

## 心持ち製材を積層した接着重ね材の構造力学的考察

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/10.15017/2231649>

---

出版情報 : 都市・建築学研究. 35, pp.41-48, 2019-01-15. 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 :

## 心持ち製材を積層した接着重ね材の構造力学的考察

### Structural Mechanics Investigation of Glued Build-up Members Made of Box Heart Timbers

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 to evaluate the bending performance of a GBM. In this study, we use two structural models; one is a GBM simple structure model based on former research and the other is GBM detailed structural model considered with inhomogeneity. Bending strength and bending stiffness are obtained using both models, and factors which determine the bending performance of GBM are study.

*Keywords : Glued build-up members, Box heart timber, Bending strength, Bending stiffness*

接着重ね材, 心持ち製材, 曲げ強度, 曲げ剛性

#### 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り増加しているが、心持ち製材の需要はラミナやパルプ・チップ材に比べて低いことから<sup>2)</sup>、供給過多の状態となっており、国産製材の有効利用が喫緊の課題となっている。本研究は、製材を積極的に活用するために開発した建築用構造部材である接着重ね材 (Glued Build-up Members: 以下, GBM) の曲げ性能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。曲げ性能を適切に評価するには、GBM の工学的な特性を整理し、これらの影響の大きさを把握する必要がある。接着重ね梁については小断面製材を積層した試験体<sup>3),4),5)</sup>や中断面製材を積層した試験体<sup>6),7)</sup>に対する実大実験の結果が報告されており、筆者らも既に文献 8)において中断面製材を積層した GBM 試験体の実大曲げ実験の結果を示した。木材は、天然有機材料であるために人工的に生産された材料よりも各個体が不均質であるとともに、各個体間に比較的大きな差異が存在する。そのため、GBM の実験で得られる結果においてもばらつきの影響が大きくなり、工学的な特徴による影響が

明確に現れにくい可能性があり、実験的な研究のみで詳細に分析することは難しい。そこで、本論では断面解析を用いた検討に基づき、構造力学的な見地より GBM の曲げ性能として曲げ強度と曲げ剛性に対する考察を行う。

#### 2. GBM と他の木質部材の工学的な特性の整理

図 1 に GBM と無垢材および集成材の断面の模式図 (断面幅:  $B$ , 断面せい:  $H$ ) を、表 1 に各材の曲げ性能に比較的大きな影響を及ぼすと考えられる特性を示す。GBM と集成材は、製材もしくはラミナを積層した木質材料であり、設計において同一機械等級区分としても、実際は等級内の上限値と下限値の間での範囲ではあるが、異なる曲げ弾性係数の材が混在することになる。この等級区分の混在の影響について 4.1 節で検討する。

GBM も集成材と同様に異なる曲げ弾性係数と強度を有する材で断面を構成できる長所がある。例えば、曲げを受ける GBM において最上段と最下段に断面中央よりも高い等級の製材を構成することは、構造性能を確保しつつ調達が容易になり、製造コストの低減等につながると思われる。一方で、異等級構成とすることで曲げ性能が大きく低下することがないかの確認が必要である。

4.2 節で異等級構成 GBM の曲げ性能について検討する。

一般に木材の圧縮・引張強度は曲げ強度よりも小さいため、曲げを受ける GBM や集成材では、特に段数が多

\* 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

くなるほど各製材やラミナに生じる垂直応力度を曲げ成分と軸方向成分の組み合わせ応力として評価することが適切であるとも考えられる。4.3節で組み合わせ応力を用いた曲げ強度の評価方法について検討する。

髄付近の未成熟材の曲げ弾性係数や強度は成熟材に比べて小さい<sup>9)</sup>。例えば渡辺ら<sup>10)</sup>は「普通に生長したスギの樹幹には髄から10~15年までの木部の多くは品質的に劣悪な未成熟材部であり、それより外周の木部である成熟材部とは明らかな差異があり、両材部を品質的に同一として取り扱うことは無理である。」と述べている。心去り無垢材は髄を含まず、ラミナは髄付近のものを用いることは少ない。心持ち無垢材の髄は断面中央付近にあるのが一般的である。GBMは最上段と最下段の製材の髄の位置が曲げ圧縮縁又は曲げ引張縁の近傍となるため、他の材に比べて各構成材内の成熟材と未成熟材の特性が曲げ強度に及ぼす影響が大きいと考えられる。これについて4.4節で検討する。

上記の特性の他に節、内部割れ、目切れ、曲り、反り、目まわりといった欠点や、密度、年輪間隔、含水率、寸法誤差および腐食といった不均質性も各材の曲げ性能に影響を与える。構成材を選定するGBMと集成材は無垢材に比べてこれらの影響を取り除くことが容易であり、製材とラミナの断面せい方向の寸法を比較すると、製材は105~150mmであるのに対してラミナは20~50mmと小さいため、集成材はGBMに比べてさらに欠点や不均質性を取り除き易い。なお、欠点と不均質性はGBMの製造過程の品質管理により一定限度内に抑えられることを前提として、本論ではこれらの影響は検討しない。

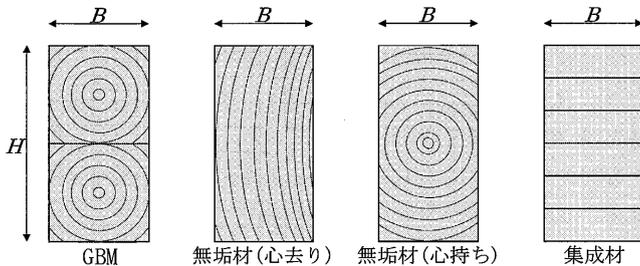


図1 各部材の断面の模式図

表1 部材の曲げ性能に影響を及ぼすと考えられる特性

部材	構成	髄の位置	未成熟材の影響	欠点	不均質性
GBM	製材と接着剤	各製材中央付近	●	▲	▲
無垢材(心去り)	単一の製材	—	×	●	●
無垢材(心持ち)	単一の製材	中央付近	▲	●	●
集成材	ラミナと接着剤	特定しない	×	×	×

