

1. 序論

天然の材料である木材を用いて製作される集成材は、材料強度のばらつきが大きいため、部材の強度推定が設計時の重要な問題となる。一般的に、木材の強度は、ヤング率と高い相関が見られるため、集成材の曲げ耐力も、はりの曲げヤング率から推定する方法が多くとられている¹⁾²⁾。しかし、実際の集成材の曲げ破壊状況は、最下層ラミナに存在する節などの欠点を起因とする場合が多く、欠点を考慮した破壊現象の説明や考察³⁾、節のランダム性を統計的に評価した集成材の曲げ強度評価⁴⁾などが報告されている。これらの報告では、欠点が破壊現象や耐力に与える影響は検討されているが、欠点の特性と部材強度の関係の実験による裏付けや、設計に応用できるような体系的な整理はなされていない。

本研究は、節の位置と強度の統計的なランダム性を考慮し、それらの確率論的な特性と、はりの曲げ強度との関係を明らかにすることを目的とする。具体的には、節を考慮した曲げ耐力モデルを提案し、実験に基づいて耐力モデルの裏付けと各モデルパラメータの決定をするとともに、節の持つランダム性が曲げ耐力に与える影響を検討する。

2. 節のランダム性を考慮した曲げ耐力モデル

ラミナに存在する節の位置はランダムであり、また節部分の強度にもランダム性が存在すると考えられる。そこで、本章では節の位置と強度を確率変量としたときの集成材の曲げ耐力モデルについて述べる。まず、耐力モデルについて以下のような仮定をする。

- ・節を含まない無欠点部分の強度は、はり全長にわたり一様である。
- ・集成材の曲げ強度は、最下層ラミナの引張強度で決定される⁵⁾。

図1に示すように、はりに単位荷重 $P_0(x)$ (x は材長方向座標) が作用したときのモーメント分布を $M_0(x)$ とする。まず、最下層が無欠点材のとき、この集成材が破壊するときの荷重を $C \cdot P_0(x)$ とすると、一般的にはりは曲げ破壊するまで弾性挙動をすると仮定できることから、はりの曲げ強度 σ_{b0} は次式で求められる。

$$\sigma_{b0} = \frac{C \cdot \max_x [M_0(x)]}{Z} \quad (1)$$

一方、最下層に存在する i 番目の節で破壊するとき、この節位置を X_i ($i=1,2,\dots,n$; n : 最下層に存在する節の数)、この節を含む断面の曲げ強度を σ_{bi} 、破壊時の荷重を $C_i \cdot P_0(x)$ とすると、破壊は

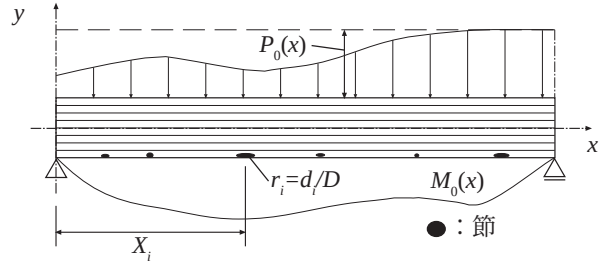


図1 集成材に作用する $P_0(x)$ と $M_0(x)$ の関係

$$\sigma_{bi} = \frac{C_i \cdot M_0(X_i)}{Z} \quad (2)$$

のとき生じる。(2)式を C_i について解けば、

$$C_i = \frac{\sigma_{bi} \cdot Z}{M_0(X_i)} \quad (3)$$

となる。耐力モデルの仮定より、 σ_{bi} と、 X_i における最下層ラミナの引張強度 σ_{ti} は等しい。また、 σ_{ti} は、 i 個目の節の節径比 r_i ($r_i=d_i/D$, d_i は i 個目の幅方向の節径、 D は材の幅) の関数 f により、次式で求められるものとする。

$$\sigma_{ti} = f(r_i) \quad (4)$$

はりの耐力は、 $C_i \cdot P_0(x)$ を受けるはりの曲げモーメントが最大となる点の曲げ応力度で表されることから、このときのはりの曲げ強度 σ'_{bi} は

