

木材めり込み挙動のアイソパラメトリック有限要素解析
 (その15) クーロン摩擦を考慮したいくつかの数値解析テスト

木質材料 弾塑性解析 アイソパラメトリック要素
 接触分離 摩擦

正会員 ○上野 拓也¹ 正会員 上辻真由香¹
 正会員 光井 周平² 正会員 近藤 一夫³

1. 緒言

本研究は、伝統的木造建築架構の解析を行う際の部材接合部の適切なバネ特性の算定方法の確立を主要な目的に、木材めり込み挙動の詳細な有限要素解析を行おうというものであり、前報では、部材どうしの接触分離現象の評価にクーロン摩擦を考慮した場合の解析を行うための準備として、接合要素の導入とクーロン摩擦を考慮したその定式化を行った。

本報では、全面圧縮試験体について試験体底面にクーロン摩擦を適用した場合のいくつかの数値実験を行い、その影響、結果について調査した結果を報告する。

2. 解析対象とそのモデル化

解析対象は、図1に示すような全面圧縮試験体であり、この試験体は平面応力状態にあるものとして、2次元応力解析を行う。樹種はスギを想定しており、用いた材料定数を表1に示す。尚、ひずみ硬化を考慮した場合の接線係数は、 R (半径) 方向、 T (接線) 方向直成分については、表1のヤング係数の1/50とし、一方、 L (繊維) 方向直成分とせん断成分については、ひずみ硬化はないものとしている。

採用した解析モデルを図2に示す。用いた要素形は、節点選択機能を有する9節点四角形要素であり、対称性を利用して、図1の灰色の領域にあたる、1/4を解析している。境界条件は図2に示すとおりで、試験体の底面と支持板が接する領域には、接合要素を挿入している。剛性分布、エネルギー積分には、2次元要素については、 (3×3) のサンプリング点を有する *Gauss-Legendre* の求積法を、一方、接合要素については、サンプリング点3の *Lobatto* の求積法を用いている。なお、本報に

表1 材料定数

| 種類 | 記号 | 材料定数 | 種類 | 記号 | 強度値 |
|-------------------------------------|------------|------|----------------------|------------|-------|
| ヤング係数 (N/mm ²) | E_L | 7350 | 縦圧縮 | F_{Lmax} | 27.5 |
| | E_R | 590 | 強さ | | |
| | E_T | 290 | 単軸 | F_L | 24.75 |
| せん断 弾性係数 (N/mm ²) | G_{LR} | 637 | 降伏応力 | F_R | 2.80 |
| | G_{RT} | 15 | (N/mm ²) | F_T | 1.40 |
| | G_{TL} | 343 | せん断 | G_{LR} | 637 |
| ポアソン比 | ν_{LR} | 0.40 | 降伏応力 | G_{RT} | 15 |
| | ν_{RT} | 0.60 | (N/mm ²) | G_{TL} | 343 |
| | ν_{TL} | 0.90 | | | |

