M, A$. また B は Bottom Center Girder を表わす。

また、それぞれの反力の作用点における撓量は

$$\begin{aligned} y_{BF} = & \frac{1}{EI_B} \left[M_{Bf} \frac{l_{BF} l_B}{6} \left(1 - \frac{l_{BF}}{l_B} \right) \left(2 - \frac{l_{BF}}{l_B} \right) - M_{Ba} \frac{l_{BF} l_B}{6} \left(1 - \frac{l_{BF}}{l_B} \right) \left(1 + \frac{l_{BF}}{l_B} \right) \right. \\ & - \frac{P_{BF} l_B l_{BF}}{6} \left\{ 2 l_{BF} \left(1 - \frac{l_{BF}}{l_B} \right)^2 + l_B \left(1 - \frac{l_{BF}}{l_B} \right) \eta_B \right\} \\ & - \frac{P_{BM} l_B^2 l_{BF}}{6} \left(1 - \frac{l_{BM}}{l_B} \right) \left(2 \frac{l_{BM}}{l_B} - \frac{l_{BF}^2 + l_{BM}^2}{l_B^2} + \eta_B \right) \\ & - \frac{P_{BA} l_B^2 l_{BF}}{6} \left(1 - \frac{l_{BA}}{l_B} \right) \left(2 \frac{l_{BA}}{l_B} - \frac{l_{BF}^2 + l_{BA}^2}{l_B^2} + \eta_B \right) \\ & \left. + \frac{w l_B^3 l_{BF}}{24} \left\{ 1 - 2 \frac{l_{BF}^2}{l_B^2} + \frac{l_{BF}^3}{l_B^3} + 2 \eta_B \left(1 - \frac{l_{BF}}{l_B} \right) \right\} \right] = f_{BF}(M_{Bf}, M_{Ba}, P_{BF}, P_{BM}, P_{BA}) \quad (22) \end{aligned}$$

同様にして

$$\begin{aligned} y_{BM} &= f_{BM}(M_{Bf}, M_{Ba}, P_{BF}, P_{BM}, P_{BA}) \\ y_{BA} &= f_{BA}(M_{Bf}, M_{Ba}, P_{BF}, P_{BM}, P_{BA}) \end{aligned} \quad (23)$$

ゆえに (21) を (22) および (23) に代入すれば、Bottom Center Girder と Transverse Web Frame の 3 ケの交点における撓量が、それぞれ反力の 1 次関数として求められる。このような関係式は Under Deck Center Girder および縦通隔壁についてもそれぞれ 3 ケずつ求めることができる。しかし、これらの撓み量および反力量は任意の Transverse Web Frame において、次のごとくに表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} y_B &= L_{5.10} \phi_1 + L_{10.12} \phi_7 \\ y_D &= L_{1.6} \phi_1 + L_{6.11} \phi_6 \\ y_L &= L_{5.10} \phi_1 \\ P_B &= 2 Q_{12.10} \\ P_D &= 2 Q_{11.6} \\ P_L &= Q_{6.1} + Q_{7.2} + Q_{8.3} + Q_{9.4} + Q_{10.5} - Q_{6.11} - Q_{10.12} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

ここに添字 B, D, L はそれぞれ Bottom および Under Deck Center Girder および縦隔壁を表わす。

ゆえにこれらより、9 ケの 1 次方程式が求められ、結局すべての未知数を決定することができる。また横隔壁の変形を考慮する場合にも、これと同様な考え方によつて各縦通部材の両端支点の沈下を考えることによつて、その影響を導入することは容易である。

これらの 51 元連立 1 次方程式を解くことは、電子計算機によれば容易ではあるが、実用計算としてはやはり相当の手数を要するので、次に実験の結果等もあわせ考えて、計算を簡易化する。

一般に横隔壁および縦隔壁の面内荷重に対する剛性は非常に大きく、したがつて、船側外板と縦隔壁とが垂直方向に相対的な変位を生じて、Wing Tank が菱形に変形することは無視しても差し支えないものと考えられる。このことは、実船計測におい喫水変化がほとんどなく且 Center Tank 内の水位が大幅に変化した場合に Wing Tank 内の Transverse Web Frame の船底部材と甲板部材との応力分布状況が極めて相似していることから裏付けられるものと思われる。これより第 8 図における節点⑥および⑩はその変位を完全に拘束されているものと考えても近似的には差し支えないものと考えられる。また計測結果における油槽長の中央および船尾側の Transverse Web Frame の応力分布は、あらゆる場合にほとんど完全に一致していると云つても差し支えない程度である。すなわちこのことは、節点⑩および⑭を完全拘束と考えてもある程度差し支えなく、少なくとも Wing Tank 内の各部材の応力分布にはほとんど影響をおよぼさないものと考えられる。このように節点 ⑥, ⑩, ⑭, ⑮の変位が拘束されているものと考えれば、3 ケの Transverse Web Frame をそれぞれ関連して解く必要が無く計算は極めて簡易化される。すなわち未知数は (19) における $\theta_1 \sim \theta_{10}$ および $\phi_2 \sim \phi_5$ の 14 ケとなり、これに対して (18) および (20) の 14 ケの方程式を連立して解けば良いこととなる。

