

一般流通製材を用いた大断面柱材の開発

平成 29 年度～令和元年度

木材チーム 山本 幸雄

1. 目 的

平成 22 年に施行された「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」は、公共建築物にターゲットを絞って木材利用に取り組み、木材の需要拡大をねらいとしている。また、平成 27 年には、学校、美術館、図書館等の中規模木造公共建築が準耐火構造で建築可能になり、公共建築物への木材利用はますます進むと考えられる。中規模木造公共建築物では、柱の座屈を防ぐため 150 mm 角程度の柱が要求され、かつ 1 時間準耐火構造のため、柱を耐火被覆する又は燃えしろ設計とすること等が必要になる。耐火被覆すると木材を現しで使用できず、150mm 角の柱で 60mm の燃えしろを考慮すると 270 (150+60×2) mm 角の柱が必要になる。これを製材品でまかなうには、乾燥が難しく単価も上昇する等の問題が指摘されている。

そこで、本研究は一般流通製材を組み合わせた柱を作製し、その性能を検討することを目的に、本年度は、枠組壁工法構造用製材の寸法型式 208 (厚 38×幅 184×長 4,000mm、以下、208 材と記す)、212 (厚 38×幅 286×長 4,000mm、以下、212 材と記す) 及び 212 材の幅を 266mm に調整した材 (以下、調整 212 材と記す) を用いた合わせ柱を試作し、その座屈試験と火災を想定した合わせ柱の座屈試験並びに 90×90mm 断面の柱 6 本を組み合わせた合わせ柱 (以下、90mm 角柱と記す) の燃焼試験を行った。

2. 試験方法

1) 合わせ柱の座屈試験

合わせ柱の座屈試験は、(1) 208 材と調整 212 材を組み合わせた合わせ柱 (以下、208 柱と記す)、(2) 208 柱の火災後を想定した合わせ柱 (以下、火災後 208 柱と記す)、(3) 接着して製作した火災後 208 柱 (以下、接着 208 柱と記す)、(4) 212 材を組み合わせた合わせ柱 (以下、212 柱と記す) 及びその合わせ柱で板の組み合わせ順を変えた合わせ柱 (以下、組替 212 柱と記す) について試験した。試験体数は各 3 体 (火災後 208 柱のみ 2 体) とした。

試験は、(公財)日本住宅・木材センターの「構造用木材の強度試験マニュアル」¹⁾の「Ⅱ. 座屈試験法」(以下、マニュアルと記す)に準じて行った。ナイフエッジの支点間距離は 4,200mm、載荷速度は 1 mm/min、座屈の変形量は材中央で測定した。試験には、島津製作所製実大強度試験機 UH-1000kNAR を用い、座屈の変形量は東京測器研究所製変位計 SDP-200D を用いて測定した。合わせ柱の細長比 (以下、 λ と記す) は、全ての材が一体となっていると仮定して求め、必要に応じ座屈強さ (以下、 f_k と記す) を補正した。

208 材 21 枚と 212 材 28 枚の縦振動ヤング係数 (以下、 E_{fr} と記す) を測定し、 E_{fr} の平均値とばらつきが等しくなるように 208 材は 3 つのグループに、212 材は 4 つのグループに分けた。その後、212 材の 1 つのグループを幅 266mm に調整し、調整 212 材とした。その後調整 212 材の E_{fr} を測定し、 E_{fr} の高い順に 6 枚を選別した。

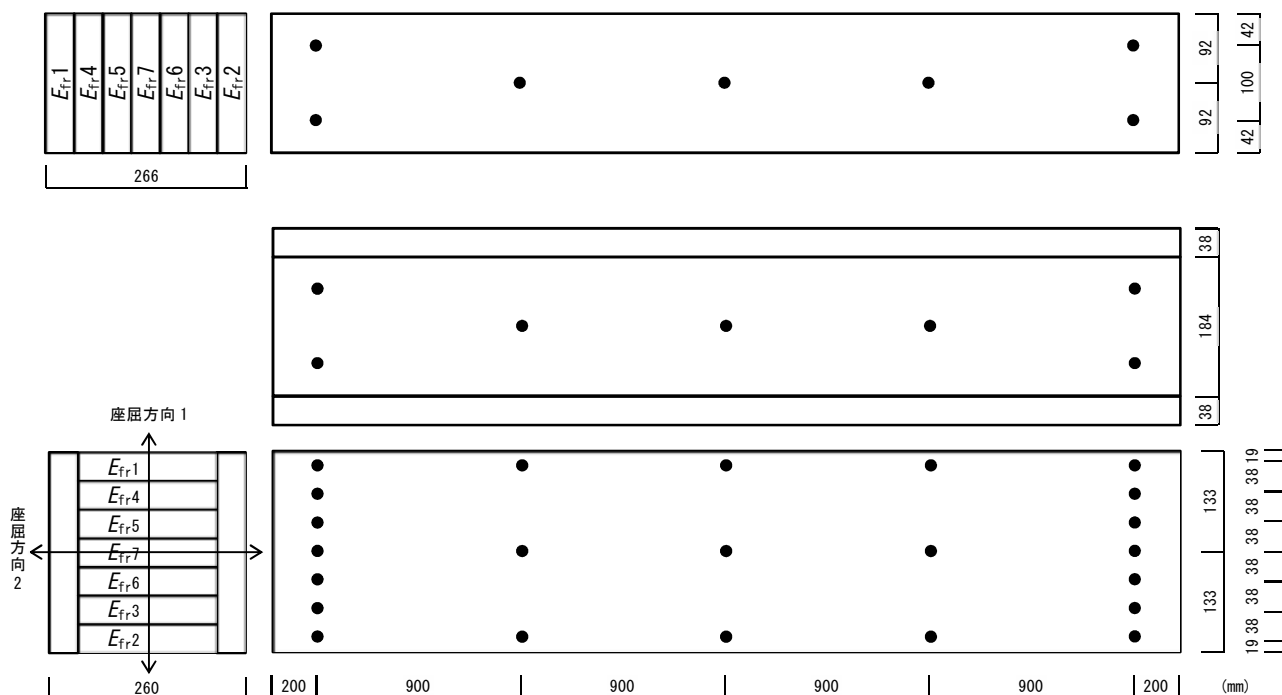


図-1 208材と調整212材の組み合わせ方と座屈方向

E_{fr} について、 $E_{fr} 1 > \dots > E_{fr} 7$

●はコーススレッドの位置を示す

(1) 208柱

208柱は、208材を図-1のように配置し組み合わせた後、調整212材を組み合せ、試験に供した。座屈の向きは、図-1に示す座屈方向1とした。組み合せには、直径4.2×長さ65mmの半ねじコーススレッド（以下、コーススレッドと記す）を使用した。試験の様子を写真-1に示す。

(2) 火災後208柱

座屈試験後の208柱から、火災を想定し最外層の208材2枚と212材2枚を外した208材5枚を組み合わせた火災後208柱の座屈試験を行った。座屈の向きは図-1に示す座屈方向1とした。

(3) 接着208柱

試験した火災後208柱を分解し、水性高分子イソシアネート接着剤TP-111で接着し、元のとおり組み合わせた接着208柱の座屈試験を行った。接着剤の塗布量は $235\text{g}/\text{m}^2$ とし、コーススレッドを図-1に示す位置に打ち圧縮した。試験は接着1週間後に図-1に示す座屈方向2で、次に座屈方向1で試験した。

(4) 212柱及び組替212柱

E_{fr} を測定した212材を、図-2のように配置しコース

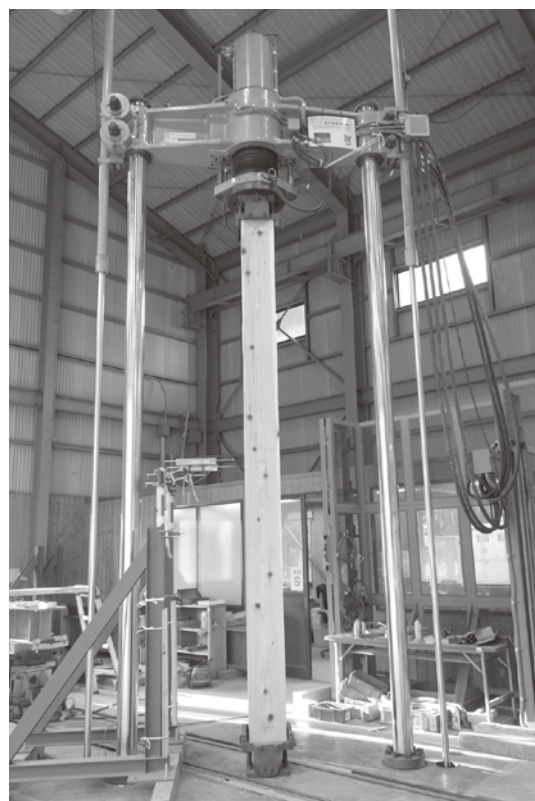


写真-1 座屈試験の様子

スレッド組み合わせた 212 柱を、図-2 に示す座屈の向きで試験した。次に、試験した試験体を分解し、一方の最外層から E_{fr} の高い順に並べ、コーススレッドで組み合わせた組替 212 柱を試験した。