示す数値実験では、試験体の異方性主軸を図1に示す座標軸と一致させ、 $L-R$ 面内で加圧した場合について解析を行っている。

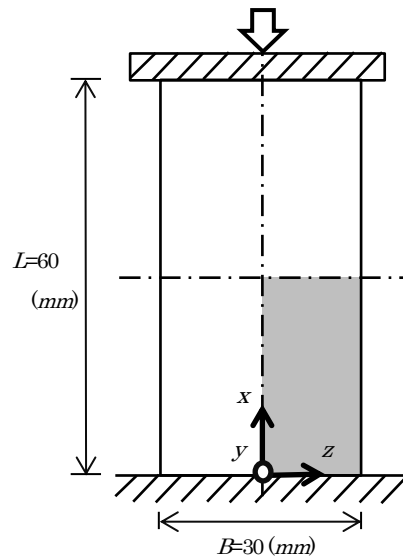


図1 解析対象

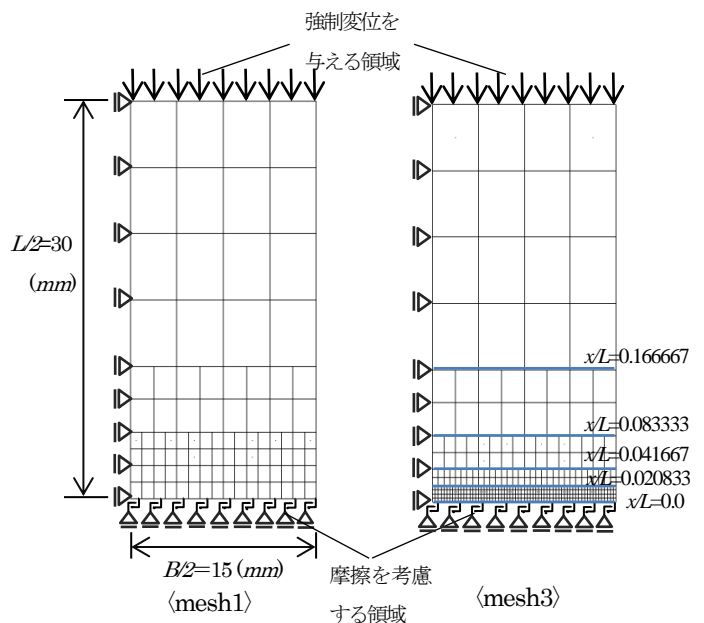


図2 解析モデル

まず、図2の左に示す mesh1 の要素分割を基本に、試験体下部の要素寸法を 1/2, 1/4 とした3つの要素分割について、収束性試験を行った。尚、スペースの関係上、< mesh2 > の要素分割については、省略している。

加圧方向を繊維方向とし、摩擦係数を滑り出しが生じる $c = 0.03125$ としたときの試験体下端における x および z 方向垂直応力、せん断応力、滑り変位を表 2 に示す。尚、図中、応力については、荷重値を加圧板面積で除した値である見かけの応力 σ で、又、滑り変位については、試験体上端の変位を試験体高さで除した値である見かけのひずみで無次元化している。これらの結果より、mesh2 あるいは mesh3 程度の要素分割でほぼ収束状態となることが分かる。尚、こうした結果は、半径方向に加圧した場合についても同様であった。

表 2 収束性試験結果

| z/B | σ_x/σ | | σ_z/σ | |
|-------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| | 0.25 | 0.484 | 0.25 | 0.484 |
| mesh1 | -0.98061 | -1.10951 | -0.03205 | -0.01126 |
| mesh2 | -0.98025 | -1.12000 | -0.03148 | -0.01680 |
| mesh3 | -0.98022 | -1.11170 | -0.03147 | -0.01480 |

| z/B | τ_{xz}/σ | | δ_s/ε | |
|-------|--------------------|---------|------------------------|---------|
| | 0.25 | 0.484 | 0.25 | 0.484 |
| mesh1 | 0.02321 | 0.03704 | 0.00002 | 1.17075 |
| mesh2 | 0.02302 | 0.03508 | 0.00002 | 1.17025 |
| mesh3 | 0.02298 | 0.03486 | 0.00002 | 1.16767 |

次に、前報で示した反復計算の有効性を検証するため、収束性試験と同じ解析ケースについて、反復計算を用いた場合と用いない場合の解の比較、検討を行った。mesh3 の要素分割を用い、収束判定基準値 ε の値を 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} と変化させた時の試験体下端における解の値を、反復計算を用いない場合の結果と共に表 3 に示す。 ε の値を 10^{-3} 程度にすれば、反復計算の適用に伴う誤差は、ほとんど生じないことが分かる。尚、要した反復計算回数は、いずれの場合についても、3-6 回程度であり、前報に示した反復計算法を用いれば、計算時間、必要記憶域の大幅な削減が期待できることが分かる。

