

論文 (Original article)

製材品の曲げ強度における寸法効果パラメータの検討 (第2報) 目視等級区分法による検討

井道 裕史^{1)*}、加藤 英雄¹⁾、長尾 博文¹⁾

要旨

製材の日本農林規格 (JAS 1083) に対応した曲げの基準強度を材せいに応じて低減するための寸法調整係数に対する寸法効果パラメータについて、前報の機械等級区分法による検討に引き続き、本報では目視等級区分法による検討を行った。まず、機械等級区分法も含めた樹種・等級ごとの材せいと曲げ強度との関係から、寸法効果パラメータは樹種・等級ごとに設定するのではなく、単一の値とするのが現実的であると考えられた。次いで、目視等級区分法における基準強度に対する寸法調整係数と、5%下限値/基準強度とを比較した結果、目視等級区分法における曲げ強度の寸法効果パラメータも機械等級区分法による結果から得られたそれと同等の0.4~0.5とすることが妥当であると考えられた。ただし、いくつかの課題は依然残されており、今後得られる材せいの大きい製材品からの曲げ強度のデータも積み重ねた上で、寸法効果パラメータの値は再検証を続けていく必要がある。

キーワード：寸法効果パラメータ、寸法調整係数、曲げ強度、構造用製材、データベース

1. はじめに

前報 (井道ら 2020) では、『「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<8>』(強度性能研究会事務局 2013) に集積された曲げ強度のデータを用いて、寸法効果の影響を調べるとともに、製材の日本農林規格 (JAS 1083) (農林水産省 2007) (以下、製材 JAS という) に対応した機械等級区分構造用製材の曲げの基準強度 (建設省 2000) を、材せいに応じて低減するための寸法調整係数に対する寸法効果パラメータの値を検討した。その結果、標準材せいは 150mm、寸法効果パラメータは 0.4~0.5 程度にするのが適当であるとの結論を得た。

上記の結果は、横架材としての利用が多いスギ、アカマツ、ベイマツの 4 点曲げ試験によるデータを、曲げヤング係数に基づき機械等級区分し、樹種、機械等級、材せいごとに曲げ強度の 5% 下限値を算出し、これを曲げの基準強度 (以下、単に基準強度という) と比較したものである。すなわち、前報は、機械等級区分法により等級区分された製材品の寸法効果パラメータを検討したものであり、目視等級区分法により等級区分された製材品の寸法効果パラメータの検討が課題として残されていた。

そこで、本報では、前報で用いたスギ、アカマツ、ベイマツの 4 点曲げ試験によるデータのうち、目視等級区分法による等級が示されているものを抜き出し、前報と同様の手法により、樹種、目視等級、材せいごとに曲げ

強度の 5% 下限値を算出した。また、5% 下限値と目視等級区分構造用製材の基準強度 (建設省 2000) との比を、前報で提案した寸法効果パラメータと比較することにより、目視等級区分法による寸法効果パラメータの検討を行った。

2. 方法

2.1 検討に用いたデータ

本報で用いたデータは、前報と同様、『「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<8>』に収録されたもののうち、わが国の横架材として用いられることの多いスギ、アカマツ、ベイマツのものである。このうち、試験体寸法、含水率、荷重条件、目視等級、曲げ強度が明示されており、4 点曲げ試験で行われたものを対象とした。さらに、前報および本報の趣旨は、材せいの大きい材料の基準強度を低減することにあるため、製材 JAS の目視等級区分構造用製材のうち、甲種 II、すなわち木口の長辺 (材せい) が 90mm 以上のものを対象とした。目視等級区分の方法は製材 JAS に準じた。ただし、等級区分は試験体の全長で行い、各公立試験研究機関からのデータ提出時に記載された等級と、同じくデータ提出時に記載された節径比のデータを用いて強度性能研究会事務局が等級を求めたもののうち、低い方を採用した。いずれかの記載しかない場合はその等級を採用し、いずれ

