

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-132

軸方向に補強されたパネルの最大軸圧縮力 (近似解)

築 地 恒 夫

1967 年 4 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 報 告

- TR-111T An Asymptotic Solution of the Nonlinear Equations of Motion of an Airplane Aug. 1966 Hiroshi ENDO
- TR-112 圧縮性と壁形状を考慮した軸流ターボ機械の作動円盤理論 (II) 1966年8月 藤井昭一
一円周速度のある流れ—
A Theoretical Investigation of the Compressible Flow Through the Axial Turbo Machines (II)
—Swirling Fluids—
- TR-113 地面近くでホバリングするヘリコプタ・ロータに関する実験 1966年8月 幸尾治朗, 岡 遠一
Experimental Study on the Ground Effect of a Model Helicopter Rotor in Hovering
- TR-114 フライイングテストベッドの高度制御システムの検討 (I) 1966年8月 武田 峻, 甲斐忠夫
Analytical and Simulation Studies of the Height Control of the Flying Test Bed (I)
- TR-115 NAL-16 ロケットの研究試作および飛しょう実験 —D型およびIT型— 1966年8月 ロケット性能研究室
Single-Stage Solid Propellant Rocket (NAL-16)
- TR-116 50 cm 極超音速風洞の計画と構造 1966年9月 極超音速風洞建設グループ
Design and Construction of the 50 cm Hypersonic Wind Tunnel at National Aerospace Laboratory
- TR-117 弾性振動方程式の差分解に関するエネルギー不等式 1966年10月 三好 甫
Energy Inequalities for the Difference Solutions of Equations of Elastic Vibration
- TR-118 高負荷燃焼器の箱形模型による実験 1966年10月 大塚貞吉, 福田 広
Some Experiments on High Intensity Combustor with Partial Models
相波哲朗
- TR-119 多次元1階準線型双曲型方程式の解の存在について 1966年10月 小島清史
On the Existence of Discontinuous Solutions of the Cauchy Problem for Quasi-Linear First-Order Equations
- TR-120 航技研フライイングテストベッドの姿勢制御方式の検討 1966年11月 武田 峻, 堀川勇壮
小川敏雄, 森 幹彦
Analytical and Simulation Studies on the Attitude Control System of the Flying Test Bed
- TR-121 パルスレシオ変調回路およびその修正回路について 1966年11月 村上 力
Some Circuits for Pulse Ratio Modulation and their Modified Circuits
- TR-122 失速が起こるような高い迎角で, 調和振動する二次元翼に働く空気力に対する半実験的理論 1966年12月 磯貝紘二
Semi-Empirical Theory to Estimate the Airforces Acting on the Harmonically Oscillating Two-Dimensional Wing at High Angle of Attack Where Separation Can Occur
- TR-123 姿勢制御用空気ジェットノズルの研究 1966年12月 滝沢直人, 西村博史
藤枝郭俊, 田辺義一
渋谷昭義
Design and Experimental Study of Air Jet Nozzles for the Attitude Control of VTOL Aircraft

軸方向に補強されたパネルの最大軸圧縮力(近似解)*

築 地 恒 夫**

Ultimate Axial Forces of Longitudinally Stiffened Plate Panels

By Tsuneo TSUIJI

An analytical investigation is presented concerning of the ultimate forces of longitudinally stiffened plate panels having large width to thickness ratios (the plate buckles before the ultimate axial strength of the panel is reached), and subjected to combined axial and uniformly distributed lateral loads.

This analysis is based on the theory of beams and simple plastic theory.

Lateral loads cause a significant reduction in the ultimate axial strength of panels. A large post-buckling strength can be expected for a panel with large plate width to thickness ratios. A comparison between the analytical and test results shows that the approximate ultimate axial strength of panels can be predicted by the method developed in this paper.

1. 結 言

軸方向に補強されたパネルに、外力として等分布横荷重と軸圧縮力が作用する場合、最大の軸圧縮力を求めることが最小重量設計の立場から必要となる。

特にパネルの板厚と補強材取付間隔との比(板の幅厚比)が比較的大きな補強パネルは板部が座屈したあともある程度軸圧縮力が増加する^{1),2)}ので板座屈後の解析が必要である。このような Postbuckling の現象に対し、境界条件が比較的簡単な平板については解析が行なわれている³⁾が、補強パネルについては実験結果が二、三報告されている程度である。これは板部座屈後、板内の応力解析が困難なためと、横荷重と軸力が同時に作用する荷重状態での弾塑性解析が困難なためである。

ここでは、次に示すような仮定のもとに問題を単純化して、等分布荷重作用下での補強パネルの最大軸圧縮力の近似解法を示す。さらにすでに発表された実験の試験片に対して数値解を求め、実験結果と比較検討する。また最大軸圧縮力に影響があると思われる等分布横荷重の大きさ、板の幅厚比について吟味する。

2. 仮 定

この解析は次の仮定に基づいている。

(1) 応力・歪関係

(a) 板: 図1(a)に示すように、引張りに対しては完全弾塑性、圧縮に対しては弾性・曲線・完全塑性の応力・歪関係があるものとする。すなわち、圧縮で、板と補強材との結合部分の歪(板結合部歪) ϵ_e が、板の座屈応力 σ_{cr} に相当する歪 ϵ_{cr} より小さい場合には、弾性的な応力・歪関係がある。板が座屈する($\epsilon_e \geq \epsilon_{cr}$)ともはや直線関係はなく、板内の平均応力と板結合部歪の間に次のような関係がある。

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} = 1.2 \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right)^{0.6} - 0.65 \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right)^{0.2} + 0.45 \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right)^{-0.2} \quad (1)$$

これは Postbuckling 領域における平板の支持辺の歪と板内の平均応力との関係を示した W.T. Koiter の式³⁾である。 ϵ_e がさらに増加して板の降伏歪 ϵ_{vp} に達すると、それに相当する応力 σ_p が板の最大応力 $\sigma_{p \max}$ となり、以後 σ_p は一定で $\sigma_{p \max}$ である。

(b) 補強材: 図1(b)のように、引張り、圧縮とも同じ完全弾塑性の応力・歪関係がある。

(2) 軸力は断面の図心に、等分布横荷重は図2に示すように、補強パネルの板側に作用する。

(3) 補強パネルには初期撓みはない。

(4) 軸力が最大値に達するまで歪の回復はない。

* 昭和42年3月8日受付

** 機体第二部

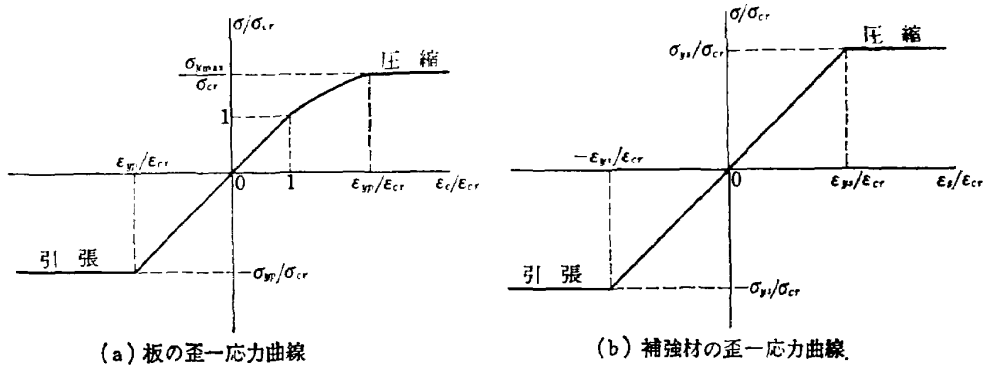


図 1 歪一応力関係

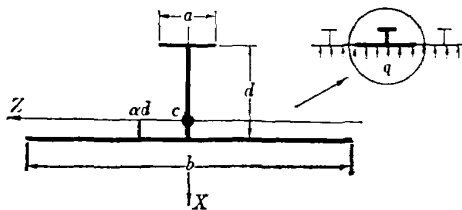


図 2 断面の形状・寸法

- (5) 補強材フランジ内応力, 板内の応力は板厚方向に一定である。
- (6) 剪断力による変形は無視する。
- (7) 補強パネルの断面形状は, 曲げや座屈による変形が小さいとして, 変らないものとする。

