木材のモード I の破壊じん性値の測定におよぼす試験方法の影響[†]

吉 原 浩* 川 村 拓 司**

Influence of the Measurement Methods on the Mode I Fracture Toughness of Wood

by

Hiroshi YOSHIHARA* and Takuji KAWAMURA**

In this work, we examined the validity of four methods for measuring the mode I fracture toughness of wood; double cantilever beam (DCB), compact tension (CT), single edge notched tension (SENT), and single edge notched bending (SENB) tests, which have been frequently conducted. In the fracture tests, the crack length was variously changed, and the validity of each method was evaluated by the dependence of fracture toughness on the crack length. From the comparisons of fracture toughnesses obtained by the different four methods, the DCB test was more recommended than any other methods because the fracture toughness could be appropriately obtained in the wide range of crack length.

Key words : Mode I fracture toughness, DCB test, CT test, SENT test, SENB test

1 緒 言

材料の強度的性質を評価する上で破壊力学はきわめて有効な手段であり、木材でもこれまで破壊力学に基づいた強度特性の評価についてさまざまに検討されてきた。^{1)~4)}特に開口モード（モード I）の破壊じん性値は、一般的に他の 2 つのモードの破壊じん性値に比べて小さく、モード I による破壊の発生および進展が生じやすいために重要視されており、今世紀に入ってもなお多くの研究成果が報告されている。^{5)~17)}しかし、従来の報告の多くはひとつの試験法から得られた破壊じん性値を用いている場合が多く、異なった試験法から得られたモード I の破壊じん性値を比較評価した例はあまりない。¹⁸⁾しかし、上述したように材料の強度的性質を評価における破壊力学的手法の有効性が認められつつあることを考えると、これまで以上に木材の破壊じん性試験がより頻繁に実施されるようになり、試験法の整備が要求されるようになることが予想される。こうした意味で、いずれの方法によって適切に破壊じん性値が評価できるか検討することは、安定した破壊じん性値を測定する上できわめて重要であると考えられる。そこで、本研究では異なる 4 つの方法でさまざまなき裂長さをもつ木材のモード I の破壊じん性値を測定し、得られた破壊じん性値を互いに比較することによって測定法の検討を試みた。

2 実 験 方 法

2・1 供試材

本研究では気乾状態で密度が $0.49 \pm 0.01 \text{g/cm}^3$ のベイツガ (*Tsuga heterophylla* Sarg.) の角材を使用した。使用した角材には節や繊維の乱れなどの欠点はなく、この角材から作製した試験体は「無欠点小試験体」とであると見

なすことができた。この角材を温度 20℃、相対湿度 65% の部屋で調湿し、ここで使用したすべての試験体をこの角材から採取した。モード I の破壊じん性値を、破壊じん性試験として比較的頻繁に実施される方法である双片持ちばり (DCB) 試験、コンパクト引張 (CT) 試験、片側クラック引張 (SENT) 試験および片側クラック 3 点曲げ試験 (SENB) 試験で求めた。なお、すべてき裂は繊維方向に沿って導入し、接線方向に開口するように荷重を負荷した (TL システム)。また、破壊じん性試験ではき裂長さをさまざまに変化させ、1 つのき裂長さについて 5 体の試験体を使用した。各試験の概要を以下に示す。

2・2 DCB 試験

Fig. 1 に DCB 試験の概要を示す。試験体の寸法を 15mm (半径方向) × 15mm (接線方向) × 315mm (繊維方向) とした。あさり幅 1mm の帯のこを用いて所定の長さまでき裂を入れた後、片刃のカミソリを用いてき裂先端を 1mm 伸長させた。き裂の導入後、高さ 30mm、長さ 30mm および幅 15mm で半径 7mm の円孔を有するベイツガのブロックを Fig. 1 のように試験体の片持ちばり部分の上下に接着した。き裂長さ a は荷重線とき裂先

Fig. 1 Schematic diagram of the DCB test.