2) 合わせ柱の燃焼試験

図-3 に示す断面 90×90 mm、長さ 700mm の角材 6 本を組み合わせた 90mm 角柱を、写真-2 に示す小型燃焼炉で試験した。90mm 角柱の角材の燃焼面以外の合わせ目には、炉外から炉内へ空気が流れ込み異常燃焼することを防ぐためアルミテープで目止めし、その外側を強化石膏ボード及びケイカル板で被覆し(写真-3) 燃焼炉に取り付けた。JIS A1304:2017 建築構造部分の耐火試験方法²⁾の 6.2 加熱温度及びその許容差に規定される標準加熱曲線 A に準じ加熱し、炉内温度、試験体燃焼表面温度、試験体裏面温度を測定した。加熱時間は 1 時間とし、加熱終了後脱炉し水をかけ消火した。試験の様

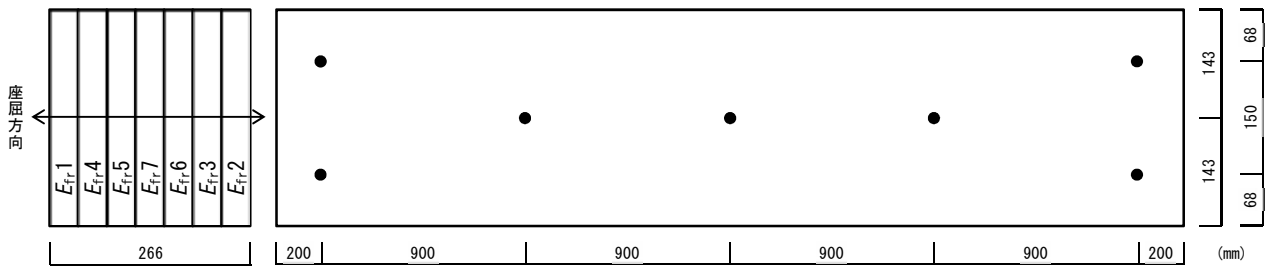


図-2 212 材の組み合わせ方と座屈方向

E_{fr} について、 $E_{fr} 1 > \dots > E_{fr} 7$

●はコーススレッドの位置を示す

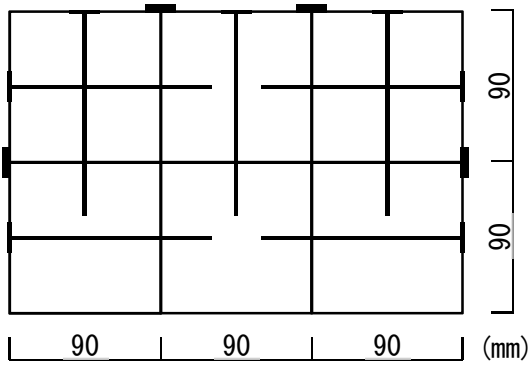


図-3 燃焼試験体の概要

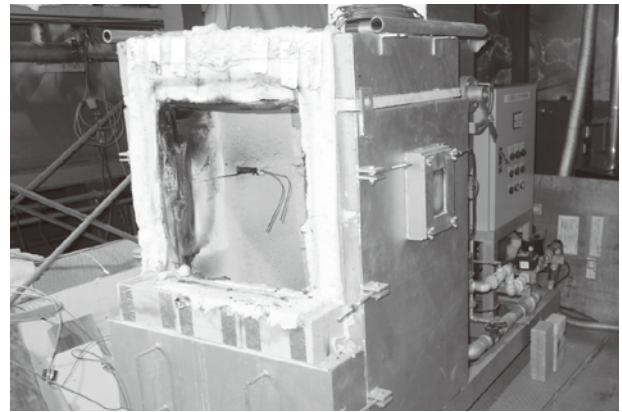


写真-2 小型燃焼炉

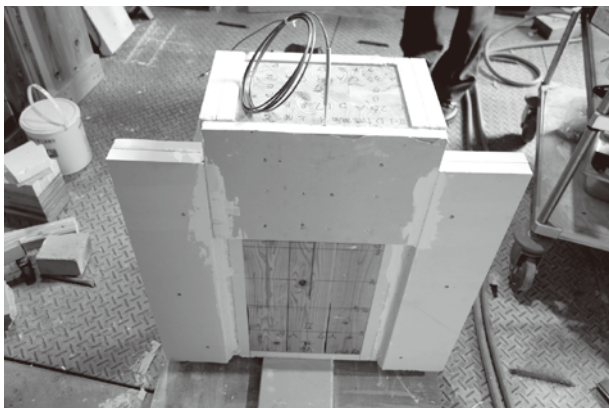


写真-3 燃焼試験体

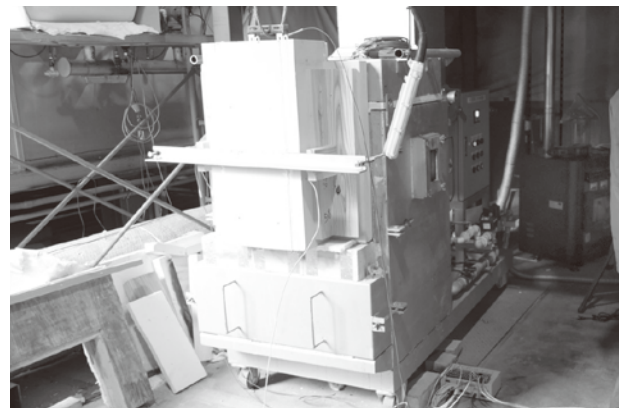


写真-4 燃焼試験の様子

子を写真-4に示す。

3. 結果及び考察

1) 合わせ柱の座屈試験

208材、212材、調整212材の E_{fr} の平均値と標準偏差、最大値、最小値を表-1に示す。

表-1 208材、212材、調整212材の E_{fr} (GPa)

項目	208				212					調整212**
	全体	Gr1*	Gr2	Gr3	全体	Gr1	Gr2	Gr3	Gr4	
平均値	7.9	8.1	7.8	7.7	7.1	6.8	6.5	6.5	6.4	6.6
標準偏差	1.52	1.31	1.72	1.72	2.23	2.02	1.52	1.10	1.09	0.84
最大値	10.0	10.0	9.9	9.8	10.9	10.9	9.2	8.2	7.9	7.8
最小値	4.8	6.5	4.9	4.8	4.3	4.4	4.3	4.9	4.6	5.6

*Gr: グループ、**212材のグループ4を調整し、調整212材とした

(1) 208柱

最大荷重(以下、 F_{max} と記す)、 f_k 、Eulerの座屈荷重(以下、 F_k と記す)を表-2に、荷重(以下、 F と記す)と座屈の変形量(以下、 D と記す)の関係を図-4に、試験後の試験体の様子を写真-5に示す。

f_k 及び F_k はマニュアルに従い求めた。すなわち、 f_k については、 D を横軸に、 D を F で除した D/F を縦軸とする $D-D/F$ 関係をプロットし、原点から F_{max} までの直線の傾きの逆数を座屈荷重とした。その座屈荷重を合わせ柱

表-2 208柱の F_{max} 、 f_k 、 F_k

項目	F_{max} (kN)	f_k (N/mm ²)	F_k (kN)
1	923.78	13.4	1970.0
2	820.40	11.9	1906.8
3	837.52	12.1	1830.2
平均	860.57	12.4	1902.3
標準偏差	55.41	0.80	70.00

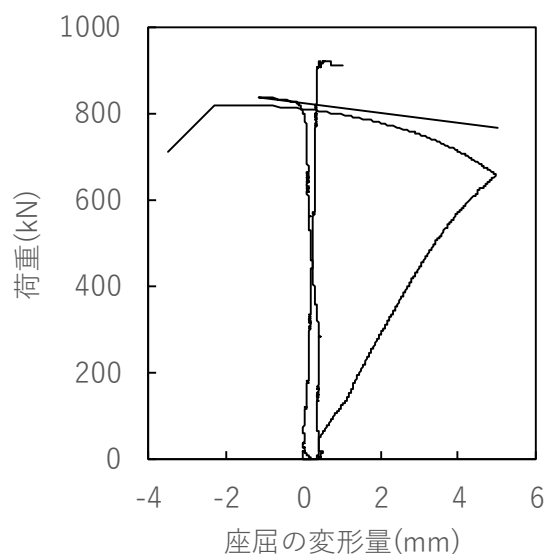


図-4 208柱の D と F の関係



写真-5 座屈試験後の試験体の様子

の断面積 $260 \times 266 \text{mm}^2$ で割り f_k とした。λによる補正は行わなかった。 F_k は、全ての材が一体となっていると仮定し等価断面二次モーメントを求め、Euler の座屈式により計算し求めた（以下、全て同じ）。

F_{\max} は、 F_k の約 1/2 となった。これは、図-4 208 柱の F と D の関係から分かるように試験体は座屈変形を起こすことなく、写真-5 に示すとおり調整 212 材を組み付けていたコーススレッドが、破断したり引き抜けたりして外れ、脆性的に破壊したためである。調整 212 材の F_k はおよそ 450kN であり、208 材が最大荷重との差 400kN を負担していることが分かった。

(2) 火災後 208 柱

E_f の平均値と標準偏差、最大値、最小値、 F_{\max} 、 f_k 、 F_k を表-3 に、 F と D の関係を図-5 に、試験後の試験体の様子を写真-6 に示す。

208 柱の試験では、208 材が約 400kN を負担していたことが分かったが、本試験では約 40kN で座屈した。これは、208 柱では調整 212 材が座屈に大きく抵抗する方向に配置されていたが、火災後 208 柱