原稿受付：令和 2 年 6 月 9 日 原稿受理：令和 2 年 10 月 26 日

1) 森林総合研究所 構造利用研究領域

* 森林総合研究所 構造利用研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

の記載もない場合は検討から除外した。

2.2 曲げ強度の調整と平均値および5%下限値の算出

含水率・試験条件の違いによる曲げ強度の調整方法は、前報と同様の手法を用いた。すなわち、まず、HOWTEC法（飯島ら 2011）に従い、標準含水率を15%として、この状態に曲げ強度を調整した。次に、EN 384 (European Committee for Standardization 2016) に従い、スパンを材せいの18倍とした3等分点4点荷重方式の標準荷重条件での値へ調整した。

以上の方法で得られた含水率15%、標準荷重条件での曲げ強度から、樹種・目視等級・材せいごとのグループを作成した。このうち、ASTM D2915 (ASTM International 2017) の表に記載された最少の試験体数である28体以上の試験体数があるグループから、曲げ強度の各5%下限値を算出した。採用したグループは、スギでは、1級（材せい（mm）＝105、120、210、240）、2級（材せい（mm）＝105、120、180、210、240）、3級（材せい（mm）＝105、120、180、210、240）、アカマツでは、1級（材せい（mm）＝105）、2級（材せい（mm）＝105、210）、3級（材

せい（mm）＝105、210）、ペイマツでは、2級（材せい（mm）＝240、270、300）の合計22グループであった。各グループの曲げ強度の平均値と5%下限値を、前報の機械等級区分法によるものも含めてTable 1に示す。

2.3 曲げ強度の平均値を用いた樹種・等級ごとの寸法効果パラメータの検討

前節で算出された平均値および5%下限値は、当然それぞれの樹種・等級・材せいの影響を受ける。前報で寸法効果パラメータを提案するにあたっては、樹種・機械等級をまとめた総合的な結果から、適切な寸法効果パラメータを判断することを試みた。具体的には、樹種・機械等級・材せいごとに得られた5%下限値を、樹種・機械等級ごとに異なる値が設定されている基準強度で除し（5%下限値／基準強度）で樹種・機械等級を標準化し、材せいと5%下限値／基準強度との関係について検討した。これは、現状、アメリカのASTM D1990 (ASTM International 2016)、ヨーロッパのEN 384、わが国の枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格（JAS 0600）（農林省 1974）（以下、枠組 JAS という）にお

Table 1. 各グループの曲げ強度
Bending strength of each group.

Visual grading						
Sugi (Japanese cedar)						
1st grade	<i>d</i>	105	120	180	210	240
	<i>n</i>	81	130		60	106
	Avg	50.6	45.0		34.4	36.2
	CV	12.8	17.0		24.4	21.0
	5% LL	37.8	30.4		19.8	22.6
2nd grade	<i>n</i>	716	440	63	168	216
	Avg	47.4	42.8	36.5	31.6	35.7
	CV	16.7	22.2	14.4	21.5	20.0
	5% LL	32.7	26.3	27.9	20.3	25.4
	3rd grade	<i>n</i>	286	147	28	82
Avg		47.3	42.5	34.3	32.5	32.8
CV		19.6	18.5	15.1	26.9	22.9
5% LL		30.8	27.0	25.5	19.6	18.8

Akamatsu (Japanese red pine)						
1st grade	<i>d</i>	105	210			
	<i>n</i>	34				
	Avg	59.5				
	CV	11.8				
	5% LL	44.9				
2nd grade	<i>n</i>	30	46			
	Avg	58.6	45.3			
	CV	21.1	23.3			
	5% LL	31.6	24.8			
	3rd grade	<i>n</i>	47	43		
Avg		43.6	36.8			
CV		31.7	30.0			
5% LL		23.3	17.6			

