(昭和54年11月 日本造船学会秋季講演会において講演)

水圧を受ける細長平板の圧縮強度

正員 岡田博雄* 正員 大嶋耕一**
正員 福本佳夫*

Compressive Strength of Long Rectangular Plates under Hydrostatic Pressure

by Hiroo Okada, *Member* Koichi Oshima, *Member*
Yoshio Fukumoto, *Member*

Summary

In this paper, the compressive strength of long rectangular plates (aspect ratio $\alpha=3$ and $\alpha=4$) under increasing compression and constant hydrostatic pressure, is studied theoretically and experimentally as a basic study on the compressive strength of a ship's bottom plating. The theoretical calculations are performed by following two methods assuming that the plate behaves elastically up to the collapse.

a) The method assuming that the plate collapses when the normal stress in the direction of compression at the longitudinal edges of the plate will become equal to yield stress of the material.

b) The method assuming that the plate collapses when the plate will satisfy the condition of plastic collapse based on plastic analysis in which collapse mechanism is assumed and the large deformation theory is considered.

From these results of theoretical calculations and experiments, conclusion is summarized as follows :

(1) The compressive strength for comparatively thin plates having the large value of $(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ where collapse of the plate will occur in postbuckling state does not change so much with hydrostatic pressure, while for comparatively thick plates having the small value of $(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ where collapse of the plate will occur in prebuckling state, the compressive strength changes remarkably with hydrostatic pressure.

(2) Calculated values of the compressive strength based on the method a) are generally larger than those based on the method b). The difference of the two becomes more remarkable for thicker plates having the small value of $(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ under larger hydrostatic pressure.

(3) Experimental results of this study concerning with thin plates having comparatively large values of $(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ agree generally with the tendency of theoretical results.

1 緒言

本論文は，船底外板の圧縮強度に関する基礎的研究として，水圧と圧縮を受ける4辺支持の細長平板（辺長比 $\alpha=3$ および $\alpha=4$ 付近）の圧縮に対する強度を検討したものである。

板構造が圧縮荷重のもとで崩壊する場合の最高荷重の計算としては，近年発達してきている有限要素法を用いた大坪や上田らの正方形板[1),2)]についてのものがあり，また上田らによる防撓板[3)]についてのものがある。解析的手法を用いたものとしては，藤田らによる防撓板[4)]についてのものや，圧縮と剪断の組合せ荷重を受ける正方形板[5)]についてのものがあり，また大坪らによる幅広平板[6)]や防撓板[7),8)]についてのものがある。著者らは解析的手法により水圧，圧縮を受ける細長平板についての座屈強度の検討を行ってきた[9)]が，本論文ではこの結果を用いてこの場合の圧縮強度を求め，水圧の圧縮強度に及ぼす影響を検討した。圧縮強度の計算手法としては板が圧壊にいたるまでは弾性的に挙動するものとし，板の縁応力が降伏応力に達したとき圧壊すると仮定する場合と，塑性崩壊の条件式を満足したとき圧壊すると仮定する場合について考えた。また実験を行い両理論計算と比較した。

* 大阪府立大学工学部
** 大阪府立大学大学院工学研究科

2 水圧と圧縮を受ける4辺支持の細長平板の弾性大撓み挙動

2.1 解析方法

いま，Fig. 1 のように比較的大きな辺長比 $\alpha(\equiv a/b)$ をもつ長方形板 $(a\times b\times t)$ が水圧 q を受けて撓んでいるところへ長辺方向に平均圧縮荷重 p が加わる場合の弾性挙動を考える。このとき，圧縮荷重 p が小さいときは板の撓み形状は同図 (b) に示されるような水圧のみによる撓みと類似のくぼみ1つの撓み形状のままで，その大きさは p の増加とともに増大する。しかし，p が水圧 q および辺長比 α によって決まるある値 p_c を超えてなお増大すれば，撓み形状は急激に変化し，同図 (c) に示されるようないくつかの凹凸（その数は α によって決まる）をもつ形状に移る。このような板の挙動を以下の方法で追跡することとする。すなわち，板の大撓み理論による基本方程式より出発し，板の撓みを未定定数を含んで仮定し，エネルギー法により未定定数を決定し板の挙動を明らかにする。なお，板は変形後も周辺は直線で残るものとし，これを面内変形に対する条件とする。

座標軸は Fig. 1 に示すように撓みのない最初の状態で中央面内に x, y 軸をとり，これに垂直に z 軸をとる。ただし，$x=0$, a および $y=0$, b が板の周辺と一致するようにとる。

板の撓みを w とし，板の中央面の応力を Airy の応力関数 F を用いて表せば，板の弾性大撓み基本方程式は下式で与えられる。

適合条件式：

$$\frac{\partial^4 F}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 F}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 F}{\partial y^4}=E\left\{\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right)^2-\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right\} \quad (1)$$

平衡条件式：

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}=\frac{q}{D}+\frac{t}{D}\left\{\frac{\partial^2 F}{\partial y^2}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}-2\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right\} \quad (2)$$

ここに，$D=Et^3/\{12(1-\nu^2)\}$；板の曲げ剛性，E：ヤング係数，ν：ポアソン比

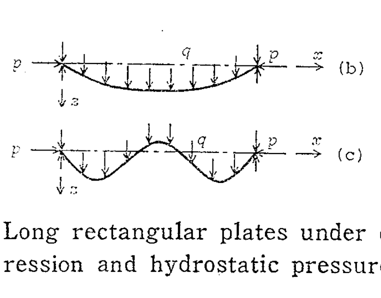

Fig. 1 Long rectangular plates under compression and hydrostatic pressure.

ここで，板の撓み w を板の面外変形に対する周辺条件および座屈前後の変形を考慮して，下式のように仮定する。

$$w=\sum_{n=1}^{N} w_n \sin\frac{n\pi}{a}x\sin\frac{\pi}{b}y\ ;\ w_n=\text{未定定数} \quad (3a)$$

上式中の撓みの項数 N は，辺長比 α によって近似的に次のように定める。

$$N=3 \text{ for } \alpha=3 \text{ and } N=4 \text{ for } \alpha=4 \quad (3b)$$

このように仮定した撓み式（3）を適合条件式（1）に代入して，面内変形に対する周辺条件および荷重条件を満足するよう未定定数を含んだまま応力関数 F を求める。

次に平衡条件として（2）式を用いる代りに，系全体のポテンシャルエネルギー ϕ が極値をもつ条件，$\delta\phi=0$ を用いて未定定数を決定する。ここに，ϕ は

$$\phi=U+V \quad (4)$$

で表わされるもので，U は板の曲げ変形によるひずみエネルギー U_b と面内変形によるひずみエネルギー U_m の和で与えられ，V は平均圧縮荷重 p によるポテンシャルと水圧 q のポテンシャルの和で与えられる。（4）式に w および F を代入して計算すれば p, q が与えられたとき ϕ が w_n の関数として表される。ここで未定定数 w_n は $\delta\phi=0$，すなわち

$$\frac{\partial\phi}{\partial w_n}=0 \quad (n=1,2,\cdots,N) \quad (5)^*$$

より決定される。（5）式より与えられた p, q に対して平衡状態が定まることになる。

なお，平衡状態の安定，不安定の判定は $\delta^2\phi$ の符号により行われるが，安定条件は $\delta^2\phi>0$ で与えられ，いまの場合下式となる。

$$\phi_{11}>0,\quad \begin{vmatrix}\phi_{11} & \phi_{12}\\ \phi_{12} & \phi_{22}\end{vmatrix}>0,\ \cdots,\ \begin{vmatrix}\phi_{11} & \phi_{12} & \cdots & \phi_{1N}\\ & \phi_{22} & & \vdots\\ \text{SYM.} & & \ddots & \vdots\\ & & & \phi_{NN}\end{vmatrix}>0 \quad (6)$$

