

県産材の高品質乾燥技術の開発(2)

—スギ桁材の乾燥方法別曲げ強度特性—

今井信・吉田孝久・柴田直明・山内仁人・高野弑夫*

前号報告の4種類の乾燥方法で乾燥したスギ桁材の曲げ強度試験を行った。その結果、(1)全ての試験材が、スギ無等級材の基準強度 22.2N/mm^2 を上回った。(2)機械等級区分材の基準強度に関しては、弱加圧型高温乾燥で5体、蒸気圧力併用型乾燥で4体、高温セット+中温乾燥で3体、高温セット+高温乾燥で4体が基準値を満たさなかった。(3)曲げ強さの平均値に統計的な差は認められなかったが、曲げ強さの5%下限値は、蒸気圧力併用乾燥で 29.4N/mm^2 、高温セット+中温乾燥で 29.0N/mm^2 、高温セット+高温乾燥で 27.3N/mm^2 、弱加圧型高温乾燥材で 24.4N/mm^2 となり、高温で乾燥する時間が長いほど曲げ強さが低下する傾向がみられた。

キーワード：高温セット、蒸気・圧力併用型乾燥、スギ桁材、曲げ強さ

1 はじめに

長野県内の民有林では、高齢林（51年生以上）の人工林面積割合が、現在約6割であり10年後には約8.5割となる見込みとなっている¹⁾。大径丸太の生産が可能となり、森林資源として充実しつつある県産材の利用促進のためには、様々な現施工法への大断面無垢材の利用や在来軸組工法住宅における横架材としての利用などを図る必要がある。

現在、木造住宅の8割弱を占める在来工法（木造軸組工法）では、部材の多くに外材が使われている。管柱については、国産材（製材・集成材）のシェアは約6割を占めているが、曲げ剛性が求められる梁・桁材等の横架材においては、国産材（製材・集成材等）シェアが1割弱、ベイマツを中心とする外材が9割以上を占めている²⁾。

一方、大断面製材の乾燥は時間がかかり、乾燥された材の品質も明らかにされていない。また、建築現場では、材面割れのない構造材を求められることが多いため、近年では高温セットを施した人工乾燥材が広く使われるようになっているが、過度な高温乾燥による熱劣化も指摘されている。

そこで、今回は千曲川下流流域の民有林人工林の55%を占めるスギの梁・桁材等の構造材として需要の拡大を図るため、北信スギ梁桁材について、4種類の高温セット乾燥を行い、乾燥特性と曲げ強度性能を調査した。乾燥特性については、前号（2015 研究報告「県産材の高品質乾燥技術の開発（1）—スギ桁材の乾燥方法別乾燥特性—」）で報

告し、本報では曲げ強さについて報告する。

なお、本試験は、国交課題「県産材の高品質乾燥技術の開発」及び千曲川下流流域林業活性化センターとの技術協力により実施した。

2 試験の方法

供試材、乾燥方法と形質測定、乾燥試験の方法については、前号に記載している。

なお、各乾燥方法毎に、ヤング係数の分布が均等になるように試験材を区分した（図-1）。

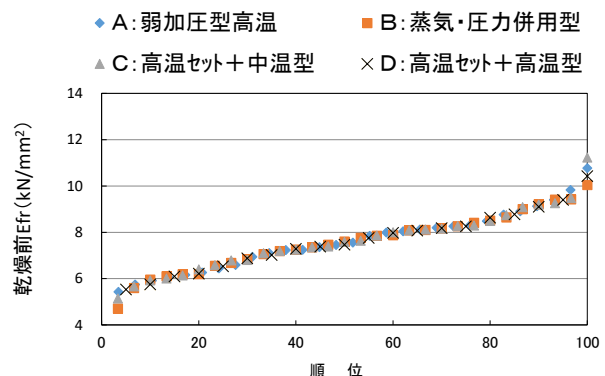


図-1 乾燥前の Efr の順位化

人工乾燥後約3か月養生した同試験体をモルダで $120 \times 240 \times 4,000\text{mm}$ に仕上げ、寸法、重量、含水率計含水率（MOC02）、縦振動法によるヤング係数（Efr）、材面割れ、目視等級区分に基づく節調査（節径比、集中節径比）を実施した。

測定後、実大材強度試験機（株式会社島津製作所製UH-1000kNA）を用い下部支点間距離 $3,900\text{mm}$ 、上部荷重点間距離 $1,300\text{mm}$ の3等分点4点荷重方式、

載加速度 15mm/min で曲げ試験を行った(図-2)。
試験体の側面中央部に変位計を設置し試験体の全たわみを測定した。試験終了後、全たわみから求めた見かけの曲げヤング係数および曲げ強度を算出した。