●, ▲, ×, —は影響の程度を示す(●は大, ▲は中, ×は小, —は無い)。欠点は節、内部割れ、目切れ、曲り、反りおよび目回りを指す。不均質性は密度、年輪間隔、含水率、寸法誤差および腐食を指す。

### 3. 断面モデル

本論の検討に用いるGBMの構造モデルは、集成材と同様に等価断面法に基づいて構成する各製材を一様な弾性体と見なし、各製材の曲げ弾性係数の相違のみを考慮した簡易GBM断面モデル(以下、簡易モデル)と、各製材の断面内における成熟材と未成熟材の曲げ弾性係数の相違を簡略した形で考慮した詳細GBM断面モデル(以下、詳細モデル)である。以下に両モデルの概要について説明する。

#### 3.1 簡易モデル

図2に製材を $n$ 段重ね、 $m$ 列束ねたGBMの断面を示す。平面保持の仮定が成り立ち(製材相互の接着剤界面にずれが生じない)、各製材が異なる曲げ弾性係数 $E_{ij}$ と断面積 $A_{ij}$ を持つ構造要素としたとき、GBM断面の等価曲げ剛性 $(EI)_e$ は(1)式で表現できる。このとき、各製材の中立軸( $N-N'$ 軸)まわりの断面二次モーメント $I_{ij-NN'}$ は(2)式で、中立軸と各製材芯の距離 $g_i$ は(3)式で、原点から中立軸までの距離 $\lambda$ は(4)式で求める。なお、接着剤の層は極めて薄いため、接着剤の層の強度と変形を無視する。

$$(EI)_e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{ij} \cdot I_{ij-NN'} \quad (1)$$

$$I_{ij-NN'} = I_{ij} + g_i^2 \cdot A_{ij} \quad (2), \quad g_i = \lambda - y_i \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{ij} \cdot A_{ij} \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{ij} \cdot A_{ij}} \quad (4)$$

ここで、 $y_i$ : 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断面に作用した際の $i$ 段の製材縁における曲げ応力度 $\sigma_{bei}$ は(5)式で求めることができる。

$$\sigma_{bei} = E_{ij} \frac{M}{(EI)_e} \left( y_i - \lambda + \frac{h_i}{2} \right) \quad (5)$$

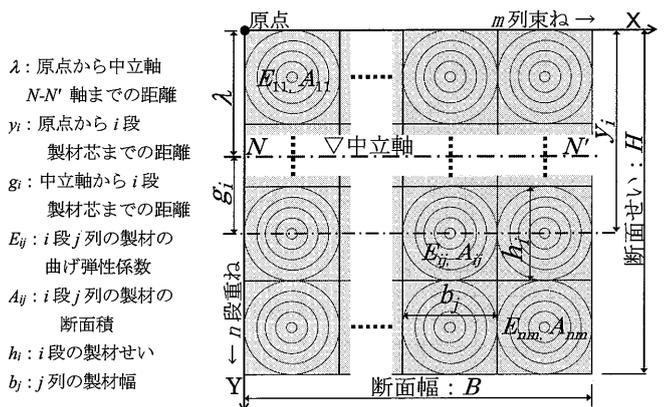


図2 簡易GBM断面モデル

また、各製材に生じる垂直応力度を曲げ成分と軸方向成分の組み合わせ応力としたときの各応力度の算出方法を以下に示す。位置 $y_i$ におけるひずみ $\epsilon_i$ は、(6)式のよう

に曲げ成分のひずみ $\varepsilon_{bi}$ と軸方向成分のひずみ $\varepsilon_{ti}$ の和として表現できる。平面保持の仮定より GBM 断面全体の曲率 $\phi$ と各製材の曲率は一致するので (7)式, 曲げ成分のひずみ $\varepsilon_{bi}$ は(8)式, 軸方向成分によるひずみ $\varepsilon_{ti}$ は(9)式となる。したがって, 曲げモーメント $M$ による位置 $y_i$ の曲げ応力度 $c\sigma_{bei}$ は(10)式により, 軸方向応力度 $c\sigma_{tei}$ は(11)式により求めることができる。

$$\varepsilon_i = (y_i - \lambda)\phi = \varepsilon_{bi} + \varepsilon_{ti} \quad (6), \quad \phi = M/(EI)_e \quad (7)$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{h_i}{2}\phi \quad (8), \quad \varepsilon_{ti} = g_i\phi \quad (9)$$

$$c\sigma_{bei} = E_i \cdot \varepsilon_{bi} \quad (10), \quad c\sigma_{tei} = E_i \cdot \varepsilon_{ti} \quad (11)$$

図3に3段重ね GBM が曲げモーメント $M$ を受けるときの最下段製材のひずみと応力の分布を例として示す。

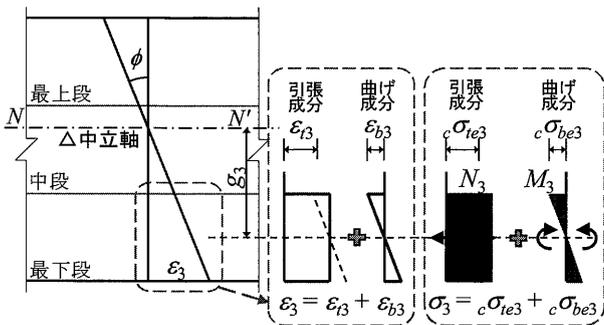


図3 GBM 断面内のひずみと垂直応力度分布 (3 段重ね)

