

加熱処理したスギ製材の曲げ強度向上と実大材への適用

その1 関係式の構築および試験概要

Increase in MOR of cedar lumber by heat treatment and application in structural sizes

Part 1: Construction of expression and experiment description

秦一平¹, 廣石秀造¹, 阿久戸信宏², 溝口晴紀², 〇高村佳典³, 古谷亘³
Hata Ipppei¹, Hiroishi Shuzo¹, Akuto Nobuhiro², Mizoguchi Harunori², Takamura Yoshifumi³, Furuya Wataru³

Abstract: We examine the changes in strength of cedar lumber with a square cross section of 30,45,60mm when heat-treated at 180~220 °C for the purpose of increasing strength. In part 1, we present an empirical formula and test method. Hirai et al. expressed the relationship between the crystallization of cypress wood and the heating time as an empirical formula (1972) based on the Arrhenius equation. We propose an empirical formula that expresses the change in the strength of cedar wood in terms of heating temperature and time by applying the Euler method to this and setting a new experimental constant. This equation requires the internal temperature and experimental constants related to strength of the wood. Therefore, we measured the internal temperature of the wood during heat-treatment with thermo couples, and conducted a bending load test of the heat-treated cedar wood. The test results are listed in Part 2.

1. はじめに

木材需要拡大の動きが高まっている現在、森林面積の多くを占めるスギ材の有効利用が望まれるが、他樹種と比較して強度が低いという欠点がある。

著者らは既報^{[1],[2]}にて、気乾状態のスギ製材にさらに加熱処理を施し、性能を向上させる方法を提案した。そして、適切な温度・時間の条件で加熱を施すことで、放冷後のスギ材の曲げ強さ、見かけ曲げヤング係数が向上し、平衡含水率が低下することが示唆された。

一方、これを構造材として適用するには、加熱処理の温度と時間による強度変化の傾向把握と、材寸法を拡大した際の検討が必要である。本研究では加熱温度と時間、強度変化の関係を詳細に試験し、後述する平井氏らの研究に基づき定式化する。また、寸法を拡大した際にも同様に提案式を適用することを目的とする。

2. 平井氏らによる結晶性と熱処理時間の実験式

加熱による強度向上は含水率によって説明されることが一般だが、実際には強度の向上と低下が連続で確認されるため、傾向の把握にあたっては、熱分解等による強度低下を加味できる数理モデルが必要となる。

平井氏らは、ヒノキ材の動ヤング係数が加熱処理によって向上し、さらに長時間の処理で低下する、という結果を確認している^[3]。そして、この変化を木材内のセルロースの結晶化と相関関係があるとし、結晶化の比率をアレニウスの式に基づく実験式で示している。

本研究ではこの実験式を元に、温度上昇過程の考慮と実験定数の変更を行い、強度変化の定式化を試みた。

3. 結晶性と熱処理時間の実験式の拡張

平井氏らによる実験式を反応速度の式まで遡ると(1)、(2)式となる。時刻 $t + \Delta t$ での $x_{t+\Delta t}$, $y_{t+\Delta t}$ を前進差分とで表し、(1)、(2)を代入すると(3)、(4)式を得る。こうして、式中の a_t , b_t に加熱中の木材の温度上昇過程を当てはめられるようにした。このとき、式中の各要素 x , c , ΔE_C , ΔE_D , A , B は計算上の見かけの値となる。

木材の温度は実測したデータを使用する。また、各定数 c , ΔE_C , ΔE_D , A , B は曲げ試験の結果から求める。

$$\frac{dy}{dt} = ax - by \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = -(a + b)x \quad (2)$$

y : 加熱前後の結晶化セルロースの比率

x : 加熱前の結晶質に対する加熱後の非晶質の比

$a = A \cdot e^{-\frac{\Delta E_C}{RT}}$: 反応速度定数 (結晶化)

$b = B \cdot e^{-\frac{\Delta E_D}{RT}}$: 反応速度定数 (分解)

T : 絶対温度[K], t : 時間[hour], $R = 8.31$: 気体定数[J/K·mol]

c : 加熱前のセルロースのうち非晶質の割合

ΔE_C : 結晶化の活性化エネルギー [J/mol]

ΔE_D : 分解の活性化エネルギー [J/mol]

A : 結晶化の頻度因子, B : 分解の頻度因子

$$y_{t+\Delta t} = (1 - \Delta t \cdot b_t) \cdot y_t + \Delta t \cdot a_t \cdot x_t \quad (3)$$

$$x_{t+\Delta t} = \{1 - \Delta t(a_t + b_t)\}x_t \quad (4)$$

$y_{t+\Delta t}$: 時刻 $t + \Delta t$ での加熱前後の曲げ強さの比率

$x_{t+\Delta t}$: 時刻 $t + \Delta t$ での x の見かけの値
 $y_0 = 1$: y の初期値, $x_0 = c/(1 - c)$: x の初期値

$a_t = A \cdot e^{-\frac{\Delta E_C}{RT_t}}$: 反応速度定数 (強度向上)

$b_t = B \cdot e^{-\frac{\Delta E_D}{RT_t}}$: 反応速度定数 (強度低下)

T_t : 時刻 t での絶対温度[K], Δt : 刻み時間[hour]

