木材素材, 熱処理材および PEG 含浸材の破壊じん性†

佐 藤 清* 高 橋 秀 明** 玉 川 欣 治**

Fracture Toughness Values of Solid Wood, Heat-treated Wood and PEG Impregnated Wood

by

Kiyoshi SATO*, Hideaki TAKAHASHI** and Kinji TAMAKAWA**

Fracture toughness testing was carried out on solid wood, heat-treated wood and polyethylene glycol (PEG) impregnated wood.

The main results are summarized as follows:

(1) The load-displacement curves had very different patterns for solid wood, heat-treated wood and PEG impregnated wood.

(2) The fracture toughness value of the heat-treated wood was equal or larger than that of the solid wood.

(3) The fracture toughness value of the PEG impregnated wood was larger than those of the solid wood and the heat-treated wood.

(4) The Young's modulus of the heat-treated wood was larger than that of the solid wood.

(5) The Young's modulus of the PEG impregnated wood was smaller than that of the heat-treated wood.

(6) The cumulative acoustic emission energy of PEG impregnated wood was very much smaller than those of the solid wood and heat-treated wood

Key words: Fracture toughness, Solid wood, Heat-treated wood, PEG impregnated wood, Load-displacement curve, Young's modulus, Acoustic emission (AE)

1 結 言

従来, 木材の寸法安定性を得る方法の一つとして, 木材の加熱処理が考えられていた. 木材を加熱処理した場合, 木材の機械的性質が変化することが, 以前から研究されている^{1)~7)}. 例えば, G. L. Clark と J. A. Howsmon¹⁾は, 400°F で 4.5 時間熱処理した maple の X 線回折パターンを撮影し, そのパターンから, 熱処理により, 材中のセルロースの結晶化の増加が認められ, また, 引張試験結果から, 熱処理材の引張強度が素材の値よりも 10% 以上増加したと報告している. また, 小原²⁾は, ヒノキにおける曲げ弾性係数と 130°C における加熱時間との関係を調べ, 加熱初期では弾性係数がいったん増加し, その後減少する, ということを報告している. R. O. H. Runkel und K. D. Wilke³⁾は, 曲げ強度および弾性係数は, 熱処理によって増大する, と報告している. しかし, 上述の実験結果とは異なる実験結果もある. この他にも, 熱処理材に関する報告がある^{4)~7)}. しかしながら, 熱処理材の破壊じん性に

関する研究は乏しい.

他方, 熱処理材は, 樹種あるいは熱処理温度, 熱処理時間にもよるが, 一般に素材よりもろくなり, 熱処理条件によっては, 機械的性質が素材よりも著しく低下する. それ故, 熱処理材の, これらの欠点を改良することが是非必要である.

そこで, 本報では, 熱処理材の欠点を改良するための方法の一つとして, 熱処理材にポリエチレングリコール (以下 PEG と記す) 含浸処理を行い, PEG 含浸材の破壊じん性を測定した. 同時にアコースティック・エミッション (以下 AE と記す) およびヤング係数をも測定した. また PEG 含浸材の結果と素材および熱処理材の結果との比較も行った.

2 供試材および実験方法

2・1 供試材

供試材はスギおよびカバの素材, 熱処理材, 熱処理材に PEG を含浸させた PEG 含浸材である. なお, 熱処理材および PEG 含浸材は, 素材と同一板材の一

† 原稿受理 平成元年12月13日 Received Dec. 13, 1989

* 正 会 員 東北大学工学部 仙台市青葉区荒巻字青葉, Faculty of Engineering, Tohoku University, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai

** 東北大学工学部 仙台市青葉区荒巻字青葉, Faculty of Engineering, Tohoku University, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai

Table I. Conditions of heat-treatment.

Species	Heat-treatment temperature (°C)	Hold time for heat-treatment (hours)
Japanese cedar	180	4
Birch	180	4

部を加熱処理したものである。加熱処理はオートクレーブの中で行った。加熱処理条件を Table I に示す。

2・2 PEG 含浸処理

PEG 含浸処理用に使用した材料は、熱処理材の一部から木取ったものである。また、含浸用 PEG としては、PEG-4000 を用い、その比重は約 1.1 であり、含浸液は 30% 水溶液である。

含浸方法は次の通りである。まず、熱処理材を室温の水に約 48 時間浸し、水切り後、濃度約 30% の PEG 水溶液に浸し、液温を約 73°C まで上昇させ、73°C で約 50 時間保持後、PEG 水溶液から取り出した。その後、電気恒温槽内で 40°C にて約 72 時間保持して乾燥させた。