[†] 原稿受理 平成 18 年 5 月 1 日 Received May 1, 2006 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 島根大学総合理工学部材料プロセス工学科 〒690-8504 松江市西川津町, Dept. of Natural Resources Process Eng., Shimane Univ., Nishikawatsu-cho, Matsue, 690-8504

** 東京大学大学院農学生命科学研究科生物材料工学専攻 〒113-8657 東京都文京区弥生, Dept. of Biomaterial Sci., The Univ. Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8657

端の距離で定義し, 90mm から 210mm まで 30mm 間隔のき裂長さを持つ試験体を準備した. DCB 試験や ENF 試験などの曲げに依拠した破壊じん性試験では, き裂先端における特異な変形によって荷重-たわみ関係が初等はり理論から逸脱することが知られているが^{4), 16), 17), 19)~22)}試験体の特定部分のひずみを同時に測定することによってはり理論からの逸脱を修正して適切に破壊じん性値が得られることが示され, コンプライアンス結合法として提案されている.^{17), 19)~22)}ここでは Fig. 1 のように片持ちばり部分における荷重線とき裂先端の中間点における長手方向のひずみを測定するためにひずみゲージ (東京測器 FLA-2-11, ゲージ長 2mm) を貼付した. 荷重点ブロックに通した鋼製のピンを介し, クロスヘッド速度 5mm/min で明らかに荷重が低下するまで引張負荷を続け, 荷重 P , 荷重点の変位 δ および荷重線とき裂先端の中間点におけるひずみ ε_x を測定した. P - δ 関係および P - ε_x 関係の直線部分の傾きから, 荷重点コンプライアンス C_L およびひずみコンプライアンス C_S を求めた. また, き裂進展開始時の荷重 P_c は P - δ 関係の初期直線部分の傾きの 5% 減じた傾きをもつ直線と P - δ 曲線の交点で定義した. 以上に示した P_c , C_L および C_S の値を用いて, エネルギー解放率の臨界値 G_{Ic} をコンプライアンス結合法に基づく以下の式から求めた.¹⁷⁾

$$G_{Ic} = \frac{3P_c^2 C_L}{2B} \left(\frac{3Hl}{4} \cdot \frac{C_L}{C_S} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここで B は試験体の幅, H は片持ちばり部分の高さである. また, Fig. 1 に示すように l は荷重点からひずみの測定点までの距離で, ここでは $l = a/2$ である.

2・3 CT 試験

Fig. 2 に CT 試験の概要を示す. 試験体の寸法は 15mm (半径方向) $\times$ 120mm (接線方向) $\times$ 125mm (繊維方向) とした. 上述した DCB 試験と同様の方法で試験体にき裂を導入した. き裂長さ a は荷重線とき裂先端の距離で定義し, 30mm から 70mm まで 10mm 間隔のき裂長さを持つ試験体を準備した. また, Fig. 2 のような位置に荷重点を負荷するための円孔を開けた. この円孔に通した鋼製のピンを介し, クロスヘッド速度 2mm/min で明らかに荷重が低下するまで引張負荷を続け, 荷重 P および荷重点の変位 δ を測定した. き裂進展開始時の荷重 P_c は DCB 試験と同様の方法で求めた.

Fig. 2 Schematic diagram of the CT test.

応力拡大係数の臨界値 K_{Ic} を以下の近似式から求めた.²³⁾

$$K_{Ic} = \frac{P_c \sqrt{a}}{BW} \left[29.6 - 185.5 \left(\frac{a}{W} \right) + 655.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 1017.0 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 638.9 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right] \quad (2)$$

ここで W は Fig. 2 のように荷重点からき裂の進行方向の試験体端部までの距離である.

2・4 SENT 試験

Fig. 3 に SENT 試験の概要を示す. 使用した角材の寸法から, 接線方向に十分な長さを持つ試験体を作製することが困難であったため, この図のようにエポキシ系接着剤を使用して接線方向に接着し, 最終的な試験体の寸法を 15mm (半径方向) $\times$ 200mm (接線方向) $\times$ 40mm (繊維方向) とした. 前述した 2 つの試験と同様の方法で試験体にき裂を導入した. き裂長さ a は試験体の縁とき裂先端の距離で定義し, 12mm から 28mm まで 4mm 間隔のき裂長さを持つ試験体を準備した. 材端から 40mm の長さで試験体をつかみ, クロスヘッド速度 1mm/min で明らかに荷重が低下するまで負荷を続け, 荷重 P および荷重点の変位 δ を測定した. 前述した 2 つの試験と同様にき裂進展開始時の荷重 P_c を求めた.

