

スギ心持ち製材を積層した接着重ね材の曲げ強度の評価方法に関する研究

田上, 誠

<https://hdl.handle.net/2324/5068152>

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

博士論文

スギ心持ち製材を積層した接着重ね材の曲げ強度の
評価方法に関する研究

令和4年5月

田上 誠

スギ心持ち製材を積層した接着重ね材の曲げ強度の 評価方法に関する研究

全 体 目 次

- 1 章 序 論
- 2 章 スギ製材を 2～5 段積層した実大 GBM 試験体の曲げ実験
- 3 章 GBM を構成する製材断面に生じる垂直応力の分布が GBM の曲げ強度に及ぼす影響
- 4 章 GBM の断面モデルと製材の強度
- 5 章 GBM を構成する各製材の曲げヤング係数の差異が GBM の曲げ性能に及ぼす影響
- 6 章 各製材内の成熟材と未成熟材の力学的な性質の差異を考慮した評価
- 7 章 体積に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響
- 8 章 GBM の曲げ強度と曲げ剛性の構造設計手法
- 9 章 結 論

主題：スギ心持ち製材を積層した接着重ね材の曲げ強度の評価方法 に関する研究

目次 ※参考文献は各章末尾に示す。

ページ

1章 序論

- 1.1 研究の背景と目的 P. 1- 1
- 1.2 GBM が有する力学的な性質を明らかにするための課題 P. 1- 2
- 1.3 本論の構成 P. 1- 5

2章 スギ製材を2～5段積層した実大GBM試験体の曲げ実験

- 2.1 はじめに P. 2- 1
- 2.2 実験方法
 - 2.2.1 試験体 P. 2- 2
 - 2.2.2 接着剤の物理的性質と調合 P. 2- 10
 - 2.2.3 試験体の製作 P. 2- 11
 - 2.2.4 実験装置 P. 2- 12
 - 2.2.5 せん断変形が中央たわみに及ぼす影響 P. 2- 13
- 2.3 実験結果 P. 2- 14
- 2.4 GBMを一様な弾性体とみなした実験結果の評価
 - 2.4.1 構成材(製材)の曲げ強度に曲げ基準強度を用いた場合 P. 2- 29
 - 2.4.2 構成材(製材)の曲げ強度に線形補間曲げ基準強度を用いた場合 P. 2- 32
- 2.5 まとめ P. 2- 34

3章 GBMを構成する製材断面に生じる垂直応力の分布がGBMの曲げ強度に 及ぼす影響

- 3.1 はじめに P. 3- 1
- 3.2 既往研究 P. 3- 2
- 3.3 GBM断面内のひずみと垂直応力の分布 P. 3- 4
- 3.4 垂直応力の引張成分と曲げ成分の割合 P. 3- 5

3.5	単純和または二乗和平方根の組み合わせ応力とするときのGBMの曲げ強度	P. 3- 7
3.6	断面に生じる垂直応力の分布に関する寸法効果がGBMの曲げ強度に及ぼす影響	P. 3- 10
3.7	まとめ	P. 3- 14
4章 GBMの断面モデルと製材の強度		
4.1	はじめに	P. 4- 1
4.2	一様断面モデル	P. 4- 1
4.3	等価断面モデル	P. 4- 2
4.4	要素断面モデル	
4.4.1	製材の断面モデル	P. 4- 3
4.4.2	GBMの断面モデル	P. 4- 4
4.5	GBM構成材（製材）の引張強度と曲げ強度	
4.5.1	スギ製材の引張基準強度と曲げ基準強度	P. 4- 5
4.5.2	スギ製材の線形補間引張強度と線形補間曲げ強度	P. 4- 7
4.5.3	スギ製材の実験引張強度と実験圧縮強度および実験曲げ強度	P. 4- 8
4.5.4	成熟材要素と髄位置の未成熟材要素のヤング率と引張強度または圧縮強度	P. 4- 10
4.6	まとめ	P. 4- 13
5章 GBMを構成する各製材の曲げヤング係数の差異がGBMの曲げ性能に及ぼす影響		
5.1	はじめに	P. 5- 1
5.2	同一等級構成のGBMの曲げ強度と曲げ剛性	P. 5- 1
5.3	異等級構成のGBMの曲げ強度と曲げ剛性	P. 5- 7
5.4	各製材の曲げヤング係数の差異を考慮した実験結果の評価	P. 5- 10
5.5	まとめ	P. 5- 15

6章	各製材内の成熟材と未成熟材の力学的な性質の差異を考慮した評価	
6.1	はじめに	P. 6- 1
6.2	既往の成熟材と未成熟材に関する研究	P. 6- 2
6.3	成熟材と未成熟材の範囲およびヤング率と引張強度または圧縮強度 の想定	P. 6- 3
6.4	髄から年輪方向の距離に対するヤング率と引張強度または圧縮強度 のモデル化	P. 6- 4
6.5	GBMの要素断面モデル	P. 6- 5
6.6	部材の曲げ強度に成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度が及 ぼす影響	
6.6.1	製材の曲げ強度	P. 6- 7
6.6.2	GBMの曲げ強度	P. 6- 10
6.6.3	髄の偏心が製材とGBMの曲げ強度に及ぼす影響	P. 6- 13
6.7	成熟材と未成熟材を考慮した実験結果の評価	P. 6- 17
6.8	まとめ	P. 6- 20
7章	体積に関する寸法効果がGBMの曲げ強度に及ぼす影響	
7.1	はじめに	P. 7- 1
7.2	既往研究	
7.2.1	寸法効果に関する研究	P. 7- 1
7.2.2	製材の引張強度と曲げ強度	P. 7- 6
7.3	GBMの曲げ強度に対する寸法効果の検討	
7.3.1	検討手法	P. 7- 7
7.3.2	断面解析結果を用いた検討	P. 7- 9
7.4	実大GBM試験体の曲げ実験結果を用いた試算	
7.4.1	検討に用いる製材の曲げヤング係数および引張強度と曲げ強度	P. 7- 12
7.4.2	寸法効果を考慮した実験結果の評価	P. 7- 12
7.5	まとめ	P. 7- 15

8 章	GBM の曲げ強度と曲げ剛性の構造設計手法	
8.1	はじめに	P. 8- 1
8.2	GBM が有する力学的な性質と適用範囲を踏まえた GBM の設計方針	P. 8- 1
8.2.1	架構形式と対象部位および GBM 内の製材の構成	P. 8- 1
8.2.2	部材の長さに関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響	P. 8- 4
8.2.3	部材の幅に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響	P. 8- 5
8.3	GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する評価精度の改善に向けた課題	
8.3.1	縦振動法による曲げヤング係数の計測	P. 8- 7
8.3.2	製材の曲げ強度と引張強度の差異と体積に関する寸法効果	P. 8- 8
8.3.3	成熟材と未成熟材の繊維方向の引張強度または圧縮強度とヤング 係	P. 8- 9
8.4	GBM の適切な構造設計手法を整備するための課題	
8.4.1	部材の構造設計	P. 8- 9
8.5	GBM の設計曲げ耐力と設計曲げ剛性	
8.5.1	GBM の設計曲げ耐力	P. 8- 14
8.5.2	GBM の設計曲げ剛性	P. 8- 15
8.5.3	実大 GBM 試験体の曲げ実験結果の評価	P. 8- 16
8.6	まとめ	P. 8- 18
9 章	結論	P. 9- 1
	謝辞	P. 9- 5

1 章 序 論

1章 序論

1.1 研究の背景と目的

国内の森林資源の蓄積量は、1966年に約 $1,900 \times 10^7 \text{ m}^3$ であったものが2017年には約 $5,200 \times 10^7 \text{ m}^3$ に増加している^{1.1)}。その中でも、樹齢50~60年の人工林の多くが主伐期を迎えており、木材の供給可能量が増えている。また、2010年には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」が制定された。

一方で、2013年の日本木造住宅産業協会の調査^{1.2)}によれば、木造住宅に用いる構造部材の国産材が占める割合は、柱で39%、横架材では僅か9%であり、輸入材が多く用いられているのが現状である。横架材に利用する製材は主に平角材であるが、断面が大きくなると調達が困難であり、高額となりやすい。また、製材の断面寸法が大きいと均一に乾燥することが難しいことから、安定した構造性能が得られ、材料費の安い集成材が選ばれる場合が多く、国産材に比べて輸入材が多く用いられている。

この傾向は木造住宅に比べて広い空間構成が求められることで長スパンとなり、大きな断面寸法が必要となる公共建築物では、より顕著に現れると推測される。したがって、他の木材に比べて需要量の少ない心持ち正角材は、潜在的な供給可能量が特に多い状況にあり、その有効利用が喫緊の課題となっている。これらの状況を踏まえて、心持ち正角材を積極的に活用するために開発された建築用木質構造材料として、接着重ね材（Glued Build-up Members：以下、GBM）がある。GBMは、心持ち正角材をその繊維方向を互いにほぼ平行にして重ね（積層）または束ねる木質構造材料である（図1.1）。

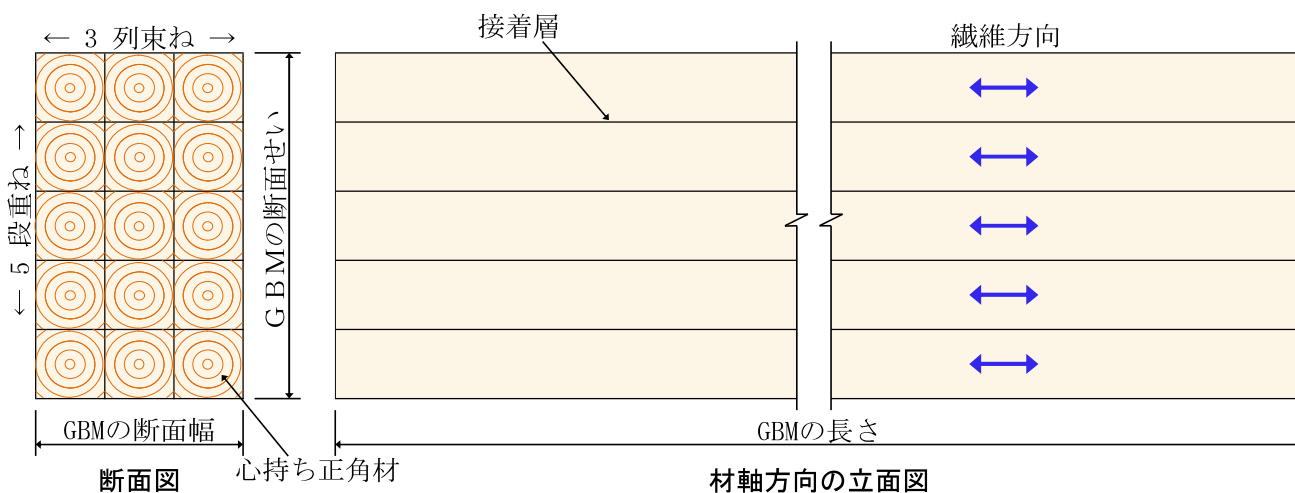


図 1.1 GBM の模式図（5段重ね，3列束ねの場合）

本論で取り扱う GBM のうち、スギ製材を積層した 1 列の GBM は、建築基準法第 37 条第二項の木質複合軸材料として国土交通大臣の大臣認定を取得しており（大臣認定番号：MWCM-0022, 0023, 0024, 0025）^{1,3)}、これまでに工場・保育園・店舗・事務所といった約 60 棟の建築物に対する柱や梁に採用した事例がある（写真 1.1）。また、2019 年 2 月には接着重ね材の日本農林規格（以下、JAS）が制定されている^{1,4)}。

しかし、GBM が有する力学的な性質に対する体系的な分析が十分に行われているとは言えず、建築基準法における接着重ね材の基準強度は未だ定められていない。そこで、本論では GBM の曲げ性能に着目し、GBM に対する構造設計手法の確立や接着重ね材の基準強度の制定に資する知見を得ることを目的として、実大 GBM の曲げ実験や GBM の力学モデルを用いた断面解析により GBM が有する力学的な性質の検討を行う。

1.2 GBM が有する力学的な性質を明らかにするための課題

図 1.2 に無垢材（心持ち平角材）と GBM および集成材の各部材断面の模式図を、表 1.1 に各材の曲げ強度に比較的大きな影響を及ぼすと考えられる特性を示す。JAS における大断面の部材（断面幅 150 mm 以上、かつ断面積 30000 mm² 以上）では、GBM は材軸方向に

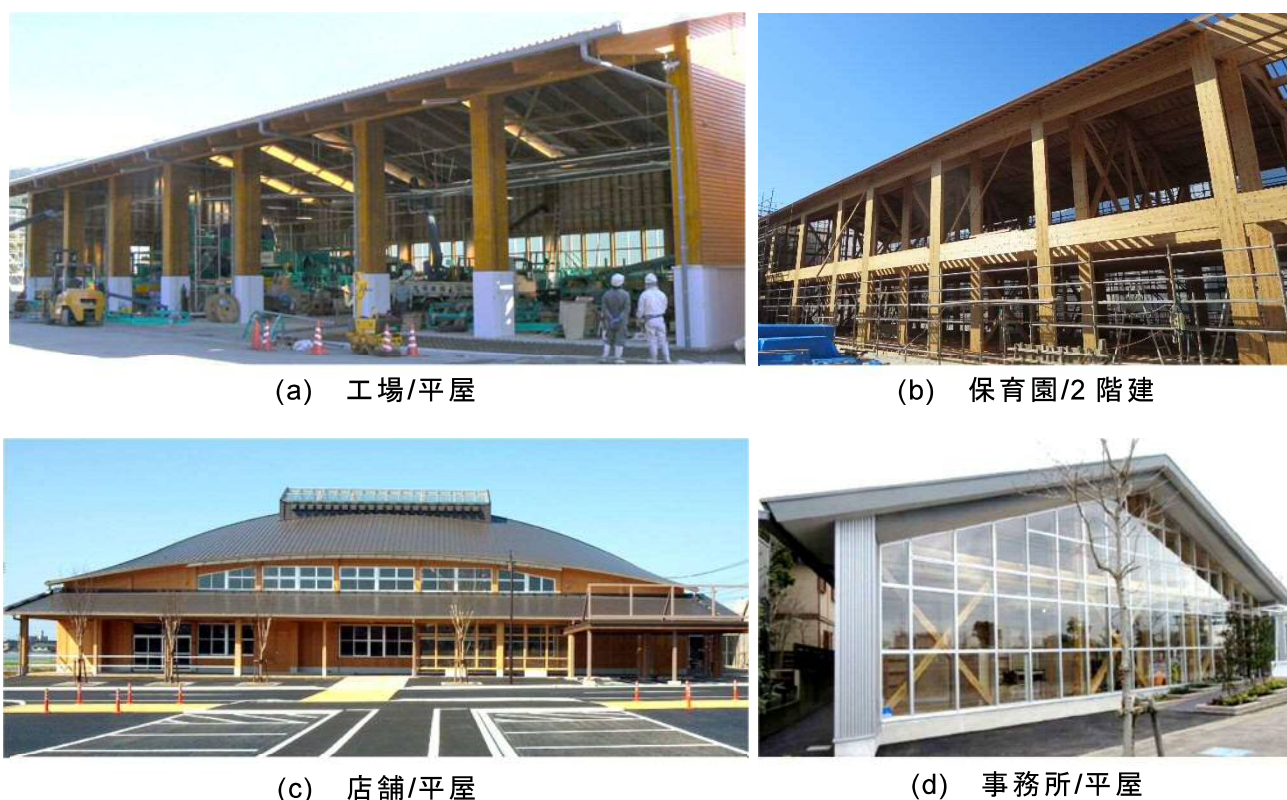
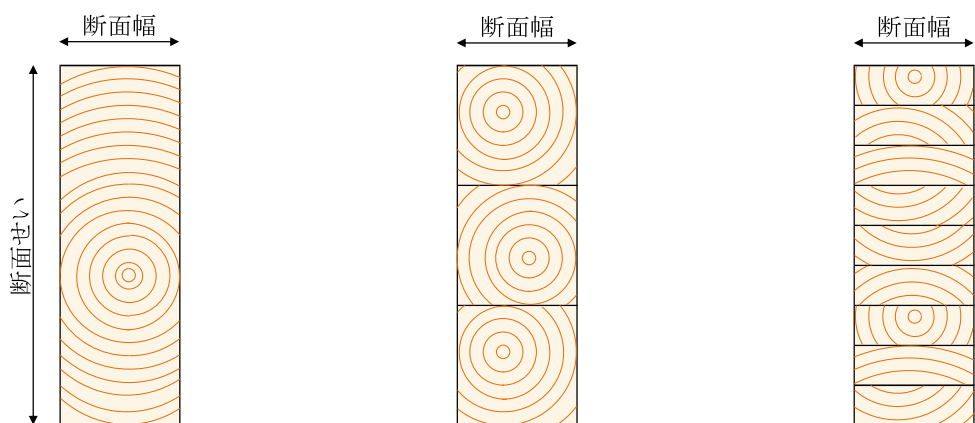


写真 1.1 柱や梁に GBM を採用した建築物の事例



(a) 無垢材（心持ち平角材） (b) GBM (c) 集成材

図 1.2 部材断面の模式図

表 1.1 各部材の曲げ強度に影響を及ぼすと考えられる性質

部材	構成	髓の位置	髓の数	積層数	構成材内の不均質性	構成材の断面寸法	構成材の長さ
無垢材 (心持ち平角材)	単一の製材	中央付近	△	—	●	●	▲
GBM	心持ち正角材 と接着剤	各製材 中央付近	●	▲	▲	▲	●
集成材	ラミナ と接着剤	髓は除外	—	●	△	△	継手を 設ける

・表中の記号「●」，「▲」，「△」，「—」は，想定される部材の曲げ強度に及ぼす影響の程度を示す。●は大，▲は中，△は小，—は無い。

わたって各断面の中央付近に髓を持つ 150×150 mm の正角材を積層する部材，集成材は断面幅 150～200 mm，厚さ 30～50 mm のラミナを積層する部材，無垢材（心持ち平角材）は 150×200～150×450 mm の単一材となる。

図 1.3 に無垢材と 3 段重ね GBM および 9 段重ね集成材の下側が引張の曲げモーメントを受けるときの構成材の断面に生じる垂直応力の分布を例として示す。当然のことながら，部材の断面せいが同じ GBM と集成材の段数（積層数）は，構成材の断面せいが大きい GBM の段数が集成材の段数よりも少なくなる。構成材を積層する GBM や集成材では，構成材の段数が多いほど，各構成材の断面にはより一様に近い垂直応力が生じることになる。また，一般に実大製材の引張強度または圧縮強度は，曲げ強度よりも小さいとされている^{1.5)}。そのため，構成材の段数に応じて各構成材の断面に生じる垂直応力の分布が，部材の曲げ強度に影響を与えることが考えられる。

GBM と集成材は，それぞれ製材もしくはラミナを積層する木質材料であり，設計におい

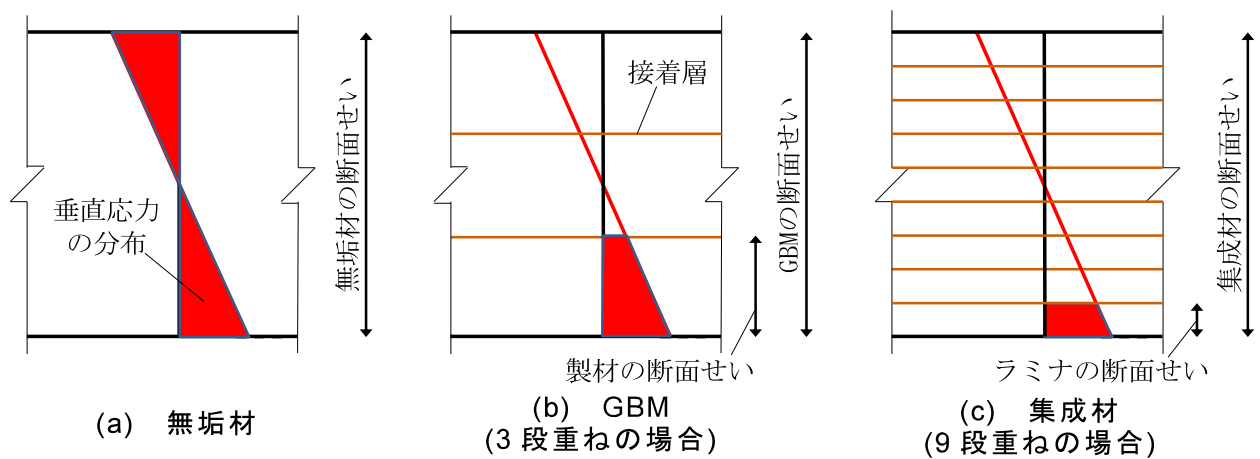


図 1.3 各部材の断面に生じる垂直応力の分布

て構成材の曲げヤング係数を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、異なる曲げヤング係数の構成材が混在することになる。GBMにおける製材の曲げヤング係数を同一等級構成とすると、GBMの構成材の曲げヤング係数の差異により、中立軸の位置や断面に生じる垂直応力の分布が変化するため、曲げヤング係数が全て下限値の製材とする場合のGBMの曲げ強度よりも下回ることや、曲げヤング係数が小さい製材位置でGBMの曲げ強度が決定する可能性もある。

一方、GBMも集成材と同様に、種々の強度・剛性を有する構成材を積層できる長所がある。例えば、曲げを受けるGBMにおいて最上段と最下段における製材の曲げヤング係数を断面中央部の製材のそれよりも大きい製材とし、その他を材料の調達が容易でかつ単価の安い製材とすることは、GBMの構造性能を確保しつつ、製造コストの低減につながると考えられる。一方で、各製材の曲げヤング係数を同一等級構成とする場合の曲げ性能に対して大きく性能が低下したり、GBMの断面中央部の強度・剛性の低い製材でGBMの曲げ強度が決定したりすることも考えられる。

各構成材内の力学的な性質に着目すると、木材は髄付近の部分とそれ以外の部分で力学的な性質に差異があることが、既往の製材に関する研究で指摘されており^{1.6)~1.9)}、髄付近の部分は未成熟材、それ以外の部分は成熟材と呼ばれている。構成材の寸法が大きいほど、構成材内の不均質さが部材の曲げ強度に及ぼす影響も大きくなると考えられるため、GBMの構成材内の成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異がGBMの曲げ強度に及ぼす影響は、集成材に比べて大きくなることが考えられる。

また、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。そのため、各構成材内の成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異がGBM

の曲げ強度に及ぼす影響が大きいと考えられる。なお、無垢材（心持ち平角材）は、髓が断面中央付近にあるのが一般的であるため、未成熟材の位置が中立軸の付近となり、部材の曲げ強度への影響は小さいと考えられる。

一般的に材料強度は試験体の体積の影響を受け、体積が大きいものほどその強度が小さくなる傾向が認められる。これを体積に関する寸法効果と呼ぶ^{1.10)}。GBMはロングスパンの横架材（大断面部材）として主に用いられるため、構造設計においてGBMの曲げ強度に影響を及ぼす体積に関する寸法効果についてどのように考慮することが適切かを明らかにすることは、GBMの設計手法の確立に欠かせない課題の一つである。

一般に、無垢材（心持ち平角材）は断面せいと断面幅および部材長さに相関性があり、部材の曲げ強度に対する寸法効果の影響は断面せいに関する寸法効果係数として評価している。GBMの曲げ強度について、曲げ圧縮縁又は曲げ引張縁の構成材に着目して、その応力状態と強度に基づいての評価する場合に、無垢材と同様の方法で体積に関する寸法効果を適切に考慮することができるかは検証する必要がある。

上記の通り、GBMは集成材や無垢材（心持ち正角材）とは異なる力学性状を呈する可能性が示唆される。一方で、木材を積層する木質構造材料という共通点から、部材の曲げ性能の評価にあたり集成材を対象とした既往研究は参考に成り得るが、集成材と同一の力学モデルがGBMに適用できるか否かは明らかではないため、検証する必要がある。なお、欠点等（節、内部割れ、目切れ等）も、GBMの曲げ強度に影響を与えられられるが、GBMの製造過程の品質管理により欠点等の影響を一定限度内に抑えられることを前提として、これらの影響を本論では検討しない。

1.3 本論の構成

図 1.3 に本論の構成を示す。

2章では実大GBM試験体の曲げ実験について述べる。本論では1.2節に示したGBMが有する力学的な性質を明らかにするための課題を踏まえ、まず、第一歩として構成材（製材）の寸法、段数および各製材の曲げヤング係数の差異がGBMの曲げ強度と曲げ剛性や破壊性状に及ぼす影響について調べることを目的として、120・150 mm角のスギ製材を2～5段積層した実大GBM試験体に対する曲げ実験を実施した。これまで、接着重ね梁の曲げ強度や接着重ね梁の曲げ剛性は、製材と同様に部材を一様な弾性体とみなして各研究の実験結果を評価している^{1.11)~1.15)}。しかし、この評価方法の妥当性は十分に検討されてい

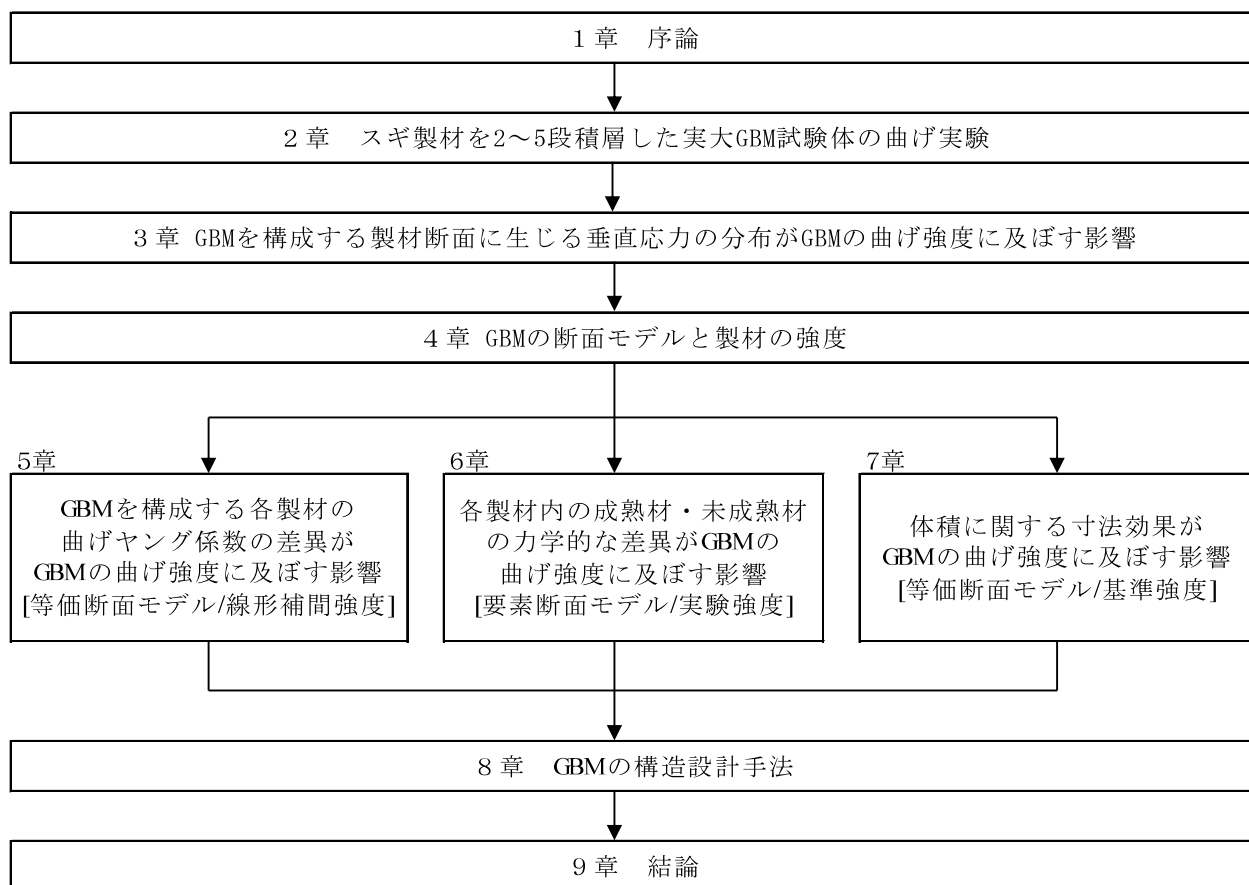


図 1.3 本論の構成

ない。また、小断面の製材を積層した接着重ね梁の試験体が多く、中断面の製材を多段積層した接着重ね梁の試験体を用いて体系的に実験を実施した研究は少ない。そこで、実験結果の荷重－中央たわみ関係を示し、それを踏まえて実験後の試験体の破壊の状況の分類を行い GBM の曲げ強度と破壊性状の相関を把握する。また、これまでの接着重ね梁の各研究と同様に GBM の断面内および材軸方向の曲げヤング係数を一様と見なしたときの GBM の曲げ強度について述べる。

3章では、GBM の製材断面に生じる垂直応力の分布が GBM の曲げ強度に及ぼす影響について考察するため、集成材と同一の力学モデルを用いた断面解析を行い、GBM の曲げ強度を求める。また、GBM の力学的な性質について考察するため、GBM と断面寸法が同一の集成材についても断面解析を行う。上記の検討に加えて、GBM の曲げ強度の評価に集成材と同一の力学モデルを用いる有用性を考察するため、集成材と同一の力学モデルを用いる方法の別法として、最弱リンク理論の基本的な式から製材の引張強度が曲げ強度よりも小さいことと、段数に応じて部材の断面に生じる垂直応力の分布が異なることを部材の引張縁の引張強度に対して導入する方法を用いて断面解析を行い、GBM の曲げ強度を求める。

なお、最弱リンク理論は体積が大きい木材ほどその強度が小さくなる傾向があること（体積に関する寸法効果）を、工学的に説明する方法としても用いられるが、体積に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響については 7 章で述べる。

5 章～7 章では構造力学的な見地から「GBM 内の製材間の曲げヤング係数の差異」と「製材内の成熟材と未成熟材の力学的な性質の差異」および「GBM を構成する製材の体積に関する寸法効果」に着目し、断面解析を用いて GBM が有する曲げ強度の定性的な特性について検討する。これは、天然有機材料である木材は、人工的に生産された材料よりも各個体内の性質が不均質であるとともに、各個体間の性質にも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はばらつきの影響が大きくなり、工学的な特性が明確に現れにくい可能性があり、実験的な研究のみで GBM が有する曲げ強度の定性的な特性を明確に分析することは難しいと考えられるためである。

4 章では本論の検討で断面解析に用いる 3 つの GBM の断面モデルと、GBM の構成材（製材）の引張強度および曲げ強度について述べる。断面モデルは、GBM の曲げヤング係数は各構成材（製材）の曲げヤング係数の平均値と等しいものとして GBM 断面内を一様な弾性体とみなし、GBM の曲げ強度の評価は最下段製材の曲げ強度を用いる「一様断面モデル」と、集成材と同一の力学モデルとして GBM を構成する各製材の断面内を一様な弾性体と見なし、各製材の曲げヤング係数の差異のみを考慮する「等価断面モデル」および GBM の構成材（製材）内の成熟材と未成熟材の力学的な性質の差異を考慮した「要素断面モデル」である。また、GBM の曲げ強度を考察する上で、構成材である製材の引張強度と曲げ強度がどのように設定されたものかが明らかになっている必要があることから、製材の引張基準強度と曲げ基準強度の設定に関する研究や、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整理する。

5 章では、同一等級内の曲げヤング係数の製材が部材内に混在するときや、製材の曲げヤング係数を異等級構成とするときに、それらが GBM の曲げ強度と曲げ剛性に及ぼす影響を調べるため、GBM を構成する各製材内の力学的性質を一様な弾性体と見なし、製材間の曲げヤング係数の差異のみを考慮する GBM の等価断面モデルを用いた断面解析を行う。

6 章では GBM を構成する各製材内の成熟材と未成熟材の力学的性質の差異に着目し、GBM の曲げ強度に及ぼす影響について検討する。成熟材と未成熟材の力学的な性質の差異点に言及した既往の研究は多いが、本論ではスギの丸太から採取した小試験片を対象としてそれぞれの力学的な性質を調べた先行研究の知見を整理する。そして、成熟材と未成熟

材の力学的な性質の差異が GBM の曲げ強度に及ぼす影響を検討するため、両材の断面内の範囲および繊維方向のヤング率と引張強度または圧縮強度を既往の研究を参考にしてモデル化し、その成熟材要素と未成熟材要素を組み合わせた要素断面モデルを用いた断面解析を行う。

まず、製材内の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異が製材の曲げ強度に及ぼす影響について検討するため、製材（単体）の要素断面モデルを用いて正角材と平角材の断面解析を行う。次に、成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異が GBM の曲げ強度に及ぼす影響を検討するため、GBM の要素断面モデルを用いて 120 mm・150 mm 角の製材を 2～5 段積層した GBM の断面解析を行う。加えて、髓の偏心が製材と GBM の曲げ強度に及ぼす影響について調べるため、GBM の最上段と最下段製材のみに髓の偏心があるものとして製材と GBM の要素断面モデルを用いて 150 mm 角の製材と 150 mm 角の製材を 2～5 段積層した GBM の断面解析を行う。

7 章では、体積に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響について検討する。まず、強度の評価に用いられている国内外の寸法効果に関する規定と既往の研究について整理する。次に、寸法効果に関する規定と既往研究の知見および GBM の工学的な性質を踏まえて、GBM の曲げ強度の評価において体積に関する寸法効果を考慮する方法について検討する。そして、体積に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす定性的な傾向を調べるため、寸法効果を考慮し GBM の等価断面モデルを用いた組み合わせ応力による断面解析を行う。

8 章では、5 章～7 章の検討を基にして GBM が有する力学的な性質を踏まえた GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する構造設計手法の考え方について考察する。また、実大 GBM 試験体を用いる曲げ実験における GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する評価精度の改善に向けた課題と、GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する適切な構造設計手法を整備するための課題についても述べる。

1 章 参考文献

- 1.1) 林野庁：森林資源の現況, 2017. 3
- 1.2) (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
- 1.3) 建築基準法第 37 条第二項, 国土交通大臣認定番号：MWCM-0022, 0023, 0024, 0025,

2015.4

- 1.4) 農林水産省：接着重ね材の日本農林規格, JAS0006
- 1.5) 中井孝：構造用製材の強度性能, JATAFF ジャーナル, 16(3), pp. 6-11, 1993.
- 1.6) 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
- 1.7) 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
- 1.8) 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
- 1.9) 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
- 1.10) 中村昇, 他：ティンバーメカニクス, 海青社, pp. 18-22, 2015. 10
- 1.11) 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 pp. 1273-1274, 1985 年 10 月
- 1.12) 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 pp. 79-80, 1988 年 10 月
- 1.13) 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 pp. 59-60, 1999 年 9 月
- 1.14) 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 pp. 23-24, 2006 年 9 月
- 1.15) 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 pp. 65-66, 2009 年 8 月

2章 スギ製材を2～5段積層した実大 GBM試験体の曲げ実験

2章 スギ製材を2～5段積層した実大GBM試験体の曲げ実験

2.1 はじめに

本論では構成材（製材）の寸法や段数の違いがGBMの曲げ強度と曲げ剛性や破壊性状に及ぼす影響について検討することを目的として、120・150mm角のスギ製材を2・3・4・5段積層した実大GBM試験体の曲げ実験を実施した。

これまで、60～90mm角の小断面製材を2～5段積層した接着重ね梁の試験体^{(例えば2.1)～(2.3)}や、120～150mm角の中断面製材を2・3段積層した接着重ね梁の試験体^{(例えば2.4), (2.5)}に対する曲げ実験が報告されている。これらの実験的研究では、一般的な製材と同様に接着重ね梁の断面内および材軸方向の曲げヤング係数を一様と見なして接着重ね梁の曲げ強度と曲げ剛性を求めている^{(2.3)～(2.5)}。しかし、この評価方法の妥当性は十分に検討されていない。また、小断面製材を積層した試験体が多く、中断面製材を多段積層した接着重ね梁を対象にして体系的に実験を実施した研究は少ない。

本章では実験で用いた実大GBM試験体と装置について述べるとともに、実験結果の荷重－中央たわみ関係を示し、それを踏まえて実験後の試験体の破壊の状況の分類を行い、GBMの破壊性状を整理する。また、構成材（製材）の寸法や段数の違いがGBMの曲げ強度と曲げ剛性や破壊性状に及ぼす影響について検討するため、製材と同様にGBMの断面内および材軸方向の曲げヤング係数を一様と見なして実験結果の評価を行う。

上記に加えて、本実験ではせん断スパンとロードスパンのGBMの断面せいに対する比率が標準の範囲^(2.6)より小さいものがあるため、実験で得られた荷重－変形関係を用いて曲げ剛性を評価するにあたり、中央たわみに及ぼすせん断変形の影響を検討する。

さらに、本実験のGBM試験体には上段に低い曲げヤング係数の製材が配置されているものもあり、曲げ圧縮縁で先行して繊維座屈を起こせば、曲げ強度に影響を及ぼすことも考えられるため、最上段と最下段製材の曲げヤング係数の相違が曲げ強度に及ぼす影響について検討する。

2.2 実験方法

2.2.1 試験体

試験体の全長 L は、実験可能な寸法から 9m 以下とし、構成材（製材）寸法と段数毎に定めている。せん断スパン a は、破壊形式が曲げ破壊となるように $4.5H$ 以上 (H : GBM 断面せい) とした。試験体数は、各構成材（製材）の段数で 5 体以上とした(表 2.1)。なお、GBM 試験体 GBM12x2 は 2010 年に、その他の GBM 試験体は 2014 年に実施した曲げ実験の試験体である。GBM 試験体の形状と寸法を図 2.1(a)~(g)に示す。

製材の含水率の計測は、製材の受け入れ時と GBM 製造前に、全乾法（JIS Z 2101）で校正した高周波式水分計を用いて材軸両端と中央の上・下・側面の 4 面(計 12 点)に対して行った。製材の含水率は、計測値の平均とする。製材のヤング係数は、GBM 製造前に縦振動法^{2.6)}により計測した。試験体における各段の製材の含水率を図 2.2(a)に、ヤング係数の計測値 E_{fr} を図 2.2(b)に、含水率とヤング係数の関係を図 2.2(c)に示す。図 2.2(c)に示すように、含水率とヤング係数には相関が見られない。よって、本論では GBM の曲げ強度や GBM の曲げ剛性の実験結果に対する含水率の補正を行わないこととする。

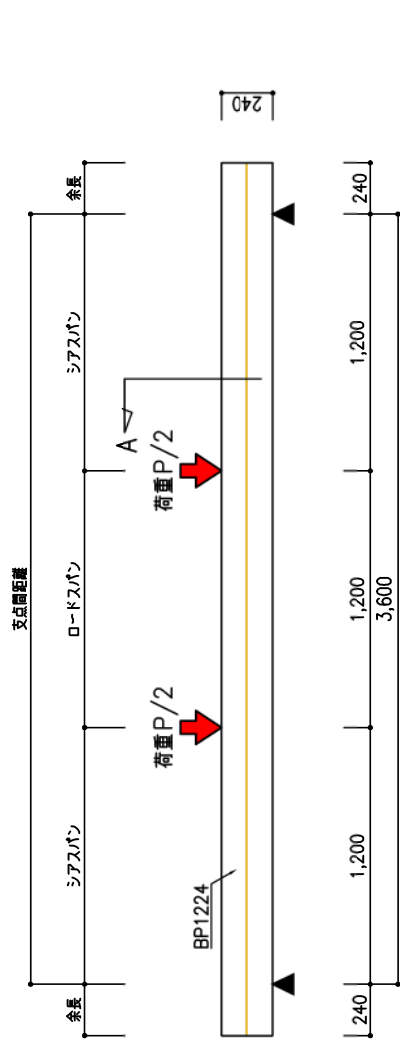
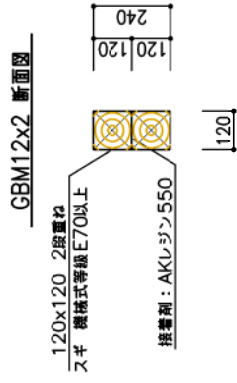
表 2.1 GBM 試験体

名称	製材の断面幅 b	段数 n_t	GBM の断面せい H	せん断スパン a	ロードスパン S	支点間距離 l	試験体数 n	振れ止め・めり込み補強
GBM12x2	120	2	240	$5.0H$	$5.0H$	$15.0H$	10	無
GBM12x3		3	360	$5.7H$	$4.2H$	$15.6H$	10	有
GBM12x5		5	600	$4.5H$	$3.3H$	$12.3H$	10	有
GBM15x2	150	2	300	$5.7H$	$5.7H$	$17.0H$	10	無
GBM15x3		3	450	$5.7H$	$5.4H$	$16.8H$	10	有
GBM15x4		4	600	$4.5H$	$3.3H$	$12.3H$	5	有
GBM15x5		5	750	$4.5H$	$2.5H$	$11.5H$	8	有

振れ止め・めり込み補強の詳細は図 2.1, 図 2.4 を参照

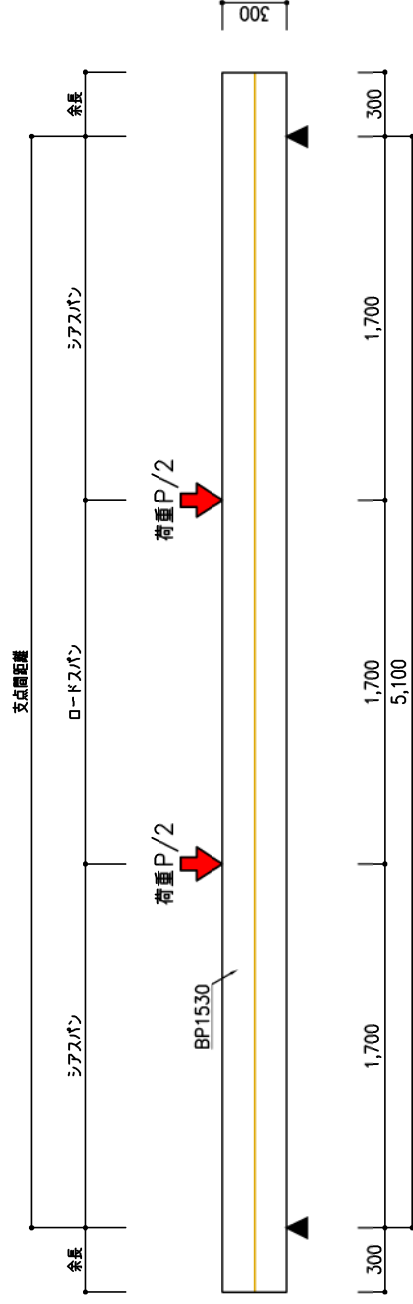
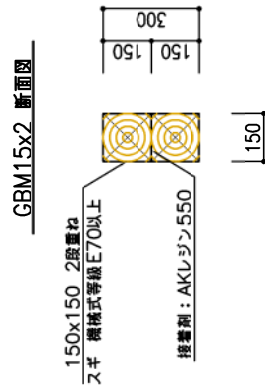
単位: b, H, a, S, l [mm]

試験体数：10体



(a) GBM12x2 試験体

試験体数：10体

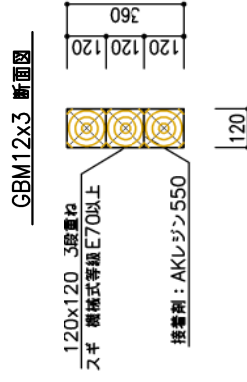
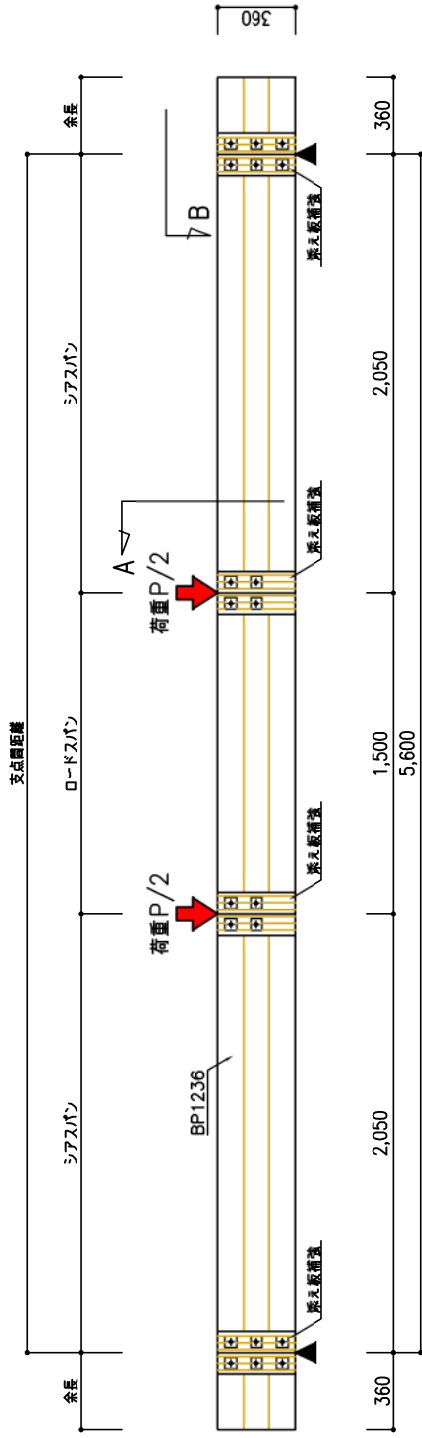


(b) GBM15x2 試験体

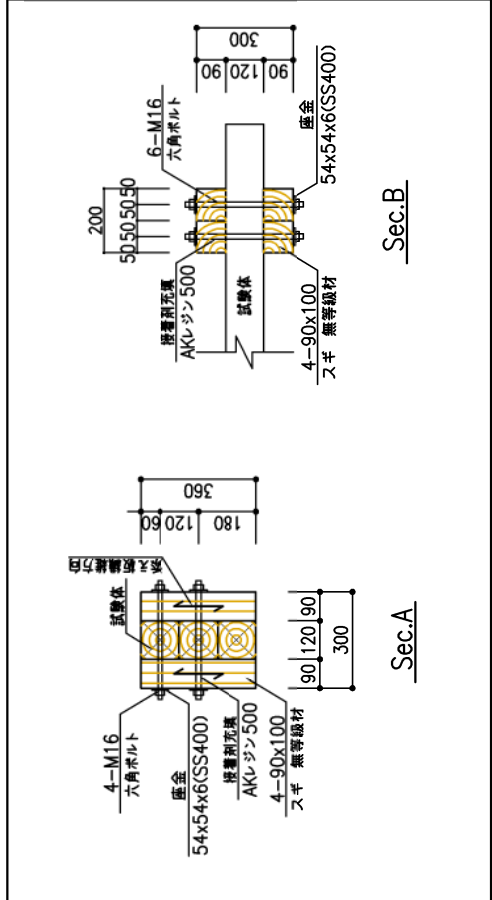
図 2.1 GBM 試験体の形状と寸法

寸法単位：mm

試験体数：10体



添え板補強 詳細図

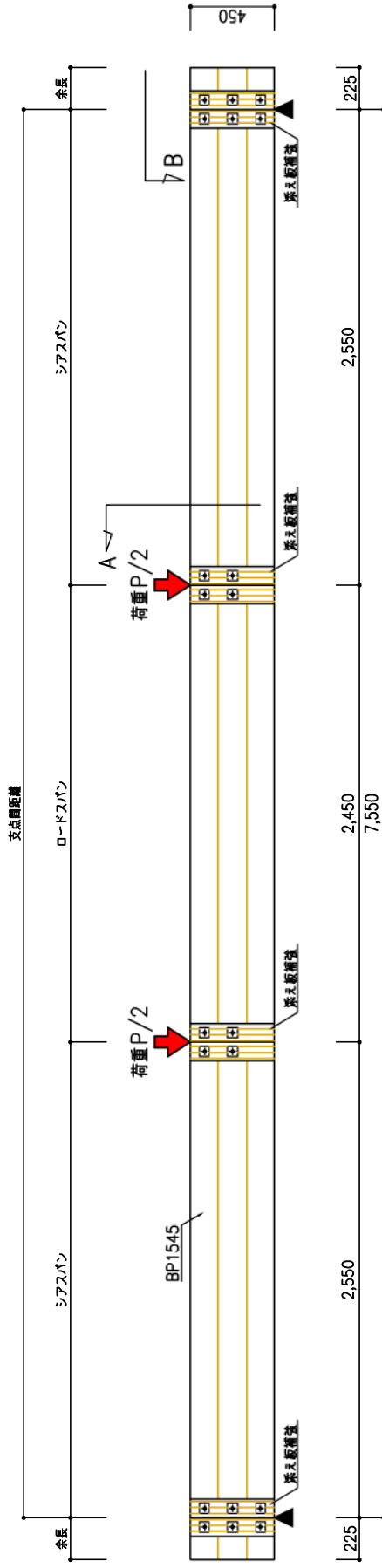


寸法単位：mm

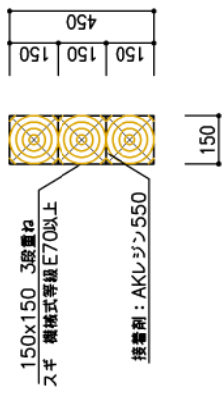
(c) GBM12x3 試験体

図 2.1 GBM 試験体の形状と寸法 (つづき)

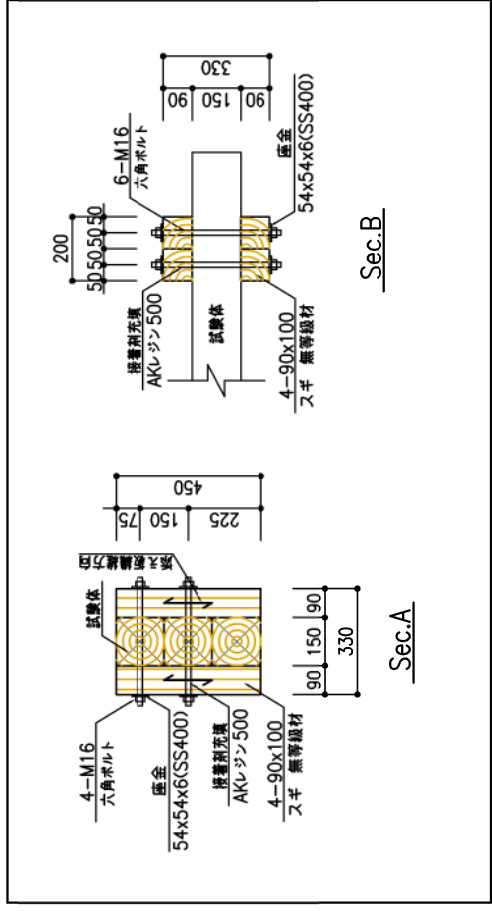
試験体数：10体



—GBM15x3 断面図—



添え板補強 詳細図

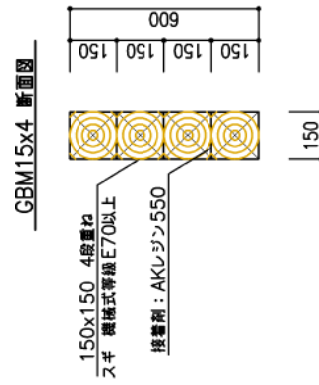
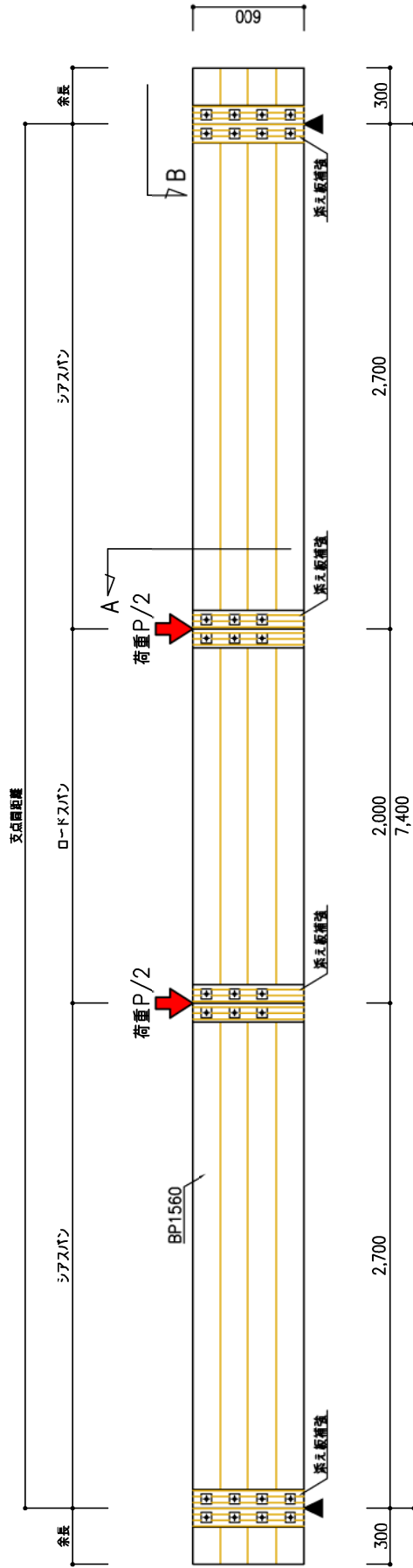


寸法単位：mm

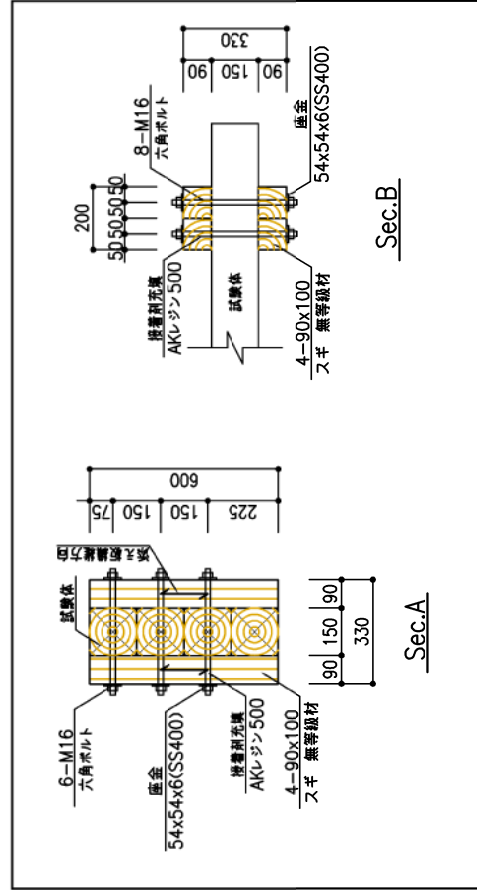
(e) GBM15x3 試験体

図 2.1 GBM 試験体の形状と寸法 (つづき)

試験体数：5体



添え板補強 詳細図

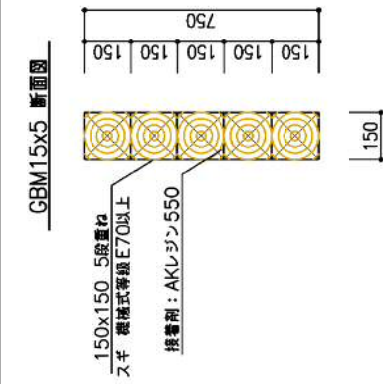
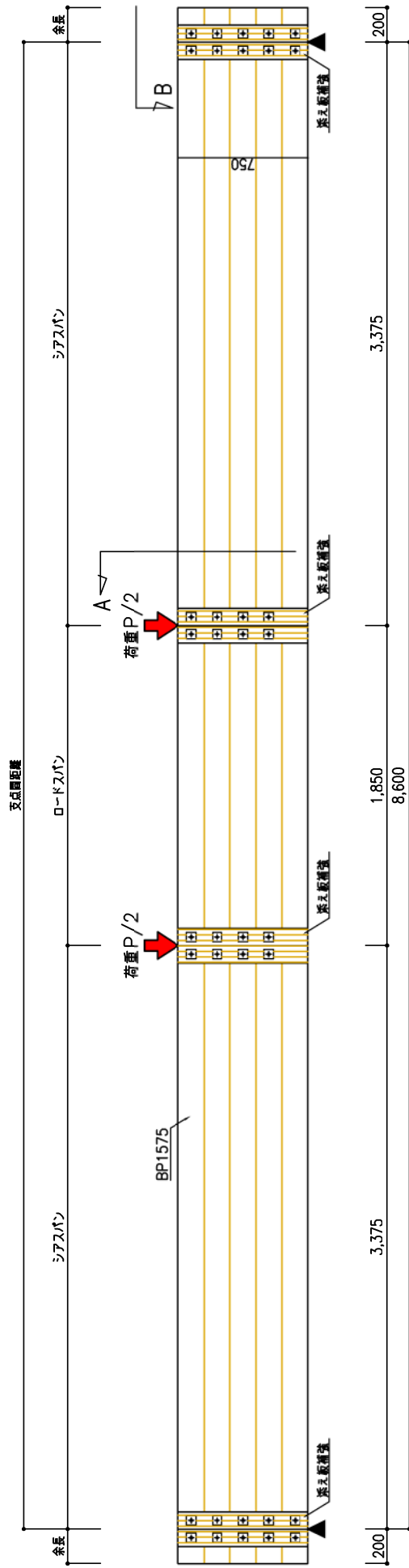


寸法単位：mm

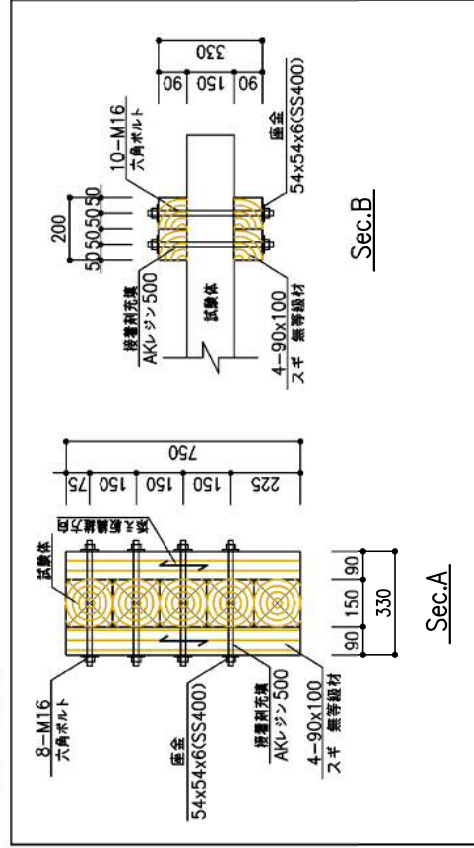
(f) GBM15x4 試験体

図 2.1 GBM 試験体の形状と寸法 (つづき)

試験体数：8体



添え板補強 詳細図

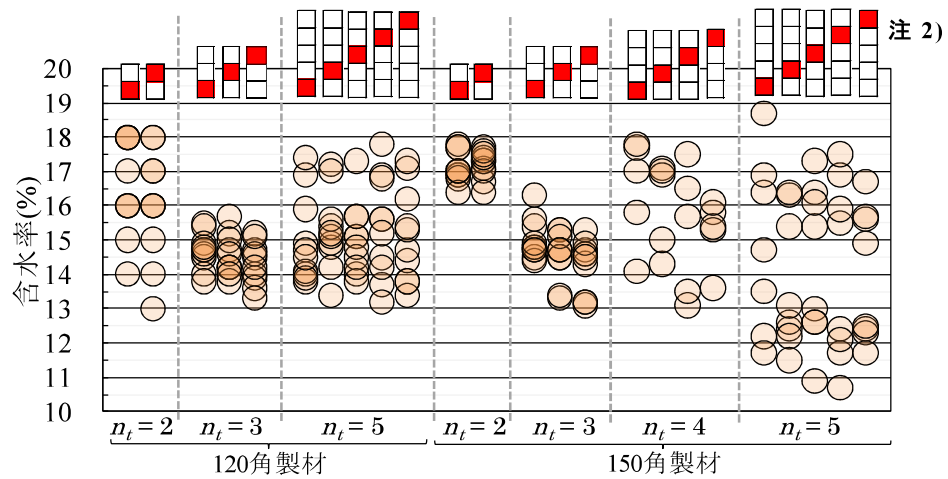


寸法単位：mm

(g) GBM15x5 試験体

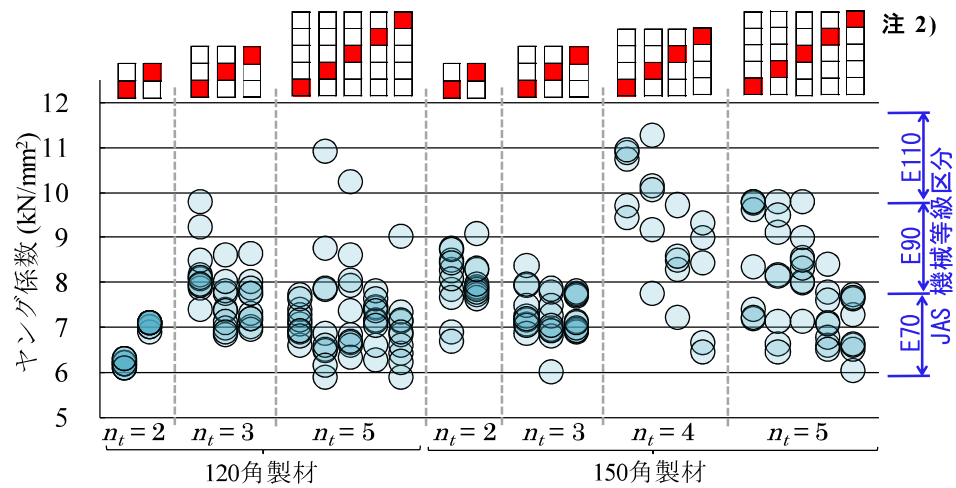
図 2.1 GBM 試験体の形状と寸法 (つづき)

