構造用 LVL の引張強度分布[†]

林 知 行^{*}

Tensile Strength Distribution of Laminated Veneer Lumber for Structural Use

by

Tomoyuki HAYASHI^{*}

Full size tensile tests were made on thirteen types of laminated veneer lumbars (LVL) for structural use. Factors affecting the strength distribution of these materials were discussed.

The dispersions of specific gravity, modulus of elasticity (MOE), and tensile strength (TS) were considerably lower than those of sawn lumber. The effects of veneer quality on the stiffness and strength properties were significant. The classifications certificated in the previous Japanese Agricultural Standard (JAS) for structural LVL did not always reflect the strength properties. The correlation between TS and MOE was low for LVL as a whole, but was high for those within a grade specified by the JAS.

Three parameter Weibull distribution functions generally provided better fit to the MOE, TS, compression strength, and horizontal-shear strength data than normal and log-normal distribution functions. The lower five percent exclusion limit calculated non-parametrically did not differ much from the values calculated parametrically.

Key words : Laminated veneer lumber, Tensile strength, Compression strength,
Horizontal-shear strength, Structural use

1 緒 言

単板積層材 (Laminated Veneer Lumber : 略称 LVL) とは、「単板を、その繊維方向を互いにほぼ平行にして積層接着した一般材」のことをいう¹⁾。この木質材料が、アメリカで構造用材として市販され始めてから、すでに 20 年以上が経過した。我が国でも LVL の構造利用に関する研究開発が進み、1988 年には構造用単板積層材の日本農林規格²⁾が制定された。しかしながら、製造規準は整備されたものの、我が国で製造されると考えられる多種多様な製品に関する実大試験データは必ずしも十分なものではなかった。

そこで、財団法人日本住宅・木材技術センターを中心に、構造用 LVL の強度特性とその統計的性質を明らかにするための広範囲な実験的研究が行われた。筆者もこの研究に参加し、市販あるいは試験的に製造された様々な種類の構造用 LVL について、一連の実験を行った。本報はそこから実大 LVL (7 樹種 13 種類) の引張強度についての結果を取りまとめたものである。また本報では試験体の基礎的材質を確認する意味で行った小試験片の圧縮強度と水平せん断強度の結果もあわせて報告する。

なお、本試験の結果の一部は 1991 年 12 月末に行わ

れた日本農林規格の改訂に際し、基礎資料として用いられた。

2 実 験

2・1 材料

実験に用いた LVL の構成・材料条件を Table I に示す。基本的にはいずれも、旧 JAS 規格 (1988 年制定) を満足する品質であった。なお、表中の SS (超特級) とは、旧 JAS 規格の特級 (S) より 1 ランク上を目標として製造された LVL であり、規格の上では特級であるが、本研究では特に SS として区別することとする。

各 LVL の特徴を挙げてゆくと、まずベイマツ (Douglas-fir) は、米国トラスジョイスト社製マイクロラム 2.0E (商品名) で、試験の実施時点で唯一市販されていたものであった。

ソ連カラマツ (Siberian larch) は、他の製品に比べ単板の厚さが薄く、比重が高いのが特徴であった。

国産カラマツ (Japanese larch) は、構成条件については超特級 (SS) を満足するものであったが、曲げヤング係数 (MOE) が低く、規格上は 2 級程度とみなされた。

ベイツガ (Western hemlock) は旧 JAS 規格の各

[†] 原稿受理 平成 4 年 4 月 22 日 Received Apr. 22, 1992

^{*} 正 会 員 農林水産省森林総合研究所 〒305 茨城県稲敷郡基崎町松の里, Forestry & Forest Products Res. Inst., Inashiki-gun, Ibaraki, 305

Table I. Specification of LVL.

