スギ・カラマツ構造用集成材の高温時の圧縮挙動に及ぼす水分の影響

INFLUENCE OF MOISTURE ON COMPRESSIVE BEHAVIOR OF JAPANESE CEDAR AND LARCH
STRUCTURAL GLULAM TIMBERS AT ELEVATED TEMPERATURE菊地 毅之^{*1}, 平島 岳夫^{*2}

Takayuki KIKUCHI and Takeo HIRASHIMA

In this study, elevated temperature compression tests of structural glulam timber were conducted in order to investigate the influence of temperature and moisture on the compressive behavior, and the following results were indicated. Compressive strength and modulus of elasticity of the specimen exposed to heating effects below 200 °C decreased significantly up to 1 hour and became the minimum during 1 to 2 hours. Influences of moisture in the specimens on the compressive behavior were discussed from the test results on the relationships of heating time and weight change. The stress-strain curve for compression was approximated by Richard's equation.

Keywords: Structural glulam timber, Elevated temperature, Moisture, Compressive strength, Modulus of elasticity, Stress-strain curve

構造用集成材, 高温, 水分, 圧縮強度, 弾性係数, 応力-ひずみ曲線

1. はじめに

木材は熱伝導率が小さいため, 大断面部材を用いた木質構造では, 火災加熱を受けたときに炭化層の内側(非炭化領域)の温度が低く, 非炭化領域で荷重を支持できる。一方, 木質部材の場合, 火災加熱後の放冷過程においても非炭化領域の温度が徐々に上昇し, 部材の剛性と耐力は低下する^{1), 2)}。したがって, 木質構造の火災時における構造安定性を放冷過程も含めて検討するには, 非炭化領域の温度上昇に伴う剛性・耐力の変化を把握し, 木材の高温力学特性を適切に設定する必要がある。木材の含水率は強度に影響を及ぼすが, 高温時においても木材中の水分はその強度と弾性係数の変化に大きな影響を及ぼす³⁾。しかしながら, 水分の影響をより大きく受ける高温時の圧縮挙動に着目した研究は少なく, 解析で必要となる応力-ひずみ関係に関する高温時データもないのが現状である。

Eurocode5⁴⁾の付録では, 先進的な火災応答解析に用いるための高温力学特性として, 針葉樹の木材について水分の影響をも含む強度と弾性係数の温度依存性が示されている⁵⁾。Eurocode5の値は, 火災加熱を受ける部材の曲げ挙動の分析⁶⁾により与えられたものであり, 国産材を用いた梁・柱の載荷加熱実験での挙動も比較的追跡できている^{1), 2)}。また国産材の高温素材試験データも近年蓄積されている。加来らは, 含水率を実験変数とした無欠点小試験体の高温

曲げ実験により, 含水率30%以下のスギとケヤキでは, 含水率が高いほど100℃未満における曲げ強度とヤング係数の低下が著しくなる結果を示した⁷⁾。また渡辺らは, 更にヒノキ・カラマツ・ベイマツのデータを加えて, 高温時の曲げ強度・ヤング率と含水率の関係を樹種別に定量化した⁸⁾。一方, 木材の水分が高温特性に及ぼす影響は圧縮挙動時に顕著であると報告されているが⁹⁾, 素材の高温圧縮実験により水分の影響が検討された研究例は少ない。またファイバーモデルを用いた構造解析では圧縮・引張それぞれの高温時の応力-ひずみ関係を与える必要があるが, その実験データはなく, 応力-ひずみ関係を得るには軸方向加力の実験が必要である。

そこで本研究では, スギ・カラマツ構造用集成材の高温圧縮挙動に及ぼす水分の影響把握および高温時応力-ひずみ関係の取得を目的として, その高温圧縮実験を実施した。既往研究^{3), 7), 8)}では含水率を実験変数として水分の影響が検討されたが, 本研究では梁・柱の載荷加熱実験^{1), 2)}に用いた構造用集成材の解析モデル取得も1つの目的であるため, 含水率ではなく加熱時間を主たる実験変数として水分の影響について検討した。木材の加熱において, 水分の蒸発や熱分解による重量減少が起こるが, 本研究では水分量の変化(蒸発量)は試験体重量の変化と同じとし, 高温圧縮強度・ヤング率と試験体重量の変化の関係を考察した。なお本報告は, 既報^{9), 10)}の実

^{*1} 千葉大学融合理工学府 大学院生・修士(工学)／
千葉大学工学部 技術職員

^{*2} 千葉大学大学院工学研究院 教授・博士(工学)

Grad. Student, Graduate school of Science and Engineering, Chiba Univ., M.Eng./
Tech. Staff, Faculty of Engineering, Chiba Univ.

Prof., Graduate School of Engineering, Chiba Univ., Dr.Eng.