### 3.2 詳細モデル

各製材の断面内における各部分の曲げ弾性係数と強度は (例えば髄からの距離の) 関数として与えるべきであるかもしれないが, このモデルでは簡略化のため各製材の断面を図4(a)に示すように髄付近の未成熟材要素とその他の成熟材要素の二つで構成されるものとする。未成熟材の要素は正方形断面とし, 中心位置と断面積を与え, 成熟材と未成熟材の要素にそれぞれ定数の曲げ弾性係数と強度を付与する。このようにモデル化した製材を組み合わせることで GBM 断面を構築する。図4(b)に未成熟材が各製材の中央にある場合の GBM 断面を示す。成熟材の曲げ弾性係数と断面積を $M E_{ij}$ と $M A_{ij}$ , 未成熟材のそれらを $J E_{ij}$ と $J A_{ij}$ としたとき, GBM 断面の等価曲げ剛性 $MJ(EI)_e$ は(12)式で表現できる。

$$MJ(EI)_e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M E_{ij} \cdot M I_{ij-NN'} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m J E_{ij} \cdot J I_{ij-NN'} \quad (12)$$

$$M I_{ij-NN'} = M I_{ij} + g_i^2 \cdot M A_{ij} \quad (13)$$

$$J I_{ij-NN'} = J I_{ij} + g_i^2 \cdot J A_{ij} \quad (14)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M E_{ij} \cdot M A_{ij} \cdot y_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m J E_{ij} \cdot J A_{ij} \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M E_{ij} \cdot M A_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m J E_{ij} \cdot J A_{ij}} \quad (15)$$

ここで,  $M I_{ij-NN'}$ ,  $J I_{ij-NN'}$ はそれぞれ製材の図心軸まわりの断面2次モーメント ( $\text{mm}^4$ ) である。

曲げモーメント $M$ が GBM 断面に作用したときの $i$ 段成熟材縁の曲げ応力度 $M\sigma_{bei}$ は(16)式, 未成熟材縁の曲げ応力度 $J\sigma_{bei}$ は(17)式で求めることができる。

$$M\sigma_{bei} = M E_{ij} \frac{M}{MJ(EI)_e} \left( y_i - \lambda + \frac{M h_i}{2} \right) \quad (16)$$

$$J\sigma_{bei} = J E_{ij} \frac{M}{MJ(EI)_e} \left( y_i - \lambda + \frac{J h_i}{2} \right) \quad (17)$$

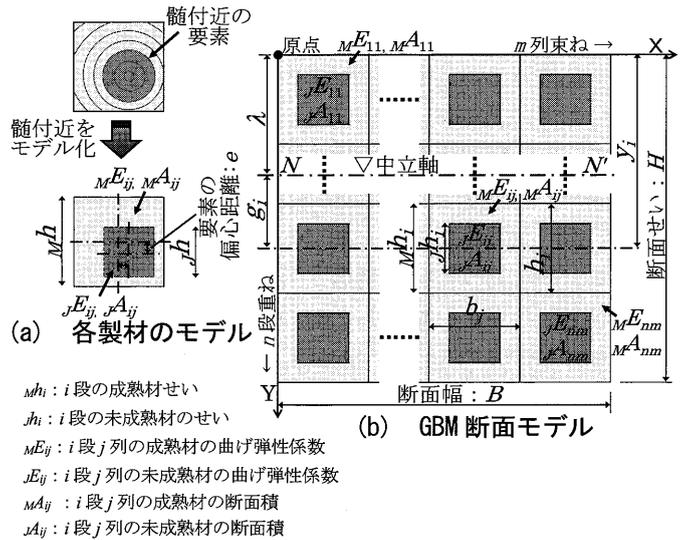


図4 詳細 GBM 断面モデル

### 4. GBM の特性を考慮した曲げ性能

本節で検討に用いる GBM は構成材を日本農林規格 (以下, JAS) 機械等級区分に適合する製材とし, その断面寸法は JAS 大断面集成材と同じ $B=15\text{cm}$ 以上,  $B \times H=300\text{cm}^2$ 以上とする。各製材の強度は, その製材の曲げ弾性係数を基に平成12年建設省告示第1452号の木材の曲げ基準強度 $F_b$ と曲げ弾性係数 $E_{ij}$ の関係から線形補間により算出する (図5)。

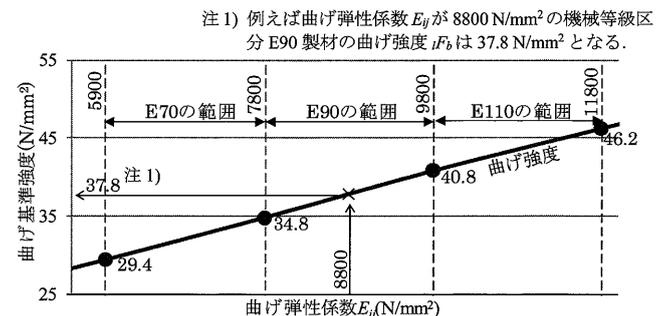


図5 製材の曲げ強度と曲げ弾性係数の関係

#### 4.1 同一等級内の曲げ弾性係数の混在を考慮したときの曲げ性能

同一等級の製材を用いたとしても, 各製材の曲げ弾性係数が混在すると中立軸の位置の移動や応力度分布の変

化により GBM の曲げ性能に影響を与えることが考えられる。このことについて以下に検討する。GBM の曲げ耐力は簡易モデルを用いて以下のように求める。i 段の製材の縁における曲げ応力度 $\sigma_{bei}$ と曲げ強度 $F_{bi}$ の関係である(18)式を(5)式に代入して曲げモーメント $M$ について求めると、 $\sigma_{bei}$ が $F_{bi}$ に達するときの曲げモーメント $M_{ai}$ は(19)式で表現できる。各製材に対して $M_{ai}$ を求め、それらの最小値を GBM の曲げ耐力 $M_a$ とする。

$$\sigma_{bei} / F_{bi} = 1 \quad (18), \quad M_{ai} = \frac{I F_{bi} (EI)_e}{E_{ij} (y_i - \lambda + h_i / 2)} \quad (19)$$

表 2 に検討対象とする GBM の製材構成を示す。JAS 機械等級区分 E70, E90, E110 の 150 角製材を用いた 2 段重ねと 5 段重ねの 2 種類とし、GBM 内での製材の曲げ弾性係数の構成は各等級内の下限値のみ(LL), 中間値のみ(MM), 上限値と下限値(HL), 上限値のみ(HH)の 4 種類とする。上限値と下限値(HL)の構成は、実際の製造においては無作為に製材を積層することを鑑みて、生じ得る最も極端な場合を想定したものである。図 6 に例として非対称な構成である GBM15x2 と GBM15x5 の E70 HL について曲げ応力度分布を示す。2 段重ねの曲げ応力度は E70, E90, E110 のいずれも曲げ弾性係数が低い曲げ引張縁が僅かに先行して曲げ強度に達している。また、5 段重ねで E70 のときは曲げ圧縮縁が、E90 のときは曲げ引張縁が先行して、E110 のときは曲げ圧縮縁と引張縁が同時に曲げ強度に達しており、曲げ弾性係数が高い材が僅かに先行して曲げ強度に達する構成もある。HL における GBM 断面の図芯から中立軸までの距離は、断面せいに対して 3%程度であり、曲げ性能に与える影響は