ここに，$\phi_{ij}=\partial^2\phi/\partial w_i\partial w_j$ である。

板の変形の様子は（5）および（6）式より求めることができる。

2.2 弾性大撓み変形挙動

（a） 4辺支持，$\alpha=3$ 付近の長方形板

本項では，4辺支持，辺長比 $\alpha=3$ 付近の長方形板が一様水圧 q と a 辺方向の圧縮荷重 p を受ける場合を考える。

p の増加により板は 2.1 で述べたような挙動をするが，その様子は（3）式において $N=3$ とした式より十分近似できる[9]。

＊ 具体的内容については付録A参照．

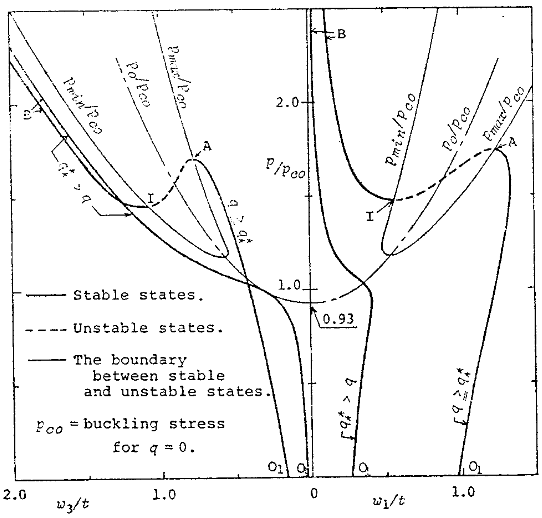

Fig. 2 $p/p_{c0}-w_1/t$, w_3/t curves ($\alpha=3$).

$N=3$ を考慮した（5）式より，q を一定として，p と w_1, w_2, w_3 の関係を求め，それぞれの平衡状態の安定，不安定を（6）式より判定して代表的変形状態を求める。その結果を示したのが Fig. 2 である。同図より水圧 q の大きさにより以下の2つの変形状態があることがわかる。

i） q がある値 q^*_* より小さい場合（$q^*_*=3.70Et^4/b^4$）

p が小さいときは w_1 が大きく w_3 が小さいくぼみ1つの状態であるが，p が大きくなると w_1 が小さく w_3 の大きいくぼみ3つの状態へ連続的に変化していく（曲線 O_1B）。このとき明確な座屈荷重が定義できないが中央撓みが0になる（すなわち $w_1=w_3$ となる）荷重 p_0 を一応の目安とした。

ii） q が q^*_* より大きい場合

p が小さいときは w_1 が大きく w_3 の小さいくぼみ1つの状態で，変形は曲線 O_1A 上を移動するが，p が曲線 O_1A の極大値A点（このときの p を $p_{\max}$ とする）に達して後，なお増加すれば変形は曲線 IB 上へ飛移り以後くぼみ3つの状態でこの曲線上を移動する。このとき $p_{\max}$ を座屈荷重と定義する。

なお，この場合外乱の程度によっては $p_{\max}\geqq p\geqq p_{\min}$（I点に対応する荷重）を満足する荷重 p で曲線 O_1A から曲線 IB へ飛移る可能性があり $p_{\min}$ は設計の見地から座屈荷重の下限と考えることができる。

$\alpha=3$ の場合，$w_2\neq 0$ の変形は p の大きなところで存在するが，変形は不安定な平衡状態である。

$p_{\max}$, $p_{\min}$ および p_0 はそれぞれその存在する範囲で水圧 q が大となれば大となる傾向がある（図省略）。

（b） 4辺支持，$\alpha=4$ 付近の長方形板

4辺支持，$\alpha=4$ 付近の長方形板の挙動は（3）式において $N=4$ とした式より十分近似できる[9]。

（5），（6）式より求めたその代表的変形状態を Fig. 3 に示す。同図では，エネルギー論的考察により，不安定な平衡状態および安定度の低い平衡状態は除いてある。同図より水圧の大きさにより代表的変形状態が2つに大別できると考えられる。

i） q がある値 q^*_* より小さい場合（$q^*_*=0.47Et^4/b^4$）

p が小さいときは $w_2=w_4=0$ で w_1 が大きく w_3 が小さいくぼみ1つの状態で変形は O_1A 上を移動するが，p がA点（この荷重のときに $w_4\neq 0$, $w_2\neq 0$ の平衡状態が存在しはじめる。このときの p を分岐点荷重と呼び p_B で表す）に達して後なお増加すれば変形は w_4 および w_2 の存在する状態（曲線 AB）へ移行し，以後 p の増加とともに w_4 が増加してくぼみ4つの状態となる。このときの分岐点荷重 p_B を座屈荷重と定義する。なお，図に見られるように $p=p_B$ における変形 O_1A から ABへの移行は連続的である。

ii） q が q^*_* より大きい場合

このときは変形には必ず飛移りが伴うが安定度の低い平衡状態を無視すれば以下の2つの状態に分けられる。

a） $q^*_*\leqq q\leqq \bar{q}^*_*$ の場合（$\bar{q}^*_*=3.56Et^4/b^4$） p が小さいときは $w_2=w_4=0$ で w_1 が大きく w_3 が小さいくぼみ1つの状態で，変形は O_1A 上を移動するが，p が分岐点荷重 p_B（図のA点）に達して後なお増加すれば，変形は w_4 および w_2 の存在する状態（曲線 IB）へ飛移り，以後 p の増加とともに w_4 が増加する。このとき p_B を座屈荷重とする。

b） $\bar{q}^*_*\leqq q$ の場合 この場合も p が小さいときは a）と同じ傾向で変形は曲線 $O_1\bar{A}$ 上を移動するが p が曲線 O_1

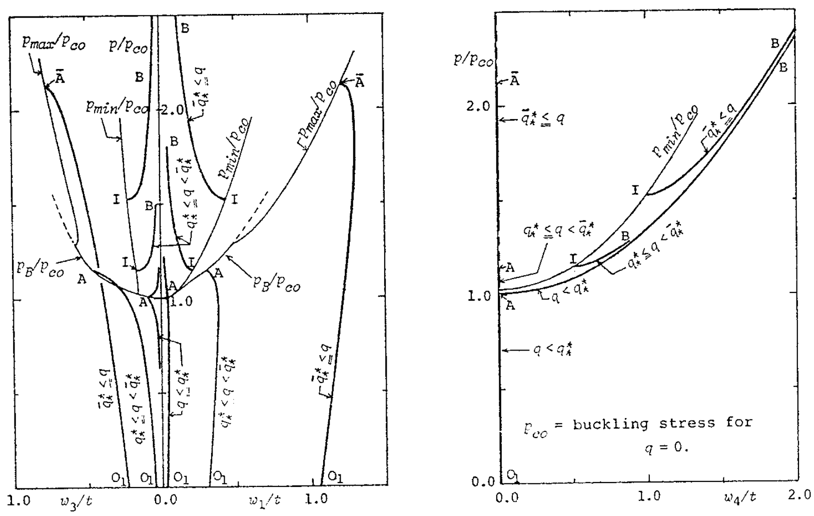

Fig. 3 $p/p_{c0}-w_1/t$, w_3/t and w_4/t curves ($\alpha=4$). ($p/p_{c0}-w_2/t$ curves are omitted.)