曲げ試験終了後、非破壊部より含水率試片を切り出し、全乾法含水率と材内水分傾斜について調査した。

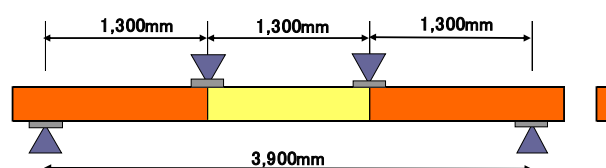


図-2 曲げ試験条件

表-1 曲げ強度試験結果の概要

	A: 弱加圧型高温					B: 蒸気・圧力併用型				
	Efr (kN/mm ²)	MOE (kN/mm ²)	MOR (N/mm ²)	含水率 (%)	気乾密度 (g/cm ³)	Efr (kN/mm ²)	MOE (kN/mm ²)	MOR (N/mm ²)	含水率 (%)	気乾密度 (g/cm ³)
平均	8.41	8.61	38.2	15.2	0.388	8.32	8.47	41.4	12.4	0.385
標準偏差	1.39	1.45	7.41	3.5	0.030	1.32	1.29	6.42	3.7	0.033
変動係数(%)	16.5	16.8	19.4	23.0	7.7	15.8	15.2	15.5	29.6	8.6
最小	6.24	6.53	23.9	8.5	0.324	5.43	5.32	31.9	7.0	0.325
最大	11.78	12.20	52.5	22.9	0.451	10.83	11.10	55.6	22.0	0.441
5%下限値	-	-	24.4	-	-	-	-	29.4	-	-
データ数	29	29	29	29	29	30	30	30	30	30

	C: 高温セット+中温型					D: 高温セット+高温型				
	Efr (kN/mm ²)	MOE (kN/mm ²)	MOR (N/mm ²)	含水率 (%)	気乾密度 (g/cm ³)	Efr (kN/mm ²)	MOE (kN/mm ²)	MOR (N/mm ²)	含水率 (%)	気乾密度 (g/cm ³)
平均	8.59	8.90	42.5	15.0	0.383	8.45	8.65	39.4	15.3	0.385
標準偏差	1.34	1.22	7.23	3.6	0.034	1.34	1.44	6.29	3.7	0.028
変動係数(%)	15.6	13.8	17.0	23.7	8.8	15.8	16.6	15.9	24.1	7.2
最小	5.88	5.99	26.8	11.2	0.333	6.23	6.47	28.4	11.5	0.350
最大	12.08	11.25	57.9	26.5	0.483	11.24	11.96	47.4	24.0	0.441
5%下限値	-	-	29.0	-	-	-	-	27.3	-	-
データ数	30	30	30	30	30	20	20	20	20	20

3 曲げ試験の結果

縦振動法によるヤング係数 (Efr)、見かけのヤング係数(MOE)、曲げ強さ(MOR)、試験時の全乾法による含水率、気乾密度を表-1 に示す。なお、「A：弱加圧型高温乾燥」の試験体1体は材長が4,000mm に足りず、上記条件で曲げ試験が実施できなかったため、本試験の結果からは除外した。

3.1 試験体含水率

図-3 に試験時の全乾法による平均含水率と最大値・最小値を示した。

各スケジュールで人工乾燥したのち、約3か月養生した試験体の曲げ試験時の含水率は、「A：弱加圧型高温乾燥」は平均 15.2%、(最大値～最小値：22.9～8.5%、変動係数 23.0%)、「B：蒸気圧力併用型乾燥」は平均 12.4%、(最大値～最小値：22.0～7.0%、変動係数 29.6%)、「C：高温

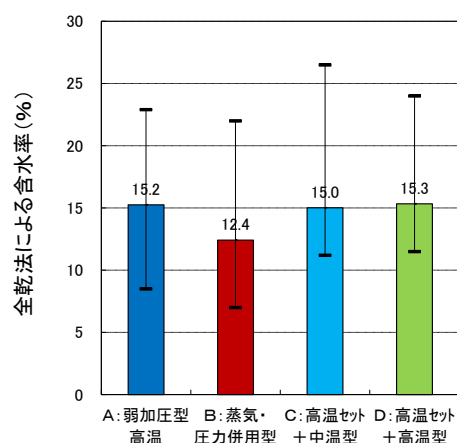


図-3 3ヶ月養生後の全乾法含水率

セット+中温乾燥」は平均 15.0%、(最大値～最小値：26.5～11.2%、変動係数 23.7%)、「D：高温セット+高温乾燥」平均 15.3%、(最大値～最小値：24.0～11.5%、変動係数 24.1%) であった。