- 注1) 各図は同値となる製材が多いほど(重なりが多いほど)濃い描画となる。
 注2) 図 2.2(a)と(b)の上部に示す図は、製材位置を示す。
 注3) 図 2.2(c)図中の白抜き(○印)は最下段製材を示す。

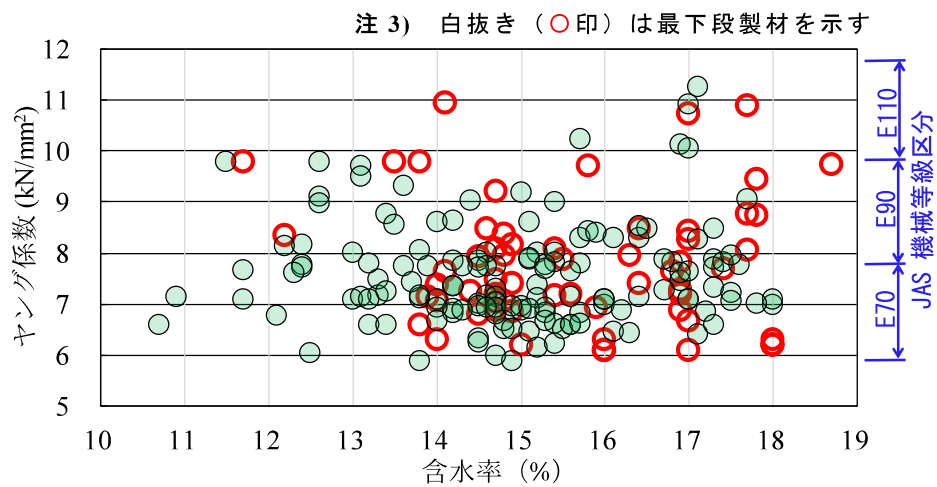


(a) 製材の含水率

(高周波式水分計で計測、材軸両端と中央の上・下・側面(計 12 点)に対する計測値の平均)



(b) 製材のヤング係数 E_{fr} (縦振動法で計測)



(c) 含水率とヤング係数の関係

図 2.2 製材の含水率とヤング係数

2.2.2 接着剤の物理的性質と調合

本実験の GBM 試験体の構成材（製材）の接着には、エポキシ樹脂系 2 液型接着剤を用いた。成分は主剤が変性エポキシ樹脂，硬化剤が変性脂肪族ポリアミンであり，質量比は主剤：硬化剤=100：45，体積比は主剤：硬化剤=2：1 である。接着剤の物理的性質を表 2.2 に示す。なお，硬化物の試験は室温 20℃で 7 日間の養生後に実施しており，圧縮せん断強度は被着材であるセメントモルタルの破壊により決定されている。

接着剤の調合は，主剤と硬化剤がセパレートされた樹脂カートリッジをエアガンに装着し，エアガンの先端に取り付けるスタティックミキサーの自動攪拌によって行う（図 2.3）。接着剤の保管は，乾燥した冷暗所で室温 5℃から 25℃の範囲で保管することとし，接着剤の使用期限は，樹脂カートリッジの製造後 1 年以内としている。

表 2.2 接着剤の物理的性質

試験項目		試験方法	標準値
未硬化物	比重	JIS K 6833	1.3±0.1
	形状	—	Paste
	可使時間	—	10 分/40℃
	堆積時間	—	30 分/40℃
硬化物	圧縮強度	JIS K 7208	75 N/mm ²
	引張せん断強度	JIS K 6850	15 N/mm ²
	圧縮せん断強度 (Dry)	JIS K 6852	8 N/mm ² 以上
	圧縮せん断強度 (Wet)	JIS K 6852	6 N/mm ² 以上

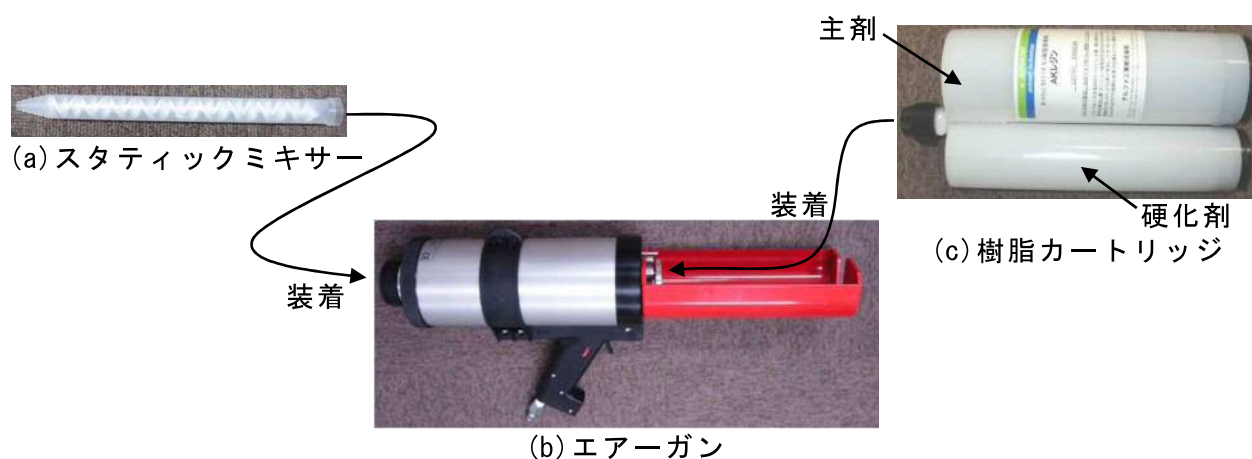


図 2.3 接着剤の調合と塗布に用いる機器

2.2.3 試験体の製作

試験体の製作は、本論で用いる GBM が大臣認定で定められている方法^{2.7)}に則り、構成材（製材）の選定、接着剤塗布、圧縮、養生、仕上げ加工の手順で行った（写真 2.1）。構成材（製材）には日本農林規格（以下、JAS）の機械等級区分製材 E70、E90、E110 に適合し、高温乾燥の後に表面仕上げを施した含水率が SD18%以下の熊本県産のスギ製材を用いた。まず、各構成材（製材）のヤング係数と含水率を測定する。加えて、GBM の上下面と製材同士の接着面が節径比 30%以下、集中節径比 50%以下となるように構成材（製材）を選定する（写真 2.1(b)）。次に、前項に示す接着剤を $350 \pm 50 \text{ g/m}^2$ となるようにエアージェンで接着面に塗布した後、接着面の全体を刷毛で均す（写真 2.1(c)）。次に、縦型多圧プレスを用いて 6.0 kgf/cm^2 の圧力で圧縮する（写真 2.1(d)）。圧縮と養生の時間は、GBM 製作時の気温が $10^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ であったことから圧縮時間を 16 時間、養生時間を 8 時間としている（写真 2.1(e)）。養生後に表面仕上げとして約 0.5 mm/面 のプレナー掛けを行い、GBM の幅・せいともに $-0.5 \sim +1.5 \text{ mm}$ 以下の寸法精度で仕上げている（写真 2.1(f)）。なお、各試験体の製作から実験までの期間は 3 週間程度である。

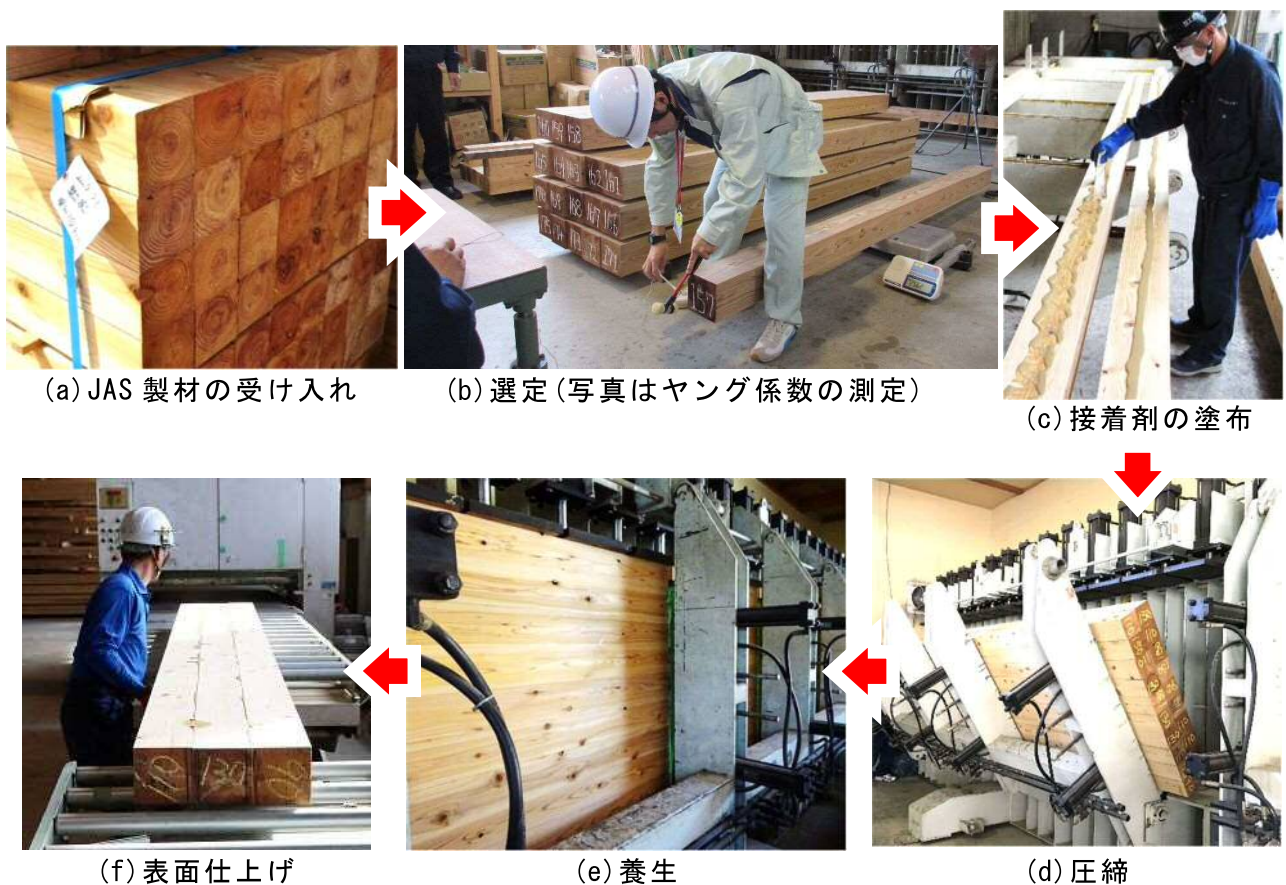


写真 2.1 GBM 試験体の製作の流れ

2.2.4 実験装置

図 2.4 に実験装置を示す。実験方法は二点载荷曲げとし、試験体の両端の支点は鋼板を介して丸鋼棒で支持した（図 2.4 左上）。载荷は万能試験機を用い、载荷速度 10 mm/min の単調载荷とした。荷重 P は、ロードセルの計測値と载荷治具の重量の和（载荷治具の重量の和は最大荷重の 1.5%~6.3%）とし、20%以上の荷重低下が生じた時点で载荷と計測を終了した。変位の計測は GBM 試験体の下端の支点間中央位置（DG1）と载荷位置（DG2, 3）、GBM 試験体の上端の支点位置（DG4, 5）で载荷方向に変位計を設置して行なった。GBM 試験体の中央たわみは両支点のめり込みの影響を取り除くため、中央の DG1 の計測値から支点位置の DG4, 5 の計測値の平均値を差し引いたものとする。構成材（製材）段数が 2 段の試験体の载荷位置と支点位置の載加板は、予想最大荷重時のめり込み応力度がスギ製材の短期許容めり込み応力度（3.2 N/mm²）以下となる寸法とした。3~5 段の試験体の载荷位置と支点位置は、めり込み防止と GBM 断面中央部でも载荷（支持）されることを目的として図 2.4 右下に示す補強を施している。この補強は、予想最大荷重を GBM へ

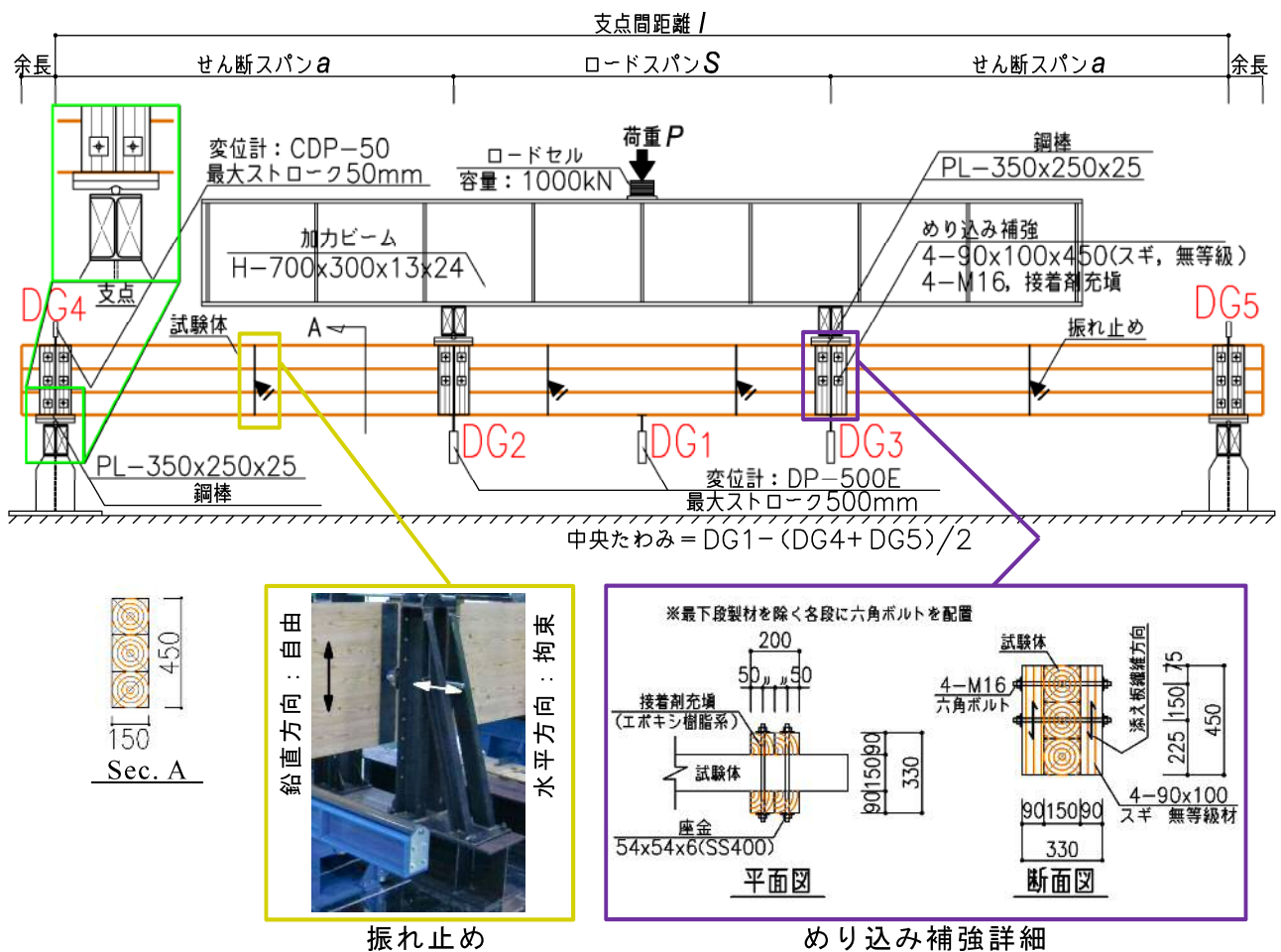


図 2.4 実験装置 (GBM15x3)

伝達可能な強度を有する製材と鋼製ボルトを使用し、ボルトは試験体の曲げ破壊に対する影響が小さくなるように最下段製材を除く位置に配置した。加えて、補強のガタを防止するために、ボルトと先孔の空隙にエポキシ樹脂の充填を行なった。また、3～5段の試験体は横座屈を防止するために横座屈細長比^{2.8)}が10以下となる位置に振れ止めを設置した(図2.4中下)。なお、各試験体は4.5～5.7Hの十分な長さのせん断スパンを確保しているため、鋼棒の摩擦抵抗等の支持状態が実験結果に及ぼす影響は小さいと判断している。

2.2.5 せん断変形が中央たわみに及ぼす影響

国内の曲げ強度試験の標準寸法は、支点間距離 $l=17.0H\sim 22.0H$ (H : GBMの断面せい)、せん断スパン $a=(6.0\pm 1.5)H$ 、ロードスパン $S=(6.0\pm 1.0)H$ の範囲とされている^{2.9)}。本実験では $l=12.3H\sim 17.0H$ 、 $a=4.5H\sim 5.7H$ 、 $S=2.5H\sim 5.7H$ と、ロードスパンのGBM断面せいに対する比率が標準の範囲より小さいものがある。そこで、実験で得られた荷重-変形関係を用いて曲げ性能を評価するにあたり、まず、中央たわみに及ぼすせん断変形の影響について以下に検討する。

断面が一様で接着層のズレが十分に小さいものとして平面保持を仮定し、せん断変形に関する形状係数 $\kappa_d=1.2$ としてはり理論を用いると、中央たわみ δ は曲げ成分による中央たわみ δ_b とせん断成分による中央たわみ δ_s の和として(2.1)式～(2.3)式で表される。

$$\delta = \delta_b + \delta_s \quad (2.1)$$

$$\delta_b = \frac{P \cdot a}{48E \cdot I} (3l^2 - 4a^2) \quad (2.2)$$

$$\delta_s = \frac{\kappa_d \cdot P \cdot a}{2G \cdot A} \quad (2.3)$$

ここで、 I : GBMの断面二次モーメント(= $BH^3/12$) (mm^4)、 A : GBMの断面積(= BH) (mm^2)、 B : GBMの断面幅($B=b$) (mm)、 H : GBMの断面せい (mm)、 E : GBMの曲げヤング係数 (N/mm^2)、 G : GBMのせん断弾性係数 (N/mm^2)、 P : 荷重 (N) である。

$E/G=15$ としたときの各試験体のせん断変形割合 δ_s/δ を図2.5に示す。また、参考として三等分載荷「 $a=S$ 」で E/G が10, 15, 20の場合と、ロードスパンが短い「 $a=2S$ 」で E/G が15の場合の a/H と δ_s/δ の関係曲線を併せて示す。

図2.5に示すように、 a/H や S/H が小さいほど、 E/G が大きいほどせん断変形の影響が大きくなることが分かる。また、同図から $E/G=15$ と仮定した場合の $a/H=S/H$ で標準寸

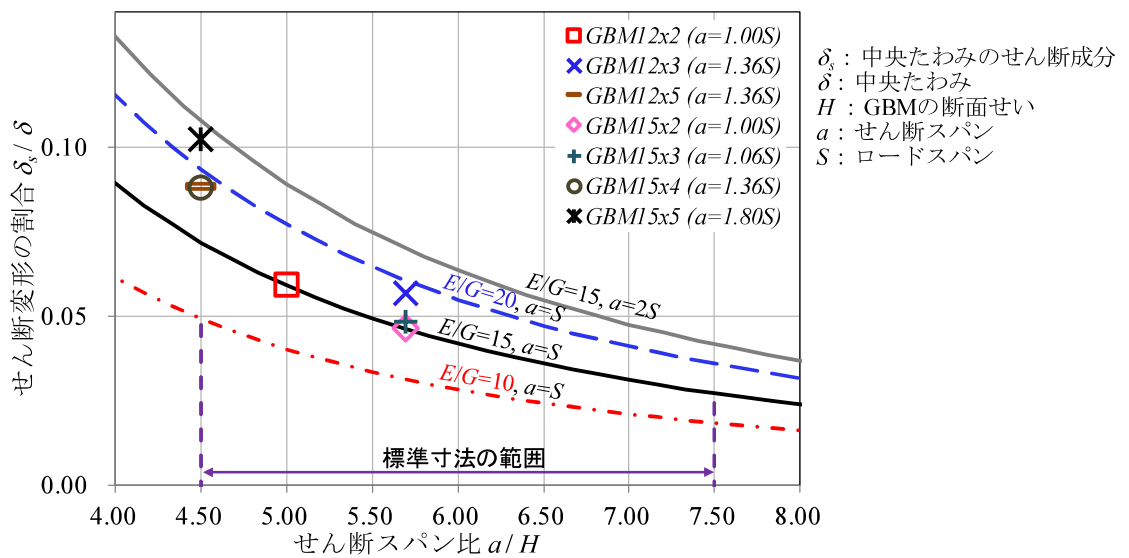


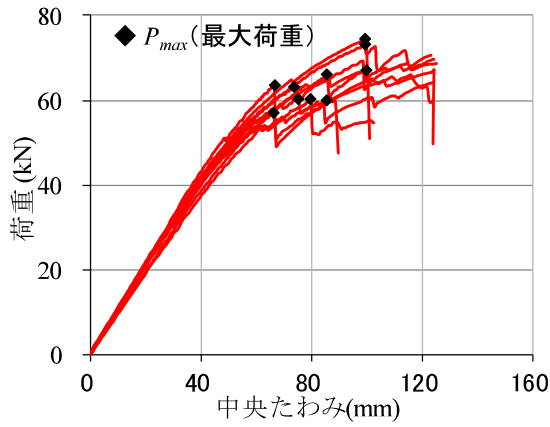
図 2.5 δ_s/δ と a/H の関係

法の範囲では δ_s/δ が 2.7%~7.2% であるのに対して、本実験の GBM 試験体の δ_s/δ は 4.6%~10.2% であり、特に 4 段重ねと 5 段重ねの GBM 試験体で大きい値となっている。よって、本実験ではせん断変形が中央たわみに与える影響は標準的な曲げ試験に比べて大きいものがあると判断し、以降の実験結果に対する GBM の曲げ剛性の評価では中央たわみから (2.3) 式のせん断変形成分を除くこととする。

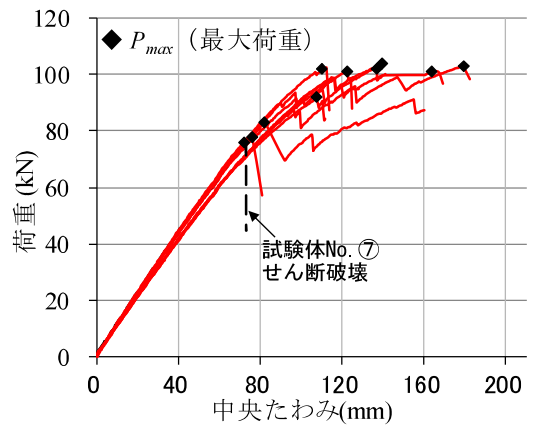
2.3 実験結果

図 2.6 に本実験の GBM 試験体の構成材（製材）寸法・段数毎の荷重と中央たわみの関係を示す。最大荷重実験値 P_{max} は、10%以上の荷重低下が最初に生じる直前に発揮した荷重とし、図 2.6 の図中に ◆印で示している。

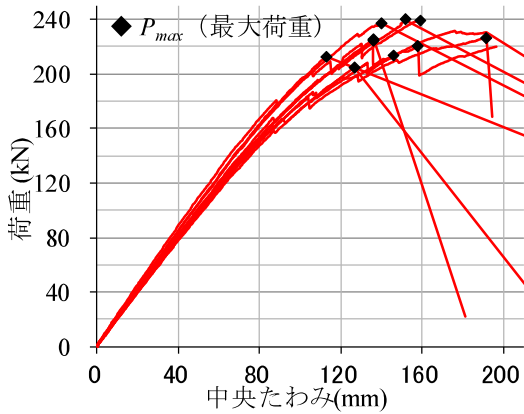
全ての GBM 試験体で接着層の破壊は生じておらず、全 63 試験体中 59 体が曲げ破壊となり、これらの GBM 試験体では最大荷重に達すると同時に GBM の最下段の製材に破壊が生じた。また、残りの 4 体の GBM 試験体はせん断破壊し、GBM 断面の中央付近に破壊が生じた。杉山は、無欠点材や実大材の曲げ材の一般的な破損タイプとして「単純引張」、「目切れ引張」、「そぎ割れ引張」、「脆性引張」の 4 つに大別しており、これらの破損タイプがほとんど同時に組み合わせられて破壊することもあると分析している^{2.10)}。ここで、杉山の研究を参考にした破壊の状況に加えて、荷重-中央たわみ関係を踏まえて 5 種類に分類して GBM の破壊性状を整理する（図 2.7）。GBM 試験体の破壊性状の分類 A, B1, B2 は、試験体の破壊の状況より曲げ引張側となる最下段の製材下端における単純引張と目切れ引張の組み合わせによる曲げ破壊と判断されるものである。分類 C は、下側製材のそぎ割れ引



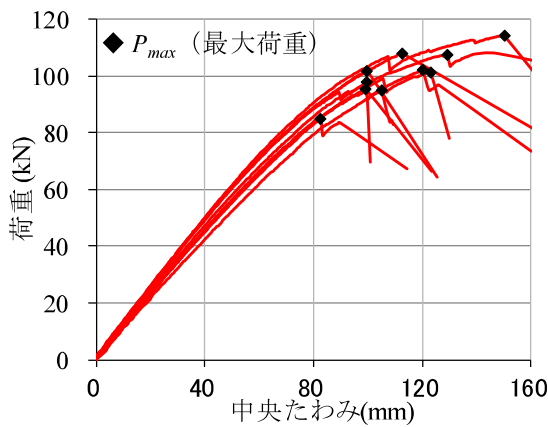
(a) GBM12x2 (120 角 2 段)



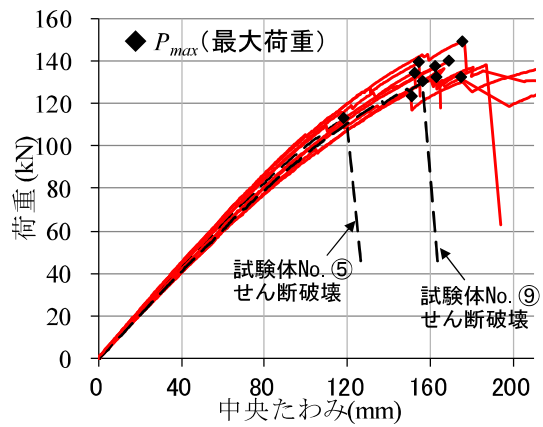
(b) GBM12x3 (120 角 3 段)



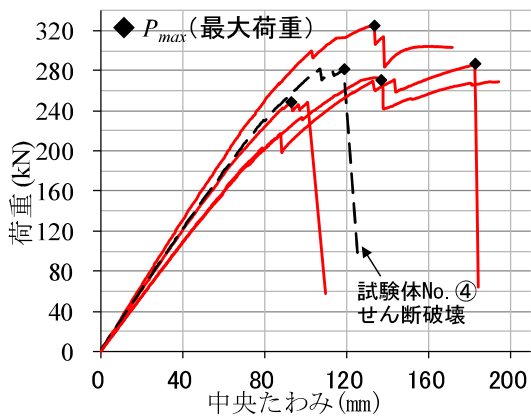
(c) GBM12x5 (120 角 5 段)



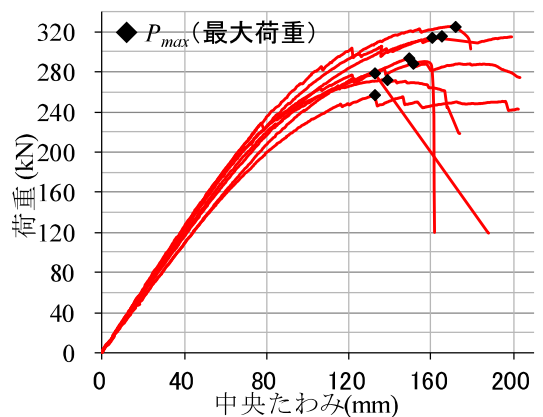
(d) GBM15x2 (150 角 2 段)



(e) GBM15x3 (150 角 3 段)



(f) GBM15x4 (150 角 4 段)



(g) GBM15x5 (150 角 5 段)

図 2.6 荷重－中央たわみ関係

図中の◆印は最大荷重実験値 P_{max} を表す。

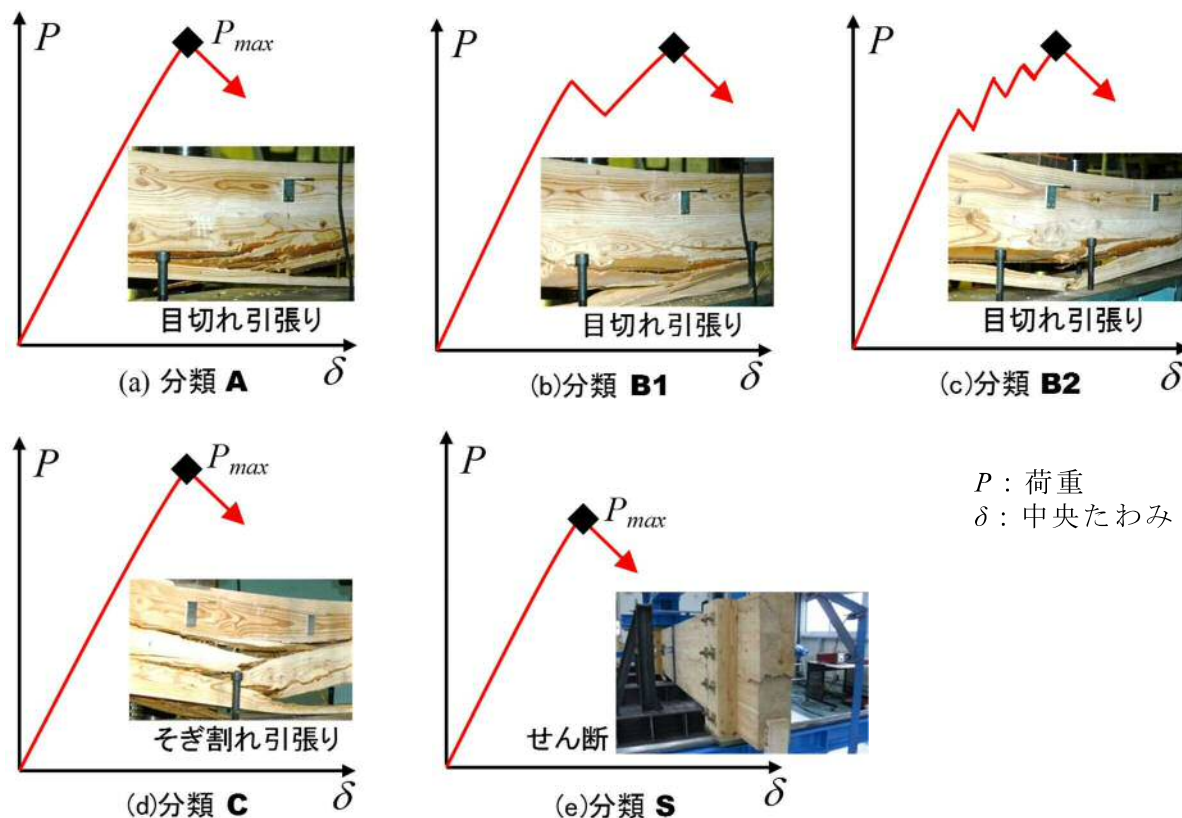


図 2.7 GBM 試験体の破壊性状の分類

張による曲げ破壊と判断されるものである。分類 S は、せん断破壊である。加えて、荷重－中央たわみ関係を踏まえて、分類 A は、ロードスパン内の材軸方向の中央部（以下、材軸中央）の最下段の製材下端において材軸（繊維）方向の割裂が大きく進展して急激に荷重が低下するもの、分類 B1 は、材軸中央部の最下段の製材下端において材軸方向の割裂が生じて一度荷重が低下するが再び荷重が増加し、その後大きく割裂が生じた時点で急激に荷重が低下するもの、分類 B2 は、材軸中央部の最下段の製材下端において材軸方向の割裂が徐々に進展しながら何度か荷重の増減を繰り返す、最後に大きく割裂けた時点で急激に荷重が低下するもの、分類 C は、材軸中央部の最下段の製材全体が材軸方向に大きく割裂けて急激に荷重が低下するものとする。分類 S は、GBM 試験体の全長において GBM の断面中央付近が材軸（繊維）方向に割裂して急激に荷重が低下するものとする。写真 2.2(a)～(p)に実験後の GBM 試験体の状況を、表 2.3 に各 GBM 試験体の破壊性状の分類を示す。本実験の GBM 試験体の構成材（製材）寸法・段数毎に生ずる破壊性状は、分類 A となる GBM 試験体が段数の少ない場合に、分類 B2 となる GBM 試験体が段数の多い場合に多い傾向が見られる。



GBM12x2 No. ①／破壊性状分類 A



GBM12x2 No. ②／破壊性状分類 A



GBM12x2 No. ③／破壊性状分類 B1



GBM12x2 No. ④／破壊性状分類 B1



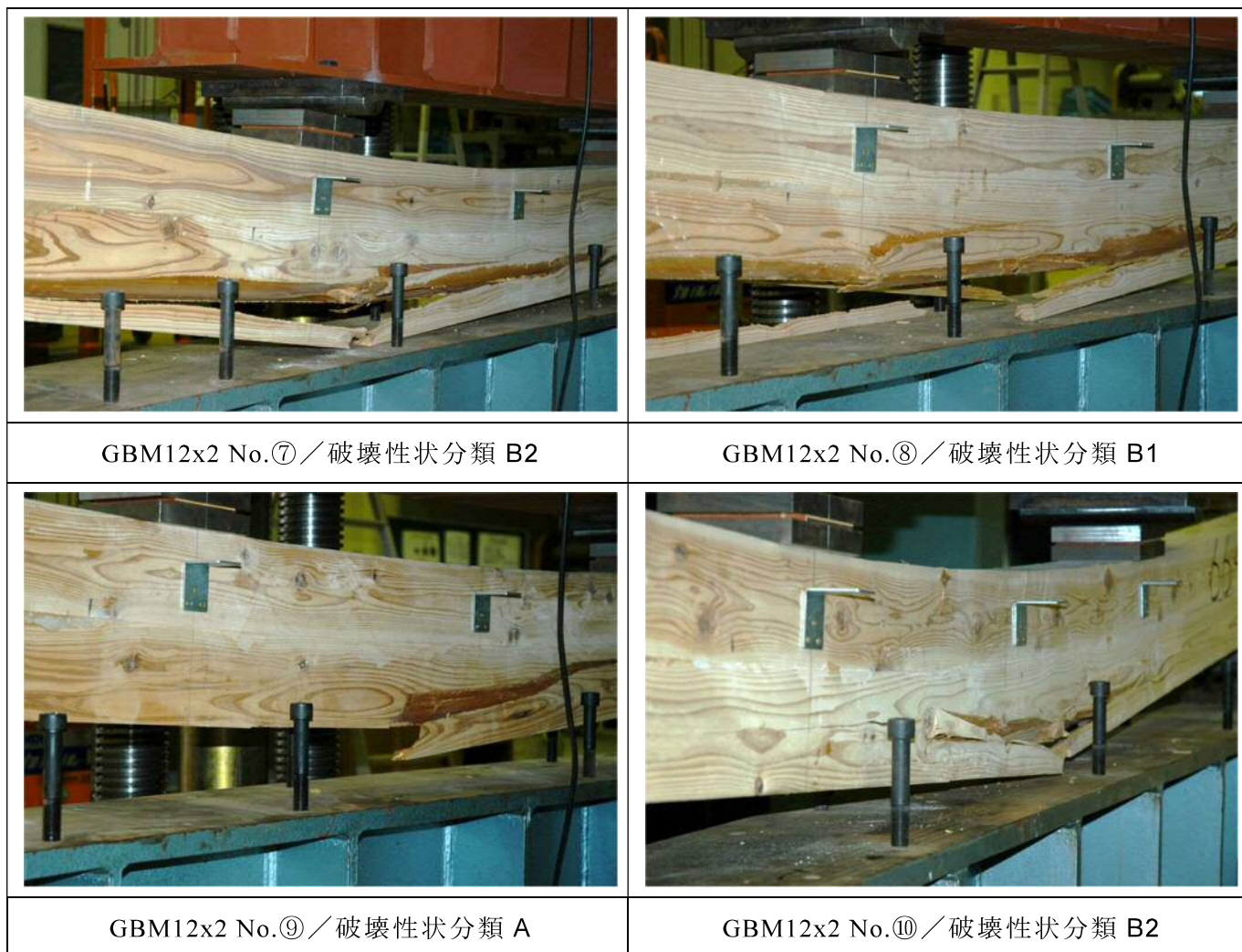
GBM12x2 No. ⑤／破壊性状分類 A



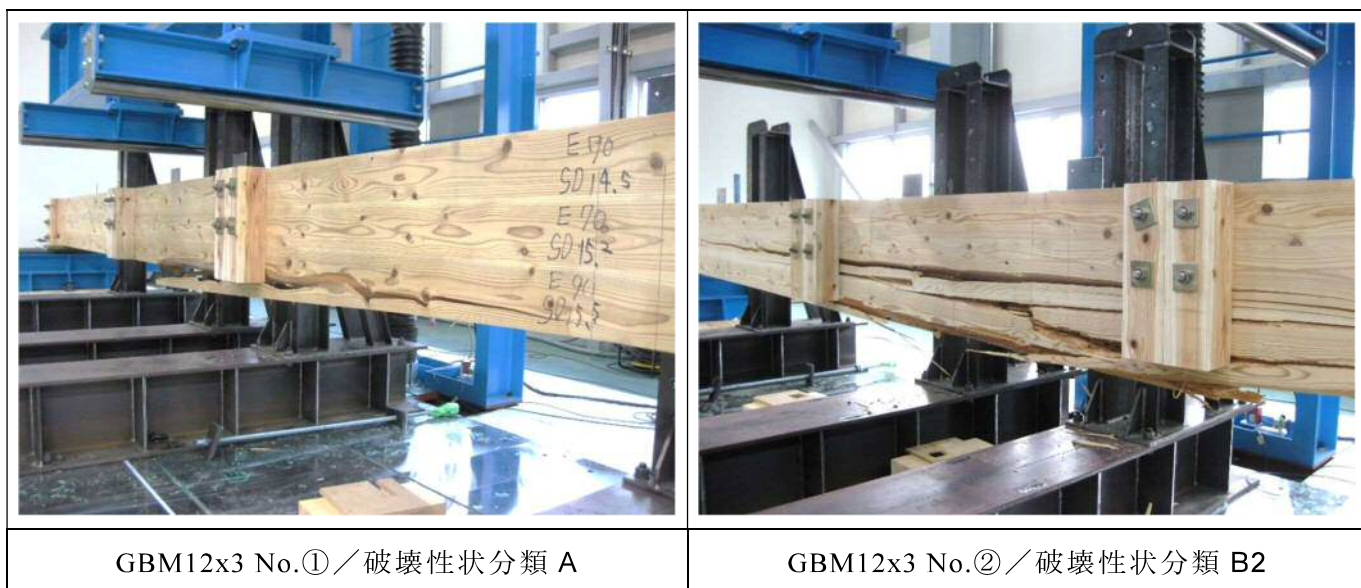
GBM12x2 No. ⑥／破壊性状分類 C

(a) GBM12x2 No. ①～⑥

写真 2.2 実験後の GBM 試験体の状況



(b) GBM12x2 No. ⑦～⑩



(c) GBM12x3 No. ①, ②

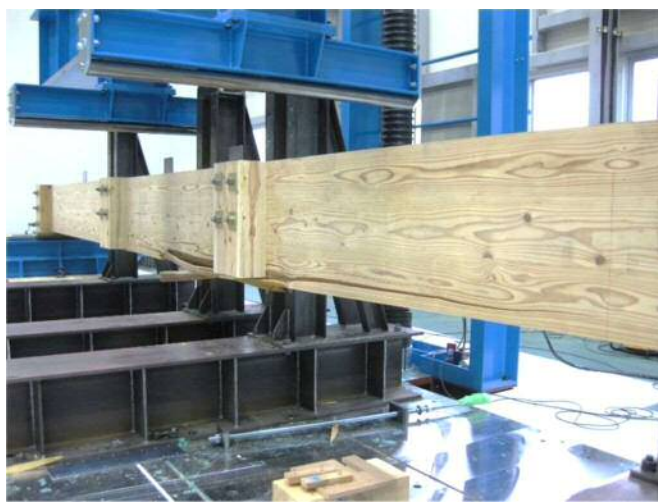
写真 2.2 実験後の GBM 試験体の状況 (つづき)



GBM12x3 No.③／破壊性状分類 A



GBM12x3 No.④／破壊性状分類 B2



GBM12x3 No.⑤／破壊性状分類 B2



GBM12x3 No.⑥／破壊性状分類 A



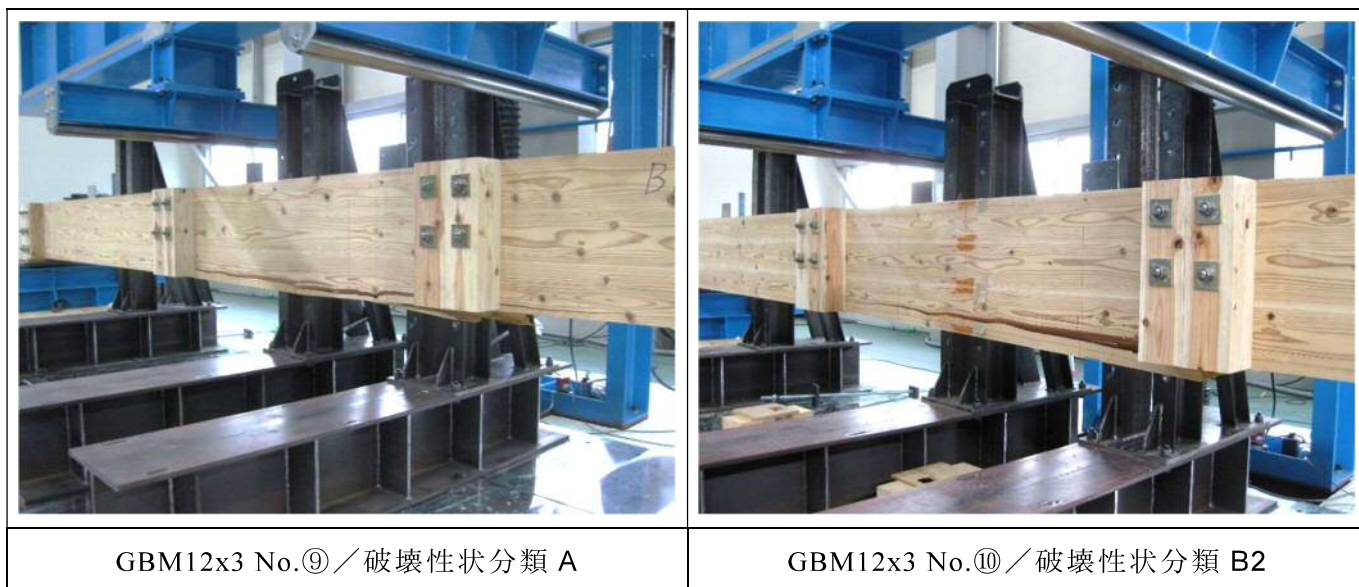
GBM12x3 No.⑦／破壊性状分類 S



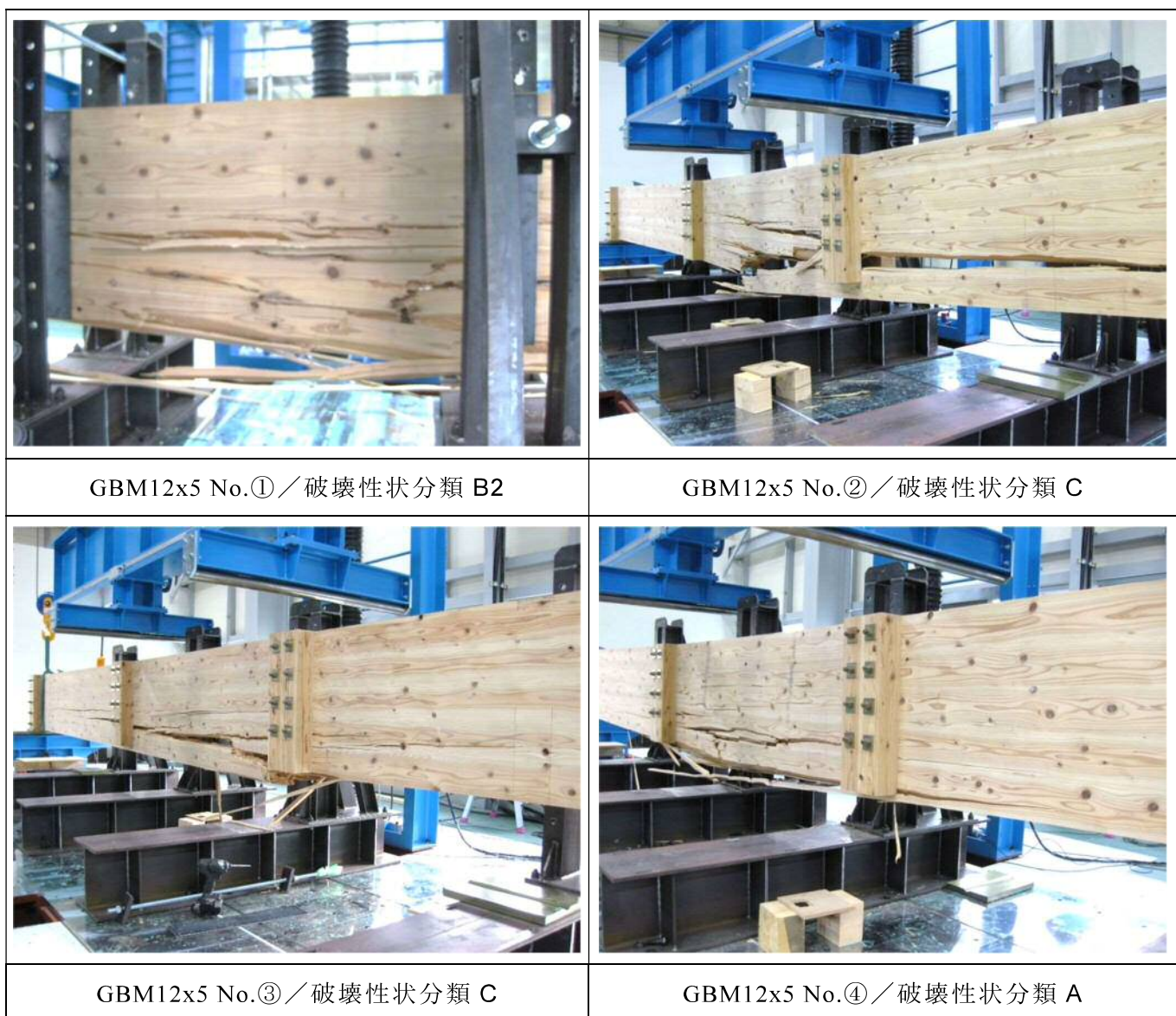
GBM12x3 No.⑧／破壊性状分類 B2

(d) GBM12x2 No. ③～⑧

写真 2.2 実験後の GBM 試験体の状況 (つづき)



(e) GBM12x3 No. ⑨, ⑩



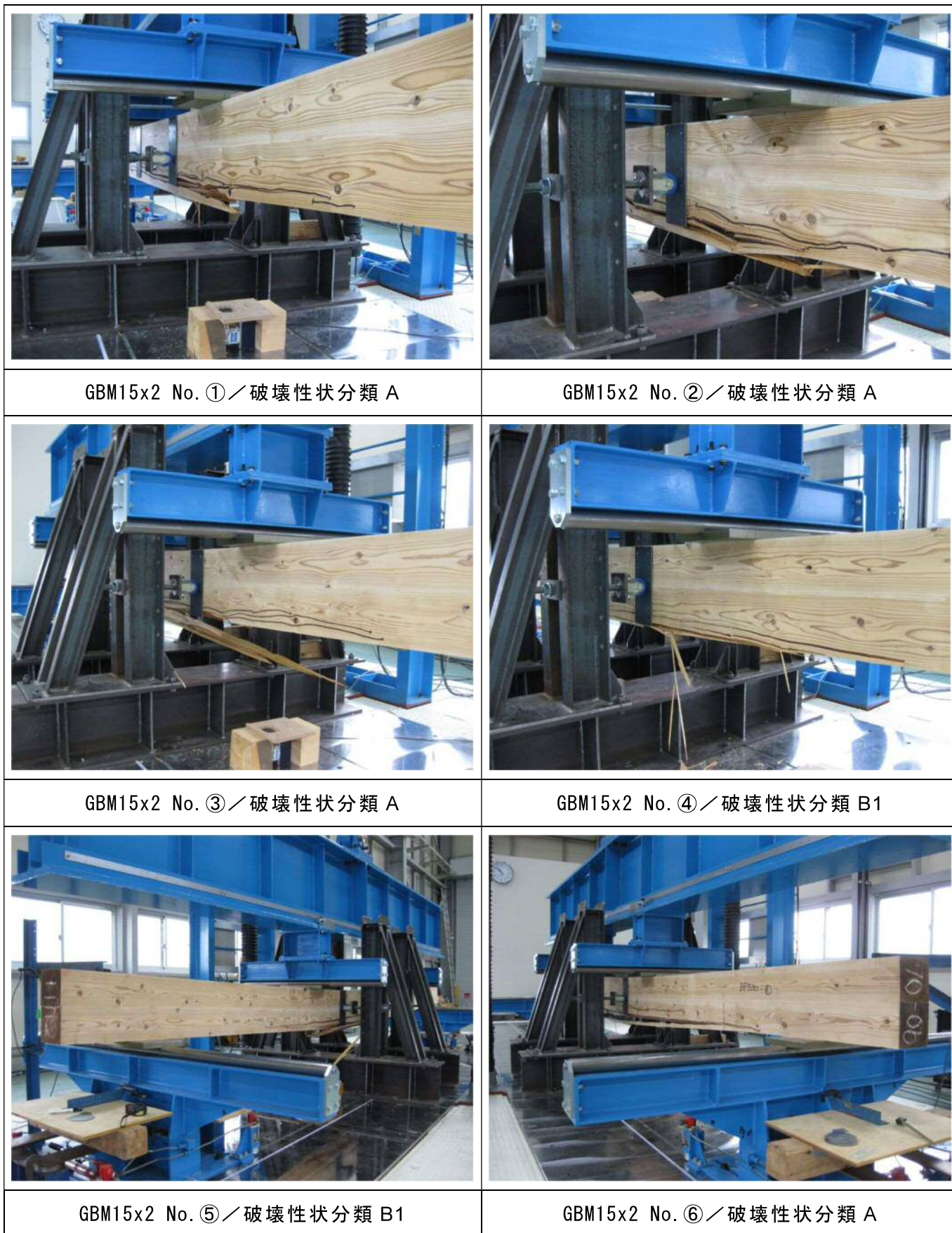
(f) GBM12x5 No. ①～④

写真 2.2 実験後の GBM 試験体の状況 (つづき)



(g) GBM12x5 No. ⑤～⑩

写真 2.2 実験後の GBM 試験体の状況 (つづき)



(h) GBM15x2 No. ①～⑥

写真 2.2 実験後の GBM 試験体の状況 (つづき)



GBM15x2 No.⑦／破壊性状分類 B2



GBM15x2 No.⑧／破壊性状分類 A



GBM15x2 No.⑨／破壊性状分類 A



GBM15x2 No.⑩／破壊性状分類 B1

(i) GBM15x2 No. ⑦～⑩









GBM15x3 No.①／破壊性状分類 B1



GBM15x3 No.②／破壊性状分類 B2

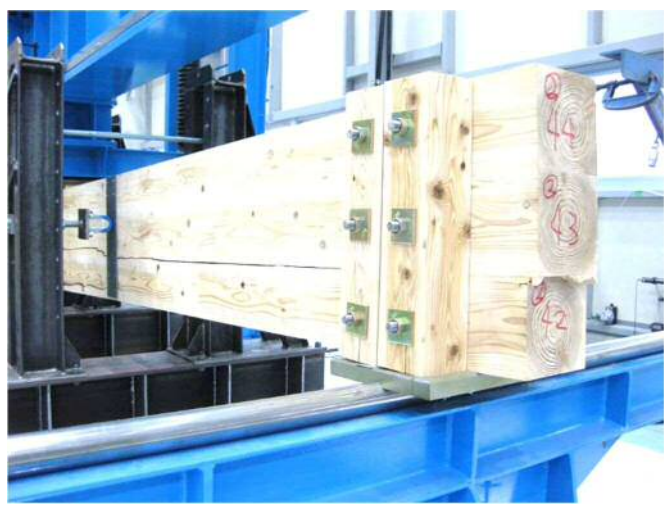
(j) GBM15x3 No. ①, ②

写真 2.2 実験後の GBM 試験体の状況 (つづき)

	
<p>GBM15x3 No.③／破壊性状分類 B2</p>	<p>GBM15x3 No.④／破壊性状分類 A</p>
	
<p>GBM15x3 No.⑤／破壊性状分類 S</p>	<p>GBM15x3 No.⑥／破壊性状分類 A</p>
	
<p>GBM15x3 No.⑦／破壊性状分類 A</p>	<p>GBM15x3 No.⑧／破壊性状分類 A</p>

(k) GBM15x3 No. ③～⑧

写真 2.2 実験後の GBM 試験体の状況（つづき）



GBM15x3 No.⑨／破壊性状分類 S



GBM15x3 No.⑩／破壊性状分類 B1

(l) GBM15x3 No. ⑨, ⑩



GBM15x4 No.①／破壊性状分類 A



GBM15x4 No.②／破壊性状分類 B2



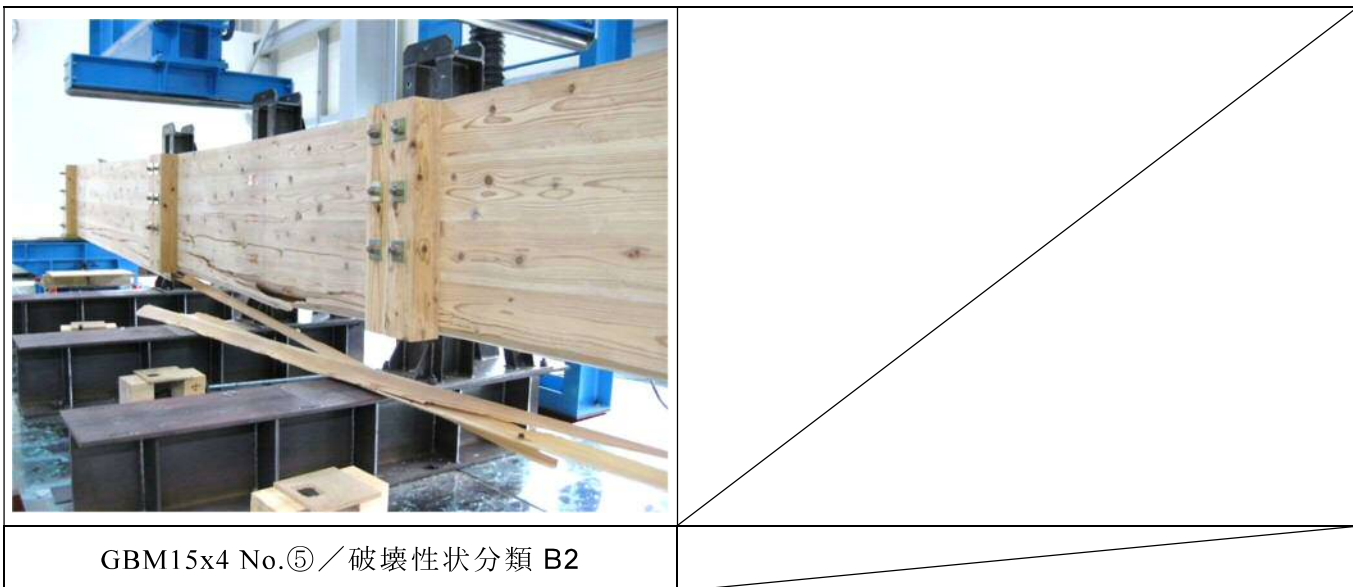
GBM15x4 No.③／破壊性状分類 B1



GBM15x4 No.④／破壊性状分類 S

(m) GBM15x4 No. ①～④

写真 2.2 実験後の GBM 試験体の状況 (つづき)



(n) GBM15x4 No. ⑤



(o) GBM15x5 No. ①～④

写真 2.2 実験後の GBM 試験体の状況 (つづき)



(p) GBM15x5 No. ⑤～⑧

写真 2.2 実験後の GBM 試験体の状況（つづき）

表 2.3 実験結果

名称	No.	E_{frn}	P_{max}	$e\sigma_b$	$e(EI)_b$	破壊性状
GBM12x2	①	6.10	74.5	38.8	9.44	A
	②	6.10	59.8	31.1	9.04	A
	③	6.20	56.9	29.6	9.16	B1
	④	6.20	63.4	33.0	9.48	B1
	⑤	6.20	73.0	38.0	9.14	A
	⑥	6.20	67.1	34.9	9.07	C
	⑦	6.30	63.2	32.9	9.39	B2
	⑧	6.30	66.1	34.4	8.75	B1
	⑨	6.10	60.2	31.4	8.33	A
	⑩	6.30	60.2	31.4	9.33	B2
GBM12x3	①	7.87	92.0	36.4	35.5	A
	②	8.08	102	40.3	37.5	B2
	③	8.16	101	39.9	35.0	A
	④	7.92	104	41.1	35.3	B2
	⑤	7.39	103	40.7	35.9	B2
	⑥	8.49	78.0	30.8	37.5	A
	⑦	8.09	76.0	30.1	38.7	S
	⑧	9.22	101	39.9	37.6	B2
	⑨	9.78	102	40.3	38.6	A
	⑩	7.96	83.0	32.8	38.1	B2
GBM12x5	①	6.61	213	39.9	160	B2
	②	7.07	237	44.4	174	C
	③	7.41	205	38.4	159	C
	④	6.90	240	45.0	167	A
	⑤	7.29	225	42.2	167	A
	⑥	7.71	224	42.0	180	B2
	⑦	7.64	212	39.8	175	C
	⑧	7.16	239	44.8	164	B1
	⑨	6.80	220	41.3	163	B2
	⑩	6.93	226	42.4	164	B2
GBM15x2	①	6.90	85.0	32.1	27.4	A
	②	7.84	95.5	36.3	28.2	A
	③	6.69	94.9	35.9	25.7	A
	④	7.66	101	38.2	27.7	B1
	⑤	8.27	102	38.5	28.5	B1
	⑥	8.48	97.9	37.0	29.0	A
	⑦	8.76	107	40.4	29.6	B2
	⑧	8.74	102	38.5	30.7	A
	⑨	8.07	108	40.8	29.9	A
	⑩	8.42	114	43.1	30.4	B1
GBM15x3	①	7.94	132	33.2	80.1	B1
	②	7.06	134	33.9	87.4	B2
	③	7.17	124	31.1	78.4	B2
	④	7.26	139	35.0	88.1	A
	⑤	7.48	113	28.5	85.8	S
	⑥	8.37	140	35.3	82.5	A
	⑦	7.97	149	37.5	88.0	A
	⑧	6.86	132	33.2	83.8	A
	⑨	7.05	130	32.7	82.4	S
	⑩	7.19	137	34.5	85.2	B1
GBM15x4	①	10.73	249	37.4	253	A
	②	10.88	270	40.5	223	B2
	③	10.95	325	48.8	272	B1
	④	9.71	282	42.3	253	S
	⑤	9.44	287	43.1	225	B2
GBM15x5	①	9.75	288	34.6	423	B2
	②	9.63	272	32.6	434	B2
	③	9.79	325	39.0	428	B2
	④	8.35	315	37.8	433	B2
	⑤	9.79	279	33.5	400	B1
	⑥	7.19	294	35.3	372	B2
	⑦	7.40	257	30.8	364	B2
	⑧	7.21	315	37.8	394	A