表 3 反復計算の有効性検証試験結果

| z/B | | σ_x/σ | | | |
|-----|-------|-------------------|----------|----------|----------|
| | | 反復計算なし | 収束判定 | 収束判定 | 収束判定 |
| | | | 基準値 | 基準値 | 基準値 |
| | | 0.01 | 0.001 | 0.0001 | |
| z/B | 0.25 | -0.98022 | -0.98022 | -0.98022 | -0.98022 |
| | 0.375 | -1.00153 | -1.00153 | -1.00153 | -1.00153 |
| | 0.5 | -1.46720 | -1.46452 | -1.46711 | -1.46720 |

| | | τ_{xz}/σ | | | |
|-----|-------|--------------------|---------|---------|---------|
| | | 反復計算なし | 収束判定基準値 | 収束判定基準値 | 収束判定基準値 |
| | | | 0.01 | 0.001 | 0.0001 |
| z/B | 0.25 | 0.02298 | 0.02297 | 0.02298 | 0.02298 |
| | 0.375 | 0.03130 | 0.03132 | 0.03130 | 0.03130 |
| | 0.5 | 0.04544 | 0.04443 | 0.04539 | 0.04544 |

3. 弾性挙動に及ぼす摩擦の影響

本節と次節では、加圧方向及び摩擦係数をパラメトリックに変化させた場合の弾性及び弾塑性解析を行い、全面圧縮試験体の変形挙動に及ぼす摩擦の影響を調査した結果について報告する。尚、解析では、前節に示した収束性試験結果及び反復計算の有効性検証結果を参考に、全てのケースについて、要素分割を mesh3 とし、収束判定基準を 10^{-4} とした反復計算を適用している。

まず、弾性挙動に及ぼす摩擦の影響を調査した。図 3 に、繊維方向に加圧した場合について、図 2 の青色の線で示したライン上の x 及び z 方向垂直応力、せん断応力分布をそれぞれ示す。又、図 4 には、試験体底面の滑り分布を示している。

これらの結果より、1) 摩擦を考慮した場合、摩擦面近傍の応力状態は、摩擦 0 とした場合のそれとはかなり異なったものとなること、2) 特に、加圧方向垂直応力については、摩擦面端部で急激な立ち上がりを生じること、3) 又、こうした傾向は、摩擦係数を大きくするほど、より顕著なものになること、等のことが分かる。

