木材の破壊じん性に及ぼす諸因子の影響†

佐 藤 清*

Influences of Various Factors on Fracture Toughness of Wood

by

Kiyoshi SATO*

In this study, the influences of loading rate, crack length, notch acuity, moisture content of specimen, heat-treatment, and polyethylene glycol (PEG) treatment on the fracture toughness of wood were examined experimentally at room temperature. The materials used for the experiment were douglas fir, spruce, western hemlock, Alaska cedar, castor aralia, Japanese beech, ramin, ash, false arbor-vitae and red lauan.

The results were summarized as follows:

- (1) The fracture toughness was independent of the loading rate in the range of the present experiment.
- (2) The fracture toughness decreased with increasing crack length (a/W) of specimen.
- (3) The fracture toughness increased with increasing notch root radius (ρ).
- (4) Above moisture content of 15%, the fracture toughness decreased with increasing moisture content.
- (5) The fracture toughness of wood heat-treated at 120°C was larger than that of solid wood, but the fracture toughness decreased with increase of treatment temperature over 120°C.
- (6) The fracture toughness of the PEG impregnated wood was larger than that of the solid wood.

Key words : Fracture toughness, Loading rate, Crack length, Notch root radius, Moisture content, Heat-treatment, PEG, Wood

1 緒 言

最近、木造大架構建築物が建設されるようになり、これらの構造物の破壊防止の観点から、木材についても破壊力学の適用が重要視され始めた。

木材および木質材料についての破壊力学的な研究結果は報告されているが、^{1)~23)}木材の破壊じん性に及ぼす諸因子の影響に関する研究報告は少ないのが現状である。他方、木材の寸法安定性を得る方法として、加熱処理、ポリエチレングリコール（以後 PEG と記す）処理などがある。しかしながら、実際には加熱処理木材はあまり使用されていないのが現状である。その原因としては色々な問題があるものと思われる。また、PEG 処理材の破壊特性を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では上記の点を考慮して、木材の破壊じん性に及ぼす負荷速度、き裂長さ（切欠き比、 a/W ）、切欠き先端半径、含水率、加熱処理および PEG 処理の影響について調べたので、その結果について報告する。

2 材料および実験方法

2・1 材料および試験片

供試材は市販のベイマツ、スプルース、ベイツガ、ベイヒバ、アルダ、セン、ブナ、ラミン、アッシュ、青森ヒバおよびラワンである。

負荷速度変化用にはベイマツ、き裂長さ（切欠き比） a/W および切欠き先端半径 ρ 変化用にはスプルース、含水率変化用にはベイツガ、加熱処理用にはベイヒバ、アルダ、セン、ブナ、ラミン、アッシュ、PEG 処理用には

ラワンを用いた。

破壊じん性試験片は Fig. 1 に示す形状、寸法の CT 試験片であり、切欠き先端はカッターの刃で仕上げた。切欠き肩部にナイフエッジを木ねじで固定し、それにクリップゲージを装着して、切欠き肩部変位を測定した。また、試験片の木取りの例を Fig. 2 に示し、本実験で用いた試験片の木取り方向を Table I に示す。Table I 中の TL-RL は TL と RL の中間状態を示す。

なお、き裂長さ（切欠き比） a/W および切欠き先端半径 ρ の影響を調べる場合の条件を Table II および Table III に示す。切欠き先端半径の影響を調べる場合の試験片の切欠き先端はカッターの刃、jewel saw、ドリル + やすり で仕上げた。

2・2 加熱処理

熱処理に用いた材は素材と同一の板材の一部である。加熱処理はオートクレーブを用い、窒素ガス雰囲気中で行った。加熱処理条件を Table IV に示す。

2・3 PEG 処理

処理に用いたポリエチレングリコールは PEG-1000、PEG-2000、PEG-4000、PEG-10000 である。

ラワン素材の含水率を十分に上げ、それらを PEG-4000 の 10%、20%、30% 水溶液および PEG-1000、2000、4000、10000 の 30% 水溶液に浸したまま 70°C で約 50 時間保持して PEG を含浸させた。PEG 含浸後、乾燥を行い含水率を約 10% に調整した。試験用素材の含水率も約 10% に調整した。

† 原稿受理 平成 9 年 11 月 18 日 Received Nov. 18, 1997

* 正 会 員 三重大学教育学部技術科 〒514-8507 津市上浜町, Dept. of Tech., Fac. of Edu., Mie Univ., Kamihama-cho, Tsu, 514-8507

Fig. 1. Specimen shape and dimensions (in mm).

Fig. 2. Specimens illustrating two principal systems of crack propagation.