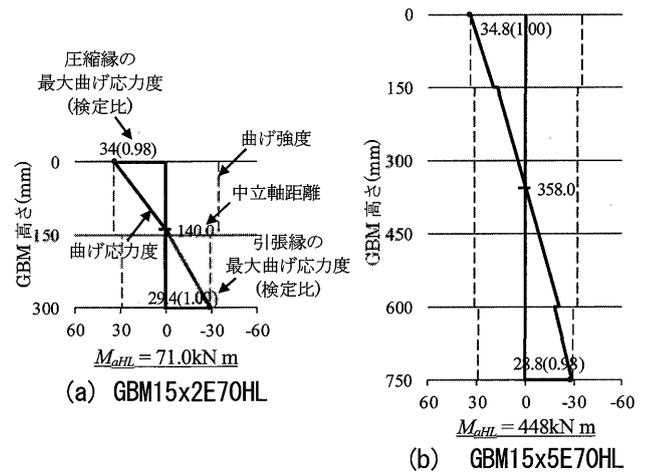


図 6 同一等級 GBM の曲げ応力度分布

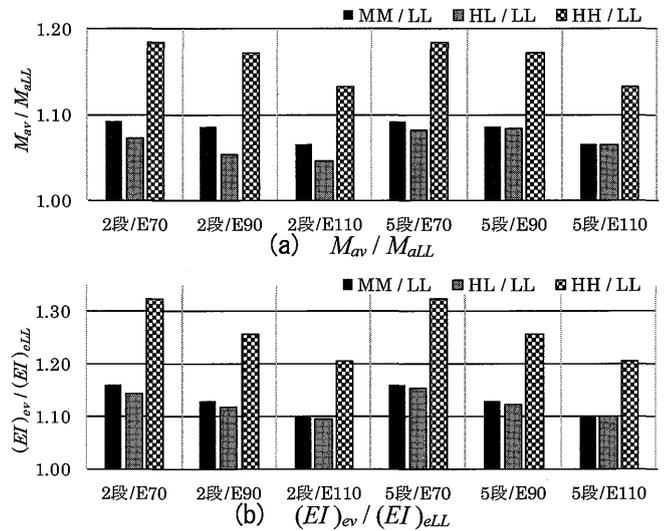


図 7 同一等級構成 GBM の曲げ耐力と曲げ剛性

表 2 同一等級構成 GBM の製材組み合わせ

構成		GBM15x2 (150角2段重ね)											
		E70				E90				E110			
No. v	構成図	LL	MM	HL	HH	LL	MM	HL	HH	LL	MM	HL	HH
各製材の曲げ弾性係数 $E_{ij}$ (N/mm <sup>2</sup> )	構成図	E70 5900	E70 6850	E70 7800	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 9800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 11800	E110 11800
		E70 5900	E70 6850	E70 7800	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 9800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 11800	E110 11800
		E70 5900	E70 6850	E70 7800	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 9800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 11800	E110 11800
		E70 5900	E70 6850	E70 7800	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 9800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 11800	E110 11800
		E70 5900	E70 6850	E70 7800	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 9800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 11800	E110 11800
$\Sigma E_{ij} / n$ (N/mm <sup>2</sup> )		5900	6850	6850	7800	7800	8800	8800	9800	9800	10800	10800	11800

構成		GBM15x5 (150角5段重ね)											
		E70				E90				E110			
No. v	構成図	LL	MM	HL	HH	LL	MM	HL	HH	LL	MM	HL	HH
各製材の曲げ弾性係数 $E_{ij}$ (N/mm <sup>2</sup> )	構成図	E70 5900	E70 6850	E70 7800	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 9800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 11800	E110 11800
		E70 5900	E70 6850	E70 7800	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 9800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 11800	E110 11800
		E70 5900	E70 6850	E70 7800	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 9800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 11800	E110 11800
		E70 5900	E70 6850	E70 7800	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 9800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 11800	E110 11800
		E70 5900	E70 6850	E70 7800	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 9800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 11800	E110 11800
$\Sigma E_{ij} / n$ (N/mm <sup>2</sup> )		5900	6850	6850	7800	7800	8800	8800	9800	9800	10800	10800	11800

注 2) 各製材の曲げ強度は以下の通り。  $E_{ij} = 5900$  は  $F_{bi} = 29.4$ ,  $E_{ij} = 6850$  は  $F_{bi} = 32.1$ ,  $E_{ij} = 7800$  は  $F_{bi} = 34.8$ ,  $E_{ij} = 8800$  は  $F_{bi} = 37.8$ ,  $E_{ij} = 9800$  は  $F_{bi} = 40.8$ ,  $E_{ij} = 10800$  は  $F_{bi} = 43.5$ ,  $E_{ij} = 11800$  は  $F_{bi} = 46.2$ 。 [単位: N/mm<sup>2</sup>]

小さい。図 7 に各構成の曲げ耐力  $M_{av}$  と曲げ剛性  $(EI)_{ev}$  について、下限値のみの構成とした  $M_{aLL}$  と  $(EI)_{eLL}$  との比を示す。曲げ弾性係数の平均値が等しい MM と HL では僅かではあるが HL の方が曲げ耐力と曲げ剛性が小さい。これは、構成材として無作為に抽出した製材を用いた GBM を考えたとき、各製材の曲げ弾性係数の混在を考慮した曲げ性能は、各製材の曲げ弾性係数の平均値から求めた曲げ性能よりも小さくなることを示唆するものである。上記から、同一等級の製材を用いても、GBM の曲げ性能を正確に把握した