K_{Ic} 値は以下の近似式から算出した.²⁴⁾

(i) き裂長さが 12mm から 20mm のとき

$$K_{Ic} = \frac{P_c \sqrt{\pi a}}{BW} \left[0.265 \left(1 - \frac{a}{W} \right)^4 + \left(0.857 + 0.265 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{-\frac{3}{2}} \right]$$

(ii) き裂長さが 24mm および 28mm のとき

$$K_{Ic} = \frac{P_c \sqrt{\pi a}}{BW} \left[1.12 - 2.31 \left(\frac{a}{W} \right) + 10.55 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 21.72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 30.39 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right] \quad (3)$$

ここで W は試験体の幅である.

Fig. 3 Schematic diagram of the SENT test.

2・5 SENB 試験

Fig. 4 に SENB 試験の概要を示す。SENT 試験と同様に接線方向に十分な長さを持つ試験体を調製することが困難であったため、エポキシ系接着剤を使用して接線方向に接着し、最終的な試験体の寸法を 15mm (半径方向) × 200mm (接線方向) × 40mm (繊維方向) とした。前述した 3 つの試験と同様の方法で試験体にき裂を導入した。き裂長さ a は試験体の縁とき裂先端の距離で定義し、12mm から 28mm まで 4mm 間隔のき裂長さを持つ試験体を準備した。スパンを 160mm としてき裂の反対側からクロスヘッド速度 0.5mm/min で荷重を負荷し、荷重 P および荷重点の変位 δ を測定した。ここでも以上の試験と同様の定義にしたがってき裂進展開始時の荷重 P_c を求め、 K_{Ic} 値を以下の近似式から算出した。²⁵⁾

$$K_{Ic} = \frac{6P_c \sqrt{\pi a}}{BW} \left[1.090 - 1.735 \left(\frac{a}{W} \right) + 8.20 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 14.18 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 14.57 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right] \quad (4)$$

ここで W は試験体の高さである。

2・6 K_{Ic} 値と G_{Ic} 値の互換に必要な弾性定数の測定

式 (2), (3), (4) で得られた K_{Ic} 値は G_{Ic} 値に変換することが可能である。一方、式 (1) で得られた G_{Ic} 値は K_{Ic} 値に変換することが可能である。したがって、ここでは変換に必要なベイツガの弾性定数を Fig. 5 に示すような 4 点曲げ試験および非対称 4 点曲げ試験を行うことにより求めた。

繊維方向のヤング率 E_L および板目面のポアソン比 ν_{LT} は、長手方向が繊維方向と一致した試験体の 4 点曲げ試験で求めた。破壊じん性試験に使用した角材から 300mm (繊維方向) × 15mm (接線方向) × 10mm (半径方向) の試験体を切り出した。試験体の板目面中央に 3 軸のひずみゲージ (東京測器 FRA-2-11, ゲージ長 2mm) を貼付した。スパンを 270mm とし、ゲージがスパン中央下部に位置するように試験体を置いた。スパンの 3 等分点にクロスヘッド 2mm/min で荷重を負荷し、荷重 P , L 方向のひずみ ε_L および T 方向のひずみ ε_T を測定した。以下の式から E_L および ν_{LT} を求めた。

$$\begin{cases} E_L = \frac{l}{bh^2} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta \varepsilon_L} \\ \nu_{LT} = -\frac{\Delta \varepsilon_T}{\Delta \varepsilon_L} \end{cases} \quad (5)$$

Fig. 4 Schematic diagram of the SENB test.

Fig. 5 Bending test diagrams for measuring the elastic constants.

