

材料特性に応じた合理的非弾性要素モデルによる骨組構造解析

佐賀大学 学生会員○武田拓之, 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など実務設計では曲率一定要素や剛体バネモデルによる非弾性骨組解析が行われている。しかし、要素単体としての弾性解の精度問題や曲げ降伏後の非弾性現象における要素分割の制約などを抱えるため、要素分割を細かくする必要がある。

本研究は、ひずみ硬化則や同軟化則の材料特性に応じて、要素単位について弾性時から曲げ降伏まで精度を維持できる合理的なバネと剛棒による一体型要素モデルを開発し、提案要素モデルの応用例として、ブレース付フレームの座屈変形履歴計算を複合非線形解析により行ったものである。

2. 非弾性材料特性に応じた要素モデル

開発する要素モデルの第一条件は、ひずみ軟化および硬化の材料特性に関わらず弾性時はオイラー梁の解と一致することとする。降伏後の非弾性解析精度を保証するためには、ひずみ軟化型材料と硬化型材料に分けて検討する必要がある。

ひずみ軟化型の場合、要素端応答曲率を支配する塑性ヒンジ長が要素長に依存することなく独立に与えられることが重要である。この条件と第一条件を合わせて図-1 に示す要素モデルが最も合理的と考えられる。この提案モデルと、既に開発された要素内応力分布仮定に基づく Gauss-Radau 積分と通常積分を併せたモデル¹⁾との計算比較を行った。有限要素法では変位仮定のもとに Gauss 積分を用いることが一般的であるが、応力仮定による Gauss 積分を用いた方が少ない積分点数のもとに高精度の解析が可能となる。また、この応力仮定型 Gauss 積分の積分点とその重みは、本論の要素モデルではそれぞれバネ位置とバネ変形が担当する曲率一定区間と物理的に等価となる。

ひずみ硬化特性の場合、要素端降伏後に塑性域が進展する現象が端モーメントと端たわみ角の関係に正しく反映する要素モデルが必要となる。この要素モデルとして Gauss-Lobatto 積分点のバネ位置と曲率一定区間長を用いた図-3 のモデルと、要素端が終局となる時の塑性域に n 個のバネを等間隔に配置するモデルについて厳密解も加えて比較検討した。

3. 各種モデルの要素単位における精度の検討

図-4 に示す単純梁の端モーメントによる端たわみ角を、ひずみ軟化型および硬化型それぞれの要素モデルについて精度を検討する。それぞれ梁の材料特性として曲げモーメント-曲率関係を図-5 に示す。降伏曲げモーメントは $177\text{kN}\cdot\text{m}$ とする。

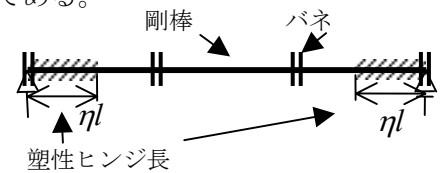


図-1 ひずみ軟化型材料に対する提案要素モデル

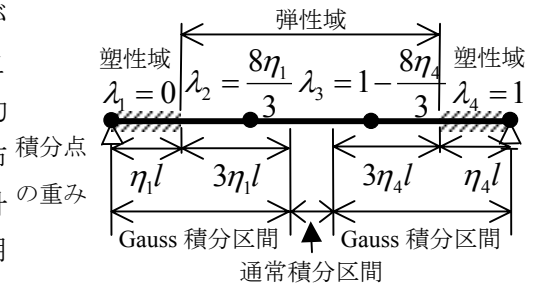
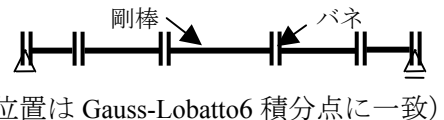


図-2 Gauss-Radau 積分を用いた要素モデル



(バネ位置は Gauss-Lobatto6 積分点に一致)

図-3 ひずみ硬化型材料に対する提案要素モデル

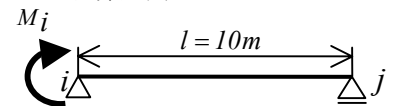


図-4 要素単位解析モデル

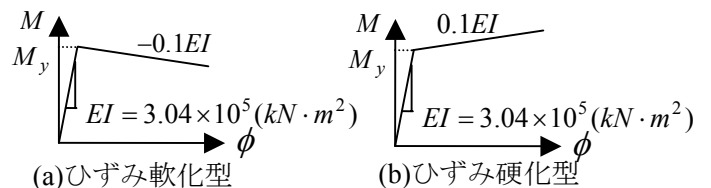


図-5 使用した $M-\phi$ 曲線

キーワード：非弾性, 骨組要素, 剛体バネ, 複合非線形

〒840-8502 佐賀市本庄 1 佐賀大学理工学部都市工学科 TEL0952-28-8579

ひずみ軟化型については、図-1 のモデルでは要素端バネの曲率一定区間長、図-2 のモデルでは要素端積分点の重みそれぞれを同じ塑性ヒンジ長とすることにより、図-6 に示すように端モーメントによる端たわみ角はともに同じ結果となる。2つのモデルを比較すれば、通常積分区間を必要とする Gauss-Radau 積分要素に比べ4点バネ剛棒要素モデルはより簡潔なモデルと言える。