$\bar{A}$ の極大値 $\bar{A}$ 点（このときの p を $p_{\max}$ とする）に達して後なお増加すれば変形は曲線 IB 上へ飛移り以後 p の増加とともに w_4 が増加する。このとき $p_{\max}$ を座屈荷重とする。

なお，ii）の水圧のもとでは外乱の程度によっては a) の場合は $p_B \geqq p \geqq p_{\min}$ を，また b) の場合は $p_{\max} \geqq p \geqq p_{\min}$ を満足する荷重で変形が曲線 IB 上へ飛移る可能性がある。したがって，この場合 I 点に対応する荷重 $p_{\min}$ は設計の見地からの座屈荷重の下限と考えることができる。

p_B，$p_{\max}$ および $p_{\min}$ と q の関係を Fig. 5 または Fig. 8 に示す。これらの値はそれぞれその存在する範囲で，水圧 q が大となれば大となる傾向がある。

3 水圧を受ける4辺支持の細長平板の圧縮強度

3.1 解析方法

ここでは，辺長比 $\alpha=3$ または4付近の4辺支持された長方形板が水圧と同時に圧縮力を受ける場合について，その圧縮強度を求めることを考える。

板が荷重を受け変形するとき，荷重が小さい間は弾性的であるが，さらに荷重増があると板の一部に降伏領域ができる。厳密に圧縮強度を求めるためにはこれらのことを考慮して荷重-変形関係を追跡しなければならない。これは近年有限要素法や有限帯板法などにより計算可能となってきているものの計算時間がかかるなど極めて煩雑であり，また挙動を定性的に把握するには不利である。

そこで，本章では荷重負荷後圧壊にいたるまでは板は完全に弾性的に挙動するものとし，以下に述べる2つの方法より近似的に圧縮強度を求めることとする。その1つは従来水圧がないときの板の圧縮強度の計算に用いられた方法で，板の圧縮方向の縁応力 $|\sigma_r|$ が降伏応力 σ_Y に達したとき圧壊するとして圧縮強度を計算するものであり，いま1つは藤田らが防撓板などの圧縮強度[4),5)]について行ったと同様な方法で，板の崩壊モードを仮定した塑性大撓み解析を行い，塑性崩壊の条件式を求め，先の弾性大撓み解析より求めた変形状態がこの条件を満足したとき圧壊するとして圧縮強度を求めるものである。

本章では，これらの圧壊の条件式を導き，それに基づいて圧縮強度を計算するとともに，これらの結果より圧縮強度に及ぼす水圧の影響を検討する。

a) 板の縁応力が降伏応力に達したとき圧壊すると仮定する方法

水圧 q が与えられたとき，p がある値 p_u に達し圧壊するまでは前章（5），（6）式より計算される変形挙動をするものとし，板が次の条件を満足するとき圧壊すると考える。すなわち，板の縁応力 $-\sigma_r$ が降伏応力に達した瞬間に圧壊するとし，そのときの圧縮荷重 p を圧縮強度 p_u とする。この条件を具体的に書けば下式で表される。

$$-\sigma_r=\frac{Et^2}{b^2}\left[\frac{\pi^2}{3(1-\nu^2)}\frac{p}{p_{c0}}+4\pi^2\sum_{n=0}^{2N}\bar{B}_n\cos\frac{n\pi}{a}x_0\right]=\sigma_Y \qquad (7)$$

ここに，x_0 は上式左辺を最大にするものをとる。また p_{c0} は水圧のないときの板の座屈荷重であり，$\bar{B}_n$ は付録Aに示されている。上式と（5）式より圧縮強度 p_u および $w_1 \sim w_N$ の値が定まることになる。

b) 塑性崩壊の条件式を満足したとき圧壊すると仮定する方法

ここでは，塑性崩壊モードを仮定した塑性大撓み挙動の解析を行い，先の弾性大撓み解析より求めた変形状態が塑性崩壊の条件式を満足するとき板が圧壊するものとして圧縮強度を求める。

まず大撓みを考慮した塑性崩壊の条件式を次のようにして導く。

材料は Mises の降伏条件に従う完全剛塑性体であるものとし，また塑性関節線は直線であると仮定する。これらの仮定に基づいて，大撓みを考慮した仮想仕事の原理より次式が得られる。

$$\sum_{m=1}^{r}\int_{l_m}(M_p+wN)\delta\Theta\, dl_m+\sum_{m=1}^{r}\int_{l_m}(N\delta u^*+T\delta v^*)\, dl_m=ptb\,\delta\bar{u}+\int_0^a\int_0^b q\,\delta w\, dx\, dy \qquad (8)$$

ここに，N, T：塑性関節線上の単位幅あたりの面内引張力および面内剪断力

M_p：面内力を考慮した塑性関節線上の単位幅あたりの塑性曲げモーメント

w：関節線の撓み

δw：仮想撓み

$\delta\Theta$：δw による塑性関節の角度変化

$\delta\bar{u}, \delta\bar{v}$：$b$ 辺および a 辺の仮想縮み量

$\delta u^*, \delta v^*$：それぞれ，$\delta\bar{u}$ および $\delta\bar{v}$ による関節線のひらき量およびずれ量，δv^* は T に対応する方向のものを正とする。

l_m：m 番目の塑性関節線

r：塑性関節線の数

（8）式を用い，δw の仮想変位を与えて，水圧，圧縮を受ける長方形板の代表的な崩壊モードに対する塑性崩壊の条件を求めると次のようになる。

（A） k 個の縦長の屋根形の崩壊モード（Fig. 4 (a) 参照）を仮定するとき（$k<\alpha$）

$$\{m_{45}+(\alpha/k-1)m_0/2-Aqb^4/(Et^4)\}/\mu=w_B/t \qquad (9a)$$

ここに，$A=\begin{cases}0 & (k:\text{even})\\ (3\alpha/k-1)/\{12k\sigma_Y b^2/(Et^2)\} & (k:\text{odd})\end{cases}$

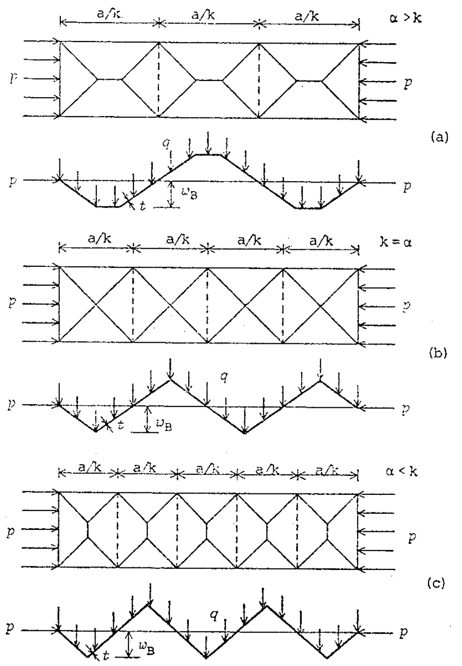

Fig. 4 Collapse modes of long rectangular plates with simply supported edges.

$$\mu=p/\sigma_Y$$

（B） k 個の正四角錐形の崩壊モード (Fig. 4 (b) 参照) を仮定するとき ($k=\alpha$, α：整数)

$$\{m_{45}-Bqb^4/(Et^4)\}/\mu=w_B/t \qquad (9b)$$

ここに，$B=\begin{cases}0 & (k:\text{even})\\ 1/\{6k\sigma_Y b^2/(Et^2)\} & (k:\text{odd})\end{cases}$

（C） k 個の横長の屋根形の崩壊モード (Fig. 4(c) 参照) を仮定するとき ($k>\alpha$)

$$\{2m_{45}+(k/\alpha-1)m_{90}-Cqb^4/(Et^4)\}\div\{4\mu(k/\alpha-0.5)\}=w_B/t \qquad (9c)$$

ここに，$C=\begin{cases}0 & (k:\text{even})\\ 2k(3-k/\alpha)/\{3\alpha\sigma_Y b^2/(Et^2)\} & (k:\text{odd})\end{cases}$

上式中の w_B は崩壊状態における板の最大撓みであり，m_{45}，m_{90} および m_0 の値は付録Bに示す。

塑性崩壊の条件式（9）は q が与えられたとき p と w_B の関係式になっているので，上式と（5）式より圧縮強度 p_u およびそのときの $w_1\sim w_N$ の値が定まることになる。

3.2 圧縮強度

a) 板の縁応力が降伏応力に達したとき圧壊すると仮定した場合

2 の（5）式と 3.1 の（7）式より圧縮強度を辺長比 $\alpha=3$ および 4 の場合について計算した。Fig. 5 は $\alpha=4$ の場合について，薄い板 ($(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}=2.8$) と比較的厚い板 ($(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}=2.0$) に対して p_u と水圧 q の関係を示したものである。縦軸は p_u を p_{c0} で除したもので，横軸は q の無次元表示 $qb^4/(Et^4)$ で表されている。図中太い実線が p_u の値を示し，細線は 2 で述べた座屈

