

県産スギ大径材から採取した心去り平角の曲げ強度性能*1

中晶平・柳川靖夫*2・井道裕史*3・長尾博文*4

奈良県産スギ大径材から製材された心去り平角 40 本の曲げ強度試験を行った。曲げ試験の結果、含水率 15%時に補正した見かけの曲げヤング係数 (MOE, 15%) の範囲は 4.36~9.68 kN/mm²、平均値は 6.70 kN/mm²であった。また、含水率 15%時に補正した曲げ強度 (MOR, 15%) の範囲は 16.8~60.6 N/mm²であり、平均値は 33.2 N/mm²であった。試験体 40 本中 29 本 (72.5%) が「製材の日本農林規格」の機械等級区分構造用製材の曲げヤング係数に対応した基準強度を満たし、36 本 (90.0%) が無等級材の基準強度 22.2N/mm²を有していた。機械等級区分材および無等級材の基準強度に満たなかった試験体の多くには、荷重点間の引張応力が働く面に大型の節が存在し、それを起点に曲げ破壊が生じていた。また、狭い材面における引張側の荷重点間の最大節径比について、節径比の増加に伴い曲げ強度が低下する傾向がみられた。以上から、スギ大径材から心去り平角を採材し横架材として使用する際には、節による等級区分を実施し、大きな節および流れ節を持つ材は短スパンの梁や桁等に使用する等の配慮が必要と考えられる。

1. はじめに

全国的にスギ人工林は高齢級化が進み、これに伴い末口径の大きなスギ丸太が得られるようになってきた。末口径が 300mm 超のスギ丸太は、一般に「スギ大径材」と呼ばれている。スギ大径材の利用の一つとして、1 本の丸太から心去り平角を複数採材することが挙げられる。心去り材は乾燥中あるいは乾燥後の変形や、強度性能が心持ち材とは異なることも考えられ、各地でスギ心去り平角の乾燥試験および強度試験が実施され報告されている¹⁻³⁾。奈良県産スギ心去り平角については、乾燥に伴う変形および動的ヤング係数の変化については報告が存在するものの⁴⁾、強度性能については詳しく調べられておらず、今後の課題となっている。そこで、本研究では、今後スギ大径材の出材増加が見込まれる、県南部地域産のスギ大径材から採取した心去り平角の曲げ強度試験を行い、強度性能を調べた。

2. 材料と方法

2.1 材料

県南部地域より出材されたスギ大径材より、計 40 本のスギ心去り平角を採取した。表 1 に、それらの乾燥条件、

寸法および試験体数を示す。このうち 21 本は、含水率 30%まで蒸気式中温乾燥を施した後、続いて天然乾燥を行った (試験体番号: K-1~K-21)。残りの 19 本は屋根付きの屋外で天然乾燥を行った (試験体番号: A-1~A-19)。両乾燥条件の試験体はヤング係数などの条件を揃えて分割したものではないことから、本報では乾燥条件間による曲げヤング係数および曲げ強度等の比較は行わないこととする。また、天然乾燥後のプレーナ仕上げは行わなかった (図 1)。なお、断面寸法が 103×200mm の試験体 (表 1 ※印) については、既報⁴⁾で乾燥に伴う動的ヤング係数や割れの変化を既に報告しており、断面寸法 115×225mm で含水率を 30%まで中温乾燥した後、断面寸法 105×210mm に調整し、天然乾燥させたものである。

2.2 節径比の測定

「製材の日本農林規格」⁵⁾の目視等級区分構造用製材の甲種Ⅱに準じて、全長および 2.4 で示す曲げ試験での荷重点間の節径の測定を行った。図 2 に示すとおり、節は狭い材面、広い材面の材縁部および中央部について最大節および集中節を測定し、式 (1) および式 (2) に示した最大節の節径比 (以下、最大節径比という) および集中節の節径比 (以下、集中節径比という) により等級を決定した。

*1 本研究の一部は第 73 回日本木材学会大会 (2023 年 3 月、福岡) において発表した。

*2 現 京都府立大学大学院生命環境科学研究科

*3 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

*4 元 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所

表 1 供試材の乾燥条件、寸法および試験体数

乾燥条件	寸法(材幅×材せい×材長)	試験体数(本)
中温乾燥 (含水率30%まで中温乾燥→天然乾燥)	135×195×4000mm	2
	120×195×4000mm	10
	103×200×4000mm [※]	9
天然乾燥	135×195×4000mm	12
	120×195×4000mm	7
合計		40

※断面 115×225mm で含水率 30%まで中温乾燥
 →断面 105×210mm に調整→天然乾燥
 (寸法測定時の断面: 103×200mm)



