

# 欠点がスギ製材の曲げ破壊に与える影響に関する実験的考察

川口 太一

## 1. はじめに

国内に限らず脱炭素社会の実現に向けた活動が活発化する中、我が国でも 2021 年に木材のさらなる利用を促す政策がとられ、建築物における木材利用は今後さらに加速するものと考えられる。一方、高層化・大規模化が進む昨今の木質構造において、他の構造材料と同等の信頼性を確保するためには、独自の強度体系等を整理していく必要があると考える。

木材は天然材料であるが故、材料内が不均質で欠点と呼ばれる明らかに性質の異なる部分も内包する。曲げ強度に限定しても、節が強度に与える影響<sup>1)</sup>の他、人工乾燥による内部割れ<sup>2)</sup>も、今後その評価が求められる重要な要素と言える。本研究はこれらを背景に、国内の主要樹種であるスギ材を対象に、曲げ破壊に影響を及ぼす要因を調べたものである。本報では特に、節と内部割れに着目し、CT スキャンと曲げ試験の結果を照合して分析を進めた結果について述べる。

## 2. 部材内の情報を補完した実大曲げ試験

### 2.1 試験体の概要

本研究では、熊本県北部の樹齢 43 ～ 66 年のスギ植林地より、長さ 4 m の直材を伐採・選定し、それを製材して試験体とした。得られた丸太は 30 本で、まず丸太を断面 135 mm 角に製材した上で、標準的な乾燥スケジュール<sup>3)</sup>で人工乾燥を行った。その後、曲げ試験に用いる試験体として、断面 120 mm 角、長さ約 2640 mm に再度製材した。

これら 30 本の試験体について、乾燥前の含水率が低い順に S-1, S-2, …と試験体番号を付し、人工乾燥後に内部割れや節等の欠点に関する情報を得るため、CT スキャンを利用し、個別の部材断面毎に木材内部の情報を補完した。以降では、CT スキャンの際に上面とした面を A 面とし、元側の木口面から見て時計回りに各面を B, C, D 面と呼ぶ。なお試験体は CT スキャン後、曲げ試験まで約 10 か月間、概ね 20 °C 程度の空調環境下にて保管したが、恒湿環境ではないため、この期間に一部の割れが進行した可能性もある。

### 2.2 試験スケジュール

本研究で実施する試験では、木材内部の割れ等が破

壊性状に及ぼす影響に着目するため、各試験体の試験前後の状態を正確に調べることに重きを置き、試験体毎に次のスケジュールで一連の試験を実施した。まず、試験体の A ～ D 面に対し、図 1 に示すように、材軸方向に撮影範囲をマーキングし、個別に写真を撮影した。その後、重量測定と共に、同じく図 1 に示す位置で含水率を計測した後、後述する曲げ試験を実施した。曲げ試験では、破壊まで試験をするが、マーキングに従い、試験後にも一対の範囲で試験体の写真を撮影した。なお、含水率測定には高周波容量式の水分計を用い、A 面と C 面の材軸方向 3 箇所を平均値を当該試験体の含水率として評価した。

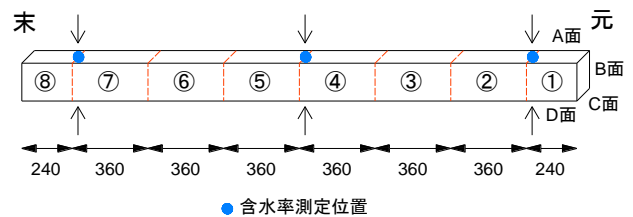


図 1 写真撮影の範囲と含水率の計測位置

### 2.3 実大曲げ試験

実施した曲げ試験は、等曲げ区間を設けた 4 点曲げ試験である。荷重装置は最大荷重 100 kN、ストローク変位 ±150 mm の油圧ジャッキで、フィードバック制御によって荷重点の変位が一定速度となるものである。ここでは荷重速度 = 0.05 mm/sec とし、試験体の破壊が視認できた時点で試験を終了とした。今回のシリーズでは、試験体が破壊に至るまでに最も短い場合で 14 min 以上の荷重時間を要した。試験体セッティングの概要と計測箇所を図 2 にまとめる。