$$\sigma'_{bi} = \frac{C_i \cdot \max_x [M_0(x)]}{Z} \quad (5)$$

となる。これに(3)式を代入すると

$$\sigma'_{bi} = \frac{\max_x [M_0(x)]}{M_0(X_i)} \sigma_{bi} \quad (6)$$

となる。複数の節を考慮した場合、それらのうち最小の曲げ強度を与える節がはりの耐力を決定することから、最終的に集成材の曲げ強度 σ_b は

$$\sigma_b = \min(\sigma_{b0}, \sigma'_{b1}, \sigma'_{b2}, \dots, \sigma'_{bn}) \quad (7)$$

により求められる。

3. 有節ラミナの縦引張強度

前章で提案した耐力モデルでは、節を含む断面の曲げ強度は節径比から求められるものとしている。そこで、本章では、節径比と引張強度の関係 $f(r_i)$ を実験に基づいて明らかにする。

節がラミナの引張強度に与える影響を定量的に把握するため、試験体の中央部分に節が存在するような試験体をひき板から切りだし、その引張強度を実験的に求めた。試験体形状を図2に示す。節径比だけでなく寸法効果の影響⁶⁾も定量化できるように7種類の断面

積の試験体を用意した。試験体一覧を表1に示す。試験体の比重と含水率の平均は、0.52と9.23%である。

万能試験機で直接試験体をつかみ、縦引張実験を行った。各試験体の節径比 d/D と引張強度 σ_t の関係を図3に示す。また、既往の実験結果⁷⁾、および試験体B70T12、B70T22、およびB70T32を例に回帰曲線もあわせて示した。どの試験体も d/D が増加するに従い σ_t が低下する傾向がみられるとともに、断面積が小さい試験体ほど節径比の影響が顕著であった。また、実験値の回帰式回りの変動係数は、断面積に関わらずほぼ0.3前後で一定であった。

続いて、これらの実験結果に基づいて節を含むラミナの引張強度の定式化を試みる。まず、節径比が引張強度に与える影響は、実験結果を指数関数で回帰することにより評価する。また、寸法効果については、最弱リンクモデルに従うものとして評価した。その結果、断面積が A_a (cm²)の時の有節ラミナの引張強度 σ_{ta} (kN/cm²)は、試験体B30T5 (断面積1.5cm²)における $d/D=0$ のときの平均引張強度10.06kN/cm²を基準として、次式により定式化することができる⁸⁾。

$$\left(\frac{1}{\beta}\right) \frac{\sigma_{ta}}{10.06} = \left[\frac{1.5}{A_a}\right]^{1/2\alpha} \quad (8)$$

ここに、 $1/2\alpha = 0.125 - 0.05(d/D)$ 、 $\beta = 0.85e^{-2.54(d/D)}$ である。

図4は、各断面ごとの実験引張強度の回帰式 σ_{tb} と、(8)式から求められる引張強度 σ_{ta} の関係を示したものである。 σ_t のばらつきが大きい d/D の小さな範囲では、やや誤差が見られるが、それ以外はよく対応している。実験値を計算値で除した値の平均は1.02、変動係数は0.37であり、各断面積ごとに計算した変動係数とほぼ同じとなった。これより、(8)式で評価される平均強度と、その回りに変動係数0.37でばらつく確率量として節を含むラミナの引張強度が与えられるものとする。

4. 集成材曲げ実験

2章の曲げ耐力モデルを実験的に検証するため、べいまつ集成材の曲げ実験を行った。本章では実験概要と結果について述べる。試験体一覧を表2に示す。ラミナの曲げヤング率は外側2層が1300～1350kN/cm²、他は900～1050kN/cm²のラミナで構成されている。最下層ラミナの断面積は、はりせい250m、300m、

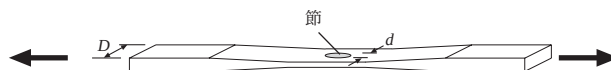


図2 引張試験体形状

表1 引張試験体一覧

厚さ(mm)	幅(mm)	断面積(cm ²)	試験体数
5	30,70	1.5,3.5	41,40 計81
12	70	8.4	53 計53
22	30,70,120	6.6,15.4,26.4	41,45,38 計124
32	70	22.4	40 計40