製材の日本農林規格(JAS)で示される乾燥材基準のD20をほぼ満足していた。

また、含水率10%以下の試験体は、「A：弱加圧型高温乾燥」は2体/30体、「B：蒸気圧力併用型乾燥」は8体/30体、「C：高温セット+中温乾燥」と「D：高温セット+高温乾燥」では0体であり、「B：蒸気圧力併用乾燥」で他の乾燥方法に比べ過乾燥の試験体が多かった。

なお、今回の曲げ試験体は人工乾燥後約3か月間養生していたため、気乾平衡含水率に近づいているものとみなし、ヤング係数、曲げ強さ等の試験結果に対して含水率補正は行わなかった。

3.2 曲げヤング係数

3.2.1 縦振動法によるヤング係数(Efr)

図-4に各乾燥方法での乾燥前と曲げ試験時(乾燥後)の縦振動法によるヤング係数(Efr)の平均値を示した。また、図-5に曲げ試験時(乾燥後)の順位化したEfrを示した。

Efrは、乾燥によって乾燥前より10%~12%増加していたが、乾燥法による違いは確認できなかった。

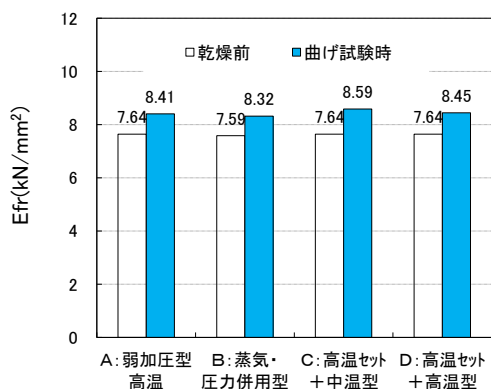


図-4 乾燥前と曲げ試験時(乾燥養生後)のEfr

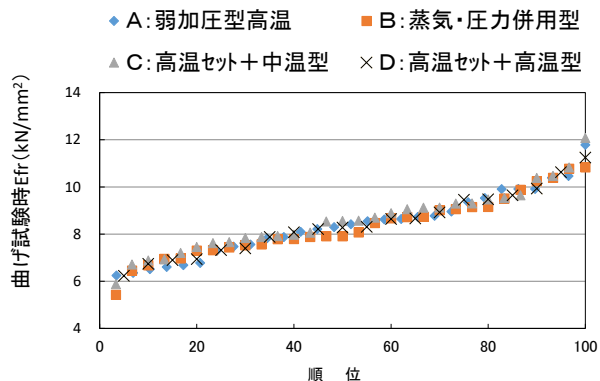


図-5 曲げ試験時(乾燥後)のEfrの順位化

3.2.2 見かけの曲げヤング係数(MOE)