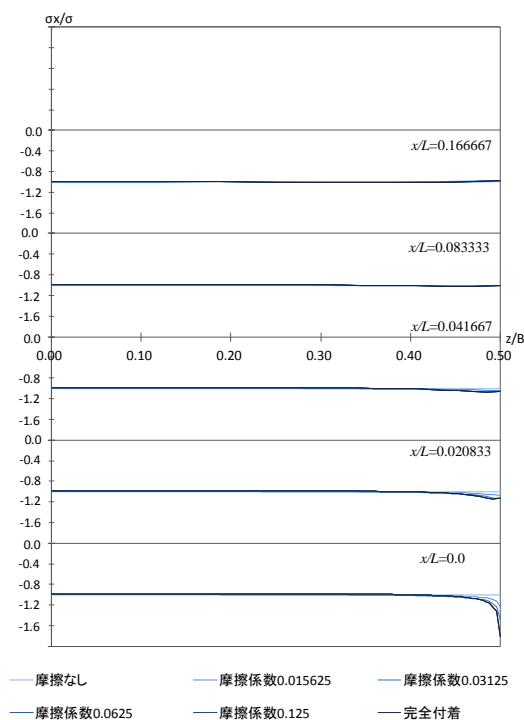


図 3. (a) x 方向垂直応力分布

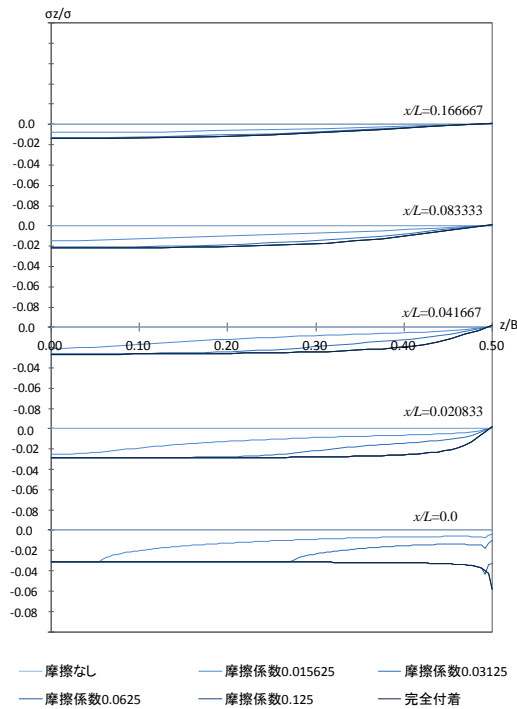


図 3. (b) z 方向垂直応力分布

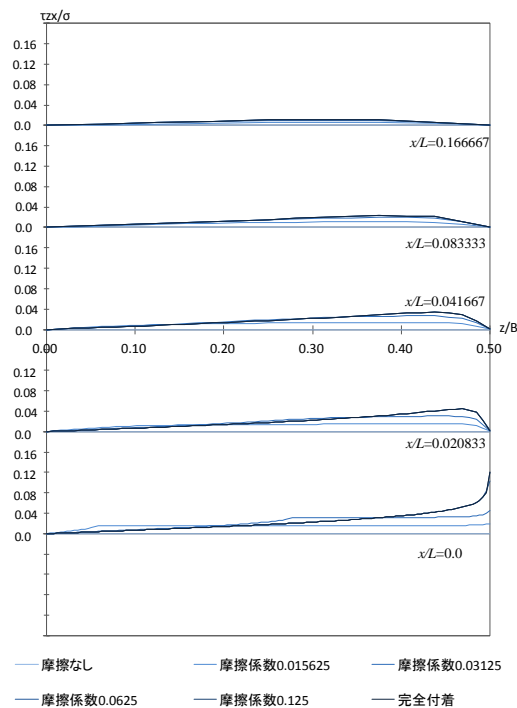


図 3. (c) せん断応力分布

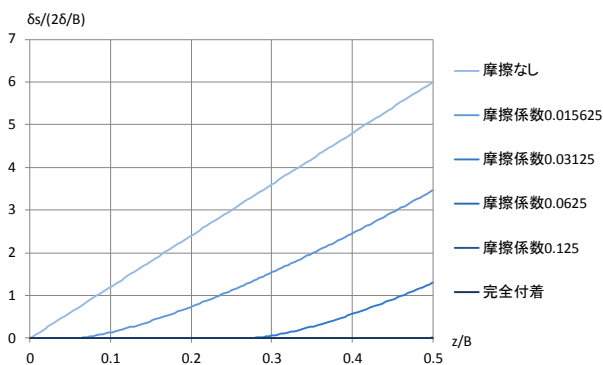


図 4 試験体底面の滑り分布

一方、スペースの関係上、その結果を示すことは省略するが、半径方向に加圧した場合については、応力、滑り共、その分布性状については、繊維方向に加圧した場合とほぼ同様のものとなるが、滑り状態が出現する摩擦係数の限界値は、0.25 程度となり、摩擦の影響は、摩擦係数の大きさだけでなく、加圧方向によっても大きく異なったものとなることが明らかとなった。

4. 弾塑性挙動に及ぼす摩擦の影響

次に、前節と同じ繊維方向に加圧した場合について、弾塑性解析を行い、塑性化後の摩擦の影響について調査した。ここでは、ひずみ硬化を考慮した場合の結果について報告する。

試験体底面の摩擦条件を、摩擦係数 0.0625 のクーロン摩擦、完全付着、摩擦なしとしたそれぞれの場合について、見かけの応力-ひずみ関係を図 4 に示す。また、摩擦係数を 0.0625 とした場合の図 4 の図中の①から⑥の変形状態における試験体内部の応力分布、試験体底面の滑り分布、試験体の降伏域の進展状況を、それぞれ、図 5、6、7 に示す。

