

スギ材に対する ISO せん断試験法の精度評価と せん断弾性係数・せん断補正係数の算定

千田 知弘¹・渡辺 浩²・荒木 博章³・平田 晃久⁴・村田 忠⁵

¹正会員 福岡大学助教 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)

E-mail: chida@fukuoka-u.ac.jp

²正会員 福岡大学教授 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)

E-mail: mag@fukuoka-u.ac.jp

³熊本県庁, 熊本県林業研究指導所 (〒860-0862 熊本県熊本市中央区黒髪 8-222-2)

E-mail: araki-h-dw@pref.kumamoto.lg.jp

⁴熊本県庁, 熊本県林業研究指導所 (〒860-0862 熊本県熊本市中央区黒髪 8-222-2)

E-mail: hirata-a@pref.kumamoto.lg.jp

⁵山佐木材株式会社 (〒893-1206 鹿児島県肝属郡肝付町前田 2090)

E-mail: muratyu@woodist.co.jp

2011年に施行された森林・林業再生プラン等によって、土木分野に適した木質土木構造物の設計基準の整備が現在進められており、せん断強度の整備のニーズも高まっている。現在最も普及している木材のせん断破壊試験法の一つに ISO 試験法が挙げられるが、曲げ破壊が先行するため、せん断強度としては著しく安全側の値しか測定できない問題がある。

そこで、本研究では、2種類の ISO 試験法に大野式逆対称 4 点曲げ試験法を加えた計 3 種類のせん断破壊試験を行い、単軸ひずみゲージとロゼットゲージから得られた値と梁理論とを比較することによって各試験法の精度、安定性等の性能評価を行った。また、変位計と各ひずみゲージから得られた値を用いてフックの法則とたわみ式を等価にし、せん断弾性係数とせん断補正係数の逆算を試みた。

Key Words: timber material, shear test method, ISO, shear modulus, strain gauge

1. はじめに

木質土木構造物の設計時においては、建築分野における建築基準法のような土木分野独自の基準や規定が存在しないため、木質構造設計規準¹⁾や諸外国の指針、基準などを併用して設計が行われている。例えば、木橋の設計時においては、鋼橋やコンクリート橋と同様に道路橋示方書²⁾に基づいて設計が行われるが、同書には木材の許容応力度や木質構造に関する基準が存在しないため、上記基準を併用して用いている³⁾。これは、木質土木構造物の設計が、設計者の経験、裁量に任されることが多いことを示し、新たな知見が得られても、ケースバイケースとして木質土木構造物全体の設計に反映されることが少ないことも意味する。

一方で、近年の土木分野では、低コスト化や効率的な耐震設計等を目的とし、仕様規定による設計から性能照査型による設計へと移行しつつある。性能照査型への移

行は、仕様規定の下では木材そのものが使用できなかった構造物への木材利用を可能にする³⁾⁷⁾とともに、信頼性の高い強度データを提示することができれば、従来の許容応力度に拠らない自由度の高い設計が可能になり得ることを示すものである。

上記背景を鑑み、著者らは、未だ十分に整備されていないせん断強度⁸⁾に着目し、土木分野における木材のせん断設計基準の策定を最終目標に、「1. 純粋なせん断強度が得られる試験体設計⁸⁾¹¹⁾」、「2. 鋼製ジグを用いた安価かつ容易な試験法の提案⁸⁾¹⁰⁾¹¹⁾」、「3. 既往の試験法に対する実験と数値解析による評価¹²⁾」の3つをテーマに設定し、実験と FEM 解析を組み合わせることで同時並行で研究を進めてきた。本研究は 3. のテーマであり、現在最も普及しているせん断破壊試験法の一つである ISO 試験法¹³⁾の精度をあらためて検証したものである。

木質構造設計規準¹⁾で用いられているせん断に関する値は、建築基準法の告示・建築基準法施行令第 89 条第

1項を基としているが、第89条第1項には、どのような試験法を用いてどのように値を決定したのかの記述が無く、記されている値の精度が低い可能性が唆される⁸⁾。加えて、第89条第1項には試験法が規定されていないため、現在も統一的な試験法でせん断試験が行われておらず、試験法の違いによるばらつきが生じている可能性がある。例えば、JIS Z2101¹⁴⁾で規定されたいす型せん断試験や、ISO式、ASTM式¹⁵⁾に代表される曲げ方式のせん断試験などが任意で選択されているが、一般的にたいす型せん断試験から得られるせん断強度は高めになる^{12), 16), 17)}。また、各々の試験法には、得られる値の精度に直接関わる問題点が指摘⁸⁾されており、各試験法で得られる値がどのような値であるかを整理する必要がある。

2005年版のISO試験法においては、3点曲げ試験法と4等分5点曲げ試験法（以後、5点曲げ試験法）が採用されているが、いずれの試験法においても曲げ破壊が先行し、低い値しか得られないことが良く知られている^{16), 17)}。なお、5点曲げ試験法に関しては、2014年版には記載されていない。曲げ破壊が先行する場合、得られた値をせん断強度とするのは適切ではないが、ISO試験法では、「もし、曲げによる影響等、せん断以外のモードで破壊していた場合でも、その結果は実用的な意味があるから、これも公称せん断強さと考えることとする」として試験結果を扱っており、おのずとせん断強度が著しく低いものとなる。この問題に対し、構造用木材の強度試験マニュアル¹⁸⁾では、ISO試験法の結果の取り扱いに新たな解釈を加え「せん断以外の影響で破壊した場合には、その試験体についての結果は試験結果評価データから除外し、別途報告する。ただし、計算された破壊時のせん断応力が、せん断破壊した試料のうちの最大のせん断強さ以上であるときは、この結果をせん断破壊したデータとみなすことができる」として精度の向上を図っているが、試験体数の母数が著しく減少するといった問題があり、根本的な解決法には至っていない。しかしながら、ISO試験法は簡易かつ安価に実施することが可能であり、また、これまでの試験データが最も多く蓄積されている試験法の一つである。例えば、前述の1.のテーマとISO試験法を組み合わせ、「純粋なせん断強度=X×ISO試験法の結果+Y」となる補正係数X、Yを導き出せれば、ISO試験法からも精度の高いせん断強度が得られるようになるとともに、これまで蓄積されてきたデータを大いに活用できることとなる。

そこで、本研究では、ISO試験法で採用されている3点曲げ試験法と、2005年版のISO試験法まで採用されていた5点曲げ試験法に加え、近年木材のせん断試験法として実績のある大野式逆対称4点曲げ試験法^{8), 9), 19)}（以後、逆対称4点曲げ試験法）を用いてスギ製材の破壊試験を行い、試験法の違いで測定結果に差が生じるかの確

