圧縮木材の静的・動的曲げ強度及び補強材としての利用に関する研究*

林 進^{*1}, 西村 尚^{*2}Study on Static & Dynamic Bending Strength of Compressed Lumber
and the Utilization for ReinforcementSusumu HAYASHI and Hisashi NISHIMURA^{*3}^{*3} Tokyo Metropolitan University, Department of Mechanical Engineering,
1-1 Minamioshima, Hachioji-shi, Tokyo, 192-0397 Japan

Japanese cedar is the most important conifer for reforestation in Japan. Recently, compression process upon lumbers are expected to be an effective way to progress the mechanical property and able to extend the uses of Japanese cedar. This study evaluated the static & dynamic bending strength of compressed Japanese cedar lumber (compressed lumber) and tried to progress the bending strength of Al alloy shape by compressed lumber as the reinforcement. As the results, bending strength of compressed lumbers are equal to the A class lumber used for structures by the regulation of JAS (Japanese Agricultural Standard). Bending strength of Al alloy shape can be progressed by compressed lumber.

Key Words: Japanese Cedar, Plastic Forming, Compressed Lumber, Bending, Static Bending Strength, Dynamic Bending Strength, Delimitation, Al Alloy Shape

1. 緒言

近年、国産木材の蓄積量はスギ材を中心に増え続け、製材用丸太生産量の50%以上がスギ材である。しかしながら、スギは針葉樹の中で強度的に最も劣るB2類(JAS)に分類されており¹⁾、利用する上での問題点が多いため有効な需要が創出されていない。そこで、特に材質が他の樹種に比べ軟弱である欠点に対し高強度化を目的としたスギ材の圧縮加工に関する研究が数多く行われている。圧縮加工したスギ材(以下圧縮木材と表す)のメリットは未圧縮木材より小さい断面積で同等の強度基準を達成でき、構造物などに利用する際、限られた空間でより高強度化の実現、または省スペース化が図れる。最近では、スギ間伐材の利用促進策に防護柵及びガードレールに木材を適用する試みが出てきており、圧縮木材の特徴を生かせばこのような補強材あるいは緩衝材として利用する分野での実用化は十分可能であると考えられる。しかし、圧縮木材について、これまでの研究では生産性の効率化に関わる可塑性処理、圧縮成形及び形状固定処理に関するものが主

で^{2), 3)}、実用上必要な強度特性を評価する研究報告は極めて少ない。

本研究では、圧縮木材の強度特性を把握することが実用化の必須条件であると考え、圧縮木材について静的3点曲げ試験、衝撃曲げ試験を行い、補強及び衝撃緩衝部材に適用する際に必要な、静的・動的曲げ強度特性の評価を行っている。また、木材単体のみならず、他材料との併用による利用法として、自動車のバンパーリインフォースメント、インパクトビームといった補強材に用いられるアルミニウム合金押出型材の中空部分に圧縮木材を充填し、曲げ強度とエネルギー吸収性の向上を試みている。

2. 圧縮木材の曲げ強度特性

2・1 供試材及び試験片 本研究で用いた供試材は、東京奥多摩産のスギ辺材である。圧縮加工は木材の板目面(Radial section)に対し垂直な方向で行っている。(図1参照)

静的3点曲げ試験、衝撃曲げ試験に用いる試験片の寸法は $1 \times b \times h : 300 \times 20 \times 20 \text{mm}$ である。試験片は極力純正な板目面が得られるように供試材より木取りし

* 原稿受付 2000年4月10日。

^{*1} 学生員、東京都立大学大学院(☎192-0397 八王子市南大沢1-1)。^{*2} 正員、東京都立大学大学院工学研究科。

E-mail: nisimura@mech.metro-u.ac.jp

たものを用いた。また、実験結果に及ぼす含水率の影響を排除するため、試験片の含水率を気乾状態に近い16%になるように調整してから実験を行っている。含水率の計算に必要な木材の全乾比重は恒温炉の中で105℃、48時間以上乾燥させた後測定した値0.31としている。

