針葉樹バークを原料としたブロック状成形物の製造と材質評価†

鈴木 滋彦* 末 永 淳 詞** 青 木 邦 章***

Production of a Molded Composite Made from Conifer Bark Residue and Its Properties

by

Shigehiko SUZUKI*, Junji SUENAGA** and Kuniaki AOKI***

A composite made from bark, named bark-block, was developed to promote utilization of the bark residue. Air-dried bark of Japanese conifers (sugi and hinoki) was used as furnish. The bark-block with dimensions of 400 mm by 400 mm by 55 mm was fabricated using urethane resin as a binder. Steam was injected during pressing through holes on the press platen. Target density of this composite was 0.4 g/cm³. A small-scale production machine that can be installed in a local sawmill or a logging site was designed for this purpose. The effect of manufacturing parameters on the properties of the bark-block was investigated to obtain the optimum conditions. The experimental results showed that bending properties (MOR and MOE), compressive stiffness, and IB strength increased with increasing resin content. Mechanical properties were proved to be controlled by the amount of the resin applied. It was found that the preferable steam injecting time for resin curing was 3 minutes. Thickness swelling was from 5 to 10 percent after water immersion treatment, while the water absorption was more than 80 percent. The bark-block produced have started to be used as a paving material in a park or in an exposition.

Key words: Bark residue, Molded composite, Internal bond strength, Bending properties, Resin content, Steaming

1 緒 言

バーク（樹皮）は樹木の形成層から外側に向かって生まれた組織であり、製材の過程では不要な廃棄物となる。国内の製材に伴うバークの発生量は年間 350 万 m³（1996 年）と推定されており、¹⁾製材原木の小径化や製材の付加価値を高めるための剥皮作業の促進により増加する傾向にある。国産材の製材で発生するバークのほとんどはスギ・ヒノキなどの針葉樹バークである。バークの利用の歴史は古く、建築物の屋根ぶきや壁などに用いられたが、最近の主な用途は家畜敷料や土壌改良材、燃料などである。²⁾良質の堆肥・土壌改良材としてのバーク堆肥は生産量が増加している³⁾ものの、未利用率が高く、約 30% が焼却または廃棄されているのが実情である。¹⁾

バークの利用促進の研究は様々な視点で行われているが、樹皮の抽出成分の利用技術に関するもの⁴⁾と、ボードなどの材料としての利用とに大別される。バーク小片を木材小片に混入してパーティクルボードを製造する^{5), 6)}ことは未剥皮原木を使用することで一般に行われている。バークのみを原料としたボードの機械的な性質⁷⁾や、熱伝導率が調べられた。⁸⁾粉末 PF 樹脂によるバークボードを製造し、エポキシ樹脂の含浸を行った事例⁹⁾や、広葉樹のバークを原料とした事例、¹⁰⁾セメント板への利用、¹¹⁾サンドイッチパネルへの利用¹²⁾などもある。製造技術に関しては、高温で熱圧することにより接着剤なしで製造す

る、¹³⁾パラホルムアルデヒドを少量添加することでバークボードの製造が可能である¹⁴⁾などの報告がある。また、最近では秋田県立大学におけるスギ樹皮ボードの事例^{15), 16)}などがある。

本研究ではバーク利用方法の一つとして、ブロック状の成形物（以下、バークブロックと呼ぶ）を考案した。開発の基本的な考え方は以下の通りである。(1) 公園などへ敷設する舗装平板としての利用を当面の目標とする。(2) 林業廃材の一種であるバークは価値も低いため、大量に集荷し量産することを目標としない。(3) バークは全国各地で分散的に発生するため、少人数による小規模な生産を目標とする。(4) 簡便で安価な生産システムを用いて、安定した品質を得ることを目標とする。上記の目標を達成するため、熱圧縮方式は採用せず湿気硬化型のバインダーを用いた蒸気噴射方式を選択した。本報告では、バークブロックを製造する際に課題となる、製造条件因子と材質との関連を検討した。特に、バインダーの添加量、蒸気処理時間、養生時間（硬化促進時間）などが材質に及ぼす影響について評価した。

