(昭和 45 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

横荷重を受ける防撓板の最小重量について

正員 長 沢 準* 正員 本 間 康 之**

On the Minimum Weight of Orthogonally Stiffened Plates under Lateral Pressure

by Hitoshi Nagasawa, *Member* Yasuyuki Homma, *Member*

Summary

This paper concerns on the minimum weight design of such a stiffened plates as bulkheads, bottom plates and outside platings of ship under lateral pressure.

Criterion of these plates based on the collapse load of orthogonally stiffened plates, and the deflection criterion was applied to the plate of panel.

The weight of the stiffened plates was calculated assuming the external pressure, safety factor, the aspect ratio of the plates, and the number of stiffeners.

In these calculation, the local buckling of the stiffener was considered in the ratio of breadth and thickness of web or flange plate.

The minimum weight of the stiffened plates and the corresponding number of stiffeners were obtained for giving pressure, aspect ratio of the plates and safety factors.

1 は し が き

この論文は縦および横方向にそれぞれ等間隔で、かつそれぞれ同一寸法の防撓材を有する矩形防撓板が等分布横荷重を受けるとき、その重量が最小となる防撓板の平板の板厚、防撓材の寸法およびその配置について検討したものである。このような解析を行なうにあたって、弾性理論を用いて差支えないか、あるいは塑性変形を考慮する必要があるかは、設計の基準により、構造物の性質により一概には言えない。船体構造の一部である防撓板隔壁にルール等で規定された荷重が加えられると、防撓板を構成する板には塑性変形を生ずる¹⁾。また防撓板の強度は単純塑性理論を用いて説明できることが報告されている²⁾。この論文では防撓板の縦および横の寸法と使用圧力が与えられたものとして、つぎの仮定の下に、塑性変形を考えた最小重量解析を試みる。

(1) 船体の隔壁は深水タンク隔壁と水密隔壁に分けられる。ここではくり返して荷重を受ける深水タンク隔壁を対象とする。

(2) 防撓板の平板の板厚は文献 3) に述べた方法、すなわち等分布横荷重を受ける両端固定の帯板が端部に塑性関節を生ずるときの荷重を許容荷重とする考え方に基ついて平板の板厚を決める。

(3) 防撓板の崩壊荷重は文献 2) で与えられるものとし、崩壊荷重と使用圧力の比を s とする。

(4) 防撓材の断面形状は T 型とする。

(5) 防撓材のウェブおよびフランジは防撓材に塑性関節が形成されるまで局部座屈を生ずることのない板幅/板厚比をもつものとする。その値は“Plastic Design in Steel”⁴⁾によれば ASTM-7 鋼に対して、ウェブの深さと板厚比 ≤ 43 、フランジの板幅と板厚比 ≤ 17 とされている。これは歪硬化を生ずるまでウェブあるいはフランジが座屈を生じないための条件を Haaijer および Thurlimann が求めているが、その結果を根拠にして決められたものである。これらの値を使用することとするが、一部の計算ではウェブの深さと板厚比を変化させている。

(6) 防撓材と平板は同じ材料で作られるものとする。

(7) 防撓材の横倒れ座屈については考えない。

* 船舶技術研究所

** 東京大学教養学部

図 1-1 防撓材配置

さて、2方向の防撓材の数を m および n とすると防撓板は $(m+1) \times (n+1)$ 個の小区画に分割され、その区画の大きさ $b/(m+1) \times a/(n+1)$ と、使用圧力 P から仮定(2)に従って防撓板の平板の板厚 h が決定される。

防撓材の寸法はつぎのようにして決められる。すなわち防撓板全体としての崩壊に対する安全率(崩壊荷重と使用圧力の比)を s とすると、崩壊荷重 P_c は $s \times P$ で与えられ、必要な防撓材の全塑性モーメントは防撓板の寸法 $a \times b$ 、板厚 h および崩壊荷重 P_c を与えれば計算することができる。そして仮定(4)および(5)の条件の下に必要な全塑性モーメントを有する防撓材断面のうち

断面積が最小となる断面寸法を求めることができる。

防撓板の平板の板厚、防撓材の形状およびその数が求めれば防撓板の重量が定まる。防撓材の数を変えて同様の計算をくり返して行ない、重量が最小となる場合を求めることとする。

2 防撓板の平板の板厚

防撓板の小区画の寸法、使用圧力および周辺固定の条件から板厚を決定することになる。この場合板の強度は膜力を考慮する必要がある、また板には崩壊現象が現われないから許容圧力を決める基準としては、構造物の性質によつて、破壊、撓み量、残留変形、その他のいずれかをえらぶことになる。この論文で対象とするのはくり返して荷重を受ける隔壁であるから、荷重が加えられたときの撓み量、または残留変形によつて許容圧力を決めることになる。

2-1 帯板の許容圧力

使用圧力が与えられたとき、帯板の板厚を文献 3) の方法、すなわち“等分布荷重を受ける両端固定の帯板について弾性計算から得られる端部の曲げモーメントが膜力を考慮した塑性モーメントに等しくなるときの荷重を許容荷重とする”方法に従って決める。このようにして得られる圧力は、弾塑性解析によつて示されるように端部の引張側の歪みが急増し始める圧力とほぼ一致しており、また板が厚い場合にはNKルール等の規程に従って求めた深水タンク隔壁板の許容圧力にも近い値となる³⁾。