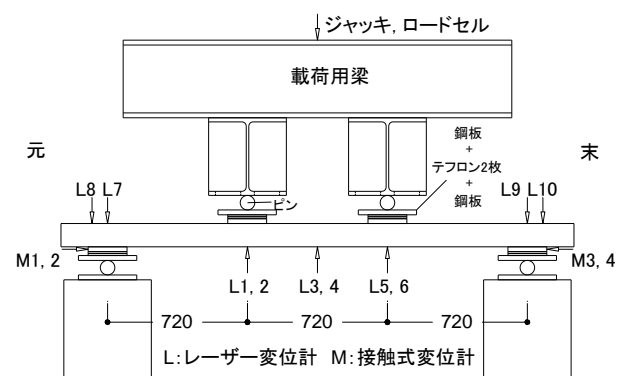


図 2 試験体のセッティングと計測位置

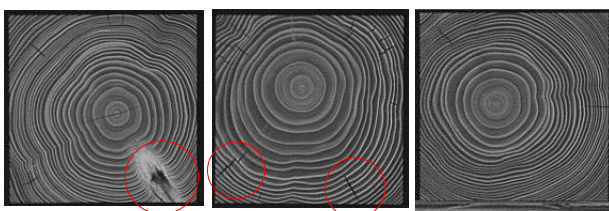
図 2 に示すように、試験条件のうち特に荷重点の拘束には配慮し、4 点全てでピンと試験体の間にテフロンシート 2 枚を挟んだ鋼板を配置した。これは、材軸方向の変形を可能な限り拘束しないため、厳密にはテフロンの摩擦分の拘束効果を持つことになる。

計測項目は、同じく図 2 に表記した変位計による計測がメインで、これらにより支持点等の回転角やめり込み量を求められる。その他、ロードセルによる荷重計測と確認用にジャッキのストロークも記録した。また、今回は破壊性状に着目するため、曲げ試験中の試験体の様子を 3 方向から映像として記録した。

### 3. 試験結果と欠点曲げ破壊に与える影響の分析

#### 3.1 破壊部付近の欠点に基づくグループ分け

試験結果を分析する上で、まず試験中の映像と試験後の写真から破壊位置を特定し、その位置の CT 画像を基に、次のグループ I ~ III に分類し、以降の分析を進める。図 3 に、グループ分けの基準となる、CT 画像から分かる断面内の欠点の様子を示す。グループ I は、図 3 (a) のように破壊部付近に内部割れと節の両者が認められた場合で、計 11 体がこれに該当した。グループ II は図 3 (b) のように内部割れのみが確認された試験体で 13 本、グループ III は図 3 (c) のように内部割れや節などの欠点の確認できなかった試験体で計 5 本であった。なお、S-3 は破壊位置の CT 画像が不足していたため、以降のグループからは除外し、単独の試験体として扱った。



(a) 節、内部割れ有 (b) 内部割れ有 (c) 欠点無し

図 3 破壊部の欠点の様子

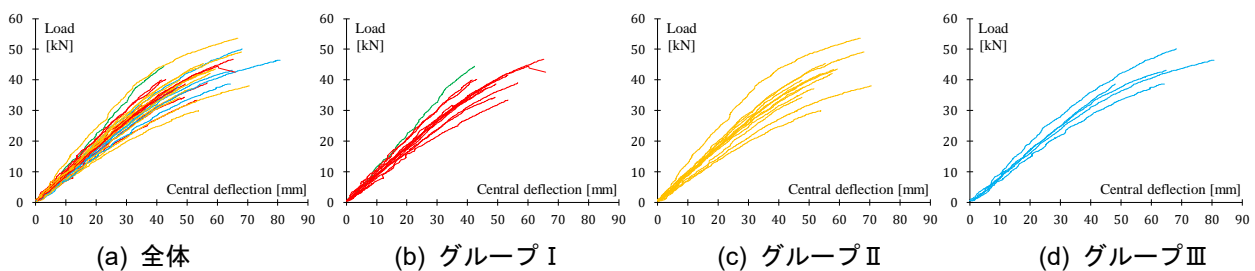


図 4 欠点に基づくグループ別の試験結果 (荷重荷重-中央たわみの関係)