E_{frn} : 最下段製材の曲げヤング係数, P_{max} : 最大荷重実験値,
 $e\sigma_b$: 曲げ応力度実験値 (2.4)式, $e(EI)_b$: 曲げ剛性実験値 (2.5)式
 単位 : E_{frn} [kN/mm²], P_{max} [kN], $e\sigma_b$ [N/mm²], $e(EI)_b$ [$\times 10^{11}$ N・mm²]

2.4 GBMを一様な弾性体とみなした実験結果の評価

2.4.1 構成材（製材）の曲げ強度に曲げ基準強度を用いた場合

GBM 試験体の曲げ強度と曲げ剛性について、一般的な製材のそれと同様に GBM 断面内と材軸方向の曲げヤング係数は一様として実験結果を評価する。評価には一般に木質材料に用いられる統計処理^{2.11)}を用いる。すなわち、実験で得られた GBM の曲げ強度の分布の信頼度水準 75%における 95%下限値（以下、95%下限値）と、実験で得られた GBM の曲げ剛性の分布の信頼度水準 75%における 50%下限値（以下、50%下限値）を求める。

最大荷重実験値 P_{max} 時の GBM 断面の引張縁の曲げ応力度実験値 ${}_e\sigma_b$ を(2.4)式により求める。2.2.5 項に示した通り、本実験ではせん断変形成分が中央たわみに与える影響が大きいものもあるため、せん断変形成分を除いて求めた曲げ剛性実験値 ${}_e(EI)_b$ を(2.5)式により求める。なお、GBM の曲げヤング係数 E とせん断弾性係数 G の比を $E/G=15$ 、せん断変形に関する形状係数 κ_d を $\kappa_d=1.2$ と仮定する。

$${}_e\sigma_b = \frac{{}_eM}{Z} = \frac{P_{max} \cdot a}{2Z} \quad (2.4)$$

$${}_e(EI)_b = \frac{0.3P_{max}}{\Delta\delta} \left\{ \frac{a}{48} (3l^2 - 4a^2) + \frac{15\kappa_d \cdot a \cdot I}{2A} \right\} \quad (2.5)$$

ここで、 ${}_eM$ は P_{max} 時にロードスパン内に生じる曲げモーメント (N・mm)、 Z は GBM の断面係数 ($= B \cdot H^2/6$) (mm³)、 B は GBM の断面幅 (mm)、 H は GBM の断面せい (mm)、 κ_d は形状係数 ($=1.2$)、 $\Delta\delta$ は中央たわみ実験値の増分 ($0.1P_{max} \sim 0.4P_{max}$) (mm)、 I は GBM の断面二次モーメント ($= B \cdot H^3/12$) (mm⁴)、 A は GBM の断面積 ($= BH$) (mm²) である。表 2.3 に各 GBM 試験体の ${}_e\sigma_b$ と ${}_e(EI)_b$ の値を示す。

GBM 断面の引張縁における曲げ応力 σ_b と曲げ基準強度 F_b の関係である(2.6)式から曲げモーメント M について求めると、 σ_b が F_b に達するときの GBM の曲げ強度 M_b は(2.7)式で表現できる。

$$\sigma_b / F_b = 1 \quad (2.6)$$

$$M_b = Z \cdot F_b \quad (2.7)$$

ここで、 F_b は平成 12 年建設省告示第 1452 号に規定されている製材の曲げ基準強度であり、曲げヤング係数の等級区分は JAS 基準値とし、GBM の各構成材（製材）の縦振動法によるヤング係数の測定値 E_{fr} の平均値 E_0 により区分する（図 2.9）。また、縦振動法によって計測したヤング係数は曲げヤング係数と同等とする。

図 2.8(a)～(g)にせん断破壊した試験体を除き、実験の最大荷重時にロードスパン内に生じる曲げモーメント ${}_eM$ を GBM の曲げ強度の計算値 M_b で除した実験値と計算値の比 (${}_eM/M_b$) と、GBM の曲げ剛性の実験値 ${}_e(EI)_b$ を GBM の曲げ剛性の計算値 E_0I (GBM の各製材の縦振動法によるヤング係数の測定値 E_{fr} の平均値 E_0 と GBM の断面二次モーメント I の積) で除した実験値と計算値の比 (${}_e(EI)_b/E_0I$) との関係を GBM 試験体の構成材 (製材) 寸法・段数毎に示す。また、同図に ${}_eM/M_b$ と ${}_e(EI)_b/E_0I$ の平均値 \bar{x} と変動係数 CV を示す。

図 2.8 より実験結果の平均値は、 ${}_eM/M_b$ が 1.08～1.43、 ${}_e(EI)_b/E_0I$ が 0.96～1.10 の範囲にあり、実験結果のばらつきは、 ${}_eM/M_b$ が $CV=0.051\sim0.124$ 、 ${}_e(EI)_b/E_0I$ が $CV=0.027\sim0.073$ の範囲にある。実験結果の平均値とばらつきに構成材 (製材) の寸法や段数に応じた明確な差異は見られない。なお、 ${}_eM/M_b$ のばらつきは、「木構造振興株式会社」が公開する^{2.12)} 国内の各地より集められた、約 4500 本の実大製材に対する標準的な曲げ実験の結果を統計的に整理した、JAS 機械等級区分 E70 スギ製材の曲げ応力度に対する変動係数 $CV=0.180$ に比べて小さい。

実験で得られた ${}_eM/M_b$ の分布の 5% 下限値である $({}_eM/M_b)_{0.05}$ と、 ${}_e(EI)_b/E_0I$ の分布の 50% 下限値である $\{{}_e(EI)_b/E_0I\}_0$ を構成材 (製材) 段数毎に求める。また、参考として試験体全体の下限值も求める。表 2.4 に $({}_eM/M_b)_{0.05}$ と $\{{}_e(EI)_b/E_0I\}_0$ の値を示す。 $({}_eM/M_b)_{0.05}$ は 0.74～1.28 の範囲にあり、GBM12x2 試験体を除き、 $({}_eM/M_b)$ の 5% 下限値は 1.0 程度か、1.0 よりも小さくなることから、GBM の曲げ強度は最下段の製材の曲げ基準強度に比べて小さくなることが示唆される。なお、試験体数が 4 体と少ない GBM15x4 試験体は、信頼限界係数 $K_{0.05}$ が $K_{0.05}=2.681$ と大きくなることから、 $({}_eM/M_b)_{0.05}$ が 0.74 と特に小さくなっていると考えられる。また、 $\{{}_e(EI)_b/E_0I\}_0$ は 0.95～1.09 の範囲にあり、GBM12x5 試験体の 1.09 を除いて 1.0 程度となる。

せん断破壊が生じた 4 体の GBM 試験体について、GBM を一様な弾性体とみなして、せん断応力度に関する形状係数 κ_s を $\kappa_s=1.5$ とし、 P_{max} 時のせん断力 ${}_eQ$ による GBM のせん断応力度の実験値 ${}_e\sigma_s$ を(2.8)式で求める。

$${}_e\sigma_s = \kappa_s \frac{{}_eQ}{A} = \kappa_s \frac{P_{max}}{2B \cdot H} \quad (2.8)$$

GBM のせん断応力度の実験値 ${}_e\sigma_s$ を平成 12 年建設省告示第 1452 号の製材のせん断基準強度 $F_s (=1.8 \text{ N/mm}^2)$ で除した実験値とせん断基準強度の比 (${}_e\sigma_s/F_s$) は、 ${}_e\sigma_s/F_s=0.70$, 0.73, 0.80, 1.31 であり、せん断基準強度に達する前にせん断破壊が生じているものもあ

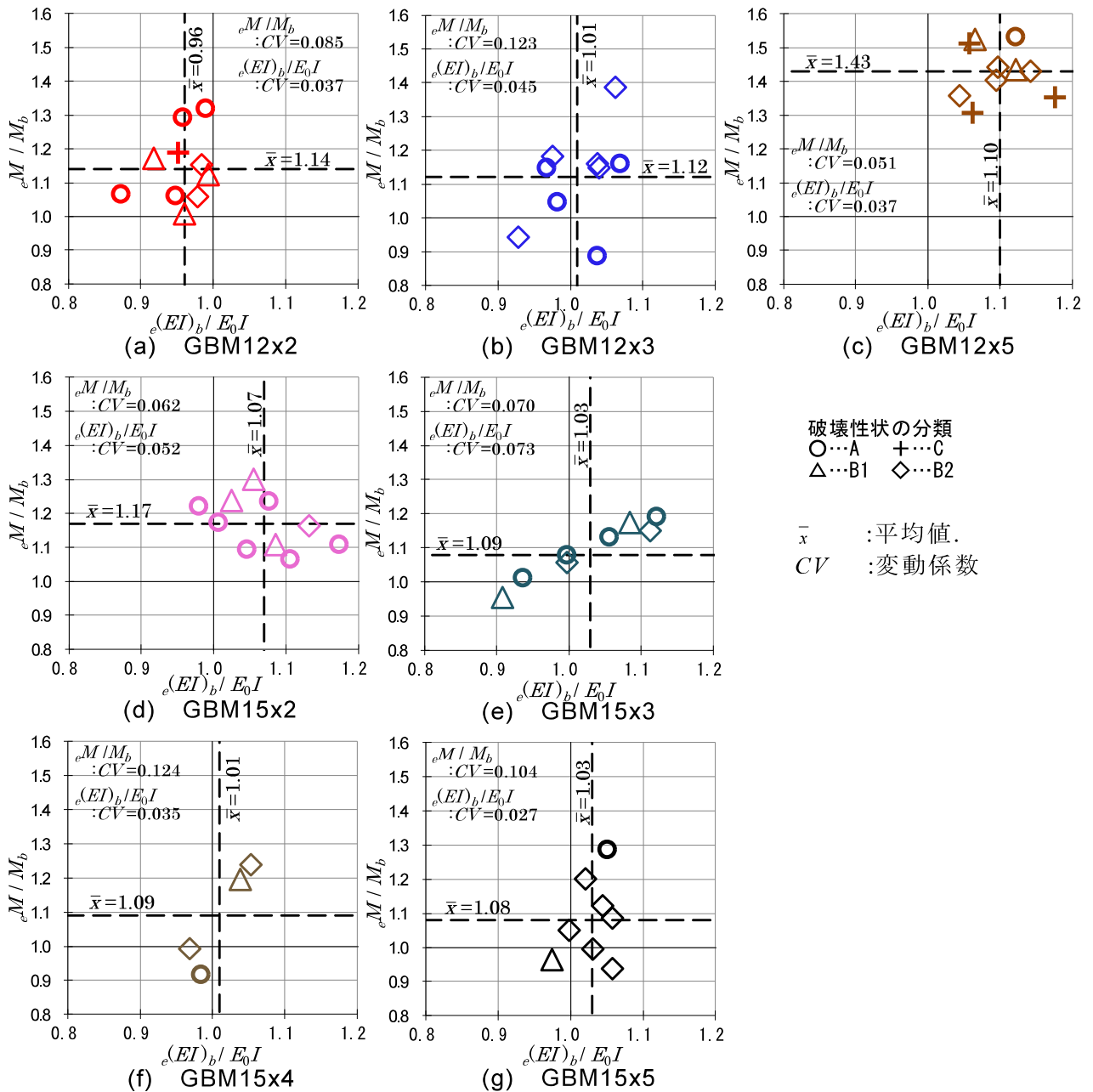


図 2.8 曲げ応力度と曲げ剛性の評価（一様断面モデル，曲げ基準強度）

表 2.4 曲げ応力度と曲げ剛性の下限値

名称	試験 体数	$K_{0.05}$	$\left(\frac{eM}{M_b}\right)_{0.05}$	K_0	$\left\{\frac{e(EI)_b}{E_0I}\right\}_0$
GBM12x2	10	2.104	0.94	0.222	0.95
GBM12x3	9	2.142	0.82	0.236	1.00
GBM12x5	10	2.104	1.28	0.222	1.09
GBM15x2	10	2.104	1.01	0.222	1.06
GBM15x3	8	2.189	0.93	0.251	1.03
GBM15x4	4	2.681	0.74	0.383	0.98
GBM15x5	8	2.189	0.81	0.251	1.02

$K_{0.05}$: 信頼度水準 75%における 95%下限値を求めるための係数, K_0 : 信頼度水準 75%における 50%下限値を求めるための係数, $\left(\frac{eM}{M_b}\right)_{0.05}$: GBM の曲げ強度の実験値と計算値の比に対する信頼度水準 75%における 95%下限値, $\left\{\frac{e(EI)_b}{E_0I}\right\}_0$: GBM の曲げ剛性の実験値と計算値の比に対する信頼度水準 75%における 50%下限値

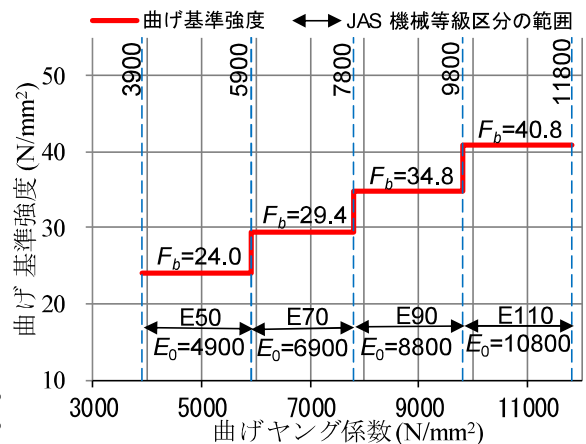


図 2.9 製材の曲げ基準強度と曲げヤング係数の関係

る。筆者らは GBM のせん断性能についても検討を行なっているが^{2.13)}、本論は曲げ性能の評価を目的とするため、以降はせん断破壊した試験体を除いて検討を行う。

2.4.2 構成材（製材）の曲げ強度に線形補間曲げ基準強度を用いた場合

前項では、最下段の製材が曲げ破壊の起点となった GBM 試験体の最下段の製材の曲げ強度について、製材に対する一般的な構造設計の取扱いと同様に、JAS の各等級区分内の曲げ強度は一定（図 2.9）としたときの GBM の曲げ強度の評価について述べた。一方で、製材の曲げ強度は、曲げ基準強度を各等級区分における曲げヤング係数の下限値（閾値）の値とし、閾値の間を曲げヤング係数を用いて線形補間するときの曲げ強度と曲げヤング係数の関係に近いと考えられる（図 2.10）。また、構造設計において各等級区分内の曲げ強度を一定とすることは、より安全側の評価となるが、GBM が有する力学的な性質が明確に現れにくい可能性がある。そこで、本項では GBM の最下段の製材の曲げ強度を同材のヤング係数の測定値である E_{frn} を用い、閾値の間を線形補間して求めた値（以下、線形補間曲げ基準強度 ${}_lF_b$ と呼ぶ）として実験結果を評価する。なお、GBM 試験体の E_{frn} は表 2.3 に示している。

図 2.11(a)～(g)に実験の最大荷重時にロードスパン内に生じる曲げモーメント ${}_eM$ を(2.7)式の F_b を ${}_lF_b$ に読み替えて求めた GBM の曲げ強度の計算値 ${}_lM_b$ で除した実験値と計算値の比 (${}_eM / {}_lM_b$) と、GBM の曲げ剛性の実験値 ${}_e(EI)_b$ を GBM の曲げ剛性の計算値 E_0I で除した実験値と計算値の比 (${}_e(EI)_b / E_0I$) との関係性を各製材段数について示す。また、図 2.11 に平均値と変動係数 CV を併せて示す。

図 2.11 より ${}_eM / {}_lM_b$ の平均値は 0.95～1.28 の範囲にあり、 ${}_eM / {}_lM_b$ のばらつきの最大値は 0.046～0.121 の範囲にあり、ばらつきの最大値は僅かではあるが小さくなる。線形補間曲げ基準強度を用いて GBM の曲げ強度の実験値と計算値の比 (${}_eM / {}_lM_b$) を求めると、前項の図 2.8 に示した GBM の曲げ強度の実験値と計算値の比 (${}_eM / M_b$) に比べて、製材の寸法や段数に関わらず実験結果と比較的良好な対応を示すことから、GBM が有する力学的な性質について考察するときには、線形補間曲げ基準強度を用いて GBM の曲げ強度を評価することが適切であると考えられる。一方で、構成材の寸法や GBM の段数が GBM の曲げ強度や破壊性状と荷重－中央たわみ関係に及ぼす影響について、明確な傾向は見られなかった。

実験結果では、GBM12x5 の ${}_eM / {}_lM_b$ と ${}_e(EI)_b / (EI)_e$ が他の構成材（製材）寸法・段数の GBM 試験体と比べて高い値となっている。GBM 試験体の含水率とヤング係数は図 2.2(a), (b)、試験体寸法は図 2.1(a)～(g)および表 2.1、載荷方法は図 2.4 に示しているが、GBM12x5

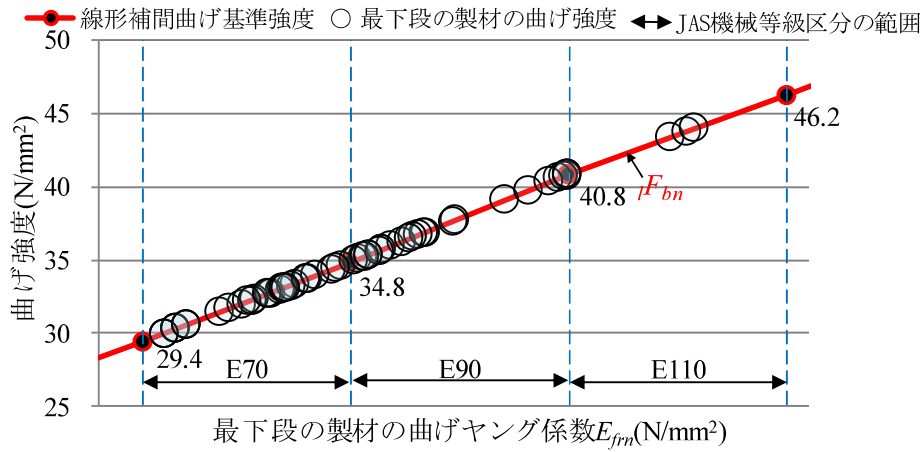


図 2.10 最下段製材の線形補間曲げ基準強度と曲げヤング係数の関係

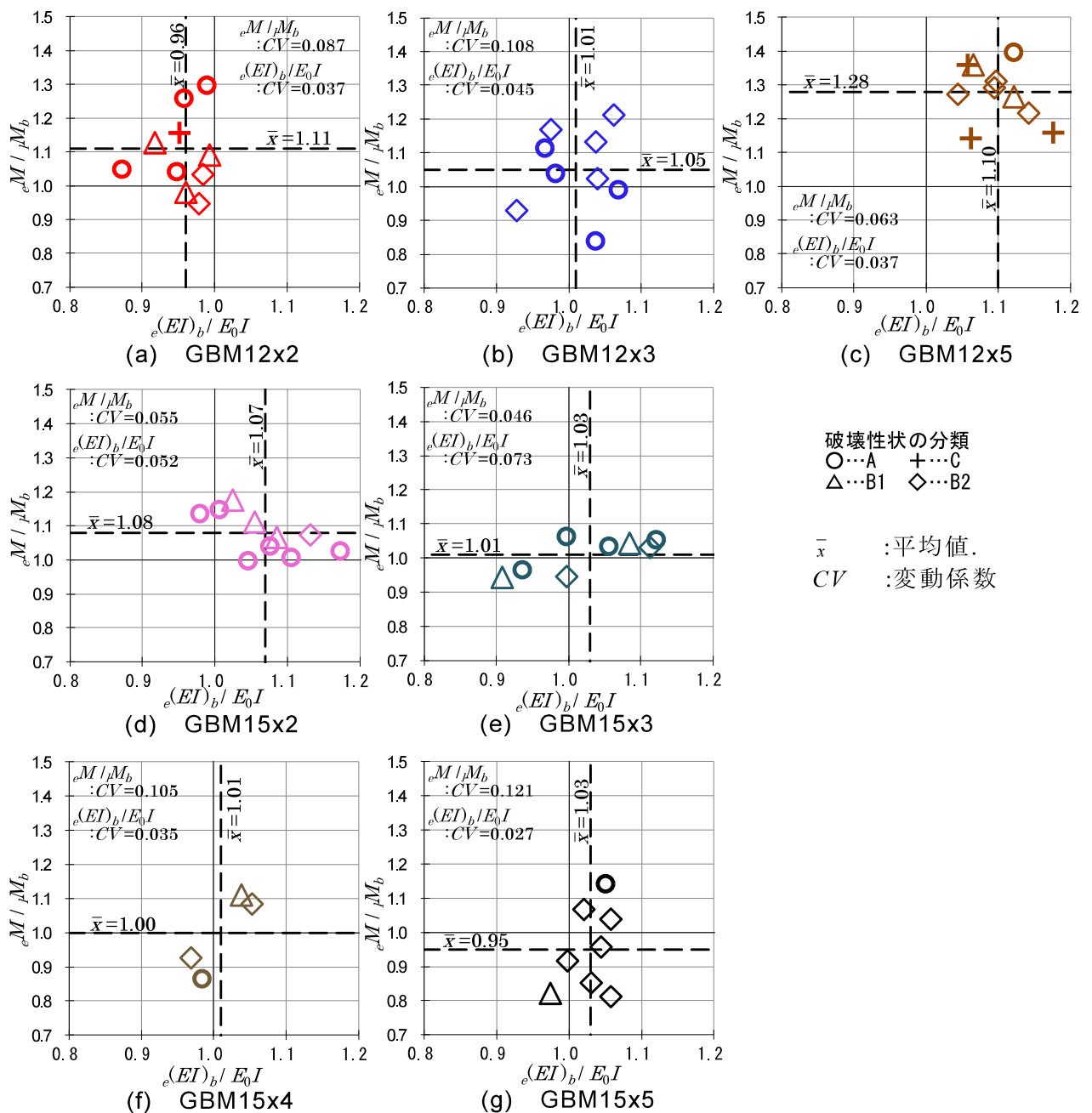


図 2.11 曲げ応力度と曲げ剛性の評価（一様断面モデル，線形補間曲げ基準強度）

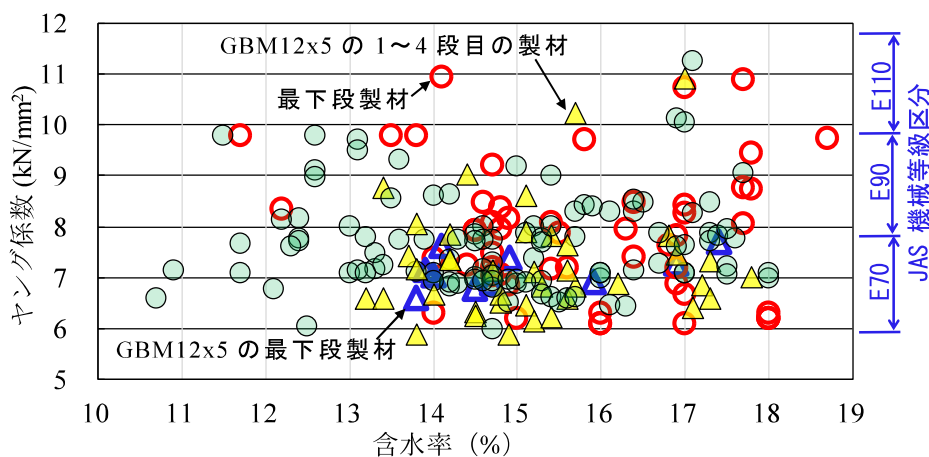


図 2.12 含水率と曲げヤング係数の関係

の構成材の含水率，ヤング係数，せん断スパン a またはロードスパン S の GBM 断面せい H に対する比 (a/H または S/H) および載荷方法と，他の GBM 試験体のそれらに大きな差異がないことが分かる。ここで，GBM12x5 に用いた製材の含水率とヤング係数が GBM の曲げ強度と曲げ剛性に及ぼす影響を以下に考察する。全ての GBM 試験体の製材の含水率とヤング係数の関係を示した図 2.2(c) を，GBM12x5 試験体に着目して改編した図を図 2.12 に示す。図より全体に含水率とヤング係数に相関は見られず，GBM12x5 試験体の含水率とヤング係数を他の GBM 試験体のそれらと比較しても，特異な値ではないことが分かる。よって，製材の含水率と曲げヤング係数が GBM の曲げ強度と曲げ剛性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

2.5 まとめ

本章では，構成材（製材）の寸法や段数の違いが GBM の破壊性状や曲げ性能に及ぼす影響について検討することを目的として行った，120 mm 角または 150 mm 角のスギ製材を 2，3，4，5 段積層した実大 GBM 試験体の曲げ試験の結果を示した。また，破壊の性状を試験体の破壊の状況と荷重－中央たわみ関係を踏まえて 5 種類に分類した。さらに，GBM を一様な弾性体とみなして，最大荷重時の GBM 断面の引張縁の曲げ応力度実験値とせん断変形成分を除いた曲げ剛性実験値を求めた。以下に本章で得られた知見を示す。

- ① GBM 試験体の破壊性状は，全ての GBM 試験体で接着面の破壊は生じておらず，全 63 試験体中 59 体が曲げ破壊となり，これらの GBM 試験体では最大荷重に達すると同時に曲げ引張側の最下段製材に破壊が生じている。また，残りの 4 体はせん断破壊し，GBM 断面の中央付近に破壊が生じている。曲げ破壊した試験体は，曲げ引張側となる最下段

製材の下端における単純引張と目切れ引張の組み合わせによる曲げ破壊と、下側製材のそぎ割れ引張による曲げ破壊の2種類の破壊の性状が見られた。

- ② GBMを一様な弾性体とみなして構成材（製材）段数毎に曲げ応力度と曲げ剛性を求めると、曲げ応力度と曲げ基準強度の比の5%下限値は、1.0程度か、1.0よりも小さくなり、GBMの曲げ強度は最下段の製材の曲げ強度に比べて小さくなることが示唆される。一方、曲げ剛性と各構成材（製材）のヤング係数の平均値とGBMの断面二次モーメントの積の比の50%下限値は、GBM12x5試験体を除いて1.0程度となる。
- ③GBMの最下段の製材の曲げ強度について、曲げ基準強度を各等級区分における曲げヤング係数の下限値（閾値）の値とし、閾値の間を最下段の製材の縦振動法によるヤング係数の測定値を用いて線形補間して求めた線形補間曲げ基準強度 F_b を用いてGBMの曲げ強度を評価するとき、実験値と計算値の比は、曲げ基準強度を用いる場合に比べて、実験結果と比較的良好な対応を示す。構造設計において各等級区分内の曲げ強度を一定とする曲げ基準強度を用いてGBMの曲げ強度を評価することは、より安全側の評価となるが、GBMが有する力学的な性質について考察するときには、線形補間曲げ基準強度を用いてGBMの曲げ強度を評価することが適切であると考えられる。
- ④検討の範囲では、構成材の寸法やGBMの段数がGBMの曲げ強度や破壊性状と荷重-中央たわみ関係に及ぼす影響について、明確な傾向は見られなかった。

上記の実験結果はGBMが有する力学的な性質によるものであると考えられることから、3章以降の章でGBMの力学的な性質を踏まえたGBMの曲げ強度と曲げ剛性に対する構造設計の方法について検討を行う。

2章 参考文献

- 2.1) 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 pp. 1273-1274，1985年10月
- 2.2) 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 pp. 79-80，1988年10月
- 2.3) 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 pp. 59-60，1999年9月
- 2.4) 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 pp. 23-24, 2006 年 9 月
- 2.5) 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 pp. 65-66, 2009 年 8 月
- 2.6) (公財)日本住宅・木材技術センター : 構造用木材の強度試験マニュアル, pp.59-63,
2011.3
- 2.7) 建築基準法第 37 条第二項, 国土交通大臣認定番号 : MWCM-0022, 0023, 0024, 0025,
2015.4
- 2.8) 日本建築学会 : 木質構造設計規準・同解説, pp.188-194, 2006.12
- 2.9) (公財)日本住宅・木材技術センター : 構造用木材の強度試験マニュアル, pp.8-10,
2011.3
- 2.10) 杉山英男 : 木構造 (建築構造学大系<第 22>), 彰国社, pp.26-28, 1971
- 2.11) 日本建築学会 : 木質構造設計規準・同解説, pp.152-154, 2006.12
- 2.12) 木構造振興株式会社 : 木材の強度等データおよび解説, p.50, 2011.9
- 2.13) 古田久盛, ほか 3 名 : 実大せん断試験に基づくスギ接着重ね材の性能評価, 日本
建築学会九州支部研究報告 第 57 号, pp.217-220, 2018.3

3 章 GBMを構成する製材断面に生じる 垂直応力の分布が GBM の曲げ強度に及 ぼす影響

3章 GBMを構成する製材断面に生じる垂直応力の分布がGBMの曲げ強度に及ぼす影響

3.1 はじめに

構成材（製材）を積層するGBMに曲げモーメントが作用するときには、特に段数が多くなるほど、各製材の断面にはより一様に近い分布の垂直応力が生じることになる。また、一般に実大製材の断面に生じる垂直応力が一様に近い分布となる引張強度または圧縮強度は、垂直応力が三角形に近い分布（中立軸を基点とし、曲げ引張縁または曲げ圧縮縁が最大）となる曲げ強度よりも小さいとされている^{3.1)}。そのため、GBMの製材の段数に応じた各製材の断面に生じる垂直応力の分布がGBMの曲げ強度に影響を与えることが考えられる。

構成材を積層する木質構造材料の曲げ強度を評価する方法は、集成材を対象にして既に検討されている^{3.2)~3.4)}。しかし、1章で整理したように日本農林規格（以下、JAS）における大断面の部材（断面幅150mm以上、かつ断面積30000mm²以上）では、GBMは150mmの正角材を積層する部材であるのに対し、集成材はせいが30~50mmのラミナを積層する部材であるため、部材のせいと同じGBMの製材の段数は、集成材のラミナの段数よりも少なくなり、集成材のラミナ断面に生じる垂直応力の分布はGBMの製材断面に生じる垂直応力に比べて一様に近い分布となる。したがって、GBMは集成材とは異なる力学性状を呈する可能性がある。また、集成材と同一の力学モデルがGBMに適用できるか否かは明らかではない。

これらを踏まえ、本章ではGBMの製材断面に生じる垂直応力の分布がGBMの曲げ強度に及ぼす影響について考察するため、集成材と同一の力学モデルを用いた断面解析を行い、GBMの曲げ強度を求める。また、GBMの力学的な性質について考察するため、GBMと断面寸法が同一の集成材についても断面解析を行う。なお、2.4.2項に示した通り、本論で行った実大GBM試験体の曲げ実験では、GBMの最上段製材の圧縮縁に繊維座屈が生じたとしてもGBMの曲げ強度に及ぼす影響は小さいと考えられることから、本章ではGBMの最下段製材の引張縁に着目してGBMの曲げ強度の検討を行う。

上記の検討に加えて、GBMの曲げ強度の評価に集成材と同一の力学モデルを用いる有用性を考察するため、集成材と同一の力学モデルを用いる方法の別法として、最弱リンク理論の基本的な式から製材の引張強度が曲げ強度よりも小さいことと、段数に応じて部材の断面に生じる垂直応力の分布が異なることを部材の引張縁の引張強度に対して導入する方法（以下、応力分布に関する寸法効果）を用いて断面解析を行い、GBMの曲げ強度を求め

る。また、GBMの力学的な性質について考察するため、GBMと断面寸法が同一の無垢材と集成材についても断面解析を行う。なお、最弱リンク理論は体積が大きい木材ほどその強度が小さくなる傾向があること（体積に関する寸法効果）を、工学的に説明する方法としても用いられるが、体積に関する寸法効果がGBMの曲げ強度に及ぼす影響については7章で述べる。

3.2 既往研究

1章でも述べた通り、GBMは集成材とは構成材の寸法により段数が異なるため、両者は異なる力学的性状を呈する可能性がある。しかし、木材を積層する木質材料という共通点から、集成材を対象とした既往研究は、GBMの曲げ強度の評価にあたり参考になると考えられる。集成材の曲げ強度の評価には、集成材の各ラミナの断面内を一様な弾性体と見なし、各ラミナの曲げヤング係数と断面積の差異を考慮する等価断面法と呼ばれる考え方が広く用いられている。等価断面法に基づく力学モデルとして、集成材のラミナ断面の引張縁に生じる垂直応力について引張成分と曲げ成分の単純和の組み合わせ応力を用いて集成材の曲げ強度を評価する小松のモデル^{3.2)}や、森らのモデル^{3.3)}あるいは集成材のラミナ断面の引張縁に生じる垂直応力について引張成分と曲げ成分の二乗和の組み合わせ応力を用いて集成材の曲げ強度を評価する平嶋らのモデル^{3.4)}が代表的である。

一方、組み合わせ応力を用いて部材の曲げ強度を求める方法の別法として、木材のような脆性的な材料の断面内における引張強度の分布は、最弱リンク理論を基に漸近分布として導出したワイブル分布^{3.5)}で表すことができると考えられている（図3.1）。以下に、この方法について述べる。中村は^{3.6), 3.7)}、無垢材の曲げ強度や集成材の曲げ強度に対する垂直応力の分布の考え方について、部材のせい・幅・スパンが同じで、断面の平面保持の仮定が成り立つものとし、部材に曲げモーメントが作用して断面に垂直応力が生じるとき、段数に応じて部材の断面に生じる垂直応力の分布が異なることを部材の引張縁における引張強度に導入するときの垂直応力の分布に関する寸法効果を以下のように説明している。

中立軸の位置が断面の中央にある無垢材は（図3.2(a)）、引張強度 f_t と曲げ強度 f_b の関係を(3.1)式で表すことができる。

$$f_b = [2(k_\sigma + 1)]^{\frac{1}{k_\sigma}} \cdot f_t \quad (3.1)$$

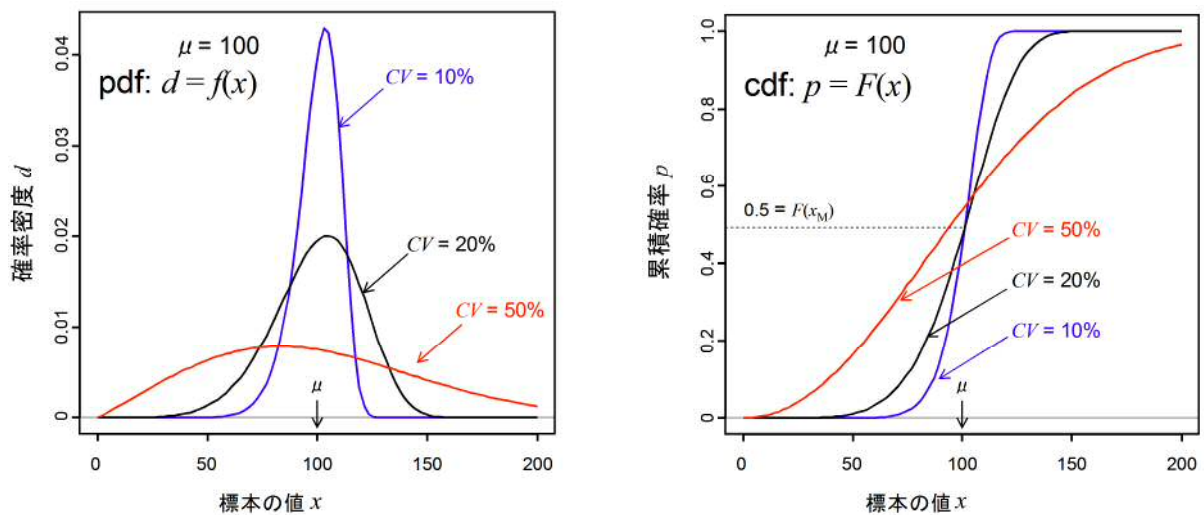
ここで、 k_σ は応力分布を表す定数である。

図 3.2(b)の集成材のように、中立軸の位置から最下段ラミナの引張縁までの距離と最下段ラミナのせい h_n との比 c の値が 1.0 を超える ($1.0 < c$) のとき、ラミナの曲げ強度 f_b' と引張強度 f_t の関係は(3.2)式で、垂直応力の分布に関する寸法効果による部材の曲げ強度の低減係数 K_σ は(3.3)式で表すことができる。

$$f_b' = \left[\frac{c}{k_\sigma + 1} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{c} \right)^{k_\sigma + 1} \right] \right]^{-1/k_\sigma} \cdot f_t \quad (3.2)$$

$$K_\sigma = f_b' / f_b \quad (3.3)$$

μ : 期待値であり、確率変数が取り得る全ての値にその出現率を乗じた値の和
pdf: 確率分布の確率密度関数, cdf: 確率分布の累積確率関数,
 x : 標本の値, CV: 変動係数($=\sigma/\mu$), σ : 標本の標準偏差



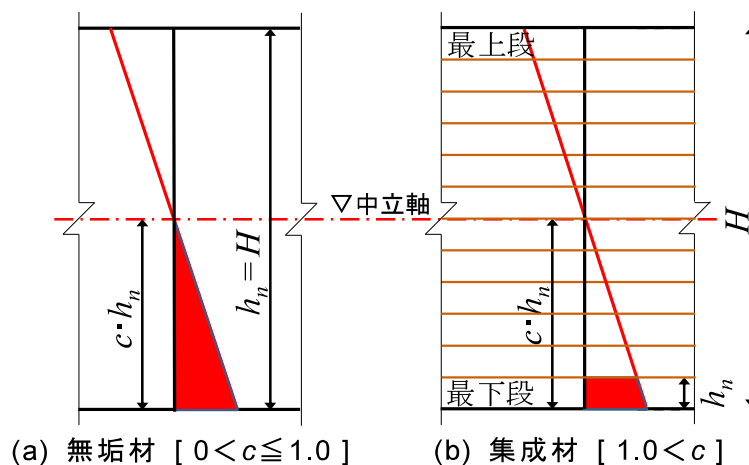
(a) 確率密度関数と標本の値

(b) 累積確率関数と標本の値

図 3.1 ワイブル分布の確率密度関数と累積確率関数の例^{3.5)}

h_n : 最下段の構成材のせい

c : 中立軸の位置から最下段の構成材引張縁までの距離と h_n との比



(a) 無垢材 [$0 < c \leq 1.0$]

(b) 集成材 [$1.0 < c$]

図 3.2 断面に生じる垂直応力の分布^{3.7)}

3.3 GBM 断面内のひずみと垂直応力の分布

本節では、GBMにおける最下段の構成材（製材）断面に生じる垂直応力について、引張成分と曲げ成分の組み合わせ応力を用いたときのGBMの曲げ強度の評価について述べる。ここで、GBM断面の平面保持の仮定が成り立つ（製材相互の接着層にずれが生じない）ものとし、接着層は極めて薄いため、接着層の変形は無視し、十分に大きい強度を有するものとする。また、GBMを構成する各製材は一様な弾性体と見なす。

図 3.3 に 3 段重ね GBM の下側が引張の曲げモーメント M を受けるときの最下段の製材断面に生じるひずみと垂直応力の分布を例として示す。GBM 断面全体の曲率 ϕ は、(3.4)式で表し、これは各製材の曲率 ϕ_i と一致する。 i 段の製材の図心に生じる垂直ひずみ ε_i は、(3.5)式のように引張成分のひずみ ε_{ti} と曲げ成分のひずみ ε_{bi} の和として表現できる。 i 段の製材縁の引張成分によるひずみ ε_{ti} は(3.6)式、曲げ成分のひずみ ε_{bi} は(3.7)式となる。したがって、製材の断面に生ずる垂直応力について組み合わせ応力を用いたとき、曲げモーメント M による i 段の製材縁の引張応力 ${}_c\sigma_{tei}$ は(3.8)式により、曲げ応力 ${}_c\sigma_{bei}$ は(3.9)式により求めることができる。

$$\phi = \frac{M}{(EI)_e} \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_i = (y_i - \lambda)\phi = \varepsilon_{ti} + \varepsilon_{bi} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{ti} = g_i \cdot \phi \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{h_i}{2} \phi \quad (3.7)$$

$${}_c\sigma_{tei} = E_i \cdot \varepsilon_{ti} \quad (3.8)$$

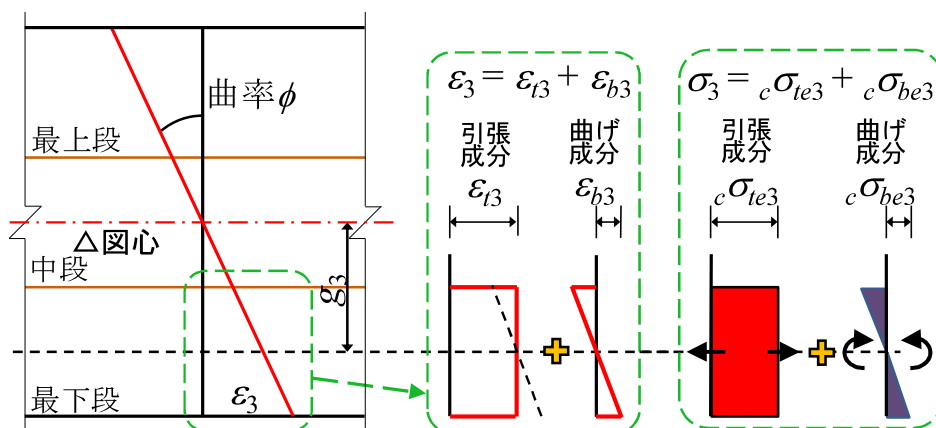


図 3.3 GBM 断面内のひずみと垂直応力の分布（3 段重ねの場合）

$${}_c\sigma_{bei} = E_i \cdot \varepsilon_{bi} \quad (3.9)$$

ここで、 $(EI)_e$: GBM 断面の等価曲げ剛性、 y_i : 原点から i 段の製材の図心までの距離、 λ : 原点から中立軸までの距離、 g_i : 中立軸から i 段の製材の図心までの距離、 h_i : i 段の製材せい、 E_i : i 段の製材の曲げヤング係数である。

一方、中立軸から i 段の製材の図心までの距離 g_i を段数 n で表すと(3.10)式となり、 i 段の製材の図心に生じる垂直ひずみ ε_i は(3.11)式で表すことができる。

$$g_i = (n-1) \frac{h_i}{2} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_i = (n-1) \frac{h_i}{2} \phi + \frac{h_i}{2} \phi = \frac{h_i}{2} \phi \cdot n \quad (3.11)$$

したがって、引張成分の割合は(3.12)式により、曲げ成分の割合は(3.13)式により求めることができる。

$$\frac{\varepsilon_{ti}}{\varepsilon_i} = 1 - \frac{1}{n} \quad (3.12)$$

$$\frac{\varepsilon_{bi}}{\varepsilon_i} = \frac{1}{n} \quad (3.13)$$

3.4 垂直応力の引張成分と曲げ成分の割合

本節では、下側が引張りの曲げモーメントを受ける GBM における最下段の構成材（製材）断面の引張縁に生じる垂直応力について、引張成分と曲げ成分の組み合わせ応力を用いたときの引張成分と曲げ成分の比率を把握するために断面解析を行う。また、GBM の力学的な性質について考察するため、GBM と断面寸法が同一の集成材についても断面解析を行う。

表 3.1 に検討する GBM と集成材の構成を示す。GBM は 150 mm 角の製材を用いた 2 段～7 段重ねとし、各製材の曲げヤング係数 E_i は JAS 機械等級区分構造用製材の E70 の基準値である 6900 N/mm² を用いる。集成材は幅 150 mm、厚さ 30 mm ラミナを用いた 10 段～35 段重ねとし、各ラミナの曲げヤング係数 E_i は GBM との比較のために GBM の製材と同じ値を用いる。

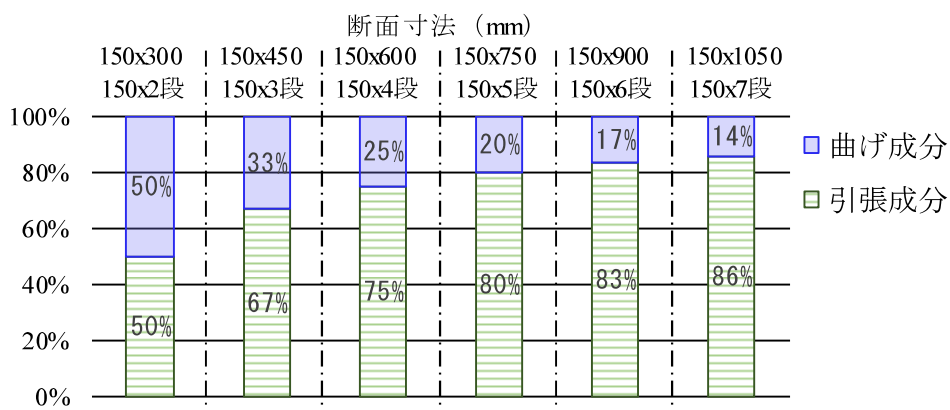
最下段の構成材の縁における垂直応力の引張成分と曲げ成分の割合について、図 3.4(a) に GBM を、図 3.4(b) に集成材を示す。曲げ成分の割合は GBM と集成材のいずれも段数の

増加に応じて減少するが、同じ断面寸法の GBM と集成材では引張成分と曲げ成分の割合が大きく異なっている。150×450（3段）以下の GBM における最下段の製材縁では曲げ成

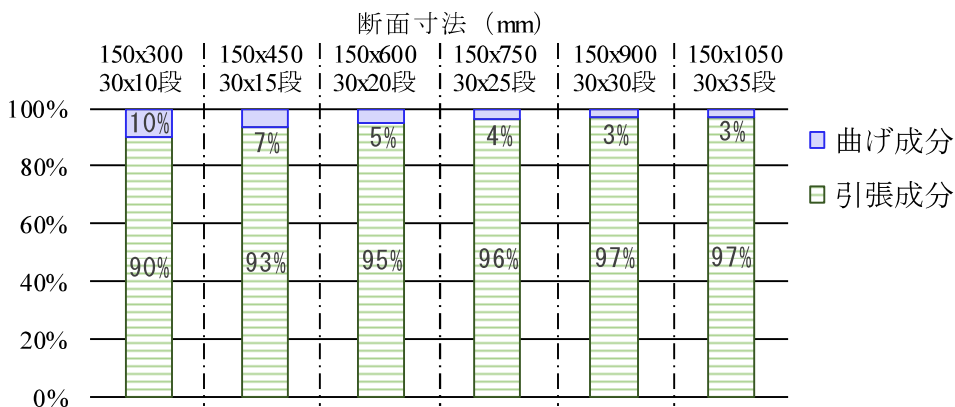
表 3.1 GBM と集成材の構成

断面寸法 (mm)		150x300	150x450	150x600	150x750	150x900	150x1050
GBM	段数 n	2	3	4	5	6	7
	模式図						
集成材	段数 n	10	15	20	25	30	35
	模式図						

製材寸法 : 150×150mm, $E_t = 6900 \text{ N/mm}^2$
 ラミナ寸法 : 150×30mm, $E_t = 6900 \text{ N/mm}^2$



(a) GBM (製材寸法 : 150x150 mm)



(b) 集成材 (ラミナ寸法 : 150x30 mm)

図 3.4 最下段構成材の引張縁における曲げ成分と引張成分の割合

分の割合が 33%以上と比較的曲げ成分の割合が大きく、150×1050（7 段）の段数が多い GBM ですら曲げ成分の割合が 14%もあるのに対し、集成材の最下段ラミナ縁では 150×300（10 段）の小さい断面寸法においても曲げ成分の割合は 10%であり、GBM に比べて引張成分の割合が支配的である。(3.6)式の通り曲げ成分の割合は構成材の段数の逆数と等しく、段数の増加に応じて漸近的に減少する。また、同一の断面寸法の GBM の曲げ成分の割合と、集成材の曲げ成分の割合の比は、製材とラミナのせいの比に等しい。したがって、製材とラミナのせいをそれぞれ 150 mm と 30 mm とする場合には、GBM の曲げ成分の割合は同一断面寸法の集成材の 5 倍になる。

3.5 単純和または二乗和平方根の組み合わせ応力とするときの GBM の曲げ強度

本節では、下側が引張りの曲げモーメントを受ける GBM における最下段の構成材（製材）断面の引張縁に生じる垂直応力について、引張成分と曲げ成分の組み合わせ応力を用いたときの引張成分と曲げ成分を単純和とする場合と、二乗和平方根とする場合で、どちらの方法が GBM の曲げ強度の評価に適しているかについて考察するために断面解析を行う。また、GBM の力学的な性質について考察するため、GBM と断面寸法が同一の集成材についても断面解析を行う。ここで、部材の曲げ強度は、部材を一様な弾性体とみなして求める。

下側が引張りの曲げモーメント M を受ける GBM における最下段の製材断面または集成材における最下段のラミナ断面の引張縁に生じる曲げ応力 σ_{ben} について、 σ_{ben} と曲げ強度 F_{bmn} の関係である(3.14)式に代入して M について求めると、最下段製材または最下段ラミナの引張縁が(3.14)式の条件を満たす部材の曲げ強度 M_{an} は(3.15)式で表現できる。

$$\frac{\sigma_{ben}}{F_{bmn}} = 1 \quad (3.14)$$

$$M_{an} = F_{bmn} \cdot Z \quad (3.15)$$

ここで、 Z : 断面係数 ($=BH^2/6$) B : 部材の断面幅、 H : 部材の断面せいである。

GBM における最下段の製材断面または集成材における最下段のラミナ断面の引張縁に生じる垂直応力を単純和の組み合わせ応力で評価するとき、曲げ応力 $c\sigma_{ben}$ と曲げ強度 F_{bmn} および引張応力 $c\sigma_{ten}$ と引張強度 F_{tmn} との関係である(3.16)式に代入して M について求めると、最下段製材または最下段ラミナの引張縁が(3.16)式の条件を満たす部材の曲げ強度 $SUMM_{an}$ は(3.17)式で表現できる。

$$\frac{c\sigma_{ben}}{F_{bmn}} + \frac{c\sigma_{ten}}{F_{tmn}} = 1 \quad (3.16)$$

$$SUM M_{an} = \frac{F_{bmn} \cdot (EI)_e}{E_n(h_n/2 + g_n/\gamma_t)} \quad (3.17)$$

ここで、 $\gamma_t = F_{tmn}/F_{bmn}$ 、 $(EI)_e$: GBM 断面の等価曲げ剛性、 E_n は最下段の製材の曲げヤング係数、 h_n は最下段の製材のせい、 g_n は最下段の製材の図心から中立軸までの距離である。

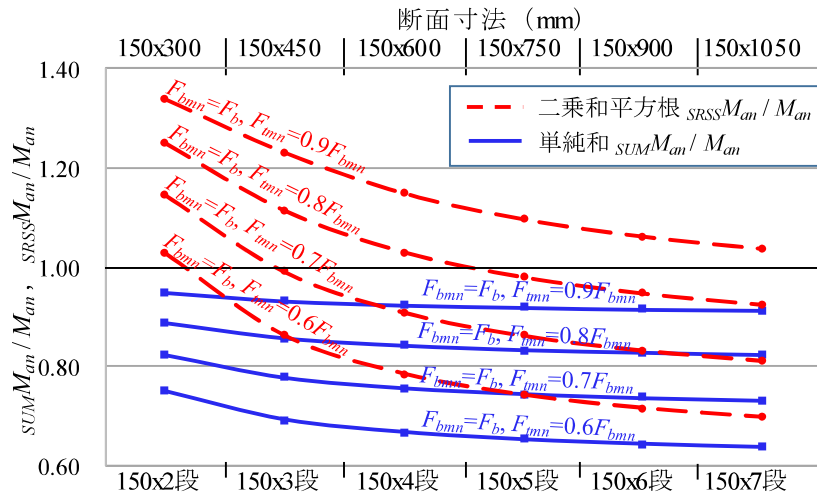
一方、GBM における最下段の製材断面または集成材における最下段のラミナ断面の引張縁に生じる垂直応力を二乗和平方根の組み合わせ応力で評価するとき、曲げ応力 $c\sigma_{ben}$ と曲げ強度 F_{bmn} および引張応力 $c\sigma_{ten}$ と引張強度 F_{tmn} との関係である(3.18)式に代入して M について求めると、最下段製材または最下段ラミナの引張縁が(3.18)式の条件を満たす部材の曲げ強度 $SRSS M_{an}$ は(3.19)式で表現できる。

$$\sqrt{\left(\frac{c\sigma_{ben}}{F_{bmn}}\right)^2 + \left(\frac{c\sigma_{ten}}{F_{tmn}}\right)^2} = 1 \quad (3.18)$$

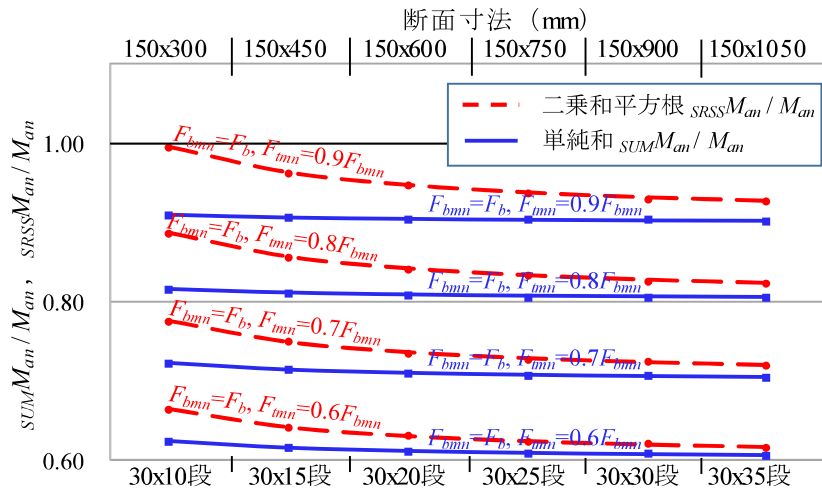
$$SRSS M_{an} = \frac{F_{bmn} \cdot (EI)_e}{E_n \sqrt{(h_n/2)^2 + (g_n/\gamma_t)^2}} \quad (3.19)$$

ここで、平成 12 建設省告示第 1452 号に定められているスギ製材の基準強度（以下、単に基準強度と呼ぶ）には安全率が設定されていると考えられるが、ここでは評価方法による差異を検討するために最下段製材の曲げ強度 F_{bmn} には JAS 機械等級区分 E70 の曲げ基準強度 $F_b = 29.4 \text{ N/mm}^2$ を用い、引張強度 F_{tmn} には $0.9F_{bmn}$ 、 $0.8F_{bmn}$ 、 $0.7F_{bmn}$ 、 $0.6F_{bmn}$ と変動させて検討する。また、集成材のラミナの曲げ強度と引張強度は製材と同じ値とする。

図 3.5(a)と図 3.5(b)に GBM と集成材の組み合わせ応力を用いたときの部材の曲げ強度 $SUM M_{an}$ 、 $SRSS M_{an}$ と、曲げ応力と曲げ強度のみで評価するときの部材の曲げ強度 M_{an} との比 ($SUM M_{an} / M_{an}$ 、 $SRSS M_{an} / M_{an}$) をそれぞれ示す。二乗和平方根とする場合、検討の範囲において同じ断面寸法の GBM と集成材で部材の曲げ強度の差異は、単純和とする場合に比べて大きい。GBM の曲げ強度は、段数が少なく二乗和平方根とする場合、すなわち、曲げ成分の割合が大きい GBM のとき非常に高い値となり、曲げ応力のみで評価する GBM の曲げ強度を大きく上回るものもある。一方、集成材は小さい断面寸法においても引張成分が支配的であるため、評価方法の差異が比較的小さい。これより、各断面寸法を統一的に評価するためには GBM の曲げ強度は単純和の組み合わせ応力を用いる評価が適していると言える。



(a) GBM (製材寸法 : 150x150 mm)



(b) 集成材 (ラミナ寸法 : 150x30 mm)

図 3.5 組み合わせ応力を用いる部材の曲げ強度と断面寸法の関係

3.6 断面に生じる垂直応力の分布に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響

本節では、前節で述べた組み合わせ応力を用いて GBM の曲げ強度を評価する方法の有効性について検証するため、組み合わせ応力を用いる方法とは別の方法として、最弱リンク理論の基本的な式から段数に応じて GBM の断面に生じる垂直応力の分布が異なることを最下段製材における引張縁の引張強度に導入して GBM の曲げ強度を評価する方法を用いて断面解析を行い、GBM の曲げ強度を求める。また、GBM の力学的な性質について考察するため、GBM と断面寸法が同一の無垢材と集成材についても断面解析を行う。

図 3.6 に 3 段重ね GBM の下側が引張の曲げモーメントを受けるときの GBM における最下段の製材断面に生じる垂直応力の分布を例として示す。GBM の中立軸の位置から最下段製材の引張縁までの距離と最下段製材のせい h_n との比 c は、集成材と同様に 1.0 を超える値 ($1 < c$) となる。しかし、構成材の断面せいにより段数が異なるため、GBM における最下段の製材断面に生じる垂直応力は、断面寸法が同じ集成材における最下段のラミナ断面に生じる垂直応力（図 3.2(b)）に比べて構成材内（引張縁と最下段構成材の接着層）の垂直応力の大きさの差が大きく、集成材における最下段のラミナ断面に生じる垂直応力は GBM における最下段の製材断面に生じるそれに比べてより一様に近い大きさの分布となる。

表 3.2 に検討する GBM と無垢材および集成材の構成を示す。GBM は 150 mm 角の製材を用いた 2 段～7 段重ね、無垢材は 150×300 mm～150×1050 mm の単一材、集成材は幅 150 mm、せい 30 mm ラミナを用いた 10 段～35 段重ねとする。GBM の各製材の曲げヤング係数 E_i は、JAS 機械等級区分構造用製材 E70 の曲げヤング係数の基準値である 6900 N/mm²

h_n : 最下段製材のせい

c : 中立軸の位置から最下段製材の引張縁までの距離と h_n との比

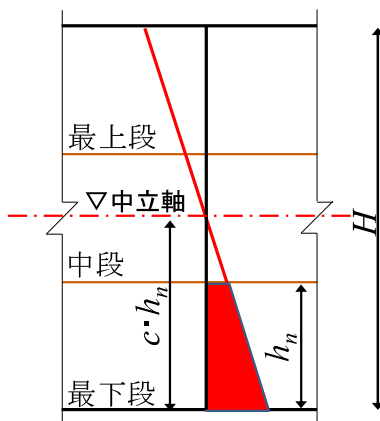




















図 3.6 GBM 断面に生じる垂直応力の分布 ($[1.0 < c]$, 3 段重ねの場合)

を用いる。無垢材と集成材の各ラミナの曲げヤング係数 E_i は、GBM との比較のために製材と同じ値を用いる。

図 3.7 に構成材の曲げ強度が同じで部材の断面寸法も同一とし、応力分布を表す定数を $k_\sigma=4.8$ とするときの部材の断面寸法と(3.3)式で求まる断面に生じる垂直応力の分布に関する寸法効果係数 K_σ の関係を示す。ここで、平成 12 建設省告示第 1452 号に定められているスギ製材の引張基準強度 F_t および曲げ基準強度 F_b の比 γ は、 $\gamma=F_t/F_b=0.6$ となっている。この引張強度と曲げ強度の比 $\gamma=0.6$ に対応する応力分布を表す定数 k_σ の値は $k_\sigma=4.8$ となる^{3.7)}。

GBM と集成材および無垢材の断面に生じる垂直応力の分布に関する寸法効果係数 K_σ の値は、GBM の断面寸法が 150×300 mm (2 段) のとき断面寸法が同じ集成材の 1.31 倍、無垢材の 0.87 倍、GBM の断面寸法が 150×1050 mm (7 段) のとき断面寸法が同じ集成材の 1.11 倍、無垢材の 0.69 倍であり、 K_σ の値は断面寸法が同じ集成材よりも大きく、断面寸法が同じ無垢材よりも小さい。断面寸法に関わらず無垢材の K_σ の値が一定であるのに対し、GBM と集成材は断面寸法が大きくなるほど漸近的に K_σ の値が小さくなる。断面寸法が大きくなるにつれて K_σ の値が小さくなる割合は、断面寸法が同じ集成材に比べて大き

表 3.2 同じ断面寸法の無垢材と GBM および集成材の構成

断面寸法 (mm)		150x300	150x450	150x600	150x750	150x900	150x1050
無垢材	模式図						
	段数 n	2	3	4	5	6	7
GBM	模式図						
	段数 n	10	15	20	25	30	35
集成材	模式図						
	段数 n	10	15	20	25	30	35