2 実験方法

2.1 供試原料およびバインダー

静岡県引佐町森林組合の製材工程に設置されたリングバーカーにより剥皮されたスギ (*Cryptomeria japonica*) およびヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) 材のバークを原料

† 原稿受理 平成 13 年 7 月 16 日 Received July 16, 2001

* 正 会 員 静岡大学農学部森林資源科学科 〒422-8529 静岡市大谷, Dept. of Forest Resources Sci., Shizuoka Univ., Ohya, Shizuoka, 422-8529

** 静岡大学農学部森林資源科学科 〒422-8529 静岡市大谷, Dept. of Forest Resources Sci., Shizuoka Univ., Ohya, Shizuoka, 422-8529

*** (株)スペース・クリエイション 〒431-0201 浜松市篠原町, Space Creation Ltd., Shinohara-cho, Hamamatsu, 431-0201

とした。スギパークとヒノキパークの混合比率は概ね 50% である。原料パークは粗砕したのち乾燥させ気乾状態で使用した。接着剤には PMDI 系プレポリマー（ウレタン樹脂：山本染料化学 NSX-123）、離型剤には（ワックス系離型剤：コニシ株式会社 UR-430）を使用した。

2・2 製造装置

原料パークに接着剤を塗布することを目的としてプレnder（スペース・クリエーション社：BBL-1 型）が試作された。直径 70cm、長さ 36cm の円筒内でフィンの回転により原料をかく拌しながら接着剤をスプレー塗布する形式で、約 5kg の原料の投入が可能である。同機はこの円筒を 2 個備えており、同時に約 10kg の塗布が可能である。

パークブロックの製造には、本研究の目的のために新たに開発試作された成形プレス機（スペース・クリエーション社：BSP-1 型）を用いた。同機の略図を Fig. 1 に示す。接着剤を塗布した原料パークを成形機のボックス（内寸：400mm × 400mm）内に移し、手作業により均一なマットを成形する。続いて、圧力 0.45MPa で圧縮を行うと同時に、下部プラテンに約 5cm 間隔で開けられた噴射口を通して蒸気加熱処理を行うことでレジンの硬化を促すことを基本原理としている。硬化したパークブロックは同図右側の押し出し器により排出される。同型の成形プレスユニットが 2 機連なっており、一方がプレス時に他方でフォーミングをすることで作業性の向上を図った。蒸気噴射には、農業土壌の滅菌に使用されている

可動ボイラー式の蒸気発生機（スペース・クリエーション社：MHS-4S 型、最大圧力 0.05MPa）を使用した。

2・3 製造試験

パークブロックの寸法は 400mm × 400mm とし、密度は $0.40\text{g}/\text{cm}^3$ を目標とした。この種の成形物に関する情報はほとんど見あたらないため、製造条件と物性との関連を幅広く検討することを目的として、以下の製造条件を設定した。

レジン添加率：4～20% で 7 水準

蒸気噴射時間：0.5～5 分で 4 水準

養生時間：0～10 分で 3 水準

厚さ：20～90mm で 6 水準

なお、蒸気噴射後のボックス内に保持する時間を、ここでは養生時間と定義した。標準条件はレジン添加率 (RC) 10%、蒸気噴射時間 3 分、養生時間 0 分、厚さ 55mm とした。以上の条件により RC、蒸気噴射時間、養生時間、厚さが材質に及ぼす影響を検討した。

2・4 はく離試験

50mm × 50mm に裁断した試験体を用いて、パークブロックの内部結合力の評価を目的としてはく離試験を行った。試験体数は、一製造条件につき各 10 体、荷重速度は 5mm/分とした。試験体両面に金具治具をホットメルト接着剤で接着し、冷却後、試験体面に対して垂直の引張り強さ（はく離強さ、IB）を求めた。

2・5 曲げ試験

幅 50mm、長さ 400mm の試験体を用いスパン 350mm、10mm/分の中央集中負荷による曲げ試験を行った。一条件につき試験体は 8 体とし曲げ破壊係数 (MOR)、曲げヤング係数 (MOE) を求めた。この試験条件では厚さに比してスパンが短いため真の曲げ性能の評価とはならない可能性があるが、材質の相対的な評価を目的としているためこの用語を用いることとした。