Species	Grade	No. of plies	Joints of veneer	Miscellaneous
Douglas fir ¹⁾	SS	16	Lap-joint	Brand name : Micro-lam 2.0 E
Siberian larch ²⁾	1	21	Butt-joint	High density veneer ◇
		21	Butt-joint	
Japanese larch ³⁾	2	13	Scarf-joint	Veneer from small diameter log
Western hemlock ⁴⁾	S	14	Butt-joint	
	1	◇	◇	
	2	◇	◇	
Grand fir ⁵⁾	1	15	Scarf-joint	
	2	◇	◇	
Radiata pine ⁶⁾	SS	15	Scarf-joint	High-grade veneer
Lauan ⁷⁾	SS	17	Scarf-joint	
	1	11	◇	
	2	11	◇	

1): *Pseudotsuga taxifolia* Britt.

2): *Larix sibirica* Ledeb.

3): *Larix leptolepis* Gord.

4): *Tsuga heterophylla* Sarg.

5): *Abies grandis* Lindl.

6): *Pinus radiata* D. Don.

7): *Shorea* spp.

SS: Super Select (Tentative grade uncertificated in the previous JAS).

S: Select grade. 1: First grade. 2: Second grade.

級の最低限を満足するように意図的に製造された製品であった。ただし、2級に用いられた単板は、特級、1級に用いられた単板より明らかに低質であったため、2級は低い性能を示すことが予想された。

一方、ベイモミ (Grand fir) では、どちらのグレードでも節の少ない比較的良質の単板が用いられていた。

ラジアタバイン (Radiata pine) では、節の少ない非常に良質の単板が選択的に用いられており、明らかに高い性能を示すことが予想された。

ラワン (Lauan) に用いられた樹種の詳細は定かではないが、いわゆるラワン類と称されるものであった。なお、ラワンの SS は他の 2 等級と別の工場で生産されたものであり、材質やジョイント方法なども全く異なった製品であった。

なお、旧 JAS 規格の樹種分類では、ベイマツが針葉樹 A-1 類、ソ連カラマツ、国産カラマツが針葉樹 A-2 類、ベイツガとベイモミが針葉樹 B-1 類、ラワンが広葉樹 B 類、ラジアタバインは樹種区分外であった。

2.2 試験体

引張試験体はいずれも厚さが 3.8~4.1 cm、幅が 9.0 cm の、いわゆる 2×4 サイズの断面をもったものであった (Fig. 1)。超特級の 3 樹種および国産カラマ

Fig. 1. Tensile specimen.

ツについては、長さ 400 cm、幅 90 cm の原板 1 枚から 1 体のみを採取した。試験体数は 30 であったので、これらの材料を準備するには少なくとも 400 cm×30 枚、すなわち 12000 cm (120 m) の長さの原板が必要であった。このことから、これら 4 種類の LVL に関しては、強度性能の統計的性質を検討できると判断された。一方、その他の LVL 試験体については 1 枚の原板から 6 体、総数 24 体の試験体が採取されたため、製品としての統計的な性質を検討するには必ずしも十分な量ではなかった。

各 LVL の搬入時の長さは 400 cm であったが、これを 280 cm に切断して引張試験体とした。この時、距層 (同一断面に存在するジョイント間の積層数) や距避 (互いに隣接する層のジョイント間の距離) の値が小さくジョイント位置が分散されていない製品については、その部分が引張試験体の中央に位置するように木取りを行った。また先に説明したように、SS の 3 樹種および国産カラマツについては、切断した残りの部分から圧縮試験片と水平せん断試験片を各 1 個、計 30 個ずつを採取した。

引張試験体には試験を行う前に中央に小荷重を作用させ、中央たわみから曲げヤング係数 (MOE) を測定した。この時のスパンは 200 cm、加重方向はフラットワイズ方向であった。この際に重量、断面寸法なども測定した。

圧縮試験片の寸法は厚さが 3.8~4.1 cm、幅が 4.0 cm、長さが 16.0 cm であった。同じく水平せん断試験片の寸法は厚さが 3.8~4.1 cm、幅が 4.0 cm、長さが 24.0 cm であった。

2.3 試験方法

引張試験は容量 40 トンの引張ブルーローダを用いて行った。引張グリップ間の距離は 160 cm、破壊までの試験時間は約 1~2 分であった (Fig. 2)。なお試験の際に単板のジョイント位置については全く考慮しなかった。

圧縮試験は、試験片の寸法を測定した後、容量 10 トンの万能試験機を用いて行った。破壊までの試験時

Fig. 2. Schematic diagram of tensile test.

