

逆対称 4 点曲げ試験による木材のせん断強さの測定における 支点および荷重点の位置の影響*1

吉原 浩*2, 吉延匡弘*2

Effect of Supporting and Loading Locations on the Shear Strength of Solid Wood Obtained by Asymmetric Four-point Bending Tests*1

Hiroshi YOSHIHARA*2 and Masahiro YOSHINOBU*2

In this research, asymmetric four-point bending (AFPB) tests were conducted to obtain the shear strength of Japanese cedar using straight specimens. During the AFPB tests, the locations of the supporting and loading points were varied along the length direction of the specimen at fixed configurations. In contrast, the AFPB test was also conducted using notched specimens, and the obtained shear strengths were compared with those obtained using straight specimens. The shear strength values obtained from straight specimen were similar to those using notched specimens when the supporting and loading points were in a certain range.

Keywords : AFPB test, notched specimen, shear strength, straight specimen, loading location.

通直なスギの試験体を用いて逆対称 4 点曲げ試験を実施してせん断強さを測定した。試験体形状は一定とし、支点および荷重点の位置を様々に変化させた。一方、試験体の上下に切り欠きを導入した試験体についても逆対称 4 点曲げを実施してせん断強さを測定し、通直な試験体から得られたせん断強さの値と比較することで支点および荷重点の位置の影響について検討した。その結果、支点と荷重点の位置を適切に決定することにより、切り欠きを導入した試験体と同等な結果が得られる可能性が示唆された。

1. 緒 言

材料の力学特性値の評価方法の中で、せん断特性の評価は他の力学特性値（曲げ、圧縮、引張など）の評価に較べて難しいことから、評価方法の整備が遅れており、木材についても適切な評価方法が十分に確立しているとは言えない状況である¹⁾。しかし、木材や木質材料をはりや壁などの実用的な場面で使

用する際、せん断力の影響を受けることが多いことから、せん断強さを含むせん断特性を適切に評価する方法の確立は重要な課題である。

せん断強さの評価方法の中で、スパン／はりせい比を小さくした試験体の曲げ試験から材料のせん断強さを測定するショートビームシア法は見掛けの定性的なせん断強さが得られる方法であると認識されているが、他の評価方法に較べて以下のような長所が存在する。

*1 Received May 11, 2020; accepted June 8, 2020. 本研究の一部は第31回日本木材学会中国・四国支部研究発表会（2019年9月、松江）で発表した。

*2 鳥根大学総合理工学部 Faculty of Science and Engineering, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

Corresponding author: H. Yoshihara (yoshihara@riko.shimane-u.ac.jp)

- (1) 一般的に使用される曲げ試験装置の使用が可能であり、この試験方法に特化した装置が不要であることが多い。
- (2) 例えば、はりなどのような実的に使用される場面におけるせん断強さの議論が可能である。
- (3) 実大材のような構造用材料のせん断特性の評価が可能である。

以上のことから、木材についてもショートビームシア法によるせん断強さの評価について様々な検討例が存在し、せん断力の影響が大きい5点曲げ試験や逆対称4点曲げ試験がしばしば実施されている²⁻¹⁵⁾。しかし、ショートビームシア法では試験体に曲げ負荷を与えてせん断破壊を発生させるため、せん断破壊以前に曲げ破壊が発生することが多い。そのため、せん断破壊を促進するために試験体の中立軸に沿った溝を切ることや、試験体の側面にテーパを切ることおよび試験体の上下に切り欠きを導入する等の試みがあるが^{5-7, 12, 16, 17)}、そのような形状の材料が実用的な場面に使用されることは少ない。また、溝や切り欠きの深さを試行錯誤で決定する必要があることや、試験体の準備にも時間を要する等の欠点が存在する。したがって、通直な試験体を使用できる方法が確立されることによって前述した5点曲げや逆対称4点曲げによるショートビームシア試験の頻度も増加すると考えられる。