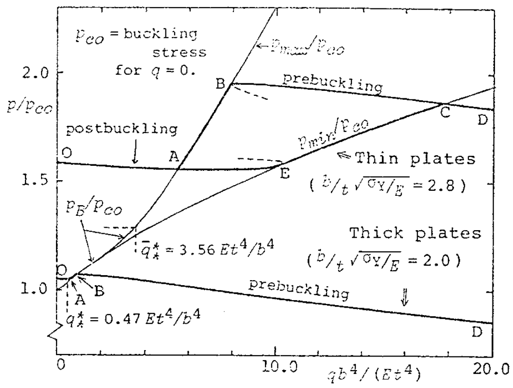

Fig. 5 $p_u/p_{c0}-qb^4/(Et^4)$ curves for plates ($\alpha=4$). —method a)—

荷重およびその目安となる荷重 p_B, $p_{\max}$, $p_{\min}$ を示す。なお，ここでも 2 の弾性大撓み挙動の追跡の場合同様安定度の低い平衡状態での圧縮強度は実際上無視できるとして除いてある。同図より，圧縮強度 p_u およびそのときの変形状態は水圧の大きさにより次のように変化するのが見られる。

まず，薄板についていえば，水圧が小さいとき（O，A間の水圧に対応する）は p_B または $p_{\max}$ で与えられる座屈荷重で板は座屈した後，曲線 OA で与えられる p_u に達して圧壊する。A，B間に対応する水圧を受けているときは外乱がないときは $p_{\max}$ で与えられる座屈荷重（同図曲線 AB）で座屈した瞬間圧壊する。すなわちこのときは $p_u=p_{\max}$ となる。B点で与えられる水圧より大きい水圧になると板は座屈する以前に曲線 BCD で与えられる p_u に達して圧壊する。すなわち外乱のないときの p_u 曲線は図の OABCD で与えられる。しかし，実際には外乱の程度によっては $p_{\min}$ 以上の荷重で飛移り座屈する可能性がある。$p=p_{\min}$ で座屈するとしたときの p_u 曲線は ABC に代り曲線 AEC となる（この場合は AE は座屈後の圧壊に対応し，EC は座屈即圧壊である）。従って曲線 OAECD で与えられる p_u は設計の見地から圧縮強度の下限と見ることができる。

厚板についていえば，薄板の場合のAとEおよびBとCにあたるものが接近し，AとE，BとCがそれぞれ1点に集中していると見なすことができ，水圧の小さい（O, A 間に対応する）間は板は p_B で座屈した後曲線 OA で与えられる p_u に達して圧壊する。A，B間に対応する水圧を受けているときは，p_B で与えられる座屈荷重（同図曲線 AB）で座屈した瞬間圧壊する。すなわち，このときは $p_u=p_B(\fallingdotseq p_{\min})$ となる。B点で与えられる水圧より大きい水圧になると板は座屈する以前に BD 曲線で与えられる p_u に達して圧壊する。

さらに厚板になると図は省略するが，いままでの曲線 OA, AB にあたるものはなくなり，板は常に座屈する以

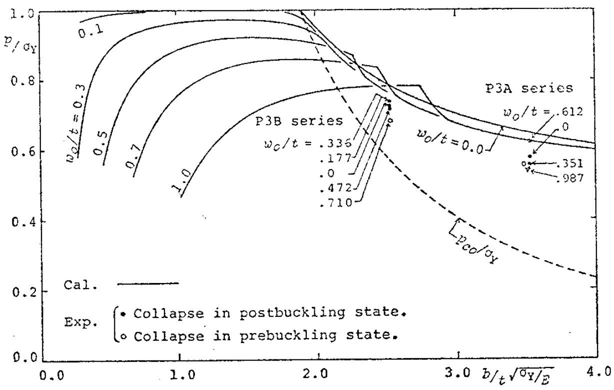

Fig. 6 $p_u/\sigma_Y-(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ curves for various values of w_0/t ($\alpha=3$). —method a)—

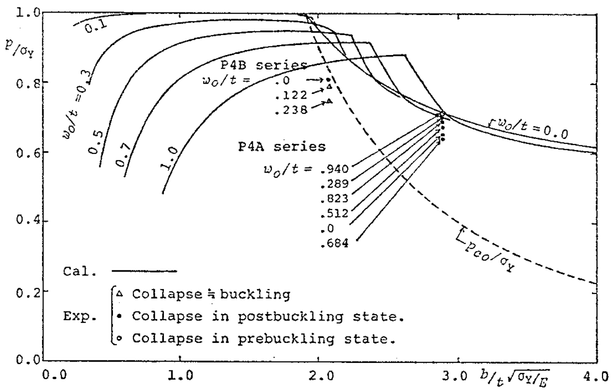

Fig. 7 $p_u/\sigma_Y-(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ curves for various values of w_0/t ($\alpha=4$). —method a)—

前にくぼみ1つの状態で圧壊する。

以上は $\alpha=4$ の場合であるが $\alpha=3$ の場合についてもほぼ類似の傾向を示す（図省略)。

次に，圧縮強度 p_u と $(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ の関係を水圧をパラメータにして示したのが Fig. 6 と Fig. 7 である。両図において，水圧を直接 q で表す代りに水圧のみによる板の中央撓み w_0 を板厚 t で除した w_0/t をパラメータとして示してある。また，縦軸は p_u を降伏応力 σ_Y で除したもので示しており，また同図での p_u は外乱を考慮して圧縮強度の下限値を取って示している。Fig. 6 は $\alpha=3$ に対するものであり，Fig. 7 は $\alpha=4$ に対するものである。

両図より，厚板では水圧が大きくなると p_u/σ_Y の値が小さくなっているが，薄板では水圧の増加によりやや小さくなっているもののその変化は小さいことが見られる。なお，中間の領域では水圧の増加により p_u/σ_Y が増加しているが，これは $p_u=p_{\min}$ となる範囲に対応するものである。

b) 塑性崩壊の条件式を満足したとき圧壊すると仮定した場合

2の（5）式と 3.1 の（9）式より圧縮強度 p_u を計算するとき，仮定する崩壊モードは2における弾性大撓み挙動を考慮して次の場合を検討した。

i）$\alpha=3$ のとき

座屈する前に圧壊する崩壊モードとしては，(9a) 式で $k=1$ としたくぼみ1つの屋根形を仮定し，最大撓み w_B としては，$y=b/2$ 上の $x=b/2$ から $x=a-b/2$ の部分の平均撓みを採用した。座屈した後圧壊する場合の崩壊モードとしては，(9b) 式で $k=3$ としたくぼみ3つの正四角錐形を仮定し，最大撓み w_B としては w_3 を採用した。

ii）$\alpha=4$ のとき

座屈する前に圧壊する崩壊モードとしては，(9a) 式で $k=1$ (w_B は $\alpha=3$ の場合と同じとり方をする）とした屋根形を仮定した場合と $k=3$ ($w_B=w_3$) としたくぼみ3つの屋根形に仮定した場合について計算した。座屈した後圧壊する崩壊モードとしては，(9b) 式で $k=4$ としたくぼみ4つの正四角錐形を仮定し，最大撓み w_B としては w_4 を採用した。

Fig. 8 は $\alpha=4$ の場合の，$(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}=2.8$ および 2.0 に対する p_u と q の関係を示したものである。座標軸は Fig. 5 と同様にした。ここでも安定度の低い平衡状態での圧縮強度は実際上無視できるとして，前項同様除いており，p_B, $p_{\max}$, $p_{\min}$ の値も細線により併記している。同図より圧縮強度およびそのときの崩壊モードが水圧の大きさにより次のように変化することが見られる。

