

スギ接着重ね材の曲げ性能に関する実験的研究

田上, 誠

九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 : 博士後期課程

佐藤, 利昭

九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 : 准教授

田口, 紅音

工芸社・ハヤタTKS事業部

蜷川, 利彦

九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 : 教授

<https://doi.org/10.15017/1931490>

出版情報 : 都市・建築学研究. 33, pp.37-46, 2018-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

バージョン :

権利関係 :

スギ接着重ね材の曲げ性能に関する実験的研究

Experimental Study on Bending Performance of Glued Build-up Member Made of Cedar

田上 誠*, 佐藤利昭**, 田口紅音***, 蜷川利彦**

Makoto TANOUE, Toshiaki SATO, Akane TAGUCHI and Toshihiko NINAKAWA

In recent years, effective utilization of domestically produced timber has become an issue. Due to this background, Glued Build-up Member (GBM) has been developed in order to be used as structural members. We carried out full-scale bending tests for GBM, and evaluated the bending performance as bending strength and stiffness, by using structural model in this paper. We conclude that the bending stress and bending stiffness are close to the estimated values, on the occasion of evaluating the bending elastic modulus for each timber.

Keywords : *Glued build-up member, Cedar, Box heart timber, Bending strength, Bending stiffness*
接着重ね材, スギ, 心持ち材, 曲げ強さ, 曲げ剛性

1. 序論

本研究は、国産の心持ち材の有効利用を目的として開発された建築構造部材である接着重ね材 (Glued Build-up Member:以下, GBM) の曲げ強さと曲げ剛性を明らかにするものである。

国内の森林資源量の蓄積推移は、昭和 51 年の $2,186 \times 10^7 \text{m}^3$ から平成 24 年で $4,901 \times 10^7 \text{m}^3$ と約 2.2 倍り上昇しており、現在、樹齢 50 年から 60 年の人工林の多くが主伐期を迎えている。また、2010 年 10 月に「公共建築物等における木材の利用促進に関する法律」が制定されたことを契機として、建築物の木造化や木質化が推進されるようになってきている。一方で、既往の調査²⁾によれば木造住宅に用いる構造材における国産材の割合は柱が 39%、横架材が 9%であり、輸入材が多く用いられているのが現状である。この理由として、一般に流通している製材は正角材か小角材 (ラミナ) であり、横架材に利用する平角材の調達は困難でかつ高額となることや、断面が大きくなると均一な乾燥処理が難しいことから、安定した構造性能が得られて材料費の安い輸入材を用いた集成材

が広く利用されていることが考えられる。また、この傾向はより大きな空間構成が求められるため、大断面材が必要となる公共建築物では顕著に表れると推察される。併せて、近年では CLT (Cross Laminated Timber) の普及に向けた法整備が進んだことにより、集成材や合板に供するラミナの需要が高い。これらの背景から国産の正角材、すなわち心持ち材の有効利用が課題となっている。本論で取り扱う GBM は心持ち材 (以下、製材) をエポキシ樹脂系接着剤 (以下、接着剤) によって積層した木質材料であり、建築基準法第 37 条第二項の木質複合軸材料の大臣認定を取得している (認定番号:MWCM-0022, 0023, 0024, 0025)。

本論では、120 または 150 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すとともに、GBM 断面の構造的な特徴を踏まえて曲げ応力度と曲げ剛性を求め、曲げ応力度実験値と製材の曲げ弾性係数から推定される曲げ強度との比較と、曲げ剛性実験値と推定される曲げ剛性との比較について述べる。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体には日本農林規格 (以下, JAS) の機械等級区分 E70, E90, E110 に適合し、含水率 KD18%以下のスギ製

* 空間システム専攻博士後期課程

** 都市・建築学部門

*** (株) 工芸社・ハヤタ TKS 事業部

材を用いた。製材の含水率は、全乾法で校正した高周波式水分計を用いて管理し、水分計の測定は材軸両端と中央の上・下・側面の4面(計12点)の平均値とした。また、曲げ弾性係数は縦振動法³⁾により計測した。水分計による含水率測定結果を図1に、曲げ弾性係数 E_f を図2に示す。

注1) 図1と図2は、同値となる製材が多いほど(プロットの重なりが多いほど)濃い描画となる。

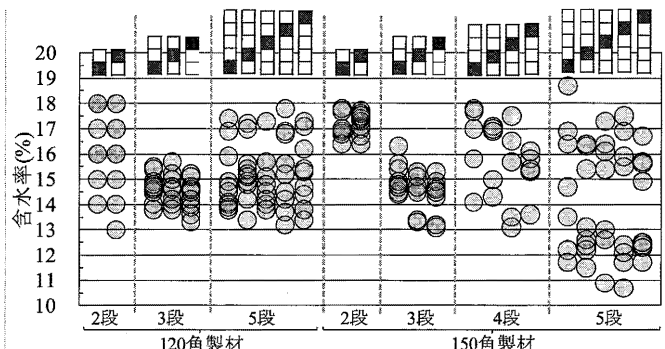


図1 製材の含水率(高周波式水分計)

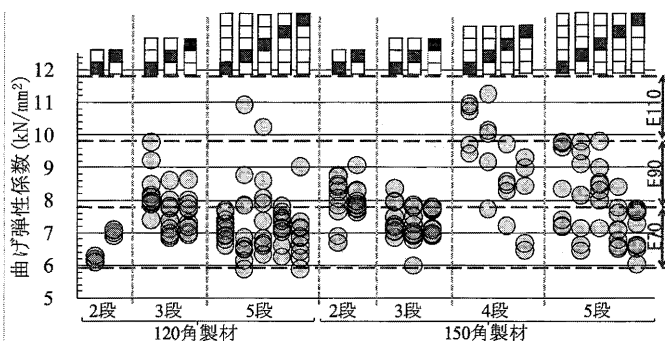


図2 製材の曲げ弾性係数 E_f (縦振動法)

試験体の製作は、本GBMに対して大臣認定で定められている製作方法に則り、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。まず、重ね材上下面と接着面が節径比30%以下、集中節径比50%以下となるように材の選定を行う。次に、接着剤を $350 \pm 50 \text{ g/m}^2$ で被着面に塗布する。接着剤塗布はエアガンにセットしたスタティックミキサーにより主剤と硬化剤を自動攪拌して行う。次に、堅型多圧プレスを用いて 6.0 kgf/cm^2 の圧力で圧縮する。圧縮と養生の時間は、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時間とした。養生後に約 0.5 mm/面 のプレナー掛けを行い、材幅、材せいともに $-0.5 \text{ mm} \sim +1.5 \text{ mm}$ 以下の寸法精度で仕上げる。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。

試験体寸法は、製材寸法と段数毎に定めた。せん断スパン a は曲げ破壊となるように $4.5H$ 以上(H : GBMせい)、試験体全長 L は実験可能な寸法から 9 m 以下とし、試験体数は各製材段数で5体以上とした(表1)。

2.2 実験方法

実験方法は二点載荷曲げ実験とし、支点は両端ピン支持である。図3に実験装置を示す。載荷は万能試験機を用い載荷速度 10 mm/min の単調載荷とした。

荷重 P は、ロードセル計測値と載荷治具重量の和(載荷治具重量の和は最大荷重の $1.5\% \sim 6.3\%$)とし、 20% 以上の荷重低下が生じた時点で載荷と計測を終了した。支点間中央位置(DG1)と載荷位置(DG2, DG3), 支点位置(DG4, DG5)に変位計を配置して載荷方向の変位を計測する。また、両端のめり込みの影響を取り除くため、中央たわみは中央のDG1の計測値から支点のDG4とDG5の計測値の平均値を差し引いたものとする。なお、3段、4段、5段の試験体には加力点と支点到めり込み補強を施し、4箇所振れ止めを設置している(図3)。