験データを再整理して考察を加えたものである。

2. 実験概要

2.1 実験条件および試験体

実験条件は、Table 1～Table 3に示すように、樹種・ヒーターの設定温度・加熱時間とした。Table 2とTable 3の中の数字は試験体数を示す。シリーズ I では、コンプレッソメーターを用いて圧縮変形を測定し、スギとカラマツの荷重－変形関係を得た。一方、シリーズ II は、カラマツの圧縮強度のみを検討対象とした。なお、シリーズ II は、カラマツ梁の載荷加熱実験¹⁾に関連して実施されたものである。本研究では、常温実験をシリーズ I では15体ずつ、シリーズ II で5体実施した。シリーズ I の15体の常温圧縮強度のばらつきは、スギでは平均値 34.0 N/mm²に対する標準偏差が 3.50 N/mm²（変動係数：10.3 %）、カラマツでは平均値 48.5 N/mm²に対する標準偏差が 2.94 N/mm²（変動係数：6.1%）であった。シリーズ II のカラマツの常温圧縮強度の変動係数は 5 体の結果ではあるが、5.3%であった。これらのばらつきは、木材の試験としては小さいと考える。ばらつきが小さい理由は、構造用集成材を用いていることと、曲げや引張・せん断強度に比べて圧縮強度のばらつきが小さいためと考える¹¹⁾。以上より高温実験では、試験体数を 1 としても、加熱温度と加熱時間による圧縮強度の変化を把握できると考えた。

最大加熱時間は、試験体が十分に乾燥し重量減少が一定になる時間を想定し、シリーズ I では 22 時間、シリーズ II では 66 時間とした。シリーズ I で、シリーズ II より加熱時間を短くした理由は、試験体寸法が小さく 22 時間の加熱で水分の蒸発後における強度回復が確認できると考えたためである。また、高温履歴を経た後の圧縮強度を確認するために、加熱時間が最長の試験体を自然放冷した圧縮実験をシリーズ I で実施した。150℃を超える温度での長時間加熱は着火の危険性があるため、シリーズ I の 200℃実験での加熱時間は、スギは 4 時間まで、カラマツは 6 時間までとした。シリーズ I・スギ・200℃で加熱を行った際、4～5 時間の間でヒーター内の試験体の 1 つが着火していた。

試験体の材料データを Table 4 に示す。試験体に用いたラミナの等級は、スギは L70、カラマツは L100 とした。全試験体とも同一等級構成集成材とし、スギ試験体の強度等級は E65-F240、カラマツ試験体の強度等級はシリーズ I が E95-F285 でシリーズ II が E95-F315 である。接着剤にはレゾルシノール・フェノール樹脂を用いた。密度と含水率の値は、Table 5 に示す通り、シリーズ I では 100℃で 22 時間加熱した試験体、シリーズ II では 100℃で 66 時間加熱した試験体の重量から得た。本試験体の含水率は 8～9%程度で、カラマツの方がスギよりも若干大きかった。

試験体の概要を Fig.1（シリーズ I）および Fig.2（シリーズ II）にそれぞれ示す。全試験体とも繊維方向の圧縮試験体である。本研究では構造用集成材による柱や梁による挙動を検討するための実験であるため、ラミナ積層数を 3 または 4 とし、一般的な圧縮試験片の辺長 20～30mm（JIS Z 2101：2009）よりも大きな断面寸法とした。また、節による欠点も含む構造用集成材を対象とし、高温加熱直後に変位測定を行う都合、試験体の断面寸法はシリーズ I で 75×75mm とした。シリーズ II では 105×105mm とした。これより加熱時に断面内部に温度勾配が生じるため、Fig.1 と Fig.2 に示す

ように熱電対を挿入した温度計測用試験体を作成し、試験体の内部温度と加熱時間の関係を把握した。圧縮実験に使用する試験体には熱電対を挿入しなかった。

Table 1 Test program (All Series)

Series	Tree species	Thermal condition		Specimen size [mm]
		Constant temperatures[℃]	Heating time [hour]	
I	Cedar Larch	Ambient Temp., 60～200	0.5～22, Natural cooling	75×75×300
II	Larch	Ambient Temp., 75～175	0.5～66	105×105×315

Table 2 Test program (Series I)

Series I Thermal condition (Cedar & Larch)												Total	
Ambient Temp.	15											15	
Constant temperatures[℃]	Heating time [hour]										Natural cooling	<div></div>	
	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	22			
60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2		13
100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2		13
150	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2		13
200	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	11	

Table 3 Test program (Series II)

SeriesⅡ Thermal condition (Larch)								Total
Ambient Temp.	5							5
Constant temperatures[℃]	Heating time [hour]							↘
	1	2	4	8	16	31	66	
75	1	1	1	1	0	1	0	5
100	2	2	2	2	2	2	2	14
125	1	1	1	1	1	1	1	7
150	2	2	2	2	2	2	2	14
175	1	1	1	1	1	0	0	5

Table 4 Material data

Series	I		II
	Cedar	Larch	Larch
Lamina layer	25mm×3		26.25mm×4
Lamina Grade	L70	L100	L100
Specimen size [mm]	75×75×300		105×105×315
Oven-dry density [g/cm ³]	0.37	0.50	0.49
Water content [%]	8.5	9.0	9.3
Adhesive type	Resorcinol phenol resin adhesive		

Table 5 Oven-dry density & Water content

100℃		Mass		Oven-dry density		Water content	
Series	Time	Before	After	Value	Average	Value	Average
		[g]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	[%]
I	Cedar	22h-1	697.2	645.0	0.38	8.1	8.5
		22h-2	656.3	602.5	0.36	8.9	
	Larch	22h-1	920.2	841.2	0.50	9.4	9.0
		22h-2	929.6	856.3	0.51	8.6	
II	Larch	66h-1	1869.8	1700.3	0.49	10.0	9.3
		66h-2	1833.0	1686.5	0.49	8.7	