製材寸法 : 150×150 mm, ラミナ寸法 : 150×30 mm,
 $E_i = 6900$ N/mm², $F_{bi} = 29.4$ N/mm²

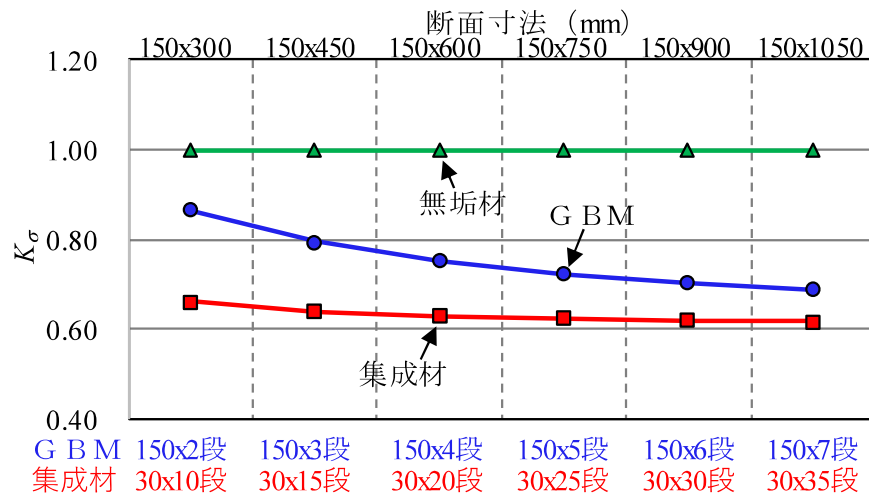


図 3.7 断面寸法と垂直応力の分布に関する寸法効果係数 K_σ の関係

く、GBM の部材の断面寸法の増加にともなう K_σ の値の低下の傾向は、集成材の部材の断面寸法の増加にともなう K_σ の値の低下の割合よりも大きい。

図 3.8 に部材に曲げモーメントが作用して断面に垂直応力が生じるとき、最下段構成材の引張縁の引張強度に対して、(3.3)式で求まる垂直応力の分布に関する寸法効果係数 K_σ を考慮するときの各断面寸法の GBM の曲げ強度 ${}_kM_{an}$ と、(3.15)式で求まる垂直応力の分布に関する寸法効果を見捨てる場合の各断面寸法の GBM の曲げ強度 M_{an} との比 (${}_kM_{an} / M_{an}$) を示す。ここで、 ${}_kM_{an}$ は GBM における最下段の製材断面または集成材における最下段のラミナ断面の引張縁に生じる曲げ応力 σ_{bn} と曲げ強度 F_{bn} の関係が(3.20)式となる場合の部材の曲げ強度であり、(3.21)式で表現できる。

$$\frac{\sigma_{bn}}{F_{bn} \cdot K_\sigma} = 1 \quad (3.20)$$

$${}_kM_{an} = F_{bn} \cdot K_\sigma \cdot Z \quad (3.21)$$

なお、 Z : 断面係数 ($=BH^2/6$) B : 部材の断面幅、 H : 部材の断面せいである。引張強度と曲げ強度の比は、平成 12 建設省告示第 1452 号に定められているスギ製材の引張基準強度 F_t および曲げ基準強度 F_b の比の $\gamma = F_t / F_b = 0.6$ とする。また、応力分布を表す定数 k_σ の値は $\gamma = 0.6$ に対応する $k_\sigma = 4.8$ とする^{3.7)}。図 3.8 には 3.5 節で示した(3.17)式で求まる断面に生じる垂直応力について引張成分と曲げ成分の単純和の組み合わせ応力を用いる場合の GBM の曲げ強度 $SUMM_{an}$ と、(3.15)式で求まる曲げ応力と曲げ強度のみで評価する場合の部材の曲げ強度 M_{an} との比 ($SUMM_{an} / M_{an}$) をあわせて示す。なお、既に図 3.7 で示した通り、本法では無垢材の曲げ強度に垂直応力の分布に関する寸法効果は現れないため、無垢材の

検討を省略する。

検討の範囲において、各断面寸法の GBM の最下段製材における引張縁の引張強度に対して垂直応力の分布に関する寸法効果係数を考慮する GBM の曲げ強度 kM_{an} / M_{an} と、単純和の組み合わせ応力を用いる GBM の曲げ強度 $SUMM_{an} / M_{an}$ との差異は、集成材のそれに比べて大きいものの、近い値の GBM の曲げ強度が得られることが分かった。また、垂直応力の分布に関する寸法効果係数を考慮する GBM の曲げ強度 kM_{an} / M_{an} の GBM の部材の断面寸法の増加にともなう部材の曲げ強度の低下の割合は、単純和の組み合わせ応力を用いる GBM の曲げ強度 $SUMM_{an} / M_{an}$ に近い傾向となる。一方、各断面寸法の集成材の kM_{an} / M_{an} と $SUMM_{an} / M_{an}$ の差異は小さく、集成材の断面寸法の増加にともなう集成材の曲げ強度の低下の割合も似通っている。

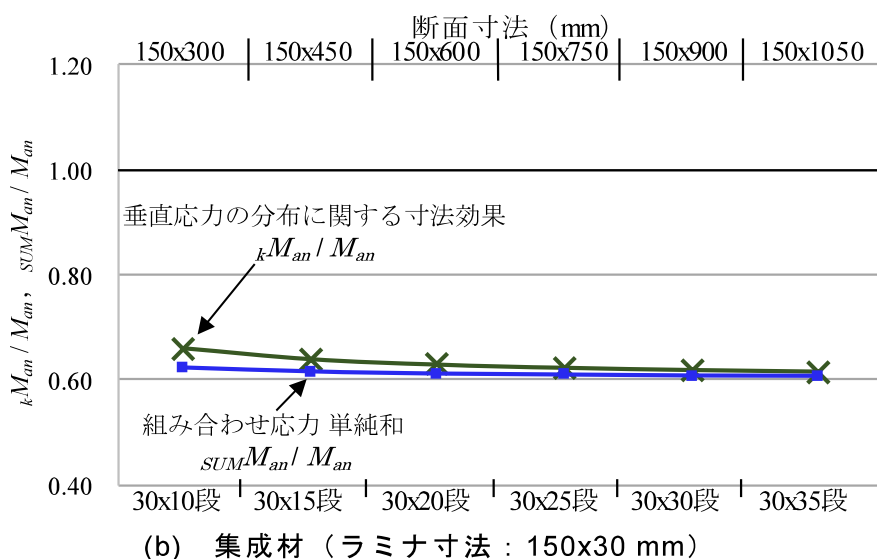
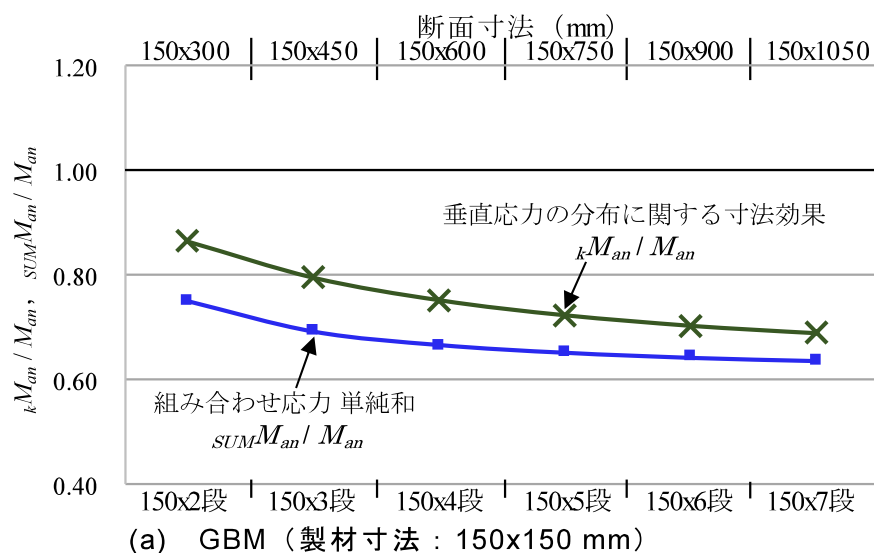


図 3.8 垂直応力の分布に関する寸法効果を考慮する部材の曲げ強度と断面寸法の関係

最弱リンク理論の基本的な式から段数に応じて GBM の断面に生じる垂直応力の分布が異なることを最下段製材における引張縁の引張強度に導入して GBM の曲げ強度を評価する方法は、各製材の曲げヤング係数がほぼ同じで部材が一様な弾性体に近いとみなせる場合は有用であるが、設計において GBM の構成材の曲げヤング係数を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、異なる曲げヤング係数の構成材が混在することになる。この場合、各製材の曲げヤング係数の差異により中立軸の位置や断面に生じる垂直応力の分布が変化することで GBM の曲げ強度に与える影響をこの方法で考慮することが難しい。一方で、単純和の組み合わせ応力を用いた GBM の曲げ強度の評価方法ではこれらの影響を考慮することができる。したがって、各製材の曲げヤング係数に差異がある場合は、単純和の組み合わせ応力を用いた GBM の曲げ強度の評価方法が有用である。

3.7 まとめ

本章では、GBM の製材の段数に応じて各製材の断面に生じる垂直応力の分布が GBM の曲げ強度に影響を考察するため、集成材と同一の等価断面法に基づく力学モデル、すなわち、GBM を構成する各製材を一様な弾性体と見なし GBM における最下段製材の断面に生じる垂直応力について、引張成分と曲げ成分の組み合わせ応力を用いた GBM の曲げ強度の評価について述べた。

断面に生じる垂直応力について、引張成分と曲げ成分の組み合わせ応力を用いたときの引張成分と曲げ成分の比率を把握するための断面解析を行った。また、引張成分と曲げ成分の組み合わせ応力を用いたときの引張成分と曲げ成分を単純和とする場合と、二乗和平方根とする場合でどちらの方法が GBM の曲げ強度の評価に適しているかについて考察するための断面解析を行った。加えて、GBM の力学的な性質について考察するため、GBM と断面寸法が同一の集成材についても解析を行った。さらに、GBM の曲げ強度の評価に用いる方法の有用性を考察するため、集成材と同一の力学モデルを用いて GBM の曲げ強度を求める方法の別法として、最弱リンク理論の基本的な式から製材の引張強度が曲げ強度よりも小さいことと、段数に応じて部材の断面に生じる垂直応力の分布が異なることを部材の引張縁の引張強度に対して導入する方法を用いて断面解析を行った。加えて、GBM の力学的な性質について考察するため、GBM と断面寸法が同一の無垢材と集成材についても断面解析を行った。以下に得られた知見を示す。

- ①GBM における最下段の製材断面の引張縁に生じる垂直応力の曲げ成分の割合は、GBM と集成材のいずれも段数の増加に応じて減少するが、同じ断面寸法の GBM と集成材では引張成分と曲げ成分の割合が大きく異なっている。150×450（3 段）以下の GBM における最下段の製材縁では曲げ成分の割合が 33%以上と比較的曲げ成分の割合が大きく、150×1050（7 段）の段数が多い GBM ですら曲げ成分の割合が 14%もあるのに対し、集成材の最下段ラミナ縁では 150×300（10 段）の小さい断面寸法においても曲げ成分の割合は 10%であり、GBM に比べて引張成分の割合が支配的である。なお、GBM の最下段製材の断面引張縁に生じる垂直応力の曲げ成分の割合は、段数の逆数と等しい。
- ②組み合わせ応力を用いるときの GBM の曲げ強度は、GBM の最下段製材の引張縁に生じる垂直応力の曲げ成分と引張成分の割合と、引張強度と曲げ強度の関係による差異があり、二乗和平方根の組み合わせ応力を用いたときの GBM の曲げ強度は特に段数が少ない、すなわち曲げ成分の割合が大きい GBM のとき非常に高い値となり、曲げ応力のみで評価する GBM の曲げ強度を大きく上回るものもある。そのため、GBM の各断面寸法を統一的に評価するためには単純和の組み合わせ応力を用いた GBM の曲げ強度の評価が適している。
- ③検討の範囲において、各断面寸法の GBM の最下段製材における引張縁の引張強度に対して垂直応力の分布に関する寸法効果係数を考慮する GBM の曲げ強度は、単純和のみ組み合わせ応力を用いる GBM の曲げ強度に近い値が得られることが分かった。最弱リンク理論の基本的な式から段数に応じて GBM の断面に生じる垂直応力の分布が異なることを最下段製材における引張縁の引張強度に導入して GBM の曲げ強度を評価する方法は、各製材の曲げヤング係数がほぼ同じで部材が一様な弾性体に近いとみなせる場合は有用であるが、各製材の曲げヤング係数に差異がある場合は、単純和の組み合わせ応力を用いた GBM の曲げ強度の評価方法が有用である。

3 章 参考文献

- 3.1) 中井孝：構造用製材の強度性能, JATAFF ジャーナル, 16(3), pp. 6-11, 1993.
- 3.2) 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
- 3.3) 森拓郎, ほか 2 名：破壊過程を再現した集成材の曲げ強度推定モデルの提案と実験による検証, 日本建築学会構造系論文集 第 541 号, pp. 51-57, 2001 年 3 月

- 3.4) 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
- 3.5) (公財)日本住宅・木材技術センター: 構造用木材の強度試験マニュアル, pp. 124-125, 2011.3
- 3.6) 中村昇: 木質構造のここが分からない第 1 回-寸法効果その 1-, Journal of timber engineering 59, vol. 17, No. 3, pp. 60-63, 2004. 5
- 3.7) 中村昇: 木質構造のここが分からない第 2 回-寸法効果その 2-, Journal of timber engineering 60, vol. 17, No. 4, pp. 87-92, 2004. 7

4 章 GBM の断面モデルと製材の強度

4章 GBMの断面モデルと製材の強度

4.1 はじめに

本論の5～7章の検討において断面解析に用いるGBMの断面モデルは、一般的な製材の曲げ性能の評価と同様に、部材の断面内を一様な弾性体とみなしたGBMの断面モデル（以下、一様断面モデル）と、集成材と同様に等価断面法に基づいて、GBMを構成する各製材の断面内を一様な弾性体と見なして簡略化し、各製材の曲げヤング係数の相違のみを考慮したGBMの断面モデル（以下、等価断面モデル）およびGBMの構成材（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の関係を既往の研究を参考にしてモデル化し、その成熟材要素と未成熟材要素を組み合わせたGBMの断面モデル（以下、要素断面モデル）である。本章では、これらのGBMの断面モデルについて述べる。なお、いずれのGBMの断面モデルも接着層は極めて薄いため、接着剤の層の変形は無視し、かつ十分に大きい強度を有するものとし（製材相互の接着界面にずれが生じない）、GBM断面の平面保持が成り立つものとする。

また、GBMの曲げ強度を考察する上で、構成材である製材の引張強度と曲げ強度がどのように設定されたものかが明らかになっている必要があることから、製材の引張基準強度と曲げ基準強度の設定に関する研究や、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整理し、5章と7章のGBMを構成する各製材を一様な弾性体とみなしたGBMの力学的な性質の検討で用いる引張強度と曲げ強度の設定と、6章のGBMの各製材内の成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異が、GBMの曲げ強度に及ぼす影響の検討に用いる強度について述べる。

4.2 一様断面モデル

一様断面モデルを用いたGBMの曲げ性能の評価について以下に示す。このモデルでは、GBMの曲げヤング係数は各構成材（製材）の曲げヤング係数の平均値と等しいものとしてGBM断面内を一様な弾性体とみなし、GBMの曲げ強度の評価は最下段製材の曲げ強度を用いる。曲げモーメント M がGBM断面に作用した際の引張縁の曲げ応力 σ_b は(4.1)式で表現できる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad (4.1)$$

ここで、 M ：曲げモーメント(N mm)、 Z ：GBMの断面係数(= $B \cdot H^2/6$) (mm³)、 B ：GBM

の断面幅 (mm) , H : GBM の断面せい (mm) である。

一方、GBM の曲げ剛性 EI は(4.2)式で表現できる。

$$EI = E_b \cdot I \quad (4.2)$$

ここで、 E_b : GBM の曲げヤング係数 (N/mm²) , I : GBM の断面二次モーメント ($=B \cdot H^3/12$)

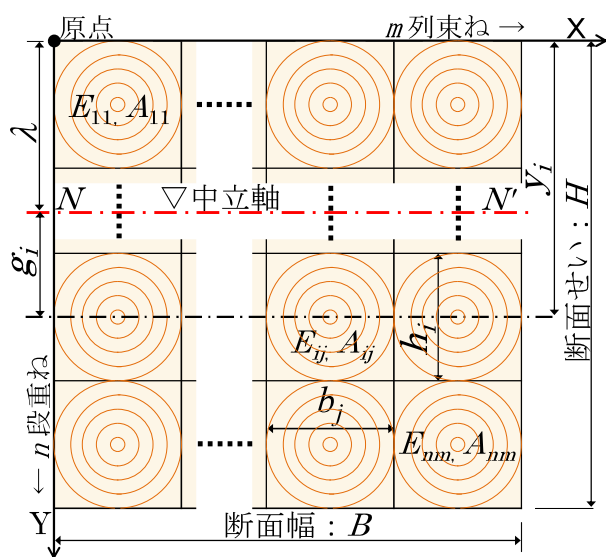
(mm⁴) である。なお、GBM の曲げヤング係数 E_b は各構成材 (製材) の曲げヤング係数の平均値と等しいものとする。

4.3 等価断面モデル

等価断面モデルを用いた GBM の曲げ性能の評価について以下に示す。このモデルでは、集成材と同一の力学モデルとして GBM を構成する各製材の断面内を一様な弾性体と見なし、各製材の曲げヤング係数の差異のみを考慮する。図 4.1 に製材を n 段重ね、 m 列束ねた GBM の断面を示す。GBM を構成する各製材を一様な弾性体と見なし、各製材が異なる曲げヤング係数 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(4.3)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(4.4)式で、中立軸と各製材芯の距離 g_i は(4.5)式で、原点 (最上段製材の圧縮縁) から中立軸までの距離 λ は(4.6)式で表現できる。

$$(EI)_e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{ij} \cdot I_{ij-NN'} \quad (4.3)$$

$$I_{ij-NN'} = I_{ij} + g_i^2 \cdot A_{ij} \quad (4.4)$$



- λ : 原点と中立軸との距離
- y_i : 原点と i 段の製材図心までの距離
- g_i : 中立軸から i 段の製材図心までの距離
- E_{ij} : i 段 j 列の製材の曲げヤング係数
- A_{ij} : i 段 j 列の製材の断面積
- h_i : i 段の製材せい
- b_j : j 列の製材幅

図 4.1 等価断面モデル

$$g_i = \lambda - y_i \quad (4.5)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{ij} \cdot A_{ij} \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{ij} \cdot A_{ij}} \quad (4.6)$$

ここで、 I_{ij} は i 段 j 列の製材の断面二次モーメント ($=b_j \cdot h_i^3/12$) (mm^4)、 b_j は j 列の製材幅、 h_i は i 段の製材せい、 y_i は原点から i 段製材芯までの距離 (mm) である。

このモデルでは、曲げモーメント M が GBM 断面に作用した際の i 段 j 列の製材引張縁における曲げ応力 σ_{beij} は(4.7)式で表現できる。

$$\sigma_{beij} = E_{ij} \frac{M}{(EI)_e} \left(y_i - \lambda + \frac{h_i}{2} \right) \quad (4.7)$$

4.4 要素断面モデル

4.4.1 製材の断面モデル

要素断面モデルを用いた GBM の曲げ性能の評価について以下に示す。このモデルでは、GBM の構成材（製材）内の成熟材と未成熟材の力学的な性質の差異を考慮する。図 4.2 に断面解析に用いる製材の断面モデルを示す。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（本論では 6.3 節で成熟材要素のヤング率 $_ME$ と未成熟材要素のヤング率 $_JE$ を $_ME = _JE$ 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）。加えて未成熟材要素には図芯の位置を与える。ここで、本論では実際には不均質な部材である製材の力学性能を、仮想の均質な（一様な）部材で表現する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するときの各要素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。

各製材内の成熟材と未成熟材の力学的性質の差異が GBM の曲げ強度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、各要素の繊維方向のヤング率と引張強度の設定を含め、単純なモデルを用いて断面解析を行う。また、未成熟材要素の範囲と位置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て取り扱う。ここで、付録 2 の付 2.1 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、6 章の要素断面モデルを用いた GBM の曲げ強度の評価では円形とする。

4.4.2 GBM の断面モデル

図 4.3 に製材を n 段重ね m 段束ねとし、未成熟材が各製材の中央にない場合の GBM の断面モデルを示す。 i 段 j 列の成熟材のヤング率を ${}^M E_{ij}$ 、未成熟材のヤング率を ${}^J E_{ij}$ としたとき、GBM 断面の等価曲げ剛性 ${}_{MJ}(EI)_e$ は(4.8)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 ${}^M I_{ij-NN'}$ は(4.9)式で、未成熟材の断面二次モーメント ${}^J I_{ij-NN'}$ は(4.10)式で、中立軸 (GBM 断面の図心) と成熟材図心との距離 ${}^M g_{ij}$ は

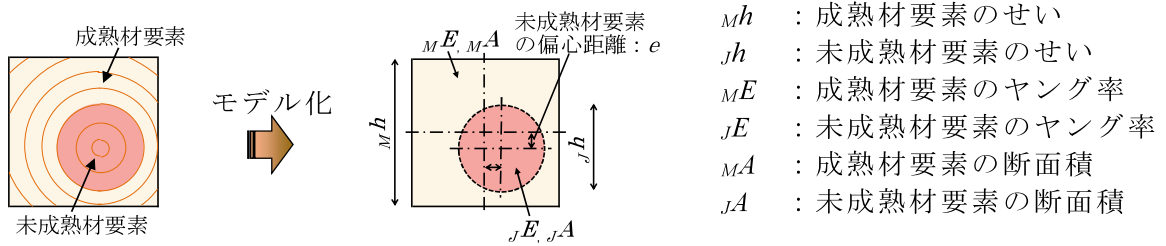


図 4.2 製材断面内の成熟材と未成熟材のモデル化

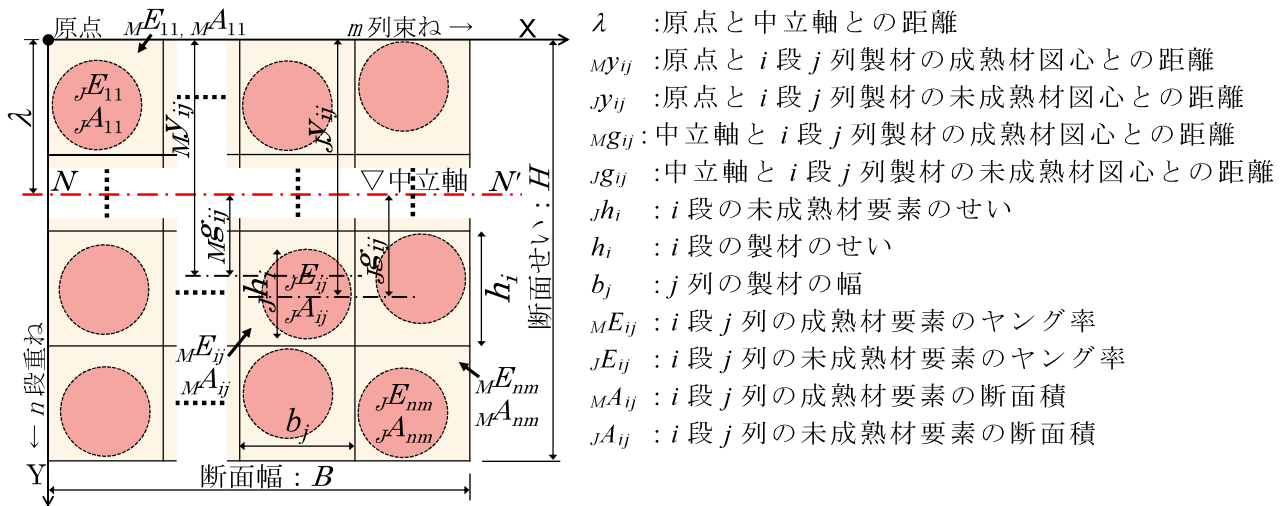


図 4.3 GBM の断面モデル

(4.11)式で、中立軸 (GBM 断面の図心) と未成熟材図心との距離 ${}^J g_{ij}$ は(4.12)式で、原点 (最上段製材の圧縮縁) から中立軸までの距離 λ は(4.13)式で表現できる。

$${}_{MJ}(EI)_e = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m {}^M E_{ij} \cdot {}^M I_{ij-NN'} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m {}^J E_{ij} \cdot {}^J I_{ij-NN'} \quad (4.8)$$

$${}^M I_{ij-NN'} = {}^M I_{ij} + {}^M g_{ij}^2 \cdot {}^M A_{ij} \quad (4.9)$$

$${}^J I_{ij-NN'} = {}^J I_{ij} + {}^J g_{ij}^2 \cdot {}^J A_{ij} \quad (4.10)$$

$${}^M g_{ij} = \lambda - {}^M y_{ij} \quad (4.11)$$

$${}^J g_{ij} = \lambda - {}^J y_{ij} \quad (4.12)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M E_{ij} \cdot M A_{ij} \cdot M y_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m J E_{ij} \cdot J A_{ij} \cdot J y_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M E_{ij} \cdot M A_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m J E_{ij} \cdot J A_{ij}} \quad (4.13)$$

ここで、 $M I_{ij}$ は i 段 j 列の成熟材の断面二次モーメント ($= b_j \cdot M h_i^3 / 12 - J I_{ij}$) (mm^4), $J I_{ij}$ は i 段 j 列の未成熟材の断面二次モーメント ($= \pi \cdot J h_i^4 / 64$) (mm^4), $M y_{ij}$ は原点から i 段 j 列の成熟材図心までの距離 (mm), $J y_{ij}$ は原点から i 段 j 列の未成熟材図心までの距離 (mm) である。

このモデルでは、下側が引張の曲げモーメント M が GBM 断面に作用したときの i 段 j 列の成熟材引張縁の引張応力 $M \sigma_{lej}$ は(4.14)式、未成熟材引張縁の引張応力 $J \sigma_{lej}$ は(4.15)式で表現できる。

$$M \sigma_{lej} = M E_{ij} \frac{M}{M J (EI)_e} (h_i \cdot i - \lambda) \quad (4.14)$$

$$J \sigma_{lej} = J E_{ij} \frac{M}{M J (EI)_e} \left(J y_{ij} - \lambda + \frac{J h_{ij}}{2} \right) \quad (4.15)$$

4.5 GBM 構成材（製材）の引張強度と曲げ強度

4.5.1 スギ製材の引張基準強度と曲げ基準強度

本論で取り扱う GBM の構成材（製材）は、JAS の機械等級区分法に準じて縦振動法^{4.1)}により計測したヤング係数により等級区分した、機械等級区分構造用製材 E70, E90, E110 に適合するスギ製材を対象とする。

木質構造基礎理論では^{4.2)}、機械等級区分構造用製材のヤング係数と強度の関係について、以下のように説明している。製材の機械等級区分法は、製材のヤング係数が強さと統計的に高い相関性を示す知見を応用した方法であり、あらかじめ樹種ごと、あるいは樹種群ごとのヤング係数と強度との関係を明らかにしておき、非破壊的に測定するヤング係数を基準として等級区分を行うものである。製材の JAS では、ヤング係数が 3900 N/mm^2 以上のものをヤング係数 2000 N/mm^2 毎に 6 等級 (E50, E70, E90, E110, E130, E150) に区分し、各等級の基準値 E_0 はヤング係数の中間値としている (例えば、E70 はヤング係数が 5900 N/mm^2 以上、 7800 N/mm^2 未満、ヤング係数の基準値は $E_0 = 6900 \text{ N/mm}^2$ である)。スギ製材の基準強度(以下、単に基準強度と呼ぶ)である引張基準強度 F_t および曲げ基準強度 F_b は、平成 12 建設省告示第 1452 号に各等級区分内の F_t および F_b は一定として定められている。 F_t および F_b と曲げヤング係数の基準値 E_0 の関係は図 4.4 のようになる。ここで、縦

振動法によって計測したヤング係数は曲げヤング係数と同等とする。

スギ製材の基準強度では、図 4.4 に示す通り各機械等級内の引張基準強度 F_t と曲げ基準強度 F_b の比は $\gamma = F_t/F_b = 0.6$ となっている。これは、木材強度・木質構造研究会の実大のスギ製材を用いた引張試験と曲げ試験の結果^{4.3)}から、両強度の 95% 下限値の比 γ として $\gamma = 0.64$ が得られたことに基づいている^{4.4)}。この強度の差異は主にそれぞれの断面に生じる垂直応力分布の相違の影響により生じたものと考えられる。なお、図 4.5 に示すように、両試験で試験体の寸法が異なっているため、 γ には断面内の垂直応力分布の影響に加えて、引張試験体の加力点間と曲げ試験体のロードスパンの体積に関する寸法効果の影響が含まれていると考えられる。しかしながら、現時点ではこれらの試験結果における断面内の垂直応力分布と体積のそれぞれの影響を明確に分離することは困難である。なお、断面内の

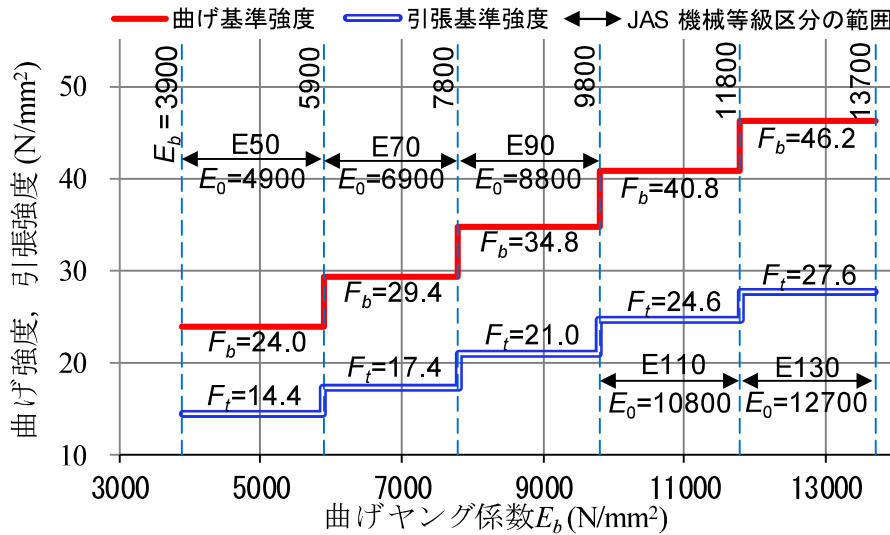


図 4.4 引張基準強度・曲げ基準強度と曲げヤング係数の関係

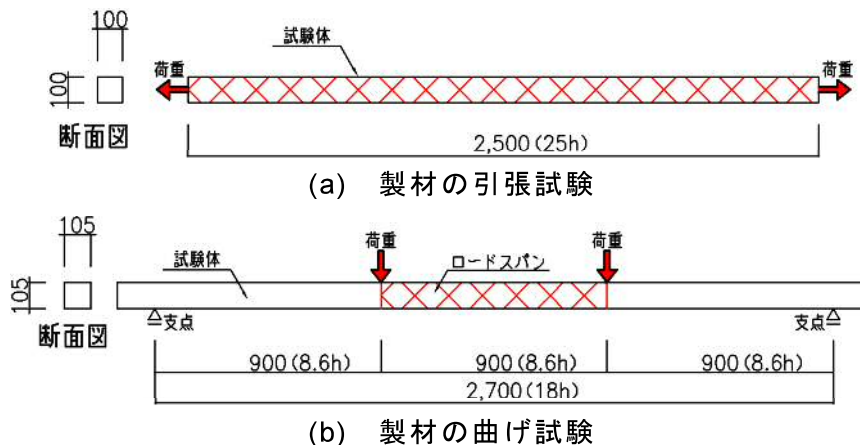


図 4.5 文献 4.3 の試験体寸法

垂直応力分布の影響は寸法効果の一種と考えることもできるが、本論ではこれを引張強度と曲げ強度の比として扱い、体積に関する寸法効果については、7章で検討する。

一方、引張試験の試験体の断面せいと断面幅は 100 mm で、曲げ試験の試験体のそれらの 105 mm とほぼ同じであるのに対し、引張試験体の加力点間距離は 2,500 mm、曲げ試験体のロードスパンの 900 mm の約 2.5 倍、体積比は引張試験体の加力点間距離：曲げ試験体のロードスパン=25.0：9.9 であり、引張試験体と曲げ試験体の体積の差がかなり大きいことから、両者の各寸法が同じときの製材の引張強度と曲げ強度の差は、木材強度・木質構造研究会の試験結果よりも小さくなる、すなわち、 γ は $\gamma=0.64$ よりも大きい値になることが示唆される。

4.5.2 スギ製材の線形補間引張基準強度と線形補間曲げ基準強度

前節で、製材の引張基準強度および曲げ基準強度と曲げヤング係数の基準値の関係について述べたが、部材の構造設計において各等級区分内の強度を一定とすることは、より安全側の評価となる。しかし、真の引張強度および曲げ強度と曲げヤング係数には相関性が成り立ち、真の引張強度および曲げ強度は法令で定められている基準強度を曲げヤング係数により補間した値に近いと考えられる。そこで、5章と7章の GBM を構成する各製材を一様な弾性体とみなした GBM の力学的な性質の検討では、これらの強度を用いる。

本論では製材の引張強度および曲げ強度について、製材の曲げヤング係数を用いて線形補間した値を線形補間引張基準強度 f_t 、線形補間曲げ基準強度 f_b と呼ぶ。図 4.6 に線形補間の方法を示す。JAS の各機械等級区分の曲げヤング係数の下限の閾値における強度を各

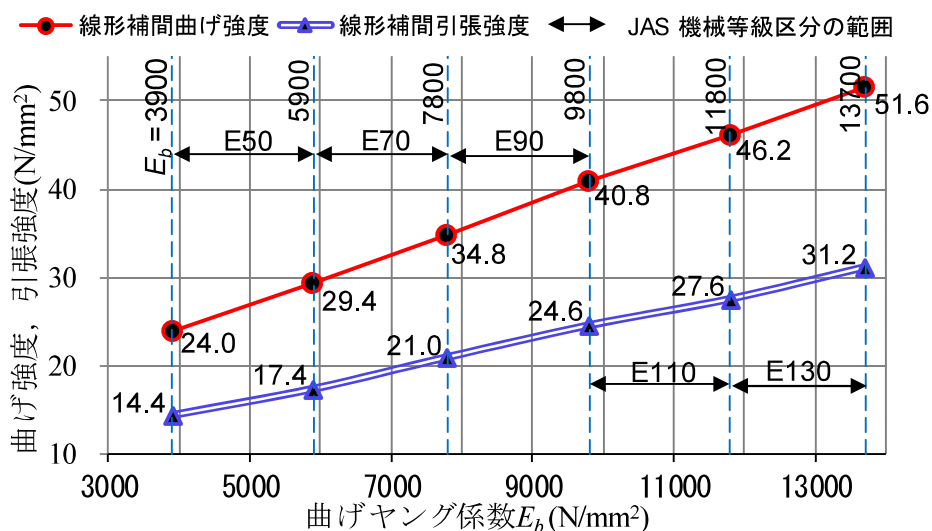


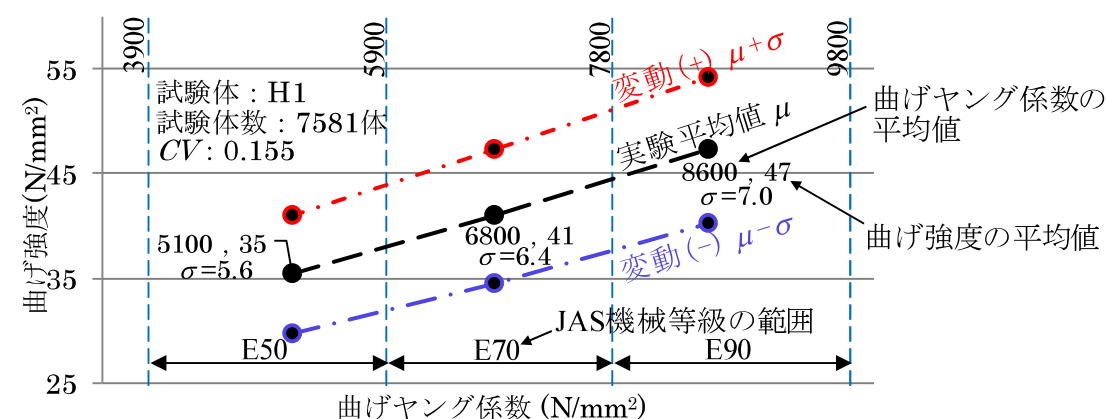
図 4.6 線形補間引張基準強度・線形補間曲げ基準強度と曲げヤング係数の関係

機械等級区分の基準強度の値とし、曲げヤング係数の閾値間の強度は製材の曲げヤング係数を基に直線補間して求める。

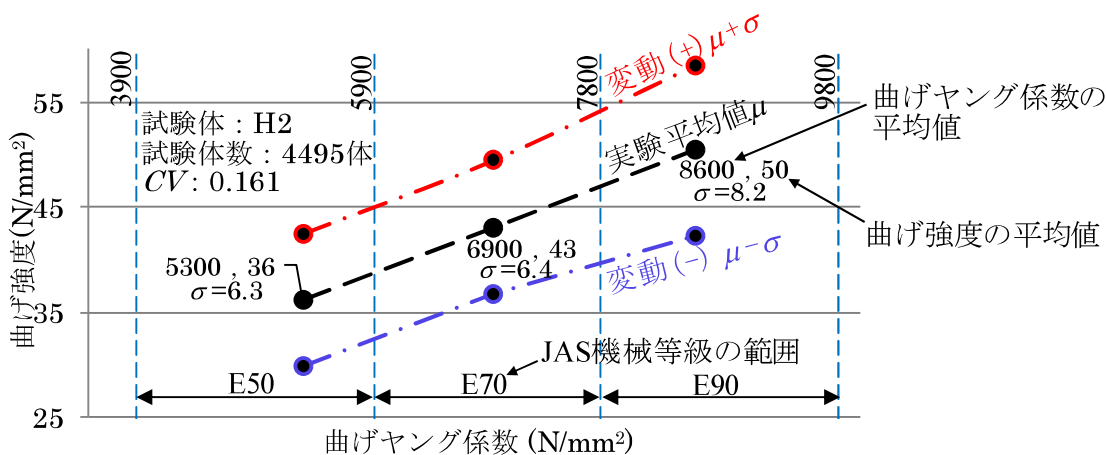
4.5.3 スギ製材の実験引張強度と実験圧縮強度および実験曲げ強度

木構造振興(株)は、国内各地の JAS 製材に対する標準的な試験の結果を公開している^{4.5)}が、このうち機械等級区分によるスギ製材の曲げ試験と引張試験および圧縮試験で得られた各強度とヤング係数の関係について整理する。ここで、それぞれの強度を製材の実験引張強度 eF_t 、実験圧縮強度 eF_c 、実験曲げ強度 eF_b と呼ぶ。

図 4.7 は、前述の曲げ試験で得られた実大製材の実験曲げ強度の平均値と曲げヤング係数の平均値との関係^{4.5)}を、筆者が図化したものである。図 4.7(a)に断面寸法が比較的小さく、正角材の H1 試験体（短辺・長辺寸法とも 90~135 mm）を、図 4.7(b)に平角材の H2 試験体（短辺寸法 105~120 mm，長辺寸法 150~300 mm）を示す。また、各図には標準偏差 ($\mu \pm \sigma$, μ : 平均値, σ : 標準偏差) を併せて示す。図に示すように各機械等級区分の H1



(a) H1 試験体（短辺長辺とも 90~135mm）



(b) H2 試験体（短辺 105~120mm，長辺 150~300mm）

図 4.7 実大製材の曲げ実験強度と曲げヤング係数の関係^{4.5)}

試験体の実験曲げ強度の平均値は、H2 試験体のそれらに比べて約 5%小さい値となっていることが分かる。これに加えて、H1 試験体と H2 試験体の変動係数 $CV(=\sigma/\mu)$ の値の差は 0.006 であり、H2 試験体の変動係数は H1 試験体のそれに比べて僅かに大きい値となる。一般に、木材は寸法効果により部材の寸法（体積）が大きくなるにつれて引張強度および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、強度の低下の一つの要因である部材内に存在する欠点の影響とは別に、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、これは未成熟材の引張強度または圧縮強度が、成熟材のそれらよりも低いこと^{4.6)}の影響もあることを示唆していると考えられる。

図 4.8 は短辺寸法 36 mm 以上、長辺寸法 90 mm 以上の試験体の標準的な引張試験で得られた実験引張強度の平均値と引張ヤング係数の平均値との関係^{4.5)}を、図 4.9 は短辺寸法 36 mm 以上、長辺寸法 90 mm 以上の試験体の標準的な圧縮試験で得られた実験圧縮強度の平均値と圧縮ヤング係数の平均値との関係^{4.5)}を筆者が図化したものである。ここで、繊維方向の曲げのヤング係数と引張ヤング係数および圧縮ヤング係数が同じとみなす。各機械等級区分の実験引張強度の平均値と、各機械等級区分の実験圧縮強度の平均値はいずれも図 4.7 に示す実験曲げ強度の平均値に比べて約 55%小さいことが分かる。これは、曲げモーメントのみが部材に作用すれば、断面内で垂直ひずみが最大となる圧縮・引張縁付近が破壊の起点となるものが多いのに対して、引張力や圧縮力が作用する場合は、垂直応力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、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ことが多いためであると考えられる。

なお、4.2 節で述べた通り、製材の JAS における各等級区分内の引張基準強度 F_t と曲げ基準強度 F_b の比は $\gamma=F_t/F_b=0.6$ 、木材強度・木質構造研究会の実大のスギ製材を用いた引張試験と曲げ試験結果^{4.3)}から、両強度の 95%下限値の比は $\gamma=0.64$ 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。

一方、圧縮試験体と引張試験体の変動係数 CV の差は 0.161、圧縮試験体と試験体寸法の近い H1 曲げ試験体の変動係数の差は 0.062 であり、引張試験体や曲げ試験体の変動係数は、圧縮試験体のそれに比べてかなり大きい値となる。これは、先に述べた垂直応力の分布の影響に加えて、引張力が作用するときの破壊性状が、圧縮力が作用するときの破壊性状に比べて脆性的な破壊となることが主な要因と考えられる。

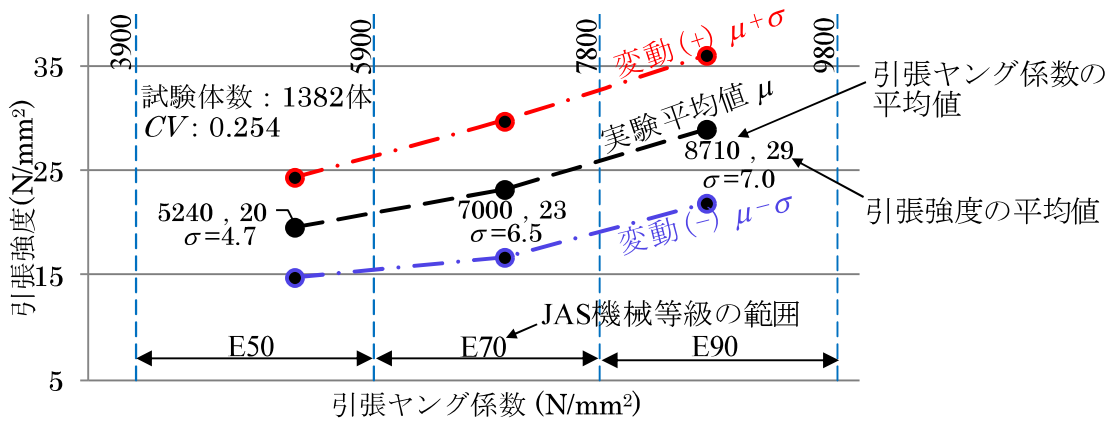


図 4.8 実大製材の引張実験強度と引張ヤング係数の関係^{4.5)}

(短辺 36mm 以上でかつ長辺 90mm 以上の試験体)

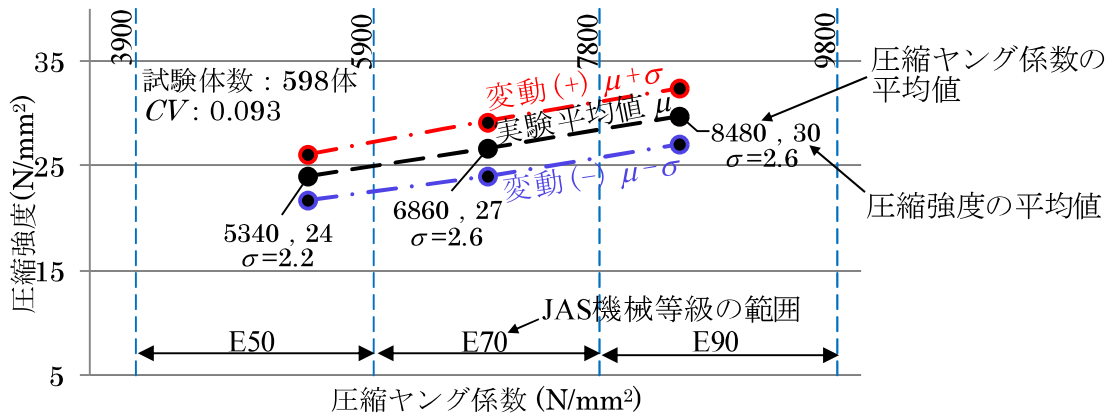


図 4.9 実大製材の圧縮実験強度と圧縮ヤング係数の関係^{4.5)}

(短辺 36mm 以上でかつ長辺 90mm 以上の試験体)

4.5.4 成熟材要素と髓位置の未成熟材要素のヤング率と引張強度または圧縮強度

以下に、6章のGBMの各製材内の成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異が、GBMの曲げ強度に及ぼす影響の検討に用いる両材の引張強度または圧縮強度とヤング率の関係について述べる。成熟材要素と髓位置の未成熟材要素の繊維方向の引張強度または圧縮強度とヤング率の関係は、前節で示した実大製材の実験結果の平均値を基に設定する。また、成熟材要素と未成熟材要素のそれぞれの引張強度または圧縮強度とヤング率の関係は、図4.6の線形補間曲げ基準強度の強度とヤング係数の関係の比例形とする。ここで、成熟材要素の引張強度または圧縮強度を $M F$ 、未成熟材要素の髓位置の引張強度または圧縮強度を $J F_0$ と呼ぶ。

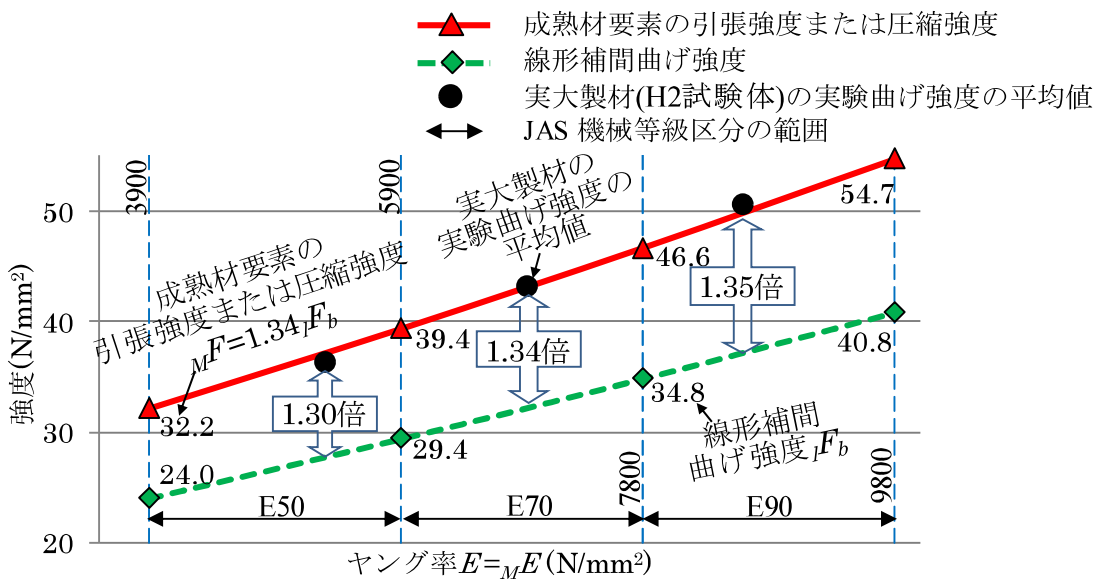
前節でも述べた通り、平角材のH2試験体（短辺寸法105~120mm，長辺寸法150~300

mm) の曲げ引張縁は、正角材の H1 試験体 (短辺・長辺寸法とも 90~135 mm) に比べて相対的に成熟材となるものが多く、製材の曲げ強度は、主に引張縁または圧縮縁が破壊の起点となって決定していると考えられる。そこで、本論では成熟材要素の引張強度または圧縮強度 M_F を実大製材の H2 試験体の曲げ試験から得られた曲げ実験強度の平均値 (図 4.7(b)) を基にして設定する。なお、これは断面せいの大きい GBM の 2 点載荷試験ではロードスパン (等曲げ区間) が製材の 2 点載荷試験よりも長くなるため、製材に比べて GBM の構成材 (製材) は材軸方向において長い区間で断面内に生じる垂直応力が大きくなる (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、実大製材の曲げ実験強度の平均値を成熟材要素の引張強度または圧縮強度とすることは、部材の長さ方向に対する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の影響による強度の低減を適切に考慮していないことになっており、実際の成熟材の引張強度または圧縮強度はこれよりも小さい値であると考えられる。

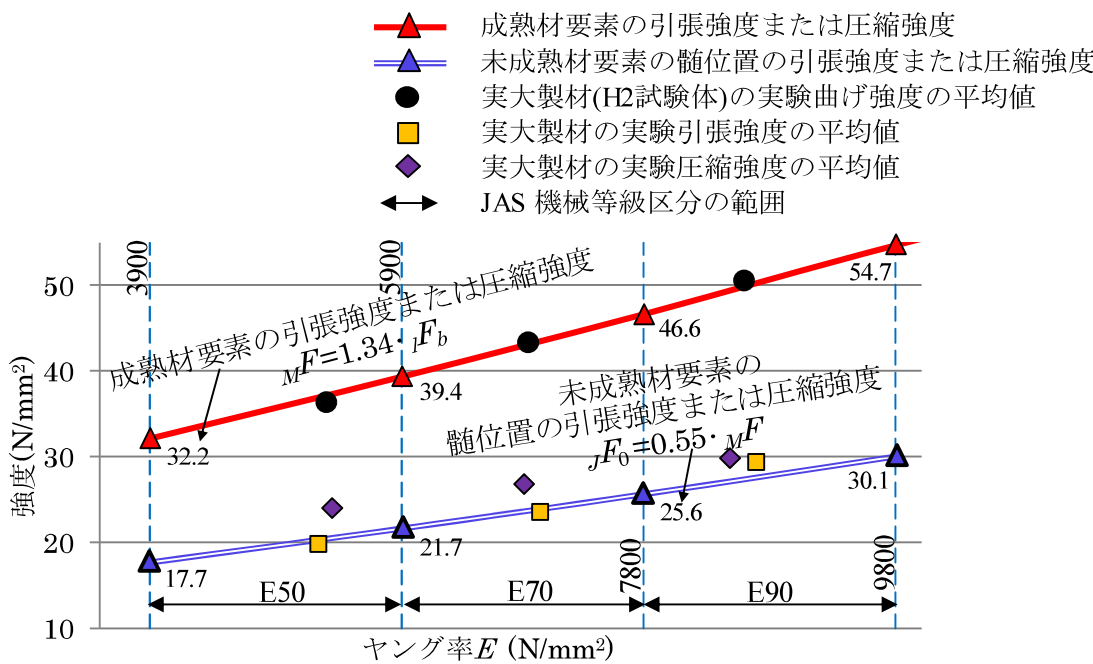
製材の引張強度または圧縮強度が曲げ強度に比べて小さくなる主な要因は、節や内部割れなどの欠点の存在と、未成熟材の力学的な性能の低さの影響と考えられる。しかしながら、それらの要因による引張強度または圧縮強度の低下の度合いを定量的に評価することは困難である。そこで、本論では引張強度または圧縮強度の低下を未成熟材の力学的な性能の低さの影響のみとみなし、未成熟材要素の髓位置の引張強度または圧縮強度 JF_0 は、実大製材の引張試験または圧縮試験から得られた実験強度の平均値 (図 4.8) を基にして設定する。なお、実際の髓付近の引張強度または圧縮強度の値は、節や内部割れなどの欠点の存在の影響を無視するこれよりも大きい値であると考えられる。

図 4.10 に成熟材要素と未成熟材要素の髓位置におけるヤング率と引張強度または圧縮強度の関係を示す。成熟材要素の引張強度または圧縮強度 M_F とヤング率の関係は、図 4.7(b) の実大製材の実験曲げ強度の平均値とほぼ等しくなる線形補間曲げ基準強度 $I F_b$ の 1.34 倍とし ($M_F = 1.34 I F_b$)、未成熟材要素の髓位置における引張強度または圧縮強度 JF とヤング率の関係は、図 4.8 の実大製材の実験引張強度の平均値とほぼ等しくなる成熟材要素の引張強度または圧縮強度 M_F の 0.55 倍としている ($JF = 0.55 M_F$)。

M^F : 成熟材要素の引張強度または圧縮強度
 J^F_0 : 未成熟材要素の髓位置の引張強度または圧縮強度
 ${}_lF_b$: 線形補間曲げ基準強度



(a) 成熟材要素の引張強度または圧縮強度



(b) 未成熟材要素の髓位置の引張強度または圧縮強度

図 4.10 成熟材要素と未成熟材要素(髓位置)のヤング率と引張強度または圧縮強度の関係

4.6 まとめ

本章では、本論の5～7章の検討において断面解析に用いるGBMの断面モデルとして、部材を一様な弾性体とみなした「一様断面モデル」と、GBMを構成する各製材の断面内を一様な弾性体と見なし、各製材の曲げヤング係数の相違のみを考慮した「等価断面モデル」およびGBMの構成材（製材）内の成熟材と未成熟材の力学的な性質の差異に着目し、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、その成熟材要素と未成熟材要素を組み合わせた「要素断面モデル」を示した。

また、GBMの構成材である製材について、製材のJASにおける機械等級区分構造用製材のヤング係数と基準強度の関係と、基準強度の設定に関する研究を整理し、5章と7章のGBMの各製材を一様な弾性体とみなしたGBMの力学的な性質の検討で用いる線形補間引張基準強度と線形補間曲げ基準強度と曲げヤング係数の関係を示した。さらに、JAS機械等級区分によるスギ製材に対する標準的な曲げ試験と引張試験および圧縮試験で得られた各強度とヤング係数の関係について整理し、6章のGBMの各製材内の成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異が、GBMの曲げ強度に及ぼす影響の検討に用いる両材の引張強度または圧縮強度とヤング率の関係を示した。

4章 参考文献

- 4.1) (公財)日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル，pp.59-63，2011.3
- 4.2) 日本建築学会：木質構造基礎理論，pp.37-46，2010.12
- 4.3) 木材強度・木質構造研究会：構造用木材－強度データの収集と分析，pp. 42～51，1988.3
- 4.4) 中井孝：構造用製材の強度性能，JATAFF ジャーナル，16(3)，pp. 6-11，1994.
- 4.5) 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
- 4.6) 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

5 章 GBMを構成する各製材の曲げヤング係数の差異が GBM の曲げ性能に及ぼす影響

5章 GBM を構成する各製材の曲げヤング係数の差異が GBM の曲げ性能に及ぼす影響

5.1 はじめに

GBM は、製材を構成材として積層した木質材料であり、設計において各製材を同一の機械等級区分の構成（以下、同一等級構成）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、異なる曲げヤング係数の製材が混在することになる。そのため、各製材の曲げヤング係数の差異による中立軸の位置の移動や、断面に生じる応力分布の変化により、GBM の曲げ強度や曲げ剛性に影響を与えることが考えられる。具体的には、各製材の曲げヤング係数が全て下限値の製材とした場合の GBM の曲げ強度よりも下回ることや、曲げヤング係数が小さい製材で GBM の曲げ強度が決定することも考えられる。

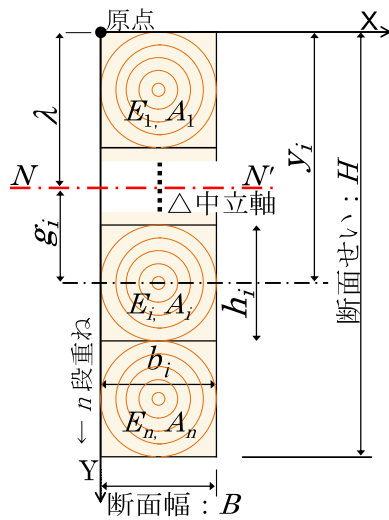
一方、GBM は、種々の曲げヤング係数の製材を自由に積層できる長所がある。例えば、曲げを受ける GBM において、最上段と最下段の製材を断面中央部よりも高い等級の製材とし、その他の製材を材料の調達が容易でかつ単価の安い、低い等級の製材とすることは、製造コストの低減につながる可能性がある。しかし、各製材を異なる機械等級区分の構成（以下、異等級構成）としたときに、同一等級構成の GBM の曲げ強度や曲げ剛性に対して大きく性能が低下したり、断面中央部の曲げヤング係数が小さい製材で GBM の曲げ強度が決定したりすることも考えられる。

そこで、本章では同一等級構成の GBM と、異等級構成の GBM について、製材内を一樣な弾性体と見なし、GBM を構成する各製材の曲げヤング係数の差異のみを考慮する GBM の等価断面モデルを用いた断面解析により、各製材の曲げヤング係数の差異が GBM の曲げ強度と曲げ剛性に及ぼす影響を検討する。加えて、実大 GBM の曲げ実験結果について、各製材の実際の曲げヤング係数を用いて実験結果の評価を行い、各製材の曲げヤング係数の差異が GBM の曲げ強度と曲げ剛性に及ぼす影響について考察する。

5.2 同一等級構成の GBM の曲げ強度と曲げ剛性

GBM の曲げ強度は、GBM を構成する各製材の曲げヤング係数の差異を考慮し、以下のように求める。なお、検討は 1 列の GBM を対象とし（図 5.1）、製材の曲げ強度は、GBM の定性的な傾向を詳細に把握するため、基準強度に比べて製材の曲げ強度と曲げヤング係数の関係に近いと考えられる線形補間曲げ基準強度 ${}_lF_b$ を用いる。

GBM を構成する各製材を一樣な弾性体と見なし、各製材が異なる曲げヤング係数 E_i と断面積 A_i 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(5.1)式で表現でき



- H : GBM の断面せい
- B : GBM の断面幅
- λ : 原点（最上段製材の圧縮縁）から中立軸（ $N-N'$ 軸）までの距離
- y_i : 原点から i 段製材図心までの距離
- g_i : 中立軸から i 段製材図心までの距離
- E_i : i 段の製材の曲げヤング係数
- A_i : i 段の製材の断面積
- h_i : i 段の製材の断面せい
- b_i : i 段の製材の断面幅

図 5.1 GBM の等価断面モデル（ n 段重ね×1 列）

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 $I_{i-NN'}$ は(5.2)式で、中立軸と各製材芯の距離 g_i は(5.3)式で、原点（最上段製材の圧縮縁）から中立軸までの距離 λ は(5.4)式で表現できる。

$$(EI)_e = \sum_{i=1}^n E_i \cdot I_{i-NN'} \quad (5.1)$$

$$I_{i-NN'} = I_i + g_i^2 \cdot A_i \quad (5.2)$$

$$g_i = \lambda - y_i \quad (5.3)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i} \quad (5.4)$$

ここで、 I_i は i 段の製材の断面二次モーメント（ $=b_i \cdot h_i^3/12$ ）（ mm^4 ）、 b_i は製材幅、 h_i は i 段の製材せい、 y_i は原点から i 段製材芯までの距離（ mm ）である。

i 段の製材の縁における曲げ応力 σ_{bei} と曲げ強度 ${}_lF_{bi}$ の関係である(5.5)式から曲げモーメント M について求めると、 σ_{bei} が ${}_lF_{bi}$ に達するときの曲げモーメント M_{ai} は(5.6)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 の曲げ強度 M_a とする。

$$\sigma_{bei} / {}_lF_{bi} = 1 \quad (5.5)$$

$$M_{ai} = \frac{{}_lF_{bi}(EI)_e}{E_i(y_i - \lambda + h_i/2)} \quad (5.6)$$

ここで、 ${}_lF_{bi}$ は i 段の製材の線形補間曲げ基準強度であり、JAS の各機械等級区分の曲げヤング係数の閾値における強度を基準強度の値とし、各機械等級区分の曲げヤング係数の閾値間の強度は製材の曲げヤング係数 E_i を基に直線補間して求める（図 5.2）。

検討する同一等級構成の GBM の製材構成を表 5.1 に示す。製材の等級区分は、日本農林規格（以下、JAS）機械等級区分 E70、E90、E110 の 3 種類とし、各等級の上限値を(H)、中間値を(M)、下限値を(L)の記号で表わす。GBM 内での製材の曲げヤング係数の構成は、

