令和4年度林野庁補助事業 大径化した原木等を活かした地域材による 設計合理化の技術開発・普及啓発事業

原木の強度選別を導入した大径材の効率的加工技術の開発

報告書

令和5年3月

国立研究開発法人 森林研究・整備機構

茨城県産材普及促進協議会

はじめに

国内では、人工林の高齢級化によりスギをはじめとする大径材の供給が増加しているもの のその需要は少なく、長引く国産材丸太価格の低迷に大径材利用の課題が加わり、伐期に達 した人工林の伐採が進まず、あるいは伐採しても再造林のコストが捻出できないという事態 が生じている。国産材資源の循環利用を進め林業の生長産業化を図るためには、大径材の利 用促進を図ることが不可欠である。

大径材の利用技術開発に関しては、国立研究開発法人 森林研究・整備機構ではこれまで に、大径材から生産される大断面の製材品を国産材の利用割合の少ない梁・桁用材や枠組壁 工法用部材として利活用するために、丸太段階で製材品の強度性能を予測する技術を開発し た。しかし、大径材の利用においては、製材に手間がかかる、大断面の製材品は乾燥が困難 といった加工面での課題を解決する必要がある。

そこで、当機構では今年度、茨城県産材普及促進協議会と共同し、林野庁補助事業 「大径化した原木等を活かした地域材による設計合理化の技術開発・普及啓発事業」を実施し た。本事業では、スギ大径材から得られる大断面の製材品、特に心去り角製材品を対象と し、要求される強度性能を有する製材品を効率的に生産するための加工技術の開発に取り組 んだ。

本事業の実施にあたり、ご指導をいただいた検討委員会の委員各位、また、試験実施にご協力をいただいた木材事業体等の関係各位に厚く御礼申し上げる。

事業実施事業体 代表機関 国立研究開発法人 森林研究・整備機構

目 次

第1章	事業の概要
1.	事業の目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
2.	検討委員会・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
3.	事業の実施経過・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
第2章	大径材の効率的製材・乾燥技術の開発
1.	心去り平角の製材・乾燥試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
2.	心去り正角の製材・乾燥試試験・・・・・・・・・・・・・・・・ 8
第3章	心去り角製材品の乾燥過程モニタリング技術の開
1.	目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
2.	試験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
3.	結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13
4.	まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
第4章	心去り正角をラミナとする接着重ね材の製造
1.	はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 23
2.	製造工程・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24
3.	試験体の抽出と構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
4.	製材の測定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27
5.	構造性能試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 40
6.	試験検証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
7.	まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 77
第5章	大径材製材の方向性と課題
1.	大径材製材の方向性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 78
2.	大径材製材の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 79

第1章 事業の概要

1. 事業の目的

戦後造成されたスギをはじめとする人工林が成熟し大径材の供給が増加しているが、大径材は その有効な用途と加工方法が確立しておらず、需要が少なく価格が低迷しているのが実情であ る。国産材資源の循環利用を進め林業の生長産業化を図るためには、大径材の利用促進を図るこ とが不可欠である。

大径材の利用技術開発に関しては、森林研究・整備機構ではこれまでに、大径材から生産され る大断面の製材品を国産材の利用割合の少ない梁・桁用材や枠組壁工法用部材として利活用する ために、丸太段階で製材品の強度性能を予測する技術を開発した。しかし、大径材の利用におい ては、製材に手間がかかる、大断面の製材品は乾燥が困難といった加工面での課題を解決する必 要がある。

本事業では、スギ大径材から得られる大断面の製材品、特に心去り角製材品を対象とし、茨城 県内の素材生産、製材、乾燥の各事業体と連携して製材・乾燥試験を行い、製材品の強度予測技 術の実証を行うとともに、大径材の製材・乾燥時の技術的な課題の解決策を検討する。また、大 断面製材品の効率的乾燥技術開発については、乾燥過程で発生する製材品の割れを適切に評価し 乾燥スケジュールに反映させるためのモニタリング技術の開発にも取り組む。さらに、大径材の 用途拡大に向けた基礎資料とするため、スギ大径材から得られる心去り角製材品を用いた接着重 ね材の製造試験を行う。

これらの成果を広く公表することにより、大径材の利用促進に貢献することを目的とする。

2. 検討委員会

2.1 委員名簿

委員長	立花 敏	筑波大学生命環境系	准教授
委員	川野 和彦	茨城県森林組合連合会	代表理事会長
委員	野上 満正	茨城県木材協同組合連合会	理事長
委員	細田 浩司	茨城県林業技術センター	センター長
オブザーバー	熊谷 有理	林野庁木材産業課 住宅資材班	課長補佐
オブザーバー	伊豫田 望	林野庁木材産業課 生産加工班	課長補佐
オブザーバー	原田 憲佑	林野庁木材産業課 住宅資材班	係長
オブザーバー	三林 丈志	林野庁木材産業課 生産加工班	係長
オブザーバー	松﨑 広夢	林野庁木材産業課 住宅資材班	係員
オブザーバー	仲野 繁	茨城県農林水産部林政課	課長補佐
オブザーバー	國廣 靖志	茨城県農林水産部林政課	係長
事務局	伊神 裕司	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 木材加工・特性研究領域	領域長
事務局	山下 香菜	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 木材加工・特性研究領域	チーム長
事務局	藤本 清彦	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 木材加工・特性研究領域	室長
事務局	井道 裕史	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 構造利用・研究領域	室長
事務局	松田 陽介	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 木材加工・特性研究領域	研究員
事務局	村野 朋哉	国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 木材加工・特性研究領域	研究員
事務局	中村 公子	茨城県産材普及促進協議会	会長
事務局	東山 由佳	茨城県産材普及促進協議会	

2.2 検討委員会の開催

○第1回検討委員会

- 日 時:令和4年7月26日(火) 10:10~11:45
- 場 所:森林総合研究所 第2会議室およびweb (Microsoft teams利用)
- 内容:事業背景の説明
 事業の実施内容の検討