2.2 実験方法

実験に用いたヒーターおよび試験体の設置状況例（シリーズ I、200℃）を Fig.3 に示す。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。樹種と試験温度が同じ圧縮実験用試験体と温度計測用試験体をヒーター内に設置し、加熱開始後はヒーターの設定温度を一定に保持して、所定の時間まで試験体を加熱した。ヒ

ーターから取り出した後、速やかに試験体の重量を測定して圧縮実験を行った。ヒーターから取り出し、実験が終了するまでの時間はすべてのシリーズにおいて 10 分程度であった。圧縮試験機および変形測定治具を Fig.4 に示す。圧縮試験には荷重能力 1 MN のアムスラー圧縮試験機を用い、荷重計測用に試験体下部にロードセルを設置し、相対変位の測定にはコンプレッソメーターを用いた。シリーズ I の実験では、容量 5mm・精度 0.0005mm の変位計を左右に設置し、変位測定区間 150mm における圧縮変形量を測定した。

2.3 温度測定結果

ヒーター内に設置した温度測定用試験体の内部温度の推移を Fig.5 の(a)と(b)に示す。Fig.5 の(a)に示す断面寸法 75×75mm の場合は表面から 9.4mm の温度と中心部の温度差が約 20℃以下に収まっているが、Fig.5 の(b)に示す断面寸法 105×105mm の場合は表面から 13mm の温度と中心部の温度差は 20℃～30℃であった。また Fig.5 の(b)より、試験体表面で計測した温度は、加熱 3 時間位まで表面から 13mm の温度よりも 20℃～30℃高い温度を示した。150℃・200℃の実験では試験体内部の温度がヒーター設定温度に近づくのに 8 時間以上を要した。Fig.6 に示す試験体の内部温度は、Fig.1 に示す 3 箇所の温度測定結果の平均温度である。例えば、Fig.6 に示す 150℃のカラマツの結果は、Fig.5(a)に示す①～③の内部温度の平均値である。Fig.6 に示すように、スギとカラマツの内部温度の推移はほぼ同様であった。ただし、200℃のスギ実験では加熱中に試験体の赤熱・発火が生じたため 4 時間以降の実験は中止した。Fig.7(a)と(b)は、シリーズ I と同じ試験体寸法・加熱条件で行った追加実験において、ヒーターから取り出した後の圧縮強度実験中における試験体 (Fig.1 の①と③の 2 点の平均) の温度低下に関する結果である。木材は熱伝導率が小さいためヒーターから取り出した

後の試験体の内部温度の低下は比較的緩やかであるが、表面から 9.4mm の温度は圧縮実験が終了するまでの 10 分以内でも 10℃位の低下が見られた。試験体表面付近の温度はさらに低下していたと考えられる。本実験は高温加熱直後に実施した圧縮実験であるが、

Fig.3 Heater (Series I, 200℃)

Fig.4 Test setup for compression test (Series I, 200℃)

Fig.1 Test specimen (Series I)

Fig.2 Test specimen (Series II)

(a) An example of Series I (75x75mm, Larch, 150℃)

(b) An example of Series II (105x105mm, Larch, 150℃)

Fig.5 Result of temperature distribution

Fig. 6 Results of mean Temperature (Series I, 75x75mm)

圧縮強度を取得するまでに約 10 分の時間を要している。Fig.7 に示すように自然放冷から 10 分後のスギの温度低下は、60℃加熱で 10℃、100℃で 14℃、150℃で 24℃、200℃で 34℃であった。したがって、本実験で圧縮強度と試験体温度の関係を示すには、やや正確性に欠けるが、後述する Fig.10 の温度には、ヒーターから取り出す際の時間における試験体内部の平均値 (①～③) を採用した。

2.4 重量減少率の結果

Fig.8 の(a)～(c)に各シリーズの重量減少率を示す。シリーズ I の 22 時間および自然放冷とシリーズ II の 100℃および 150℃は実験条件より 2 体行ったため、そのデータを示す。ここで述べる重量減少率は、加熱前の重量に対する加熱直後までの重量変化の割合である。重量減少率は、ヒーターの設定温度 (以下、加熱温度) が高いほど、時間の経過に伴い増加した。Fig.8 の(a)に示す重量減少率の傾き (以下、重量減少速度) を見ると、加熱温度 150℃・200℃の場合は加熱開始 1～1.5 時間で比較的大きい。Fig.5 の(a)より加熱開始 1.5 時間付近では、内部温度が 100℃に至り温度勾配が緩やかになる時間帯であり、水分蒸発が多かったことが推測される。一方、加熱温度が 100℃以下の場合は、時間に概ね比例して重量が減少した。Fig.8 の(a)と(b)を比較すると、カラマツに対してスギの重量減少速度は 3 時間まではやや大きい傾向にあるが、その後は大差がなくなった。断面が大きなシリーズ II の結果は、シリーズ I に比べて重量減少速度は小さくなるが、1 日以上経過した後の重量減少率は同程度であった。

