船体上部構造の応力分布に就いて

正員 山 越 道 郎*

On the Stress Distribution of Ship's Superstructure

By Michio Yamakoshi, Member

Abstract

A calculation of the stress distribution of ship's superstructure is presented, which is introduced by combining author's former calculation of the shear lag distribution of house wall with H. H. Bleich's bending theory of superstructure, so the effects of bending and shear lag are both taken into consideration in this calculation. The numerical calculation of one example is carried out by this theory and by H. H. Bleich's theory respectively, and the results obtained by each theory are compared with a good agreement except in the vicinity of the superstructure ends.

1. 緒 言

President Wilson 号の実船実験¹⁾ によつて船体の縦応力の分布が主構造と上部構造の境で折れて上部構造内では逆に上にゆくに従つて減少する傾向のある事が発表されて以来、船体上部構造の応力分布に関する理論が Lyndon Crawford²⁾, H. H. Bleich³⁾, H. A. Schade⁴⁾ 等により発表された。この中 Lyndon Crawford の理論と H. H. Bleich の理論は共に“主構造と上部構造は夫々独立な梁として働く”と云う仮定の上に立つて居り、これら両構造の間に作用し合う水平及び垂直方向の力を両構造の境界上で水平方向の変位が等しく且垂直方向の力は両構造の垂直方向の変位の差に比例すると云う条件より定めている。即ち主構造と上部構造に対し夫々梁理論を適用し、いわゆる shear lag の影響は無視している。一方 H. A. Schade の理論は主構造が bending を受けても上部構造は全然 bending を生じない場合を考えており、板の有効幅の概念を応用して上部構造の応力分布を計算している。即ちこれは shear lag の影響のみを考えている。また著者⁵⁾ はさきに甲板室側壁の shear lag の分布を計算したが、この場合にも上部構造の bending の影響は考えなかつた。この様に従来の上部構造の理論は何れも bending か shear lag の一方のみしか考えていないので、著者は著者がさきに発表した計算法と H. H. Bleich の理論とを組合わせて bending と shear lag の両方の影響を考慮した計算法を導いた。なお最近寺沢教授、八木助教授⁶⁾ によつて矢張り bending と shear lag の両方の影響を考慮した理論が発表されているが、両氏の方法はその第 1 報では E. Reissner の方法を応用して歪エネルギー最小の条件より shear lag の分布を定め、又第 2 報、第 3 報では上部構造の有効断面積及び有効断面慣性能率を用いて近似計算を行つている。これに対し本稿で述べる著者の計算法では shear lag の分布に対しても基礎方程式を立てて居り、shear lag に対する取扱い方が全く異つている。

2. 基 礎 方 程 式

Fig. 1 に示す様に上部構造と主構造との境界に作用する単位長当りの水平及び垂直方向の力を夫々 q 及び p とし、上部構造及び主構造に作用する単位長当りの荷重を夫々 w_1 及び w_2 とする**。先ず Fig. 2 に示す様に上部構造のみを取出し、主構造との境界面を垂直変位零の状態に拘束して、これに Fig. 1 の q と等しい水平方向の力

を作用せしめる。然る時は拘束より垂直方向の反力 r が加えられるが、これは力の平衡条件より求められる。

原稿受付、1月3日

* 九州大学助教授

** Fig. 1 の矢印はこれらの力の正の向きを示す。

Fig. 2 の状態は垂直変位が零であるから bending は生じて居らず, shear lag のみの問題である。次に同じく上部構造に Fig. 3 に示す荷重を作用せしめる。Fig. 3 の状態は普通の bending の問題である。Fig. 2 及び Fig. 3 の荷重状態を重ね合わせれば Fig. 1 の荷重状態となるから, Fig. 1 の上部構造の状態は shear lag の問題である Fig. 2 の状態と bending の問題である Fig. 3 の状態に分離する事が出来る。主構造に対しても同様な分離が考えられるが, 本稿では上部構造に対してのみ shear lag を考慮し, 主構造に対しては H. H. Bleich の理論と同様にそのまま梁理論を適用する。

Fig. 4

Fig. 5

Fig. 6

Fig. 2 に示す shear lag の問題はもつと正確な解も可能ではあるが, Fig. 3 に示す bending の問題と連立に解かなければならないので, 本稿では近似解法による事とし, 著者がさきに甲板室側壁の shear lag を計算した方法を用いる。即ち先ず上部構造が甲板一層よりなる場合を考える事とし*, Fig. 4 に示す様に上の deck 及

び wall に働く tension を夫々 P_a 及び P_w , wall の上端及び下端に働く単位長当りの shearing force を夫々 q^* 及び q とすれば, 上の deck 及び wall の微小長さの平衡条件より次式を得る。

$$\frac{dP_a}{dx} = -q^*, \quad \frac{dP_w}{dx} = q^* - q \quad \therefore \frac{dP_a}{dx} + \frac{dP_w}{dx} = -q \quad (1)$$

次に wall の高さを h とし, wall の normal stress の分布を近似的に一様分布と仮定すれば, wall の上端より z の位置の単位長当りの shearing force q_z は次の様になる。

$$q_z = q^* - \frac{dP_w}{dx} \left(\frac{z}{h} \right) = q^* + \frac{q - q^*}{h} z \quad (2)$$

即ち wall 内の単位長当りの shearing force の分布は Fig. 6 に示す様に直線分布となる。したがって wall の上端, 中央及び下端の変位を夫々 u_a , u_w 及び u_0 とし, wall の板厚を t とすれば, 次式が成立する。

$$u_w - u_a = \frac{(3q^* + q)h}{8Gt}, \quad u_0 - u_w = \frac{(q^* + 3q)h}{8Gt} \quad \therefore u_0 - u_a = \frac{(q^* + q)h}{2Gt} \quad (3)$$

然るに一方上の deck の effective area を A_a , wall の area を A_w とすれば, 応力と歪の関係より次式が成立する。

$$\frac{du_a}{dx} = \frac{P_a}{EA_a}, \quad \frac{du_w}{dx} = \frac{P_w}{EA_w} \quad (4)$$

(1), (3) 及び (4) より u_a , u_w , q^* 及び q を消去すれば次式を得る。

$$\frac{P_a}{EA_a} - \frac{h}{2Gt} \left(2 \frac{d^2 P_a}{dx^2} + \frac{d^2 P_w}{dx^2} \right) = \frac{du_0}{dx}, \quad \frac{P_w}{EA_w} - \frac{h}{8Gt} \left(4 \frac{d^2 P_a}{dx^2} + 3 \frac{d^2 P_w}{dx^2} \right) = \frac{du_0}{dx} \quad (5)$$