薄板（$(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}=2.8$）の場合についていえば，水圧が小さい（0, A 間の水圧に対応する）間は，p_B または $p_{\max}$ で座屈した後曲線 OA で与えられる p_u に達して4つの正四角錐形に圧壊する。A，B間に対応する水圧を受けているときは外乱がないと座屈荷重 $p_{\max}$（曲線 AB）まで達し，座屈した瞬間圧壊する。すなわち $p_u=p_{\max}$ となる。B点での水圧より大きい水圧では外乱がないときは圧壊荷重が曲線 BCD で与えられる p_u に達するとくぼみ1つの屋根形のまま座屈する以前に圧

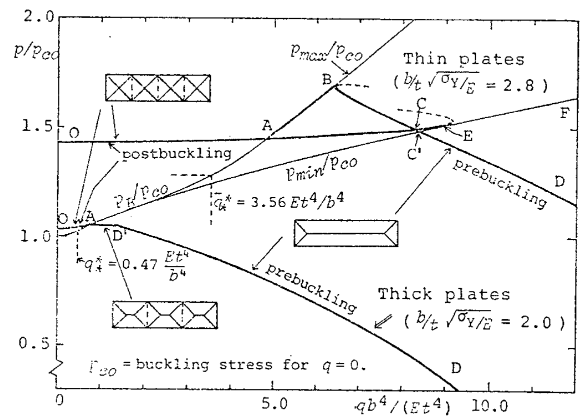

Fig. 8 $p_u/p_{c0}-qb^4/(Et^4)$ curves for plates ($\alpha=4$). —method b)—

壊する。この場合座屈後の p_u である曲線 CEF は意味をもたない。すなわち外乱のないときの p_u 曲線は OABCD で与えられる。なお，A，C 間の水圧では，外乱の程度によっては，p_{min} 以上の荷重で飛移り座屈した後，AC 曲線で与えられる p_u に達して圧壊するか，もしくは AC 曲線以上で飛移り座屈したときはその瞬間板は圧壊する。したがって，A, C 間の水圧では AC 曲線で与えられる p_u は設計の見地から圧縮強度の下限と考えられる。なお，C, C′ (C′ は図ではわかりにくいが曲線 BD と p_{min}/p_{c0} 曲線の交点である) 間の水圧では外乱により飛移り座屈した方が p_u が増加する範囲も考えられるが設計の見地から圧縮強度の下限を考えれば p_u 曲線は OACD で与えられる。

厚板 ($(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}=2.0$) についていえば，薄板の場合の A，B，C 点にあたるものが接近し，実際上A点1つとみなすことができ，水圧の小さい間は板は p_B で座屈した後曲線 OA で与えられる p_u に達して圧壊する。A点での水圧より大きい水圧下では，座屈する以前に圧壊するがその形式は w_3 が大きくくぼみ3つの形に崩壊する場合（同図 AD′ 曲線での p_u）とくぼみ1つの形に崩壊する場合（同図 D′D 曲線での p_u）がある。

さらに厚板になると図は省略するが，いままでの OA, AD′ 部分にあたるものはなくなり常にくぼみ1つのままで板は座屈する以前に圧壊する。

同図でもわかるように，座屈後圧壊する場合は水圧により p_u はあまり変化しないが，座屈以前に圧壊する場合は水圧の増加により p_u は急激に低下することが見られる。この傾向は前項の結果に比べ顕著である。

次に，圧縮強度 p_u と $(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ の関係を前述の w_0/t をパラメータとして示したのが Fig. 9 および 10 である。座標の表示は前項と同じであり，p_u の値は外乱を考慮して圧縮強度の下限値をとっている。Fig. 9 が $\alpha=3$ に対するもので，Fig. 10 が $\alpha=4$ に対するものである。両図より，$\alpha=3$, 4 どちらの場合も，厚板では水圧の影響により p_u/σ_Y の値が大きく減少しているに対して，薄板ではあまり変化がないのが見られる。

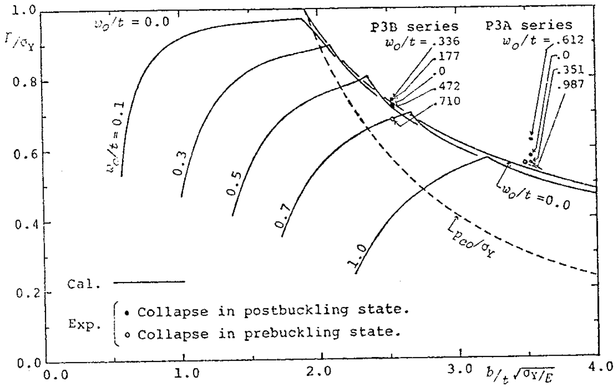

Fig. 9　$p_u/\sigma_Y-(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ curves for various values of w_0/t ($\alpha=3$). —method b)—

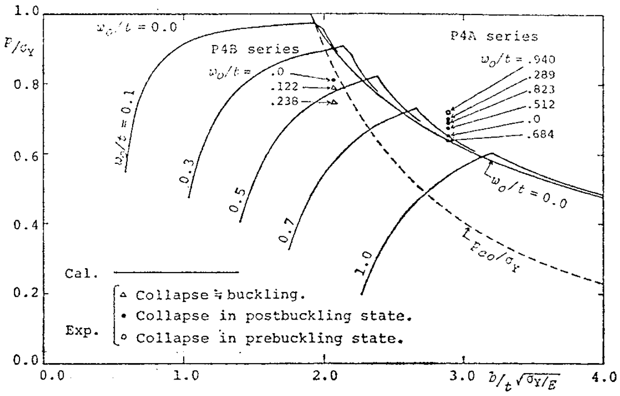

Fig. 10　$p_u/\sigma_Y-(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ curves for various values of w_0/t ($\alpha=4$). —method b)—

なお，Fig. 6 と 9，Fig. 7 と 10 より，a)，b) の方法による p_u の計算値を比較すれば，座屈後圧壊が起こる $(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ の大きい範囲では，いずれの場合も水圧による p_u/σ_Y の変動は小さく，a) の方法による p_u/σ_Y の計算値は b) の方法による p_u/σ_Y の計算値よりやや高い。座屈前に圧壊が起こる $(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ の小さい範囲では，前述の範囲に比べ水圧による変動は大きいが，この場合も a) の方法による p_u/σ_Y の計算値は b) の方法による計算値より高い。この傾向は水圧が大きいとき顕著になる。

4　水圧と圧縮を受ける細長平板の実験

4.1　実験方法，装置および試験片

本章では，水圧と圧縮を受ける細長平板の変形挙動，圧縮強度に関する理論計算の妥当性を検討するため行った実験について述べる。

用いた実験装置は，Fig. 11 に示されるような $\alpha=3$ または4，4辺支持の長方形板 $a\times b\times t$ に一様圧力 q と1方向圧縮荷重 p が加えられるようなものである。試験片の周辺は同図に示されるように左右辺はナイフエッジにより，上下縁は試験片の縁を板ではさみつけることにより板面に垂直な方向に支持される。同図 (b) に示すように試験片の片側に槽があり，ビニール袋を介して試験片に空気圧が加えられる。空気圧はこの槽内ビニール袋と圧力調節弁を経由してポンプをパイプで連結して加える。試験片の上下の縁は剛な装置によって平行を保ちながら試験機で圧縮される。このとき，板は変形するが変形後板の周辺は直線で残るよう同図 (c) に示されるように支持用ナイフエッジ外側に幅 20mm，厚さ 3.2mm の帯鋼を板の両面にボルト締めして取り付けた。

実験に用いた試験片の材料は市販の鋼材 SS 41 で公称板厚 3mm と 4.5mm のものを用いた。試験片の長

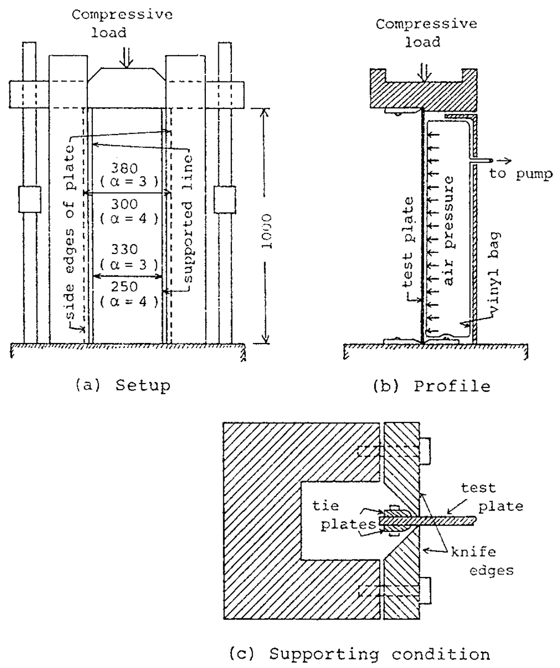

Fig. 11 Experimental apparatus.