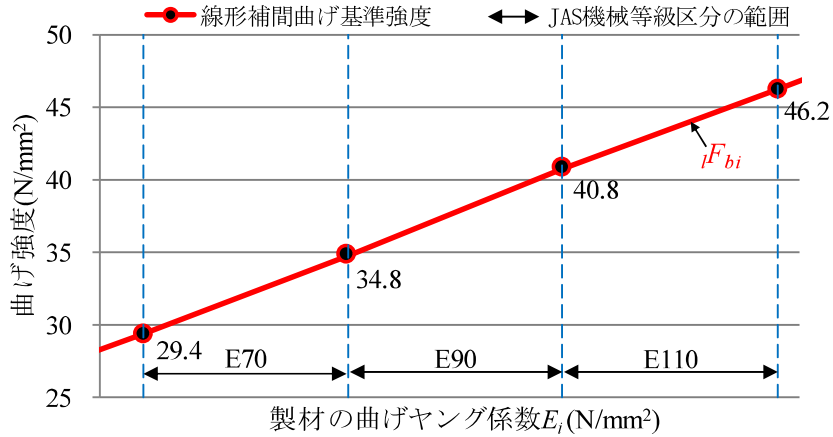


図 5.2 各製材の線形補間曲げ基準強度と曲げヤング係数との関係

表 5.1 同一等級構成 GBM の製材組み合わせ

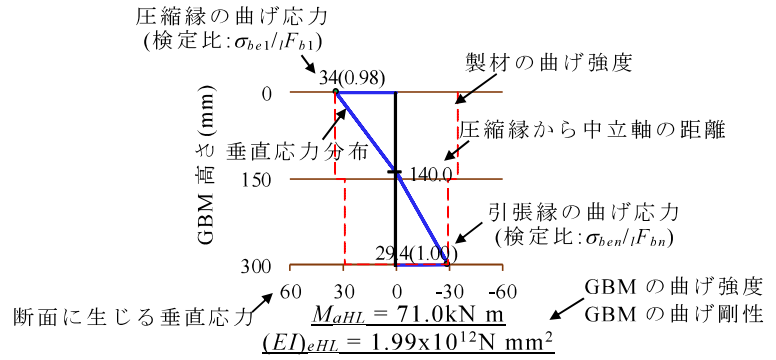
構成		GBM15x2 (150角2段重ね)											
		E70				E90				E110			
		LL	MM	HL	HH	LL	MM	HL	HH	LL	MM	HL	HH
構成図	等級区分												
	各製材の曲げヤング係数 E_i (N/mm ²)	E70 5900	E70 6850	E70 7800	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 9800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 11800	E110 11800
$\Sigma E_i/n$ (N/mm ²)		5900	6850	6850	7800	7800	8800	8800	9800	9800	10800	10800	11800
構成		GBM15x5 (150角5段重ね)											
		E70				E90				E110			
		LL	MM	HL	HH	LL	MM	HL	HH	LL	MM	HL	HH
構成図	等級区分												
	各製材の曲げヤング係数 E_i (N/mm ²)	E70 5900	E70 6850	E70 7800	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 9800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 11800	E110 11800
	各製材の曲げヤング係数 E_i (N/mm ²)	E70 5900	E70 6850	E70 6850	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 8800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 10800	E110 11800
	各製材の曲げヤング係数 E_i (N/mm ²)	E70 5900	E70 6850	E70 6850	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 8800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 10800	E110 11800
	各製材の曲げヤング係数 E_i (N/mm ²)	E70 5900	E70 6850	E70 5900	E70 7800	E90 7800	E90 8800	E90 7800	E90 9800	E110 9800	E110 10800	E110 9800	E110 11800
$\Sigma E_i/n$ (N/mm ²)		5900	6850	6850	7800	7800	8800	8800	9800	9800	10800	10800	11800

$E_i = 5900$ (E70L)は ${}_iF_{bi}=29.4$, $E_i = 6850$ (E70M)は ${}_iF_{bi}=32.1$, $E_i = 7800$ (E70H, E90L)は ${}_iF_{bi}=34.8$, $E_i = 8800$ (E90M)は ${}_iF_{bi}=37.8$, $E_i = 9800$ (E90H, E110L)は ${}_iF_{bi}=40.8$, $E_i = 10800$ (E110M)は ${}_iF_{bi}=43.5$, $E_i = 11800$ (E110H)は ${}_iF_{bi}=46.2$. [単位:N/mm²]

各等級内の下限値のみ(LL), 中間値のみ(MM), 最上段を上限値で最下段を下限値としその他を中間値(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。GBMの製材段数は150mm角製材を用いた2段重ね又は5段重ねの2種類とする。

GBM断面に生じる垂直応力分布を図5.3, 図5.4に示す。図には検定比としてGBMの圧縮縁の曲げ応力と最上段製材の曲げ強度の比(σ_{be1} / f_{b1})とGBMの引張縁の曲げ応力と最下段製材の曲げ強度の比(σ_{ben} / f_{bn})およびGBMの圧縮縁から中立軸までの距離を示す。2段重ねGBM断面内の垂直応力はE70HL, E90HL, E110HLのいずれも製材の曲げヤング係数が低いGBMの曲げ引張縁が製材の曲げ強度に達している。また, 5段重ねGBMでE70HLのときはGBMの曲げ圧縮縁が, E90HLのときはGBMの曲げ引張縁が先行して, E110HLのときはGBMの曲げ圧縮縁と引張縁が製材の曲げ強度に達しており, E70HLのように製材の曲げヤング係数が高い材が曲げ強度に達する構成もある。HLのGBM構成におけるGBM断面の図心から中立軸の距離は, 断面せいに対して2段重ねGBMで4.9~7.1%, 5段重ねGBMで3.0~4.7%となる。しかし, 製材の曲げヤング係数に応じて製材断面に生じる曲げ応力が変化し, 最上段の製材断面で曲げ応力が大きく, 最下段の製材断面で曲げ応力が小さくなり, 各製材の曲げヤング係数を全て下限値の製材としたLLのGBM構成の曲げ強度を上回る。

各GBMの曲げ強度 M_{av} と曲げ剛性 $(EI)_{ev}$ について, 各製材の曲げヤング係数を全て下限値の製材としたLLのGBM構成の曲げ強度 M_{aLL} と曲げ剛性 $(EI)_{eLL}$ との比を図5.5に示す。2段重ねと5段重ねGBMでいずれも曲げヤング係数の平均値が等しいMMとHLのGBM構成では, 僅かではあるがMMに比べてHLの構成の方がGBMの曲げ強度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, 各製材の曲げヤング係数の差異を考慮したGBMの曲げ性能は, 各製材が同一等級区分内であっても, 各製材の曲げヤング係数の平均値から求めたGBMの曲げ性能よりも小さくなる可能性があることを示唆するものである。上記から, 同一等級構成のGBMであっても, ラーメン架構で柱・梁部材の曲げ剛性が構面(層)の剛性に影響を及ぼす場合や, 保有水平耐力の確認を行う場合のようにGBMの曲げ強度と曲げ剛性を正確に把握したいときは, 各製材の曲げヤング係数の差異を考慮してGBM断面の圧縮縁と引張縁の両縁に生じる垂直応力を評価することが必要である。



[GBM 断面の垂直応力分布 凡例]

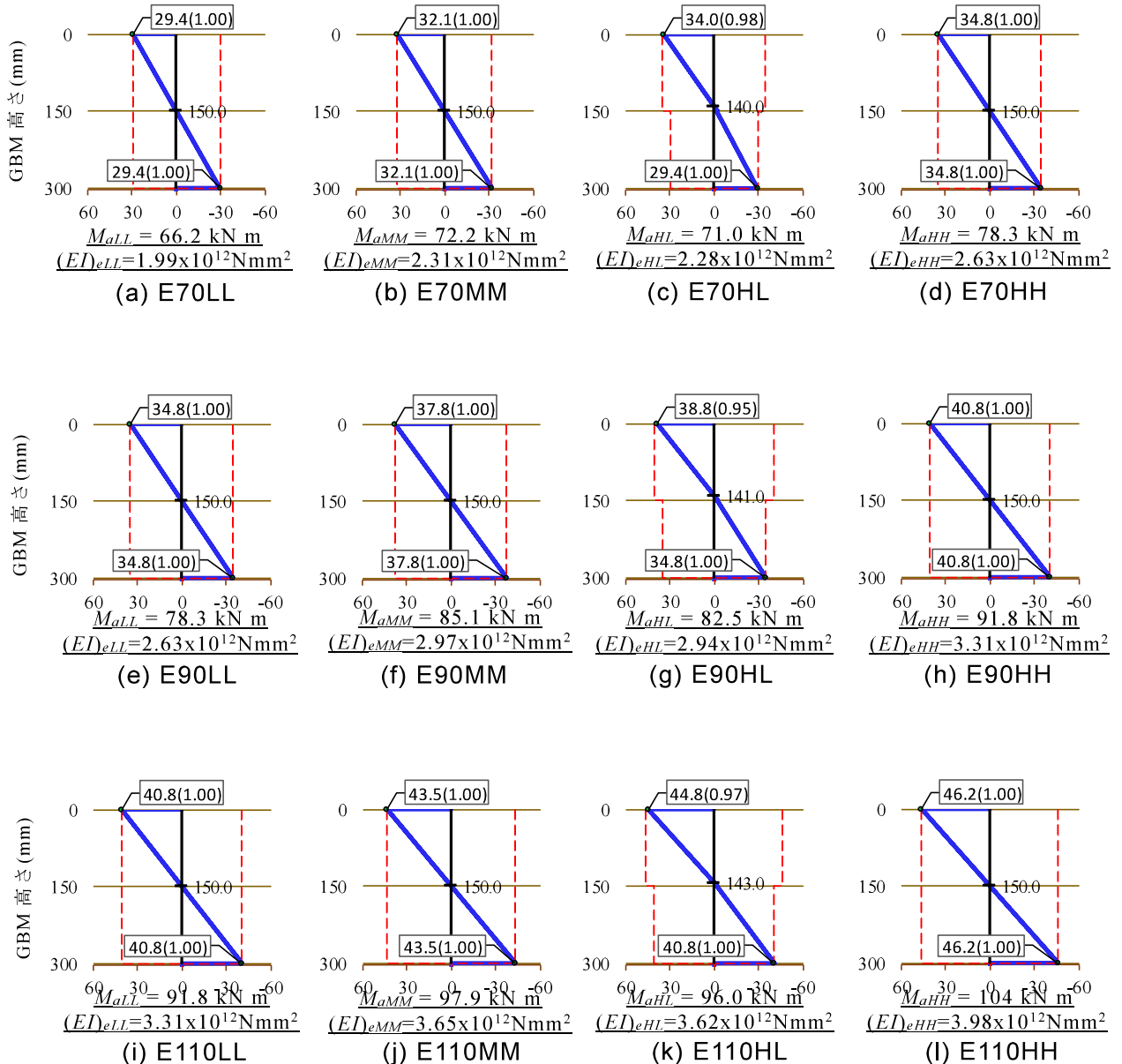


図 5.3 同一等級構成の 150 角 2 段重ね GBM 断面の垂直応力分布

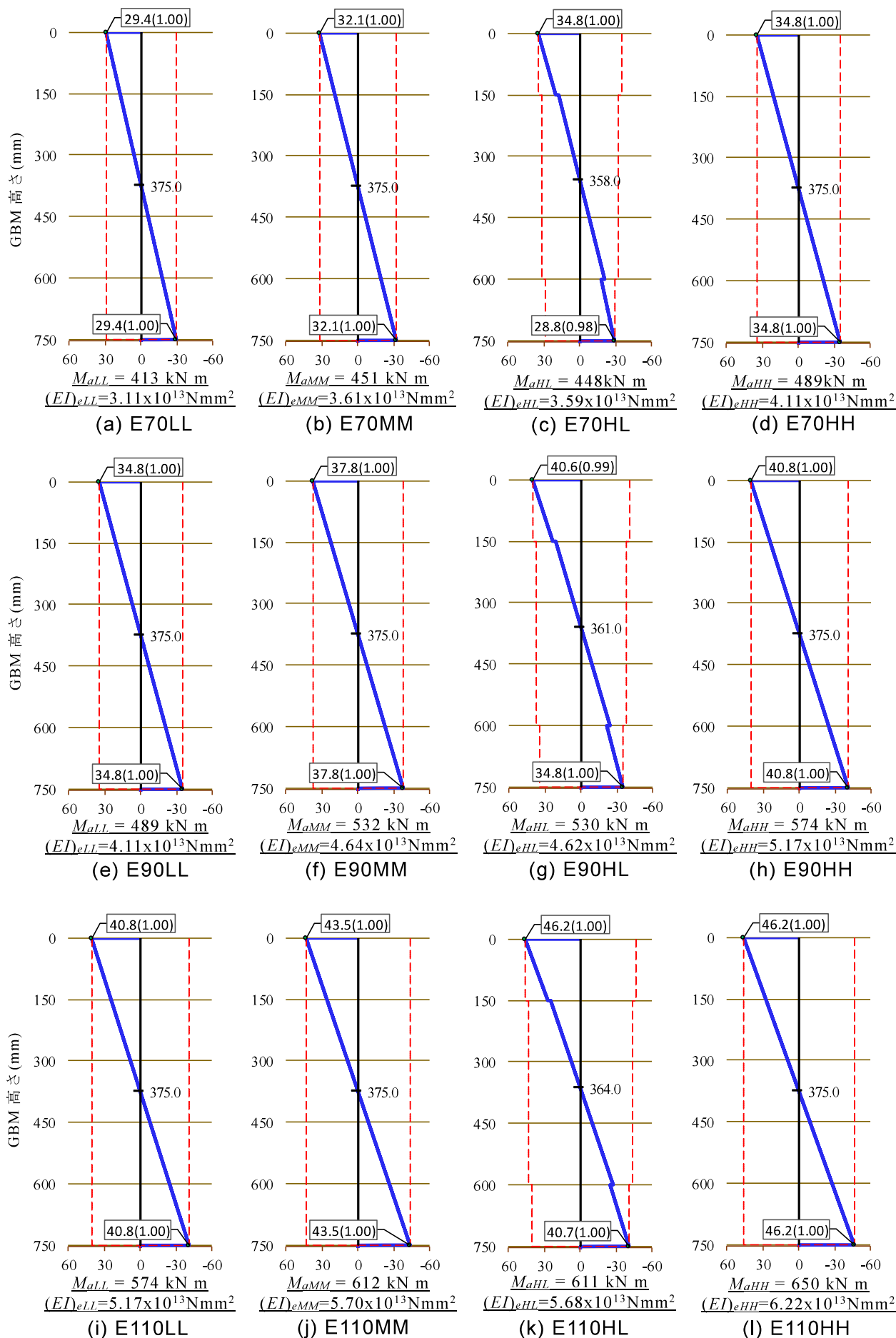


図 5.4 同一等級構成の 150 角 5 段重ね GBM 断面の垂直応力分布

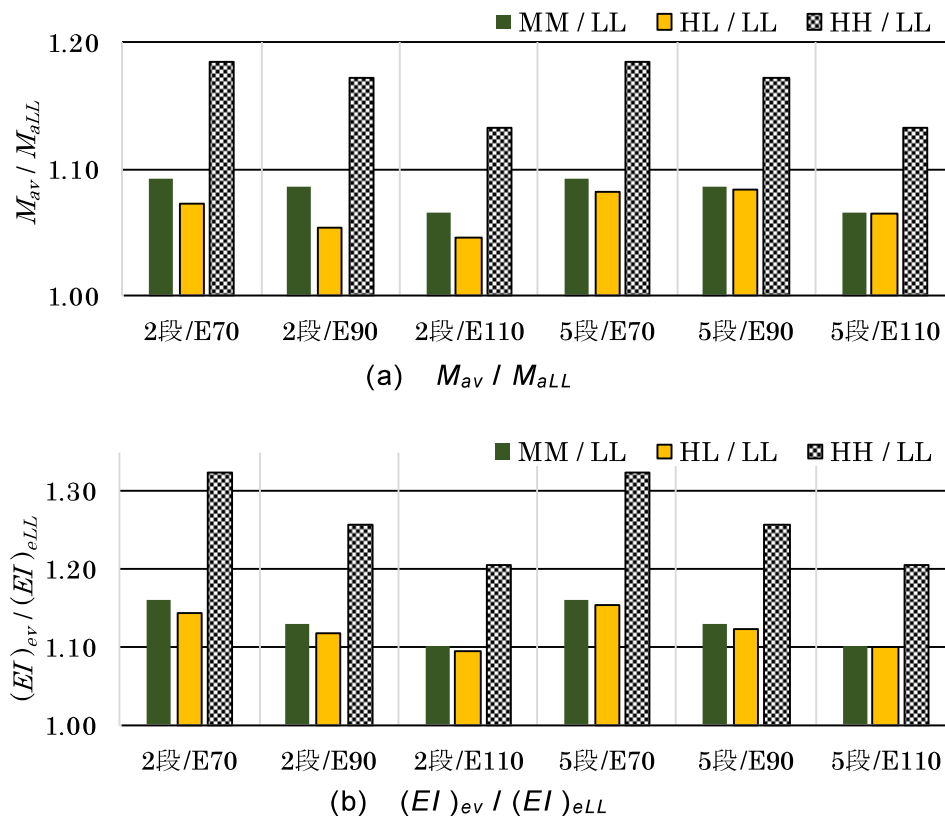


図 5.5 同一等級構成 GBM の曲げ強度と曲げ剛性

5.3 異等級構成の GBM の曲げ強度と曲げ剛性

本節も前節と同様に、図 5.1 に示した GBM の等価断面モデルを用いて異等級構成の GBM の曲げ強度と曲げ剛性について検討する。検討する異等級構成の GBM の製材構成を表 5.2 に示す。異等級構成の GBM 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 GBM を構成材する半数以上の製材を異等級材とすることができることが、調達や製造のコスト低減の効果が大きいと考えられる。したがって、検討に用いる製材段数は 150 角製材の 5 段重ね GBM とする。製材の等級区分は E70, E90, E110 の 3 種類とし、検討する全ての GBM で最上段と最下段の製材の等級区分は E110 の上限値 (E110HH) とし、断面中央部の製材の等級区分は E90 の中間値 (E90M) 又は下限値 (E90L) とするとき、E70 の中間値 (E70M) 又は下限値 (E70L) とするときについて検討する。なお、GBM の曲げ強度と曲げ剛性の変化を確認するため、断面中央部の製材の等級区分を E110 の中間値 (E110M) 又は下限値 (E110L) とした同一等級構成の GBM についても検討する。

GBM 断面に生じる垂直応力分布を図 5.6 に示す。全ての GBM で GBM の曲げ圧縮縁と引張縁が製材の曲げ強度に達しており、最上段および最下段製材と断面中央部との製材の曲げヤング係数の差が最も大きい E110HH/E70L のとき、断面中央部の製材における最大応

力は 13.9 N/mm²(検定比:0.47)と、中央部の製材の曲げ強度に対して十分小さい。検討の範囲では GBM の曲げ強度は GBM の圧縮縁もしくは引張縁の製材の曲げ応力度によって決定し、等級の低い断面中央部の製材で決定することはない。図 5.7 に GBM の曲げ強度 M_{av} と曲げ剛性 $(EI)_{ev}$ について、製材の曲げヤング係数を全て E110 の上限値(表 5.1 の GBM15x5 E110HH) の曲げ強度 M_{aHH} と曲げ剛性 $(EI)_{eHH}$ との比 (M_{av} / M_{aHH} と $(EI)_{ev} / (EI)_{eHH}$) を示す。各 GBM の曲げ強度と曲げ剛性は、全て E110 の上限値の構成とした GBM の 0.95~0.89 倍の範囲にあり、全て E110 の上限値の構成とした GBM と比較しても大きく GBM の曲げ強度と曲げ剛性が低下していない。一方、各製材の曲げヤング係数を全て E70 の中間値(図 5.4(b)) または E90 の中間値(図 5.4(f)) としたときの GBM の曲げ強度と曲げ剛性と、全て E110 の上限値(図 5.4(l)) としたときとの比は、 M_{av} / M_{aHH} がそれぞれ 0.69 倍、0.82 倍、 $(EI)_{ev} / (EI)_{eHH}$ がそれぞれ 0.58 倍、0.75 倍である。異等級構成の GBM とすると同一等級構成の GBM とした場合に比べて高い GBM の曲げ強度と曲げ剛性を確保できることから、構造的な合理性に優れているといえる。

表 5.2 異等級対称構成 GBM の製材組み合わせ

構成		GBM15x5 (150角5段重ね)					
		E110HH					
		E110M	E110L	E90M	E90L	E70M	E70L
構成図	等級区分	E110 11800	E110 11800	E110 11800	E110 11800	E110 11800	E110 11800
	各製材の 曲げヤング 係数 E_i (N/mm ²)	E110 10800	E110 9800	E90 8800	E90 7800	E70 6850	E70 5900
		E110 10800	E110 9800	E90 8800	E90 7800	E70 6850	E70 5900
		E110 10800	E110 9800	E90 8800	E90 7800	E70 6850	E70 5900
		E110 11800	E110 11800	E110 11800	E110 11800	E110 11800	E110 11800
$\Sigma E_{ij} / n$ (N/mm ²)		11200	10600	10000	9400	8830	8260

$E_i = 5900$ (E70L)は ${}_iF_{bi}=29.4$, $E_i = 6850$ (E70M)は ${}_iF_{bi}=32.1$, $E_i = 7800$ (E70H, E90L)は ${}_iF_{bi}=34.8$, $E_i = 8800$ (E90M)は ${}_iF_{bi}=37.8$, $E_i = 9800$ (E90H, E110L)は ${}_iF_{bi}=40.8$, $E_i = 10800$ (E110M)は ${}_iF_{bi}=43.5$, $E_i = 11800$ (E110H)は ${}_iF_{bi}=46.2$. [単位:N/mm²]

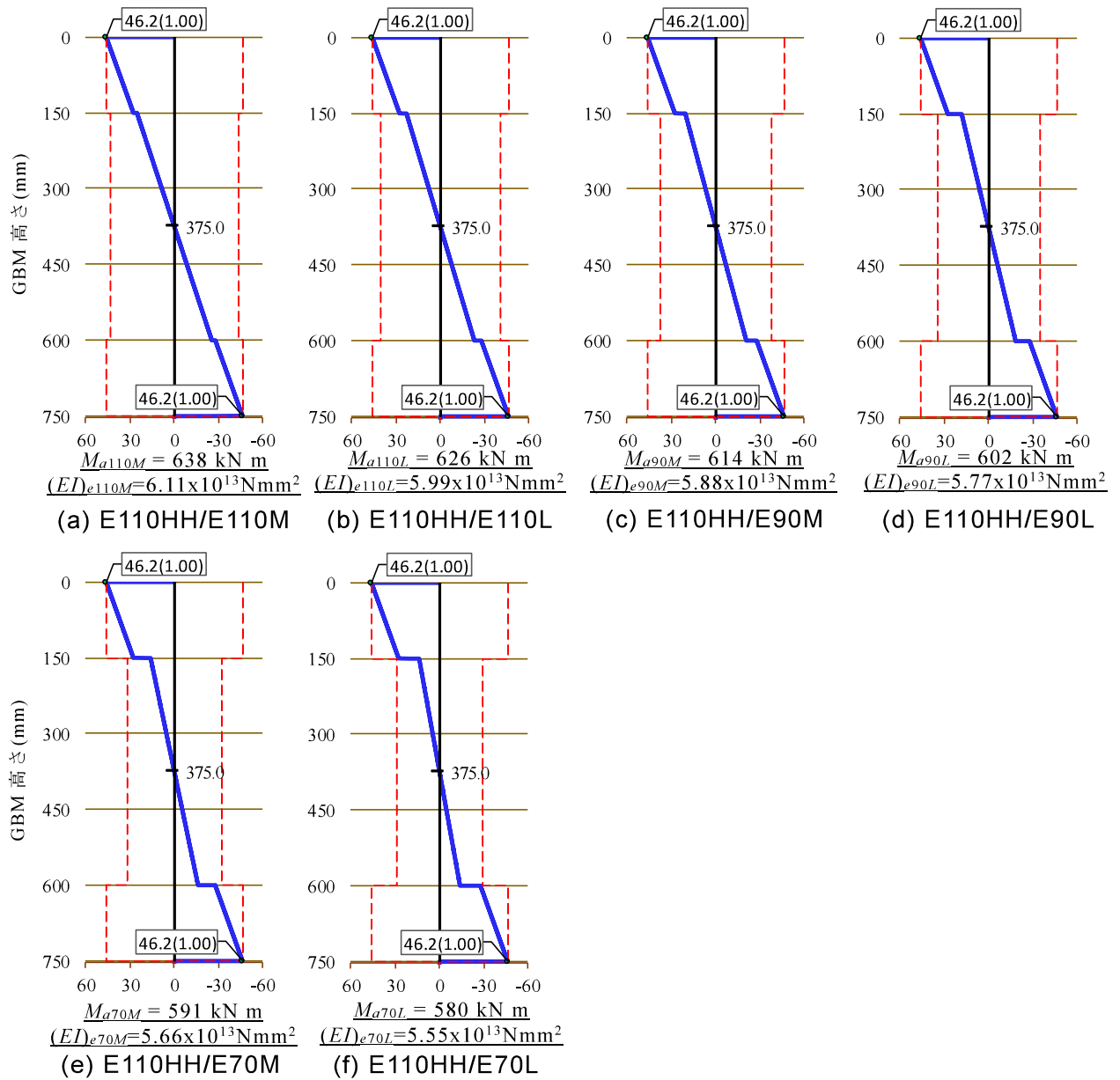


図 5.6 異等級構成の 150 角 5 段重ね GBM 断面の垂直応力分布

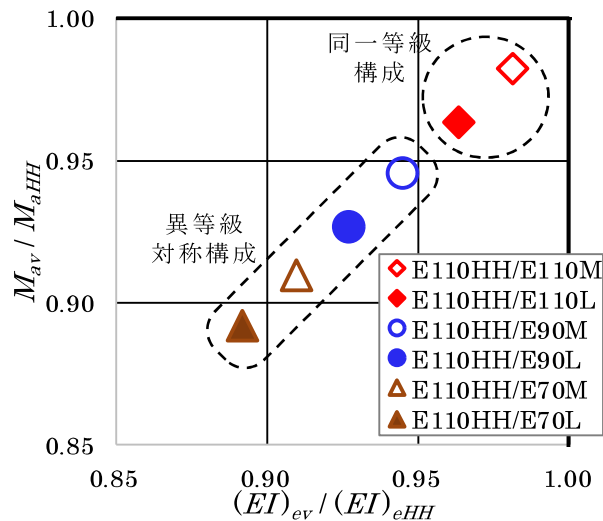


図 5.7 M_{av} / M_{aHH} と $(EI)_{ev} / (EI)_{eHH}$ の関係

5.4 各製材の曲げヤング係数の差異を考慮した実験結果の評価

本論の2章で示した曲げ実験に用いられた実大GBM試験体は、各製材の曲げヤング係数を縦振動法によって計測しており、JAS機械等級区分E70、E90、E110の製材が混在した配置となっているものもある(図2.2(b))。そのため、5.2節で示したGBMを構成する各製材の曲げヤング係数の差異を考慮し、各製材の断面内と材軸方向の強度と曲げヤング係数は一様とした等価断面モデルを用いて、各製材の曲げヤング係数の差異がGBMの曲げ強度と曲げ剛性に及ぼす影響について検討する。評価に用いる各製材の曲げ強度には、より真の曲げ強度と曲げヤング係数の相関関係に近いと考えられる各製材の曲げ強度を各製材の曲げヤング係数の測定値である E_{fr} を用いて線形補間した値 ${}_lF_b$ を用いる(図5.2)。

図5.8に例として150角5段重ねGBMの断面に生じる応力度分布と、(5.6)式を用いて算定したGBMの曲げ強度の計算値 M_a および(5.1)式を用いて算定したGBMの曲げ剛性の計算値 $(EI)_e$ を示す。GBM試験体No.①～⑤(図5.8(a)～(e))は、最上段の製材の等級区分がE70、最下段の製材がE90の試験体であり、上段に低い曲げヤング係数の製材が配置されているGBM試験体の圧縮縁が製材の曲げ強度に達している。これは他の製材段数の試験体も同様である。ここで、本実験では、せん断破壊した試験体を除いて引張縁の破壊により最大荷重が決まっているが、GBMの圧縮縁で先行して繊維座屈を起こせば、GBMの曲げ強度に影響を及ぼすことも考えられるため、最上段と最下段製材の曲げヤング係数の差異が曲げ強度に及ぼす影響について以下に検討する。

図5.9に実験の最大荷重時にロードスパン内に生じる曲げモーメント ${}_eM$ をGBMの曲げ強度の計算値 M_a で除した実験値と計算値の比 $({}_eM/M_a)$ と、最上段の製材の曲げヤング係数の測定値 E_{fr1} と最下段の製材の曲げヤング係数の測定値 E_{frn} の比の関係性を各製材段数について示す。 E_{fr1}/E_{frn} が低い試験体が ${}_eM/M_a$ が低い結果となっているわけではなく、いずれの製材段数においても E_{fr1}/E_{frn} と ${}_eM/M_a$ に明確な相関は見られない。したがって、本論で用いた試験体の範囲では最上段製材の圧縮縁に繊維座屈が生じたとしても、それがGBMの曲げ強度に及ぼす影響は小さいと判断する。また、曲げ破壊したGBM試験体は最下段の製材に破壊が生じていることから、最上段と最下段の製材のヤング係数の差異がGBMの曲げ強度に及ぼす影響は小さく、曲げ引張側に配置した最下段の製材に着目してGBMの曲げ強度を評価しても差し支えないと考えられる。

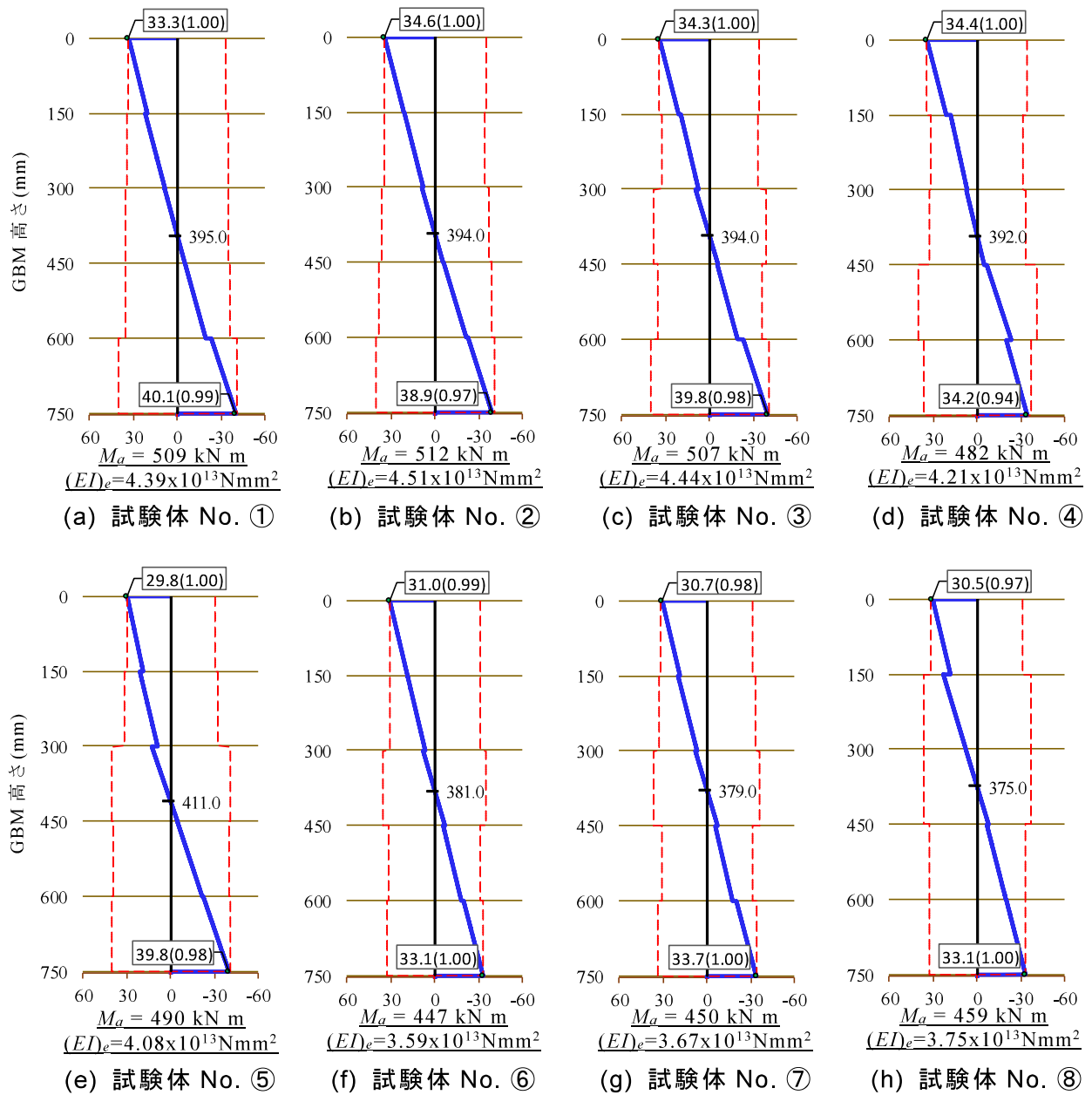


図 5.8 150 角 5 段重ね GBM 試験体の断面に生じる垂直応力分布

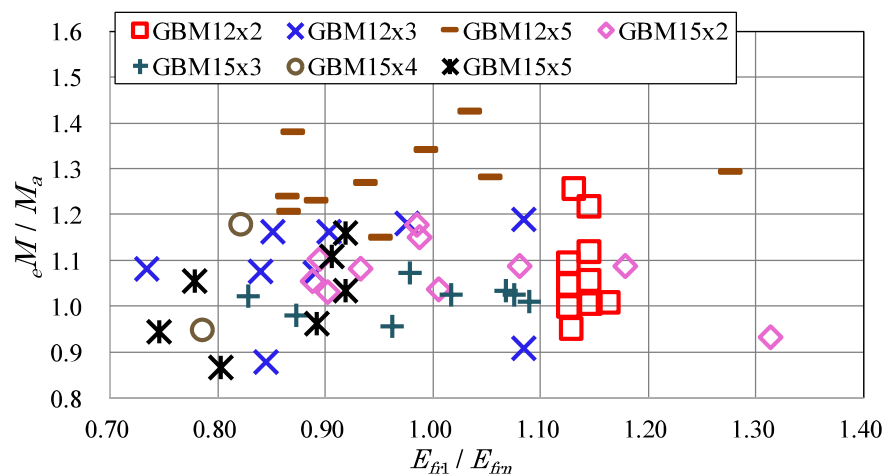


図 5.9 eM/M_a と E_{fr1}/E_{frn} の関係

図 5.11 と図 5.12 に GBM の曲げ強度の実験値と計算値の比 (eM/M_a) と, GBM の曲げ剛性の実験値 $e(EI)_b$ を GBM の曲げ剛性の計算値 $(EI)_e$ で除した実験値と計算値の比 ($e(EI)_b / (EI)_e$) との関係を示す。また, ヒストグラムと平均値 \bar{x} および変動係数 CV を併せて示す。なお, 2 章で述べた通り, GBM 試験体の破壊性状は, 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 に分類する (図 5.10)。

図 5.11 と図 5.12 より, ばらつきは eM/M_a が $CV = 0.032 \sim 0.100$, $e(EI)_b / (EI)_e$ が $CV = 0.023 \sim 0.038$ の範囲にあり, eM/M_a の平均値は $1.01 \sim 1.28$, $e(EI)_b / (EI)_e$ の平均値は $1.00 \sim 1.09$ の範囲にあることが分かる。各製材の曲げヤング係数の差異を考慮して, eM/M_a や $e(EI)_b / (EI)_e$ を求めると, 2.4.2 項に示した GBM 断面内と材軸方向の曲げヤング係数を一様とみなす一様断面モデルを用いた実験結果の評価のばらつき (eM/M_b が $CV = 0.046 \sim 0.121$, $e(EI)_b / E_0I$ が $CV = 0.027 \sim 0.073$) に比べて, 小さくなる。また, 製材寸法や製材段数に関わらず GBM の曲げ強度の実験値と推定値と曲げ剛性の実験値と推定値はいずれも近い値となり, 各製材段数の eM/M_a と $e(EI)_b / (EI)_e$ の平均値は一様断面モデルを用いた実験結果の評価の平均値 (eM/M_b の平均値は $0.95 \sim 1.28$, $e(EI)_b / E_0I$ の平均値は $0.96 \sim 1.10$) に比べて 1.0 に近づく。これらの結果から, GBM を構成する各製材の曲げヤング係数の差異を考慮することで, GBM 断面内と材軸方向の曲げヤング係数を一様とみなすよりも GBM の曲げ強度と曲げ剛性を精度良く評価できることが分かった。

一方, 図 5.11 と図 5.12 のヒストグラムを用いて GBM 試験体の破壊性状の分類と製材の段数の関係について着目しても, 製材の段数と eM/M_a と破壊性状や $e(EI)_b / (EI)_e$ と破壊性状に明確な傾向は見られない。

P : 荷重, δ : 中央たわみ, ◆印は最大荷重 P_{max} を示す

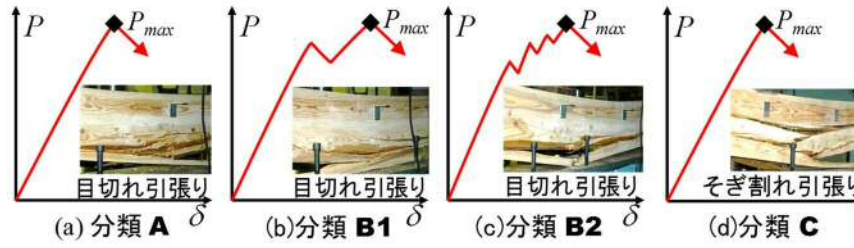
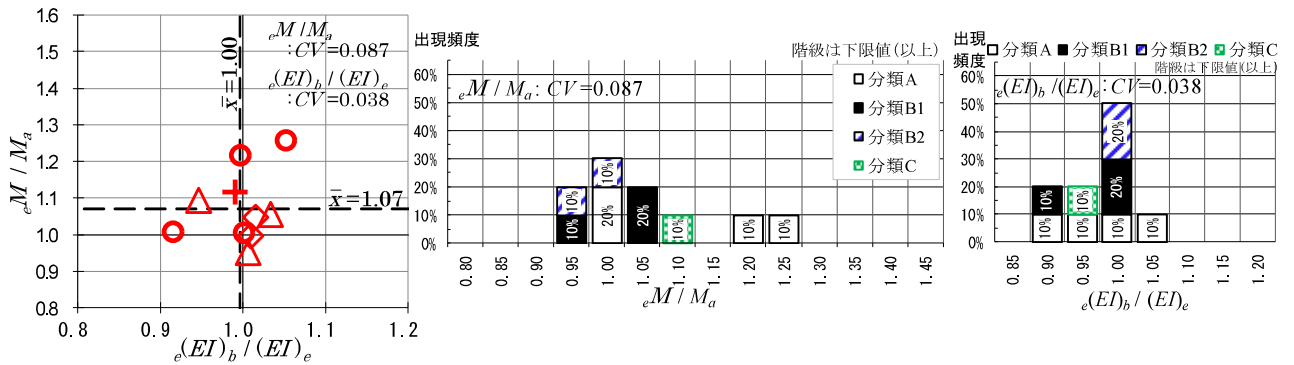
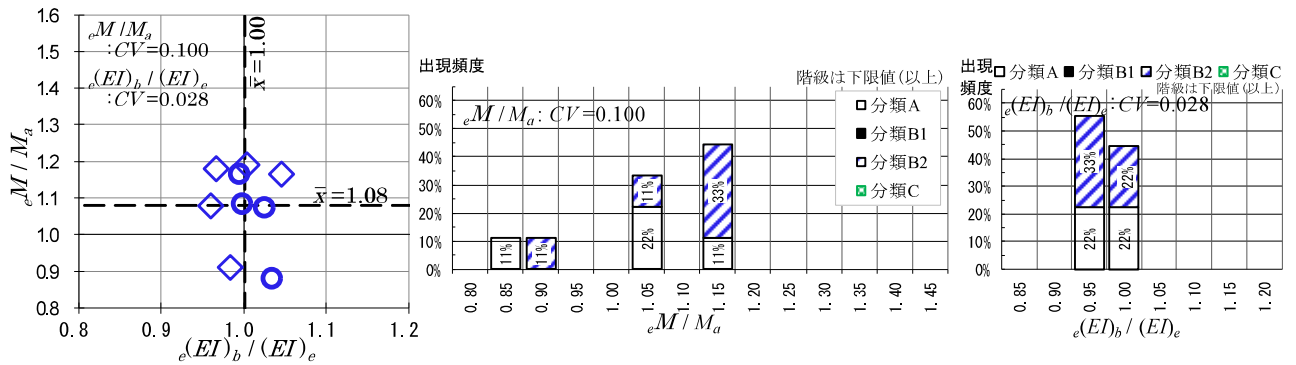


図 5.10 破壊性状の分類 (2章, 図 2.7 の再掲)

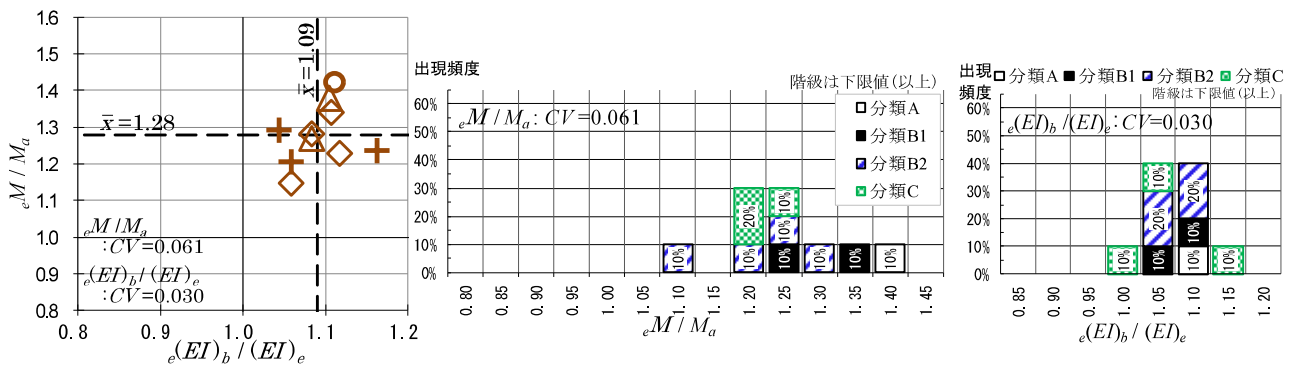
破壊性状の分類
 ○…A △…B1 ◇…B2 +…C \bar{x} : 平均値, CV : 変動係数



(a) GBM12x2 (120 角 2 段)



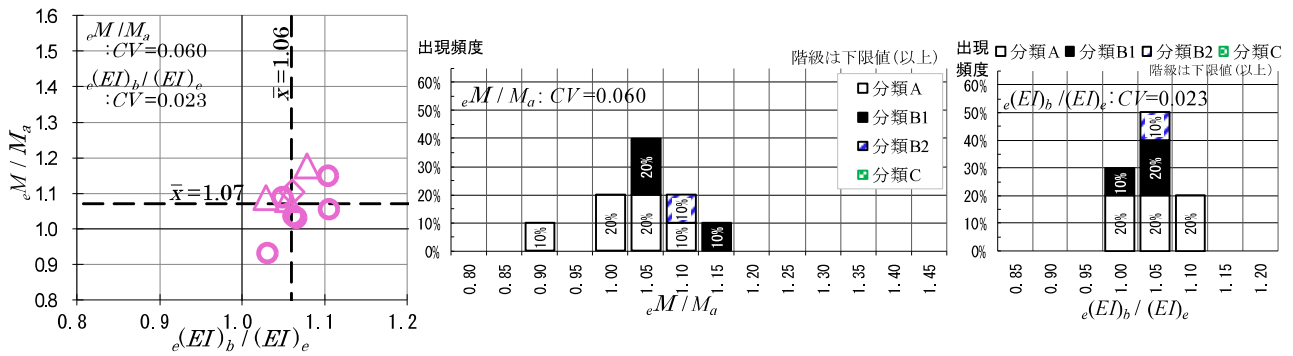
(b) GBM12x3 (120 角 3 段)



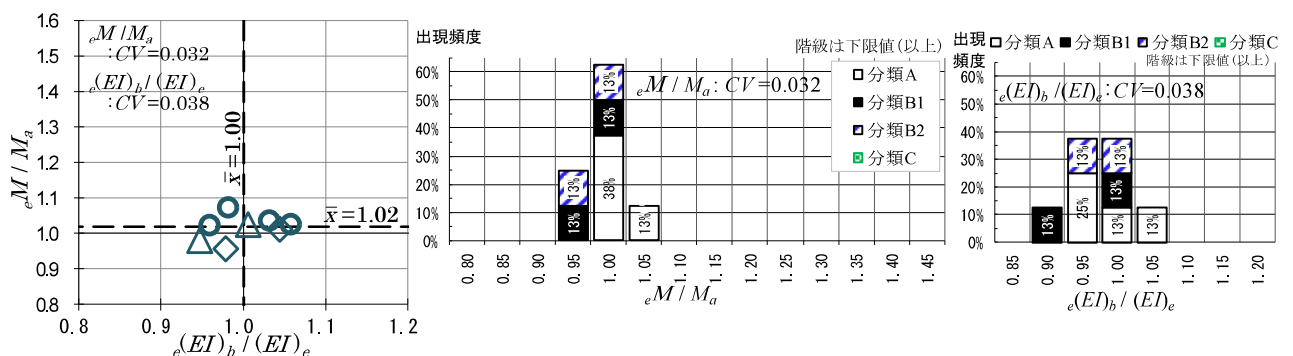
(c) GBM12x5 (120 角 5 段)

図 5.11 120 角製材 GBM の eM/M_a と $e(EI)_b/(EI)_e$

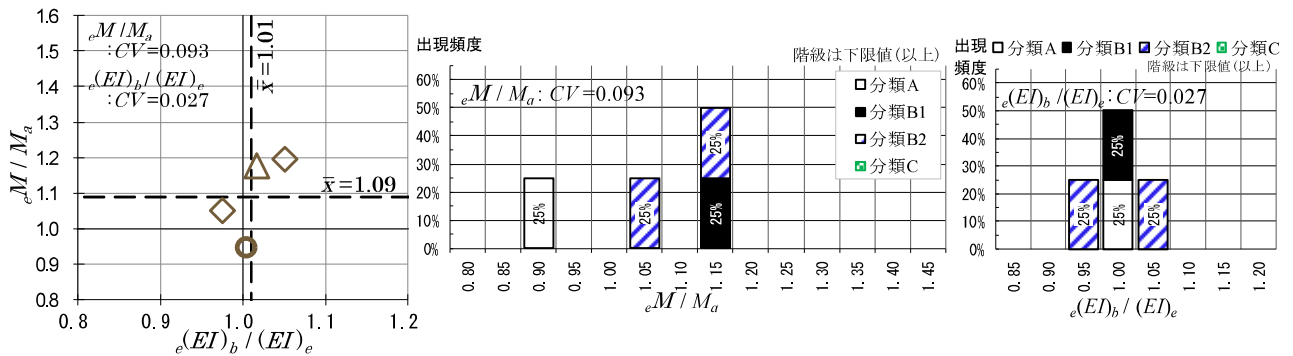
破壊性状の分類
 ○…A △…B1 ◇…B2 +…C \bar{x} : 平均値, CV : 変動係数



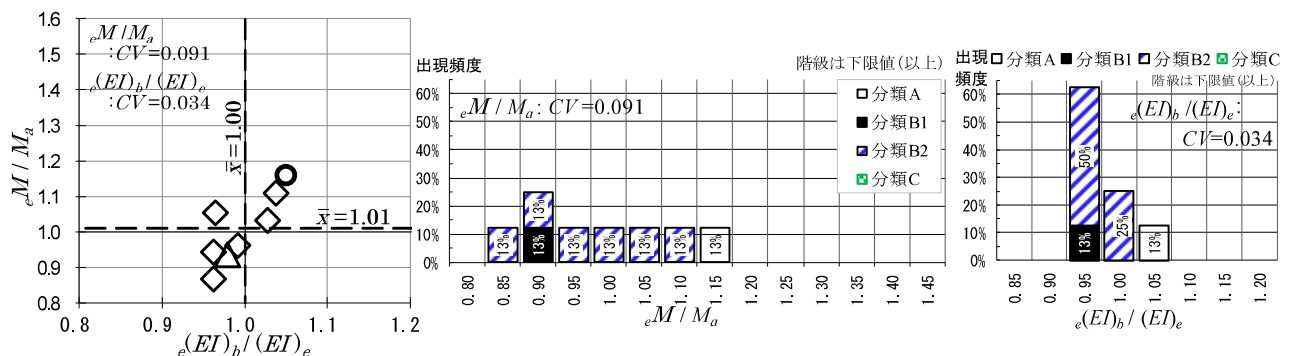
(a) GBM15x2 (150 角 2 段)



(b) GBM15x3 (150 角 3 段)



(c) GBM15x4 (150 角 4 段)



(d) GBM15x5 (150 角 5 段)

図 5.12 150 角製材 GBM の eM/M_a と $e(EI)_b/(EI)_e$

5.5 まとめ

本章では同一等級構成の GBM と、異等級構成の GBM について、製材内を一様な弾性体と見なし、GBM を構成する各製材の曲げヤング係数の差異のみを考慮する GBM の等価断面モデルを用いた断面解析により、各製材の曲げヤング係数の差異が GBM の曲げ強度と曲げ剛性に及ぼす影響を検討した。加えて、実大 GBM の曲げ実験結果について、各製材の実際の曲げヤング係数を用いて実験結果の評価を行い、各製材の曲げヤング係数の差異が GBM の曲げ強度と曲げ剛性に及ぼす影響について考察した。

- ① 同一等級構成の GBM について、製材段数を 2 段～5 段とし、JAS 機械等級区分 E70, E90, E110 の製材を無作為に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とき、各製材の曲げヤング係数が全て下限値の製材とした GBM の曲げ強度よりも下回ることはない。
- ② 異等級構成の GBM について、製材段数を 5 段とし、最上段と最下段の製材の JAS 機械等級区分を E110 の上限値とし、断面中央部の製材の等級区分を E90 又は E70 とするとき、GBM の曲げ強度は GBM の圧縮縁もしくは引張縁の製材の曲げ応力度によって決定し、等級の低い断面中央部の製材で決定することはない。また、全て E110 の上限値の構成とした GBM の 0.95～0.89 倍の範囲にあり、全て E110 の上限値の構成とした GBM と比較しても大きく GBM の曲げ強度と曲げ剛性が低下することはない。
- ③ 本実験の GBM 試験体の曲げ強度は、最上段と最下段の製材のヤング係数の比が低い GBM 試験体が低い結果となっているわけではなく、いずれの製材段数の GBM 試験体も GBM の曲げ強度と最上段と最下段の製材のヤング係数の比に明確な相関は見られない。また、曲げ破壊した GBM 試験体は最下段の製材に破壊が生じている。したがって、最上段と最下段の製材のヤング係数の差異が GBM の曲げ強度に及ぼす影響は小さく、曲げ引張側に配置した最下段の製材に着目して GBM の曲げ強度を評価しても差し支えないと考えられる。
- ④ GBM を構成する各製材の曲げヤング係数の差異を考慮することで、GBM 断面内と材軸方向の曲げヤング係数を一様とみなすよりも GBM の曲げ強度と曲げ剛性を精度良く評価できることが分かった。

6章 各製材内の成熟材と未成熟材の 力学的な性質の差異を考慮した評価

6章 各製材内の成熟材と未成熟材の力学的な性質の差異を考慮した評価

6.1 はじめに

本論では、材軸方向にわたって断面の中央付近に髓を持つスギ心持ち製材を構成材とする GBM を対象としている。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差異があることが、既往の製材に関する研究で指摘されており^{6.1)~6.4)}、それぞれの部分は未成熟材・成熟材と呼ばれている。まず、成熟材と未成熟材の力学的な性質を調べた先行研究の知見を整理する。

次に、製材（無垢材）について、成熟材と未成熟材の力学的な性質の差異が製材の曲げ強度に及ぼす影響を検討すると共に、製材断面内の未成熟材の範囲と力学的な性質の設定の妥当性について考察する。検討は、90・120・150 mm の正角材について成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異を考慮した断面解析を行う。成熟材要素と未成熟材要素は、既往の研究を参考に、成熟材と未成熟材それぞれの繊維方向のヤング率と引張強度または圧縮強度および範囲をモデル化する。

GBM では最上段と最下段の製材の髓の位置が曲げ圧縮縁または曲げ引張縁の近傍となる。そのため、各構成材内の成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異が GBM の曲げ強度に及ぼす影響は大きいと考えられる。そこで、各製材の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異が GBM の曲げ強度に及ぼす影響について検討する。検討は、120 mm・150 mm 角の製材を 2~5 段積層した 1 列の GBM について、4.3.2 項に示した各製材の成熟材要素と未成熟材要素を考慮する製材で構成する GBM の要素断面モデルを用いて断面解析を行う。

加えて、髓に偏心がある場合には部材断面の未成熟材要素に生じる垂直応力が引張強度または圧縮強度に達して部材の曲げ強度が決定することも考えられる。そこで、髓の偏心が製材（無垢材）の曲げ強度と GBM の曲げ強度に及ぼす影響について調べる。検討は、150 mm 角の製材（無垢材）と 150 mm 角の製材を 2~5 段積層した 1 列の GBM について髓の偏心を考慮した GBM の要素断面モデルを用いて断面解析を行う。製材（無垢材）は髓が断面の引張縁方向へ偏心する場合について、GBM は断面に生じる垂直応力が比較的小さい GBM 断面の中央付近に配置する製材の髓の偏心の影響を無視し、最下段と最上段製材の髓が断面の中央方向へ偏心する場合と、最下段製材の髓が引張縁方向へ、最上段製材の髓が圧縮縁方向へ偏心する場合について検討する。

最後に、2章で示した実大 GBM の曲げ実験結果について、GBM の要素断面モデルを用

いて GBM の曲げ強度の評価を行い、製材内の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異が GBM の曲げ強度に及ぼす影響について考察する。

6.2 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、引張強度や圧縮強度などの力学的な性質が成熟材とは異なることが知られている。成熟材と未成熟材の力学的な性質の相違点について言及した既往の研究は多く、様々な樹種に対して研究が行われているが、本論ではスギ製材を積層する GBM を対象としているため、スギの丸太から採取した小試験片を対象として成熟材と未成熟材の力学的な性質を調べた先行研究の知見を以下に整理する。

渡辺ら^{6.1)}と太田^{6.2)}は、髄からの年輪方向の距離と比縦圧縮強度および比縦圧縮ヤング係数（それぞれ、縦圧縮強度と縦圧縮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、それぞれの値が断面内で安定する領域とそれ以外の領域に区分し、髄から各領域の回帰直線の交点までの距離の 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な差異があり、髄から年輪方向の未成熟材の範囲は 10 年～15 年の範囲であると述べている。太田は、上記に加えて未成熟材の比圧縮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その約 0.8 倍～0.9 倍と報告している。

田戸岡ら^{6.3)}は、曲げ・縦圧縮・せん断実験を行い、髄からの年輪方向の距離に応じた各強度およびヤング係数の関係を調べており、比曲げヤング係数の変動に指数式を当てはめて断面内の髄から年輪方向の未成熟材の範囲を区分している。断面内の未成熟材の範囲は、平均すると髄から 15 年の範囲であるが、供試体によって髄から 9 年～31 年の範囲が未成熟材であり、未成熟材の範囲に対するばらつきが大きいとしている。また、未成熟材の曲げ強度と圧縮強度は、成熟材のそれら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成熟材に比べてばらつきが大きいことを報告している。

藤崎^{6.4)}は、断面内の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圧縮ヤング係数の関係を調べ、未成熟材と成熟材に有意な差異は無く、圧縮強度に対する比重の依存性は高いが、縦圧縮ヤング係数に対するそれは低いと述べている。

上記の通り，既往研究において成熟材と未成熟材の髄から年輪方向の範囲や，両材のヤング率と引張強度および圧縮強度の差異に対する見解が統一されているとは言い難い状況にある。

6.3 成熟材と未成熟材の範囲およびヤング率と引張強度または圧縮強度の想定

本論では，断面内の髄から年輪方向の距離に対する繊維方向のヤング率と引張強度または圧縮強度の関係を渡辺ら^{6.1)}と太田^{6.2)}の研究を参考にして図 6.1 のように想定する。ヤング率と引張強度または圧縮強度は，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，引張強度または圧縮強度は未成熟材の範囲で髄から離れるほど急激に大きくなり，成熟材の範囲ではほぼ一定，ヤング率は両材の範囲にわたりほぼ一定となるものとする。

日本農林規格（以下，JAS）の製材に対する機械等級区分は，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，仮想の均質な（一様な）部材で表現した等価な値である曲げヤング係数により等級区分を行っているものであり，田戸岡ら^{6.3)}の研究では，繊維方向のヤング率も引張強度または圧縮強度と同様に未成熟材の範囲で髄から離れるほど急激に大きくなることを示唆しているが，付録 1 に結果を示す通り，このようにして検討を行った場合，ヤング率が小さくなると断面に生じる垂直応力も小さくなることにより，

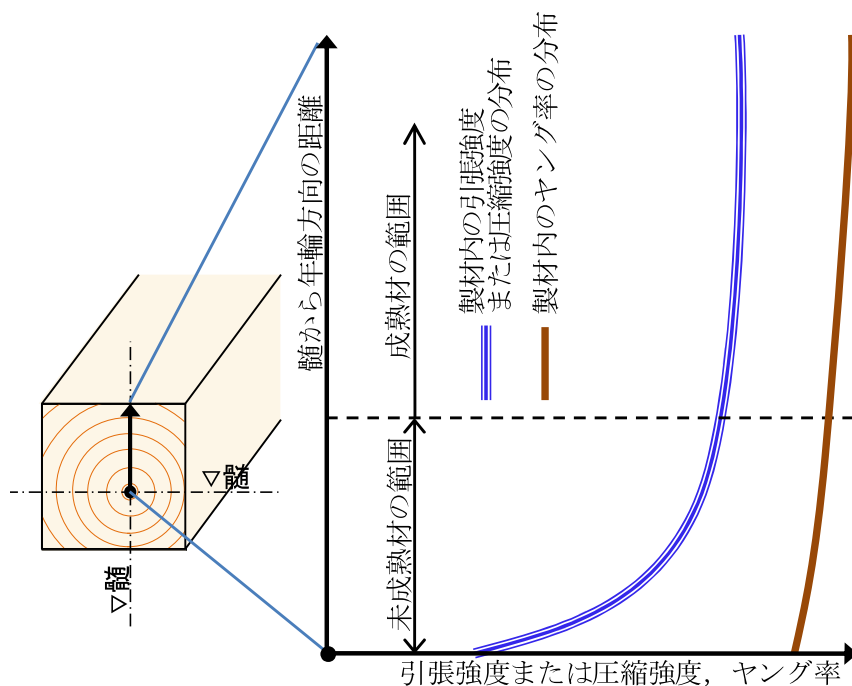


図 6.1 想定する髄から年輪方向のヤング率と引張強度または圧縮強度の関係

未成熟材が成熟材よりも先に引張強度または圧縮強度に達することがないことと、成熟材の断面積が未成熟材の断面積より大きいほど GBM の曲げ強度が大きくなることを確認している。そのため、本章では木材は脆性的な破壊性状となる性質を考慮して未成熟材が引張強度または圧縮強度に達した時点で GBM の曲げ強度が決定する図 6.1 の想定としている。また、成熟材の繊維方向の引張強度と圧縮強度、未成熟材の繊維方向の引張強度と圧縮強度は等しいものとする。

6.4 髄から年輪方向の距離に対するヤング率と引張強度または圧縮強度のモデル化

ここでは、製材断面内の成熟材と未成熟材について、想定する両材の範囲および繊維方向のヤング率と引張強度または圧縮強度の関係から、成熟材要素と未成熟材要素にモデル化する。図 6.1 で想定した髄からの年輪方向（放射状）の距離に応じて連続的に変化するヤング率と引張強度または圧縮強度を図 6.2 に示すように単純化する。すなわち、未成熟材要素の引張強度または圧縮強度は、髄からの距離に応じて線形に変化し、成熟材要素の引張強度または圧縮強度は $M F$ で一定とする。未成熟材要素の髄位置の引張強度または圧縮強度 ${}_j F_0$ は ${}_j F_0 = \alpha \cdot M F$ (α : 髄位置の未成熟材要素と成熟材要素の引張強度または圧縮強度の比) 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