上式右辺の u_0 は上部構造と主構造との境界面に於て両構造の水平変位が等しいと云う条件或いは縦応力が等しいと云う条件によつて定めらるべきもので, Fig. 3 の bending の問題と一緒に考えなければ求られない。

次に Fig. 3 に示す上部構造の bending の問題と Fig. 1 の主構造の bending の問題を考えるのであるが, 先ず Fig. 2 の状態で拘束より上部構造に加えられる力 r を求める。Fig. 2 の状態の shearing force を V とすれば, 微小長さの垂直方向の平衡条件より

$$r = dV/dx \quad (6)$$

同じくモーメントの平衡条件より**

$$V = h^* \frac{dP_a}{dx} + \frac{h}{2} \frac{dP_w}{dx} \quad (7)$$

Fig. 7

* 甲板二層以上の場合に就ては後に述べる。

** 上部構造が甲板一層よりなる場合には $h^* = h$ である。甲板二層以上を有する場合を考えて特に h^* で表わす。

故に (6) と (7) より次式を得る。

$$r = h^* \frac{d^2 P_a}{dx^2} + \frac{h}{2} \cdot \frac{d^2 P_w}{dx^2} \quad (8)$$

(7) の V は (2) の q_z を積分して求めたものとも一致する*。即ち

$$-\int_0^h q_z dz = -\frac{h}{2} (q^* + q) = \frac{h}{2} \left(2 \frac{dP_a}{dx} + \frac{dP_w}{dx} \right) = V$$

また Fig. 2 に於て上部構造の端に作用する V_0 及び V_0' は夫々次式で与えられる。

$$V_0 = -[V]_{x=l}, \quad V_0' = [V]_{x=-l} \quad (9)$$

この力は本来零となるべきものであるが、本稿では wall 内の normal stress の分布を一様分布と仮定し、その結果 wall 内の shearing stress の分布が直線分布となつていたので、この様な力を考えないと平衡条件が満足出来ないのである。次に両構造の境界面に作用し合う垂直方向の力 p は H. H. Bleich の理論と同様に両構造の垂直方向の変位の差に比例すると仮定する。即ち上部構造及び主構造の垂直変位を夫々 y_1 及び y_2 とすれば

$$p = K(y_2 - y_1) \quad (10)$$

比例常数 K の値は境界面の構造によつて決定される。さて上部構造及び主構造の断面二次モーメントを夫々 I_1 及び I_2 とし、主構造の中性軸より両構造の境界面までの距離を e_2 とすれば、上部構造及び主構造の撓み方程式は夫々次のようになる。

$$EI_1 \frac{d^4 y_1}{dx^4} = w_1 + p - r, \quad EI_2 \frac{d^4 y_2}{dx^4} = w_2 - p + e_2 \frac{dq}{dx} \quad (11)$$

上式の右辺に夫々 (1), (8) 及び (10) を代入すれば

$$\left. \begin{aligned} EI_1 \frac{d^4 y_1}{dx^4} + Ky_1 - Ky_2 + h^* \frac{d^2 P_a}{dx^2} + \frac{h}{2} \frac{d^2 P_w}{dx^2} &= w_1, \\ EI_2 \frac{d^4 y_2}{dx^4} - Ky_1 + Ky_2 + e_2 \frac{d^2 P_a}{dx^2} + e_2 \frac{d^2 P_w}{dx^2} &= w_2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

次に両構造の境界面に於ける縦応力の連続の条件を考える。上部構造及び主構造の bending moment を夫々 M_1 及び M_2 、主構造の normal force を N_2 、主構造の断面積を A_2 とすれば、縦応力の連続の条件は

$$E \frac{du_0}{dx} - \frac{M_1}{I_1/e_1} = \frac{N_2}{A_2} + \frac{M_2}{I_2/e_2} \quad (13)$$

しかるに

$$M_1 = EI_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2}, \quad M_2 = EI_2 \frac{d^2 y_2}{dx^2}, \quad N_2 = -(P_a + P_w) \quad (14)$$

$$\therefore \frac{du_0}{dx} = e_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2} + e_2 \frac{d^2 y_2}{dx^2} - \frac{P_a + P_w}{EA_2} \quad (15)$$

上式を (5) に代入して整理すれば次の様になる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{h}{2Gt} \left(2 \frac{d^2 P_a}{dx^2} + \frac{d^2 P_w}{dx^2} \right) - \frac{P_a}{E} \left(\frac{1}{A_a} + \frac{1}{A_2} \right) - \frac{P_w}{EA_2} + e_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2} + e_2 \frac{d^2 y_2}{dx^2} &= 0, \\ \frac{h}{8Gt} \left(4 \frac{d^2 P_a}{dx^2} + 3 \frac{d^2 P_w}{dx^2} \right) - \frac{P_a}{EA_2} - \frac{P_w}{E} \left(\frac{1}{A_w} + \frac{1}{A_2} \right) + e_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2} + e_2 \frac{d^2 y_2}{dx^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

(12) 及び (16) が本理論の基礎方程式であつて、これを解いて y_1, y_2 及び P_a, P_w を求める事が出来る。上部構造の長さがその高さに比べて非常に長くなつた極限では、この基礎方程式は H. H. Bleich の理論の基礎方程式と完全に一致する。

3. 正 解

基礎方程式 (12), (16) の正解を求めて見る。但し簡単の爲上部構造の中央に対し前後対称な状態を仮定し、荷重は uniform bending 及び uniform load の場合を考える。Fig. 1 に示す様に上部構造の長さの半分を l とし

$$x/l = \xi, \quad Eh/8Gt = k \quad (17)$$

* 上部構造が甲板二層以上を有する場合には、上の wall の shearing force を加えたものが V と一致する。

とて (12) 及び (16) を整理すれば次の様になる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{I_1}{l^4} \cdot \frac{d^4 y_1}{d\xi^4} + \frac{K}{E} y_1 - \frac{K}{E} y_2 + \frac{h^*}{El^2} \cdot \frac{d^2 P_d}{d\xi^2} + \frac{h}{2El^2} \cdot \frac{d^2 P_w}{d\xi^2} &= \frac{w_1}{E}, \\ \frac{I_2}{l^4} \cdot \frac{d^4 y_2}{d\xi^4} - \frac{K}{E} y_1 + \frac{K}{E} y_2 + \frac{e_2}{El^2} \cdot \frac{d^2 P_d}{d\xi^2} + \frac{e_2}{El^2} \cdot \frac{d^2 P_w}{d\xi^2} &= \frac{w_2}{E} \end{aligned} \right\} \quad (12)'$$

$$\left. \begin{aligned} 8k \frac{d^2 P_d}{d\xi^2} + 4k \frac{d^2 P_w}{d\xi^2} - \left(\frac{l^2}{A_d} + \frac{l^2}{A_w} \right) P_d - \frac{l^2}{A_w} P_w + Ee_1 \frac{d^2 y_1}{d\xi^2} + Ee_2 \frac{d^2 y_2}{d\xi^2} &= 0, \\ 4k \frac{d^2 P_d}{d\xi^2} + 3k \frac{d^2 P_w}{d\xi^2} - \frac{l^2}{A_d} P_d - \left(\frac{l^2}{A_w} + \frac{l^2}{A_2} \right) P_w + Ee_1 \frac{d^2 y_1}{d\xi^2} + Ee_2 \frac{d^2 y_2}{d\xi^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)'$$