Douglas fir						
1st grade	<i>d</i>	240	270	300		
	<i>n</i>					
	Avg					
	CV					
	5% LL					
2nd grade	<i>n</i>	87	28	54		
	Avg	39.4	46.3	40.2		
	CV	26.7	16.7	24.0		
	5% LL	23.1	30.7	22.1		
	3rd grade	<i>n</i>				
Avg						
CV						
5% LL						

Machine grading												
Sugi (Japanese cedar)												
E50	*d*	30	45	60	90	105	120	180	210	240	270	
n	84			34	1140	271	55	140	124	28		
Avg	44.9			38.7	36.8	34.6	33.6	26.6	26.1	24.5		
CV	20.4			19.5	16.4	16.5	14.6	15.9	16.0	15.0		
5% LL	31.2			26.8	26.7	24.2	25.2	19.4	18.1	17.1		
E70	*n*	104	28	57	45	1582	611	143	252	315		
Avg	50.0	50.1	47.1	46.5	42.5	40.3	37.9	31.1	31.7			
CV	15.8	20.5	13.0	14.4	15.0	14.0	15.4	17.2	18.0			
5% LL	37.4	31.9	35.6	34.7	31.9	30.0	28.5	21.3	21.1			
E90	*n*	72				956	410	74	98	244		
Avg	60.4				49.5	46.2	42.2	38.0	38.5			
CV	10.9				12.9	12.9	14.0	15.4	15.6			
5% LL	48.0				38.7	36.3	31.9	26.6	28.3			
E110	*n*					195	93			42		
Avg					55.7	51.9			46.9			
CV					11.3	14.8			12.5			
5% LL					45.0	37.5			34.4			
Akamatsu (Japanese red pine)												
E70	*d*	105	120	210	240							
n	34			47								
Avg	34.1			26.5								
CV	25.8			23.7								
5% LL	19.8			16.5								
E90	*n*	84		43	40							
Avg	39.9		32.6	33.3								
CV	24.6		24.3	21.7								
5% LL	26.5		19.0	18.5								
E110	*n*	82	42	48								
Avg	49.7	50.0	41.3									
CV	22.3	19.2	21.7									
5% LL	30.6	34.4	25.7									
E130	*n*	42		37								
Avg	60.5		49.3									
CV	18.7		15.5									
5% LL	41.2		33.1									
Douglas fir												
E110	*d*	240	270	300								
n	46	28										
Avg	36.5	38.3										
CV	16.5	21.1										
5% LL	27.9	22.0										
E130	*n*	46	29									
Avg	44.7	44.1										
CV	17.5	16.8										
5% LL	33.9	30.3										

d = specimen depth (mm); *n* = number of specimens; Avg = average (N/mm²); CV = coefficient of variation (%); 5% LL = 5% lower limit (N/mm²).

いては、いずれも単一の寸法効果パラメータが用いられており、樹種・等級ごとのそれは設定されていないことを考慮したものである。

しかし、仮に材せいに対する寸法効果が樹種・等級（目視・機械とも）ごとに異なるものであれば、それぞれの条件に応じた寸法効果パラメータを求める必要が生じる。そこで、本報で対象とする目視等級区分法によるものだけでなく前報での機械等級区分法によるものの結果も含めて、樹種・等級ごとに材せい（90mm 以上）と曲げ強度との関係を求め、各寸法効果パラメータが異なるかどうかの検討を行った。なお、ここでは樹種・等級ごとの平均的な曲げ強度の傾向を検討することとし、曲げ強度は 5% 下限値ではなく平均値を用いた。

2.4 目視等級区分法における寸法調整係数の検討

2.2 節で、目視等級区分法により樹種・目視等級・材せいごとに 5% 下限値を算出した。これを用いて、前報と同様に、5% 下限値と目視等級区分法による基準強度との比を求めた。この比を、前節の結果を踏まえた上で、前報で提案した機械等級区分法による曲げ強度の寸法効果パラメータ（0.4～0.5）と比較した。標準材せいは、現行の製材 JAS の目視等級区分構造用製材の基準強度の元となった値が正角と平角の実験値から算出したとされている（井道 2018）ことから、前報と同様 150mm とした。材せいが 150mm を超えた範囲において寸法調整係数による

