

三次元有限要素損傷解析を用いた木材のボルト接合部の破壊メカニズムの解明

Elucidation of fracture mechanism of bolted timber connections by using three dimensional finite element analysis with continuum damage model

新潟大学 研究推進機構 助教 寺西正輝

1. はじめに

木質構造物では、部材耐力よりも、接合部耐力が一般的に低いため、接合部の変形・破壊が構造物全体の挙動に大きな影響を及ぼす。従って、木質構造物の安全性の観点からは十分な塑性変形能力を有する接合部の設計が望ましく、終局挙動の定量的な評価手法の確立が重要である。木質構造物では、ボルト、ねじ、釘等の円形鋼棒を接合具として使用する曲げ降伏型接合が頻用されている。一般的には、径長比(木材厚/接合具径)の大小が接合部の靱性・脆性破壊を決定することが知られている。一方、径長比の他にも縁端距離や接合具の表面粗さ等が破壊形式に大きく影響することが報告されているが、その破壊メカニズムには不明な点が多い(桑村仁 (2013).日本建築学会構造系論文集 78(685): 529-538.)。曲げ降伏型接合部の耐力推定手法として、ヨーロッパ型降伏理論、弾性床理論、破壊力学を用いた手法が提案されているものの、靱性、脆性破壊のメカニズムの定量的な評価手法の確立には至っていない。接合部の破壊メカニズムの解明には、木材の段階的な損傷を再現可能な増分解析手法が必要不可欠である。金属材料やコンクリートの破壊現象の再現方法として、損傷力学モデルを用いた有限要素解析が提案されており、大きな成果を上げている。そこで、本申請では、木質材料用の損傷力学モデルを開発し、三次元有限要素解析を実施し、ボルト接合部の破壊メカニズムを解明する。

2 木材の材料試験

図1に示す圧縮試験装置を用いて、JAS規格のスギ材の圧縮試験を実施した。図2は各方向の圧縮試験の応力ひずみ関係である。なお、申請当初は、スギ材の各方向の機械的性質を材料試験により取得する予定であったが、材料試験の準備を進めていく中で、実験に必要な計測機器、治具、試験片の加工に予算が想定以上に嵩み、全方向(繊維、半径、接線方向)の機械的特性を取得することが困難であることが判明した。そこで、方針を転換し、以降の有限要素法における木材の機械的性質は、既往の研究(Sirumbal-Zapata, L. F., et al. (2018). Computers & Structures 195: 47-63.)の値を代用することとした。



図 1 圧縮試験装置

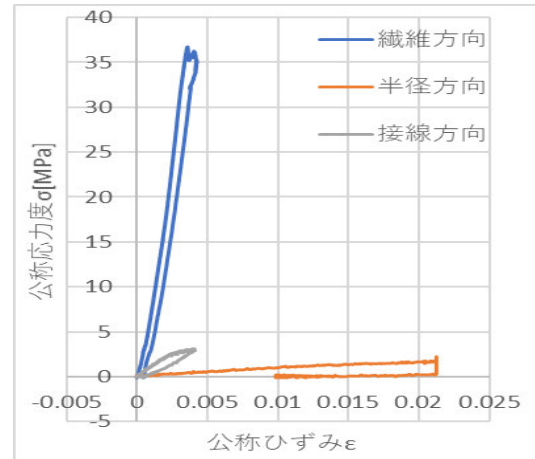


図 2 スギ材の各方向の圧縮試験結果

3. 木材の材料構成則および数値解析例

木材の材料構成則は、Zapata らにより提案された材料構成則をベースに開発を実施した (Sirumbal-Zapata, L. F., et al. (2018). Computers & Structures 195: 47-63.). この材料構成則は連続体損傷力学に基づき、定式化されている。その中で、損傷規準として Hill の異方性降伏条件式、弾塑性規準として Hoffman の降伏条件式を採用した。また、完全陰的アルゴリズムにより応力とひずみを算出するプログラムの開発を行った。さらに、材料構成則の汎用有限要素法ソフト Abaqus のユーザーサブルーチン(UMAT)関数を作成した。