(12)' 及び (16)' は常数係数の連立微分方程式であるから容易に解く事が出来る。座標軸を Fig. 1 に示す様にとれば、今の場合必要なのは ξ の偶函数部分のみであるから、(12)' 及び (16)' の一般解を求め奇函数部分を捨てれば、次の様になる。即ち方程式

$$\begin{aligned} 8k^2 \frac{I_1}{l^4} \cdot \frac{I_2}{l^4} \lambda^8 - k \left[\left(3 \frac{l^2}{A_d} + 8 \frac{l^2}{A_w} + 3 \frac{l^2}{A_2} \right) \frac{I_1}{l^4} \cdot \frac{I_2}{l^4} + 3 \frac{e_2^2}{l^2} \cdot \frac{I_1}{l^4} + \frac{(2h^* - h)e_1}{l^2} \cdot \frac{I_2}{l^4} \right] \lambda^6 \\ + \left[8k^2 \left(\frac{I_1}{l^4} + \frac{I_2}{l^4} \right) \frac{K}{E} + \left(\frac{l^4}{A_d A_w} + \frac{l^4}{A_d A_2} + \frac{l^4}{A_w A_2} \right) \frac{I_1}{l^4} \cdot \frac{I_2}{l^4} + \left(\frac{l^2}{A_d} + \frac{l^2}{A_w} \right) \frac{e_2^2}{l^2} \cdot \frac{I_1}{l^4} \right. \\ + \left. \left(\frac{l^2}{A_d} + 2 \frac{l^2}{A_w} \right) \frac{(2h^* - h)e_1}{2l^2} \cdot \frac{I_2}{l^4} \right] \lambda^4 - k \frac{K}{E} \left[\left(3 \frac{l^2}{A_d} + 8 \frac{l^2}{A_w} + 3 \frac{l^2}{A_2} \right) \left(\frac{I_1}{l^4} + \frac{I_2}{l^4} \right) + 3 \frac{e_2(e_1 + e_2)}{l^2} \right. \\ + \left. \frac{(2h^* - h)(e_1 + e_2)}{l^2} \right] \lambda^2 + \frac{K}{E} \left[\left(\frac{l^4}{A_d A_w} + \frac{l^4}{A_d A_2} + \frac{l^4}{A_w A_2} \right) \left(\frac{I_1}{l^4} + \frac{I_2}{l^4} \right) + \left(\frac{l^2}{A_d} + \frac{l^2}{A_w} \right) \frac{e_2(e_1 + e_2)}{l^2} \right. \\ + \left. \left(\frac{l^2}{A_d} + 2 \frac{l^2}{A_w} \right) \frac{(2h^* - h)(e_1 + e_2)}{2l^2} \right] = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

の実根を $\pm \lambda_1, \pm \lambda_2$, 複素根を $\pm \lambda_3, \pm \lambda_4$ とし*

$$\alpha = (\lambda_3 + \lambda_4)/2, \quad \beta = (\lambda_3 - \lambda_4)/2i \quad (19)$$

とおけば

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= C_0 + C_2 \xi^2 + B_1 \frac{\cosh \lambda_1 \xi}{\cosh \lambda_1} + B_2 \frac{\cosh \lambda_2 \xi}{\cosh \lambda_2} + B_3 \frac{\cosh \alpha \xi \cos \beta \xi}{\cosh \alpha} + B_4 \frac{\sinh \alpha \xi \sin \beta \xi}{\cosh \alpha} \\ &+ \frac{w_1}{(1+\mu)K} + \frac{w_1 + w_2}{24EI} l^4 \xi^4, \\ y_2 &= C_0 + C_2 \xi^2 + B_1 f_1 \frac{\cosh \lambda_1 \xi}{\cosh \lambda_1} + B_2 f_2 \frac{\cosh \lambda_2 \xi}{\cosh \lambda_2} + (B_3 f_\alpha + B_4 f_\beta) \frac{\cosh \alpha \xi \cos \beta \xi}{\cosh \alpha} \\ &+ (B_4 f_\alpha - B_3 f_\beta) \frac{\sinh \alpha \xi \sin \beta \xi}{\cosh \alpha} + \frac{\mu w_2}{(1+\mu)K} + \frac{w_1 + w_2}{24EI} l^4 \xi^4, \\ P_d &= El \left[2C_2 \frac{(e_1 + e_2)A_d A_w}{(A_2 + A_d + A_w)l^3} + B_1 g_1 \frac{\cosh \lambda_1 \xi}{\cosh \lambda_1} + B_2 g_2 \frac{\cosh \lambda_2 \xi}{\cosh \lambda_2} + (B_3 g_\alpha + B_4 g_\beta) \right. \\ &\times \frac{\cosh \alpha \xi \cos \beta \xi}{\cosh \alpha} + (B_4 g_\alpha - B_3 g_\beta) \frac{\sinh \alpha \xi \sin \beta \xi}{\cosh \alpha} + \left. (\phi_d + \psi_d \xi^2) \frac{w_1 + w_2}{24EI} l^4 \right], \\ P_w &= El \left[2C_2 \frac{(e_1 + e_2)A_d A_w}{(A_2 + A_d + A_w)l^3} + B_1 h_1 \frac{\cosh \lambda_1 \xi}{\cosh \lambda_1} + B_2 h_2 \frac{\cosh \lambda_2 \xi}{\cosh \lambda_2} + (B_3 h_\alpha + B_4 h_\beta) \right. \\ &\times \frac{\cosh \alpha \xi \cos \beta \xi}{\cosh \alpha} + (B_4 h_\alpha - B_3 h_\beta) \frac{\sinh \alpha \xi \sin \beta \xi}{\cosh \alpha} + \left. (\phi_w + \psi_w \xi^2) \frac{w_1 + w_2}{24EI} l^4 \right] \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

