

初期不整を有する平板構造の最終強度 (その1)

福地信義*・河角省治*
田上良継**Ultimate Strength of Plate Structures with Initial
Imperfections Subjected to Compression (part 1.)

by

Nobuyoshi FUKUCHI, Shoji KAWAKADO

(Department of Structural Engineering)

and Yoshitsugu TANOUE

(Mitsubishi Heavy Industry Co. Ltd.)

Great parts of ship construction and steel girder bridge are consisted of plate structures, such as stiffened plates and plates with lightning holes. In application of welding and gas cutting to fabricate them, the shrinkage of heated portion may usually produce distortion and residual stresses in each element of plate structure. Such initial imperfections may be decisive factors for structural strength and ultimate strength of plate structure subjected to compression.

The purpose of this study is a investigation of the relation between ultimate strength and initial imperfections of stiffened plates and plates with a hole subjected to in-plane compression which are consisted of comparatively thick plate as used for ship construction.

In part 1., the ways of experimental and numerical analyses of plate structure are shown. The deformation and the stress distribution in each structural element are calculated by the finite element method based on incremental theory. And the propriety of analytical method is examined by comparing with measured values on a few experimental model.

1. はじめに

船舶や鋼製ガータ橋などの主要構造には防撓平板や軽め穴などの開口をもつ平板が多く用いられている。これらの構造では工作時の溶接やガス切断により起る残留変形や残留応力などの初期不整は避けがたく、初期不整の大きさや種類の組合せによっては、その最終強度は大きく異なる。

近年の構造物の大型化と構造解析技術の発達に伴い構造物の余剰強度は少くなる傾向にある。このため、

初期不整による構造物の最終強度の低下を正確に把握する必要が生じ、平板構造についてもいくつかの研究がなされている^{1) 2) 3)}。

本研究では船舶の主要構造に見受けられる程度の構造寸法比をもつ防撓平板および有孔板について、面内圧縮荷重により崩壊に到るまでの弾塑性解析を実験および数値計算により行った。これにより初期たわみや残留応力がこれらの平板構造の構造強度や最終強度にどのように影響するかを明らかにしようとするもので

昭和53年5月13日受理

* 構造工学科

** 三菱重工業㈱長崎造船所

ある。今回は実験方法および数値解析の方法について述べ、両方法による結果の比較により解析法の妥当性を検討した。

2. 実験の概要

2-1 試験体

試験体の形状を Fig. 1 に示す。(a), (b) は防撓平板モデルであり, (c), (d) は有孔板モデルである。各試験体とも外形寸法 500×500mm, 板厚 4.5mm とし, Table 1 に示す材料定数をもつ鋼材より製作した。

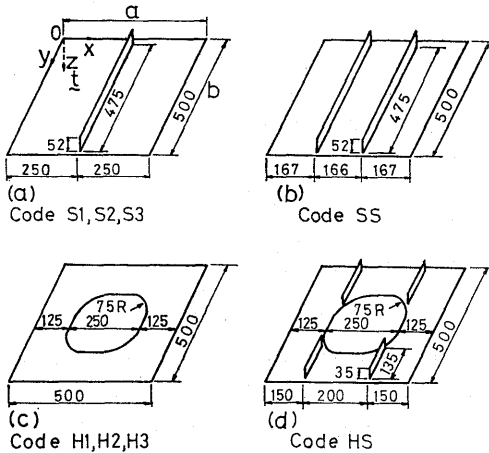


Fig. 1 Details of specimens

Table 1 Mechanical properties of material

Material No.	1	2
E (Kg/mm ²)	2.07×10 ⁴	2.02×10 ⁴
ν	0.31	0.27
σ _Y (Kg/mm ²)	34.4	29.6
strain-hardening rate	100.0	100.0
σ _B (Kg/mm ²)	42.2	40.2

試験体の不整量としては製作時の溶接およびガス切断により生じた残留変形をそのまま用い, 残留応力は約630℃, 1時間の応力除去を行い初期不整の対象として除いた。試験体の数値解析を行う際の初期たわみのデータとしては, 25mm 間隔の格子点における残留たわみを計測し最小自乗法によりたわみ係数 w_{ij} を決め, (1)式のように近似して用いた。

$$w_0 = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 w_{ij} \sin \frac{i\pi x}{a} \cdot \sin \frac{j\pi y}{b} \quad (1)$$

ここに a, b は試験体の外形寸法 (Fig. 1 (a)参照)

2-2 実験装置

試験体に対し周辺単純支持の条件において面内圧縮荷重を負荷するために, Fig. 2 に示すような実験装置を製作した。荷重辺は Fig. 3 に示すように回転自由の条件をできるだけ満足するよう V 字型溝とし, 非