認と性能評価を行った。また、各試験体には、複数のロゼットゲージと単軸ひずみゲージを貼付するとともに変位計を設置し、得られた各値を梁理論と各弾性理論に代入・逆算することによって、ISOせん断試験にに適したせん断弾性係数とせん断補正係数の算出を試みた。

2. 試験体概要および試験方法

本研究で用いたISO式3点曲げ試験法の側面図、平面図、せん断力図、曲げモーメント図を図-1に、ISO式5点曲げ試験法の各図を図-2に、逆対称4点曲げ試験法の各図を図-3に示す。ここに、 P はトータル荷重、 L は有効長を示す。逆対称4点曲げ試験法に関しては、各載荷点、支点の呼称を文献⁹⁾に倣い、図-3の向きを基準とし、試験体中央よりも左側の支点、載荷点を左支点（反力 $P/3$ ）、左載荷点（加力 $2P/3$ ）と呼称し、右側も同様に右支点（反力 $2P/3$ ）、右載荷点（加力 $P/3$ ）と呼称する。各図には後述するひずみゲージ貼付位置も示した。

ISO試験法では、せん断破壊の確率を増加させるためにせん断スパンを桁高 h の2~3倍で設定¹³⁾できるとしている。著者らがこれまで行ってきたせん断試験^{8), 9)}においては、桁高 h を100mmと統一しており、本研究でも桁高 h を100mmとし、これを基にせん断スパンと軸方向の有効長を設定した。5点曲げ試験体に関しては、実験で使用した試験機に設置できる試験体の最大サイズから、桁高-せん断スパン比を2.75、軸方向の有効長を1100mmとした(図-2)。3点曲げ試験体についても桁高-せん断スパン比を2.75で統一することが望ましいが、桁高-せん断スパン比が2.75の場合、試験体サイズに

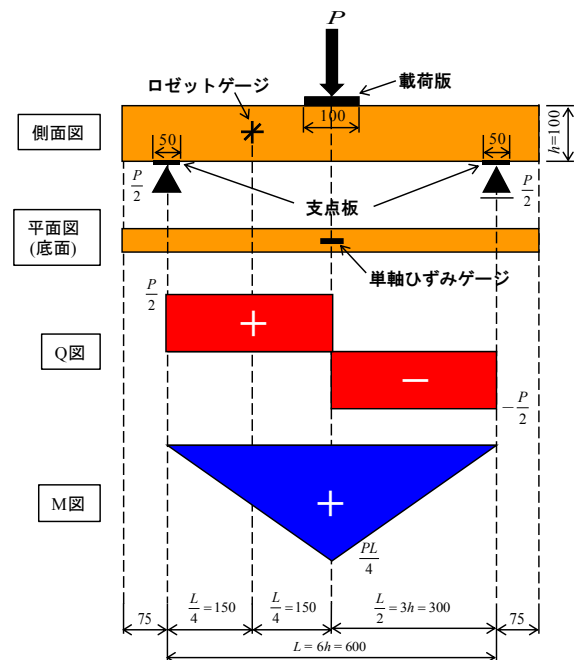


図-1 3点曲げ試験体寸法とせん断力図と曲げモーメント

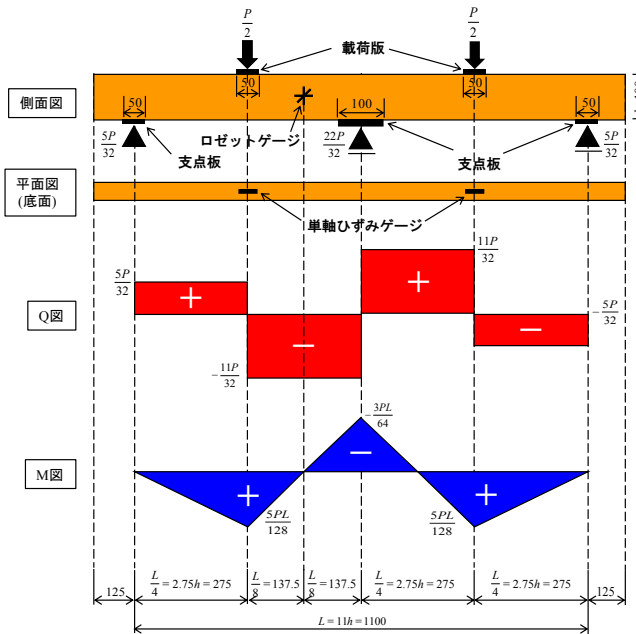


図-2 5点曲げ試験体寸法とせん断力図と曲げモーメント

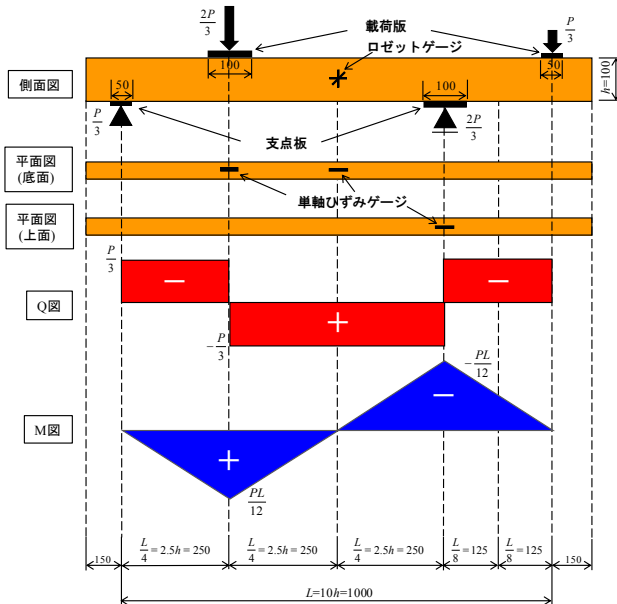


図-3 逆対称4点曲げ試験体寸法とせん断力図と曲げモーメント

対する載荷板・支点板のサイズが相対的に大きくなり、せん断応力の分布に影響する⁹⁾ことが考えられた。よって、3点曲げ試験法に関しては、桁高-せん断スパン比を3まで拡張し、軸方向の有効長(支間長)を600mmとした。逆対称4点曲げ試験体に関しては、ISO試験法と各文献^{9), 13), 17), 19), 20)}を参考に総合的に判断し、図-3に示した有効長とした。逆対称4点曲げ試験法が3点曲げ試験法よりも優れている点は、図-1と図-3の曲げモーメント図とせん断力図の関係から明らかなように、曲げ破壊が生じると仮定した場合、同一スパンであれば、逆対称4点曲げ試験法は3点曲げ試験法の3.0倍の荷重を載荷