この圧力(無次元化した値)と $\left(\frac{\text{降伏応力}}{\text{ヤング率}}\right) \times \left(\frac{\text{板幅}}{\text{板厚}}\right)^2$ の間には文献 3) に示すように殆んど直線に近い関係がある。そこで取扱いの都合を考えてこれをつぎの式で近似する。

$$a_0^2 P / 1/4 \sigma_y h^2 = 12.5 + 0.436 \frac{\sigma_y a_0^2}{E h^2} \quad (2.1)$$

ここに a_0 : 帯板の幅, h : 帯板の厚さ, P : 許容圧力

2-2 矩形板の許容圧力

等分布横荷重を受ける周辺固定の矩形板については、周辺上における曲げモーメントの最大値、すなわち長辺の中点の曲げモーメントが全塑性モーメントに達するときの圧力を許容圧力とする。この圧力の正確な値を求めるには相当面倒な計算を必要とするので、ここでは線型理論から得られる結果を用いて矩形板の許容圧力の近似式を求めた。

膜力を無視した弾性計算によれば等分布横荷重を受ける $a_0 \times b_0$ の長さをもつ周辺固定の矩形板の最大応力は長辺上の中点において生じ、その値は

$$\sigma = \frac{\alpha}{4} \frac{a_0^2}{h^2} P \quad (2.2)$$

ここに a_0 : 矩形板の短辺の長さ

α : 矩形板の縦横比によつて決まる係数

また膜力を無視したときは、板表面の応力が板の降伏応力の $3/2$ 倍になると、その点の曲げモーメントは全塑性モーメントに達するから、長辺の中点における曲げモーメントが全塑性モーメントに等しくなるときの圧力 P' は(2.2)式から

$$P' = \frac{6}{\alpha} \frac{h^2}{a_0^2} \sigma_y \quad (2.3)$$

ここに σ_y : 板の降伏応力

図 1-2 応力分布

一方膜力を無視した、幅 a_0 をもつ帯板について、端部が塑性関節になるときの圧力 P_h' はつぎの式から求められる。

$$P_h' a_0^2 / \frac{1}{4} \sigma_y h^2 = 12.0 \quad (2.4)$$

矩形板の長辺上の中点および帯板の端部においてはいずれも板の長手方向の変位は零であるから、降伏条件が同一であれば板としての降伏応力は等しい。また膜力を考えたとき、帯板の両端が塑性関節になるときの圧力 P_h は (2.1) 式から計算される。そこで膜力を考慮した矩形板の許容圧力 P をつぎの関係によつて与える。

$$P/P_h = P'/P_h' \quad (2.5)$$

(2.3), (2.4) および (2.5) 式から

$$P = \frac{2}{\alpha} P_h \quad (2.6)$$

係数 α は種々の文献等に与えられているが、これを縦横比 r の 3 次式で近似しつぎのように表わす。

$$\begin{aligned} \alpha &= -2.458 + 6.012 r - 2.752 r^2 + 0.429 r^3 & 1.0 \leq r \leq 2.0 \\ \alpha &= 2.00 & 2.0 < r \end{aligned} \quad (2.7)$$

ここに r : 矩形板の縦横比

(2.1), (2.6) 式から

$$\left(\frac{h}{a_0} \right)^2 = \frac{1}{25.0} \left(4 \alpha \frac{P}{\sigma_y} - 0.872 \frac{\sigma_y}{E} \right) \quad (2.8)$$

(2.8) 式から使用圧力 P 、寸法 $a_0 \times b_0$ をもつ矩形板の板厚を求めることができる。

1.1 図に示す防撓板については

$$\begin{aligned} \frac{b}{m+1} \geq \frac{a}{n+1} \text{ ならば} \\ h^2 = \frac{1}{25} \left(4 \alpha \frac{P}{\sigma_y} - 0.872 \frac{\sigma_y}{E} \right) \left(\frac{a}{n+1} \right)^2 \\ r = \left(\frac{b}{m+1} \right) / \left(\frac{a}{n+1} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{b}{m+1} < \frac{a}{n+1} \text{ ならば} \\ h^2 = \frac{1}{25} \left(4 \alpha \frac{P}{\sigma_y} - 0.872 \frac{\sigma_y}{E} \right) \left(\frac{b}{m+1} \right)^2 \\ r = \left(\frac{a}{n+1} \right) / \left(\frac{b}{m+1} \right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

なお数値計算を行なつたところ最小重量を与える m, n の組み合わせに対して、小区画の縦横比はすべて 2.0 より大になつた。

3 防撓材の寸法

3.1 防撓材の全塑性モーメント

等分布横荷重を受ける防撓板の強度については、文献 2), 5) および 6) 等の研究がある。文献 2) では板厚防撓材の寸法とその数、および材質を変えた 1 辺の長さ 900 mm の多数の正方形防撓板について実験を行ない、塑性関節線を仮定し上界定理を用いて求めた理論値と比較している。実験から得られた崩壊型式、崩壊荷重は計算で仮定した崩壊型式およびそれに対応する崩壊荷重の理論値とかなりよく一致する。

