

カラマツ集成材の高温時強度に及ぼす水分蒸発の影響

カラマツ集製材 圧縮強度 引張強度
高温 水分蒸発 質量減少率

正会員 ○片倉 佑介*1 同 松本 匠*1
同 平島 岳夫*1 同 金城 仁*2
同 齋藤 潔*3

1. はじめに

2010年に施行された「公共建築物等木材利用促進法」により、構造用集成材の需要が高まっている。しかし、木構造部材においては、火災時に建物の可燃物が燃え尽きた後も、木構造部材の自己燃焼が継続して、荷重支持能力が失われる恐れがある。既往の研究では、カラマツ集成材の梁を対象とした載荷加熱実験を行い、放冷過程を含めた火災時耐力を得た¹⁾。その結果、ISO834-1による加熱1時間直後の耐力に対して、さらに3時間放冷した後の耐力が半減した。その理由として、加熱1時間直後では断面内部温度が低く、3時間放冷後の温度は断面全域で100℃～150℃となっていたことがあげられる。このときは、内部温度の上昇が耐力低下の原因と考え、追加の高温素材実験を実施した。この試験体には所定の温度で長時間(2日間)保持して十分に乾燥したものをを用いていた。結果として、常温時強度と高温時強度の差は比較的小さかった¹⁾。

以上のことから、高温時における強度は、温度よりむしろ水分蒸発時の影響を強く受けると考えられる。したがって、今回の実験では、高温加熱時における断面内部温度と質量の時間変化を把握し、その条件下での強度を得て、木材の高温時強度に及ぼす水分蒸発の影響を把握することを目的とする。

2. 高温引張実験

2.1 実験概要

表1に示すように、引張強度実験の条件は、温度および加熱時間とした。

2.2 試験体

試験体の樹種はカラマツ(長野県産)、強度等級はE95-F315とした。試験体の寸法を図1に示す。試験体の寸法は105×105×315mmで、試験部は30×30mmの正方形断面とした。既往実験¹⁾では試験部端部での破壊が目立ったため、形状を見直した。

2.3 実験方法

表1 引張強度実験の条件

目標温度	加熱時間							試験数
	0.5時間	1時間	1.5時間	2時間	4時間	8時間	32時間	
75℃	1	1	1	1	1	1	1	6
100℃	2	2	1	2	1	2	2	12
125℃	1	1	1	1	1	1	1	6
150℃	2	2	1	2	1	2	2	12
175℃	1	1	1	1	1	1	1	6
常温	8							8
	計							50

試験体の加熱には200℃まで加熱可能な恒温ヒーターを用いた。ヒーターの設定温度は目標温度とした。100℃および150℃の実験は2回に分けて行った。1MNの引張試験機を用いて100kNレンジで実験を行った。チャックには板厚18～35mmの鋼板試験用チャックを用いた。ヒーターから取り出して、3分後に引張実験を開始し、その載荷時間は2～5分程度であった。

2.4 実験結果

引張実験の加熱時間-質量減少率関係を図2に、加熱時間-引張強度関係を図3に質量減少率-引張強度関係を図4に示す。

本実験において、加熱に伴う質量の減少は、水分の蒸発によるものである。加熱前と加熱後の試験体の質量の変化から質量減少率を式(1)のように定義して算定した。

$$R_t = \frac{W_{ini} - W_t}{W_{ini}} \quad (1)$$

R_t : 加熱t時間後の質量減少率

W_{ini} : 加熱前における試験体の初期質量[g]

W_t : 加熱t時間後の質量[g]

常温実験8体では、引張強度のばらつきが平均から最大で±35%で、基準材料強度³⁾22.7N/mm²に対して平均値は44.8N/mm²であった。図2に示すように、加熱時間に伴い、質量減少率が増加した。加熱32時間では質量減少率が6%から11%であった。図3・図4に示すように、加熱時間や温度および質量減少に伴う強度の低下が明確にみられなかった。高温加熱時の引張強度残存率は最も低いもので約68%であった。