図 1 供試材の一部

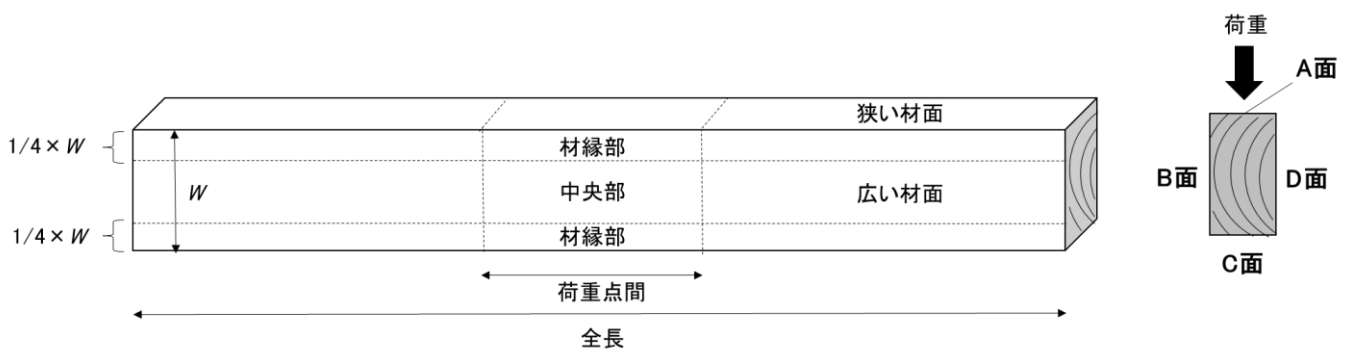


図 2 節径の計測位置

$$\text{最大節径比} = \frac{d}{W} \times 100 (\%) \quad \text{式 (1)}$$

d : 最大節の径、 W : 最大節の存する材面の幅

$$\text{集中節径比} = \frac{d_1 + \dots + d_n}{W} \times 100 (\%) \quad \text{式 (2)}$$

$d_1、d_2 \dots d_n$: 節の径、 W : 集中節の存する材面の幅

集中節径比は、材長方向に対して 15cm の距離の材面に存する節に係る径比の合計のうち最大のものとした。

なお、狭い材面において、2.4 で示す曲げ試験での荷重を受ける面（圧縮応力が働く側、以下「圧縮側」）を A 面、もう一方の面（引張応力が働く側、以下「引張側」）を C 面とし、広い材面において、木表側を B 面、木裏側を D 面とした（図 2）。

2.3 縦振動ヤング係数の測定

2.4 で示す曲げ試験に先立ち、縦振動法によるヤング係数（縦振動ヤング係数、 E_{fr} ）の測定を行った（図 3）。測定は「構造用木材の強度試験マニュアル」⁶⁾（以下、マニュアルと呼ぶ）に準拠して実施した。FFT アナライザはリオン株式会社製シグナルアナライザ SA-77 を用いた。 E_{fr} は式（3）を用いて求めた。

$$E_{fr} = (2 f l)^2 \rho \quad (\text{kN/mm}^2) \quad \text{式 (3)}$$

ここで、 f : 一次固有振動数、 l : 材長、 ρ : 試験時の密度

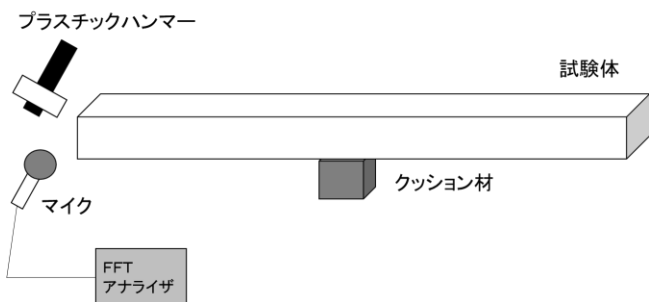


図 3 縦振動法によるヤング係数の測定

2.4 曲げ試験

図 4 に、曲げ試験の方法を示す。スパンは材せいの 18 倍とし、3 等分点 4 点荷重により試験を行った。荷重は

材せい方向（長辺方向）に加え、荷重面は節等を考慮せず無作為とした。式（4）および式（5）を用いて、せん断の影響を含んだ見かけの曲げヤング係数（MOE）および曲げ強度（MOR）を求めた。以下、見かけの曲げヤング係数を本報では「曲げヤング係数」と記載する。

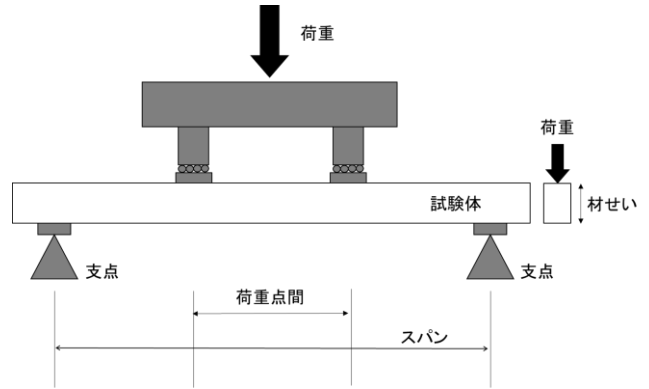


図 4 曲げ試験

$$\text{MOE} = \frac{a (3 L^2 - 4 a^2) (F_2 - F_1)}{4 b h^3 (w_2 - w_1)} \quad (\text{kN/mm}^2) \quad \text{式 (4)}$$

$$\text{MOR} = \frac{3 a F_{ult}}{b h^2} \quad (\text{N/mm}^2) \quad \text{式 (5)}$$