図 3 は、繰返し負荷下における、1 要素の数値解析結果であり、引張方向は弾性脆性、圧縮方向は弾塑性脆性を表しており、木質系材料特有の力学的挙動が再現されていることを確認した。また、図 4 に示すように、木材のボルト接合部を想定した有限要素解析(1/2 モデル)を実施し、複数要素への適用性を確認した。ここでは、鋼から成るボルト軸部とボルト孔を有する木材から成る有限要素モデルを作成し、繰返し負荷を与えた。なお、ボルト軸部表面と木材孔の表面には接触条件を考慮した。図 5 の解析結果より、解析モデルは、繰返し負荷に伴う、ボルト孔付近の塑性化および損傷の進行を再現可能であることを確認した。

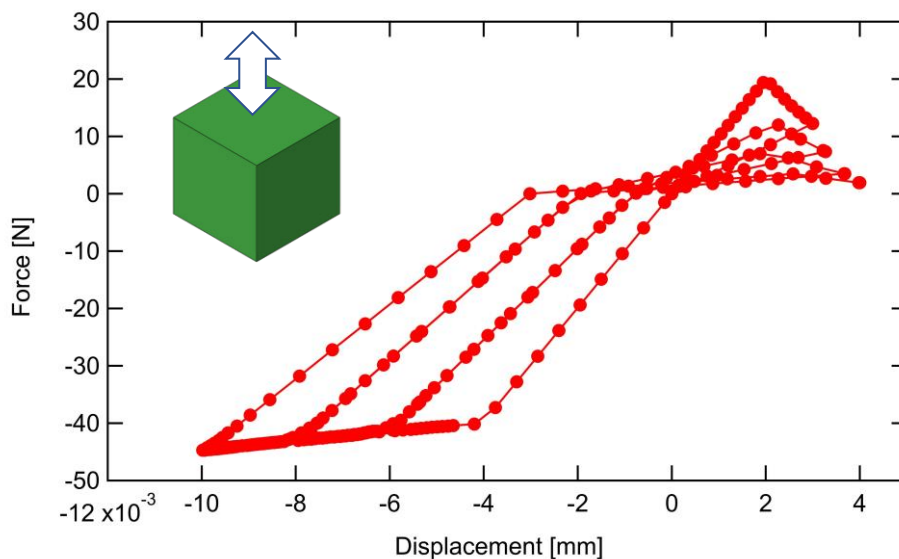


図 3 1 要素での数値実験

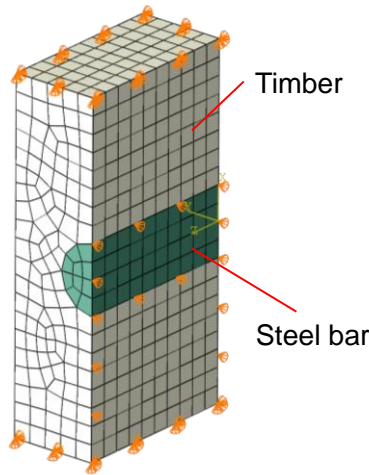


図4 有限要素モデル

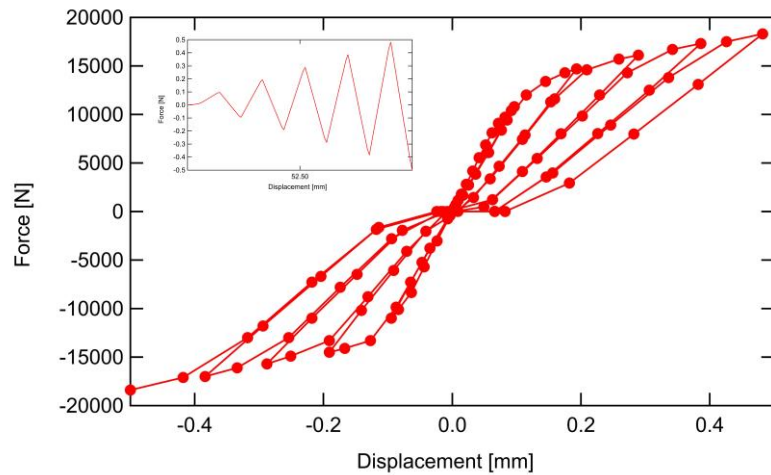


図5 荷重変位関係

4. 単調負荷における数値解析結果と実験結果の比較

桑村らにより実施されたボルト接合試験の結果(桑村仁 (2013).日本建築学会構造系論文集 78(685): 529-538.)と有限要素解析結果の比較を行う。図6に示す試験片 2dC と 8dC の実験結果を用いる。図7がボルトの軸部および木材の有限要素モデルである。図中の L は繊維方向, R は半径方向, T は接線方向を表す。