常温実験での強度のばらつきが大きいことから試験体ごとの個体差が強度に大きな影響を与えているとかがえる。このことから、引張試験は同条件の実験回数を増やした再検討が必要と考える。

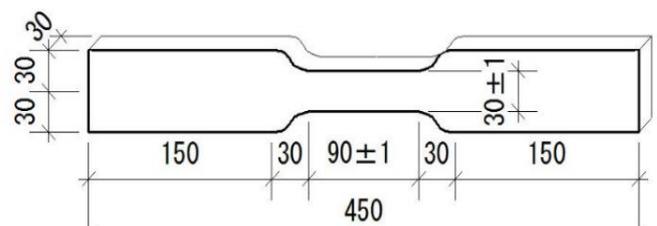


図1 引張試験体図

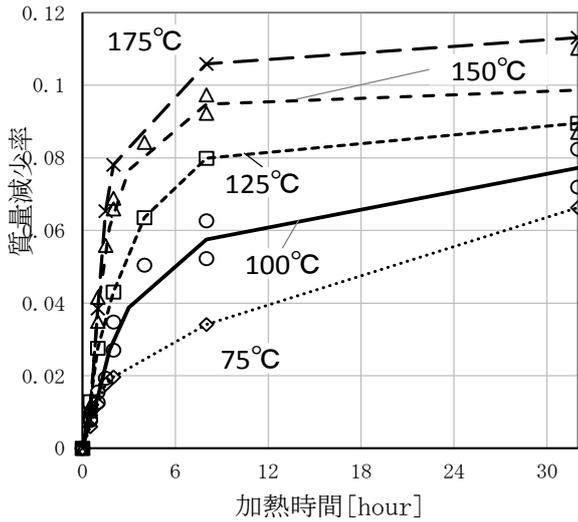


図2 加熱時間—質量減少率関係

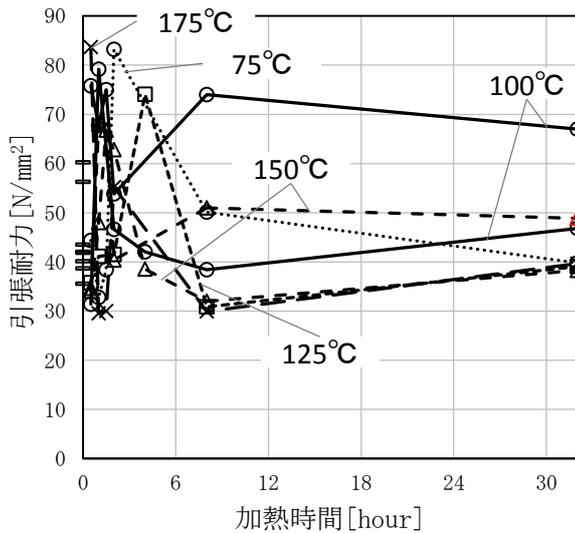


図3 加熱時間—引張強度関係

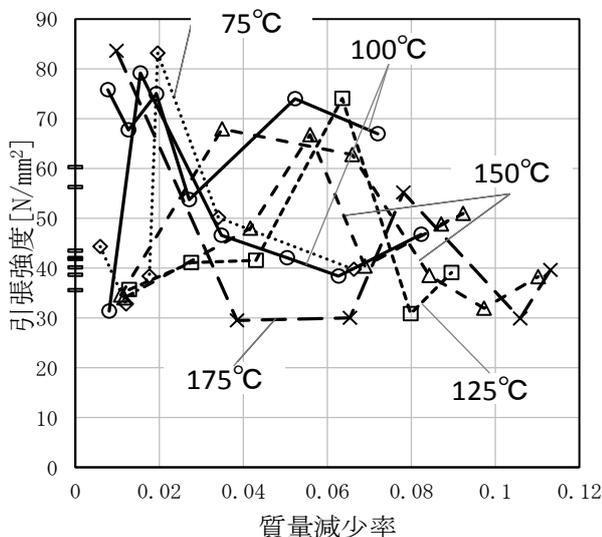


図4 質量減少率—引張強度関係

引張実験では、強度が破壊状況により大きく変化した。破壊状況を写真1(a)および(b)に示す。温度100°Cで0.5h加熱した試験体(a)では、引張強度が31.4N/mm²であり、繊維方向に対して斜め方向に亀裂が入り破断した。1h加熱した試験体(b)では、引張強度が79.2N/mm²であり、繊維方向に対して平行に亀裂が入り破断した。