ここで l はスパン長、 b は試験体の幅、 h は試験体の高さ、 $\Delta P / \Delta \varepsilon_L$ および $\Delta \varepsilon_L / \Delta \varepsilon_T$ はそれぞれ P - ε_L 関係と ε_L - ε_T 関係の初期の傾きである。試験体の個数は 5 体とした。一方、この試験体を使用し、Fig. 5 (b) のようにゲージがスパン中央の側面になるように配置して非対称 4 点曲げ試験を行うことによって板目面のせん断弾性係数 G_{LT} を求めた。クロスヘッド速度は 2mm/min とし、荷重 P , 繊維方向のひずみ ε_L , 接線方向のひずみ ε_T , および繊維方向から 45° 傾いた方向のひずみ ε_{45} を測定した。以下の式から G_{LT} を求めた。²⁶⁾

$$G_{LT} = \frac{3}{4bh} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta \gamma} \quad (6)$$

ここで γ はせん断ひずみで、以下の式から与えられる。

$$\gamma = 2\varepsilon_{45} - \varepsilon_L - \varepsilon_T \quad (7)$$

接線方向のヤング率 E_T は長手方向が接線方向と一致した試験体の 4 点曲げ試験で求めた。破壊じん性試験に使用した角材から 15mm (繊維方向) × 140mm (接線方向) × 10mm (半径方向) の試験体を切り出した。試験体の板目面中央に単軸のひずみゲージ (東京測器 FLA-2-11, ゲージ長 2mm) を貼付した。スパンを 120mm とし、ゲージがスパン中央下部に位置するように試験体を置いた。スパンの 3 等分点にクロスヘッド 2mm/min で荷重を負荷し、荷重 P および T 方向のひずみ ε_T を測定した。以下の式から E_T を求めた。

$$E_T = \frac{l}{bh^2} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta \varepsilon_T} \quad (8)$$

この場合も試験体の個数は 5 体とした。

K_{Ic} 値は以下の式で G_{Ic} 値に変換することができる。²⁷⁾

$$G_{Ic} = K_{Ic}^2 \left(\frac{S_{11}S_{22}}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{S_{11}}{S_{22}} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{2S_{12} + S_{66}}{2S_{11}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

ここで $S_{11} = 1/E_L$, $S_{22} = 1/E_T$, $S_{12} = -\nu_{LT}/E_L$, $S_{66} = 1/G_{LT}$ である。各弾性定数の平均値および式 (2), (3), (4) で得られた K_{Ic} 値を式 (9) に代入して G_{Ic} 値を求めた。一方、式 (1) で得られた G_{Ic} 値を式 (9) に代入して K_{Ic} 値を求めた。

3 結果と考察

Table 1 に 4 点曲げ試験および非対称 4 点曲げ試験で得られた繊維方向のヤング率 E_L , 接線方向のヤング率 E_T , 板目面のポアソン比 ν_{LT} および板目面のせん断弾性係数 G_{LT} を示す. 上述したように, CT 試験, SENT 試験および SENB 試験で得られた応力拡大係数の臨界値 K_{Ic} をこれらの弾性定数の平均値を用いてエネルギー解放率の臨界値 G_{Ic} に変換した. 一方, DCB 試験で得られたエネルギー解放率の臨界値 G_{Ic} をこれらの弾性定数の平均値を用いて応力拡大係数の臨界値 K_{Ic} に変換した. Fig. 6 に各方法で得られた G_{Ic} 値とき裂長さの関係を示す. また, Fig. 7 に各方法で得られた K_{Ic} 値とき裂長さの関係を示す.

Fig. 6 から, DCB 試験ではき裂長さにかかわらずほぼ一定した G_{Ic} 値が得られた. また, 標準偏差の値も他の方法で得られたものよりも小さく, DCB 試験が G_{Ic} 値の測定に非常に効果的な方法であることが示された. これに対し, CT 試験で得られた G_{Ic} 値は, き裂長さが短くなると大きくなる傾向を示し, 反対に SENT 試験で得られた G_{Ic} 値はき裂長さが長くなると大きくなる傾向を示した. ただし, き裂長さの範囲を限定するならば, これらの試験で得られた G_{Ic} 値は DCB 試験で得られた値と比較的近い値を示しており, 破壊じん性値が適切に求められる可能性があると思われる. また, SENB 試験で得られ

Table 1 Elastic constants obtained by the symmetric and asymmetric four-point bending tests.