○第2回検討委員会

- 日 時:令和5年2月10日(金) 10:00~11:30
- 場 所:森林総合研究所 第1会議室およびweb (Microsoft teams利用)
- 内 容:事業の実施結果の検討 成果報告会等の今後の予定の確認

3. 事業の実施経過

詳細は、次章以降で述べる。

○心去り平角の製材・乾燥試験

令和4年8月上旬	原木の測定・評価 実施場所:美和木材協同組合
8月中旬	製材試験 実施場所:皆川製材所
8月下旬~9月中旬	乾燥試験および仕上げ、製材品の測定
	実施場所:八溝多賀木材乾燥協同組合

○心去り正角の製材・乾燥試験

令和4年10月上旬	原木の測定・評価 実施場所:美和木材協同組合
10月中旬	製材試験 実施場所:皆川製材所
10月中旬~11月上旬	乾燥試験および仕上げ、製材品の測定
	実施場所:八溝多賀木材乾燥協同組合

○心去り角製材品の乾燥過程モニタリング試験

令和4年9月~令和5年2月 実施場所:森林総合研究所

○接着重ね材の製造試験

令和4年12月初旬~12月中旬	ラミナの品質評価	
12月中旬~12月下旬	接着重ね材の製造試験	実施場所:WOOD BP関東
令和5年1月初旬~2月初旬	接着重ね材の強度試験	実施場所:ものつくり大学

第2章 大径材の効率的製材・乾燥技術の開発

1. 心去り平角の製材・乾燥試験

1.1 原木の測定·評価

美和木材協同組合土場(茨城県常陸大宮市)において、スギ大径材(末口径38~44cm、4m) 40本の諸元および動的ヤング係数測定を行った(写真2.1)。原木のヤング係数の測定結果は、最 小5.8GPa、最大10.6GPa、平均7.9GPaであった。ヤング係数は比較的高い値であり、これは年輪 幅が狭い樹齢が80~100年生の原木が主体であったことが主な原因と考えられる。



写真2.1 原木のヤング係数測定の様子

1.2 製材試験

(有)皆川製材所(茨城県常陸太田市)において、心去り平 角を2丁採材する木取りを適用して、送材車付き帯鋸盤を 用いてスギ大径材40本の製材試験を行った。図2.1に心去 り平角の木取りを示す。大径材から心去り平角を生産する 場合、成長応力が解放されることにより製材品に大きな反 りが発生することが課題となっているが、これまでの研究 結果から、後で製材する平角Bの反りが先に製材する平角 Aの反りよりも小さくなることがわかっている。そこで、 平角Aは、一旦厚さ160mm×幅225mmの断面寸法で製材して から修正挽きを行って乾燥前の粗挽き寸法厚さ135mm×幅 225mmで製材し、平角Bは修正挽きを行わず乾燥前の粗挽 き寸法の厚さ135mm×幅225mmで製材した。



図2.1 心去り平角の木取り 図中の数字は鋸断順を示す。

心去り平角の厚さ方向の反りの矢高の値は、

平角A 製材直後 :最小6mm、最大18mm、平均11.4mm修正挽き後:最小1mm、最大3mm、平均1.9mm

平角B 製材直後 :最小1mm、最大5mm、平均2.3mm

であった。製材試験の結果から、後に製材する平角Bでは先に製材する平角Aと比較して反

りが大幅に小さくなることを確認できた。

また、平角の丸太からの採材位置を記録するとともに、ビデオカメラで製材試験の様子(写真 2.2)を撮影し作業時間の測定を行った。





写真2.2 心去り平角の製材の様子

1.3 乾燥試験

八溝多賀木材乾燥協同組合(茨城県常陸大宮市)に おいて、心去り平角80本の乾燥試験を行った。

表2.1に乾燥スケジュール(高温低湿+中温)を示す。 乾燥期間は約10日間である。乾燥後の厚さ方向の収縮 量、幅方向の収縮量および反りの平均値は、平角Aが 3.6mm、4.6mmおよび2.9mm、平角Bが3.3mm、4.3mmおよ び2.8mmであった。乾燥後に同組合でモルダ掛け仕上げ を行った結果、すべての製材品で削り残し等の仕上げ 不良は見られなかった。このことから、乾燥前の粗挽 き寸法が適切であったこと、後に製材する平角Bでは 修正挽きを行わずに乾燥前の粗挽き寸法に製材可能で あることが示された。

所要時間 (時間)	乾球温度 (℃)	湿球温度 (℃)
1.5	60	60
3.5	95	95
10	97	97
8	120	90
12	120	93
14	110	85
26	103	78
170	90	65

表2.1 心去り平角の乾燥スケジュール

1.4 製材品のヤング係数の推定

乾燥・モルダ掛け仕上げを行った心去り平角について、動的ヤング係数の測定を行った。これ に対し、製材試験において測定した採材位置と、原木ヤング係数の測定値から、下式¹⁾を用い て、心去り平角のヤング係数を推定した。

(製材品のヤング係数) =
$$\begin{array}{l} 0.051 \times (r - 89.2 + \frac{89.2^3}{3R^2}) + (丸太のヤング係数) \quad (r < 89.2) \\ 0.051 \times \frac{89.2^3}{3R^2} + (丸太のヤング係数) \quad (r ≥ 89.2) \end{array}$$

心去り平角のヤング係数の推定値と実測値との関係について、表2.2に示す。全ての心去り平 角のヤング係数の実測値は、推定値と同等あるいは推定値を上回る結果となった。要求性能を満 たす製材品を効率的に生産するため、原木の段階で製材品のヤング係数を推定する手法の有効性 を確認できた。

推守店	実測値					
推進	E70	E90	E110	E130		
E70	11	5				
E90		24	22	4		
E110			7	5		
E130				2		