さ，および幅は，$\alpha=3$ の場合ではそれぞれ 1000mm，380mm，$\alpha=4$ の場合では 1000mm，300mm であり，帯鋼を取り付けるためナイフエッジ支持間隔 $b=330$mm ($\alpha=3$)，$b=250$mm ($\alpha=4$) より 25mm ずつ左右に延ばしてある。また上下縁は 3mm を板ではさんであるためその支持間隔は $a=994$mm となる。試験片の機械的性質を Table 1 中第 (3) 第 (4) 欄に示す。

4.2 実験結果

$\alpha=3$ および $\alpha=4$ の辺長比の場合についてそれぞれ，上記各板厚の試験片に対して，系統的に水圧を変えた圧

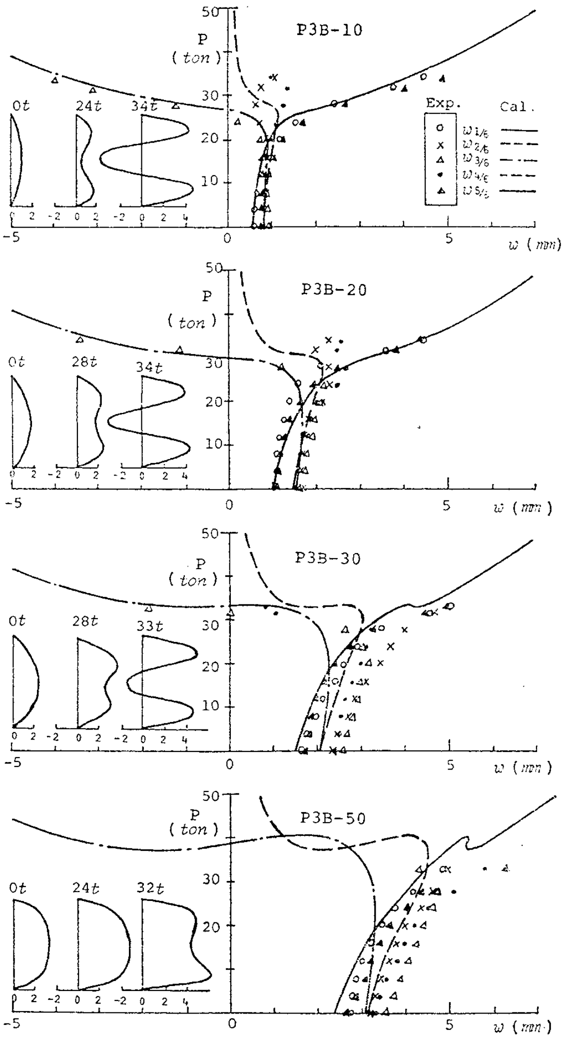

Fig. 12 Relation between compressive load and deflection (P 3 B series).

Table 1 Test conditions and results.

	(1) Specimen	(2) Plate thicknes t mm	(3) Young's modulus E kg/mm^2	(4) Yield stress σ_Y kg/mm^2	(5) $\frac{qb^4}{Et^4}$	(6) $\frac{w_0}{t}$	(7) Max. load ton	(8) Number of waves	(9) $\bar{J}=J/(bt^3)$	(10) Reduced $(p_u/\sigma_Y)_s$
α=3	P3A-00				0	0	17.5	3		0.574
	P3A-05		$\times 10^4$		3.08	0.351	17.0	3	$\times 10^{-2}$	0.555
	P3A-10	3.09	2.10	25.4	6.16	0.612	18.8	3	6.14	0.622
	P3A-20				12.4	0.987	17.0	1		0.555
	P3B-00				0	0	34.4	3		0.726
	P3B-10		$\times 10^4$		1.43	0.177	34.9	3	$\times 10^{-2}$	0.738
	P3B-20	4.42	2.19	27.4	2.85	0.336	35.0	3	3.57	0.740
	P3B-30				4.28	0.472	34.0	3		0.717
	P3B-50				7.24	0.710	32.6	1		0.683
α=4	P4A-00				0	0	18.5	4		0.653
	P4A-10				2.26	0.289	19.6	4		0.701
	P4A-20		$\times 10^4$		4.52	0.512	19.0	4	$\times 10^{-2}$	0.675
	P4A-30	3.03	2.05	29.1	6.78	0.684	18.2	4	8.43	0.640
	P4A-40				9.04	0.823	18.4	4		0.691
	P4A-50				11.3	0.940	19.9	1		0.715
	P4B-00		$\times 10^4$		0	0	37.7	4	$\times 10^{-2}$	0.810
	P4B-20	4.54	2.01	33.1	0.91	0.122	36.8	1→4	4.55	0.787
	P4B-40				1.83	0.238	35.2	1→4		0.746

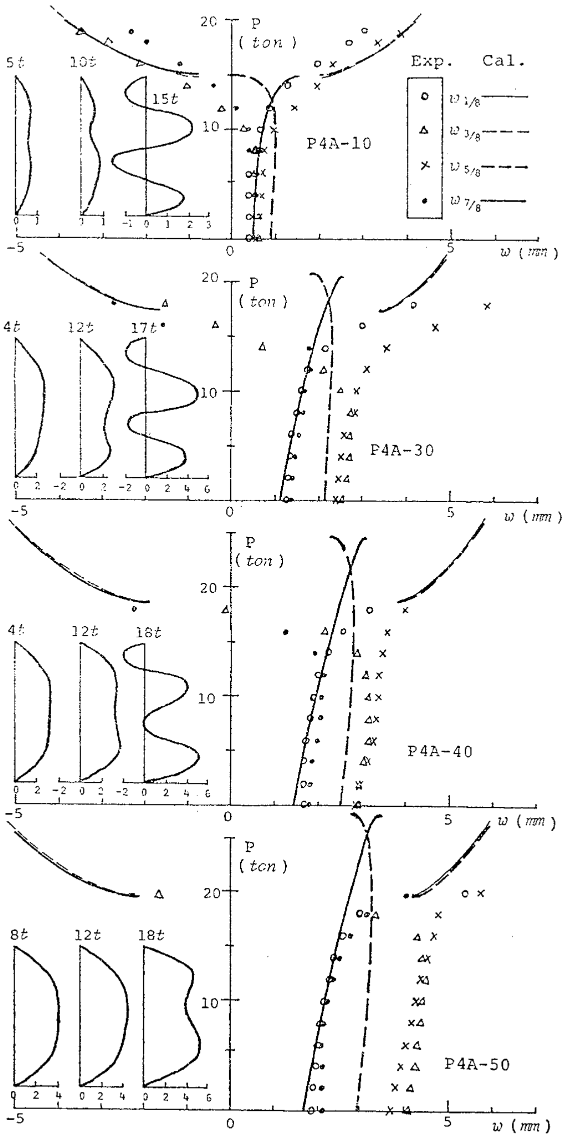

Fig. 13 Relation between compressive load and deflection (P 4 A series).