Table I. Fracture planes on fracture toughness specimens.

Species	Specific crack alignment
Douglas fir	RL, TL-RL
Spruce	RL
Western hemlock	RL
Alaska cedar	TL
Alder	TL
Castor aralia	TL
Japanese beech	TL-RL
Ramin	TL
Ash	TL
False arbor-vitae	RL
Red lauan	RL

Table II. Condition of crack length.

a/W	W	Crosshead speed
0.3	50.8 mm	0.2 mm/min
0.4	"	"
0.5	"	"
0.6	"	"
0.7	"	"
0.8	"	"

Table III. Condition of notch acuity.

ρ	a/W	Crosshead speed
0.01 mm	0.5	0.2 mm/min
0.5 "	"	"
0.8 "	"	"
2.0 "	"	"

Table IV. Condition of heat treatment.

Species	Temperature (°C)	Hold time (hours)
Alaska cedar	120, 145, 170	10
Alder	120, 145, 170	6
Castor aralia	200	12
Japanese beech	120, 150, 190	10
Ramin	190	8
Ash	120, 145, 170	6

2・4 破壊じん性試験

破壊じん性試験は、負荷速度、き裂長さ、切欠き先端半径、含水率および PEG 含浸処理の影響を調べる場合には、容量 20kN の引張試験機を用い、クロスヘッド速度 0.2mm/min の引張速度で行った。ただし、負荷速度の影響を調べる場合には Table V の条件で行った。

加熱処理の影響を調べる場合の破壊じん性試験は容量 9.8kN の引張試験機を使用し、クロスヘッド速度 0.5mm/min で行った。破壊じん性は前報¹⁸⁾の式を用いて計算した。限界荷重の決定法としては P_Q 法を用いた。ただし、荷重速度および含水率の影響を調べる場合には、限界荷重として最高荷重を用いた。

Table V. Condition of loading rate.

Crosshead speed	W	a/W
0.02 mm/min	50.8 mm	0.5
0.2 "	"	"
2 "	"	"
20 "	"	"
200 "	"	"

3 実験結果および考察

3・1 破壊じん性の負荷速度依存性

破壊じん性試験の負荷速度を種々に変えて実験を行った結果を Fig. 3 に示す。(a) が RL 試験片であり、(b) が TL-RL 試験片である。なお、Fig. 3 中のプロット点は試験片 6 個についての平均値である。RL および TL-RL 試験片ともに、破壊じん性は負荷速度の影響をほとんど受けないことが分かる。鋼材の破壊じん性 K_{IC} については、 K_{IC} は負荷速度の増加とともに減少するという報告²⁴⁾と K_{IC} の負荷速度依存性は認められないという報告²⁵⁾がある。本実験結果は後者の傾向と同様である。また、ベイツガおよびスギの破壊じん性についても最近報告され²³⁾、限界荷重の決定法として P_Q を用いると速度依存性はほとんど見られないが、AE 法を用いると負荷速度の増加に従って K_{IC} は低下すると結論している。負荷速度の影響については、今後広範囲の負荷速度について多くの実験データを蓄積する必要があると考えられる。

3・2 破壊じん性の切欠き比(き裂長さ)依存性

切欠き比 a/W が異なる破壊じん性試験片で実験を行った。切欠き比と破壊じん性との関係を示したのが Fig.

(a) RL system specimen

(b) TL-RL system specimen

Fig. 3. Effect of loading rate on fracture toughness.

4である。なお、Fig. 4中のプロット点は試験片9個についての平均値である。切欠き比が増加するに従い破壊じん性が減少することが明らかである。

破壊じん性に及ぼす a/W の影響については大倉ら^{21), 22)}、佐藤¹⁷⁾の研究報告がある。大倉らのスプルース、ヘムロック、スギを用いた実験結果では、 K_{IC} は a/W が0.3～0.5付近で安定したと報告しており²¹⁾、また、パーティクルボードを用いた実験結果では、破壊じん性値は a/W の増加に伴い減少したと報告している。²²⁾佐藤の中比重ファイバーボードを用いた実験結果では、破壊じん性は a/W が0.4～0.6ではほぼ一定であると報告している。¹⁷⁾

本実験結果は大倉らのパーティクルボードについての実験結果²²⁾と同様と思われる。

3・3 破壊じん性の切欠き先端依存性

試験片の切欠き先端半径 ρ を種々に変えて破壊じん性を測定した。その結果をTable VIに示す。なお、Table中の破壊じん性値は1条件につき試験片10個の平均値である。破壊じん性は切欠き先端半径 ρ の増加に従い増加することが明らかである。

3・4 破壊じん性に及ぼす含水率の影響

試験片の含水率を種々に変えて破壊じん性を求めた。Fig. 5に破壊じん性 K_{IC} と含水率との関係を示す。図か

Fig. 4. Effect of crack length on fracture toughness.