IV. 計算例について

実際に計算を行なうにあたって採った細部にわたる事項を列挙すれば次のとおりである。

(1) 各節点の位置は各部材の中性軸の交点とした。特に3部材が集る位置でその交わり、致しない場合には、その2つの交点の中央を採った。

(2) Transverse Web Frame のフランジとして働く外板、甲板あるいは縦通隔壁の有効幅は、その部材長方向のモーメント分布によつても異なり、厳密には各部材に対して一義的に定めることはできない。しかしこれでは実際に計算を行なうにあたってはなほ不便である。いま実験で求められた各部材断面の部材長方向の応力分布からみると、外板、甲板部においてその部材断面の中性軸位置は板面に極めて近く、有効幅を100%すなわち Transverse Web Frame の間隔一杯に採った場合の計算による位置と大略一致するので、以下の計算においては平板フランジの有効幅はすべて100%とした。また波形隔壁の有効幅については、例えば伏見氏等の大型模型による実験⁽⁴⁾によれば、平板の場合に比へて約1/3に減少すると云う結果が示されている。また今回の実験結果からみても中性軸位置は平板の場合に比へて板面から離れており、有効幅の小なることか推測されるか、適確にその値を決めることは困難であるので、比較計算の意味もあつてこの場合にも有効幅は100%として計算を行なつた。

(3) 各部材の断面2次モーメントを求める場合には、軽減孔、切欠き等の存在を無視した。

(4) 波形隔壁部のウェブの深さは、その最狭部の値を採った。

(5) 円弧形肘板を持つ梁の Span Point を取扱つた研究としては、山口氏の模型実験⁽⁵⁾があるが、これによれば梁深さと円弧半径の大略等しい付近においては、両端固定の場合 Span Point の位置は肘板長の20ないし40%の付近となるようである。しかし Transverse Web Frame の場合には、剪断の影響も考慮する必要もあるものと思われ、また実際の計算においては、Span Point の位置の誤差がおよぼす影響は比較的少いので、ここでは機械的に第10図のこことくにして各部材端部の剛体部の範囲を定めた。

(6) 計算の結果得られたモーメント分布から部材隅部の応力分布を求めるのには種々の方があるか⁽⁶⁾、ここでは Osgood 氏のくさひ理論を拡張した計算方法を採用することとした。

第11図は水位変化による各節点のモーメントの変動状況を計算した例である。また第12図ないし第15図は、Wing Tank 内の各部材のモーメント分布を実験状態に対応して計算したものである。また第16図は、同様な計算を

Fig 10

Fig 11

Fig. 12

Fig. 13

Fig. 14

Fig. 15

20,000 D W T 形油槽船について行なつた結果を示す。これらのモーメント分布図は、水平部材については上方に凸のモーメントを、また垂直部材については右方に凸のモーメントをそれぞれ正にとつて示されている。またこれらのモーメント分布図から、各部材の内縁に沿つた応力分布を計算して、実験値と比較した例を第 17 図～第 21 図に示す。

これらの結果でも明らかなように、実験結果と計算値とは比較的良好な一致を示し、この程度の近似計算によ

Fig. 16

Fig. 17

Fig. 18

Fig. 19

つても十分その目的を達し得るものと云つて差し支えないであらう。

なお最後に、Transverse Web Frame の各部材の中で最大応力を示す Wing Tank 内船底部材の両隅部について、水位の影響を調べてみる。第 22 図は、喫水あるいは Center Tank の水位がそれぞれ単独に変化した場

合の外板側隅部中心の計測応力値および同位置の節点モーメント計算値を示し、また第 23 図は同様に求めて縦隔壁側隅部中心のものを示す。これらの図から判るように、外板側隅部においては、喫水と Center Tank 水位とが互に相殺する方向に働き、縦隔壁側ではこれらがともに負の応力を生ずるように働く。したがって外板側隅部では喫水が深くかつ Tank 内空荷の場合が悪条件となり、縦隔壁では Center Tank 満載状態に最も大きな応力を生ずる。また実験時においては応力の零点は初期喫水時におかれているので、計算によるモーメント曲線と比較して、これら初期喫水の影響を除去すると、外板側隅部では最大応力約 11.2 kg/mm^2 隔壁側隅部では約 16.5 kg/mm^2 と云う値を示すこととなる。いずれにせよこれらの部分は荷重状態によつては過大な応力値を生じ得る所であり、形状的に応力の集中を避けうように努めるとともに、工作上の弱点を設けることのないように注意しなければならない。

V. 結 言

以上油槽船の横強度の実船計測資料に対して、近似計算を行ない、十分実用に供し得ることを確かめた。

なお、実測例の一部に、日本造船研究協会 SR-38 の資料を引用させて頂いたことに対し、感謝の意を表す次第である。

報告を終えるにあたり、終始御指導を賜つた大阪大学寺沢教授、日立造船機技術研究所・木下博士、および計算、検討に御協力を頂いた日立造船(株)、田島、片陸、浦田各氏に厚く御礼申上げる。

〔参 考 文 献〕

- (1) 西牧：油槽船横強度の実測例について；造船協会論文集 105 号
- (2) H.J. Adams：Notes on Stresses in Tankers' Members；TINA. Vol. 92
E. Steneroth：On the Transverse Strength on Tankers；Tr. Royal Inst. of Tesh. Stockholm 1955
岡部、堀：Wing Tank 立体格子構造計算について；造船協会論文集 106 号
その他
- (3) 松浦：梁の曲げにおける剪断の影響について；関西造船協会誌 89.90 号
- (4) 伏見、菱田、山本：隔壁構造の強度；日立造船技報 Vol. 17 No. 2
- (5) 山口：肘板を有する固定梁の実験について；造船協会論文集 102 号
- (6) W.R. Osgood：A Theory of Flexure of Beam with nonparallel Extreme Fibers；J. App. mech. Sept. 1939
F. Bleich：鉄骨構造
大野：ラーメン隅部の研究；土木学会誌 37 巻 7～9 号，39 巻 1，2 号
山本、井上：多径間ラーメン隅角部の応力分布とその近似計算；土木学会論文集 62 号
寺田：肘板付梁に関する研究；造船協会論文集 103 号
徳川、鬼頭：船体不連続部に生ずる応力分布の近似解法；海軍資料