低減を行った。以上は次式で表される。

$$k_1 = \begin{cases} 1, & (d \leq 150) \\ \left(\frac{150}{d}\right)^{s_R}, & (d > 150) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 k_1 は標準荷重条件における寸法調整係数、 d は材せい (mm)、 s_R はスパン／材せい比が一定の場合の寸法効果パラメータ（前報の機械等級区分法では 0.4 または 0.5）である。

3. 結果と考察

3.1 樹種・等級ごとの材せいと曲げ強度の平均値との関係

Fig. 1 に樹種・等級ごとの材せいと曲げ強度の平均値との関係を示す。凡例の各等級の横には、材せいを x 、曲げ強度を y とした累乗方程式を示した。寸法効果パラメータは指数の絶対値で表される。

まず、等級ごとの曲げ強度の違いを見ると、等級が 1 つしかないベイマツの目視等級区分法を除き、目視等級区分法・機械等級区分法ともに、いずれの樹種においても等級が上位になるにつれ材せいと曲げ強度の回帰曲線も上側にシフトする傾向が見られた。各樹種のうち最もプロットの多いスギでは、目視等級区分法よりも機械等級区分法の方が等級による強度の差が明確に現れた。この要因の一つとして、目視等級区分法は機械等級区分法に比べて強度的な精度は高いとは言えない（井道 2019）ことが挙げられる。さらに、本報による目視等級区分は