ここで、 a : 支点-荷重点間距離、 L : スパン、 b : 材幅、 h : 材せい

$F_2 - F_1$: 荷重変形曲線直線部分の荷重の増分

$w_2 - w_1$: $F_2 - F_1$ に対応する変形の増分

F_{ult} : 最大荷重

加力には、株式会社前川試験機製作所製の実大強度試験機を用いた。

曲げ破壊後、破壊部近傍の非破壊部分から、長さ方向に 3cm 程度の含水率測定用の試片各 1 体を切り出し、全乾法により試験体の含水率を求めた。

曲げヤング係数および曲げ強度は、マニュアル⁶⁾に記載された日本国内における提案式に従って含水率 15% 時の値に補正した。ただし、含水率 10% 以下の場合には 10%、含水率 18% 以上の場合には 18% として補正した。曲げヤング係数は式（6）および曲げ強度は式（7）を補正係数とし、それぞれ曲げヤング係数および曲げ強度に乗じた。

$$k_1 = \frac{1.14}{1.44 - 0.0200M} \quad \text{式 (6)}$$

$$k_2 = \frac{1.2505}{1.75 - 0.0333M} \quad \text{式 (7)}$$

ここで、M：試験時の含水率（ただし、含水率 10%以下は 10%、含水率 18%以上は 18%）

3. 結果および考察

3.1 節径比

最大節径比および集中節径比により求めた目視等級区分の結果を表 2 に示す。全長および荷重点間のいずれにおいても 2 級が最も多く、前者が 24 本（60%）、後者が 28 本（70%）であった。

荷重点間における最大節径比および集中節径比の結果を表 3 に示す。荷重点間における最大節径比の平均値は、狭い材面については A 面が 20.8%、C 面が 15.3%、広い材面については B 面の材縁部が 4.7%、B 面の中央部が 6.9%、D 面の材縁部が 11.9%、D 面の中央部が 14.7%であった。D 面が B 面より最大節径比の平均値が高かった理由として、B 面は木表側、D 面は木裏側であり髓から

の距離が近く節の出現が多かったためと考えられる。また、荷重点間における集中節径比の平均値は D 面の中央部で最も高く、平均 29.8%であった。

3.2 曲げ強度性能

強度試験の結果を表 4 に示す。縦振動ヤング係数の範囲は 4.31~9.88kN/mm² であり平均値は 6.79kN/mm² であった。含水率 15%時に補正した曲げヤング係数（MOE,15%）の範囲は 4.36~9.68 kN/mm²、平均値は 6.70 kN/mm² となり、縦振動ヤング係数と概ね同等の結果となった。含水率 15%時に補正した曲げ強度（MOR,15%）の範囲は 16.8~60.6N/mm² であり、平均値は 33.2N/mm² であった。以下、「曲げヤング係数」および「曲げ強度」はそれぞれ「MOE,15%」および「MOR,15%」を示す。

表 2 全長および荷重点間の節径比（最大節、集中節）による目視等級ごとの試験体数

目視等級区分	全長		荷重点間	
	試験体数 (本)	割合 (%)	試験体数 (本)	割合 (%)
1級	2	5	6	15
2級	24	60	28	70
3級	12	30	4	10
等級外	2	5	2	5
計	40	100	40	100

表 3 荷重点間における最大節の節径比および集中節の節径比

	最大節の節径比 (%)								集中節の節径比 (%)							
	狭い材面				広い材面				狭い材面				広い材面			
	A面		C面		B面		D面		A面		C面		B面		D面	
	材縁部	中央部	材縁部	中央部	材縁部	中央部	材縁部	中央部	材縁部	中央部	材縁部	中央部	材縁部	中央部	材縁部	中央部
平均値	20.8	15.3	4.7	6.9	11.9	14.7	5.3	1.3	1.4	1.6	5.4	29.8				
最小値	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
最大値	61.9	61.0	27.2	32.8	29.7	29.7	50.8	37.1	23.1	31.3	39.5	55.9				
標準偏差	14.2	14.7	7.6	8.9	8.1	4.6	14.1	6.2	5.1	6.2	11.9	12.3				
変動係数 (%)	68.2	95.9	160	129	68.1	31.4	267	479	355	387	220	41.4				

表 4 強度試験の結果

	ρ (kg/m ³)	ρ ,15% (kg/m ³)	MC (%)	E_{fr} (kN/mm ²)	MOE,15% (kN/mm ²)	MOR,15% (N/mm ²)
平均値	368	368	15.0	6.79	6.70	33.2
最小値	319	312	11.9	4.31	4.36	16.8
最大値	463	447	24.0	9.88	9.68	60.6
標準偏差	33.7	34.5	2.79	1.32	1.33	8.02
変動係数 (%)	9.17	9.37	18.7	19.5	19.9	24.1

ρ :試験時の密度、 ρ ,15%:含水率 15%時に補正した密度（気乾密度）

MC:全乾法による含水率、 E_{fr} :縦振動法によるヤング係数（縦振動ヤング係数）

MOE,15%:含水率 15%時に補正した曲げヤング係数、MOR,15%:含水率 15%時に補正した曲げ強度

図5に縦振動ヤング係数と曲げヤング係数および曲げ強度との関係を示した。縦振動ヤング係数と曲げヤング係数の間には強い正の相関が認められた。また、縦振動ヤング係数と曲げ強度の間にはやや弱い正の相関が認められた。