3. 高温加熱直後の圧縮実験結果

3.1 圧縮強度

Fig.9 の(a)～(c)に圧縮強度と加熱時間の関係を、Fig.10 の(a)～(c)に圧縮強度残存率と内部温度の関係をそれぞれ示す。0 分時にプロットした常温実験の結果より、圧縮強度のばらつきが分かる。同じ素材を用いた引張強度⁹⁾および曲げ強度¹⁰⁾の結果に比べて圧縮強度のばらつきは小さく、各条件 1 体の結果でも、圧縮強度が加熱時間により変化する傾向が分かる。Fig.9 の(a)に示すスギの結果より、常温時圧縮強度の平均値 34.0 N/mm²に対して加熱開始から 1 時間までの間に強度が大きく低下し、圧縮強度が最小となる時間帯は 1～2 時間であった。加熱温度が高いほど強度低下の速度が大きい傾向にあった。200℃の結果を除き、加熱開始 1 時間から 3 時間の間で、強度が小さいまま停滞する傾向にあり、3 時間以降から強

(a) Cedar

(b) Larch

Fig.7 Results of Additional heating test (75x75mm)

(a) Series I (Cedar, 75x75mm)

(b) Series I (Larch, 75x75mm)

(c) Series II (Larch, 105x105mm)

Fig.8 Mass reduction rate

(a) Cedar (Series I, 75x75mm)

(b) Larch (Series I, 75x75mm)

(c) Larch (Series II, 105x105mm)

Fig.9 Compressive strength

(a) Series I (Cedar)

(b) Series I (Larch)

(c) Series II (Larch)

Fig.10 Compressive strength reduction ratio

度の回復傾向が見られ、22 時間後の高温強度と加熱冷却後強度は元の強度にまで回復した。Fig.9 の(b)に示す同シリーズのカラマツでも、スギの結果と同様な傾向を示し、加熱開始 1~2 時間で圧縮強度が最小となり、その後強度の停滞が見られ、150℃と 200℃は先行して強度が回復する傾向にあった。Fig.8 の(a)と(b)に示すように、スギの 200℃の結果を除いた 60℃~200℃の加熱では、3 時間以降でその前よりも重量減少の速度が小さくなっており、水分の蒸発が緩慢になっていたと考えられる。また、Fig.5 の(a)と(b)に示すように、時間の経過に伴い断面内部の温度差が小さくなっており、水分の移動も緩慢になっていたと考える。以上から、水分の変化が小さくなるにつれて、強度が回復したと考える。Fig.9 の(c)に示す断面寸法が大きい場合は、強度低下の速度がやや小さく、加熱開始から 2 時間後まで強度が低下し続け、その後はシリーズ I と同様、停滞・回復の傾向にあった。全ての結果で加熱開始から 1 時間までの間に圧縮強度が大きく低下することに着目すると、その時間帯は内部温度の上昇速度が大きい但未だ 100℃には到達していないこと (Fig.5 と Fig.6 を参照)、重量の変化はそれほど大きくないこと (Fig.8 を参照) が分かる。したがって、この時間帯における圧縮強度低下の要因は、蒸気による熱軟化および水分移動による含水率の変化などが考えられる¹²⁾。既往の高温曲げヤング係数の結果に対して温度と含水率のそれぞれの影響度合いを考察した報告¹³⁾では、100℃未満では含水率の影響が支配的であることが示唆されている。本実験では、加熱開始から 1 時間までの重量減少がそれほど大きくないため、水分の移動が圧縮強度の低下に影響し、その後加熱時間が長くなるにつれてその水分移動が緩やかになり、強度の回復があったと考える。シリーズ I の加熱温度 150℃と 200℃の 1~2 時間での結果に着目すると、Fig.8 の(a)と(b)に示すように重量減少速度は大きい、その時間帯における強度低下は比較的小さく、圧縮強度が小さいまま保たれた。したがって 100℃付近で水分が蒸発している状況下では、圧縮強度が更に大きく低下することではなく、低い強度を維持 (停滞) したままであった。火災加熱を受ける木質部材の非炭化領域の強度を設定する上では、本実験では重量減少速度 (1 時間当たりの傾き) が最も大きくなる、加熱開始から 2 時間位までの挙動に着目すべきと考える。加熱時間が 2 時間を超えると、Fig.8 に示すように重量減少速度が徐々に緩やかになり、Fig.9 に示すように含水率の低下に伴う強度回復が始まった。

Fig.9 には実験結果に加えて、圧縮に関する構造設計用の基準材料強度¹⁴⁾ (以下、基準圧縮強度と称す) を示している。この基準圧縮強度に対して、常温時の圧縮強度は 1.7~2.1 倍の値を示したが、加熱開始から 1 時間後に下回るものがあつた。一方、要求耐火時間に応じて燃えしろの深さを減じた断面で構造計算する燃えしろ設計では非炭化領域の強度に基準材料強度の 2/3 倍の短期許容応力度を用いるが¹⁴⁾、本実験では短期許容応力度を下回るものはなかった。