以上の仮定の下で, 等分布横荷重が作用している補強材の最大軸圧縮力の解析を, 補強パネルから切り出した工型断面を有する柱に対する最大軸圧縮力の解析問題として近似する。

さらに, ここで用いる符号は次の規定による。

- (i) 圧縮軸力を正
- (ii) モーメントは板に圧縮歪を生じるものを正
- (iii) 応力, 歪は圧縮を正にとる。

3. モーメント・曲率・軸力の関係

最大軸圧縮力の解析には, 断面形状, 材料の降伏応力, 作用する軸力の大きさ等で決定される断面特有のモーメントと曲率の関係を使い, 後で述べる力およびモーメントの平衡方程式を数値積分する方法を用いる。したがって, まず与えられた断面に対して, モーメント・曲率・軸力の関係をお求め。

断面内の歪 (応力) 分布は, 作用する軸力, モーメントにより種々考えられるが, 曲率の方向により次の二通りに大別される。そのおのおのについてモーメント・軸力・曲率の関係を求める。

3.1 負方向の曲げ

曲率が負の場合がこれに属する。図 8 にその代表的

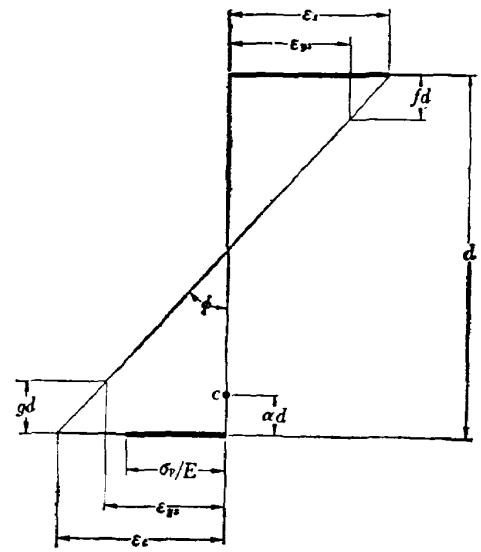


図 3 断面内歪分布 (負の曲げ)

な歪分布状態を示す。

この図から軸力 P は次式のようなになる。

$$\begin{aligned}
 P = & AE\epsilon - \frac{1}{2}E(\epsilon_s - \epsilon_e)A_m - (E\epsilon_s - \sigma_{ys})A_f \\
 & - (E\epsilon_s - \sigma_p)A_p - \frac{1}{2}f(E\epsilon_s - \sigma_{ys})A_w \\
 & - \frac{1}{2}g(E\epsilon_e + \sigma_{ys})A_w \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここに

- A_m, A_f : 補強材ウエーブ, フランジ断面積
- A_p : 板部断面積
- A : 全断面積 ($A_m + A_f + A_p$)
- ϵ_s : 補強材フランジ内歪
- ϵ_e : 板結合部歪
- σ_{ys} : 補強材降伏応力
- σ_p : 板内平均応力
- f : 補強材フランジから測った補強材内降伏部分の無次元深さ
- g : 板から測った補強材内降伏部分の無次元深さ

E : 縦弾性係数

z 軸回りのモーメントは

$$M = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} d - \alpha d \right) E (\varepsilon_s - \varepsilon_e) A_w \\ + \frac{1}{2} f \left(d - \alpha d - \frac{1}{3} f d \right) (E \varepsilon_s - \sigma_{ys}) A_w \\ - (d - \alpha d) (E \varepsilon_s - \sigma_{ys}) A_f - \alpha d (E \varepsilon_s - \sigma_p) A_p \\ - \frac{1}{2} g \left(\alpha d - \frac{1}{3} g d \right) (E \varepsilon_e + \sigma_{ys}) A_w \quad (3)$$

ここに

d : 補強材高さ

α : 断面の無次元化図心位置

断面の幾何学的関係から α は次式で表わされる。

$$\alpha = \frac{A_f}{A} + \frac{1}{2} \left(\frac{A^*}{A} \right) \quad (4)$$

さらに、歪分布から、板結合部歪と補強材フランジ歪との間には次の関係がある。

$$\varepsilon_s = \varepsilon_e - \phi d \quad (5)$$

ここに、 ϕ : 曲率

またウェット内降伏深さ f , g は ε_e , ε_s とおのおの次のような関係にある。

$$f = 1 + \frac{\varepsilon_e - \sigma_{ys}/E}{\varepsilon_s - \varepsilon_e} \quad (6)$$

$$g = - \frac{\varepsilon_e + \sigma_{ys}/E}{\varepsilon_s - \varepsilon_e} \quad (7)$$

解析の都台上、各式を板の座屈応力 σ_{cr} , 総断面積 A で無次元化する。

まず (5) 式は

$$\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} - \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right) \quad (8)$$

ここに

$\varepsilon_{cr} = \sigma_{cr}/E$ σ_{cr} : 板の座屈応力

ϕ_{cr} : モーメント $M_{cr} = s \sigma_{cr}$ のみが作用した場合

($P=0$) の曲率, s は断面係数

(6), (7) 式もおのおの同様な方法で無次元化して

$$f = 1 + \frac{\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}}}{\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}}} \quad (9)$$

$$g = - \frac{\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} + \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}}}{\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}}} \quad (10)$$

(8) 式を用いて (9), (10) 式を書きなおして

$$f = 1 - \alpha \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)} \quad (11)$$

$$g = \alpha \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} + \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)} \quad (12)$$

さらに、軸力式(2), モーメント式(3)も無次元化する。

$$\frac{P}{P_{cr}} = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} - \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \\ - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_f}{A} - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_p}{A} \\ - \frac{1}{2} f \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \\ - \frac{1}{2} g \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} + \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \quad (13)$$

$$\frac{M}{M_{cr}} = \frac{1}{\left(\frac{S}{Ad} \right)} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \right. \\ + \frac{1}{2} f \left(1 - \alpha - \frac{1}{3} f \right) \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \\ + (1 - \alpha) \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_f}{A} \\ - \alpha \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_p}{A} \\ \left. - \frac{1}{2} g \left(\alpha - \frac{1}{3} g \right) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} + \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \right] \quad (14)$$

ここに、

P_{cr} : $A \sigma_{cr}$ で表わされる軸力

$\frac{S}{Ad}$: 無次元表示の断面係数で、断面の形状から次のように表わされる。

$$\frac{S}{Ad} = \frac{1}{3\alpha} \left(\frac{A_f}{A} + 2\alpha - 3\alpha^2 \right) \quad (15)$$

つぎに、(13) 式に (8), (11), (12) 式を代入して $\frac{\phi}{\phi_{cr}}$ について解くと、

$$\frac{\phi}{\phi_{cr}} = \frac{2\alpha \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} \right) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right)}{\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} - \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\sigma_s}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_f}{A} + \frac{A_w}{A} \right) - \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_p}{A} - \frac{P}{P_{cr}}} \quad (16)$$

となる。この式から、板結合歪 $\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}}$ と軸力 $\frac{P}{P_{cr}}$ が与えられると、曲率 $\frac{\phi}{\phi_{cr}}$ が求まる。

$\phi < 0$ の場合、 ε_e , ε_s の組合せにより種々な歪分布が存在するが、それらに対する軸力式、モーメント式は (13), (14) 式より次の法則に従って求められる。

(1) $\varepsilon_{ys} > \varepsilon_s \geq 0$ の場合

$$f = 0, \quad \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_f}{A} = 0$$