い場合などは、各製材の曲げ弾性係数の混在を考慮して曲げ圧縮縁と曲げ引張縁の両縁における応力度を評価することが必要である。

#### 4.2 異等級対称構成としたときの曲げ性能

本節では図2に示した簡易モデルを用いて異等級対称構成GBMの曲げ性能について検討する。表3に対象とする製材の構成を示す。製材の段数は長スパンか、もしくは大きな荷重を支持するために用いることが想定され、かつ断面全体の半数以上が異等級材となり、調達や製造のコスト低減の効果が大きいと考えられる150角製材の5段重ねを対象とする。各製材の曲げ弾性係数は、最上段と最下段をE110の上限値、断面中央部をE90とE70の中間値と下限値とする。なお、断面中央部の曲げ弾性係数をE110の中間値と下限値とした同一等級構成も比較のために検討する。

図8に例としてE110HHL, E110HHE90L, E110HHE70Lの曲げ応力度分布を示す。最上段と最下段製材の応力度分布は各構成で同一であり、断面中央部との曲げ弾性係数の差が最も大きいE110HHE70Lのとき、断面中央部における最大応力度は13.9 N/mm<sup>2</sup>(検定比:0.47)と、中央の製材の強度に対して十分小さい。検討の範囲では曲げ耐力は曲げ圧縮もしくは引張縁の製材によって決定し、断面中央部の製材で決定することはない。図9に曲げ耐力 $M_{av}$ と曲げ剛性 $(EI)_{ev}$ について、製材の曲げ弾性係数を全てE110の上限値のみ(表2のGBM15x5 E110HH)とした $M_{aHH}$ と $(EI)_{eHH}$ との比( $M_{av} / M_{aHH}$ と $(EI)_{ev} / (EI)_{eHH}$ )を示す。曲げ耐力と曲げ剛性は全てE110の上限値とした場合の0.95~0.89倍の範囲にあり、全てE110の上限値とした構成と比較しても大きく曲げ性能が低下することはない。一方、各製材の曲げ弾性係数を全てE70またはE90の中間値としたときの曲げ耐力と曲げ剛性と、全てE110の上限値としたときとの比は、 $M_{av} / M_{aHH}$ がそれぞれ0.69, 0.82倍、 $(EI)_{ev} / (EI)_{eHH}$ がそれぞれ0.58, 0.75倍である。異等級対称構成とすると同一等級構成とした場合に比べて少ないコストの増加で高い曲げ性能を確保できることから、有効であるといえる。

#### 4.3 組み合わせ応力による曲げ耐力の評価

本節では図3に示した簡易モデルを用いて各製材に生じる垂直応力度を曲げ成分と軸方向成分の組み合わせ応力とした評価方法の適用性について検討する。製材の構成は表2で示したGBM15x5E70MMと同じ構成材の2・3・4・6・7段重ねGBMとする。図10に最下段製材の曲げ引張縁における曲げ成分と引張成分の割合をGBM段数毎に示す。3段重ねのときは曲げ成分33%、軸方向成分67%であるが、7段重ねのときは曲げ成分14%に対して軸方向成分は86%と、5段重ね以上の場合は軸方向成分が80%以上となり、段数が多いGBMの曲げ引張縁の製材では特に軸方向成分が支配的であることが分かる。

表3 異等級対称構成GBMの製材構成

構成	GBM15x5 (150角5段重ね)					
	E110HH		E110HHE90		E110HHE70	
No. v	M	L	M	L	M	L
各製材の曲げ弾性係数 $E_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	E110 11800	E110 11800	E110 11800	E110 11800	E110 11800	E110 11800
	E110 10600	E110 9800	E90 8800	E90 7800	E70 6850	E70 5900
	E110 10600	E110 9800	E90 8800	E90 7800	E70 6850	E70 5900
	E110 10600	E110 9800	E90 8800	E90 7800	E70 6850	E70 5900
	E110 11800	E110 11800	E110 11800	E110 11800	E110 11800	E110 11800
$\Sigma E_y / n$ (N/mm <sup>2</sup> )	11200	10600	10000	9400	8830	8260