文献 2) によれば崩壊荷重の理論値はつぎの式で与えられる。

$$P_c = 24 \frac{M_{0y}}{b^2} \frac{1}{3 - 2 \sqrt{1 + 3 \beta^2} - 1} \frac{1}{\beta^2} \quad (3.1 a)$$

ただし $\beta^2 \geq 1.0$

$$\beta^2 = \frac{a^2}{b^2} \frac{M_{0y}}{M_{0x}} \quad (3.2 b)$$

$$M_{0x} = M_0 + \frac{m}{b} M_{0sx} \quad (3.1 c)$$

$$M_{0y} = M_0 + \frac{n}{a} M_{0sy} \quad (3.1 d)$$

$$M_0 = \frac{1}{4} \sigma_Y h^2 \quad (3.1 e)$$

M_{0sx} , M_{0sy} は防撓材についての板の有効幅を防撓材間隔全幅とした x 方向および y 方向それぞれの防撓材全塑性モーメントである。また β^2 を有効剛性比と称することにする。この論文では防撓板の崩壊荷重を (3.1) 式によつて計算する。

(1) 防撓板全体としての崩壊

β^2 が与えられたとき、荷重 P_c で崩壊するために必要な M_{0x} , M_{0y} は (3.1) 式から

$$\left. \begin{aligned} \frac{M_{0y}}{b^2} &= \left(3 - 2 \frac{\sqrt{1+3\beta^2}-1}{\beta^2} \right) \frac{P_c}{24} \\ \frac{M_{0x}}{a^2} &= \frac{1}{\beta^2} \frac{M_{0y}}{b^2} = \frac{1}{\beta^2} \left(3 - 2 \frac{\sqrt{1+3\beta^2}-1}{\beta^2} \right) \frac{P_c}{24} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

とくに一方方向にのみ ($\beta^2 \geq 1.0$ であるから y 方向とする) 防撓材を設けたときは (3.1) 式において

$$\left. \begin{aligned} M_{0x} &= M_0 \\ M_{0y} &= \frac{b^2}{a^2} \beta^2 M_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

(3.3) 式を (3.1 a) 式へ入れ、 β^2 について解き、 $\beta^2_{\max}$ とおいて

$$\beta^2_{\max} = \frac{3 - 2\sqrt{24 \frac{M_0}{a^2 P_c}}}{24 \frac{M_0}{a^2 P_c}} \quad (3.4)$$

したがつて防撓板の崩壊荷重と平板の板厚が定められているとすると、防撓板全体の崩壊から β^2 のとり得る範囲は (3.1) および (3.4) 式から

$$1 \leq \beta^2 \leq \beta^2_{\max} \quad (3.5)$$

あるいは (3.1 b) 式を用いて書きなおすと

$$\frac{b^2 P_c}{24} \leq M_{0y} \leq \frac{b^2 P_c}{24} \left(3 - 2\sqrt{24 \frac{M_0}{a^2 P_c}} \right) \quad (3.6)$$

使用圧力 P が与えられると、 x 方向、および y 方向の必要な防撓材全塑性モーメント M_{0sx} , M_{0sy} は安全率を s , および $m \neq 0$, $n \neq 0$ として (3.1 c) (3.1 d) 式から

$$M_{0sx} = \frac{b}{m} (M_{0x} - M_0) \quad (3.7 a)$$

$$M_{0sy} = \frac{a}{n} (M_{0y} - M_0) \quad (3.7 b)$$

$m=0$, $n \neq 0$, すなわち一方 (y 方向) にのみ防撓材を設けたときは、(3.7 a) 式は

$$M_{0sx} = 0 \quad (3.7 a)'$$

ただし、

$$\beta^2 = \beta^2_{\max}$$

(3.2), (3.7) 式から必要な防撓材の全塑性モーメントを計算することができる。

なお板厚を求める場合には安全率を考えなかつたのに、防撓材の崩壊については安全率を導入した理由は、(2.1) 式が使用圧力に対して板厚を決めたものであるのにくらべ、(3.1) 式から得られる荷重は防撓板の崩壊荷重のためである。

(2) 防撓板の局部崩壊

前項では $a \times b$ の寸法をもつ防撓板全体の崩壊を考えて防撓材の寸法を決めたが、この外に局部的な崩壊についても検討する必要がある。すなわち図 3.1 において、 x 方向の防撓材がどのように小さくとも、防撓板全体の崩壊に対しては y 方向の防撓材を大きくすることにより、要求される強度をもたせることができる。しかし、 x 方向の防撓材があまり小さくなると $\frac{a}{n+1} \times b$ の小区画に崩壊を生ずることになる。また $a \times \frac{b}{m+1}$ の区画についても同様である。

$$\frac{a}{(n+1)} \times b \text{ 区画の崩壊}$$

はじめに $\frac{a}{(n+1)} \times b$ 区画について考える。この区画の β^2 および崩壊荷重を β_n^2 , P_{cn} とすると、これらは (3・1) 式を用いて

$$\beta_n^2 = \frac{b^2}{a^2/(n+1)^2} \frac{M_{0x}}{M_0} \quad (3・8)$$

および

$$P_{cn} = 24 \frac{M_{0x}}{a^2/(n+1)^2} \frac{1}{3-2\sqrt{1+\beta_n^2-1}} \quad (3・9)$$

