

製材内の未成熟材の存在が接着重ね材の曲げ耐力に及ぼす影響

田上, 誠
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 : 博士後期課程

佐藤, 利昭
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 : 准教授

田口, 紅音
(株) 工芸社・ハヤタTKS事業部

蜷川, 利彦
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 : 教授

<https://doi.org/10.15017/2556606>

出版情報 : 都市・建築学研究. 37, pp.1-10, 2020-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン :
権利関係 :

製材内の未成熟材の存在が 接着重ね材の曲げ耐力に及ぼす影響

Effects of Juvenile Wood Contained in Timber on the Bending Strength of Glued Build-up Members

田上 誠*, 佐藤利昭**, 田口紅音***, 蜷川利彦**

Makoto TANOUE, Toshiaki SATO, Akane TAGUCHI, Toshihiko NINAKAWA

Glued build-up members (GBM) are structural building members that are developed as an application to effectively utilize Japanese domestic box-heart timber. The purpose of this study is to establish a method for evaluating the bending performance of GBM. In this paper, we construct a simple model that is composed of two elements of mature wood and juvenile wood about the timbers that constitutes GBM. As a result of cross-sectional analysis, it was found that the effect of the difference between Mature wood and Juvenile wood on the bending strength of GBM was higher than that of Timbers.

Keywords : Glued build-up members, Box heart timber, Bending strength, Mature wood, Juvenile wood
接着重ね材, 心持ち製材, 曲げ耐力, 成熟材, 未成熟材

1. 序論

近年の国産木材の供給量は、樹齢 50~60 年の人工林の多くが主伐期を迎えたことによって増加している¹⁾。そのため、国土の保全と木材の自給率の向上を図ることを目的として「公共建築物等における木材の利用促進に関する法律」が 2010 年に制定された。しかし、既往の調査によれば、木質構造建築物の構造部材に占める国産材の割合は僅かであり、その多くは輸入材を用いた集成材が占めているのが現状である²⁾。したがって、需要量が少ないことで特に供給過多の状況である心持ち製材は、その有効利用が喫緊の課題となっている。接着重ね材 (Glued Build-up Members: 以下, GBM) は、これらの状況を踏まえて、製材を積極的に活用するために開発された建築用の木質構造部材である。

本論文は、力学モデルを用いて GBM の曲げ性能について検証し、その評価手法の確立に資する知見を得ることを目的としている。これまでに筆者らは、120mm 角および 150mm 角のスギ製材を 2~5 段積層した実大 GBM 試験体の曲げ実験を行い、それらの結果を示すとともに、

GBM の曲げ性能について検討した³⁾。また、等価断面法に基づく GBM の力学モデルを構築し、これを用いた断面解析により、各製材 (構成材) 間の曲げヤング係数の差異が GBM の曲げ耐力と曲げ剛性に及ぼす定性的な傾向について示した⁴⁾。さらには、GBM の最下段製材の断面に生ずる垂直応力度を曲げ成分と引張成分の組み合わせ応力として曲げ耐力を評価する手法について、その適用性を検証した⁵⁾。木材は髓付近の部分とそれ以外の部分で力学的な性質に相違があることが、既往の製材に関する研究で指摘されており、それぞれの部分は未成熟材・成熟材と呼ばれている。既に著者らは、文献 4) で曲げヤング係数と強度が異なる二つの部分で製材断面が構成されるとして GBM の力学モデルを構築し、双方の曲げヤング係数と強度を変動させた断面解析を行い、製材断面内の力学的な性質の相違が曲げ性能に及ぼす影響について簡単な検討を行った。しかしながら、GBM の特性を詳しく調べるためには、成熟材と未成熟材の力学的な性質をより詳細に反映したモデルを用いて断面解析を行い、分析を進める必要がある。

本論では製材内の成熟材と未成熟材の力学的な性質の相違に着目し、両材の範囲および繊維方向のヤング率と強度を既往の研究を参考にしてモデル化し、その成熟

* 空間システム専攻博士後期課程

** 都市・建築学部門

*** (株) 工芸社・ハヤタ TKS 事業部

材要素と未成熟材要素を組み合わせることで GBM の断面モデルを構築する。そして、これを用いた断面解析を行って成熟材と未成熟材の力学的性質の相違が GBM の曲げ耐力に及ぼす影響を検討する。加えて、文献3)で示した実大実験で得られた曲げ耐力に対して、この断面モデルを用いて評価を行う。ここで、実際には不均質な部材である製材の力学性能(曲げたわみ量)を、仮定の均質な(一様な)部材で表現した等価な値のことをヤング係数と呼び、製材内を要素に分割したときの力学性能の値をヤング率と呼んで使い分けることとする。

2. 成熟材と未成熟材の範囲とヤング率および強度

2.1 既往の成熟材と未成熟材に関する研究

一般に未成熟材は、未成熟な形成層により生成された部分を指し、樹種毎に細胞壁を構成する繊維の角度であるマイクロフィブリル傾角(MFA)や密度が成熟材のそれとは相違することが知られている。両者の相違点を言及した既往の研究は多いが、本節ではスギの丸太から採取した小試験片を対象として力学的な性質を調べた先行研究の知見を整理する。

渡辺ら⁶⁾と太田は⁷⁾、髄からの年輪方向の距離と比縦圧縮強度および比縦ヤング係数(それぞれ縦圧縮強度と縦ヤング係数を全乾比重で除した値)の関係を圧縮実験により調べ、それぞれの値が安定する領域とそれ以外の領域に区分し、領域毎の回帰直線の交点から髄側の2/3を未成熟材の範囲としている。また、普通に生長した製材の未成熟材と成熟材には、力学的に有意義な差異があり、未成熟材の範囲は髄から10~15年であると述べている。太田は、上記に加えて未成熟材の強度は成熟材に比べて小さく、その値は髄から成熟材の範囲へ向かって次第に大きくなるように変化し、未成熟材の比圧縮強度は成熟材の約0.8~0.9倍と報告している。

田戸岡らは⁸⁾、曲げ・縦圧縮・せん断実験を行い、髄からの年輪方向の距離と強度およびヤング係数の関係を調べている。未成熟材の範囲は、比曲げヤング係数の変動に指数式を当てはめて区分しており、平均すると髄から15年であるが、供試体によって髄から9~31年であり、ばらつきが大きいとしている。また、未成熟材の曲げ・圧縮強度は成熟材に比べていずれも約0.8倍であることと、未成熟材の各強度は比較的ばらつきが大きいことを報告している。

藤崎⁹⁾は未成熟材の範囲を髄から20年と仮定し、圧縮実験の結果を基に比圧縮強度と縦ヤング係数の関係を調べ、未成熟材と成熟材に有意義な差異はないと述べている。また、圧縮強度に対する比重の依存性は高いが、縦ヤング係数のそれは低いと述べている。