Fig.10 の(a)~(c)に圧縮強度と温度の関係を示す。Fig.10 の(a)と(b)の温度は Fig.1 に示す 3 点の内部温度の平均値 (Fig.6 の温度と同値) であり、Fig.10 の(c)の温度は Fig.2 に示す 3 点①~③の内部温度の平均値である。縦軸の圧縮強度残存率は、常温実験による圧縮強度の平均値に対する高温圧縮強度の割合である。図中には Eurocode5 に示される針葉樹 (softwood) の強度残存率も示す。Eurocode5 の圧縮強度残存率は、100℃のときに 0.25 である。

Fig.10(a)~(c)の横軸に内部温度の平均値を採用したためか、70℃以下では Eurocode5 の残存率を下回る結果もあつたが、100℃までの実験結果と Eurocode5 の強度残存率は概ね対応した。本実験では、Fig.10 の(a)~(c)に示すように、内部温度が 60~70℃に至るまでに圧縮強度は大きく低下し、その後 100℃近くまでは強度が緩やかに低下した。ただし、内部温度が加熱温度に近づくにつれて、重量減少速度が緩やかになるため、強度が回復した。常温~70℃位までは、加熱温度が高いほど同温度での圧縮強度が小さくなる傾向が見られた。スギとカラマツの圧縮挙動に大きな違いはなかった。Eurocode5 の圧縮強度残存率の検討を行った Konig らは、乾燥による強度回復挙動を認識した上で、100℃~300℃の領域が 100℃以下の領域に比べてかなり小さいことを踏まえ、数値解析に用いる 100℃~300℃の強度を大まかに設定したと述べている⁶⁾。

以上に示した通り、一定温度下に近い状態で実施する荷重漸増実験では、圧縮強度は加熱時間に大きく依存する傾向があつた。加熱温度によって、重量減少速度の早さにも違いが生じ、木材内部の水分移動と含水率の変化に大きな影響を与えたと考えられる。したがって、木材の高温時強度を検討するためには、載荷加熱実験のような一定荷重下での温度漸増実験をも実施することが望ましいと考える。

3.2 圧縮弾性係数

Fig.11 の(a)と(b)にシリーズ I の実験による圧縮弾性係数 (以下、弾性係数) と加熱時間の関係を示す。弾性係数は、Fig.4 に示す測定区間 150mm における荷重-変位関係に基づき、比例上限荷重を最大荷重の 2/3、下限荷重を最大荷重の 1/15 として、その間の勾配を用いて計算した。変位の値は左右で計測した変位の平均値とした。試験体によっては変形が片側に集中し左右の変位が異なるものもあつたが、すべて同様に計算した。常温時の弾性係数は、常温実験 15 体の結果のうち、最大値と最小値を除いた 13 体の結果の平均値とした。常温時の弾性係数は、スギが 6.9 kN/mm²、カラマツが 12.6 kN/mm²であり、基準弾性係数に対してそれぞれ 1.1 倍と 1.3 倍であつた。Fig.11 の(a)と(b)に示す弾性係数と加熱時間の関係より、高温時における弾性係数にはばらつきが見られるが、加熱によって弾性係数が低下する現象は確認された。スギ・カラマツともに、加熱開始から 2 時間位までの間に弾性係数は低下し、概ね 1~2 時間の間で最小となり、常温時の弾性係数の約 0.5 倍まで低下したのもあつた。一方、常温時に対する高温時の弾性係数の低下は圧縮強度の場合ほどは大きくなかった。Fig.10(a)に示すスギの 200℃の結果を除き、加熱温度が高い場合ほど、弾性係数がより低下する傾向にあつた。また加熱 3 時間後位から弾性係数が徐々に増加することも確認された。これらの挙動は圧縮強度の結果に対応しており、弾性係数が低下する挙動においても、圧縮強度の場合と同様に水分の影響を受けたと考えられる。

Fig.12 の(a)と(b)に弾性係数と温度の関係を示す。図中横軸の温度は前述した Fig.10 のものと同じである。縦軸の弾性係数残存率は、常温実験より得た弾性係数に対する高温時の弾性係数の割合である。Fig.12 の(a)と(b)に示すように、ばらつきはあるものの全体的に内部温度が 100℃付近で最低値となり、100℃以降では水分の重量減少が落ち着き、弾性係数が回復する傾向も見られた。図中に Eurocode5 に示される針葉樹の弾性係数残存率も示しているが、本

Fig.11 Modulus of elasticity

Fig.12 Relative Modulus of elasticity

Fig.13 Load-Displacement relationship (Series I)

Fig.14 Stress-strain curve

実験より得た下限値は100℃までの Eurocode5 の低下勾配と概ね対応した。

3.3 荷重-変位関係

スギの荷重-変位関係を Fig.13 の(a)~(d), カラマツの荷重-変位関係を Fig.13 の(e)~(h)に示す。比較のために、各図とも常温実験による荷重-変位関係の一例も示している。Fig.13 の(a)に示すスギ・加熱時間1時間の結果を見ると、加熱温度が高い（内部温度上昇速度が大きい）ほど最大荷重と剛性の低下が見られた。Fig.13 の(e)に示すカラマツ・加熱時間1時間の結果でも同様な傾向が見られ、加熱初期の剛性と耐力は加熱温度の影響を受けることが確認された。一方、加熱時間2~4時間の結果を見ると、加熱温度が高い場合に剛性と耐力の大きくなるものがあり、乾燥に伴う強度と弾性係数の回復も見られた。Fig.13 の(d)に示すスギ・加熱時間4時間の結果を見ると、加熱温度200℃における最大荷重が大きく低下したことが分かる。

