

高張力鋼部材の耐力

加 藤 勉^{*}
秋 山 宏^{**}
内 田 直 樹^{***}

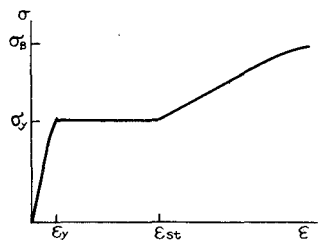
1. 序

鋼構造物は、それがどの様な鋼材を用いて造られようとも、破壊に対して同一の安全率を持つ様に設計されることが望ましい。その為には、構造物の各要素の耐力が鋼材の性質の相違に応じて正確に求められねばならない。

鋼材の性質を端的に示すものは鋼材のStress-Strain 関係である。鋼のStress-Strain 関係には塑性流れの現象が顕著である為、鋼構造部材の耐力を求める際には、しばしばStress-Strain 関係はelasto-plastic であると考えられ、歪硬化は無視される。しかし、歪硬化によって断面の負荷能力及び部材の剛性は増すので、部材の耐力は歪硬化に影響され歪硬化を無視すれば実際より小さな耐力が求まることになる。従って、単純にStress-Strain 関係をelasto-plastic であるとしてしまうと、歪硬化の影響は解析結果に反映され得ず、結果を設計に応用すれば、SS41 鋼の様に歪硬化の著しいものとelasto-plastic に近い高張力鋼では歪硬化に対する依存度が異なる為、破壊に対する安全率はだいぶ異なることが予想される。そこで本文では、素材の歪硬化を無視せずに部材の耐力を求めるを試みる。対象とする部材はラーメン構造の梁及び柱材で、部材断面は破壊時迄同一に保たれ、局部破壊は生ずることなく、材全体が曲げ変形のみを生じて崩壊に到る場合を扱う。解析の結果はSS41 鋼材を用いた柱材の実験結果と比較検討される。また、H形断面、及び管形断面を持つ部材の耐力をSS41 鋼及び60キロ高張力鋼の代表的なStress-Strain 関係を用いて求め、耐力に及ぼす歪硬化の影響を量的に明らかにし、単に降伏点のみでなく、歪硬化⁽¹⁾をも考慮することによって鋼構造部材一般の耐力が得られることを示す。

2. 解 析 法

鋼素材のStress-Strain 関係はオ1図に示されるものが一般的である。オ1図を特徴づけるものは降伏応力度、塑性流れ歪度、歪硬化の勾配、破断応力度等である。このstress-strain 関係を用いれば部材各断面の曲げモーメントと曲率との関係が得られる。部材の荷重状態はオ2図で代表される。オ



オ 1 図



オ 2 図

* 東京大学助教授、工博

** 同助手

*** 同大学院生

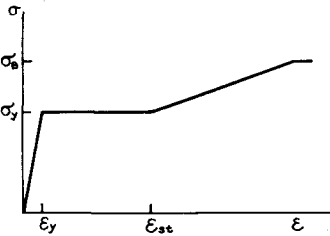
2 図に於て、部材の変形及び耐力は荷重 P, Q の加力順序に影響されるが、軸力 P が降伏軸力以下である時にはその影響は微小であると考えられるので、先づ軸力 P が加わり、その後に横力 Q が加わる場合の耐力を求めることにする。従つて曲げモーメントと曲率の関係は、一定軸力 P を parameter として求められる。力の釣合方程式はオ 1 式の様になる。

$$\bar{M}(\theta) = M = P y + Q x \dots\dots\dots(1)$$

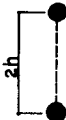
M : 外力による曲げモーメント, $\bar{M}$: 応力としての曲げモーメント, θ : 曲率