上記の通り、成熟材と未成熟材の範囲やヤング率と強度の差異についての見解が統一されているとは言い難い

が、本論では繊維方向のヤング率と強度を既往の研究を参考にして図1のように想定する。ヤング率と強度は、髄に近いほど小さくなるように年輪方向に連続的に変化するものとするが、渡辺らと太田の研究に従って、強度は未成熟材の範囲において大きく変化するが成熟材の範囲ではほぼ安定するものとし、ヤング率は両材の範囲にわたって変化が小さいものとする。田戸岡らの研究⁸⁾ではヤング率が強度と同様に未成熟材の範囲で大きく低下することを示唆しているが、既に文献4)でこのようにして検討を行い、成熟材の面積が未成熟材より大きいほど曲げ耐力が大きくなり、ヤング率が小さい未成熟材では生じる応力度が小さくなり、未成熟材が成熟材よりも先に強度に達することがないことを確認している。そのため、本論では木材の引張破壊の脆性的な性質を考慮して未成熟材が強度に達した時点で曲げ耐力が決定する図1の想定とした。なお、未成熟材の範囲は髄から120φの範囲とするが、これは平均年輪間隔を高橋¹⁰⁾の報告を参考として5mmと仮定したとき、12年の範囲に相当する。図2に髄の偏芯が無いときの105・120・150mm角の製材の断面の模式図を示す。

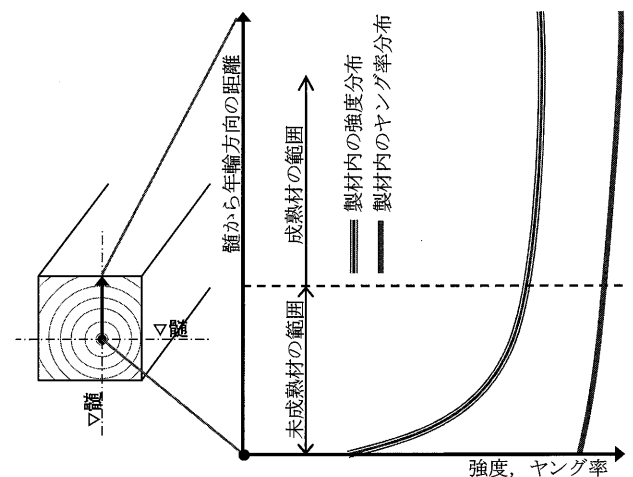


図1 年輪方向の距離に対するヤング率と強度の関係

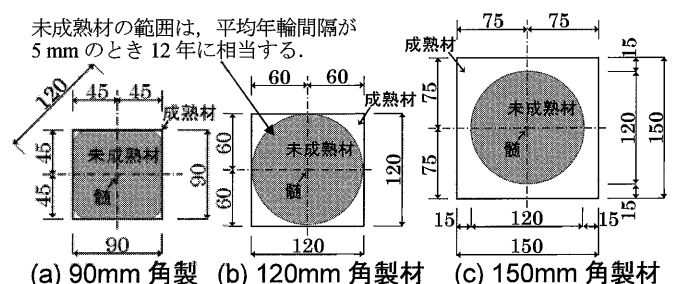


図2 髄の偏芯が無いときの成熟材と未成熟材の範囲

2.2 既往の製材に対する曲げ・引張試験で得られた強度

木構造振興(株)は、国内各地の日本農林規格(以下、JAS)製材に対する標準的な試験の結果を公開しているが、このうち機械等級区分によるスギ構造用製材の曲げ

試験と引張試験で得られた強度について考察し、成熟材と未成熟材の各強度のモデル化の参考とする。

図3は曲げ試験で得られた曲げ強度と曲げヤング係数の関係¹¹⁾を、筆者らが図化したものである。(a)にH1試験体(短辺・長辺寸法とも90~135mm)を、(b)にH2試験体(短辺寸法105~120mm, 長辺寸法150~300mm)を示す。また、各図には変動として $\mu \pm \sigma$ (μ : 平均値, σ : 標準偏差)を併せて示す。図よりH1試験体の曲げ強度はH2試験体に比べて約5%小さい値であり、変動係数CVはH2試験体が僅かに大きいことが分かる。一般に、木材は寸法効果¹²⁾により部材の寸法が大きくなるにつれて曲げ強度が小さくなるとされるが、上記の結果はこれに反する結果となる。これは、強度の低下の一要因である断面内の欠点の影響とは別に、断面寸法が小さいH1試験体ではH2試験体より相対的に曲げ引張縁が未成熟材となるものが多いと推察されることから、未成熟材が成熟材よりも強度が低いことの影響もあることを示唆していると考えられる。

図4は短辺寸法36mm以上, 長辺寸法90mm以上の試験体の標準的な引張試験で得られた引張強度と引張ヤング係数の関係¹¹⁾を、筆者らが図化したものである。

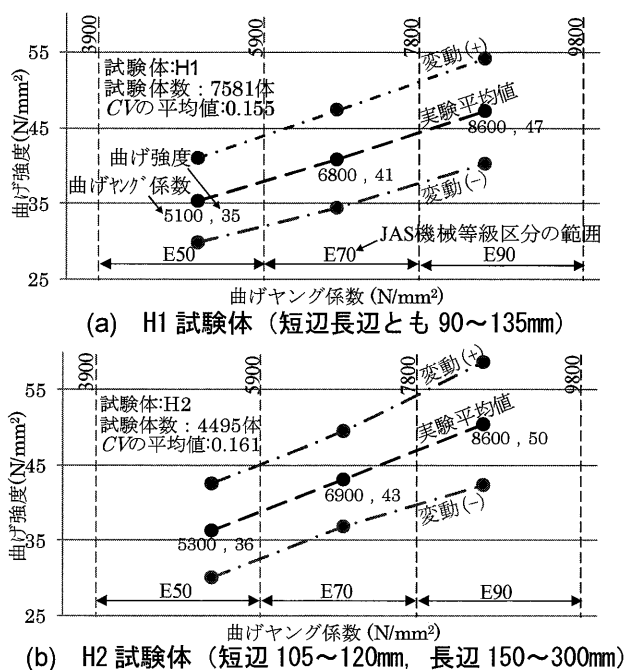


図3 実大製材の曲げ強度と曲げヤング係数の関係¹¹⁾

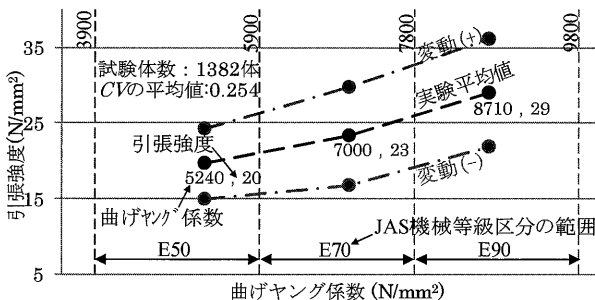


図4 実大製材の引張強度と曲げヤング係数の関係¹¹⁾ (短辺 36mm 以上, 長辺 90mm 以上の試験体)