但し

$$\left. \begin{aligned} f_n &= \frac{1}{D_n} \left[\frac{e_2}{l} \left(\frac{I_1}{l^4} \lambda_n^4 + \frac{K}{E} \right) \left(3k\lambda_n^2 - \frac{l^2}{A_d} - \frac{l^2}{A_w} \right) + \frac{K}{E} \left\{ \frac{h}{2l} \left(4k\lambda_n^2 - \frac{l^2}{A_d} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{h^*}{l} \left(k\lambda_n^2 + \frac{l^2}{A_w} \right) \right\} \right], \quad g_n = \frac{\lambda_n^2}{D_n} \left[\frac{I_1}{l^4} \cdot \frac{I_2}{l^4} \lambda_n^4 + \left(\frac{I_1}{l^4} + \frac{I_2}{l^4} \right) \frac{K}{E} \right] \left(k\lambda_n^2 + \frac{l^2}{A_w} \right), \\ h_n &= -\frac{\lambda_n^2}{D_n} \left[\frac{I_1}{l^4} \cdot \frac{I_2}{l^4} \lambda_n^4 + \left(\frac{I_1}{l^4} + \frac{I_2}{l^4} \right) \frac{K}{E} \right] \left(4k\lambda_n^2 - \frac{l^2}{A_d} \right), \quad (n=1, 2, 3, 4) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

* (18) の根がすべて実根又はすべて複素根の場合の解は全く同様にして容易に求められるから省略する。

$$D_n = \frac{e_2}{l} \cdot \frac{K}{E} \left(3 k \lambda^2 n - \frac{l^2}{A_d} - \frac{l^2}{A_w} \right) + \left(\frac{I_2}{l^4} \lambda^4 n + \frac{K}{E} \right) \left\{ \frac{h}{2l} \left(4 k \lambda^2 n - \frac{l^2}{A_d} \right) - \frac{h^*}{l} \left(k \lambda^2 n + \frac{l^2}{A_w} \right) \right\} \quad \left| \right.$$

$$f_\alpha = (f_3 + f_4)/2, g_\alpha = (g_3 + g_4)/2, h_\alpha = (h_3 + h_4)/2, f_\beta = (f_3 - f_4)/2, g_\beta = (g_3 - g_4)/2, h_\beta = (h_3 - h_4)/2 \quad (22)$$

$$\mu = \frac{(e_1 + e_2)I_1 + e_1 I_A}{(e_1 + e_2)I_2 + e_2 I_A}, I_A = (e_1 + e_2)^2 \frac{A_2(A_d + A_w)}{A_2 + A_d + A_w}, I = I_1 + I_2 + I_A \quad (23)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi_d &= \frac{24 k(e_1 + e_2)A_2 A_d}{(A_2 + A_d + A_w)^2 l} \cdot \frac{A_2(8 A_d + 4 A_w) + A_w(4 A_d + A_w)}{l^4}, \psi_d = \frac{12(e_1 + e_2)A_2 A_d}{(A_2 + A_d + A_w)l^3}, \\ \phi_w &= \frac{24 k(e_1 + e_2)A_2 A_w}{(A_2 + A_d + A_w)^2 l} \cdot \frac{A_2(4 A_d + 3 A_w) - A_d(4 A_d + A_w)}{l^4}, \psi_w = \frac{12(e_1 + e_2)A_2 A_w}{(A_2 + A_d + A_w)l^3} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

$C_0, C_2, B_1, B_2, B_3, B_4$ は積分常数である。この中 C_0 は船全体の剛体としての変位を表わすものであつて応力分布には影響を与えない。残りの五つの積分常数は次の様な境界条件より定められる。

i) 上部構造の端に横隔壁がない場合：——上部構造の端に於ける主構造の bending moment 及び shearing force を夫々 M_0 及び S_0 とすれば、次式が成立しなければならない。

$$[P_d]_{x=l}=0, [P_w]_{x=l}=0, \left[EI_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2} \right]_{x=l}=0, \left[EI_2 \frac{d^2 y_2}{dx^2} \right]_{x=l}=M_0 \quad (25)$$

$$\left[EI_1 \frac{d^3 y_1}{dx^3} \right]_{x=l}=V_0, \left[EI_2 \frac{d^3 y_2}{dx^3} - e_2 q \right]_{x=l}=S_0 \quad (26)$$

然るに (11) 及び (6) を積分し、(9) 及び前後対称の仮定を用いば

$$\left[EI_1 \frac{d^3 y_1}{dx^3} \right]_{-l}^l = \int_{-l}^l (w_1 + p - r) dx, \left[EI_2 \frac{d^3 y_2}{dx^3} - e_2 q \right]_{-l}^l = \int_{-l}^l (w_2 - p) dx, \int_{-l}^l r dx = [V]_{-l}^l = -2 V_0$$

したがつて (26) は次の様に表わす事も出来る。

$$\int_{-l}^l (w_1 + p) dx = 0, \int_{-l}^l (w_2 - p) dx = 2 S_0 \quad (27)$$

然るに上部構造及び主構造全体の平衡条件を考えれば容易に明らかな如く、(27) の両式は一方が満足されれば他方は当然成立する。したがつて (25) 及び (27) の何れか一方より C_2, B_1, B_2, B_3, B_4 を求める事が出来る。

ii) 上部構造の端に横隔壁がある場合：——横隔壁の変形を無視すれば、この場合には (26) の代りに次式が成立しなければならない。

$$[y_1]_{x=l} = [y_2]_{x=l} \quad (28)$$

(25) 及び (28) より C_2, B_1, B_2, B_3, B_4 を求める事が出来る。

$$\left. \begin{aligned} [\text{数値例}] \quad A_d &= 0.060 m^2, A_w = 0.036 m^2, \\ h &= 2.40 m, l = 12.5 m, t = 0.015 m, \\ I_1 &= 0.0497 m^4, I_2 = 28.5 m^4, A_2 = 1.27 m^2, \\ e_1 &= 1.95 m, e_2 = 7.27 m, K/E = 0.475 \times 10^{-4} \end{aligned} \right\}$$

上記の数値例に就き本理論及び H. H. Bleich の理論により数値計算を行つた結果を Fig. 8 に示す。但し上部構造の端に横隔壁がないと仮定した。両理論による結果は上部構造の端に近い部分を除けば可成りよく一致している。

4. 近似解法

前節の正解は数値計算が稍煩雑であるが、 K の値が比較的小さい場合には、両構造の間に作用し合う垂直方向の力 p を適当に仮定する事により、次のような近似解法が可能である。即ち p_1, p_2 を未定の常数とし、例えば

$$p + w_1 = p_1 + p_2 \cos(\pi x/2l) \quad (29)$$

Fig. 8a Uniform Bending の場合 ($w_1 = w_2 = 0$)

Fig. 8b Uniform Load の場合 ($M_1 = 0$)