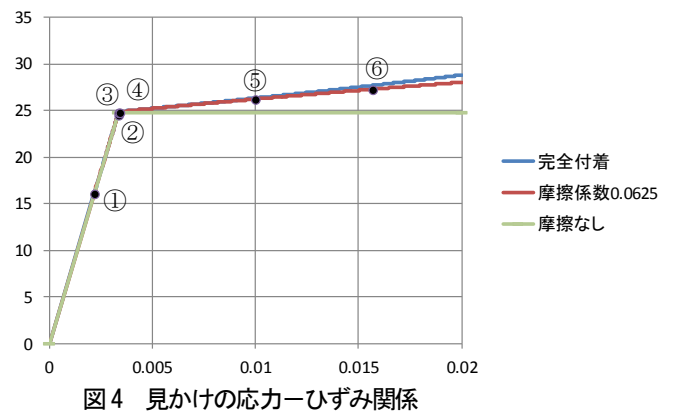


図 4 見かけの応力-ひずみ関係

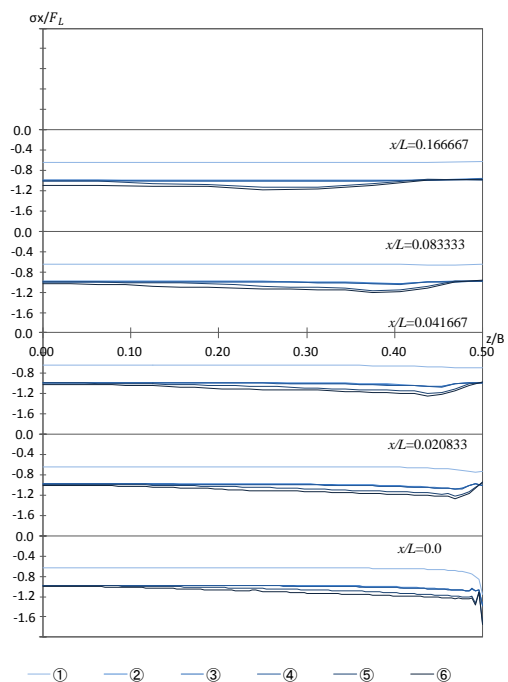


図 5. (a) x 方向垂直応力分布

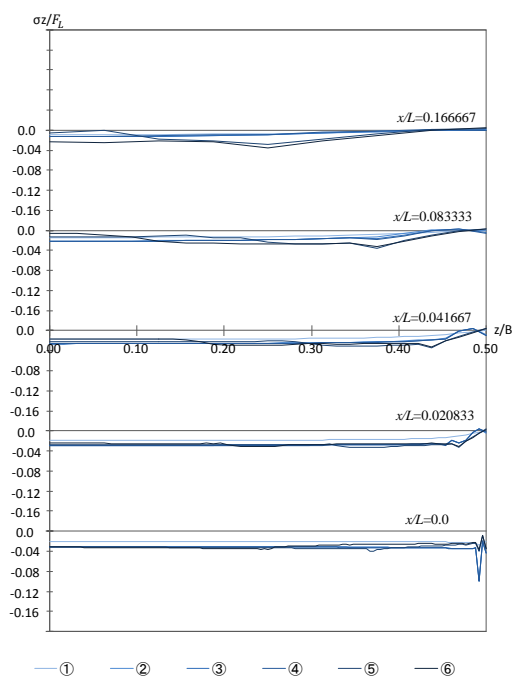


図 5. (b) z 方向垂直応力分布

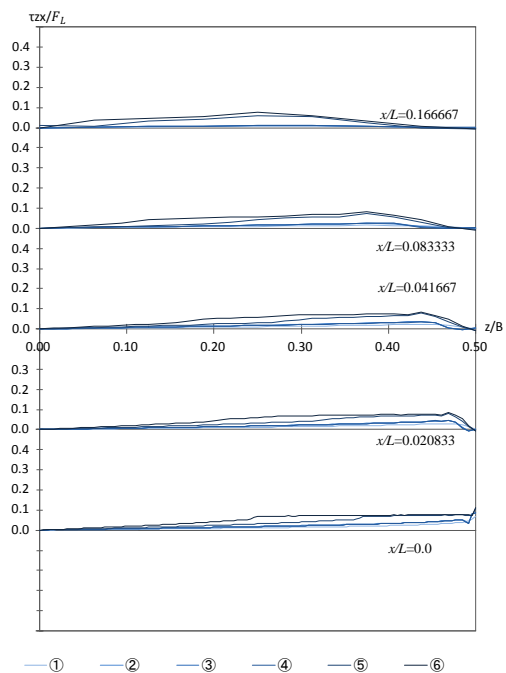


図 5. (c) せん断応力分布

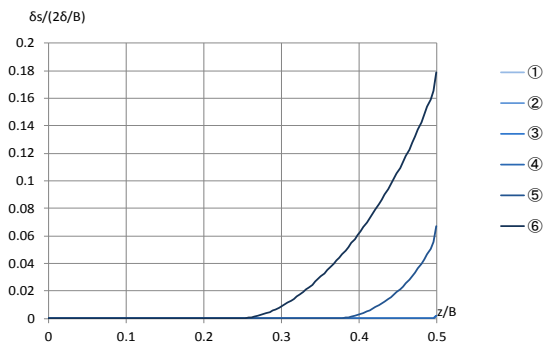


図 6 試験体底面の滑り分布

これらの結果より、1) 全面圧縮試験体の弾塑性挙動は、摩擦を考慮した場合と考慮しない場合とでは、大きく異なったものとなること、2) 又、繊維方向に加圧した場合の挙動は、摩擦係数が非常に小さい場合を除いて、完全付着とした場合とほぼ同様のものとなること、3) 接触面における滑りは、まず、接触面端部近傍で生じ、変形の進行と共に、接触面内部に順次広がっていくこと、等のことが分かる。

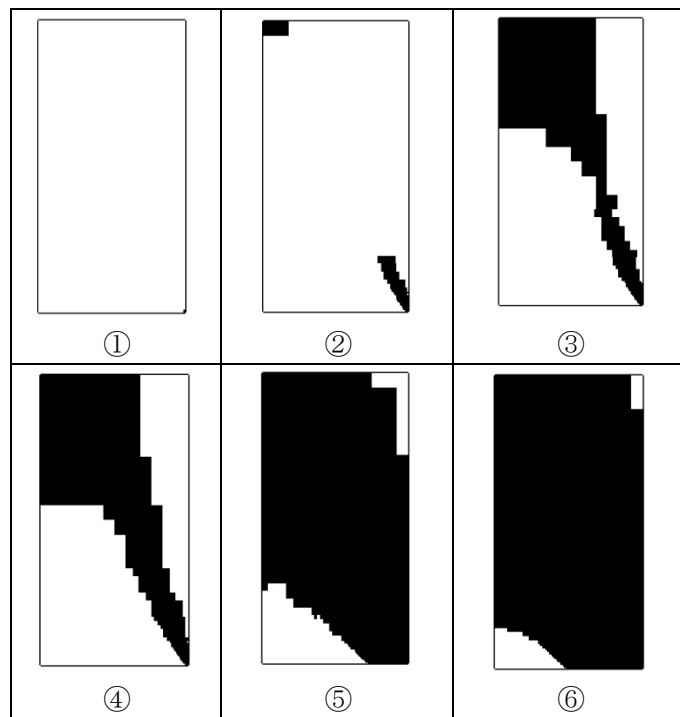


図 7 降伏域の進展状況

5. 結 び

本報（その 14）では、前報に示した解析方法を用いて、全面圧縮試験体の弾性及び弾塑性解析を行い、摩擦を考慮したときの接触分離・滑り付着の状態変化が変形挙動に及ぼす影響、効果について調査した。

参考文献

- 1) 堀文, 光井周平, 河内武, 近藤一夫: 木材めり込み挙動のアイソパラメトリック有限要素解析 (その 8) 強度比無次元化応力を用いた直交異方性降伏条件とひずみ硬化則 (続), 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 34 巻, 2011.3 (CD-ROM)
- 2) 堀文, 光井周平, 河内武, 近藤一夫: 木材めり込み挙動のアイソパラメトリック有限要素解析 (その 10) 2 次元問題における材料構成則について, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 35 巻, 2012.3 (CD-ROM)

*1 広島大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生
 *2 呉工業高等専門学校建築学分野 助教・博士(工学)
 *3 広島大学大学院工学研究科 准教授・工博

*1 Graduate Student, Graduate School of Eng., Hiroshima Univ.
 *2 Assistant Prof., Kure National College of Technology, Dr. Eng.
 *3 Associate Prof., Faculty of Eng., Hiroshima Univ., Dr. Eng.