グ係数の関係¹¹⁾を筆者らが図化したものである。ここで、引張ヤング係数と曲げヤング係数は便宜的に同じとしている。図より引張強度の値は図3に示す曲げ強度に比べて約55%小さく、変動係数CVが大きいことが分かる。これは、曲げモーメントのみが部材に作用すれば、断面の垂直ひずみ度の分布が最大となる圧縮・引張縁付近が破壊の起点となる確率が高いのに対して、引張力が作用する場合は、垂直応力度の分布が断面内のみならず、部材の全長に渡り一様となるため、節や内部割れなどの欠点や未成熟材などの力学的な性質の劣る部分が破壊の起点となる確率が高いことの影響であると考えられる。なお、平成12年建設省告示第1452号で定められるスギ製材の基準強度(以下、基準強度)は、部材の曲げヤング係数の閾値による各区分での引張強度は曲げ強度の0.6倍とされており、ここで述べた曲げ試験と引張試験で得られた各強度の平均値の比は、これとほぼ対応している。

3. 断面解析モデル

3.1 製材内の成熟材と未成熟材のモデル化

本論は、製材内の成熟材と未成熟材の力学的性質の相違がGBMの曲げ耐力に及ぼす影響をまずは簡明に把握することを目的としており、そのために以下に示す各要素の繊維方向のヤング率と強度の設定を含め、単純なモデルを用いて断面解析を行う。図5に断面解析に用いる製材のモデルを示す。各製材は髓付近の未成熟材要素とその他の成熟材要素で構成されるものとし、各要素の与条件は断面積とヤング率とする。加えて、未成熟材要素には図心の位置を与える。なお、未成熟材要素の範囲は単一の製材内でも材軸方向の位置によって異なると考えられるが、本論ではそれが部材の全長に渡り同一であるとし、断面解析を用いて検討を行う。ここで、文献4)では計算が容易となるように未成熟材の形状を正方形としていたが、実際の未成熟材の範囲と関係する年輪の形状に類したモデル化とするために、本論ではそれを円形に変更している。

m_h : 成熟材要素のせい, j_h : 未成熟材要素のせい
 m_E : 成熟材要素のヤング率, j_E : 未成熟材要素のヤング率
 m_A : 成熟材要素の断面積, j_A : 未成熟材要素の断面積

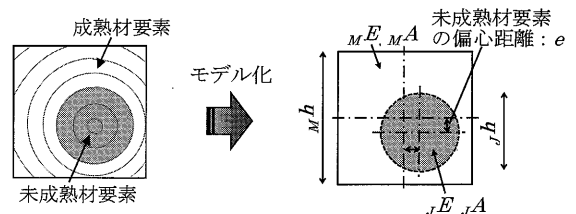


図5 製材断面内の成熟材と未成熟材のモデル化

成熟材要素と未成熟材要素それぞれの繊維方向のヤング率と強度は、前章で示した既往の研究を参考にして設定する。図1で想定した髓からの年輪方向(放射状)

E : 製材全体の曲げヤング係数, $M E$: 成熟材要素のヤング率
 $J E$: 未成熟材要素のヤング率, $M F$: 成熟材要素の強度
 $J F$: 未成熟材要素の強度, α : 成熟材と未成熟材の強度比

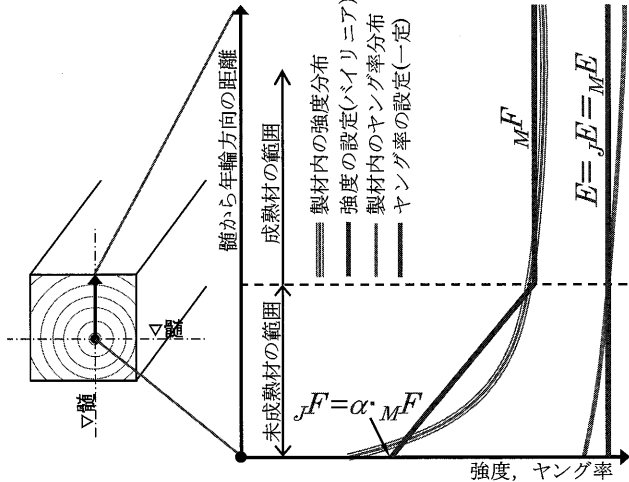
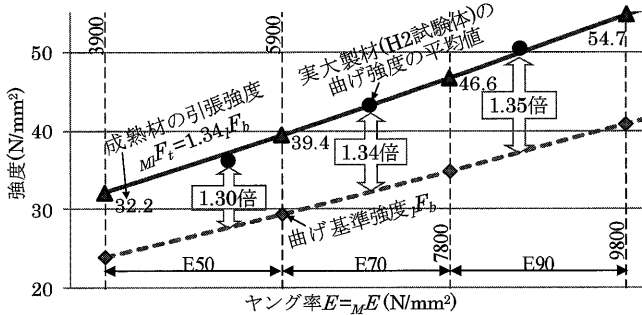
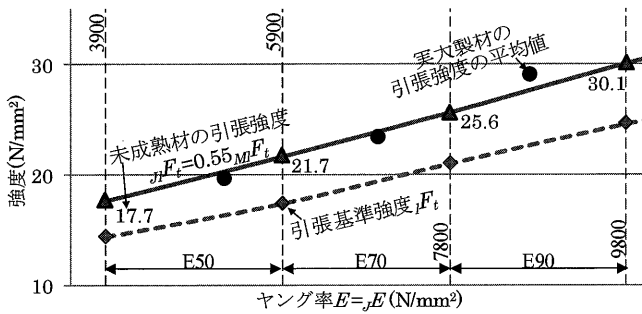


図6 年輪方向の距離に対するヤング率と強度の設定

$M F_t$: 成熟材要素の引張強度, $J F_t$: 未成熟材要素の髄位置の引張強度
 F_b : 線形補間した曲げ基準強度, F_t : 線形補間した引張基準強度



(a) 成熟材要素の引張強度



(b) 未成熟材の髄位置の引張強度

図7 成熟材と未成熟材のヤング率と強度の関係

の距離に応じて連続的に変化するヤング率と強度を図6に示すように単純化する。すなわち、未成熟材要素の強度は髄からの距離に応じて線形に変化し、成熟材要素の強度 $M F$ は一定とする。未成熟材要素の髄位置の強度 $J F$ は $J F = \alpha \cdot F$ (α : 成熟材要素の強度と、未成熟材要素の髄位置の強度の比) の関係にあるものとする。また、成熟材要素のヤング率 $M E$ と未成熟材要素のヤング率 $J E$ は、髄からの距離に関わらず一定(同じ値)とし、その値は製材全体の曲げヤング係数 E と等しいものとする。成熟材要素の強度は2.2節で述べたように、よりそれに近いと推察される H2 試験体の曲げ試験から得られた曲げ強

度の平均値(図3(b))を基にして設定する。これは、GBMの2点載荷試験ではロードスパン(等曲げ区間)が製材よりも長い場合、材軸方向において製材に比べて長い区間で大きな応力度が断面に生じる(実際の構造物においてもGBMはロングスパン部分に用いられるので同様の状況となる)ことを考えると、材軸方向の長さに関する寸法効果による強度の低減を考慮していないことになり、実際の成熟材の強度はこれよりも小さい値であると考えられる。未成熟材要素の髄位置の強度は、引張試験から得られた引張強度の平均値(図4)を基にして定める。引張強度を基とすることは、製材の引張強度が曲げ強度に比べて小さくなる要因を、欠点の存在の影響などではなく、未成熟材の力学的な性能の低さの影響のみとみなすことになり、実際の髄位置の強度の値はこれよりも大きいと考えられる。しかしながら、それらの要因による強度の低下の割合を定量的に評価することは困難なため、本論では製材の引張強度を基として未成熟材要素の髄位置の強度を設定する。また、成熟材と未成熟材とも強度とヤング率は線形関係にあるとし、その関係は告示第1452号の各機械的等級区分の曲げヤング係数の閾値と基準強度の関係に倣って設定する。