できることにある。これは、破壊時のせん断力が3点曲げ試験法の2倍となることを意味する。しかし、本研究におけるスパン比であれば、1.8倍の荷重しか載荷できないので、破壊時のせん断力は1.2倍となる。

ISO試験法では幅に関する指定はないため、より高いせん断応力を得る方法として、断面幅 b を小さくする方法が挙げられる。しかし、横倒れ座屈が生じる可能性が高くなるため、一定の幅は必要となる。そこで、横倒れ座屈を生じないことが確認されている幅-桁高比2.5を参考²⁰⁾に、本研究では幅 b を40mmとした。ただし、載荷点部、支点部で生じるめり込みが起因となって横倒れ座屈が生じ得る。この場合、横倒れ座屈防止装置の設置が有効であるが、本試験体はショートビームであるので、実際に横倒れが生じた際、横倒れ防止装置の設置によって生じ得る側面の反力がロゼットゲージのひずみに影響を及ぼす可能性が否定できない。よって、横倒れ防止装置の設置をせず、めり込みに対する照査を行うことで横倒れ座屈に対応することとした。

めり込みの照査を行うために、実験に用いる載荷板と支点板のサイズを予め決定した。試験に用いる載荷板と支点板は、厚さ10mmの鋼板(SS400)とし、幅150mm×桁軸方向50mm、幅150mm×桁軸方向100mmの2種類とした。桁軸方向100mmの鋼板は、加力、反力が大きい箇所、すなわち3点曲げ試験法においては載荷点、5点曲げ試験法においては中央支点、逆対称4点曲げ試験法においては $2/3P$ となる左載荷点と右支点に対して用い、その他の箇所には桁軸方向50mmの鋼板を用いた(図-1~図-3)。また、鋼板のエッジ部が局所的に木材試験体にめり込むのを防ぐため、各鋼板の桁軸方向のエッジ部には、 $\phi 10$ mmの曲率で5mmずつ丸みを付けた。曲げモーメントが最も大きく、かつめり込みが最大となり得る3点曲げ試験法の載荷点でめり込みを考慮すると、めり込み荷重は、スギ材の材中間部の部分圧縮の基準材料強度 6MPa ¹⁾に、使用する載荷板のサイズエッジの丸みを除いた90mmに試験体幅40mmを乗じることで21.6kNが得られる。この荷重時に生じる引張縁の最大曲げ引張応力 σ_t を算出すると48.6MPaとなり、スギ材で材料強度の大きい甲種構造材1級の曲げ基準材料強度 27MPa ¹⁾の1.8倍の大きさとなる。よって、めり込みを生じる前に曲げ破壊が生じる可能性が高いと判断した。

実験に使用した試験機は、3点曲げ試験時と逆対称4点曲げ試験時においては島津製作所製実大試験機UH-2KNAを用い、5点曲げ試験時においては、島津製作所製オートグラフAG-10TBを用いた。5点曲げ試験で異なる試験機を用いた理由は、実大試験機用に新たに用意した中間支点に不具合が生じたため、H鋼を架台として⁷⁾5点曲げ試験が可能であるオートグラフに変更したためである。なお、UH-2KNAのような大型の実大試験機

を有する試験場は多く存在するが、支点を3つ以上設置できる設備を有する試験場は極めて少ない。3点曲げ試験法と5点曲げ試験法を比較した場合、曲げ破壊が生じるまでに得られる最大せん断応力は5点曲げ試験法が明らかに大きいにもかかわらず、2005年版のISO試験法で両試験法を採用している理由が上記によるものである。せん断試験法として逆対称4点曲げ試験法が行われるようになってきた背景も同様で、支点が2つで5点曲げ試験法に近い結果が得られる。

各ひずみゲージは(株)東京測器研究所社製の木材用のゲージを用い、ロゼットゲージはゲージ長30mmのPFLR-30-11を、単軸ひずみゲージはゲージ長30mmのPRL-30-11を用いた。ロゼットゲージは最大せん断応力が得られるせん断スパンの中央に貼付し、単軸ひずみゲージは最大曲げモーメント位置に貼付した。ただし、5点曲げ試験法に関しては、配線の都合上、負曲げ最大位置ではなく、図2の位置に貼付した。また、逆対称4点曲げ試験法に関しては、ロゼットゲージを貼付した試験体中央位置の曲げモーメントが0となり、純せん断の値が得られることが最大の特徴の一つであるが、それが担保されているかを確認するため、試験体中央底面にも単軸ひずみゲージを貼付した(図3)。

本研究は、1章で示したように、3種類の試験法で試験精度に差が生じるかを確認することが研究目的の一つであるので、ヤング率等の材料定数が異なる複数の木材を試験対象とすることは試験結果にばらつきを生じさせる原因となり得、適切ではない。よって、試験体数nを増やすのではなく、あらかじめ同じ丸太から製材した木材の内、ヤング率が近いものを選び出し、ばらつきを減らした状態で試験を行うことが理想である。

上記理由から、本研究では、鹿児島産スギ材の丸太2本から、成熟材部を主に含んだ試験体(以後、成熟材)、未成熟材部を主に含んだ試験体(以後、未成熟材)に分けて複数本木取りした後、図1~図3に示した各ゲージ貼付位置に節が存在しない試験体を選び出した。それら試験体全てに3点曲げ試験法で5kNまで載荷し、荷重-たわみ関係からヤング率を算出した後、各試験法毎にヤング率が近い4本ずつを選び出し試験を行った。各試験法に使用した試験体のヤング率を表1に示す。5点曲げ試験体・成熟材に関しては、節のある試験体を除くと4本しか残らなかったため、他の試験法と比べ試験体のばらつきが大きくなっている。これが試験結果にどのように影響するかは3章で考察する。なお、ヤング率の算出にはティモシェンコ梁理論を用いたが、計算方法もまた3章で詳述する。木取りに関しては、成熟材は板目木取りとし、未成熟材は断面中央部に芯がある芯持ち材とした。未成熟材を試験対象とした理由は、著者らは、合板工場で産出されるスギ芯持ち材の有効活用に関する研究^{21),22)}

表-1 各試験法に使用した試験体のヤング率(単位:MPa)

	No.	3点曲げ試験体	5点曲げ試験体	逆対称4点曲げ試験体
成熟材	①	7484	5760	6495
	②	7912	9120	6345
	③	7970	9660	6540
	④	7811	6255	7935
標準偏差		217	1976	742
未成熟材	⑤	6609	5445	4575
	⑥	5854	6030	5100
	⑦	6183	5565	5235
	⑧	6636	5865	6000
標準偏差		374	269	588