表2.2 心去り平角のヤング係数の推定値と実測値との関係

1.5 製材コスト試算

1.5.1 歩止りと製材時間の算出

心去り平角の生産コストの試算においては、まず、製材試験を行った製材工場におけるスギ大 径材製材の実態をふまえて標準木取りを設定し、標準木取りに基づき製材歩止りを算出した。図 2.2に生産コストの試算に用いた標準木取りを示す。製材工場ではこれまで、心去り平角の2丁取 りを行う場合には図2.3(a)に示すように平角A, Bともに一旦断面寸法160×225mmで製材し、平 角A, Bともに修正挽きを行っていた。これに対し、本事業における試験結果から、平角Bは修 正挽きを行う必要が無く断面寸法135×225mmでの製材が可能であることを確認できたことから、 図2.3(b)に示す改良型の木取りを設定した。仕上げ寸法から計算した製材歩止りは、従来型の木 取り(a)が49.5%、改良型の木取り(b)が52.3%となった。



図2.2 製材コスト試算に用いた標準木取り

次に、作業時間測定の結果に基づき原木1本当たりの製材時 間を算出した。まず、原木1本分の製材作業を図2.3に示すよう にいくつかの要素に分割し、それぞれの要素の作業時間の平均 値を求めた。続いて、標準木取りに基づいて各要素の作業時間 を積算した。また、心去り平角1本当たりの修正挽きに要した作 業時間の平均値は108.5秒であった。これにより、木取り(a)お よび(b)の原木1本当たりの製材時間は、それぞれ698.3秒および 623.4秒となった。木取り(b)の製材時間は、木取り(a)と比較し て、板を1枚多く製材する分がプラス、後から製材する平角の修 正挽きを行わない分がマイナスとなる。



図2.3 大径材の製材作業の流れ

1.5.2 モデル工場の設定とコスト試算

心去り平角の製材コストを試算するために設定したモデル工場の製材工程を図2.4に模式的に 示す。また、表2.3に示した数値と前述の原木1本当たりの作業時間を用いて試算した結果、モデ ル工場の年間原木消費量および心去り平角の粗挽き未乾燥製材品の製材コストは、木取り(a)の 場合で5,674 m³および40,870 円/m³、木取り(b)の場合で6,356 m³および35,050 円/m³と算出さ れた。ここで、心去り平角の粗挽き未乾燥寸法から仕上げ寸法に至る歩止りは83%であり、仕上 げ寸法に換算した製材コストは、木取り(a)の場合で49,240 円/m³、木取り(b)の場合で42,230 円/m³と算出された。これに乾燥コスト、プレーナ掛け等の加工仕上げコスト、輸送コスト等を 加えたものがスギ心去り平角乾燥材のおおよその供給価格となる。

本事業の結果から、心去り平角の製材において適切な粗挽き寸法を設定することによって、製材コストを大幅に削減できることがわかった。



図2.4 モデル工場の製材工程

項目	数値
年間稼働日数(日)	240
1日当実働時間(時間/日)	6.5
原木価格(円/m ³)	13,000
平割製品販売価格(円/m ³)	40,000
板製品販売価格(円/m ³)	20,000
チップ販売価格(円/dry-t)	12,000
おが粉販売価格(円/m ³)	1,000

表2.3 製材コストの試算に用いた数値

2. 心去り正角の製材・乾燥試験

2.1 原木の測定·評価

心去り平角の場合と同様に、美和木材協同組合土場において、スギ大径材(末口径38~44cm、 4m)40本の諸元および動的ヤング係数測定を行った。原木のヤング係数の測定結果は、最小 4.2GPa、最大7.4GPa、平均6.0GPaであった。供試した原木の樹齢は50~60年生が主体であり、ヤ ング係数は心去り平角の製材試験に用いた原木と比較して全体的に低い値であった。

2.2 製材試験

(有)皆川製材所において、心去り正角を2丁,3丁,4丁採材する木取りをそれぞれ原木20本, 10本,10本に適用して、送材車付き帯鋸盤を用いてスギ大径材40本の製材試験を行った。図2.5 に心去り正角の木取りを示す。心去り平角の場合には、主として図2.2中の水平方向に反りが発 生するが、心去り正角では多くの場合に図2.5中の鉛直方向および水平方向の両方に反りが発生 する。そこで、3丁取りの正角A,B,C、4丁取りの正角A,B,C,Dについては、一旦断面 寸法160mm×160mmで製材してから修正挽きを行って乾燥前の粗挽き寸法135mm×135mmとした。一 方、心去り平角と同様の木取りとなる2丁取りについては、正角Aは一旦断面寸法135mm×160mm で製材してから修正挽きを行って乾燥前の粗挽き寸法135mm×135mmとし、正角Bは修正挽きを行 わず乾燥前の粗挽き寸法135mm×135mmで製材した。



図2.5 心去り正角の木取り 図中の数字は鋸断順を示す。

図2.6に、3丁取りおよび4丁取りの心去り正角について、製材直後(断面寸法160×160mm)の鉛 直方法および水平報告の反りの矢高の大きさを示す。3丁取りの正角C、4丁取りのC, Dでは水 平方向にも大きな反りが発生していた。これは、図2.5の3丁取りおよび4丁取りで鋸断4を行った 際に得られる、これらの心去り正角を含む半製品がすでに木表側に大きく反っていることが主な 原因である。



図2.6 心去り正角の製材直後の反り

2.3 乾燥試験

八溝多賀木材乾燥協同組合において、心去り正角110本の乾燥試験を行った。

表2.4に乾燥スケジュール(高温低湿+中温)を示す。乾燥期間は約8.5日間である。図2.5中の 鉛直方向および水平方向の収縮量を、表2.5に示す。木材の乾燥に伴う収縮量は、軸方向、半径 方向、接線方向の中では接線方向が最大になるが、製材品の接線方向となる、2丁取りの正角A およびBの水平方向、3丁取りの正角Cの鉛直方向で5mm以上となり、大きな値となった。

所要時間 (時間)	乾球温度 (℃)	湿球温度 (℃)
1.5	60	60
3.5	95	95
8	97	97
8	120	90
10	120	93
12	110	85
20	103	78
142	90	65