総計298

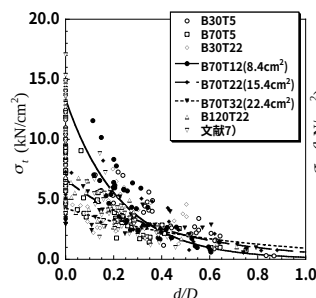


図3 d/D と σ_t の関係

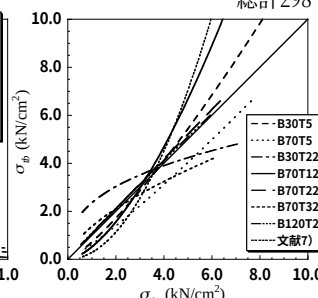


図4 σ_{ta} と σ_{tb} の関係

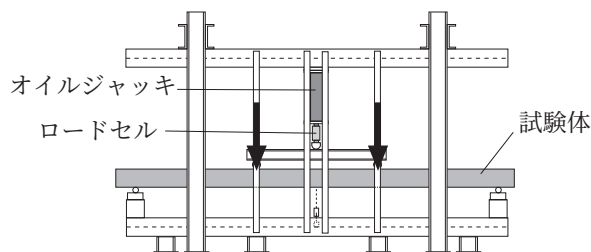


図5 4点曲げ実験装置概要

表3 節のパラメータ

	平均	変動係数	分布関数
Λ	368(mm)	1.08	-
d/D	0.22	2.27	対数正規分布

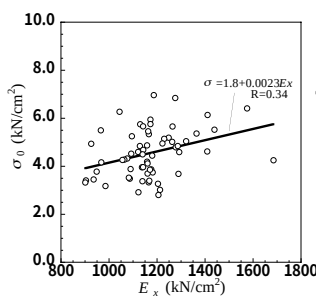


図6 E_x と σ_0 の関係

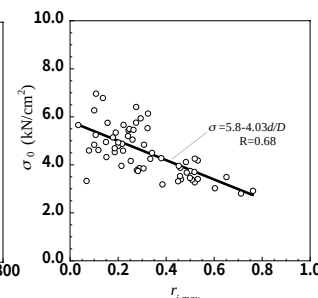


図7 $r_{l,max}$ と σ_0 の関係

および350mの試験体でそれぞれ13cm²、14.5cm²、および15.5cm²である。試験体の比重と含水率の平均は、0.49、10.24%で、それぞれの変動係数は、0.12と0.07であった。

実験は中央集中荷重で行った3点曲げ実験と、2点集中荷重による、等モーメント区間が1mと2mの4

表2 試験体一覧

	スパン(mm)	等モーメント区間(mm)	はりせい(mm)	はり幅(mm)	積層数	試験体数
3点曲げ	2000	—	250,300,350	50	8,9,11	3,3,3 計9
	3000	—				6,9,6 計21
	4000	—				6,3,5 計14
4点曲げ	6000	1000				3,3,3 計9
		2000				3,3,3 計9

総計62

点曲げの3種類を行った。4点曲げ実験の実験装置概要を図5に示す。また、節のランダム性を定量的に把握するため、実験前の各試験体について、最外層のラミナに存在する節の材長方向間隔 Δ と、節径比 d/D を測定した。測定結果を表3に示す。

破壊状況は、各試験体とも、ほぼ弾性範囲内で脆性的に破壊し、最下層ラミナの載荷点付近に存在する節を起因とするものが大半であった。

図6に各試験体の面内曲げヤング率 E_x と曲げ強度 σ_0 の関係を、図7に各試験体の最大節径比 $r_{i,max}$ と σ_0 の関係を示す。既往の研究から明らかにされている通り E_x と σ_0 には相関性が見られたが、 $r_{i,max}$ と σ_0 についてもある程度の相関性が確認できた。これより節径比も E_x と同様に σ_0 と相関性を有することが実験的に確認できた。

