

H 形断面柱の座屈耐力に関する実験的研究

若林 実・辻 文三・木村信也

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE BUCKLING STRENGTH OF WIDE FLANGE COLUMNS

by *Minoru WAKABAYASHI, Bunzo TSUJI and Shinya KIMURA*

Synopsis

This report presents the experimental investigation on the buckling strength of wide flange sections with and without residual stresses due to flame cutting and welding.

The buckling tests are performed for the columns under central and eccentric loading on the strong axis of the cross-section. Measurement of the residual stress distribution and stub-column tests are also conducted.

The magnitude of the residual stress measured by the layer removal method is rather small; its distribution reasonably corresponds to the hysteresis of heating. The buckling test result shows that the strength of the member, which was constructed by flame cutting and welding, is a little weaker than that of the annealed member.

1. 序

鋼構造部材には、製造工程で受ける熱サイクル、強制変形等による塑性変形にともなって残留応力が存在している。特に溶接によって組み立てられる部材には、圧延鋼材に比べてより大きい応力が内在していると考えられる。残留応力の大きさ、分布形は断面形、製造方法、材質等により異なる。本研究では、H形断面材を種々の製造方法で作製し、残留応力の測定、短柱圧縮実験、中心圧縮実験、強軸上の偏心圧縮実験を行ない、残留応力の分布形、大きさ及び溶接による熱応力に伴って、部材の座屈耐力がどのように変化するかを検討する。

2. 実験計画

(1) 試験体

試験体は SS 41 の鋼板を溶接して組み立てた H 形鋼 (H-100×100×6×8) から採取し、その製造方法から、以下の 3 Series に分れる。

WF-Series ; 鋼板から溶断により切り出された板を溶接して組み立てたもの。

WR-Series ; 鋼板から溶断により切り出された板を焼鈍した後、溶接組立したもの。

WA-Series ; WF-Series と同じものを成形後焼鈍したもの。

溶接はサブマージドアーク溶接である。焼鈍条件は 600~650°C で 4 時間加熱、4 時間炉中放置とする。

(2) 引張試験

フランジ、ウェブ用鋼板から採取した 1 号引張試験片を用いて、降伏応力度、その他の機械的特性を試べた。結果は Table 1 に示す。

Table 1 Mechanical Properties

Series		WF	WR		WA
Slenderness ratio		40, 60, 70, 80	40, 80	60, 70	40, 80
Yield point (kg/cm ²)	flange	3250	2990	2630	2830
	web	3580	3010	3010	3010
Tensile strength (kg/cm ²)	flange	4500	4400	4050	4080
	web	4650	4150	4150	4150
Elongation (%)	flange	31	29	29	30
	web	35	32	32	32

(3) 残留応力の測定

溶接及び溶断により、溶接線、溶断線及びその近傍が局所的に塑性的な加熱冷却の熱サイクルを受けるために残留応力が生ずる。一般に溶接線、溶断線及びその近傍には引張応力が生じ、それから離れた部分にはそれと釣合うための圧縮残留応力が生じることが知られている。本実験に用いる 3 Series の試験体は製造過程において受ける熱サイクルの差異により区別されるものである。部材の全体的な挙動に影響を及ぼすと考えられるのは材軸方向に内在する応力であり、切断法によってこの残留応力を測定する。残留応力が、ほぼ一様に分布していると考えられる長さ約 1.5 m の材の中央部フランジ、ウェブの両面に Fig. 1 に示すように 34 枚の wire strain gage (W.S.G.) を貼付する。まず、材を W.S.G. を含む約 3 cm の長さに切断し、次に、材軸と平行方向に、各 W.S.G. を含む短冊形に切断する。切断は熱発生を防ぐために、電動ノコ、手ノコを併用し、電動ノコの場合には、冷却油を注ぎながら行なう。測定は切断後、各段階で歪の安定をまわって行なう。残留応力は、この切断による解放歪にヤング係数を乗じたものと考えられる。

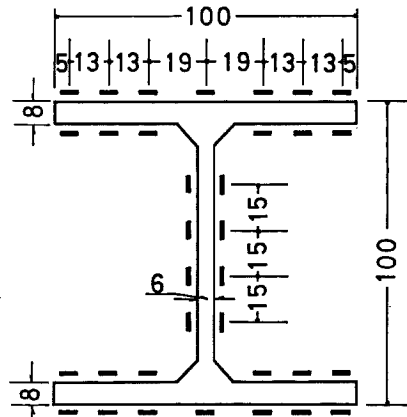


Fig. 1 Positions of Wire Strain Gages

(4) 短柱圧縮実験

材長を座屈長と考えた時、細長比 (λ) が 10.0 になる短柱 (材長 24.7 cm) について、各 Series とも 3 体ずつ圧縮実験を行ない、全断面についての平均的な応力度—歪度関係を求め、残留応力、溶接にともなう材質の変化等の影響を調べる。加力はアムスラー型 100 t 長柱試験機で行なう。試験機下部には固定板を取