表2.4 心去り正角の乾燥スケジュール

表2.5 心去り正角の乾燥後の収縮量

反りの	2丁	T取り 3T取り		4丁取り					
方向	А	В	А	В	с	А	В	с	D
鉛直方向	3.4	3.8	3.5	3.5	5.3	3.4	3.5	3.7	4.3
水平方向	5.7	5.7	4. 9	4. 5	3. 7	4. 1	4.0	3.8	3.9

(mm)

2. 4 製材品のヤング係数の推定

乾燥・モルダ掛け仕上げを行った心去り正角について、動的ヤング係数の測定を行った。これ に対し、製材試験において測定した採材位置と、原木ヤング係数の測定値から、心去り平角のヤ ング係数を推定した。心去り平角のヤング係数の推定値と実測値との関係について、表2.6に示 す。全ての心去り正角のヤング係数の実測値は、推定値と同等あるいは推定値を上回る結果とな った。

堆空店	実測値					
推進	E50	E70	E90	E110		
E50	27	2				
E70		35	45			
E90						
E110						

表2.6 心去り正角のヤング係数の推定値と実測値との関係

10

引用文献

1) 森林総合研究所:第4期中長期計画成果35 (2021)

第3章 心去り角製材品の乾燥過程モニタリング技術の開発

1. 目的

木材の乾燥過程で生じる乾燥割れは製材品の品質を低下させるため、割れが少ない乾燥技術の 開発が求められる。心去り材と心持ち材では乾燥割れが発生する傾向が異なるため、同一の方法 で乾燥することは難しい。例えば、心去り平角を心持ち平角の乾燥で用いられるスケジュールで 乾燥させると断面に顕著な内部割れが発生し、大きな強度低下が生じることが報告されている¹⁾。 一方で、心去り材は心持ち材に比べて実験データの蓄積が少なく、乾燥スケジュールは確立され ていない。心去り角製材品の利用拡大に向けては、乾燥時間が短く効率的かつ乾燥割れの発生が 少ない乾燥技術の開発が求められる。

乾燥過程における乾燥割れの発生を直接検出することができれば、心去り角製品の効率的な乾 燥スケジュールの開発や乾燥操作の自動制御につながる。乾燥割れの検出方法の代表的な例とし て、物体が破壊した時に生じる振動であるAE(Acoustic Emission)を用いた方法がある。AE法は 1980年~2000年頃にかけて精力的に木材乾燥への適用が検討されてきた。しかし、AE法を木材乾 燥に適用するには、高含水率の木材中ではAEが大きく減衰してしまうなどの問題があり実用化に は至っていない²⁾。一方で、近年は深層学習をはじめとした機械学習の進展によって、振動波形の ような高次元のデータの解析・利用が可能になってきた。これによりAEのような振動波形を用い た機械の故障検知や予防技術が大きく進展している³⁾。これらの知見を木材乾燥にも応用すること で、実用的な乾燥割れ発生のモニタリング技術に繋がる可能性がある。

本研究では、AE法を用いた乾燥割れ発生のモニタリング技術の開発を目的として、減衰の比較 的小さい低周波のAEを特に対象として、AE波形データの収集および乾燥過程に検出されたAE波形 の特徴の解析を行った。

2. 試験方法

2.1 供試材料

試験には寸法が4000×210×135 mmのスギ心去り平角生材1本を用いた。生材時の含水率と密度 は52%と421 kg/m³であった。平角からエンドマッチして長さ400 mmの試験材を9体切り出し、両 木口をシリコンシーラント(セメダイン株式会社、SR-066)でシーリングした。試験材は乾燥試 験開始までラップで包み冷蔵庫内で保管した。

2.2 AEデータ収集装置

試験材の木表面中央部に平刃に加工したシージング釘(太さ11 mm×長さ38 mm、ユニクロメッ キ)を深さ10 mm打ち込んだ(図3.1)。なおこのとき、刃が割れの起点にならないようにするた めに刃の方向は木目と直角になるようにした。釘の頭に耐熱性の瞬間接着剤(東亞合成株式会 社、アロンアルファエクストラ4020)を用いて耐熱防水性のAEセンサ(株式会社エヌエフ回路設 計ブロック、AE-900H-200-WP、ケーブル長5m)を取り付け、瞬間接着剤が固着した後に治具で固 定した。

AEデータ収集装置の全体図を図3.2に示した。AEセンサによって検出された波形はプリアンプ (株式会社エヌエフ回路設計ブロック、AE-912)を通ってディスクリミネータ(株式会社エヌエ フ回路設計ブロック、AE9922)に送られる。検出波形はプリアンプで40dB、ディスクリミネ ータで40dB、計80dB増幅され、100kHzのローパスフィルタ処理が行われる。ディスクリミネータ からアナログ出力された検出波形はA/Dコンバータ(株式会社タートル工業、TUSB-0224DM)によ ってデジタルデータに変換され最終的にノートパソコンに集積される。波形データの収集にはサ ウンドレコード用のソフトウェア(株式会社タートル工業、WaveRec24)を用いた。なおレコード 時の入力電圧レンジは±1V、サンプリングレートは44.1kHzとし、最長9時間連続してデータの取 り込みを行った。また、検出波形とは別に、ディスクリミネータによってしきい値を超えた時間 だけパルス波を出力し、パルスカウンタ(株式会社タートル工業、TUSB-S03CN3BZ)によってパル ス波をカウントすることでAE発生数を計測した。なお、しきい値の電圧は0.5Vとし記録は 1分ごとの積算値とした。

2.3 乾燥試験

AEセンサを取り付けた試験材を恒温恒湿槽(エスペック株式会社、PR-2J)内に静置し、重量を 測定した後に乾燥試験を行った(図3.3)。乾燥スケジュールは表3.1に示す4種類の条件とした。 スケジュール1は乾球温度95℃の初期蒸煮を行った後、乾球温度90℃、相対湿度35%RHで乾燥する スケジュールである。スケジュール2およびスケジュール3はスケジュール1の蒸煮時間をそれぞれ 24時間と0時間に変更したものである。スケジュール4は95℃で6hの初期蒸煮を行った後、乾球温 度120℃で乾燥させた。装置の都合上、100℃以上の雰囲気下で湿度制御ができなかったため、湿 度については不明であった。また、スケジュール3および4では、大きな表面割れが発生してAE センサが外れてしまった場合はその時点で乾燥を打ち切った。