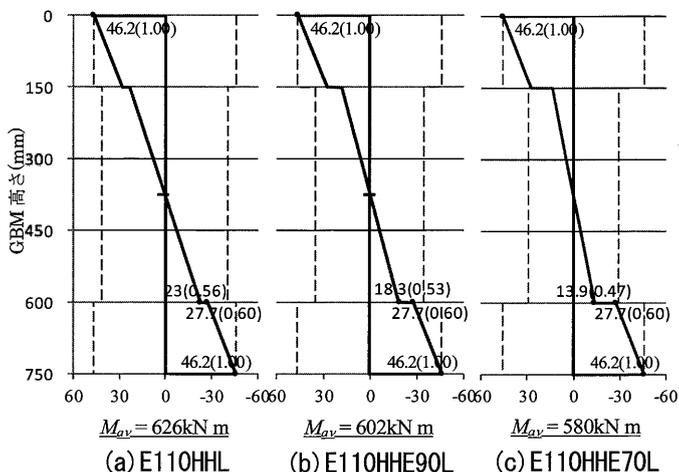


図8 異等級対称構成GBM (GBM15x5)の曲げ応力度分布

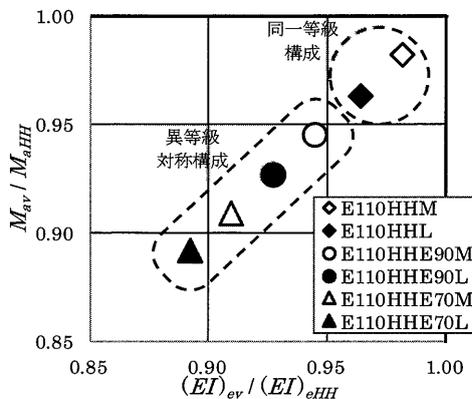


図9  $M_{av} / M_{aHH}$ と $(EI)_{ev} / (EI)_{eHH}$ の関係

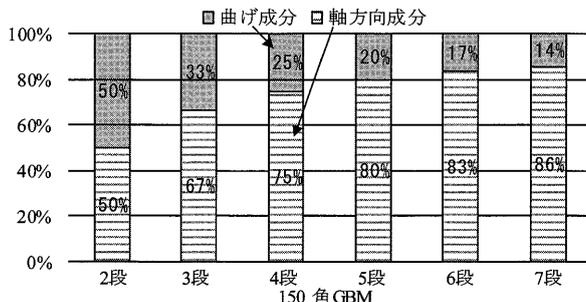


図10 最下段製材の組み合わせ応力の割合

既往の集成材に対する研究において組み合わせ応力  
で曲げ強度を評価するとき、主に応力度の単純和や二乗  
和を用いて評価している。例えば小松<sup>11)</sup>は最終荷重時  
までひずみは弾性域内にあると仮定し、単純和の組み  
合わせ応力式を用いて各段ラミナの強度から曲げ破壊係  
数を計算するモデルを作成しており、平嶋ら<sup>12)</sup>は小松と  
同様の仮定条件のもとで二乗和の組み合わせ応力式を  
用いて集成材の曲げ破壊係数を計算するモデルを提案し  
ている。一方で、GBM の組み合わせ応力を詳細に検討  
した研究はない。そこで、組み合わせ応力と強度の関  
係を検討することを目的として、単純和と二乗平方根  
の2つについて検討を行う。組み合わせ応力が単純和  
のとき、(10)式と(11)式を  $c\sigma_{bei}$  と曲げ強度  $F_{bmi}$   
および  $c\sigma_{tei}$  と引張強度  $F_{tmi}$  との関係である(20)  
式又は圧縮強度  $F_{cmi}$  との関係である(21)式に代入  
して  $M$  について求めると、曲げ引張側が(20)式の  
条件を満たす曲げモーメント  $SUM M_{ati}$  は(22)式、  
曲げ圧縮側が(21)式の条件を満たす曲げモーメント  
 $SUM M_{aci}$  は(23)式で表現でき、 $SUM M_{ati}$  と  
 $SUM M_{aci}$  の最小値を GBM の曲げ耐力  $SUM M_a$   
とする。

$$\frac{c\sigma_{bei}}{F_{bmi}} + \frac{c\sigma_{tei}}{F_{tmi}} = 1 \quad (20), \quad \frac{c\sigma_{bei}}{F_{bmi}} + \frac{c\sigma_{cei}}{F_{cmi}} = 1 \quad (21)$$

$$SUM M_{ati} = \frac{F_{bmi}(EI)_e}{E_i(h_i/2 + g_n/\gamma_t)} \quad (22)$$

$$SUM M_{aci} = \frac{F_{bmi}(EI)_e}{E_i(h_i/2 + g_n/\gamma_c)} \quad (23)$$

ここで、 $\gamma_t = F_{tm}/F_{bm}$ 、 $\gamma_c = F_{cm}/F_{bm}$  である。

組み合わせ応力が二乗平方根のとき、(10)式と(11)式  
を  $c\sigma_{bei}$  と曲げ強度  $F_{bmi}$  および  $c\sigma_{tei}$  と引張強度  
 $F_{tmi}$  との関係である(24)式又は圧縮強度  $F_{cmi}$  との  
関係である(25)式に代入して  $M$  について求めると、  
曲げ引張側が(24)式の条件を満たす曲げモーメント  
 $SRSS M_{ati}$  は(26)式、曲げ圧縮側が(25)式の  
条件を満たす曲げモーメント  $SRSS M_{aci}$  は(27)  
式で表現でき  $SRSS M_{ati}$  と  $SRSS M_{aci}$  の最小値を  
GBM の曲げ耐力  $SRSS M_a$  とする。

$$\sqrt{\left(\frac{c\sigma_{bei}}{F_{bmi}}\right)^2 + \left(\frac{c\sigma_{tei}}{F_{tmi}}\right)^2} = 1 \quad (24)$$

$$\sqrt{\left(\frac{c\sigma_{bei}}{F_{bmi}}\right)^2 + \left(\frac{c\sigma_{cei}}{F_{cmi}}\right)^2} = 1 \quad (25)$$

$$SRSS M_{ati} = F_{bmi}(EI)_e / E_i \sqrt{(h_i/2)^2 + (g_n/\gamma_t)^2} \quad (26)$$

$$SRSS M_{aci} = F_{bmi}(EI)_e / E_i \sqrt{(h_i/2)^2 + (g_n/\gamma_c)^2} \quad (27)$$

曲げ強度  $F_{bmi}$  は  $iF_{bi}$  (図5) を用いる。引張強度は平成  
12年建設省告示第1452号の木材の引張基準強度  $F_t$  では  
曲げ基準強度の0.6倍とされているが、瀧野ら<sup>13)</sup>が心持  
ち材の引張試験を通じて指摘している通り、引張基準強

度は安全率等の考慮によって真の引張強度に比べて小さ  
く設定されていると考えられる。現時点では真の引張強  
度を確定できないため、引張強度  $F_{tmi}$  は  $0.9F_{bmi}$ 、 $0.8F_{bmi}$ 、  
 $0.7F_{bmi}$ 、 $0.6F_{bmi}$  を用いて検討を行う。

図11に各引張強度としたときの曲げ耐力  $SUM M_{av}$ 、  
 $SRSS M_{av}$  の曲げ応力度と曲げ強度から求めた  $M_{aMM}$  との比  
( $SUM M_{av}/M_{aMM}$ 、 $SRSS M_{av}/M_{aMM}$ ) を示す。検討の範囲では  
組み合わせ応力の単純和としたときの曲げ耐力は曲げ応  
力度のみでの曲げ耐力に比べて2段重ねのとき0.75~  
0.95、7段重ねのとき0.64~0.91の範囲にある。一方、組  
み合わせ応力の二乗平方根としたときは、2段重ねの  
とき1.03~1.34、7段重ねのとき0.70~1.04の範囲にあ  
る。組み合わせ応力の二乗平方根で評価したときの曲  
げ耐力( $SRSS M_{av}$ )は、単純和で評価したときの曲げ耐  
力( $SUM M_{av}$ )に比べて、引張成分の割合が支配的である段  
数の多いGBMよりも、段数が少ない、すなわち引張成  
分の割合が小さいGBMでかなり高い値となっており、  
曲げ応力度のみで評価した曲げ耐力( $M_{aMM}$ )を大きく上回  
るものもある。やはり、組み合わせ応力による曲げ耐力  
の評価にあたっては実験結果を踏まえた検討を行う必要  
があると考えられる。

