

4 点バネ剛棒要素による RC 柱の複合非線形解析

佐賀大学 学生会員○岸村 信 正会員 井嶋克志
正会員 帯屋洋之 正会員 川崎徳明

1. まえがき

構造物の耐震安全性照査には骨組構造モデルが使用されることが多い。骨組解析モデルを大別すれば、曲げ降伏箇所にはバネを用いるもの、有限要素法に基づくもの、剛体バネモデルの3者となり、客観的に曲げ降伏と塑性域の進展を評価できるモデルは後者2つである。有限要素法では、最近、変位関数を用いず応力分布仮定によるガウス積分要素モデル¹⁾が提案され、少ない要素数により合理的かつ高精度の解析が可能になった。一方、既存剛体バネモデルをRC構造に用いる場合、細かな分割を必要とするも塑性ヒンジ長による分割長の下限が存在する欠点がある。

本研究のモデルは、バネと剛棒により要素を構成することによって少ない分割数によりガウス積分要素と同等の精度を有するものである。また、積分点とバネ位置、重みと変形一定区間長についてガウス積分要素とバネ剛棒要素は物理的に等価でありながら、ルジャンドル多項式のゼロ点に支配される積分点よりバネ位置の設定は自由度が高い。本研究は、4個のバネと剛棒により構成される要素を用いてRC柱の複合非線形解析を行い、文献2)の実験結果と比較することにより本要素モデルの妥当性を検討したものである。

2. 4 点バネ剛棒要素モデルとガウス積分要素モデル

要素モデルは全体構造より1要素を取り出したとき単純支持の支点条件上で定義され、要素の特性は全て要素端力と要素端変形の関係に集約される。要素には図-1に示すようにバネが配置され、要素の特性はバネ剛性とバネ位置によって決まる。構造要素に変形一定区間を定め、この変形の集約をバネ変形とするものであり、この区間長によりバネ剛性が定まる。バネ位置と変形一定区間長は要素の弾性時ひずみエネルギーがオイラー梁のそれと等価になるように設定する。このとき両端バネが担当する変形一定区間長はRC柱では塑性ヒンジ長として定められた条件となる。これらの設定により、弾性解の精度とともに、要素長に依存することなく曲げ降伏後の正確な塑性域応答曲率が保証される。

一方、通常のガウス積分を用いた場合、必要な積分点を取れば容易に弾性解の保証はできるものの、要素長が与えられれば自動的に要素端塑性ヒンジ長に当たる重みも定まり、塑性ヒンジ長が要素長に依存することになる。したがって、要素長に独立した重みを与えるため、図-2のように1積分点指定型の Gauss-Radau 積分を用いて、この積分区間と弾性域とする通常積分区間を用いるモデルが提案されている。図のようにバネ剛棒モデルがより簡潔であり、鋼製構造における塑性域の進展現象やRC柱の3次元解析などのモデルへの展開ではバネ剛棒モデルの方が有利である。