を続けており、その一環として試験対象に加えた。

3. 実験結果および考察

(1) せん断弾性係数の算出法

木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法¹⁾では、 G_{yz} は $E_z/15$ とされているが、文献によっては、 G_{yz} は $E_z/10 \sim E_z/20$ と任意に与えられ、確定的な値ではないことが知られている⁹⁾。よって、本研究では、せん断弾性係数の算出に次の3つの式を用いて厳密に求めた。

$$\tau_{yz} = 3Q/2A \tag{1}$$

$$\tau_{yz,Ex} = 2G_{yz}\gamma_{yz} \tag{2}$$

$$G_{yz} = \frac{3Q}{4\gamma_{yz}A} \tag{3}$$

ここに、 τ_{yz} は梁理論から求められるせん断応力、 Q はせん断力、 A は断面積、 $\tau_{yz,Ex}$ は実験から得られるせん断応力、 G_{yz} はせん断弾性係数、 γ_{yz} はロゼットゲージから得られるせん断ひずみである。式(1)と式(2)を等価とし、 G_{yz} について解いた式が式(3)となる。本研究では弾性限界時の荷重とせん断ひずみからせん断弾性係数を求めた。

(2) 弾性域の挙動と弾性限界時の最大せん断応力

各試験体のせん断弾性係数と含水率を表2に、弾性限界時における荷重とせん断応力 $\tau_{yz,Ex}$ を表3に、弾性限界時までの荷重-せん断応力関係の一例を図4に示す。表2中の含水率は、試験終了後にロゼットゲージ貼付位置から試験片を切り出し、全乾法で求めた。表3中で示した下限値の算出には次式で表わされる信頼水準75%の95%下側許容限界値($TL_{75,95}$ 、以後下限値)を用いた。

$$TL_{75,95} = \bar{X} - Ks \tag{4}$$

ここに、 \bar{X} は最大荷重の平均値、 K は信頼限界係数、 s は標準偏差である。なお、表3中で*で示した3点曲げ試験法の成熟材の試験体の一つは、載荷点板の幅のサイズの影響を調べるため、100mm幅ではなく50mm幅の

表-2 各試験体のせん断弾性係数と含水率

No.	3点曲げ試験体		5点曲げ試験体		逆対称4点曲げ試験体		
	G_{yz} (MPa)	含水率(%)	G_{yz} (MPa)	含水率(%)	G_{yz} (MPa)	含水率(%)	
成熟材	①	664	12.6	768	11.8	759	12.6
	②	908	12.3	761	12.7	725	12.2
	③	1105	14.0	809	12.3	787	18.3
	④	739	11.3	706	15.0	732	15.0
未成熟材	⑤	1243	13.7	1694	14.4	910	18.2
	⑥	843	21.9	1325	15.9	1255	15.6
	⑦	1230	12.0	1022	12.8	891	16.1
	⑧	1132	11.8	986	15.4	776	12.7

表-3 弾性限界時における各試験体のせん断応力

No.	3点曲げ試験体		5点曲げ試験体		逆対称4点曲げ試験体		
	荷重(kN)	実験値(MPa)	荷重(kN)	実験値(MPa)	荷重(kN)	実験値(MPa)	
成熟材	①	8.38*	1.57*	18.48	2.45	16.78	1.95
	②	11.90	2.45	8.94	1.22	15.10	1.84
	③	11.54	2.20	18.94	2.47	14.27	1.68
	④	12.47	2.34	22.66	3.96	16.15	2.10
応力平均			2.14		2.53		1.89
標準偏差			0.39		1.12		0.18
下限値			1.23		0.63		1.55
未成熟材	⑤	13.10	2.25	23.94	4.05	11.89	1.33
	⑥	11.16	2.10	20.82	3.34	16.87	2.13
	⑦	7.40	1.38	25.14	2.80	17.19	2.71
	⑧	10.67	2.07	26.08	3.42	12.51	1.76
応力平均			1.95		3.40		1.98
標準偏差			0.39		0.52		0.59
下限値			1.06		2.24		0.85

表-4 弾性限界時の載荷板・支点板部の部分圧縮応力の平均値

	3点曲げ試験体(MPa)	5点曲げ試験体(MPa)	逆対称4点曲げ試験体(MPa)
成熟材	3.64	4.57	2.96
未成熟材	3.14	4.54	2.79

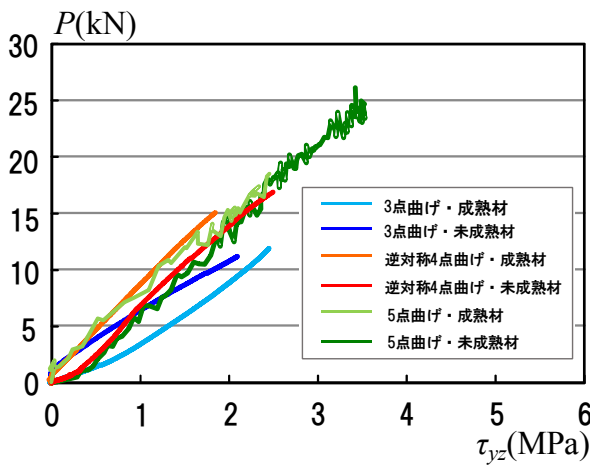


図-4 弾性限界までの各試験体の荷重-せん断応力関係の一例

載荷板を設置し比較したものであり、参考値として扱う。また、図-4 中で5点曲げ試験結果の精度が低いが、5点曲げ試験法のみを使用したオートグラフの解析能によるものである。弾性限界に関しては、文献⁹⁾を参考とし、荷重 P をたわみ δ で除した見かけのヤング率が、最大値から 2%減少する点を弾性限界とし、その際の荷重をめり込み荷重と定義した。

各文献^{1), 23), 24)}においては、 G_{yz} の値に未成熟材、成熟材の区別は無いが、表-2 を見ると、未成熟材のせん断弾性係数が成熟材よりも大きい傾向が見られた。