図7に次章で曲げ耐力の算定に用いる成熟材要素と未成熟材要素の髄位置のヤング率と強度の関係を示す。成熟材の引張強度 $M F_t$ とヤング率の関係は、図3(b)の曲げ強度の平均値を用いて曲げ基準強度の1.34倍とし($M F_t = 1.34 F_b$)、未成熟材の髄位置の引張強度 $J F_t$ とヤング率の関係は、図4の引張強度の平均値を用いて成熟材の0.55倍($\alpha = 0.55$)としている($J F_t = 0.55 M F_t$)。

3.2 GBMの断面解析モデル

GBMのモデルの概要を以下に説明する。前節で示したモデル化した製材を文献4)で示したように組み合わせることで、GBMの断面モデルを構築する。図8に製材を n 段重ねとし、未成熟材が各製材の中央にある場合のGBMの断面モデルを示す。平面保持の仮定が成り立ち

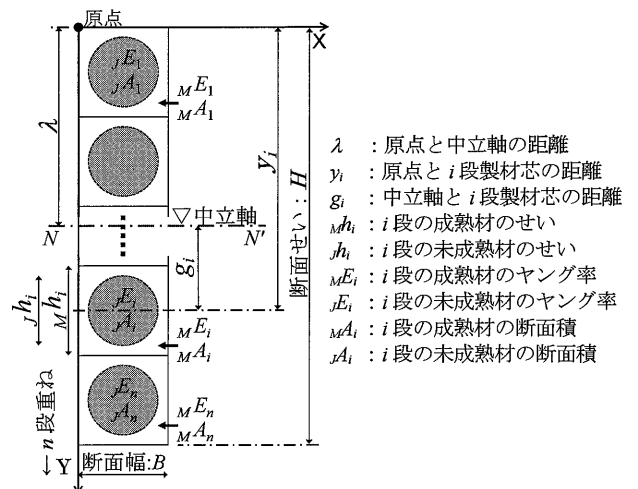


図8 GBMの断面モデル

(製材相互の接着剤界面にずれが生じない), i 段の成熟材のヤング率を $M E_i$, 未成熟材のヤング率を $J E_i$ としたとき (本論では後で $M E_i = J E_i$ として検討を行うが, ここではより汎用的なモデルを示すこととする), GBM 断面の等価曲げ剛性 $MJ(EI)_e$ は(1)式で表現できる. このとき, 各製材の中立軸 (N-N' 軸) まわりの成熟材の断面二次モーメント $M I_{i-NN'}$ は(2)式で, 未成熟材の断面二次モーメント $J I_{i-NN'}$ は(3)式で, 中立軸と各製材芯の距離 g_i は(4)式で, 原点から中立軸までの距離 λ は(5)式で求められる. なお, 接着剤の層は極めて薄いため, 接着剤の層の変形は無視し, 十分に大きい強度を有するものとする.

$$MJ(EI)_e = \sum_{i=1}^n M E_i \cdot M I_{i-NN'} + \sum_{i=1}^n J E_i \cdot J I_{i-NN'} \quad (1)$$

$$M I_{i-NN'} = M I_i + g_i^2 \cdot M A_i \quad (2)$$

$$J I_{i-NN'} = J I_i + g_i^2 \cdot J A_i \quad (3)$$

$$g_i = \lambda - y_i \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n M E_i \cdot M A_i \cdot y_i + \sum_{i=1}^n J E_i \cdot J A_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n M E_i \cdot M A_i + \sum_{i=1}^n J E_i \cdot J A_i} \quad (5)$$

ここで, y_i は各製材芯と原点 (圧縮縁) の距離である.

曲げモーメント M が GBM 断面に作用したときの i 段成熟材縁の引張応力度 $M \sigma_{tei}$ は(6)式, 未成熟材縁の引張応力度 $J \sigma_{tei}$ は(7)式で求めることができる.

$$M \sigma_{tei} = M E_i \frac{M}{MJ(EI)_e} \left(y_i - \lambda + \frac{M h_i}{2} \right) \quad (6)$$

$$J \sigma_{tei} = J E_i \frac{M}{MJ(EI)_e} \left(y_i - \lambda + \frac{J h_i}{2} \right) \quad (7)$$

下側が引張りの曲げモーメントを受ける GBM に対して成熟材の引張応力度 $M \sigma_{tei}$ と引張強度 $M F_{ti}$ の関係である(8)式を(6)式に代入して曲げモーメント M について求めると, 最下段の製材における成熟材縁の $M F_{tn}$ に達する曲げモーメント $M M_{an}$ は(9)式で表現でき, 同様に未成熟材の引張応力度 $J \sigma_{ten}$ と引張強度 $J F_{tn}$ の関係である(10)式を(7)式に代入して M について求めると, 最下段の製材における未成熟材縁の $J F_{tn}$ に達する曲げモーメント $J M_{an}$ は(11)式で表現できる. GBM の曲げ耐力 $MJ M_{an}$ は, $M M_{an}$ と $J M_{an}$ のいずれか小さい方とする ((12)式).

$$M \sigma_{ten} / M F_{tn} = 1 \quad (8)$$

$$M M_{an} = \frac{M F_{tn} \cdot MJ(EI)_e}{M E_n (y_n - \lambda + M h_n / 2)} \quad (9)$$

$$J \sigma_{ten} / J F_{tn} = 1 \quad (10)$$

$$J M_{an} = \frac{J F_{tn} \cdot MJ(EI)_e}{J E_n (y_n - \lambda + J h_n / 2)} \quad (11)$$

$$MJ M_{an} = \min(M M_{an}, J M_{an}) \quad (12)$$

なお, 本論では各製材を一様な弾性体とみなして各製材のヤング係数の差異のみを考慮した簡易モデル⁴⁾により求めた GBM の曲げ耐力 M_{an} により, 本モデルから得られる GBM の曲げ耐力 $MJ M_{an}$ を除して無次元化して結果を示すこととする. 簡易モデルの最下段の製材縁における引張応力度 σ_{ten} は(13)式で求めることができる⁴⁾.

$$\sigma_{ten} = E_n \frac{M}{(EI)_e} \left(y_n - \lambda + \frac{h_n}{2} \right) \quad (13)$$

ここで, E_n : 最下段の製材のヤング率, $(EI)_e$: GBM 断面の等価曲げ剛性, h_n : 最下段の製材せいである.