(3・8), (3・9) 式から M_{0x} を求め, P_{cn} を P_c とおくと

$$\frac{M_{0x}}{a^2} = \frac{1}{(n+1)^2} \left(3-2\sqrt{24 \frac{M_0}{b^2 P_c}} \right) \frac{P_c}{24} \quad (3・10)$$

防撓板の x 方向の全塑性モーメントは (3・10) 式より大きくしなければならない。

つぎに全区画の β^2 および M_{0y} は全区画の崩壊から決まる。すなわち (3・10) 式を (3・1 a) および (3・1 b) 式に入れて β^2 を求め, β_{xm}^2 とおくと

$$\beta_{xm}^2 = \left(3-2\sqrt{24 \frac{M_{0x}}{a^2 P_c}} \right) \frac{a^2 P_c}{24 M_{0x}} \quad (3・11)$$

また M_{0y} は

$$\frac{M_{0y}}{b^2} = \left(3-2\sqrt{24 \frac{M_{0x}}{a^2 P_c}} \right) \frac{P_c}{24} \quad (3・12)$$

$a \times \frac{b}{(m+1)}$ 区画の崩壊

$\frac{a}{(n+1)} \times b$ 区画の場合とはほぼ同様にして次式が得られる。

$$\frac{M_{0y}}{b^2} = \frac{1}{(m+1)^2} \left(3-\sqrt{24 \frac{M_0}{a^2 P_c}} \right) \frac{P_c}{24} \quad (3・13)$$

$$\beta_{ym}^2 = 4 \times \left(24 \frac{M_{0y}}{b^2 P_c} \right) \left/ \left(3-24 \frac{M_{0y}}{b^2 P_c} \right)^2 \right. \quad (3・14)$$

$$\frac{M_{0x}}{a^2} = \beta_{ym}^2 \times \frac{M_{0y}}{b^2} \quad (3・15)$$

このように局部崩壊を考えると β^2 の値は β_{xm}^2 , β_{ym}^2 により制限される。しかし (3・1) 式には $\beta^2 \geq 1.0$ の条件が付けられているため, β^2 のとり得る範囲は $\beta_{xm}^2 \geq \beta^2 \geq 1.0$ となる。 β^2 が 1.0 より小さい範囲については防撓板の x 軸と y 軸を交換して計算しなければならないが, あとで述べるように最小重量を求めるだけならばその必要はない。

3・2 防撓材の最小断面積

与えられた防撓材の全塑性モーメント M_{0s} を有するもののうち, 断面積最小となる断面寸法を求める。ただし防撓材断面は図 3・2 に示すように T 形と仮定する。

防撓材ウェブの深さと板厚の比を k_1 , フランジ幅と板厚の比を k_2 とおく。 k_1 , k_2 の値は座屈に対する考慮から決められ, 数値計算ではすでに述べたように歪硬化を生ずるまで防撓材は局部座屈を生じないと言う条件から, $k_1=43$, $k_2=17$ とする。また板の有効幅 l は防撓材間隔に等しくとる。

図 3・2 から, 防撓材断面積 A_s は

$$A_s = k_1 t_1^2 + k_2 t_2^2 \quad (3・16)$$

ここに t_1 : ウェブ板厚

t_2 : フランジの板厚

k_1 : ウェブの深さと板厚の比

k_2 : フランジの幅と板厚の比

また

$$A_p = l \times h, \quad (3・17)$$

$k = t_2/t_1$ において (3・16) 式を書きなおすと

$$A_s = (k_1 + k_2 k^2) t_1^2 \quad (3・18)$$

図 3・1 防撓板の局部崩壊

図 3・2 防撓材断面の形状

したがって

$$t_1^2 = \frac{A_s}{k_1 + k_2 k^2} \quad t_2^2 = \frac{k^2 A_s}{k_1 + k_2 k^2}$$

ここで防撓材の塑性中立軸が平板の中にあるか、ウェブ内にあるかによつて異なつた計算式になる。

(1) $A_p \geq A_s$ の場合 (塑性中立軸が平板にある)

このときは図3・2に示す断面の全塑性モーメント M_{0s} はつぎのようになる。

$$M_{0s} = \frac{1}{2} \sigma_y h A_p \left\{ \frac{1}{2} + \frac{A_s}{A_p} + \frac{k_2 k^3 + 2 k_1 k_2 k^2 + k_1^2}{(k_1 + k_2 k^2)^{3/2}} \frac{A_s^{3/2}}{l h^2} - \frac{A_s^2}{2 A_p^2} \right\} \quad (3 \cdot 19)$$

変形して

$$\frac{1}{2} \left(\frac{A_s}{A_p} \right)^2 + k_0 \sqrt{\frac{l}{h}} \left(\frac{A_s}{A_p} \right)^{3/2} - \frac{A_s}{A_p} - \frac{1}{2} + \frac{M_{0s}}{\frac{1}{2} \sigma_y h A_p} = 0 \quad (3 \cdot 20)$$

ここに

$$k_0 = \frac{k_2 k^3 + 2 k_1 k_2 k^2 + k_1^2}{(k_1 + k_2 k^2)^{3/2}}$$

(3・20) 式において k_1, k_2 は座屈に対する考慮から決まり、 M_{0s} は (3・7) 式から求められる。したがつて (A_s/A_p) は k のみの関数となる。故に

$$\frac{d}{dk} \left(\frac{A_s}{A_p} \right) = 0$$

の条件から k を求めると

$$k = \frac{1}{2 k_2} \left(\frac{3}{2} + \sqrt{2 k_1 k_2 + \frac{9}{4}} \right) \quad (3 \cdot 21)$$