本試験では、5点曲げ試験体 6 本を除いた全ての試験体で破壊までに非線形挙動が見られたが、その原因はめ

り込みに起因した横倒れ座屈であった。荷重が大きい載荷点、反力が大きい支点部に他所より 2 倍大きい載荷板、支点板を設置している(図-1~図-3)ことを考慮した上で、めり込みが最大となり得る箇所の荷重、反力を求めると、3点曲げ試験体で $P/2$ 、5点曲げ試験法で $11P/32$ 、逆対称 4 点曲げ試験体は $P/3$ となる。よって、3点曲げ試験法に比べ、逆対称 4 点曲げ試験法、5点曲げ試験法ともに 1.5 倍程度めり込み時の荷重が大きい。これを踏まえ、表-3、図-4 から各試験体の弾性限界時の荷重を比較すると、3点曲げ試験法と逆対称 4 点曲げ試験法では、平均で約 1.3~1.4 倍の差であるので、上記から妥当な数値であると言える。一方、3点曲げ試験体と 5点曲げ試験体では、2 倍以上の差が見られた。

弾性限界時の荷重から逆算した、載荷板もしくは支点板が設置される箇所の木材の部分圧縮応力の平均値を表-4 に示す。同じ試験法で比較すると、成熟材、未成熟材の違いで部分圧縮応力に大きな差は無い。5点曲げ試験体・成熟材に関しては、①と④、②と③の試験体のヤング率が近い値となるが(表-1)、弾性限界時の部分圧縮応力に顕著な傾向は見られず、ヤング率のばらつきが小さい他の試験法と同様の結果となった。一方、試験法の違いで比較すると、部分圧縮応力には大きな差が生じた。また、各値は、設計時に参考にしたスギ材の材中間部の部分圧縮の基準材料強度 6MPa ¹⁾ を大幅に下回っている。ISO 試験法のような短スパンの桁の破壊試験を行う場合には、載荷板、支点板のサイズの影響が強く出る可能性が示唆される。この点も含め、今後、変動スパン法を用いるとともに、サイドマッチングやエンドマッチングでサンプリングを行い、継続的に照査していく予定である。なお、仮に、断面幅を 2 倍にした場合、めり込み耐性は 2 倍となり、同じ荷重域では横倒れは生じにくくなるが、得られるせん断応力は 1/2 となるため、本試験と同じせん断応力を得ようとすると 2 倍の荷重が必要となり、結局は本試験同様にめり込みを生じ得る。

表-3 を用いて各試験法から得られる最大せん断応力を比較すると、平均値に関しては、成熟材・未成熟材ともに 5点曲げ試験法が最も高い値を示す。しかし、標準偏差に関しては、5点曲げ試験法の成熟材試験体のばらつきが大きく、平均値は最も高いが下限値は最も低い値となった。一方で、5点曲げ試験法の未成熟材試験体は、ばらつきが他の試験法と大差なく、下限値も大きい値を示した。3点曲げ試験法においては、成熟材・未成熟材試験体ともに同じ値となり、他の試験体と比べ、成熟材と未成熟材の違いによるばらつきが小さい。5点曲げ試験法の試験時においては、載荷板と支点板の数が多いため、木材試験体の若干のそりなどの影響を受けやすく、均等に荷重がかかるまで、試験体や載荷板、支点板の位置調整を繰り返した。5点曲げ試験体の標準偏差が他の

表-5 破壊時における3点曲げ試験体のせん断応力

	No.	荷重(kN)	式(1)(MPa)	実験値(MPa)	破壊性状
成熟材	①	8.78*	1.65*	1.62*	横倒れ座屈
	②	19.67	3.69	4.97	曲げ破壊
	③	20.66	3.87	4.72	曲げ破壊
	④	18.79	3.52	4.98	曲げ破壊
応力平均			3.70	4.89	
標準偏差			0.18	0.15	
下限値			3.18	4.43	
未成熟材	⑤	16.678			曲げ破壊
	⑥	15.11	2.83	3.27	曲げ破壊
	⑦	16.652	3.12	3.47	曲げ破壊
	⑧	21.088			曲げ破壊
応力平均			2.98	3.37	
標準偏差					
下限値					

表-6 破壊時における5点曲げ試験体のせん断応力

	No.	荷重(kN)	式(1)(MPa)	実験値(MPa)	破壊性状
成熟材	①	23.86	3.08	3.67	曲げ破壊
	②	11.10	1.43	1.60	横倒れ座屈
	③	18.94	2.44	2.47	横倒れ座屈
	④	22.66	2.92	3.96	横倒れ座屈
応力平均			2.47	2.93	
標準偏差			0.74	1.09	
下限値			0.93	0.91	
未成熟材	⑤	23.94	3.09	4.05	横倒れ座屈
	⑥	20.82	2.68	3.34	横倒れ座屈
	⑦	25.14	3.24	2.80	横倒れ座屈
	⑧	26.08	3.36	3.42	横倒れ座屈
応力平均			3.09	3.40	
標準偏差			0.30	0.52	
下限値			2.37	2.24	

表-7 破壊時における逆対称4点曲げ試験体のせん断応力

	No.	荷重(kN)	式(1)(MPa)	実験値(MPa)	破壊性状
成熟材	①	22.33	2.79	3.51	横倒れ座屈
	②	19.59	2.45	3.08	横倒れ座屈
	③	21.36	2.67	2.61	横倒れ座屈
	④	23.16	2.90	5.49	横倒れ座屈
応力平均			2.75	3.78	
標準偏差			0.20	1.27	
下限値			2.29	1.81	
未成熟材	⑤	21.30	2.66	3.51	曲げ破壊
	⑥	24.01	3.00	5.05	横倒れ座屈
	⑦	23.06	2.88	3.48	横倒れ座屈
	⑧	23.21	2.90	3.85	横倒れ座屈
応力平均			2.86	3.97	
標準偏差			0.14	0.73	
下限値			2.50	2.47	

試験法と比べ大きくなる理由として、支点板、載荷板の数の多さが影響している可能性がある。

以上より、弾性域においては、多くの項目で5点曲げ試験法で安定した数値が得られたが、明らかな優劣は示されなかった。しかし、めり込みに関しては大きな差が生じており、その影響が破壊時のせん断応力の値にどれほどの差を生じさせ得るのかを次節で詳しく見ていく。

(3) 非線形域の挙動と破壊時の最大せん断応力

本研究では、1章で述べたように、破壊時に得られた値を各試験法で比較し、性能を評価することを目的としている。著者らはこれまで、せん断破壊が先行する曲げ

試験法を提案⁹⁾し、これまで合計約60体のスギ集成材とスギ材に対し破壊試験を行っており^{9),29)}、全てせん断破壊を生じさせた上で下限値で4MPaを超える値を得ている。前述した通り、本研究で行った3種類の試験法はいずれも、スギ材に対しせん断破壊を先行させることは著しく困難であり、低いせん断応力値しか得られないことは自明である。しかし、せん断破壊が先行する曲げ破壊試験で得られたデータが増えつつある現在、「純粋なせん断強度=X×ISO試験法の結果+Y」となる補正係数X、Yを導き出せる可能性は高くなりつつあり、それに伴い、せん断破壊が先行しなくても、各試験法は十分に性能の良い試験法となり得る。