これより変位に対する荷重の極大値として耐力が得られる。一般に、 $\bar{M}(\theta)$ は単純な関係ではないので、オ 1 式の積分は数値積分によらねばならない。その場合には、オ 2 図に於て P と Q をあらかじめ定め、固定端 A のモーメントを与え釣合状態に於ける部材長さ L を求める。固定端モーメントに対する L の極大値を求めれば、部材長 L についての一つの耐力の組合わせ P, Q が定まる。この演算は解の収斂性等を考慮する反復計算ではないので電子計算機を使えば簡単に行なえる。しかし本文では歪硬化の耐力に及ぼす影響、及び高張力鋼の耐荷特性を概略的に把握することにし、解析は出来る丈単純化して得られた結果から要点のみを抽出することを試みる。

先づ、素材の Stress-Strain 関係としてオ 3 図のものを考える。歪硬化域での勾配は降伏応力度から破壊応力度に到る迄歪硬化初期の勾配を保ちつづけるものとする。断面の曲率と曲げモーメントとの関係は、オ 4 図に示される断面の面積要素が 2 点に集中しているものの場合から類推することにする。



オ 3 図



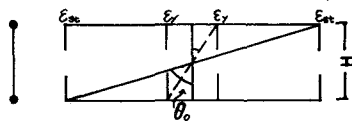
オ 4 図

先づ、軸力が無い場合、曲げモーメントによる塑性流れ開始点の歪度分布はオ 5 図 a の点線で示され歪硬化開始点の歪度分布は実線で示される。次に、軸力が降伏軸力に達した場合には、歪硬化開始点の歪度分布はオ 5 図 b の実線で示されるものになる。ヤング率を E, 歪硬化の勾配係数を E_{st} とすれば、諸量はオ 1 表の様になる。

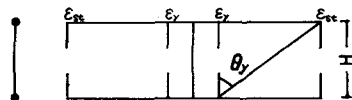
オ 1 表

曲率及び剛性 \ 軸力	P = 0	P = P _y
弾性域の曲げ剛性	E I	E I
塑性流れ開始点の曲率	ϵ_y / h	0
歪硬化開始点の曲率	$\theta_o = \epsilon_{st} / h$	$\theta_y = (\epsilon_{st} - \epsilon_y) / 2 h$
歪硬化域での剛性	$D_{sto} = E_{st} I$	$D_{sty} \approx 2 E_{st} I$

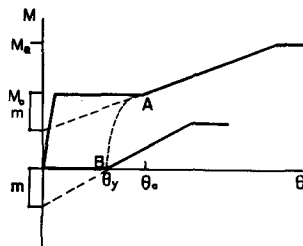
従って、曲げモーメントと曲率との関係は才 6 図に示されるものになる。軸力が両者の中間にある場合は、歪硬化開始後の曲率は、才 6 図に於て A 点を頂点とし B 点を通る放物線で表わせるものとする。また、歪硬化域での剛性も両者の間を連続的に変化すると考え次式の様に近似する。



才 5 図 a



才 5 図 b



才 6 図

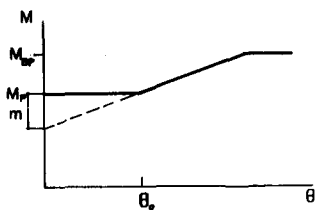
$$M_P = M_0 \left\{ 1 - \left(\frac{\theta_P - \theta_0}{\theta_y - \theta_0} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$D_{stP} = D_{sto} \left(2 - \frac{M_P}{M_0} \right) \dots\dots\dots (3)$$

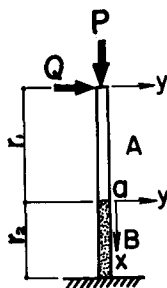
ここで、

M_P : 軸力 P の時の降伏曲げモーメント D_{stP} : 軸力 P の時の歪硬化域曲げ剛性

一般の断面形についても、 M_P の値を降伏応力度を用いた断面の full plastic moment とし、歪硬化域で取り得る最大曲げモーメントを破壊応力度を用いた断面の full plastic moment M_B として才 6 図のものと同様に曲率と曲げモーメントとの関係を近似的に定める。更に、弾性変形の耐力に及ぼす影響は小さいと考えられるので弾性変形を無視すると、曲率と曲げモーメントとの関係は才 7 図の様に単純化される。部材の応力は、才 8 図に於て、A 部分で弾性範囲であり、B 部分が歪硬化域であると