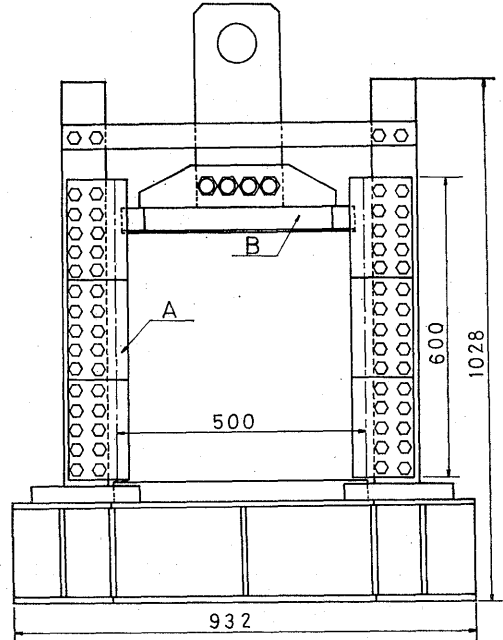


Fig. 2 Loading frame

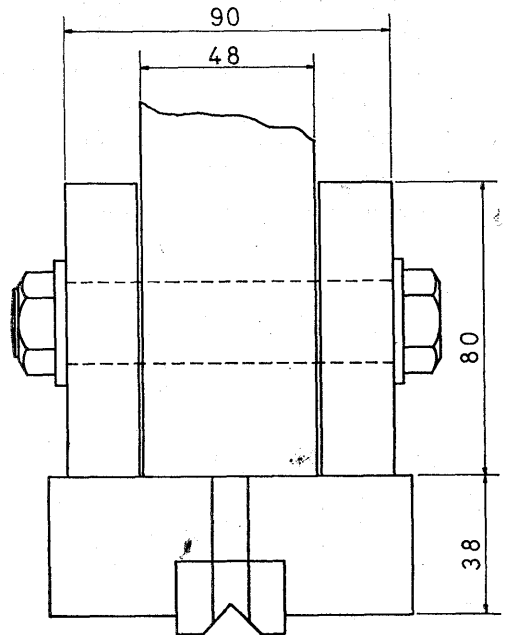


Fig. 3 Detail of loading edge (B)

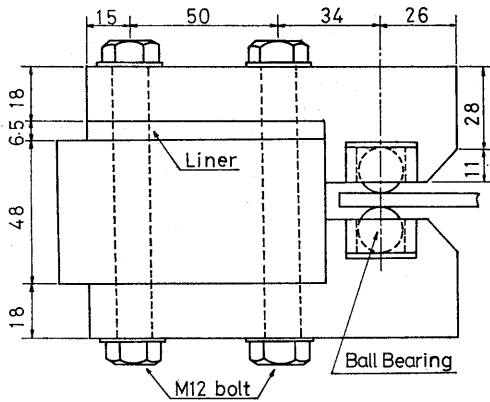


Fig. 4 Detail of side fixture (A)

荷重辺は Fig. 4 に示すようにボールベアリングを使用して面内変位の拘束および回転拘束が生じないように支持とした。

2-3 実験方法

面内圧縮荷重の負荷には 200 トン万能試験機を使用し、試験体の荷重辺における面内変位を一定にするために、試験機のテーブル中心軸と実験装置の中心が一致するように設置した。つぎに実験装置の支持金具 (Fig. 4) に試験体を取付け、ボールベアリングと試験体とが密着するようにライナーの板厚を調整した。試験機のクロスヘッドに上部荷重治具 (Fig. 3) を取付け、クロスヘッドを下げることで試験体に負荷した。

実験の際、荷重は試験機の計力機で読みとり、試験体のひずみはストレインゲージおよび面外たわみはダイヤルゲージにより計測を行った。また代表点の面外たわみは変位変換器を用いて X-Y レコーダにより記録した。

3. 解析法

平板構造の崩壊に到るまでのたわみ挙動については増分理論¹⁾に基づく有限要素法による弾塑性大たわみ解析を行って求めた。有限要素として、平板は弾塑性大たわみを考慮した三角形要素 (非適合) を、および防撓材については縦曲げに対してのみ大たわみを考慮した梁要素を用いた。