(2) $\epsilon_{cr} > \epsilon_e \geq -\sigma_{ys}/E$ の場合
 $g=0$

(3) $\epsilon_{cr} > \epsilon_e \geq -\sigma_{yp}/E$ の場合

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} = \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \quad \sigma_{yp}: \text{板の降伏応力}$$

(4) $\frac{\sigma_{yp}}{E} > \epsilon_e \geq \epsilon_{cr}$ の場合

$\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}}$ は Koiter の式から求まる。

(5) $\epsilon_e \geq \frac{\sigma_{yp}}{E}$ の場合

$\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}}$ は (1) 式に $\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} = \frac{\sigma_{yp}}{\sigma_{cr}}$ を代入して
 得られた $\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}}\right)_{\max}$ に等しい。

(6) $-\frac{\sigma_{yp}}{E} > \epsilon_e$ の場合

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} = -\frac{\sigma_{yp}}{\sigma_{cr}}$$

上記の方法によって負の曲げの場合のすべての歪分布に対する軸力、モーメントをまとめたのが表 4 である。

負方向曲げモーメントの極値として、断面が負担できる負モーメントの最大値は、材料の降伏応力、断面の形状、軸力の大きさなどから決まる中立軸の位置で、次の二種類が考えられる。

(1) 中立軸が補強材ウエップ内にある場合(図4(a))

$$\begin{aligned} \left(\frac{M}{M_{cr}}\right)_{\max} = & -\frac{1}{\left(\frac{S}{Ad}\right)} \left[2n \left(\alpha - \frac{n}{2} \right) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \right. \\ & \left. + \alpha \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} + \frac{\sigma_{yp}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_p}{A} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、 n は無次元表示した中立軸の位置を表わし、軸力のつり合より

$$\begin{aligned} n = & \frac{1}{2 \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right)} \left[\left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(1 - \frac{A_p}{A} \right) \right. \\ & \left. + \left(\frac{\sigma_{yp}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right) - \frac{P}{P_{cr}} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

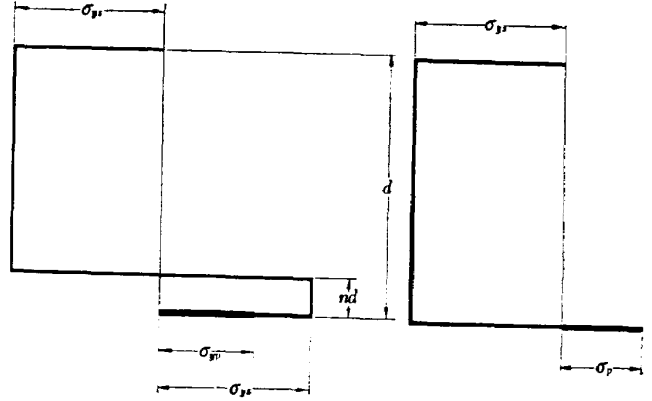
である。

(2) 中立軸が板内にある場合 (図 4 (b))

$$\left(\frac{M}{M_{cr}}\right)_{\max} = -\frac{\alpha}{\left(\frac{S}{Ad}\right)} \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} - \frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_p}{A} \quad (19)$$

ここで、板内応力 $\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}}$ は軸力のつり合から次式で与えられる。

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} = -\frac{1}{\left(\frac{A_p}{A}\right)} \left[\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \left(1 - \frac{A_p}{A} \right) - \frac{P}{P_{cr}} \right] \quad (20)$$



(a) 中立軸がウエップ内にある場合 (b) 中立軸が板内にある場合

図 4 負の最大曲げモーメントにおける断面内応力分布

3.2 正方向の曲げ

曲率 $\phi \geq 0$ になるような歪分布での軸力およびモーメントは、 $\phi < 0$ の場合と同様、図 5 に示すような一般的な歪分布に対してまず求め、これらから前述の法則に従って、他の歪分布についても簡単に求めることができる。

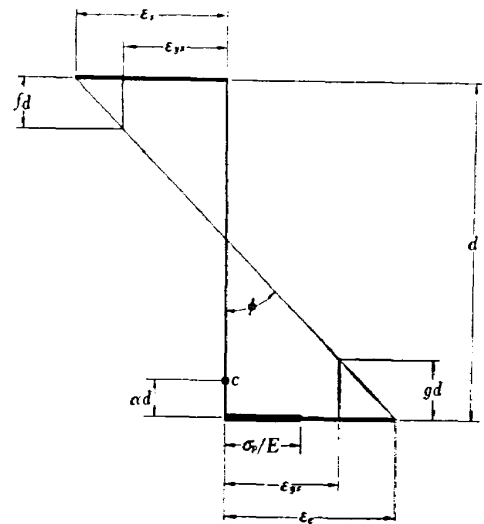
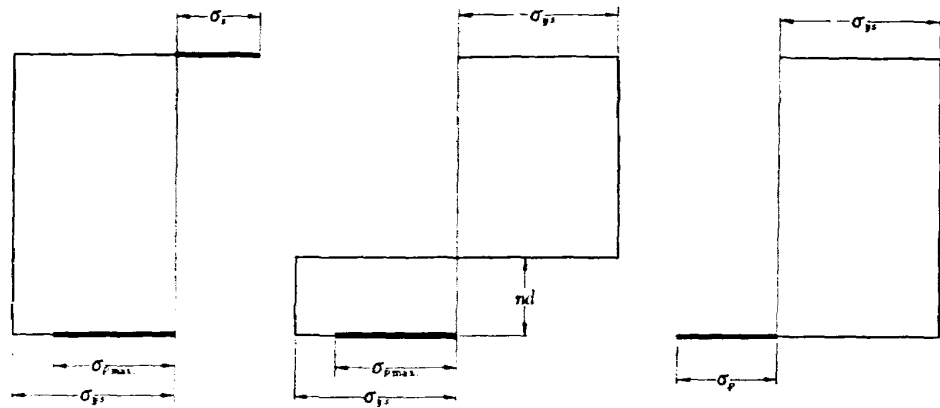


図 5 断面内歪分布 (正の曲げ)

図の歪分布から、軸力は

$$\begin{aligned} \frac{P}{P_{cr}} = & \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \\ & - \left(\frac{\sigma_{ys}}{\epsilon_{cr}} + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \frac{A_f}{A} + \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \frac{A_p}{A} \\ & - \frac{1}{2} f \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \end{aligned}$$



(a) 中立軸がフランジ内にある場合 (b) 中立軸がウェブ内にある場合 (c) 中立軸が板内にある場合

図 6 正の最大曲げモーメントにおける断面内応力分布

$$-\frac{1}{2}g\left(\frac{\epsilon_e - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} - \sigma_{cr}}\right)\frac{A_w}{A} \quad (21)$$

モーメントは

$$\begin{aligned} \frac{M}{M_{cr}} = & \frac{1}{\left(\frac{S}{Ad}\right)} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \right. \\ & + (1-\alpha) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \frac{A_f}{A} \\ & + \alpha \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \frac{A_p}{A} \\ & + \frac{1}{2} f \left(1 - \alpha - \frac{1}{3} f \right) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \\ & \left. - \frac{1}{2} g \left(\alpha - \frac{1}{3} g \right) \left(\frac{\epsilon_e - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} - \sigma_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \right] \quad (22) \end{aligned}$$

となる。

降伏部深さ f, g はこの場合次式のようになる。

$$f = 1 - \alpha \left(\frac{\epsilon_e + \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} + \sigma_{cr}} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)} \quad (23)$$

$$g = \alpha \left(\frac{\epsilon_e - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} - \sigma_{cr}} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)} \quad (24)$$

$\phi \geq 0$ の場合のすべての歪分布に対する $P/P_{cr}, M/M_{cr}$ を表 5 に示す。

正の曲げモーメントの最大値には次の三つのケースが考えられる。

(1) 中立軸が補強材フランジ内にある場合(図9(a))

$$\begin{aligned} \left(\frac{M}{M_{cr}} \right)_{\max} = & \frac{1}{\left(\frac{S}{Ad}\right)} \left[(1-\alpha) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} - \frac{\sigma_s}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_f}{A} \right. \\ & \left. - \alpha \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} - \frac{\sigma_{p \max}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_p}{A} \right] \quad (25) \end{aligned}$$