表-3 火災後 208 柱の E_f の平均値と標準偏差、最大値、最小値、 F_{\max} 、 f_k 、 F_k

グループ	E_f (GPa)				F_{\max} (kN)	f_k (N/mm ²)	F_k (kN)
	平均値	標準偏差	最大値	最小値			
1	7.5	1.04	8.9	6.5	39.37	7.8	490.6
2	7.1	1.41	8.9	4.9	43.11	6.2	465.5
3	7.0	1.49	8.8	4.8	-	6.6	467.6

- は測定データが無いことを示す

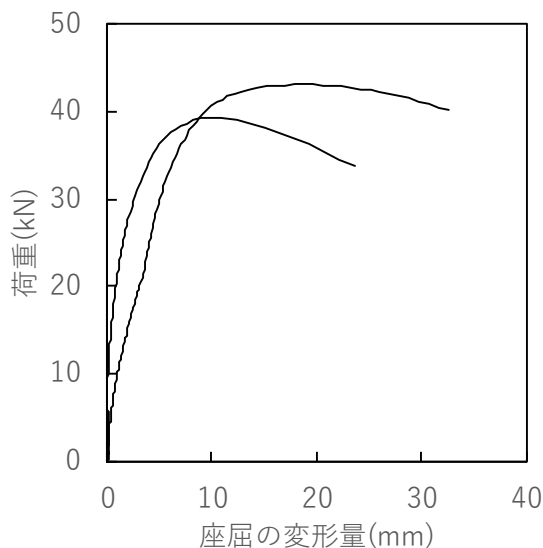


図-5 火災後 208 柱の D と F の関係

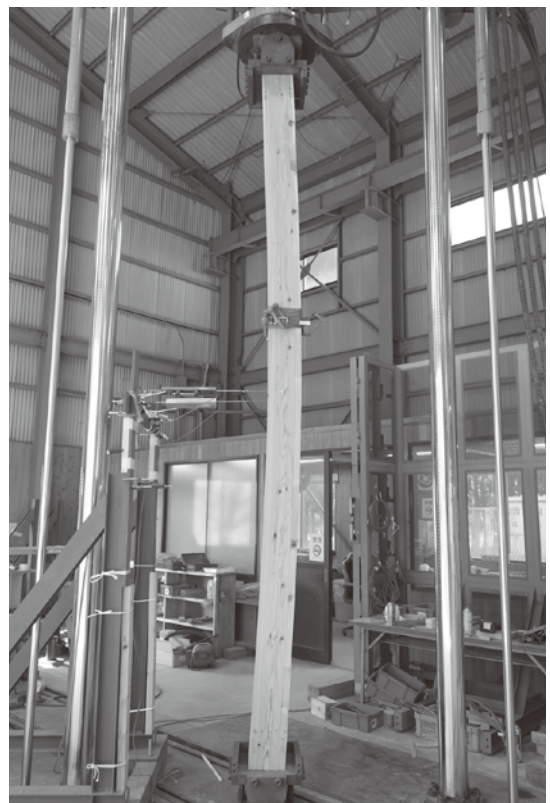


写真-6 座屈試験後の試験体の様子

では火災を想定しこの板を取外したこと、座屈で生じるせん断力の抵抗要素がコーススレッドのみで、材が一体となって変形していないことが主な要因と考えられる。

(3)接着 208 柱

F_{max} 、 f_k 、 F_k を表-4に、 F と D の関係を図-6に示す。

座屈方向2について、試験中接着層が剥離することはなく、 F_{max} と F_k についてほぼ同じ値となり、 F_{max} をEulerの座屈式で推定できることが分かった。座屈方向1について、接着剤塗布後の圧縮がコーススレッド7本だけの簡易な圧縮であったため、試験中最大荷重付近で接着層の剥離が生じ、 F_{max} は

表-4 接着 208 柱の F_{max} 、 f_k 、 F_k

グループ	座屈方向 1			座屈方向 2		
	F_{max} (kN)	f_k (N/mm ²)	F_k (kN)	F_{max} (kN)	f_k (N/mm ²)	F_k (kN)
1	464.7	7.8	490.6	448.6	8.0	417.9
2	367.7	6.2	465.5	399.9	7.2	388.2
3	391.4	6.6	467.6	370.6	6.6	388.2
平均	407.9	6.9	474.6	406.4	7.3	398.1
標準偏差	50.57	0.83	13.92	39.40	0.70	17.15

表-5 212 柱と 212 組替柱の F_{max} 、 f_k 、 F_k

項目	212 柱			212 組替柱		
	F_{max} (kN)	f_k (N/mm ²)	F_k (kN)	F_{max} (kN)	f_k (N/mm ²)	F_k (kN)
1	94.4	1.2	2055.5	87.8	1.2	1827.4
2	94.7	1.2	1915.6	95.0	1.2	1682.7
3	79.6	1.0	1866.2	70.0	1.1	1673.0
平均	89.6	1.2	1945.7	84.3	1.2	1727.7
標準偏差	8.67	0.11	98.18	12.87	0.07	86.47

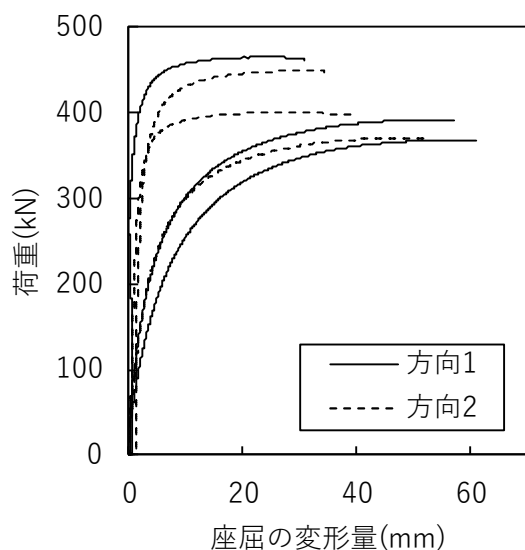


図-6 接着 208 柱の D と F の関係

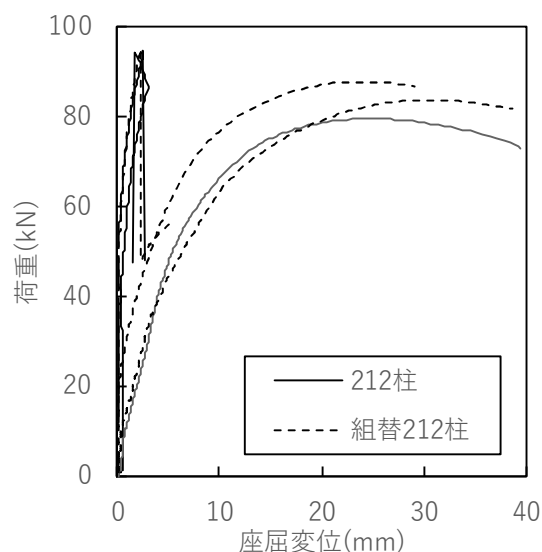


図-7 212 柱及び組替 212 柱の D と F の関係

F_k に比べ低い値となった。

(4)212 柱及び組替 212 柱

F_{max} 、 f_k 、 F_k を表-5 に、荷重と座屈の変形量の関係を図-7 に示す。 f_k は λ による補正は行わなかった。 F_{max} は F_k に比べ小さい値となった。これは火災後 208 柱で述べたとおり、座屈で生じるせん断力の抵抗要素がコーススレッドのみであることが主な要因と考えられる。

212 組替柱はヤング係数の順に最外層から並べたため、212 組替柱の F_{max} は 212 柱のそれより低くなることが予想されたが、実際にはほぼ変わらない値となった。これは、座屈で生じるせん断力の抵抗要素がコーススレッドのみでほぼ座屈抵抗に寄与していないためと思われる。

2) 合わせ柱の燃焼試験

標準加熱曲線、炉内温度、試験体燃焼表面温度、試験体裏面温度を図-8 に、燃焼試験後の試験体の様子を写真-7 に示す。

炉内温度は 1000°C 近くまで上昇しているにもかかわらず、試験体裏面温度は燃焼試験中変化していないことが分かった。

燃焼深さはおよそ 45mm であった。試験体燃焼面合わせ目には約 3.5mm の隙間が空いているところもあったが(写真-8)、その隙間から燃焼が進むことはなく、60mm 燃え代があれば十分であることが確認できた。