3-1 基礎方程式

Fig 1 (a) に示すように構造全体の座標をとり、構造に生ずる変位および応力を Fig. 5 のように表わす。

(1) 変位—ひずみ関係式

変位とひずみの関係は高次の項として曲げによる項のみ考慮すると次のように表わされる。

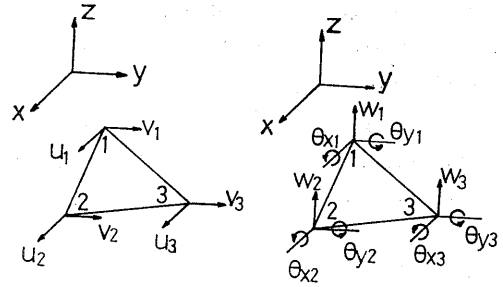


Fig. 5 Local coordinate of plate and displacements

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \\ 2 \frac{\partial w}{\partial x} \cdot \frac{\partial w}{\partial y} \end{pmatrix} - z \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{pmatrix} \quad (2)$$

したがって、ひずみ増分 $\{\dot{\epsilon}\}$ は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_x \\ \dot{\epsilon}_y \\ \dot{\gamma}_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{u}}{\partial x} \\ \frac{\partial \dot{v}}{\partial y} \\ \frac{\partial \dot{u}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{v}}{\partial x} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \dot{w}}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial \dot{w}}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial \dot{w}}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \dot{w}}{\partial y} \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial \dot{w}}{\partial x}\right)^2 \\ \left(\frac{\partial \dot{w}}{\partial y}\right)^2 \\ 2 \frac{\partial \dot{w}}{\partial x} \frac{\partial \dot{w}}{\partial y} \end{pmatrix} - z \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 \dot{w}}{\partial x \partial y} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここに \dot{u} , \dot{v} , \dot{w} は各軸方向の変位増分を表わす。

(2) ひずみ増分—応力増分関係式

ひずみ増分と応力増分の間には弾性域では平面応力場のフックの法則より次の関係がある。

$$\begin{pmatrix} \dot{\sigma}_x \\ \dot{\sigma}_y \\ \dot{\tau}_{xy} \end{pmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_x \\ \dot{\epsilon}_y \\ \dot{\gamma}_{xy} \end{pmatrix} \quad (4)$$

なお以降、増分量に関しては $\dot{\cdot}$ を付して表わす。

材料の降伏の判定として Mises の降伏条件を適用する。降伏関数を f とすれば、塑性状態では

$$f = \bar{\sigma}^2 - \sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 - \sigma_T^2 = 0 \quad (5)$$

ここに σ_T は引張試験より求めた材料の降伏応力。一定温度で静的な外力を受ける等方性材料では、塑性状態での応力増分とひずみ増分の関係⁴⁾ は

$$\begin{pmatrix} \dot{\sigma}_x \\ \dot{\sigma}_y \\ \dot{\tau}_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_x \\ \dot{\epsilon}_y \\ \dot{\gamma}_{xy} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$-\frac{1}{S} \begin{pmatrix} S_1^2 & & & sym. \\ S_1 S_2 & S_2^2 & & \\ S_1 S_6 & S_2 S_6 & S_6^2 & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_x \\ \dot{\epsilon}_y \\ \dot{\gamma}_{xy} \end{pmatrix}$$

$$\text{ここに } S = \frac{4}{9} \bar{\sigma}^2 H' + S_1 \sigma_x' + S_2 \sigma_y' + 2S_6 \tau_{xy}'$$

$$S_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\sigma_x' + \nu \sigma_y'), \quad S_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\sigma_y' + \nu \sigma_x'),$$

$$S_6 = \frac{E}{1+\nu} \tau_{xy}'$$

ただし H' : 加工硬化係数, $\bar{\sigma}$: 相当応力
 σ_x' , σ_y' , τ_{xy}' : 偏差応力

3-2 変位関数

変位関数は三角形要素の面積座標 (L_1, L_2, L_3) に関する多項式として表わす。

(1) 面内変位

$$u = L_1 a_1 + L_2 a_2 + L_3 a_3, \quad v = L_1 b_1 + L_2 b_2 + L_3 b_3 \quad (7)$$

(2) 面外変位

$$\begin{aligned} w = & L_1 c_1 + L_2 c_2 + L_3 c_3 \\ & + (L_1^2 L_2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3) c_4 \\ & + (L_2^2 L_3 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3) c_5 \\ & + (L_3^2 L_1 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3) c_6 \\ & + (L_1 L_2^2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3) c_7 \\ & + (L_2 L_3^2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3) c_8 \\ & + (L_3 L_1^2 + \frac{1}{2} L_1 L_2 L_3) c_9 \end{aligned} \quad (8)$$