力学的対称性を考慮し, 1/2 サイズの解析モデルを用いた。また, ボルト軸部と木材のボルト穴表面に接触条件を考慮している。先述したように, スギ材の全方向の材料定数を材料試験から取得することは困難であったため, 既往の研究(Sirumbal-Zapata, L. F., et al. (2018). Computers & Structures 195: 47-63.)の値を代用した。図8, 9に試験片 2dC と 8dC におけるミーゼス応力および損傷定数の時間毎の分布を示す。試験片 2dC では, 木材下端中央からき裂が発生・進展し, その後, ボルト孔付近から上部に向かってき裂が発生・進展する様子が再現されている。また, 試験片 8dC では, ボルト孔から木材の下端に向かってき裂が発生・進展し, その後, ボルト孔から木材上部に向かってき裂が発生・進展する様子が再現されている。以上のことから, 提案モデルがボルト接合試験における損傷発生・進展挙動を定性的に再現できることを確認した。今後は, 木材の全方向の材料定数を材料試験から取得し, 有限要素解析に使用し, 数値解析結果と実験結果を定量的に比較する予定である。

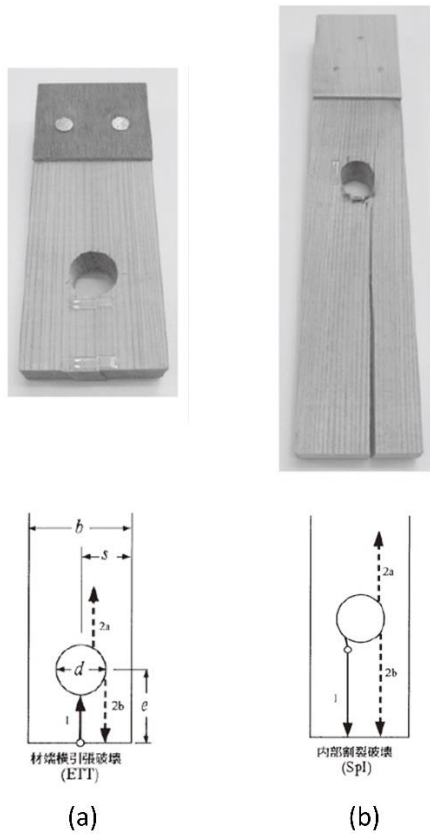


図6 試験片(a)2dC と(b)8dC の破損状況

(桑村仁 (2013).日本建築学会構造系論文集 78(685): 529-538.からの転載)