(13)式を最下段の製材の σ_{ten} と引張強度 F_{tmn} の関係である(14)式に代入して M について求めると, 最下段の製材縁が(14)式の条件を満たす曲げモーメント M_{an} は(15)式で求める.

$$\sigma_{ten} / F_{tmn} = 1 \quad (14)$$

$$M_{an} = \frac{F_{tmn} \cdot (EI)_e}{E_n (y_n - \lambda + h_n / 2)} \quad (15)$$

4. 未成熟材の強度と位置が部材の曲げ耐力に及ぼす影響

4.1 製材の曲げ耐力

前章で示したモデルを用いた製材 (単体) の断面解析により, 製材内の成熟材と未成熟材の強度の差異が製材の曲げ耐力に及ぼす影響について検討した結果を以下に示す. 製材は $90 \cdot 120 \cdot 150$ mm の正角材と 150×300 mm の平角材とし, 一覧を表 1 に示す. 各製材は JAS 機械等級区分によるスギ構造用製材の E70 とし, 成熟材と未成熟材の繊維方向のヤング率は区分の中間値である $E = 6850$ N/mm² とし, 製材の芯と髄は同一位置 (髄の偏芯はない) にあるとする. 図 7 に示したヤング率と引張強度の関係より, 成熟材の強度 $M F_{ti}$ は 43.0 N/mm², 髄位置の未成熟材の強度 $J F_{ti}$ は 23.7 N/mm² となる.

表 1 検討に用いる製材断面

種別	無垢材			
髄の偏芯	無し			
未成熟材寸法	120φ			
符号	N9x9	N12x12	N15x15	N15x13
断面寸法	90x90	120x120	150x150	150x300
模式図				

断面寸法の単位: mm, ●: 未成熟材 120φ

図 9 に(12)式で求めた未成熟材の強度を考慮した製材の曲げ耐力 $MJ M_{a1}$ と, 製材内のヤング率と強度は一樣とし, 成熟材の強度を用いて(15)式で求めた曲げ耐力 M_{a1} (本節では, 単純に製材の断面係数に成熟材の引張強度を乗じたものとなる) との比 $(MJ M_{a1} / M_{a1})$ と, 曲げ耐力の決定要素 (成熟材要素と未成熟材要素のうち, 曲げに

曲げ耐力の決定位置

N9x9	N12x12	N15x15	N15x30
未成熟材	=	成熟材	成熟材

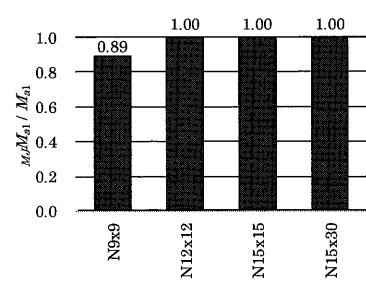


図9 製材の曲げ耐力の算定結果 ($M_j M_{a1} / M_{a1}$)

←「成熟材」は成熟材が先に強度に達したことを示す。「未成熟材」は未成熟材が先に強度に達することを示す。「=」は成熟材と未成熟材が同時に強度に達することを示す。

表2 検討に用いる GBM 断面

種別	GBM			
	2	3	4	5
段数 n	2	3	4	5
髓の偏芯	無し			
未成熟材寸法	120φ			
符号	GBM12x2	GBM12x3	GBM12x4	GBM12x5
断面寸法	120x240	120x360	120x480	120x600
符号	GBM15x2	GBM15x3	GBM15x4	GBM15x5
断面寸法	150x300	150x450	150x600	150x750
模式図 120角GBM 150角GBM 共通				

断面寸法の単位: mm, ●:未成熟材120φ

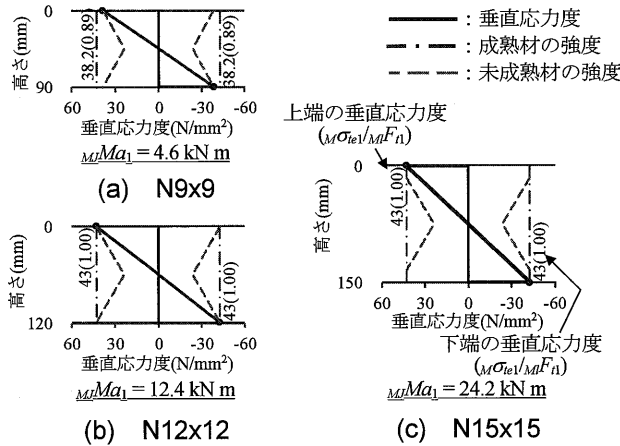


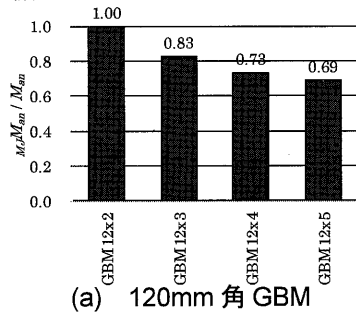
図10 断面の垂直応力度の分布

より生じる垂直応力度が先にそれぞれの強度に達する要素)を示す。 $M_j M_{a1} / M_{a1}$ は、この検討では製材の断面寸法が未成熟材の直径未満になると当然のことながら1.0より小さくなり、90mm正角材で約10%の曲げ耐力の低減となる。これらのことは、2.2節の図3で示した断面寸法の小さい試験体が大きい試験体よりも曲げ強度が小さくなるという製材の実験結果と適合しており、その要因の一つとして未成熟材の影響があることの裏付けになる。

図10に90・120・150mmの正角材(それぞれN9x9・N12x12・N15x15)の断面のせい方向の垂直応力度の分布を示す。図中の実線は垂直応力度を、一点鎖線は成熟材の引張強度を、破線は未成熟材の引張強度を表している。図から断面縁が強度に達することで曲げ耐力が決定し、未成熟材の髓位置の強度 μF_t が0に近い値であったとしても、製材の断面寸法が未成熟材部分の直径未満とならない限り、未成熟材は断面の曲げ耐力に影響を及ぼさないことが分かる。よって、本論のような未成熟材要素の範囲と力学的な性質の設定が妥当であるとすれば、断面せいが150mmを超えるような平角材では、未成熟材の影響を無視して曲げ耐力を算定しても差し支えないと考えられる。一方で、部材に引張力が作用する場合には、断面の垂直応力度が一樣となって髓位置で断面の引張耐力が決定することから、図4で示した引張実験の結果が曲げ実験よりも小さいことについて、未成熟材の影響が

曲げ耐力の決定位置

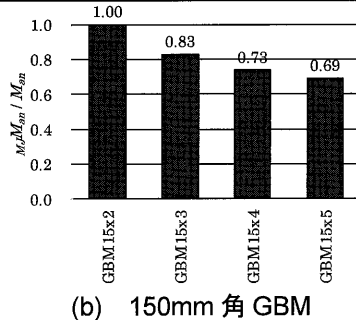
GBM12x2	GBM12x3	GBM12x4	GBM12x5
=	未成熟材	未成熟材	未成熟材



(a) 120mm 角 GBM

曲げ耐力の決定位置

GBM15x2	GBM15x3	GBM15x4	GBM15x5
成熟材	未成熟材	未成熟材	未成熟材



(b) 150mm 角 GBM

図11 GBMの曲げ耐力の算定結果 ($M_j M_{an} / M_{an}$)