図-6に各乾燥方法での見かけのヤング係数(MOE)の平均値と最大値・最小値を、図-7に順位化したMOEを示した。また、EfrとMOEの関係と図-8に示した。

乾燥スケジュールによって、見かけのヤング係数(MOE)に違いは確認できなかった。また、EfrとMOEは対応していた。

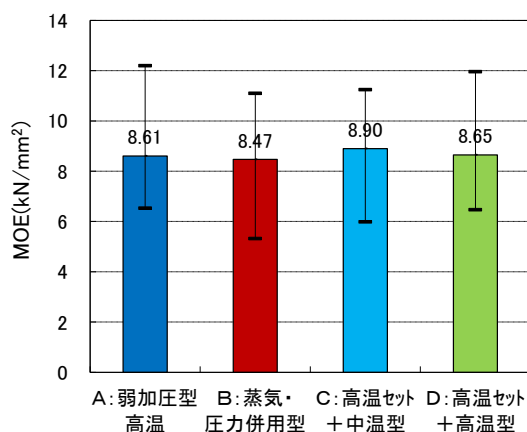


図-6 乾燥スケジュールごとのMOE

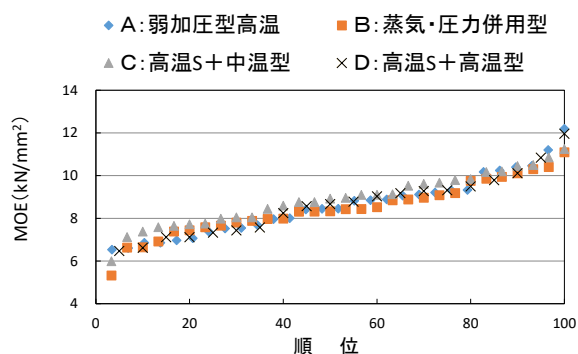


図-7 MOEの順位化

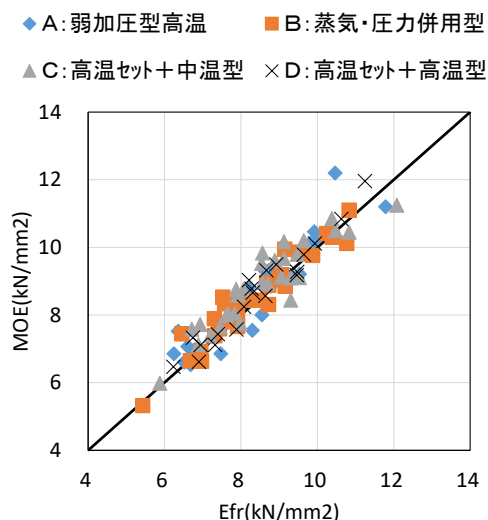


図-8 曲げ試験時EfrとMOEの関係

3.3 曲げ強さ

3.3.1 乾燥スケジュールと曲げ強さ

図-9 に各乾燥方法での曲げ強さの平均値と最大値・最小値を示し、図-10 に曲げ強さを順位化して示した。また、見かけの曲げヤング係数(MOE)と曲げ強さ(MOR)の関係を図-11 に示した。

各乾燥スケジュールごとの曲げ強さは、「A：弱加圧型高温乾燥」では平均 38.2N/mm²、(最大値～最小値:52.5～23.9N/mm²、変動係数 19.4%)、「B：蒸気圧力併用型乾燥」では平均 41.4N/mm²、(最大値～最小値:55.6～31.9N/mm²、変動係数 15.5%)、「C：高温セット+中温乾燥」では平均 42.5N/mm²、(最大値～最小値:57.9～26.8N/mm²、変動係数 17.0%)、「D：高温セット+高温乾燥」では平均 39.4N/mm²、(最大値～最小値:47.4～28.4N/mm²、変動係数 15.9%)であった。

スギ無等級材の基準強度 22.2N/mm² については、全ての試験体が上回った。一方、機械等級区分材の基準強度に関しては、「A：弱加圧型高温乾燥」で 5 体、「B：蒸気圧力併用型乾燥」で 4 体、「C：高温セット+中温乾燥」で 3 体、「D：高温セット+高温乾燥」で 4 体が基準値を満たさなかった。

スケジュールの違いによって、曲げ強さの平均値に統計的な差は認められなかったが、順位化した曲げ強さで比較するとでは「A：弱加圧型高温」及び「D：高温セット+高温乾燥」が「B：蒸気圧力併用型乾燥」及び「C：高温セット+中温乾燥」に比べて低い傾向がみられた(図-10)。また、曲げ強さの信頼水準 75%における 5%下限値は、「B：蒸気圧力併用乾燥材」で 29.4N/mm²、「C：高温セット+中温乾燥材」で 29.0N/mm²、「D：高温セット+高温乾燥材」で 27.3N/mm²、「A：弱加圧型高温乾燥材」で 24.4N/mm² となり、高温乾燥時間が長いほど曲げ強さが低下する傾向がみられた。

乾燥スケジュールごとの破壊の様子を写真-1～4 に示すが、乾燥方法によって、脆性破壊が多い少ない等の大きな違いは確認できなかった。しかし、せん断破壊が、「A：弱加圧型高温乾燥」では 1 体/30 体、「B：蒸気圧力併用型乾燥」でも 1 体/30 体、「C：高温セット+中温乾燥材」では 0 体/30 体であったのに対して、「D：高温セット+高

