サンドイッチロールプレス法による長尺圧縮木材の製造*

村井大輔^{*1}, 廣井徹磨^{*2}, 西村 尚^{*2}Sandwich Roll Press Method for Manufacturing
Long Compressed LumberDaisuke MURAI, Tetsumaro HIROI^{*3} and Hisashi NISHIMURA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan College of Technology,
1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo, 140-0011 Japan

New lumber compression process, named sandwich roll press method, was developed. In this method lumber is rolled with a pair of metal jigs because rolling process is more suitable than prevalent press process to manufacture long products such as bar or column which is necessary for wood market. In this paper, limit compression ratio and plasticizing conditions of new method were investigated experimentally, and bending test was performed for estimation of strength of the products. The results indicate that this new method has possibility to manufacture longer lumber compressed highly than the manufactured by press process and that plasticizing conditions don't influence surface appearance and bending strength of lumber compressed by new method as the conditions of press process. These results show the effectiveness of this new method.

Key Words: Roll Press, Manufacturing System, Jig, Compressed Lumber, Bending Test

1. 緒 言

我が国には38億 m^3 に達する森林資源が存在し、これらは毎年成長により年間木材消費量とほぼ等しい1億 m^3 が増加している。しかし、国産材が消費される量は約2千万 m^3 と少なく、我が国の森林資源は山林に放置されている⁽¹⁾。このような国産材の消費低迷の原因は主に人工林の大半を占めるスギ材の脆弱性にあり、近年この脆弱なスギ材の有効利用を目的とし、様々な高付加価値化の方法が提案されている。その中で木材圧縮塑性加工は、低比重であるスギ材の改質法として注目されている⁽²⁾。この方法は木材を煮沸などで可塑化した後、金型に挿入しプレス機で年輪の半径方向に圧縮し、金型ごと形状固定処理をするもので、高級材並みの密度に高めることができ、圧縮木材と呼ばれている。

しかし、プレス機による圧縮加工では、木材需要の主たる棒や柱などの長尺物の製造を考える場合、プレス機の容量・寸法が大型になるため、加工機のコスト増加、大寸法への対応の難しさが懸念される。そのため、長尺物の製造に優れる圧延による圧縮木材の製造が研究されている⁽³⁾。著者らも圧延機を用いて高圧縮木材の製造を試みた。しかし、高い圧縮率を得ようとすれば、割れや剥離などの成形不良が容易に発生し、また、与えた圧縮ひずみもロール通過直後から回復してしまうといった問題が明らかになった。そこで本研究では、上記の問題を解決するため、3スタンドの圧延機を使用し、木材を上下1対のあて板で挟むことにより圧縮荷重の分散をはかり、そのまま圧延し、圧延終了後あて板ごとさらに拘束治具でクランプすることにより見かけ上の金型を構成し、形状固定するプロセスを考案した(以下、サンドイッチロールプレス法という)。

本報ではサンドイッチロールプレス法の概要と、この方法を用いて行った圧縮木材の製造について、その限界圧縮率、可塑化温度条件と、製品評価として外

* 原稿受付 2003年5月29日。

^{*1} ABB(株) (☎ 150-8512 東京都渋谷区桜丘町 26-1)。^{*2} 正員、東京都立工業高等専門学校 (☎ 140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40)。

E-mail: hiroi@tokyo-tmct.ac.jp

観および曲げ試験による強度を調べた結果を示す。さらに、本法を用いて厚さ方向に密度分布を与えられることを示し、フローリング材など表面層のみの圧縮を必要とする建材製造に有効であることを報告する。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材

供試材には奥多摩産スギ材を用いた。図1に供試材の寸法を示す。平均年輪間隔 3.45mm(標準偏差 1.0mm), 平均全乾比重 0.3 である。全乾比重は供試材小片を恒温器中にて 105℃, 24 時間乾燥して求めた。実験には可塑性のため 60 分間煮沸した含水率 80%以上の飽水材を用いた。図2には含水率 97%の圧縮応力とひずみの概略を示す。圧縮率 50% (ひずみ 0.7) までは平均応力は約 1.5MPa, それ以上になれば急激に上昇している。なお, 含水率(MC: moisture content)は式(1)により定義する。式(1)中の全乾質量は全乾比重と供試材容積との積である。

$$MC(\%) = (m - m_0) / m_0 \times 100 \quad (1)$$

m : 供試材質量 m_0 : 全乾質量

2.2 実験方法

図3に, サンドイッチロールプレス法による圧縮木材製造の模式図を示す。実験には, 3スタンドの圧延機を用いた。表1に仕様を示す。スタンド間は

300 mmであるので, 供試材は1スタンドまたは2スタンドで圧下される。これに各種の装置を付加して使用した。図3(a)では, 供試材の上下面に鋼製のあて板を配置し, 圧延することでロールからの荷重を木材の面全体に分散している。この方法で割れや剥離

L (mm)	500
W (mm)	40
H (mm)	12.5, 15.0 17.5, 20.0
Ave. annual ring interval (mm)	3.45

Fig.1 Dimensions of specimen.