その一因であると説明することができる。これらの結果から、製材のモデル化は有意義であると判断し、次節では前章で示した製材のモデルを組み合わせたGBMの断面モデルを用いてGBMの曲げ耐力について検討する。

4.2 GBMの曲げ耐力

断面解析により各製材内の成熟材と未成熟材の強度の差異がGBMの曲げ耐力に及ぼす影響について以下に検討する。断面寸法は120mm・150mm角の製材を2~5段積層したGBMであり(表2参照)、各製材の未成熟材の範囲およびヤング率と強度の値は前節と同じである。また、各製材の芯と髓は同一位置にあるとする。

図11に各製材内の成熟材と未成熟材の強度の差異を考慮して求めた曲げ耐力 $M_j M_{a1}$ と、各製材内のヤング率と強度は一樣とし、成熟材の強度を用いて求めた曲げ耐力の比 $M_j M_{an} / M_{an}$ と、曲げ耐力の決定要素を示す。 $M_j M_{an}$

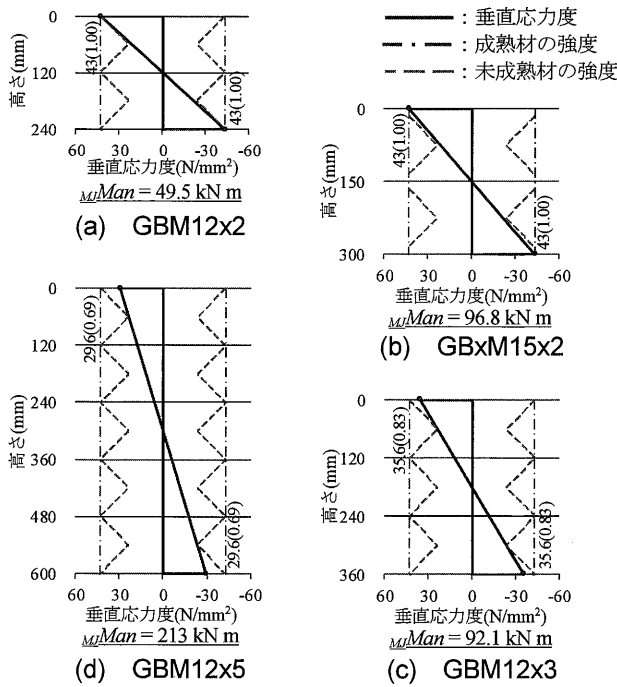


図 12 垂直応力度の分布

M/M_{an} の値は、製材寸法に関わらず段数毎に同じ値となり、段数の増加に応じて漸近的に小さくなっている。3 段重ねで約 15%、5 段重ねで約 30% の曲げ耐力の低下となる。

図 12 に 120mm 角 2・3・5 段（それぞれ GBM12x2・GBM12x3・GBM12x5）および 150mm 角 2 段 (GBM15x2) の断面せい方向の垂直応力度の分布を示す。3 段重ね以上の GBM では最下製材の曲げ引張縁や最上段製材の曲げ圧縮縁よりも、それぞれの製材の髓位置が先に強度に達して GBM の曲げ耐力が決定している。これは、成熟材と髓位置の未成熟材の強度の比である α の値に応じて曲げ耐力が変化することを意味している。本章の検討では 2 段重ねでは曲げ耐力の低減は無く、3 段重ね以上で未成熟材の強度により部材の曲げ耐力が決定する結果となったが、 α の値が本論で設定した値よりも小さくなると 2 段重ねの GBM でも髓位置の未成熟材で曲げ耐力が決定し、耐力比 M/M_{an} は 1.0 よりも小さくなることありうる。上記の結果から、GBM は製材に比べて未成熟材の存在、具体的には成熟材と未成熟材の強度の差異が断面の曲げ耐力に及ぼす影響が大きいと言える。

4.3 髓に偏芯があるときの製材と GBM の曲げ耐力

ここまで、各製材の髓に偏芯がないときの検討を述べたが、当然のことながら実際には必ずしも製材の芯と髓は同一位置にはない。そこで、本節では髓の偏芯が GBM の曲げ耐力に及ぼす影響について調べる。検討は、最上段と最下段製材のみに髓の偏芯があるとして行う。断面は 150mm 角の製材と 150mm 角の製材を 2~5 段積層した GBM とし（表 3 参照）、各製材の未成熟材の範囲および

表 3 検討に用いる部材断面（髓が偏芯したとき）

種別	GBM					
	無垢材	1	2	3	4	5
段数 n		1	2	3	4	5
髓の偏芯	有り	有り				
未成熟材寸法	120φ	120φ				
符号		GBM15x2e-	GBM15x3e-	GBM15x4e-	GBM15x5e-	
断面寸法		150x300	150x450	150x600	150x750	
模式図 (髓が断面の中央方向へ偏芯)						
符号	N15x15e+	GBM15x2e+	GBM15x3e+	GBM15x4e+	GBM15x5e+	
断面寸法	150x150	150x300	150x450	150x600	150x750	
模式図 (髓が断面の縁方向へ偏芯)						

断面寸法の単位：mm、●：未成熟材120φ、偏芯距離はすべて15mm

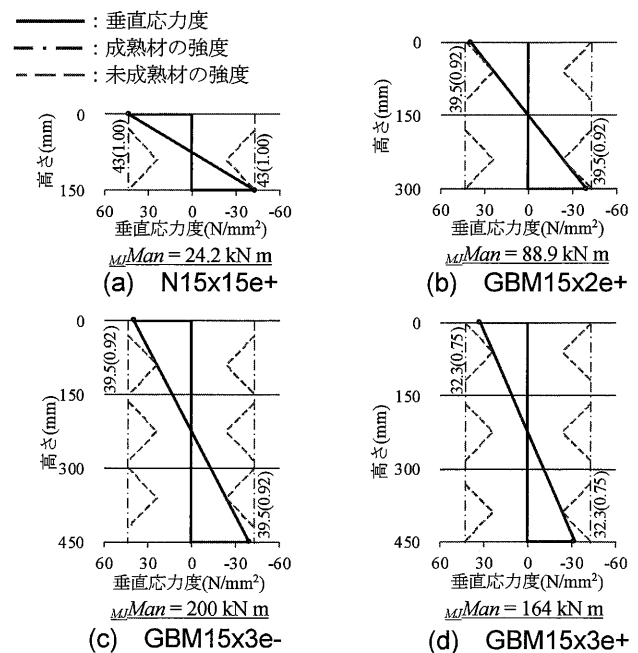


図 13 断面の垂直応力度の分布

ヤング率と引張強度の値は前節と同じである。髓の偏芯は未成熟材の境界が製材の縁と接した位置で設定し、その距離 e は GBM 断面の中央方向へもしくは縁方向へ 15mm ($e/h = 0.1$, h : 製材せい) とする。