と仮定する。撓み方程式 (11) に (1), (8) 及び (29) を代入すれば

$$\left. \begin{aligned} EI_1 \frac{d^4 y_1}{dx^4} &= p_1 + p_2 \cos \frac{\pi x}{2l} - h^* \frac{d^2 P_a}{dx^2} - \frac{h}{2} \cdot \frac{d^2 P_w}{dx^2}, \\ EI_2 \frac{d^4 y_2}{dx^4} &= w_1 + w_2 - p_1 - p_2 \cos \frac{\pi x}{2l} - e_2 \frac{d^2 P_a}{dx^2} - e_2 \frac{d^2 P_w}{dx^2} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

上式を2回積分し、境界条件 (25) 及び前後対称の条件より積分常数を定めれば、次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} EI_1 \frac{d^2 y_1}{dx^2} &= -\frac{p_1 l^2}{2} \left(1 - \frac{x^2}{l^2}\right) - p_2 \left(\frac{2l}{\pi}\right)^2 \cos \frac{\pi x}{2l} - h^* P_a - \frac{h}{2} P_w, \\ EI_2 \frac{d^2 y_2}{dx^2} &= M_0 + \left(M_w + \frac{p_1 l^2}{2}\right) \left(1 - \frac{x^2}{l^2}\right) + p_2 \left(\frac{2l}{\pi}\right)^2 \cos \frac{\pi x}{2l} - e_2 P_a - e_2 P_w \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$\text{但し} \quad M_w = -(w_1 + w_2)l^2/2 \quad (32)$$

(31) より $d^2 y_1/d\xi^2$, $d^2 y_2/d\xi^2$ を求めて、(16)' に代入し整理すれば、次の様になる。

$$\left. \begin{aligned} 4k \frac{d^2 P_a}{d\xi^2} + k \frac{d^2 P_w}{d\xi^2} - \theta_1 P_a + \theta_2 P_w &= 0, \\ 4k \frac{d^2 P_a}{d\xi^2} + 3k \frac{d^2 P_w}{d\xi^2} - \theta_3 P_a - \theta_4 P_w &= \frac{e_2 l^2}{I_2} \left[-M_0 + (-M_w + \kappa m_1)(1 - \xi^2) + \kappa m_2 \cos \frac{\pi \xi}{2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

但し

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \frac{l^2}{A_a}, \quad \theta_2 = \frac{l^2}{A_w}, \quad \theta_3 = \frac{l^2}{A_2} + \frac{h^* e_1 l^2}{I_1} + \frac{e_2 l^2}{I_2}, \\ \theta_4 &= \frac{l^2}{A_w} + \frac{l^2}{A_2} + \frac{h e_1 l^2}{2 I_1} + \frac{e_2 l^2}{I_2}, \quad \kappa = \frac{e_1 I_2}{e_2 I_1} - 1, \quad m_1 = \frac{p_1 l^2}{2}, \quad m_2 = \frac{4 p_2 l^2}{\pi^2} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

(33) の一般解を求め偶函数部分のみをとれば次の様になる。即ち方程式

$$8k^2 \gamma^4 - k(3\theta_1 + 4\theta_2 - \theta_3 + 4\theta_4)\gamma^2 + (\theta_1\theta_4 + \theta_2\theta_3) = 0 \quad (35)$$

の根を $\pm\gamma_1, \pm\gamma_2$ とすれば

$$\left. \begin{aligned} P_a &= C_1 \frac{\cosh \gamma_1 \xi}{\cosh \gamma_1} + C_2 \frac{\cosh \gamma_2 \xi}{\cosh \gamma_2} + \frac{e_2 l^2}{I_2} \left[\Psi_a M_0 + (-M_w + \kappa m_1)(\Phi_a + \Psi_a \xi^2) + \kappa m_2 \Omega_a \cos \frac{\pi \xi}{2} \right] \\ P_w &= \nu_1 C_1 \frac{\cosh \gamma_1 \xi}{\cosh \gamma_1} + \nu_2 C_2 \frac{\cosh \gamma_2 \xi}{\cosh \gamma_2} + \frac{e_2 l^2}{I_2} \left[\Psi_w M_0 + (-M_w + \kappa m_1)(\Phi_w + \Psi_w \xi^2) + \kappa m_2 \Omega_w \cos \frac{\pi \xi}{2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

但し

$$\left. \begin{aligned} \nu_i &= -\frac{4k\gamma_i^2 - \theta_1}{k\gamma_i^2 + \theta_2} \quad (i=1, 2), \quad \Psi_a = \frac{\theta_2}{\theta_1\theta_4 + \theta_2\theta_3}, \quad \Psi_w = \frac{\theta_1}{\theta_1\theta_4 + \theta_2\theta_3}, \\ \Phi_a + \Psi_a &= 2k \frac{\theta_2(3\theta_1 + 4\theta_2) + \theta_4(\theta_1 + 4\theta_2)}{(\theta_1\theta_4 + \theta_2\theta_3)^2}, \quad \Phi_w + \Psi_w = 2k \frac{\theta_1(3\theta_1 + 4\theta_2) - \theta_3(\theta_1 + 4\theta_2)}{(\theta_1\theta_4 + \theta_2\theta_3)^2} \\ \Omega_a &= \frac{-(4\theta_2 - k\pi^2)}{(\theta_1 + k\pi^2)(4\theta_4 + 3k\pi^2) + (4\theta_2 - k\pi^2)(\theta_3 + k\pi^2)}, \\ \Omega_w &= \frac{-4(\theta_1 + k\pi^2)}{(\theta_1 + k\pi^2)(4\theta_4 + 3k\pi^2) + (4\theta_2 - k\pi^2)(\theta_3 + k\pi^2)} \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

$\xi=1$ にて $P_a=P_w=0$ の条件より積分常数 C_1, C_2 を定めれば

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{e_2 l^2}{I_2} \left[\frac{\nu_2 \Psi_a - \Psi_w}{\nu_1 - \nu_2} M_0 + \frac{\nu_2(\Phi_a + \Psi_a) - (\Phi_w + \Psi_w)}{\nu_1 - \nu_2} (-M_w + \kappa m_1) \right] \equiv \frac{e_2 l^2}{I_2} F_1, \\ C_2 &= \frac{e_2 l^2}{I_2} \left[\frac{-\nu_1 \Psi_a + \Psi_w}{\nu_1 - \nu_2} M_0 + \frac{-\nu_1(\Phi_a + \Psi_a) + (\Phi_w + \Psi_w)}{\nu_1 - \nu_2} (-M_w + \kappa m_1) \right] \equiv \frac{e_2 l^2}{I_2} F_2 \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

次に (31) に (34), (36) 及び (38) を代入して両辺を夫々二回積分し

$$\xi=0 \text{ にて} \quad y_1 = \delta_1, \quad y_2 = \delta_2, \quad dy_1/d\xi = dy_2/d\xi = 0 \quad (39)$$