り付け、上部には附属の球座を用いる。この場合、材端条件は、ほぼ一端固定、一端ピンと考えられる。測定は材中央部フランジ先端部各4点に W.S.G. を貼付し、更にフランジ側面には、精度 1/1000 mm の dial gage (D.G.) を取りつけ、全断面についての平均的な圧縮歪を測定する (Fig. 2 Photo 1 参照)。

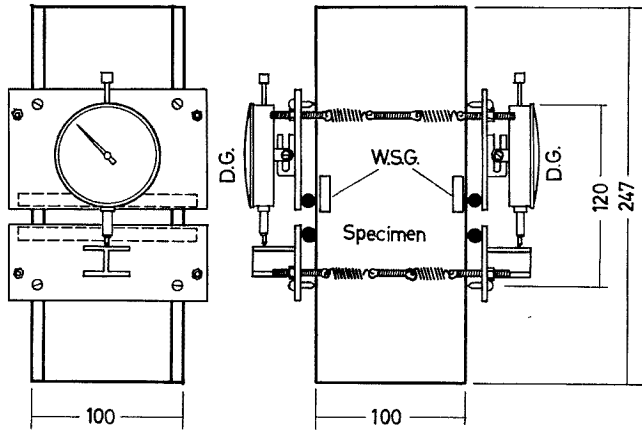


Fig. 2 Arrangements for Stub-Column Test

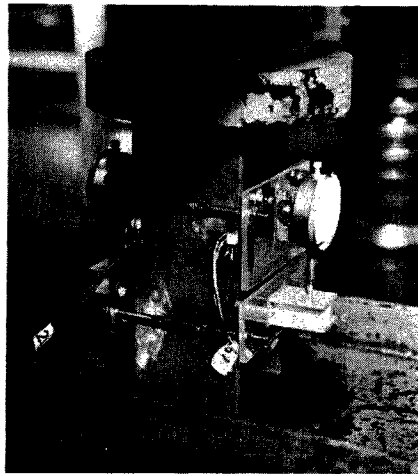


Photo 1 Arrangements for Stub-Column Test

(5) 座 屈 実 験

残留応力の影響が、最も顕著に表われるであろうと考えられる中程度の細長比を持つ材について、中心圧縮実験、及び強軸上の偏心圧縮実験を行なう。Table 2 に各試験体の細長比、材長、偏心量について示す。加力は短柱圧縮実験と同様、アムスラー型 100 t 長柱試験機で行ない、試験機上部及び下部には、油圧式球座を取りつける (Fig. 3, Photo 2 参照)。この球座の回転中心は、材端部に一致しているので、材長は座屈長に等しい。 d 部分に取り付けられた e は試験体をとりつけたまま、2方向へネジによって微動できるようになっており、微動量は 1/10 mm までバーニアによって読みとることができる。

Table 2 Specimens of Buckling Test

Slenderness ratio	40			60			70			80		
Length (mm)	988			1482			1729			1976		
Eccentricity (mm)	0	3.6	7.2	0	3.6	7.2	0	3.6	7.2	0	3.6	7.2
WF-Series	○	○	○		○	○		○	○		○	○
WR-Series	○	○	○		○	○		○	○	○	○	○
WA-Series	○	○	○								○	○

(○ Specimen)

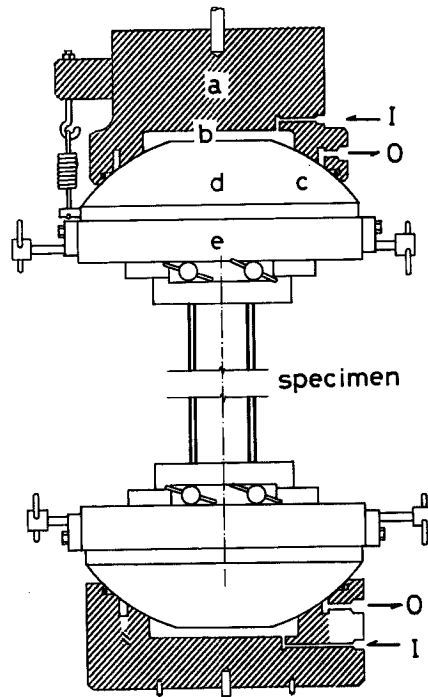


Fig. 3 End Supports

試験体とほぼ長さの等しい木製枠を、上端ピン、下端ローラー支持によって、試験体に取り付け、材中央部から D.G. 取付腕木を出して、2 主軸方向のたわみを D.G. により測定する。断面の重心を決定する操作のため、更に加力中の歪度分布を測定するため、両材端及び中央部断面フランジ先端部各 4 点に W.S.G. を貼付する (Fig. 4 参照)¹⁾。