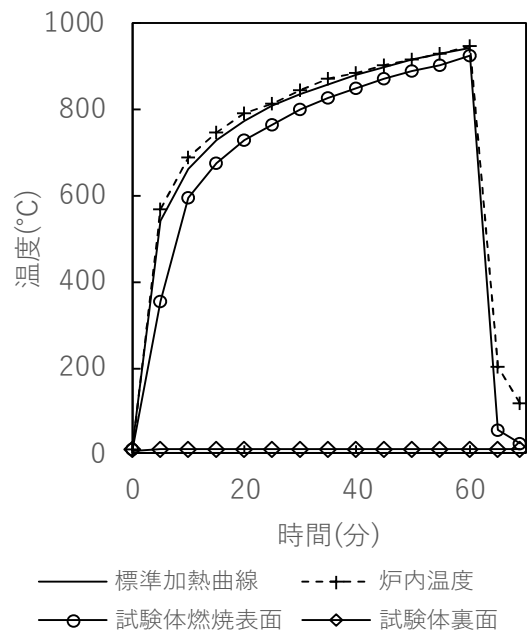


図-8 燃焼試験温度

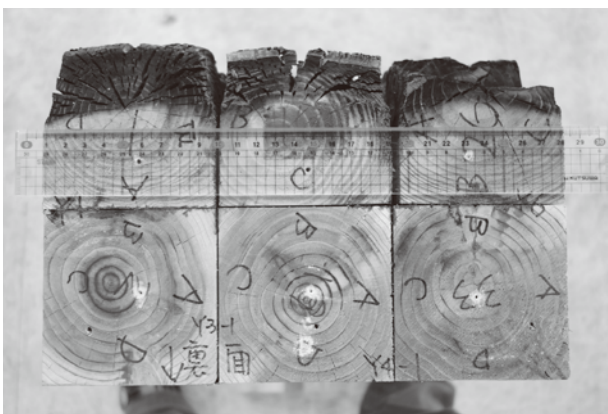


写真-7 燃焼試験後の試験体の様子



写真-8 燃焼試験体合わせ目の様子

まとめ

板を使った合わせ柱について、以下のことが分かった。

- ・全ての板を同じ方向に並べてしまうと、座屈性能が全く期待できないこと
- ・一部板の配置を座屈方向と直交させることで、座屈性能が格段に向上すること

・一部板の配置を座屈方向と直交させても、火災を想定した場合座屈性能が全く期待できないこと
角材 6 本を組み合わせた合わせ柱について、以下のことが分かった。

- ・ 燃焼試験中も、試験体裏面の温度は上昇しないこと
- ・ 1 時間の燃焼試験では、45mm 程度しか燃焼せず、60mm 燃え代があれば十分であること

参考文献

- 1) (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, 37-47p (平成23年)
- 2) 日本産業標準調査会：JIS A1304：2017 建築構造部分の耐火試験方法, 16-18p (2017)

寸法安定性の高い高品質乾燥材生産技術の開発

平成 30 年度～令和 2 年度

木材チーム 山田 康裕

1. 目 的

近年、公共建築物等の中大規模建築物における構造部材として地域材が利用される機会が増加し、製材の日本農林規格（以下、製材 JAS と記す）で定める一定の含水率基準を満たした人工乾燥材の需要が高まっている。接合部に金物工法が多用される木造住宅においても、構造材に高い寸法安定性が要求されるため、製材 JAS の含水率基準 15%以下を示す SD15 が求められるようになってきた。

一方、増加する大径材の需要創出を図る一つの方策として、梁桁等の構造材への利用が期待されているが、こうした中・大断面材にスギ無垢材を活用していくためには、品質を確保しつつ SD15 に乾燥するための技術的な課題が残されている。

本年度は、中・大断面材の効率的な乾燥技術開発に資する基礎的データを得るため、①断面寸法と高温乾燥が材質に与える影響との関係解明、及び②減圧環境下で高周波加熱を行う高周波減圧乾燥によるスギ平角材の乾燥試験を熊本県林業研究・研修センターと共同で実施した。

2. 試験方法

1) 断面寸法と高温乾燥が材質に与える影響との関係解明

(1) 供試材及び乾燥試験

供試材は、異なる 3 つの断面寸法をもつ大分県佐伯市産の心持ちスギ材で、各寸法（製材寸法 ; mm）は、120×120×3,000（135×135×3,000、以下 120mm 材と記す）、120×180×4,000（135×195×4,000、以下 180mm 材と記す）、120×300×6,000（135×320×6,000、以下 300mm 材と記す）である。乾燥前の段階で寸法、重量、縦振動ヤング係数（以下、 E_{fr} と記す）を測定し、 E_{fr} の平均値がほぼ等しくなるように選別した 120mm 材、180mm 材を各 45 本、300mm 材 25 本を乾燥工程に供した。

なお、選別した試験材は、材質試験後に研究課題「非住宅分野の木造化に対応する大断面製材品の強度性能評価」の寸法効果試験に供するため、同じ熱履歴を与える目的で、すべての試験材を表-1 に示すスケジュールにより同じ蒸気式高温乾燥機で乾燥した。乾燥後の目標含水率は、最も乾燥が困難と考えられる 300mm 材の平均含水率が 20%以下となるよう設定した（写真-1）。

表-1 乾燥スケジュール

ステップ	処理時間 (h)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	乾湿球差 (°C)	備 考
1	12	98	98	0	蒸 煮
2	24	120	90	30	高温セット
3	72	110	85	25	高温乾燥
4	96	105	80	25	
5	60	100	80	20	
6	24	100	85	15	
7	12	95	90	5	調 湿
300		(12.5日間)			



写真-1 乾燥後の 300mm 材

乾燥終了から1週間後にモルダーで仕上げた材は、材質試験用として断面寸法別に各5本を選木し、残りの試験材は3か月間養生した後に、前述した研究課題の寸法効果試験用として供した。

(2) 材質試験

乾燥後、仕上げ後、養生後の各段階で試験材の寸法、重量、 E_{fr} （乾燥後は未測定）、含水率を測定し、含水率は材の両木口から50cm、材中央部の計3か所を高周波木材水分計HM-520により測定した。材質試験は、試験材すべての材面割れを測定した後、図-1に示す位置において厚さ2.5cmの試験片を全乾含水率用3枚、内部割れ用7枚、内部含水率分布用2枚を切り出した。材内部の含水率分布は、切り出した試験片を図-2のように長辺方向に5分割し、全乾法により測定した。なお、最終的な試験材の全乾含水率は、寸法効果曲げ試験後の非破壊部より試験片を採取して全乾法により測定した。

材面割れは、両木口から10cm以内の木口割れを除く4材面に現れた幅1mm以上の割れ長さを測定し、内部割れは、切断木口面に現れた幅1mm以上の内部割れ長さを測定した。

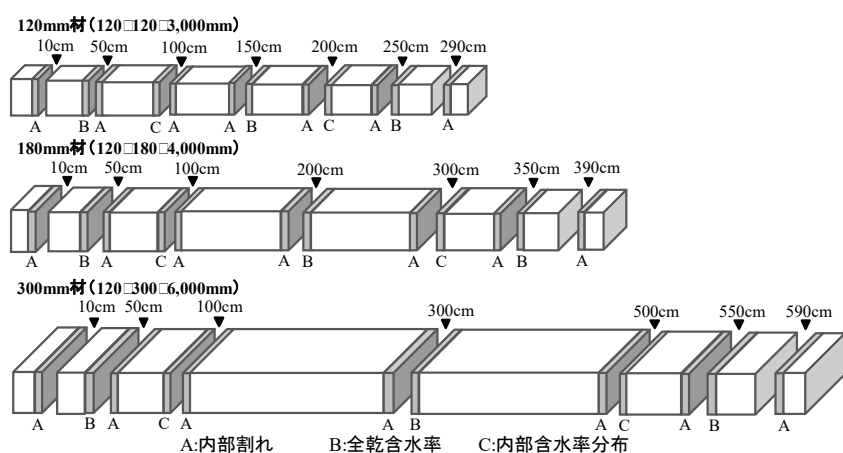


図-1 試験片サンプリング模式図

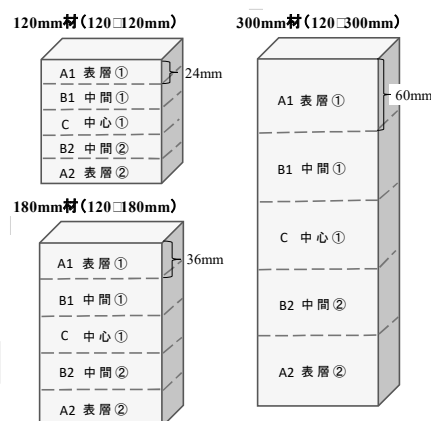


図-2 内部含水率分布のサンプリング模式図

2) 高周波減圧乾燥による平角材の乾燥試験

(1) 供試材及び高周波減圧乾燥試験

供試材は、大分県日田市産スギ8本で、寸法（製材寸法；mm）120×240×2,000（135×255×2,000）とした。製材後の材は、寸法、重量、 E_{fr} を測定した後、高周波木材水分計を用いて木口から50cm、100cm、150cm位置の表裏面計6カ所の含水率を測定した。材の明るさは、 $L^*a^*b^*$ 表色系の明度 L^* を木口から50cm、100cm、150cm位置の長辺中央部表裏面6カ所を色彩色差計CR-400型（コニカミノルタセンシング株式会社製）で測定した。製材後から乾燥試験までの2か月間は、材の乾燥を防ぐ目的でポリエチレン製ストレッチフィルムを材全面にラッピングし、直射日光の当たらない屋内で保管した。

保管後の材は、寸法、重量、 E_{fr} 、含水率を測定した後、表-2に示す乾燥スケジュールで乾燥した。乾燥機は、熊本県林業研究・研修センターの多機能木材乾燥機HTD-1型（株式会社ヤスジマ製、写真-2）を用い、乾燥期間中は光ファイバー温度センサーで材温を測定した。

(2) 材質試験

乾燥後の試験材は、寸法、重量、 E_{fr} 、高周波木材水分計による含水率の測定を行い、プレナー仕上げ後に再度、同項目と明度 L^* を測定した。全乾含水率と内部割れ測定に供する試験片は、図-3のよ

うに厚さ 2.5cm の試験片を全乾含水率用 3 枚、内部割れ用 5 枚、内部含水率分布用 2 枚を切り出した。材内部の含水率分布は、切り出した試験片を図-4 のように 5 分割し、全乾法により測定した。