間は約 2～3 分であった。

水平せん断試験は JAS 規格に準拠して、スパン $l = 16$ cm, オーバーハング $l' = 4$ cm, ヘッドの曲率半径 $d = 7.5$ cm で行った (Fig. 3)。ただし、加重方向はフラットワイズのみとした。

なおいずれの試験においても試験終了後、小試験片を採取して全乾法による含水率の測定を行ったが、いずれの LVL も 7～10% の範囲にあった。

Fig. 3. Schematic diagram of horizontal-shear test.

3 結果と考察

3.1 曲げヤング係数と引張強度

各試験体の比重、曲げヤング係数、引張強度の一覧を Table II に示す。なお、試験体の破壊は、ジョイント以外の個所から破壊するものがベイマツで一部見られたが、それ以外ではすべてジョイントを含む形で破壊が生じた。

まず、それぞれの特性の変動係数を概観すると、多少の例外はあるものの、比重は 5% 以下、曲げヤング係数は 5～10% 程度、引張強度は 10～15% 程度の値を示していることがわかる。これらの値は一般的な製材品に比べ非常に低く、特に引張強度におけるばらつきの高さは、木質構造における引張部材としての適性の高さを表すものといえよう。

Table II の各 LVL の平均値を見れば明らかなように、引張強度の大小関係は旧 JAS 規格における樹種群間の序列 ($A1 > A2 > B1 > B2$: Table II では上から下へ) を反映していない。また、ラワン の 1 級と 2 級に見られるように、等級間の序列が逆転しているものや、ソ連カラマツの特級と 1 級、あるいはベイツガの特級と 1 級のように、等級間の差が明確でないものも存在する。

つぎに、LVL の種類ごとの特性について考察する。

Table II. Results of tensile tests.

Species	Grade	Samples	Specific gravity	Modulus of elasticity (10^3 kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)
Douglas fir	SS	30	0.579 (4.56)	169 (9.06)	466 (12.2)
Siberian larch	1	24	0.686 (1.86)	163 (5.78)	635 (9.66)
		24	0.710 (3.94)	164 (7.45)	617 (13.3)
Japanese larch	2	30	0.528 (2.74)	105 (8.73)	220 (14.1)
Western hemlock	S	24	0.558 (2.23)	140 (4.92)	429 (10.5)
		24	0.587 (2.15)	153 (7.62)	421 (11.6)
	2	24	0.571 (3.15)	131 (7.38)	291 (17.8)
Grand fir	1	24	0.546 (2.75)	172 (6.03)	613 (11.8)
	2	24	0.502 (1.97)	158 (2.72)	417 (10.9)
Radiata pine	SS	30	0.562 (2.07)	158 (5.66)	518 (9.55)
Lauan	SS	30	0.552 (8.28)	139 (9.80)	458 (15.1)
		24	0.514 (4.14)	144 (5.50)	343 (13.1)
	2	24	0.532 (2.72)	149 (7.68)	377 (12.2)

SS: Super Select (Tentative grade uncertificated in the previous JAS).

S: Select grade. 1: First grade. 2: Second grade.

(): Coefficient of variation (%).

ベイマツについては過去に行われた試験結果とほぼ同等の値を示しており、この製品の品質管理が安定していることがうかがわれる。

ソ連カラマツは単板の厚さが薄く、積層数も多いため、比重が非常に高く、最も高い引張強度の値を示した。国産カラマツは、変動係数の大きさについては他の樹種と変わりはないものの、引張強度の平均値は他の樹種より著しく劣っている。このような結果がこの製品のみについての結果であるかどうかは、今後の研究結果を待たざるを得ないが、比重の割に曲げヤング係数の低い製品については、要求される強度が得られない可能性があることに留意すべきであろう。

ベイツガは引張強度の値が 2 級で特に低いが、これは 2・1 節で述べたように 2 級の単板の性質が他の等級に比べ明らかに劣っていたことが一因と考えられる。同じようにベイモミの値がベイツガに比べて高いのも、高い品質の単板が用いられていたためと考えられる。

