

I-112

開断面鋼アーチ部材の面外座屈耐荷力

熊本大学 正員 崎元達郎, 坂田 力
 富士通大分 : 吉原哲宏
 大分県 : 渡邊輝光

1) まえがき: 曲線圧縮部材としてのアーチは重要な構造要素であり、その終局強度を明らかにすることが重要である。開断面アーチ部材で構成される構造の弾塑性挙動と面内・面外座屈に関連した耐荷力については、比較的多くの研究が報告されている。開断面アーチ部材は、中小支間のアーチ系橋梁、トンネル支保工、建築骨組として多用されるにもかかわらず、弾塑性ねじりを含む解析の困難さもあり、その弾塑性挙動と耐荷力は未だ十分に明らかにされていない。ここでは、開断面(I型断面)で構成される単一アーチ部材について、有限変位弾塑性解析を行い、初期たわみと残留たわみ及び構造諸元が、面外座屈耐荷力に与える影響を考察する。

2) 解析法と解析モデル: 解析には、有限変位と弾塑性を考慮し、拘束ねじりが考慮できる文献1)に示す有限要素法を用いた。解析モデルは、図-1

に示すように、2-ヒンジアーチで、側面形状は、円弧及び放物線とした。アーチは、支間方向に10等分し、直線要素で折線近似した。荷重は、面外座屈に対して最も危険な場合として、等分布荷重が満載する場合を考慮し、等価な9個の節点集中荷重として与えた。荷重の増加とともに、面内変位、面外変位、ねじり変形が増大するが、アーチの面外変形後の荷重方向は、図-1b)に示すように、鉛直を保つ重力荷重とした。図-1c)の平面図に示す w_0 は、面外(X)方向初期たわみを正弦半波と仮定した時の最大値を示している。

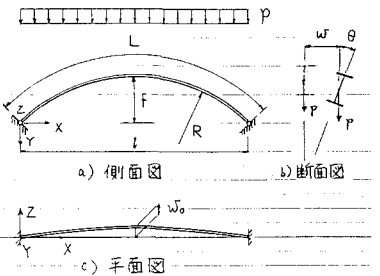


図-1 解析モデルの一般図

断面は、図-2に示すような寸法を有するI型断面とし、フランジ中 b を変化させることにより、所定の断面諸量を得た。材質は、SS 41 ($\sigma_y = 2400 \text{ kgf/cm}^2$)とした。断面の塑性化を評価するために、フランジの中方向及びウェブの高さ方向に10分割し、さらに板厚方向に8分割し、計80分割した。残留たわみは、圧延タイプ(rolled)と溶接タイプ(welded)とし、図-3に示す値と分布形を仮定し、各断面要素の初期たわみ値として与えた。以下の解析では、変位が急増する荷重-変位曲線の最大値をもって耐荷力とした。

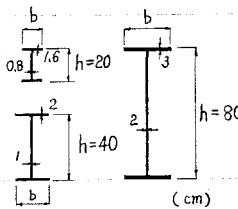


図-2 断面寸法

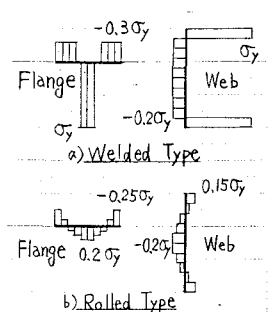


図-3 残留たわみの仮定

3) パラメーター: 弾性座屈解析の結果^{2,3)}によれば、開断面アーチの面外座屈は、細長比(L/r)、ライズ支間比(f/l)以外に、次式で定義されるパラメーター m 、 n に支配される。 $m = GI_x / EI_y$, $n = EC_w / R^2 EI_y$ ここに、 $GI_x = St$, Venantのねじり剛性、 $EC_w =$ 曲げねじり剛性、 $EI_y =$ 3(弱)軸まわりの曲げ剛性、 $R =$ アーチの半径である。フランジ中 b が大きくなれば m は小さくなる。 n は近似的には、 $(h/R)^2$ に比例するので、 f/l , l , L/r とは独立でなく、 f/l が大きくなるほど、 l , L/r が小さくなるほど大きくなる。フランジ中 b が高さ h より小さな現実的な断面では、 m は $10^{-2} \sim 10^{-1}$ の値となり、実用的な h/l の範囲($0.2 \sim 0.02$)では、 $m=0.01$ の時 $n=10^{-3} \sim 10^{-4}$, $m=0.1$ の時 $n=10^{-2} \sim 10^{-3}$ の値をとる。以下に示す図では、与えた荷重に対して線形理論で計算される支軸軸力 N を、降伏軸力 $A\sigma_y$ で無次元化したたわみ $\bar{\sigma} = \sigma/\sigma_y = N/A\sigma_y$ を荷重の代表値とし、最大荷重(耐荷力)は $\bar{\sigma}_u = \sigma_u/\sigma_y = N_u/A\sigma_y$ で表す。また、アーチを展開した材長 L の両端固定柱(有効長さ係数0.5)としての細長比係数 $\lambda = (1/\pi) \sqrt{\sigma_y/E} \cdot (0.5L/r)$ も直柱との比較の為のパラメーターとする。

また、以下の図中の破線は、道路橋示方書に与えられている直柱の基準耐力曲線である。

4) 解析結果： 図-4の上半分は、

$m=0.1$, $L/r=100$ を固定して n を変化させた時のクラウンにおける荷重-変形 (w =面外たわみ, θ =ねじり角) 関係を示し、下半分は、 $n=10^{-3}$, $L/r=200$ を固定して m を変化させた時の同じ関係を示している。