それぞれの荷重-変位関係を比較すると、最大荷重に至るまでの曲線の形に大きな差がないことが分かる。このことから、試験体の温度（加熱時間、加熱温度）および樹種によらず、1つの式で使用木材の応力-ひずみ曲線を数式化することを試みた。具体的には、次に示す Richard¹⁵⁾の式(1)と式(2)を用いて数式化した。

$$\sigma = \frac{(E - E_p)}{\left\{ 1 + \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} \right|^n \right\}^{\frac{1}{n}}} \cdot \varepsilon \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_c - 0.01E_p}{E - E_p} \quad (2)$$

ここで、 σ ：応力 [N/mm²], ε ：ひずみ

E ：弾性係数 [N/mm²], E_p ：硬化係数 ($E_p = E/1000$)

ε_1 ：漸近線の交点におけるひずみ, σ_c ：圧縮強度 [N/mm²]

n ：応力-ひずみ曲線のとがり具合を表す係数 ($n=4.0$)

ここでは、上式における E_p , ε_1 , n の設定値における妥当性を確認するため、圧縮強度と弾性係数の値は実験結果を代入する。

前述した通り、火災加熱を受ける木質部材の非炭化領域の高温力学特性を設定する際は、水分の影響を受けてその剛性と耐力が最も低下する時間を捉えるため、本実験結果としては加熱開始から2時間位までの挙動に着目した。そこで加熱2時間後の応力-ひずみ関係の実験値と式(1)による値（以下、計算値）を比較する。スギの結果を Fig.14 の(a)~(d), カラマツの結果を Fig.14 の(e)~(h)に加熱温度毎に示す。縦軸の応力比は、当該実験で得た圧縮強度に対する応力の比である。横軸のひずみは、変位測定区間150mmにおける相対変位の結果による平均ひずみである。Fig.14 の(a)では実験値の初期剛性が大きな値を示した影響で計算値との差が見られ、また Fig.14 の(g)ではひずみが0.003位のときに実験計測の不具合があり計算値と乖離した。一方、その他の大半の結果では、式(1)による計算値が実験値と概ね対応した。図中で比較する範囲をひずみ0.01までとした理由は、部材の耐火試験で ISO834¹⁶⁾に規定される限界変形時の平均縁ひずみが0.01であり、既往の木質構造の柱や梁の載荷加熱実験結果^{1), 2)}ではその半分位の変形で破壊に至ることが多かったからである。したがってひずみが0.01位までの応力-ひずみ曲線を適切に与えることができれば、細長比が比較的小さな柱の座屈荷重を接線係数理論にて計算可能となる²⁾。その際は、式(1)中で n の値が重要となるが、本実験結果から $n=4$ と定めた。

3.4 破壊性状

圧縮強度を取得した後に破壊させた試験体の様子を示す例として、加熱温度 150℃の例を Fig.15 の(a)と(b)に示す。スギ・カラマツともに、加熱時間 2.5 時間の例では、幅方向の亀裂が局所的に生じて、やや斜めにずれながら圧壊した。その他の大多数の試験体の破壊性状も同様であった。このタイプの破壊性状を示した試験体では、最大荷重以降、ひび割れが拡大しながら緩やかに荷重が低下した。一方、加熱時間 22 時間の例では、材軸方向（繊維方向）全体に亀裂が生じて、縦に割れながら脆性的に破壊するものが多かった。節を通る亀裂も見られ、節が起点となったような例もあったが、一辺が 75mm 以上の本試験体では、圧縮挙動に与える節の影響は比較的小さかったと考える。今回の試験体の節は、生節と死節（抜け節）があり、その節の補修は行っていない。

4. まとめ

スギとカラマツによる構造用集成材を対象として、加熱温度と加熱時間を実験条件とした圧縮実験を実施し、高温時の圧縮挙動に及ぼす水分の影響について検討した。以下にその結果をまとめる。

- 1) 圧縮強度は、加熱開始から 1 時間までの間に大きく低下し、1～2 時間の間で最小となった。その後は強度が停滞し、4 時間以降は乾燥に伴って強度が回復し、22 時間後・冷却後は元の強度にまで回復した。
- 2) 加熱開始から 1 時間までの間に圧縮強度が大きく低下した要因は、蒸気による熱軟化および水分移動による含水率の変化が大きく影響していることが推察された。また、内部温度が 100℃程度に達し、重量変化が最も大きかった 1～2 時間の間では、圧縮強度が低下したまま停滞している状態であった。
- 3) 試験体の断面平均温度が常温～70℃に至るまでの間に圧縮強度が大きく低下することを示し、常温強度に対する強度残存率は、Eurocode5 で示される 100℃までの強度残存率に近い値を示した。
- 4) 高温時における圧縮弾性係数の低下は、圧縮強度の結果と概ね同様であったが、常温値に対する残存率は圧縮強度より大きかった。また、圧縮強度の場合と同様に水分の影響が見られた。
- 5) 弾性係数残存率は、ばらつきは多いものの、内部温度が 100℃付近で最低値となり、実験結果の下限値は Eurocode5 の低下勾配に近い値を示した。
- 6) 荷重－変位関係より、加熱開始 1 時間での剛性・耐力は加熱温度が高い（内部温度上昇速度が大きい）ほど小さくなる傾向が確認された。
- 7) 圧縮域に関するひずみ 1%までの応力－ひずみ曲線を、Richard 式によって近似できることを示した。
- 8) 加熱時間 2.5 時間位までの場合は、最大荷重以降、ひび割れが大きくなりながら緩やかに荷重が低下し、脆性的な破壊性状を示すものが少なかった。

