

柱の塑性化を考慮した座屈解析によるはり・柱接合部の剛結条件の検討

岐阜工業高等専門学校

正会員 ○宮下 敏

名古屋工業大学

正会員 後藤 芳顯

1. はじめに：通常骨組解析を行う際には、はり・柱の接合部に対し剛結あるいはピン結合といった非常に理想化したモデル化が行われる。しかしながら厳密な剛結・ピン結合の分類法に関しては、接合部の非線形挙動を考慮した骨組の全体解析が必要となるため必ずしも十分に明らかにされていない。そのような現状を踏まえ、著者らは骨組部材の幾何学的及び材料非線形、並びに接合部の非線形挙動を厳密に考慮した上で数種類の骨組に対し耐荷力解析を行った¹⁾。その結果、Eurocode3(EC3)²⁾など従来提案されている剛結条件がかなり安全側に設定されていることが明らかになった。理由としては、従来提案されている剛結条件では接合部の非線形挙動は考慮されているものの、柱の塑性化が無視されているため、柱の剛性が高めに評価されていることによると考えられる。一方、文献1)の弾塑性有限変位解析によれば、剛結条件に関する厳密な判断を行うことができるものの、このような解析法による手法は必ずしも一般的ではない。そこで本研究では既存の設計計算法の枠内で解析的に剛結条件を導くことを考える。

2. 解析手法：具体的にはまず、骨組の有効座屈長評価のためのAlignment-chart³⁾算定の基礎となった部分構造に、接合部の特性を考慮した図-1の部分構造モデルを設定する。この部分構造モデルの耐荷力を柱の塑性化ならびに接合部の非線形性を接線係数理論で考慮することにより座屈荷重として解析的に算定する。

図-1の部分構造モデルの部材A-Bの有効座屈係数 k は、横拘束骨組の場合以下の特性方程式を解くことにより求められる。

$$\frac{\bar{G}_A \bar{G}_B}{4} \left(\frac{\Pi}{k} \right) + \left(\frac{\bar{G}_A + \bar{G}_B}{2} \right) \left\{ 1 - \frac{\Pi}{k} \cot \left(\frac{\Pi}{k} \right) \right\} + \frac{2 \tan(\Pi/2k)}{(\Pi/2k)} - 1 = 0 \quad (1)$$

$\bar{G}_A, \bar{G}_B$ は節点A,Bに接合されている柱と接合部を含めたはりの剛比であり、図-1に示される構造モデルに対し以下のように表される。

$$\bar{G}_A = \frac{EI_c^{i+1}/L_c^{i+1} + EI_c^i/L_c^i}{\eta_{i-1}^A EI_{bA}^{i-1}/L_b^{i-1} + \eta_i^A EI_{bA}^i/L_b^i} \frac{E_t}{E}, \quad \bar{G}_B = \frac{EI_c^{i+1}/L_c^{i+1} + EI_c^i/L_c^i}{\eta_{i-1}^B EI_{bB}^{i-1}/L_b^{i-1} + \eta_i^B EI_{bB}^i/L_b^i} \frac{E_t}{E} \quad (2a,b)$$

ここに E は弾性剛性、 E_t は柱の塑性化を考慮した有効接線係数でその評価方法は後で述べる。 I は断面2次モーメント、 L は部材長である。添字A, BはA節点B節点を、 b, c はそれぞれはり・柱を、また $i-1, i, i+1$ は各層ならびに径間を表す。 η_α^β ($\alpha = i-1, i, \beta = A, B$)は接合部の剛性を考慮するための補正係数で横拘束骨組について以下のように表される。

$$\eta_\alpha^\beta = \frac{(6 + \Delta \bar{K}_\beta^{\omega'}) \Delta \bar{K}_\beta^{\omega n}}{12 + 4(\Delta \bar{K}_\beta^{\omega n} + \Delta \bar{K}_\beta^{\omega'}) + \Delta \bar{K}_\beta^{\omega n} \Delta \bar{K}_\beta^{\omega'}} \quad \Delta \bar{K}_\beta^{\omega'} = \frac{\Delta K_\beta^{\omega'}}{EI_b/L_b} \quad \Delta \bar{K}_\beta^{\omega n} = \frac{\Delta K_\beta^{\omega n}}{EI_b/L_b} \quad (3a,b,c)$$