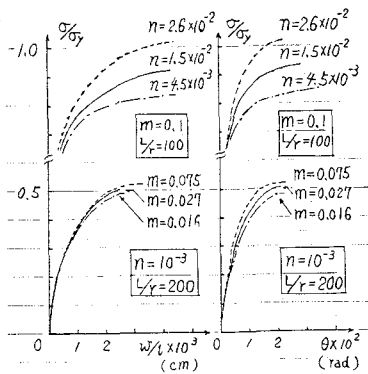


図-4 荷重-変形曲線にみる m, n の影響
(円弧, $f/t=0.15$, $w_0=L/1000$, welded)

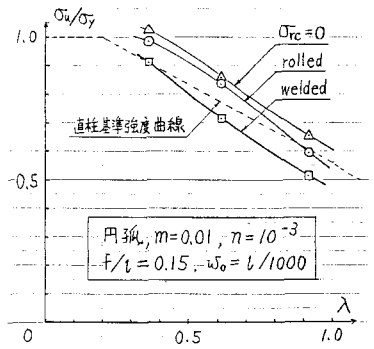


図-5 残留た力と耐力

差は、変形挙動と耐力にかなり影響を及ぼすが、St. Venant のねじり剛性 (m) の差の影響は小さいことがわかる。図-5は、 $m, n, f/t, w_0$ を固定して、残留た力の有無、分布タイプを変化させた時の耐力を、 σ_w/σ_y と λ の関係で示したものである。残留た力の無い場合に比べて、圧延タイプは5~10%、溶接タイプで10~20%強度が減少することが分かる。これは、

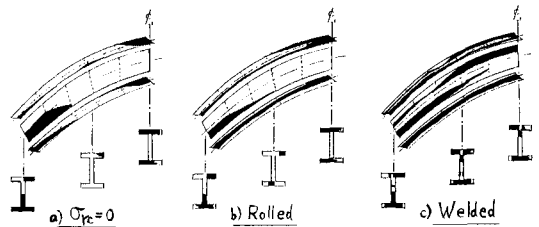


図-6 圧縮降伏域の分布(円弧, $L/r=68, m=10^{-2}, n=10^{-3}, w_0=L/1000$)

早期降伏による剛性低下に帰因するもので、荷重-変形曲線(省略)にもこの影響が現れる。図-6に、残留た力の有無、分布タイプの相異による崩壊直前の塑性域の分布の比較の一例を示す。図-7は、面外初期たわみの大小の差が耐力に及ぼす影響を示しているが、 $\lambda=1.25$ 程度の所で、 $w_0=L/5000$ の耐力を基準に考えると、 $w_0=L/1000$ の場合で約15%、 $w_0=L/500$ の場合で約25%の強度低下があらわれている。図-8は、同じ断面、構造諸元に対して、アーチ形状のみ変えた時の耐力の比較である。支間方向に等分布した荷重に対して連力線を形成する放物線形のアーチの方が、連力線からの偏心による面内曲げモーメントを受ける円弧アーチよりも、最大で約30%耐力 σ_w/σ_y が大きいことがわかる。

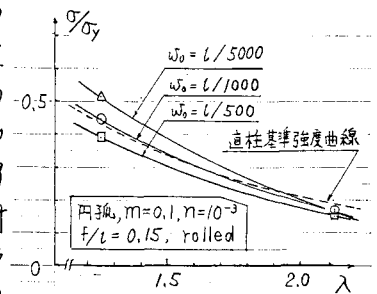


図-7 初期たわみと耐力

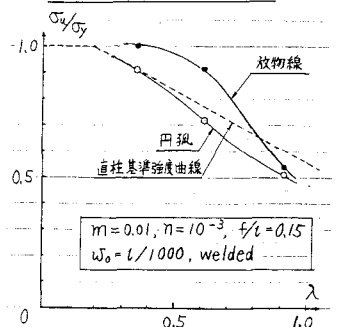


図-8 アーチ形状と耐力

4) あとがき： 開断面単材アーチの面外座屈挙動の一端を明らかにした。

ねじり剛性の大きい開断面アーチの場合は、基本的に曲げ座屈として扱い、直柱の基準耐力式(図中の破線)で評価することも可能であったが、⁴⁾ ねじり剛性の小さい開断面アーチの場合は、何らかの形でねじりの影響を評価する必要がある。その際、著者が既に報告している弾性固有値解を用いた有効長さ手法もひとつの有力な手段となる。⁵⁾

参考文献：

- 1) Sakimoto, T. et al. 「Nonlinear Analysis of ...」 Proc. of JSCE, No. 362/L-4, 1985.10 p.139-148, 又は 構造工学論文集 Vol. 37A 1986.3
- 2) Namita, Y. 「Die Theorie II. Ordnung ...」 Trans. of JSCE, No. 155, 1968.7, p.32-41 [R.255~264]
- 3) 深沢泰晴 「軸圧縮力を受ける円弧アーチの曲げねじれ座屈 ...」 土木学会論文集 96号, 1963.8, p.29-47.
- 4) Sakimoto, T. et al. 「Ultimate Strength Formula ...」 J. of SE, Proc. of ASCE, Vol. 109, No. 3, p.613~627.
- 5) 崎元 他 「弾性固有値解を用いた開断面鋼アーチの ...」 土木学会西部支部報告集 1986.3 p.46~47.