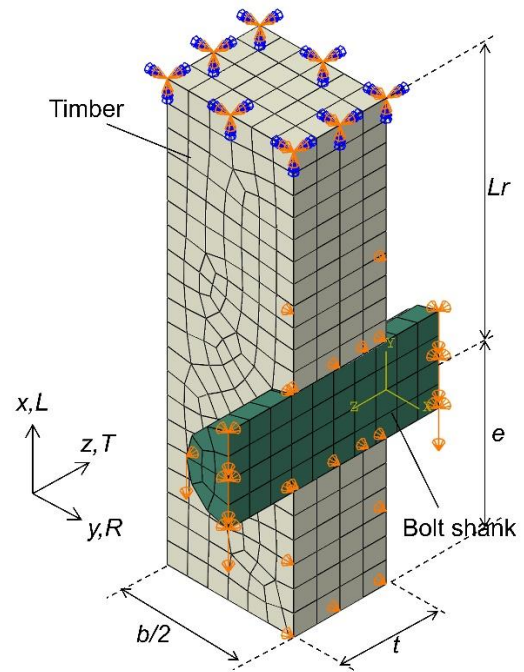


図7 有限要素モデル

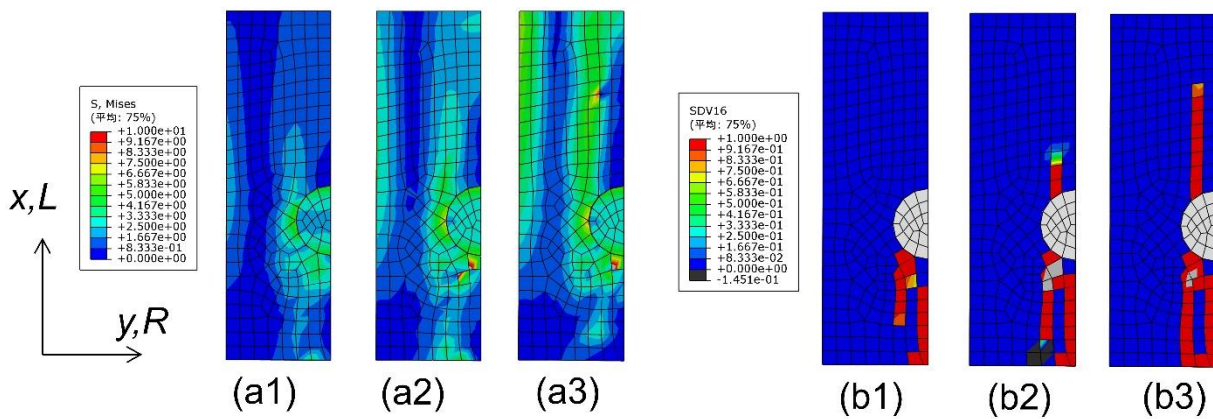


図8 試験片 2dC における(a)相当応力と(b)損傷変数の分布

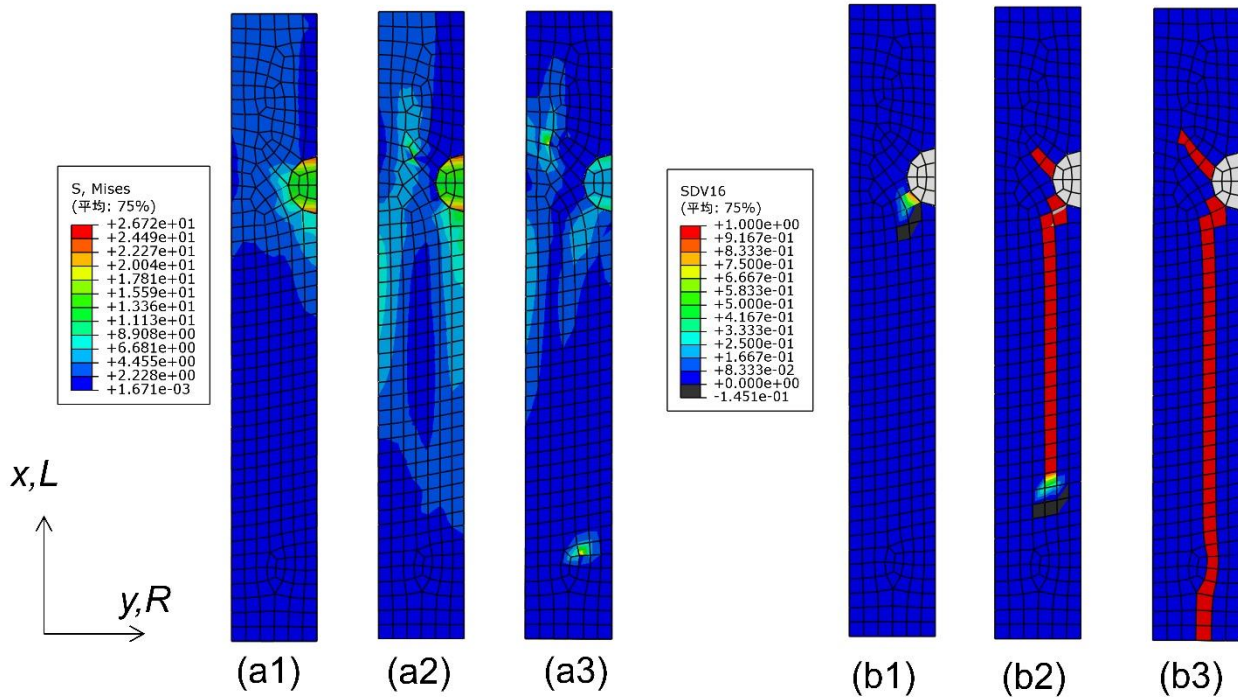


図9 試験片 8dC における(a)相当応力と(b)損傷変数の分布

5. まとめ

本研究では、木材の異方性を考慮した材料構成則を開発し、汎用有限要素プログラム Abaqus への実装を行った。1要素および複数要素を用いた数値解析例を通して、提案モデルが木材の力学的特性を定性的に再現可能であることを確認した。また、既往のボルト接合部の実験結果と数値解析結果を比較することにより、提案モデルによりき裂の発生・進展を定性的に再現可能であることを確認した。なお、本成果は、材料試験結果を追加後、再解析を実施し、定量的な評価を行った後に、国際ジャーナルに投稿予定である。