2・6 圧縮試験

50mm × 50mm に裁断した試験体を用いて圧縮試験を行った。一条件につき試験体の数は 10 体とした。試験体面に垂直に荷重を加え、負荷応力が 8MPa に達したところで除荷して応力-変形曲線を求めた。この曲線から負荷直後の剛性、除荷後の変形量などを求めることで圧縮変形特性を評価した。

2・7 吸水試験

50mm × 50mm に裁断した試験体を常温水中に浸せきし耐水性能を評価した。なお、浸せき時には試験体の上面が水面から 2.5cm 程度の深さになるように留意した。24 時間の浸せきの後ただちに厚さ、質量を測定して吸水率 (WA)、厚さ膨張率 (TS) を求めた。引き続き、温風乾燥機 (60℃) を用いて乾燥させ、はく離試験を行った。

なお、一部の条件について、温水処理および煮沸処理を行った。温水処理は 70℃ の温水に 2 時間浸せき後、常温水に 1 時間浸せきさせ、40℃ で温風乾燥した。また、煮沸処理では 2 時間煮沸処理した後、ただちに常温水に 1 時間浸せきさせ、40℃ で温風乾燥した。

Fig. 1. A side view of the press machine designed for the bark-block manufacturing.

3 結果と考察

3・1 バークブロックの製造方法の検討

バークブロックの製造工程は、バークの調整、レジンの塗布、原料エレメントのフォーミング、圧縮、蒸気噴射、調湿の6工程からなる。バークの調整段階ではリングパーカーにより剥皮されたバークを粗砕したのち、気乾状態にまで乾燥させる。次に、原料バークにブレンダーを用いてレジンを塗布する。塗布済みバークを秤量して成形プレス機に投入してフォーミングする。圧縮と同時に蒸気噴射を行いレジンの硬化を促進させる。その後、調湿して完成する。

本試作システムは大量に生産することを目的とするものでなく、林業経営の行われている各地域で個別に生産することを基本のコンセプトとして計画されたものである。さらに、作業員1名～2名で生産できる小規模機械を開発した。レジンの塗布は2連のブレンダーを用いることで効率よく運転ができること、同様に、成形プレス機も2連とすることで、継続的に製造できることが確認できた。また、一般のボード製造においては、大板を製造の後、研削ならびに裁断の工程が必要となるが、本製造工程においてはブロックの完成寸法を予め定めることでトリミングに要する工程が不要となること、また材料のロスがなくなることが確認できた。また、農業土壌の滅菌に使用されている可動ボイラー式の蒸気発生機を使用した。同機の出力は112000kcal/h、最大圧力0.05MPaであり、この程度の蒸気発生機がバークブロックの製造に十分使用可能であることが検証できた。

3・2 レジン添加率の影響

IBに及ぼすRCの影響をFig. 2に示す。RCが10%の条件下では、およそ0.05MPaの値を示した。この値はパーティクルボードやMDFなどの市販の木質ボードの1～2割に相当する。¹⁷⁾インシュレーションファイバーボードと同程度の内部結合力状態と見なすことができる。内部結合力が低い理由は、原料として用いたエレメントそのものが比較的大きく、エレメント単体が十分な強度を

Fig. 2. Effect of resin content on IB strength.