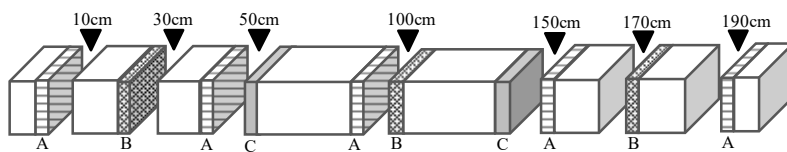
材面割れは、両木口から 10cm 以内の木口割れを除く 4 材面に現れた幅 1mm 以上の割れ長さを測定し、内部割れは、切断木口面に現れた幅 1mm 以上の内部割れ長さを測定した。

表-2 乾燥スケジュール

ステップ	処理時間 (h)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	真空度 (torr)	備考
前処理	1	95	—	300	初期蒸煮
1	20	98	78	300	高温セット
2	48	70	55	300	高周波発振
3	192	60	50	150	
261		(10.9日間)			



写真-2 多機能木材乾燥機 HTD-1 型



A: 内部割れ B: 全乾含水率 C: 内部含水率分布

図-3 試験片サンプリング模式図

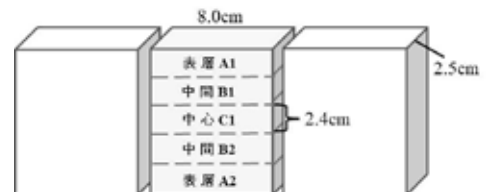


図-4 内部含水率分布のサンプリング模式図

3. 結果及び考察

1) 断面寸法と高温乾燥が材質に与える影響との関係解明

時期別の試験材の諸元を表-3 に示す。乾燥前から乾燥後の含水率（平均値±標準偏差）の推移をみると、120mm 材が 74.1±23.6% から 6.2±2.8%、180mm 材が 92.8±28.5% から 12.4±6.7%、300mm 材が 113.8±37.8% から 19.0±8.0% と断面寸法が小さいほど含水率が低く、養生後は 120mm 材が 10.0±2.4% とやや過乾燥であったが、180mm 材と 300mm 材は概ね含水率 15% となった。

乾燥後の長辺方向の平均収縮量（収縮率）は、断面寸法別に 120mm 材が 3.8mm (2.8%)、180mm 材が 4.1mm (2.1%)、300mm 材が 5.6mm (1.8%) であり、断面寸法が大きいほど平均収縮率は小さい結果となったが、これは断面が大きいほど含水率が高かったことが一因として考えられた。

断面寸法別の E_{fr} (平均値±標準偏差; kN/mm²) は、乾燥前は 120mm 材が 5.7±0.7、180mm 材が 5.9±0.6、300mm 材が 5.6±0.5 であり、養生後は 120mm 材が 6.5±0.8、180mm 材が 6.4±0.6、300mm 材が 6.1±0.6 といずれの寸法も乾燥によって高くなったが、断面寸法間に有意差はなかった。

材内部の含水率分布を図-5 に示す。材質試験に供した断面寸法別各 5 本の平均含水率は、120mm 材が 8.0%、180mm 材が 9.6% と乾燥していたのに対し、300mm 材は 26.0% と含水率が高く、120mm 材と 180mm 材は材中心部と表層間でほぼ同程度に乾燥していたが、300mm 材では含水率の低い 1 本を除いて材の材中心部と表層間の含水率差が大きく、内部の含水率は高い状態であった。

断面寸法別の材面割れについて、1 本あたりの発生本数と割れ長さ合計を図-6 に、内部割れ長さ合計を図-7 に示す。1 本あたりの割れ本数及び割れ長さ合計の平均値は、120mm 材が 0.13 本、2.1cm、

180mm材が0.80本、13.2cm、300mm材が2.52本、73.3cmとなり、材の表面積で除した1 m³あたりの割れ長さの比較においても、120mm材が1.5cm、180mm材が5.5cm、300mm材が14.5cmと断面寸法が大きいほど材面割れの発生が多い結果となった。内部割れは、各断面寸法ともに両木口から10cm位置で最も多く発生し、120mm材は180mm材と比較して少ない傾向がみられたが、1 m³あたりの全断面の平均割れ長さで比較すると、120mm材0.63mm、180mm材0.60mmと差はほとんどなかった。300mm材の内部割れが末口10cm以外の断面で少なかったことについては、300mm材の内部含水率が高かったことが主な原因として考えられた。

表-3 時期別の試験材諸元 (平均±標準偏差、—は未計測)

時期	試験材区分	本数	寸法			重量 (kg)	密度 (kg/m ³)	E _f (kN/mm ²)	含水率 (%)
			長辺 (mm)	短辺 (mm)	長さ (cm)				
乾燥前	120mm材	45	136.2±0.9	136.0±0.7	306.3±0.1	33.3±3.6	586±64.4	5.7±0.7	74.1±23.6
	180mm材	45	196.6±0.5	138.8±0.5	407.0±0.2	69.4±8.4	625±75.9	5.9±0.6	92.8±28.5
	300mm材	25	320.9±0.6	138.2±0.4	615.2±0.1	183.8±32.8	674±119.8	5.6±0.5	113.8±37.8
乾燥後	120mm材	45	132.4±1.2	130.8±1.0	306.1±0.1	20.4±1.4	385±28.2	—	6.2±2.8
	180mm材	45	192.5±1.8	135.3±1.3	406.8±0.2	40.6±3.0	383±29.2	—	12.4±6.7
	300mm材	25	315.3±2.1	134.0±1.2	614.6±0.1	107.4±12.4	413±44.4	—	19.0±8.0
仕上げ後	120mm材	45	120.4±0.3	120.1±0.3	300.1±0.0	17.1±1.3	394±28.6	6.4±0.9	8.4±3.1
	180mm材	45	180.2±0.4	120.2±0.3	400.0±0.1	34.5±2.5	398±29.2	6.2±0.7	17.4±7.5
	300mm材	25	300.1±0.3	120.5±0.3	600.0±0.1	85.9±7.1	396±33.1	5.7±0.6	19.5±7.1
養生後	120mm材	40	120.3±0.3	120.2±0.3	300.2±0.1	17.3±1.3	399±28.6	6.5±0.8	10.0±2.4
	180mm材	40	179.4±0.5	119.9±0.3	400.0±0.1	33.7±2.3	392±26.8	6.4±0.6	15.6±3.9
	300mm材	20	299.2±0.9	120.2±0.5	600.1±0.1	82.1±4.0	381±19.0	6.1±0.6	15.0±3.3

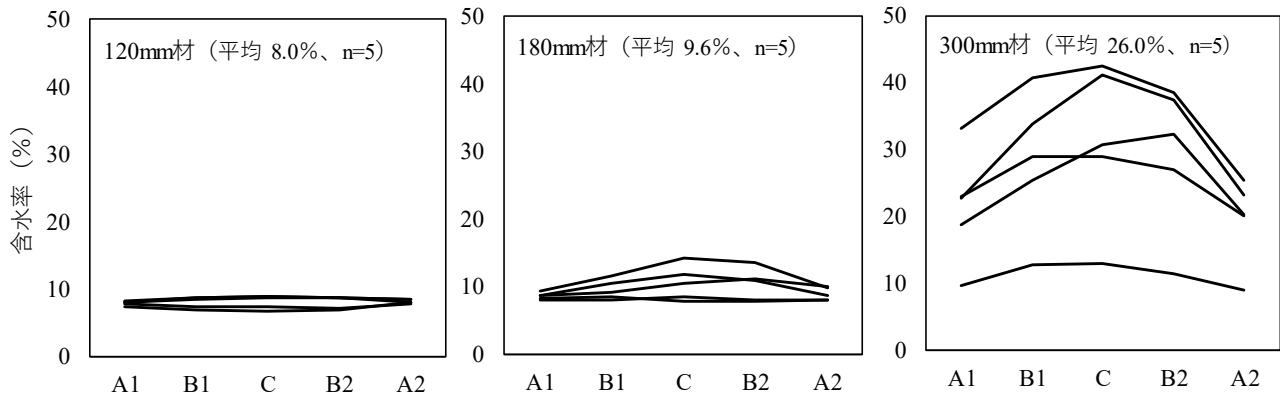


図-5 材内部の含水率分布

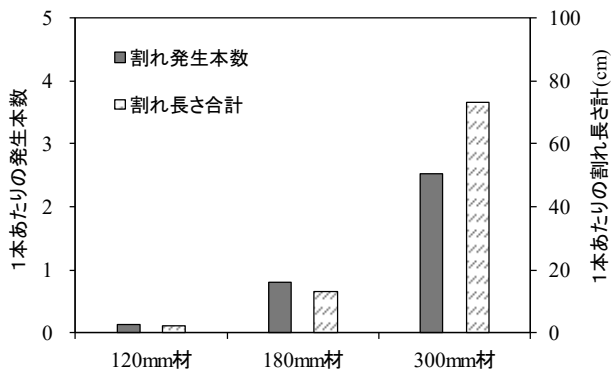


図-6 断面寸法別の材面割れ比較

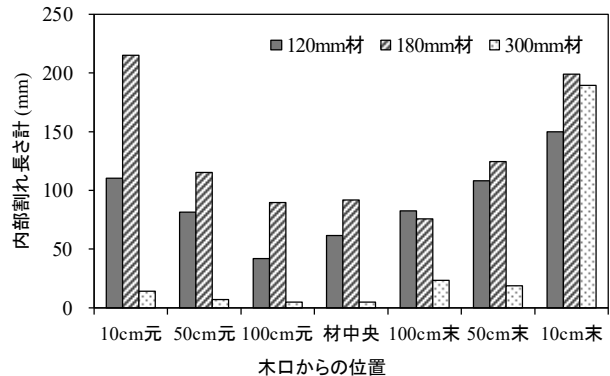


図-7 断面寸法別の内部割れ比較

2) 高周波減圧乾燥によるスギ平角材の乾燥試験

乾燥材の釜出しの様子を写真-3に、全乾法から推定した時期別の含水率推移を図-8に示す。なお、乾燥スケジュールのステップ1とステップ2の間で冷却水ポンプの不具合により約1か月間乾燥を停止し、再稼働後のステップ3途中で真空ポンプの制御システムに不具合が生じたため、当初予定より68時間短いスケジュールで乾燥を終了した。図-8の破線で示した初期含水率の低いグループの含水率は、乾燥前(最小値~平均値~最大値)34.9~46.7~55.2%、乾燥後13.4~15.4~17.5%、養生後15.0~17.2~19.7%と含水率20%以下に乾燥していたが、実線で示した初期含水率の高いグループの乾燥後含水率は30%を超えており、未乾燥な状態であった。