図7に示した各試験体の $r_{i,max}$ と、各試験体の最下層ラミナの断面積を、(8)式に代入し得られるラミナの引張強度 σ'_{ta} と、 σ_0 の関係を図8に示す。 σ_0 は σ'_{ta} より全体的に強くなっている。これは、集成材には積層する事により欠点を補強しあう積層効果があり、その分集成材の曲げ強度はラミナの引張強度よりも高くなっているためである。したがって、集成材の曲げ強度をラミナの引張強度から評価する場合には、この積層効果を考慮する必要がある。

積層効果については、最下層ラミナの節径比に応じてラミナのヤング率が低下すると仮定し、集成材の曲げ強度とラミナの引張強度の比から求められる積層効果モデル⁹⁾が報告されている。このモデルより得られる積層効果 λ_p と、実験結果から得られる積層効果 λ_0 を $r_{i,max}$ との関係で示したものが図9である。両者はよく対応しており、この積層効果モデルを(8)式に応用することで、最終的に最下層ラミナの引張強度 σ_{ti} を次式で定義する。

$$\sigma_{ti} = 10.06\lambda_i \cdot \beta \left[\frac{1.5}{A_v} \right]^{1/2\alpha} \quad (9)$$

5. モンテカルロシミュレーションによる曲げ耐力

本章では、前章までで提示されたはりの耐力モデルに対し確率論的な数値シミュレーションを行い、実験結果のばらつきと比較することにより、確率論的な性質も含めたモデルの検証を行う。

数値解析では、実験と対応させるため中央集中荷重による3点曲げと、2点集中荷重による4点曲げの2タイプを対象とした。(1)式で示した無欠点材の曲げ強度、および(6)式で示した i 番目の節を対象とした曲げ強度を各はりについて具体的に求めるとそれぞれ下式のようなになる。

・ 3点曲げ

$$\sigma_{b0} = \frac{l}{4Z} C \cdot P_0(x) \quad (10)$$

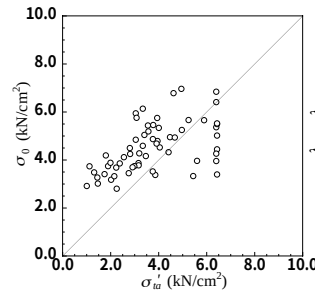


図8 σ'_{ta} と σ_0 の関係
 $CP_0(x)$

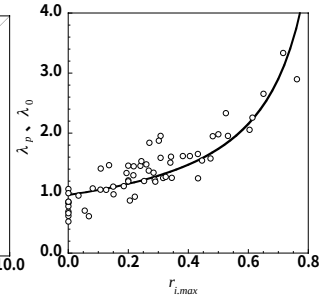


図9 $r_{i,max}$ と λ の関係
 $CP_0(x)$

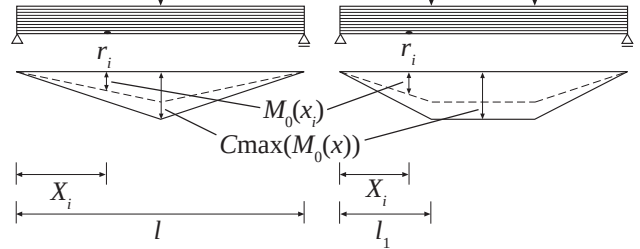


図10 モデルにおける3点曲げと4点曲げの概要

$$\sigma'_{bi} = \frac{l}{2X_i} \sigma_{bi} \quad (11)$$

・ 4点曲げ (等モーメント区間 1m)

$$\sigma_{b0} = \frac{5l}{24Z} C \cdot P_0(x) \quad (12)$$

$$\sigma'_{bi} = \frac{5l}{12X_i} \sigma_{bi} \quad (13)$$

・ 4点曲げ (等モーメント区間 2 m)

$$\sigma_{b0} = \frac{l}{6Z} C \cdot P_0(x) \quad (14)$$

$$\sigma'_{bi} = \frac{l}{3X_i} \sigma_{bi} \quad (15)$$

これらを用い、各パラメータ1000体ずつの仮想集成材に存在する全ての節において、それぞれの位置で破壊するときの曲げ強度を求め、(7)式で曲げ強度 σ_b をシミュレートした。