とて積分常数を決定すれば、次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{EI_1}{l^2} y_1 &= \frac{EI_1}{l^2} \delta_1 - m_1 \left(\frac{\xi^2}{2} - \frac{\xi^4}{12} \right) - \frac{4}{\pi^2} m_2 \left(1 - \cos \frac{\pi \xi}{2} \right) - \frac{h e_2 l^2}{2 I_2} \left[\frac{(2h^* + \nu_1 h) F_1}{h \gamma_1^2} \right. \\ &\quad \times \left(\frac{\cosh \gamma_1 \xi - 1}{\cosh \gamma_1} \right) + \frac{(2h^* + \nu_2 h) F_2}{h \gamma_2^2} \left(\frac{\cosh \gamma_2 \xi - 1}{\cosh \gamma_2} \right) + \left(2 \frac{h^*}{h} \Psi_a + \Psi_w \right) M_0 \frac{\xi^2}{2} + (-M_w + \kappa m_1) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} & \times \left\{ \left(2 \frac{h^*}{h} \Phi_a + \Phi_w \right) \frac{\xi^2}{2} + \left(2 \frac{h^*}{h} \Psi_a + \Psi_w \right) \frac{\xi^4}{12} \right\} + \frac{4}{\pi^2} \kappa m_2 \left(2 \frac{h^*}{h} \Omega_a + \Omega_w \right) \left(1 - \cos \frac{\pi \xi}{2} \right) \Bigg], \\ & \frac{EI_2}{l^2} y_2 = \frac{EI_2}{l^2} \delta_2 + M_0 \frac{\xi^2}{2} + (M_w + m_1) \left(\frac{\xi^2}{2} - \frac{\xi^4}{12} \right) + \frac{4}{\pi^2} m_2 \left(1 - \cos \frac{\pi \xi}{2} \right) - \frac{e_2 l^2}{I_2} \\ & \times \left[\frac{(1+\nu_1)F_1}{\gamma_1^2} \left(\frac{\cosh \gamma_1 \xi - 1}{\cosh \gamma_1} \right) + \frac{(1+\nu_2)F_2}{\gamma_2^2} \left(\frac{\cosh \gamma_2 \xi - 1}{\cosh \gamma_2} \right) + (\Psi_a + \Psi_w) M_0 \frac{\xi^2}{2} \right. \\ & \left. + (-M_w + \kappa m_1) \left\{ \left(\Phi_a + \Phi_w \right) \frac{\xi^2}{2} + (\Psi_a + \Psi_w) \frac{\xi^4}{12} \right\} + \frac{4}{\pi^2} \kappa m_2 (\Omega_a + \Omega_w) \left(1 - \cos \frac{\pi \xi}{2} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

最後に未定の常数 p_1 , p_2 即ち m_1 , m_2 と $(\delta_2 - \delta_1)$ を次のようにして決定する*。即ち (29) の p と (40) の y_1 , y_2 は (10) の関係を満足しなければならない。然し p を (29) で近似した場合にはすべての点で (10) を満足させる事は不可能であるから、上部構造の中央及び両端で (10) を満足させる事にすれば、次の条件式が得られる。

$$K(\delta_2 - \delta_1) = [p]_{\xi=0} = p_1 - w_1 + p_2, \quad K[y_2 - y_1]_{\xi=1} = [p]_{\xi=1} = p_1 - w_1 \quad (41)$$

(41) の第二式に (40) の y_1 , y_2 を代入し、更に (41) の第一式を用いて $(\delta_2 - \delta_1)$ を消去し整理すれば次式を得る。

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} M_0 + \frac{5}{12} M_w + \frac{5}{12} \left(1 + \frac{I_2}{I_1} \right) m_1 + \frac{4}{\pi^2} \left(1 + \frac{I_2}{I_1} \right) m_2 + \frac{\pi^2 EI_2}{4 K l^4} m_2 + \frac{h e_2 l^2}{2 I_1} \left[\frac{(2 h^* + \nu_1 h) F_1}{h \gamma_1^2} \left(\frac{\cosh \gamma_1 - 1}{\cosh \gamma_1} \right) \right. \\ & + \frac{(2 h^* + \nu_2 h) F_2}{h \gamma_2^2} \left(\frac{\cosh \gamma_2 - 1}{\cosh \gamma_2} \right) + \left(2 \frac{h^*}{h} \Psi_a + \Psi_w \right) \frac{M_0}{2} + (-M_w + \kappa m_1) \left(\frac{2 h^* \Phi_a + h \Phi_w}{2 h} + \frac{2 h^* \Psi_a + h \Psi_w}{12 h} \right) \\ & + \frac{4}{\pi^2} \kappa m_2 \left(2 \frac{h^*}{h} \Omega_a + \Omega_w \right) \Bigg] - \frac{e_2^2 l^2}{I_2} \left[\frac{(1+\nu_1)F_1}{\gamma_1^2} \left(\frac{\cosh \gamma_1 - 1}{\cosh \gamma_1} \right) + \frac{(1+\nu_2)F_2}{\gamma_2^2} \left(\frac{\cosh \gamma_2 - 1}{\cosh \gamma_2} \right) \right. \\ & \left. + (\Psi_a + \Psi_w) \frac{M_0}{2} + (-M_w + \kappa m_1) \left(\frac{\Phi_a + \Phi_w}{2} + \frac{\Psi_a + \Psi_w}{12} \right) + \frac{4}{\pi^2} \kappa m_2 (\Omega_a + \Omega_w) \right] = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

未知数は m_1 , m_2 の二つであるから、これを求めるには上式のみでは不足である。もう一つの条件式は境界条件により夫々次の様になる。

i) 上部構造の端に横隔壁がない場合：——この場合には p は (27) を満足しなければならないから、(29) の p を (27) の第一式に代入して積分を行い整理すれば、次式を得る。

$$m_1 + (\pi/4) m_2 = 0 \quad (43)$$

ii) 上部構造の端に横隔壁がある場合：——この場合には (28) を満足しなければならない。

∴ $K[y_2 - y_1]_{\xi=1} = [p]_{\xi=1} = p_1 - w_1 = 0$ 故に (34) より次式を得る。

$$m_1 = w_1 l^2 / 2 \quad (44)$$

m_1 , m_2 が求められれば、 P_a , P_w は (36) より計算され、 M_1 , M_2 及び q はこの P_a , P_w を用いて夫々 (31) 及び (1) より計算する事が出来る。前節の数値例を上記の近似解法で計算し、前節で計算した正確な値と比較した処、両者は殆んど一致し誤差は最大 2~3% 程度であつた。

p を (29) と異つた式で近似した場合にも同様な計算が可能であるが、この場合には (33) の右辺が異つて来るから、この方程式の特解が成可く容易に求められる様な函数を用いて近似する事が望ましい。