含水率 15%時に補正した密度⁷⁾ (気乾密度 ρ , 15%) と曲げヤング係数および曲げ強度との関係を図6に示す。気乾密度は曲げヤング係数および曲げ強度との間にいずれも弱い正の相関が認められた。

図7には、A面(圧縮側)およびC面(引張側)における荷重点間の最大節径比と曲げヤング係数および曲げ強度との関係を示す。A面の荷重点間の最大節径比については、曲げヤング係数および曲げ強度との間にはそれぞれ相関が見られなかった。一方、C面の荷重点間の最大節径比については、曲げヤング係数との間に相関が見られなかったが、曲げ強度との間には節径比の増加に伴い曲げ強度が低下する傾向がみられた。木材の曲げ試験時、引張側に存在する節は、材強度を低下させることが知られている⁸⁾。

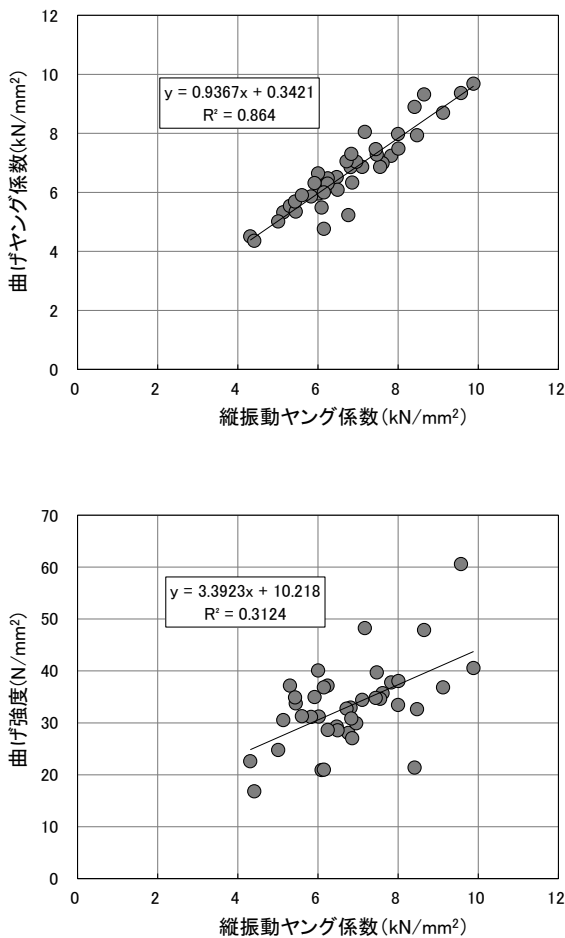


図5 縦振動ヤング係数と曲げヤング係数および曲げ強度との関係

また、高山・永井は、スギ心去り平角について、含水率 15%時の曲げ強度の重回帰分析の結果、最も曲げ強度に影響を及ぼしている要因は、含水率 15%時の密度(気乾密度)と下面(本報でのC面)の節径比であることを報告している⁹⁾。本研究においても、気乾密度およびC面の荷重点間の最大節径比が曲げ強度に影響を及ぼした可能性が高い。

3.3 基準強度との関係

全試験体について、曲げヤング係数と曲げ強度との関係を図8に示す。ここで、実線は「製材の日本農林規格」⁵⁾における機械等級区分構造用製材の等級ごとのスギの曲げ基準強度を、黒の破線は平成12年国土交通省告示第1452号における無等級材のスギの曲げ基準強度を示している。曲げヤング係数と曲げ強度との間には正の相関が認められ、試験体40本中29本(72.5%)が各等級における機械等級区分材の基準強度を上回った。また36本(90.0%)が無等級材の基準強度 22.2N/mm²を有していた。