才 7 図



才 8 図

考える。a 点では曲率は不連続であるが、勾配は連続的である。弾性部分の変形は無視されるので、力の釣合は B 部分のみで考慮する。才 1 式は次のようになる。

$$M_P - m - D_{stP} \ddot{y} = Py + Qx + M_P \dots\dots\dots (4)$$

b 点は固定端であることを考慮すれば解は次の様になる。

$$y = \left(\frac{Q + m\beta}{P\beta \cos \beta r_2} \frac{\sin \beta r_2}{\beta r_2} \right) \sin \beta x + \frac{m}{P} \cos \beta x - \frac{Q}{P} x - \frac{m}{P} \dots\dots\dots (5)$$

これより固定端モーメント M_f は次の様に求まる。

$$M_f = \frac{Q \sin \beta r_2 + m \beta}{\beta \cos \beta r_2} + M_p - m \dots\dots\dots (6)$$

尚、上式で、 $\beta = \sqrt{\frac{P}{D_s t_p}}$ r_2 : 歪硬化域の長さ

一方、a 点ではモーメントは M_p に達しているから

$$P \dot{y}(0) r_1 + Q r_1 = M_p \dots\dots\dots (7) \quad \text{ここで } r_1 : \text{弾性域の長さ}$$

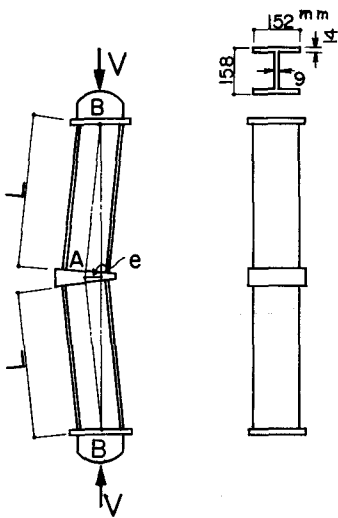
となり、与えられた P, Q, M_f に対して部材長さ $L = r_1 + r_2$ が上式から求まる。 P, Q を定め M_f を増加させて L の極大値を求めれば、一つの耐力の組合わせ (L, P, Q) が求まる。

しかし、梁の場合は勿論、柱の場合でもラーメン構造の下層部分の柱の様に細長比の小さい ($\lambda=10\sim 30$) 柱では、 M_f が破壊応力度を用いた断面の full plastic moment M_{BP} に達した場合に耐力が得られると考えても小さい誤差で耐力を求めることが出来る。本文ではこの様にして耐力を求め、実験値と比較し、歪硬化の役割について考察する。

3. 実験値との比較

ラーメン構造の下層部分の柱を想定して試験体を作成し実験⁽²⁾を行なった。部材の断面はH形で材質はSS41である。試験体の概略はオ9図に示される。部材長さ L は 45, 60, 75, 90 cm の4種類である。

オ9図で、A点是对称点であり角度変化を生じない為、オ8図に於ける固定端に対応し、端部Bには鋼製半円筒ローラーがボルト締めされており、移動自由で、オ8図の自由端に対応する。荷重は鉛直方向のVのみでVがABの傾斜角に応じて軸力 P と剪断力 Q に分配される。ただし、実験では P と Q の比率は常に一定に保たれる。加力は荷重Vが最大値に達し、更に試験体が不安定となって荷重が減少する迄続けられた。最終の崩壊形は、試験体がウェブを含む面内に極端に曲がり、更にA点から捩り変形が生ずるものであった。圧縮素材試験の結果はオ2表に示されている。