木材の圧縮率 C_r が曲げ強度特性に与える影響を調べるため、 $C_r=10\%$ 、 25% 、 40% 、 50% の試験片を用い、同じ圧縮率につき5本の試験片で実験を行った。本研究において、木材の圧縮率 (C_r) を次式のように定義する：

$$C_r = \frac{h}{h_0} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

h ：元の高さに対して圧縮した量、 h_0 ：元の高さ
なお木材では圧縮率と比重の増加率はほぼ比例関係にある。

2・2 試験装置及び試験方法 静的3点曲げ試験は島津製作所の精密万能試験機、衝撃曲げ試験は自作の自然落下式衝撃試験機を用いて行った。試験装置の略図、試験条件及び主な工具条件を図2に示す。

評価方法について、曲げ強度は最大曲げ荷重、吸収エネルギーは木材が破断し始めるまでの荷重－ストローク線図で囲まれた面積を用いて評価を行った。

2・3 実験結果及び考察 図3に静的3点曲げ試験、衝撃曲げ試験における最大曲げ荷重と比重 ρ との関係を示す。全体的に、最大曲げ荷重は比重が大きくなるにつれ増加する傾向にあり、比重が0.6以上の試験片は日本農林規格のA級構造用木材ブナ (beech tree) 及びケヤキ (zelkova tree) 並みの曲げ強度が達成されている。

図4に静的3点曲げ試験、衝撃曲げ試験における吸収エネルギーと比重 ρ との関係を示す。最大曲げ荷重同様比重が大きくなるにつれ吸収エネルギーも増加する傾向にあり、圧縮後の比重が0.6以上の試験片はバラツキがあるものの、ブナ及びケヤキ並みのエネルギー吸収性をもつことが認められる。

圧縮加工によってスギ材の曲げ強度が増大する理由としては、スギ材の構造上、早材部は晩材部に比べ仮道管の径が大きく、細胞壁が薄いため比重が小さい。(早材部の比重0.2に対し、晩材部の比重は0.85で、早材より4倍以上大きい値である) 従って、木口面における早材、晩材間の比重差が著しく、組織構造的に複合材になっている。このような組織構造上の複合化が曲げ強度に影響を与えることは容易に考えられる。

Fig.1 Cross section of wood

Static bending test

Punch speed: 10mm/min
Length of specimen: 300mm
Bending span: 240mm
Radius of bending dies: 15mm

Radius of punch: 30mm

Dynamic bending test

Dropping height: 50cm
Length of specimen: 300mm
Bending span: 240mm
Radius of bending dies: 15mm
Radius of punch: 30mm

Fig.2 Equipment and common conditions of static & dynamic bending test

Fig.3 Relation between maximum bending load and specific gravity in the static & dynamic bending test

Fig.4 Relation between absorbed energy and specific gravity in the static & dynamic bending test

一方、スギ材を板目面方向に圧縮加工することによって早材部、晩材部から構成される年輪の幅が狭くなり、 C_r 50%までの範囲ではこの年輪幅の変動はほとんど早材部の変形によるものである。図5に C_r 50%まで圧縮した試験片の断面を示すが、晩材部の仮道管はほとんど変形せず、早材部の仮道管のみが圧縮によって偏平になっている。このように仮道管の形が偏平になれば早材部の比重が当然大きくなり、早材、晩材間の比重変動も小さくなるので木口面における組織構造上のバラツキが減少する。つまり、スギ材は圧縮加工によって組織構造的に均質化されるため曲げ強度が増大すると考えられる。