予想耐力の約 20% までの荷重をかけ、W.S.G. によって、断面内の歪度分布、D.G. によって、2 主軸方向たわみを測定する。D.G. によるたわみの測定値が零に近づくように、又各断面 4 点の W.S.G. の値が等しくなるように、加圧板の位置を微動装置により調整する。この操作を数回繰り返して、できる限り加力線と重心軸が一致するようにした後、改めて本載荷に移る。偏心圧縮実験の場合には、上記の方法で、加力線と重心軸をできる限り一致させた後、球座の加圧板に取り付けられたバーニアによって、所要の偏心量だけ移動させ、本載荷に移る。

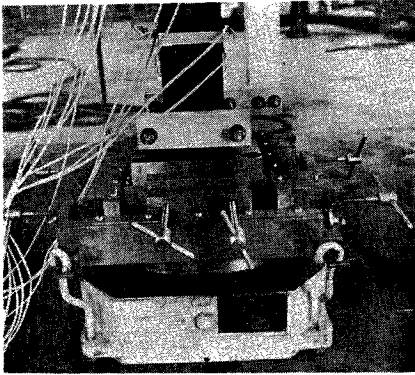


Photo 2 Lower End Support

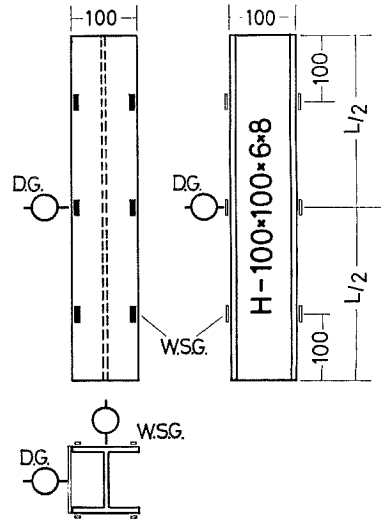


Fig. 4 Positions of Wire Strain Gages & dial Gages

3. 結果及び考察

(1) 残留応力の測定結果

切断法によって得られた残留応力の大きさは2主軸に対して、必ずしも対称形に分布しないが、平均してみると Fig. 5 のように一つの明確な分布形が得られる。WF-Series では、溶断と溶接という2回の熱サイクルを受けているため、フランジ先端部及びフランジとウェブの結合点に引張残留応力が生じる。ウェブ中央部及びフランジ $\frac{1}{4}$ 分点近傍に圧縮残留応力が生じている。ウェブの圧縮残留応力は、降伏応力度(σ_y)の0.44倍、フランジは0.12 σ_y である。WR-Seriesでは、溶断による残留応力は応力焼鈍により、ほとんど消滅しており、溶接による残留応力が、主なものと考えられる。フランジとウェブの結合点にある溶接線の近傍に引張残留応力が存在し、フランジ先端部、ウェブ中央部に圧縮残留応力が存在する。フランジ、ウェブの残留応力は、それぞれ0.11 σ_y 、及び0.35 σ_y である。溶接線近傍の引張残留応力は0.31 σ_y である。WF-Seriesに比して圧縮残留応力は小さく、引張残留応力は大きい。WA-Seriesでは、残留応力はWF-Seriesとほぼ同じ分布形を示すが、その大きさは、最大応力で0.08 σ_y と非常に小さく、応力焼鈍はほぼ完全であったと考えられる。