温乾燥」では 3 体/20 体認められ、30 体に換算すると 4.5 体と多くなり、高温による影響が危惧された。

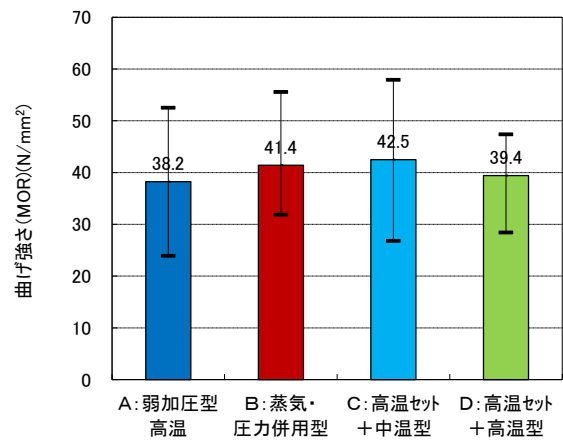


図-9 乾燥スケジュールごとの曲げ強さ

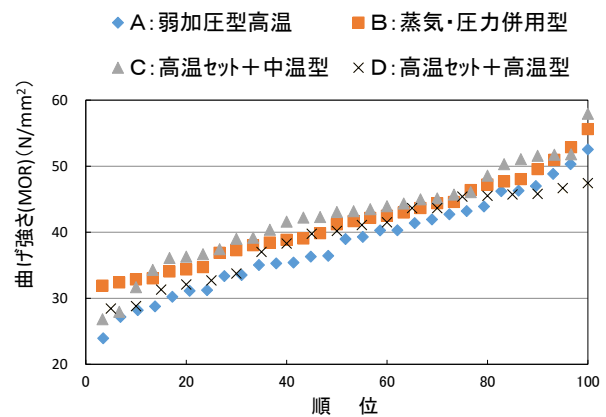


図-10 曲げ強さの順位化

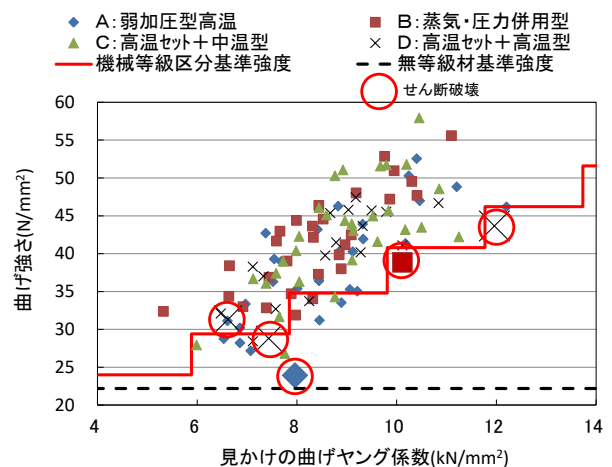


図-11 MOE と MOR の関係



曲げ強さ最大(52.5N/mm²)の試験体



曲げ強さ最小(25.4N/mm²)の試験体

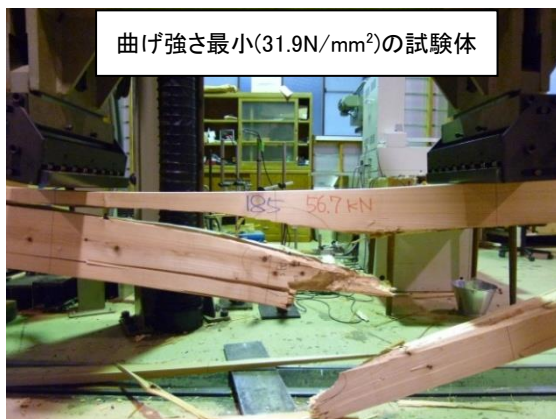


せん断破壊した試験体(23.9N/mm²)

写真-1 曲げ強度試験による破壊の様子 (A : 弱加圧型高温乾燥)



曲げ強さ最大(55.6N/mm²)の試験体

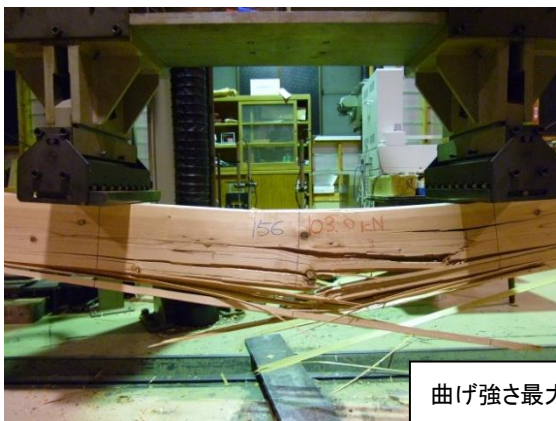


曲げ強さ最小(31.9N/mm²)の試験体



せん断破壊した試験体(38.3N/mm²)

写真-2 曲げ強度試験による破壊の様子 (B : 蒸気・圧力併用型乾燥)



曲げ強さ最大(57.9N/mm²)の試験体



曲げ強さ最小(26.8N/mm²)の試験体



写真-3 曲げ強度試験による破壊の様子(C:高温セット+中温型)



曲げ強さ最大(47.4N/mm²)の試験体



曲げ強さ最小(28.4N/mm²)の試験体



せん断破壊した試験体(28.8N/mm²)



せん断破壊した試験体(43.6N/mm²)

写真-4 曲げ強度試験による破壊の様子(D:高温セット+高温型)

次に、乾燥スケジュールごとに、節による目視等級区分による曲げ強さを表-2 及び図-12 に示した。また、各乾燥スケジュールの1級材と2級材の曲げ強さを図-13, 14 に示した。