表1 試験体一覧

名称	w (mm)	n	H (mm)	a	S	l	試験体数	倒れ止め、めり込補強
GBM12x2	120 角	2段	240	5.0H	5.0H	15.0H	10体	無し
GBM12x3		3段	360	5.7H	4.2H	15.6H	10体	有り
GBM12x5		5段	600	4.5H	3.3H	12.3H	10体	有り
GBM15x2	150 角	2段	300	5.7H	5.7H	17.0H	10体	無し
GBM15x3		3段	450	5.7H	5.4H	16.8H	10体	有り
GBM15x4		4段	600	4.5H	3.3H	12.3H	5体	有り
GBM15x5	5段	750	4.5H	2.5H	11.5H	8体	有り	

w : 製材寸法, n : 製材段数, H : GBMせい, a : せん断スパン, S : ロードスパン, l : 支点間距離

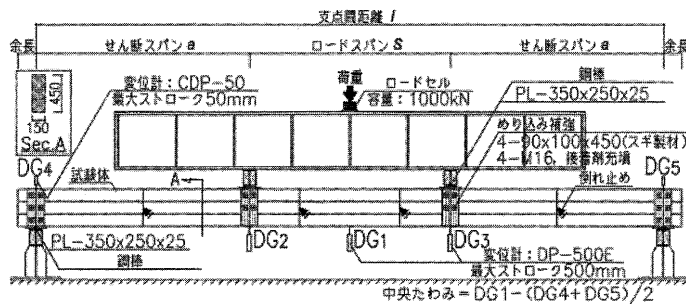


図3 実験装置(GBM15x3)

ここで、国内の曲げ強度試験の標準寸法⁴⁾は、 $l=17.0H \sim 22.0H$, $a=(6.0 \pm 1.5)H$, $S=(6.0 \pm 1.0)H$ の範囲とするが、本実験では $l=12.3H \sim 17.0H$, $a=4.5H \sim 5.7H$, $S=2.5H \sim 5.7H$ と、 a と S の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ため、中央たわみにおけるせん断変形の影響について以下に検討する。断面が一様で接着面相互のズレがない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 は曲げモーメントによる中央たわみ δ_b とせん断力による中央たわみ δ_s の和として(1)式で表される。

$$\delta = \delta_b + \delta_s = \frac{Pa}{48EI} (3l^2 - 4a^2) + \frac{\kappa_d Pa}{2GA} \quad (1)$$

ここで、 I : GBMの断面二次モーメント, A : GBMの断面積, E : 曲げ弾性係数, G : せん断弾性係数である。

図4に曲げ弾性係数とせん断弾性係数の比を $E/G=15$ としたときの各試験体のせん断スパン比 a/H とせん断変形割合 δ_s/δ の関係を示す。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4より $a/H=S/H$ で $E/G=15$ と仮定した場合に δ_s/δ は 2.7%~7.2% であるのに対して本実験では 4.6%~10.2% であり、特に4段重ね材と5段重ね材で大きい値となっている。よって、本実験でせん断変形が中央たわみに与える影響は標準的な試験に比べて大きいものがあると判断し、以後はせん断変形を除いた曲げ剛性を用いて実験結果の評価を行う。

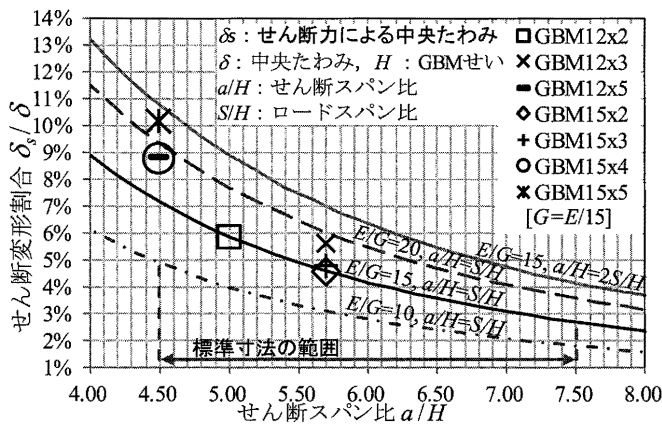


図4 せん断変形の影響

2.3 実験結果

図5に各試験体の荷重-中央たわみ関係を製材寸法・段数毎に示す。最大荷重実験値 P_{max} は最初に10%以上の荷重低下が生じる直前に発揮した荷重とし、図5中に◆印で示す。写真1に実験後の試験体状況を示す。

全ての試験体で接着面の破壊は生じておらず、曲げ破壊したものは最下段製材に、せん断破壊したものは断面中央付近に破壊が生じている。ここで、試験体の破壊性状を荷重-中央たわみ関係と破壊状況を踏まえてA, B1, B2, CおよびSに分類する(図6)。分類Aは、ロードスパン内の材軸中央部(以下、材軸中央)において最下段製材の下端が加力方向へ大きく割裂けて荷重が低下したものとす。分類B1は、材軸中央において最下段製材の下端が加力方向へ割裂けて一度荷重が低下するが再び荷重が増加し、その後大きく割裂けた時点で急激に荷重が低下したものとす。分類B2は、材軸中央において最下段製材の下端が加力方向へ徐々に割裂けながら何度か荷重の増減を繰り返し、最後に大きく割裂けた時点で急激に荷重が低下したものとす。分類Cは、材軸中央において最下段製材全体が加力方向へ割裂けて急激に荷重が低下したものとす。分類Sは、支点間スパン内の材軸全体において断面中央付近が繊維方向に割裂し