未定係数 a_i, b_i, c_i は各節点での変位の大きさにより決まる。したがって面内および面外の節点変位を $\{u\}, \{w\}$ とすると

$$\begin{pmatrix} u \\ w \end{pmatrix} = [a_p] \{u\}, \quad w = [a_b] \{w\} \quad (9)$$

ここに $[a_p] = [u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3]$

$$[a_b] = [w_1 \left(\frac{\partial w}{\partial L_1}\right)_1 \left(\frac{\partial w}{\partial L_2}\right)_1 \ w_2 \left(\frac{\partial w}{\partial L_1}\right)_2 \left(\frac{\partial w}{\partial L_2}\right)_2 \ w_3 \left(\frac{\partial w}{\partial L_1}\right)_3 \left(\frac{\partial w}{\partial L_2}\right)_3]$$

3-3 平衡方程式

(9)式を適当階微分することにより

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{pmatrix} = [p] \{u\}, \quad \begin{pmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial y} \end{pmatrix} = [b_1] \{w\}$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{pmatrix} = [b_2] \{w\}, \quad [c_0] = \begin{pmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial x} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix} [a_b] \{w\} \quad (10)$$

ひずみ, ひずみ増分およびその変分は次のように表わされる。

$$\{\epsilon\} = [p] \{u\} + \frac{1}{2} [c_0] [b_1] \{w\} - z [b_2] \{w\} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{\{\epsilon\}} = & [p] \{\dot{u}\} + [c_0] [b_1] \{\dot{w}\} \\ & + \frac{1}{2} [\dot{c}_0] [b_1] \{\dot{w}\} - z [b_2] \{\dot{w}\} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \{\delta \epsilon\} = & [p] \{\delta \dot{u}\} + [c_0 + \dot{c}_0] [b_1] \{\delta \dot{w}\} \\ & - z [b_2] \{\delta \dot{w}\} \end{aligned} \quad (13)$$

したがって, 一要素の内力による仮想仕事は

$$\delta w_i = \int_V \{\delta \epsilon\}^T \{\sigma + \dot{\sigma}\} dV \quad (14)$$

となり, 外力による仮想仕事は次式により表わされる。

$$\delta w_e = \int_S \{\delta \dot{\delta}\}^T \{\mathbf{F} + \dot{\mathbf{F}}\} dS \quad (15)$$

ただし $\{\delta\} = \{u, w\}^T$, ここに V, S は要素の全体的積および全面積を意味する, $\{\mathbf{F}\}$ は外力ベクトル

仮想仕事の原理により次の関係が成り立つ。

$$\delta w_i = \delta w_e \quad (16)$$

(16)式に(4)から(13)までの関係を代入すると次のような平衡方程式が導かれる。

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{K}_{pp} & \mathbf{K}_{pb} \\ \mathbf{K}_{bp} & \mathbf{K}_{bb} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{w}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{F}}_p \\ \dot{\mathbf{F}}_b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_p - \mathbf{R}_p \\ \mathbf{F}_b - \mathbf{R}_b \end{Bmatrix} \quad (17)$$

ここに *suffix-p*, *b* は各々面内, 面外に関する項を意味する。右辺第2項は前段階の外力と内力の差であり不平衡力と呼ばれる。ここで要素の節点変位を全体座標系 (*suffix-g* を付して表わす) により表現すると, 面内変位は明らかに

$$\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{u}_g\} \quad (18)$$

となり, 面外変位は Fig. 5 に示す回転角 $\theta_x (= \partial w / \partial y)$, $\theta_y (= -\partial w / \partial x)$ を正とすると

$$\{\mathbf{w}\} = \begin{Bmatrix} w_i \\ \left(\frac{\partial w}{\partial L_1}\right)_i \\ \left(\frac{\partial w}{\partial L_2}\right)_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & J_{12} & -J_{11} \\ 0 & J_{22} & -J_{21} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{Bmatrix}$$

$$= [\mathbf{G}] \{\mathbf{w}_g\} \quad (i=1, 2, 3) \quad (19)$$

ここに $J_{kl}(k, l=1, 2)$ は面積座標による Jacobian 行列の各要素を表わす。

(17)式を(18), (19)の関係を用い全体座標系で表現すると

$$\begin{Bmatrix} [\mathbf{K}_p] \\ [\mathbf{G}]^T [\mathbf{K}_{pb}] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} [\mathbf{K}_{pb}] [\mathbf{G}] \\ [\mathbf{G}]^T [\mathbf{K}_{bb}] [\mathbf{G}] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_g \\ \dot{\mathbf{w}}_g \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{F}}_{pg} \\ \dot{\mathbf{F}}_{bg} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{pg} - \mathbf{R}_p \\ \mathbf{F}_{bg} - [\mathbf{G}]^T \mathbf{R}_b \end{Bmatrix} \quad (20)$$