2・3 破壊じん性試験

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、切欠肩部にナイフエッジを木ネジで固定し、それにクリップゲージを装着して、切欠肩部変位を測定した。つぎに、試験片の木取り図の例を Fig. 2 に示し、本実験で用いた試験片の木取り方向を Table II に示す。なお、Table II 中の TL-RL は TL と RL の中間状態を示す。

破壊じん性試験は、容量 98 kN のインストロン 1185 および容量 9.8 kN の引張圧縮試験機を用い、クロスヘッド変位速度 0.5 mm/min で行った。試験の際、試験片に AE センサーを装着し、放出される AE をも同時に測定した。AE 計測系のフローチャートを Fig. 3 に示す。また、試験片の取り付け状態を Fig. 4 に示す。

破壊じん性 K_{Ic} は次式を用いて計算した。⁸⁾

$$K_{Ic} = \frac{P}{BW^{1/2}} \left(29.6 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 185.5 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} \right)$$

Fig. 3. Block diagram of AE measurement system.

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

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

Table II. Fracture planes on fracture toughness specimens.

Species		Specific crack alignment	No. of specimens
Japanese cedar	Solid wood	RL	5
	Heat-treated wood	RL	5
	PEG impregnated wood	RL	5
Birch	Solid wood	TL-RL	5
	Heat-treated wood	TL-RL	5
	PEG impregnated wood	TL-RL	5

$$+655.7 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 1017.0 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 638.9 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \quad (1)$$

ここで、 P : 荷重、 B : 試験片厚さ、 W : 荷重中心から測定した試験片幅、 a : 荷重中心から測定したき裂長さ。

Fig. 4. Loading device with test specimen.

ヤング係数は, 破壊じん性試験の荷重-変位曲線の初期の線形部分のコンプライアンスを用いて求めた。

2・4 ヤング係数の測定

線形弾性理論に基づく解析から, 破壊じん性試験片の弾性コンプライアンスは, 特定の試験片形状に対して, き裂長さの関数として表される。CT 試験片の無次元コンプライアンスは, 次式で表される。⁹⁾

$$\frac{BEV_M}{P} \quad (2)$$

ここで, E : ヤング係数, B : 試験片の板厚, V_M : 切欠肩部変位, P : 荷重。

Fig. 5. Dimensionless compliance as a function of crack length for a compact tension specimen.

式(2)で表される無次元コンプライアンスは, Fig. 5に示すように, き裂長さ a/W の関数として表される。⁹⁾ それ故, き裂長さが既知の試験片に対しては, 試験片のコンプライアンス (V_M/P) を測定すれば, ヤング係数 E を Fig. 5 の無次元コンプライアンスから求めることができる。なお, 本実験の場合, コンプライアンスは破壊じん性試験の荷重-切欠肩部変位曲線の線形部分から求めた。

3 実験結果および考察

3・1 荷重-切欠肩部変位曲線

Fig. 6 はスギの素材, 熱処理材, PEG 含浸材における荷重 P および AE 累積エネルギーと切欠肩部変位 V_M との関係を示した例である。荷重-変位曲線の最大荷重は, 素材の値と熱処理材のそれとはほぼ等しいが, PEG 含浸材の値は前 2 者の値よりも大きくなっている。また, 素材の荷重-変位曲線は比較的初期の段階から, 非線形性を示しながら荷重が増加し, 最大荷重到達後, 荷重は緩やかに減少する。それに対して, 熱処理材の荷重-変位曲線は素材に比べて線形領域が広く, 最大荷重の 2/3 位までは線形性を示し, その後, 非線形性を示しながら荷重が増加する。最大荷重到達後, 非線形性を示しながら若干減少し, その後は直線的に減少する。PEG 含浸材の荷重-変位曲線の傾向は熱処理材の場合と同じであるが, 最大荷重到達後は前 2 者の場合よりも急速に減少する。更に熱処理材の荷重-変位曲線の立ち上がりは素材のそれよりも急である。これは加熱処理^{2), 12)}により, 材中のセルロースの結晶領域が増加することと分子構造の変化により材の構造が剛になることによるものと思われる。また, PEG 含浸材の破壊強度は, 素材および熱処理材よりも増加しており, かつ, 荷重-変位曲線の立ち上がりも熱処理材より緩く, 素材に近づいている。これらの原因としては次のことが考えられる。PEG 含浸

Fig. 6. Load and AE cumulative energy versus displacement for Japanese cedar.