ショートビームシア試験では、支点および荷重点の位置を適切に決定し、曲げ破壊を避けながらせん断破壊を発生させる必要がある。前述した5点曲げ試験と逆対称4点曲げ試験を比較した場合、5点曲げ試験では曲げの方程式が不静定問題となり、支点および荷重点の位置を変化させた際のせん断強さの評価式を導出する際に煩雑な手順が必要である。また、試験体を3点で支持する必要があるため、JIS Z 2101-2009に規格化されている曲げ試験装置¹⁸⁾では実施不可能である。一方、逆対称4点曲げ試験ではこれらの位置を変化させても容易にせん断強さの評価式を導出することが可能であることや、上述した規格に定められている装置をそのまま使用できる点でも有利である。

本研究では、スギを用いて逆対称4点曲げによるショートビームシア試験を実施し、荷重点の位置をさまざまに変化させることによってせん断強さを測定した。さらに試験体の上下に切り欠きを導入した試験体の逆対称4点曲げ試験から得られたせん断強さと比較し、適切な荷重点位置について検討した。

2. 実 験

実験には密度 $329 \pm 17 \text{ kg/m}^3$ のスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don, 島根県産)を用いた。寸法を220(縦方向)×20(半径方向)×20 mm(接線方向)とした。Fig. 1に逆対称4点曲げ試験に使用した試験体の概要と荷重および支点反力を示す。いずれの試験体においてもスパン長 L (左側の支点から右側の荷重点までの距離)を200 mmとして逆対称4点曲げ

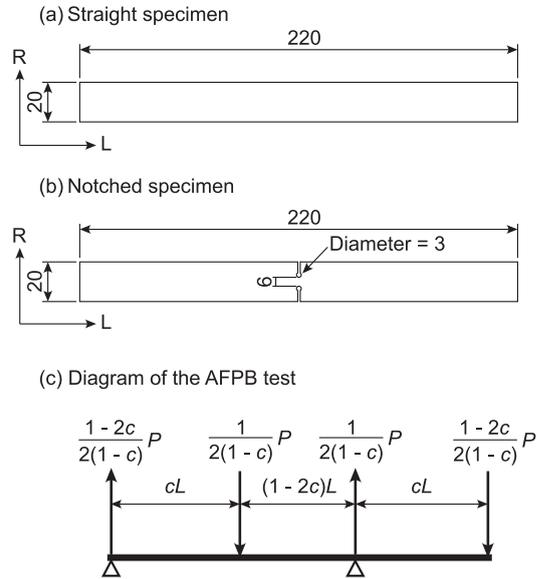


Fig. 1. Specimens used for the asymmetric four-point bending (AFPB) tests and diagram of the AFBP test. Unit = mm. L and R represent the longitudinal and radial directions, respectively. Width of the specimen = 20 mm.

試験を行った。1つの条件につき5個の試験体を使用した。

通直な試験体 (Fig. 1 (a)) では支点および荷重点の位置を変え、せん断強さの測定を試みた。この際、Fig. 1 (c) に示すように互いに隣接する支点と荷重点間の距離を cL とし、 c 値を0.1から0.4まで0.05刻みで変化させた。クロスヘッド速度 1 mm/min として板目面に荷重を負荷し、最大荷重 P_{\max} を求めた。初等はり理論から、支点および荷重点にはFig. 1 (c) に示すような外力が試験体に加えられ、曲げモーメント M は内側の支点および荷重点で最大となる。最大荷重に達した際の曲げモーメントを M_{\max} とすると、内側の支点および荷重点における M_{\max} は $(1-2c)P_{\max}/[2(1-c)] \times cL$ となる。また、曲げ応力はこれらの位置の外縁部で最大となることから、最大荷重に達した際の内側の支点および荷重点における曲げ応力 σ_c は以下の式で与えられる。

$$\sigma_c = \frac{M_{\max}H}{2I} = \frac{3c(1-2c)}{1-c} \times \frac{P_{\max}L}{BH^2} \quad (1)$$

ここで B 、 H および I は試験体の幅、はりせいおよび断面二次モーメントで、 $I=BH^3/12$ である。一方、せん断力は c の値が0.25よりも小さければ互いに隣接する外側の支点と荷重点の間で最大となり、0.25より大きければ内側の支点と荷重点の間で最大