Table VI. Effect of notch acuity on fracture toughness.

ρ	Fracture toughness ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
0.01 mm	0.435
0.5 "	0.494
0.8 "	0.517
2.0 "	0.572

ら明らかなように、含水率が約15%までは、含水率が増加するに従って破壊じん性は若干増加するが、含水率が15%以上では含水率が増加するに従って破壊じん性は減少する。

破壊じん性に及ぼす含水率の影響についてはA. W. Porter,²⁶⁾ G. R. Debaiseら²⁷⁾、A. P. Schniewindら²⁸⁾の研究報告があり、含水率が15%を越えると含水率が増加するに従って破壊じん性は減少すると報告している。本実験結果の傾向はこれらの研究結果の傾向と同様である。

3・5 破壊じん性に及ぼす加熱処理の影響

破壊じん性と熱処理温度との関係を示したのがFig. 6である。なお、Fig. 6中のプロット点は試験片5～10個の平均値である。図から明らかなように120℃で熱処理した材の破壊じん性は素材の値よりも増加しているが、それ以上の温度で熱処理した材の値は温度が増加するに従って減少している。これらの原因としては次

Fig. 5. Effect of moisture content on fracture toughness.

のことが考えられる。120℃の場合には、熱処理により材中のセルロースの結晶領域が増加するためと思われる。それに対し、145℃以上の温度で熱処理した材では、熱処理による材中のセルロースの結晶領域の増加に比べて、セルロースの減少が著しいことによるためと思われる。^{29), 30)}

Fig. 6. Fracture toughness versus temperature of heat treatment.

3・6 破壊じん性に及ぼす PEG 処理の影響

PEG-4000 で処理したラワン材の破壊じん性と処理水溶液濃度との関係を Fig. 7 に示す。本実験の範囲内では、水溶液濃度が増加するに従って若干ではあるが破壊じん性が増加している。なお、濃度が 0% のプロット点は素材の値である。また、図中のプロット点は試験片 8～10 個の平均値である。PEG 処理材の破壊じん性値が素材の値よりも大きいのは前報¹⁵⁾の結果と同様である。

また、処理水溶液濃度を一定 (30%) 条件にした場合、破壊じん性に及ぼす PEG 分子量の影響を示したのが Fig. 8 である。なお、分子量 0 のプロット点は素材の破壊じん性を示す。また、図中のプロット点は試験片 8～10 個の平均値である。破壊じん性は PEG の分子量が大きくなるに従って増加している。

Fig. 7. Effect of solution concentration in water on fracture toughness.

Fig. 8. Effect of molecular weight on fracture toughness.

4 結 論

数樹種の木材を用いて、破壊じん性に及ぼす負荷速度、き裂長さ、切欠き先端半径、含水率、加熱処理および PEG 処理の影響を実験的に調べた。得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) 本実験の範囲内では、破壊じん性は負荷速度の影響を受けない。
- (2) 破壊じん性はき裂長さの影響を受け、き裂長さが増加するに従って減少する。
- (3) 破壊じん性は切欠き先端半径が増加するに従って増加する。
- (4) 含水率が 15% 以上では、破壊じん性は含水率が増加するに従って減少する。
- (5) 破壊じん性は加熱処理の影響を受ける。
- (6) PEG 処理材の破壊じん性は素材の値よりも大きい。

最後に、本研究を行うにあたり、実験を手伝っていただいた本学技官の山本尚登氏、元本学院生の藤山秀公、庄司 哲の両氏、本学修士課程の山之内 猛君及び本学学生・田矢敦士君に深く感謝の意を表します。

(平成 9 年 9 月 24 日 日本材料学会第 9 回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) E. M. Wu, J. Appl. Mech., **34**, 967 (1967).
- 2) A. P. Schniewind and R. A. Pozniak, Engng. Fract. Mech., **2**, 223 (1971).
- 3) M. Tomin, Wood Sci., **5**, 118 (1972).
- 4) A. P. Schniewind and D. E. Lyon, Wood Sci., Technol., **7**, 45 (1973).
- 5) A. P. Schniewind and J. C. Centeno, Wood and Fiber, **5**, 152 (1973).
- 6) P. F. Walsh, J. Inst. Wood Sci., **6**, 22 (1973).
- 7) S. Mindess, J. S. Nadeau and J. D. Barrett, Wood Sci., **8**, 389 (1975).
- 8) Y. Lei and J. B. Wilson, Wood Sci., **12**, 154 (1980).
- 9) J. D. Barrett, Phil. Trans. R. Soc. Lond., **A299**, 217 (1981).
- 10) S. W. J. Boaright and G. G. Garrett, J. Mater. Sci., **18**, 2181 (1983).
- 11) 太田正光, 浅野猪久夫, 第33回日本木材学会大会研究発表