モンテカルロシミュレーションによる計算結果と、実験結果を累積頻度曲線に表し、荷重状態別に示したものが図11から図16である。3点曲げにおいて、無欠点材としたとき(図11)は、実験値より20%程強くなっており、節を考慮すると実験値と計算結果は良く対応している(図12)。変動係数は、どれも20%前後でほぼ同じであり、節による強度低下のために、集成材の強度が20%程低下することになる。4点曲げも3点曲げと同様に、節を考慮しない場合(図13、図15)よりも節を考慮したときの実験値との対応(図14、図16)が良くなっている。しかし、4点曲げ実験は、3点曲げ実験に比べ、試験体数が少ないため、3点曲げほどの対応は見られない。変動係数は、等モーメント区間1m、2mともに、実験値と無欠点材モデルは0.13前後と小さく、節を考慮するとすこしばらつきが大

きくなるが、3点曲げと同程度のばらつきである。これらの結果から、モンテカルロシミュレーションによる結果は実験結果と良い対応を示しており、本論文で提示したはりの耐力モデルの妥当性が検証できていると言える。

続いて、本解析モデルを用い荷重状態を変化させパラメトリックな考察を行う。荷重状態は、4点曲げにおいて等モーメント区間を1m間隔で5mまで変化させたものと、等分布荷重、および均等曲げ荷重である。スパンを6mとするため、均等曲げ荷重は、4点曲げの等モーメント区間6mと同義である。また、日本農林規格の、構造用集成材ひき板の品質基準、節及び穴における、1等($d/D \leq 0.2$)、2等($d/D \leq 0.3$)、3等($d/D \leq 0.4$)、および4等($d/D \leq 0.5$)の各等級に基づき、 r_i を発生させ、目視等級区分の集成材の曲げ強度に与える影響も考察できるようにして、モンテカルロシミュレーションを行う。

それぞれの荷重状態における、計算結果の平均値と、目視等級の関係を図17に示す。等モーメント区間が多いほど、曲げ強度は低下している。これは、等モーメント区間内では、節に作用する応力が一様であり、等モーメント区間が増加すれば、その中に d/D の大きな節が含まれる確率が高くなり、曲げ強度に与える影響が顕著になるためである。また、荷重状態に関わらず、目視等級が低下するに従い、平均値が低下している。これも、目視等級が低下すると、 d/D の大きな節が発生する確率が増加するため、節による強度低下が顕著になるためである。

最後に、それぞれの結果の5%下限値についての考察を行う。各目視等級毎の等モーメント区間と、5%の下限値の関係を図18に示す。等モーメント区間0mから1mへの強度低下が、他の区間より顕著であり、等モーメント区間長よりも、等モーメント区間の有無が集成材の曲げ耐力に与える影響が大きいといえる。また、目視等級は、等モーメント区間に関わらず、ほぼ一様な影響を与えているといえる。

6. 結論

本研究で得られた結論は、以下の通りである。

- ・節の位置と強度の統計的なランダム性を考慮した曲げ耐力モデルを提示し、実験に基づいて耐力モデルのパラメータの決定と検証を行った。
- ・提示した曲げ耐力モデル用い、目視等級、および荷重状態の違いが集成材の曲げ強度にあたる統計的な特徴を検討した。

参考文献

- 1) 林知行：「確率モデルによる集成加工材の性能予測(第1報) MOEの分布」、木材学会誌、Vol.35、No.11、1989年
- 2) 三橋博三、板垣直行、伊藤彦紀、鈴木登：「スギ集成材の力学性能設計のための解析モデル(第1報) 積層による補強効果及び塑性領域を考慮した集成材の曲げ予測モデル」、木材学会誌、Vol.42、No.2、1996年