表2 実験結果とGBM断面の評価結果

種別	No.	E_{fr}	P_{max}	$e\sigma_b$	$e\sigma_{be}$	$e\sigma_{ben}$	$e\sigma_{ten}$	$(EI)_e$	$e(EI)_b$	破壊性状
GBM12x2	①	6.10	74.5	38.8	37.6	18.3	19.4	8.96	9.44	A
	②	6.10	59.8	31.1	30.1	14.6	15.6	9.02	9.04	A
	③	6.20	56.9	29.6	28.8	14.0	14.8	9.10	9.16	B1
	④	6.20	63.4	33.0	31.9	15.4	16.5	9.16	9.48	B1
	⑤	6.20	73.0	38.0	36.8	17.8	19.0	9.16	9.14	A
	⑥	6.20	67.1	34.9	33.8	16.3	17.5	9.16	9.07	C
	⑦	6.30	63.2	32.9	32.0	15.5	16.4	9.24	9.39	B2
	⑧	6.30	66.1	34.4	33.4	16.2	17.2	9.24	8.75	B1
	⑨	6.10	60.2	31.4	30.2	14.6	15.7	9.08	8.33	A
	⑩	6.30	60.2	31.4	30.4	14.8	15.7	9.24	9.33	B2
GBM12x3	①	7.87	92.0	36.4	37.6	12.9	24.7	34.7	35.5	A
	②	8.08	102	40.3	41.5	14.1	27.3	35.8	37.5	B2
	③	8.16	101	39.9	41.7	14.4	27.3	35.2	35.0	A
	④	7.92	104	41.1	41.5	13.9	27.6	36.5	35.3	B2
	⑤	7.39	103	40.7	40.0	13.1	26.9	35.8	35.9	B2
	⑥	8.49	78.0	30.8	32.4	11.2	21.2	36.2	37.5	A
	⑦	8.09	76.0	30.1	30.3	10.2	20.1	37.3	38.7	S
	⑧	9.22	101	39.9	42.1	14.6	27.5	39.2	37.6	B2
	⑨	9.78	102	40.3	44.1	15.8	28.2	38.7	38.6	A
	⑩	7.96	83.0	32.8	32.0	10.5	21.6	38.7	38.1	B2
GBM12x5	①	6.61	213	39.9	38.6	8.0	30.6	143	160	B2
	②	7.07	237	44.4	42.3	8.2	34.1	166	174	C
	③	7.41	205	38.4	40.6	8.2	32.4	150	159	C
	④	6.90	240	45.0	45.8	8.9	36.9	150	167	A
	⑤	7.29	225	42.2	42.3	8.6	33.7	154	167	B1
	⑥	7.71	224	42.0	39.6	8.2	31.4	170	180	B2
	⑦	7.64	212	39.8	42.5	8.7	33.8	151	175	C
	⑧	7.16	239	44.8	45.5	9.4	36.1	148	164	B1
	⑨	6.80	220	41.3	40.9	8.0	32.9	151	163	B2
	⑩	6.93	226	42.4	43.3	8.6	34.7	148	164	B2
GBM15x2	①	6.90	85.0	32.1	30.0	14.1	16.0	26.6	27.4	A
	②	7.84	95.5	36.3	36.2	18.1	18.1	26.5	28.2	A
	③	6.69	94.9	35.9	34.5	16.6	17.9	24.5	25.7	A
	④	7.66	101	38.2	37.4	18.4	19.1	26.9	27.7	B1
	⑤	8.27	102	38.5	39.2	19.9	19.3	27.0	28.5	B1
	⑥	8.48	97.9	37.0	38.0	19.5	18.5	27.2	29.0	A
	⑦	8.76	107	40.4	41.6	21.4	20.2	27.9	29.6	B2
	⑧	8.74	102	38.5	39.7	20.5	19.2	27.8	30.7	A
	⑨	8.07	108	40.8	40.9	20.5	20.4	27.1	29.9	A
	⑩	8.42	114	43.1	43.2	21.7	21.5	28.2	30.4	B1
GBM15x3	①	7.94	132	33.2	34.5	11.8	22.6	84.6	80.1	B1
	②	7.06	134	33.9	33.0	10.8	22.2	83.8	87.4	B2
	③	7.17	124	31.1	31.6	10.6	21.0	80.1	78.4	B2
	④	7.26	139	35.0	34.4	11.3	23.1	85.4	88.1	A
	⑤	7.48	113	28.5	28.9	9.7	19.2	83.1	85.8	S
	⑥	8.37	140	35.3	37.3	13.0	24.3	86.0	82.5	A
	⑦	7.97	149	37.5	37.9	12.7	25.2	89.5	88.0	A
	⑧	6.86	132	33.2	32.9	10.9	22.0	79.2	83.8	A
	⑨	7.05	130	32.7	32.7	10.9	21.8	80.5	82.4	S
	⑩	7.19	137	34.5	33.9	11.1	22.8	84.8	85.2	B1
GBM15x4	①	10.7	249	37.4	41.0	10.7	30.3	252	253	A
	②	10.9	270	40.5	46.0	13.0	33.0	229	223	B2
	③	11.0	325	48.8	51.7	13.4	38.2	268	272	B1
	④	9.71	282	42.3	42.6	10.8	31.7	256	253	S
	⑤	9.44	287	43.1	47.6	12.8	34.8	214	225	B2
GBM15x5	①	9.75	288	34.6	38.3	8.1	30.3	439	423	B2
	②	9.63	272	32.6	34.9	7.4	27.6	451	434	B2
	③	9.79	325	39.0	43.0	9.1	33.9	444	428	B2
	④	8.35	315	37.8	37.7	7.9	29.8	421	433	B2
	⑤	9.79	279	33.5	38.2	8.5	29.8	408	400	B1
	⑥	7.19	294	35.3	36.7	7.5	29.2	359	372	B2
	⑦	7.40	257	30.8	32.4	6.6	25.9	367	364	B2
	⑧	7.21	315	37.8	38.4	7.7	30.7	375	394	A

E_{fr} : 最下段製材の曲げ弾性係数, P_{max} : 最大荷重実験値, $e\sigma_b$: 曲げ応力度実験値(一様断面モデル), $e\sigma_{be}$: 曲げ応力度実験値(GBM断面モデル), $e\sigma_{ben}$: 曲げ応力度実験値(GBM断面モデル, 複合応力), $e\sigma_{ten}$: 引張応力度実験値(GBM断面モデル, 複合応力), $e(EI)_b$: 曲げ剛性実験値, $(EI)_e$: 等価剛性. 単位: E_{fr} [kN/mm²], $e(EI)_b$ [x10¹¹N・mm²], P_{max} [kN], $e\sigma_b, e\sigma_{be}, e\sigma_{ben}, e\sigma_{ten}$ [N/mm²].

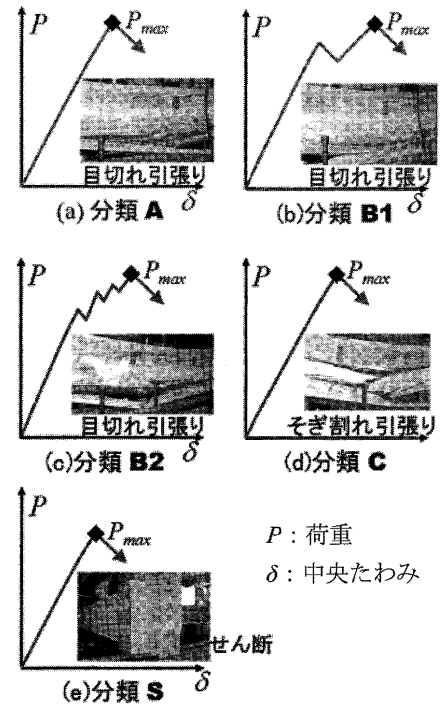
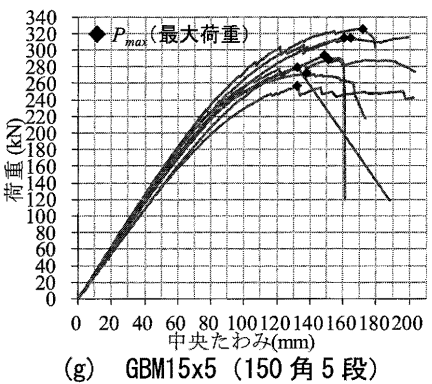
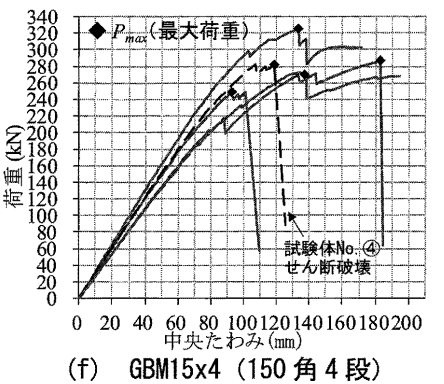
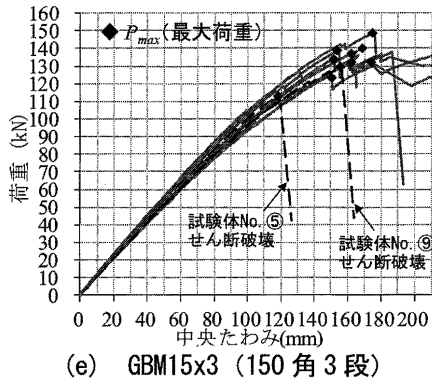
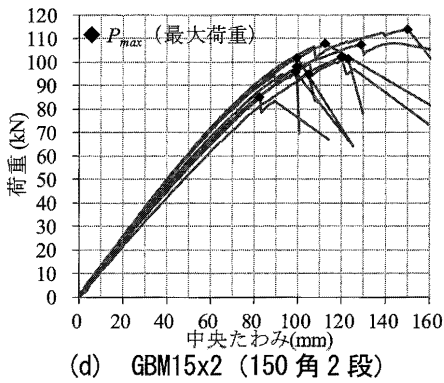
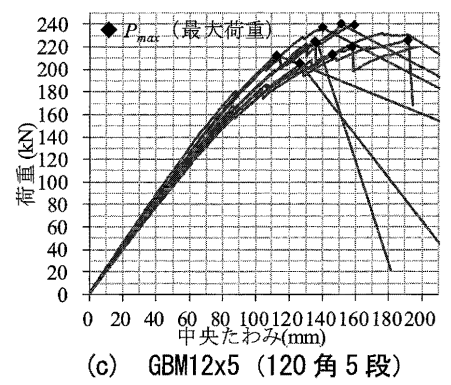
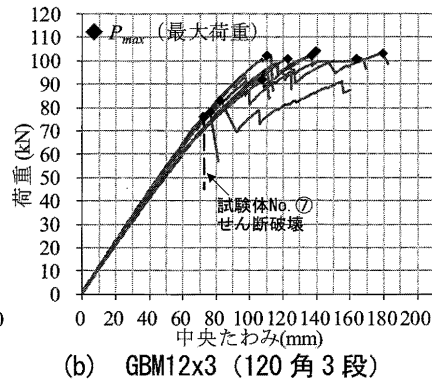
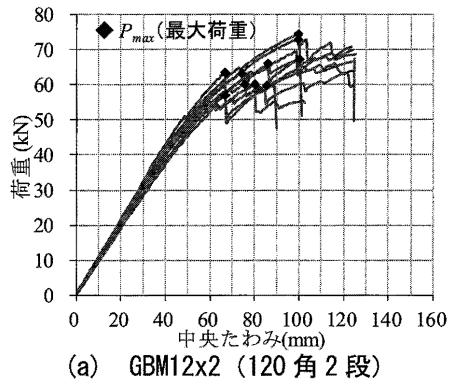
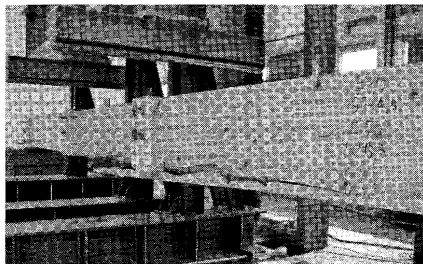
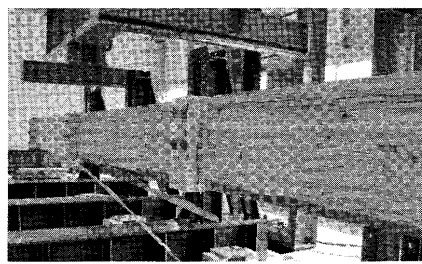