3-4 防撓材

防撓材は梁要素として扱う。Fig. 6 のように座標をとると, ひずみは次のように表わされる。

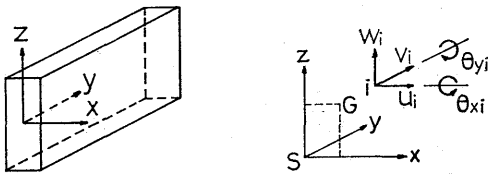


Fig. 6 Local coordinate of stiffener and displacements

$$\epsilon_y = \frac{\partial v_G}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_S}{\partial y} \right)^2 - z \frac{\partial^2 w_S}{\partial y^2}, \quad \gamma_{yz} = -2x \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \quad (21)$$

ここに v_G , w_S は防撓材断面の図心における *y* 方向の変位および剪断中心のたわみである。また断面の剪断中心, 図心および平板と防撓材の接合点の位置を (x_S, z_S) , (x_G, z_G) , (x_i, z_i) とすると次の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} u_S &= u_i - (z_i - z_S) \theta_y \\ v_G &= v_i + (z_i - z_G) \frac{\partial w_i}{\partial y} \\ &\quad + (x_i - x_S) \frac{\partial u_i}{\partial y} + \omega \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \\ w_S &= w_i + (x_i - x_S) \theta_y \\ \theta_S &= \theta_i \quad \text{ただし } \omega: \text{ そり関数} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

ここで面内, 面外の変位関数として平板の変位関数を *y* のみの関数に次元を落とし, 3-3 と同様な手法により梁要素に関する平衡方程式を導く。この式を, 接合点における変位の連続性より平板全体の平衡方程式に重ね合せ, 構造全体の剛性方程式を得る。

3-5 解析方法

平板の平衡方程式(20)に防撓材の平衡方程式を重ね合わせて, 次のような形の剛性方程式が得られる。

$$[\bar{\mathbf{K}}] \{\bar{\delta}_g\} = \{\bar{\mathbf{F}}_g\} + \{\bar{\mathbf{F}}_g\} - \{\bar{\mathbf{R}}\} \quad (23)$$

荷重増分法および強制変位増分法に基づき, 剛性方程式(23)を解くことにより, 大たわみ解析を行う。

弾塑性解析においては, 曲げ応力による板厚方向の応力分布に従い, 同一要素内の板厚方向に, 弾性域と塑性域を生じることになり, 剛性行列を求める積分が解析的には行なえなくなるため, 有限要素を板厚方向(防撓材では深さ方向)に分割し, 各層の重心位置における応力状態で各層毎の剛性を求め, 全層が弾性の場合には解析的に, 塑性の層が生じた場合は台形公式による数値積分によって板厚方向の積分を行う。

また, 初期不整は初期たわみおよび残留応力ともに取りあつかうことが出来, 初期たわみは(1)式で各節点の初期変位として, 残留応力は各要素の初期応力として与える。ただし防撓材は深さ方向にも残留応力を分布させる。

4. 実験結果

初期不整を持つ防撓平板および有孔板に関する実験結果を以下に述べる。

試験体と同じ材料より製作した, JIS 5号試験片の引張試験より求めた, 材料の機械的性質を Table 1 に示す。

面内圧縮実験により, 最終強度は Table 2 のように得られた。

初期たわみの大きさと最終強度との関係は, 防撓平板 (S1, S2, S3 モデル) の実験結果より, 初期たわみが大きい程, 最終強度は低いことが解る。しかし, 有孔板 (H1, H2, H3 モデル) の実験では, 初期たわみの

Table 2 Experimental results of ultimate strength

Model code	Material No.	W_0 (mm)	P_m (ton)	W_m (mm)
S1	1	1.55	53.9	2.40 (50.0ton)
S2	1	1.79	52.9	1.58 (50.0ton)
S3	1	1.20	54.0	2.10 (54.0ton)
SS	1	2.25	62.6	1.18 (60.0ton)
H1	2	1.28	27.4	7.50 (23.5ton)
H2	2	1.17	26.2	9.25 (23.0ton)
H3	2	1.06	25.0	5.92 (19.5ton)
HS	1	1.14	25.6	9.12 (22.0ton)

notation
 W_0 ; max. initial deflection
 P_m ; ultimate load
 W_m ; maximum deflection

形状が崩壊形状に近い程、最終強度が低下するという結果を得ている。このことにより、薄板構造物の最終強度の低下に及ぼす、初期たわみの影響は、その大きさだけでなく、たわみ波形にもよることが解る。