4. 試験方法

本研究に用いる試験体は、30×30×480mm, 45×45×720mm, 60×60×960mmの相似形の無等級スギ角材である。また、加熱処理には熱風乾燥炉 (KS-2110) を使用した。加熱温度は、既報^{[1],[2]}にて最も性能向上がみられた 200℃を基準とし (既報では 150℃と表記されているが、これは予備実験に基づく補正值であり、実験操作上は 200℃)、温度制御の誤差を考慮した±20℃の変化幅で 180℃, 200℃, 220℃の3種を設定した。

4.1. 内部温度計測

各設定温度・寸法につき1体、計9体の温度計測を行った。計測には加熱温度に応じて T 型及び K 型の熱電対を用い、計測箇所は①: 断面中心, ②: ①と③の中間点, ③: 表面から 5mm, の3点の試験体温度と, ④: 木材周辺の雰囲気温度とした。(Fig. 1) ①~③は試験体の長さ方向の中央で、φ3mmの穴を材幅の中心深さまで空け、熱電対を挿入した。穴の密集を避けるため、②は材芯に対して対称となる位置とした。また、熱風の流入と計測中の抜けを防ぐため、穴を耐熱シーリング材 (ロックタイト SI5920) で満たした。

まず乾燥炉を予熱し、炉内温度の安定後、計測を開始して試験体を投入した。内部温度の上昇が完了するまで加熱し、その後取り出して 20℃下の室内にて 30℃程度に放冷されるまでの過程を 1 秒ごとに計測した。

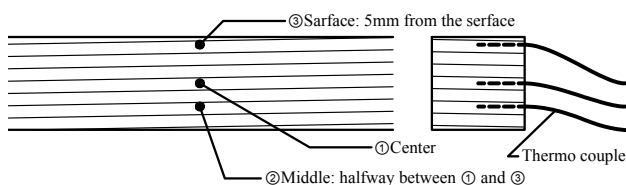


Fig. 1 Position of thermo couples

4.2. 曲げ载荷試験

本試験では、加熱処理前後の木材の強度性能変化を曲げ载荷試験によって検証した。まず、試験体の寸法・質量の計測を行い、弾性範囲内での曲げ载荷試験によって加熱前の見かけ曲げヤング係数 E_0 を計測した。各加熱条件に対して試験体数は 12 体に設定し、曲げヤング係数の偏りが小さくなるように均等に配分した。そして、配分した条件で加熱処理を行い、20℃下の室内

で 3 日以上放冷・養生した後、再度寸法等の計測を行い、曲げ試験にて加熱後の見かけ曲げヤング係数 E と曲げ強さ σ を計測した。また、破壊後の試験体について、JAS^[4]に準じた全乾法にて含水率を算出した。

曲げ試験規格は 30mm 角については「JIS Z 2101 木材の試験方法」^[5]より中央集中载荷方式、45, 60mm 角については「構造用木材の強度試験マニュアル」^[6]に準じて行った。各試験体の载荷条件を Table 2 に示す。加熱前の载荷荷重は、予備試験によって最大荷重を推定し、その 40%の値とした。変位計測には 30, 45mm 角にレーザー変位計 (LB-80)、60mm 角に接触式変位計 (DTH-A-100)を用い、荷重計測には容量 50kN のロードセル (TCLM-5A)を用いた。

Table 1 Heating time

	30×30mm			45×45mm			60×60mm		
	180°C	200°C	220°C	180°C	200°C	220°C	180°C	200°C	220°C
Untreated	2.0	1.5	1.0	3.0	2.3	1.2	4.0	3.0	2.1
Untreated	4.3	3.0	2.1	10.0	4.0	2.3	21.8	10.0	3.0
Untreated	6.5	4.3	2.1	21.8	10.0	4.0	45.0	3.0	2.1
Untreated	9.7	4.3	2.1	4.0	2.3	1.2	9.0	3.0	2.1
Untreated	21.8	10.0	4.0	1.0	1.5	1.0	16.0	4.5	3.0

Table 2 Loading setup

	30×30mm	45×45mm	60×60mm
Span [mm]	420	630	840
1/2 Shear span [mm]	Center-Point Loading	202.5	270.0
Speed of testing [mm/sec]	0.09	0.10	0.13
Test load before heating [N]	840	2800	5200

5. まとめ

本報では、加熱処理を施した木材の強度変化を提案式で表した。また、式中の実験値を求めるための試験方法を示した。次報では、これらの試験結果を示し、実験値の算出および提案式の評価を行う。

6. 参考文献

- [1]高鹿雅樹, 秦一平, 廣石秀造, 市川達也: 高温加熱した杉材の曲げ強度性能試験 その 1 試験概要および加熱による材料状態の検討 日本建築学会大会学術講演梗概集, 東北, 構造Ⅲ, pp.273-274, 2018
- [2]市川達也, 秦一平, 廣石秀造, 高鹿雅樹: 高温加熱した杉材の強度性能試験 その 2 評価方法および曲げ試験結果 日本建築学会大会学術講演梗概集, 東北, 構造Ⅲ, pp.275-276, 2018
- [3]平井信之, 祖父江信夫, 浅野猪久夫: 木材の圧電効果に関する研究(第 4 報)熱処理による木材の結晶性の変化と圧電効果 木材学会誌 Vol.18, No.11, pp.535-542, 1972
- [4]農林水産省, 日本農林規格 林産物 1 製材, 2018
- [5](財)日本規格協会, JIS Z2101 木材の試験方法, 2009
- [6](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, 2011