図4において、比重が0.6以上になると、静的曲げ吸収エネルギーが衝撃曲げ吸収エネルギーより顕著に大きくなる傾向がみられる。また、特に静的曲げ吸収エネルギーに関し、比重が0.6付近の試験片について吸収エネルギーに大きなバラツキがみられる。まず、静的曲げ、衝撃曲げにおけるエネルギー吸収量が異なることについて、負荷形式による試験片の破壊形態の違いが原因に考えられる。木材の衝撃曲げに関する既往の研究より、破断面が平滑な木材ほど脆く、衝撃曲げ吸収エネルギーが小さい傾向にあることが明らかにされている⁴⁾。図6に比重、圧縮後の年輪幅がほぼ等しい静的曲げ、衝撃曲げの試験片をそれぞれ示す。静的曲げ試験の場合、Fig.6にあるように、曲げの引張側で発生した割れが早材、晩材の境界部で繊維方向へ層間剥離を起こしながら年輪層を横切る破壊形態が典型的であり、比重、年輪幅の違いに関係なく、すべての試験片は同じ破壊形態を示す。これに対し、衝撃曲げ試験では、繊維方向への層間剥離がほとんどみられず、曲げ中心部に年輪層を横切る方向の割れが集中する傾向を示している。試験片の破断面も静的曲げ試験の場合に比べ波状或いは階段状を示し、比較的平滑である。実際、木材の衝撃曲げについて、早材部の仮道管の平坦な破断面が増えることも報告されており⁵⁾、このような、破壊形態の違いが両者のエネルギー吸収性に影響を及ぼしたと考えられる。

図7に静的曲げ試験、衝撃曲げ試験における破壊たわみと平均年輪幅の逆数 $1/b_a$ との関係を示すが、これから平均年輪幅の逆数が大きくなるほど、つまり年輪幅が狭いほど破壊たわみの増加が認められる。また、圧縮木材の年輪幅が曲げ強度及びエネルギー吸収性に与える影響を確認するため図8と図9に最大曲げ荷重及び吸収エネルギーと試験片の平均年輪幅の逆数との関係をそれぞれ示す。これらから、平均年輪幅の逆数が大きくなるにつれ最大曲げ荷重、吸収エネルギーと

Fig.5 Compressed lumber (C_r 50%)

Fig.6 Test piece after static & dynamic bending test

Fig.7 Relation between maximum deflection and the reciprocal of average annual ring width

Fig.8 Relation between maximum bending load and reciprocal of average annual ring width

も増大傾向を示しており、圧縮木材の曲げ強度特性は圧縮後の比重以外に年輪幅の影響も受けることが考えられる。

以上、静的3点曲げ試験、衝撃曲げ試験の結果より、スギ辺材を圧縮加工によって比重 0.6 以上にすれば A 類構造用木材並みの曲げ強度、エネルギー吸収性が得られること、圧縮木材の静的、動的曲げ強度は同等であることが明らかになった。また、圧縮木材の曲げ強度特性を定性的に見極める手段として、比重及び年輪幅のような巨視的構造因子が効果的であることが明らかになった。

3. 圧縮木材を充填したアルミニウム押出型材の曲げ強度特性

3・1 供試材及び試験片 アルミニウム合金押出型材は、A6063-T5、肉厚 1.5mm、40×40mm の矩形断面のものを用いた。充填物のスギ辺材は C_r 10%~50% の 4 通りの圧縮率で加工したものを用いた。なお、すべての木材は押出型材の中に充填できるよう高さ 36mm まで、木材の板目面に垂直な方向で圧縮加工した。試験片作成の流れを図 10、試験片の寸法を Table1 に示す。

3・2 試験装置及び条件 試験装置、実験条件などはすべて圧縮木材の場合（2・2 項参照）と同一である。なお、衝撃曲げ試験の落下高さは 150cm である。

3・3 実験結果及び考察 静的3点曲げ試験における最大曲げ荷重、圧縮木材が破断し始めるまでの吸収エネルギーと試験片の単位長さ当たりの質量との関係を図 11 に示す。最大曲げ荷重、吸収エネルギー共充填する木材の圧縮率が大きくなるにつれ線形的に増加する傾向を示している。