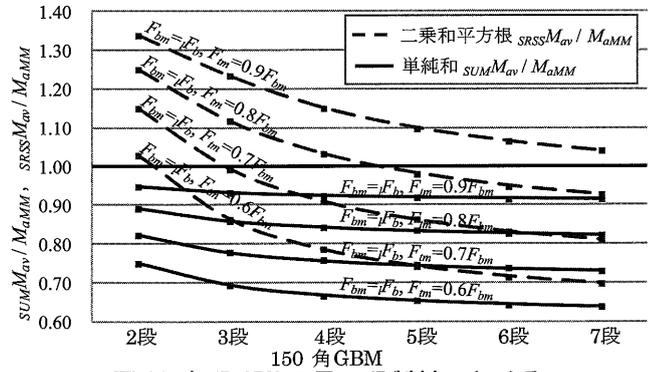


図11 各段 GBM の最下段製材における  
組み合わせ応力と強度の関係

#### 4.4 成熟材と未成熟材を考慮したときの曲げ耐力

本節では図4で示した詳細モデルを用いて各製材の成  
熟材と未成熟材を考慮したときの GBM の曲げ耐力につ  
いて検討する。なお、成熟材と未成熟材の影響を簡便に  
評価するために垂直応力度を組み合わせ応力とした検討  
は行わない。図12に製材の構造モデルを示す。平均年輪  
間隔は高橋<sup>14)</sup>の調査報告を参考に5mmとし、10年輪目  
までを未成熟材とみなす。製材全体の曲げ弾性係数  $E_{ij}$   
と断面二次モーメント  $I_{ij}$  の積  $E_{ij}I_{ij}$  と、成熟材と未成熟材の  
曲げ弾性係数  $M E_{ij}$ 、 $J E_{ij}$  と断面二次モーメント  $M_{ij}$ 、 $J_{ij}$   
のそれぞれの積の和が等しいと仮定する ((28)式)。

$$E_{ij} \cdot I_{ij} = M E_{ij} \cdot M_{ij} + J E_{ij} \cdot J_{ij} \quad (28)$$

製材は JAS 機械等級区分 E70 の 150 角製材とし、各製

材全体の曲げ弾性係数は E70 中間値の  $E_{ij} = 6850 \text{ N/mm}^2$  とする。製材構成は無垢材と 2 段・5 段重ね GBM について検討する。現時点では成熟材と未成熟材のそれぞれの曲げ弾性係数を確定できないため、未成熟材の曲げ弾性係数  ${}_jE_{ij}$  が  $0.9E_{ij}$ ,  $0.8E_{ij}$ ,  $0.7E_{ij}$  を用いて検討を行う。成熟材と未成熟材の強度は図 5 で示した曲げ強度と曲げ弾性係数の関係を用いて定める。

成熟材の曲げ応力度  ${}_M\sigma_{bei}$  と曲げ強度  ${}_MF_{bi}$  の関係である(29)式を(16)式に代入して曲げモーメント  $M$  について求めると、 $i$  段の製材における成熟材縁の  ${}_MF_{bi}$  に達する曲げモーメント  ${}_MM_{ai}$  は(30)式で、未成熟材の曲げ応力度  ${}_j\sigma_{bei}$  と曲げ強度  ${}_jF_{bi}$  の関係である(31)式を(17)式に代入して  $M$  について求めると、 $i$  段の製材における未成熟材縁の  ${}_jF_{bi}$  に達する曲げモーメント  ${}_jM_{ai}$  は(32)式で表現でき、 ${}_MM_{ai}$  と  ${}_jM_{ai}$  の最小値を GBM の曲げ耐力  ${}_MM_a$  とする。

$${}_M\sigma_{bei} / {}_MF_{bi} = 1 \quad (29)$$

$${}_M M_{ai} = \frac{{}_M F_{bi} (EI)'_e}{{}_M E_i (y_i - \lambda + {}_M h_i / 2)} \quad (30)$$

$${}_j\sigma_{bei} / {}_jF_{bi} = 1 \quad (31)$$

$${}_j M_{ai} = \frac{{}_j F_{bi} (EI)'_e}{{}_j E_i (y_i - \lambda + {}_j h_i / 2)} \quad (32)$$

図 13 に例として無垢材と GBM15x2 および GBM15x5 について  ${}_jE_{ij} = 0.7E_{ij}$  としたときの曲げ応力度図を示す。無垢材又は GBM の曲げ耐力は曲げ引張縁又は曲げ圧縮縁の成熟材部で決定しており、検討の範囲では未成熟材部で曲げ耐力で決まることは無い。図 14 に成熟材と未成熟材を考慮したときの無垢材と 150 角 2 段から 5 段重ね GBM の曲げ耐力  ${}_MM_{av}$  について、曲げ弾性係数を E70 の中間値のみ (MM) として未成熟材を考慮しないときの曲げ耐力  ${}_MAMM$  との比 ( ${}_MM_{av} / {}_MAMM$ ) を示す。未成熟材を考慮した時の GBM 曲げ耐力は、製材全体の曲げ弾性係数に対する未成熟材の曲げ弾性係数が小さいほど曲げ耐力が小さくなっている。また、曲げ耐力の割合は 0.99 ~ 0.89 倍の曲げ耐力の低下が見られ、いずれのケースも 1.0 を下回っている。これらの結果から、検討の範囲では未成熟材と成熟材の影響を考慮すると、5 段重ね程度の GBM に対する曲げ強度は、製材の曲げ基準強度よりも 10% 程度低減して用いる必要があると考えられる。