(3・20), (3・21) 式からつぎの条件

$$0 < \frac{A_s}{A_p} \leq 1.0$$

を満足する A_s/A_p の最小根を求めれば、必要塑性モーメントをもち、断面積最小の防撓材断面が得られる。

(2) $A_p < A_s$ の場合 (塑性中立軸が防撓材にある) 全塑性モーメント M_{0s} は

$$M_{0s} = \sigma_y \left\{ \frac{1}{2} h A_p - \frac{(k_1 + k_2 k^2)^{1/2}}{4} \frac{(A_s - A_p)^2}{A_s^{1/2}} + \frac{1}{2} k_0 A_s^{3/2} \right\} \quad (3 \cdot 22)$$

変形して

$$\begin{aligned} & \frac{k_1(k_1 + 2 k_2 k^2) + k_2 k^2(2 k - k_2 k^2)}{(k_1 + k_2 k^2)^{3/2}} \left(\frac{A_s}{A_p} \right)^2 \\ & + (k_1 + k_2 k^2)^{1/2} \left(2 \frac{A_s}{A_p} - 1 \right) - 2 \sqrt{\frac{h}{l}} \left(\frac{2 M_{0s}}{\sigma_y h A_p} - 1 \right) \left(\frac{A_s}{A_p} \right)^{1/2} = 0 \end{aligned} \quad (3 \cdot 23)$$

(3・23)式において (A_s/A_p) は k のみの関数であるから、 $(A_s/A_p) > 1.0$ の条件の下に (A_s/A_p) の最小値を求めれば最小断面積が得られる。(3・23)式を k で微分し $\frac{d}{dk} \left(\frac{A_s}{A_p} \right) = 0$ とおいて

$$(k_1^2 + 6 k_1 k - 6 k_1 k_2 k^2 - k_2^2 k^4) \left(\frac{A_s}{A_p} \right)^2 + (k_1 + k_2 k^2)^2 \left(2 \frac{A_s}{A_p} - 1 \right) = 0 \quad (3 \cdot 24)$$

これを (A_s/A_p) について解くと

$$\frac{A_s}{A_p} = \frac{-(k_1 + k_2 k^2) \pm \sqrt{2 k_1^2 + 6 k_1 k - 4 k_1 k_2 k^2}}{k_1^2 + 6 k_1 k - 6 k_1 k_2 k^2 - k_2^2 k^4} \times (k_1 + k_2 k^2) \quad (3 \cdot 25)$$

複号は $(A_s/A_p) \geq 1.0$ の条件から負号のみとなる。

また (3・23), (3・24) 式から

$$\frac{k(2 k_2 k^2 + 8 k_1 k_2 k - 6 k_1)}{(k_1 + k_2 k^2)^{3/2}} \left(\frac{A_s}{A_p} \right)^{3/2} = 2 \sqrt{\frac{h}{l}} \left(\frac{2 M_{0s}}{\sigma_y h A_p} - 1 \right) \quad (3 \cdot 26)$$

(3・25), (3・26) 式を (A_s/A_p) , k について解けばよい。

なお、(3・25)式において (A_s/A_p) が実根であるための条件から

$$2 k_1^2 + 6 k_1 k - 4 k_1 k_2 k^2 \geq 0$$

これから

$$k \leq \frac{1}{2k_2} \left(\frac{3}{2} + \sqrt{2k_1k_2 + \frac{9}{4}} \right) \quad (3.27)$$

が得られ、 k の最大値は $(A_s/A_p) \leq 1.0$ の場合と一致し、またこのとき $(A_s/A_p) = 1.0$ となる。

4 防撓板の最小重量

防撓板の平板の板厚および防撓材の断面積が得られると、防撓板の全体積 V は

$$V = abh + ma A_{sx} + nb A_{sy} \quad (4.1)$$

また平均板厚を $\bar{h}$ で表わすと

$$\bar{h} = \frac{V}{a \times b} = h + \frac{m}{b} A_{sx} + \frac{n}{a} A_{sy} \quad (4.2)$$

防撓板の寸法 $a \times b$ 、使用圧力 P 、安全率 s 、材料の降伏点 σ_y 、ヤング率 E 、および k_1 、 k_2 が与えられたとき、防撓板の重量を最小化するため、その値を自由に变化できるパラメーターは、防撓板の長辺方向および短辺方向の防撓材の数 m 、 n および有効剛性比 $\beta^2 = \frac{a^2}{b^2} \frac{M_{0y}}{M_{0x}}$ の3つである。これらの変数の値を変えて計算をくり返し、重量の最小値を求める。