破壊時における荷重と破壊性状、せん断応力 τ_{yz} の関係を3点曲げ試験体は表-5に、5点曲げ試験体は表-6に、逆対称4点曲げ試験体は表-7に、支点部のめり込みを図-5に、横倒れ座屈の様子を図-6に、破壊時までの各試験体の荷重-せん断応力関係の一例を図-7に示す。表-5に示す未成熟材試験体の2本については、横倒れに伴いゲージの配線が接触し、非線形域のデータが取れなかったため除外した。また、式(4)における信頼限界係数は2本以下には適用できないため、表-5では下限値を算出してない。

破壊性状に関しては、3点曲げ試験法は横倒れも生じていたが最終的に曲げ破壊、その他の試験法に関しては横倒れ座屈が支配的であった。ただし、表-5中で*で示した3点曲げ試験法の成熟材1試験体に関しては、前節で述べたように、半分のサイズの載荷板を用いたため、めり込みが大きく、曲げ破壊が生じる前に横倒れ座屈が生じた。この結果は、載荷点部、支点部のめり込みが、破壊荷重や破壊性状に大きく影響することを示すものである(図-5、図-6)。前節の弾性限界時の挙動において、3点曲げ試験法と逆対称4点曲げ試験法とでは、同じようなめり込み挙動を示したにも関わらず、破壊性状が異なる。図-6に示すように、逆対称4点曲げ試験体では、図-3における右支点-右載荷点間で横倒れ座屈が顕著になっている。右支点-右載荷点間は片持ちとなっているため、構造的な不安定さから横倒れ座屈を生じやすいと推察される。5点曲げ試験体に関しては、ほとんどの試験体において、表-3、表-6に示した各荷重から分かるように、めり込み直後、もしくはめり込みを経ない横倒れ座屈で破壊に至っている。現在木材の横倒れ座屈に関しては一定の指標が無いが、この結果は純粋な横倒れ座屈挙動に近い結果であり、今後試験体設計において、断面や細長比の決定に有用な一指標が得られたと言える。

図-7においては、3点曲げ試験法、逆対称4点曲げ試験法でせん断応力の非線形性が大きく表れている。めり込みによって支点部、載荷点部周辺に応力の卓越が生じ、せん断応力の最大値を増加させることは既報¹²⁾で記した



図-5 支点部のめり込み

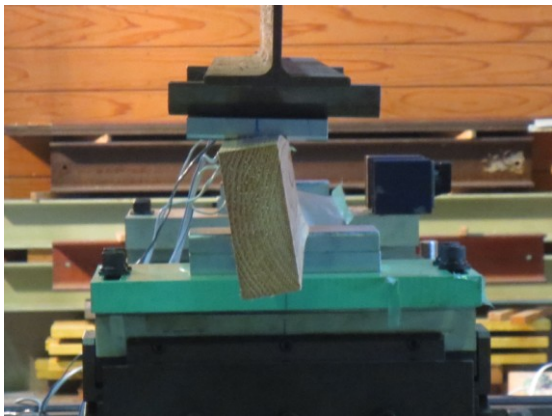


図-6 横倒れ座屈(逆対称4点曲げ試験体)

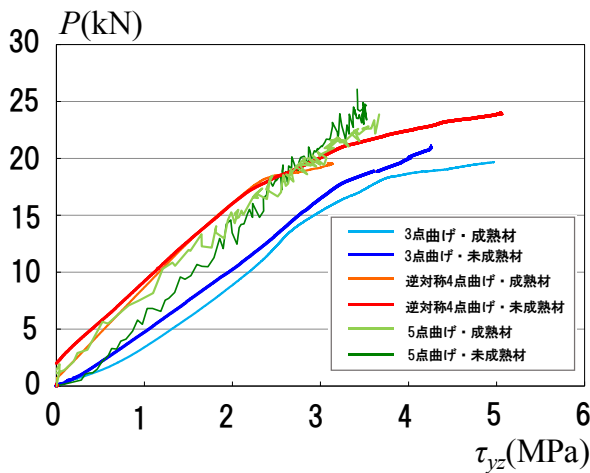


図-7 破壊時までの各試験体の荷重 - せん断応力関係の一例

が、その影響は1~2%程度に留まる。よって、本節で示している破壊時のせん断応力の非線形性は横倒れによって生じた非線形性と考えられる。横倒れを生じた場合、縦ひずみの値が卓越するので、ロゼットゲージから得られる3方向のひずみからせん断応力を算出するのは妥当ではない。本節で示した破壊時のせん断応力は、あくまでも参考値として取り扱うのが妥当であろう。弾性限界

と破壊荷重が一致しない5点曲げ試験法における成熟材の①, ②試験体も同様である。

本研究では「純粋なせん断強度 = $X \times \text{ISO}$ 試験法の結果 + Y 」となる補正係数 X, Y を導き出せなかったが、今後、横倒れ座屈防止装置を取り付けや、断面幅を増加させるなどの横倒れ座屈対策を講じ、検討を続けていく予定である。

(4) 異なる手法を用いたせん断弾性係数の算出とせん断補正係数 K の算出

本研究では、3.(1)に示した方法でせん断弾性係数 G_{yz} を算出したが、 G_{yz} を軸方向ヤング率 E_z の $1/10 \sim 1/20$ とし、ティモシェンコ梁理論を用いて算出する方法も多く用いられる。しかし、本研究で用いた試験体のように、いわゆるショートビームシア試験の場合、梁理論から大きく逸脱する結果が得られることが知られている^{29,28)}。本研究では、5点曲げ試験体と逆対称4点曲げ試験体の破壊試験を行う前に、支間長1mとした3点曲げ試験でたわみを測定しおり、3点曲げ試験体における $L/h=6$ と、他試験体における $L/h=10$ とで、どれほどの影響があるかを確認していく。なお、3点曲げ試験におけるティモシェンコ梁理論によるたわみは次式で与えられる。

$$\delta = \frac{Pl^3}{48E_{zz}I} + \frac{Pl}{4G_{yz}kA} \quad (5)$$

ここに、 δ は実験から得られたたわみ、 P は荷重、 l は支間長、 I は強軸回りの断面二次モーメント、 k は $5/6$ で与えられる²⁷⁾ せん断補正係数である。本節では、 $P=5\text{kN}$ 時のたわみを用い、 $G_{yz} = E_z/15$ ¹⁾ として式(5)の第2項に代入し、 E_z を逆算した後に、あらためて E_z を15で除してせん断弾性係数を算出した。 $G_{yz} = E_z/15$ として求めたせん断弾性係数を表-8に示す。 $L/h=6$ である3点曲げ試験体と $L/h=10$ であるその他の試験体とでせん断弾性係数の値を比較すると、明らかな差は見られない。 $L/h=6$ 程度のショートビームシア試験では、差が生じない可能性がある。成熟材と未成熟材の値を比較すると、表-2では未成熟材の値が大きいのに対し、表-8では逆の傾向として成熟材の値の方が大きい。また、値そのものも表-8から得られる値は表-2から得られる値よりも明らかに小さい。ロゼットゲージを用い、式(2)からせん断応力を算出する際は、慣例的に用いられる $G_{yz} = E_z/15$ ¹⁾ ではなく、式(1)~式(3)を用いて算出する必要があることが示された。