Fig.2 Compressive stress-strain curve of cedar (MC97%, 100℃).

Table 1 Rolling mill specification.

Type	2Hi 3Stand Tandem Mill
Max torque	160kg-m/stand
Max rolling force	50kN/stand
Roll diameter	150 mm
Distance of each stands	300 mm

Fig.3 Flow chart diagram of sandwich roll press method.

の原因となる圧延時のせん断変形の抑制をはかる。圧延ロールには凸幅 40 mm, 凹幅 42 mm の孔型ロールを用いた。孔型ロールを用いた理由は、予備実験の結果から高圧縮木材では横方向のゆがみ変形が著しいことがわかったので、横方向変形を拘束するためである。あて板の幅は 41.6 mm とし、凹型ロールとのクリアランスは片側 0.2 mm である。あて板に挟まれた木材を圧延するとき、あて板と木材とのすべりなどによりかみ合い不良が生じるので、後方から押し込むために容量 10kN, ストローク 500 mm の油圧のプッシャーを配置し、供試材の末端が第 1 スタンドに至るまで押し込んだ。また、圧延後の寸法回復を抑止するため各スタンド間と最終ロール通過後に、上下からロールベアリングを介してあて板に圧縮力を保持する装置(以下、復元抑制装置 A,B と呼ぶ)を取り付け、圧下力を保持している。また、最終スタンドにおいて板厚 8mm まで圧縮されるようにロールギャップおよび復元抑止装置の間隔を設定した。図 3(b)では、圧延終了した木材とあて板をそのままコの字型治具に挿入する。このとき厚さは 9mm に回復する。つづいて図 3(c)のように、復元抑制装置の上下からの圧縮力を取り除けば、供試材の板厚は、さらに 10mm まで回復し、木材はあて板ごとクランプされる。

その後、図 3(d)のように圧縮木材を、一体化した治具ごと恒温炉に入れ 180℃, 60 分の熱処理を行い、形状固定処理を行う。

以上のように、本法はあて板を用いて、木材を圧縮することを主としておりロールによる木材への張力の付与はないものと考えられる。

3. 実験条件

3. 1 圧縮木材の製造条件

表 2 に圧延条件を示す。製品板厚 (h) を 10 mm とし、初期板厚 (H) によって製品圧縮率 (CR : compression ratio) を式(2)で定義する。また、木材は各スタンド間で形状回復するので、ロール直下の圧縮率を (CRr) として式(3)を定義する。低 CR は 1 スタンドで達成できるが、 CR 50% では 2 スタンドでの圧縮率を設定した。

$$CR(\%) = (H - h) / H \times 100 \quad (2)$$

H : 供試材初期板厚 h : 製品板厚

$$CRr(\%) = (H - hs) / H \times 100 \quad (3)$$

H : 供試材初期板厚 hs : 各スタンド通過時の板厚

Table 2 Compression ratio for roll press die method

H (mm)	CR (%)	CRr (%)		
12.5	20	1st stand		
		36		
15.0	33	47		
17.5	43	54		
20.0	50	1st stand	2nd stand	
		35	60	
	60	1st stand	2nd stand	3rd stand LCR
		20	45	70
		65	25	50
		75	75	75
	70	30	55	80

CR : Compression ratio of product.

CRr : Compression ratio under each roll stand.

LCR : Limit compression ratio.

3. 2 限界圧縮率

割れや剥離を生じることなく圧縮木材を製造可能な限界圧縮率を調査するため、板厚 20mm の供試材を用いて、製品圧縮率 $CR=60, 65, 70\%$ について実験を行った(表 2 参照)。50%を超えるため、3 スタンドでの圧縮率を設定した。なお、サンドイッチロールプレス法において木材が最も圧縮されるのは最終スタンド通過時であるため、最終スタンド通過時の圧縮率を限界圧縮率 (LCR : Limit CRr) とした。