ここに、 $\frac{\sigma_s}{\sigma_{cr}}$ はフランジ内応力で、軸力のつり合

より

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_{cr}} = \frac{1}{\left(\frac{A_f}{A}\right)} \left[- \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} - \left(\frac{\sigma_{p \max}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_p}{A} + \frac{P}{P_{cr}} \right] \quad (26)$$

(2) 中立軸が補強材ウェブ内にある場合(図6(b))

$$\begin{aligned} \left(\frac{M}{M_{cr}} \right)_{\max} = & \frac{1}{\left(\frac{S}{Ad}\right)} \left[2n \left(\alpha - \frac{n}{2} \right) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_w}{A} \right. \\ & \left. + \alpha \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} + \frac{\sigma_{p \max}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_p}{A} \right] \quad (27) \end{aligned}$$

ここに、 n は無次元化中立軸位置

$$\begin{aligned} n = & \frac{1}{2 \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right)} \left[\left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(1 - \frac{A_p}{A} \right) \right. \\ & \left. - \left(\frac{\sigma_{p \max}}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_p}{A} + \frac{P}{P_{cr}} \right] \quad (28) \end{aligned}$$

(3) 中立軸が板内にある場合 (図 6 (c))

$$\left(\frac{M}{M_{cr}} \right)_{\max} = \frac{\alpha}{\left(\frac{S}{Ad}\right)} \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} + \frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} \right) \frac{A_p}{A} \quad (29)$$

ここで、 $\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}}$ は板内の応力で

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} = \frac{1}{\left(\frac{A_p}{A}\right)} \left[\left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(1 - \frac{A_p}{A} \right) + \frac{P}{P_{cr}} \right] \quad (10)$$

3.3 モーメント・曲率・軸力曲線 ($M-\phi-P$ 曲線)

与えられた断面形状のモーメントと曲率の関係曲線は、表 4, 5 から軸力をパラメーターとして求められる。計算の順序は次のとおりである。

(1) 軸力の選定。

(2) 板結合部歪 $\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}}$ を仮定する。

(3) 仮定した $\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}}$ に相当する板内平均応力 $\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}}$ を

求める。

- (4) 表 4, 5 の軸力式より曲率 $\frac{\phi}{\phi_{cr}}$ を求める。
- (5) 表 4, 5 のモーメント式より (4) で算出した $\frac{\phi}{\phi_{cr}}$ に相当する $\frac{M}{M_{cr}}$ を計算する。
- (6) $\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}}$ を変えて (3)~(5) の計算を繰り返す。
- (7) 軸力 $\frac{P}{P_{cr}}$ を変えて (2)~(6) の計算を繰り返す。
- (8) 計算で得られた $\frac{M}{M_{cr}}$ と $\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}}$ を $\frac{P}{P_{cr}}$ をパラメーターとしてグラフにする。

4. 補強パネルの最大軸圧縮力

4.1 モーメント・変形の関係⁽⁴⁾

補強パネルを軸にそって微小の長さ (一定でない) 分割する。いま分割断面 i と $i+1$ 番目で決まる微小の長さの要素 (図 7) について、力およびモーメントのつり合式と変形の関係式を求める。図で x および y 方向の力を H, V モーメントを M , 図心線が y 軸となす角を θ とする。 Δs は小要素の図心線にそった長さ, $\Delta x, \Delta y$ は Δs の x, y 方向成分である。

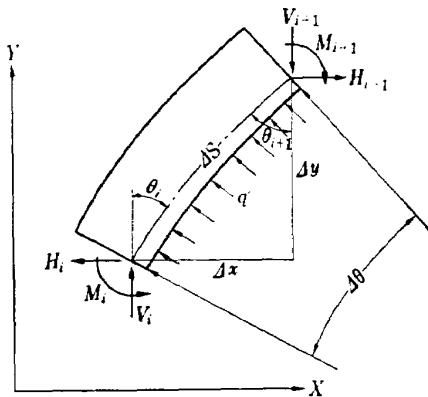


図 7

曲率は軸方向の長さの変化に対する、図心線の y 軸となす角 θ の変化の割合で表わされるから

$$\phi = \frac{\partial \theta}{\partial s} \quad (31)$$

この要素内で曲率は一次的に変化していると仮定すると、小要素内の任意点の曲率は、小要素両端での曲率 ϕ_i, ϕ_{i+1} によって次のように表わされる。

$$\phi = \phi_i + \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\Delta s} s \quad (32)$$

ここに、 s は断面 i より図心線にそって測った小要素内の任意点までの長さである。

同じ点の傾斜は (32) 式を用い、(31) 式を積分して得られる。

$$\theta = \theta_i + \phi_i s + \frac{1}{2} \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\Delta s} s^2 \quad (33)$$

したがって、断面 $i+1$ での傾斜 θ_{i+1} は

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \phi_i \Delta s + \frac{1}{2} (\phi_{i+1} - \phi_i) \Delta s \quad (34)$$

となる。

小要素に働いている力およびモーメントのつり合式は

$$\begin{aligned} \frac{dV}{ds} &= (1 - \phi \alpha d) q b \sin \theta \\ \frac{dH}{ds} &= (1 - \phi \alpha d) q b \cos \theta \\ \frac{dM}{ds} + V \sin \theta + H \cos \theta &= 0 \end{aligned} \quad (35)$$

である。ここに、 b は板幅、 q 分布横荷重である。また、第 1 式、第 2 式のカッコ内の第二項は分布横荷重が図心線より αd だけ内側に作用しているための補正項である。

$\frac{dy}{ds} = \cos \theta, \frac{dx}{ds} = \sin \theta$ と (31) 式を用いて、(35) 式を積分すると垂直力 V , 水平力 H , モーメント M はそれぞれ次のようになる。

$$\begin{aligned} V &= V_i + qb(x - x_i) + qb \cdot \alpha d (\cos \theta - \cos \theta_i) \\ H &= H_i + qb(y - y_i) - qb \cdot \alpha d (\sin \theta - \sin \theta_i) \\ M &= M_i - V_i(x - x_i) - \frac{1}{2} qb(x - x_i)^2 \\ &\quad - H_i(y - y_i) - \frac{1}{2} qb(y - y_i)^2 \end{aligned} \quad (36)$$

したがって、 $i+1$ 断面での力およびモーメントは

$$\begin{aligned} V_{i+1} &= V_i + qb \Delta x + qb \cdot \alpha d (\cos \theta_{i+1} - \cos \theta_i) \\ H_{i+1} &= H_i + qb \cdot \Delta y - qb \cdot \alpha d (\sin \theta_{i+1} - \sin \theta_i) \\ M_{i+1} &= M_i - V_i \Delta x - H_i \Delta y - \frac{1}{2} qb [(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2] \end{aligned} \quad (37)$$

ここで、 $\Delta x = \Delta s \sin \theta_i, \Delta y = \Delta s \cos \theta_i$ である。

補強パネルの全長は各要素の総和であるから、

$$L = \sum_j (\Delta s)_j \quad (38)$$

上記の各式は無次元化して、

$i+1$ 断面での傾斜角は、

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\phi_{i+1}}{\phi_{cr}} \right) + \left(\frac{\phi_i}{\phi_{cr}} \right) \right] \left(\frac{\Delta s}{r} \right) \left(\frac{r}{\alpha d} \right) \epsilon_{cr} \quad (39)$$