データ数にバラツキはあるが、それぞれの乾燥スケジュールで曲げ強さの平均値は1級材>2級材

となり節は強度に影響していることが確認された。また、各乾燥スケジュールの1級材及び2級材の曲げ強さの平均値では、目視等級区分をしない場合と同様、高温で乾燥する時間が長いほど曲げ強さが低下する傾向がみられた。

表-2 乾燥スケジュールごとの目視等級区分材(節)の曲げ強さ

乾燥スケジュール	A: 弱加圧型高温				B: 蒸気・圧力併用型				C: 高温セット+中温型				D: 高温セット+高温型			
目視等級(節)	1級	2級	3級	等級外	1級	2級	3級	等級外	1級	2級	3級	等級外	1級	2級	3級	等級外
平均	39.4	37.2	38.3	40.3	47.3	39.5	38.0	38.0	43.5	42.4	41.4	39.2	41.5	38.0	40.1	
標準偏差	9.7	6.2	7.2		6.5	5.3		5.2	3.1	8.9	9.0		4.5	6.8	10.4	
変動係数(%)	24.7	16.7	18.7		13.7	13.3		13.6	7.0	20.9	21.7		10.8	18.0	26.0	
最小	23.9	28.2	28.8		36.9	31.9		34.4	37.4	26.8	36.1		33.7	28.4	32.7	
最大	52.5	48.8	46.2		55.6	49.5		41.7	48.5	57.9	51.7		46.7	45.8	47.4	
データ数	10	14	4	1	8	19	1	2	9	17	3	1	7	11	2	