図 13 に髓が断面の縁方向に偏芯した 150mm 角製材 (N15x15e+) と 150mm 角 2 段 (それぞれ GBM15x2e+・GBM15x3e+)、髓が断面の中央方向へ偏芯した 150mm 角 3 段 (GBM15x3e-) の断面せい方向の垂直応力度の分布を示す。製材の曲げ耐力は、成熟材と未成熟材の境界が製材の縁にある程度であれば、成熟材が先に強度に達して決定しているため、髓の偏芯が曲げ耐力の大きさに影響を及ぼしていない (図 13a)。3 段重ね以上の GBM の曲げ耐力は、髓の偏芯が無い場合と同様に最上段・最下段製材の髓が先に強度に達して決定している。一方で、2 段重ね GBM の曲げ耐力は、偏芯が無い場合では成熟

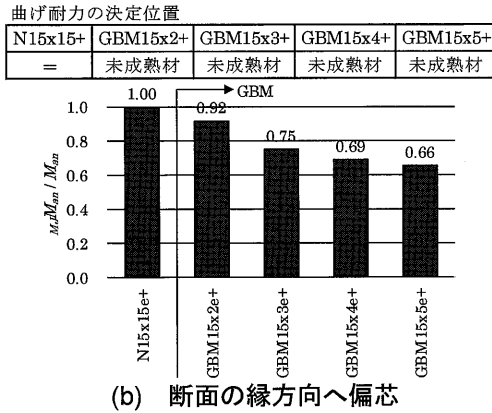
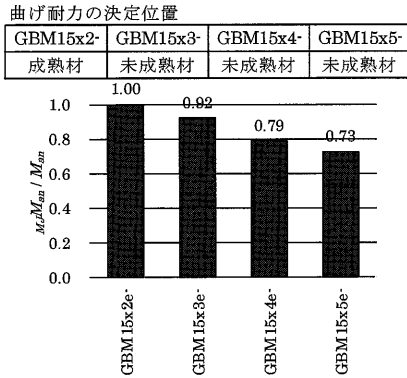


図 14 髓が偏芯したときの曲げ耐力計算値 ($M_{MJ}M_{an}/M_{an}$)

材が先に強度に達するが、髓が断面の縁方向へ偏芯した場合では髓が先に強度に達している (図 13b)。

図 14 に髓がそれぞれの方向へ偏芯した場合の曲げ耐力比 $M_{MJ}M_{an}/M_{an}$ と曲げ耐力の決定要素を示す。髓の偏芯がある場合の $M_{MJ}M_{an}/M_{an}$ は、髓が断面の中央方向へ偏芯すると大きくなり、縁方向へ偏芯すると小さくなる。また、段数が多いほど髓の偏芯が無い場合のそれとの差が小さくなり、2 段重ねで約±10%、5 段重ねで±5%となっている。上記の検討から、髓の偏芯が GBM の曲げ耐力に及ぼす影響はさほど大きくないと判断できる。また、次章では実大 GBM の曲げ実験の結果について評価を行うが、各試験体の曲げ耐力には髓の偏芯が無いものとして算定した値を用いる。

5. GBM 実験値と未成熟材を考慮した曲げ耐力計算値

著者らが行った GBM の実大曲げ実験の結果を³⁾、前章と同様に製材内の成熟材と未成熟材の強度の差異を考慮して算定した曲げ耐力と比較して、本論で示す曲げ耐力の評価手法の適用性について検証する。前章と同様に未成熟材の範囲は髓から 120ϕ とし、髓位置の偏芯は無いものとするが、各要素のヤング率は、GBM 製作の直前に行った縦振動法による各製材の曲げヤング係数の測定値 E_{β} を用いることとし、各製材内の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度も E_{β} をヤング率として図 7 に示す引張強度とヤング率の関係から求める。各製材の E_{β} の値につ

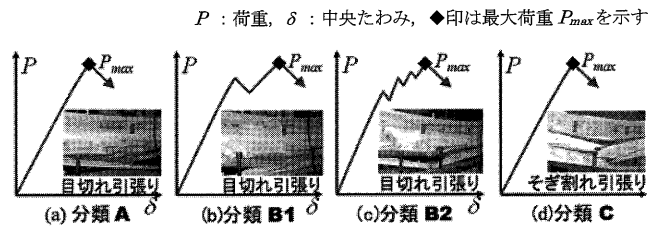


図 15 破壊性状の分類³⁾

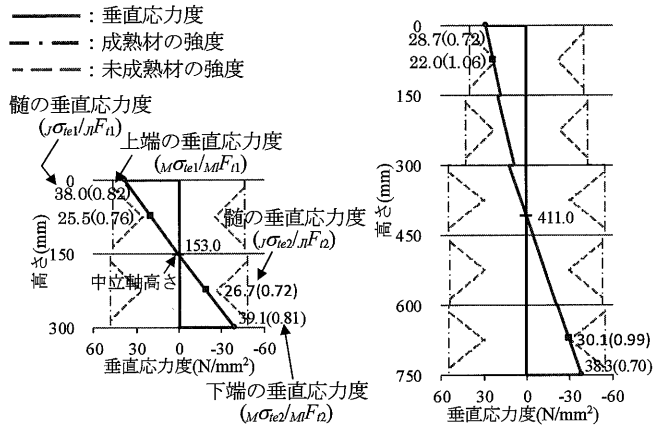


図 16 最大荷重時の垂直応力度の分布

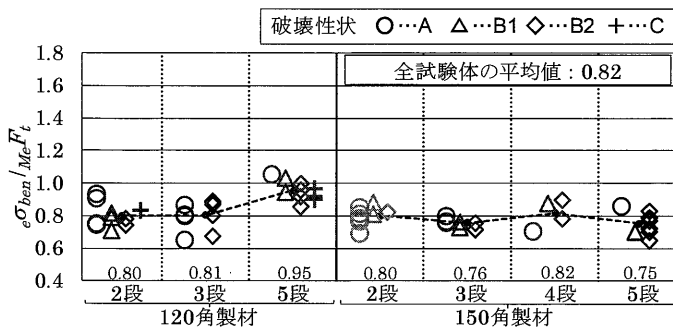
いては、文献 3)を参照されたい。なお、文献 3)では GBM 試験体の破壊性状を、破壊の状況により A, B または C に分類し、さらに最大荷重 P_{max} を発揮するまでの荷重-中央たわみ関係を踏まえて A, B1 または B2 に分類している (図 15)。

図 16 に GBM15x2 の No.5 試験体と、GBM15x5 の No.5 試験体の弾性解析による最大荷重時の断面せい方向の垂直応力度の分布を示す。製材間のヤング率の差異により、中立軸の位置は断面中央からずれ、ヤング率が大きい製材が負担する応力度の値が大きくなる。しかし、ヤング率に応じて引張強度も増加するため、一概にヤング率が大きい製材で曲げ耐力が決定するものではなく、検討の範囲では、GBM の曲げ耐力が最下段または最上段以外の製材で決まることは無い。