図5 荷重—中央たわみ関係

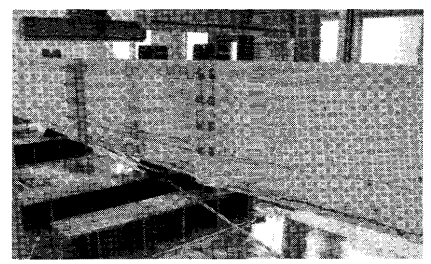
図6 試験体の破壊性状の分類



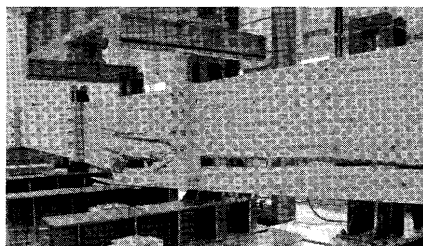
(a) 分類 A GBM12x3 No. ①



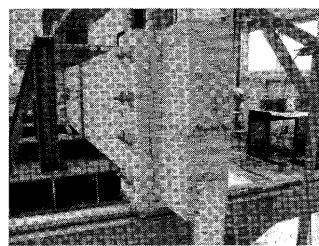
(b) 分類 B1 GBM15x3 No. ①



(c) 分類 B2 GBM15x5 No. ③



(d) 分類 C GBM12x5 No. ②



(e) 分類 S GBM15x4 No. ④

写真1 実験後の試験体状況

て急激に荷重が低下したものとする。分類A, B1, B2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⁵⁾と、分類Cは下側製材のそぎわれ引張による曲げ破壊⁵⁾と、分類Sはせん断破壊と判断する。各試験体の破壊性状の分類を表2に示す。

3. 実験結果の評価

3.1 一様断面モデルを用いた評価

GBM 断面を一様断面とみなし、一般に木質材料に用いられる統計処理を行って実験結果を評価する。すなわち、GBM 断面内の曲げ弾性係数は一様とし、断面の平面保持が成り立つと仮定する。 P_{max} 時の GBM 断面の引張り縁の曲げ応力度実験値 ${}^e\sigma_b$ を(2), (3)式により、 $E/G=15$ と仮定し、中央たわみからせん断力による中央たわみを除いて求めた曲げ剛性実験値 ${}^e(EI)_b$ を(4)式により求める。

$${}^e\sigma_b = \frac{{}^eM}{Z} = \frac{P_{max}a}{2Z} \quad (2), \quad Z = \frac{WH^3}{6} \quad (3)$$

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

ここで、 ${}^eM: P_{max}$ 時の曲げモーメント、 Z : 断面係数、 W : GBM の幅、 H : GBM せい、 k_d : 形状係数 ($k_d=1.2$)、 $\Delta\delta$: 中央たわみ実験値の増分であり、増分範囲は $0.1P_{max}$ から $0.4P_{max}$ である。

表 2 に各試験体の ${}^e\sigma_b$ と ${}^e(EI)_b$ の値を示す。各試験体の ${}^e\sigma_b/F_b$ と ${}^e(EI)_b/E_0I$ の関係を図 7(a)~(g) に示す。また、同図に ${}^e\sigma_b/F_b$ と ${}^e(EI)_b/E_0I$ の平均値 \bar{x} と変動係数 CV を示す。 F_b は最下段製材の曲げ強度、 E_0 は各製材の曲げ弾性係数の平均値であり、どちらも JAS 基準値を用いる (図 8)。なお、せん断破壊した試験体は上記の評価の対象外とする。図 7 より実験結果のばらつきは、曲げ応力度が $CV=0.124$ (GBM15x4)、曲げ剛性が $CV=0.073$ (GBM15x3) である。曲げ応力度のばらつきは、「木構