有していないことに依るものと思われる。測定値の変動が大きいの、比較的大きなエレメントを用いていることに起因するものであろう。本研究と同様の手法で製造した事例が無いため、パーティクルボードを模したバークボードの性能と比較することで内部結合力の絶対値を評価する。Maloney⁷⁾はUF樹脂接着剤を用いて多種類のバークボードを製造した。RCが10%、密度0.7g/cm³程度でIBの値0.4MPa～0.5MPaを得ている。Suzukiら⁶⁾はスギのバークを用いた密度0.7g/cm³のボードでIBを0.17MPaと報告している。バークブロックの内部結合力が文献値よりも低い理由は、既往の研究では熱硬化型接着剤を用いて熱圧成形していること、密度が高いことなどによる。また、バークを原料としたボードの強度を比較する場合には、内樹皮と外樹皮の混合比率、細化の程度と篩い分けによるダストの分離の有無などが値に大きく影響することを考慮する必要がある。本研究で製造したバークブロックでは、原料を無駄なく利用することを目的として前処理段階での加工度を低く押さえてあることも、内部結合力が低く現れた理由の一つであろう。しかしながら、内部結合力の絶対値は低いものの、RC4%程度で一定の強度を発現し、成形物として利用可能であることが示された。また、RCの上昇とともにIBは増加する傾向を示し、特に16%以上で著しい増加傾向を示した。

次に、MORおよびMOEとRCの関係をFig. 3に示した。RCが10%の条件下では、MORが約1.5MPa、MOEが100MPa程度の値を有することが示された。市販の木質ボード類¹⁷⁾と比較すると一桁以上の違いがある。これらの値そのものは他の材料と比較して小さいが、RCの増加とともに曲げ性能が向上する様子が分かる。バークを原料とした成形物の研究事例は木質ボードのそれと比較すると極めて少ないため、製造条件を説明変数としての強度予測が開発段階では必要となる。Rishelら¹⁰⁾はバークボードの曲げ性能(MOR, MOE)とボード密度およびボード厚さとの間に直線関係があることを報告している。Bartolomucciら⁹⁾はエポキシ樹脂を含浸したバークボードの曲げ性能を線形回帰による予測を試みている。Fig. 3に示したバークブロックのRCと曲げ性能の関係も概ね直線関係が認められる。以下に、RC4%～20%の間における直線回帰の結果を示す。

$$\text{MOR} = 0.125\text{RC} + 0.013 \quad R^2 = 0.97$$

$$\text{MOE} = 8.30\text{RC} + 24.2 \quad R^2 = 0.95$$

3・3 圧縮特性

バークブロックは公園の舗装平板や休憩所の床などへの利用可能性が検討されており、一部、試験的に施工されている。この様な利用方法では、歩行感などに関連して圧縮特性が重要視される。Fig. 4に標準的なバークブロックの応力-変形曲線を示した。確立した評価方法がないため、応力-変形曲線の特徴を数値化することで、製造条件との関係を評価した。8MPaまで負荷した後に除荷し、残留変形量(Ds)を求めた。初期の剛性k1を曲線の初期勾配から求めた。この値はバークブロックの圧縮ヤング率に相当する。負荷を継続すると変形量が

Fig. 3. Effect of resin content on the bending properties.

Fig. 5. Effect of resin content on the compressive stiffness.

k1 : initial value, k2 : minimum value, and k3 : at stress of 4MPa.

Fig. 4. Compressive behavior of the bark-block.

5mmを超えた付近から、剛性がやや低下する傾向を示すため、曲線から剛性の最小値 k_2 を求めた。また、4MPa 負荷時の勾配から求めた剛性を k_3 とし、10mm 変形時の応力 S_{10} を求めることで、圧縮挙動の特徴を把握することにつとめた。

Fig. 5 に圧縮変形曲線から求めた3種類の剛性値を示す。これらの値は、圧縮負荷試験の各状態における弾性係数に相当する。初期の勾配から求めた k_1 は IB と類似した傾向を示した。これは、両者がともにブロックの面に対して垂直方向の物性を評価していることが共通点となっているためであろう。勾配の最小値から求めた k_2 は RC とともに上昇したが、いずれの RC においても k_1 の概ね半分程度となっている。また、10mm 変形時の応力 S_{10} は、RC = 4% では 0.9MPa であったのが RC = 20% では 2.4MPa へと増加した。その傾向は k_1 もしくは k_2 と類似したものであった。また、変形量 10mm 程度ところに勾配の最小値が現れた。 k_3 は RC が高くなるとやや低下する傾向が認められた。4MPa 負荷時には圧縮変形が 20mm 程度進行しているため、密度 $0.4\text{g}/\text{cm}^3$ 程度の試験体が $0.6\text{g}/\text{cm}^3$ 程度まで圧縮されていることになる。そのため、この条件下ではバインダー量の多寡に依らず、