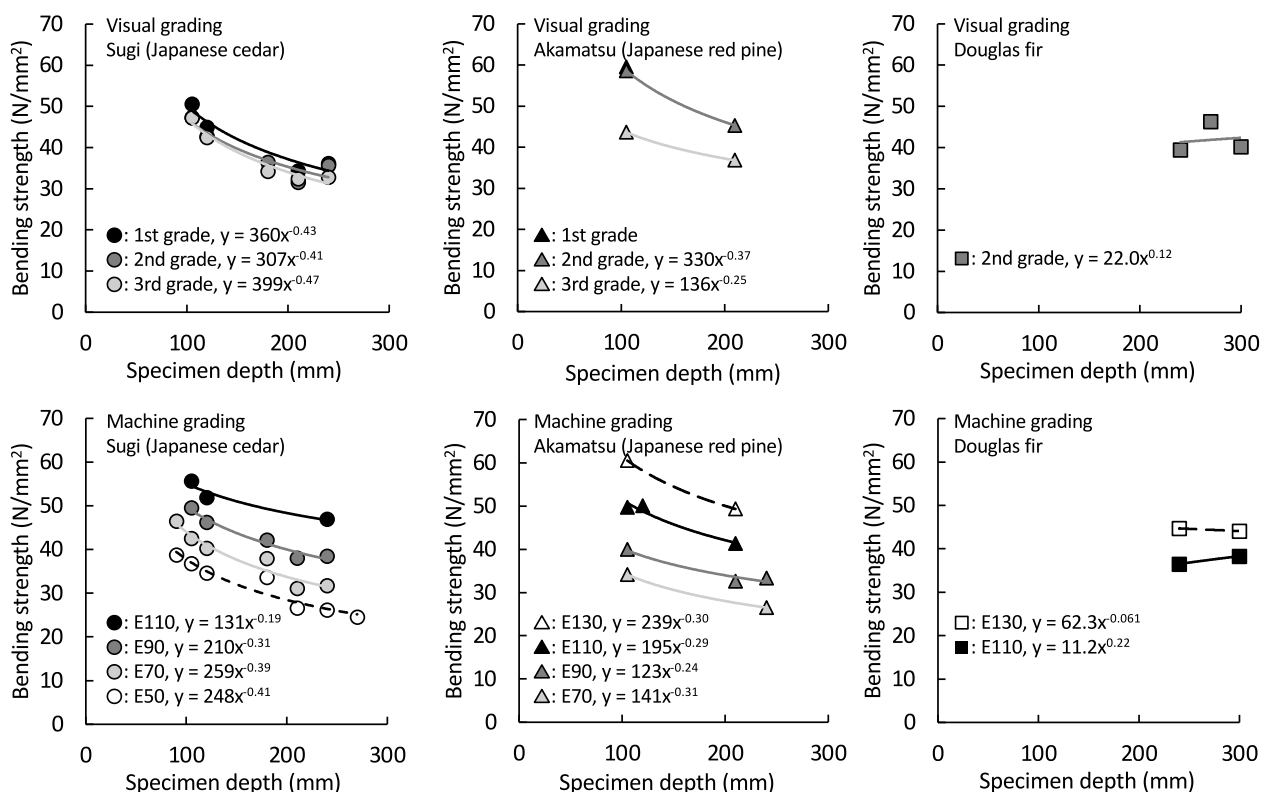


Fig. 1. 樹種・等級ごとの材せいと曲げ強度の平均値との関係

Relationship between specimen depth and average of bending strength by species and grades.

試験体の全長で行ったため、等級を決める要因となった欠点が曲げモーメントが最大で破壊確率の高い荷重点間に存在しなかった試験体では、等級を過小評価する傾向にあった可能性も考えられる。アカマツでは、スギほどプロットが多くはないものの、目視等級区分法においても2級と3級の曲げ強度の差が明確に見られた。この要因として、アカマツは長さ方向に狭い間隔で輪生節が多く含まれるため、荷重点間に破壊の要因となる節が入る確率が高く、等級に応じた傾向が出やすかった可能性が考えられる。また、アカマツの機械等級区分法では、スギのそれと同様、等級による曲げ強度の差が明確に見られた。最もプロットが少ないベイマツでは、機械等級区分法では等級の差は現れたものの、E110では材せいが大きい方が曲げ強度も大きくなった。これは目視等級区分法の2級においても同様であった。ただし、ベイマツは試験体数が非常に少ないため、この結果のみでは材せいによる曲げ強度の影響は明確ではない。

次に、等級ごとの寸法効果パラメータについて各樹種のうち最もプロットの多いスギを見ると、目視等級区分法の寸法効果パラメータは0.41～0.47であり、等級による差異は小さかった。機械等級区分法の寸法効果パラメータの範囲は0.19～0.41であり、E110の0.19のみやや小さいものの、他の等級は0.3～0.5の範囲に収まっていた。他の樹種については、プロットが少なく明確ではないが、アカマツでは目視等級区分法・機械等級区分法ともに寸法効果パラメータは0.3前後にあった。

最後に、樹種ごとの違いについては、スギ以外のプロットが少ないため比較は困難であるが、比較的プロットの多い機械等級区分法によるスギとアカマツとを比べると、ややスギの方が寸法効果パラメータの平均値が大きい傾向にあった。

以上の結果をまとめると、比較的数据が充実しているスギの目視等級区分法・機械等級区分法およびアカマツの機械等級区分法の結果から、平均値を用いた樹種・等級ごとの寸法効果パラメータは概ね0.3～0.5の範囲にあることがわかった。さらに、目視等級区分法の強度的な精度の問題、欠点の存在位置による等級を過小評価する可能性、樹種・等級ごとに寸法効果パラメータを設定するためのデータが十分でないことを考慮に入ると、寸法効果パラメータは、現時点では個別に設定するのではなく、海外規格や枠組JASと同様に単一の値とするのが現実的であると考えられる。

3.2 目視等級区分法における基準強度に対する寸法調整係数と5%下限値／基準強度との比較

前節の結果から、寸法効果パラメータは、樹種・等級ごとに設定するのではなく単一の値とすることとした。次に、その値を検討するため、5%下限値と目視等級区分法における基準強度（建設省2000）の比（5%下限値／基準強度）により樹種・目視等級を標準化したものと、材