となる。最大荷重に達した際のせん断力を V_{\max} とすると、外側の支点と荷重点の間で $V_{\max} = (1-2c)P_{\max}/[2(1-c)]$ 、内側の支点と荷重点の間で $V_{\max} = cP_{\max}/(1-c)$ となる。せん断応力は中立軸で最大となることから、最大荷重に達した際のせん断応力 τ_c は以下の式で与えられる。

$$\tau_c = \frac{3V_{\max}}{2BH} = \begin{cases} \frac{3(1-2c)}{4(1-c)} \times \frac{P_{\max}}{BH} & (0 < c \leq \frac{1}{4}) \\ \frac{3c}{2(1-c)} \times \frac{P_{\max}}{BH} & (\frac{1}{4} \leq c < \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (2)$$

曲げによる破壊よりもせん断による破壊を先行させるためには、 τ_c 値が大きく、 σ_c の値が小さい方が望ましい。したがって、 τ_c/σ_c 値が大きいほどせん断で破壊する可能性が高くなる。式(1)および(2)から τ_c/σ_c 値は以下のように与えられる。

$$\frac{\tau_c}{\sigma_c} = \begin{cases} \frac{1}{4c} \times \frac{H}{L} & (0 < c \leq \frac{1}{4}) \\ \frac{1}{2(1-2c)} \times \frac{H}{L} & (\frac{1}{4} \leq c < \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (3)$$

スパン/はりせい比 L/H が一定であれば $(\tau_c/\sigma_c) \times (L/H)$ 値の大小でせん断破壊の可能性を評価することが可能である。 c 値の変化に伴う $(\tau_c/\sigma_c) \times (L/H)$ 値の変化を Fig. 2 に示す。既往の研究では $c = 1/4$ あるいは $1/3$ とすることが多いが^{5, 8, 11, 13-15)}、この図に示すように、 c の値が 0 あるいは $1/2$ に近づくほど $(\tau_c/\sigma_c) \times (L/H)$ 値が大きくなり、せん断による破壊が発生しやすくなる。一方、 c 値が $1/4$ に近づくほど曲げモーメントによる破壊が発生しやすくなる。

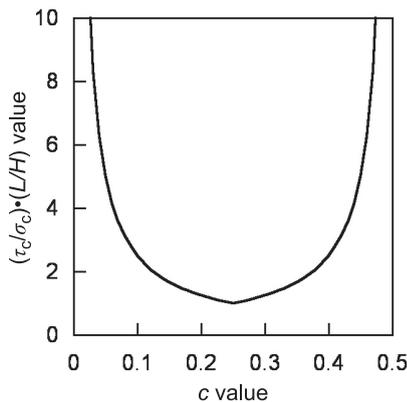


Fig. 2. $(\tau_c/\sigma_c) \times (L/H)$ - c relationship obtained from Eq. (3). c value represents the ratio of the distance between the outer/inner supporting point and inner/outer loading point to the total span length L .

上述した通直の試験体に加え、Fig. 1 (b) に示すような中央上下に切り欠きを導入してせん断破壊を発生しやすくした試験体を用いて逆対称4点曲げを実施した。通直な試験体と同様、曲げ応力は内側の支点および荷重点の引張側外縁部で最大となるが、試験体の中央部を細くしたことでせん断応力はスパン中央で最大となる。ここでは $c = 1/3$ に固定し、以下の式を用いて σ_c および τ_c の値を評価した¹²⁾。

$$\sigma_c = \frac{P_{\max}L}{2BH^2} \quad (4)$$

$$\tau_c = \frac{P_{\max}}{BH'} \quad (5)$$

ここで H' は切り欠き底間の距離である。切り欠きを導入した試験体から得られた σ_c および τ_c の値を通直な試験体から得られた結果と比較し、適切にせん断強さが評価できる試験条件について検討した。

3. 結果および考察

Fig. 3 に逆対称4点曲げ試験によって破壊した試験体の写真を示す。Fig. 2 に示すように、 c の値が 0.25 に近いほど曲げモーメントの影響が大きくなり、0 あるいは 0.5 に近いほどせん断力の影響が大きくなる。Fig. 3 (a) のように、試験結果も c の値が 0.25 に近い範囲 ($c = 0.2 \sim 0.3$ 程度) では荷重点の裏側において典型的な曲げ破壊が発生している。これに対して Fig. 3 (b) のように、 c の値が 0.15 よりも小さいか 0.35 よりも大きいと荷重点裏側の曲げ破壊が発生せず、支点近傍の圧潰や中立軸に寄った部分でせん断力に起因すると思われる破壊が発生している。また、切り欠きを導入した試験体 (Fig. 3 (c)) では切り欠きの縁のみならず、中立軸に沿ったせん断破壊が発生していることを示している。