衝撃曲げ試験における最大衝撃曲げ荷重、単位変位当たりの吸収エネルギーと試験片の単位長さ当たりの質量との関係を図 12 に示す。静的3点曲げ試験の結果と同様に、最大衝撃曲げ荷重、吸収エネルギー共線形的に増加する傾向を示している。これらの結果から、圧縮木材の充填による矩形断面押出型材の曲げ強度、エネルギー吸収性の大幅な向上が認められる。

図 13 に静的3点曲げ試験の荷重－ストローク線図を示す。比較を行いやすくするため、中空及び圧縮率の差が最も大きい 10% と 50% の木材を充填した押出型材の実験結果をそれぞれ示している。中空押出型材 A は荷重がピークに達した直後、著しい低下傾向を示すの

Fig.9 Relation between absorbed energy and reciprocal of average annual ring width

Table1 Dimensions of the test piece

	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)	C_r (%)
Al shape	400	40	40	
Lumber①	400	36	40	10
Lumber②	400	36	48	25
Lumber③	400	36	60	40
Lumber④	400	36	72	50

- 1 : Boiling treatment for softening the lumber
- 2 : Compressing process of the lumber
- 3 : Drying set treatment to prevent the recovery of the compressed lumber
- 4 : Fill the compressed lumber into the Al shape
- 5 : Boiling treatment to fix the compressed lumber to the Al shape by using the recovering force of the compressed lumber

Fig.10 Flow chart of the manufacture of test piece

Fig.11 Relationship between maximum bending load and absorbed energy to the mass per unit length (static bending test)

に対し、圧縮木材を充填した押出型材 B と E はストローク 20mm 付近まで荷重の低下がほとんど見られず、特に圧縮率 50% の木材を充填した試験片 E はほぼ最大荷重を保ったままである。これは中空押出型材の場合、荷重が最大値に達した直後パンチ接触部において圧縮フランジの座屈変形が発生し、パンチから離れると共にウェブの圧縮側においても面外へ膨らむ局部変形が発生したため圧縮フランジとウェブの接合部に破断が生じ、押出型材の急速な断面変形が著しい荷重低下を引き起こしたと考えられる。

一方、圧縮木材を充填した押出型材は中空のものに比べ、荷重がピークに達してからパンチ接触部において圧縮フランジの落込み、ウェブの面外へ膨らむ局部変形が現われ始めるものの、変形が進行するにつれ圧縮フランジ側の木材が局部的に圧密化され、変形抵抗が急増するため変形の進行度合いは極めて緩慢である。従って、押出型材の断面変形が小さく、著しい荷重低下がみられない。

図 14 に代表的な衝撃曲げ試験の荷重－ストローク線図を示す。静的曲げ試験の結果と同様、中空押出型材 F に比べ、圧縮木材を充填した G と H の押出型材は最大荷重で大きく上回り、C_r25% の木材を充填した G よりも C_r50% の木材を充填した H のほうが最大曲げ荷重が大きい。

中空押出型材の場合、パンチ接触部における圧縮フランジの落込み及びウェブの膨らみによる断面変形が曲げ強度低下の主因とされており⁹⁾、図 15 に中空と圧縮木材を充填した場合の押出型材のパンチ接触部をそれぞれ示すが、圧縮フランジの落込みに中空と圧縮木材を充填した場合の押出型材のパンチ接触部をそれぞれ示すが、圧縮フランジの落込み及びウェブの膨らみは共に圧縮木材の充填によって大幅に軽減されていることが確認できる。実際の測定結果から、圧縮木材の充填によりフランジの落込み量が中空押出型材の 2～3 割にとどまり、ウェブの膨らみ量も 3～5 割程度に収まることが明らかになっている。

図 16 に衝撃曲げ試験後の試験片を示す。まず、中空押出型材の場合、圧縮フランジの落込み、ウェブの膨らみ変形が著しく、フランジ、ウェブの接合部で破断が発生している。この破壊形態は静的 3 点曲げ試験の場合と同じである。圧縮木材を充填した押出型材についてみると、全体的に圧縮フランジの落込み、ウェブの膨らみ変形が生じているものの、中空押出型材に比べて明らかに変形の程度が軽く、フランジ、ウェブの接合部も破断していない。また、圧縮率 C_r が 10%～50% に大きくなるにつれ、フランジ、ウェブの変形

