

塑性域の広がり を考慮した木材はりの ASI-Gauss 法による弾塑性・破壊解析

正会員 ○伊藤 慎也*
会員種別 磯部 大吾郎**木材はり 弾塑性解析 破壊解析
塑性域 ASI-Gauss 法

1 序論

日本は世界有数の地震大国であり、東日本大震災や熊本地震では甚大な被害を受けた。日本の既存住宅の多くは木造家屋であり、地震による住宅への被害は木造家屋に集中している。このような被害を防ぐため、木造家屋がどの程度地震の影響を受けるのかをあらかじめ正しく予測することが求められている。こういった背景から、木造家屋の地震時挙動を予測できるシミュレーション技術が必要とされている。

本研究では木造家屋の解析への足掛かりとして、木材はり要素の解析を行う。はり要素は骨組構造物を構成する最も基礎的な要素であるため、その弾塑性・破壊挙動を再現することは非常に重要である。その解析手法には、将来的に木造家屋の地震動解析への拡張を考え、効率的に降伏・破断を扱うことのできる ASI-Gauss 法[1]を用いる。本研究では、簡単のため2次元に限定して木材はりの解析を行う。先行研究[2]に基づいて理論を展開し解析に必要な判定式を導き、ASI-Gauss 法に導入して解析を行う。

2 木材はり

解析を行うにあたり考慮すべき木材の特徴として、圧縮力による塑性ひずみに対し、引張力による塑性ひずみが小さいことが挙げられる。先行研究[3]によると、木材はりの弾塑性解析において bilinear 型の応力-ひずみ曲線を用いることには妥当性がある。そこで本研究では、図1の bilinear 型の応力-ひずみ曲線を用いる。図中の σ_c は圧縮強度、 σ_t は引張強度、 ε_c は降伏ひずみ、 ε_u は圧縮破壊ひずみである。

従来の ASI-Gauss 法[2]では、はりに全断面降伏が生じると、塑性ヒンジが作成される。一方で図1のような bilinear モデルでは、引張側において弾性であるため、圧縮力の

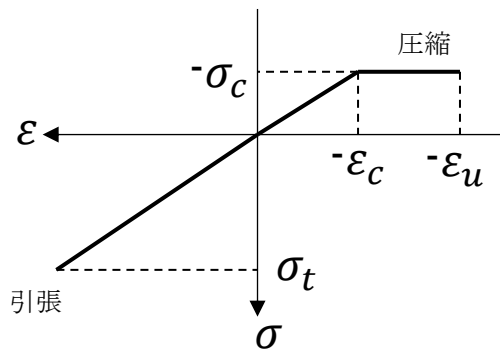


図1：荷重-変位関係

みが作用した時を除き全断面降伏することがない。このことから塑性ヒンジ法により木材の塑性化を表現することは不適切であるため、先行研究[2]では塑性ヒンジ法を用いず、塑性域の広がりによる剛性低下を断面積と断面二次モーメントの減少で表現している。本研究では3次元への拡張を容易にするために、これを単純化した方法を用いて塑性域の広がり を考慮する。

3 塑性化・破壊判定

塑性化・破壊判定を行うにあたり、先行研究[2]における $m-n$ 破壊相関曲線を用いる。 $m-n$ 破壊相関曲線を図2に示す。 m, n はそれぞれ曲げモーメント比 $m = M/M_{max}$ と軸力比 $n = N/N_{max}$ である。 M_{max} は降伏曲げモーメント、 N_{max} は降伏軸力である。

はりの断面力が増加すると m, n が増加し、 m, n によって描かれる点が弾性限界線に到達すると、塑性化が判定される。破壊についても同様で、断面力が増加し、 m, n が破壊曲線を通ると破壊が判定される。本研究では要素両端の m, n を計算し、要素両端のどちらかで弾性限界および圧縮・引張破壊を迎えると塑性化・破壊の判定を行う。

4 塑性域の広がり を考慮する方法

塑性域の広がりによる剛性低下を表現する方法として、先行研究[2]では要素中の塑性域を除いた面積と断面二次モーメントを要素長に渡って積分し、剛性マトリックスを作成している。本研究では3次元への適用を考慮し、これを単純化した二つの方法について検討を行う。

まず、剛性を低下させるためには要素がどの程度塑性化しているかを知る必要がある。先行研究[2]では、その指標として弾塑性境界位置 δ ($-0.5 \leq \delta \leq 0.5$) を用いている。弾塑性境界位置は要素断面での弾性域と塑性域の境

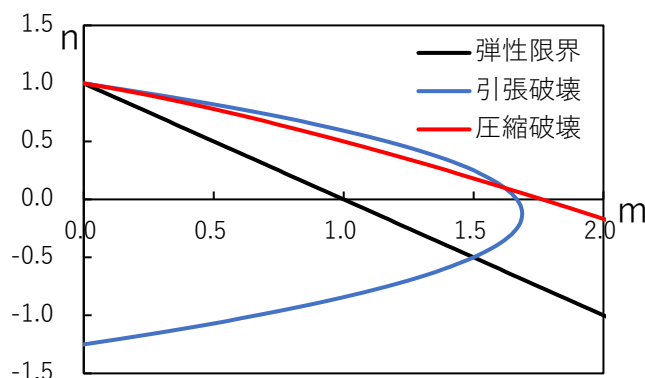


図2：m-n 破壊相関曲線

界位置であり，要素が塑性化していない時は-0.5，完全に塑性化しているときは 0.5 となる．弾塑性境界位置 δ は次式[2]に要素端での断面力を代入して得ることができる．