Fig. 4 に式 (1) ~ (5) を用いて得られた破壊発生時の σ_c 値および τ_c 値と c 値の関係を示す。切り欠きを導入した試験体では曲げモーメントが小さな段階で Fig. 3 (c) に示すようなせん断力に起因する破壊が先行して発生したため、 σ_c の値が通直な試験体から得られた値よりも小さくなっている。また、Fig. 3 (c) に示された破壊形態は切り欠きを導入した試験体から得られた τ_c の値がせん断強さとして評価できることを示唆していることから、通直な試験体から得られた τ_c の値が切り欠きを導入した試験体から得られた τ_c の値に近くなることが望ましいと考えられる。

Table 1 に通直な試験体と切り欠きを導入した試験体から得られた τ_c 値について、対応のない 2 標本 t 検定による平均値の差の検定結果を示す。 $c =$

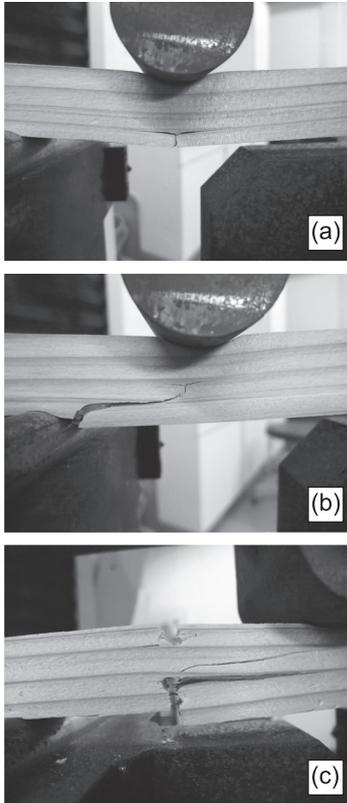


Fig. 3. Failure during the AFPB test using the straight specimen at $c = 0.25$ (a) and $c = 0.15$ (b), and the notched specimen (c).

0.15および0.2あるいは0.3および0.35の際に得られた τ_c 値の平均値は切り欠きを導入した試験体の τ_c 値の平均値と有意差がないため、支点や荷重点をこのような位置に設定することにより、得られた τ_c 値をせん断強さとして評価できる可能性が示唆されている。ただし、 $c=0.1$ および0.4では支点と荷重点が互いに近く、はり理論では予測不可能な荷重点近傍の特異な応力状態の影響が強くなることで τ_c の値が大きく評価され、切り欠きを導入した試験体の τ_c の平均値と有意差を生じたと思われる。また、 $c=0.2$ および0.3とした場合も有意差を生じていないが、前述したように $c=0.25$ とした場合と同様に荷重点裏側で曲げモーメントに起因する破壊が発生した。したがって、これらの位置で試験することを避け、 $c=0.15$ および0.35として試験を実施するべきであると考えられる。

以上のことから、適切に c 値を設定すれば通直な試験体を使用してもせん断強さを評価することが可能であると思われる。ただし、ここでは L/H 値を

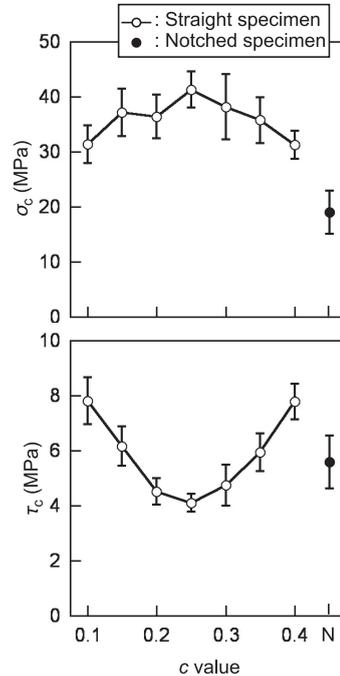


Fig. 4. The σ_c and τ_c values corresponding to the c value. N represents the result of the notched specimens. The results represent the average \pm standard deviations.