3. 複合非線形解析のアルゴリズム

多くの複合非線形解析は、材料特性に基づく接線剛性と

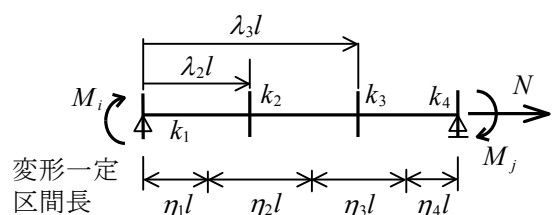


図-1 1点バネ剛棒要素

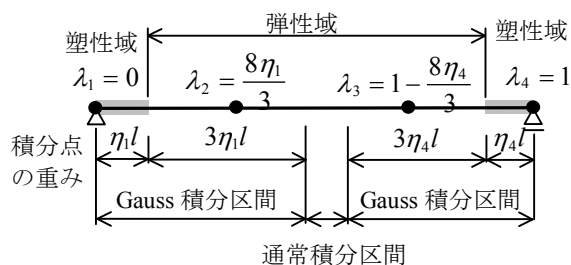


図-2 Gauss-Radau 積分要素モデル

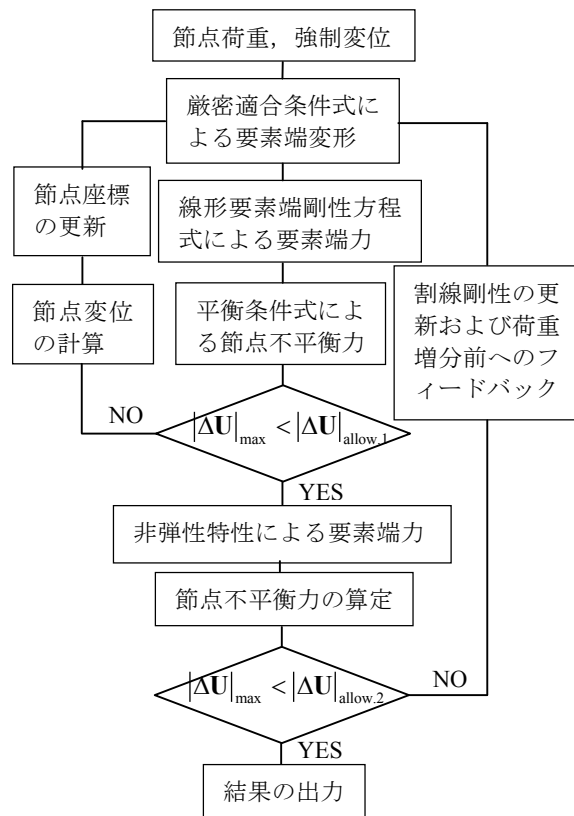


図-3 複合非線形解析の計算手順

幾何剛性を同時に更新する接線剛性マトリクスが用いられているようである。本手法では、先ず幾何学的非線形解析の収束計算を行い、この反復計算中は材料割線剛性を更新することなく一定として用いる。幾何学的非線形解の収束後、前平衡解と現収束解を用いて材料非線形特性に基づき割線剛性を更新することとしている。これにより鉄筋降伏あるいは中立軸の移動による急激な状態量変化にも対応できる計算が可能となる。

4. RC 柱の複合非線形解析結果と考察

図-4 に示す RC 柱を解析モデルとして、4 点バネ剛棒要素 1 要素のみを用いて数値計算を行った。軸方向力 968kN 作用下において水平方向の強制変位を柱頂部に与えるものである。この解析モデルは、文献 2) に示された実験に基づくものである。使用した 4 点バネ剛棒要素モデルは、柱の形状寸法から道路橋示方書に基づく塑性ヒンジ長：0.275m を要素両端の変形一定区間長として用いる。

鉄筋は初期ヤング率： $2.0 \times 10^5 \text{ MN/m}^2$ 、降伏後のヤング率： $1.287 \times 10^3 \text{ MN/m}^2$ 、降伏応力：511MPa を用い、これらの値は文献に示された応力-ひずみ曲線を参考にした。

また、コンクリートの応力-ひずみ骨格曲線は図-5 に示す通りである。RC 断面内部の拘束コンクリートについては、主として道路橋示方書の応力-ひずみ曲線に従っているものの、次の点について修正を行った。道路橋示方書に示されたコンクリート設計基準強度 σ_{ck} を文献中の強度 32MPa に一致するものとして、示方書計算式から拘束コンクリートの強度 $\sigma_{cc} = 36.45 \text{ MPa}$ およびひずみ $\varepsilon_{cc} = -0.0044$ を算出し解析に用いている。道路橋示方書は軸方向力の影響を考えていないため、拘束コンクリートの強度は低めの評価となる。これは劣化勾配についても同様であり、示方書の値を用いた場合、水平荷重-変位曲線は実験結果と全く異なるものとなるため、示方書劣化勾配の 1/1000 を使用した。