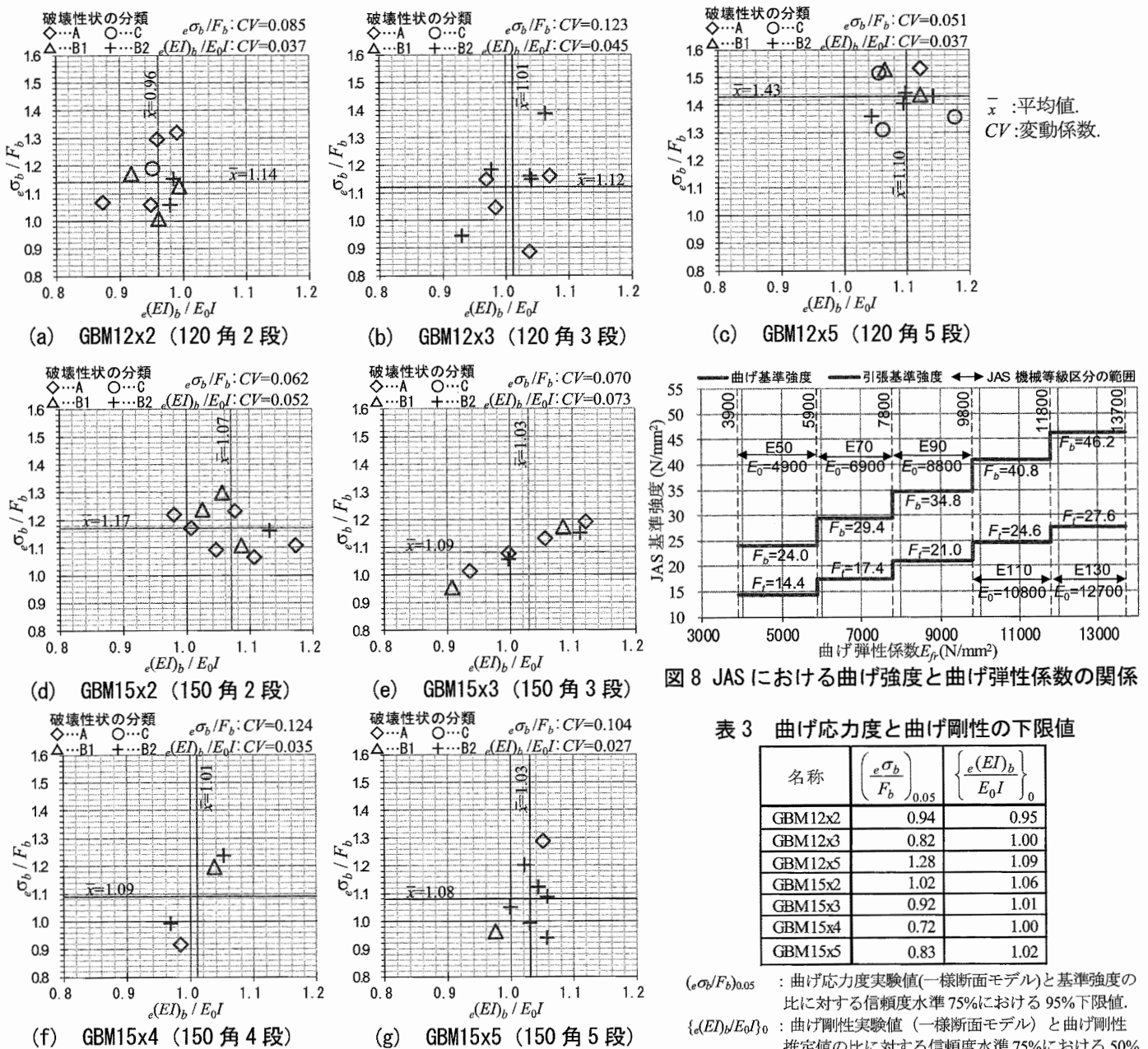


図 7 曲げ応力度と曲げ剛性の評価 (一様断面モデル)

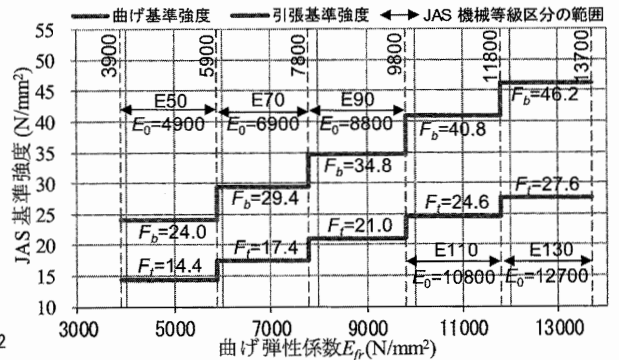


図 8 JAS における曲げ強度と曲げ弾性係数の関係

表 3 曲げ応力度と曲げ剛性の下限値

名称	$\left(\frac{{}^e\sigma_b}{F_b}\right)_{0.05}$	$\left\{\frac{{}^e(EI)_b}{E_0I}\right\}_0$
GBM12x2	0.94	0.95
GBM12x3	0.82	1.00
GBM12x5	1.28	1.09
GBM15x2	1.02	1.06
GBM15x3	0.92	1.01
GBM15x4	0.72	1.00
GBM15x5	0.83	1.02

$({}^e\sigma_b/F_b)_{0.05}$: 曲げ応力度実験値 (一様断面モデル) と基準強度の比に対する信頼水準 75% における 95% 下限値。
 $\{{}^e(EI)_b/E_0I\}_0$: 曲げ剛性実験値 (一様断面モデル) と曲げ剛性推定値の比に対する信頼水準 75% における 50% 下限値

造振興(株)」が公開する⁹⁾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。なお、文献 6) は、日本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ものである。

ここで、一般に木質材料で行う統計処理により曲げ応力度と曲げ剛性の下限値を求める。すなわち、実験で得られた $e\sigma_b/F_b$ の分布の信頼度水準 75% における 95% 下限値 (以下、95% 下限値)³⁾ である $(e\sigma_b/F_b)_{0.05}$ と、実験で得られた $e(EI)_b/E_0I$ の分布の信頼度水準 75% における 50% 下限値 (以下、50% 下限値)³⁾ である $\{e(EI)_b/E_0I\}_0$ を製材段数毎に求める。表 3 に $(e\sigma_b/F_b)_{0.05}$ と $\{e(EI)_b/E_0I\}_0$ の値を示す。

表より $(e\sigma_b/F_b)_{0.05}$ は、最も小さい試験体で GBM15x4 の 0.72, 最も大きい試験体で GBM12x5 の 1.28 であり、全体に曲げ応力度実験値は曲げ基準強度と同程度か、小さくなる試験体が多いことがわかる。また、 $\{e(EI)_b/E_0I\}_0$ は、最も小さい試験体で GBM12x2 の 0.95, 最も大きい試験体で GBM12x5 の 1.09 であり、全体に曲げ剛性の実験値は曲げ剛性の推定値と同程度となる試験体が多いことが分かる。GBM12x5 の実験値のみが基準強度に比べて大きい要因と、全体に実験で得られた曲げ応力度の下限値が曲げ基準強度に比べて小さい要因については、今後の研究課題である。

次に、せん断破壊が生じた試験体について、一様断面モデルを用いて形状係数 $\kappa_s=1.5$ とし、 P_{max} 時のせん断力 eQ によるせん断応力度実験値 $e\sigma_s$ を(5)式で求める。

$$e\sigma_s = \kappa_s \frac{eQ}{A} = \kappa_s \frac{P_{max}}{2WH} \quad (5)$$

$e\sigma_s$ と JAS せん断基準強度 $F_s (=1.8 \text{ N/mm}^2)$ の比は、GBM12x3 No.⑦: 0.73, GBM15x3 No.⑤: 0.70, No.⑨: 0.80, GBM15x4 No.④: 1.30 であり、120 角 3 段と 150 角 3 段で JAS せん断基準強度に達する前にせん断破壊が生じている。本論は、GBM 断面の曲げ応力度と曲げ剛性の評価を目的としているため、以降はせん断破壊した試験体を取り除いて検討を行う。せん断破壊した試験体の分析についても今後の研究課題である。

3.2 GBM 断面モデルを用いた評価

GBM の構成要素である製材寸法は、集成材の構成要素であるラミナ寸法に比べて大きく、本実験においては JAS 機械等級区分 E70, E90, E110 製材が混在した配置となっているものもある。そのため、各製材の曲げ弾性係数を適切に考慮して GBM 断面の曲げ応力度と曲げ剛性を求め、前節に示した一様断面と見なして求めたそれらと比較する。GBM 断面における各製材の曲げ弾性係数の差を表現するために、図 9 に示す GBM 断面モデルを用いて曲げ応力度と曲げ剛性を求める。各製材の曲げ

弾性係数は GBM の製作前に実施した縦振動法による測定結果 E_{fr} を用いる (図 2)。

平面保持が成り立ち (製材相互の接着剤界面にずれが生じない)、各製材が異なる曲げ弾性係数 E_i と断面積 A_i を持つ構造要素としたとき、等価曲げ剛性 $(EI)_e$ は(6)式で表現できる。なお、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(7)式で、中立軸と各製材芯の距離 g_i は(8)式で、原点から中立軸までの距離 λ は(9)式で求められる。

$$(EI)_e = \sum_{i=1}^n E_i I_{i-NN'} \quad (6) \quad I_{i-NN'} = I_i + g_i^2 A_i \quad (7)$$

$$g_i = \lambda - y_i \quad (8) \quad \lambda = \frac{\sum_{i=1}^n E_i A_i y_i}{\sum_{i=1}^n E_i A_i} \quad (9)$$

ここで、 y_i : 各製材芯と原点 (圧縮縁) の距離である。また、GBM 断面の引張縁の垂直応力度実験値 $e\sigma_{be}$ は(10)式で求める。

$$e\sigma_{be} = E_n \frac{eM}{(EI)_e} (H - \lambda) \quad (10)$$

ここで、 E_n : 最下段製材の曲げ弾性係数である。

表 2 に各試験体の $e\sigma_{be}$ と $(EI)_e$ の値を示す。

JAS 基準強度は、曲げ弾性係数の測定結果により等級を区分し、各区分の強度の下限値を与えている (図 8)。また、曲げ弾性係数と曲げ強度には相関関係が成り立ち、製材の真の強度は JAS 基準値を曲げ弾性係数により線形補間した値にばらつきや樹木の生長に伴い木材に内包される節等の欠点の影響を考慮した値に近いと考えられる。そこで、以降の検討では最下段製材の曲げ弾性係数 E_{fr} を用いて JAS 基準強度と曲げ弾性係数係数の関係を線形補間により求めた曲げ強度 μF_b を用いて検討を行う。図 10 に線形補間の方法を示す。また、各試験体の最下段製材に対する E_{fr} の測定値 E_{frn} を表 2 に示している。図 11(a)