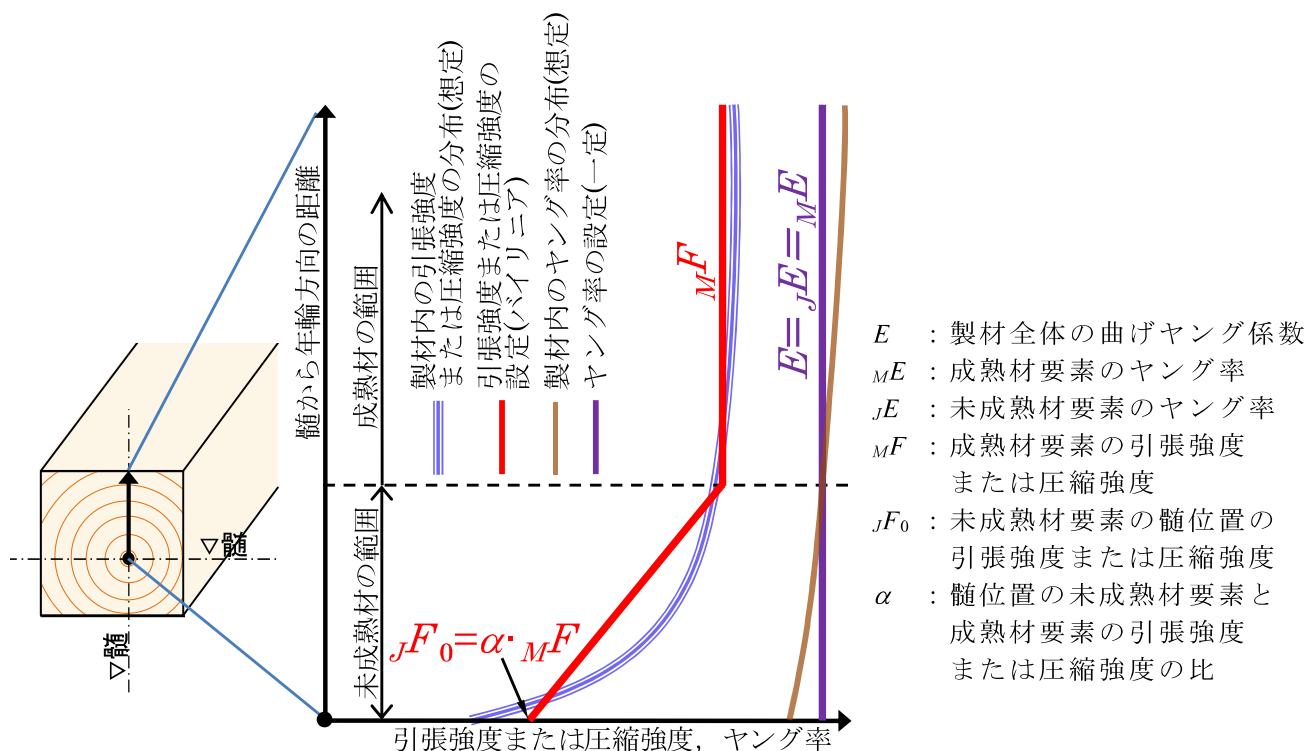


図 6.2 髄から年輪方向のヤング率と引張強度または圧縮強度のモデル化

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。

6.5 GBM の要素断面モデル

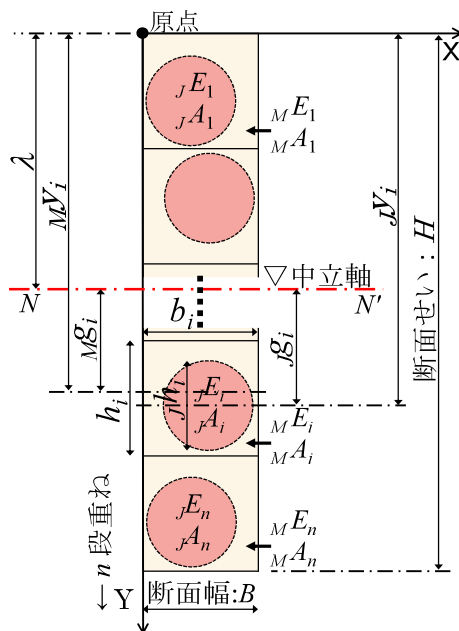
GBM の曲げ強度は、前節で示した成熟材要素と未成熟材要素を考慮する製材で構成する GBM の要素断面モデルを用いて、以下のように求める。

n 段重ね 1 列の GBM で、髄の偏心がある（未成熟材要素が各製材の中央にない）場合の GBM の要素断面モデルについて述べる（図 6.3）。なお、各製材の髄は全長にわたって同じ位置にあるものとする。 i 段の成熟材要素と未成熟材要素のヤング率をそれぞれ $M E_i$ 、 $J E_i$ としたとき、GBM 断面の等価曲げ剛性 $MJ(EI)_e$ は(6.1)式で表現できる。このとき、各製材の中立軸 ($N-N'$ 軸) まわりの成熟材要素の断面二次モーメント $M I_{i-NN'}$ は(6.2)式で、未成熟材要素の断面二次モーメント $J I_{i-NN'}$ は(6.3)式で、中立軸 (GBM 断面の図心) と成熟材要素の図心との距離 $M g_i$ は(6.4)式で、中立軸と未成熟材要素の図心との距離 $J g_i$ は(6.5)式で、原点 (最上段製材の圧縮縁) から中立軸までの距離 λ は(6.6)式で表現できる。

$$MJ(EI)_e = \sum_{i=1}^n M E_i \cdot M I_{i-NN'} + \sum_{i=1}^n J E_i \cdot J I_{i-NN'} \quad (6.1)$$

$$M I_{i-NN'} = M I_i + M g_i^2 \cdot M A_i \quad (6.2)$$

$$J I_{i-NN'} = J I_i + J g_i^2 \cdot J A_i \quad (6.3)$$



H : GBM の断面せい

B : GBM の断面幅

λ : 原点(最上段製材の圧縮縁)から
中立軸($N-N'$ 軸)の距離

y_i : 原点から i 段製材図心までの距離

g_i : 中立軸から i 段製材図心までの距離

h_i : i 段の製材のせい

b_i : i 段の製材の幅

$J h_i$: i 段の未成熟材要素のせい

$M E_i$: i 段の成熟材要素のヤング率

$J E_i$: i 段の未成熟材要素のヤング率

$M A_i$: i 段の成熟材要素の断面積

$J A_i$: i 段の未成熟材要素の断面積

図 6.3 GBM の要素断面モデル (n 段重ね \times 1 列、髄の偏心あり)

$${}_M g_i = \lambda - {}_M y_i \quad (6.4)$$

$${}_J g_i = \lambda - {}_J y_i \quad (6.5)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n {}_M E_i \cdot {}_M A_i \cdot {}_M y_i + \sum_{i=1}^n {}_J E_i \cdot {}_J A_i \cdot {}_J y_i}{\sum_{i=1}^n {}_M E_i \cdot {}_M A_i + \sum_{i=1}^n {}_J E_i \cdot {}_J A_i} \quad (6.6)$$

ここで、 ${}_M I_i$ は i 段の成熟材要素の断面二次モーメント ($=b_i \cdot {}_M h_i^3 / 12 - {}_J I_i$) (mm^4), ${}_J I_i$ は i 段の未成熟材要素の断面二次モーメント ($=\pi \cdot {}_J h_i^4 / 64$) (mm^4), ${}_M y_i$ は原点から i 段の成熟材要素の図心までの距離 (mm), ${}_J y_i$ は原点から i 段の未成熟材要素の図心までの距離 (mm) である。

下側が引張りの曲げモーメントを受ける GBM に対して成熟材要素の引張応力または圧縮応力 ${}_M \sigma_{ei}$ と引張強度または圧縮強度 ${}_M F_i$ の関係である(6.7)式, 未成熟材要素の引張応力または圧縮応力 ${}_J \sigma_{en}$ と引張強度または圧縮強度 ${}_J F_n$ の関係である(6.8)式から曲げモーメント M について求めると, 最下段の製材における成熟材縁が引張強度 ${}_M F_n$ に達する曲げモーメント ${}_M M_{an}$ は(6.9)式で表現でき, 同様に最下段の製材における未成熟材縁が引張強度 ${}_J F_n$ に達する曲げモーメント ${}_J M_{an}$ は(6.10)式で表現できる。

$${}_M \sigma_{en} / {}_M F_n = 1 \quad (6.7)$$

$${}_J \sigma_{en} / {}_J F_n = 1 \quad (6.8)$$

$${}_M M_{an} = \frac{{}_M F_n \cdot {}_M J (EI)_e}{{}_M E_n (h_n \cdot n - \lambda)} \quad (6.9)$$

$${}_J M_{an} = \frac{{}_J F_n \cdot {}_M J (EI)_e}{{}_J E_n ({}_J y_n - \lambda + {}_J h_n / 2)} \quad (6.10)$$

一方, 最上段の製材における成熟材縁が圧縮強度 ${}_M F_1$ に達する曲げモーメント ${}_M M_{a1}$ は(6.11)式で表現でき, 同様に最上段の製材における未成熟材縁が圧縮強度 ${}_J F_1$ に達する曲げモーメント ${}_J M_{a1}$ は(6.12)式で表現できる。GBM の曲げ強度 ${}_M J M_a$ は, ${}_M M_{an}$ と ${}_J M_{an}$ と ${}_M M_{a1}$ および ${}_J M_{a1}$ のいずれか小さい値となる ((6.13)式)。

$${}_M M_{a1} = \frac{{}_M F_1 \cdot {}_M J (EI)_e}{{}_M E_1 \cdot \lambda} \quad (6.11)$$

$${}_J M_{a1} = \frac{{}_J F_1 \cdot {}_M J (EI)_e}{{}_J E_1 ({}_J y_1 - \lambda + {}_J h_1 / 2)} \quad (6.12)$$

$${}_M J M_a = \min({}_M M_{an}, {}_J M_{an}, {}_M M_{a1}, {}_J M_{a1}) \quad (6.13)$$

6.6 部材の曲げ強度に成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異が及ぼす影響

6.6.1 製材の曲げ強度

本項では、製材内の成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異が製材の曲げ強度に及ぼす影響について検討するため、前節で示した成熟材要素と未成熟材要素を考慮した製材（無垢材）の断面解析を行う。すなわち、製材の断面内の未成熟材要素の引張強度を考慮し、1段重ね、1列の断面解析を行って製材の曲げ強度を求める。製材の寸法は、90・120・150 mmの正角材とし、製材断面と髓の図心は同一位置にある（髓の偏心はない）ものとする。（表 6.1）。未成熟材要素の範囲は、髓から $\phi 120$ mmの範囲とするが、これは平均年輪間隔を高橋^{6.5)}の報告を参考として5 mmと仮定したとき、12年の範囲に相当する。90・120・150 mmの小角材断面の模式図を図 6.4 に示す。

製材は JAS 機械等級区分によるスギ構造用製材の E70 とし、成熟材要素と未成熟材要素の繊維方向のヤング率は、等級区分の閾値の中間値である $E = 6850 \text{ N/mm}^2$ とする。成熟材要素と髓位置の未成熟材要素のそれぞれの引張強度または圧縮強度は、4.5.3 項で示した実大製材の曲げ・引張・圧縮実験結果^{6.6)}を基にモデル化した、成熟材要素と髓位置の未成熟材要素のヤング率と引張強度または圧縮強度の関係から求める（図 6.5）。成熟材要素の引

表 6.1 検討に用いる製材の断面

種別	無垢材		
髓の偏心	無し		
未成熟材寸法	$\phi 120$		
符号	N9x9	N12x12	N15x15
断面寸法	90x90	120x120	150x150
模式図			

断面寸法の単位：mm，●：未成熟材 $\phi 120$

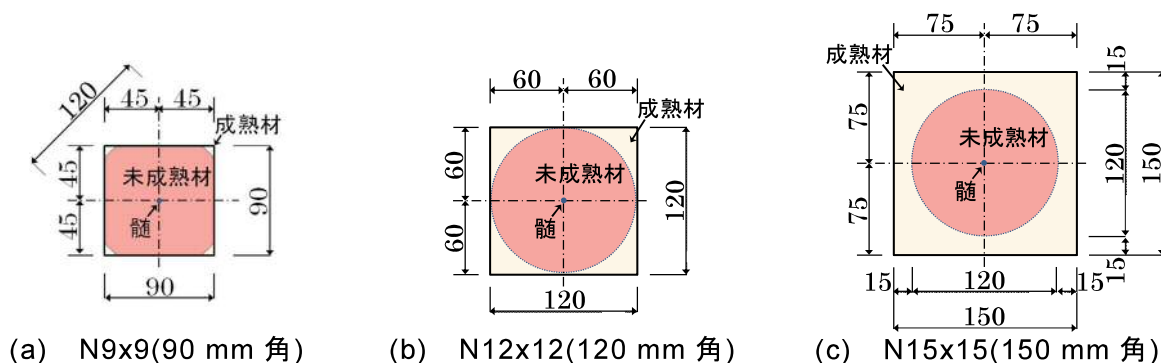


図 6.4 成熟材と未成熟材の範囲（髓の偏心無し）

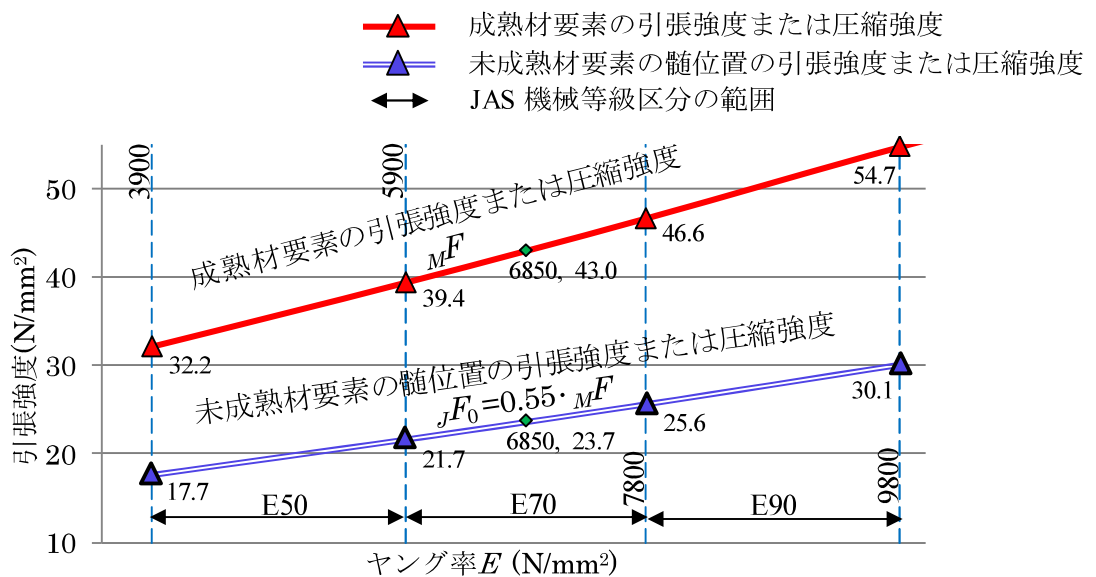


図 6.5 成熟材要素と髄位置の未成熟材要素のヤング率と引張強度または圧縮強度の関係

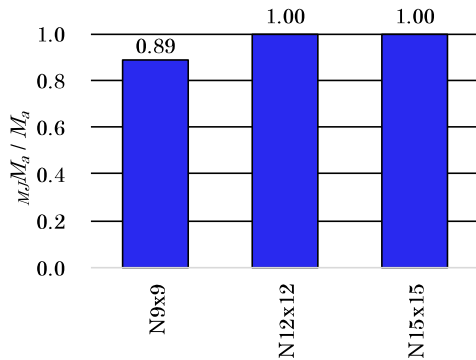
張強度または圧縮強度 M^F は 43.0 N/mm²，髄位置の未成熟材要素の引張強度または圧縮強度 JF_0 は 23.7 N/mm² とする。

図 6.6 に(6.13)式で得られる未成熟材要素の引張強度または圧縮強度を考慮した製材の曲げ強度 $M_J M_a$ と，未成熟材要素を考慮せずに製材内のヤング率と引張強度または圧縮強度は一樣として求めた曲げ強度 M_a （本項では，単純に製材の断面係数 $Z (=b \cdot h^2/6)$ に成熟材要素の引張強度または圧縮強度 M^F を乗じたもの）との比 $(M_J M_a / M_a)$ と，製材の曲げ強度の決定要素（成熟材要素と未成熟材要素のうち，断面に生じる垂直応力が先に引張強度または圧縮強度に達する要素）を示す。ここで， b ， h はそれぞれ製材の断面幅，断面せいである。

本検討の範囲では，製材の断面寸法が未成熟材要素の直径よりも大きく，髄の偏心が無い場合，製材の曲げ強度は引張縁の成熟材要素の引張強度もしくは圧縮縁の成熟材要素の圧縮強度によって決定し，製材の断面寸法が未成熟材要素の直径よりも小さい場合には，当然のことながら未成熟材要素の引張強度または圧縮強度によって決定し， $M_J M_a / M_a$ は 1.0 より小さくなり，製材の曲げ強度は 90 mm の正角材で未成熟材要素を考慮せずに製材内のヤング率と引張強度または圧縮強度は一樣として求めた製材の曲げ強度よりも約 10% 小さい値となっている。これは，4.5.3 項の図 4.7 で示した，断面寸法の大きい製材の曲げ試験体よりも，断面寸法の小さい試験体の製材の曲げ強度が小さくなるという実験結果と適合しており，その要因の一つとして成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異の影響があることを示唆している。

製材の曲げ強度の決定位置

N9x9	N12x12	N15x15
未成熟材	=	成熟材



←「成熟材」は成熟材要素が引張強度または圧縮強度に達することを示す。「未成熟材」は未成熟材要素が引張強度または圧縮強度に達することを示す。「=」は成熟材要素と未成熟材要素が引張強度または圧縮強度に達することを示す。

図 6.6 製材の曲げ強度 ($M_J M_a / M_a$)

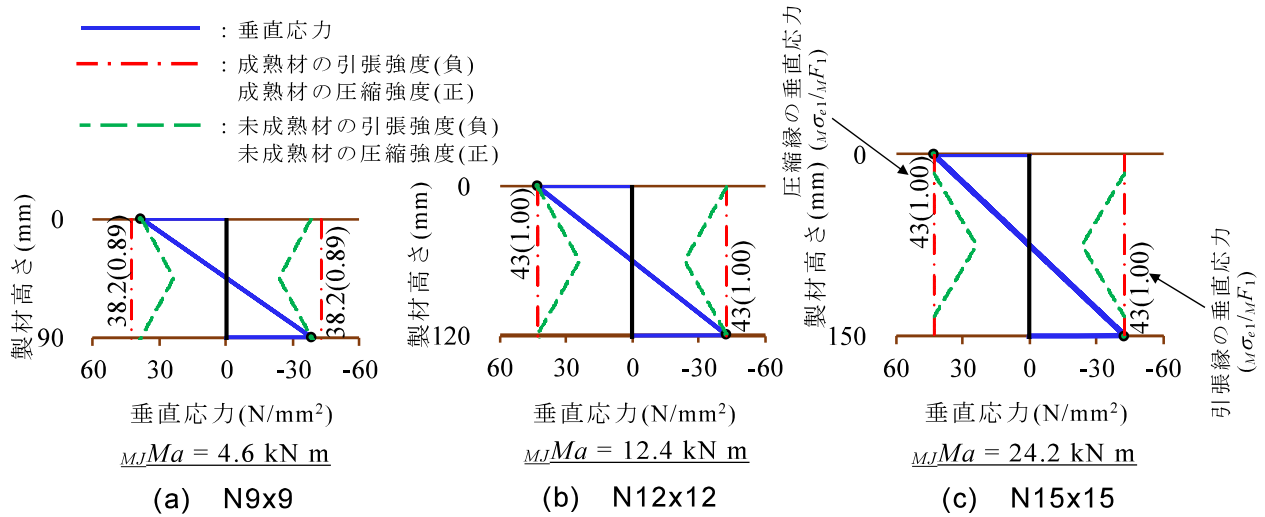


図 6.7 製材（無垢材）の断面に生じる垂直応力の分布

図 6.7 に 90・120・150 mm の正角材（それぞれ N9x9・N12x12・N15x15 で表わす）の断面に生じる垂直応力の分布を示す。図中の実線は垂直応力を，一点鎖線は成熟材要素の引張強度（負値）または圧縮強度（正值）を，破線は未成熟材要素の引張強度（負値）または圧縮強度（正值）を表している。成熟材要素と未成熟材要素のヤング率は，髄からの距離に関わらず一定（同じ値）とし，髄の偏心は無いものとしていることから，断面の引張縁または圧縮縁に生じる垂直応力が引張強度または圧縮強度に達することで製材の曲げ強度が決定し，未成熟材要素の髄位置の引張強度または圧縮強度 JF_0 が極めて小さい値であったとしても，製材の断面寸法が未成熟材要素の直径よりも小さくならない限り，未成熟材要素の引張強度または圧縮強度は製材の曲げ強度に影響を及ぼさないことが分かる。したがって，本論のような未成熟材要素の範囲と成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または

圧縮強度の設定が妥当であるとすれば、髓の偏心が無く、断面せいが 150 mm を超えるような製材では、未成熟材要素の影響を無視して製材の曲げ強度を算定しても差し支えないと考えられる。

一方で、部材に引張軸力または圧縮軸力が作用する場合には、断面に生じる垂直応力がほぼ一様となって髓位置の引張強度または圧縮強度で製材の引張強度または圧縮強度が決定することから、4.5.3 項の図 4.7～図 4.9 で示した実大製材の引張実験または圧縮実験の結果が、製材の曲げ実験の結果よりも小さいことについて、未成熟材の影響が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、本論のような未成熟材要素の範囲と成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の設定は有意性があると判断する。

6.6.2 GBM の曲げ強度

本項では、成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異が GBM の曲げ強度に及ぼす影響を検討するため、前節で示した成熟材要素と未成熟材要素を考慮した製材で構成する GBM の要素断面モデルを用いて GBM の曲げ強度の断面解析を行う。

検討する GBM の断面寸法は 120 mm・150 mm 角の JAS 機械等級区分 E70 のスギ構造用製材を 2～5 段積層した 1 列の GBM を対象とする（表 6.2）。また、各製材の髓の偏心は無いものとする。未成熟材要素の範囲と成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の設定は前項と同じとし、成熟材要素と未成熟材要素の繊維方向のヤング率は $E = 6850 \text{ N/mm}^2$ 、成熟材要素の引張強度または圧縮強度 $M F$ は 43.0 N/mm^2 、髓位置の未成熟材要素の引張強度または圧縮強度 ${}_M F_0$ は 23.7 N/mm^2 とする（髓位置の未成熟材要素の引張強度または圧縮強度と、成熟材要素の引張強度または圧縮強度との比 α は $\alpha = 0.55$ ）。

表 6.2 検討に用いる GBM 断面

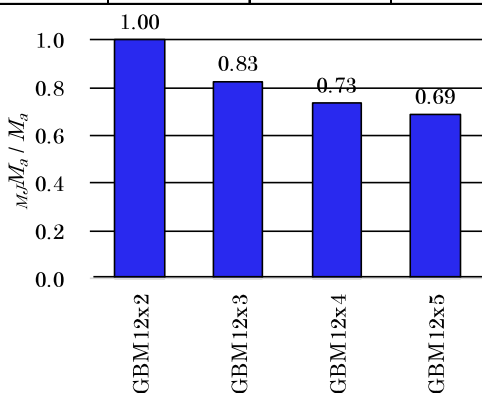
種別	GBM							
	120 mm 角				150 mm 角			
製材寸法	120 mm 角				150 mm 角			
段数 n	2	3	4	5	2	3	4	5
髓の偏心	無し							
未成熟材寸法	$\phi 120$							
符号	GBM12x2	GBM12x3	GBM12x4	GBM12x5	GBM15x2	GBM15x3	GBM15x4	GBM15x5
断面寸法	120x240	120x360	120x480	120x600	150x300	150x450	150x600	150x750
模式図								

断面寸法の単位：mm，●：未成熟材 $\phi 120$

「成熟材」は成熟材要素が引張強度または圧縮強度に達することを示す。
「未成熟材」は未成熟材要素が引張強度または圧縮強度に達することを示す。
「=」は成熟材要素と未成熟材要素が引張強度または圧縮強度に達することを示す。

GBMの曲げ強度の決定位置

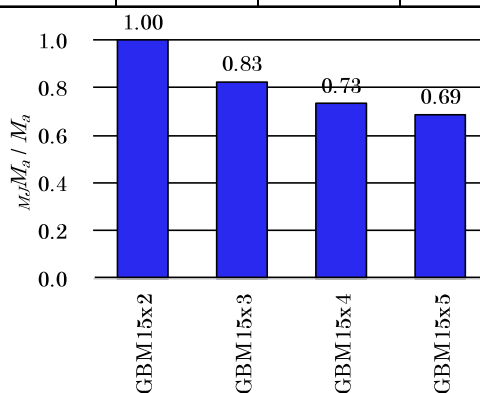
GBM12x2	GBM12x3	GBM12x4	GBM12x5
成熟材	未成熟材	未成熟材	未成熟材



(a) 120 mm 角 GBM

GBMの曲げ強度の決定位置

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



(b) 150 mm 角 GBM

図 6.8 GBM の曲げ強度 ($M_J M_a / M_a$)

図 6.8 に各製材内の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異を考慮して求めた GBM の曲げ強度 $M_J M_a$ と、未成熟材要素を考慮せずに GBM 内のヤング率と引張強度または圧縮強度は一樣として求めた GBM の曲げ強度 M_a (本項では、単純に GBM の断面係数 $Z (=B \cdot H^2/6)$ に成熟材要素の引張強度または圧縮強度 $M F$ を乗じたもの) との比 ($M_J M_a / M_a$) と、GBM の曲げ強度の決定要素 (成熟材要素と未成熟材要素のうち、断面に生じる垂直応力が先に引張強度または圧縮強度に達する要素) を示す。ここで、 B 、 H はそれぞれ GBM の断面幅、断面せいである。 $M_J M_a / M_a$ の値は、製材寸法に関わらず段数毎で同じ値となり、段数の増加に応じて漸近的に小さくなっている。未成熟材要素を考慮しないときの GBM の曲げ強度との差は 3 段重ねで約 15%、5 段重ねで約 30% となる。

図 6.9 に 120 mm 角 2~5 段 (それぞれ GBM12x2・GBM12x3・GBM12x4・GBM12x5 で表わす) および 150 mm 角 2~5 段 (それぞれ GBM15x2・GBM15x3・GBM15x4・GBM15x5 で表わす) の GBM 断面に生じる垂直応力の分布を示す。3 段重ね以上の GBM では、最下段または最上段の引張縁や圧縮縁よりも、それぞれの髓位置に生じる垂直応力が未成熟材要素の引張強度または圧縮強度に達して GBM の曲げ強度が決定している。これは、成熟材要素と髓位置の未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の比 ($\alpha =_J F_0 / M F$) に応じて GBM の曲げ強度が変化することを意味している。検討の範囲で 2 段重ねでは成熟材要素の引張強度または圧縮強度により GBM の曲げ強度が決定し、3 段重ね以上で未成熟材要素の引張強度または圧縮強度により GBM の曲げ強度が決定する結果となったが、成熟材要素と髓位置

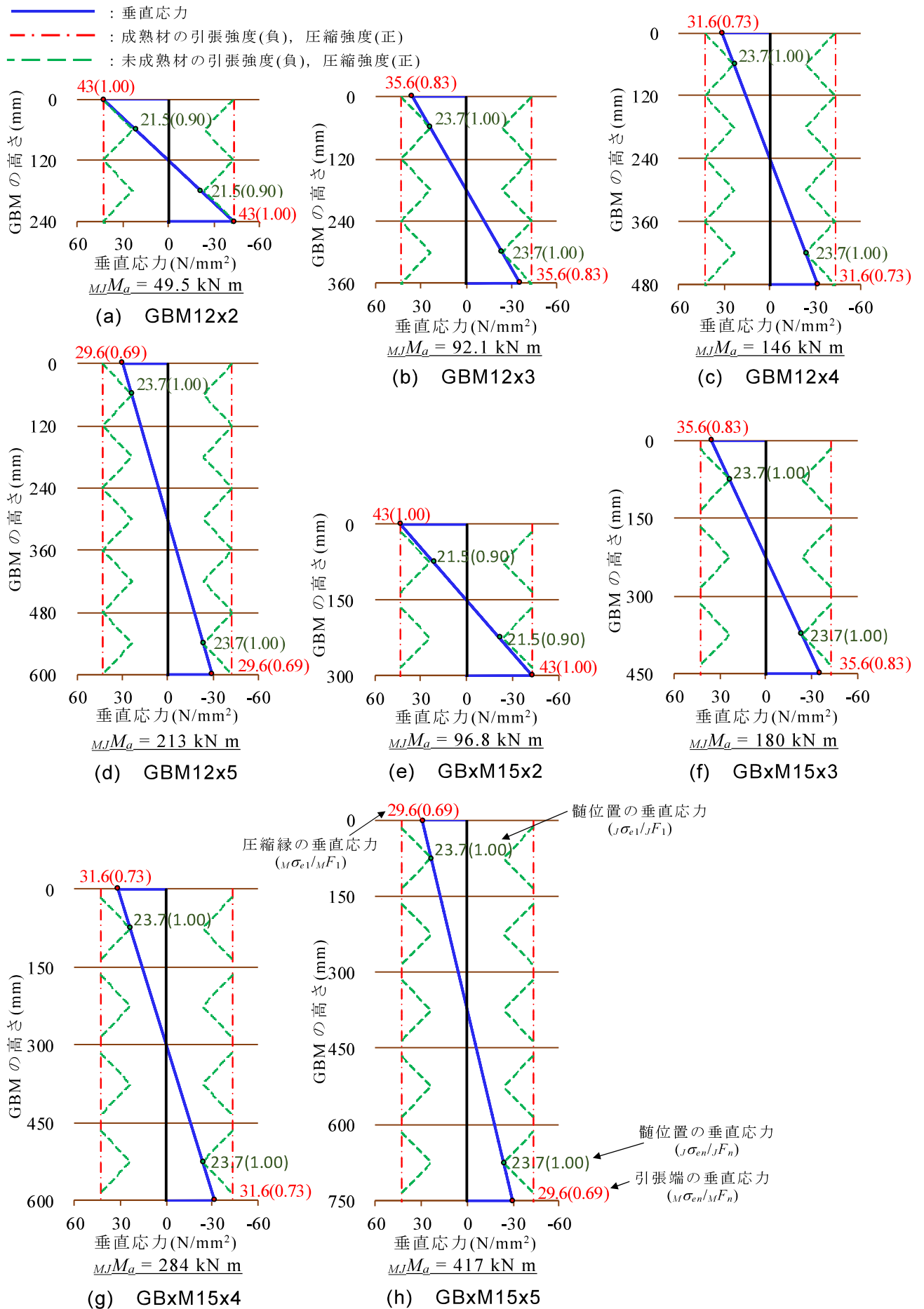


図 6.9 GBM の断面に生じる垂直応力の分布

の未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の比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要素の引張強度または圧縮強度で GBM の曲げ強度が決定する（2 段重ねの GBM も MJM_a / M_a が 1.0 よりも小さくなる）ことがありうる。上記の結果から、GBM は製材（無垢材）に比べて未成熟材の存在、具体的には成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異が GBM の曲げ強度に及ぼす影響が大きいと言える。

6.6.3 髓の偏心が製材と GBM の曲げ強度に及ぼす影響

前項まで、髓に偏心が無い場合について検討したが、当然のことながら実際には必ずしも製材の図心と髓は同一位置にはない。髓に偏心がある場合には部材断面の未成熟材要素に生じる垂直応力が引張強度または圧縮強度に達して部材の曲げ強度が決定することも考えられる。そこで、本項では髓の偏心を考慮して成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異が製材（無垢材）の曲げ強度や GBM の曲げ強度に及ぼす影響について調べる。

検討する製材（無垢材）の断面寸法は、150 mm 角の JAS 機械等級区分 E70 のスギ構造用製材とする。GBM の断面寸法は 150 mm 角の JAS 機械等級区分 E70 のスギ構造用製材を 2～5 段積層した GBM であり、1 列の GBM を対象とする（表 6.3）。これらの製材（無垢材）と GBM の成熟材要素について、髓が偏心している未成熟材要素を考慮した製材と、この製材で構成する GBM の要素断面モデルを用いて断面解析を行う。

髓の偏心寸法は、未成熟材要素が製材の上端または下端に接する位置で設定し、その距離 e は $e=15\text{ mm}$ ($e/h=0.1$, h : 製材せい) とする。製材（無垢材）は髓が断面の引張縁方向へ偏心する場合について、GBM は断面に生じる垂直応力が比較的小さい GBM 断面の中央付近に配置する製材の髓の偏心の影響を無視し、最下段と最上段製材の髓が断面の中央方向へ偏心する場合と、最下段製材の髓が引張縁方向へ、最上段製材の髓が圧縮縁方向へ偏心する場合について検討する。

未成熟材要素の範囲と成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の設定は前項と同じとし、成熟材要素と未成熟材要素の繊維方向のヤング率は $E = 6850\text{ N/mm}^2$ 、成熟材要素の引張強度または圧縮強度 M_F は 43.0 N/mm^2 、髓位置の未成熟材要素の引張強度または圧縮強度 JF_0 は 23.7 N/mm^2 とする（髓位置の未成熟材要素の引張強度または圧縮強度と、成熟材要素の引張強度または圧縮強度との比 α は $\alpha=0.55$ ）。

髓がそれぞれの方向へ偏心した場合の各製材内の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異を考慮して求めた曲げ強度 MJM_a と、未成熟材要素を考慮せずに

表 6.3 検討に用いる製材と GBM の断面（髓が偏心したとき）

種別	GBM				
製材寸法	150 mm角				
段数 n	2	3	4	5	
髓の偏心	有り				
未成熟材寸法	$\phi 120$				
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心)					
種別	無垢材	GBM			
製材寸法	150 mm角	150 mm角			
段数 n	1	2	3	4	5
髓の偏心	有り	有り			
未成熟材寸法	$\phi 120$	$\phi 120$			
符号	N15x15e+	GBM15x2e+	GBM15x3e+	GBM15x4e+	GBM15x5e+
断面寸法	150x150	150x300	150x450	150x600	150x750
模式図 (髓が断面の引張縁，圧縮縁方向へ偏心)					

断面寸法の単位: mm, ●:未成熟材 $\phi 120$, 偏心寸法はすべて15mm

GBM 内のヤング率と引張強度または圧縮強度は一様として求めた曲げ強度 M_a との比 ($_{MJ}M_a / M_a$) と, GBM の曲げ強度の決定要素を図 6.10 に示す。髓の偏心がある場合の $_{MJ}M_a / M_a$ の値, すなわち, 未成熟材要素を考慮しないときの GBM の曲げ強度との差は, 最上段と最下段製材の髓が断面の中央方向へ偏心すると大きくなり, 最上段製材の髓が圧縮縁方向へ, 最下段製材の髓が引張縁方向へ偏心すると小さくなる。また, 髓の偏心が無い GBM の $_{MJ}M_a / M_a$ (図 6.8) と見比べると, 段数が多いほど髓の偏心が無い場合のそれとの差が小さくなり, 髓の偏心の有無による $_{MJ}M_a / M_a$ の値の差は GBM の 2 段重ねで約 $\pm 10\%$, 5 段重ねで $\pm 5\%$ となっている。

図 6.11 に最下段と最上段製材の髓が断面の中央方向へ偏心した 150 mm 角 2~5 段 (それぞれ GBM15x2e-・GBM15x3e-・GBM15x4e-・GBM15x5e- で表わす) と, 髓が断面の引張縁方向へ偏心した 150 mm 角の製材 (無垢材) (N15x15e+ で表わす) および最下段製材の髓が引張縁方向へ, 最上段製材の髓が圧縮縁方向へ偏心した 150 mm 角 2~5 段 (それぞ

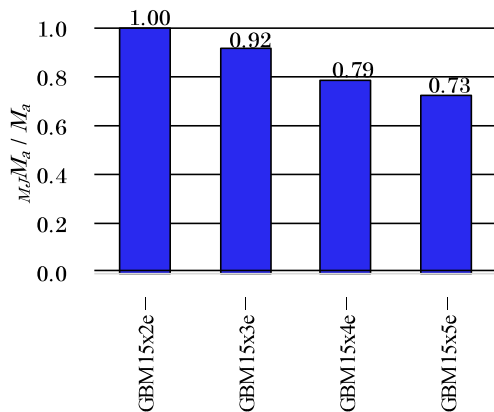
れ GBM15x2e+・GBM15x3e+・GBM15x4e+・GBM15x5e+で表わす)の断面せい方向の垂直応力の分布を示す。製材の曲げ強度は、未成熟材要素が製材の引張縁にある ($e/h=0.1$)程度であれば、成熟材要素に生じる応力が先に引張強度に達して決定しているため、髓の偏心は製材の曲げ強度の大きさに影響を及ぼしていない(図 6.11(e))。3 段重ね以上の GBM の曲げ強度は、髓の偏心が無い場合と同様に最上段・最下段製材の髓に生じる垂直応力が先に引張強度または圧縮強度に達して GBM の曲げ強度が決定している。一方で、2 段重ね GBM の曲げ強度は、偏心が無い場合では成熟材要素に生じる垂直応力が先に引張強度または圧縮強度に達するが(図 6.9(e))、最上段製材の髓が圧縮縁方向へ、最下段製材の髓が引張縁方向へ偏心した場合は髓に生じる垂直応力が先に引張強度または圧縮強度に達している(図 6.11(f))。

GBMの曲げ強度の決定位置

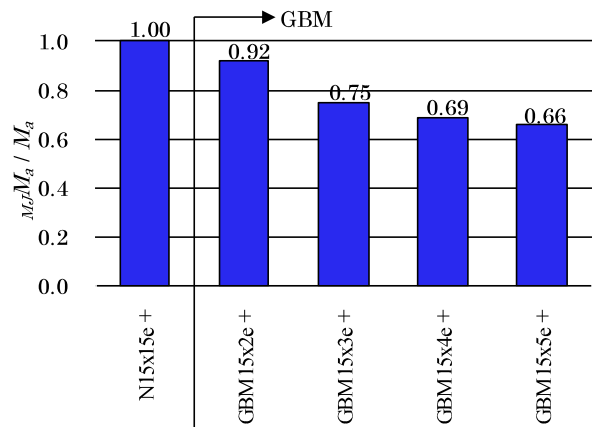
GBM15x2-	GBM15x3-	GBM15x4-	GBM15x5-
成熟材	未成熟材	未成熟材	未成熟材

製材とGBMの曲げ強度の決定位置

N15x15+	GBM15x2+	GBM15x3+	GBM15x4+	GBM15x5+
=	未成熟材	未成熟材	未成熟材	未成熟材



(a) 断面の中央方向へ偏心



(b) 断面の縁方向へ偏心

図 6.10 髓が偏心したときの無垢材または GBM の曲げ強度の算定結果 ($M_G M_a / M_a$)

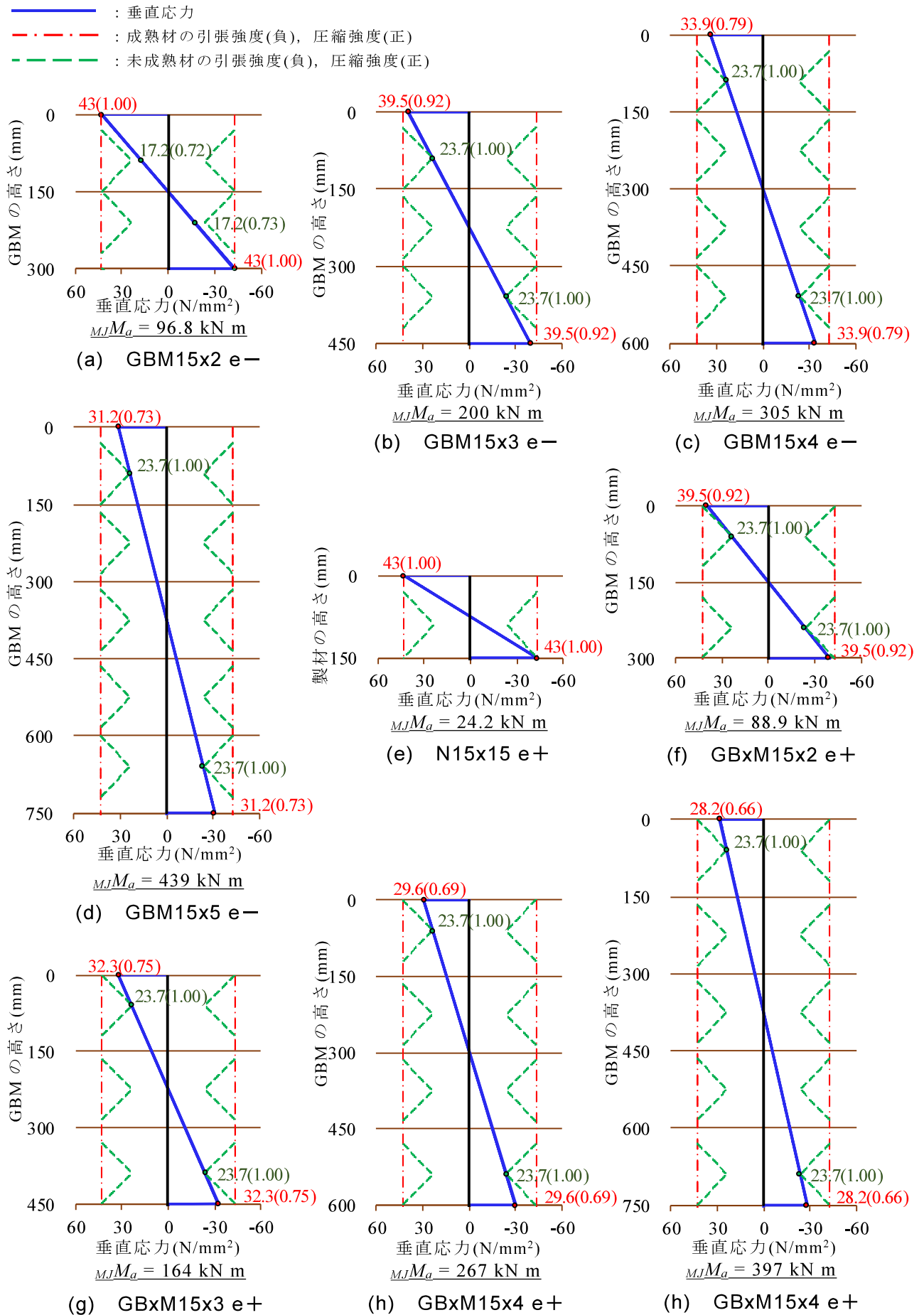


図 6.11 製材（無垢材）と GBM の断面に生じる垂直応力の分布

6.7 成熟材と未成熟材を考慮した実験結果の評価

本論の2章で示した実大 GBM 試験体について、成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異が GBM の曲げ強度に及ぼす影響を検討するため、成熟材要素と未成熟材要素を考慮した製材で構成する GBM の要素断面モデルを用いて実験結果の評価を行う。なお、前項の検討から、未成熟材要素が製材の上端または下端に接する ($e/h=0.1$) 程度の髓の偏心が GBM の曲げ強度に及ぼす影響はさほど大きくないと判断できる。よって、本節では各 GBM 試験体の曲げ強度は髓の偏心が無いものとして評価する。

GBM 試験体の製作直前に測定した縦振動法による各製材のヤング係数 (E_{fri}) と (図 2.2)、製材内の成熟材要素と未成熟材要素のそれぞれのヤング率 (${}_M E_i, {}_J E_i$) は同等とみなす。各製材内の成熟材要素の引張強度または圧縮強度 (${}_M F_i$) と、未成熟材要素の髓位置の引張強度または圧縮強度 (${}_J F_{0i}$) は、4.5.3 項で示した実大製材の曲げ・引張・圧縮実験結果を基にモデル化した、成熟材要素と髓位置の未成熟材要素のヤング率と引張強度または圧縮強度の関係から、各製材内の成熟材要素と未成熟材要素のそれぞれのヤング率 (${}_M E_i, {}_J E_i$) を用いて求める。未成熟材要素の範囲は、前節と同様に髓から $\phi 120$ mm の範囲とする。

図 6.12 に GBM15x2 の No.⑤試験体と、GBM15x5 の No.⑤試験体の最大荷重時に GBM 断面に生じる垂直応力の分布を示す。製材間のヤング係数の差異により、中立軸の位置は断面中央からずれ、ヤング係数が大きい製材の成熟材要素と未成熟材要素が負担する垂直応力の値が大きくなる。しかし、ヤング係数に応じて成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度も変化すると仮定しているため、一概にヤング係数が大きい製材で GBM の曲げ強度が決定するものではなく、検討の範囲では、GBM の曲げ強度が最下段または最上段の製材で決まっている。

図 6.14(a)に各製材段数の GBM の最大荷重時にロードスパン内に生じる曲げモーメント ${}_e M$ を、未成熟材要素を考慮せずに GBM 内のヤング率と引張強度または圧縮強度は一様として求めた GBM の曲げ強度 M_a (本項では、単純に GBM の断面係数 $Z (=B \cdot H^2/6)$ に成熟材要素の引張強度または圧縮強度 ${}_M F$ を乗じたもの) で除した実験値と計算値の比 (${}_e M/M_a$) を示す。また、図 6.14(b)に ${}_e M$ を製材間のヤング係数の差異と各製材内の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異を考慮し、(6.13)式により算定した GBM の曲げ強度の計算値 ${}_{MJ} M_a$ で除した実験値と計算値の比 (${}_e M/{}_{MJ} M_a$) を示す。加えて、図 6.15 に各製材段数の GBM の曲げ強度の実験値と計算値の比 (${}_e M/M_a$ と ${}_e M/{}_{MJ} M_a$) の標準偏差を示す。なお、2.3 節で述べた通り、GBM 試験体の破壊性状は、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6.13）。各製材内のヤング率と強度を一様としたときの eM/M_a 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 eM/M_a の平均値は0.75～0.95であり、全試験体の eM/M_a の平均値は0.82である。なお、それらに製材の段数による傾向やGBM試験体の破壊性状による傾向は見られない。一方、製材間のヤング係数の差異と、各製材内の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異を考慮したときの eM/M_JM_a の平均値は0.80～1.41である。全試験体の eM/M_JM_a の平均値は1.02であり、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GBMの曲げ強度を過小に評価する傾向が見られる。また、 eM/M_a と eM/M_JM_a の標準偏差は、120角製材では各段数でほぼ同じ値であり150角製材では段数が多いGBMで大きくなっている。

上記のように、製材間のヤング係数の差異と、各製材内の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異を考慮しても、GBMの曲げ強度の実験結果を満足できるほど良くは評価できてはいない。GBMの曲げ強度の評価精度に影響する大きな要因に成熟材要素と未成熟材要素のヤング率と引張強度または圧縮強度の設定があると考えられる。また、検討では各要素のヤング率を同一と設定したことにより、髓位置に生じる垂直応力を過大に評価している可能性がある。また、6.5.2項に示した通り、3段重ね以上のGBMの

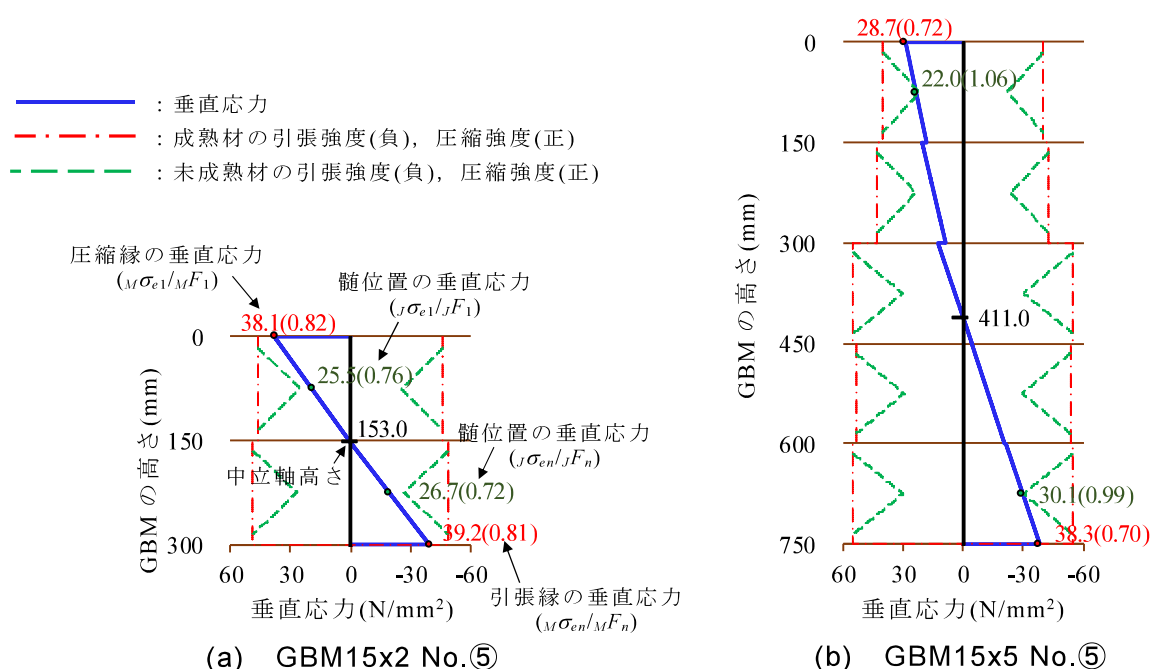


図 6.12 最大荷重時の垂直応力の分布

P : 荷重, δ : 中央たわみ, ◆印は最大荷重 P_{max} を示す

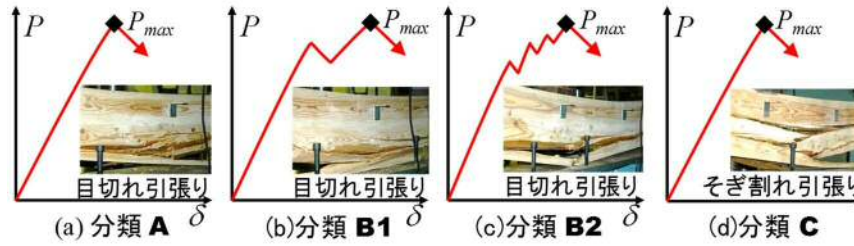
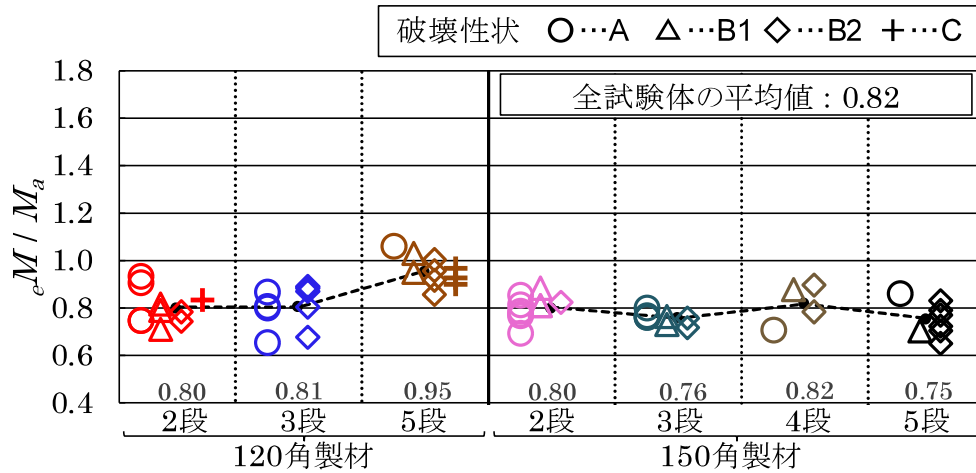
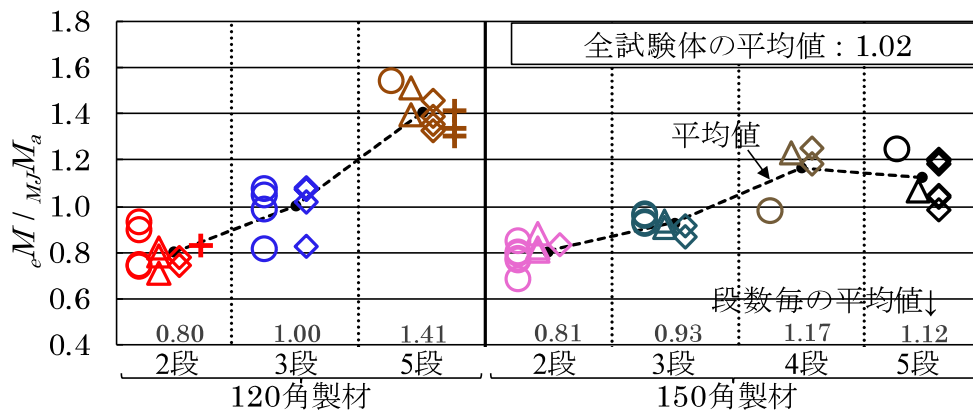


図 6.13 破壊性状の分類 (2章, 図 2.7 の再掲)



(a) eM/M_a (未成熟材を無視)



(b) eM/M_a (未成熟材を考慮)

図 6.14 GBM の実験結果の評価

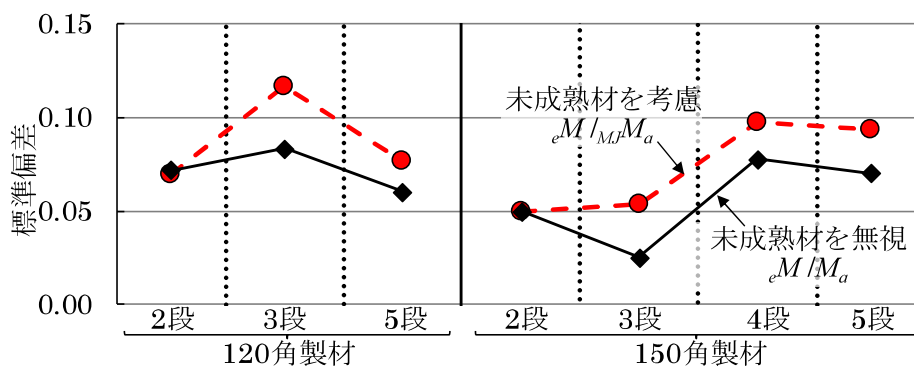


図 6.15 eM/M_a と eM/M_a の標準偏差

曲げ強度は最下段または最上段の製材の髄位置に生じる垂直応力が引張強度または圧縮強度に達して決定しており、製材の段数が多いほど GBM の最下段または最上段製材の髄位置と引張縁または圧縮縁に生じる垂直応力の差が小さくなることから、成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差が検討で設定した値よりも小さいのであれば、製材の段数が多いものでは GBM の曲げ強度が大きくなり、製材の段数が多いもので GBM の曲げ強度を過小に評価する傾向が改善する可能性がある。

6.8 まとめ

本章では各製材の成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異が GBM の曲げ強度に及ぼす影響について検討するため、既往の研究を参考に製材内の未成熟材要素の範囲と、成熟材要素と未成熟材要素の繊維方向のヤング率と引張強度または圧縮強度を設定し、その成熟材要素と未成熟材要素を考慮した製材で構成する GBM の要素断面モデルを用いて GBM の曲げ強度の断面解析を行った。また、本論の 2 章で示した実大 GBM 試験体について、GBM の要素断面モデルを用いて実験結果の評価を行った。

ここで、未成熟材要素の引張強度または圧縮強度は、髄からの距離に応じて線形に変化し、成熟材要素の引張強度または圧縮強度 ${}_MF$ は一定とした。また、未成熟材要素の髄位置の引張強度または圧縮強度 ${}_jF_0$ は ${}_jF_0 = \alpha \cdot {}_MF$ ($\alpha = 0.55$) の関係にあるものとした。加えて、成熟材要素のヤング率 ${}_ME$ と未成熟材要素のヤング率 ${}_jE$ 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 と等しいものとした。以下に得られた知見を示す。

- ①髄の偏心が無い場合、検討の範囲では、製材（無垢材）の断面寸法が未成熟材要素の直径よりも小さい場合や、3 段重ね以上の GBM で未成熟材要素の引張強度または圧縮強度により部材の曲げ強度が決定しており、製材内の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異が部材の曲げ強度に及ぼす影響は、製材（無垢材）よりも GBM においてより大きく現れる。各製材内の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異を考慮して求めた GBM の曲げ強度と、未成熟材要素を考慮せずに GBM 内のヤング率と引張強度または圧縮強度が一樣として求めた GBM の曲げ強度との比は、製材寸法に関わらず段数毎で同じ値となり、段数の増加に応じて漸近的に小さくなる。このとき、未成熟材要素を考慮しないときの GBM の曲げ強度との差は 3 段重ねで約 15%、5 段重ねで約 30%となる。

②製材内の未成熟材要素の範囲を髓から $\phi 120$ mmとし、150 mm角の製材の上端または下端に接する位置に髓が偏心するとき（偏芯距離 $e=15$ mm ($e/h=0.1$, h : 製材せい)), GBMの曲げ強度の髓の偏心が無い場合のそれとの差は、最上段と最下段製材の髓が断面の中央方向へ偏心すると大きくなり、最上段製材の髓が圧縮縁方向へ、最下段製材の髓が引張縁方向へ偏心すると小さくなる。また、段数が多いほど差が小さくなり、2段重ねで約 $\pm 10\%$ となるのに対して5段重ねでは $\pm 5\%$ となる。未成熟材要素が製材の上端または下端に接する ($e/h=0.1$) 程度の髓の偏心が GBMの曲げ強度に及ぼす影響はさほど大きくない。

③実大 GBM 試験体の曲げ実験について、製材間のヤング係数の差異と、各製材内の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異を考慮しても、段数が少ない GBMの曲げ強度は過大に、段数が多い GBMの曲げ強度は過小に評価する傾向が見られ、実験結果を満足できるほど良くは評価できてはいない。GBMの曲げ強度の評価精度に影響する大きな要因に成熟材要素と未成熟材要素のヤング率と引張強度または圧縮強度の設定があると考えられる。

6章 参考文献

- 6.1) 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
- 6.2) 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
- 6.3) 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
- 6.4) 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
- 6.5) 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
- 6.6) 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

7 章 体積に関する寸法効果が GBM の 曲げ強度に及ぼす影響

7章 体積に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響

7.1 はじめに

一般的に材料強度は試験する試験体の体積の影響を受け、体積が大きいものほどその強度が小さくなる傾向が認められる。これを体積に関する寸法効果と呼ぶ^{7.1)}。GBM はロングスパンの横架材（大断面部材）として主に用いられるため、構造設計において GBM の曲げ強度に影響を及ぼす体積に関する寸法効果について、どのように考慮することが適切かを明らかにすることは、GBM の設計手法の確立に欠かせない課題の一つである。

既に 2 章で述べた実大 GBM 試験体の曲げ実験より、曲げ破壊した試験体は最大荷重の直前に曲げ引張側となる最下段の製材に脆性的な引張破壊が生じて急激に耐力が低下していることと、曲げ圧縮側となる最上段の製材が圧縮降伏していたとしても GBM の曲げ強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、3.5.2 項に示した通り、最下段製材の垂直応力の分布は製材の段数が多いほど曲げ成分に比べて引張成分が大きくなることから、筆者は GBM の曲げ強度は最下段の製材内に生じる垂直応力を引張成分と曲げ成分の単純和の組み合わせ応力を用いて評価することが適切であると考えている。しかし、曲げ引張縁の最下段の製材に着目して、組み合わせ応力を用いて GBM の曲げ強度を評価する場合に、無垢材と同様の方法で体積に関する寸法効果を適切に考慮することができるかは検証する必要がある。さらに、実際の建築物において GBM を柱に用いるときは、せいが大きく長さが短いような部材となることも考えられることから、長さに関する寸法効果も考慮して強度を評価する方が適切とも考えられる。

そこで、本章では、GBM における体積に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす定性的な傾向を検討するため、120 mm 角および 150 mm 角の製材を積層する GBM について、最下段の製材の引張強度と曲げ強度に対する寸法効果を考慮し、GBM の等価断面モデルを用いた組み合わせ応力を用いた断面解析を行う。なお、本論では製材の引張試験において断面内に生じる垂直応力の分布はほぼ一様となることから、最下段の製材の引張強度に対して最下段製材の体積に関する寸法効果係数を考慮する。一方、製材の曲げ試験において断面内に生じる垂直応力は引張縁付近が最大となることから、曲げ強度に対して最下段の製材の引張縁（GBM の下面）の面積に関する寸法効果係数を考慮する。

加えて、寸法効果を考慮する評価手法の適用性を検証するため、実大 GBM の曲げ実験結果について、最下段の製材の引張強度に対して最下段製材の体積に関する寸法効果係数を、曲げ強度に対して最下段の製材の引張縁の面積に関する寸法効果係数を考慮し、最下

段製材に生じる垂直応力について引張成分と曲げ成分の単純和の組み合わせ応力を用いた評価を行う。

7.2 既往研究

本節では、寸法効果に関する既往研究の知見と GBM の工学的な性質を踏まえて、GBM の曲げ強度に対して体積に関する寸法効果を考慮する方法について検討するため、寸法効果に関する国内外の強度評価に用いられている規定と既往の研究について整理する。また、GBM の構成材である製材の引張強度と曲げ強度について、体積に関する寸法効果に関連する事項をまとめる。