Fig.12 Relationship between maximum bending load and absorbed energy to the mass per unit length (dynamic bending test)

Fig.13 Relation between bending load and punch stroke in the static bending test

Fig.14 Relation between bending load and punch stroke in the dynamic bending test

量も小さくなる傾向にある。そこで、試験片の断面がどの程度変形したかを調べるために圧縮フランジの落込み、ウェブの膨らみの変形量を測定し、その結果を Table2 に示した。中空押出型材では、圧縮フランジが断面高さの 30%以上落込み、両ウェブの膨らみが断面幅の 50%以上に達している。これに対し、圧縮木材を充填した場合は、圧縮フランジの落込みは $C_r 10\%$ のときで断面高さの約 18%, $C_r 50\%$ になると断面高さの 10%以下になっている。また、ウェブの膨らみ量も、 $C_r 10\%$ のときで断面幅の約 30%, $C_r 50\%$ になると断面幅の 20%以下になっている。これより、圧縮木材の充填はフランジの落込みを 16%~25%, ウェブの膨らみを 23%~37%まで軽減させており、接合部の破断及び断面全体の変形を有効に防いでいることが明らかである。

4. 結論

本研究は圧縮木材の静的、動的曲げ強度特性及び押出型材に充填した場合の曲げ強度特性について調査し、得られた結果を以下に示す。

1. スギ辺材を圧縮加工によって比重 0.6 以上にすれば日本農林規格で規定されている A 類構造用木材に匹敵する曲げ強度、エネルギー吸収性が達成できる。
2. 圧縮木材の静的、動的曲げ強度は同等であり、静的曲げ試験による曲げ強度の評価が可能である。
3. 圧縮木材の曲げ強度特性は圧縮後の比重によって定性的に評価することができ、その際に生じるバラツキは木材の年輪幅によって整理できる。
4. 矩形断面押出型材に圧縮木材を充填することにより、パンチ接触部のフランジ、ウェブの局所変形が軽減され、曲げ強度、エネルギー吸収性の大幅な向上が認められる。

最後に、本研究は文部省科学研究費（基盤研究 B）の補助下で行われ、また、研究費の援助を頂いたアイシン軽金属（株）にも深く謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所 交通安全研究室, 八千代エンジニアニング株式会社, 木材防護柵の実用性に関する検討報告書 (1999)。
- 2) 井上雅文ほか, 高周波加熱による圧縮木材の形状安定化, 木材学会誌 43 (1997) 16~23。
- 3) 浅葉将之ほか, 圧縮木材の曲げ強度に及ぼす加工条件の影響, 機論A, 67-654 (2001) 267-272。

- 4) 友松昭雄ほか, 木材の衝撃曲げに関する研究 (第 2 報) 平均ミセル傾角および年輪内細胞壁率変動の影響, 木材学会誌 26-10 (1980) 673~678。
- 5) 佐伯浩, 木材の Fractography, 材料, 22-241 (1983) 18~25。
- 6) 山田賢治ほか, 自動車サイドドアビーム用アルミニウム押出型材の曲げ強度解析: 住友軽金属技報 36-1, 2 (1995) 92~98。

Fig.15 Test piece after static bending test

H: Al shape filled with C_r 50% lumber

G: Al shape filled with C_r 25% lumber

F: Al shape

Fig.16 Test piece after dynamic bending test

Table2 Transformation of cross section after dynamic bending test

C_r (%)	t_0 (mm)	α (%)	β (%)
	1.5	34.3	53.8
10	1.5	17.8	30.3
25	1.5	12.6	26.8
40	1.5	11.8	20.3
50	1.5	9.3	17.3

$$\alpha = h' / h_0 \times 100 (\%)$$

$$\beta = b' / b_0 \times 100 (\%)$$