5. $K \rightarrow \infty$ の場合の解

K の値が大きい場合には両構造の間に作用し合う垂直方向の力 p の分布を (29) で近似する事が無理となるので、前節の近似解法をそのまま用いる事は出来なくなる。寺沢教授、八木助教授の論文⁶⁾ の第3報によれば、この様な場合には H. H. Bleich の理論によつて求めた p の分布を用いるとよい様である。然し $K \rightarrow \infty$ の場合には次の様にして正解が簡単化されるので、 K の値が充分大きい場合には端の部分を除けば $K \rightarrow \infty$ の場合から推測する事が出来る。

先ず $p = K(y_2 - y_1)$ であるから、 $K \rightarrow \infty$ の場合には $y_2 \rightarrow y_1$ となる。故に $y_2 = y_1 \equiv y$ とおけば (12)' より

$$\frac{I_1 + I_2}{l^4} \cdot \frac{d^4 y}{d\xi^4} + \frac{h^* + e_2}{EI^2} \cdot \frac{d^2 P_a}{d\xi^2} + \frac{h + 2e_2}{2EI^2} \cdot \frac{d^2 P_w}{d\xi^2} = \frac{w_1 + w_2}{E} \quad (45)$$

* δ_1 或は δ_2 の絶対値は船全体の剛体としての変位と関係があり、応力分布には直接影響を与えない。

上式を二回積分すれば

$$\frac{I_1+I_2}{l^4} \cdot \frac{d^2y}{d\xi^2} + \frac{h^*+e_2}{EI^2} \cdot P_a + \frac{h+2e_2}{2EI^2} \cdot P_w = \frac{w_1+w_2}{2E} \xi^2 + C_0 + C_1\xi \quad (46)$$

上式の積分常数 C_0, C_1 は上部構造の両端に於ける次の境界条件より定めらるべきである。

$$\left[EI_1 \frac{d^2y_1}{dx^2} \right]_{x=\pm l} = 0, \quad \left[EI_2 \frac{d^2y_2}{dx^2} \right]_{x=\pm l} = M_0, \quad [P_a]_{x=\pm l} = 0, \quad [P_w]_{x=\pm l} = 0 \quad (47)$$

Fig. 9

然るに $y_1=y_2$ の場合には上式の第1及び第2の条件を同時に満足させる事は不可能であつて、この矛盾を解決する為には次の様に考える必要がある。即ち“ $K \rightarrow \infty$ の場合には上部構造の端が構造上の不連続点となり、この点で $p \rightarrow \infty$ となる。そのためにこの点に於て Fig. 9 に示すような大きさ等しく方向反対なる偶力 M^* が上部構造及び主構造に作用する”。この様に考えれば (47) の第1及び第2の条件は夫々次のようになる。

$$\left[EI_1 \frac{d^2y_1}{dx^2} \right]_{x=\pm l} = M^*, \quad \left[EI_2 \frac{d^2y_2}{dx^2} \right]_{x=\pm l} = M_0 - M^*$$

したがつて C_0, C_1 を定めるべき条件は結局次のようになる。

$$\left[\frac{E(I_1+I_2)}{l^2} \cdot \frac{d^2y}{d\xi^2} \right]_{\xi=\pm 1} = M_0, \quad [P_a]_{\xi=\pm 1} = 0, \quad [P_w]_{\xi=\pm 1} = 0 \quad (48)$$

上式の条件で C_0, C_1 を定め、(46) に代入すれば

$$\frac{d^2y}{d\xi^2} = \frac{l^2}{E(I_1+I_2)} \left[M_0 + M_w(1-\xi^2) - (h^*+e_2)P_a - \left(\frac{h}{2} + e_2 \right) P_w \right] \quad (49)$$

上式を (16)' の $d^2y_1/d\xi^2, d^2y_2/d\xi^2$ に代入して整理すれば次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} 4k \frac{d^2P_a}{d\xi^2} + k \frac{d^2P_w}{d\xi^2} - \theta_1 P_a + \theta_2 P_w &= 0, \\ 4k \frac{d^2P_a}{d\xi^2} + 3k \frac{d^2P_w}{d\xi^2} - \theta_3^* P_a - \theta_4^* P_w &= -\frac{(e_1+e_2)l^2}{(I_1+I_2)} [M_0 + M_w(1-\xi^2)] \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

但し

$$\theta_1 = \frac{l^2}{A_a}, \quad \theta_2 = \frac{l^2}{A_w}, \quad \theta_3^* = \frac{l^2}{A_2} + \frac{(e_1+e_2)l^2}{(I_1+I_2)} (h^*+e_2), \quad \theta_4^* = \frac{l^2}{A_w} + \frac{l^2}{A_2} + \frac{(e_1+e_2)l^2}{(I_1+I_2)} \left(\frac{h}{2} + e_2 \right) \quad (51)$$

(50) は前節の近似解法に於ける (33) と全く同形である。したがつて (50) の一般解を求め偶函数部分のみをとれば

$$\left. \begin{aligned} P_a &= C_1 \frac{\cosh \gamma_1 \xi}{\cosh \gamma_1} + C_2 \frac{\cosh \gamma_2 \xi}{\cosh \gamma_2} + \frac{(e_1+e_2)l^2}{(I_1+I_2)} [\Psi_a M_0 - (\Phi_a + \Psi_a \xi^2) M_w], \\ P_w &= \nu_1 C_1 \frac{\cosh \gamma_1 \xi}{\cosh \gamma_1} + \nu_2 C_2 \frac{\cosh \gamma_2 \xi}{\cosh \gamma_2} + \frac{(e_1+e_2)l^2}{(I_1+I_2)} [\Psi_w M_0 - (\Phi_w + \Psi_w \xi^2) M_w] \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

上式の $\gamma_1, \gamma_2, \nu_1, \nu_2, \Psi_a, \Psi_w, \Phi_a, \Phi_w$ は夫々 (35) 及び (37) に於て θ_3, θ_4 を θ_3^*, θ_4^* で置き換えたものに等しい。 $\xi=1$ にて $P_a=P_w=0$ の条件より積分常数 C_1, C_2 を定めれば

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{(e_1+e_2)l^2}{(I_1+I_2)} \left[\frac{\nu_2 \Psi_a - \Psi_w}{\nu_1 - \nu_2} M_0 - \frac{\nu_2 (\Phi_a + \Psi_a) - (\Phi_w + \Psi_w)}{\nu_1 - \nu_2} M_w \right] \equiv \frac{(e_1+e_2)l^2}{(I_1+I_2)} F_1^*, \\ C_2 &= \frac{(e_1+e_2)l^2}{(I_1+I_2)} \left[\frac{-\nu_1 \Psi_a + \Psi_w}{\nu_1 - \nu_2} M_0 - \frac{-\nu_1 (\Phi_a + \Psi_a) + (\Phi_w + \Psi_w)}{\nu_1 - \nu_2} M_w \right] \equiv \frac{(e_1+e_2)l^2}{(I_1+I_2)} F_2^* \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