7.2.1 寸法効果に関する研究

集成材の日本農林規格(以下、JAS)では、集成材の曲げ強度に対する寸法効果係数 K_{SR} として下式を用いている^{7.2)}。

$$K_{SR} = \left(\frac{H_0}{H} \right)^{1/\kappa_{SR}} \quad (7.1)$$

ここで、 H は断面せい、 H_0 は標準断面せい、 κ_{SR} は寸法効果を表す定数であり、 $H_0=300$ mm、 $\kappa_{SR}=9.0$ とされている。(7.1)式は部材の断面せいのみの関数として簡単な形で表わされているが、一般に断面せいと横架材の長さ(スパン)には相関があること等を踏まえると、これには体積の影響も間接的に含まれていると考えられる。

寸法効果に関する中村の解説^{7.1)}に拠ると、寸法効果を工学的に説明する試みとして、Weibull の破壊を確率論的にモデル化する最弱リンク理論がある^{7.3)}。この理論を木材の寸法効果に適用した代表的な研究として、Bohannan^{7.4)}、Barrett^{7.5)}、Madsen^{7.6)}の研究がなされており、国内外の木材の強度に対する評価手法にも取り入れられている^{7.7)~7.10)}。Barrett は体積 V_1 と応力 σ_1 、体積 V_2 と応力 σ_2 の組み合わせがあるとき、それぞれの確率密度関数の分布形状を表す形状パラメータ m や、広がりを表す尺度パラメータが両者で等しい(V_1 と V_2 の応力分布が相似形となる)とき、それぞれの破壊確率が等しくなる体積や応力分布の条件を寸法効果と考え、これらの関係を(7.2)式で表現している^{7.5)}。

$$\sigma_1 / \sigma_2 = \left(V_1 / V_2 \right)^{1/m} \quad (7.2)$$

実大材の構造性能を評価するための試験方法を定めている北米の規格 ASTM D 1990-19 では、この考えを進展させ、部材の強度に及ぼす体積に関する寸法効果の影響を断面せい

(H), 断面幅(B), 部材スパン(L)の影響に分解し, それぞれに異なる値の寸法効果を表す定数を与え, 木材の異方性を考慮する手法を提案している^{7,8)}。この考え方を強度に対する寸法効果係数 K_V の形で表わすと下式のようになる。

$$K_V = K_H \cdot K_B \cdot K_L = \left(\frac{H_0}{H} \right)^{1/\kappa_H} \left(\frac{B_0}{B} \right)^{1/\kappa_B} \left(\frac{L_0}{L} \right)^{1/\kappa_L} \quad (7.3)$$

ここで, K_H, K_B, K_L はそれぞれ断面せい, 断面幅, 部材長さに関する寸法効果係数, $\kappa_H, \kappa_B, \kappa_L$ はそれぞれ断面せい, 断面幅, 部材長さに関する寸法効果を表す定数, H_0, B_0, L_0 はそれぞれ断面せい, 断面幅, 部材長さの標準寸法である。(7.3)式に L/H と L_0/H_0 は等しく, 断面幅に関する寸法効果は小さい($K_B=1.0$)という条件を加えれば(7.1)式と等しくなる。

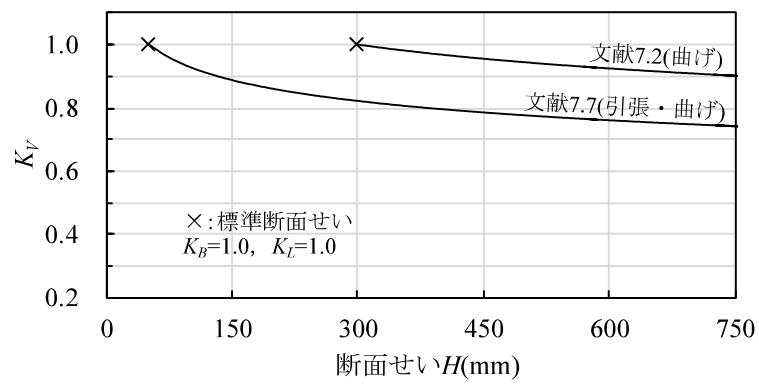
表 7.1 に国内外の強度の評価に用いられている規定, もしくは既往の研究で得られた寸法効果を表す定数を整理する。近年では曲げ強度や引張強度に対して断面せい(H), 断面幅(B), 部材長さ(L) (引張試験における加力点間距離又は曲げ試験における支点間距離) の寸法に着目した研究が行われており, それぞれに関する寸法効果を表す定数が示されている。なお, 同表の<>内の数値は標準寸法が規定されていないため, 検討用に筆者が設定した値であり, ()内の数値は対象材料の L_0 / H_0 から定まる値, [] 内の数値は中央値であり, 検討用に筆者が設定した。 K_{450} / K_{300} は断面せいに関する寸法効果係数の場合は断面せいが 450 mm のときと 300 mm のときの比または部材長さに関する寸法効果係数の場合は部材長さが 5400 mm のときと 8100 mm のときの寸法効果係数の比である。

表 7.1 に示した研究等の標準寸法と寸法効果を表す定数から求まる寸法効果係数と断面せい(H)もしくは部材長さ(L)の関係を図 7.1 に示す。同図において Buchanan^{7,11)}, 井道ら^{7,12)}, 日本住宅・木材技術センター^{7,13)}の実験の範囲を超える場合の値は, 推定値として破線で示している。同図より, 個々の寸法効果の影響は大きく異なるように見えるが, それらの標準寸法は異なっていることから, ある寸法における寸法効果係数の大小について考察することに工学的な意味はない。そこで, 断面せいが 450 mm の寸法効果係数を 300 mm の寸法効果係数で除した値(K_{450} / K_{300})を用いて寸法効果を比較する。それぞれの K_{450} / K_{300} を表 7.1 に示す。それぞれの K_{450} / K_{300} の値は 0.83~0.96 であり, 各研究等で大きくは違わない。また, 引張強度に対する寸法効果は, 曲げ強度に対する寸法効果とほぼ等しいか, 若干小さくなっている。

表 7.1 寸法効果に関する規定と既往研究の結果

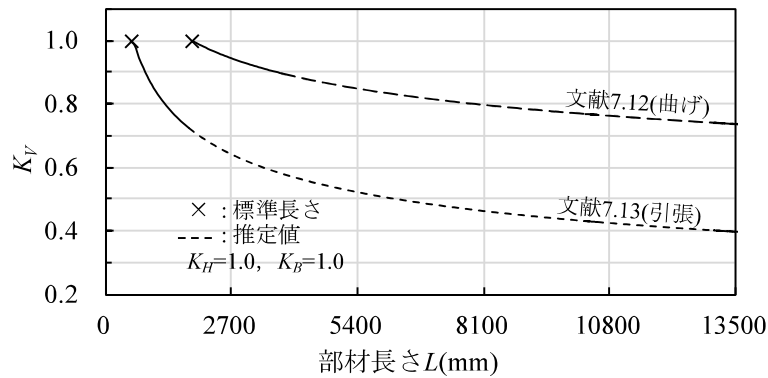
規定の名称 又は著者	対象 強度	対象材料	標準寸法			検討に用いる寸法 効果を表す定数			$K_{450}/$ K_{300}
			H_0 (mm)	B_0 (mm)	L_0 (mm)	κ_H	κ_B	κ_L	
集成材の JAS ^{7.2)}	曲げ	集成材	300	—	—	9.0	—	—	0.96
ASTM D 245-06 ^{7.7)}	引張 曲げ	構造用製材, $L_0/H_0=14$ $B=51\sim 102$ mm程度	51	—	(714)	9.0	—	—	0.96
ASTM D 1990-19 ^{7.8)}	引張 曲げ	実大試験体, $L_0/H_0=17$	< 89 >	—	< 1,513 >	3.4	—	7.1	0.84
ASTM D 3737-91 ^{7.9)}	曲げ	集成材	305	130	6401	10.0	9.0	10.0	0.92
EN384 ^{7.10)}	引張	構造用製材, $L_0/H_0=9$	150	—	(1,350)	5.0	—	5.0	0.85
	曲げ	構造用製材, $L_0/H_0=18$	150	—	(2,700)	5.0	—	5.0	0.85
Buchanan ^{7.11)}	引張	スプルー・ス・パイン・ファー $B=38$ mm(一定), $H=89\cdot 140$ mm $L=450\sim 3000$ mm	89	—	450	4.0	—	4.0~ 6.0 [5.0]	0.83
	曲げ	スプルー・ス・パイン・ファー $B=38$ mm(一定), $H=89\cdot 140$ mm $L=840\sim 2440$ mm	89	—	840	8.0~ 15.0 [11.5]	—	4.0~ 6.0 [5.0]	0.89
井道ら ^{7.12)}	曲げ	構造用製材 スギ E70 $H=120$ mm(一定), $L=1890\sim 3780$ mm	—	—	1,890	—	—	6.5	0.94
HOWTEC ^{7.13)}	引張	ラミナ カラマツ L70 $H=24$ (一定), $B=150$ mm(一定), $L=600\sim 1800$ mm	—	—	600	—	—	3.4	0.89

H :断面せい, B :断面幅, L :部材長さ(引張試験における加力点間距離又は曲げ試験における支点間距離), H_0 :標準断面せい, B_0 :標準断面幅, L_0 :標準部材長さ, κ_H , κ_B , κ_L :それぞれ断面せい, 断面幅, 部材長さに関する寸法効果を表す定数, < >内の数値は標準寸法が規定されていないため, 検討用に筆者が設定した値, ()内の数値は対象材料の L_0/H_0 から定まる値, []内の数値は中央値であり, 検討用に筆者が設定した, K_{450} / K_{300} は断面せいに関する寸法効果係数の場合は断面せいが 450 mm のときと 300 mm のときの比 または, 部材長さに関する寸法効果係数の場合は部材長さが 5400 mm のときと 8100 mm のときの寸法効果係数の比

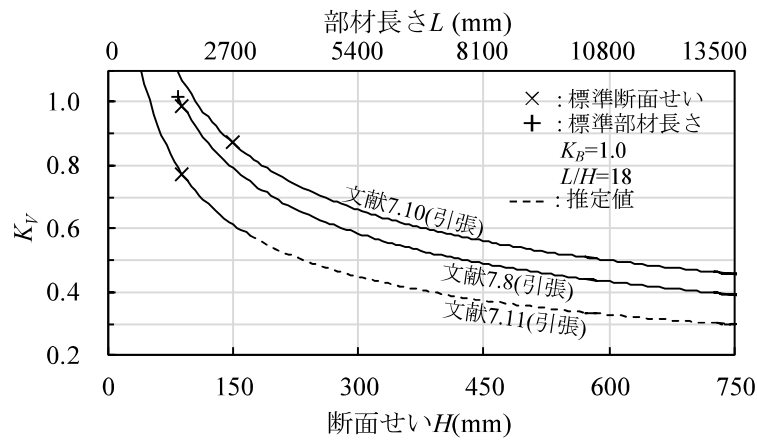


K_V :強度に対する寸法効果係数
 $(K_V = K_H \cdot K_B \cdot K_L)$,
 K_H, K_B, K_L :それぞれ断面せい, 断面幅, 部材長さに関する寸法効果係数

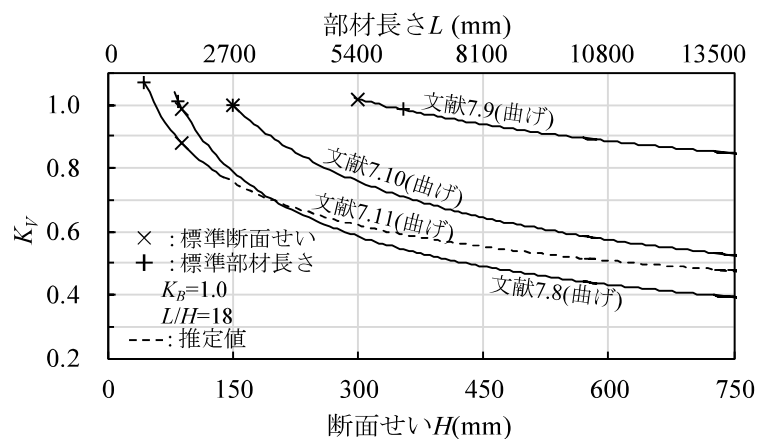
(a) 断面せいに関する寸法効果係数 (引張強度, 曲げ強度)



(b) 部材長さに関する寸法効果係数 (引張強度, 曲げ強度)



(c) 断面せいと部材長さに関する寸法効果係数 (引張強度)

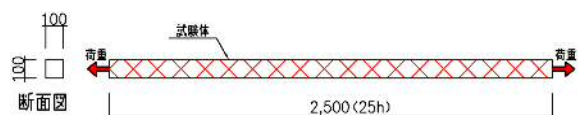


(d) 断面せいと部材長さに関する寸法効果係数 (曲げ強度)

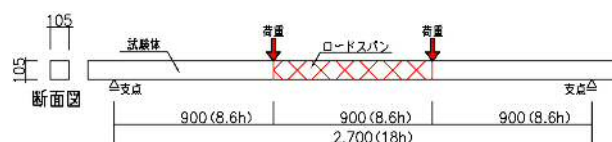
図 7.1 寸法効果係数 K_V と断面せい又は部材長さの関係

7.2.2 製材の引張強度と曲げ強度

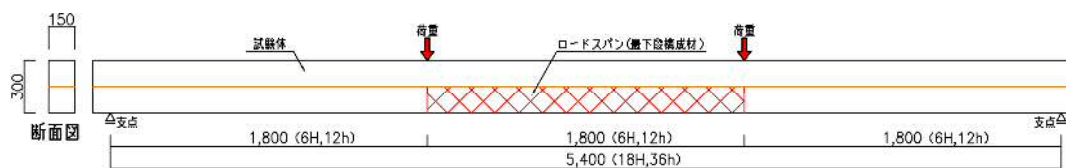
2.3 節で述べた通り，スギ製材の基準強度では，各機械等級内の引張基準強度 F_t と曲げ基準強度 F_b の比は $\gamma = F_t / F_b = 0.6$ としている。これは，木材強度・木質構造研究会^{7.14)}の実大のスギ製材を用いた引張試験と曲げ試験結果から，両強度の95%下限値の比 γ として $\gamma = 0.64$ が得られたことに基づいている^{7.15)}。この強度の差異はそれぞれの応力分布の相違の影響により生じたものと考えられる。なお，両試験で試験体の寸法が異なる(図 7.2(a), (b))ため， γ は応力分布に加えて体積の影響も含まれていると考えられる。しかしながら，現時点ではこれらの試験結果における応力分布と体積のそれぞれの影響を明確に分離することは困難である。応力分布の影響は寸法効果の一種と考えることもできるが，本章ではこれを引張強度と曲げ強度の比として扱い，体積に関する寸法効果について検討する。一方，引張試験の試験体の断面せいと断面幅は，曲げ試験の試験体の約 0.95 倍とほぼ同じであるのに対し，引張試験体の加力点間距離は，曲げ試験体のロードスパンの約 2.8 倍となることから，両者の各寸法が同じときの γ は $\gamma = 0.64$ よりも大きい値になることが示唆される。このような状況も踏まえ，次節ではスギ製材で構成する GBM の曲げ強度の評価において，どのように寸法効果の影響を考慮することが妥当であるかについて検討する。



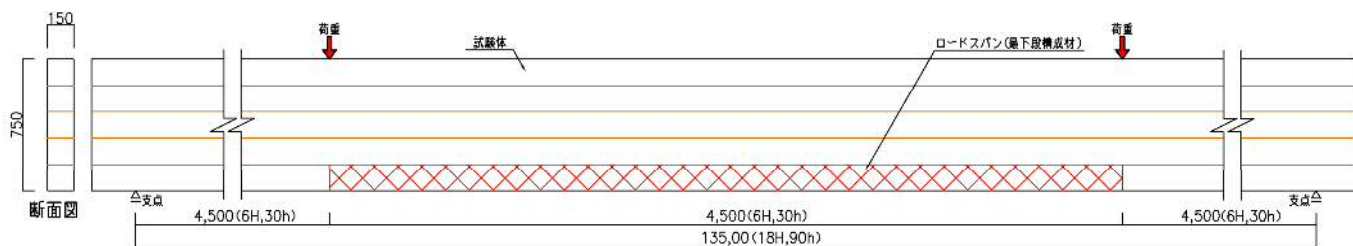
(a) 製材の引張試験体^{7.14)}



(b) 製材の曲げ試験体^{7.14)}



(c) GBM15x2 の曲げ試験における標準試験体^{7.16)}



(d) GBM15x5 の曲げ試験における標準試験体^{7.16)}

図 7.2 木材強度・木質構造研究会の試験体^{7.14)}と GBM の曲げ試験における標準試験体^{7.16)}

7.3 GBMの曲げ強度に対する寸法効果の検討

7.3.1 検討手法

一般に、製材(無垢材)では断面せい(H)と断面幅(B)および部材長さ(支点間距離 L もしくはロードスパン S)には相関があるため、(7.1)式を用いて寸法効果を評価することに理論的に大きな矛盾があるとは考えない。しかし、4.3節で示したGBMを構成する各製材の断面内を一様な弾性体と見なし、各製材の曲げヤング係数の差異のみを考慮するGBMの等価断面モデルにより、GBMの曲げ強度について最下段の製材内に生じる垂直応力を引張成分と曲げ成分の単純和の組み合わせ応力を用いて評価する場合は、最下段の製材内の垂直応力の分布と製材の強度に基づくことから、GBMの断面せいのみからでは寸法効果を適切に評価することができない可能性がある。

一方で、GBMを構成する製材の断面寸法は一般に寸法効果の影響を考慮する大きさではないため、組み合わせ応力で曲げ強度を評価すれば、GBMでは寸法効果を考慮しなくとも差し支えないのかについても検証する必要がある。そこで、本節では、4.3節で示したGBMを構成する各製材の断面内を一様な弾性体と見なし、各製材の曲げヤング係数の差異のみを考慮するGBMの等価断面モデルを用いた組み合わせ応力により体積に関する寸法効果について検討する。

木材強度・木質構造研究会^{7.14)}の製材の引張試験体と曲げ試験体を図7.2(a), (b)に、接着重ね材のJAS^{7.16)}の2段重ねGBMと5段重ねGBM(符号: GBM15x2, GBM15x5)の曲げ試験における標準試験体を図7.2(c), (d)に示す。引張試験では断面内の垂直応力の分布は一様に近くなり、曲げ試験では断面内の垂直応力の分布は引張縁付近が最大となることから、ロードスパン部分の体積および引張縁(GBMの下面)の面積に着目して各試験体を比較すると、5段重ねのGBM(図7.2(d))の最下段製材は、引張試験体(図7.2(a))の体積の約4倍、曲げ試験体(図7.2(b))の引張縁の面積の約7倍にもなる。これは、段数の多いGBMではせいに応じてスパンが大きくなるからであるが、このことはGBMでは部材長さに関する寸法効果も考慮することが必要であることを示唆している。そこで、本章では製材の強度について、その長さに関する寸法効果も考慮して検討を行うこととする。なお、寸法効果係数を算出する際の標準寸法は木材強度・木質構造研究会^{7.14)}の試験体寸法とし、引張強度と曲げ強度には基準強度を用いる。以下に、検討に用いる製材の引張強度と曲げ強度に対する寸法効果係数を示す。

本論では製材の引張試験において断面内に生じる垂直応力の分布はほぼ一様となるこ

とに着目し、最下段の製材の体積に関する寸法効果として引張強度に対する寸法効果係数を求める。引張強度に対する寸法効果係数 K_{Vt} は下式とする。

$$K_{Vt} = K_{Ht} \cdot K_{Bt} \cdot K_{Lt} = \left(\frac{H_{0t}}{h_n} \right)^{1/\kappa_{Ht}} \left(\frac{B_{0t}}{B} \right)^{1/\kappa_{Bt}} \left(\frac{L_{0t}}{S} \right)^{1/\kappa_{Lt}} \quad (7.4)$$

ここで、 K_{Ht} 、 K_{Bt} 、 K_{Lt} はそれぞれ引張強度に対する断面せい、断面幅、部材長さに関する寸法効果係数、 H_{0t} 、 B_{0t} 、 L_{0t} はそれぞれ引張試験体(図 7.2(a))の断面せい($H_{0t}=100$ mm)、断面幅($B_{0t}=100$ mm)、荷重点間距離($L_{0t}=2,500$ mm)の寸法^{7.14)}、 h_n 、 B 、 S はそれぞれ GBM の最下段製材の断面せい、断面幅、ロードスパンの寸法、 κ_{Ht} 、 κ_{Bt} 、 κ_{Lt} はそれぞれ断面せい、断面幅、部材長さに関する寸法効果を表す定数である。

製材の曲げ試験において断面内に生じる垂直応力の分布は、引張縁付近が最大となることに着目し、最下段の製材の引張縁 (GBM の下面) の面積に関する寸法効果として曲げ強度に対する寸法効果係数を求める。曲げ強度に対する寸法効果係数 K_{Ab} は下式とする。

$$K_{Ab} = K_{Bb} \cdot K_{Lb} = \left(\frac{B_{0b}}{B} \right)^{1/\kappa_{Bb}} \left(\frac{S_{0b}}{S} \right)^{1/\kappa_{Lb}} \quad (7.5)$$

ここで、 K_{Bb} 、 K_{Lb} はそれぞれ曲げ強度に対する断面幅、部材長さに関する寸法効果係数、 B_{0b} 、 S_{0b} はそれぞれ基準強度の比 ($\gamma = F_t / F_b$) の検討^{7.15)}に用いた曲げ試験体(図 7.2(b))の断面幅($B_{0b}=105$ mm)、ロードスパン($S_{0b}=900$ mm)の寸法^{7.14)}、 κ_{Bb} 、 κ_{Lb} はそれぞれ断面幅、部材長さに関する寸法効果を表す定数である。検討で用いる寸法効果を表す定数は、7.2.1 項で述べた国内外の規定^{7.7)~7.10)}、もしくは既往の研究^{7.11)~7.13)}を参考にするとともに、簡略に検討するため、断面せいと断面幅および部材長さのそれぞれの値は同一とし、かつ引張と曲げのみに差をつけて $\kappa_{Ht} = \kappa_{Bt} = \kappa_{Lt} = 5.0$ 、 $\kappa_{Bb} = \kappa_{Lb} = 10.0$ とする。

組み合わせ応力 (最下段の製材の引張応力 $c\sigma_{tn}$ と曲げ応力 $c\sigma_{bn}$) は、3.5.1 項で筆者らが提案している GBM の等価断面モデルを用いて算定する。製材の強度を(7.6)式のように引張と曲げの単純和の組み合わせで評価するとき、GBM の曲げ強度 $SUM M_a$ は(7.7)式となる。

$$\frac{c\sigma_{tn}}{F_{tn} \cdot K_{Vtn}} + \frac{c\sigma_{bn}}{F_{bn} \cdot K_{Abn}} = 1 \quad (7.6)$$

$$SUM M_a = \frac{F_{bn} \cdot K_{Abn} \cdot (EI)_e}{E_n \{h_n / 2 + g_n \cdot K_{Abn} / (\gamma \cdot K_{Vtn})\}} \quad (7.7)$$

ここで、 K_{Vtn} 、 K_{Abn} はそれぞれ引張強度および曲げ強度に対する寸法効果係数、 $(EI)_e$ は GBM 断面の等価曲げ剛性、 F_{tn} 、 F_{bn} 、 E_n 、 h_n 、 g_n はそれぞれ最下段製材の引張強度、曲げ強度、

曲げヤング係数，断面せい，断面の図芯から GBM 断面の中立軸までの距離である。ここでは， $(EI)_e$ は GBM の各製材の曲げヤング係数 E と断面二次モーメント $I(=B \cdot H^3/12)$ の積 $(=E \cdot I)$ と同じであり，GBM 断面の中立軸は断面中央となる。

7.3.2 断面解析結果を用いた検討

本項では，GBM における寸法効果の定性的な傾向について検討する。ここでは，引張基準強度と曲げ基準強度の比である $\gamma = 0.60$ ，GBM の寸法を接着重ね材の JAS における曲げ試験の標準試験体の寸法(例えば 2 段では図 7.2(c)，5 段では図 7.2(d))^{7.16)}として検討する。図 7.3 に GBM を構成する 120 mm 角および 150 mm 角の製材の前節で設定した引張強度と曲げ強度に対する寸法効果係数を，断面せい(K_{Hl})，断面幅(K_{Bl} ， K_{Bb})，部材長さ(K_{Ll} ， K_{Lb})のそれぞれ示す。また，図には(7.1)式で与えられる集成材の JAS^{7.2)}における寸法効果係数 K_{SR} も併せて示している。図 7.4 に 120 mm 角および 150 mm 角の製材を積層する GBM の $\text{SUM}M_a/M_a$ と GBM 断面せい H (ロードスパン S) の関係を示す。 $\text{SUM}M_a/M_a$ は，(7.7)式で得られる GBM の曲げ強度 $\text{SUM}M_a$ を，組み合わせ応力で評価せず(無垢の製材と同様の手法で寸法効果を考慮せず評価する)GBM の曲げ強度 M_a で除した値である。ここで， M_a は最下段の製材縁において曲げ応力 σ_{bn} と曲げ強度 F_{bn} の関係が(7.8)式となるときの曲げの大きさであり，(7.9)式で求めることができる。

$$\frac{\sigma_{bn}}{F_{bn}} = 1 \quad (7.8)$$

$$M_a = \frac{F_{bn} \cdot (EI)_e}{E_n(g_n + h_n/2)} \quad (7.9)$$

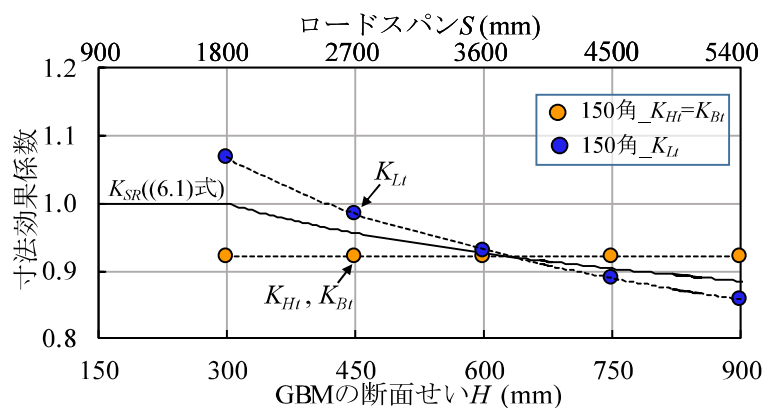
ここで， $(EI)_e$ は GBM 断面の等価曲げ剛性， F_{bn} ， E_n ， h_n ， g_n はそれぞれ最下段製材の曲げ強度，曲げヤング係数，断面せい，断面の図芯から GBM 断面の中立軸までの距離である。なお，ここでの M_a は製材の曲げ強度 F_b と GBM の断面係数 $Z(=B \cdot H^2/6)$ の積 $(=F_b \cdot Z)$ と同じである。同図には組み合わせ応力による評価で寸法効果を考慮しない($K_{Vl}=1.0$ ， $K_{Ab}=1.0$) 場合の曲げ強度と M_a の比も併せて示している。図 7.4 の $\text{SUM}M_a/M_a$ には寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響に加えて，組み合わせ応力に用いる引張強度と曲げ強度の差異の影響も含まれている。そこで，GBM の寸法効果係数を，各段数において寸法効果を考慮するときの $\text{SUM}M_a/M_a$ の値と考慮しないときのそれとの比と考え，その比を図 7.5 に示す。また，同図には(7.1)式で与えられる K_{SR} の値も併せて示している。

図 7.3 に示す通り，各段数で製材の断面寸法は変わらないため，GBM の最下段の製材の

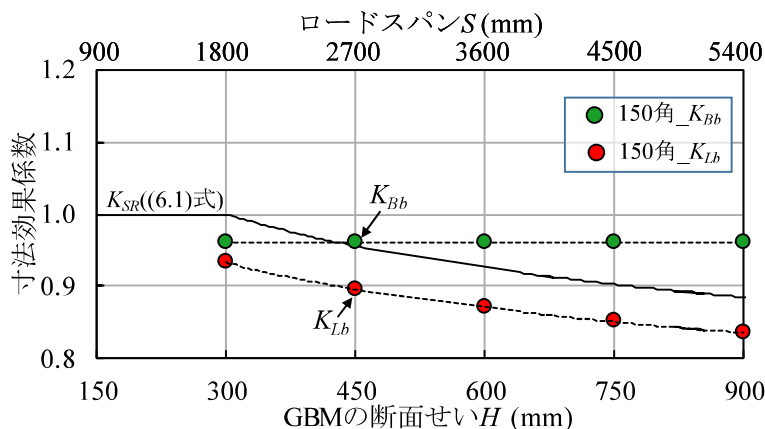
引張強度に対する幅またはせいに関する寸法効果係数 (K_{Ht} , K_{Bt}) と、曲げ強度に対する幅に関する寸法効果係数 (K_{Bb}) は、段数によらず一定の値となる。一方、各製材の長さは GBM の断面せいに応じて長くなるため、GBM 断面せいが大きくなると引張強度に対する部材長さに関する寸法効果係数 (K_{Lt}) と曲げ強度に対する部材長さに関する寸法効果係数の値 (K_{Lb}) が GBM 断面せいが大きくなることに応じて小さくなる。これにより、図 7.5 に示すような寸法効果が現れる。

一方、製材の断面寸法に着目すると、同じ GBM 断面せい(ロードスパン)では、図 7.5 に示すように GBM の寸法効果係数の値は 120 mm 角よりも 150 mm 角のほうが小さくなり、検討の範囲では両者に 5% ほどの差が見られる。これは、製材の長さに関する寸法効果係

K_{Ht} , K_{Bt} , K_{Lt} : それぞれ断面せい, 断面幅, 部材長さに関する寸法効果係数 ($K_{Vt} = K_{Ht} \cdot K_{Bt} \cdot K_{Lt}$ であり, K_{Vt} は製材の引張強度に対する寸法効果係数), K_{Bb} , K_{Lb} : それぞれ断面幅, 部材長さに関する寸法効果係数 ($K_{Ab} = K_{Bb} \cdot K_{Lb}$ であり, K_{Ab} は製材の曲げ強度に対する寸法効果係数)



(a) 引張強度に対する寸法効果係数



(b) 曲げ強度に対する寸法効果係数

図 7.3 GBM の構成材(製材)の寸法効果係数と GBM の断面せいとの関係

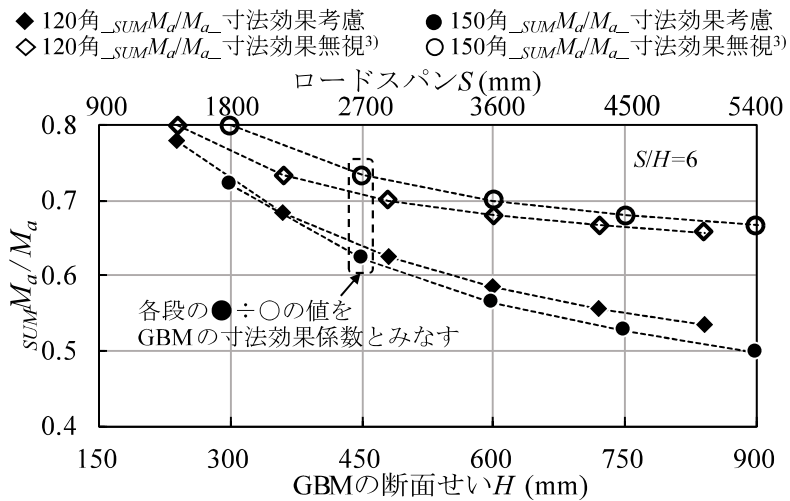


図 7.4 $_{SUM}M_d / M_a$ と GBM 断面せい (ロードスパン) の関係

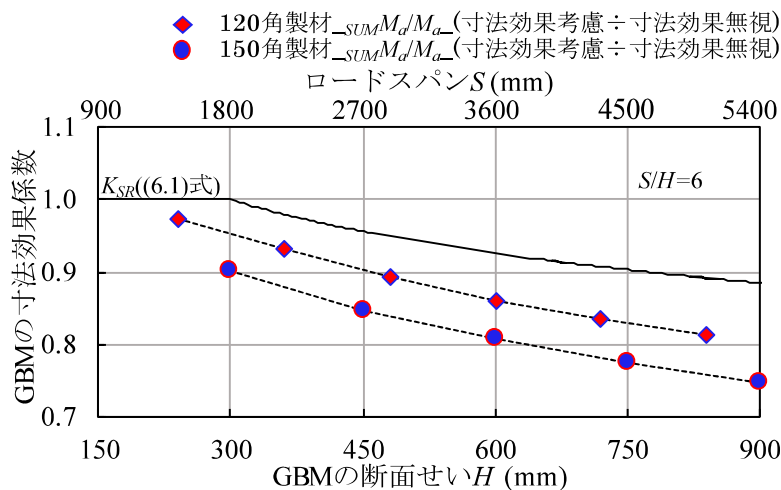


図 7.5 GBM の寸法効果係数と GBM の断面せい (ロードスパン) の関係

数(K_{Ll} と K_{Lb})は断面寸法によらず同じ値になるため、断面せいと断面幅に関する寸法効果係数(K_{Bl} , K_{Bb})の差により生じるものである(図 7.3)。

図 7.5 に示す GBM の寸法効果係数と(7.1)式で求まる K_{SR} は、値に差はあるものの、段数に応じた値の変化の様子はほぼ同様である。ここで、GBM を構成する製材の強度に対する寸法効果係数と K_{SR} では算定に用いる標準寸法が異なっており、図 7.5 に示すそれらの値の大小について考察することに工学的な意味はないため、7.2.1 項で用いた方法と同様に、断面せいが 450 mm と 300 mm の場合の比 K_{450} / K_{300} で比較する。GBM の寸法効果係数の K_{450} / K_{300} は 120 mm 角で 0.96、150 mm 角で 0.94 となり、(7.1)式による K_{SR} の K_{450} / K_{300} の値の 0.96(表 7.1)とほぼ同じ値となっている。

7.4 実大 GBM 試験体の曲げ実験結果を用いた試算

7.4.1 検討に用いる製材の曲げヤング係数および引張強度と曲げ強度

著者が行った GBM の実大曲げ実験の結果に対して、最下段製材に生じる垂直応力について引張成分と曲げ成分の単純和の組み合わせ応力を用い、引張強度と曲げ強度に対して寸法効果係数を考慮する評価を行い、評価手法の適用性を検証する。各製材の曲げヤング係数は縦振動法により計測した値を用いる。また、4.4.2 項で述べた通り、評価に用いる最下段製材の曲げ強度と引張強度には、より実験結果と良い対応を示すと考えられる基準強度を最下段製材のヤング係数の測定値である E_{frn} を用いて線形補間する値 ${}_iF_b$ 、 ${}_iF_t$ を用いる（図 7.6）。なお、図 7.6 には各 GBM の最下段製材の値を併せて示す（○印）。

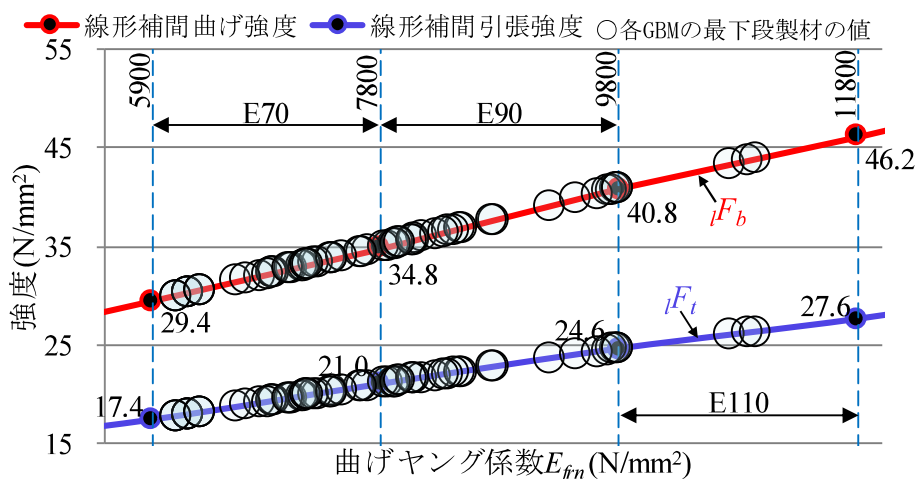


図 7.6 強度と曲げヤング係数の関係

7.4.2 寸法効果を考慮した実験結果の評価

4章で示したスギ GBM の実大曲げ実験結果に対し、前節で示した寸法効果を考慮する GBM の曲げ強度の評価方法を用いて試算を行う。表 7.2 に各 GBM 試験体と構成材（製材）の寸法を示す。製材に生じる応力の算定に用いる断面モデルは、前節と同様に GBM 断面モデルとするが、各製材の曲げヤング係数には縦振動法による測定値(E_{fr})を用いる。また、寸法効果を考慮する前の引張強度と曲げ強度には、最下段製材の E_{frn} により基準強度を線形補間する強度(それぞれ ${}_iF_{tn}$ と ${}_iF_{bn}$)を用いる。

GBM の曲げ強度について、最下段の製材内に生じる垂直応力を組み合わせ応力用いて評価するときの各試験体の曲げ成分の値 ${}_e\sigma_{ben}$ と引張成分の値 ${}_e\sigma_{ten}$ の値を表 7.3 に示す。図 7.7 に実験の最大荷重時にロードスパン内に生じる曲げモーメント ${}_eM$ を、(7.7)式を用いて

表 7.2 GBM 試験体

Series	n_t	B, h	H	a	S	L
GBM12x2	2	120	240	$5.00H$	$5.00H(10.0h)$	$15.00H(30.0h)$
GBM12x3	3		360	$5.69H$	$4.17H(12.5h)$	$15.55H(46.7h)$
GBM12x5	5		600	$4.50H$	$3.33H(16.7h)$	$12.33H(61.7h)$
GBM15x2	2	150	300	$5.67H$	$5.67H(11.3h)$	$17.01H(34.0h)$
GBM15x3	3		450	$5.67H$	$5.44H(16.3h)$	$16.78H(50.3h)$
GBM15x4	4		600	$4.50H$	$3.33H(13.3h)$	$12.33H(49.3h)$
GBM15x5	5		750	$4.50H$	$2.47H(12.3h)$	$11.47H(57.3h)$

n_t :段数, B :GBMの断面幅, h :製材せい, H :GBMの断面せい,
 a :せん断スパン, S :ロードスパン, L :支点間距離, 単位:[mm]

表 7.3 実験結果

名称	No.	E_{frn}	P_{max}	λ	$ce\sigma_{ben}$	$ce\sigma_{ten}$
GBM12x2	①	6.10	74.5	116	18.3	19.4
	②	6.10	59.8	116	14.6	15.6
	③	6.20	56.9	116	14.0	14.8
	④	6.20	63.4	116	15.4	16.5
	⑤	6.20	73.0	116	17.8	19.0
	⑥	6.20	67.1	116	16.3	17.5
	⑦	6.30	63.2	116	15.5	16.4
	⑧	6.30	66.1	116	16.2	17.2
	⑨	6.10	60.2	115	14.6	15.7
	⑩	6.30	60.2	116	14.8	15.7
GBM12x3	①	7.87	92.0	185	12.9	24.7
	②	8.08	102	184	14.1	27.3
	③	8.16	101	186	14.4	27.3
	④	7.92	104	181	13.9	27.6
	⑤	7.39	103	177	13.1	26.9
	⑥	8.49	78.0	187	11.2	21.2
	⑦	8.09	76.0	181	10.2	20.1
	⑧	9.22	101	187	14.6	27.5
	⑨	9.78	102	193	15.8	28.2
	⑩	7.96	83.0	177	10.5	21.6
GBM12x5	①	6.61	213	309	8.0	30.6
	②	7.07	237	289	8.2	34.1
	③	7.41	205	303	8.2	32.4
	④	6.90	240	292	8.9	36.9
	⑤	7.29	225	305	8.6	33.7
	⑥	7.71	224	311	8.2	31.4
	⑦	7.64	212	307	8.7	33.8
	⑧	7.16	239	309	9.4	36.1
	⑨	6.80	220	295	8.0	32.9
	⑩	6.93	226	297	8.6	34.7
GBM15x2	①	6.90	85.0	140	14.1	16.0
	②	7.84	95.5	150	18.1	18.1
	③	6.69	94.9	144	16.6	17.9
	④	7.66	101	147	18.4	19.1
	⑤	8.27	102	153	19.9	19.3
	⑥	8.48	97.9	154	19.5	18.5
	⑦	8.76	107	154	21.4	20.2
	⑧	8.74	102	154	20.5	19.2
	⑨	8.07	108	150	20.5	20.4
	⑩	8.42	114	151	21.7	21.5
GBM15x3	①	7.94	132	232	11.8	22.6
	②	7.06	134	221	10.8	22.2
	③	7.17	124	227	10.6	21.0
	④	7.26	139	222	11.3	23.1
	⑤	7.48	113	227	9.7	19.2
	⑥	8.37	140	235	13.0	24.3
	⑦	7.97	149	226	12.7	25.2
	⑧	6.86	132	224	10.9	22.0
	⑨	7.05	130	225	10.9	21.8
	⑩	7.19	137	221	11.1	22.8
GBM15x4	①	10.73	249	313	10.7	30.3
	②	10.88	270	335	13.0	33.0
	③	10.95	325	312	13.4	38.2
	④	9.71	282	306	10.8	31.7
	⑤	9.44	287	321	12.8	34.8
GBM15x5	①	9.75	288	395	8.1	30.3
	②	9.63	272	394	7.4	27.6
	③	9.79	325	394	9.1	33.9
	④	8.35	315	392	7.9	29.8
	⑤	9.79	279	411	8.5	29.8
	⑥	7.19	294	381	7.5	29.2
	⑦	7.40	257	379	6.6	25.9
	⑧	7.21	315	375	7.7	30.7

E_{frn} :最下段製材の曲げヤング係数, P_{max} :最大荷重実験値, λ :原点から中立軸 $N-N'$ 軸までの距離,
 $ce\sigma_{ben}$:最下段製材の曲げ応力, $ce\sigma_{ten}$:最下段製材の引張応力,
 単位: E_{frn} [kN/mm²], P_{max} [kN], λ [mm], $ce\sigma_{ben}$, $ce\sigma_{ten}$ [N/mm²]

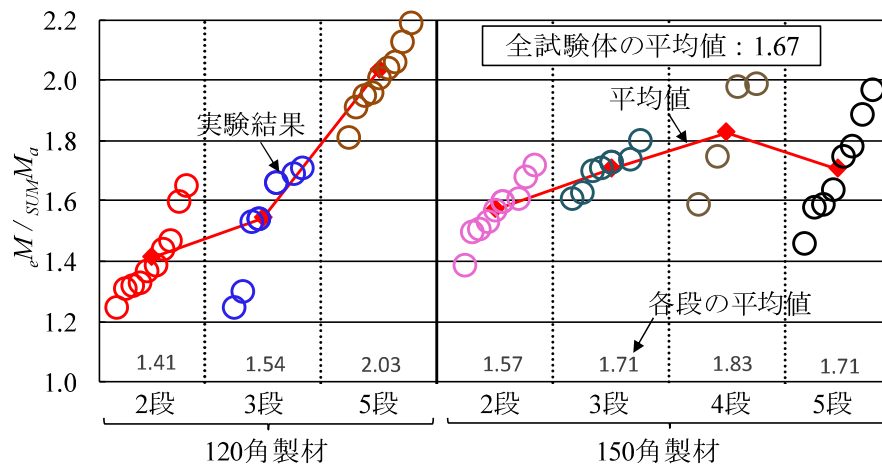


図 7.7 組み合わせ応力に寸法効果を考慮した実験値/計算値

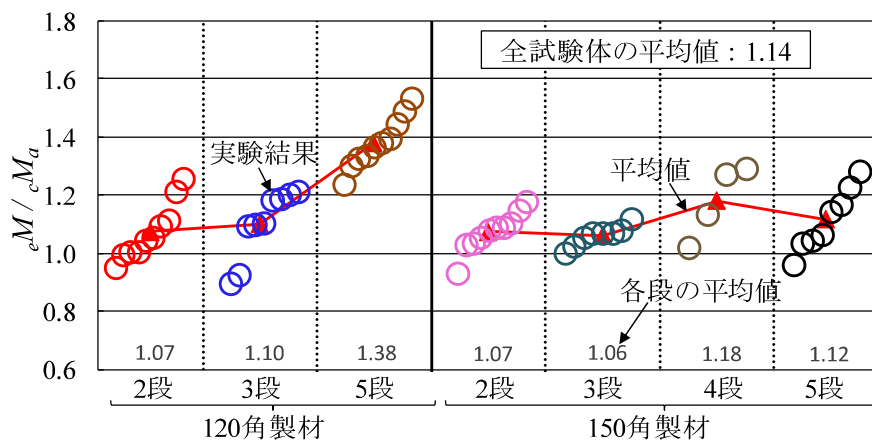


図 7.8 曲げ応力に寸法効果を考慮した実験値/計算値

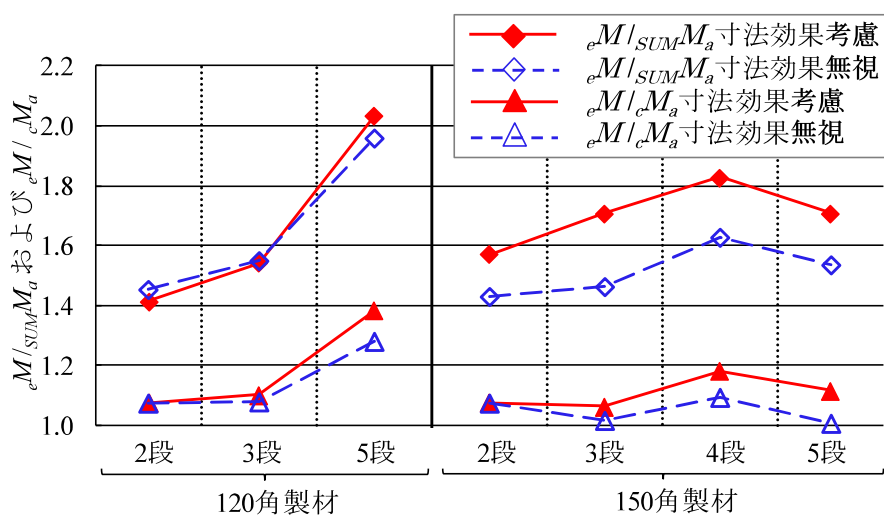


図 7.9 各段の実験値/計算値の平均

算定する GBM の曲げ強度の計算値 $_{SUM}M_a$ で除した実験値と計算値の比(${}_eM /_{SUM}M_a$)を段数毎に示す。また、図 7.8 に組み合わせ応力を用いず、寸法効果係数 K_{SR} ((7.1)式)を考慮し、最下段製材の曲げ強度 $K_{SR} \cdot I F_{bn}$ に GBM の断面係数 $Z (=B \cdot H^2 / 6)$ を乗じて求めた GBM の曲げ強度の計算値 ${}_cM_a (=K_{SR} \cdot I F_{bn} \cdot Z)$ で ${}_eM$ を除した実験値と計算値の比(${}_eM /{}_cM_a$)を段数毎に示す。さらに、寸法効果の評価方法による差異を明確にするため、図 7.7 と図 7.8 の各段の ${}_eM /_{SUM}M_a$ および ${}_eM /{}_cM_a$ の平均値と、寸法効果を考慮しない($K_{Vtm}=1.0, K_{Abn}=1.0, K_{SR}=1.0$) 場合のそれらを加えて図 7.9 に示す。なお、図 7.7 と図 7.8 の各段における実験値/計算値の値は、印の重なりを避けるため、昇順に示している。寸法効果を考慮する場合と考慮しない場合の平均値の差は、120 mm 角と 150 mm 角の ${}_eM /{}_cM$ では段数が多くなる(断面せいが大きくなる)ほど大きくなっているが、150 mm 角の本章で示した方法で寸法効果を考慮している ${}_eM /_{SUM}M_a$ では段数が多くなっても差が大きくなってはいない。これは、4 章の実験では载荷装置上の制限により、試験体のロードスパン(S)の GBM の断面せい(H)に対する比率が一定となっておらず(S / H が標準寸法より小さいものもある)、部材長さに関する寸法効果係数と断面せいの相関性が一律となっていないためと考えられる。そのため、GBM の部材長さ と断面せいの比率を同一とするときの GBM の曲げ強度が明らかになれば、本章で用いた GBM の寸法効果の評価方法がより適切なものになると考えられる。

7.5 まとめ

7 章では、寸法効果に関する国内外の強度評価に用いられている規定と既往の研究について整理し、これにより得られた知見を基に GBM の工学的な性質を踏まえて、GBM で寸法効果を考慮する方法について検討した。以下に得られた知見を示す。

- ① 既往の研究では、断面せいに関する寸法効果だけでなく、断面幅や部材長さに関する寸法効果も考慮されている。これらにおいて、引張強度に対する寸法効果係数は曲げ強度のそれとほぼ等しいか、若干小さくなっている。
- ② GBM の最下段製材に着目し、その組み合わせ応力で GBM の曲げ強度を評価するとき、GBM を構成する製材の幅とせいに関する寸法効果は段数によらず一定となるが、通常は各製材の長さが GBM の断面せいに応じて長くなるため、これによる寸法効果が現れ、GBM の寸法効果を考慮する曲げ強度の、それを考慮しない曲げ強度に対する比は段数が増えると小さくなる。GBM においては部材長さに関する寸法効果を考慮する必要があると考えられる。

7章 参考文献

- 7.1) 中村昇, 他: ティンバーメカニクス, 海青社, pp. 18-22, 2015. 10
- 7.2) 農林水産省: 集成材の日本農林規格, 農林水産省告示第 1587 号, 2012. 6
- 7.3) Weibull, W.: A statistical distribution function of wide applicability, ASME, Journal of Applied Mechanics, pp. 293-397, 1951.9
- 7.4) Bohannon, B.: Effect of size on bending strength of wood members, FPL 56, 1966. 5
- 7.5) Barrett, J. D.: Effect of size on tension perpendicular to-grain strength of Douglas-fir, Wood and fiber, Vol. 6(2), pp. 126-143, 1974.
- 7.6) Madsen, B. and Buchanan, A. H.: Size effect in timber explained by a modified weakest link theory, Can. J. Civ. Eng., 13(2), pp. 218-232, 1986.
- 7.7) ASTM D 245-06: Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber, 2006.
- 7.8) ASTM D 1990-19: Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests of full-size specimens, 2019.
- 7.9) ASTM D 3737-91: Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber (Glulam), 1991.
- 7.10) EN384: Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density, 2016.
- 7.11) Buchanan, A. H. (1984): Strength model and design methods for bending and axial load interaction in timber members, Dissertation ,University of British Columbia, pp. 243-245, 1984.
- 7.12) 井道裕史, ほか 2 名: 製材品の曲げ強度における寸法効果パラメータの検討, 森林総合研究所研究報告 Vol. 19-No. 1, pp. 79-87, 2020.
- 7.13) 日本住宅・木材技術センター: エンジニアリングウッド性能評価事業 報告書, pp. 104-129, 1998.
- 7.14) 木材強度・木質構造研究会: 構造用木材－強度データの収集と分析, pp. 42-51, 1988.3
- 7.15) 中井孝: 構造用製材の強度性能, JATAFF ジャーナル, 16(3), pp. 6-11, 1993.
- 7.16) 農林水産省: 接着重ね材の日本農林規格, JAS 0006, 2019. 1

8 章 GBM の曲げ強度と曲げ剛性の構造 設計手法

8章 GBM の構造設計

8.1 はじめに

GBM の曲げ強度と曲げ剛性は、曲げ実験の結果から製材のそれと同様に GBM 断面内と材軸方向の曲げヤング係数を一様として評価し、一般に木質材料に用いられる統計処理^{8.1)}を行って基準強度を設定する手法が最も簡便である。この手法によるとき、3～6章で述べた、GBM の曲げ強度に対する製材間の曲げヤング係数の差異や、成熟材・未成熟材の力学的な差異および部材の体積に関する寸法効果の影響を包含する形で加味している。

しかしながら、建築用木質構造材料である GBM は多岐にわたる架構形式や対象部位に使用することが想定されるため、GBM 断面内と材軸方向の曲げヤング係数を一様とする曲げ強度と曲げ剛性の評価では、危険側の評価となることも考えられる。例えば「架構形式」に着目すると、部材端部の接合部をピン接合とみなす在来軸組架構と、部材端部の接合部を剛接合または半剛接合とみなすラーメン架構では部材に作用する曲げモーメントの状況が異なる。また、「対象部位」に着目すると、柱では短スパンで束ね材を用いることが多く、梁では長スパンで重ね材を用いることが多い。さらに、「製材の構成」に着目すると、長期軸力を支持する柱では GBM の構成材（製材）を同一等級構成の GBM とすることや、長スパンの梁では異等級構成の GBM とすることが考えられる。そこで、本章では GBM が有する力学的な性質を踏まえた GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する構造設計方針について考察する。

また本章では、実大 GBM 試験体を用いる曲げ実験における GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する評価精度の改善に向けた課題と、GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する適切な構造設計手法を整備するための課題についても述べる。さらに、2章で示した実大 GBM 試験体の曲げ実験の結果から製材のそれと同様に GBM 断面内と材軸方向の曲げヤング係数を一様として、一般に木質材料に用いられる統計処理^{8.1)}を行って求めた GBM の曲げ強度と曲げ剛性ならびに両者の構造設計推奨値についても述べる。

8.2 GBM が有する力学的な性質を踏まえた GBM の構造設計方針

8.2.1 架構形式と対象部位および GBM 内の製材の構成

本項では架構形式と対象部位に着目して、GBM が有する力学的な性質を踏まえた GBM の構造設計について考察する。図 8.1(a)に曲げ実験における曲げモーメント図を示す。木材の曲げ強度や曲げ剛性を求める際の実験方法は、実大曲げ試験体を用いた二点載荷の曲

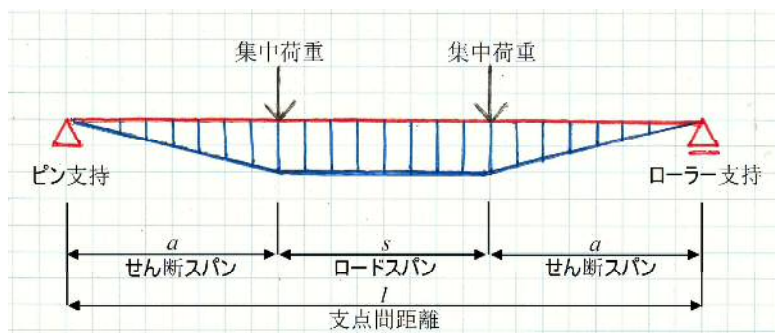
げ実験によって求めることが一般的である。GBM の曲げ強度は純曲げとなるロードスパン（加力点間距離）内に作用する曲げモーメントから、曲げ剛性は中央たわみから求める。国内の木材の曲げ強度と曲げ剛性を求める曲げ試験体の標準寸法は、 $l=17.0H\sim 22.0H$ 、 $a=(6.0\pm 1.5)H$ 、 $S=(6.0\pm 1.0)H$ の範囲とされている^{8.2)}。ここで、 l は支点間距離、 H は GBM の断面せい、 a はせん断スパン、 S はロードスパンである。一方で、大断面の実大 GBM 試験体では、断面せいに応じてせん断スパンやロードスパンも長くなる。そのとき、実験可能な寸法の制限から試験体の全長が制限され、せん断スパンとロードスパンの GBM の断面せいに対する比率が標準の範囲よりも小さい値となることもあると考えられる。このような場合は、GBM の曲げ強度の評価に対して純曲げとなる区間が短くなることや、GBM の曲げ剛性の評価に対してせん断変形の影響が大きくなることを適切に評価する必要があると考えられる。

図 8.1(b) に在来軸架構に長期の鉛直荷重が作用するときまたは鉛直荷重と短期の水平荷重が同時に作用するときの曲げモーメント図を示す。一般に在来軸組架構の接合部は、柱・梁や柱脚および筋かいの部材端部をピン接合とみなし、短期の水平荷重は筋かいが負担するため、梁の曲げモーメントは、長期の鉛直荷重が支配的となる。また、梁のスパンと断面せいには相関があり、梁は比較的短いスパンで小さい断面せいとなるものが多い。一方、柱は建物外周部の短期に風荷重を受ける柱で、かつ吹抜けに面する場合などは大きい曲げモーメントが作用するが、一般に梁から伝達する鉛直荷重や筋交いから伝達する圧縮軸力または引張軸力が支配的である。そのため、在来軸組架構の柱の断面寸法は断面せいの小さい正角材を採用することが多い。

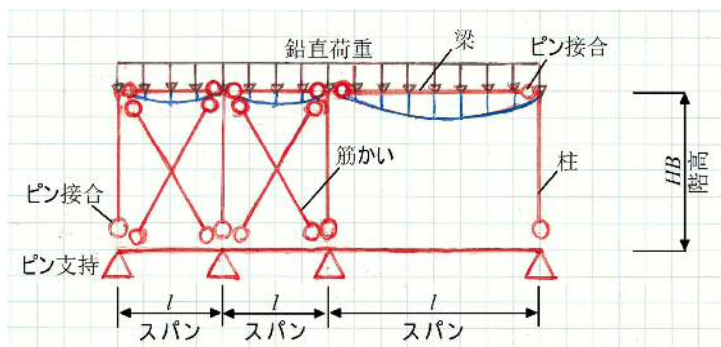
図 8.1(c) にラーメン架構に長期の鉛直荷重が作用するときの曲げモーメント図を、図 8.1(d) にラーメン架構に長期の鉛直荷重と短期の水平荷重が同時に作用するときの曲げモーメント図を示す。ラーメン架構の梁についても、在来軸組架構と同様に梁のスパンと断面せいに相関があり、比較的長いスパンで大きい断面せいとなるものが多いと考えられる。しかしながら、部材端部の接合部を半剛接または剛接とみなし、接合部のモーメント抵抗に期待するラーメン架構では、短期の水平荷重が作用するときにも部材端部の接合部には大きい曲げモーメントが作用する。そのため、ラーメン架構の一部の梁は短スパンでも大きい断面せいとなるものもあり、ラーメン架構の柱は階高で部材長さが決まるものもあるため、梁スパンと断面せいまたは柱長さとの断面せいに相関がなく、スパン（長さ）と断面せいの比が小さい値となるものもある。在来軸組の梁のように GBM の断面せいと長さ

相関がある部材に比べ、ラーメン架構の短スパンの梁や柱のように断面せいと部材長さに関連が無い部材では、GBMの曲げ強度に対する体積に関する寸法効果の影響を過小に評価することが考えられる。

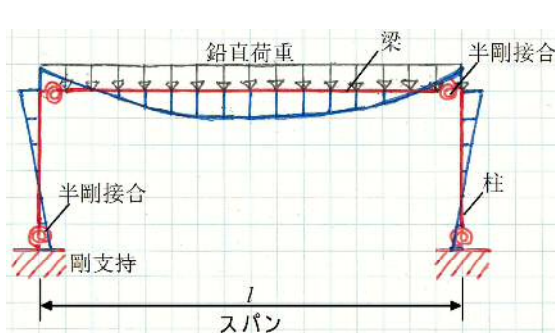
さらに、長スパンとなる梁では、構成材の調達やGBMの製造に対するコストの低減のためにGBMの構成材（製材）を異等級構成とすることが考えられる。このとき、部材端部の接合部を剛接合または半剛接合とみなし、柱梁接合部や柱脚に曲げモーメント抵抗を期待するラーメン架構では各部材の曲げ剛性の差異による予期せぬ応力集中が生じることにより、危険側の評価となる可能性もあると考えられる。なお、部材端部の接合部をピン接合とみなし耐震要素を耐力壁とする在来軸組架構ではこの影響は小さいと考えられる。



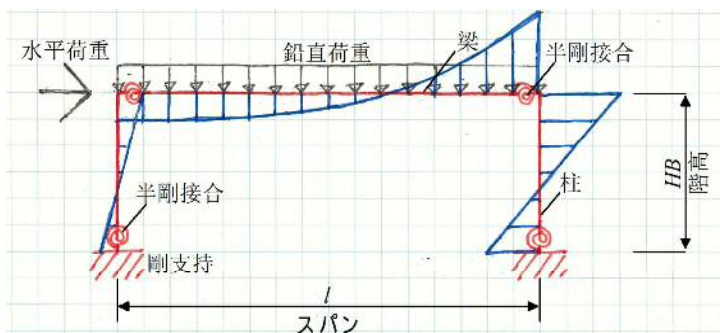
(a) 部材の曲げ実験



(b) 在来軸組架構の長期鉛直または短期水平荷重時



(c) ラーメン架構の長期鉛直荷重時



(d) ラーメン架構の短期鉛直+水平荷重時

図 8.1 曲げモーメント図

8.2.2 部材の長さに関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響

本項ではラーメン架構の一部の梁や柱のように、部材のスパンと断面せいに相関がないときに部材の長さに関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響について検討する。既に 7.3.2 節で示したように GBM では部材長さに関する寸法効果が表れる。GBM の最下段製材の引張強度に対する部材長さに関する寸法効果係数 K_{Ll} は下式による。

$$K_{Ll} = \left(L_{0l} / S \right)^{1/\kappa_{Ll}} \quad (8.1)$$

ここで、 L_{0l} は標準引張試験体の荷重点間距離 ($L_{0l} = 2,500$ mm) の寸法^{8.3)}、 S は GBM の最下段製材のロードスパンの寸法、 κ_{Ll} は部材長さに関する寸法効果を表す定数である。