乾燥試験終了後、AEセンサを取り外して重量を測定し、試験材の木表面の写真を撮影した。その後、材中央部から厚さ15 mmの試験片を切り出してスキャナーにより横断面の画像を取得した。 試験片は全乾法にて含水率を測定した。

3. 結果

3.1 乾燥割れの発生状況

各乾燥スケジュールにおける乾燥後の表面割れの発生状況を図3.4に示した。図3.4-a,dを除い ていずれのスケジュールについても表面割れが見られた。特にスケジュール3およびスケジュール 4の試験材は大きな表面割れが発生し、それによって乾燥試験の途中で釘が完全に抜けてしまっ た。各乾燥スケジュールにおける乾燥後の内部割れの発生状況を図3.5に示した。今回の試験では 全ての材について内部割れの発生は認められなかった。

以上のことから、本試験において収集されたAEは全て表面割れの発生に関係するものと考えら れた。以降の節で割れは全て表面割れとして扱う。

3.2 AE発生頻度

各乾燥スケジュールにおけるAE発生頻度の時間経過を図3.6に示した。AE発生頻度の時間経過 は一様ではなく、同一のスケジュールにおいても傾向は大きく異なった。図3.6-a,dのように乾 燥終了後に割れが見られなかった試験材でも1分間で60を超えるAEイベントの発生があった一方 で、図3.6-e,fのように大きな割れが発生した試験材でもAE発生頻度は小さかった。このように AE発生頻度と割れの関係は明確ではなかった。

3.3 検出波形の特徴

AEイベントの発生が見られた時間帯で特徴的な波形を抜粋したものを図3.7に示した。 蒸煮過程では不規則な信号が検出され、乾燥過程では時間に伴って減衰する波が検出された。 これらの波形について、解析ソフト(NCHソフトウェア、WavePad)を用いて時間周波数解析を行った(図3.8)。時間周波数解析の結果は横軸が時間経過を、縦軸が周波数(対数軸)を示し、 色が明るいほどその時点おける周波数成分が強いことを示す。図3.8-(i),(iv),(v)のように、 蒸煮過程では時間の経過によらずほとんど一定の周波数分布が見られた。心持ち正角では蒸煮に よる成長応力の解放によって髄付近が割れることが知られているが⁴⁾、心去り平角では成長応力の 解放に伴う割れが発生する可能性は小さいと考えられる。このことから蒸煮過程に計測されたAE イベントは、本試験のサンプリングレートである44.1kHz以上の周波数帯域のAEか、もしくは周囲 環境のノイズに起因するものと推察された。いずれにしろ巨視的な割れの発生には関係ないと考 えられる。一方で、図3.8-(ii),(iii),(iv)のように乾燥過程に見られた特徴的な波形について は明確な周波数分布の時間変化が確認された。このような波形が見られた時間帯でも、 図3.7-(ii)のように必ずしもAE発生頻度が大きいわけではなかった。

今回の試験で観察されたAEの持続時間は0.1秒以下であった。AEの種類は突発型と連続型の大き く2つに分けられるが⁵⁾、今回の試験で観察されたものは全て突発型であった。また、周波数分析 の結果から、100Hz~10kHzの低周波音が多く含まれていることが分かった。川元は、円盤材の乾 燥過程におけるAEを測定した結果、巨視的な割れの発生時に低周波のAEが多く観察されたことを 報告している⁶⁾。本研究においても、乾燥割れの発生に関係すると考えられる低周波のAEが観察さ れた。低周波帯域は装置のファンの音など周囲環境に起因するノイズの帯域と被るが、時間周波 数分析を行うことでノイズの影響を受けずに低周波のAEの検出が可能であると考えられた。

含水率100%以上の高含水率の木材は、気乾材に比べて減衰が10dB(3倍)程度大きくなるため⁷⁾、 1つのセンサでAEを拾える範囲が限られてしまうことがAE法を木材乾燥に適用する上での大きな 課題であった。比較的減衰の小さい10kHz以下の低周波のAEによって割れの検出ができれば課題の 解決に繋がる可能性がある。例えば木材よりも減衰の大きな材料であるコンクリートでは、10kHz のAEが1m伝播するとき1/2程度に減衰すると考えられている^{2.3.8)}。これを踏まえると、低周波のAE を対象とすることで長さ4mの実大の梁材の乾燥過程においても少数のセンサで割れの発生のモニ タリングができる可能性がある。今後さらに検討を進めることで、実大の乾燥機内において適用 可能か明らかにする必要がある。

14

4. まとめ

スギ心去り平角を4種類のスケジュールで乾燥させ、乾燥過程に発生したAEの収集および解析 を行った。その結果以下の知見が得られた。

- 1. AE発生頻度と乾燥終了後の表面割れとの関係は明らかではなかった。
- 2. 乾燥過程では、時間に伴って減衰する突発型のAEが検出された。これは蒸煮中には観察 されなかった。
- 3. 上記のAEについて時間周波数解析を行ったところ、割れの発生と関係すると考えられる 100Hz~10kHzの低周波音が多く含まれていることが分かった。

以上のように、減衰の比較的小さい10kHz以下の低周波AEは時間周波数解析を用いること で抽出することが可能だった。10kHzはヒトの可聴音域であるため、アンプや録音に必要な 装置も比較的安価に調達することができる。乾燥割れの発生を定量的にモニタリングするた めに、今後は乾燥割れとAEとの関係についてさらに解析を進める必要がある。