(2) 短柱圧縮実験

Fig. 6 は D.G. 測定結果から得られた平均的な応力度-歪度関係の一例である。WA-Series では、明確

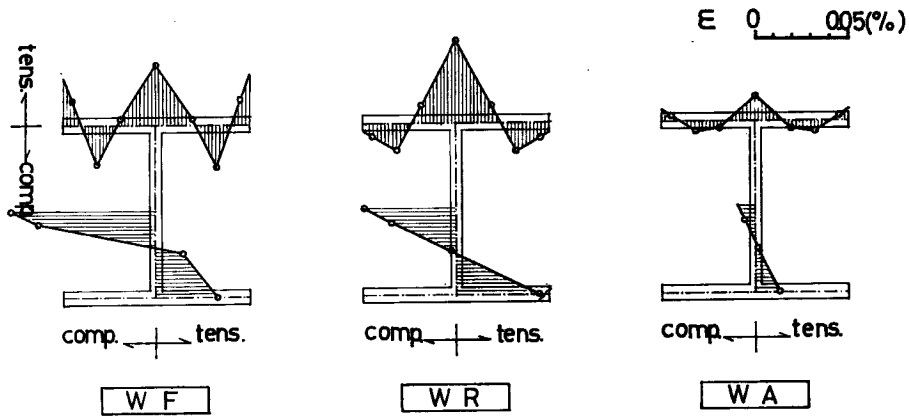


Fig. 5 Magnitude and Distribution of Residual Stress

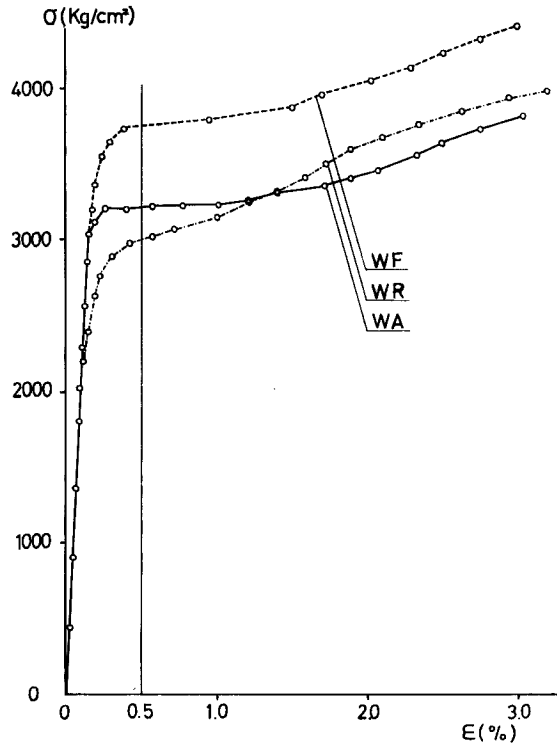


Fig. 6 Stress-Strain Curves from Stub-Column Test

な降伏の踊り場が存在し、その形状は歪硬化域に至るまでは、ほぼ理想弾塑性と考えてよい。WF, WR-Series では、踊り場が明確でなく、歪の増大にともない応力も増大し、引張試験から得られる素材の応力度—歪度関係とは異った性状を示している。これは残留応力とともに溶接及び溶断による熱影響部、及び溶着金属の影響と考えられる。全断面に対する降伏応力度を歪度0.5%時の応力とすると、各 Series の降伏応

力度は、WF-Series 3715 kg/cm^2 、WR-Series 2990 kg/cm^2 、WA Series 3260 kg/cm^2 である。各試験体とも歪度 $0.5\sim 1.0\%$ の間で局部座屈が起り、局部座屈後も応力は更に増大する。Photo 3 に、実験後の試験体の状態を示す。

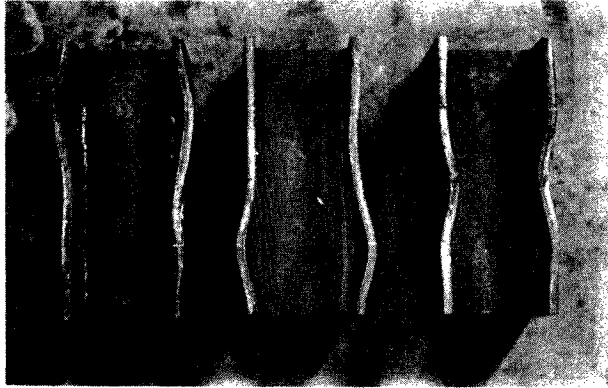


Photo 3 Specimens after Stub-Column Test

(3) 座 屈 実 験

座屈変形は、WR-Series 中心圧縮柱 ($\lambda=40$) が曲げ捩れ座屈を起した以外は、すべて弱軸まわりの曲げ座屈であった (Photo 4, 8)。D.G. による荷重一変位関係、及びそれと対応する荷重一中央部歪度関係の

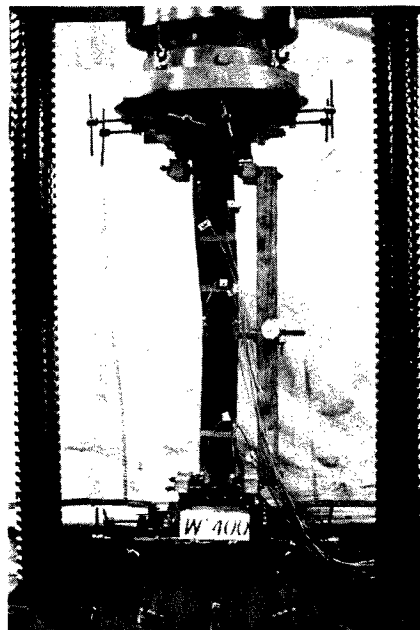


Photo 4 Specimen after Buckling Test, WR-Series, $\lambda=40$, $m=0$
(Torsional-Flexural Buckling)