ここで、 $\Delta \bar{K}_\alpha^{\beta'}$ 、 $\Delta \bar{K}_\alpha^{\beta n}$ は座屈時の接合部の接線剛性を表すパラメータである。 $\Delta K_\beta^{\omega'}$ 、 $\Delta K_\beta^{\omega n}$ は接合部の接線剛性で、座屈前に接合部にモーメントが作用する場合には、その作用モーメントに対応する接線剛性を接合部の $m-\theta$ 関係から求めることになる。柱の塑性化を考慮した有効接線係数 E_t はYura⁴⁾と同様の方法で評価するため、柱の耐荷力 σ_u は接線係数理論を用いて以下の様にも表せると仮定する。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \frac{E_t}{E} / (k \lambda_c)^2 \quad (4)$$

柱の耐荷力 σ_u としては適当な耐荷力曲線を用いればよいが、ここではECCS-b曲線を用いる。すなわち、

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \frac{1}{2(k \lambda_c)^2} \left(\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4(k \lambda_c)^2} \right) \quad \alpha = 1 + 0.399(k \lambda_c - 0.2) + (k \lambda_c)^2 \quad (5)$$

σ_u : 柱の軸圧縮強度 σ_y : 降伏応力 k : 有効座屈係数 λ_c : 柱の細長比パラメータ

以上の式を用いて部分構造モデルの接合部の剛結条件を求める。まずはじめに接合部を剛結とした際の構造物の耐荷力を求める。剛結の場合、接合部の剛性を考慮するための補正係数 η が1.0となるため、与えられた構造モデル

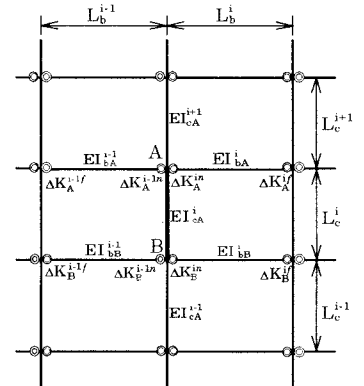


図-1 部分構造モデル

の構造諸元を用いて細長比パラメータ λ_c および式(2)から $\bar{G}_A, \bar{G}_B$ が決定される。ここで、有効座屈係数を k' と仮定すれば、式(5)から σ_u / σ_y 、式(4)から E_t / E を求めることができ、式(1)から有効座屈係数 k を求めることができる。

この k が先に仮定した k' と一致するまで有効座屈係数を仮定しなおし、繰り返し計算を行う。 $k = k'$ となり有効座屈係数が決定されれば、式(4)から接合部を剛結とした際の耐荷力 $\bar{\sigma}_{rig}$ を求めることができる。ここで本論文でも文献1)に従い剛結骨組の耐荷力の95%以上の耐荷力を発揮する場合、その構造物の接合部を剛結と見なすこととし、 $\bar{\sigma}_{semi} = 0.95\bar{\sigma}_{rig}$ とすると、式(5)から $\bar{\sigma}_{semi}$ に対応する有効座屈係数 k_{semi} を求めることができる。この k_{semi} と式(4)から E_t / E 、式(1)から $\bar{G}_A$ （あるいは $\bar{G}_B$ ）、式(2)から η_α^β を決定する。以上の値を用いて式(3a)を $\Delta\bar{K}_\beta^\alpha$ について解けば、剛結と見なすために必要な $\Delta\bar{K}_\beta^\alpha$ を決定することができる。なお横移動骨組についても特性方程式に横移動骨組に対する式を用いれば全く同様の手法により $\Delta\bar{K}_\beta^\alpha$ を求めることができる。