3. 3 可塑化温度

木材の可塑化のために水を用いる場合、煮沸法が行われている。しかし、近年プレスによる圧縮加工において 60℃ の温水、さらには 25℃ (常温) の水による可塑化での圧縮木材の製造が報告されており⁽⁴⁾省エネルギー化がはかられている。そこでこのような可塑化温度の低下をサンドイッチロールプレス法でも実施可能であるかを調査するため、60℃, 20℃ の水に供試材を 1 時間浸漬後、 $CR=50\%$ の圧縮木材の製造を試みた。

3. 4 製品評価

製造した圧縮木材について割れや剥離など外観的な成形不良の確認を行った。また、図 4 に示す試験条件で静的曲げ試験を行い、曲げ強度を評価した。荷重は板目面から負荷し、試験本数は各条件で 5 本とした。なお、静的曲げ試験時の試験片の含水率をなるべく揃えるため、試験の一日前から設定温度 20℃ の

恒温器に入れて保存した。含水率は 15～9% (平均 12%) であった。

Fig. 4 Static bending test conditions.

3. 5 圧縮率分布の創生

本法では木材を上下のあて板で挟むので、あて板温度を変えることにより、上下方向に温度分布を与えることができる。すなわち可塑化条件の分布を与え、その状態で圧縮すれば圧縮率の分布を創生できると思われる。このことは、木材として要求される機能としての機械的性質以外に、フローリング材等では歩行時の衝撃吸収性や断熱性などが求められており、このような要求に対して傾斜機能を付与して木材の高付加価値化をはかれる可能性を意味する。これまで木材の含水率を部分的に変えたり、薬剤を注入したりする手法を使ってこの種の研究は行われているが^{(5), (6)}、型やロールに温度差を与えた例はない。

本報では、あて板のうち一方を 120℃, 160℃, 200℃に加熱し、他方を常温とした場合について調べた。供試材は初期板厚 20mmとし、これを板厚 10 mm ($CR=50\%$) に圧縮する。実験本数は同一条件で 3 本とした。なお、板厚方向の圧縮率分布の測定は図 5 に示すように、板厚方向に 5mm 間隔で 4 つの格子を、長手方向に 100mm 間隔で計 5 箇所描き、圧縮加工前後の各格子の高さから圧縮率を求めた。加熱した側を格子番号 1 とした。

4. 実験結果および考察

4.1 圧縮木材の外観評価

(1) $CR=50\%$ までの場合

サンドイッチロールプレス法により製造した $CR=50\%$ までの圧縮木材の割れや剥離の観察結果を表 3 に示す。どの圧縮率の供試材においても割れや剥離などの外観的な不良は観察されなかった。このことから本法は高圧縮木材を効率よく製造できる方法であるといえる。

(2) $CR>50\%$ の場合

限界圧縮率を調べた結果を表 4 に、また CRr

Fig. 5 Grid number for creating inclined distribution of compression ratio. ($H=20\text{ mm} \rightarrow H=10\text{ mm}; CR=50\%$)

Table 3 Results of appearance estimation.

CR (%)	Crack	Delamination
20	○	○
33	○	○
43	○	○
50	○	○

○:nonexistent ×:existent

70%, および CRr 75% の外観を図 6 に示す。

CRr 70% では図 6(a) に示すように良好な表面性状が得られた。しかし、 CRr 75% では図 6(b) に示すように、長手方向への割れが発生した。また CRr 80% では圧縮荷重が圧延機的能力をオーバーするため圧延不能であった。

CRr 75% で発生した長手方向への割れの原因は、

Table 4 Results of appearance estimation.

CRr (%)	Crack	Delamination
70	○	○
75	×	○
80	—	—

○:nonexistent ×:existent —impossible

(a) CRr 70%

(b) CRr 75%

Fig. 6 Appearance of compressed lumber.

板厚方向への圧縮による板幅方向への寸法の変化および熱処理時の寸法変化が原因と思われる。

(3) 可塑性温度を変えた場合

表 5 は可塑性温度を変えた場合の外観評価結果を示す。プレス法⁽⁴⁾と同様にサンドイッチロールプレス法においても 60℃、20℃の処理により、割れや剥離を生じることなく圧縮木材を製造可能であった。木材の可塑性は主に木質構成成分のリグニン、ヘミセルロースの軟化により発現し、その軟化温度は 100℃付近と言われているが⁽⁷⁾、本法でも低温での可塑性が達成されることは省エネルギーに役立つ。

Table 5 Effects of plasticizing temperature

	Crack	Delamination
PT 60℃	○	○
PT 20℃	○	○

○:nonexistent ×:existent

4.2 曲げ強度評価

(1) 圧縮率と曲げ強度

図 7 にサンドイッチロールプレス法で製造した圧縮木材の曲げ強度と圧縮率の関係を示す。これまでの圧縮木材に関する研究によれば、圧縮木材の強度や剛性、硬さなどの機械的性質と圧縮率は正の相関関係をもつことが明らかになっており、本法の結果でもプレス圧縮と同様に圧縮率に比例して強度向上が見られることが確認できた。また圧縮率 50 %ではチーク材(図中破線)と同等かそれ以上の曲げ強度が得られている。

Fig.7 Relationship between σ and CR.