## 5. 結論

本論では国産製材の有効利用を目的として開発した建築用構造部材である GBM の曲げ性能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工学的な特徴を整理し、構造力学的な見地より断面解析を用いた検討に基づく GBM の曲げ性能に対する考察を行った。以下に得られた知見を示す。

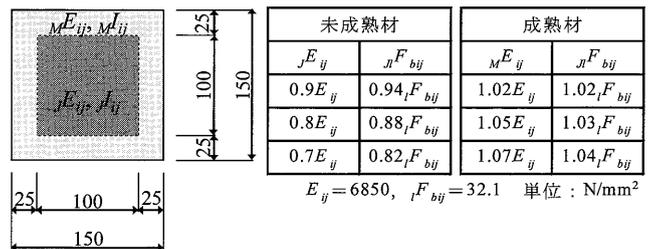


図 12 成熟材と未成熟材を考慮した製材モデル

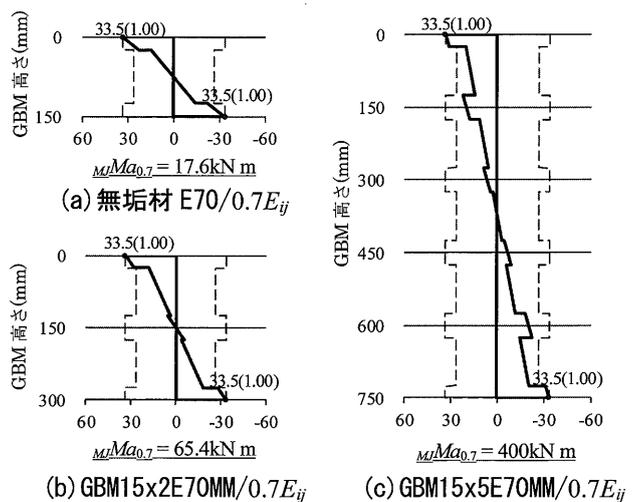


図 13 成熟材と未成熟材の影響を考慮したときの曲げ応力度図

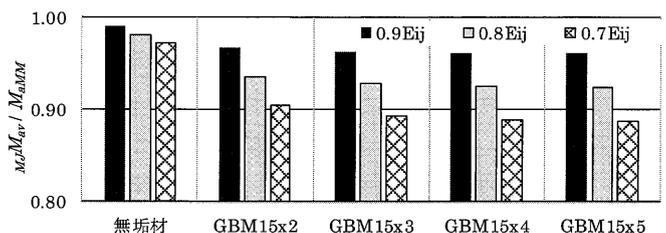


図 14 成熟材と未成熟材を考慮したときの曲げ耐力 ( ${}_MM_{av} / {}_MAMM$ )

- ① 同一等級構成 GBM の曲げ性能は、曲げ弾性係数の混在による中立軸の位置の移動や応力度分布の変化により、僅かではあるが曲げ耐力と曲げ剛性が低下する。GBM の曲げ性能を正確に把握したい場合などは、各製材の曲げ弾性係数の混在を考慮して曲げ圧縮縁と曲げ引張縁の両縁における応力度を評価することが必要である。
- ② 異等級対称構成 GBM の曲げ性能は、E70 から E110 の製材を用いるとき、全て E110 の製材とした GBM の 0.9 倍程度となり、大きく性能が低下することはない。異等級対称構成を使用することは同一等級構成とした場合に比べて少ないコストの増加で高い曲げ性能を確保できることから、有効である。
- ③ 垂直応力度を曲げ成分と軸方向成分の組み合わせ応力

としたとき、5段重ね以上の場合には軸方向成分が80%以上となり、段数が多いGBMの曲げ引張縁の製材では特に軸方向成分が支配的となる。組み合わせ応力の単純和または二乗和平方根で評価したときのGBMの曲げ耐力は、評価方法による差異と、段数、すなわち曲げ成分と引張成分の割合による差異があり、評価方法による差異は特に段数の少ないGBMで大きい。

④各製材の成熟材と未成熟材を考慮したとき、曲げ耐力は曲げ引張・圧縮縁の成熟材部で決定する。製材全体に比べて未成熟材の曲げ弾性係数が小さいほど、曲げ耐力が小さくなる。

本論では製材のグレーディングの閾値を主軸に検討を進めたが、木質材料の曲げ性能は、その性能分布に適合する確率分布モデルを基に評価される。これら統計的手法に因る場合は、試験体数が限られる実大試験のみでなく、本検討を発展させたシミュレーション結果も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。加えて、文献8)の実験結果を用いてGBMの特性が曲げ性能に及ぼす影響の検証を行う予定である。

#### 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) 鈴木秀三: 間伐小径木を利用した現場接着重ねばりの曲げ試験について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 1273-1274, 1985. 10
- 4) 井上正文: 小径木材を利用した重ねばりの剛性および強度について (その1) 2本重ねばりの場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 79-80, 1988. 10
- 5) 山本悦子, ほか2名: スギ間伐材を用いた接着重ね梁の曲げ性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp. 59-60, 1999. 9
- 6) 大仁香保里, ほか5名: 大断面接着重ね梁に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp. 23-24, 2006. 9
- 7) 山盛孝治, ほか3名: 大径間伐材を用いた重ね梁構法の性能評価に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp. 65-66, 2009. 8
- 8) 田上誠, 佐藤利昭, 田口紅音, 蛭川利彦: 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 (印刷中), 日本建築学会構造系論文集, 第754号, 2018. 12
- 9) 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

- 10) 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
- 11) 小松幸平: 任意断面構成集成材の最大モーメントの推定と実験結果による検証, 木材学会誌, Vol.43, No.11, pp.934~939, 1997. 11
- 12) 平嶋義彦, 山本幸雄, 鈴木滋彦: 集成材の強度計算および確率モデル, 木材学会誌, Vol.40, No.11, pp.1172~1179, 1994. 11
- 13) 瀧野教夫, ほか4名: 国産心持ち木材の引張強度特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第611号, pp.119-124, 2007. 1
- 14) 高橋宏明: スギ林の年輪成長 (I) スギ林の年輪成長の共通性, 日本林學會誌 52(6), pp. 173-177, 1972. 3

(受理: 平成30年10月29日)