圧縮変形されたパークマットに共通する値が得られたものと考えられる。また、除荷後の残留変形量 D_s は 20 ~ 25mm 程度となり、RC の高い方がやや小さくなる傾向は示したが、大きな差異は認められなかった。

舗装平板として利用される場合、歩行時の変形量が話題となる。ここで、人の体重を 80kg、靴裏の面積を 200cm^2 程度と仮定すると、平板面にかかる応力は 0.04MPa 程度またはそれ以下であり、初期剛性の範囲内にあることになる。初期剛性から計算すると通常の人の歩行による変形量は 0.5mm 以下と推定される。

3・4 蒸気噴射時間の影響

本研究で用いた接着剤はチップモールド加工用に市販されている湿気硬化型のウレタン系プレポリマーであり、蒸気加熱処理により硬化する特徴を有している。しかしながら、パークのような素材に利用する際の情報が少ないため、蒸気加熱処理時間の影響を実験的に検証した。結果を Fig. 6 に示した。IB、 k_1 、MOR、MOE はいずれも類似した傾向を示した。すなわち、噴射時間 0.5 ~ 1 分では十分な強度は発現しないが、2 分の噴射により硬化が促進され、それ以上噴射時間を延ばしても強度の向上は望めないことが示された。このことは、2 分の噴射でほぼ硬化が完了しているためと考えることができる。この結果から、本装置を用いたパークブロックの実生産には、安全側に余裕をみて 3 分程度の蒸気噴射時間が適当と判断した。

3・5 養生時間の影響

蒸気噴射後、硬化を促進させるために養生時間が必要か否かを検討した。ここでは、蒸気噴射を停止後直に取り出した場合を養生時間 0 分とした。5 分間および 10 分間の養生時間の有無と物性との関係を Fig. 7 に示した。IB については、常態の値も、吸水処理を施し乾燥後に試験した場合も、10 分後の平均値は 0 分、5 分の値よりもやや大きな値を示した。しかしながら、初期の剛性を示す k_1 、曲げ試験から得られた MOR、MOE とともに養

Fig. 6. Effect of steaming time on the mechanical properties of the bark-block. A) IB, B) compressive stiffness, C) MOR, D) MOE.

Fig. 7. Effect of curing time on the mechanical properties of the bark-block. A) IB, B) compressive stiffness, C) MOR, D) MOE.

生時間の影響を受けていないことが分かる。これらの、結果より蒸気噴射停止後の養生時間は不要であると判断することができる。

3・6 厚さの影響

厚さ 20mm から 90mm の間で 6 水準を設定して厚さと材質の関係を検討した結果、最も薄い 20mm の成形物は強度的にやや優れた結果を示したが、他は大きな差は認められなかった。一般に、熱圧成形される木質材料においては厚さは物性を左右する重要な因子となるが、パークブロックでは、湿気硬化型のレジンを使用しており蒸気処理が適切に行われれば均一な内部の硬化が得られるため、厚さの影響は現れないと考えることができる。このことは、板状の成形物にとどまらず、立方体や直方体などの形状の成形物の製造可能性を示唆するものである。

3・7 耐久性能評価

常温水の吸水処理後の TS を Fig. 8 に示した。熱圧成形された木質ボード類では接着剤添加率の増加により TS は著しく低下するが、パークブロックでは大きな差は認められなかった。蒸気噴射時間や養生時間の影響も顕著ではない。また、吸水処理による WA は 100% 程度あるものの、TS の値そのものも 5% ～ 10% の間にあり、それほど大きな値を示していない。これは、原料エレメントが強い圧壊を受けていない点が木質ボード類などの違いとなっているものと思われる。

また、70℃の温水処理後の TS は 6% 程度、煮沸処理後では 8% 程度を示した。処理による WA はそれぞれ 180%, 200% 程度であった。このことは、温水処理や煮沸処理によりパークブロックが崩壊するようなことはなく、一定の形状を保ちうることを示すものである。