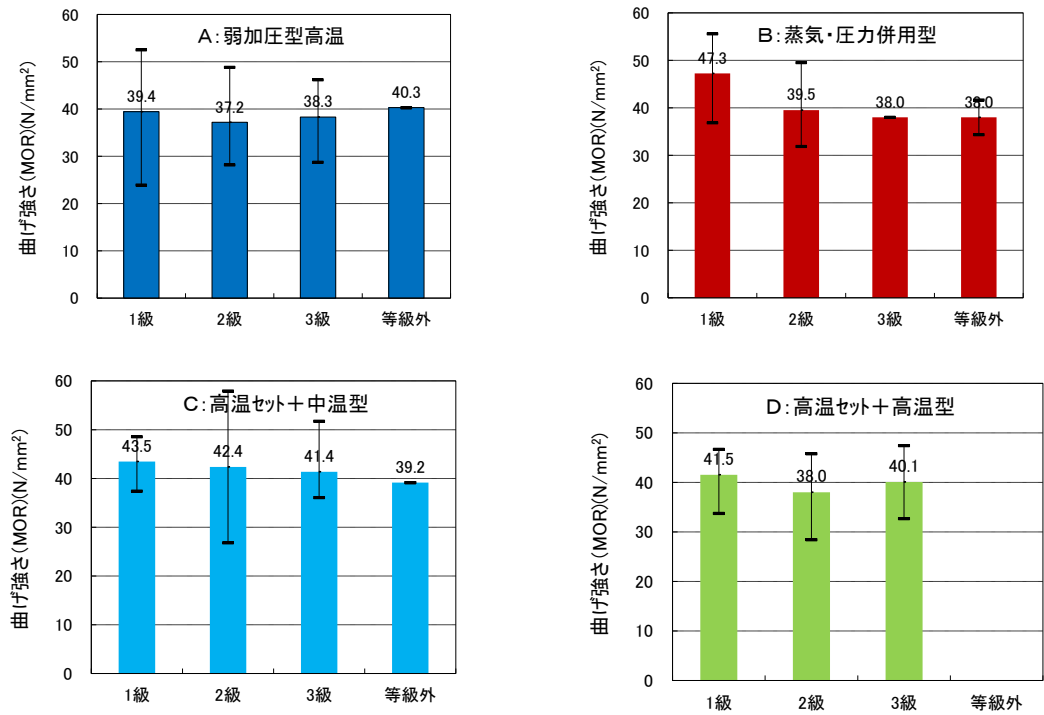


図-12 乾燥スケジュールごとの目視等級区分材の曲げ強さ

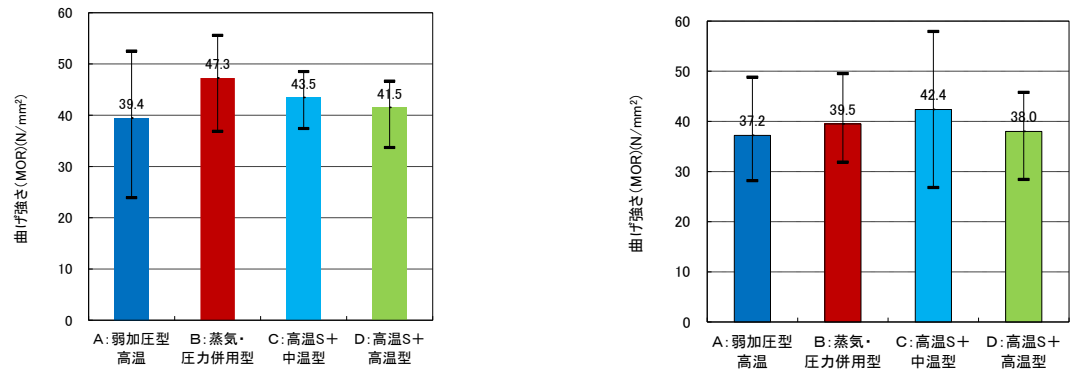


図-13 1級材の曲げ強さ

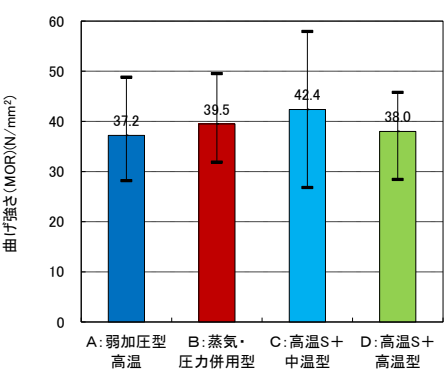


図-14 2級材の曲げ強さ

3.3.2 節径及び比重, 内部割れと曲げ強さの関係

荷重点間（中央 1/3）下面の単独節径と曲げ強さの関係を図-15 に示した。また、曲げ強さと試験時気乾密度との関係を図-16 に、内部割れとの関係を図-17 に示した。

荷重点間（中央 1/3）下面の単独節径が大きくなると曲げ強さが低下する傾向が見られたが、一方で、節が下面に無い材(0mm)であっても曲げ強さは大きくばらついていた。

試験時気乾密度との関係では、気乾密度が高いほど曲げ強度も高くなる傾向が若干見られるものの、両者には強い相関は認められなかった。最も両者の関係が強い蒸気・圧力併用型乾燥での決定係数は $R^2=0.2241$ であった。