(2) 可塑性温度が曲げ強度に及ぼす影響

図 8 には可塑性温度が曲げ強度に及ぼす影響を示す。可塑性温度の低下による曲げ強度の低下は発生していないことがわかる。サンドイッチ

ロールプレス法による圧縮では、平行平板間で圧縮するプレス法と異なり、あて板で挟む構造であるので、ロール間隔がスタンドごとに異なるとき長手方向に圧縮力が傾きをもつ。そのため、木材内にせん断力が働き木質繊維間においてせん断破壊が発生する可能性があった。また細胞壁の破壊は強度に大きな影響を与えることが明らかになっている⁽⁴⁾。このようなことから強度低下は可塑性温度が低い場合に生じると予想されたが、本研究範囲では木質繊維間でのせん断破壊は発生していないと思われる。この理由として、本研究では形状固定工程に細胞壁を劣化させ難いドライグセット法を採用したために、可塑性温度が曲げ強度に影響を及ぼさなかったと考えられる。

Fig.8 Relationship between σ and PT.

4.3 圧縮率分布の創生結果

図 9 (a)~(c)に各可塑性温度での板厚方向の圧縮率分布を示す。あて板温度の高い方(グリッド No1)が可塑性条件を維持するので、圧縮率が高くなると予想された。しかし、図 9 (a)の可塑性温度 100℃では加熱側の圧縮率を他の部分よりも高めることはできていない。ほぼ均一である。図 9 (b)の可塑性温度 60℃の場合、あて板温度が低い 120℃で傾斜分布が生じている。図 9 (c)の可塑性温度 20℃の場合、すべてのあて板温度でグリッド No1の圧縮率が他の部分よりも高い分布を示している。なお、あて板温度 200℃では圧縮率 70%以上の値が得られている。

ここで、可塑性温度が高いほど傾斜分布を与えない原因を検討するため、可塑性温度と吸水量との関係を調べた結果を図 10 に示す。可塑性温度が高いほど吸水率が高くなっている。このことから、可塑性温度が高いときは水分が木材内に多く吸収されたため、供試材全体が十分に軟化し一様化していること、また、あて板の熱が供試材に伝わりやすいためと考えられる。

逆にいえば、可塑化温度 20℃では吸水された水が少ないため、全体の熱伝導性が低く、加熱された方に近い部分のみが限定的に可塑化されたため、圧縮率の分布の創生ができたと考えられる。

以上の結果から、水分吸収量を適切にコントロールし、供試材内に含水率の分布を与えるか、あるいは熱量をコントロールすることで所望の圧縮率分布を創生できる可能性があることを示すことができた。

Fig. 9 Distribution of compression ratio at each plasticizing temperature. (Average CR=50%)

Fig. 10 Relationship between amount of water-absorption and plasticizing temperature.

5. 結 言

本報で得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 長尺の高圧縮木材の製造に適したサンドイッチロールプレス法の開発に成功した。
- 2) 本法では圧縮率 70%の高圧縮木材を製造する事が可能である。
- 3) 本法においても、可塑化温度は成形不良の発生および曲げ強度に影響を与えない。すなわち、可塑化工程での省エネルギー化が図られる。
- 4) 本法による高圧縮木材の曲げ強度はチーク材より高い強度を得られる。
- 5) 木材の可塑化温度とあて板温度を組み合わせることにより、厚さ方向に密度分布をもたせた高圧縮木材の製造が可能である。この場合、可塑化温度は低い方が表面硬化に有効である。

参考文献

- (1) 農林統計協会編：林業白書(平成11年版)，(2000)，26-35，日本林業協会。
- (2) 西村尚：塑性と加工，41-478(2000)，1087-1092。
- (3) 塩崎宏行，河瀬忠弘，池田元吉，三上昌夫：塑性と加工，42-486(2001)，675-679。
- (4) 浅葉将之，西村尚：機論 A，67-654(2001)，267-272。
- (5) 井上雅文，則元京，大塚康夫，山田正：木材学会誌，36-11(1990)，969-975。
- (6) 井上雅文，則元京，大塚康夫，山田正：木材学会誌，37-3(1991)，227-233。
- (7) 中戸莞二編：木材工学(1985)，178，養賢堂。