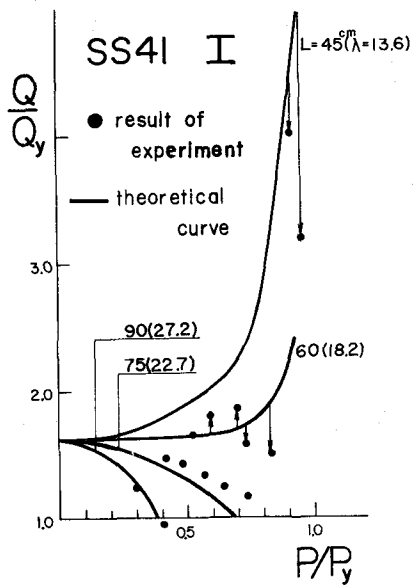


オ 9 図

オ 2 表

σ_y	2.62 t/cm ²
σ_B	4.30 t/cm ²
E	2100 t/cm ²
E_{st}	$E \times 0.033$

才 2 表に示す数値を用いて(5), (6), (7)式より得られた耐力の計算値が才 10 図に示されている。才 10 図に於て縦軸は軸力による附加曲げモーメントを無視した場合に、固定端モーメントが M_p になる時の Q で実際の耐力 Q の値を除した値を示し、また横軸は降伏軸力 P を除した値を示す。計算結果は実線で示され、実験結果は点で示されている。 $P = 0$ の場合は梁の場合であり、計算値の縦軸上の値は σ_B / σ_y となり、降伏比の逆数になる。実験結果は計算値と良く対応しており、歪硬化の耐力に及ぼす影響を明瞭に物語っている。



才 10 図

4. 鋼材質及び断面形と耐力との関連

以上の様な略算でもほぼ実際に近い耐力値を求めることができることが示されたが、ここでは、同様な方法を用いて、高張力鋼部材の耐力を求め、SS41 鋼部材の耐力との相違点を見出し、更に、部材の断面形の相違が耐力に及ぼす影響を極く大まかに論じようと思う。

先づ、過去に行なわれた鋼の素材試験結果⁽³⁾から標準的な Stress-Strain 関係を選ぶ。比較される鋼は、SS41 鋼と 60 キロ高張力鋼である。諸量は才 3 表の通りである。

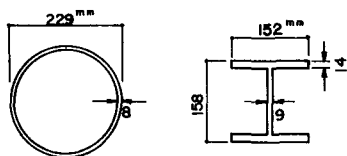
才 3 表

諸量 鋼	SS41	60 キロ鋼
σ_y	2.14 t/cm ²	5.08 t/cm ²
σ_B	4.59 t/cm ²	6.71 t/cm ²
E	2100 t/cm ²	2100 t/cm ²
ϵ_{st}	5810×10^{-6}	12000×10^{-6}
E_{st}	65 t/cm ²	40 t/cm ²

断面形としては才 11 図に示す H 形断面形と管形断面形を取りあげる。2 つの断面形の断面積及び断面係数は等しい。従って、いわゆる弾性設計式

$$\frac{N}{A} + \frac{M}{Z} \leq \sigma_y \dots\dots\dots (8)$$

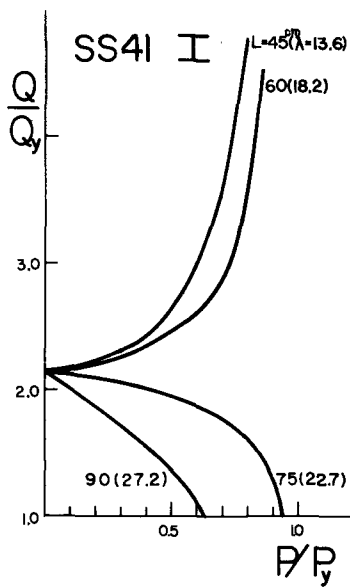
を用いた設計の上では等価な断面と云える。
 § 2 に示した計算を以上の断面形を持つ部材について行なえば、鋼種に応じて才 12 図の