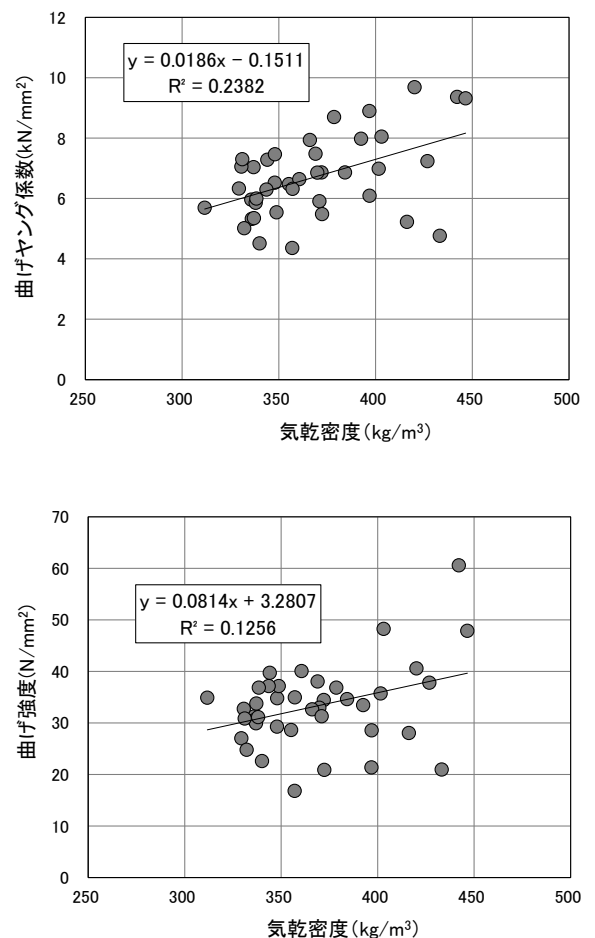


図6 気乾密度と曲げヤング係数および曲げ強度との関係

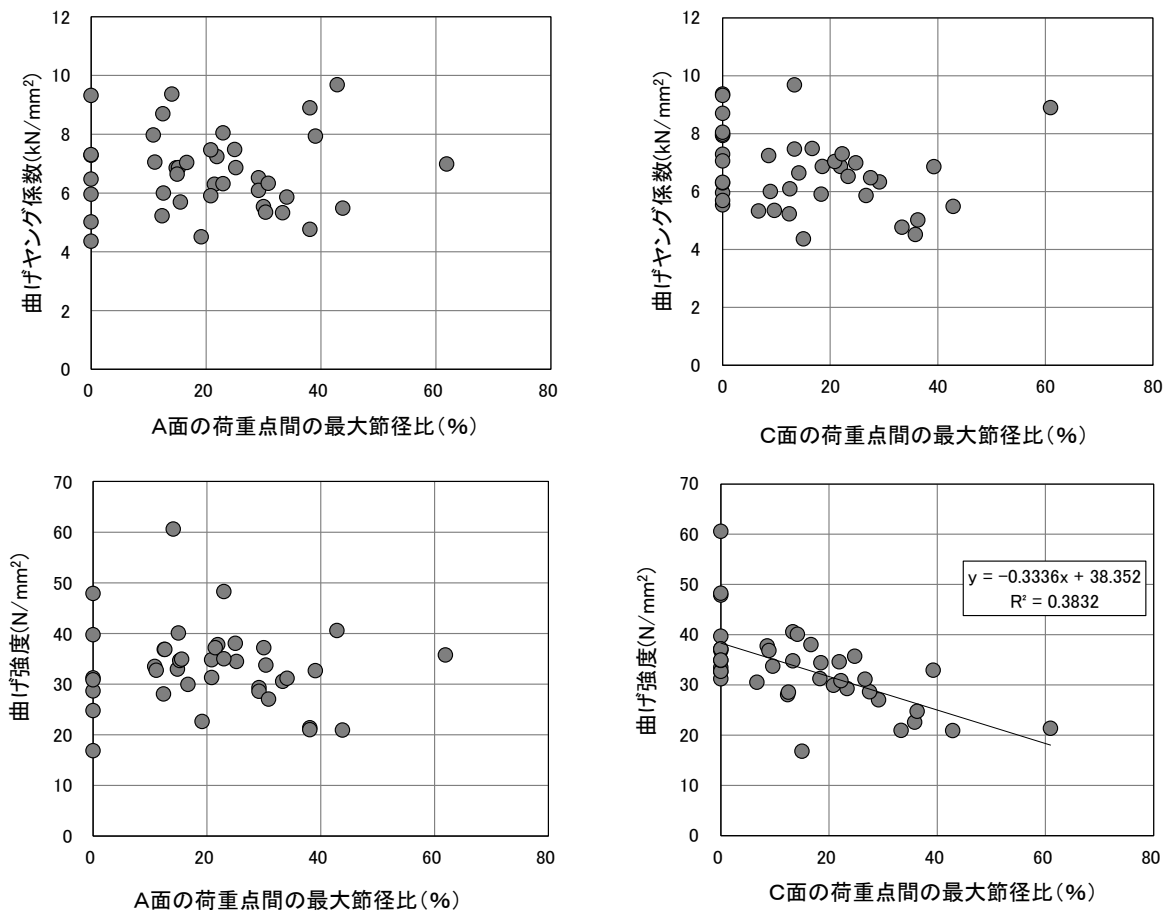


図7 荷重点間の最大節径比と曲げヤング係数および曲げ強度との関係

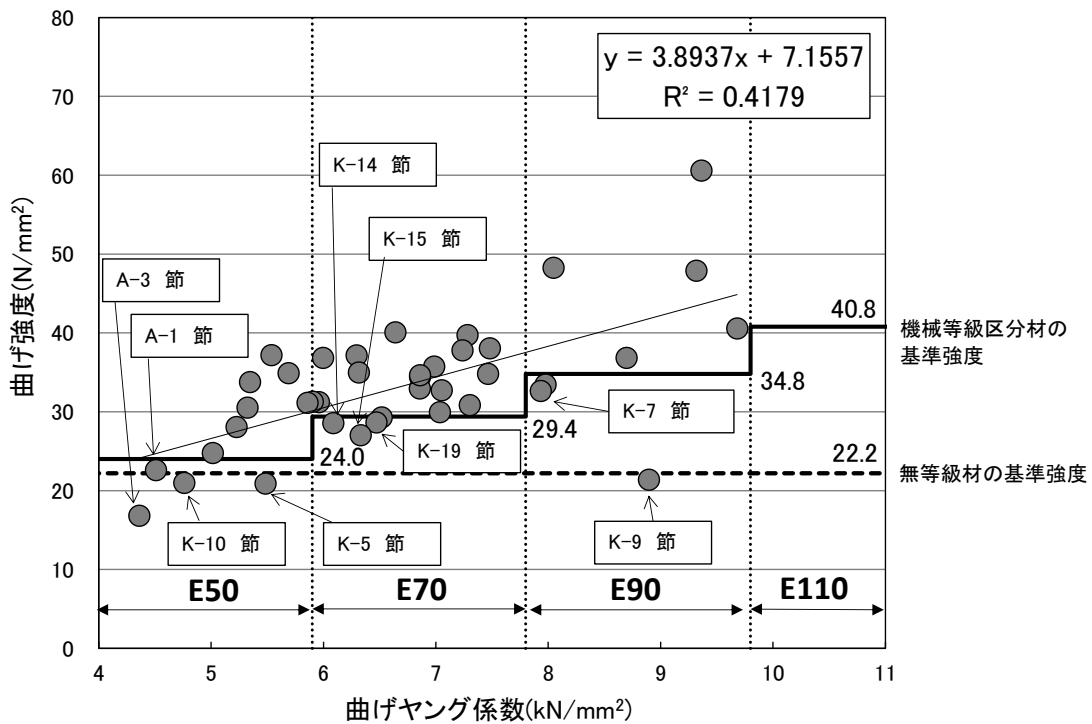


図8 曲げヤング係数と曲げ強度との関係

一方、無等級材の基準強度を下回った試験体が4本 (K-5、K-9、K-10、A-3) 確認された。これらの試験体は、いずれも荷重点間の引張側に節または流れ節がみられ、曲げ試験時にはそれらに起因する割れが発生した (図9)。これらの4本の試験体の荷重点間には節以外の欠点、すなわち腐朽や丸身等はみられなかった。さらに、無等級材の基準強度を上回ったが、機械等級区分材の基準強度を下回った試験体が7本 (K-7、K-13、K-14、K-15、K-19、K-21、A-1) 出現した。7本のうち5本 (K-7、K-13、K-15、K-19、A-1) には、荷重点間および荷重点付近の引張側にC面からB面およびC面からD面を貫通する節 (以下「貫通節」とする) が、1本 (K-14) には集中節があり、曲げ試験時にはそれに起因する割れが発生した。なお、荷重点間には腐朽や丸身等の節以外の欠点はみられなかった。貫通節は心持ち材では通常出現することはない、心去り材特有のものであり、引張側に存在する節は、時として基準強度を下回る原因になることが既に報告されている^{1,10)}。

全試験体について、最大節径比および集中節径比により求めた目視等級区分 (全長および荷重点間) と曲げ強度との関係を図10に示す。ここで、実線は各等級の曲げ強度の平均値を、破線は「製材の日本農林規格」⁵⁾ における目視等級区分構造用製材の等級ごとのスギの曲げ基準強度を示している。全長、荷重点間いずれも各等級の曲げ強度の平均値は各等級の基準強度を上回った。