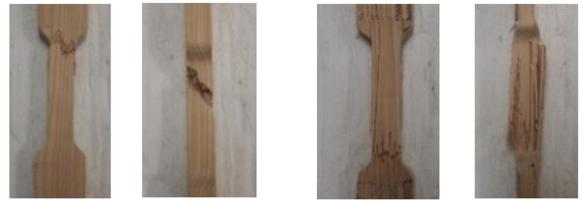
3. 高温圧縮強度実験

3.1 実験概要

表2に示すように、圧縮強度実験の条件は、温度および加熱時間とした。100°C・125°C・150°Cの実験においては、熱電対を挿入した温度測定用試験体を他の試験体とともに加熱し、試験体の内部温度を調べた。

3.2 試験体

試験体の樹種はカラマツ(長野県産)、強度等級はE95-F315とした。試験体の寸法は105×105×315mmとした。ラミナの厚さは26.25mm、ラミナの積層数は4である。これは、既往実験¹⁾の試験体と同じ寸法である。加熱中、試験体両端の木口面は厚さ25mmのファイバークラケットで被覆した。温度測定用試験体における内部温度測定位置を図5に示す。



(a)100°C加熱0.5h後破壊状況 (b)100°C加熱1h後破壊状況

写真1 破壊後の引張試験体

表2 高温圧縮実験の条件

目標温度	加熱時間							試験数	
	1時間	2時間	4時間	8時間	16時間	31時間	66時間		
75°C	1	1	1	1	1	1	1	5	
100°C	2	2	2	2	2	2	2+(1)	14+(1)	
125°C	1	1	1	1	1	1	1+(1)	7+(1)	
150°C	2	2	2	2	2	2	2+(1)	14+(1)	
175°C	1	1	1	1	1	1	1	5	
常温	5							5	
								計	50+(3)

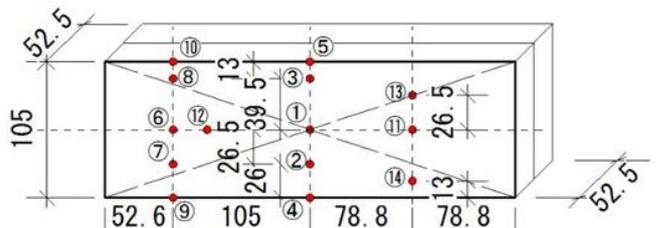


図5 試験体内部温度測定位置
(接着前の試験体半分の図)

*1 千葉大学大学院工学研究科
*2 ベターリビングつくば建築試験研究センター
*3 齋藤木材工業 株式会社

*1 Graduate School of Engineering, Chiba University
*2 Tsukuba Building Research Test Laboratory
*3 Saito Wood Industry Co.,Ltd.

なお、文献²⁾に記載される構造用木材の強度試験法では、縦圧縮強さに関する試験体の長さは横断面の短辺の6倍(径長さ比:6)とすることとなっている。しかし、本実験ではヒーター寸法の都合で径長さ比を3とした。

3.3 実験方法

試験体への加熱には、200℃まで加熱可能な恒温ヒーターを用いた。ヒーターの設定温度は、加熱開始時には目標温度の+5℃とし、加熱開始から4時間の時点で目標温度に合わせた。圧縮用試験体はヒーターに最大8体までしか入らないため、100℃および150℃の実験は2回に分けて行った。温度測定を行う実験の温度測定間隔は5分とした。加熱時間-試験体内部温度関係を図6に示す。125℃の実験では、ヒーターの誤作動により加熱温度が150℃になっている部分があるが、それ以外は目標温度に対して+10℃の範囲で加熱することができた。圧縮実験には、載荷能力1MNの圧縮試験機を用いた。試験体をヒーターから取り出した後、速やかに質量と寸法を測定し、すぐに圧縮実験を行った。ヒーターから取り出し、実験が終了するまでの時間は概ね10分であった