引用文献

- 1)木構造振興株式会社:CLT等木質建築部材技術開発・普及事業―成果概要集-、2021、 pp. 4-13
- 2) 奥村正悟、丑丸靖史、野口昌巳:木材の乾燥過程で発生するAEについて二三の考察 (続)、京都大学農学部演習林報告、61、319-328(1989)
- 3) Yaguo Lei, Bin Yang, Xinwei Jiang, Feng Jia, Naipeng Li, Asoke K. Nandi: Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap, Mechanical Systems and Signal Processing, 138, 106587 (2020)
- 4)田村紘、金川靖、藤原新二、後藤純一:スギ心持ち断面における収縮異方性に及ぼす蒸 煮処理の影響、木材工業、58(2)、56-60(2003)
- 5) 長谷亜蘭:アコースティックエミッション計測の基礎、精密工学会誌、78(10)、856-861 (2012)
- 6) 川元スミレ:木材乾燥過程で発生するAE並みの減衰(第1報)、木材学会誌、40(7)、
 694-702 (1994)
- 7) 小玉泰義:木材の音波伝ば特性の含有水分依存性、材料、41、144-147(1992)
- 8) 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論 第2版、森北出版、東京、
 2005、pp. 61-71





図3.1 AEセンサの取付概略図(a)と実際の試験風景(b)



図3.2 AEデータ収集装置の概略図(a)と実際の試験風景(b)



図3.3 乾燥試験の様子(右側、恒温恒湿槽)

表3.1 乾燥スケジュール

		スケジュール1			スケジュール2	
	乾球温度(℃)	相対湿度(%RH)	時間(h)	乾球温度(°C)	相対湿度(%RH)	時間(h)
蒸煮	95	100	6	95	100	24
乾燥	90	35	66	95	35	66
		スケジュール3			スケジュール4	
	乾球温度(℃)	スケジュール3 相対湿度(%RH)	時間(h)	乾球温度(℃)	スケジュール4 相対湿度(%RH)	時間(h)
蒸煮	乾球温度(°C)	スケジュール3 相対湿度(%RH) N/A	時間(h)	乾球温度(℃) 95	スケジュール4 相対湿度(%RH) 100	時間(h) 6



図3.4 乾燥試験終了後の表面割れの発生状況



図3.5 乾燥試験終了後の内部割れの発生状況



図3.6 各乾燥スケジュールにおけるAE発生頻度の時間経過



図3.7 乾燥過程に検出された波形の例



0.5s

図3.8 検出波形の時間周波数解析(番号は図3.7を参照)

第4章 心去り正角をラミナとする接着重ね材の製造

1. はじめに

接着重ね材は、小断面の正角等の製材を厚さ方向に積層接着することにより製造され、大断面の構造用材料 とすることができる。本章では、第2章で製材・乾燥試験を行った大径材から得られた心去り正角を用い、「接着重 ね材の日本農林規格」に準じて製造を行った製品について、曲げ試験及び品質管理試験を実施し、心持ち材を 使用した製品と同じ製造方法で製造が可能か、また、その構造性能と製造条件について検証を実施した結果を 取りまとめた。

2. 製造工程

接着重ね材の製造工程は、概ね集成材と同様の製造工程となる。接着重ね材の製造は、手動で多くの工程を 行うことでプレス機等の比較的少ない設備の導入のみとなることがメリットとしてあげられ、これは、まだ大量生産 ではなく、受注生産が多いこと、製材ラミナ段階での選別も行う工程が多いことが理由となっている。また、製品は 集成材の中断面から大断面までが主流となることから、製造後の加工も通常のプレカットでは困難となるケースが 多く生じるなどの課題がある。本項では、今回試験体の製造を実施した製造工程について確認する。



図 4.1 接着重ね材の製造フロー

(1) 未乾燥製材の受入・乾燥【工程 1),2)】

今回の試験体製造では、乾燥済製材を受入したことからこの工程は行っていない。

(2) 乾燥済製材の受入・検査【工程 3),5),6)】

はじめに、製材の選別として受入検査を行った。製材の基準は、製材の日本農林規格の「機械等級区分製材」 を基準として作成されており、製造工場内でヤング係数測定、含水率測定を実施して管理すること、大断面材を 想定した被着面の安全率、材縁部の節の欠損を加味することで製品性能を安定化させることを期待し節径比・集 中節径比の条件をより制限することとされている。

(3) 製材ラミナの材面仕上げ【工程 7)】

測定・選別後、次工程までの時間が空く場合には接着剤塗布直前にプレーナー処理を行い、材面の平滑度を 確保する。今回は、材面に不陸が生じたもの、削り残しがあったものについて仕上げ処理を追加で行った。

(4) 製材ラミナの構成【工程 8)】

製材ラミナのヤング係数の測定後、製品の構成を検討する。今回の製造では、製材ラミナの木取りの仕方によってさまざまなパターンの製品試験体が製造できるように組合せを調整した。

(5) 接着剤の受入・製湖・塗布【工程 4),9),10)】

建築基準法第37条認定で運用されている株式会社工芸社・ハヤタ及び株式会社 WOODBP 関東のスギ・ヒノキBP 材では、主材と硬化剤が梱包されたシリンダーの先端にスタティックミキサーを取り付け、圧力を加えることで自動撹拌する方式をとっており、積層する木材のうち片側の被着面に線状に抽出し、へらで伸ばすことによって被着面全体にまんべんなく接着剤を塗布する。今回についても同様の方法で塗布を実施した。

(6) 圧締·養生【工程 11),12)】

圧締は、縦型プレス機によって上方向から圧力をかけ、加えて側圧をかけることで圧締時の木材のずれを防止 する。今回の製造では、冬場の製造であったことから、十分な接着性能が確保できるように、温度が20℃以上で 圧締できるよう暖房によって温度管理をしたうえで、養生まで実施した。