ラジアタパインについても、品質が非常に高い単板が使用されていたため、ばらつきが小さく比較的高い平均値が得られた。ラジアタパインからは、色々な品質の単板が得られると考えられるので、今後さらに色々な品質の単板について試験を行う必要がある。

ラワン SS の比重の変動係数は大きい。これは製

品の一部に非常に高比重の単板が混入していたためである。この結果、他樹種に比べて強度的な性質のばらつきも大きくなってしまったと考えられる。SS と異なる原料および構成の1級や2級では、そのような傾向は見られない。いずれにしても、製品のばらつきが小さいことがLVLの強度面における最大の特徴であり、安定した品質の製品を生産するためには、単板の品等区分が非常に重要であることがこの結果からもわかる。

3・2 水平せん断強度と圧縮強度

水平せん断強度と圧縮試験の結果をTable IIIに示す。水平せん断の平均値はいずれも旧JAS規格を満足するものであった。なお、試験片は少数の例外を除いて、すべて水平せん断で破壊した。

カラマツを除く3樹種では、圧縮強度は引張強度より若干高い程度の値を示した。ただし、圧縮強度の変

Table III. Results of horizontal-shear and compression tests.

Species	Samples	Shear strength (kgf/cm ²)		Compression strength (kgf/cm ²)	
		Average	CV	Average	CV
Douglas fir	30	59.9	9.72%	473	5.95%
Japanese larch	30	61.9	15.6 %	441	6.77%
Radiata pine	30	81.4	9.07%	582	3.78%
Lauan	30	54.3	11.5 %	461	9.96%

CV: Coefficient of variation.

Table IV. Results of regression analysis.

Species	Grade	Samples	Coefficient of correlation	
			TS-SG	TS-MOE
Douglas fir	SS	30	0.721	0.667
Siberian larch	S	24	0.0622	0.362
	1	24	0.750	0.658
Japanese larch	2	30	0.150	0.162
Western hemlock	S	24	0.591	0.506
	1	24	0.624	0.621
	2	24	-0.0526	0.475
Grand fir	1	24	0.292	0.406
	2	24	0.115	-0.260
Radiata pine	SS	30	0.418	0.280
Lauan	SS	30	0.563	0.484
	1	24	0.527	0.216
	2	24	0.580	0.473
All SS and S grade		138	0.768	0.501
All 1 grade		96	0.595	0.764
All 2 grade		102	-0.307	0.854

SS: Super Select (Tentative grade uncertificated in JAS).

S: Select grade. 1: First grade. 2: Second grade.

SG: Specific gravity. TS: Tensile strength.

MOE: Modulus of elasticity.

動係数は引張強度のそれよりかなり低い値となるので、後に示す5%下限値はかなり上昇する。

なお圧縮試験における破壊形態は、一部の単板が座屈するような形か、あるいは積層面の中央から左右に二分されるような形であった。

3・3 各特性の相関

比重およびMOEを独立変数とし、引張強度を従属変数として単回帰分析を行った。この時得られた相関係数の値をTable IVに示す。

比重と引張強度の相関はベイマツの0.721からベイツガ2級の-0.0526までばらついており、平均値が0.411である。同様にMOEと引張強度の相関もベイマツの0.667からベイモミの-0.260までばらついており、平均値が0.388である。このように各LVLにおける両者の相関が低いのは、製材品に比べ独立関数であるMOEそのものの変動係数が小さいためと考えられる。

そこで、SSとSを1グループ、1級と2級をそれぞれ1グループとして、データをプールし、独立変数の範囲を広げたものについて相関係数を求めた。試験体によって単板構成やたてつぎの方法が異なるので、これは厳密な意味での回帰分析とはいえないが、同一等級内における相関関係は概観できることになる。

この結果、比重では0.768(SSとS)、0.595(1級)、-0.307(2級)という値が得られた。2級の場合には、データをプールしてもなお、その範囲が狭いため、0以下の相関係数になったものと思われる。このことから明らかなように、比重と引張強度とに相関関係が明確に表れない場合もあるので、引張強度の予測に比重のみを用いるのは無理がある。