E_L (GPa)	E_T (GPa)	ν_{LT}	G_{LT} (GPa)
16.0 ± 2.0	0.73 ± 0.08	0.51 ± 0.09	0.90 ± 0.06

Results are average $\pm$ standard deviations.

Fig. 6 Comparison of the mode I fracture toughnesses G_{Ic} obtained by the different methods. Circles and horizontal bars represent the average and standard deviations, respectively.

た G_{Ic} 値はき裂長さあまり依存せず, その平均値は DCB 試験で得られた値と比較的近くになった. ただし, DCB 試験に比べて標準偏差が大きく, 試験の安定性を考えれば DCB 試験の方がより優れた方法であると考えられる. また式 (9) から, K_{Ic} 値については G_{Ic} 値に比べてき裂長さによる変動は少なくなるが, Fig. 7 に示されるように CT 試験や SENT 試験の結果にはき裂長さの依存性が明白であった. 一方, DCB 試験がもっとも安定した結果が得られたという点は G_{Ic} 値の傾向と同様であった.

以上のことから, き裂長さ依存性や破壊じん性値の変動の小ささを考慮すると, ここで検討した 4 つの方法の中では DCB 試験が破壊じん性値を安定的に測定できるもっとも適切な試験法であると思われる. 一方, DCB 試験を除く 3 つの試験法では K_{Ic} 値を算出する際に近似式を使用しているが, ここで示された G_{Ic} 値や K_{Ic} 値のき裂長さ依存性から, き裂長さが広い範囲で木材の破壊じん性値が適切に得られるような近似式の提案が必要であると思われる.

4 結 論

本研究ではモード I の破壊じん性試験として比較的实施される頻度が比較的高い 4 つの方法 (DCB 試験, CT 試験, SENT 試験および SENB 試験) で, さまざまき裂長さをもつベイツガの破壊じん性値を測定し, 各方法の妥当性について検討した. その結果, き裂長さの範囲を限定すれば, ここで検討した 4 つの方法で適切に破壊じん性値を評価できる可能性が示唆されたが, 中でも DCB 試験はき裂長さの影響が小さく, もっとも安定的に破壊じん性値を測定できると思われた.

Fig. 7 Comparison of the mode I critical stress intensity factors K_{Ic} obtained by the different methods. Circles and horizontal bars are similar to those in Fig. 6.