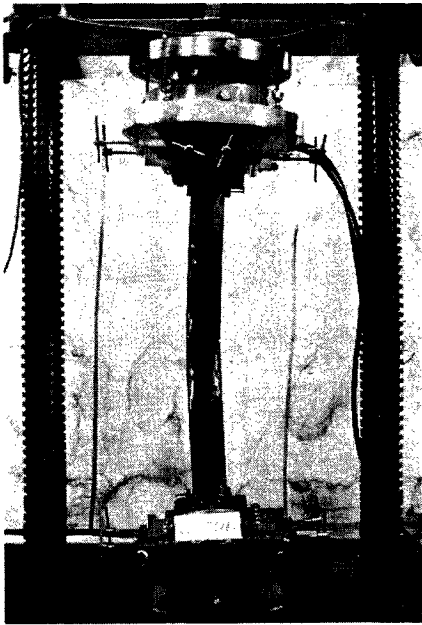


Photo 5 Specimen after Buckling Test, WF-Series, $\lambda=40$, $m=0$

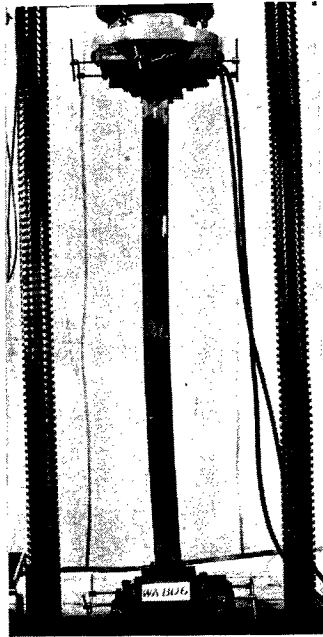


Photo 6 Specimen after Buckling Test, WA-Series, $\lambda=80$, $m=0.6$

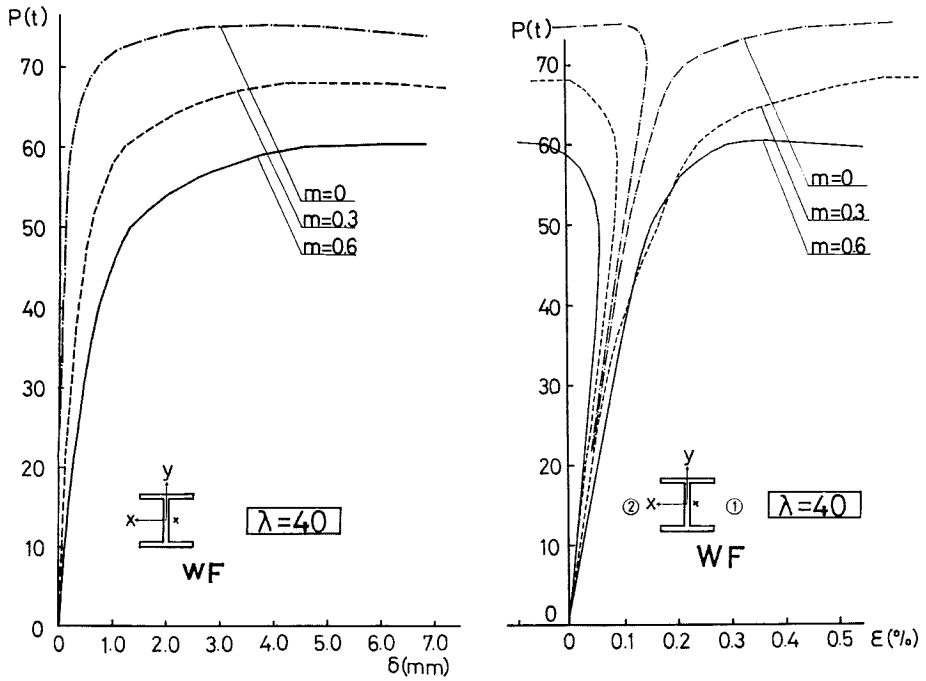


Fig. 7 Load-Deformation Relation, WF-Series, $\lambda=40$

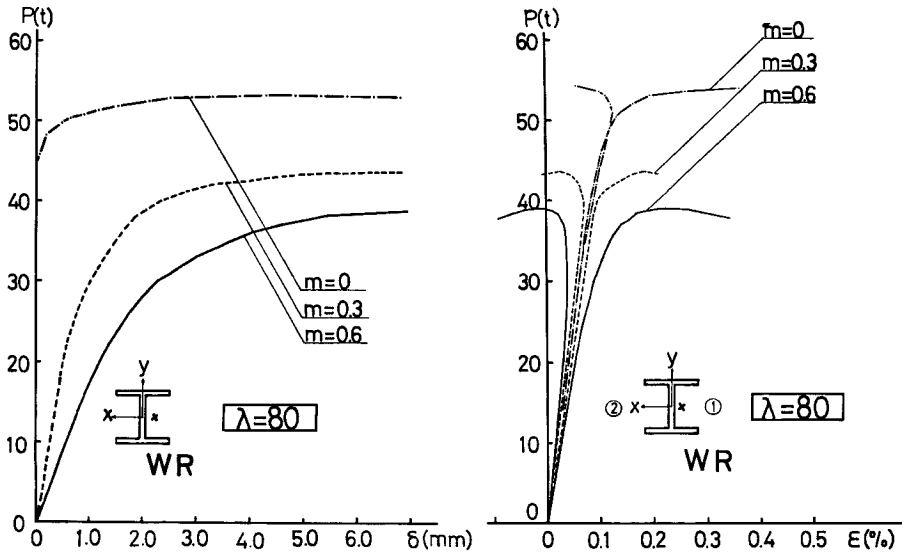


Fig. 8 Load-Deformation Relation, WR-Series, $\lambda=80$

例を Fig. 7. 8 に示す。図中 m は偏心率（偏心量／核半径）を表わす。中心圧縮材では耐力の 90% 前後に至るまで、横方向変形を生ぜず、曲げ圧縮側歪度①と、曲げ引張側歪度②とはほぼ一致する。それ以上の荷重で、変形は急激に増大し、歪度も①では急激に増大し、②では歪の逆転が生じ、遂には引張域に入る。偏心圧縮材では、荷重初期段階から、たわみは漸次増大し、①②の歪度も分岐したまま、漸増する。又偏心率 0.3 では耐力の 75%、0.6 では耐力の 60% 程度から変形は大きく増大し、②の歪度の逆転は早期に発生する。なお耐力時の変形は、偏心が増すほど増大する。最大荷重時における中央部たわみは、WF, WR-Series では、ほとんど等しく、WA-Series では、それよりも小さい値を示す傾向がある。

4. 理 論 値

a) 中心圧縮柱の非弾性域における座屈

Engesser-shanley の tangent modulus theory を適用すれば、座屈応力度 (σ_{cr}) は

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_t \tau}{\lambda^2} \quad \text{但し} \quad \tau = \frac{E_t}{E} \quad \dots\dots\dots(1)$$