3.4 実験結果

加熱時間-質量減少率関係を図7に、加熱時間-圧縮強度関係を図8に、質量減少率-圧縮強度関係を図9に示す。

常温実験5体では、圧縮強度のばらつきが平均値から±8%の範囲であった。高温時における圧縮強度と比較するための常温時の圧縮強度の値は平均値の43.3N/mm²を用いた。E95-F315の圧縮に対する基準材料強度³⁾26.0N/mm²に対して1.67倍であった。

図7に示すように、加熱時間に伴い、質量減少率が上昇した。加熱開始から4時間程度までは、質量減少速度が大きかったが、その後は質量減少速度が徐々に小さくなった。加熱66時間では質量減少率が8%から10%であった。図8に示すように、加熱直後から圧縮強度は低下し、加熱を開始してから2時間から4時間の範囲で圧縮強度が最低となるものが多かった。

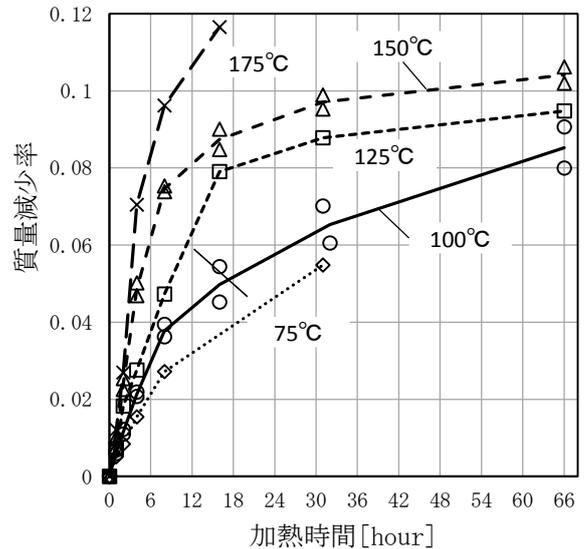


図7 加熱時間-質量減少率関係

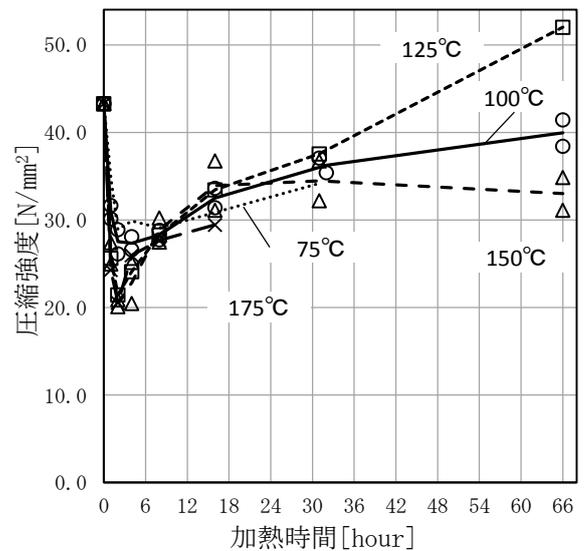


図8 加熱時間-圧縮強度関係

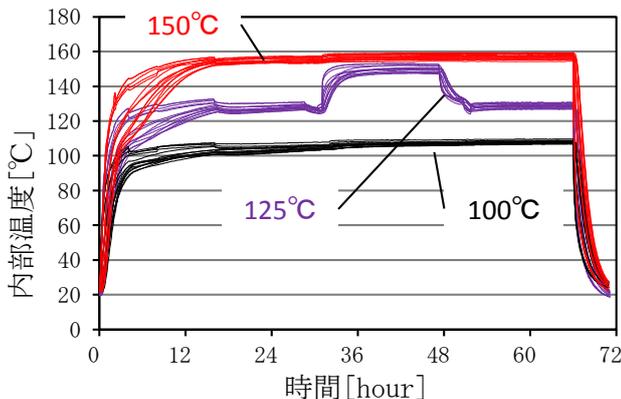


図6 加熱時間-内部温度関係

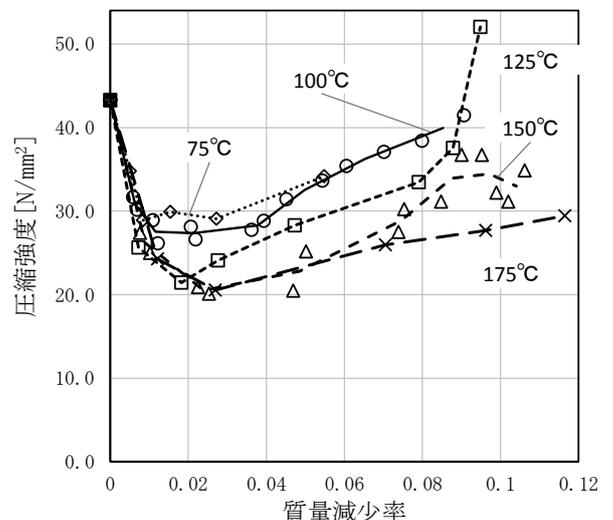


図9 質量減少率-加熱時間関係