材内部の含水率分布を図-9に示す。初期含水率が高いグループの材は、材の表層部と比べて中心部の含水率が非常に高かったが、含水率20%以下に乾燥した材では両者の間の含水率差は小さかった。

乾燥前後における心材色の明度L*の比較を図-10に示す。心材色の明度L*(平均値±標準偏差)は、乾燥前61.9±6.5であったものが、仕上げ後には66.7±6.3とすべての試験材で高くなっていったことから、乾燥処理による変色の影響はかなり少ないものと考えられた(写真-4)。

材面割れは、試験材8本のうち1本に両木口を貫通する割れ1本が幅面心材部に発生していたが、それ以外に割れの発生はなかった。内部割れは、図-11に示すように両木口から10cm位置でわずかに発生していたが、それ以外の断面に内部割れはなかった。

今回、乾燥機の不具合によって想定した乾燥スケジュールよりも短期間で乾燥を終了したが、初期含水率の低い材については、材内部まで含水率20%以下に乾燥しており、材の変色への影響もなく、内部割れもほとんどなかったことから、高品質なスギ平角材生産を行う乾燥方法として有効であることが分かった。



写真-3 高周波減圧乾燥材釜出しの様子

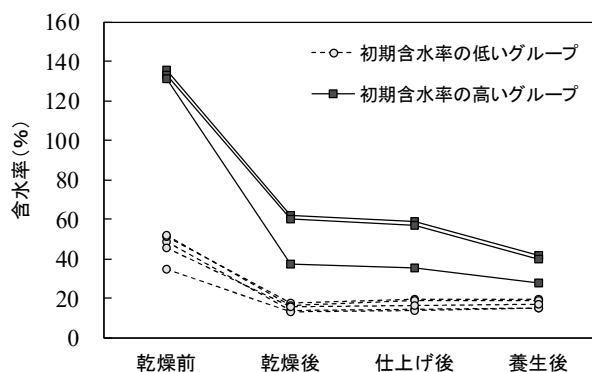


図-8 時期別の含水率推移

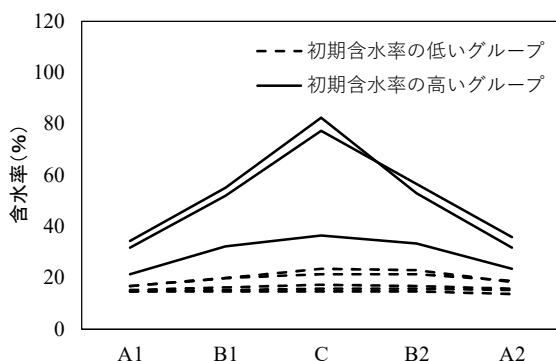


図-9 材内部の含水率分布

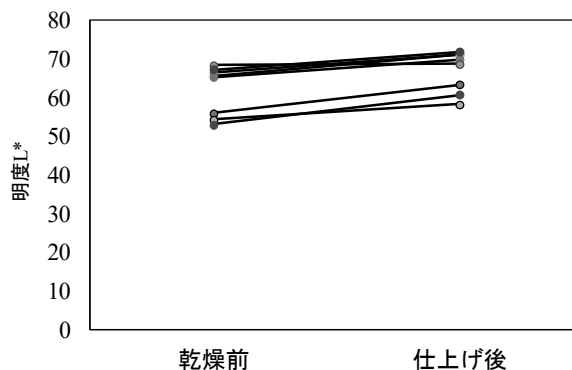


図-10 明度L*の比較



写真-4 仕上げ後の材面の様子

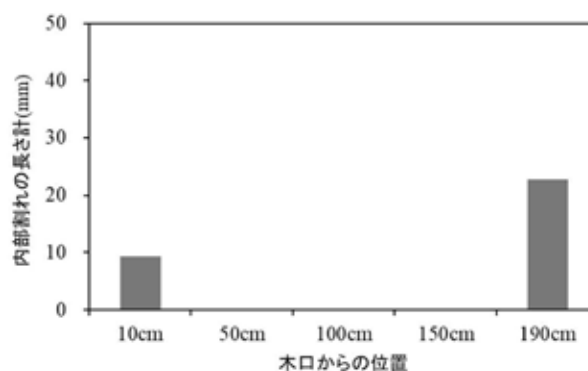


図-11 内部割れの発生状況

4. まとめ

1) 断面寸法と高温乾燥が材質に与える影響との関係解明

断面寸法が異なるスギ材に同じ条件の高温乾燥スケジュールで乾燥した結果、当初想定したとおり断面寸法が小さい材ほど含水率は低く、また材内部の含水率は、特に断面が大きい含水率の高い材において材表層部と中心部の含水率差が大きかった。

表面積あたりの材面割れ本数および割れ長さは、断面寸法が大きい材ほど発生量が多く、また内部割れは、各断面寸法ともに両木口から 10cm 位置で最も多く発生していたが、断面寸法別の発生量には明確な差は見られなかった。

2) 高周波減圧乾燥によるスギ平角材の乾燥試験

今回の高周波減圧乾燥スケジュールは、当初予定よりも短時間で乾燥を終了したが、初期含水率の低い材については、材内部まで含水率 20%以下に乾燥していた。材質についても、内部割れは木口付近でわずかに見られた以外は発生しておらず、乾燥に伴う変色の影響もほとんどなかったことから、高品質なスギ平角材を生産する上で有効な乾燥方法であることが示された。

次年度については、本年度の乾燥結果もとに一貫乾燥による高周波減圧乾燥スケジュールの構築に取り組む予定である。

謝辞

高周波減圧乾燥試験では、熊本県林業研究・研修センターの池田元吉氏に高周波減圧乾燥機の使用等において多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

非住宅分野の木造化に対応する大断面製材品の強度性能評価

平成 30 年度～令和 2 年度

木材チーム 前原 礼明

1. 目 的

平成 22 年に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が制定され、公共建築物などの非住宅分野における中・大規模の建築物の木造化が進んでいる。これらの建物の構造部材には、梁桁材等に大きな断面の製材(以下、大断面製材と記す)が多く用いられている一方、大断面製材の乾燥方法や寸法の違いが強度性能に与える影響についてのデータは少ないことから、建築関係者が大断面製材の利用を不安視する要因の 1 つになっている。

今年度は、寸法毎の強度性能を把握することによって、寸法調整係数を提案するための基礎データを得ることを目的に、梁せいの異なる 3 種類のスギ心持ち材を用いて曲げ試験を行った。

2. 試験方法

1) 試験材の作製

試験材は、異なる 3 つの断面寸法をもつ大分県佐伯市産の 3 種類のスギ心持ち材で、各寸法(短辺×長辺×長さ:mm)は、120×120×3,000(以下、120mm 材と記す)、120×180×4,000(以下、180mm 材と記す)、120×300×6,000(以下、300mm 材と記す)とし、乾燥前の寸法、重量、縦振動ヤング係数(以下、 E_{tr} と記す)を測定後、 E_{tr} の平均がほぼ等しくなるように 120mm 材を 72 本の中から 40 本、180mm 材を 96 本の中から 40 本、300mm 材を 30 本の中から 20 本選んだ。その後、同じ熱履歴を与える目的で、すべての試験材を表-1 に示す乾燥スケジュールに従って乾燥した。乾燥後の目標含水率は、最も乾燥が困難と考えられる 300mm 材の平均含水率が 20%以下となるよう設定した。

表-1 乾燥スケジュール

乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	処理時間 (h)	備考
98	98	12	蒸煮
120	90	24	高温セット
110	85	72	
105	80	96	高温乾燥
100	80	60	
100	85	24	
95	90	12	調湿

2) 曲げ試験

はじめに、欠点調査として、製材の日本農林規格¹⁾(以下、製材 JAS と記す)に準じて、荷重点間の節及び材全体で等級に影響を及ぼす節の位置及び節径の測定を行った。欠点調査後、材長、材の長さ方向の中央部の 4 辺の寸法、重量、材の長さ方向の中央と木口両端から 50 cm 位置の長辺の両面計 6 か所の含水率(以下、 MC_m と記す)、 E_{tr} を測定した。含水率の測定には(株)ケツト科学研究所製の高周波木材水分計 HM-520 を用いた。

曲げ試験には、(株)島津製作所製の実大強度試験機 UH-1000kNAR を、変位の測定には(株)東京測器研究所製の変位計 SDP-200D を用い、スパン中央部下面において計測した。