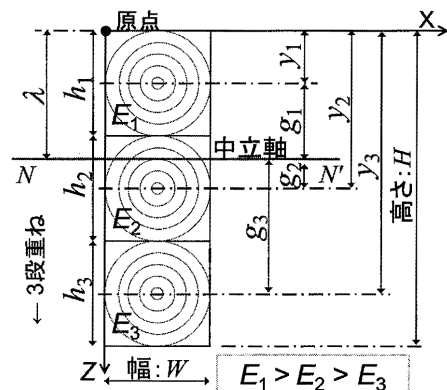


図 9 GBM 断面モデル (3 段重ね, $E_1 > E_2 > E_3$ の場合)

～(c)に120角製材GBMの $e\sigma_{be}/iF_b$ と $e(EI)_b/(EI)_e$ の関係とヒストグラムを、図12(a)～(d)に150角製材GBMの $e\sigma_{be}/iF_b$ と $e(EI)_b/(EI)_e$ の関係とヒストグラムを示す。また、ヒストグラムに平均値 \bar{x} と変動係数 CV を併せて示す。

ばらつきの最大値は、 $e\sigma_{be}/iF_b$ が $CV=0.100$ (GBM12x3), $e(EI)_b/(EI)_e$ が $CV=0.038$ (GBM12x2, GBM15x3)である。また、 $e\sigma_{be}/iF_b$ の平均値は1.01(GBM15x5)～1.28(GBM12x5), $e(EI)_b/(EI)_e$ の平均値は1.00(GBM12x2, GBM12x3, GBM15x3, GBM15x5)～1.09(GBM12x5)であり、各製材の曲げ弾性係数を考慮して、GBM断面の曲げ応力度と曲げ剛性を求め、求めた曲げ応力度と製材の曲げ弾性係数 E_f で線形補間した曲げ強度との比較や、求めた曲げ剛性と製材の曲げ弾性係数から推定される曲げ剛性との比較を行ったところ、3.1節に示した一様断面による曲げ性能の実験値と推定値の比較に比べて、曲げ応力度のばらつきと曲げ剛性のばらつきは、共に小さくなる。また、製

材寸法や段数に関わらず実験値と推定値は近い値となる。

GBM12x5試験体は、曲げ応力度の実験値 $e\sigma_{be}$ が曲げ強度の推定値 iF_b に比べて平均で1.28倍、曲げ剛性の実験

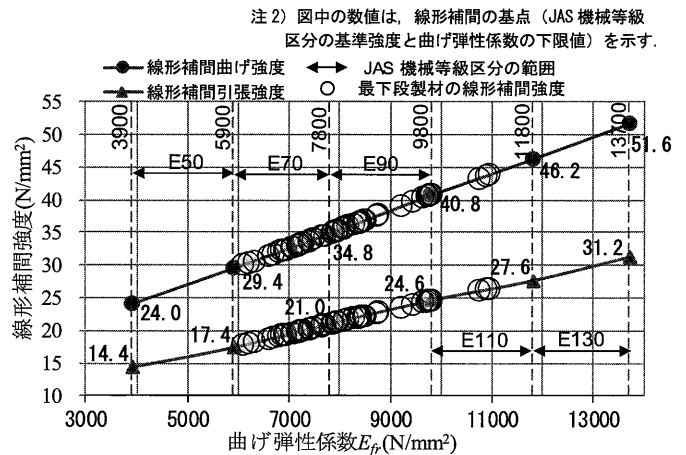


図10 曲げ強度の曲げ弾性係数 E_f を用いた線形補間の方法

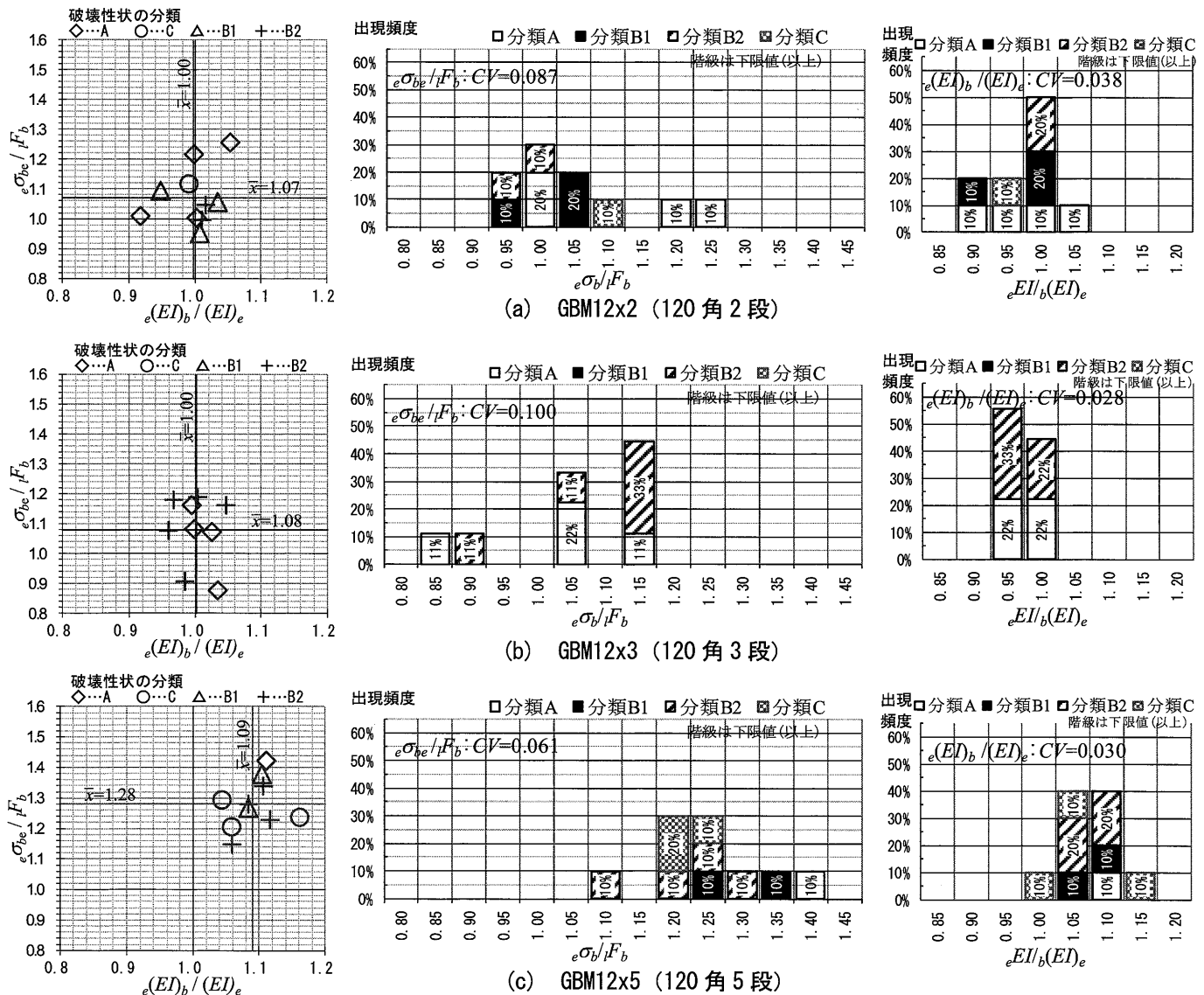


図11 120角製材GBMの曲げ応力度と曲げ剛性の評価 (GBM断面モデル-線形補間)