#### 3.2 グループに分類した試験結果の分析

試験結果として、まず各試験体の荷重-変形関係として、部材中央のたわみと荷重荷重の関係を 3.1 節で分類したグループ毎に色分けして図 4 に示す。ここで、中央たわみはレーザー変位計 3, 4 の平均値からめり込み変位を差し引いた値である。

図 4 の結果より、まず (a) とした全体の結果より、特に傾きに注目すればグループ間に明瞭な差異は認められないことから、各グループの剛性に大きな偏りはないものと推察される。一方、(b) ~ (d) としたグループ別に描いた結果を相互に比較すると、横軸の中央たわみが破壊時にグループ I が最も短く、次いでグループ II、グループ III の順に延びている様子が窺える。すなわち欠点の影響がより強いほど、試験体が脆性的な破壊を呈していることが示唆される。

この傾向を具体的に調べるため、破壊時の中央たわみのみを整理した結果を図 5 にまとめて示してある。図 5 の結果より、結果は大きくバラつくが平均値に着目すると、グループ I と II で約 5 mm、グループ II と III で約 10 mm で、絶対変位が 50 mm 程度と考えれば、これらは 1 割 ~ 2 割に相当し、グループ間には有意差があると判断される。

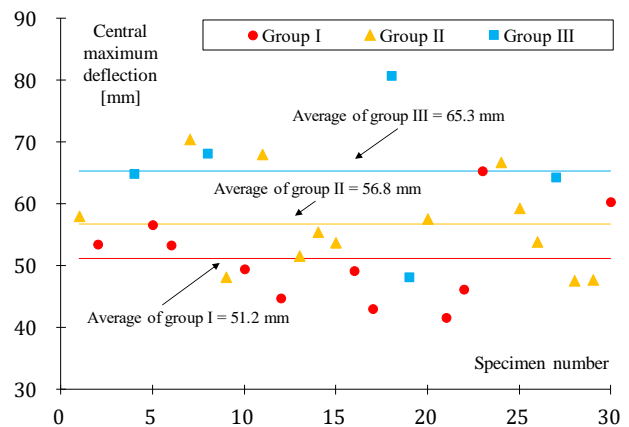


図 5 破壊時の中央たわみと欠点毎のグループの関係

次に、曲げ強度に与える影響として、各試験で得られた最大荷重をこれまでの結果と同様、グループ毎にまとめて結果を図 6 に示す。

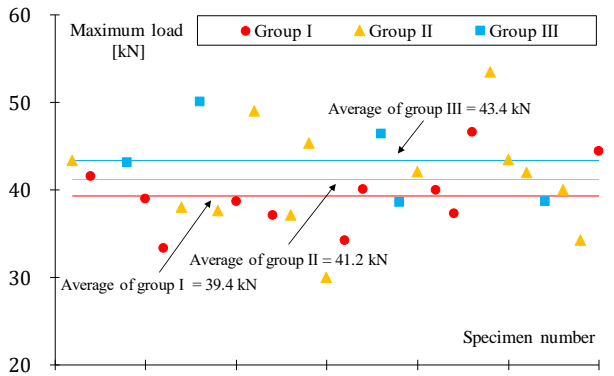


図 6 破壊時の最大荷重と欠点毎のグループの関係

図 6 より基本的には、先の分析結果と同様、最大荷重についてもグループの序列が確認できるが、図 5 に示した結果に比して明瞭ではない。この分析では、ヤング係数の差異を考慮していないため、木材の個体差の影響が強いと考えられるが、それらの影響を明確に分離することは難しく、以降では CT スキャンの結果をより詳しく調べ、分析を進めるものとする。

#### 4. 木材内部の情報を含めた総合考察

##### 4.1 知見の整理と基本的な分析方針

これまでの分析結果より、欠点を有する試験体はより脆性的に破壊し、欠点の種類としては内部割れの影響より節の影響が大きいと推察された。しかし、この傾向と外れる試験体も存在し、これは木材の個体差の影響によるものと考えられる。以降では、これらの試験体を対象に、密度および髓の位置の差異による曲げ破壊への影響を分析する。