また、防撓材による最終強度の変化は、防撓平板(SSモデル)の実験結果から、防撓効果により最終強度が高まることが解る。しかし、防撓材つき有孔板(HSモデル)(Fig. 1 (d) 参照)のように、パネルに対して1本の連続した防撓材となっていない場合には、防撓効果が発揮されず最終強度はほとんど変化しないことが解る。

5. 解析例

解析法の妥当性を調べるため、実験結果および有限帯板法による解析結果と、本解析法による結果との比較を以下に示す。

Fig. 7 は単純支持正方形板の弾塑性大たわみの荷重増分法による解析例である。

- F. E. M. 1 は本解析法で不平衡力を各増分毎に1回収束させた解、
 - F. E. M. 2 は本解析法で不平衡力を考慮しない解、
 - F. S. M. は有限帯板法による解である。
- (以下同じ略号を用いる)

本解析法では不平衡力を1回収束させると、従来の解¹⁾と比較して精度の良い解が得られることが解る。

Fig. 8, 9 に示すように、防撓平板(S1, S2モデル)の解析結果は実験結果と良く一致している。最終強度に若干の差が見られるのは、実験において防撓材の端部の溶接部分から割れが起り、最終強度が低下したことによると考えられる。

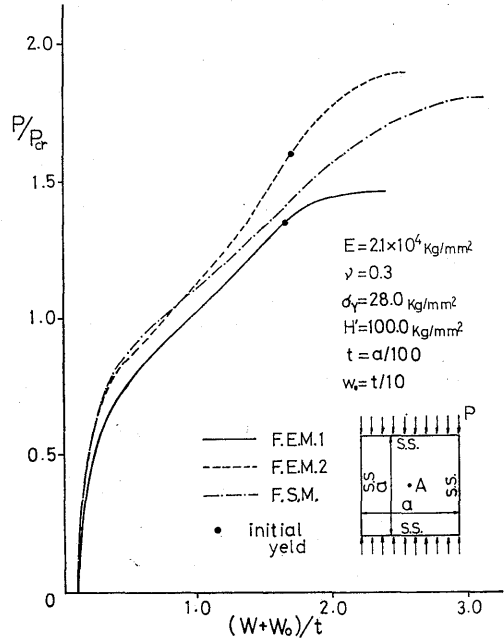


Fig. 7 Maximum deflection of square plate with initial deflection

Fig. 10 は防撓平板(S1モデル)の応力分布を荷重の増加に従って比較したものであるが、支持側辺を除いては良く一致している。実験においては単純支持の条件を十分満足させることが出来なかったため、側辺部に応力の乱れが起り、そのため実験結果と解析結果に差が生じたものと考えられる。

Fig. 11, 12 は有孔平板(H2, HSモデル)の結果であるが、解析結果と実験結果は比較的一致している。解析例の方が実験に比べてたわみが大きくなる原因は、計算上の初期たわみの近似が不十分であり、特に実験

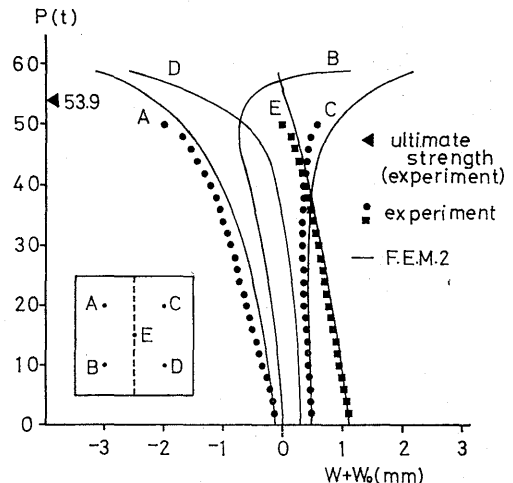


Fig. 8 Load-deflection curves for model-S1

モデルが開口部周辺で剛性の高くなるような初期変形を起しているものと考えられる。

実験モデルの解析においては、不平衡力を考慮しない解法 (F. E. M. 2) を用いたが、増分ステップを十分細かく (崩壊に至るまでの増分ステップを 25~40 ステップ) 取ることで、上述のように比較的精度の良い解を得ることが出来た。ただし、H2 モデルの解析は各増分段階で不平衡力を収束させる解法 (F. E.