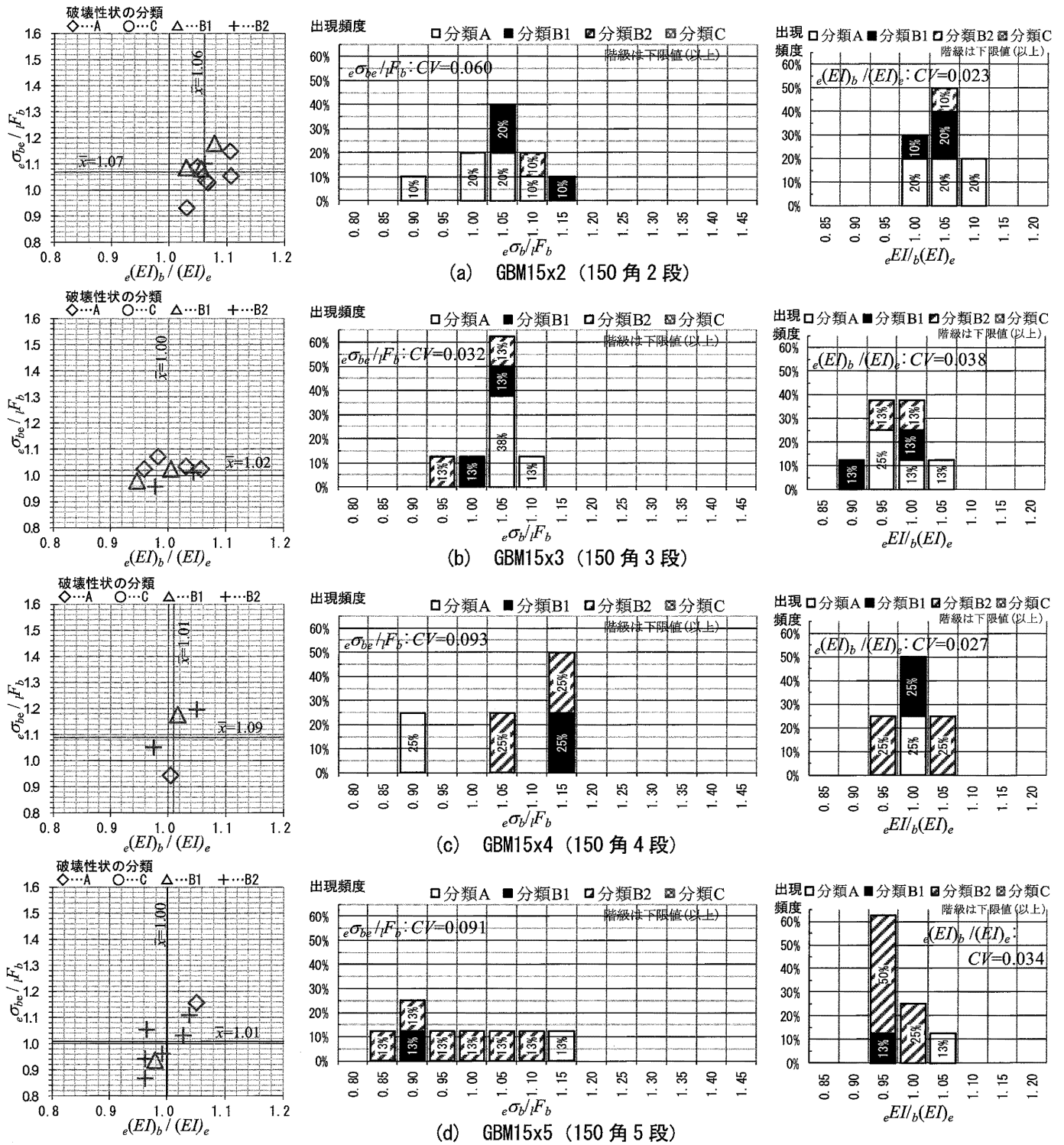


図 12 150 角製材 GBM の曲げ応力度と曲げ剛性の評価 (GBM 断面モデル線形補間)

値 $e(EI)_b$ が曲げ剛性の推定値 $(EI)_e$ に比べて平均で 1.09 倍大きくなっている。GBM12x5 試験体が他の製材段数の試験体に比べて曲げ応力度と曲げ剛性が大きい値を示した要因については、今後の研究課題である。

次に、破壊性状の分類と製材段数の関係について検討する。図 11 と図 12 より、2 段重ね試験体では 120 角・150 角ともに分類 A の試験体が多い。分類 A は、急激に

荷重低下を生じる破壊性状であることから、製材に含まれる欠点の影響が大きく、2 段重ね試験体はこの影響が顕著に現れたものと考えられる。また、同図より 120 角は 3・4・5 段重ね試験体で、150 角は 5 段重ね試験体で分類 B2 の試験体が多い。分類 B2 は、急激な損傷が生じずに荷重の増減を繰り返して破壊が進行するため、製材断面内における目切れの影響が大きく、3・4・5 段重ね

試験体はこの影響が顕著に現れたものと考えられる。また、同図より一般に強度・剛性の高い木材にみられる破壊性状の分類 C は、いずれの製材段数も少ないことが分かる。

3.3 GBM 断面モデルを用いた複合応力の評価

木材の引張り強度は曲げ強度に比べて低いため、製材で構成される GBM では、段数が多くなると各製材の垂直引張り応力度を適切に考慮する必要があると考えられる。そこで、最下段製材の垂直応力度を複合応力が作用するものとして評価する。

図 13 に 3 段重ねの GBM 断面が曲げモーメント eM を受けるときの最下段製材におけるひずみ分布を示す。最下段製材のひずみ ε_3 は、曲げ成分のひずみ ε_{b3} と軸方向成分のひずみ ε_{t3} に分けることができ、(11)式の関係が成り立つ。図 13 のように曲げ成分のひずみは $y-\lambda$ の場合に 0 となる。よって、軸方向成分によるひずみ ε_{t3} は(12)式で表現できる。また、断面全体の曲率と各製材の曲率 ϕ は一致する ((13)式)。したがって、曲げモーメント eM による最下段製材 n の垂直曲げ応力度実験値 $e\sigma_{ben}$ は(14)式により求めることが、垂直引張り応力度実験値 $e\sigma_{ten}$ は(11)式を(12)式に代入し、(15)式により求めることができる。

$$\varepsilon = \varepsilon_{bn} + \varepsilon_{tn} = (y - \lambda)\phi \quad (11), \quad \varepsilon_{tn} = g_n\phi \quad (12)$$

$$\phi = \frac{M}{(EI)_e} \quad (13)$$

$$e\sigma_{ben} = E_n \frac{eM}{(EI)_e} \times \frac{h_n}{2} \quad (14), \quad e\sigma_{ten} = E_n \frac{eM}{(EI)_e} \times g_n \quad (15)$$

ここで、 h_n : 最下段製材のせい、 E_n : 最下段製材の曲げ弾性係数、 g_n : 図心と最下段製材芯の距離である。

表 2 に各試験体の $e\sigma_{ben}$ と $e\sigma_{ten}$ の値を示す。全試験体の複合応力を単純和とした $(e\sigma_{ben}/F_b) + (e\sigma_{ten}/F_t)$ と $e(EI)/(EI)_e$ の関係を図 14(c)に、全試験体の複合応力度を二乗和平方根とした $\sqrt{\{(e\sigma_{ben}/F_b)^2 + (e\sigma_{ten}/F_t)^2\}}$ と $e(EI)/(EI)_e$ の関係を図 14 (d)に示す。また、複合応力の平均値 $\bar{\sigma}$ と変動係数 CV を併せて示す。引張り強度の推定値 iF_t は、曲げ強度の推定値 iF_b と同様にして求める (図 10)。なお、先に述べた一様断面モデル (3.1 節) と GBM モデル (3.2 節) による曲げ応力度と曲げ剛性の結果を比較するために、全試験体の $e\sigma_b/F_b$ と $e(EI)_b/E_0I$ の関係を図 14(a)に、全試験体の $e\sigma_{bd}/iF_b$ と $e(EI)_b/(EI)_e$ の関係を図 14(b)に示す。

