

大阪大学工学部 正員 西村宣男

大阪大学工学部 正員 小松定夫

大阪大学大学院 学造員 山縣延文

1. まえがき 圧縮部材の設計においては一般に、有効座屈長係数を用いることにより、両端ヒンジ柱の基本強度に結び付けられる。欧米の鋼構造設計法は柱の基本強度に関する複数柱曲線の導入により、合理化されたと評価されているが、有効座屈長係数については比較的簡単な分類で与えられている。実際には隣接部材の拘束効果、溶接残留応力、初期歪み、構造物の骨組構成等が有効座屈長係数に影響を与えるから、単純の有効座屈長係数を用いて評価される圧縮材の強度と、上述の諸因子を考慮した実際の強度との差は、複数柱曲線間の差より大きくなる場合もある。設計上の立場から要求される単純化を尊重したうえで、より高精度の有効座屈長係数の算定式を作成するためには、各種の圧縮部材の極限強度特性を有効座屈長の観点に立、て詳細に調査した基礎資料を整備することが重要である。本文では端部の回転角が弾性拘束された単一圧縮材および中間で弾性拘束された圧縮材（ポストラス上弦材に相当）について極限強度を解析し、その結果を有効座屈長係数の観点から考察を加える。なお、極限強度の解析には著者らが開発した骨組構造の弾塑性有限変形解析用の有限要素プログラム（NAFRAM）を用いた。材料は完全弾塑性とし、歪硬化を考慮していないことおよび必要要素の局部座屈を考慮していないので極端にスロッキーな部材については考察の対象外とする。

2. 弾性的に回転拘束された単一圧縮材 一端ないしは両端において回転角が弾性的に拘束された圧縮部材の極限強度および有効座屈長係数 β を図-1 および図-2 に示す。解析モデルは溶接集成箱形断面で $\sigma_{t0} = \sigma_y$, $\sigma_{rc} = -0.4 \sigma_y$ の溶接残留応力および $\sin$ 半波で $u_0 = l/1,000$ の初期ねじれを与えた。両端の回転にすぎない場合この柱の基本強度は ECCS の柱曲線 b に相当する。図-1, 2 の横軸は代表長を部材長 l にとったときの基準細長比パラメータ $\bar{\lambda}_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{l}{r}$ にとっている。また回転に与る剛性 K_θ と柱の弾性曲げ剛性 EI および部材長 l を用いたパラメータ $\Omega_0 = K_\theta l / EI$ を用いた。

スレンダーな柱では弾性座屈理論により与えられる有効座屈長係数に一致するが、断面内の塑性域の広がりの影響を受ける柱では曲げ剛性 EI は実質的に減少するから回転に与る拘束効果がより強く発揮されて有効座屈長係数は小さくなる。回転に与る剛性が大きくなり $\Omega_0 \geq 50$ の範囲では完全固定にみなすことができらるが、このような柱では $\bar{\lambda}_0$ の小さな領域で塑性域の部材全長にわたる拡大の影響により、有効座屈長係数は弾性座屈理論による値より、逆に大きくなる傾向がみられる。両端固定の場合、道路橋示方書に与えられている有効座屈長係数の推奨値 0.65 に接近している。いずれにせよ有効座屈長係数は端部の拘束効果のほかに座屈応力レベルが関係している。