引き続き実験データの蓄積を行い、木材のばらつきによる検討を行うことが今後の課題である。また、今後は載荷加熱実験のような一定荷重下での温度漸増実験をも実施し、高温時の強度を検討する必要もあると考える。

(a) Cedar, left: 2.5h, right: 22h (b) Larch, left: 2.5h, right: 22h

Fig.15 Examples of failure of the specimens (Series I, 150℃)

謝辞

本報に示すシリーズ I の実験は、国土交通省平成 28 年度住宅・建築物技術高度化事業の助成を受け、大成建設・日本集成材工業協同組合・日建設計との共同研究の一部として実施された。シリーズ II の実験は、ベターリビング・齋藤木材工業との共同研究の一部として実施された。また千葉大学工学部建築学科の火災工学研究室のメンバーの協力の下で実験は実施された。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) H. Kinjo, S. Yusa, T. Horio, T. Hirashima, T. Matsumoto, K. Saito, Behaviours of Larch Glued Laminated Timber Beams Exposed to Standard Fire Heating During the Cooling Phase -Study on fire performance of structural glued laminated timber beams Part 1-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 80, No. 711, pp.831-840, 2015.5 (in Japanese)
金城仁, 遊佐秀逸, 堀尾岳成, 平島岳夫, 松本匠, 齋藤潔: 標準火災加熱を受けたカラマツ集成材梁の放冷過程における挙動, 構造用集成材梁の耐火性に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集 第 80 巻 第 711 号, 831-840, 2015. 5
- 2) T. Igarashi, S. Ishii, H. Yamashita, S. Baba, T. Someya, T. Hirashima, Buckling Strength and Failure time of Japanese Cedar and Larch Glued Laminated Timber Columns Exposed to Fire, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 85, No. 770, pp.639-649, 2020.4 (in Japanese).
五十嵐 樹, 石井 俊吾, 山下 平祐, 馬場 重彰, 染谷 朝幸, 平島 岳夫: 火災加熱を受けるスギ・カラマツ構造用集成材柱の座屈耐力および破壊時間, 日本建築学会構造系論文集 第 85 巻 第 770 号, pp.639-649, 2020.4
- 3) C. C. Gerhards, Effect of Moisture Content and Temperature of the Mechanical Properties of Wood: An Analysis of Immediate Effects, Wood and Fiber, 14 (1), pp. 4-36, 1982
- 4) Eurocode5: Design of timber structures – Part 1-2: General - Structural fire design, 2004
- 5) J. König, Structural Fire Design According to Eurocode 5 -Design Rules and Their Background, Fire and Materials, 29, pp.147-163, 2005
- 6) J. König, L. Walleij, Timber Frame Assemblies Exposed to Standard and Parametric Fires -Part.2 A Design Model for Standard Fire Exposure, Rapport I 0001001, Swedish Institute for Wood Technology Research: Stockholm, 2000
- 7) T. Kaku, et al, Influence of Water Content on the Mechanical Properties of Wood Exposed to Fire – Young's Modulus and Bending Strength of Cryptomeria Japonica and Zelkova Serrate under Various water-containing States at Elevated Temperature -, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 85, No. 769, pp. 451-453, 2020.3 (in Japanese)
加来千紘, 長谷見雄二, 上川大輔, 鈴木達朗, 安井昇, 腰原幹雄, 長尾博文: 含水率が火災加熱を受ける木材の力学的性能へ及ぼす影響－多様な含水状

