木材構成則を導入した ASI-Gauss 法に基づく木造家屋倒壊解析技術 (その1:木材はりの弾塑性・破壊解析)

| 正会員 | ○伊藤 | 慎也* ¹ | 司 | 磯部 | 大吾郎*3 |
|-----|-----|------------------|---|----|-------|
| 同 | 大村 | 浩之*2 | | | |

| 木材はり | 弾塑性・破壊解析 | 塑性域 |
|------------------|-------------|-----|
| Newton-Raphson 法 | ASI-Gauss 法 | |

1. 序論

木造家屋の地震動解析は数多く行われているが,多く の場合,木材はりは弾性体または剛体として扱われる. 岩崎ら[1]は,木材はりを弾塑性体として扱い,はり断面1 方向の曲げと軸力を受ける木材はりの弾塑性解析を行っ ているが,木造家屋の地震動解析にこれを適用させるに は2方向の曲げと軸力を考慮可能とする必要がある.そこ で本研究では,文献[1]で用いられた木材構成則を2方向の 曲げと軸力を考慮できるように拡張し,地震崩壊解析が 可能な ASI-Gauss 法[2]に導入した.

2. ASI-Gauss 法[2]

本研究で用いた ASI-Gauss 法は,線形チモシェンコはり 要素を用いて弾塑性解析を行う有限要素法(FEM)の一 種である.弾塑性解析時には数値積分点を順応的にシフ トすることで,1部材2要素分割でも高精度な解析が可能 となる.ただし,本研究では木材構成則に基づいて塑性 化を表現するため,数値積分点のシフトは行っていない. ASI-Gauss 法では,弾性域での応力評価点が部材のガウス 積分点と一致するように数値積分点を配置しており,最 小分割数の2要素分割でも収束解が得られる.さらに,部 材の破断および部材間での接触判定が容易であるという 特長を有する.

3. 木材はり

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.長谷川ら[3]は、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としている.そこで本研究では、図1に示す Bilinear 型の応力-ひずみ曲線を用いる.図中の σ_c は降伏応力、 ε_t は引張破壊ひずみ、 ε_u は圧縮破壊ひずみである.

4. 弾塑性境界の算出方法

本研究では、文献[1]と同様にはり要素に作用する断面 力である、軸力と曲げモーメントから弾塑性境界を算出 しそれをもとに剛性を低下させる. 文献[1]では平面での 解析のみを実施しており、曲げモーメントが一方向にし か作用しないため、直接弾塑性境界を求めることができ た. 一方、2 方向の曲げモーメントを取り扱う場合には、 断面力から直接弾塑性境界を求めることはできない. そ



のため本研究では、構造解析から得られた断面力から Newton-Raphson 法を用いて要素断面での応力分布を算出 し、その応力分布をもとに弾塑性境界を求める.

4.1 正規化

本研究では、はりの断面を長方形断面とする. さらに、 応力分布を求めるために、要素断面を 1×1 の正方形とな るように正規化する. これに伴い断面力を以下の式で正 規化する.

$$m_x = \frac{M_x}{\sigma_c b h^3}, m_y = \frac{M_y}{\sigma_c b^3 h}, n = \frac{N}{\sigma_c b h}$$
(1)

これにより,正規化平面では降伏応力の値は-1となる. また,曲げモーメントの正負によって応力分布が鏡像に なるので,議論を簡単にするするため曲げモーメントは 常に正であると仮定する.正規化された断面の弾性域の 応力分布を式(2)で定義する.

$$f(x, y) = ax + by + c \quad a > 0, b > 0$$
(2)

Bilinear 型の応力-ひずみ曲線を用いたため, 塑性域では 常にf(x,y) = -1となる. 弾塑性境界g(x)は, f(x,y) = -1とすることで求めることができる.

$$g(x) = -\frac{a}{b}x - \frac{c+1}{b}$$
(3)

Wooden House Collapse Analysis Technique Based on the ASI-Gauss Method Introducing the
Wood Constitutive Law (Part 1: Elasto-Plastic and Fracture Analysis of Wood Beams)ITO Shinya, OMURA Hiroyuki and
ISOBE Daigoro

4.2 応力分布の算出

応力分布は断面力から直接求めることができないが, 断面力は式(4)に示すように応力分布を重積分することで 容易に求められる.その計算結果は,図3に示す塑性パタ ーンによって異なる.例として塑性パターン1の場合の 重積分の結果を式(5)に示す.