##### 4.2 密度の差異による曲げ破壊への影響

一般に木材は密度が大きいほど強度が高いとされ、本試験でも図 7 に示す通り、その傾向が見られた。

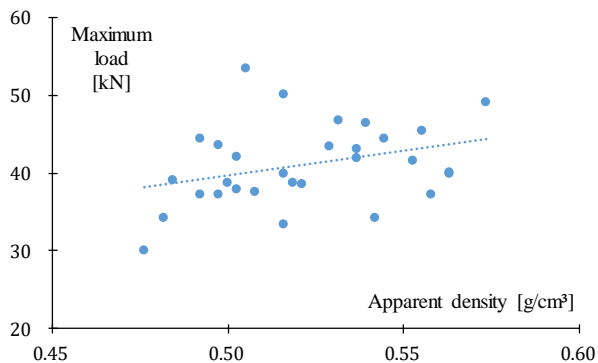


図 7 最大荷重と見かけ密度の関係

木材において密度には個体差があることに加え、断面内でも差がある。曲げ破壊は、一般に断面下端部の引張破壊が先行するため、その密度が曲げ破壊に影響すると推察されるが、下端部のみの密度を計量することは難しい。ここでは、下端部密度の大小関係を示す代替指標として年輪間隔を用い、曲げ破壊に影響を与える要因となるかを調べる。まず密度と年輪間隔の関係を調べるため、各試験体について図 1 における破線位置での CT 画像を取り出し、それを全乾密度順に並べた。全乾密度  $\rho$  は、曲げ試験前に計測した測定重量  $w$ 、平均含水率  $u$ 、材長  $L$ 、断面積  $A$  を用いて下式より評価する。

$$\rho = \frac{w}{\frac{u}{100} + 1} \times \frac{1}{AL} \quad (1)$$

表 1 に全乾密度の小さい方、大きい方から各 5 試験体ずつにおける中央付近 3 枚の CT 画像を示す。

表 1 全乾密度順の試験体中央付近の CT 画像

##### (a) 全乾密度が小さい方

| 試験体番号        | S-3   | S-5   | S-27  | S-15  | S-7   |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 元側           |       |       |       |       |       |
| 中央           |       |       |       |       |       |
| 末側           |       |       |       |       |       |
| 全乾密度 [g/cm³] | 0.403 | 0.411 | 0.414 | 0.414 | 0.414 |

##### (b) 全乾密度が大きい方

| 試験体番号        | S-2   | S-11  | S-12  | S-21  | S-17  |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 元側           |       |       |       |       |       |
| 中央           |       |       |       |       |       |
| 末側           |       |       |       |       |       |
| 全乾密度 [g/cm³] | 0.457 | 0.461 | 0.463 | 0.467 | 0.468 |

表 1 より全乾密度が大きいほど年輪間隔が狭くなっていることが見て取れ、この傾向は全体的にも言えることだった。このことから下端部の年輪間隔が狭いと材の強度が高まると考えられる。

### 4.3 髓の位置の差異による曲げ破壊への影響

表 1 の CT 画像より、髓の位置には個体差があることが分かる。一般に髓付近はヤング係数が低いと考えられているため、髓位置の違いにより試験体毎に断面内でヤング係数のばらつきの様子が異なる。これが各試験体断面内の応力分布に差異を生じさせ、曲げ破壊に影響を与えると予想される。