図-6 に数値計算より得られた水平荷重-変位曲線と実験における強制変位反転時の値も示している。示方書に示されたコンクリート強度は軸圧縮力による拘束効果を考慮しないため、計算結果は実験値より若干小さい値となっている。図-6 には実験値の履歴曲線を示していないが、変位増加時の履歴曲線の勾配は計算値と実験値はほぼ等しく、変位反転後の曲線の勾配については計算値の方が大きい結果となった。なお、講演時には実験値の履歴曲線も示した説明を行う予定である。図中直線部は計算において未収束箇所であるが、細かな強制変位増分ではなく大きな増分を与えれば収束解を得る。これは割線剛性を用いた複合非線形アルゴリズムの利点といえる。

参考文献

- 1) Scott, H. M., and Fenves, L. G.: Plastic hinge integration methods for force-based beam-column elements, *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 132, No.2, pp. 244-252, 2006.
- 2) Tanaka, H. and Park, R.: Effect of lateral confining reinforcement on the ductile behavior of reinforced concrete columns, Rep. No. 90-2, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1990.

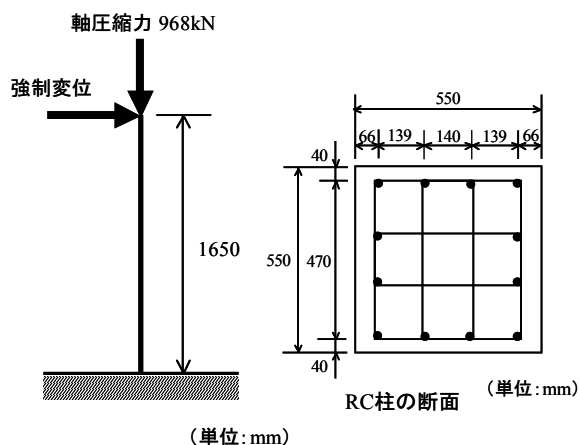


図-4 解析モデル

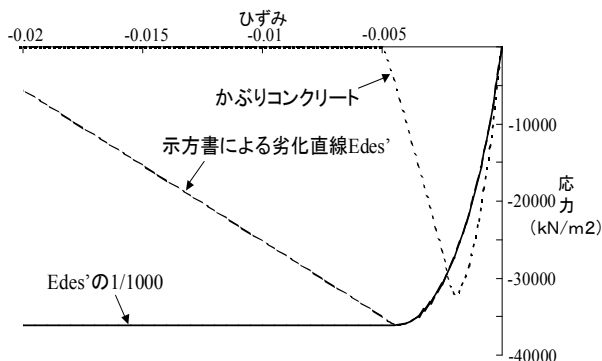


図-5 コンクリートの応力 - ひずみ骨格曲線

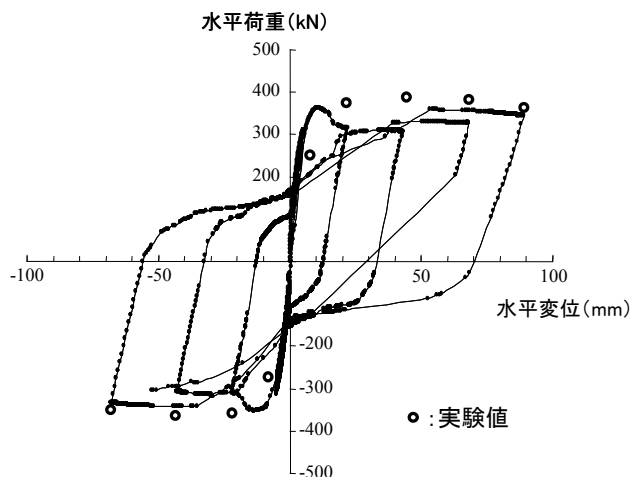


図-6 解析モデルの解析結果