計算はつぎの順序で行なう。

- (i) m, n を仮定する。
- (ii) (2.9) または (2.10) 式から板厚を求める。
- (iii) β_{m0}^2 、 β_{xm}^2 を計算する。 β_{m0}^2 は x 方向防撓材の寸法を零としたときの β^2 の値である。
- (iv) β^2 を与える。ただし $1.0 \leq \beta^2 \leq \beta_{m0}^2$
- (v) x および y 方向防撓材の必要塑性モーメント M_{0sx} 、 M_{0sy} を (3.7) 式から計算する。
- (vi) まず (3.20)、(3.21) 式を用いて M_{0sx} 、 M_{0sy} をもつ断面積最小の防撓材寸法を求める。得られた断面が $A_p \geq A_s$ であれば正しい最小断面である。もし $A_p < A_s$ のときは (3.25)、(3.26) 式によつて最小断面積を計算する。
- (vii) 防撓板の体積 V 、平均板厚 $\bar{h}$ を求める。(4.1)、(4.2) 式
- (viii) m 、 n 、 β^2 を順次変えて同じ計算をくり返し、 V の最小値を求める。

フローチャートおよび ALGOLIP によるプログラムは省略する。

5 計算結果と考察

5.1 計算の範囲

あとで述べるように防撓板の寸法に関し、一部無次元化が可能であるが、計算機を使用する都合上つきに示す数値をもつ場合について計算した。

使用圧力 $P = 1.0, 2.0, 5.0$ および 10.0 kg/cm^2

防撓板の崩壊荷重と使用圧力の比 (安全率) $s = 2.0$

材料のヤング率 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

材料の降伏点 $\sigma_y = 2300 \text{ kg/cm}^2$

防撓材ウェブの深さと板厚の比 $k_1 = 43$

防撓材フランジの幅と板厚の比 $k_2 = 17$

防撓板の寸法 $a \text{ mm} \times b \text{ mm}$

$5,000 \times 5,000, 7,500 \times 5,000, 10,000 \times 5,000, 15,000 \times 5,000$ および $10,000 \times 10,000, 20,000 \times 10,000$

有効剛性比 $\beta^2 = 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, \beta_{m0}^2$ および β_{xm}^2

防撓材の数 m, n

ここに β_{m0}^2 は長辺方向防撓材寸法を零としたときの値で言わば仮想的なものである。また β_{xm}^2 はすでに述べたように局部崩壊を生じないための条件から要求される値である。したがつて β_{xm}^2 より大きな値について計算することは無意味であるが β^2 と重量の関係を知るため $\beta^2 > \beta_{xm}^2$ についても検討した。

また防撓板の崩壊荷重を求める (3.1) 式には $\beta^2 \geq 1.0$ の条件が課せられているため $\beta^2 < 1.0$ となる防撓板についてはその x 軸と y 軸を交換して計算しなければならない。しかし正方形板は対称であるためその必要はな

図 5.1 a 防撓材の数と重量

図 5.1 b 同 上

図 5.1 c 同 上

く、長方形板の場合には短辺に平行な防撓材の剛性を大きくしたとき最小重量が得られるから短辺方向に y 軸をとり、 $\beta^2 \geq 1.0$ の範囲について計算するだけでよいことになる。この外、安全率 s の影響をしらべるため $10,000 \times 5,000$ の寸法をもつ防撓板について s を変化させたときの最小重量を求めた。

また実際の船体隔壁と比較するため、実際の隔壁と同じ数の防撓材を配置した場合およびその数を変化させて最小重量とした場合について計算した。この計算では $k_1 = 43, 70, 100, 200$ および 300 とした。

5.2 計算結果

$P = 1.0 \text{ kg/cm}^2$, $a \text{ mm} \times b \text{ mm} = 5,000 \times 5,000, 7,500 \times 5,000$ および $10,000 \times 5,000$ の各寸法については m, n および β^2 を変化させて防撓板重量を求めた。結果の一部を、横軸に長辺方向防撓材の数 m 、縦軸に平均板厚と短辺の長さの比 $\bar{h}/b$ をとり、 β^2 を助変数として図 5.1 に示した。このような計算から長方形板、正方形板いづれについても $\beta^2 = \beta^2_{xm}$ のとき最小重量の得られることが分った。そこで前述の組み合わせ以外は無効剛性比を β^2_{xm} とした場合についてのみ計算した。結果の一部を図 5.2 に示す。

以上の計算から得られた最小重量をもつ防撓板の形状を表 5.1 に一括して示す。

また安全率 s 、使用圧力 P を変化させたとき、これらが最小重量に与える影響を図 5.4 および 図 5.5 に、さらに実船との比較を図 5.6 に示した。

5.3 考察

(1) 防撓板寸法と重量

防撓板の縦横比 a/b および防撓材の数 m, n が等しく、その使用

図 5.2 a 防焼材の数と重量 ($\beta^2=\beta^2xm$)

図 5.2 b 同 上

図 5.2 c 同 上

圧力が同一である2つの防焼板を考える。防焼板の平板の板厚は小区画の寸法から決まるが、ここで考えている防焼板では使用圧力と縦横比が同じであるから小区画の短辺の長さの板厚の比は(2.8)式によつて等しくなり、板厚は防焼板寸法に比例する。また防焼材については、(3.1)式から分るようにこれら2つの防焼板の β^2 および M_{0y}/b^2 を等しくする必要がある。そのためには x および y 方向の防焼材全塑性モーメント M_{0sx} , M_{0sy} が防焼板寸法の3乗に比例するように防焼材寸法を決めなければならない。防焼材断面を決める(3.20)および(3.23)式において M_{0s} は M_{0sx} あるいは M_{0sy} を表わしており、また $A_p \times h$ は防焼板寸法の3乗に比例するから、いま考えている2つの防焼板について(3.20)および(3.23)式は全く同じ形となり、防焼材と平板の断面積比 A_s/A_p は等しくなる。したがって縦横比の等しい防焼板の平均板厚はその1辺の長さに比例する。あるいは平均板厚と短辺の比は防焼板の大きさとは無関係に一定となる。