参 考 文 献

- 1) A. W. Porter, "On the mechanics of fracture in wood", Forest Products Journal, Vol.14, No.8, pp.325-331 (1964).
- 2) M. Patton-Mallory, "Fracture mechanics : a tool for predicting wood component strength", Forest Products Journal, Vol.37, No.7/8, pp.40-47 (1987).
- 3) M. P. Conrad, G. D. Smith and G. Fernlund, "Fracture of solid wood : a review of structure and properties at different scales", Wood and Fiber Science, Vol.35, No.4, pp.570-584 (2003).
- 4) H. Yoshihara, "Characterization of fracturing properties of wood and wood materials based on the fracture mechanics", Mokuzai Gakkaishi, Vol.52, No.4, pp.185-195 (2006).
- 5) E. K. Tschegg, K. Frühmann and S. E. Stanzl-Tschegg, "Damage and fracture mechanisms during mode I and III loading of wood", Holzforschung, Vol.55, No.5, pp.525-533 (2001).
- 6) A. Reiterer, G. Sinn, S. E. Stanzl-Tschegg, "Fracture characteristics of different wood species under mode I loading perpendicular to the grain", Materials Science and Engineering A, Vol.A332, No.1, pp.29-36 (2002).
- 7) S. Vasic and I. Smith, "Bridging crack model for fracture of spruce", Engineering Fracture Mechanics, Vol.69, No.6, pp.745-760 (2002).
- 8) S. Vasic, I. Smith and E. Landis, "Fracture zone characterization—micro-mechanical study", Wood and Fiber Science, Vol.34, No.1, pp.42-56 (2002).
- 9) S. Morel, G. Mourrot and J. Schmittbuhl, "Influence of the specimen geometry on R-curve behavior and roughening of fracture surfaces", Vol.121, No.1, pp.23-42 (2003).
- 10) K. Frühmann, I. Burgert, I. E. K. Tschegg and S. E. Stanzl-Tschegg, "Mode I fracture behaviour on the growth ring scale and cellular level of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and beech (*Fagus sylvatica* L.) loaded in the TR crack propagation system", Holzforschung, Vol.57, No.6, pp.326-332 (2003).
- 11) S. Vasic and I. Smith, "Contact-crack problem with friction in spruce", Holz als Roh-und Werkstoff, Vol.61, No.3, pp.182-186 (2003).
- 12) I. Smith and S. Vasic, "Fracture behaviour of softwood", Mechanics of Materials, Vol.35, No.8, pp.803-815 (2003).
- 13) M. Scheffler, P. Niemz, M. Diener and V. Lustig, "Untersuchungen zur Ermittlung der Bruchzähigkeit an Laubholz in den Rissöffnungsmodi I und II", Holz als Roh-und Werkstoff, Vol.62, No.2, pp.93-100 (2004).
- 14) S. Samarasinghe and D. Kulasiri, "Stress intensity factor of wood from crack-tip displacement fields obtained from digital image processing", Silva Fennica, Vol.38, No.3, pp.267-278 (2004).
- 15) S. Morel, N. Dourado, G. Valentin, J. Morais, "Wood : a quasibrittle material R-curve behavior and peak load evaluation", International Journal of Fracture, Vol.131, No.4, pp.385-400 (2005).
- 16) J. L. Jensen, "Quasi-non-linear fracture mechanics analysis of the double cantilever beam specimen", Journal of Wood Science, Vol.51, No.6, pp.566-571 (2005).
- 17) H. Yoshihara and T. Kawamura, "Mode I fracture toughness estimation of wood by DCB test", Composites Part A, Vol.37, No.11, pp.2105-2113 (2006).
- 18) N. Suzuki, "Fracture toughness of wood and wood products", Final Report of a Grant-in-Aid for Scientific Research Project 1994-1995 (No.06302069), pp.129-135 (1996).
- 19) H. Yoshihara, "Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test", Engineering Fracture Mechanics, Vol.71, No.13/14, pp.2065-2077.
- 20) H. Yoshihara, "Mode II initiation fracture toughness analysis for wood by 3-ENF test", Composites Science and Technology, Vol.65, No.14, pp.2198-2207 (2005).
- 21) H. Yoshihara "Examination of the 4-ENF test for measuring the mode III R-curve of wood", Engineering Fracture Mechanics, Vol.73, No.1, pp.42-63 (2006).
- 22) H. Yoshihara "Influence of crack length on the measurement of mode II initiation fracture toughness of wood by three-point bend end-notched flexure (3ENF) test", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part A, Vol.72, No.1, pp.133-139 (2006).
- 23) E. T. Wessel, "State of the art of the WOL specimen for K_{Ic} fracture toughness testing", Engineering Fracture Mechanics, Vol.1, No.1, pp.77-82 (1968).
- 24) R. A. Jurf and R. B. Pipes, "Interlaminar fracture of composite materials", Journal of Composite Materials, Vol.16, No.5, pp.386-394 (1982).
- 25) B. Gross and J. E. Srawley, "Stress-intensity factors for three-point bend specimens by boundary collocation", NASA Technical Note TN D-3092, pp.1-13 (1966).
- 26) H. Yoshihara and A. Suzuki, "Shear stress/shear strain relation of wood obtained by asymmetric four-point bending test of side-tapered specimen", Journal of Testing and Evaluation, Vol.33, No.1, pp.55-60.
- 27) G. C. Sih, P. C. Paris and G. R. Irwin, "On cracks in rectilinearly anisotropic bodies", International Journal of Fracture Mechanics, Vol.1, No.3, pp.189-203 (1965).