せいとの関係を求めた。Fig. 2に、材せいと、樹種・目視等級ごとの5%下限値／基準強度および寸法調整係数との関係を示す。前報の機械等級区分法による結果では、5%下限値／基準強度は、材せいが30～105mmあたりまでは1より大きい値を、120～180mmあたりは1に近い値を、210mmを超えると1より小さくかつ減少傾向を示した。Fig. 2の目視等級区分法による結果を見ると、非常にばらつきは大きいものの、材せいが大きくなるに従い5%下限値／基準強度が減少する傾向は機械等級区分法と同様であった。ただし、目視等級区分法は機械等級区分法に比べて、全体的に5%下限値／基準強度のプロットが寸法調整係数 k_1 よりも上側に位置している傾向にあり、標準材せいとした材せい150mmを超えた範囲においても、材せいが210mmのスギの2プロットを除き、5%下限値／基準強度は、寸法効果パラメータ s_R を0.4あるいは0.5とした寸法調整係数 k_1 よりも大きかった。

このことから、目視等級区分法による寸法効果パラメータは、機械等級区分法によるそれよりも緩やかにするという選択も考えられる。しかし、前述したように、欠点の存在位置により等級を過小評価する傾向で曲げ強度が高めとなり、その結果5%下限値も高めに算出された可能性がある。さらに、目視等級区分法によるデータが乏しいことや、目視等級区分法の強度的な精度の問題を考えると、現時点では目視等級区分法による曲げ強度の寸法効果パラメータは機械等級区分法によるそれと同等の0.4～0.5とするのが妥当であると考えられる。

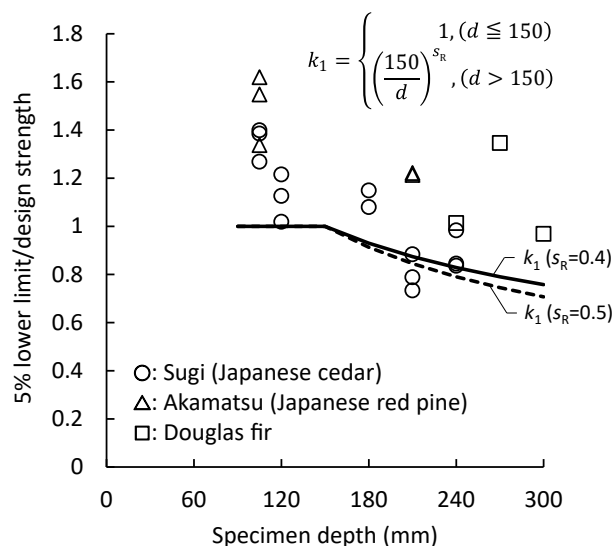


Fig. 2. 材せいと、樹種・目視等級ごとの5%下限値を基準強度で除したものおよび寸法調整係数との関係
Relationship between specimen depth and 5% lower limit/design strength and size effect factor.

d = specimen depth (mm); k_1 = size adjustment factor; s_R = size effect parameter for constant span/specimen depth.

4. 結論

製材 JAS に対応した基準強度を、材せいに応じて低減するための寸法調整係数に対する寸法効果パラメータについて、前報の機械等級区分法による結果に引き続き、『「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<8>』に集積されたスギ、アカマツ、バイマツの曲げ強度データを用いて、目視等級区分法について検討した。

まず、樹種・等級ごとの材せいと曲げ強度との関係について、スギの目視等級区分法・機械等級区分法およびアカマツの機械等級区分法の結果から、平均値を用いた樹種・等級ごとの寸法効果パラメータは概ね 0.3 ~ 0.5 の範囲にあることがわかった。一方、目視等級区分法の強度的な精度の問題、欠点の存在位置による等級を過小評価する可能性、樹種・等級ごとに寸法効果パラメータを設定するためのデータが十分でないことを考慮すると、寸法効果パラメータは、現時点では樹種・等級ごとに設定するのではなく、海外規格や枠組 JAS と同様に単一の値とするのが現実的であると考えられた。

