

I-26 はりと柱の結合部の非弾性特性を考慮した 半剛結骨組の臨界挙動の解析

名古屋工業大学(博士課程後期) 正員 鈴木五月

名古屋工業大学 正員 後藤芳顯

名古屋工業大学 正員 松浦 聖

1. はじめに: 近年、はり・柱の結合部の非弾性特性を考慮した骨組(Semi-Rigid Frame)の設計法を確立する動きが欧米を中心にある。部材単位の設計を行う場合には、通常、部材の非弾性特性は部材照査式の中で考慮され、断面力ならびに有効座屈長の算定では幾何学的非線形性のみ考慮される。しかし、半剛結骨組におけるはり・柱の結合部の非弾性特性は低荷重から現れるため、上記の設計法のわく内で設計を行う場合も、断面力ならびに有効座屈長算定に、幾何学的非線形性の他に、少なくとも結合部の非弾性特性を考慮する必要がある。この種の解析は比較的多く報告されているが、著者の知る範囲では、継手の非弾性特性、ならびに骨組の幾何学的非線形挙動を厳密に扱った例はほとんどない。

以上のような観点から、ここでは、繰返し荷重下の挙動を含めた継手の非弾性特性をより精密に考慮し、さらに、半剛結骨組の臨界挙動を正確に解析するための手法を検討した。

2. はり・柱部材の剛性方程式と接線剛性方程式: 骨組の解析において、幾何学的非線形の影響を考慮するため、ここでは、はり・柱部材の支配方程式として、非線形はり-柱の式を用いる¹⁾。剛性方程式は支配方程式から解析的に式(1)に示すものを誘導し、接線剛性方程式は剛性方程式を増分することにより式(2)のよう

$$f_i = k_{ij}(\tilde{N}_i)d_j + k_{ijk}(\tilde{N}_i)d_j d_k + \tilde{\rho}_{ij} Q_{ij}(\tilde{N}_i)d_j + \tilde{\rho}_{ij} Q_{ij}(\tilde{N}_i) + \tilde{\rho}_{ij}^2 C_i(\tilde{N}_i) \quad (1)$$

$$\Delta f_i = \Delta k_{ij} \Delta d_j + \Delta C_i \Delta \tilde{\rho}_{ij} \quad (2)$$

ここに、表示は総和規約を用いており、 $(\tilde{N}_i)$ は軸力の関数であること示している。

3. 結合部のモデル化: 結合部は作用曲げモーメント(M)に対して相対回転角(θ_r)を生ずる回転ばねとしてモデル化を行った。単調増加荷重下の構成則は、実験値を指数関数近似した高精度の修正 Exponential model を用いる。履歴挙動に関する構成則については、実験結果が少ないので、ここでは、Bounding Surfaceを有するDafalias-Popovのモデルを用いる²⁾。

4. 非弾性臨界挙動の解析: 周知のように、骨組の安定に関するつり合い経路上の特異点は臨界点と呼ばれ、これはさらに極限点と分岐点に分類できる。

極限点の解析については、弾性体と同様、弧長増分法を用いれば、その特異点は容易に除去でき、十分な精度で解析できる。ここでは、継手の構成則が全ひずみ型で表現されているので、Newton-Raphson法と組み合わせることにより解析する。

一方、分岐挙動については、分岐点が本質的な特異点となる他、非弾性体の場合、この点で除荷を伴うことが多く、剛性変化が不連続に起こるため、弾性体に比べその挙動は複雑になる。ここでは、分岐点の特定に、Hillによる解の唯一性の十分条件の対偶を接線剛性方程式を用いて書き換えた必要条件式を用いる。この条件式は、全体系の基本経路(f)、及び、分岐経路(b)に沿う接線剛性方程式をそれぞれ

$$\Delta F_i = \Delta K_{ij}^f \Delta u_j^f, \quad \Delta F_i = \Delta K_{ij}^b \Delta u_j^b \quad (3a, b)$$

と表すと次式のように表される。

$$(\Delta u_j^b - \Delta u_j^f) \Delta K_{ij}^f (\Delta u_j^b - \Delta u_j^f) + (\Delta u_j^b - \Delta u_j^f) (\Delta K_{ij}^b - \Delta K_{ij}^f) \Delta u_j^b = 0 \quad (4)$$

分岐点は、式(4)より、接線係数荷重以上に存在することがわかる。接線係数荷重で分岐する場合には式(4)の左辺第1項が零となるので、分岐方向で除荷する結合部は分岐の瞬間中立変形状態となることが必要である。したがって、この場合、まず、除荷する結合部を仮定し、 ΔK_{ij}^b を評価する。つぎに、式(3,b)より単位

荷重増分に対して、増分変位を計算し、除荷を仮定した結合部で中立状態にあるかを検証する。仮定と一致しておけば、分岐点と分岐経路方向への増分変位が得られたことになる。