また、内部割れ長さと曲げ強度との関係も、明らかではなかった。

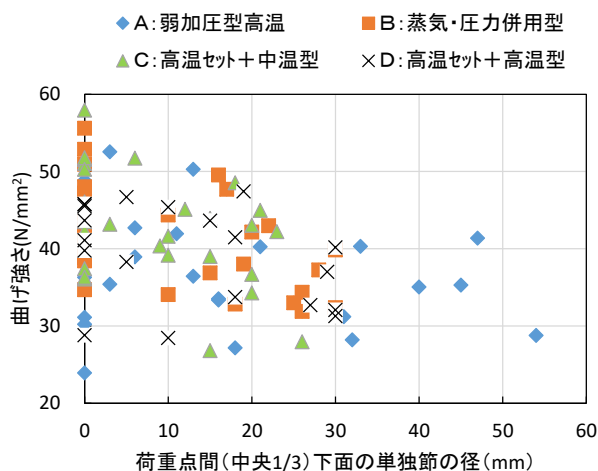


図-15 節と曲げ強さの関係

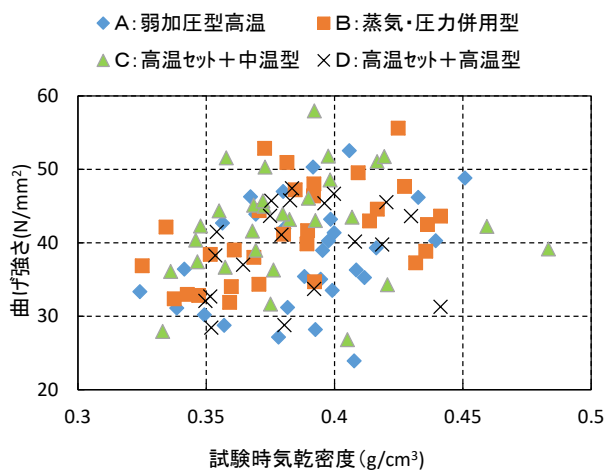


図-16 試験時気乾密度と曲げ強さの関係

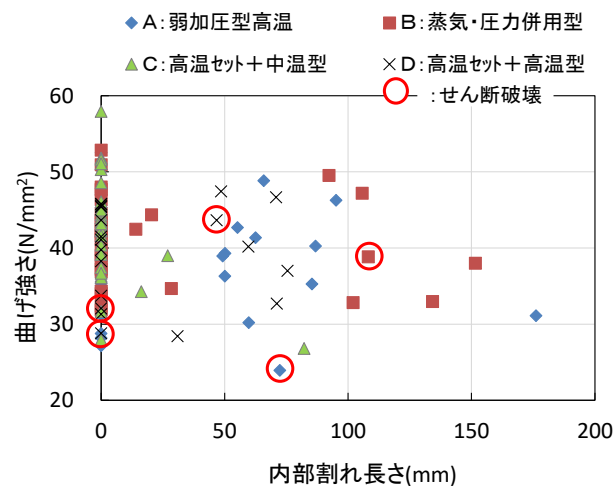


図-17 内部割れ長さと曲げ強さの関係

3.3.3 既存データとの比較

曲げ試験データを既存のデータ（「木材の強度等データおよび解説」木構造振興株式会社⁴⁾）と比較するため、梁せいを 150mm, 荷重条件を標準実験条件として計算した結果を、図-18 に示した。

その結果、今回の試験結果は、既存データの範囲内であった。

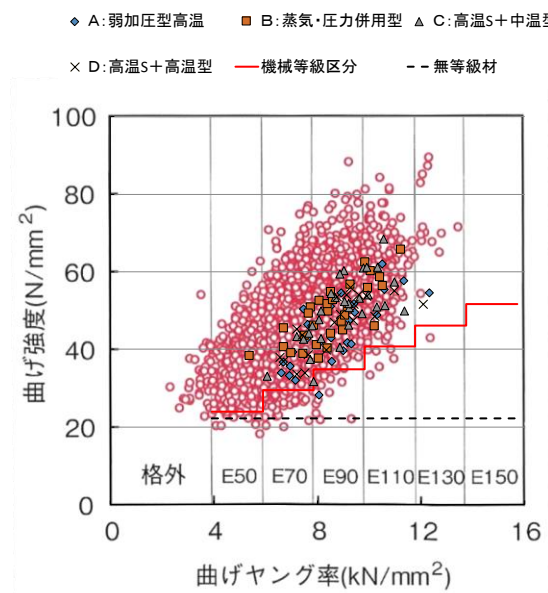


図-18 標準条件での MOE と MOR の既存データ⁴⁾との関係

4 まとめ

千曲川下流流域の人工林の 55%を占めるスギは、徐々に成熟しつつあり大径丸太の生産が可能になってきている。そこで、大径材の利用拡大を図るため、北信スギ梁桁材を高温セットによる 4 種類の乾燥方法で含水率 20%以下を目標に乾燥試験を行い、その曲げ強度特性について検討した。

その結果、

- 1) Efr は乾燥によって 10%~12%増加したが、乾燥法による違いは確認できなかった。また、見かけのヤング係数(MOE)にも違いはなかった。
- 2) 乾燥スケジュールの違いによって、曲げ強さの平均値に統計的な差は認められなかった。しかし、曲げ強さの度数分布や、曲げ強さの信頼水準 75%における 5%下限値、または、節による目視等級区分において、「A：弱加圧型高温」及び「D：高温セット+高温乾燥」の乾燥過程を通して 100℃以上で乾燥する方法は、「B：蒸気圧力併用型乾燥」及び「C：高温セット+中温乾燥」の乾燥途中から 100℃以下の乾燥に移行する方法に比べて低い傾向がみられ、高温で乾燥する時間が長いほど曲げ強さが低下する傾向がみられた。
- 3) 曲げ破壊形態で高温による脆性破壊の増加は確認できなかったが、せん断破壊したものは、「D：高温セット+高温乾燥」で 3 体/20 体認められ、30 体に換算すると 4.5 体と多かった。但し、内部割れとの関係は不明であった。
- 4) 曲げ強さと荷重点間（中央 1/3）下面の単独節径及び試験時気乾密度、内部割れとの関係は、明らかではなかった。
- 5) 曲げ強さは、既存のデータ（「木材の強度等データおよび解説」木構造振興株式会社）と比）の範囲内であった。

4) 「木材の強度等データおよび解説」木構造振興株式会社

引用文献・参考文献

- 1) 長野県民有林の現況(平成 27 年)
- 2) 平成 24 年度森林・林業白書
- 3) 吉田孝久・今井信・柴田直明・山内仁人・高野弑夫(2015):県産材の高品質乾燥技術の開発
(1)ースギ桁材の乾燥方法別乾燥特性ー, 長野県林業総合センター研究報告, No. 30 p. 95ー105