GBM の最下段製材の曲げ強度に対する部材長さに関する寸法効果係数 K_{Lb} は下式による。

$$K_{Lb} = \left(S_{0b} / S \right)^{1/\kappa_{Lb}} \quad (8.2)$$

ここで、 S_{0b} は基準強度の比 ($\gamma = F_l / F_b$) の検討^{8.4)}に用いた標準曲げ試験体のロードスパン ($S_{0b} = 900$ mm) の寸法^{8.3)}、 κ_{Lb} は部材長さに関する寸法効果を表す定数である。

検討に用いる寸法効果を表す定数は、7.2.1 項で述べた国内外の規定^{8.5)~8.8)}、もしくは既往の研究^{8.9)~8.11)}を参考に $\kappa_{Ll} = 5.0$ 、 $\kappa_{Lb} = 10.0$ とする。図 8.2 にロードスパン S と GBM の断面せい H の比として、一般的なロードスパンと断面せいの比である $S/H = 6.0$ のときと、短スパンまたは短柱を想定し $S/H = 4.0$ となるときの GBM を構成する 150 mm 角の製材の引張強度と曲げ強度に対する部材長さに関する寸法効果係数 (K_{Ll} , K_{Lb}) と GBM の断面せいの関係をそれぞれ示す。図には (8.3) 式で求まる集成材の日本農林規格 (以下、JAS) に示されている集成材の曲げ強度に対する断面せいに関する寸法効果係数^{8.12)} も併せて示す。

$$K_{SR} = \left(\frac{H_0}{H} \right)^{\kappa_{SR}} \quad (8.3)$$

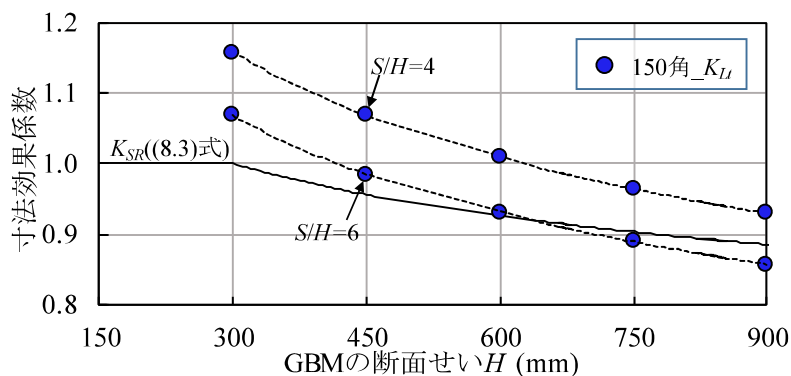
ここで、 K_{SR} は部材の断面せいに関する寸法効果係数、 H_0 は GBM の標準断面せい (mm)、 κ_{SR} は寸法効果を表す定数であり、 $H_0 = 300$ mm、 $\kappa_{SR} = 9.0$ である。

ラーメン架構の短スパンまたは短柱のように $S/H = 4.0$ となるときの構成材 (製材) の最下段製材の曲げ強度または引張強度に対する寸法効果係数は、 $S/H = 6.0$ となるときの寸法効果係数に比べて、断面せいに関わらず引張強度に対する寸法効果係数で 10% 程、曲げ強度に対する寸法効果係数で 5% 程を過小に評価することとなる。

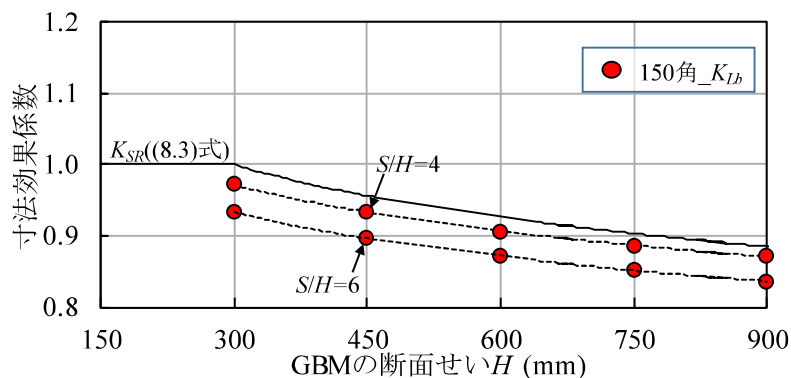
ラーメン架構の GBM の曲げ強度を過小に評価すると、予期せず GBM のせん断破壊が先

行する場合も考えられる。したがって、ラーメン架構の短スパンの梁や柱のように断面せいと部材長さに相関が無いものについては、部材長さに関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響を適切に考慮することが望ましい。なお、GBM の在来軸組のように部材端部をピン接合とみなす架構形式では安全側の評価になる。

K_{Lt} : 製材の引張強度に対する部材長さに関する寸法効果係数
 K_{Lb} : 製材の曲げ強度に対する部材長さに関する寸法効果係数



(a) 引張強度に対する寸法効果係数



(b) 曲げ強度に対する寸法効果係数

図 8.2 GBM の構成材(製材)の寸法効果係数と GBM の断面せいとの関係

8.2.3 部材の幅に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響

寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響を(8.3)式で求まる断面せいに関する寸法効果係数のみで評価するとき、GBM の構成材の断面幅と断面せいに関する寸法効果の影響は、包含する形で加味されており、120 mm 角の製材を 5 段積層する GBM と 150 mm 角の製材を 4 段積層する GBM の断面せいが 600 mm の GBM の曲げ強度に対する寸法効果係数の値は同じ値となる。さらに、積層し GBM の幅方向に束ねる GBM (以下、単に束ね GBM と呼ぶ) の断面せいが 600 mm の GBM の曲げ強度に対する寸法効果係数の値も同値となる。

このとき、特に束ね GBM では GBM の曲げ強度を過大に評価することが考えられる。しかし、束ね GBM の断面幅に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響は明らかではない。そこで、以下に束ね GBM の断面幅に関する寸法効果の影響について検討する。

検討は 120 mm 角を積層する GBM と 150 mm 角を積層する GBM および 150 mm 角を積層し GBM の幅方向に 3 列束ねる GBM について行う。7.3.2 項と同様に各段数において寸法効果を考慮し、GBM の断面内に生じる垂直応力を引張成分と曲げ成分の単純和の組み合わせ応力を用いて評価するときの GBM の曲げ強度 $_{SUM}M_a$ と、組み合わせ応力を用いずに曲げ応力で評価するときの GBM の曲げ強度 M_a との比 $_{SUM}M_a/M_a$ の値に寸法効果を考慮しないときのそれとの比を図 8.3 に示す。

図に示す GBM の寸法効果係数と(8.3)式で求まる K_{SR} は、値に差はあるものの、段数に応じた値の変化の様子はほぼ同様である。ここで、GBM を構成する製材の強度に対する寸法効果係数と K_{SR} では算定に用いる標準寸法が異なっており、図 8.3 に示すそれらの値の大小について考察することに工学的な意味はないため、7.2.1 項で用いた方法と同様に、断面せいが 450 mm の寸法効果係数を 300 mm の寸法効果係数で除した値(K_{450}/K_{300})を用いて 120 mm 角を積層する GBM と 150 mm 角を積層する GBM および 150 mm 角を積層し GBM の幅方向に 3 列束ねる GBM の寸法効果を比較する。GBM の寸法効果係数の K_{450}/K_{300} は 120 mm 角 1 列で 0.96、150 mm 角 1 列で 0.94、150 mm 角 3 列で 0.93 となり、製材幅や束ねに関する寸法効果の影響は小さい。また、(8.3)式による K_{SR} の K_{450}/K_{300} の値の 0.96 とほぼ同じ値となっており、検討の範囲で積層して束ねる GBM の断面幅に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響は小さい。

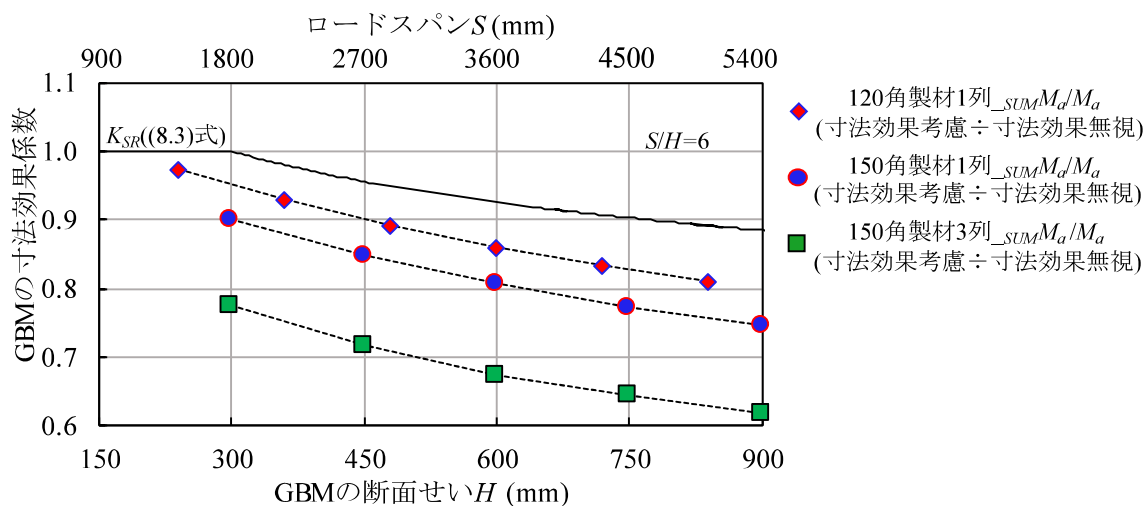


図 8.3 GBM の寸法効果係数と GBM の断面せい(ロードスパン)の関係

8.3 GBMの曲げ強度と曲げ剛性に対する評価精度の改善に向けた課題

8.3.1 縦振動法による曲げヤング係数の計測

4.5.1項で既に述べた通り，GBMの構成材で用いるJASの機械等級区分構造用製材は，簡便で非破壊的な測定を可能とする縦振動法により計測する動的ヤング係数により等級区分を行っている。本項では動的特性に基づくヤング係数の非破壊的な測定方法とGBMの曲げ強度と曲げ剛性に対する評価精度の改善に向けた今後の課題について述べる。

動的ヤング係数の測定方法の一つである縦振動法は，材軸方向の打撃により木材の振動を励起させ，FFTスペクトルアナライザにより縦共振による1次の固有振動数 f_1 を計測して木材の動的ヤング係数 E_{fr} を評価する方法である^{8.13)}。タッピング法，共振法もしくは打撃音法とも呼ばれる。図8.7に縦振動法によるヤング係数の測定の模式図を，写真8.1にGBMの製作時に行った縦振動法によるヤング係数の測定時の写真を示す。ここで得られた1次の固有振動数 f と密度 ρ を用いて(8.6)式により動的ヤング係数 E_{fr} を求める。

$$E_{fr} = (2 \cdot f_1 \cdot l)^2 \cdot \rho \quad (8.6)$$

ここで， f_1 は1次の固有振動数， l は材長(mm)， ρ は密度(kg/m^3)である。通常，木材の支持は材長方向の中央をクッション材等で支持する中央支持・両端自由の条件で行う。

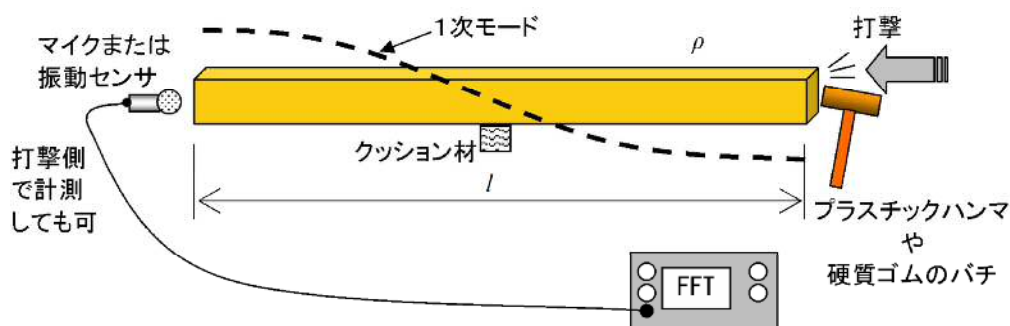


図 8.7 縦振動法によるヤング係数の測定 ^{8.13)}



写真 8.1 縦振動法によるヤング係数の測定

本論の実大 GBM 試験体の各製材のヤング係数は、縦振動法により計測し、縦振動法によって計測する製材の材軸方向の縦ヤング係数は、材せい方向の曲げヤング係数と同等として検討を行っている。ここで、縦振動法では木材の断面内と材軸方向の平均的な縦ヤング係数を評価するのに対し、静的な曲げ実験では加力方向（断面せい方向）の曲げヤング係数を評価している。したがって、製材の寸法が大きいほど材断面内や材軸方向の不均質さにより両者の差も大きくなり、部材の曲げ強度の評価に影響を及ぼすことが示唆される。

断面中央付近に未成熟材、材縁部に成熟材を持ち、かつ長尺となる心持ち平角材では縦ヤング係数と曲げヤング係数の差が大きく、一般にラミナの断面内と材軸方向のヤング係数を均質とみなす集成材では縦ヤング係数と曲げヤング係数の差は小さいと考えられる。一方で、GBM で用いる心持ち正角材は、各製材の中央付近に髓を持ち、髓付近の部分とそれ以外の部分で力学的な性質に差異があることが示唆される。この影響は、GBM の曲げ強度や曲げ剛性のばらつきの要因のひとつになると考えられるため、縦振動法の適用範囲に関するさらなる検証は、GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する評価精度の改善に向けた重要な事項である。

また一般に、粘弾性体である木材に静的なヤング係数の測定を適用する場合、断面に生じる垂直応力の大きさや载荷時間および塑性ひずみの影響が現れることから、動的に評価する縦振動法による動的ヤング係数は静的に評価する曲げ実験による静的ヤング係数に比べて 5~10%程度大きい値を示すとされている^{8.14)}。

8.3.2 製材の曲げ強度と引張強度の差異と試験体の体積に関する寸法効果

スギ製材の基準強度では、各機械等級内の引張基準強度 F_t と曲げ基準強度 F_b の比は $\gamma = F_t / F_b = 0.6$ としている。これは、木材強度・木質構造研究会^{8.3)}の実大のスギ製材を用いた引張試験と曲げ試験結果から、両強度の 95% 下限値の比 γ として $\gamma = 0.64$ が得られたことに基づいている^{8.4)}。図 8.8 に引張試験体と曲げ試験体を示す。両試験で試験体の寸法が異なっており、引張試験の試験体の断面せいと断面幅は、曲げ試験の試験体の約 0.95 倍とほぼ同じであるのに対し、引張試験体の加力点間距離は、曲げ試験体のロードスパンの約 2.8 倍とかなり大きいため、 γ には応力分布の影響に加えて体積の影響も含まれていると考えられる。しかしながら、現時点ではこれらの試験結果における応力分布と体積のそれぞれの影響を明確に分離することは困難である。したがって、製材の強度に対する応力分布と体積の影響をそれぞれ抽出する実験を実施することが望ましい。

また、本論の前提条件として欠点等（節、内部割れ、目切れ、曲り、反り、目まわり、含水率、腐食等）も部材の曲げ強度に影響を与えると考えられるが、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、これらの影響を本論では検討しないこととしている。製材の曲げ強度と引張強度の差異の要因に上記の欠点の影響があることも考えられるため、詳細に分析する必要がある。

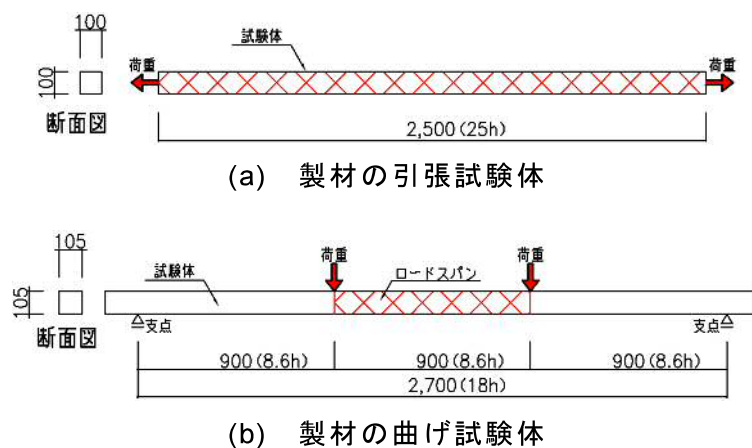


図 8.8 文献 8.3 の試験体寸法

8.3.3 成熟材と未成熟材の繊維方向の引張強度または圧縮強度とヤング率

GBMの曲げ強度の評価精度に影響する大きい要因に成熟材要素と未成熟材要素のヤング率と引張強度または圧縮強度の設定があると考えられるが、既往研究において成熟材と未成熟材の髓から年輪方向の範囲や、両材のヤング率と引張強度および圧縮強度の差異に対する見解が統一されているとは言い難い状況にある。

本論では過去に実施された幾つかの強度試験の結果を参考に、繊維方向のヤング率と成熟材要素と未成熟材要素の引張強度を設定して検討を進めたが（図 8.9）、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も有効と考えられる。

8.4 GBM に対する適切な構造設計手法を整備するための課題

8.4.1 部材の構造設計

木造の在来床組を採用するとき、鉄骨造や鉄筋コンクリート造に比べて小さい固定荷重となる。そのとき、柱に対して風圧力による大きい引抜き力と曲げモーメントが作用することや、中・高層の木造でラーメン架構を採用するとき、隅柱に対して大きい引抜き力と

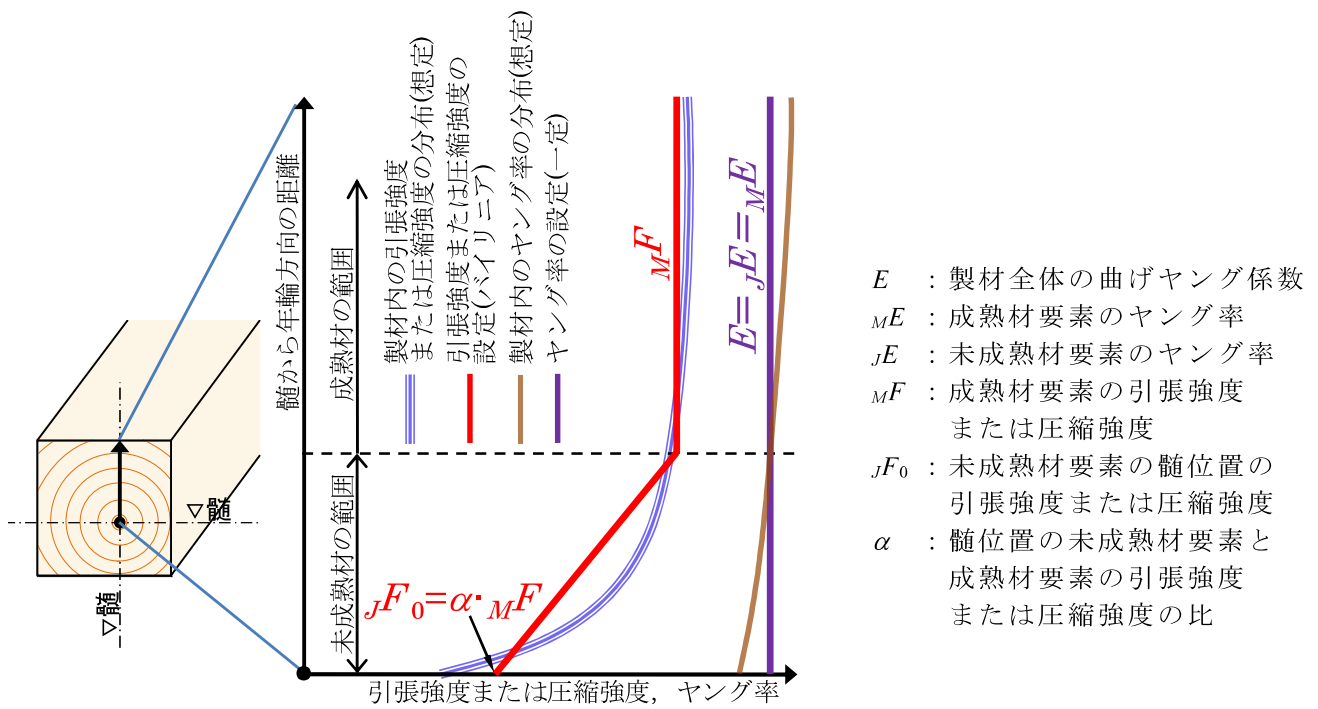


図 8.9 髄から年輪方向のヤング率と引張強度または圧縮強度のモデル化

曲げモーメントが作用することが考えられる。このように木造の固定荷重は軽い場合が多いが、近年では遮音性や耐火性に配慮して鉄筋コンクリート造のスラブを採用する事例もあり、柱に対して大きい圧縮力と曲げモーメントが作用することも考えられる。すると、GBM の圧縮縁で GBM の曲げ強度が決まることもあると考えられる。

上記の引張応力と曲げ応力または圧縮応力と曲げ応力といった複合応力に対する GBM の構造設計手法の他にも、柱等で 2 軸曲げを受ける場合の評価や、中・高層の木造の柱に対する $P - \delta$ 効果を考慮した軸力比の制限は今後の課題と考えている。以下に、最も一般的な手法に倣うときの GBM の構造設計方法について整理する。

(1) 引張力と曲げモーメントの複合応力が作用する場合

$$\frac{N_{td}}{N_{ta}} + \frac{M_d}{M_a} \leq 1.0 \quad (8.7)$$

$$N_{ta} = A_e \cdot f_t \quad (8.8)$$

$$M_a = C_b \cdot K_{SR} \cdot Z \cdot f_b \quad (8.9)$$

ここで、 N_{td} は GBM の設計引張力 (N)、 M_d は GBM の設計曲げモーメント (N・mm)、 N_{ta} は GBM の許容引張耐力 (N)、 M_a は GBM の許容曲げ耐力 (N・mm)、 A_e は GBM の有効断面積 (mm²)、 f_t は GBM の許容引張応力度 (N/mm²)、 C_b は GBM の横座屈による曲げ耐力の低減係数、 K_{SR} は GBM の断面せいに関する寸法効果係数 ((8.3)式で求める)、 Z は GBM

の断面係数 ($=B \cdot H^2/6$) (mm^3), B は GBM の断面幅 (mm), H は GBM の断面せい (mm), f_b は GBM の許容曲げ応力度 (N/mm^2) である。

(a) 横座屈による曲げ耐力の低減係数 C_b

$$C_s \leq 10 \text{ のとき} \quad C_b = 1.0 \quad (8.10A)$$

$$10 < C_s \leq C_k \text{ のとき} \quad C_b = 1 - 1/3 \cdot (C_s / C_k)^4 \quad (8.10B)$$

$$C_k < C_s \leq 50 \text{ のとき} \quad C_b = 0.4 \cdot E_0 \div (C_s^2 \cdot F_b) \quad (8.10C)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{l_e \cdot H}{B^2}} \quad (8.11)$$

$$C_k = \sqrt{\frac{0.6 \cdot E_0}{L f_b}} \quad (8.12)$$

ここで, C_s は横座屈細長比, C_k は横座屈係数, l_e は有効座屈長さ (mm), E_0 は GBM の曲げヤング係数 (N/mm^2), B は GBM の断面幅 (mm), $L f_b$ は GBM の長期許容曲げ応力度 (N/mm^2) である。

(2) 圧縮力と曲げモーメントの複合応力が作用する場合

$$\frac{N_{td}}{N_{ta}} + \frac{M_d}{M_a} \leq 1.0 \quad (8.13)$$

$$N_a = \eta \cdot A_e \cdot f_c \quad (8.14)$$

ここで, N_{td} は GBM の設計圧縮力 (N), N_{ca} は GBM の許容圧縮耐力 (N), η は GBM の座屈による圧縮耐力の低減係数, f_c は GBM の許容圧縮応力度 (N/mm^2) である。

(a) 座屈による圧縮耐力の低減係数 η

$$\lambda \leq 30 \text{ のとき} \quad \eta = 1.0 \quad (8.15A)$$

$$30 < \lambda \leq 100 \text{ のとき} \quad \eta = 1.3 - 0.01 \cdot \lambda \quad (8.15B)$$

$$100 < \lambda \quad \text{のとき} \quad \eta = 3000 \div \lambda^2 \quad (8.15C)$$

$$\lambda = \frac{l_k}{i} \quad (8.16)$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (8.17)$$

ここで, λ は細長比, l_k は座屈長さ (mm), i は座屈方向における GBM の断面 2 次半径 (mm), I は座屈方向における GBM の断面二次モーメント (mm^4), A は GBM の断面積 (mm^2) である。

(3) 主軸以外の方向に曲げが作用するとき (二軸曲げ)

$$\frac{M_{dx}}{M_{ax}} + \frac{M_{dy}}{M_{ay}} \leq 1.0 \quad (8.18)$$

$$M_{ax} = C_{bx} \cdot K_{SRx} \cdot Z_x \cdot F_{bx} \quad (8.19)$$

$$M_{ay} = C_{by} \cdot K_{SRy} \cdot Z_y \cdot F_{by} \quad (8.20)$$

ここで、 M_{dx} は y 分力 P_a による GBM の設計曲げモーメント (N・mm)、 M_{dy} は x 分力 P_b による GBM の設計曲げモーメント (N・mm)、 M_{ax} は x-x 軸に関する GBM の許容曲げ耐力 (N・mm)、 M_{ay} は y-y 軸に関する GBM の許容曲げ耐力 (N・mm)、 C_{bx} 、 C_{by} は各軸に関する横座屈による GBM の曲げ耐力の低減係数、 K_{SRx} 、 K_{SRy} は各軸に関する GBM の寸法効果係数、 Z_x 、 Z_y は各軸に関する GBM の断面係数 ($Z_x = B \cdot H^2 / 6$ 、 $Z_y = H \cdot B^2 / 6$) (mm^3)、 B は GBM の断面幅 (mm)、 H は GBM の断面せい (mm)、 f_{bx} 、 f_{by} は各軸に関する GBM の許容曲げ応力度 (N/mm^2) である。

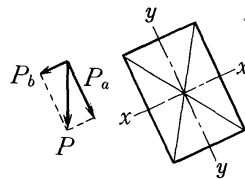


図 8.10 主軸の斜めの力が加わる場合 ^{8.15)}

(4) せん断力が作用する場合

$$\frac{Q_d}{Q_a} \leq 1.0 \quad (8.21)$$

$$Q_a = \frac{b_{qy} \cdot I_q \cdot f_{sy}}{S_{qy}} \quad (8.22)$$

ここで、 Q_d は GBM の設計せん断力 (N)、 Q_a は GBM の許容せん断耐力 (N)、 b_{qy} は中立軸からの距離 y の位置の材幅 (mm)、 I_q は中立軸に関する断面二次モーメント (mm^4)、 f_{sy} は中立軸からの距離 y の位置にある構成材の許容せん断応力度 (N/mm^2)、 S_{qy} は中立軸からの距離 y の位置より外端側部分の中立軸に関する断面一次モーメント (mm^3) である。

8.4.2 梁のたわみと曲げクリープ特性

従来の比較的小規模な木造建築では、短スパンの梁が多いことから梁の曲げクリープ変形や荷重継続時間と部材の曲げ強度の関係が問題視されることは少なかったが、GBM を用

いる中・大規模の木造建築では長スパンの梁を採用することが多いため、構造的な安全性や機能性の観点からこれらの影響を無視できない場合が生じることもあると考えられる。

木質部材のクリープ特性について、日本建築学会：木質構造設計規準^{8.16)}（以下、木質規準）では以下のように説明している。木質部材に荷重を載荷すると瞬間的に変形（弾性変形）するが、載荷をそのまま継続させると変形が増大する現象が見られる。これをクリープ現象と呼び、クリープによる変形をクリープ変形と呼ぶ。一方、クリープ変形量は載荷する荷重に左右され、ある限度以上の荷重を載荷し続けると、やがて大変形を生じて破壊する。これをクリープ破壊と呼び、長期間の荷重に対して木材が曲げクリープ破壊しない荷重の最大値を曲げクリープ限度荷重と呼ぶ。

梁のたわみは、外力による瞬間的な初期たわみと初期たわみに対するその後の相対たわみに分けることができる。ここでは、この相対たわみを曲げクリープたわみと呼ぶ。既往の曲げクリープたわみに関する研究は、集成材を試験体としたものが多く、木村ら^{8.17)}は気乾状態の集成材試験体の曲げクリープたわみは初期たわみの1.75倍であると報告している。また、森ら^{8.18)}は温湿度一定環境と温湿度無調整の自然環境および温度無調整で湿度をほぼ100%の吸湿環境の3環境下で集成材試験体の曲げクリープ試験を行い、曲げクリープたわみは温湿度一定環境で初期たわみの1.70倍、自然環境で初期たわみの2.00倍、吸湿環境で初期たわみの3.30倍であると報告している。一方、木質規準では、一般に木質構造材の曲げクリープたわみは初期たわみの2.0倍、温湿状態または乾湿繰り返し条件下においては初期たわみの3.0倍を見込むものとしている^{8.16)}。

荷重継続時間と部材の曲げ強度の関係に着目すると、杉山^{8.19)}や沢田^{8.20)}が行った研究によれば、小断面のスギ無欠点供試体の曲げクリープ限度荷重は、静的曲げ試験の供試体の曲げ強度の40～60%程度であると報告している。なお、実大製材を試験体として荷重継続時間と部材の曲げ強度の関係を求めた研究は、実験可能な寸法や長期間実施の困難さのために非常に少ない状況にある。木村ら^{8.17)}は、静的曲げ実験の集成材の曲げ強度の30%と50%の2種類の荷重レベルの実験により、50%の試験体は載荷1年半後にひび割れが発生し、4年後にクリープ破壊に至ったと報告している。一方、木質規準では、部材の曲げ強度の5%下限値の3分の1.1（37%）を設計上の曲げクリープ限度荷重とみなし、これを供用期間50年の長期許容応力度としている^{8.16)}。

木質規準では製材と集成材を同じ扱いとしているが、GBMも同様の扱いで良いかは十分に検証する必要がある。さらに、部材の曲げクリープたわみに加えて、接合部を半剛接ま

たは剛接とみなし、接合部のモーメント抵抗に期待するラーメン架構を採用する場合は、接合部のクリープ特性の把握も重要な事項のひとつである。

8.5 GBM の設計曲げ耐力と設計曲げ剛性

GBM の実大試験体の実験結果から GBM の曲げ基準強度 ${}_G F_b$ と、GBM の曲げヤング係数 ${}_G E$ を定め、GBM の設計曲げ耐力、設計曲げ剛性を求める手順をまとめる。

8.5.1 GBM の設計曲げ耐力

GBM の設計曲げ耐力 ${}_d M_b$ は(8.23)式により求める。このとき、(8.3)式の GBM の断面せいに関する寸法効果を考慮する。

$${}_d M_b = Z \cdot {}_G f_b \cdot K_{SR} \quad (8.23)$$

$$K_{SR} = \left(\frac{H_0}{H} \right)^{1/\kappa_{SR}} \quad (8.24)$$

ここで、 Z は GBM の断面係数 ($= B \cdot H^2/6$) (mm^3)、 B は GBM の断面幅 (mm)、 H は GBM の断面せい (mm)、 ${}_G f_b$ は許容曲げ応力度であり、長期は $1.1/3 \cdot {}_G F_b$ 、短期は $2/3 \cdot {}_G F_b$ 、終局は ${}_G F_b$ 、 ${}_G F_b$ は GBM の基準強度、 K_{SR} は GBM 断面せいに関する寸法効果係数、 H_0 は標準断面せい、 κ_{SR} は寸法効果を表す定数であり、 $H_0 = 300 \text{ mm}$ 、 $\kappa_{SR} = 9.0$ である。120 mm 角製材または 150mm 角製材を積層する GBM の断面せいと K_{SR} の関係を図 8.11 に示す。

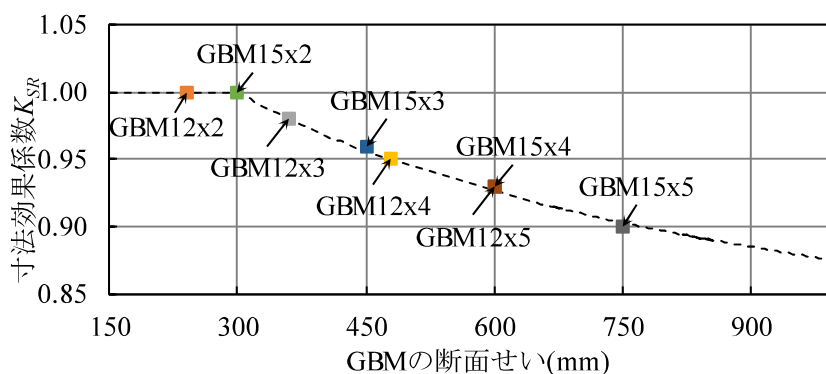


図 8.11 GBM の断面せいと寸法効果係数 K_{SR}

GBM の実験結果から GBM の曲げ基準強度 ${}_G F_b$ を定めるとき、最大荷重実験値 P_{max} 時の GBM 断面の圧縮縁または引張縁に生じる曲げ応力 σ_{bk} は(8.25)式により求める。各製材寸法および段数の σ_{bk} から、一般に木質材料に用いられる統計処理^{8.1)}を行って GBM の基準強度 ${}_G F_b$ を評価する。すなわち、実験で得られた GBM の曲げ強度の分布の信頼度水準 75%

における 95%下限値（以下，95%下限値）を(8.26)式により求める。

$$\sigma_{bk} = \frac{{}_eM}{Z \cdot K_{SR}} = \frac{P_{max} \cdot a}{2Z \cdot K_{SR}} \quad (8.25)$$

$${}_G F_b = \overline{\sigma_{bk}} - K_{0.05} \cdot s \quad (8.26)$$

ここで， P_{max} は最大荷重実験値（N）， ${}_eM$ は P_{max} 時にロードスパン内に生じる曲げモーメント（N・mm）， a はせん断スパン（mm）， $\overline{\sigma_{bk}}$ は各製材寸法および段数の GBM 試験体における GBM 断面の圧縮縁または引張縁に生じる曲げ応力の平均値(N/mm²)， $K_{0.05}$ は GBM の試験体数に応じた信頼度水準 75%における 95%下限値を求めるための係数， s は各製材寸法および段数の GBM 試験体における曲げ応力の標準偏差である。

8.5.2 GBM の設計曲げ剛性

GBM の設計曲げ剛性 EI は(8.27)式により求める。

$$EI = {}_G E \cdot I \quad (8.27)$$

ここで， ${}_G E$ は GBM の曲げヤング係数（N/mm²）， I は GBM の断面二次モーメント（= $B \cdot H^3/12$ ）（mm⁴）である。

GBM の実験結果から GBM の曲げヤング係数 ${}_G E$ を定めるとき，最大荷重実験値 P_{max} 時の GBM の曲げ剛性実験値 ${}_e(EI)_b$ は(8.28)式により求める。各製材寸法および段数の ${}_e(EI)_b$ から，一般に木質材料に用いられる統計処理^{8.1)}を行って GBM の曲げヤング係数 ${}_G E$ を評価する。すなわち，実験で得られた GBM の曲げ剛性実験値の分布の信頼度水準 75%における 50%下限値（以下，50%下限値）を(8.29)式により求める。

$${}_e(EI)_b = \frac{0.3P_{max}}{\Delta\delta} \left\{ \frac{a}{48} (3l^2 - 4a^2) + \frac{15\kappa_d \cdot a \cdot I}{2A} \right\} \quad (8.28)$$

$${}_G E = \overline{{}_e(EI)_b} - K_0 \cdot s \quad (8.29)$$

ここで， $\Delta\delta$ は中央たわみ実験値の増分（ $0.1P_{max} \sim 0.4P_{max}$ ）（mm）， κ_d は形状係数（=1.2）， I は GBM の断面二次モーメント（= $B \cdot H^3/12$ ）（mm⁴）， A は GBM の断面積（= BH ）（mm²）， $\overline{{}_e(EI)_b}$ は各製材寸法および段数の GBM 試験体における曲げ剛性の平均値(N/mm²)， K_0 は GBM の試験体数に応じた信頼度水準 75%における 50%下限値を求めるための係数， s は各製材寸法および段数の GBM 試験体における曲げ剛性の標準偏差である。なお，(8.28)式はせん断変形成分が中央たわみに与える影響が大きい場合の GBM の曲げ剛性に対する評価式であり，せん断変形成分を除いて求めた GBM の曲げヤング係数 E とせん断ヤング係数 G の比を $E/G=15$ と仮定している。

8.5.3 実大 GBM 試験体の曲げ実験結果の評価

製材のそれと同様に GBM 断面内と材軸方向の曲げヤング係数は一様として実験結果を評価することは、簡便な手法として有効であると考えられる。以下に、本論の 2 章で示した実大 GBM 試験体の実験結果を基に、GBM の断面せいに関する寸法効果を考慮し、GBM の曲げ基準強度 ${}_G F_b$ と GBM の設計曲げ剛性 EI について検討する。

図 8.12 にせん断破壊した試験体を含み実験の最大荷重時にロードスパン内に生じる曲げモーメント ${}_e M$ を、寸法効果係数 K_{SR} ((8.3)式)を考慮し、最下段製材の曲げ基準強度 $K_{SR} \cdot F_{bn}$ に GBM の断面係数 $Z (=B \cdot H^2 / 6)$ を乗じて求めた GBM の曲げ強度の計算値 ${}_c M_a (=K_{SR} \cdot F_{bn} \cdot Z)$ で ${}_e M$ を除した実験値と計算値の比(${}_e M / {}_c M_a$)と GBM の曲げ剛性の実験値 ${}_e (EI)_b$ を GBM の曲げ剛性の計算値 $E_0 I$ (GBM の各製材の縦振動法によるヤング係数の測定値 E_{fr} の平均値 E_0 と GBM の断面二次モーメント I の積)で除した実験値と計算値の比(${}_e (EI)_b / E_0 I$)との関係を各製材段数について示す。ここで、 F_b は平成 12 年建設省告示第 1452 号に規定されている製材の曲げ基準強度であり、 B は GBM の断面幅、 H は GBM の断面せいである。また、同図にせん断破壊した試験体を含む ${}_e M / {}_c M_a$ と ${}_e (EI)_b / E_0 I$ の平均値 \bar{x} と変動係数 CV を示す。なお、2 章で述べた通り、GBM 試験体の破壊性状は、破壊の状況により A、B、C または S 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 に分類する (図 8.12)。

対象部位を在来軸組架構に用いる横架材等のスパンと断面せいに相関がある部材とし、JAS 機械等級区分 E70、E90、E110 の製材を無作為に積層する GBM で、120 mm 角を 2~5 段または 150 mm 角を 2~5 段積層するとき、8.2 節に示した一様な弾性体とみなす GBM の曲げ強度と曲げ剛性の評価は、簡便な方法として概ね有効であり、設計実務上は最下段製材の曲げ基準強度に対して 10%程度、各製材の縦振動法によるヤング係数の測定値の平均値に対して 5%程度の低減率を用いれば、ほぼ安全側に GBM の曲げ強度と曲げ剛性を評価することができる。図 8.13 に設計推奨値を一点鎖線で示す。

P : 荷重, δ : 中央たわみ, ◆印は最大荷重 P_{max} を示す

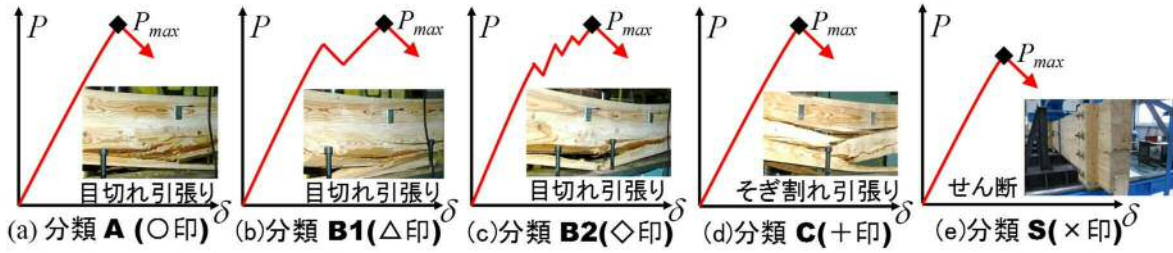


図 8.12 破壊性状の分類 (2章, 図 2.7 の再掲)

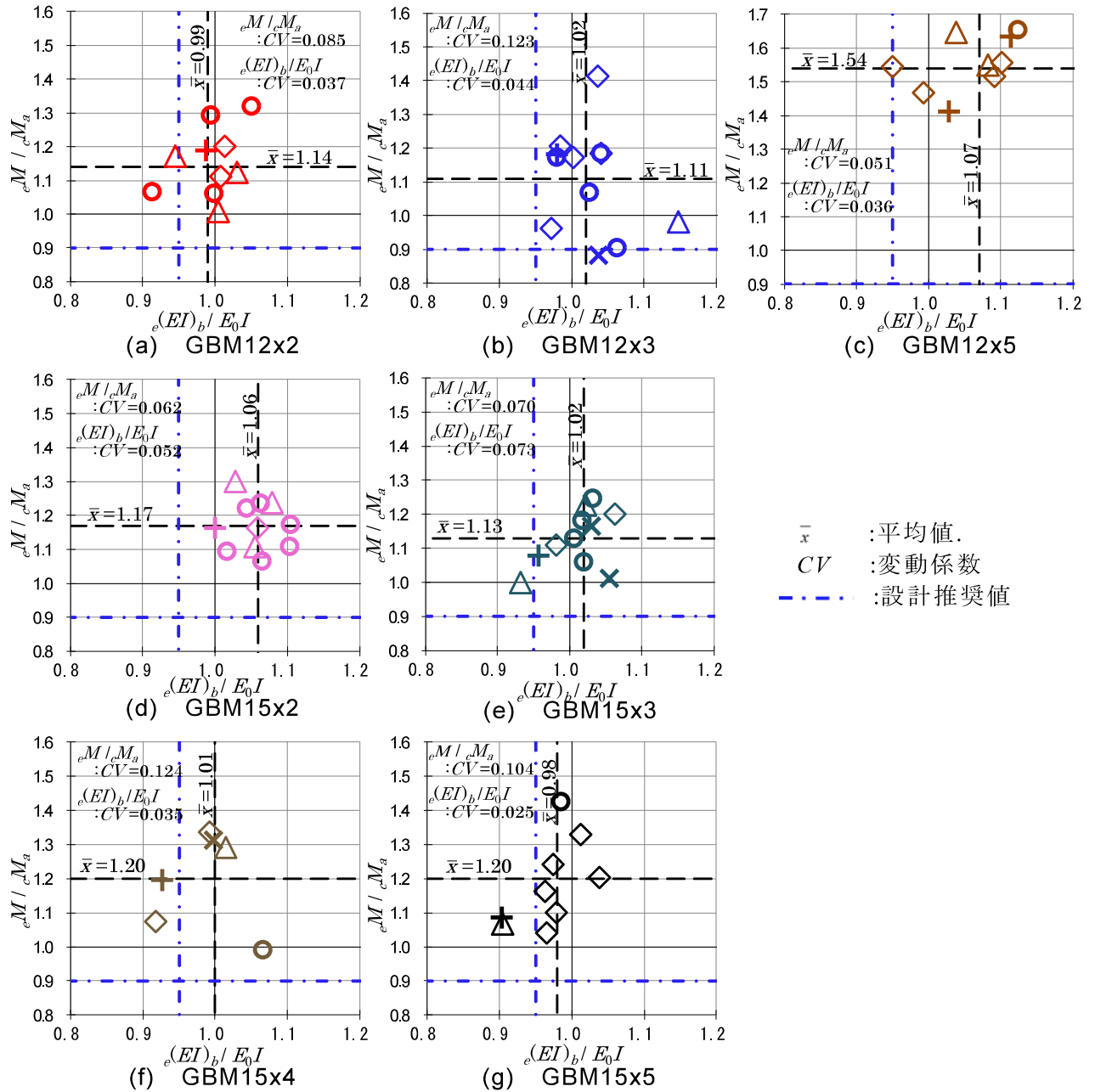


図 8.13 曲げ応力度と曲げ剛性の評価 (せん断破壊した GBM 試験体を含む)

8.6 まとめ

本章では、GBM が有する力学的な性質を踏まえた GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する構造設計方針について考察した。また、実大 GBM 試験体を用いる曲げ実験における GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する評価精度の改善に向けた課題と、GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する適切な構造設計手法を整備するための課題についても述べた。さらに、GBM 断面内と材軸方向の曲げヤング係数を一様として、一般に木質材料に用いられる統計処理を行って求めた GBM の曲げ強度と曲げ剛性ならびに両者の構造設計推奨値についても述べた。以下に、得られた知見を示す。

- ① ラーメン架構の短スパンまたは短柱のようにロードスパン S と断面せい H との比が $S/H = 4.0$ となるときの構成材（製材）の最下段製材の曲げ強度または引張強度に対する寸法効果係数は、一般的なロードスパンと断面せいの比である $S/H = 6.0$ のときの寸法効果係数に比べて、断面せいに関わらず引張強度に対する寸法効果係数で 10% 程、曲げ強度に対する寸法効果係数で 5% 程を過小に評価することになる。ラーメン架構において GBM の曲げ強度を過小に評価すると、予期せず GBM のせん断破壊が先行する場合も考えられることから、断面せいと部材長さに相関が無いものについては、部材長さに関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響を適切に考慮することが望ましい。
- ② 120 mm 角を積層する GBM と 150 mm 角を積層する GBM および 150 mm 角を積層し GBM の幅方向に 3 列束ねる GBM について、断面幅に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす影響を考慮するとき、GBM の曲げ強度の差は約 3% と小さい。
- ③ GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する評価精度の改善に向けて、縦振動法の適用範囲に関するさらなる検証と、製材の強度に対する応力分布と体積の影響をそれぞれ抽出する実験を実施することおよび繊維方向のヤング率と成熟材要素と未成熟材要素の引張強度を設定に関するさらなる検証は重要な事項である。また、GBM に対する適切な構造設計手法の整備に向けて、部材に対して複合応力が作用する場合や二軸曲げが作用するときの構造設計手法や部材の曲げクリープ特性を把握することは重要な事項である。
- ④ 対象部位を在来軸組架構の横架材とするとき、120 mm 角を 2～5 段または 150 mm 角を 2～5 段積層する GBM を一様な弾性体とみなす GBM 断面の曲げ性能の評価は、簡便な方法として概ね有効であり、設計実務上は最下段製材の曲げ基準強度に対して 10% 程度、GBM の曲げ剛性に対して 5% 程度の低減率を用いれば、ほぼ安全側に GBM の曲げ強度と曲げ剛性を評価できると考えられる。

8 章 参考文献

- 8.1) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説， pp.152-154， 2006.12
- 8.2) (公財)日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル， pp.8-10，
2011.3
- 8.3) 木材強度・木質構造研究会：構造用木材－強度データの収集と分析， pp. 42-51，
1988.3
- 8.4) 中井孝：構造用製材の強度性能， JATAFF ジャーナル， 16(3)， pp. 6-11， 1993.
- 8.5) ASTM D 245-06: Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber, 2006.
- 8.6) ASTM D 1990-19: Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests of full-size specimens, 2019.
- 8.7) ASTM D 3737-91: Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber (Glulam), 1991.
- 8.8) EN384: Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density, 2016.
- 8.9) Buchanan, A. H. (1984): Strength model and design methods for bending and axial load interaction in timber members, Dissertation ,University of British Columbia, pp. 243-245, 1984.
- 8.10) 井道裕史，ほか 2 名：製材品の曲げ強度における寸法効果パラメータの検討，森林総合研究所研究報告 Vol. 19-No. 1, pp. 79-87, 2020.
- 8.11) 日本住宅・木材技術センター：エンジニアリングウッド性能評価事業 報告書， pp. 104-129, 1998.
- 8.12) 農林水産省：集成材の日本農林規格，農林水産省告示第 1587 号，2012. 6
- 8.13) (公財)日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル， pp.59-63，
2011.3
- 8.14) 松本勗：木材の動的弾性率 特に撓み振動によるヤング率と対数減衰率とに関する研究，九州大学農学部演習林報告. 36, pp.1-86， 1962.11
- 8.15) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説， pp.188-190， 2006.12
- 8.16) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説， pp.165-168， 2006.12
- 8.17) 木村衛，ほか 2 名：実大ベイマツ集成材の曲げクリープ性状，日本建築学会構造系

論文集, 第 561 号, pp.169-176, 2002. 11

8.18) 森拓郎, ほか 4 名: 温湿度条件の異なる集成材はりの曲げクリープ特性, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 49B, pp. 593-598, 2003. 3

8.19) 杉山英男: 木材の曲げ強度と剛性に及ぼす荷重時間の影響, 日本建築学会論文集, 第 52 号, pp. 85-94, 1956. 3

8.20) 沢田稔: 木材梁に関する研究 (第 4 報) 曲げクリープ試験 (1), 林業試験場研究報告, No. 98, pp. 85-116, 1957

9 章 結 論

9章 結論

本論では、心持ち正角材をその繊維方向を互いにほぼ平行にして重ね（積層）または束ねる建築用木質構造材料である接着重ね材（Glued Build-up Members：以下、GBM）について、GBMの曲げ性能に着目し、GBMに対する構造設計手法の確立や接着重ね材の基準強度の制定に資する知見を得ることを目的として、実大GBMの曲げ実験やGBMの力学モデルを用いた断面解析によりGBMが有する力学的な性質の検討を行った。結論を以下に述べる。

2章では構成材（製材）の寸法、段数および各製材の曲げヤング係数の差異がGBMの曲げ強度と曲げ剛性や破壊性状に及ぼす影響について調べることを目的として行った、120 mm角または150 mm角のスギ製材を2～5段積層した実大GBM試験体の曲げ実験の結果を示した。また、破壊の性状を試験体の破壊の状況と荷重－中央たわみ関係を踏まえて5種類に分類した。さらに、GBMを一様な弾性体とみなして、最大荷重時のGBM断面の引張縁の曲げ応力度実験値とせん断変形成分を除いた曲げ剛性実験値を求めた。

GBM試験体の破壊性状は、全ての試験体で接着面の破壊は生じておらず、全63試験体中59体が曲げ破壊となり、これらのGBM試験体では最大荷重に達すると同時に曲げ引張側の最下段製材の脆性的な引張破壊が生じて耐力低下が生じている。また、GBMを一様な弾性体とみなして構成材（製材）段数毎に曲げ応力度と曲げ剛性を求めると、曲げ応力度と曲げ基準強度の比の5%下限値は、1.0程度か、1.0よりも小さくなることから、GBMの曲げ強度は最下段製材の曲げ強度に比べて小さくなることが示唆される。一方、曲げ剛性と各構成材（製材）のヤング係数の平均値とGBMの断面二次モーメントの積の比の50%下限値は、GBM12x5試験体を除いて1.0程度となることが分かった。さらに、構成材の寸法やGBMの段数がGBMの曲げ強度や破壊性状と荷重－中央たわみ関係に及ぼす影響について、明確な傾向は見られなかった。これらの実験結果は、GBMが有する力学的な性質によるものであると考えられることから、3章以降の章でGBMの力学的な性質を踏まえたGBMの曲げ強度と曲げ剛性に対する構造設計の方法について検討を行うこととした。

3章では、GBMの製材断面に生じる垂直応力の分布がGBMの曲げ強度に及ぼす影響とGBMの力学的な性質について考察するため、集成材と同一の等価断面法に基づく力学モデル、すなわち、GBMを構成する各製材を一様な弾性体と見なしGBMにおける最下段製材の断面に生じる垂直応力について、引張成分と曲げ成分の組み合わせ応力を用いたGBMの曲げ強度の評価について述べた。

組み合わせ応力を用いるときの GBM の曲げ強度は、GBM の最下段製材の引張縁に生じる垂直応力の曲げ成分と引張成分の割合と、引張強度と曲げ強度の関係による差異があり、二乗和平方根の組み合わせ応力を用いたときの GBM の曲げ強度は特に段数が少ない、すなわち曲げ成分の割合が大きい GBM のとき非常に高い値となり、曲げ応力のみで評価する GBM の曲げ強度を大きく上回るものもある。そのため、GBM の各断面寸法を統一的に評価するためには単純和の組み合わせ応力を用いた GBM の曲げ強度の評価が適していることが分かった。

4 章では本論の検討で断面解析に用いる「一様断面モデル」、「等価断面モデル」、「要素断面モデル」の 3 つの GBM の断面モデルと、GBM の曲げ強度を考察する上で、構成材である製材の引張強度と曲げ強度がどのように設定されたものかが明らかになっている必要があることから、GBM の構成材である製材について、製材の JAS における機械等級区分構造用製材のヤング係数と基準強度の関係と、基準強度の設定に関する研究を整理し、5 章と 7 章の GBM の各製材を一様な弾性体とみなした GBM の力学的な性質の検討で用いる線形補間引張基準強度と線形補間曲げ基準強度と曲げヤング係数の関係を示した。さらに、JAS 機械等級区分によるスギ製材に対する標準的な曲げ試験と引張試験および圧縮試験で得られた各強度とヤング係数の関係について整理し、6 章の GBM の各製材内の成熟材と未成熟材の引張強度または圧縮強度の差異が、GBM の曲げ強度に及ぼす影響の検討に用いる両材の引張強度または圧縮強度とヤング率の関係を示した。

5 章では、同一等級内の曲げヤング係数の製材が部材内に混在するときや、製材の曲げヤング係数を異等級構成とするときに、それらが GBM の曲げ強度と曲げ剛性に及ぼす影響を調べるため、GBM を構成する各製材内の力学的性質を一様な弾性体と見なし、製材間の曲げヤング係数の差異のみを考慮する GBM の等価断面モデルを用いた断面解析を行った。

同一等級構成の GBM について、製材段数を 2 段～5 段とし、JAS 機械等級区分 E70, E90, E110 の製材を無作為に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とき、各製材の曲げヤング係数が全て下限値の製材とした GBM の曲げ強度よりも下回ることはないことが分かった。また、異等級構成の GBM について、製材段数を 5 段とし、最上段と最下段の製材の JAS 機械等級区分を E110 の上限値、断面中央部の製材の等級区分を E90 又は E70 とするとき、GBM の曲げ強度は GBM の圧縮縁もしくは引張縁の製材の曲げ応力度によって決定し、等級の低い断面中央部の製材で決定することはなく、全て E110 の上

限值の構成とした GBM と比較しても大きく GBM の曲げ強度と曲げ剛性が低下することはないことが分かった。

6 章では GBM を構成する各製材内の成熟材と未成熟材の力学的な性質の差異が GBM の曲げ強度に及ぼす影響を検討するため、両材の断面内の範囲および繊維方向のヤング率と引張強度または圧縮強度を既往の研究を参考にしてモデル化し、その成熟材要素と未成熟材要素を組み合わせた要素断面モデルを用いた断面解析を行った。

髓の偏心が無い場合、検討の範囲では、製材（無垢材）の断面寸法が未成熟材要素の直径よりも小さい場合や、3 段重ね以上の GBM で未成熟材要素の引張強度または圧縮強度により部材の曲げ強度が決定しており、製材内の成熟材要素と未成熟材要素の引張強度または圧縮強度の差異が部材の曲げ強度に及ぼす影響は、製材（無垢材）よりも GBM においてより大きく現れることが分かった。また、GBM の曲げ強度の髓の偏心が無い場合のそれとの差は、製材内の未成熟材要素の範囲を髓から $\phi 120$ mm とし、150 mm 角の製材の上端または下端に接する位置に髓が偏心する（偏芯距離 $e=15$ mm ($e/h=0.1$, h : 製材せい)) 程度の髓の偏心が GBM の曲げ強度に及ぼす影響はさほど大きくないことが分かった。

7 章では、寸法効果に関する規定と既往研究の知見および GBM の工学的な性質を踏まえて、GBM の曲げ強度の評価において体積に関する寸法効果を考慮する方法について検討した。また、体積に関する寸法効果が GBM の曲げ強度に及ぼす定性的な傾向を調べるため、寸法効果を考慮し GBM の等価断面モデルを用いた組み合わせ応力による断面解析を行った。

検討の結果、GBM の最下段製材に着目し、その組み合わせ応力で GBM の曲げ強度を評価するとき、GBM を構成する製材の幅とせいに関する寸法効果は段数によらず一定となるが、通常は各製材の長さが GBM の断面せいに応じて長くなるため、これによる寸法効果が現れ、GBM の寸法効果を考慮する曲げ強度の、それを考慮しない曲げ強度に対する比は段数が増えると小さくなることが分かった。

8 章では、5 章～7 章の検討を基にして GBM が有する力学的な性質を踏まえた GBM の曲げ強度と曲げ剛性に対する構造設計手法の考え方について考察した。

ラーメン架構の短スパンまたは短柱のようにロードスパン S と断面せい H との比が $S/H=4.0$ となるときの構成材（製材）の最下段製材の曲げ強度または引張強度に対する寸法効果係数は、一般的なロードスパンと断面せいの比である $S/H=6.0$ のときの寸法効果係数に比べて、断面せいに関わらず引張強度に対する寸法効果係数で 10% 程、曲げ強度に対す

る寸法効果係数で5%程を過小に評価することになる。ラーメン架構においてGBMの曲げ強度を過小に評価すると、予期せずGBMのせん断破壊が先行する場合も考えられることから、断面せいと部材長さに相関が無いものについては、部材長さに関する寸法効果がGBMの曲げ強度に及ぼす影響を適切に考慮することが望ましいこと、150 mm角を積層しGBMの幅方向に3列束ねるGBMについて、断面幅に関する寸法効果がGBMの曲げ強度に及ぼす影響を考慮するとき、GBMの曲げ強度の差は約3%と小さいことが分かった。

なお、実大GBM試験体を用いる曲げ実験におけるGBMの曲げ強度と曲げ剛性に対する評価精度の改善に向けた課題として、縦振動法の適用範囲に関するさらなる検証と、製材の強度に対する応力分布と体積の影響をそれぞれ抽出する実験を実施することおよび繊維方向のヤング率と成熟材要素と未成熟材要素の引張強度を設定に関するさらなる検証は重要な事項である。一方で、GBMの曲げ強度と曲げ剛性に対する適切な構造設計手法を整備するための課題として、部材に対して複合応力が作用する場合や二軸曲げが作用するときの構造設計手法や部材の曲げクリープ特性を把握することは重要な事項である。

謝辞

本論は、著者が（株）織本構造設計において平成20年から約10年間にわたって取り組んできた木質構造材料である接着重ね材の材料開発の成果,ならびに平成28年から九州大学大学院人間環境学府博士後期課程の学生として、接着重ね材に対する研究成果をまとめたものです。

九州大学大学院人間環境学研究院の蜷川利彦教授ならびに同 佐藤利昭准教授には、本研究を行う機会を与えて頂くとともに、研究の遂行にあたり指導教官として浅学菲才な筆者に対して終始変わらず懇到切至な御指導を賜りました。構造設計技術者である筆者が本論をまとめることができたのは、御指導・御鞭撻の賜物であります。ここに、心より厚く御礼申し上げます。本論の審査にあたり、九州大学大学院農学研究院の藤本登留准教授には、貴重な御意見と御助言を頂きました。ここに、深謝の意を表します。大分大学理工学部の菊池健児名誉教授ならびに同 黒木正幸教授には、博士後期課程の進学以前から現在にわたって温かく見守って頂くとともに、多くの御指導を賜りましたことに深く感謝致します。

筆者の博士後期課程への進学および研究活動全般にわたる多大なる御支援を賜りました、（株）工芸社・ハヤタの早田允英代表取締役をはじめ同 田口紅音氏ならびに同社の皆様に対して、ここに謹んで御礼申し上げます。社会人として構造設計業務を続けながら本論を作成するために、さまざまなご高配を賜るとともに、ときにやさしく励ましてくださった（株）織本構造設計の中村幸悦代表取締役社長をはじめ同 所員の皆様に感謝の意を表します。九州大学大学院人間環境学研究院の南部恭広助教をはじめ、蜷川研究室および佐藤研究室に所属する技術職員や学生の皆様には、筆者を快く受け入れて頂き、ありがとうございました。最後に、本論を作成するまで辛抱強く、明るく見守ってくれた筆者の家族に対して感謝の意を表して結びとします。

令和4年5月

田上 誠