縮実験を行い，その挙動を追跡した。その試験条件および結果を Table 1 および Fig. 12, 13 に示す。

Table 1 の第 (1) 欄は試験片の名称であり，P 3 A シリーズは $\alpha=3$ で薄板の試験片に，P 3 B は同厚板に，P 4 A シリーズは $\alpha=4$ で薄板の試験片に，P 4 B シリーズは同厚板に対するものである。末尾の2けたの数字は加える空気圧を dm 単位の水柱で表示したものである。第 (2) 欄に各シリーズごとの実測平均板厚を示している。第 (5) 欄は空気圧 q を無次元表示した $qb^4/(Et^4)$ の値を示した。第 (6) 欄には3で述べた水圧のみによる板の中央撓み w_0/t の計算値を示してある。第 (7) 欄は実験で得られた板の最高荷重である。第 (8) 欄は圧壊時の板のくぼみの数を示す。なお同欄 1→4 の記号は圧壊前後でくぼみ1つから4つの形状へ急変したことを示す。

Fig. 12, 13 は試験片の長辺方向の中央線上の撓み w mm と圧縮荷重 p ton の関係の実験結果の一部をプロットしたものである。また図中左下に二三の荷重段階における長辺方向の中央線上の撓み波形の実測値を示す。Fig. 12 は P 3 B シリーズに対するもので，Fig. 13 は P 4 A シリーズに対するものである。

4.3 理論計算結果に対する検討

本実験では前述のように左右辺に変位の直線性を保たせる目的で帯鋼を取付けているが，このため板の縁は撓みによる回転変形をある程度拘束されることになる。4辺支持の場合についての計算結果を用いて近似的にこの変形挙動，圧縮強度を求めるには，4辺支持の場合の p，σ_Y をそれぞれ下のように読み換えればよい（付録C参照）。

$$\left.\begin{array}{l} p\to p-\{6(1-\nu)\bar{J}\}p_{c0} \\ \sigma_Y\to\sigma_Y-\{6(1-\nu)\bar{J}\}p_{c0} \end{array}\right\} \qquad (10)$$

ここに，$\bar{J}=J/(bt^3)$ （Table 1 第 (9) 欄参照）

J：縁の部分の部材のねじり剛性係数

Fig. 12, 13 の図中曲線は上の換算により実験値に対応する圧縮荷重-撓み関係を求め，その結果を示したものである。同図より，塑性変形が支配的となる場合（P 3 B-50, P 4 A-50 の圧縮強度付近）を除き，飛移り現象も含めて，実験値，計算値は傾向的によい一致を示しているのがわかる。以上は $\alpha=3$, P 3 B シリーズおよび $\alpha=4$, P 4 A シリーズに対するものであるが他の実験結果についても同様なことがいえる。

次に，圧縮強度について計算値，実験値を比較するため，実験より得られた p_u/σ_Y の値を，Fig. 6, 7, 9 および 10 に示す4辺支持の板の計算値に対応するものに換算し，その値 $(p_u/\sigma_Y)_s$ を Table 1, 第 (10) 欄に示すとともに同図中にプロットした。これらの図より，実験による $(p_u/\sigma_Y)_s$ の値はばらつきがあるものの，比較的よく計算値と一致していることが見られる。なお，実験値はおおむね a) の方法による計算値より低目に，b) の方法による計算値よりは P 4 B シリーズを除き高目になっている。なお，P 4 B シリーズの実験では，局部的塑性変形により撓みが急増したとき板周辺部が内側に入り込む傾向が出たため，実験値が全体に低目にでているものと考えられる。次に，圧壊時の波形についての実験，計算の比較についていえば，座屈後圧壊にいたった実験は計算によりそのことが予測されていることが見られる。また Table 1, P 4 B-20 および P 4 B-40 の第 (8) 欄に示す 1→4 はくぼみ1つからくぼみ4つに急変して圧壊した例で，これは座屈即圧壊の場合と考えられるが，値自身は低目ながら，この場合も計算からこの現象を説明することができる。座屈前に圧壊した P 3 A-20, P 3 B-50, P 4 A-50 については，b) の方法による計算は比較的よくこの傾向を示しており，また a) の方法に

よる計算でも，P 3 A-20 を除き，これらの $(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ は板が座屈前圧壊する可能性のある場合のもの（Fig. 5 で言えば，与えられた水圧に対して曲線 BC が存在する $(b/t)\times\sqrt{\sigma_Y/E}$ ということもできる）であることを考慮すればこの現象を説明することができる。圧壊波形に関する P 3 A-20 の実験と a) の方法による計算との対応はあまりよくない。

なお，本実験では試験機および試験装置の能力の関係により，比較的薄い板についての検討にとどまり，十分厚い板については検討できなかった。

5 結　　言

以上，船底外板の圧縮強度に関する基礎的研究として，水圧と圧縮を受ける 4 辺支持の細長平板（辺長比 $\alpha=3$ および 4 付近）の圧縮に対する強度を，圧壊にいたるまでは板は完全に弾性的に挙動するものとし，次の 2 つの方法により近似的に求めた。

a) 板の圧縮方向の縁応力が降伏応力に達したとき圧壊すると仮定する方法。

b) 板の崩壊モードを仮定し，塑性大撓みを考慮した塑性崩壊の条件式を満たすとき圧壊すると仮定する方法。これにより，圧縮強度に対する水圧の影響を明らかにするとともに，実験を行い理論に対する検討を行った。得られた結果を要約すると次の通りである。

1) 座屈後圧壊が起こる $(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ の範囲（比較的薄い板に対応する）では水圧による圧縮強度の変動は小さいが，座屈前に圧壊が起こる $(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ の範囲（比較的厚い板に対応する）では水圧による圧縮強度の低下は大きい。

2) a) の方法による圧縮強度の計算値は b) の方法による計算値より概して高目になる。両者の違いは $(b/t)\times\sqrt{\sigma_Y/E}$ が小さく，水圧の大きいところで著しい。

3) $(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ が大きい比較的薄い板で行った実験では，両計算値によりおおむね実験値の傾向を説明できた。

最後に，本論文の実験実施にあたり，当学船舶工学科助手 北浦堅一氏並びに当時学部生，田口義治，渡辺茂，伊藤聡，浜田公司の各氏の協力を得たことを記して謝意を表する。なお，本研究の数値計算にあたっては大阪府立大学計算センター ACOS 77，TOSBAC 600 を使用した。また，本研究の一部は文部省科学研究費の補助を受けて行われたことを付記する。

参 考 文 献

1) 大坪英臣：平板の弾塑性大たわみ問題の一解法—特に平板の圧縮最終強度について—，日本造船学会論文集，第 130 号，昭和 46 年 12 月，173～182.
2) 上田，安川，矢尾，池上，大南：圧縮を受ける正方形板の最終強度に関する研究（第 1 報），日本造船学会論文集，第 137 号，昭和 50 年 6 月，210～221.
3) 上田，矢尾，菊本：補強材の最小剛比（第 1 報），日本造船学会論文集，第 140 号，昭和 51 年 12 月，221～216.
4) 藤田，野本，仁保：防撓板の圧縮強度について，日本造船学会論文集，第 141 号，昭和 52 年 6 月，205～213.
5) 藤田，野本，仁保：組合せ荷重を受ける平板の最終強度（第 1 報），日本造船学会論文集，第 145 号，昭和 54 年 6 月，205～213.
6) 大坪，山本，李：幅広平板の圧壊強度の研究，日本造船学会論文集，第 142 号，昭和 52 年 12 月，279～289.
7) 大坪，山本，李：防撓板の圧壊強度の研究（その 1），日本造船学会論文集，第 143 号，昭和 53 年 6 月，316～325.
8) 大坪，山本，李：同上（その 2），日本造船学会論文集，第 144 号，昭和 53 年 12 月，429～436.
9) 岡田，大嶋，福本：船底外板の座屈強度に関する基礎的研究（第 2 報），関西造船協会誌，第 173 号，昭和 54 年 6 月，109～115.