(7) 接着重ね材の仕上げ加工【工程 13)】

製品製造後、はみ出た接着剤をプレーナーサンダーで削り取り、材面の仕上げをプレーナーにて行った。

(8) 製品検査【工程 14)】

仕上げ加工後、全ての製品から浸漬剝離試験、煮沸剝離試験、ブロックせん断試験及び含水率試験体を抽 出し試験を実施した。

3. 試験体の抽出と構成

本試験では、同じ丸太から抽出した製材のうち1体を比較試験体として品質の確認及び製材曲げ破壊試験を 行うことで製材の性能を確認し、残った製材から製品試験体を製造することとした。下図に示すように、「2丁取り」 の丸太から抽出した製材は、1本を比較製材試験体としもう1本を製品試験体とし、「3丁取り」の丸太から抽出し た製材は1体を比較試験体とし、2体を製品試験体に、「4丁取り」の丸太から抽出した製材は1体を比較試験 体とし3体を製品試験体として製造した。また、製品は木表が最外縁に位置するように構成を行った。



I.2 丁取りの場合



4. 製材の測定

本章では、接着重ね材に用いる製材の各種測定を実施し、心去り材の接着重ね材への利用に関わる品質について検証を行った。測定結果について示す。

4.1 測定方法と内容

接着重ね材に利用する製材の測定内容は、原則として、機械等級区分製材を基準として作成されているが、 一部を集成材に合わせて設定されている。各種測定項目と基準(表 4.1)及び材面品質(表 4.2)を以下に示す。ま た、接着重ね材の性能には内部割れなどの影響によって性能が大きく低下する恐れがあることから、材縁部から 300mmの個所に加え、@200mmで試験材長に達するまで切断して内部割れの状態を確認した(図 4.3)。

事項	基準					
寸法	短辺及び長辺:105mm 以上 150mm 以下					
含水率	8%以上18%以下					
ヤング係数	等級	曲げヤング係数 (GPa 又は N/mm²)				
	SE130	12.7 以上				
	SE120	11.8 以上				
	SE110	10.8 以上				
	SE100	9.8 以上				
	SE90	8.8 以上				
	SE80	7.8 以上				
	SE70	6.9 以上				
	SE60	5.9 以上				
	SE50	4.9 以上				
	SE40	3.9 以上				
曲がり		0.2%以下				

表 4.1 測定項目

	事項	基準			
節及び穴	節(節(材面における欠け、きず	側面	70%以下		
	及び穴を含み集中節を除く。)	被着面及び製品上下面	40%以下		
	集中節径比(材面における欠	側面	90%以下		
	け、きず及び穴を含む)	被着面及び製品上下面	60%以下		
	丸身	30%以下			
	申、予告に	木口	長辺に対し2.0倍以下		
貝迪刮れ		材面	材長の 1/3 以下		
	日まわれ	利用上支障のないこと			
	日よりワ	かつ 木口短辺寸法の 1/2 以下			
	腐朽	腐朽があってはならない			
	狂い及びその他の	利用上支障があってはならない			

表 4.2 接着重ね材の材面品質





4.2 各種測定

ヤング係数、含水率及び材面検査の結果を以下に示す。

(1) ヤング係数の区分と分布

① 測定方法

測定は、(公財)日本住宅・木材技術センターの「構造用木材の強度試験マニュアル」の縦振動法の測定方 法に準じて測定を行った。



※FFT アナライザ等に接続

f

図 4.4 収音マイク・プラスチックハンマ・FFT アナライザを利用した測定

$$E_{fr} = (2fl)^2 \rho \times k_m$$

ここで、 E_{fr} :縦振動によるヤング係数 (kN/mm² または GPa)

- :共振周波数(原則として,一次共振周波数)(Hz)
- *l* :試験体の長さ (m)
- ρ :密度 (kg/m³)
- k_m :含水率 1%あたりの補正係数(木材工業ハンドブックより 105 角スギ材の値として 0.9 を設定)

② 測定結果

全体の分布を図 4.5 に示した。接着重ね材の製材ラミナでは、機械等級区分構造用製材の下限値を基準と して区分されており、E70の中央値である SE80 が最も多くなる結果となったことから、スギ製材の全国的な分布 と概ね合致する材が多く含まれていたことが確認された。

また、各丸太から抽出した製材のうち1体ずつを製材試験体とし、その他の製材を製品にすることから、製材 試験体がその丸太の代表値として問題ないか確認した。結果を図 6~図 4.8 に、オレンジを製材試験体、青を 製品用製材として示した。4 丁取り及び 3 丁取りは製材試験用と製品試験用で 1.0kN/mm²を超えるようなずれ は生じなかったものの、2 丁取りは 1.0kN/mm²を超えるものも見られた。抽出が特殊となる 3 丁取りの製材試験 体は、木口面繊維方向の違いによる差は余り見られなかった。2 丁取りに差がみられたのは、髄に近い部分も 含んで抽出されており、髄のずれにより未成熟材の含まれている量によって変化がみられたものと考えられた。 これらの影響を踏まえ、製品性能と製材の関係を検討する。



図 4.5 心去り製材ラミナの等級区分本数分布



図 4.6 4丁取り丸太別ヤング係数比較



図 4.7 3丁取り丸太別ヤング係数比較

表4.3 3丁取り製材試験体の木口面繊維方向

丸太番号	37	38	41	34	36	40	33	35	39	42
製材番号	123	126	128	131	133	136	140	142	147	150
木口面										



図4.8 2丁取り丸太別ヤング係数比較
(2) 含水率の測定結果と分布

測定方法

高周波式含水率計による測定を4面3点ずつ測定し、平均値を算出した。



図 4.9 高周波式の木材水分計による材面の含水率測定

② 測定結果

結果の全体の分布を図 4.10 に示した。10~12%まで十分に乾燥された材と、20%を超える比較的高い含水 率の材に分かれる傾向があった。

図 4.11~図 4.13 に、丸太別の含水率比較を示す。なお、オレンジで示した試験体は、製材曲げ試験を実施 する試験体である。同じ丸太から抽出した製材は、3 丁取りの丸太番号 35 の製材、2 丁取りの丸太番号 45 の 製材間で比較的大きな違いが生じたが、その他は概ね近い含水率であった。