垂直力、水平力、モーメントは

$$\begin{aligned} \frac{V_{i+1}\alpha d}{\sigma_{cr}Ar} &= \frac{V_i\alpha d}{\sigma_{cr}Ar} + \left(\frac{qb\cdot\alpha d}{\sigma_{cr}\cdot A}\right)\left(\frac{\Delta x}{r}\right) \\ &\quad + \left(\frac{qb\cdot\alpha d}{\sigma_{cr}A}\right)\left(\frac{\alpha d}{r}\right)(\cos\theta_{i+1}-\cos\theta_i) \\ \frac{H_{i+1}\alpha d}{\sigma_{cr}Ar} &= \frac{H_i\alpha d}{\sigma_{cr}Ar} + \left(\frac{qb\cdot\alpha d}{\sigma_{cr}\cdot A}\right)\left(\frac{\Delta y}{r}\right) \\ &\quad - \left(\frac{qb\cdot\alpha d}{\sigma_{cr}\cdot A}\right)\left(\frac{\alpha d}{r}\right)(\sin\theta_{i+1}-\sin\theta_i) \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \frac{M_{i+1}}{M_{cr}} &= \frac{M_i}{M_{cr}} - \left(\frac{V_i\alpha d}{\sigma_{cr}Ar}\right)\left(\frac{\Delta x}{r}\right) - \left(\frac{H_i\alpha d}{\sigma_{cr}\cdot Ar}\right)\left(\frac{\Delta y}{r}\right) \\ &\quad - \frac{1}{2}\left(\frac{qb\cdot\alpha d}{\sigma_{cr}A}\right)\left[\left(\frac{\Delta x}{r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{r}\right)^2\right] \end{aligned}$$

Δs の x, y 方向の成分 $\Delta x, \Delta y$ は

$$\frac{\Delta x}{r} = \frac{\Delta s}{r} \sin\theta_i \quad \frac{\Delta y}{r} = \frac{\Delta s}{r} \cos\theta_i \quad (41)$$

パネル全長は

$$\frac{L}{r} = \sum_j \left(\frac{\Delta s}{r}\right)_j \quad (42)$$

ここに、 r は断面の z 軸回りの回転半径で、無次元表示すると、断面の形状から

$$\frac{r}{\alpha d} = \frac{1}{\alpha} \sqrt{(1-2\alpha)\frac{A_f}{A} + \left(\frac{1}{3}-\alpha\right)\frac{A_w}{A} + \alpha^2} \quad (43)$$

である。

4.2 補強パネルの最大軸圧縮力

与えられた補強パネルの最大軸圧縮力を求めるには、まず前節で得られた $M-\phi-P$ 曲線を用い、(39), (40), (41), (42) 式から step-by-step の方法で、ある一定圧縮力作用下での補強パネルの最大の長さを求める。つぎに、軸圧縮力と補強パネルの最大長との関係

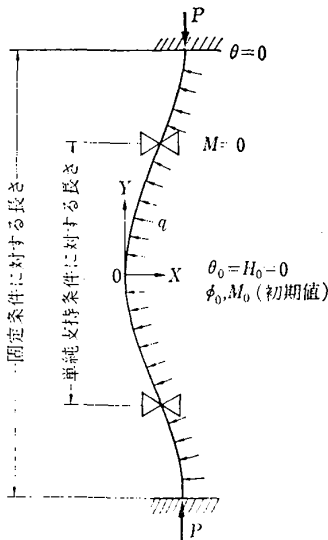


図 8 補強パネルの変形状態

を図示し、このグラフより与えられた補強パネルに対する最大軸圧縮を読み取る。

補強パネルの変形は、荷重辺の境界条件および荷重状態が軸に関して対称なので、図 8 のように仮定できる。したがって原点において、傾斜角および水平力は零であり、曲率とモーメントを与えれば原点での境界条件はすべて与えられることになる。しかるに、曲率とモーメントは前節で $M-\phi-P$ 曲線として求まっているから、結局原点での曲率を仮定すれば計算に必要な初期値はすべて与えられたことになる。

最大軸圧縮力の計算順序は次のとおりである。

- (1) 原点での曲率を仮定、この曲率に相当するモーメントを $M-\phi-P$ 曲線より求める。
- (2) 適当な小要素の長さ $\frac{\Delta s}{r}$ を選ぶ。
- (3) 小要素終端での曲率を仮定する。
- (4) 小要素終端の傾斜、 $\frac{\Delta x}{r}, \frac{\Delta y}{r}$ を (39) および (41) 式より求める。
- (5) 小要素終端の水平力、垂直力、モーメントを (40)式から求める。
- (6) (5)で求めたモーメントに相当する曲率を $M-\phi-P$ 曲線より読む。
- (7) (6)で求めた曲率と、(3)で仮定した曲率の差がある値 ($\epsilon \ll 1$) より大きいときは、(3)で仮定した曲率を補正して、(4)~(6)の繰り返す。曲率の差が ϵ より小さい時は次の小要素に進み、算 (2)~(6) を繰り返す。
- (8) 小要素終端でのモーメントが零となる $\frac{\Delta s}{r}$ を求め、この小要素終端の傾斜、水平力を計算し、荷重端が単純支持の場合の境界値とする。同時に補強パネルの全長が (42) 式から求まる。
- (9) さらに (2)~(6) の計算を続け、終端での傾斜が零となる $\frac{\Delta s}{r}$ を求め、この小要素終端でのモーメント、水平力を荷重端が固定の場合の境界値として計算する。固定の場合の補強パネルの全長を求める。
- (10) 原点での曲率を変え、上記 (1)~(9) の計算を繰り返し、原点での曲率と補強パネルの長さとの関係を求める。
- (11) 与えられた軸力下での補強パネルの最大長を求める。
- (12) 分布横荷重をパラメーターとして、軸力と補強パネルの最大長を図示する。 $P-L-q$ 曲線
- (13) 与えられた補強パネルの最大圧縮力は (12) で得られた $P-L-q$ 曲線から求まる。

5. 数値解および実験結果との比較

解析例として、すでに報告されている実験⁽²⁾の試験片について計算を行なった。

実験された補強パネルを図9に示す。

計算に必要なパラメータは次のとおりである。

板のアスペクト比 $\frac{L}{b} = 3.8$

パネルの幅厚比 $\frac{b}{t} = 50, 60, 75, 90$

材質

板の降伏応力 $\sigma_{yp} = 36.0 \text{ ksi}$

補強材の降伏応力 $\sigma_{ys} = 40.0 \text{ ksi}$

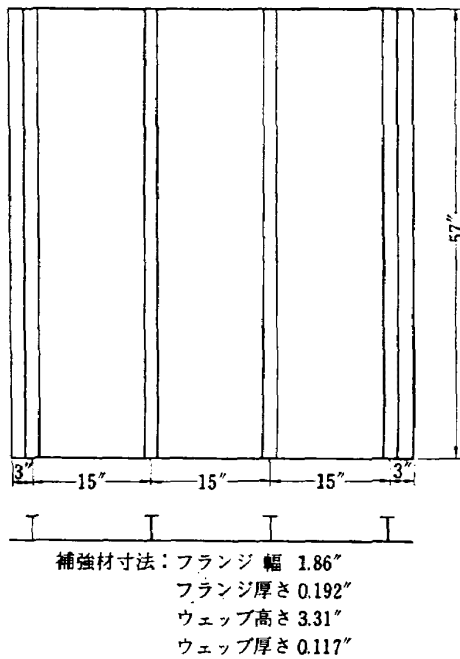


図9 試験補強パネルの寸法

縦弾性係数 $E = 29.9 \times 10^3 \text{ ksi}$

等分布横荷重 $q = 6.5, 13, 20 \text{ psi}$

5.1 モーメント・曲率・軸力曲線: M-φ-P 曲線

パネルの幅厚比 60 の補強パネルに対する M-φ-P 曲線を図10に示す。この例では、板の降伏応力が補強材の降伏応力より低く、しかもモーメントを図心回りにとったため、軸力 $\frac{P}{P_{cr}}$ が 0.8 の場合に、正の曲げモーメントが最大となっている。また軸力が断面の最大軸力に近い場合には、曲率を零にするのに、負の曲げモーメントを加えねばならないのも同じ理由による ($\frac{P}{P_{cr}} = 1.1$ の場合)。