パークブロックの耐久性能については、材料としては耐久性が高い方が良いとする見方と、必ずしも高い耐久性は必要としないとの二通りの考え方がある。前者は材料開発の一般的な思想である。後者は、接着剤の使用量を可能な限り少なくすることで、パークブロックとして一定の期間使用した後は、林地などに帰そうという発想である。舗装平板として、あるいは家庭菜園や園芸用途に一定期間用いた後に、ほぐして土壌に戻すことを念頭に置いて耐久性を設計しようとするものである。製造因子と機械的な性質が明らかになったが、引き続き耐久性について検討する必要がある。

4 結 論

パークの有効利用を目的として、パークブロックの製造条件の最適値、製造条件が材質に及ぼす影響について検討し、以下の結論を得た。

(1) 各種物性におよぼす RC の影響を評価した。RC4% 程度で十分成形が可能であること、RC を変えることで必要に応じた物性の調節が可能であることが明らかとなった。

(2) 蒸気噴射時間の効果は 2 分以上で飽和する傾向を示したことから、本製造システムでは、3 分が最適値と

Fig. 8. Effect of manufacturing parameter on thickness swelling of the bark-block. ST : steaming time, CT : curing time

判断した。また、養生時間の影響が見られないことから、必要ないものと判断した。

(3) 圧縮負荷に対する変形挙動の特徴を明らかにした。また、人の歩行による変形は微少であることが確認できた。

(4) WA の高さの割に TS が小さいことが明らかとなった。

本研究の遂行にあたり下記の皆様のご協力とご助言を得た。ここに記して謝意を表するものである。(株)大村工業大村正樹氏、(株)新東海フェルト白井博之氏、静岡県引佐町森林組合前島春光氏、静岡大学農学部木質科学講座の諸氏。

参 考 文 献

- 1) 西村勝美, “日本木材学会第6期研究分科会報告書”, p.V20 (1999) 日本木材学会.
- 2) 日本材料学会木質材料部門委員会, “木材工学辞典”, p.252 (1982) 工業出版.
- 3) 田近克司, “木材の科学と利用技術 IV”, p.II-39 (1996) 日本木材学会.
- 4) Y. Nakashima, J.-J. Ge and K. Sakai, Mokuzai Gakkaishi, **42**, 1105 (1996).
- 5) 高橋利男, 穴沢 忠, 北沢政幸, 波岡保夫, 北林産試月報, **281**, 1 (1975).
- 6) S. Suzuki, F. Saito and M. Yamada, Mokuzai Gakkaishi, **40**, 287 (1994).
- 7) T. M. Maloney, Forest Prod. J., **23**, 30 (1973).
- 8) 斉藤藤市, 池田正行, 福井栄一, 木材学会誌, **25**, 476 (1979).
- 9) J. R. Bartolomucci, G. R. Moore, P. R. Blankenhorn, D. E. Kline and L. E. Rishel, Wood and Fiber Sci., **16**, 2 (1984).
- 10) L. E. Rishel, P. R. Blankenhorn and W. K. Murphey, Wood and Fiber, **11**, 233 (1980).
- 11) 川村恵洋, 継田視明, 屋代 真, 渡辺裕二, 木材工業, **31**, 544 (1976).
- 12) E. J. Biblis and G. J. Coleman, Forest Ind., **102**, 72 (1975).
- 13) S. Chow, Forest Prod. J., **25**, 32 (1975).
- 14) A. B. Anderson, A. Wong and K.-T. Wu, Forest Prod. J., **24**, 51 (1974).
- 15) H. Yamauchi, O. R. Plido, L. F. Ma, I. Miura and H. Sasaki, Hols als Roh-und Werkstoff, **57**, 150 (1999).
- 16) 田村靖夫編, “スギ樹皮ボードに関する実証化試験事業報告書”, p.10 (2001) 秋田県木材加工推進機構.
- 17) 鈴木正治, 徳田迪夫編, “木材科学講座 8, 木質資源材料” p.159 (1999) 海青社.