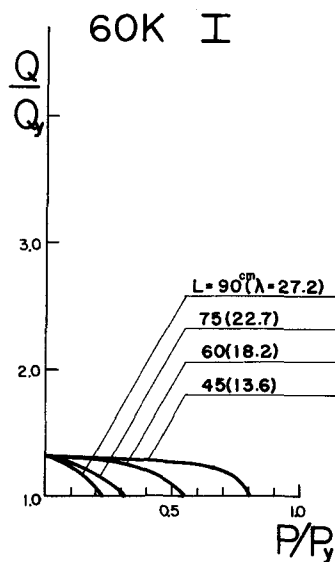
才 11 図

結果を得る。結果は才10図と同じ表示で示されている。

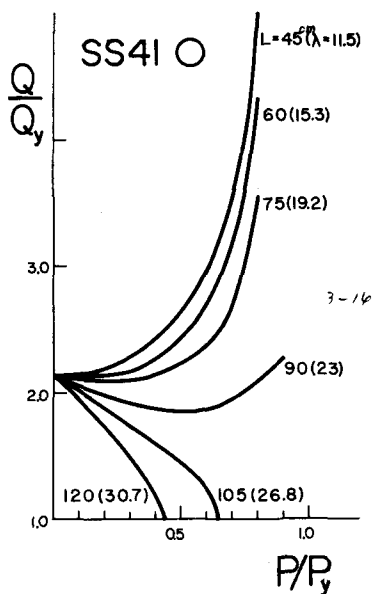
$P = 0$ の場合は縦軸上の値は明らかに降伏比の逆数であり、
 $P \neq 0$ の場合は、この値の上下に存在している。結果を比較
 してみると、次の様なことがわかる。



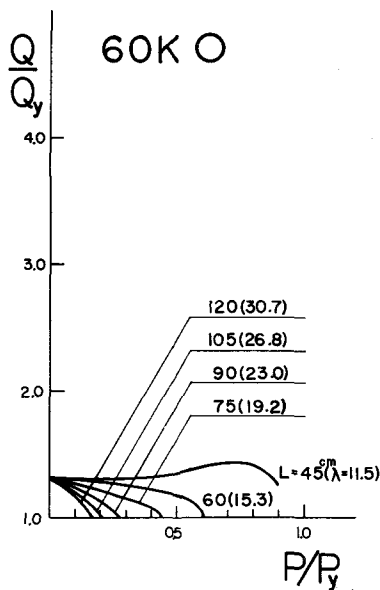
才 12 図 (a)



才 12 図 (b)



才 12 図 (c)



才 12 図 (d)

1. ラーメン構造の柱の存在軸力は $P < 0.7 P_y$ 程度であることを考慮すれば、短柱の耐力に及ぼす歪硬化の影響は顕著である。
2. SS41の場合、極く短い柱に於ては、歪硬化を無視した場合に比べて、歪硬化を考慮した場合の耐力は大きく、その比率は降伏比の逆数以上にも達する。軸力が大きい程この傾向は大きい。
3. 材長に応じて耐力は異なり、材長の大きいもの程、耐力の歪硬化への依存度は減少する。
4. 60キロ鋼では降伏比の大きいこと、及び歪硬化域の剛性の低さに対応して、歪硬化への耐力の依存度はSS41鋼に比べて極めて少ない。
5. 管形断面とH形断面とを比較すると、耐力値は同一の細長比のものではほぼ一致しているが、部材長さに着目すると値は可成り異なる。このことは、弾性設計に於ける設計式で断面の効率が評価され得ないことを示す。

5. 結 果

以上で耐力に及ぼす歪硬化の影響を明らかにし、鋼材種類により耐力が異なり、単純に elasto-plastic な Stress-Strain 関係を用いて耐力を一般的に求めることが出来ないことを示した。また、短柱の耐力を決定する上で重要な因子の一つとして細長比が挙げられることを示した。

今後の課題として、更に精度の高い解析結果から、単に降伏応力度のみならず、降伏比、歪硬化域の剛性等を含む耐力算定の一般式を導き出すことが残されている。

参考文献

- (1) 加藤 勉 “構造用鋼の許容応力度” 季刊カラム 15
- (2) 加藤 勉 秋山宏、内田直樹 “H形断面柱の耐力実験”

日本建築学会関東支部発表会論文集 1965年6月

- (3) 座屈小委員会 “構造用鋼材の機械的性質調査報告書”

日本建築学会論文報告集 才101号 昭和39年8月