$$m_{x}(a,b,c) = \int^{S} f(x,y) * \left(y - \frac{1}{2}\right) dS$$
(4-1)

$$m_x(a, b, c) = \int^S f(x, y) * \left(x - \frac{1}{2}\right) dS$$
 (4-2)

$$n(a,b,c) = \int^{S} f(x,y) dS$$
(4-3)

$$m_x(a,b,c) = \frac{2ab^3 + 2b(1+c)^3 + (1+c)^4}{24ab^2}$$
(5-1)

$$m_{y}(a, b, c) = \frac{2a^{3}b + 2a(1+c)^{3} + (1+c)^{4}}{24a^{2}b}$$
(5-2)

$$n(a,b,c) = \frac{3a^2b + 3ab^3 - (1+c)^3 + 6abc}{6ab}$$
(5-3)

Newton-Raphson法に用いる関数Fを式(6)のように設定し, 式(7)のように逐次的にa,b,cを求めていくことで,F = 0となるa,b,cが得られる.このように,重積分で得られる 断面力と構造解析から得られた断面力が一致するa,b,cを 求め,式(3)に代入することで弾塑性境界g(x)を求める.

$$F_1(a, b, c) = m_x^{target} - m_x(a, b, c)$$
(6-1)

$$F_2(a, b, c) = m_y^{target} - m_y(a, b, c)$$
(6-2)

$$F_{3}(a,b,c) = n^{target} - n \ (a,b,c)$$
(6-3)

$$\begin{cases} a \\ b \\ c \end{cases}_{i+1} = \begin{cases} a \\ b \\ c \end{cases}_{i} - J_{i}^{-1} \begin{cases} F_{1}(a, b, c) \\ F_{2}(a, b, c) \\ F_{3}(a, b, c) \end{cases}_{i}$$
(7-1)

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial a} & \frac{\partial F_1}{\partial b} & \frac{\partial F_1}{\partial c} \\ \frac{\partial F_2}{\partial a} & \frac{\partial F_2}{\partial b} & \frac{\partial F_2}{\partial c} \\ \frac{\partial F_3}{\partial a} & \frac{\partial F_3}{\partial b} & \frac{\partial F_3}{\partial c} \end{bmatrix}$$
(7-2)

5. 断面積・断面二次モーメントの算出

求められた弾塑性境界をもとに断面積・断面二次モー メントを算出する.断面二次モーメントについては,初 めに図心を求め,図心を基準とした断面二次モーメント を算出する.この計算式も,塑性パターンごとに異なる.

6. 破断判定

弾性域の応力分布をもとにひずみ分布を求める. 図2の 断面で最も圧縮ひずみが大きい位置は(0,0)であり,引張ひ ずみが大きくなる位置は(1,1)である. (0,0)のひずみが圧縮 破壊ひずみ*ɛ*_uになった際に圧縮破壊, (1,1)のひずみが引張



図 5 荷重-z軸方向変位

破壊ひずみ ε_t になった際に引張破壊を判定する.

7. 解析

7.1 解析モデル

文献[1]で行われた解析と同じモデル(図4,表1)で解 析を行う.コの字のはりの上部に水平荷重Pを加える.2 方向の曲げモーメントを作用させるため,中央はり部分 をx軸周りにそれぞれ0,15,30,45°回転させて解析を行う.

7.2 解析結果

はり中央のz軸方向のたわみを図 5 に示す. 解析結果から,角度をつけるほど塑性化開始時の変位が小さいことがわかる.これは図心から圧縮端までの距離が長く,圧縮端でのひずみが大きくなるためである.

塑性化開始後の剛性に注目する.角度をつけているモ デルは塑性化開始が早いが塑性化後の剛性の低下が緩や かである.これは,角度のあるモデルでは塑性域が断面 の角から進行し,欠損部分が比較的小さいからである.

8. 結論

本研究では既存の研究をもとに2方向の曲げモーメント と軸力が作用する木材はりの解析手法を開発し、ASI-Gauss 法に導入した. 今後は、2 方向の曲げモーメントが 作用する実験を行い、解析の精度について検討する.

参考文献

[1] 岩崎正二, 佐々木寛幸, 山本亮, 宮本裕: 塑性域の広 がりを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.

- [2] 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.
- [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.

*3筑波大学

*²National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

*3University of Tsukuba

^{*1}筑波大学大学院

^{*2}防災科学技術研究所

^{*1}Graduate school, University of Tsukuba