5.2 最大軸圧縮力・補強パネル長さ曲線 (P-L-q 曲線)

$b/t = 60$ の補強パネルについて、種々な軸力での補強パネルの最大長を求めた結果が表1である。またこれを図示したのが図11(単純支持)、図12(固定)で

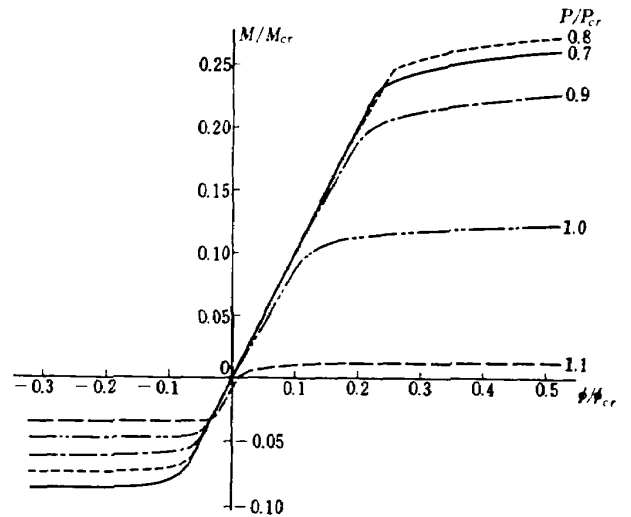


図10 モーメント・曲率・軸力曲線 (b/t=60)

表1 補強パネルの最大長 (b/t=60)

荷重端 P/P_{cr}	6.5		13		20	
	支持	固定	支持	固定	支持	固定
1.05	36.9	46.9	29.7	36.6	22.8	27.8
1.00	47.4	57.4	36.2	43.4	27.9	32.9
0.90	61.0	70.0	47.7	54.7	37.2	42.0
0.80	66.2	78.2	53.6	60.6	40.3	47.4
0.70	67.2	80.4	53.9	62.4	40.1	48.3
0.50	68.5	85.4	54.1	65.6	39.3	49.7

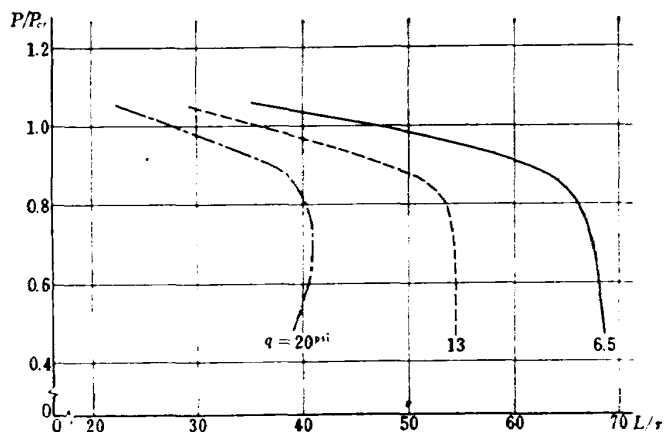


図 11 補強パネルの最大軸圧縮力 (荷重端単純支持, $b/t=60$)

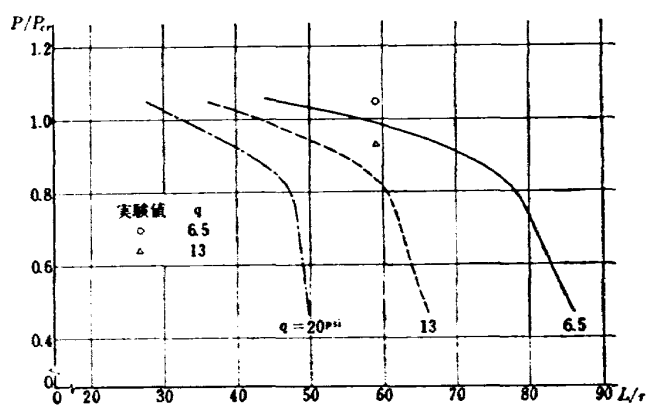


図 12 補強パネルの最大軸圧縮力 (荷重端固定, $b/t=60$)

表 2 補強パネルの最大長 (荷重端支持 $q=6.5psi$)

板最大応力 P/P_{cr}	b/t 50		60		75		90	
	σ_{pmax} σ_{cr}	σ_{pmax}	σ_{cr}	σ_{pmax}	σ_{cr}	σ_{pmax}	σ_{cr}	
1.40	—	—	—	22.9	—	58.9	—	
1.20	—	—	—	54.4	—	67.1	—	
1.05	—	36.9	—	—	—	—	—	
1.00	—	47.4	20.9	67.4	25.5	68.7	28.1	
0.90	—	61.0	55.0	—	—	—	—	
0.80	35.2	66.2	63.2	68.0	57.5	68.9	53.5	
0.70	60.0	61.0	67.0	—	—	—	—	
0.60	65.6	—	—	69.3	69.6	70.0	68.0	
0.50	69.3	68.5	68.5	—	—	—	—	

表 3 補強パネルの最大長 (荷重端固定 $q=6.5psi$)

板最大応力 P/P_{cr}	b/t 50		60		75		90	
	σ_{pmax} σ_{cr}	σ_{pmax}	σ_{cr}	σ_{pmax}	σ_{cr}	σ_{pmax}	σ_{cr}	
1.40	—	—	—	45.7	—	74.7	—	
1.20	—	—	—	68.9	—	83.1	—	
1.05	—	46.9	—	—	—	—	—	
1.00	—	75.1	39.3	79.8	56.4	86.5	62.7	
0.90	—	70.7	64.0	—	—	—	—	
0.80	46.4	78.2	76.4	85.2	78.7	89.7	77.1	
0.70	67.2	80.4	79.2	—	—	—	—	
0.60	78.1	—	—	90.6	89.2	93.6	91.8	
0.50	80.3	85.4	—	—	—	—	—	

ある。

荷重辺が単純支持の場合、図 11 からわかるように、軸圧縮力が 0.8 以下では補強パネルの最大長はほとんど変わらず、分布横荷重が大きい場合にはむしろ軸圧縮力の減少とともに短くなっている。これは先に求めた $M-\phi-P$ 曲線からもわかるように、正の曲げモーメントが $P/P_{cr}=0.8$ の時に最大となることに起因している。荷重辺が固定の場合には、固定端で負の曲げモーメントが作用するので、上記の効果がある程度打ち消すために、軸圧縮力の増加にともなって、補強パネルの長さは短くなっている。

また、図 11, 12 は補強パネルの最大軸圧縮力におよぼす分布横荷重の影響が大きいことを示している。

5.3 最大軸圧縮力・板の幅厚比曲線

最大軸圧縮力におよぼす板の幅厚比の影響をみるために、 $b/t=50, 75, 90$ 、で板の最大応力が $\sigma_{p \max}$ または σ_{cr} の場合について計算した結果 ($q=6.5 \text{ psi}$) を表 2 (単純支持) と表 3 (固定) に示す。これを図示した $P-L-q$ 曲線から、荷重辺が単純支持の補強パネル ($\frac{L}{r}=45, 60$)、固定の補強パネル ($\frac{L}{r}=60, 75$) について軸圧縮力の最大値と b/t の関係を読みとりグラフにしたのが図 13, 図 14 である。

図中実線が板の最大応力を $\sigma_{p \max}$ とした場合であり、破線は板が座屈したあとは板の応力は増加せず、板の座屈応力 σ_{cr} であるとして求めた最大軸圧縮力である。けっきょく、実線と破線の差が補強パネルの座屈後強さである。