弾性域における Euler の座屈公式は $\tau=1$ で得られる。今、比例応力度 σ_p を $\sigma_p=0.8\sigma_y$ と仮定して DIN4114 で用いるような 2 次曲線形に仮定すれば、 τ は

$$\tau = 1 - \left(\frac{\sigma_{cr} - \sigma_p}{\sigma_y - \sigma_p} \right)^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

で与えられる¹⁾。

b) 偏心圧縮柱の非弾性域における座屈

偏心軸圧縮力を受ける材の座屈耐力に関する研究は Chwalla 等によってなされてきた。それは材の応力度—歪度関係を実際のものを用いて、たわみ形を求めるという方法である。その方法では、厳密な解がえられるが、それには非常に複雑な計算を要する。Ježek は、Fig. 9 に示すような理想弾塑性系の応力度—歪度曲線を用い、更にはたわみ形を正弦半波形に仮定して、非常に簡単な略算法を示した (Fig. 10)。ここでは、この方法に従って解析する²⁾。

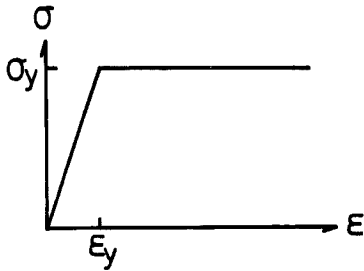


Fig. 9 Stress-Strain Relation

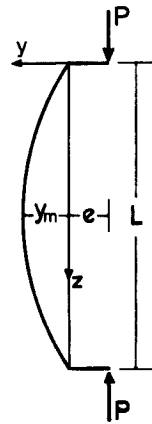


Fig. 10 Column Deflection

〈仮定〉

1. 無載荷状態で材は真直ぐであり、たわみ曲線は正弦半波形とする。
2. 材の応力度—歪度関係は理想弾塑性とする。
3. 载荷中に生じる歪は、平面を保持するものとする。
4. 曲げモーメント及び軸方向力の釣合いは、材の中央部断面で成立する。
5. ウェブの厚さは、充分に薄く、軸方向力のみを受けもち、曲げモーメントには抗しえないとする。

以上の仮定からH形断面柱の強軸上偏心圧縮耐力を計算する。

一般に2つの独立な量を与えることにより応力分布が決定される。圧縮縁から降伏域の境界までの距離 x 、及び曲率 ϕ をパラメーターとして選ぶ。

軸方向力及び曲げモーメントの釣合式は

$$N = \int_A \sigma dA = N(\phi, x) = P \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$M = \int_A \sigma y dA = M(\phi, x) = P(y_m + e) \quad \dots\dots\dots (4)$$