- 態におけるスギ及びケヤキの高温時ヤング係数・曲げ強度の測定－, 日本建築学会構造系論文集 第85巻 第769号, pp. 451-453, 2020.3
- 8) S. Watanabe, et al, Dependence of Mechanical Properties of Wood on Temperature, Moisture Content and Tree Species at Elevated Temperature – Measurement of Young's Modulus and Bending Strength on Major Structural Tree Species and Examination of the Predictability of the Mechanical Properties at Elevated Temperatures Based on Basic Material Properties –, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 84, No. 761, pp. 1011-1020, 2019.7 (in Japanese)
- 渡辺秀太, 鈴木達朗, 長谷見雄二, 加来千紘, 上川大輔, 安井昇, 宮本康太: 多様な樹種の木材の力学的性能に対する温度・含水率の影響の把握と予測可能性, 構造用主要樹種に関するデータ構築と全乾密度に基づく予測可能性の検討, 日本建築学会構造系論文集 第84巻 第761号, pp. 1011-1020, 2019.7
- 9) Y. Katakura, T. Matsumoto, T. Hirashima, H. Kinjo, K. Saito, Effect of Moisture Evaporation on Strength of Larch-glulam at High Temperature, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp.131-134, 2015.7 (in Japanese)
- 片倉佑介, 松本匠, 平島岳夫, 金城仁, 齋藤 潔: カラマツ集成材の高温時強度に及ぼす水分蒸発の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.131-134, 2015.7
- 10) M. Ichikawa, S. Baba, T. Kataoka, T. Someya, T. Hirashima, Mechanical Properties of Cedar and Larch of Structural Glued Laminated Timber at High Temperature, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Fire Safety, pp.357-360, 2017.7 (in Japanese)
- 市川萌都, 馬場重彰, 片岡辰幸, 染谷朝幸, 平島岳夫: 高温加熱を受けるスギ・カラマツ構造用集成材の力学的特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp.357-360, 2017.7
- 11) H. Ido, S. Miura, H. Nagao, H. Kato : Strength properties of kuri (Japanese chestnut, *Castanea crenata*) timber Bending strength, compressive strength parallel to the grain, tensile strength parallel to the grain, shear strength parallel to the grain, and compressive strength perpendicular to the grain, Bulletin of FFPRI, Vol.12, No.3, pp.143-152, 2013.9(in Japanese)
- 井道裕史, 三浦祥子, 長尾博文, 加藤英雄: クリ製材品の強度性能-曲げ, 縦圧縮, 縦引張, せん断, めり込み-, 森林総合研究所研究報告, Vol.12, No.3, pp.143-152, 2013.9
- 12) A. H. Buchanan, Structural Design for Fire Safety, Chapter 10 Timber Structures, JOHN WILEY & SONS, LTD, 2002
- 13) T. Suzuki, Y. Hasemi, D. Kamikawa, N. Yasui, C. Kaku, S. Watanabe, Development of an Equation Calculating Young's Modulus Remaining Ratio with Temperature and Moisture Content within Wooden Members Exposed to Fire Heating, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 85, No. 770, pp. 651-661, 2020.4 (in Japanese)
- 鈴木達朗, 長谷見雄二, 上川大輔, 安井昇, 加来千紘, 渡辺秀太: 火災加熱される木質部材内部の温度・含水率によるヤング係数残存率計算式の導出, 日本建築学会構造系論文集 第85巻 第770号, pp. 651-661, 2020.4
- 14) Architectural Institute of Japan: Standard for Structural Design of Timber Structures, 2006 (in Japanese)
- 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 2006
- 15) Richard, R.M, and Abbott. B. J.: Versatile elastic-plastic stress-strain formula, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.10, No.4, pp.511-515, 1975
- 16) ISO 834-1: Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements, 1999

INFLUENCE OF MOISTURE ON COMPRESSIVE BEHAVIOR OF JAPANESE CEDAR AND LARCH STRUCTURAL GLULAM TIMBERS AT ELEVATED TEMPERATURE

Takayuki KIKUCHI^{*1} and *Takeo HIRASHIMA*^{*2}

^{*1} Grad. Student, Graduate school of Science and Engineering, Chiba Univ., M.Eng./
Tech. Staff, Faculty of Engineering, Chiba Univ.

^{*2} Prof., Graduate School of Engineering, Chiba Univ., Dr.Eng.

Regarding the load-bearing capacity of timber elements subjected to fire heating, knowledge of not only the charring behavior but also the mechanical properties at elevated temperature are required because the temperature of the non-charring area gradually increases during the cooling decay phases in fire. Therefore, in order to predict the fire resistance of timber elements, it is necessary to grasp the changes in strength and elastic modulus of the timber materials with temperature rise.

In this study, elevated temperature compression tests of structural glulam timbers made of Japanese cedar and larch were carried out for the purpose of understanding the influence of moisture in the timber on the compressive behavior at elevated temperature. The tests parameters were tree species, furnace temperature condition below 200 °C, and heating time. Influences of moisture in the specimens on the compressive behavior were discussed from the test results on the relationships of heating time and weight changing. Another purpose was to obtain a numerical model of stress-strain curves at elevated temperature to analysis the fire resistance of timber elements.

Main findings of this study were summarized as follows:

- (1) Compressive strength at elevated temperature decreased significantly from the start of heating to 1 hour, and became the minimum during 1 to 2 hours. After that, the strength recovered with drying, and finally, it returned to the strength at ambient temperature.
- (2) The reason why the compressive strength decreased significantly from the start of heating up to 1 hour was that the steam softening and the change of water content due to migration of the moisture had a great influence¹²⁾.
- (3) Compressive strength of both Japanese cedar and larch decreased significantly when the internal temperature of the timber increased from ambient temperature to 70°C, and the lower values of the results up to around 100°C were close to the strength ratio of Eurocode5.
- (4) The modulus of elasticity at elevated temperature decreased significantly from the start of heating to 1 hour, and became the minimum during 1 to 2 hours, similar to change of the compressive strength.
- (5) Results of the load-displacement relationships indicated that the decrease of the rigidity and the maximum load in the initial stage of heating depended on the temperature rising rate.
- (6) The stress-strain curve for compression within 1% strain was approximated by Richard's equation.

(2020 年 7 月 10 日原稿受理, 2020 年 12 月 22 日採用決定)