- 表要旨集, p.65 (1983).
- 12) P. Triboulot, I. Asano and M. Ohta, Mokuzai Gakkaishi, **29**, 111 (1983).
- 13) N. Sobue, D. Bajolet and G. Pluinage, Mokuzai Gakkaishi, **31**, 528 (1985).
- 14) 佐藤 清, 材料, **35**, 106 (1986).
- 15) 佐藤 清, 材料, **37**, 535 (1988).
- 16) 佐藤 清, 木材学会誌, **34**, 823 (1988).
- 17) 佐藤 清, 木材学会誌, **34**, 955 (1988).
- 18) 佐藤 清, 高橋秀明, 玉川欣治, 材料, **39**, 1521 (1990).
- 19) 佐藤 清, 材料, **39**, 1676 (1990).
- 20) 佐藤 清, 材料, **43**, 142 (1994).
- 21) 大倉淳一, 祖父江信夫, 平井信之, 第43回日本木材学会大会研究発表要旨集, p.324 (1993).
- 22) 大倉淳一, 村瀬安英, 又木義博, 第44回日本木材学会大会研究発表要旨集, p.204 (1994).
- 23) 小川真貴, 祖父江信夫, 日本木材学会中部支部大会講演要旨集, p.13 (1997).
- 24) S. T. ロルフ, J. M. パーソム, 横堀武夫監訳, “構造物における破壊と防止 = 破壊力学の応用”, p.76 (1981) 培風館.
- 25) D. P. Kendall, Watervliet Tech. Rep., **WVT-7044**, 1 (1970).
- 26) A. W. Porter, Forest Prod. J., **14**, 325 (1964).
- 27) G. R. Debaise, A. W. Porter and R. E. Pentoney, Mater. Res. Stand., **6**, 493 (1966).
- 28) A. P. Schniewind, T. Ohgama, T. Aoki and T. Yamada, Wood Sci., **15**, 101 (1982).
- 29) 今村博之, 岡本 一, 後藤輝男, 安江保民, 横田徳郎, 善本知孝編, “木材利用の化学”, 3章 (1986) 共立出版.
- 30) 西岡常一, 小原二郎, “法隆寺を支えた木”, p.137 (1982) 日本放送出版協会.

書 評

“X線分析の進歩 第28集”

日本分析化学会, X線分析研究懇談会 (編集)

(1997年, アグネ技術センター発行, B5判, 416ページ, 本体5500円)

本書には, 第32回X線分析討論会で発表された主な論文, および討論会期間中に投稿された論文が収録されている。従来よりも速報性を高めたとのことで, 研究論文集として歓迎するべきことである。編集者の努力に敬意を表したい。研究報告は, I. X線光電子分光法, II. 固有X線の化学シフト, III. 蛍光X線分析, IV. 全反射蛍光X線分析, V. X線回折, VI. EPMA, VII. 装置開発・その他, の7章に分類され, 300ページに27編の論文が含まれている。更に, VIII. 既報X線粉末回折図形索引, IX. 1995, 1996年X線分析のあゆみ (文献集, 講演会, 研究会一覧等), X. X線分析関連機器資料, XI. 既刊総目次, XII. X線回折の進歩28総目次, と続く。VIII以降の部分で116ページであるから, 簡単な付録ではなく, この部分だけでも実用価値のある資料集である。

本書に収録されているのは, X線分析の最新の応用例である。X線分析を用いて研究, 開発を行っている人たちにとって, 有用な実用的情報源になろう。表面, 界面, 薄膜等の研究が多いのは, X線分析という方法の特徴であると共に, 材料技術の現状を反映しているためであると思われる。X章の機器資料に, 装置の価格, 納期まで書かれたものがあり, 現場の研究者には役に立つ情報であろう。研究論文集であるから, 各分野の専門家を対象としている。使われている用語に解説は無く, 各論文が相互の関連性を考慮して書かれているのでもない。各分野の入門的な解説集として使うのは困難であろう。学会等の講演を理解できるだけの専門知識が, 本書を読むためには必要である。それだけ詳細な情報が, 本書には詰まっていると言える。通読するのではなく, 自分に必要な部分を集中的に読み, 参考にするための本であろう。

(京都工芸繊維大学 猿山 靖夫)