仮定より、たわみ曲線 (y) は

$$y = y_m \sin \frac{\pi}{L} z \quad \dots\dots\dots (5)$$

中央部断面での曲率 ϕ は

$$\phi = y'' = -\frac{\pi^2}{L^2} y_m \quad \dots\dots\dots (6)$$

(3), (4), (6) より, ϕ, x を消去すれば

$$F = F(P, L, e, y_m) \quad \dots\dots\dots (7)$$

又は

$$P = P(L, e, y_m) \quad \dots\dots\dots (8)$$

L, e が既知の場合、座屈条件式は

$$\frac{dF}{dx} = \frac{\partial F}{\partial P} \cdot \frac{dP}{dy_m} + \frac{\partial F}{\partial y_m} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

即ち

$$\frac{\partial F}{\partial y_m} = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

又は

$$\frac{dP}{dy_m} = 0 \quad \dots\dots\dots(11)$$

全断面についての応力状態は、弾性域を除いて、Fig. 11 のように4つの場合に分けられる。応力状態 A, B では、x を無次元化した \bar{x} を、応力状態 C, D では、 y_m を無次元化した \bar{y}_m を、パラメーターとして用いる。

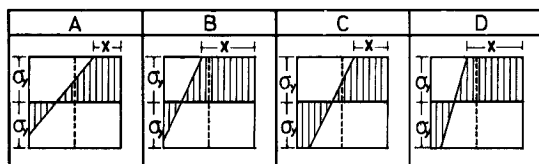


Fig. 11 Stress Distribution Pattern

1) 応力状態 A

軸方向力及び曲げモーメントの釣合式は、

$$N = 1 - 2y_m \frac{(1-x)^2 + (1-2x)D}{(1+D)} \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$M = 2\alpha y_m (1-x)^2 (x+0.5) \quad \dots\dots\dots(13)$$

中央断面での釣合式は、

$$M = N(m + y_m) \quad \dots\dots\dots(14)$$

(8), (9) を等置して

$$F = N(m + y_m) - 2\alpha y_m (1-x)^2 (x+0.5) = 0 \quad \dots\dots\dots(15)$$

座屈条件式は

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial y_m} = N - 2\alpha(1-x)^2(x+0.5) - 2\alpha y_m(1-x)^2 \frac{dx}{dy_m} \\ + 4\alpha y_m(1-x)(x+0.5) \frac{dx}{dy_m} = 0 \quad \dots\dots\dots(16) \end{aligned}$$

(16) 式に (12) 式を用いて消去すれば

$$N = 2\alpha(1-x)^2(x+0.5) - \frac{3\alpha x(1-x)\{(1-x)^2 + (1-2x)D\}}{1+D-x} \quad \dots\dots\dots(17)$$

(12), (15) 式より y_m を消去すれば

$$N \cdot m = \frac{3x(1-x)(1+D)(1-N)}{1+D-x} \quad \dots\dots\dots(18)$$

(17), (18) 式で x をパラメーターとして $N - \alpha^{-1/2}$ の関係が求まる。

中央部たわみ (y_m) は

$$y_m = \frac{(1-N)(1+D)}{\alpha[(1-x)^2 + (1-2x)D]} \quad \dots\dots\dots(19)$$

2) 応力状態 B

軸方向力、曲げモーメントの釣合式は

$$N = 1 - \alpha y_m \frac{(1-x)^2}{1+D} \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$M=2\alpha y_m(x+0.5)(1-x)^2 \quad \dots\dots\dots(21)$$

応力状態 A の場合と同様に、座屈耐力式から y_m を消去して

$$N=\alpha(1-x)^3 \quad \dots\dots\dots(22)$$

(14), (29), (21) 式より y_m を消去して

$$N=\frac{3x(1+D)}{3x(1+D)+m} \quad \dots\dots\dots(23)$$

中央部たわみは

$$y_m=\frac{(1+D)(1-N)}{\alpha(1-x)^2} \quad \dots\dots\dots(24)$$

3) 応力状態 C

軸方向力及び曲げモーメントの釣合式は

$$N=\frac{2(1+\alpha D y_m)}{1+D}\left(x+\frac{1-\alpha y_m}{2\alpha y_m}\right) \quad \dots\dots\dots(25)$$

$$M=6\left\{-\frac{1}{3}\left(\frac{1}{\alpha y_m}\right)^2+\frac{1-2x}{2\alpha y_m}+x(1-x)\right\} \quad \dots\dots\dots(26)$$

(14), (25), (26) 式より、 x を消去して

$$N(m+y_m)=6\left\{\frac{1}{4}-\frac{1}{12(\alpha y_m)}-\frac{N^2(1+D)^2}{4(1+\alpha D y_m)}\right\} \quad \dots\dots\dots(27)$$

$\frac{dN}{dy_m}=0$ より

$$N=\frac{\alpha}{(\alpha y_m)^3}+\frac{3\alpha D N^2(1+D)^2}{(1+\alpha D y_m)^3} \quad \dots\dots\dots(28)$$