一方、目視等級区分材の各等級の基準強度を満たさない試験体が、全長、荷重点間いずれも5本 (A-1、A-3、A-14、K-5、K-10) 確認された。いずれの試験体も、荷重点間の引張側に節および流れ節がみられ、曲げ試験時にはそれに起因する割れが発生したが、5本中1本 (A-14) は機械等級区分材の曲げヤング係数に対応した基準強度を満たしていた。

図11に機械等級区分材の曲げヤング係数に対応した基準強度を下回った試験体 (n=11) および基準強度を上回った試験体 (n=29) について、それぞれの気乾密度の平均値を示す。両試験体の間でウェルチのt検定を実施した結果、有意差は認められなかった。このことから、図6に示したように気乾密度は曲げ強度には影響を及ぼす可能性はあるが、図11のとおり基準強度を下回った要因であるとは考えにくい。

一方、図12に機械等級区分材の曲げヤング係数に対応した基準強度を下回った試験体 (n=11) および基準強度を上回った試験体 (n=29) について、各材面の荷重点間の最大節径比の平均値を示す。A~Dの各材面において基準強度を上回った試験体および下回った試験体の間

で、最大節径比の平均値についてウェルチのt検定を実施した。その結果、C面のみ5%水準で有意な差が認められた。このことから、引張側、すなわちC面の荷重点間の最大節径比は図7に示したように曲げ強度に影響を及ぼし、さらに図12のとおり基準強度を下回った原因である可能性が高い。

今回の試験ではマニュアルに従い、節等の欠点の位置を無作為に配置して強度試験を行った結果、機械等級区分材および無等級材の基準強度を下回った試験体が存在した。低い曲げ強度となった要因の一つとして、引張応力が働くC面の荷重点間の節の存在が考えられた。また統計的にC面の最大節径比が曲げ強度に影響を与えることが確認された。これらのことから、大径材から心去り平角を採材し横架材として使用する場合、節の出現を避けることは困難であるが、節が引張応力が働く側に位置しないようにプレカット時に配慮を求める、あるいは大きな節および流れ節を持つ心去り平角は短スパンの梁や桁等に使用する等の配慮が必要と考えられる。