Table 1. Results of the unpaired t -test of the difference in shear strengths obtained from the straight and notched specimens.

c value	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
	S ^a	NS	NS	S ^b	NS	NS	S ^a

S^a and S^b = significant at the significance levels of 0.01 and 0.05, respectively. NS = not significant. c value represents the ratio of the distance between the outer/inner supporting point and inner/outer loading point to the total span length L .

10に固定して試験を実施したが、式(3)に示すように L/H 値をさらに小さくすることによってより適切にせん断強さが評価できる可能性があり、今後の検討課題である。

4. 結 論

通直な試験体および上下に切り欠きを導入したスギの試験体を用いて逆対称4点曲げ試験を実施し、せん断強さの測定を試みた。通直な試験体では支点と荷重点の位置を変化させ、その影響について検討した。その結果、適切な位置で試験体を支持および負荷することにより、通直な試験体でも適切にせん

断強さが評価できる可能性が示唆された。

文 献

- 1) 吉原 浩：木材および木質材料のせん断特性の評価法. 材料 **55**(4), 349-355 (2006).
- 2) Hunt, M. O., Shook, S. M., Bradtmueller, J. P.: Longitudinal shear-strength of LVL via the 5-point bending test. *Forest Prod. J.* **43**(7/8), 39-44 (1993).
- 3) Bradtmueller, J. P., Hunt, M. O., Shook, S. M.: Mechanical properties of laminated veneer lumber via five-point bending test. *J. Test. Eval.* **26**(2) : 132-137 (1998).
- 4) Janowiak, J. J., Hindman, D. P., Manbeck, H. B.: Orthotropic behavior of lumber composite materials. *Wood Fiber Sci.* **33**(4), 580-594 (2001).
- 5) Yoshihara, H., Furushima, T.: Shear strengths of wood measured by various short beam shear test methods. *Wood Sci. Technol.* **37**, 189-197 (2003).
- 6) Yoshihara, H., Ohhata, O.: Method of measuring the shear strength of wood by the asymmetric four-point bending test using a notched beam specimen. *J. Test. Eval.* **31**(4), 352-355 (2003).
- 7) Yoshihara, H., Suzuki, A.: Shear stress/shear strain relation of wood obtained by asymmetric four-point bending test of side-tapered specimen. *J. Test. Eval.* **33**(1), 573-578 (2005).
- 8) 森田秀樹, 藤元嘉安, 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. 木材学会誌 **52**(6), 376-382 (2006).
- 9) Hindman, D. P., Janowiak, J. J., Manbeck, H. B.: Comparison of ASTM D 198 and five-point bending for elastic constant ratio determination. *Forest Prod. J.* **56**(7/8), 85-90 (2006).
- 10) Harrison, S.K., Hindman, D.P.: Test method comparison of shear modulus evaluation of MSR and SCL products. *Forest Prod. J.* **57**(7/8), 32-38 (2007).
- 11) 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 **54A**, 650-658 (2008).
- 12) Yoshihara, H.: Shear properties of wood measured by the asymmetric four-point bending test of notched specimen. *Holzforschung*, **63**(2), 211-216 (2009).
- 13) 大野英克, 亀山雄揮, 安藤康裕, 田邊 純, 石栗太, 飯塚和也, 横田信三, 吉澤伸夫：スギおよびヒノキ材を用いた厚さが異なる異樹種異等級構成積層材の曲げ, せん断およびめり込み性能. 材料 **60**(10), 913-917 (2011).
- 14) 大野英克：スギ材を用いた異樹種構成積層材の開発. 宇大演報 **48**, 35-70 (2012).
- 15) 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. 木材学会誌 **58**(5), 260-270 (2012).
- 16) Radcliffe, B. M., Suddarth, S. K.: The notched beam shear test for wood. *Forest Prod. J.* **5**(4), 131-135 (1955).
- 17) 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, 静岡, 1998, p. 106.
- 18) JIS Z 2101：木材の試験方法. 日本規格協会 (2009).