$b/t=50$ の場合には板は座屈を起さず、横荷重と軸力によって漸次撓みが増加し最大軸圧縮力に達するが、 b/t の値が増加するにしたがって、かなり低い軸

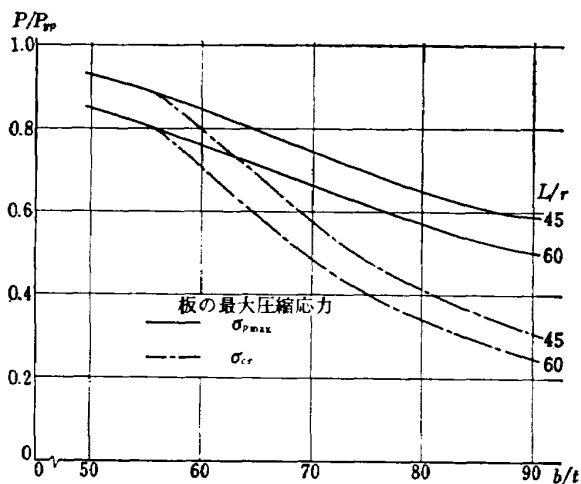


図 13 最大軸圧縮力におよぼす板の厚幅比(b/t)の影響 (荷重端単純支持, $q=6.5 \text{ psi}$)

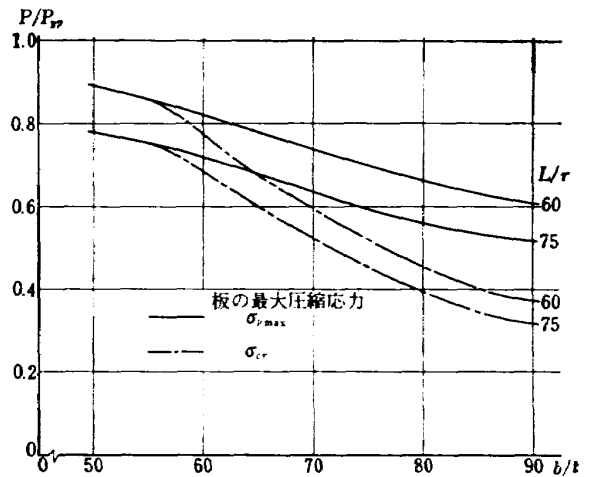


図 14 最大軸圧縮力におよぼす板の厚幅比(b/t)の影響 (荷重端固定, $q=6.5 \text{ psi}$)

力で板部は座屈するが、その後も軸圧縮力は増加する。

5.4 実験結果との比較

リーハイ大学で行なわれた実験結果を図 11 に○印および△印で示す。○印は $q=6.5 \text{ psi}$ 、△印は 13 psi で実験された結果である。本解析では、板結合部歪が板の降伏歪に達したとき、この歪に相当する応力 $\sigma_{p \max}$ を板内の最大応力としたために、最大の軸圧縮力は多少低い値となっている。

6. 結 論

- (1) 等分布横荷重が作用している補強パネルの最大圧縮力の近似解が得られたが、さらに実験との比較検討が必要である。
- (2) 最大軸圧縮力におよぼす等分布横荷重の影響は大きい。
- (3) 板の幅厚比 b/t が大きい補強パネルはかなりの座屈後強度を有する。

さらによりよい近似の解を得るために、等分布横荷重が作用している補強パネルの板座屈後の弾性挙動について研究を進める必要がある。

最後に本研究にあたってリーハイ大学の A. Ostapenko 教授のご指導に感謝の意を表します。また日立造船株式会社の近藤淳氏から適切など意見をいただくとともに計算プログラムを使わせていただいた、ここに感謝します。また終始ご指導くださった構造研究室長の 堀 武敏技官に感謝の意を表します。

文 献

- 1) A.E. McPherson, S. Eevy, G. Zibritsky; Effect of Normal Pressure on Strength of Axially Loaded Sheet-Stringer Panels, NACA TN 1041, 1964.
- 2) J. Kondo, A. Ostapenko; Tests on Longitudinally Stiffened Plate Panels with Fixed Ends, Fritz Lab. Report No. 248. 12, Lehigh U., 1964.
- 3) J. R. Jombock, J. W. Clark; Postbuckling Behavior of Flat Plates, Trans. ASCE, Vol. 127, 1962.
- 4) J. Kondo; Ultimate Strength of Stiffened Plate Panels, Subjected to Combined Axial and Lateral Loading, Fritz Lab. Report No. 248. 13, Lehigh U., 1965.

表 4 軸力, モーメント式 (負の曲げ)

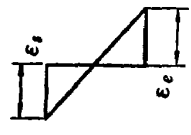
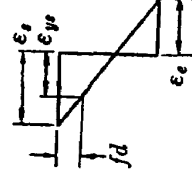
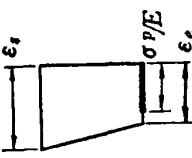
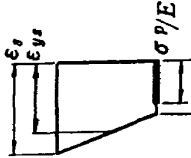
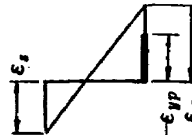
歪分佈	歪範圍	$\frac{P}{P_{cr}}$	$\frac{M}{M_{cr}} \cdot S$ Ad
	$\epsilon_{cr} > \epsilon_e \geq -\epsilon_{yp}$ $\epsilon_{ys} > \epsilon_e \geq 0$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\phi}{\phi_{cr}}$	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) - \alpha \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right)$
	$\epsilon_{cr} > \epsilon_e \geq -\epsilon_{yp}$ $\epsilon_s \geq \epsilon_{ys}$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_f}{A} + \frac{A_w}{A} \right) + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right)^2 \left(\frac{A_w}{A} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)}$	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) + \frac{f}{2} (1 - \alpha - \frac{f}{3}) \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_f}{A} \right) - \alpha \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right)$
	$\epsilon_{yp} > \epsilon_e \geq \epsilon_{cr}$ $\epsilon_{ys} > \epsilon_s \geq 0$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\phi}{\phi_{cr}} - \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right)$	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) - \alpha \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right)$
	$\epsilon_{yp} > \epsilon_e \geq \epsilon_{cr}$ $\epsilon_s \geq \epsilon_{ys}$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_f}{A} + \frac{A_w}{A} \right) - \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right) + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right)^2 \left(\frac{A_w}{A} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)}$	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) + \frac{f}{2} (1 - \alpha - \frac{f}{3}) \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_f}{A} \right) - \alpha \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right)$
	$-\epsilon_{yp} > \epsilon_e \geq -\epsilon_{ys}$ $\epsilon_{ys} \geq \epsilon_s$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\phi}{\phi_{cr}} - \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} + \frac{\sigma_{yp}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right)$	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) - \alpha \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} + \frac{\sigma_{yp}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right)$