(27), (28) 式より、 x を消去して

$$N=\frac{3+\frac{1}{D}\left(\frac{1}{\alpha y_m}\right)^3}{3y_m+2m+\frac{1}{\alpha D}} \quad \dots\dots\dots(29)$$

(28), (29) 式において、 y_m をパラメーターとして $N-\alpha^{-1/2}$ の関係を求めうる。

4) 応力状態 D

軸方向力、曲げモーメントの釣合式は

$$N=\frac{1}{1+D}(2x+D+\frac{1}{\alpha y_m}-1) \quad \dots\dots\dots(30)$$

$$M=6\left\{-\frac{1}{3}\left(\frac{1}{\alpha y_m}\right)^2+\frac{1-2x}{2\alpha y_m}+x(1-x)\right\} \quad \dots\dots\dots(31)$$

応力状態 C と同様に、 x を消去して

$$N(m+y_m)=-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\alpha y_m}\right)^2+1.5-1.5\{D-N(1+D)\}^2 \quad \dots\dots\dots(32)$$

$$N=\frac{\alpha}{(\alpha y_m)^3} \quad \dots\dots\dots(33)$$

真の座屈荷重は、仮定した応力分布から求まる座屈荷重が、仮定した応力分布を満たしている場合である。

<記号>

偏心圧縮柱の座屈耐力計算に用いた記号はすべて無次元化で与える。

N ; 軸力/降伏軸力

M ; モーメント/降伏モーメント

α ; Euler 荷重/降伏軸力

y_m ; たわみ量/核半径

x ; 圧縮縁から降伏域までの距離 (x)/フランジ幅

m ; 偏心量/核半径

D ; ウェブ面積/フランジ面積

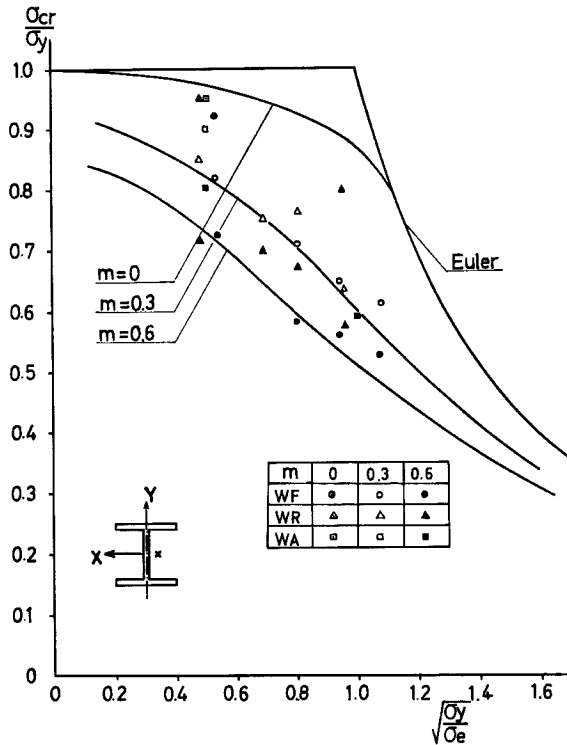


Fig. 12 Column Curve

Fig. 12 図中の曲線は、上記 Ježek の略解法を用いて計算した結果から得られる座屈曲線、及び $\sigma_p = 0.8\sigma_y$ とした tangent modulus 式の座屈曲線を示す。引張試験の結果によれば、ウェブの降伏応力度 σ_{yW} とフランジの降伏応力度 σ_{yF} とは異なり、 σ_{yW}/σ_{yF} の値は、約 1.0, 1.05, 1.10, 1.15 の 4 種類がある。しかし座屈曲線を全断面の降伏軸力を基準に無次元化すれば、座屈曲線は σ_{yW}/σ_{yF} の値にかかわらず、ほとんど一致する。ここでは短柱圧縮実験の結果を考慮して、歪度 0.5% 時の応力を降伏応力度と考えて解析を行なった。

中心圧縮柱の座屈耐力は、WF, WR, WA 各 Series とほとんど等しい値を示し、 $\sigma_p = 0.8\sigma_y$ とした tangent modulus 式より、やや小さい。偏心圧縮材の耐力は、WA-Series が WF, WR-Series に比して大きく、WF, WR-Series は、ほぼ等しく、計算値に一致している。

参 考 文 献

- 1) 横尾義貫, 若林 実, 野中泰二郎: 単一山型鋼の座屈耐力に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告雄, 1964/7, pp. 34-40.
- 2) 若林 実, 辻 文三: 残留応力をもつH形断面柱の偏心圧縮座屈耐力について—その1 理想断面の場合—, 京都大学防災研究所年報, 1967, pp. 631-643.