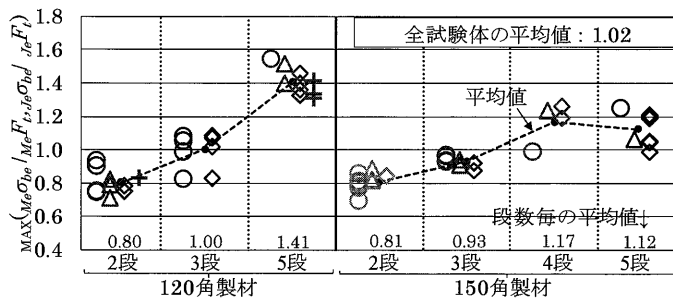
曲げ耐力の実験値と、各製材内のヤング率と強度を一樣として成熟材の強度を用いて算定した曲げ耐力の計算値との比を図 17(a)に、各製材内の成熟材要素と未成熟材要素の強度の差異を考慮して算定した曲げ耐力の計算値との比を図 17(b)に示す。加えて、それぞれの曲げ耐力の比の標準偏差を図 18 に示す。各製材内のヤング率と強度を一樣としたときの曲げ耐力の計算値は、全ての段数で実験値を上回る結果となり、各製材寸法・段数の試験体の曲げ耐力の比の平均値は 0.75~0.95 で、それらに段数による傾向は見られない。一方、成熟材と未成熟材の強度の差異を考慮したときの曲げ耐力比の平均値は 1.0 に近いものの、段数が少ない GBM では過大に、段数が

多い GBM では過小に評価する傾向が見られる。また、両製材寸法とも段数が多い GBM で曲げ耐力の比の標準偏差が大きくなっている。

上記のように、各製材内の成熟材要素と未成熟材要素の強度の差異を考慮しても、曲げ耐力の実験結果を満足できるほど良く評価できてはいない。この原因のひとつに成熟材要素と未成熟材要素の強度の設定があると考えられる。3.1 節で示したように、本論では成熟材の強度を実状よりも大きく、未成熟材の強度を実状よりも小さく設定している可能性があり、曲げ耐力の評価の精度を高めるためには、ここに改善の余地があると考えている。



(a) $e\sigma_{be}/MeF_t$ (各製材のヤング係数は測定値を用い、製材内の強度は一律とし成熟材の強度を用いたとき)



(b) $\text{MAX}(Me\sigma_{be}/MeF_t, Je\sigma_{be}/JeF_t)$ (各製材のヤング係数の測定値により成熟材と未成熟材の強度の差異を考慮したとき)

図 17 GBM の実験値³⁾ と曲げ耐力の計算値の比

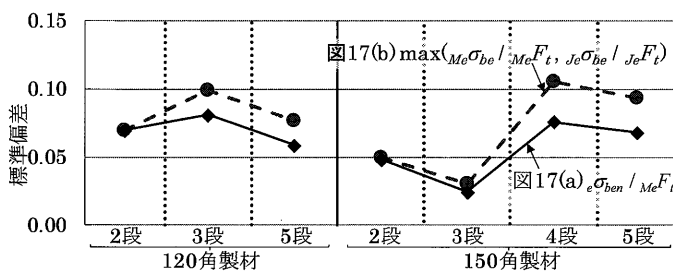


図 18 曲げ耐力比の標準偏差

6. 結論

本論では製材内の成熟材と未成熟材の力学的性質の相違に着目し、既往の研究を参考に両者の範囲および繊維方向のヤング率と強度を設定し、その成熟材要素と未

成熟材要素から構成される製材を組み合わせることで GBM の断面モデルを構築した。これを用いて断面解析を行い、各製材の成熟材と未成熟材の強度の差異が GBM の曲げ耐力に及ぼす影響について検討することに加えて、GBM の実大実験で得られた曲げ耐力に対して、この断面モデルを用いて評価を行った。以下に得られた知見を示す。

- ①各製材の成熟材と未成熟材の強度の差異が曲げ耐力に及ぼす影響は、製材よりも GBM において大きく現れる。これを考慮して(12)式で求めた GBM の曲げ耐力と、各製材内のヤング率と強度は一樣として(15)式で求めた GBM の曲げ耐力との比は、段数の増加に応じて漸近的に小さくなり、最上段および最下段の製材の髓の強度で曲げ耐力が決まり、曲げ耐力は3段重ねで約 15%、5 段重ねで約 30%の曲げ耐力の低下となる。
- ②髓の偏芯が有る場合の GBM の曲げ耐力は、段数が多いほど髓の偏芯が無い場合のそれとの差が小さくなり、2段重ねで約±10%、5段重ねで±5%である。
- ③GBM の実大実験で得られた曲げ耐力に対して断面モデルを用いた評価を行った結果、段数が少ない GBM では過大に、段数が多い GBM では過小に評価する傾向が見られ、曲げ耐力の実験結果を満足できるほど良く評価できず、成熟材と未成熟材の強度の設定に課題が残る結果となった。

本論では過去に実施された幾つかの強度試験の結果を基に、成熟材と未成熟材の強度を設定して検討を進めたが、木質材料の強度はその強度分布に適合する確率分布モデルを基に評価されることから、本検討を発展させた強度のシミュレーション結果を取り入れることが有効と考えられる。今後は、本論で述べた断面モデルを基に、確率分布モデルの選定や GBM の実設計に用いる強度等の特性値の評価方法を検討する計画である。

参考文献

- 1) 林野庁: 森林資源現状表, 2016. 3
- 2) (社)日本木造住宅産業協会: 木造軸組住宅における国産材利用の実態調査報告書, 2013. 9
- 3) 田上誠, ほか3名: スギ製材を2~5段積層した接着重ね材の実大曲げ実験 心持ち製材を積層した接着重ね材の曲げ性能 その1, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No. 754, pp.1821-1831, 2018. 12
- 4) 田上誠, ほか3名: 心持ち製材を積層した接着重ね材の構造力学的考察, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 65B, pp.165-171, 2019. 3
- 5) 田上誠, ほか3名: 心持ち製材を積層した接着重ね材の組み合わせ応力による曲げ耐力の評価手法, 日本建築学会技術報告集, 第25巻, 第61号, pp.1121-1125, 2019. 10

- 6) 渡辺治人, ほか2名: 未成熟材に関する研究(第1報)
スギ樹幹についての実験, 木材学会誌, 9巻, 6号, P.225,
1963
- 7) 太田貞明: スギ・ヒノキ樹幹内における未成熟材の力学特性に関する基礎的研究, 九州大学農学部演習林報告. 45, pp. 1-80, 1972. 3
- 8) 田戸岡尚樹, ほか2名: スギの組織構造及び力学的特性の樹幹内変動, 北海道大学演習林研究報告, 第62巻, 第1号, pp. 15-30, 2005
- 9) 藤崎謙次郎: 木材の圧縮強さと圧縮ヤング率の関係について, 愛媛大学農学部演習林研究報告, 第8巻, pp. 67-71, 1971. 3
- 10) 高橋宏明: スギ林の年輪成長 (I) スギ林の年輪生長の共通性, 日本林學會誌 52(6), pp. 173-177, 1972. 3
- 11) 木構造振興株式会社: 木材の強度等データおよび解説, pp. 16-97, 2011. 9
- 12) 中村昇, 他: ティンバーメカニクス 木材の力学理論と応用, 海青社, pp.164~165, 2015. 10

(受理：令和元年10月21日)