(1) 製材 JAS に準じた曲げヤング係数の測定

はじめに、写真-1 に示すように試験材を設置し、一般社団法人全国木材検査・研究協会：製材の品質管理の実際²⁾(6)①曲げ試験装置による曲げヤング係数の測定に準じて、曲げヤング係数(以下、 E_m と記す)を求めた。スパンは長辺の 18 倍、載荷速度は 20mm/min とした。

(2) 構造用木材の強度試験マニュアルに準じた曲げヤング係数と曲げ強度の測定

次に、写真-2 に示すように試験材を設置し、(公財)日本住宅・木材技術センターの構造用木材の強度試験マニュアル³⁾(以下、マニュアルと記す)のⅠ. 構造用木材の強度試験法 7. 曲げ強さ及び曲げヤング係数に準じて曲げ試験を行い、曲げヤング係数(以下、MOE と記す)及び曲げ強度(以下、MOR と記す)を求めた。

曲げ試験終了後、木口から 50cm 以上離れた破壊部近くから厚さ約 25mm の試験片を、120mm 材と 180mm 材からは 1 枚、300mm 材からは 2 枚切り出し、平均年輪幅を測定した。その後、切り出した試験片を梁せいの両外側 1/5 と中央部 3/5 に分割し、全乾法により含水率(以下、それぞれを $MC_{1/5}$ と $MC_{3/5}$ と、全体の全乾含水率を MC_{ALL} と記す)を測定した。また、目視等級区分は、製材 JAS の構造用製材甲種Ⅱにおける材面の品質区分のうち、節と集中節及び平均年輪幅のみにより区分を、機械等級区分は E_m と節及び集中節のみにより区分を行った。

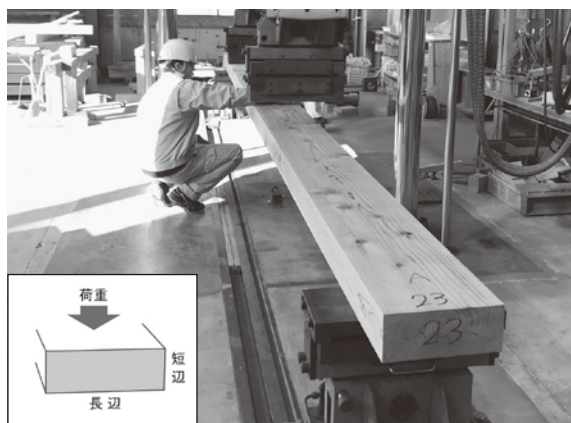


写真-1 E_m の測定状況

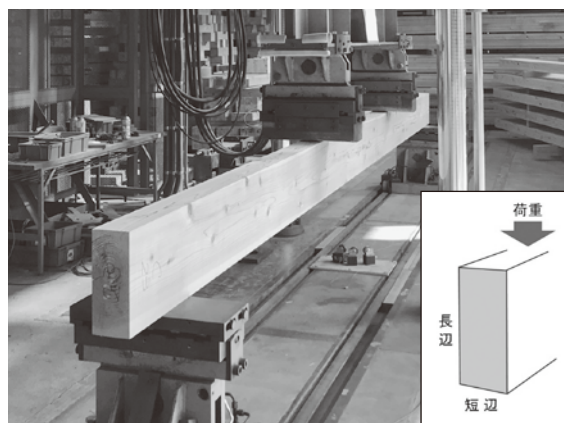


写真-2 MOE 及び MOR の測定状況

3. 結果及び考察

1) 試験材の作製

表-2 試験前の試験材の測定結果

区分	寸法(mm)			重量(kg)	密度(kg/m ³)	MC _{HM} (%)	E_{fr} (kN/mm ²)	
	短辺	長辺	材長					
120mm材	平均値	120.2	120.3	3,002	17.3	399	11.3	6.5
	最大値	121.3	121.0	3,004	19.6	454	16.8	7.7
	最小値	119.2	119.8	3,000	15.5	356	9.9	5.0
	標準偏差	0.3	0.3	0.7	1.3	28.6	1.3	0.8
180mm材	平均値	119.9	179.4	4,000	33.7	392	14.6	6.4
	最大値	120.4	180.6	4,002	39.8	462	21.7	7.4
	最小値	118.8	178.3	3,998	29.8	350	10.0	5.0
	標準偏差	0.3	0.5	0.8	2.3	26.8	3.2	0.6
300mm材	平均値	120.2	299.2	6,001	82.1	381	12.6	6.1
	最大値	121.6	300.4	6,004	91.8	426	18.4	7.4
	最小値	118.8	296.9	5,999	77.7	360	9.6	5.2
	標準偏差	0.5	0.9	1.3	4.0	19.0	2.3	0.6

試験前の試験材の測定結果を表-2に示す。MC_{HM}(平均値(標準偏差))は、120mm材が11.3(1.3)％、180mm材が14.6(3.2)％、300mm材が12.6(2.3)％であり、各試験材ともに15％以下であった。E_{fr}(平均値(標準偏差))は、120mm材が6.5(0.8)kN/mm²、180mm材が6.4(0.6)kN/mm²、300mm材が6.1(0.6)kN/mm²であり、試験材間で有意差はなかった。

2)曲げ試験

製材 JAS に基づく等級区分結果を表-3に示す。目視等級区分では各試験材ともに2級が最も多かった。300mm材は平均年輪幅の大きな試験材が多く、1級に該当する試験材が無かった。機械等級区分は、120mm材と180mm材ではE70の割合が最も多く、300mm材ではE50が最も多かった。E90は120mm材では6本見られ、180mm材と300mm材では無かった。

(1)製材 JAS に準じた曲げヤング係数の測定

結果を表-4に示す。E_m(平均値(標準偏差))は、120mm材が6.8(1.0)kN/mm²、180mm材が6.4(0.6)kN/mm²、300mm材が6.0(0.6)kN/mm²であった。

(2)構造用木材の強度試験マニュアルに準じた曲げヤング係数と曲げ強度の測定

結果を表-4に示す。MOE と MOR は、マニュアルのV. 構造用木材の強度評価表および基準値算出法の付録3. 含水率によるデータの調整の解説に準じて全乾含水率試験片の梁せいの両外側1/5の測定値を用いて、含水率15%値に補正した(以下、MOE₁₅及びMOR₁₅と記す)。

MC_{ALL}(平均値(標準偏差))について、120mm材は10.3(2.0)％、180mm材は14.4(3.3)％、300mm材は14.1(3.0)％であった。MC_{1/5}と、MC_{3/5}について、120mm材は10.1(1.5)％と10.7(3.1)％、180mm材は13.0(2.5)％と17.4(4.9)％、300mm材は12.8(2.7)％と16.6(3.7)％であった。120mm材は、MC_{1/5}とMC_{3/5}はほぼ同じだったのに対し、180mm材と300mm材のそれは平均値でおよそ4％異なり、表層1/5が中央部3/5より乾燥していることが分かった。

表-3 製材 JAS に基づく等級区分 (単位:本)

区 分	目視等級区分(甲II)				機械等級区分			
	1級	2級	3級	計	E50	E70	E90	計
120mm材	7	26	7	40	7	27	6	40
180mm材	6	26	8	40	10	30	0	40
300mm材	0	17	3	20	11	9	0	20

表-4 曲げ試験の結果

区分		E _m (kN/mm ²)	MOE (kN/mm ²)	MOR (N/mm ²)	全乾含水率(%)			MOE ₁₅ (kN/mm ²)	MOR ₁₅ (N/mm ²)
					MC _{ALL}	MC _{1/5}	MC _{3/5}		
120mm材	個 数	40	40	40	40	40	40	40	40
	平 均 値	6.8	6.8	36.3	10.3	10.1	10.7	6.3	32.1
	最 大 値	8.8	9.2	52.8	17.0	15.8	19.3	8.7	48.3
	最 小 値	4.7	4.8	26.1	8.0	8.1	7.8	4.4	23.2
	標 準 偏 差	1.0	0.9	7.1	2.0	1.5	3.1	0.9	6.2
180mm材	個 数	40	40	40	40	40	40	40	40
	平 均 値	6.4	6.7	32.9	14.4	13.0	17.4	6.5	31.0
	最 大 値	7.4	7.9	43.7	23.3	19.5	31.0	7.4	40.8
	最 小 値	4.9	5.3	22.1	8.4	8.5	8.3	4.9	20.2
	標 準 偏 差	0.6	0.7	5.0	3.3	2.5	4.9	0.7	4.9
300mm材	個 数	20	20	20	20	20	20	20	20
	平 均 値	6.0	6.5	30.9	14.1	12.8	16.6	6.2	29.0
	最 大 値	7.1	7.8	41.2	20.7	19.0	24.1	7.8	37.9
	最 小 値	5.1	5.5	22.8	9.4	8.9	10.5	5.3	22.0
	標 準 偏 差	0.6	0.7	4.3	3.0	2.7	3.7	0.8	4.2

E_m とMOEについて、180mm材と300mm材では、MOEが E_m よりも高い結果となった。これは写真-2に示すように試験材を設置することで、成熟材の割合が高い辺材部が圧縮及び引張側により多く含まれるようになったことが主な要因と考えられる。次に E_{fr} と E_m 、MOEとの関係を図-1に示す。相関係数は、 E_{fr} と E_m 、 E_{fr} とMOEともに0.84以上で、強い相関が見られた。MOE₁₅(平均値(標準偏差))については、120mm材が6.3(0.9)kN/mm²、180mm材が6.5(0.7)kN/mm²、300mm材が6.2(0.8)kN/mm²であった。