また、本研究に供した心去り平角は、限られた地域において限られた時期に生産されたものであることから、県南部から産出されるスギ心去り平角の材質を必ずしも反映するとは言えないため、今後、さまざまな地域から試験材を収集し、データを蓄積する必要がある。

4. まとめ

奈良県産スギ大径材から採材した心去り平角の曲げ試験を行った。荷重面を無作為とした曲げ試験の結果、試験体40本中29本 (72.5%) が機械等級区分材の曲げヤング係数に対応した基準強度を満たした。また36本 (90.0%) が無等級材の基準強度 22.2N/mm^2 を有していた。一方、機械等級区分材および無等級材の基準強度を満たさない試験体も一部に確認された。低い曲げ強度となった要因の一つとして、荷重点間の引張応力が働く側に位置した節が考えられたことから、スギ心去り平角を横架材として使用する際には、節による等級区分を実施し、大きな節および流れ節を持つ材は短スパンの梁や桁等に使用する等の配慮が必要と考えられる。今後の課題としては、さまざまな地域で伐出されるスギ大径材から心去り平角を採取して試験を実施し、データの蓄積および考察が必要である。

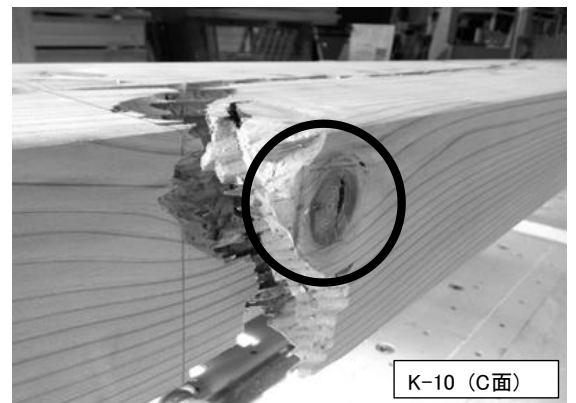
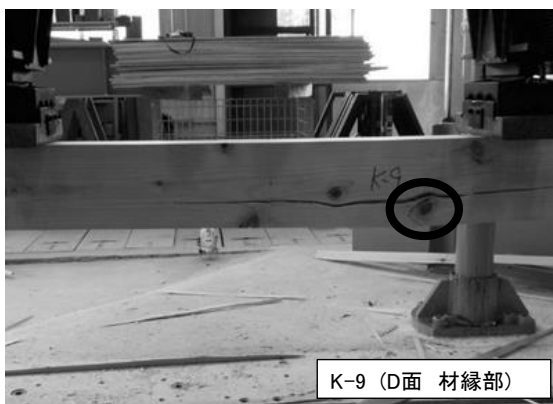
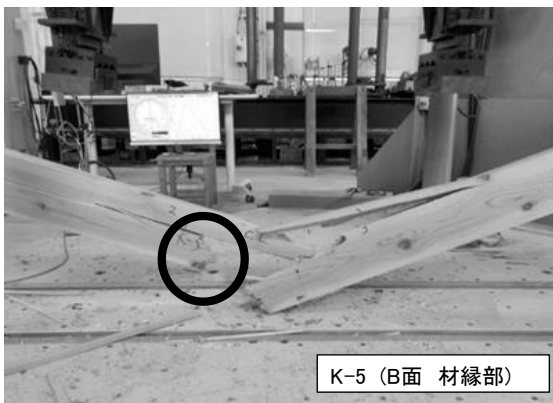
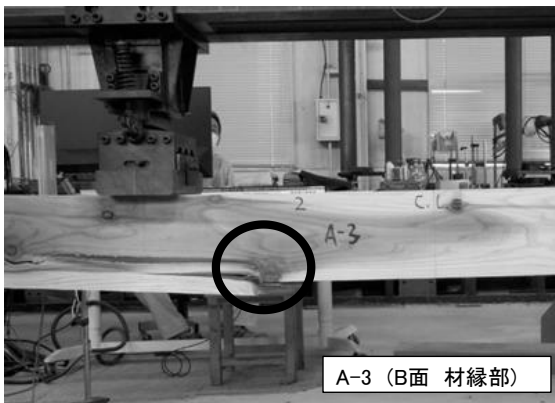