加熱 8 時間以降では、ほぼ全ての実験で強度が増加した。加熱 66 時間後の圧縮強度は 100℃では常温時強度にまで回復した。既往実験¹⁾の結果に関して 100℃で強度が低下していなかったのは、強度が回復した時点で実験を行っていたためだと考えられる。加熱温度が高くなると強度回復の割合が小さくなり、150℃で 66 時間加熱した試験体は常温時強度の 0.76 倍位までの回復であった。

図 9 に示すように、ほとんどの実験で質量減少率が 1%から 4%の時に圧縮強度が最小となった。加熱温度が上昇すると圧縮強度は低下する傾向がみられ、75℃では常温時の 0.67 倍の低下だったのに対し、175℃では常温時の 0.47 倍まで減少した。その後、質量減少率が 5%以上となり、徐々に増加する過程では強度が回復した。圧縮強度の最低値は常温から 125℃の範囲では徐々に低下するが、125℃から 175℃の範囲ではあまり圧縮強度が低下しなかった。

圧縮試験体の破壊状況を写真 2(a)・(b)・(c)・(d) に示す(括弧の中の数字は圧縮強度)。短時間加熱(1 時間または 2 時間)の試験体(a)・(c)では、繊維に垂直、あるいは斜め方向の破壊が発生し、徐々に応力が低下した。長時間加熱(66 時間)の試験体(b)・(d)は、繊維と平行に亀裂が発生し急速に応力が低下した。加熱時間の違いにより、明確な破壊状況の違いが見られた。他の加熱温度の試験体にも同様の破壊傾向があった。