表 4 軸力, モーメント式 (負の曲げ) 続

歪分佈	歪範圍	$\frac{P}{P_{cr}}$	$\frac{M}{M_{cr}} \cdot \frac{S}{\Lambda d}$
	$-\epsilon_{yp} > \epsilon_e \geq -\epsilon_{ys}$ $\epsilon_s \geq \epsilon_{ys}$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \left(\frac{\epsilon_e - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_f + \Lambda_w}{\Lambda} \right) - \left(\frac{\epsilon_e + \sigma_{yp}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_p}{\Lambda} \right) + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\epsilon_e - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right)^2 \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)}$	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) + \frac{f}{2} \left(1 - \alpha \frac{f}{3} \right) \left(\frac{\epsilon_s - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{\epsilon_s - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_f}{\Lambda} \right) - \alpha \left(\frac{\epsilon_s + \sigma_{yp}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_p}{\Lambda} \right)$
	$-\epsilon_y > \epsilon_e \geq -\epsilon_{yp}$ $\epsilon_{ys} > \epsilon_s \geq 0$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\phi}{\phi_{cr}} - \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\epsilon_e + \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right)^2 \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)}$	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) - \alpha \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_p}{\Lambda} \right) - \frac{g}{2} \left(\alpha - \frac{g}{3} \right) \left(\frac{\epsilon_e + \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right)$
	$-\epsilon_{ys} > \epsilon_e \geq -\epsilon_{yp}$ $\epsilon_s \geq \epsilon_{ys}$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \left(\frac{\epsilon_e - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_f + \Lambda_w}{\Lambda} \right) - 2\alpha \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)}$	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) + \frac{f}{2} \left(1 - \alpha \frac{f}{3} \right) \left(\frac{\epsilon_s - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{\epsilon_s - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_f}{\Lambda} \right) - \alpha \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_p}{\Lambda} \right) - \frac{g}{2} \left(\alpha - \frac{g}{3} \right) \left(\frac{\epsilon_e + \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right)$
	$-\epsilon_{yp} \geq \epsilon_e$ $-\epsilon_{ys} > \epsilon_s \geq 0$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\phi}{\phi_{cr}} - \left(\frac{\epsilon_e + \sigma_{yp}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_p}{\Lambda} \right) - \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\epsilon_e + \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right)^2 \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)}$	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) - \alpha \left(\frac{\epsilon_s + \sigma_{yp}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_p}{\Lambda} \right) - \frac{g}{2} \left(\alpha - \frac{g}{3} \right) \left(\frac{\epsilon_e + \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right)$
	$-\epsilon_{yp} \geq \epsilon_e$ $-\epsilon_{ys} \geq \epsilon_s$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \left(\frac{\epsilon_e - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_f + \Lambda_w}{\Lambda} \right) - \left(\frac{\epsilon_e + \sigma_{yp}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_p}{\Lambda} \right) - 2\alpha \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)}$	$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) + \frac{f}{2} \left(1 - \alpha \frac{f}{3} \right) \left(\frac{\epsilon_s - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{\epsilon_s - \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_f}{\Lambda} \right) - \alpha \left(\frac{\epsilon_s + \sigma_{yp}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_p}{\Lambda} \right) - \frac{g}{2} \left(\alpha - \frac{g}{3} \right) \left(\frac{\epsilon_e + \sigma_{ys}}{\epsilon_{cr} \sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\Lambda_w}{\Lambda} \right)$

表 5 軸力, モーメント式 (正の曲げ)

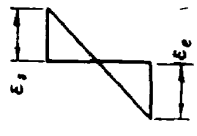
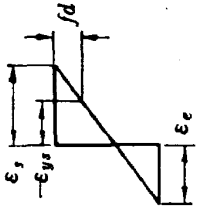
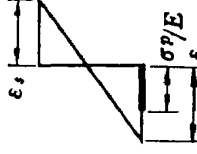
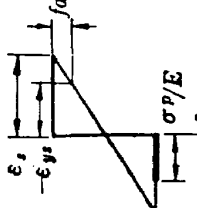
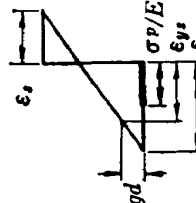
歪分布	歪範囲	$\frac{P}{P_{cr}}$	$\frac{M}{M_{cr}} \cdot \frac{S}{Ad}$
	$\epsilon_{cr} > \epsilon_e \geq 0$ $\epsilon_e > \epsilon_s \geq -\epsilon_{ys}$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\phi}{\phi_{cr}}$	$-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) + \alpha \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right)$
	$\epsilon_{cr} > \epsilon_e \geq 0$ $-\epsilon_{ys} > \epsilon_s$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} + \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_f}{A} + \frac{A_w}{A} \right) + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} + \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right)^2 \left(\frac{A_w}{A} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)}$	$-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) + \alpha \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_f}{A} \right) + \frac{f}{2} \left(1 - \alpha - \frac{f}{3} \right) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right)$
	$\epsilon_{ys} > \epsilon_e \geq \epsilon_{cr}$ $\epsilon_e > \epsilon_s \geq -\epsilon_{ys}$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\phi}{\phi_{cr}} + \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right)$	$-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) + \alpha \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right)$
	$\epsilon_{ys} > \epsilon_e \geq \epsilon_{cr}$ $-\epsilon_{ys} > \epsilon_s$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} + \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} + \frac{A_f}{A} \right) + \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right) + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} + \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right)^2 \left(\frac{A_w}{A} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)}$	$-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) + \alpha \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right) + (1-\alpha) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_f}{A} \right) + \frac{f}{2} \left(1 - \alpha - \frac{f}{3} \right) \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} + \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right)$
	$\epsilon_e \geq \epsilon_{ys}$ $\epsilon_{ys} > \epsilon_s \geq -\epsilon_{ys}$	$\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\phi}{\phi_{cr}} + \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} - \frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right) - \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right)^2 \left(\frac{A_w}{A} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)}$	$-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) + \alpha \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right) - \frac{g}{2} \left(\alpha - \frac{g}{3} \right) \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right)$

表 5 軸力, モーメント式 (正の曲げ) 続

歪分分布	歪範囲	用	$\frac{P}{P_{cr}}$	$\frac{M}{M_{cr}} \cdot \frac{S}{Ad}$
	$\varepsilon_e \geq \varepsilon_{ys}$ $-\varepsilon_{ys} > \varepsilon_s$		$\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} - \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} + \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_f}{A} + \frac{A_w}{A} \right)$ $+ \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right)$ $+ 2\alpha \left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) \frac{1}{\left(\frac{\phi}{\phi_{cr}} \right)}$	$-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \alpha \right) \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right) + \alpha \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{cr}} - \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} \right) \left(\frac{A_p}{A} \right)$ $+ (1 - \alpha) \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} + \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_f}{A} \right) + \frac{f}{2} \left(1 - \alpha - \frac{f}{3} \right) \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{cr}} + \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right)$ $- \frac{g}{2} \left(\alpha - \frac{g}{3} \right) \left(\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{cr}} - \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{cr}} \right) \left(\frac{A_w}{A} \right)$

- | | | | |
|---------|--|-----------|---|
| TR-124 | FM 多重テレメータの動特性
Dynamic Characteristics of FM Multi-channel Telemetry System | 1966年12月 | 新田慶治, 桜井善雄
松崎良継 |
| TR-125T | Experimental and Calculated Results of Supersonic Flutter Characteristics of a Low Aspect-Ratio Flat-Plate Surfaces | Jan. 1967 | Eiichi NAKAI, Toshiro TAKAGI, Koji ISOGAI, Toshiyuki MORITA |
| TR-126 | 高負荷燃焼器の箱形模型による実験 (II)
Some Experiments on High Intensity Combustor with Partial Models (II) | 1967年2月 | 大塚貞吉, 福田 広
相波哲朗 |
| TR-127 | 周波数変換による微小回転角の計測
Measurement of Small Rotating Angle by the Frequency Modulation Technique | 1967年3月 | 大月正男, 鈴木孝雄
円居繁治 |
| TR-128 | 輻射加熱による固体の熱的物性値の測定法
Infra-red Radiation Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity of Solid Materials | 1967年3月 | 小川 敏一 |
| TR-129 | 金屬箔による円管流の熱絶縁
Thermal Insulation of Metal Foil for the Case of Circular Pipe Flow | 1967年3月 | 井上建二 |
| TR-130T | An Experimental Study of the Melting Phenomena in Axisymmetric Stagnation Region of Thermally Highly-Conducting Materials | Mar. 1967 | Yasuhiko AIHARA |
| TR-57 | 超音速二次元翼の非定常ピッチングモーメント係数の測定
Measurements of the Aerodynamic Derivatives of an Oscillating Airfoil in Supersonic Flow at Mach Numbers from 2 to 3
(欧文刊行済み) | 1967年3月 | 柳沢三憲, 石井孝雄 |
| TR-131 | 風があるときのロケットの運動の近似解析によるランチャ角修正法
An Approximate Analytical Solution for Dispersion of Unguided Rockets Due to Wind with its Application to the Calculation of Wind Compensation for Launching | 1967年4月 | 毛利 浩 |

航空宇宙技術研究所報告132号

昭和42年4月発行

発行所	航空宇宙技術研究所 東京都調布市深大寺町1880 電話武蔵野三鷹(0422) 44-9171 (代表)
印刷所	株式会社 東京プレス 東京都板橋区桜川 2-27-12