一方、MOEでは0.501(SSとS)、0.764(1級)、0.854(2級)という値が得られた。比重よりもMOEの方が引張強度を予測するに適しているといえよう。さきに明らかにしたように、引張強度の平均値の大小関係は旧JAS規格における樹種群間の序列を反映していないので、等級を格付けするには製品のMOEを用いるのがより合理的であると考えられる。

しかしながら、いずれにせよ同一の製品内では、比重や曲げヤング係数から、製品の品質をコントロールすることは困難である。単板の品質の安定化を図ることが、安定した性能の製品を生産するために非常に重要であることが、ここでもまた明らかになったといえよう。

3・4 各特性の統計分布

SSの3樹種および国産カラマツについて、ヤング係数、引張強度、圧縮強度、水平せん断強度のそれぞれに正規分布、対数正規分布、3パラメータワイブル分布を当てはめて求めた5%下限値、ノンパラメト

Table V. Lower 5% exclusion limit, and three parameters of Weibull distribution functions.

	Species	Non-parametric	Noral distribution	Log normal distribution	Three parameter Weibull distribution			
		EX 5%	EX 5%	EX 5%	EX 5%	Scale	Shape	Location
Modulus of elasticity ($\times 10^3$ kgf/cm ²)	Douglas fir	143.8	143.7	145.0	144.2	45.53	2.776	128.6
	Japanese larch	92.31	89.69	90.42	88.64	53.71	6.434	54.79
	Radiata pine	143.7	143.0	143.4	140.9	161.4	21.87	0.
	Lauan	117.0	116.5	117.7	116.8	41.09	2.836	102.3
Tensile strength (kgf/cm ²)	Douglas fir	355.1	372.4	376.2	363.4	313.0	5.788	176.0
	Japanese larch	161.7	168.8	171.1	163.6	174.8	5.944	57.56
	Radiata pine	449.9	436.7	440.5	442.4	136.8	2.784	395.3
	Lauan	344.5	342.5	352.4	345.1	215.8	2.973	265.7
Compression strength (kgf/cm ²)	Douglas fir	454.6	465.8	466.9	458.5	237.6	7.134	301.8
	Japanese larch	395.1	391.4	393.3	387.2	166.1	5.880	286.9
	Radiata pine	554.0	546.1	546.7	546.2	98.55	5.065	491.4
	Lauan	412.2	389.2	392.9	388.5	477.3	14.43	0.
Horizontal-shear strength (kgf/cm ²)	Douglas fir	45.10	43.93	44.38	44.21	17.29	3.141	37.49
	Japanese larch	46.35	46.93	47.22	46.30	28.56	4.996	30.54
	Radiata pine	66.10	67.58	67.85	66.79	56.01	9.679	25.58
	Lauan	41.70	41.66	42.02	42.39	8.919	2.174	40.11

EX 5%: Lower 5% exclusion limit.

リックな 5% 下限値⁴⁾を Table V に示す。また、ワイブル分布の 3 つのパラメータも表中に示す。

強度特性の分布形態を調べることは、材料の信頼性設計のみならず、強度発現のメカニズムを知る上で重要な手がかりとなる。そこで、上で用いた 3 種類の統計分布のなかで、どれが最も適合度の高い分布であるかということ調べるために、最尤法および Kolmogorov-Smirnov 法⁵⁾によって適合度判定を行った。結果を Table VI に示す。この表中で L とあるのは、最尤法によってその分布が 3 種類の統計分布のなかで最も適合度の高い分布であると判定されたことを示している。同様に、K とあるのはその分布が Kolmogorov-Smirnov 法によって最も適合度の高い分布であると判定されたことを示している。

適合度検定の結果を見てみると、全般的にパラメータが 3 つある 3 パラメータワイブル分布の適合性が高いが、ヤング係数では正規分布もよく適合している。ヤング係数の場合、積層数が増えるに従って中心極限定理が成立し、分布の形態が正規分布に近づくため、このような結果になったものと考えられる。

一方、引張強度や圧縮強度では、いわゆる信頼性工学でいうところの並列モデルで現象が説明されやすいので、3 パラメータワイブルや対数正規のように右に裾を引く分布がよく適合するのであろう。

下限 5% の値に注目すると、分布を仮定しないノンパラメトリックの場合も、分布をあてはめた場合も値そのものに大差はないことがわかる。単に 5% 下限値を算出する場合には、いずれの分布を当てはめて

Table VI. Results of goodness-of-fit tests.