図9 曲げ試験において破壊の起点と考えられる節
 注) 該当の節を黒丸内に示す。括弧内は節が位置した材面を示す。

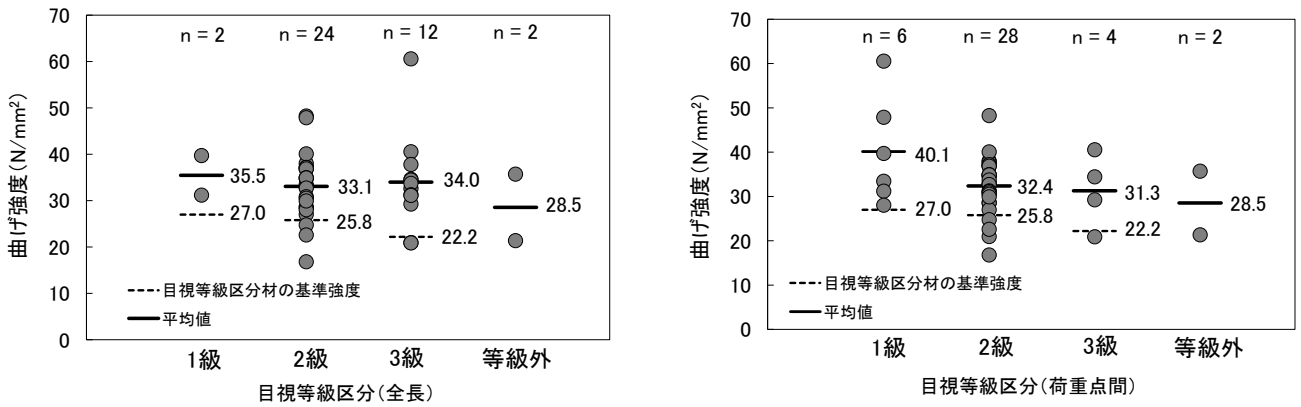
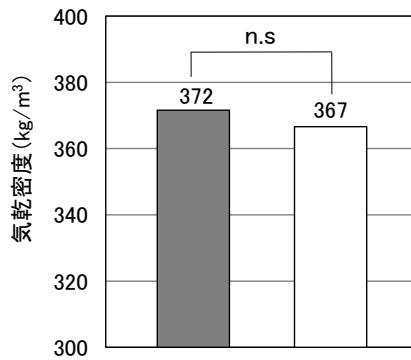


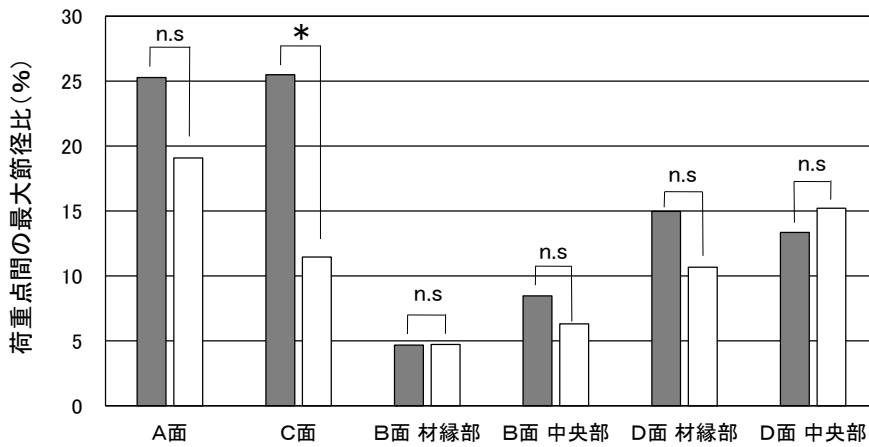
図 10 目視等級区分と曲げ強度との関係



- 機械等級区分材の基準強度を下回った試験体 (n=11) の平均値
- 機械等級区分材の基準強度を上回った試験体 (n=29) の平均値

図 11 試験体間の気乾密度の比較

注) n.s : 有意差なし



- 機械等級区分材の基準強度を下回った試験体 (n=11) の平均値
- 機械等級区分材の基準強度を上回った試験体 (n=29) の平均値

図 12 各材面ごとの荷重点間の最大節径比の比較

注) n.s : 有意差なし、* : 危険率 5% で有意差あり

引用文献

- 1) 椎葉淳, 荒武史朗, 松元明弘, 森田秀樹: 大径材から得られたスギ心去り平角材の曲げ性能. 日本森林学会誌, 97, 203-207(2015)
- 2) 柴和宏: ボカスギ大径材の構造利用技術の開発 (I) 心去り平角材の仕上がり品質と強度性能. 富山県農林水産総合技術センター木材研究所研究報告, 9, 1-13(2022)
- 3) 奥原祐司, 今井信, 吉田孝久, 山口健太: 心去り無垢梁桁材の乾燥特性及び強度特性の解明. 長野県林業総合センター研究報告. 35, 124-139(2021)
- 4) 柳川靖夫, 成瀬達哉: 県産スギ大径丸太から採取した心去り平角の材質. 奈良県森林技術センター研究報告. 49, 11-24(2020)
- 5) 農林水産省: 製材の日本農林規格 (最終改正: 令和元年8月15日農林水産省告示第661号), (2019)
- 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 (第4版)”. 東京, (公財) 日本住宅・木材技術センター, 2013
- 7) 強度性能研究会: “「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<8>”. 独立行政法人森林総合研究所構造利用研究領域内強度性能研究会事務局編, 2013, 4
- 8) 村田功二: “有節材の強度, 日本木材学会 木材強度・木質構造研究会編 ティンバーメカニクス 木材の力学理論とその応用” 大津, 海青社, 2015, 34-35
- 9) 高山勉, 永井智: スギ大径材から得られた上下心去り平角の曲げ性能と材面の品質. 兵庫県農林水産技術総合センター研究報告. 5, 12-18(2022)
- 10) 岐阜県森林研究所: スギ心去り平角材の強度を考える(1). <https://www.forest.rd.pref.gifu.lg.jp/rd/shigen/mori220201.html>

(2023年4月24日 受理)