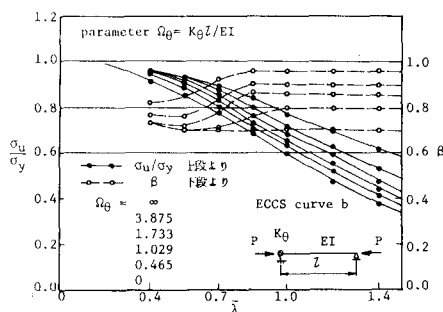


図-1 一端ヒンジ他端回転弾性拘束柱の有効座屈長係数

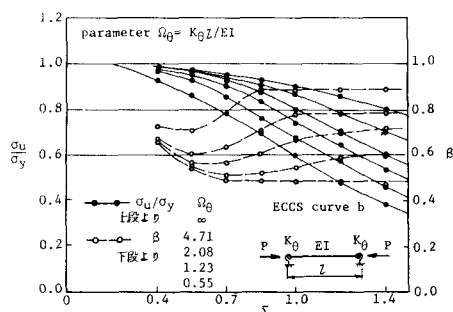


図-2 両端回転弾性拘束柱の有効座屈長係数

3. 中間ねわみを弾性拘束された圧縮材 ポニートラス上弦材のガイドタワーの座屈設計の基本モデルとして用いられている中間ねわみを離散的に弾性拘束された圧縮材の極限強度解析を行った。圧縮部材の断面は2と同様の箱形断面である。極限状態におけるねわみモードは中間バネ剛性 K （ポニートラスの場合Uフレーム剛性）と部材の曲げ剛性 EI とで与えられるパラメータ $\Omega = Kl^3/EI$ の値により異なるから、初期ねわみモードはそれぞれの解析モデルの極限状態ねわみモードにはほぼ相似した形状を与えた。なお最大初期ねわみ量はバネ間偏しの1/1000とした。また、解析モデルは、作用される軸方向力、圧縮部材の曲げ剛性、断面積、バネ剛性、端部境界条件等について、ポニートラス上弦材の橋脚に座屈を対象としたHolt¹⁾のモデルと同一である。主構形式は図-3に示す3種類とした。バネ間隔を用いて評価した基準細長比パラメータ $\bar{\lambda}_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{l}{r}$ が0.4, 0.7および1.0, およびパラメータ Ω が1, 2, 5および10を組合せて、3種のトラス形式についてそれぞれ12 caseの解析を行った結果を総合して、無次元表示した極限平均圧縮応力 σ_u/σ_y と細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ の関係を図4~6に掲げる。

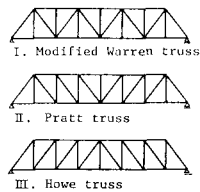


図-3 ポニートラスの主構形式

図-4はHolt¹⁾の方法、すなわちパラメータ Kl/Per の Per として極限強度解析における中央弦材の最大軸力を用いて求めた有効座屈長 ρl により横軸の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ を計算し、極限強度 σ_u/σ_y をプロットした。ECCS柱曲線bはほぼ極限強度の下限を包絡しているものの、トラス形式や Ω に対するばらつきが大きい。

図-5はBS 5400²⁾の有効座屈長係数 $\beta = 2.5$ の $\Omega^{-1/4}$ を用いて細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ を求めたものである。弦材の基準細長比パラメータ $\bar{\lambda}_0$ が小さい領域で、かなり安全側に有効長を評価する結果になっている。

前述のように圧縮材の有効長は弾性バネの拘束効果だけでなく座屈応力レベルが関係することを考慮して、以下のような有効座屈長係数の算定式を考えた。

$$\beta = (C_1 \bar{\lambda}_0 + C_2) \cdot \Omega^{-1/n} \quad (1)$$

$C_1 = 1$, $C_2 = 1.8$, $n = 2.5$ として解析結果をプロットすると図-6のように細長比パラメータの広範囲にわたり、柱曲線bと良好に対応させることができた。なお、図-3のような主構形式の相違による極限強度の差は最大で8%であり、Model IのWarren形式の強度が3形式のうちで最小であった。

4. あとがき 今回は圧縮材の旁形を拘束する同軸バネやねわみバネが線形弾性である場合を扱った。一般のトラス構造における圧縮材では、隣接部材の拘束効果は必ずしも線形バネとして扱うことはできない。また構造物の全体変形の影響も適切に評価しなければならない。これらの諸因子を含めて一般のトラス構造における有効座屈長についての基礎データを今後蓄積したいと考えている。

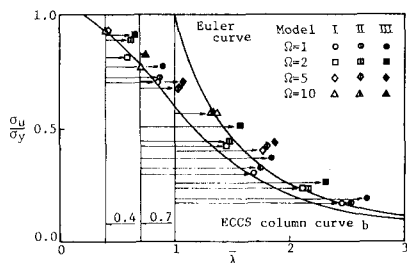


図-4 Holtの方法により有効座屈長の評価

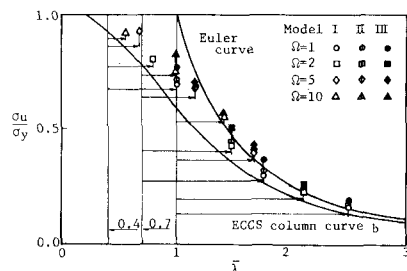


図-5 BS 5400による有効座屈長の評価

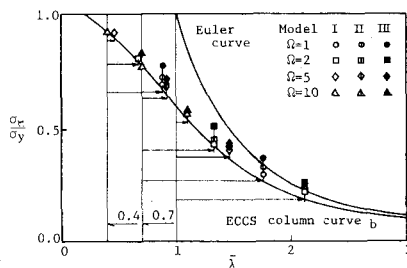


図-6 提案式による有効座屈長の評価

参考文献: 1) Johnston, B. G.: Guide to Design Criteria for Metal Compression Members, John Wiley & Sons Inc., 3rd Ed., 1976. 2) British Standards Institution: BS 5400: Part 3, 1982.