	Species	Normal distribution	Log normal distribution	Three parameter Weibull distribution
Modulus of elasticity	Douglas fir	K		L
	Japanese larch	K, L		L
	Radiata pine	K		L
	Lauan	K		L
Tensile strength	Douglas fir		K	L
	Japanese larch			K, L
	Radiata pine			K, L
	Lauan			K, L
Compression strength	Douglas fir			K, L
	Japanese larch	L		K
	Radiata pine		K	L
	Lauan		K, L	
Horizontal-shear strength	Douglas fir		K	L
	Japanese larch	K		L
	Radiata pine			K, L
	Lauan			K, L

L: Best fit distribution by Log-likelihood test.

K: Best fit distribution by Kolmogorov-Smirnov test.

も大きな影響はないように思われる。

ノンパラメトリックの場合の5%下限値を例にとって、各特性を比較してみると、先に3・1節でも述べたように、国産カラマツの引張強度が他の樹種に比べて低い値となっていることがわかる。国産カラマツの圧縮強度はラワンとはほぼ同等であり、水平せん断強度はラワンやベイマツより高いことを考えると、この引張強度の低さは異常とも考えられた。そこで予備の原料から再度試験体を採取して引張試験を行ったが、同じような結果しか得られなかった。このような性能のアンバランスが国産カラマツに共通するものか、あるいは製造工程に原因が存在するのかは明らかではないが、いずれにしてもこの結果は構造用材料の実大実験の重要性を示唆するものとして、受けとめるべきものと考えられる。

4 ま と め

市販あるいは試験的に製造された7樹種13種類の構造用LVLについて、実大の引張試験を行い、以下のような結果を得た。

(1) 試験されたLVLは、比重、曲げヤング係数、引張強度、圧縮強度のばらつきが製材品に比べて小さく、構造用材料としての適性が非常に高い。

(2) 単板の品質はLVLの強度特性に大きな影響を及ぼすので、製品の性能を安定なものとするには、単板の品等区分や品質管理が必要である。

(3) LVLの種類によっては、等級による強度の差が明確でないものも存在する。また引張強度の大小関係は旧JAS規格における樹種群間の序列を反映しない。

(4) 各LVLにおける引張強度と曲げヤング係数と

の相関係数、および引張強度と比重との相関係数はかなり低い。ただし、等級ごとにデータをまとめると、高い相関が表れる。

(5) LVLの強度分布には3パラメータワイブル分布関数が適合しやすい。ただし、5%下限値は正規分布や対数正規分布をあてはめて求めたものと大差がない。

(6) 実大試験では、小試験体の試験結果から推測できないような結果が得られることがある。したがって、LVLの製造に当たっては、あらかじめ実大試験を行うことが望ましい。

本研究の計画と実施にあたり、森林総合研究所の藤井毅集成加工研究室長、日本住宅・木材技術センター、ならびに全国LVL協会から多大なるご助言とご援助を頂いた。また試験の実施にあたっては、中国黒龍江省林産工業研究所の崔志敏研究員に、多大なご助力を頂いた。ここに、深く感謝の意を表する。

(平成3年10月11日 日本木材加工技術協会第9回年次大会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 日本農林規格, “構造用単板積層材の日本農林規格”, p.1 (1988) 日本合板検査会
- 2) 日本農林規格, “構造用単板積層材の日本農林規格”, p.1 (1991) 日本合板検査会
- 3) 林 知行, 宮武 敦, 日本木材学会誌, **37**, 202 (1991).
- 4) 飯島泰男, “構造用木材—強度データの収集と分析”, p.3 (1988) 日本木材学会木材強度・木質材料研究会編
- 5) 林 知行, 日本木材学会誌, **35**, 1148 (1990).
- 6) 林 知行, 木材工業, **47**, 155 (1992).