M. 1) によった、この場合 F. E. M. 2 による解析は、たわみが大きくなり、良い結果を得ることが出来なかった。すなわち、H2 モデルのように、比較的剛性の低い構造は不平衡力を収束させる解法を用いて、また増分ステップも細かくすることで、精度の良い解が得られることが解った。また、初期たわみは各モデ

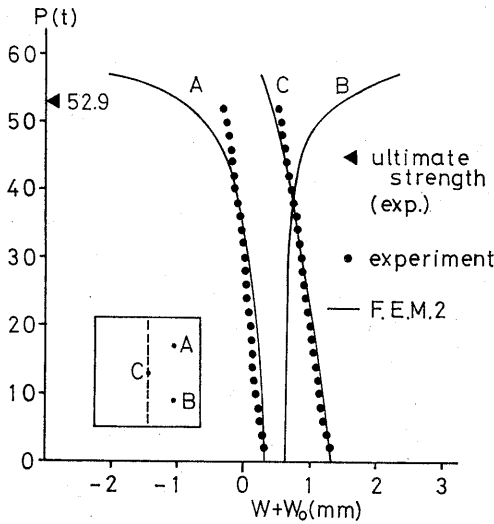


Fig. 9 Load-deflection curves for model-S2

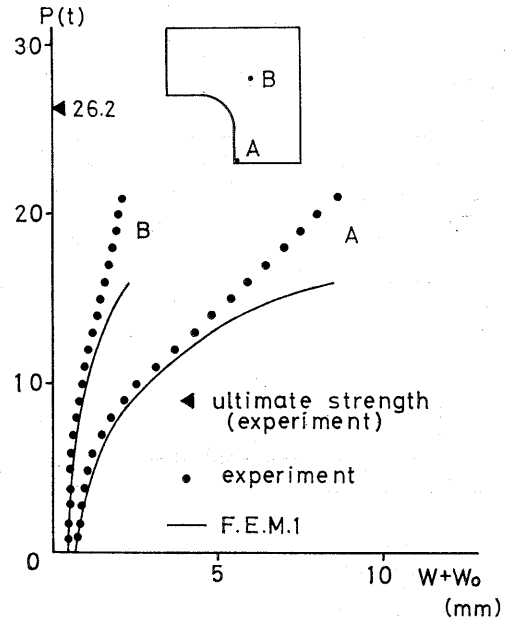


Fig. 11 Load-deflection curves for model-H2

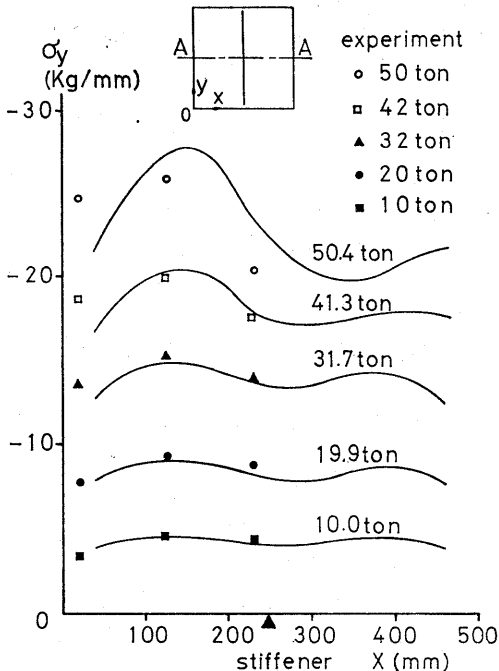


Fig. 10 Stress distributions of model-S1 according to loading

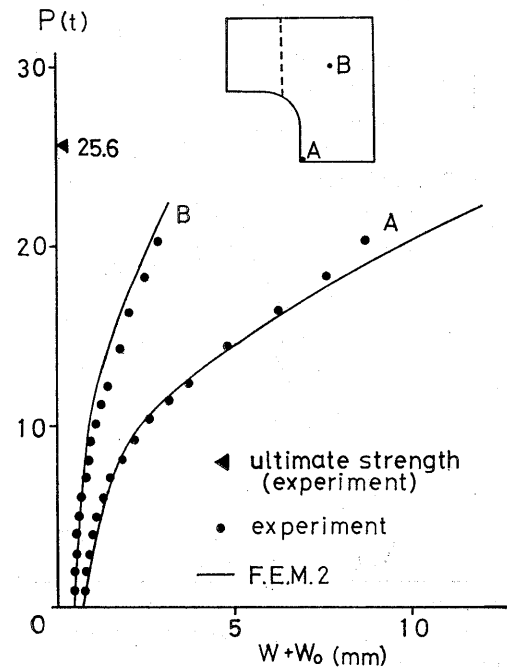


Fig. 12 Load-deflection curves for model-HS

ルともに(1)式の二重三角級数を各5項まで用いて近似したが、有孔平板モデルのように初期変形が複雑であるものは級数の項数を増して、近似度を高くして解析に用いると解の精度が良くなると考えられる。