文献²⁸⁾においては、 L/h によって、せん断補正係数 k の値が変化することが示されている。本研究では、単軸ひずみゲージから得られる軸方向ひずみとヤング率の関係から、せん断補正係数の算出を試みる。軸方向ヤング率 E_z が、断面内かつ軸方向に一様であると仮定すると、

表-8 $G_{yz}=E_z/15$ として求めたせん断弾性係数(単位: MPa)

	No.	3点曲げ試験体	5点曲げ試験体	逆対称4点曲げ試験体
成熟材	①	499	384	433
	②	527	608	423
	③	531	644	436
	④	521	417	529
未成熟材	⑤	441	363	305
	⑥	390	402	340
	⑦	412	371	349
	⑧	442	391	400

表-9 3点曲げ試験体におけるヤング率とせん断補正係数の関係

	No.	ヤング率(MPa)			補正k
		$G_{yz}=E_{zz}/15$		表-1Gyz	
		k=5/6	k=5/6		
成熟材	①	7484	6726	9062	0.47
	②	7912	6879	9447	0.43
	③	7970	6300	9330	0.33
	④	7811	6889	9669	0.45
未成熟材	⑤	6609	5068	5361	0.54
	⑥	5854	4393	5628	0.33
	⑦	6183	4702	6121	0.27
	⑧	6636	5362	6254	0.41

次に示す式(6)が成り立ち、また、軸方向ひずみ ϵ_z とヤング率 E_z の関係は、式(7)で表わされる。式(6)と式(7)とを等価にすると、軸方向ヤング率 E_z は式(8)で表わされる。

$$\sigma_{zz} = \frac{M}{I} y \tag{6}$$

$$\sigma_{zz} = E_{zz} \epsilon_{zz} \tag{7}$$

$$E_{zz} = \frac{M}{I \epsilon_{zz}} y \tag{8}$$

ここに、 σ_z は軸方向応力、 ϵ_z は単軸ひずみゲージから得られる軸方向ひずみ、 M は曲げモーメント、 y は中立軸から断面上下縁までの距離である。

$k=5/6$ のままとし、式(8)から得られる E_z を式(5)に代入すると、表-2、表-8 のいずれのせん断弾性係数を用いても、実験から得られたたわみと一致しなかった。そこで、式(5)を k について解き、軸方向ヤング率 E_z に式(8)を代入すると次式が得られる。

$$k = \frac{pl}{4G_{yz}A(\delta - \frac{pl^3 \epsilon_{zz}}{48My})} \tag{9}$$

式(9)は、各ゲージから得られた各ひずみと、たわみから k を算出することが可能である。なお、本研究では試験の工程上、たわみを測定しているのは3点曲げ試験法のみであるので、本節の E_z の算出は3点曲げ試験体の結果のみを扱う。

式(5)の G_{yz} と k に、 $G_{yz}=E_z/15 \cdot k=5/6$ を代入して逆算したヤング率、 $k=5/6$ はそのままに表-2 から得られた G_{yz} を式(5)に代入して逆算したヤング率、表-2 から得られた G_{yz} ・式(9)から得られた k を代入して逆算したヤング率の関係を表-9 に示す。なお、表-6 には、式(9)から得ら

れた k を補正 k として併記した。

$G_{yz}=E_z/15 \cdot k=5/6$ で得られる E_z に対し、 $k=5/6$ はそのままに、式(5)から得られた G_{yz} を用いて E_z を算出した場合、成熟材、未成熟材ともに E_z が減少する。同様に、 $G_{yz}=E_z/15 \cdot k=5/6$ で得られる E_z に対し、式(3)と式(9)から得られた G_{yz} と k を用いて E_z を算出した場合、成熟材の E_z は上昇し、未成熟材の E_z は減少する傾向が見られる。

表-9 において、補正した k の値に着目し成熟材と未成熟材を比較すると、 G_{yz} や E_z で見られたほどの大きな差が見られない。また、 $k=5/6$ と比べ平均で 50%を下回った。 G_{yz} と k は本来固有の値であるはずであり、 Lh によって変化する補正係数が必要である。いずれにせよ、せん断補正係数の算出に用いた試験体は8本だけであるので、今後試験体数を増やして確認していく予定である。

4. まとめ

本研究では、ISO 試験法で採用されている3点曲げ試験法と、2005年版のISO 試験法まで採用されていた5点曲げ試験法に加え、逆対称4点曲げ試験法を用いてスギ製材の破壊試験を行い、試験法の違いで測定結果に差が生じるかを確認した。また、ISO せん断試験に適したせん断弾性係数とせん断補正係数の算出を試みた。

以下に得られた知見を示す。

- ・弾性限界時の成熟材で各試験体を比較すると、平均値では5点曲げ試験法から最も高い値が得られたが、ばらつきが大きく、下限値は最も小さい値となった。弾性限界時の未成熟材で各試験体を比較すると、平均値、下限値ともに5点曲げ試験法から最も高い値が得られた。
- ・3点曲げ試験体と逆対称4点曲げ試験体の全試験体、5点曲げ試験体の一部において、めり込みによる非線形挙動が見られたが、めり込みが生じた際の部分圧縮応力を求めると、各試験法の違いによって明らかに差が生じることが示された。それらの値は、スギ材の材中間部の部分圧縮の基準材料強度 6MPa を大きく下回った。逆対称4点曲げ試験法、3点曲げ試験法、5点曲げ試験法の順にめり込み剛性が高く、試験法の違いによって支点板、載荷板の影響を受けやすさが変わる可能性が示唆された。
- ・異なるサイズの載荷板を用いた3点曲げ試験法の結果より、同一試験でより大きなせん断応力を得るためには、支点板、載荷板の設定が重要であることがあらためて示された。
- ・せん断弾性係数を厳密に求めた場合と、 $G_{yz}=E_z/15$ で