次に、目視等級区分法において、基準強度に対する寸法調整係数と 5% 下限値／基準強度とを比較すると、標準材せい 150mm を超える範囲の 5% 下限値／基準強度は、仮定した寸法調整係数を下回ることは一部を除いてなかった。ただし、上記と同様の理由により、目視等級区分法による寸法効果パラメータも機械等級区分法によるそれと同等の 0.4 ~ 0.5 とすることが妥当であると考えられた。

ただし、特にスギ以外のデータが十分でないこと、目視等級区分法における欠点の存在位置による等級の確認などの課題は依然残されており、今後増加するであろう材せいの大きい製材品から得られる曲げ強度のデータも積み重ねた上で、寸法効果パラメータの値は再検証を続けていく必要がある。

謝辞

本報は、日本建築学会木質構造運営委員会木質材料強度検証小委員会（2016 年 4 月～2020 年 3 月、主査：中島史郎）の一環として行ったものである。また、「製材品の強度性能に関するデータベース」の参画機関である公立試験研究機関の担当者の方々に感謝する。

引用文献

- ASTM International (2016) ASTM D1990 – 16 Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests of full-size specimens.
- ASTM International (2017) ASTM D2915 – 17 Standard practice for sampling and data-analysis for structural wood and wood-based products.
- European Committee for Standardization (2016) EN 384:2016 Structural timber – Determination of characteristic values

of mechanical properties and density.

- 井道 裕史 (2018) 我が国の製材規格と許容応力度の変遷. 森林総合研究所研究報告 17 (1), 1-33.
- 井道 裕史 (2019) 15. グレーディング. 創立 70 周年記念出版等委員会編 “最新 木材工業事典 [新版]”, 日本木材加工技術協会, 29-30.
- 井道 裕史・加藤 英雄・長尾 博文 (2020) 製材品の曲げ強度における寸法効果パラメータの検討. 森林総合研究所研究報告 19 (1), 79-87.
- 飯島 泰男・園田 里見・青井 秀樹 (2011) 構造用木材の強度評価法および基準値算出法. 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”, 88-92.
- 建設省 (2000) 平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1452 号. 木材の基準強度 F_c , F_t , F_b 及び F_s を定める件. (最終改正: 平成 27 年 8 月 4 日国土交通省告示第 910 号).
- 強度性能研究会事務局 (2013) “「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<8>”, 54pp.
- 農林省 (1974) 昭和 49 年 7 月 8 日農林省告示第 600 号. 枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格. (最終改正: 令和 2 年 6 月 1 日農林水産省告示第 1066 号).
- 農林水産省 (2007) 平成 19 年 8 月 29 日農林水産省告示第 1083 号. 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).

Influence of the size effect parameter on the bending strength of lumber (Part 2) Examination by the visual grading classification

Hirofumi IDO^{1)*}, Hideo KATO¹⁾ and Hirofumi NAGAO¹⁾

Abstract

By extending the previous investigation of the machine grading classification, this study examined the visual grading classification to determine the size effect parameter for the size adjustment factor used to reduce the design bending strength in the Japanese agricultural standard for sawn lumber (JAS 1083). First, by examining the relationship between the specimen depth and bending strength of various species and grades, including the machine grading classification, it was deemed realistic to adopt at present a single value for the size effect parameter for all species and grades, rather not by species and grades. Then, after comparing the size adjustment factor for the design strength for the visual grades with a 5% lower limit/design strength, it was considered logical to assume the same value for the size effect parameter of the visual grading classification as to be 0.4-0.5 that obtained from the machine grading classification. However, some problems persist, and the values of the size effect parameters need to be reexamined after accumulating bending strength data obtained from the large-diameter lumber, which will increase in the future.

Key words : size effect parameter, size adjustment factor, bending strength, structural lumber, database

Received 9 June 2020, Accepted 26 October 2020

1) Department of Wood Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* Department of Wood Engineering, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, JAPAN; E-mail: ido@ffpri.affrc.go.jp