ひずみ硬化型については、厳密解とともに幾つかのバネ剛棒要素モデルによる結果を図-7 に示している。4点バネは要素端バネの曲率一定区間長を $0.394l$ とし図-1 の要素両端と内部に2個のバネを配する要素、6点バネは終局塑性域を $0.394l$ としてこの塑性域に2個のバネを配する要素と積分区間両端に積分点を指定する Gauss-Lobatto 積分点にバネ位置を配するモデルの2種類である。図-7 に示すように Gauss-Lobatto 積分点使用の6点バネ要素モデルは厳密解に非常に近い値となる。終局塑性域内を等間隔にバネを配する要素では、同程度の精度を得るには14個のバネが必要となり、ひずみ硬化型に対応する要素モデルとしては Gauss-Lobatto 積分点を使用するのが合理的と言える。

4. ひずみ硬化型要素による複合非線形解析計算例

上に示すひずみ硬化型材料に対する提案要素を用い、図-8 に示す対傾構フレームの頂部に交播強制変位を与え、複合非線形解析を行った。部材断面は正方形とし、主構断面辺長、対傾構断面辺長ともに 5cm とし、部材の初期ヤング率は 200kN/mm^2 、降伏後ヤング率は 2kN/mm^2 、降伏応力は 235N/mm^2 とし応力-ひずみ関係則を図-9 に示す。使用要素のバネは軸力と曲げの連成を取り扱うことができるファイバー的分布バネとする。断面分割数は20分割であり、この分割数では弾性解との誤差は3.7%である。要素両端の変形一定区間長は、要素両端とも等しく要素長に対して $1/6$ と設定する。

図-10 に複合非線形解析によるせん断履歴曲線を示す。対傾構の座屈後、主構剛接部の曲げ降伏に伴い主構自身も座屈した。よってせん断強度は変形の増大に伴い減少した。

実験結果等との比較により本提案要素モデルの検証を行うことが望ましく、講演時にはこれを発表する予定である。

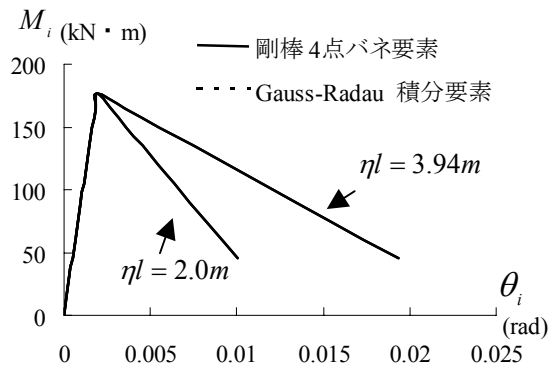


図-6 ひずみ軟化型における要素モデル比較

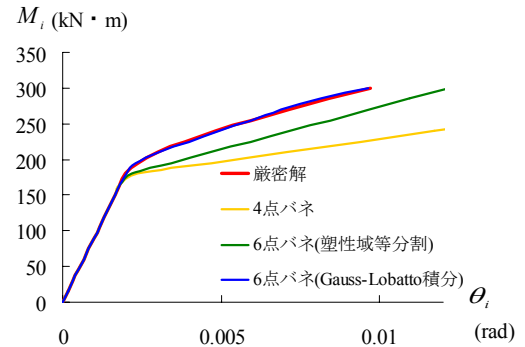


図-7 ひずみ硬化型における要素モデル比較

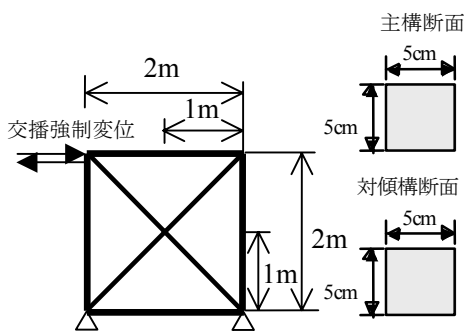


図-8 解析モデル

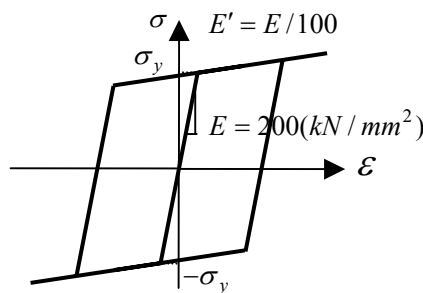


図-9 応力-ひずみ関係則

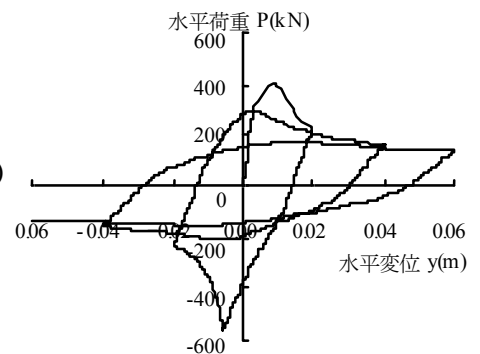


図-10 対傾構フレームのせん断履歴曲線

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.