により, 材の細胞壁中に浸透した PEG により, 膨潤状態を作り, 壁の構造を動きやすい形に変化させるので材の構造全体がフレキシブルになる^{10), 11)}. このことより, 切欠き先端付近の応力勾配が緩和され, 組織敏感性が低下し, 大きな荷重に耐えられるようになったものと考えられる.

Fig. 6 より, PEG 含浸材の AE 累積エネルギーは素材の値よりも極端に小さく, 熱処理材では素材と PEG 含浸材の中間的挙動を示す. AE 累積エネルギーの差は破壊のメカニズムの相違を示唆するものと思われる.

カバの素材, 熱処理材, PEG 含浸材における荷重 P および AE 累積エネルギーと切欠肩部変位 V_M との関係を示した例が Fig. 7 である. 素材の荷重-変位曲線はスギの場合と同様に, 比較的初期の段階から非線形性を示しながら荷重が増加し, 最大荷重到達後, 緩やかに減少する. それに反し, 熱処理材は最大荷重点までは線形性を示しながら荷重は増加し, 最大荷重到達後は直線的にある点まで減少し, その後は緩やかに減少する. PEG 含浸材の荷重-変位曲線は最大荷重の約 6 割位までは線形性を示して荷重が増加し, その後非線形性を示しながら荷重が増加し, 最大荷重到達後は, 直線的にある点まで減少しその後は緩やかに減少する. 更に, 熱処理材の荷重-変位曲線は素材のそれよりも立ち上がっており, この傾向はスギの場合と同様であり, これは熱処理により材が剛になったことによるものと考えられる. また, PEG 含浸材の破壊強度はスギの場合と同様, 素材および熱処理材の値よりも増加しており, かつ, 荷重-変位曲線の立ち上がりは素材および熱処理材のそれよりも緩くなっている. これは PEG 含浸により, 材の構造全体がフレキシブルになり^{10), 11)}. そのことにより, 大きな荷重に耐えられるようになったものと考えられる.

Fig. 7 より, カバの AE 累積エネルギーはスギの AE 累積エネルギーの傾向と同様なことが分かる.

3・2 破壊じん性およびヤング係数

実験により求めた破壊じん性およびヤング係数の値

Fig. 7. Load and AE cumulative energy versus displacement for birch.

を Table III に示す. 熱処理材の破壊じん性は素材の値と同等かあるいは大きくなっている. また, ヤング係数はスギおよびカバ共に素材の値よりも大きい. これは前項に述べたのと同様な現象によるものと思われる.

PEG 含浸材の破壊じん性は素材および熱処理材の値よりも大きく, PEG 含浸材のヤング係数は熱処理材の値よりも小さくなっている. これは前項に述べたのと同様に, PEG 含浸により材がフレキシブルな構造となり, 高い荷重を支えることになったものと考えられる.

4 結 言

2 種類の木材の素材, 熱処理材, PEG 含浸材について, 破壊じん性, ヤング係数, AE を調べた結果, 次のことが分かった.

- (1) 荷重-変位曲線は, 素材, 熱処理材, PEG 含浸材によってかなり異なる.
- (2) 熱処理材の破壊じん性は, 素材の値と同等かあるいは大きい.
- (3) PEG 含浸材の破壊じん性は, 素材および熱処理材の値よりも大きい. これは膨潤により, 材の構造がフレキシブルになったことによるためである.
- (4) 熱処理材のヤング係数は, 素材の値よりも大きい.
- (5) PEG 含浸材のヤング係数は, 熱処理材のヤング係数よりも小さい. これは PEG 含浸により, 材全

Table III. Fracture toughness values and Young's moduli.

Species		Specific gravity	Specific crack alignment	Fracture toughness (MPa · m ^{1/2})	Standard deviation (MPa · m ^{1/2})	Young's modulus (MPa)	Standard deviation (MPa)	Moisture content (%)
Japanese cedar	Solid wood	0.32	RL	0.229	0.008	588 (E_R)	16	9~10
	Heat-treated wood	0.29	RL	0.233	0.009	814 (E_R)	18	7.4
	PEG impregnated wood	0.39	RL	0.305	0.012	647 (E_R)	15	9.3
Birch	Solid wood	0.65	TL-RL	0.602	0.015	1863 (E_{T-R})	26	8~9
	Heat-treated wood	0.63	TL-RL	0.716	0.021	2089 (E_{T-R})	29	7.5
	PEG impregnated wood	0.76	TL-RL	0.846	0.022	1726 (E_{T-R})	25	9.0