簡易的に求めた場合とでは、大きな差が生じた。また、せん断弾性係数を厳密に求めた場合、成熟材よりも未成熟材のせん断弾性係数の方が大きい、 $G_{xz} = E_{\perp} / 15$ で求めた場合、逆の傾向を示した。

・ショートビームシア試験では、 G_{xz} が梁理論から逸脱することが知られているが、 $L/h=6$ と $L/h=10$ とでは差が見られなかった。

・実験から得られた軸方向ひずみ、せん断弾性係数、軸方向ヤング率からせん断補正係数を算出すると、 $k=5/6$ の約半分の値となった。

謝辞：本研究の遂行にあたり、(株)安藤ハザマ・篠原己観郎氏、ライト工業(株)・田平純一氏、富永竜平氏、前川大樹氏、前田建設工業(株)・平岡正輝氏に多大なる助力を得た。ここに深く謝意を表す。

参考文献

- 1) (社)日本建築学会：木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—, 2006.
- 2) (社)日本道路協会：“道路橋示方書・同解説”, 2012.
- 3) (公社)土木学会 木材工学委員会：土木技術者のための木材工学入門, 2017.
- 4) (社)日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説, 2005.
- 5) 張日紅, 金丸和生：3メートルスパン木製ガードレールの開発, 木材利用研究論文報告集 14, pp.29-32, 2015.
- 6) 町田初男, 小黒正次, 佐藤博, 松井春喜, 金子文男, 佐藤順一, 福島守, 齊藤孝信：ぐんま型木製ガードレールの開発と初期の劣化状況, 木材利用研究論文報告集 12, pp.117-124, 2013.
- 7) 金丸和生：「木への逆代替に向けて」III.事例 5.木製車両用防護柵, 木材工業, Vol.45, 562-565, 2003.
- 8) 千田知弘, 渡辺浩, 本田秀行, 荒木博章, 平田晃久, 村田忠：橋梁に適した木材のせん断試験法の開発に関するFEM解析と実験, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.747-759, 2015.
- 9) 千田知弘, 佐々木貴信, 山内秀文, 岡崎泰男, 川井安生, 飯島泰男：スギ材のせん断破壊標準試験法の提案とせん断強度の推定(第1報)-木材を補剛材として用いたスギ積層材の有限要素解析とせん断破壊試験-, 日本木材学会木材学会誌, Vol.58(5), pp.260-270, 2012.
- 10) 篠原己観郎, 本田秀行, 千田知弘, 渡辺浩, 佐々木貴信：FEM解析による木材のせん断破壊標準試験法に関する基礎的研究, 木材利用研究論文報告集 13, pp.48-53, 2014.
- 11) 篠原己観郎, 本田秀行, 千田知弘, 渡辺浩：性能照査型設計法に適した木材のせん断強度評価に関するFEM解析, 木材利用研究論文報告集 14, pp.45-50, 2015.
- 12) 千田知弘, 渡辺浩, 岡崎泰男：3次元FEM解析によるいす型せん断試験の基礎的研究, 木材利用研究論文報告集 13, pp.54-59, 2014.
- 13) ISO 13910 : 2005, Structural timber-Characteristic values of strength-graded timber-Sampling, full-size testing and evaluation, 2005-02-15, pp.7-8, 18.
- 14) JIS Z 2101：“木材の試験方法”、日本規格協会、pp.30-32, 2009.
- 15) ASTM D198-09 Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes.
- 16) 長尾博文, 加藤英雄：スギ製材品のせん断強度に関する予備的検討, 第48回日本木材学会大会研究発表要旨集, 1998, p.106.
- 17) 井道裕史, 長尾博文, 加藤英雄：試験方法の違いによる製材品のせん断強度の評価, 木材学会誌 52(5), 293-302(2006).
- 18) (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.18-19, 23-25, 139, 2011.
- 19) 森田秀樹・藤本嘉安・小松幸平・村瀬安英：実大構造用木材のせん断試験法の開発, 日本木材学会木材学会誌, Vol.52(6), pp.275-282, 2006.
- 20) 千田知弘, 後藤文彦, 薄木征三, 佐々木貴信, 石川和彦：鋼板挿入集成材梁のせん断強度についての数値的・実験的解析, 構造工学論文集, Vol.54A, 650-658, 2008.
- 21) 渡辺浩：合板工場で産出されるスギ剥き芯材の耐久性試験について, 第60回日本木材学会大会研究発表要旨集, Y27-08-0900, 2013.
- 22) 渡辺浩, 西山拓弥, 吉田昂生：スギ剥き芯材の土木資材としての利用価値の検討と耐久性試験, 第66回日本木材学会大会研究発表要旨集, N28-P-07, 2016.
- 23) 秋田県立大学木材高度加工研究所編：コンサイス木材百科, 2011.
- 24) (独)森林総合研究所：改訂4版 木材工業ハンドブック, p.135, 2004.
- 25) 前川大樹：低ヤング率比補強法を用いたスギ材のせん断強度の定量評価, 2016年度福岡大学工学部社会デザイン工学科卒業論文, 2016.
- 26) 吉原浩：木材および木質材料のせん断特性の評価法, 材料, Vol.55, No.4, pp.349-355, 2006.
- 27) 例えば, 千田知弘, 後藤文彦, 平間匠, 橋本崇史, 薄木征三：せん断変形を伴う梁の横ねじれ座屈, 木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, Vol.5, pp.87-94, 2006.
- 28) 大黒屋信英, 後藤文彦, 佐々木貴信, 長谷部薫：鋼板挿入集成材梁のせん断性能, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.925-932, 2009.

(2017. 8.31 受付)

ACCURACY ASSESMENT OF ISO SHEAR TEST FOR JAPANESE CEDAR AND CALCULATIONS OF SHEAR MODULUS AND SHEAR COLLECTION COEFFICIENT

Tomohiro CHIDA, Hiroshi WATANABE, Hiroaki ARAKI, Akihisa HIRATA and
Tadashi MURATA

When timber bridge was designed in Japan, allowable shear stress was often referred the value defined Order for Enforcement of the Building Standards Act, and it was said that those values were measured by bending test method of ISO. Three-point bending test and five-point bending test were defined as shear tests used bending method for timber in ISO, and asymmetric four-point bending test can be add to ISO at an early days. Although these tests were one of the most popular shear tests, there were few cases that compared and accessed the accuracy of these test methods due to the difference of each test method. In this study, we conducted those three types of shear test, and compared accuracy by the value obtained from beam theory and rosette gougues.