(2) β^2 (有効剛性比) の影響

防焼材の数および平板の板厚を一定とし、有効剛性比 β^2 を変化させた計算からつぎのようなことが分つた。長方形板については短辺に平行(y 方向)な防焼材の全塑性モーメントを大きく、かつその数を比較的少なくしたとき重量が小になり、正方形板では一方方向の防焼材、たとえば y 方向防焼材の数 n が少ないときは、その方向の全塑性モーメントを大きくするほど重量が軽くなり、 n がある程度大きい場合には $m=n$, $\beta^2=1.0$ つまり縦方向および横方向の防焼材の数と全塑性モーメントを等しくすると重量は極小となるが、そ

の値は n の少ない場合より大きい。したがって長方形板，正方形板いずれに対しても β^2 をできるだけ大きくする，すなわち $\beta^2 = \beta_{xm}^2$ とすると最小重量が得られる。そしてこのときの y 方向防撓材の数は前述のように比較的少ない。

このような結果についてはつぎのように考えることができよう。短辺に平行に配置された防撓材は短かいスパ

表 5・1 防撓材の寸法と最小重量

防撓板寸法 $a \text{ mm} \times b \text{ mm}$	圧力 $P \text{ kg/cm}^2$	防撓材の数		剛性比 β_{xm}^2	防撓材の間隔		防撓材断面積		板 厚 $h \text{ cm}$	平均板厚 $\bar{h} \text{ cm}$
		n	m		$a/n+1$	$b/m+1$	$A_{sy} \text{ cm}^2$	$A_{sx} \text{ cm}^2$		
5,000 × 5,000	1.0	2	17	5.77	166.7	27.8	132.2	8.2	0.279	1.087
7,500 × 5,000	1.0	3	15	11.88	187.5	31.3	139.9	10.4	0.314	1.186
10,000 × 5,000	1.0	5	16	30.17	166.7	29.4	135.0	8.5	0.295	1.243
15,000 × 5,000	1.0	7	17	56.90	187.5	31.3	143.1	10.4	0.314	1.294
5,000 × 5,000	2.0	2	17	5.79	166.7	27.8	211.5	13.0	0.430	1.718
7,500 × 5,000	2.0	3	15	11.92	187.5	31.3	223.9	16.5	0.484	1.874
10,000 × 5,000	2.0	4	14	20.16	200.0	33.3	230.6	18.8	0.516	1.964
15,000 × 5,000	2.0	7	14	57.27	187.5	33.3	224.9	17.1	0.516	2.046
5,000 × 5,000	5.0	2	15	5.84	166.7	31.3	388.6	25.7	0.801	3.127
7,500 × 5,000	5.0	3	14	11.99	187.5	33.3	417.1	31.6	0.855	3.408
10,000 × 5,000	5.0	4	13	20.28	200.0	35.7	429.0	36.1	0.916	3.570
15,000 × 5,000	5.0	7	13	57.59	187.5	35.7	418.4	32.9	0.916	3.724
5,000 × 5,000	10.0	1	11	1.85	250.0	41.7	699.9	88.1	1.533	4.871
7,500 × 5,000	10.0	3	12	12.10	187.5	38.5	654.6	54.7	1.515	5.346
10,000 × 5,000	10.0	4	12	20.38	200.0	38.5	685.8	60.1	1.415	5.598
15,000 × 5,000	10.0	7	12	57.86	187.5	38.5	668.7	54.7	1.415	5.848
10,000 × 10,000	1.0	2	17	5.77	333.3	55.6	528.7	32.8	0.558	2.174
20,000 × 10,000	1.0	5	16	30.17	333.3	58.8	540.1	34.1	0.591	2.486

図 5・3 防撓材の間隔と最小重量

図 5.4 安全率と最小重量

図 5.5 使用圧力と最小重量

ンで荷重を支えることができ、また大きな防焼材を数少なく設けると、同じ塑性モーメントを得るための防焼材断面積が小さくてよい等の理由から、防焼板全体の崩壊に対しては短辺方向に大きな防焼材を数少なく配置するのが有利となろう。しかし短辺方向のみに防焼材を設けた場合 ($\beta^2 = \beta_{\max}^2$)、および短辺方向の防焼材の数を減らしすぎた場合はいずれもかえって重量は増加する。これは防焼材の数をあまり減らすと小区画の寸法が大となり、平板の板厚が増すためである。

したがって重量を最小とするには、短辺に平行な（正方形板では y 方向）防焼材の外に板厚を減らすため長辺方向（正方形板では x 方向）にも防焼材を設けることが必要になり、さらにこの防焼材が局部崩壊を生じないよう、そして全重量が最小となるように、その塑性モーメントおよび局部崩壊に対するスパン（短辺方向防焼材の間隔）を決めることになる。