5. 数値計算例: 図-1の継手を持つ図-2の2層1径間骨組に鉛直荷重が集中して柱上に作用する場合と、等分布して梁上に作用する場合の臨界挙動を解析した。この時、継手が何ら荷重履歴を受けていない処女系と、繰返し風荷重を受けた、履歴系との差についても解析した。風荷重は図-3に示すヒステリシスループが収束するまで作用させ、その後これを除去した。図-4にそれぞれの解析結果を比較する形で、鉛直荷重と水平変位の関係を示している。この図より、柱上に集中荷重が作用する場合は、処女系の分岐後の荷重低下が著く、荷重履歴による初期不整に対しても敏感で、最大荷重が大きく低下することがわかる。一方、梁上に分布荷重が作用する場合は、処女系、履歴系とも分岐後荷重が増加し、極限点に至り不安定となる。この場合、履歴系の初期不整は、分布荷重の増加とともに分岐点に到達する以前に消滅するため処女系との挙動の差はなくなる。

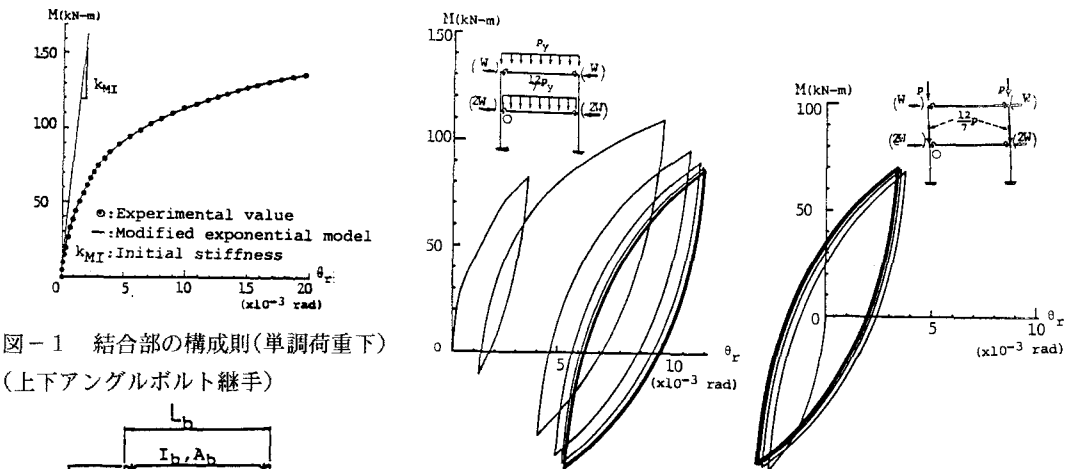
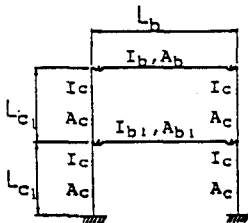


図-1 結合部の構成則(単調荷重下)
(上下アングルボルト継手)

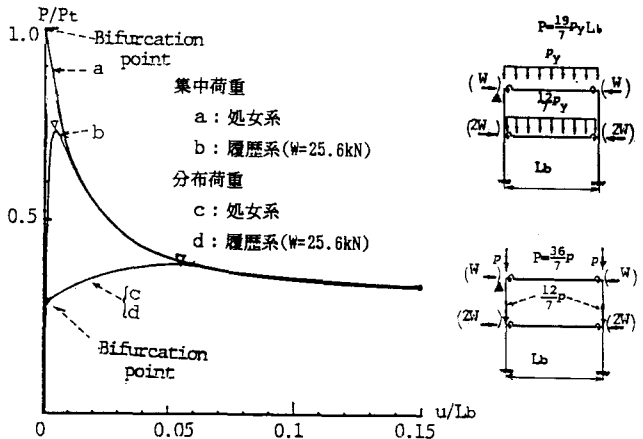


$I_c = 7076 \text{ cm}^4$
 $A_c = 62.65 \text{ cm}^2$
 $I_{b1} = 3508 \text{ cm}^4$
 $A_{c1} = 83.87 \text{ cm}^2$
 $I_b = 15610 \text{ cm}^4$
 $A_b = 58.84 \text{ cm}^2$
 $L_b = L_c = 2L_{c1} = 731.5 \text{ cm}$
 $E_b = E_c = 1.998 \times 10^5 \text{ MPa}$

図-2 計算モデル

a) $p_y = 0.245 \text{ kN/cm}$, $W = 25.6 \text{ kN}$ b) $p = 89.6 \text{ kN}$, $W = 25.6 \text{ kN}$

図-3 継手の履歴曲線(○:履歴を示した結合部)



参考文献) 1) Goto, Y., Suzuki, S. and Chen, W.F.: Proc. of the International Colloquium on Bolted and Special Structural Joints, Moscow, (to appear 1989)

2) Dafalias, Y.F. and Popov, E.P.: J. Appl. Mech. Vol.43., pp.645-651, 1976

P_t : 接線係数荷重(集中荷重), u : 水平変位,

▽: P_{max} , ▲: 水平変位を示した節点

図-4 荷重変位曲線