そこで、図 8 に示す方法で髓の座標および破壊部の位置を特定し、点と直線の距離の式により求まる髓と破壊部の距離と最大荷重の関係を図 9 に示す。

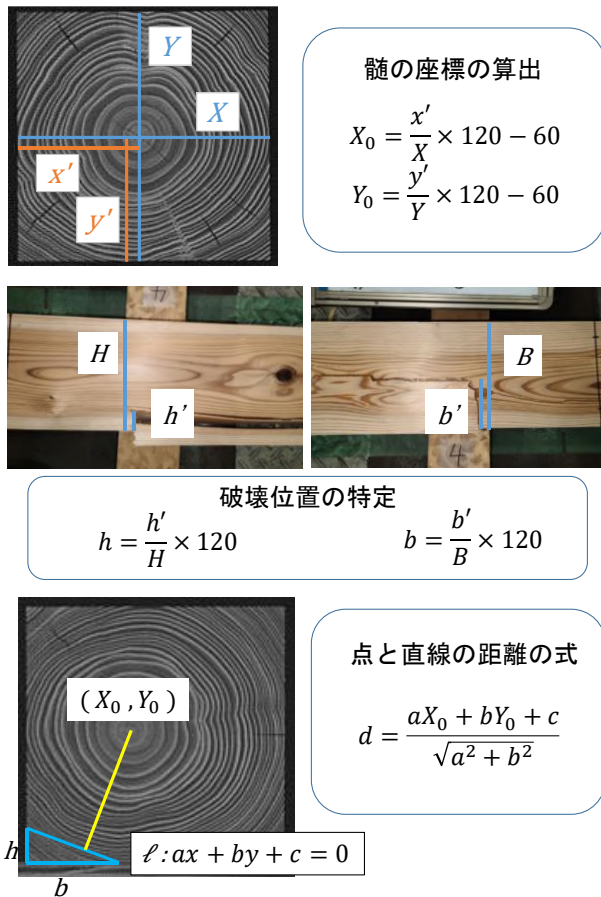


図 8 髓と破壊部の距離の求め方

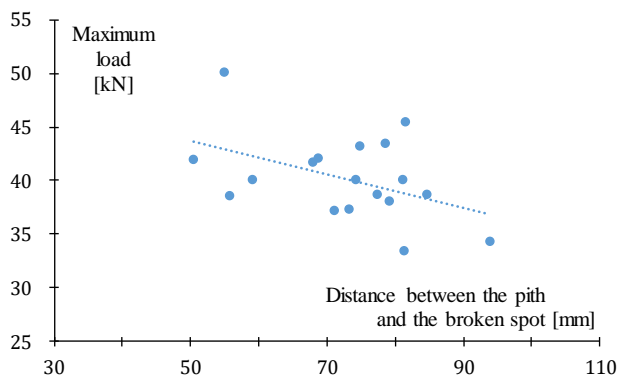


図 9 髓と破壊部の距離と最大荷重の関係

図 9 より髓と破壊部との距離と最大荷重には弱い負の相関が見られることから、髓の位置が下端部に近いほど材の強度が高くなると考えられる。しかし、グループ I では材端部で小さく壊れる破壊形状が多かったため、これにより髓と破壊部との距離が大きくなっている可能性を考慮する必要がある。

### 4.4 木材の個体差による曲げ破壊への影響

3 章で述べた傾向と外れた試験体の破壊位置での CT 画像を表 2 に示す。

表 2 破壊位置での CT 画像

| グループ I |      | グループ II |      |      | グループ III |
|--------|------|---------|------|------|----------|
| S-23   | S-30 | S-7     | S-11 | S-24 | S-19     |
|        |      |         |      |      |          |
|        |      |         |      |      |          |

ここまでの分析で下端部の年輪間隔が狭い、または髓が下端部に近いと材の強度が高まると推察されるが、表 2 より、S-30、S-7、S-24 は、材の強度が高くなるような特徴は見られず、S-19 に関しても材の強度が低くなるような特徴は見られない。一方、S-23 は髓の位置が下端部に近く、S-11 は下端部の年輪間隔が狭いため、これにより材の強度が高くなった可能性はあるが、平均より特段に異なるわけではないため、下端部の密度や髓の位置が欠点の有無以上に曲げ破壊に影響を与える決定的な要因であるとは言えない。

### 5. まとめ

本報では、CT スキャンにより木材内部の情報を補完したスギ試験体を対象に、曲げ破壊に内部割れや節等の欠点を与える影響を分析した。検討の結果、欠点は曲げ強度の低下以上に、脆性的な破壊に寄与する傾向が明らかとなった。また、欠点の種類としては内部割れよりも節の方がその影響が大きいという傾向が見られた。一方、これらの傾向と合致しない試験体についても検討を行い、不明な点は残るものの、髓位置と破壊箇所との関係などの新たな知見が得られた。今後はさらに分析を深める計画である。

### 参考文献

- 1) 畑山よし男：有節材の強度推定に関する研究，林業試験場研究報告，第 326 号，pp. 69-169, 2011. 3
- 2) 農林水産省：接着重ね材の日本農林規格，農林水産省告示第 179 号，第 4 条，第 8 項，材料，2019. 1
- 3) 石川県林業試験場 石川ウッドセンター：安心・安全な乾燥材の生産・利用マニュアル，前田印刷株式会社，pp. 88, 2012