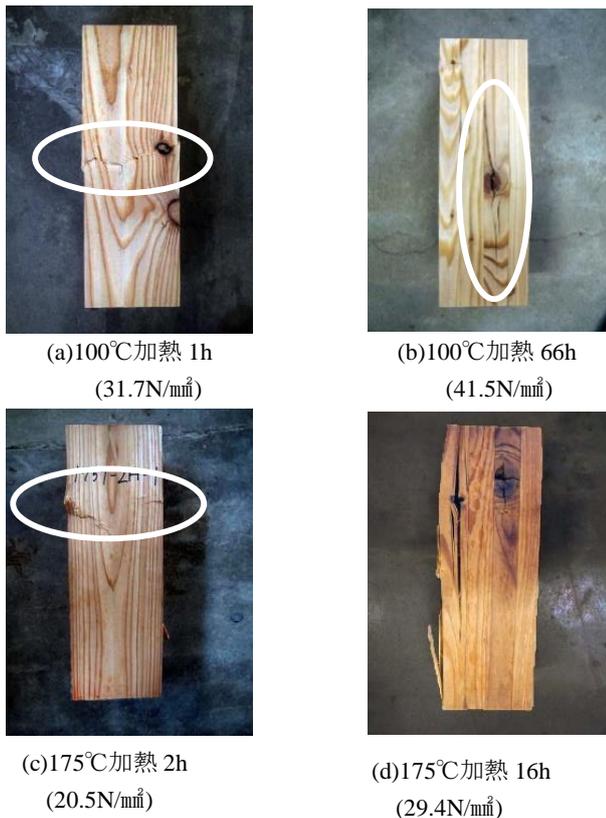


写真 2 破壊後の圧縮試験体

4. 質量減少率と圧縮強度の関係

Popovics のコンクリート強度—歪関係式⁴⁾を参考に、図 9 の近似式(2)を作成した(図 10)。n の増減で、それぞれの加熱温度に対応させている。

$$\frac{St}{St_0} = 1 - \frac{0.08n^{R_t/s}}{1.94n - 5.2 + 0.35(R_t/s)^{kn}} \quad (2)$$

$$k = \frac{5 \times 10^{-4}}{s} + 0.79 \quad s = \frac{5 \times 10^{-4}}{n} + 0.0153$$

$\frac{St}{St_0}$: 圧縮強度残存率

R_t : 質量減少率

n : 加熱温度 T によって定まる係数

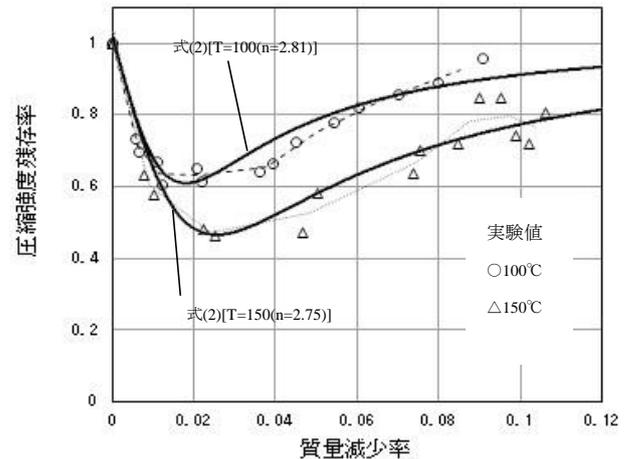


図 10 式(2)と実験値の比較

5. まとめ

- 1) 木材の高温圧縮強度には、図 9 に示す通り、質量減少率の影響が明確にみられた。質量減少率が 0.01~0.04 の時に圧縮強度が常温時強度の 0.46~0.67 倍となり最小となった。
- 2) 加熱を継続し、質量減少率が 0.05 を超えると圧縮強度が回復する傾向がみられた。150℃以上では、常温時強度の 0.76 倍程度の回復であった。
- 3) 引張実験に関しては、温度や質量減少率に比べ、試験体素材のばらつきによる影響が大きいものの、高温時でも基準強度を下回るほどの強度低下は見られなかった。
- 4) 圧縮強度残存率—質量減少率関係を数式化した。

【参考文献】

- 1) 金城仁、齋藤潔、松本匠、堀尾岳成、遊佐秀逸、平島岳夫：構造用集成材梁部材の火災時耐力その 1、その 2、その 3、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)pp.257-262, 2014. 9
- 2) 日本建築学会：木質構造限界状態設計指針(案)・同解説、2003.10
- 3) 日本建築学会：木質構造設計基準・同解説、2006.12
- 4) Sandor Popovics : A NUMERICAL APPROACH TO THE COMPLETE STRESS-STRAIN CURVE OF CONCRETE, CEMENT and CONCRETE RESEARCH. Vol.1 .3 , pp . 583-599 , 1973

*1 千葉大学大学院工学研究科

*2 ベターリビングつくば建築試験研究センター

*3 齋藤木材工業 株式会社

*1 Graduate School of Engineering, Chiba University

*2 Tsukuba Building Research Test Laboratory

*3 Saito Wood Industry Co.,Ltd.