$$m - 2(\delta + 1)(1 - n) = 0 \quad (1)$$

本研究では簡単のため，次式を用いて要素両端の弾塑性境界位置 δ_l, δ_r から弾塑性境界位置の平均 δ_{avg} を算出し，これをもとに剛性を決定する．

$$\delta_{avg} = \frac{\delta_l + \delta_r}{2} \quad (2)$$

4-1 弾性係数の低下で表現する方法

こちらの方法では弾性係数のみを低下させる．

$$E' = E \times (0.5 - \delta_{avg}) \quad (3)$$

修正後の弾性係数 E' は，要素全体が完全に塑性化しているときは元の弾性係数 E の 0 倍，要素が一切塑性化していないときは 1 倍になるよう線形に設定した．得られた弾性係数を要素剛性マトリックスに用いる方法を方法 1 とする．

4-2 断面積と断面二次モーメントの低下で表現する方法

先行研究[2]と同様に，塑性域は欠損したものとみなし，弾性域の断面積と断面二次モーメントを以下の式を用いて求める．ただし，先行研究[2]とは異なり，式(2)で得られる要素両端の弾塑性境界位置平均を用いる．

$$A' = A \times (0.5 - \delta_{avg}) \quad (4)$$

$$I' = I \times (0.5 - \delta_{avg})^3 \quad (5)$$

A, I はもとの部材の面積と断面二次モーメントである．得られた断面積と断面二次モーメントを要素剛性マトリックスに用いる方法を方法 2 とする．

5 解析結果の比較

本解析の妥当性を検証するため，先行研究[2]にて行われた解析と同じモデル（図 3）を作成し解析を行い，結果を比較する．解析には先行研究[2]と同じ材料特性値を用いた．支点上の部材に水平荷重を加え，表 1 に示すようにスパン中央点への垂直荷重と支点上部部材の長さを変えて解析を行った．全ての解析において節点 3 の垂直変位を記録した．その結果を図 4 に示す．

図 4 に示すように，弾性域では結果がほとんど一致しており，塑性化判定点もほとんど重なっている．塑性化が判定されると，方法 1 の結果が他の方法と比べて変位が小さくなっている．特に①，②でその差が顕著であるが，これは①，②では曲げモーメントに比べて圧縮力が大きく塑性域が広いいため，弾性係数の低下だけでは十分に剛性が評価できないからである．方法 2 と先行研究[2]では結

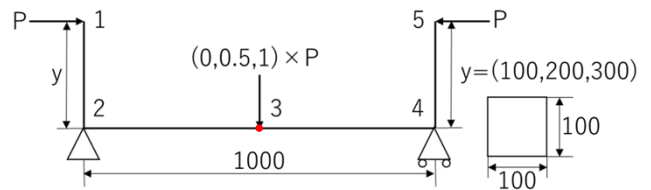


図 3：解析モデル [mm]

表 1：支点上部部材長さ中央垂直荷重

	y=100	y=200	y=300
中央垂直荷重 0	①	②	③
中央垂直荷重 0.5P			④
中央垂直荷重 P			⑤

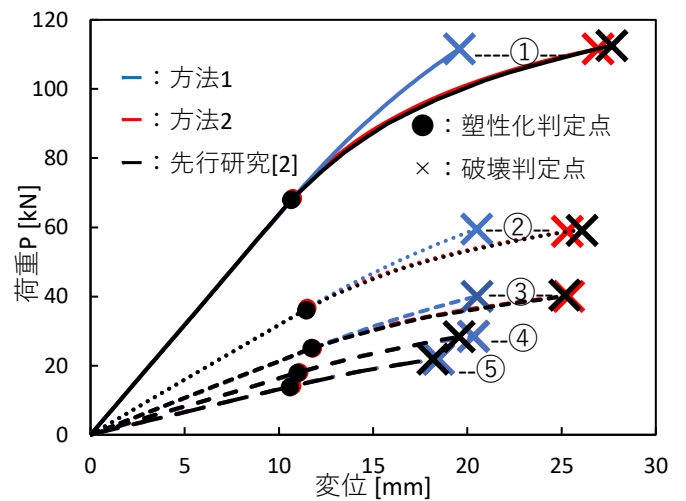


図 4：荷重-変位関係

果がほとんど一致しており，要素端の塑性域のみで剛性を決定しても，断面積と断面二次モーメントを低下させることで高い精度で解析を実施できることが分かる．

6 結論

本研究では，既存の研究をもとに木材の剛性を低下させる二つの方法を考案し，2次元平面ではり要素の解析を行った．方法 1 では塑性域が広い場合には精度が悪かったが，方法 2 では十分な精度を得ることができた．

今後は，塑性化・破壊判定と剛性低下の方法を 3次元に拡張することを検討する．

参考文献

- [1] 磯部大吾郎：はり要素で解く構造動力学：建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで，丸善出版，2020.
- [2] 岩崎正二，佐々木寛幸，山本亮，宮本裕：塑性域の広がり考慮した平面木骨組構造物の弾塑性解析，第 3 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告書，2004.
- [3] 長谷川薫，薄木征三：曲げとせん断を受けるひずみ軟化はりの弾塑性変位解析，土木学会論文集，1989.

*筑波大学大学院 システム情報工学研究群 大学院生

**筑波大学 教授・博士（工）

*Graduate student, Univ. of Tsukuba

**Professor, Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.