図 14 (c)、図 14 (d)より GBM 断面モデルを用いて曲げ応力度と引張り応力度の単純和または、二乗和平方根で評価し、線形補間により求めた強度の推定値と比較すると、単純和とした場合に全試験体の平均で 1.58 倍、二乗和平方根とした場合に全試験体の平均で 1.27 倍推定値

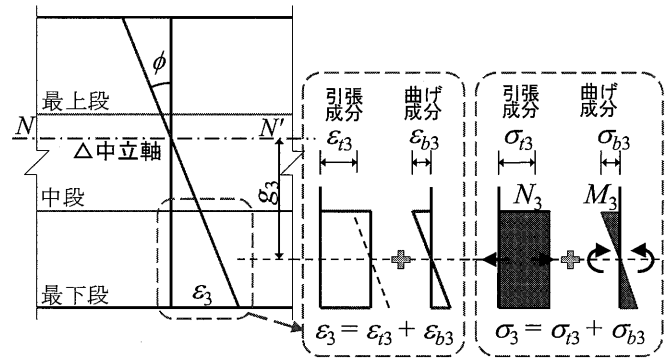


図 13 複合応力の評価に用いる GBM 断面内のひずみと垂直応力度分布 (3 段重ねの場合)

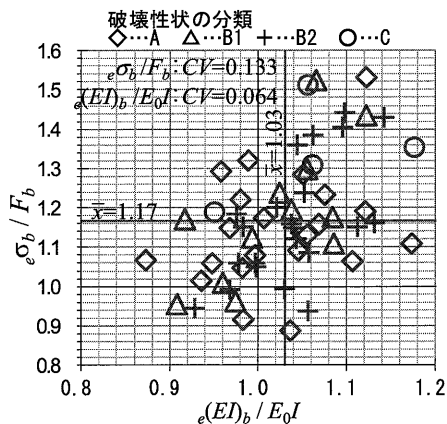
よりも大きい値となる。これは、引張り強度の基準値に対して多くの安全率を見込んでいるためであると考えられる。したがって、複合応力による GBM 断面モデルの評価精度を向上させるためには、引張り試験により製材の引張り強度を明らかにする必要がある。

また、全試験体のばらつきは単純和とした場合で $CV=0.137$ 、二乗和平方根とした場合で $CV=0.198$ であり、どちらも GBM 断面モデルで曲げ応力度とした結果に比べてばらつきが大きい。

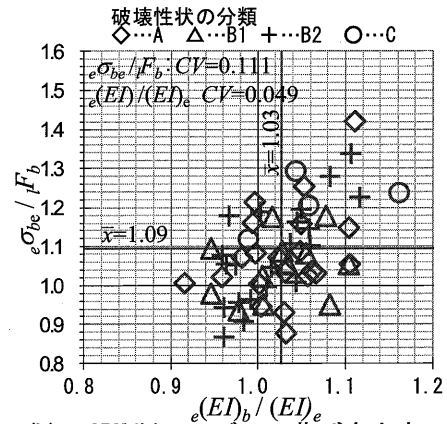
4. 結論

本論では、120 角または 150 角のスギ製材を 2 段、3 段、4 段、5 段積層した実大 GBM 試験体の曲げ試験の結果を示した。加えて、一般に木質材料に用いられる断面を一樣と仮定した一樣断面モデルと、各製材の曲げ弾性係数の差を考慮した GBM 断面モデルを用いた評価手法により GBM 断面の垂直応力度と曲げ剛性について検討した。以下に得られた知見を示す。

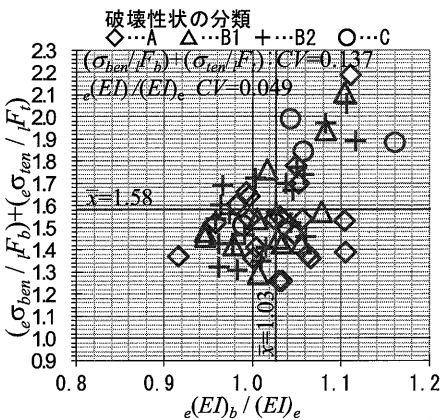
- (1) 試験体の破壊性状は、全ての試験体で接着面の破壊は生じておらず、曲げ破壊したものは最下段製材に、せん断破壊したものは断面中央付近に破壊が生じている。また、曲げ破壊した試験体は、曲げ引張り側となる最下段製材の下端における単純引張と目切れ引張の組み合わせによる曲げ破壊と、下側製材のそぎわれ引張による曲げ破壊の 2 種類の性状が見られ、急激に荷重低下を生ずる試験体は 2 段重ねに、徐々に目切れが進行する試験体は 4・5 段重ねに多く見られた。
- (2) 製材段数毎に一樣断面モデルで曲げ応力度と曲げ剛性を求めると、曲げ応力度の 95% 下限値は 120 角 5 段重ねの試験体で曲げ基準強度を越えるが、他の試験体は曲げ応力度が曲げ基準強度よりも小さい。また、曲げ剛性の 50% 下限値は、実験値と推定値が同程度であった。
- (3) 各製材の曲げ弾性係数の差を考慮した GBM 断面モデルを用いて実験を評価し、最下段製材の曲げ弾性係



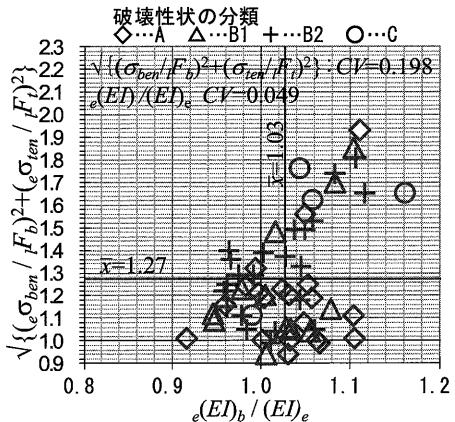
(a) 一様断面モデル



(b) GBM 断面モデル, 曲げ応力度



(c) GBM 断面モデル, 複合応力-単純和



(d) GBM 断面モデル, 複合応力-二乗和平方根

図 14 試験体全数の応力度と曲げ剛性の評価

数測定値を用いて JAS 基準強度と曲げ弾性係数の関係を線形補間により求めた曲げ強度を用いると、一様断面モデルに比べて曲げ応力度と曲げ剛性のばらつきの値が小さくなり、応力度は強度の推定値に近づくことから、GBM 断面モデルを用いた曲げ性能の評価が有効であることを示した。

- (4) GBM 断面モデルを用いて、最下段製材の垂直応力度を曲げ応力度と引張応力度の複合応力度で評価し、線形補間により求めた強度の推定値と比較すると、曲げ応力度と曲げ強度の推定値と、引張応力度と引張強度の推定値の比の単純和とした場合は、全試験体の平均値で 1.58、二乗和平方根とした場合は、全試験体の平均値で 1.27 であり、応力度が強度の推定値に対して大きくなる。これは、引張基準強度に多くの安全率を見込んでいるためであると考えられる。

謝辞

本報の実験は、九州産業大学の九谷和秀研究室と、一般財団法人 建材試験センター 西日本試験所に実施頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 林野庁：森林資源現状表，林野庁，2016年3月
- 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，(社)日本木造住宅産業協会，2013年9月
- 3) (社)日本建築学会：木質構造基礎理論，(社)日本建築学会，pp.34-47，2006年12月
- 4) (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，(公財)日本住宅・木材技術センター，pp.8-10，2011年3月
- 5) 杉山英男：木構造（建築構造学大系＜第22＞），彰国社，pp.26-28，1971年
- 6) 木構造振興(株)：木材の強度等データおよび解説，木構造振興(株)，p.50，2011年9月

(受理：平成29年11月6日)