体がフレキシブルになったことに起因する。

(6) PEG 含浸材の AE 累積エネルギーは, 素材および熱処理材のそれらに比べて極端に小さい。

終りに, 本研究を遂行するにあたり材料のご提供をいただいた仙台ファニチア湯目智理事長とご支援をいただいた同本間克己常務理事および宮城県工業技術センター鈴木康夫氏に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) G. L. Clark and J. A. Howsmon, Ind. Eng. Chem., **38**, 1257 (1946).
- 2) 小原二郎, 岡本 一, 木材学会誌, **1**, 80 (1955).
- 3) R. O. H. Runkel und K. D. Wilke, Holz als Roh-und Werkstoff, **7**, 260 (1951).
- 4) 北原覚一, 中元寺昌之, 日林誌, **33**, 414 (1951).
- 5) A. J. Stamm, H. K. Burr and K. A. Kline, Ind. Eng. Chem., **38**, 630 (1946).
- 6) A. J. Stamm, Ind. Eng. Chem., **48**, 413 (1956).
- 7) 梶田 茂, 山田 正, 鈴木正治, 小松一雄, 木材学会誌, **7**, 34 (1961).
- 8) W. F. Brown, Jr., ASTM STP 463, 249 (1970).
- 9) A. Saxena and S. J. Hudak, Jr., Int. J. Fract., **14**, 453 (1978).
- 10) 佐藤 清, 材料, **37**, 535 (1988).
- 11) 後藤輝男, “木材利用の化学”, (今村博之・岡本 一・後藤輝男・安江保民・横田徳郎・善本知孝編), 19章 (1983) 共立出版
- 12) 北原覚一, “木材物理”, 第2章 (1967) 森北出版

書 評

“パソコンによるリモートセンシングデータ解析”

日本リモートセンシングデータ学会
出版委員会(編)

(1989年, 啓学出版(株)発行, B 5 判, 291ページ, 4800円)

今日, エレクトロニクスによって加速された地球規模の情報化は, その恩恵のグローバル化とその及ぼす影響の顕在化を, 一つの側面的特徴としている。なかでも, 典型的な一例, 衛星画像はそれを効果的なツールとして, 地球の観測, 例えば, 資源・環境の探査評価をはじめ広範な分野における種々の問題に一つの新しい役割を果たしていることは周知の通りである。リモートセンシング技術は, 通常, このような遠く離れた人工衛星からの宇宙, 地球上の詳細な画像を提供することに結びつけられた用語としてなじまれている。しかしながら, 広義には, その名の示すように, 遠隔計測, 中国名では遙感というように, 遠く離れた所から対象物を計測する探査技術全般にも通用する。公式には, Remote Sensing が使用されたのはミシガン大学での第1回環境リモートセンシングシンポジウム(1962)であり, その後, 米国ランドサット衛星観測が余りにも有名となった。別途, センシング技術の分野の進歩も著しい。さて, このリモートセンシング(探査)情報を解析処理する技術において, 培われた多角的な手法や画像化, それらの応用における情報知識獲得過程は, 当該分野のみならず, 他の多くの探査評価情報処理, さらに微視的構造特徴の顕在化といった広い分野においても役立てることができ, その周辺効果も少なくない。画面を数10万個の画素のデータを取り扱う大容量の記憶と高速演算の電子計算機実行には少し遅くても, 近年の高度化もあって, ある程度の限定範囲であればパソコン上でも可能である。第1部の基礎編では, リモートセンシングの概観と, リモートセンシングデータ, ソフトおよびハードウェア構成, パソコン画像処理方法などが, 第2部では, 数値地形モデル, ランドサットデータ解析, 情報表示支援システムから合成開口処理プログラム, 地表断裂解析プログラムはじめ, 3次元多重分光, 多重時刻画像出力などに至る種々の具体的応用例などが, 記述されている。執筆陣は, 第一線でアクティビティのある専門家32名から成り, それぞれの章ごとに, そのエキスパートの深い情報知識獲得過程をふまえた解説を行っている。読物構成でない点は別にして, マニュアル的解析技法の入門に終らない基本的あるいは要素的という意味を発揮できる内容となっている。環境地球資源探査では雲のない画像合成, 天気予測では雲画像というように, 目的による信号とノイズの区別, そしていかに対象物の情報の効果的な抽出・強調に創意工夫がされているかどうかは他の分野にも通じる。このような画像解析基礎のパソコン化領域での展開は, 教育的にも一つの新しい意義を含んでいると思われる。

(京都大学工学部 菅野 強)