各試験材のMOR₁₅(平均値(標準偏差))は、120mm材で32.1(6.2)N/mm²、180mm材で31.0(4.9)N/mm²、300mm材で29.0(4.2)N/mm²であった。MOR₁₅の5%下限値を、マニュアルの参考資料2データの統計的解析の解説と方法に準じて求めると、120mm材で22.3N/mm²、180mm材で22.0N/mm²、300mm材で21.8N/mm²となった。MOR₁₅が最小値を示した試験材(写真-3)は180mm材で、20.2N/mm²であった。破壊部周辺に節が多く、狭い材面の集中節径比が44%と高かったことが要因の1つと考えられる。試験材の破壊形態は、荷重点間で曲げ破壊(写真-4)が生じたものが98本、圧縮破壊(写真-5)が生じたものが1本、せん断破壊(写真-6)が生じたものが1本だった。圧縮破壊とせん断破壊はいずれも300mm材において見られた。

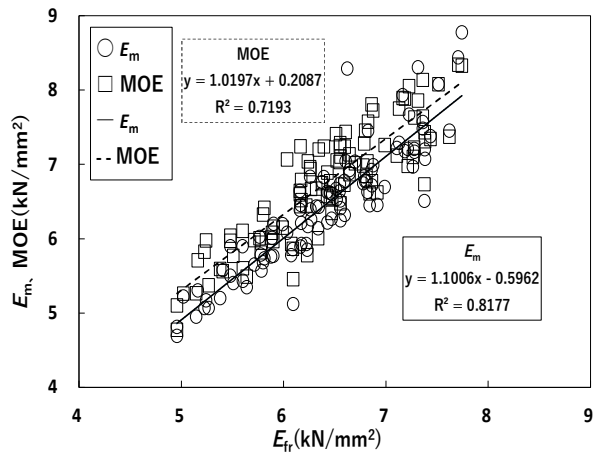


図-1 E_{fr} と E_m 、MOEとの関係



写真-3 MOR₁₅が最小値を示した試験材



写真-4 曲げ破壊



写真-5 圧縮破壊

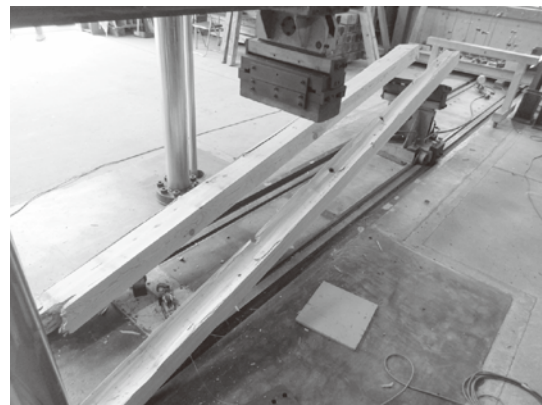


写真-6 せん断破壊

3) 梁せいと曲げ強度

MOR₁₅ について、t 検定では 120mm 材と 300mm 材で平均値の差に有意差が認められた。MOE₁₅ と MOR₁₅ との関係を図-2 に示す。MOE₁₅ と MOR₁₅ の回帰直線において、梁せいが大きくなるに従って傾きが小さくなり、同じ MOE₁₅ で比較した場合に、梁せいが大きいほど MOR₁₅ は低くなることが分かった。

4) 寸法調整係数の試算

木質材料の単位断面積あたりの強度が、断面、特に曲げを受ける梁のせいが大きくなると低下する傾向⁴⁾を寸法効果という。寸法効果の大きさを示す寸法効果パラメータ及び寸法調整係数は、長尾らの方法⁵⁾に準じると、木材の強度と体積の関係を表した式(1)をもとに求められる。式(1)のS₁及びS₂は、V₁及びV₂の時のそれぞれの強度であり、sが寸法効果パラメータである。式(1)を変形すると、式(2)となり、V₁を標準寸法時の体積と考えると寸法調整係数は式(2)のk_sとなる。

$$\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^s \quad (1)$$

$$S_1 = S_2 \times \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^s = S_2 \times k_s \quad (2)$$

k_sを荷重点間の体積で考え、式で表すと式(3)となる。ここでh、b、Lは梁せい、材幅、荷重点間距離、h₀、b₀、L₀は標準寸法時の梁せい、材幅、荷重点間距離を示す。また、α、γ、βはそれぞれの寸法効果パラメータであり、梁せいを横軸に MOR₁₅ を縦軸にして各データをプロットし、回帰させたときの回帰式y = ax^bから得られる係数bの絶対値である。今回の研究では材幅の影響についてはないもの(γ = 0)と考え、かつ荷重点間距離が梁せいの6倍(L₀ = 6h₀、L = 6h)であることを踏まえて式(3)をまとめると式(4)となる。式(4)のα + βは、回帰式で求められた係数bの絶対値に相当し、この式からk_sを求めた。

$$k_s = \left(\frac{h_0}{h}\right)^\alpha \times \left(\frac{b_0}{b}\right)^\gamma \times \left(\frac{L_0}{L}\right)^\beta \quad (3)$$

$$k_s = \left(\frac{h_0}{h}\right)^{\alpha+\beta} \quad (4)$$

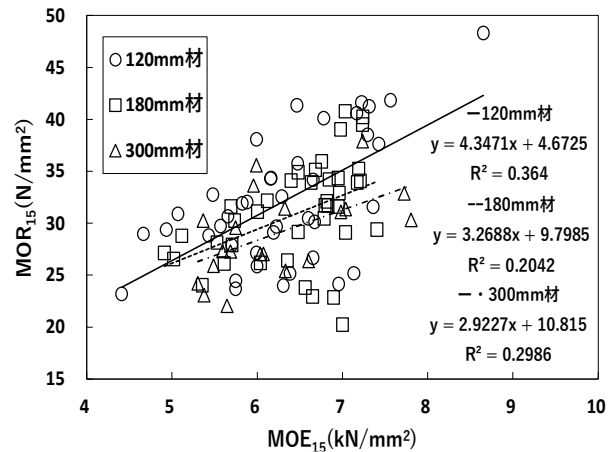


図-2 MOE₁₅ と MOR₁₅ の関係

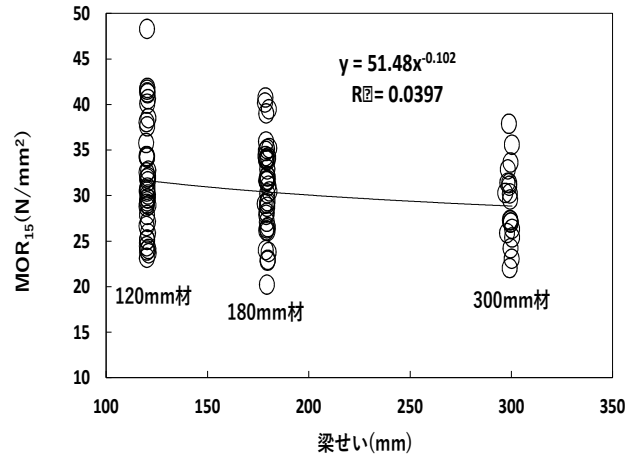


図-3 梁せいと MOR₁₅ の関係

表-5 寸法調整係数

梁せい (mm)	寸法調整係数
105	1.04
120	1.02
150	1.00
180	0.98
210	0.97
240	0.95
270	0.94
300	0.93
330	0.92
360	0.91
390	0.91

梁せいと MOR_{15} の関係を図-3 に示す。このグラフの回帰式から寸法効果パラメータである係数の絶対値 0.102 を用いて標準寸法時の梁せいを $h_0 = 150$ として式(4)から寸法調整係数を試算すると表-5 の値となった。寸法効果パラメータの結果について、スギ心持ち材を用いて 0.25~0.29 の値が得られたという報告⁵⁾ もあり、本試験で得られたパラメータはそれに比べて低かった。これについては、全ての材に同じ熱履歴を与える目的で 120mm 材、180mm 材、300mm 材を同じ乾燥スケジュールで乾燥したため、乾燥後の材質の差が生じたことも要因の 1 つと考えられる。強度試験の結果には、寸法効果以外にも、使用した試験材の生産地域、乾燥方法、樹種特性、未成熟材の割合、樹心の位置、木取り等様々な要因によって差が生じると考えられ、これらの項目を考慮に入れたデータの収集が今後必要となってくると思われる。

4. まとめ

今回の研究では、材幅を 120mm で一定にして、梁せいを 120mm、180mm、300mm の 3 種類の試験体を用いて曲げ試験を実施したところ、梁せいが大きくなるほど、曲げ強度の低下が確認され、また寸法効果パラメータとして 0.102 が得られた。今後、圧縮強度についての寸法調整係数のデータの収集を進め、寸法効果を明らかにする予定である。

参考文献

- 1) 製材の日本農林規格：平成 19 年 8 月 29 日農林水産省告示第 1083 号
- 2) 一般社団法人全国木材検査・研究協会：製材の品質管理の実際 1, 154-163 (平成 25 年)
- 3) (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, 162pp (平成 23 年)
- 4) 木材・樹木用語研究会：木材・樹木用語辞典, 145 (平成 16 年)
- 5) 長尾博文, 井道裕史, 加藤英雄, 三浦祥子, 下田優子：スギ製材の曲げ強度に対する寸法効果 材幅と材せいの影響, 木材学会誌 Vol. 60 No. 2 100-106 (平成 26 年)