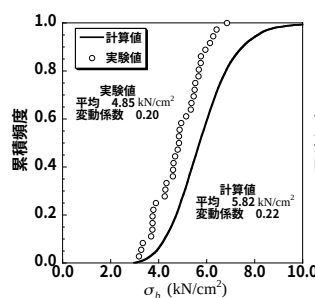


図11 無欠点材モデル
3点曲げ計算結果

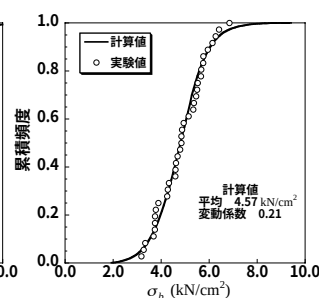


図12 節を考慮したモデル
3点曲げ計算結果

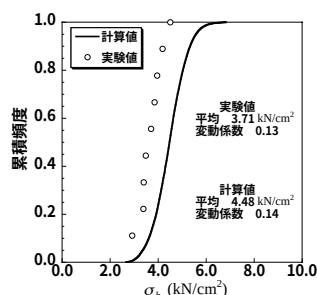


図13 無欠点材モデル
4点曲げ1m計算結果

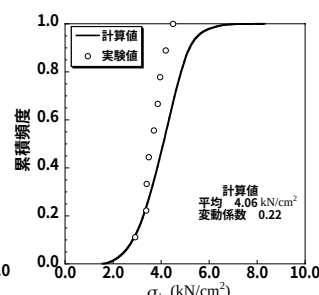


図14 節を考慮したモデル
4点曲げ1m計算結果

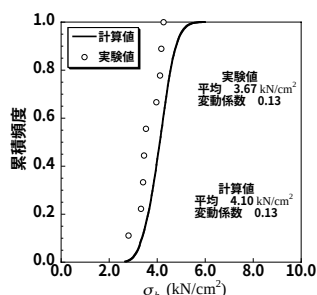


図15 無欠点材モデル
4点曲げ2m計算結果

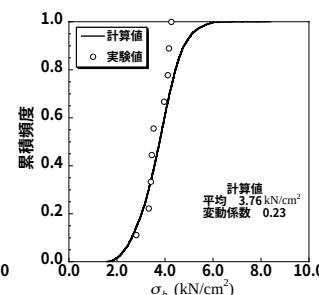


図16 節を考慮したモデル
4点曲げ2m計算結果

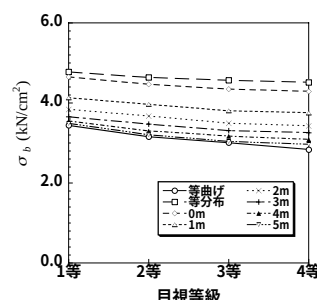


図17 目視等級と σ_b の関係

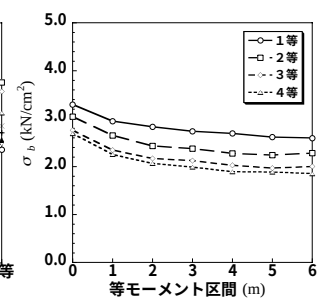


図18 5%下限値における
等モーメント区間と σ_b の関係

- 3) 五十田博、森拓郎、笹川明：「曲げを受ける集成材はりの抵抗状態と破壊過程の解明」、日本建築学会構造系論文集 第529号、2000年3月
- 4) Hideki IDOTA and Tetsuro ONO：「Reliability of glue-laminated wood beams」、ICOSAR '97、1997年
- 5) 平嶋義彦、山本幸雄、鈴木滋彦：「集成材の強度計算モデルおよび確率モデル」、木材学会誌、Vol.40、No.11、1994年
- 6) 林知行、宮武敦、宮原久光：「スギラミナの引張強度における寸法効果」、木材工業、Vol.52、No.1、1997
- 7) 畑山義男：「有節材の強度推定に関する研究」、林業試験場研究報告、No.326、1984年
- 8) 堀内宏樹、井戸田秀樹：「有節ラミナの縦引張強度における寸法効果」、日本建築学会東海支部研究報告集、第38号、p.253-256、2000年
- 9) 竹山篤：「木質集成材はりの積層効果」、名古屋工業大学卒業論文、2000年