なお、実験モデルの解析はすべて、荷重辺の強制変

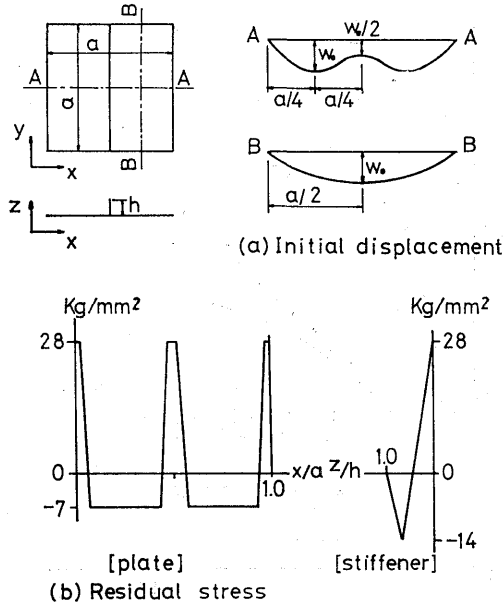


Fig. 13 Distributions of residual stresses and initial deflection

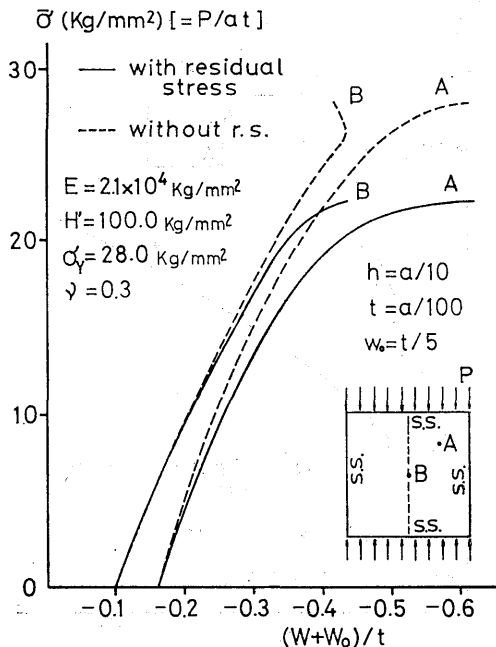


Fig. 14 Effect of residual stress on ultimate strength for stiffened plate

位増分法により、全辺単純支持の条件で解き、また H2, HS, SS モデルは対称性を考慮して解いた。

Fig. 14 は単純支持の正方形板に、Fig. 13 に示すような初期たわみ形状および残留応力分布^{5) 6)}を仮定した場合、残留応力を除いた場合の解析例であり、残留応力による最終強度の低下が明らかである。

6. まとめ

初期不整を有する防撓平板および有孔板について実験を行い、さらに、増分理論に基づいた有限要素法により実験モデルの弾塑性大たわみ解析を行い、次の結論を得た。

1. 本解析法は初期不整 (初期たわみ, 残留応力) を有する平板構造物の崩壊に至るまでの弾塑性大たわみ挙動を明らかにする妥当な計算法である。
2. 平板構造物の最終強度は初期たわみの大きさとともに、そのたわみ波形にも左右される。すなわち、初期たわみが同じ波形であればたわみ量が大い程、同じたわみ量であればたわみ波形が座屈波形に近い程、最終強度は低くなる。
3. 残留応力を考慮した解析例においては、残留応力の存在によって最終強度がかなり低下する。

次報以降において、初期不整を有する平板構造物の崩壊に至るまでの弾塑性大たわみ挙動について、実験と解析の両面から詳細に報告する。

なお、本研究の計算は九州大学大型計算機センター FACOM M-190 を用いて行った。

参考文献

- 1) 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 (第一報), 日本造船学会論文集第137号, (1975).
- 2) 上田・矢尾・菊本：補強材の最小剛比について, 日本造船学会論文集第140号, (1976).
- 3) 小松・牛尾・北田：補剛材を有する圧縮板の極限強度に関する実験的研究, 土木学会論文集第255号, (1976).
- 4) 山田嘉昭：塑性・粘弾性, コンピューターによる構造工学講座 II-2-A, 日本鋼構造協会編, 倍風館.
- 5) SR 147 研究部会：ひずみゲージ解放による突合せ溶接継手の溶接残留応力測定結果, SR 147 研究部会 17-172, (1975).
- 6) 長谷川・長浜・西野：圧縮を受ける補剛された板の座屈強度, 土木学会論文集第236号, (1975).