付録A　4 辺支持，辺長比 α の長方形板に対する $\partial\phi/\partial w_n=0$ の具体的表示

$$\begin{aligned}
&\frac{12(1-\nu^2)}{\alpha^2}\Bigg[2n^2\bar{B}_0\left(\frac{w_n}{t}\right)\\
&\quad+\sum_{n-r\geq 1}\left\{-\frac{r^2}{2}\bar{A}_r+\left(n-\frac{r}{2}\right)^2\bar{B}_r\right\}\left(\frac{w_{n-r}}{t}\right)\\
&\quad-\sum_{N\geq r-n\geq 1}\left\{-\frac{r^2}{2}\bar{A}_r+\left(n-\frac{r}{2}\right)^2\bar{B}_r\right\}\left(\frac{w_{r-n}}{t}\right)\\
&\quad+\sum_{N\geq r+n}\left\{-\frac{r^2}{2}\bar{A}_r+\left(n+\frac{r}{2}\right)^2\bar{B}_r\right\}\left(\frac{w_{r+n}}{t}\right)\Bigg]\\
&\quad+\left\{\left(1+\frac{n^2}{\alpha^2}\right)^2-\left(\frac{p}{p_{c0}}\right)\left(\frac{n}{k}+\frac{kn}{\alpha^2}\right)^2\right\}\frac{w_n}{t}\\
&=\frac{192(1-\nu^2)}{\pi^6}\cdot\frac{1-\cos n\pi}{2n}\cdot\frac{qb^4}{Et^4}
\end{aligned}\tag{A 1}$$

ここに，

$$\bar{A}_0=0,\quad \bar{B}_0=\frac{1}{32\alpha^2}\sum_{n=1}^{N}n^2\left(\frac{w_n}{t}\right)^2$$

$$\bar{A}_n=\frac{\alpha^2}{4n^4}\left[\sum_{|k-l|=n}\sum(kl-k^2)\frac{w_kw_l}{t^2}+\sum_{k+l=n}\sum(kl+k^2)\frac{w_kw_l}{t^2}\right]$$

$$\bar{B}_n=\frac{\alpha^2}{4(n^2+4\alpha^2)^2}\left[\sum_{|k-l|=n}\sum(kl+k^2)\frac{w_kw_l}{t^2}+\sum_{k+l=n}\sum(kl-k^2)\frac{w_kw_l}{t^2}\right]$$

$p_{c0}=\pi^2D\{\alpha/k+k/\alpha\}^2/(tb^2)$；水圧のないときの座屈荷重，$k$＝正整数；座屈半波数。

付録B　面内力を考慮した塑性曲げモーメント M_p

完全剛塑性体より成る板が圧縮力 p を受け，圧縮力の方向と θ の角度をなす塑性関節線を軸として曲がるとき

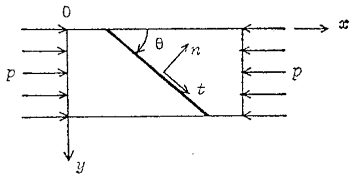

Fig. 14 Plastic hinge line of plate.

(Fig. 14) の塑性曲げモーメント M_p は面内力の存在により $M_{p0}=\sigma_Y t^2/4$ と異なる。この M_p は次のようにして求められる (文献 4) および文献 5) 参照)。

いま，塑性関節線に垂直な方向に n 軸を，平行な方向に t 軸をとり，この座標軸に関する応力を $\sigma_n, \sigma_t, \tau_{nt}$ とする．塑性曲げモーメント M_p は σ_n により発生するが，この応力の板厚方向の分布は圧縮側 σ_n^C，引張側 σ_n^T であり，中性軸は中央面より z_0 の位置にあるとする。そして，σ_t，τ_{nt} は板厚方向に一定であり，これらの応力による断面モーメントはないものとする．このように仮定した σ_t，τ_{nt} および σ_n の平均応力 $\bar{\sigma}_n$ は面内力のつりあいより下式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned} N&=\bar{\sigma}_n t=-pt\sin^2\theta \\ N'&=\sigma_t t=-pt\cos^2\theta \\ T&=\tau_{nt}t=-pt\sin\theta\cos\theta \end{aligned}\right\} \tag{A2}$$

次に，σ_n^C，σ_n^T は Mises の降伏条件式

$$\sigma_n^2-\sigma_n\sigma_t+\sigma_t^2+3\tau_{nt}^2=\sigma_Y^2 \tag{A3}$$

より σ_n の根として p で表わされる．また z_0 は σ_n の板厚方向の平均が $\bar{\sigma}_n$ であることにより，やはり p で表わされる。

以上により σ_n による塑性曲げモーメント M_p が次のように計算できる．

$$M_p/M_{p0}=2(1-\mu^2)/\sqrt{4(1-\mu^2)+\mu^2(2-3\cos^2\theta)^2}=m_\theta \tag{A4}$$

ここに，$\mu=p/\sigma_Y$ である．$\theta=45°$，$90°$ および $0°$ のときの m_θ の値 m_{45}，m_{90} および m_0 はそれぞれ下式で与えられる．

$$\left.\begin{aligned} m_{45}&=4(1-\mu^2)/\sqrt{16-15\mu^2} \\ m_{90}&=1-\mu^2 \\ m_0&=2(1-\mu^2)/\sqrt{4-3\mu^2} \end{aligned}\right\} \tag{A5}$$

付録C 支持縁にねじり剛性を有する部材をもつ長方形板の挙動の近似解析

4辺支持された長方形板の長辺に沿ってねじり剛性を有する部材をもつ場合の挙動を2と同様の手順で求める．すなわち，板の撓み w を（3）式で仮定し*，未定定数を（5）式で決定する．ただし，このときの系全体のポテンシャルエネルギー ϕ は式中の U として U_b，U_m のほかに長辺に沿う縁材のねじれによるひずみエネルギー U_t を加えたものを用いる．これより付録**A**の（A1）式に相当するものとして，同式中の p/p_{c0} の代りに $\{p/p_{c0}-6(1-\nu^2)\bar{J}\}$ とおいた式が得られる。したがって，周辺部材のある板の挙動は改めて基礎式を解く必要がなく，4辺支持の結果より直ちに求めることができる。すなわち，縁材のある場合の $p/p_{c0}-w/t$ 曲線は4辺支持の場合の $p/p_{c0}-w/t$ 曲線を $6(1-\nu^2)\bar{J}$ だけ上方へ平行移動すればよいことになる。Fig. 12，13 はこのようにして作成されたものである。次に 3 a) の方法で圧縮強度の修正について考える。このときは（7）式に相当するものとして下式を得る。

$$\frac{Et^2}{b^2}\left[\frac{\pi^2}{3(1-\nu^2)}\left\{\frac{p}{p_{c0}}-6(1-\nu)\bar{J}\right\}+4\pi^2\sum_{n=0}^{2N}\bar{B}_n\cos\frac{n\pi}{a}x_0\right]=\sigma_Y-6(1-\nu)\bar{J}p_{c0} \tag{7'}$$

これより縁材のある場合の p_u を4辺支持の $p_u/\sigma_Y-(b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$ 曲線を用いて求める場合，4辺支持の場合の p_u，σ_Y をそれぞれ，$p-6(1-\nu)\bar{J}p_{c0}$，$\sigma_Y-6(1-\nu)\bar{J}\times p_{c0}$ と読み換えればよいことになる．Table 1，第 (10) 欄における $(p_u/\sigma_Y)_s$ はこの縦軸の値を示したものである。

なお，b) の方法による強度は上述のような修正で求めることができず，GJ を考慮した塑性崩壊の条件式と弾性変形挙動を用いて計算しなければならない。しかしながら，本論文ではこの計算を行わず，上の $(p_u/\sigma_Y)_s$ と b) の方法による圧縮強度とを比較することとした。

*（3）式は長辺における力学的周辺条件

$$\pm GJ\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}\right)_{y=0,b}=D\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\nu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)_{y=0,b}$$

を満足していないが，近似的にこの形を用いることにする。