3. 剛結条件の検討：まず、柱の塑性化を考慮した本手法による剛結条件とEC3で提示された剛結条件との比較を行う。このためにEC3が剛結条件を検討するのに用いた図-2中に示される門型骨組（柱上集中荷重）に対して、本手法により剛結条件を求めた。その結果として、接合部の挙動を考慮した骨組の座屈荷重が剛結骨組の座屈荷重の95%になる時の接合部の剛性（ $\Delta\bar{K} = K_I / (EI_b / L_b)$ 、 K_I :初期剛性）とはりと柱の剛比（ $\rho = (EI_b L_c) / (EI_c L_b)$ ）の関係を横拘束骨組について図-2に示した。同図中には弾性座屈荷重に基づくEC3の検討結果も示している。なお、柱の塑性化を考慮した場合、 $\Delta\bar{K} - \rho$ 曲線は弾性的ように一本の曲線とならず、柱の細長比パラメータ λ_c の値により異なったものとなる。従って図中には数種類の細長比パラメータに対する $\Delta\bar{K} - \rho$ 曲線を示している。図-2より、柱の塑性化を考慮した場合の $\Delta\bar{K}$ の値はすべての ρ の値に対し弾性解析によるEC3の曲線を下回っており、接合部の剛結条件がかなり緩和できることがわかる。

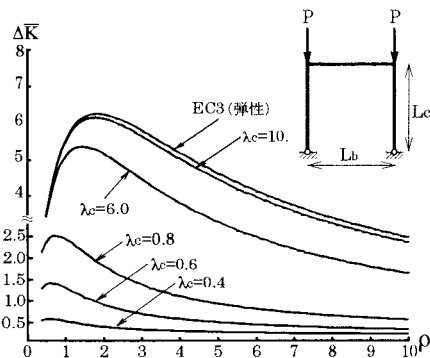


図-2 $\Delta\bar{K} - \rho$ 曲線

次に具体的に図-3で示される骨組に対し本手法を適用し、得

られた剛結条件を弾塑性有限変位解析の結果により検証する。載荷荷重に関しては、はり上分布荷重と柱上集中荷重を設定し、両者の比を t をパラメータとして3種類設定しそれぞれType1,2,3とした。各Typeに対する t の値を表-1に示す。いずれの場合もEC3のモデルとは異なり、はり上に荷重が載荷されるので、座屈前に接合部にモーメントが作用する。このモーメントにより接合部の剛性が低下するのでこの影響を座屈解析では考慮する必要がある。ここではBeam-Line法により接合部の剛性の低下を評価した。なお、座屈前のはりへの載荷荷重量としては、弾塑性有限変位解析の結果得られた剛結骨組の耐荷力の95%の荷重とした。以上のような手法により、剛結と見なすために必要な $\Delta\bar{K}$ の値を載荷荷重Type1,2,3の場合に対して求めた。EC3では横拘束骨組に対しては $\Delta\bar{K} = 8.0$ を剛結条件の境界値としているが、このEC3の値との比を α とする。Type1からType3に対し剛結とみなすために必要とされる α の下限値を求め、弾塑性有限変位

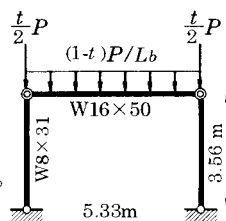


図-3 解析対象物

表-1 載荷荷重の割合

	Type1	Type2	Type3
t	0	1/2	2/3

表-2 α の境界値

Frame	Type1	Type2	Type3
弾塑性有限変位	0.003	0.002	0.002
塑性化を考慮した座屈解析	0.090	0.09	0.024

解析により得られた結果とあわせて表-1に示した。表-1からわかるように、柱の塑性化を考慮した場合、剛結と見なすために必要な接合部の剛性はいずれの骨組の場合も柱部材を弾性としたEC3の値（ $\alpha = 1$ ）よりかなり低減されることがわかる。しかしながら、厳密な弾塑性有限変位解析の結果と比較すると、はり部材の塑性化が考慮されていないので、いずれも安全側の値となる。

【参考文献】1)Goto,Y.,and Miyashita,S.: Proc. Structural Congress Atlanta Vol.2 pp.1191-1196,ASCE,1994 2)Eurocode No.3:Design of steel structures ,Vol.1 Edited draft,Issue3,1990 3)AISC:Manual of Steel Construction,LRFD 2nd Edition,1993 4)Yura,J.A. Eng.J.,AISC,Vol.8 No.2,1971