(3) 防焼材の数と重量

防焼材の数と重量の関係を示した図 5.2 をみると、正方形板の場合、 n が少ないときは、 m を 1 から順次増加させて行くにつれ、重量は減少している。これは m の増加により小区画の寸法が小さくなって平板の板厚が減少するためであろう。 n がある程度多いときは m を増すとはじめは重量も増加する。これは m を増しても小区画の縦横比が 2.0 以上にとどまるため板厚の変化はなく、一方 m を増すことによる防焼材の重量増を生ずる結果であろう。この場合もさらに m を多くすると板厚が減少して重量は小さくなる。

また $m=n$ において折れ角を生じている。これは m が n から $n+1$ に増加すると、小区画の寸法が小さくなって板厚が減少し、板重量は小となるが、正方形から長方形への変化であるため板厚の減少が小さく、他方では防焼材の数を増したことによる重量増があつて、全体としては重量の減少率が小さくなり場合によつては増加することもあるためである。

長方形の防焼板についても正方形のときと同じような現象がみられる。ただし折れ角は $m=n$ ではなく、小区画が正方形またはそれに近い形となる防焼材配置のときに生じている。

(4) 防焼材間隔と最小重量

$\beta^2 = \beta_{xm}^2$ とした場合に、 m に関して最小化した重量と短辺方向防焼材の間隔 $a/(n+1)$ の関係を図 5.3 に示す。縦軸に平均板厚と短辺の長さの比 $\bar{h}/b$ を、横軸には防焼材間隔と短辺の比をそれぞれ用いて無次元化してあ

る。これから防撓板の寸法とは殆んど無関係に、横軸の値が 0.36 前後のとき最小重量となることが分る。またこの図は使用圧力 $P=1.0 \text{ kg/cm}^2$ として得られたものであるが、表 5.1 に見られるように使用圧力が変化しても短辺方向防撓材の間隔 $\left(\frac{a}{n+1}\right)$ の最適値は殆んど変わらない。ただこの結論しは k_1 , k_2 , s をはじめに述べたようににおいて得られたものである。

(5) 使用圧力と防撓材配置

使用圧力が変化したときの最小重量を与える防撓材配置は、短辺方向防撓材の数 n が前述のように殆んど変わらないのにくらべ、長辺方向防撓材の数 m は使用圧力が大きくなるにつれて減少している。

(6) 安全率と最小重量

縦横比 $a/b=2.0$ 、使用圧力 $P=1.0 \text{ kg/cm}^2$ の防撓板について安全率 s と最小重量の関係を図 5.4 に示した。防撓材の数 m , n および β^2 を一定に保つたまま、安全率を大きく

すると板厚は変わらないが防撓板の崩壊荷重 P_0 が増加するため防撓材寸法を大きくしなければならない。防撓材断面積については、その全塑性モーメント M_{0s} が崩壊荷重に比例し、また断面積 A_s と M_{0s} は (3.20), (3.23) 式で結びつけられている。しかしこれらの式は複雑であり、また m , n の最適値も変化するので s の影響を理論的に推定することは難しい。計算結果をみると重量は殆んど s に比例して増加する。

(7) 使用圧力と最小重量

使用圧力と最小重量の関係を、縦横比を助変数として図 5.5 に示した。これから任意の寸法をもつ防撓板の最小重量を求めることができる。

(8) 実船の隔壁重量

実船の隔壁板 3 種について、NK ルールで規定される水圧に対し、実船と同じ数の防撓材を配置した場合の重

量および防撓材の数を変えて最小とした重量を計算し、図 5・6 に示した。防撓材のフランジとウェブの板幅/板厚比について、はじめに仮定した値 $k_1=43$, $k_2=17$ を用いると実船より計算値の方が大きくなった。その原因は実船ではウェブの深さと板厚の比 k_1 が仮定した値よりはるかに大きいためである。そこで k_1 を変化させた計算を行なった。 k_1 を大きくするにつれて、はじめは急速に重量が小さくなるが、 k_1 が 100 以上になると重量の変化は緩やかになってくる。そして実船と同じ数の防撓材を配置した場合には $k_1=200\sim300$ の範囲で実船と大差ない重量が得られた。もちろん k_1 をこのように大きくすると座屈を防ぐための措置が必要になり、それによる重量増加を生ずるであろうが、結果が大きく変えることはないと考える。

また m , n を変化させて求めた最小重量は実船と同じ数とした場合に比べて 20~30% 軽くなっている。

本研究の一部は日本造船研究協会第 83 部会の研究として行なわれたものであることを附記し、ご指導、ご討論を頂いた吉識教授、秋田博士ほか委員の方々に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 本間康之：等分布荷重を受ける帯状板，造協論文集，第 111 号（昭和 37 年）
- 2) 長沢準他：横荷重を受ける防撓板の塑性強度，造協論文集，第 114 号（昭和 38 年）
- 3) 本間康之：隔壁板の設計法について，造船協会誌，第 455 号（昭和 41 年 8 月）
- 4) Joint Committee of the Welding Research Council, "Plastic Design in Steel", (1961・), pp. 50
- 5) 田中秀雄他：塑性域をこえて加圧される防撓板の強度に関する研究 関西造船協会（昭和 38 年）
- 6) Clarkson, J. "Test of Flat Plated Grillages under Uniform Pressure", R.I.N.A. (1963・)