この様にして P_a, P_w が求められれば、 M_1, M_2 は次式より計算出来る。

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= \frac{EI_1}{l^2} \cdot \frac{d^2y}{d\xi^2} = \frac{I_1}{I_1+I_2} \left[M_0 + M_w(1-\xi^2) - (h^*+e_2)P_a - \left(\frac{h}{2} + e_2 \right) P_w \right], \\ M_2 &= \frac{EI_2}{l^2} \cdot \frac{d^2y}{d\xi^2} = \frac{I_2}{I_1+I_2} \left[M_0 + M_w(1-\xi^2) - (h^*+e_2)P_a - \left(\frac{h}{2} + e_2 \right) P_w \right] \end{aligned} \right\} \quad (54)$$

また q は (52) を (1) に代入する事により求められる。

$$\left. \begin{aligned} [\text{数値例}] \quad A_a &= 0.377 \text{ m}^2, \quad A_w = 0.01657 \text{ m}^2, \quad h = 3.55 \text{ m}, \quad l = 50 \text{ m}, \quad t = 0.004667 \text{ m}, \\ I_1 &= 0.0817 \text{ m}^4, \quad I_2 = 200 \text{ m}^4, \quad A_2 = 2.78 \text{ m}^2, \quad e_1 = 3.34 \text{ m}, \quad e_2 = 11.8 \text{ m}, \quad E/G = 2.53 \end{aligned} \right\}$$

上の例に就き以上の方法で数値計算を行つた結果を Fig. 10 に実線で示してある。同図には同じ例の $K/E=1$ の場合を正解法で計算した結果も一緒に示してあるが、 $x/l < 0.9$ の範囲では両者は殆ど一致している。又 $K/E=1$ の場合の ρ の値は端の近くで急激に大きくなつて居り、本節のはじめに述べた境界条件に対する考察が正しい事を裏書きしている。

6. 上部構造の応力分布

先ず Fig. 2 に示す状態の応力分布に就て考える。この状態は主構造との境界面を垂直変位零の状態に拘束して、上部構造に shear lag のみを生ぜしめた状態であるから、この場合の normal stress の分布は Fig. 11 に示す様に主構造との境界面から離れるにしたがつて単調に減少する様な分布をしているものと思われる。本理論ではこの状態に対し、wall 及び上の deck を夫々一つの部材として取扱い、wall 内の normal stress の分布を一様分布と仮定して計算したので、本理論により求めた P_w/A_w は Fig. 11 に示す様に wall 内の normal stress の分布の平均値を意味する。一方 wall の上端即ち上の deck との境界に於ける normal stress は上の deck の

Fig. 11

Fig. 12

上部構造の実際の応力分布は Fig. 2 の状態の応力分布に Fig. 3 の状態の応力分布を加え合わせたものに等しい。然るに Fig. 3 の状態の応力分布は梁理論により直線で表わされるから、wall 内の total normal stress の分布は局結 Fig. 12 に於て斜線をほどこした部分の面積が等しくなるような適当な分布曲線を描く事によつて与えられる。

$$\text{但し} \quad \sigma_1 = \frac{P_d}{A_d} + \frac{M_1}{I_1} (h - e_1), \quad \sigma_2 = \frac{P_w}{A_w} + \frac{M_1}{I_1} (h - e_1), \quad \sigma_3 = \frac{P_w}{A_w} - \frac{M_1}{I_1} e_1, \quad \sigma_4 = -\frac{P_d + P_w}{A_2} + \frac{M_2}{I_2} e_2 \quad (55)$$

Fig. 10a Uniform Bending の場合 ($w_1 = w_2 = 0$) Fig. 10b Uniform Load の場合 ($M_0 = 0$)

effective area を A_a とすれば P_d/A_a に等しく、wall の下端即ち主構造との境界に於ける normal stress は $E(du_0/dx)$ に等しい。したがつて本理論により wall 内の normal stress の分布を求める際には、上端及び下端に於て夫々 P_d/A_a 及び $E(du_0/dx)$ に等しく、且その平均が P_w/A_w となる様な適当な分布曲線を推定すべきであつて、分布曲線の詳細は本理論からは求められない。

来る。 A_d 及び h^* は、有効幅を参考にして XX 断面より上部の normal stress の分布を適当に推定し、これを積分したものを P_d 、境界面からの高さを乗じて積分したものを M_d とし、Fig. 13 の B 点の normal stress を σ^* とすれば、夫々次式で与えられる。

$$A_d = P_d / \sigma^*, \quad h^* = M_d / P_d \quad (56)$$

なお本稿では uniform bending 及び uniform load の場合のみを考えたが、 M_0 及び M_w を Fig. 14 に示すようにとれば、一般の荷重状態に対しても近似的に応用する事が出来る。

Fig. 14

7. 結 言

著者がさきに甲板室側壁の shear lag の分布を計算した方法と H. H. Bleich の理論とを組合わせて、bending と shear lag の両方の影響を考慮した上部構造の応力分布の計算法を導き、基礎方程式の正解、近似解法及び $K \rightarrow \infty$ の場合の解に就て述べ、夫々一例に就て数値計算を行つた結果を示した。上部構造の理論は緒言に於ても述べたように既に多くの人々によつて発表されているが、本稿の方法は上部構造側壁の shear による変形に重点を置いている点に特色がある。終りに本稿は数年前から船体構造委員会西部地区部会に報告したものを取りまとめたものであつて、終始御懇篤なる御指導を賜りました部会長渡辺恵弘教授をはじめ有益なる御討論をいただいた委員各位に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) John Vasta: "Structural Test on the Passenger Ship S.S. President Wilson—Interaction Between Superstructure and Main Hull Girder" T. S. N. A. & M. E. 1949
- 2) Lyndon Crawford: "Theory of Long Ship's Superstructures" T. S. N. A. & M. E. 1950
- 3) H. H. Bleich: "Nonlinear Distribution of Bending Stress due to distortion of the Cross Section" Journal of Applied Mechanics 1953
- 4) H. A. Schade: "The Effective Breadth Concept in Ship Structure Design" T. S. N. A. & M. E. 1953
- 5) 山越道郎: "船楼上空壁エントランス損傷原因の一検討" 造船協会論文集 第 95 号
- 6) 寺沢一雄, 八木順吉: "上部構造の効きに関する研究" 造船協会論文集 第 100 号, 第 101 号, 第 102 号