図 4.10 心去り製材ラミナの含水率本数分布



図 4.11 4 丁取り丸太別含水率比較



図 4.12 3 丁取り丸太別含水率比較





(3) 材面検査結果

材面検査の結果として、通常の心持ち材の節や欠点の特徴の他、心去り材や大径材で生じやすい欠点として、貫通するような節がある材や入り皮なども見られた。これら欠点の生じた材のうち一部の状態を写真 4.1 に示す。今回は材表面にこれらが出ないように接着または引張縁に配しない形で試験を行うが、実際には製材ラミナとして用いないことで品質が安定すると考えられる。

また、材面の検査結果のうち、製材・製品曲げ試験に影響が大きいと考えられる上下面及び被着面の節径 比、及び引張側の節径比について測定結果を図 4.14 に示した。大きな節は比較的少なく、単独で節がある場 合が多かったことから、節径比は小さく、また集中節径比は概ね節径比と同じ結果となった。また、製材下端及 び製品上下面に節が生じる試験体は更に少ない結果となっており、節による影響より繊維方向による影響が大 きく出る可能性が高いと考えられた。



写真 4.1 主な欠点(例)



図 4.14 節径比の本数分布

材面の検査結果をまとめると以下となった。

- ・ 節は、まとまった節がなかったことから、集中節径比の項目は除外し、条件の厳しい節径比のみを判定 した。4 丁取りのもので節が NG となるものが多かった。
- ・ 丸身は材の皮が残ったものがあったがほとんど目立たなかった。
- ・ 貫通割れのうち木口面は乾燥後の仕上げ加工がなかったことから生じたもの、材面の貫通割れは丸太の状態からあった割れがそのまま残ってしまったものとなるが、曲げ試験、製品試験の製材にはその部分が入らないように長さ方向を短くして製造することから、今回の試験には影響ないものとなった。
- ・ 腐朽、狂い欠点は目立ったものはないが、節周りの普及に見えるもの、入り皮をこの項目で判定した。 (普及の4丁取りは2丁取りと同じ位置のためプロットが見えなくなっている。)
- ・ 削り残しは、材面の不陸、120角への修正ができないものは製材曲げ試験体の 105角として修正し、再 度確認を行った。
- ・ 全体を通じて、合格率は 67%となった。NG のものも含めて試験、性能検証を行うこととした。



図 4.15 材面品質とその合否

4.3 内部割れの測定結果

内部割れの測定結果を以降に示す。製材の曲げ試験体はすべてで40体あったが、一部に内部割れが生じて いた試験体は9体で、4丁取りで10体中3体、3丁取りで10対中1体、2丁取りで20体中5体であった。髄か ら放射状に割れているものが多くあったが、一部試験体ではそのうち最も内側である⑤、⑥の個所まで内部割れ が生じていた試験体はわずか1体であり、また、これは、今回の製材は高温セットを行わずに乾燥されたことによ る影響と考えられる。



図 4.16 製材試験体と内部割れ測定箇所【再掲】



図 4.17 4 丁取り製材内部割れ寸法



写真4.2 4丁取り製材内部割れ状況



図 4.18 3 丁取り製材内部割れ寸法とその状況



写真4.3 3丁取り製材内部割れ状況



図 4.19 2 丁取り製材内部割れ寸法



写真4.4 2丁取り製材内部割れ状況

4.4 各種測定結果まとめ

以上測定した結果から、接着重ね材用の製材ラミナとしての適合判定を行った。全体では45%が合格率となった。4 丁取りでは35%,3 丁取りでは30%,2 丁取りでは68%と2 丁取りの材が最も高い適合率となった。



図 4.20 製材検定結果

表 4.4 製材検定結果

		N *h	節征	圣比	曲志い	十百	貫通	割れ	目ま	府ナ	狂い	削り残	合否		42.5	合否
		母釵	上下	側面	囲かり	儿身	木口	材面	わり	腐竹	欠点	L	材面	137个平	7171	全体
全体	本数	110	92	101	110	109	106	96	110	101	108	98	74	74	110	50
	合格率	-	84%	92%	100%	99%	96%	87%	100%	92%	98%	89%	67%	67%	100%	45%
4丁取り	本数	40	27	32	40	39	36	31	40	38	38	35	20	27	40	14
	合格率	-	68%	80%	100%	98%	90%	78%	100%	95%	95%	88%	50%	68%	100%	35%
3丁取り	本数	30	28	30	30	30	30	27	30	25	30	25	20	17	30	9
	合格率	-	93%	100%	100%	100%	100%	90%	100%	83%	100%	83%	67%	57%	100%	30%
2丁取り	本数	40	37	39	40	40	40	38	40	38	40	38	34	30	40	27
	合格率	-	93%	98%	100%	100%	100%	95%	100%	95%	100%	95%	85%	75%	100%	68%

5. 構造性能試験

構造性能試験として、丸太から抽出した製材と、同じ丸太から抽出した製材から製造した接着重ね材について 構造性能試験及び接着試験を実施した。

5.1 組合せの決定

構造性能試験に先駆けて、測定した材面品質、ヤング係数、含水率及び木取りの状態から製材曲げ試験と製品曲げ試験の試験体を決定した。なお、製材のうち No.88,174 は 120 角の寸法が確保できなかったことから、105角試験体とした。

① 4丁取り試験体

1本の丸太から4本の正角材が取れるため、1本を製材試験体、1本の丸太から2本を製品試験体とし、残 りの1体は次の丸太との組み合わせとして製品を製造した。丸太から抽出した材はヤング係数が同一のものが おおいことから「同一等級構成接着重ね材」とし、次の丸太との間で製造した製品は、「非対称異等級構成」が 多く生じた。

	丸太	製材	ヤング	ヤング	含水率	引張節径比
	番号	番号	GPa	区分	%	%
	23	81	7.40	SE70	12.4%	0.0%
	29	88	7.47	SE70	11.8%	0.0%
	28	89	8.73	SE80	12.7%	0.0%
4	26	93	6.48	SE60	12.0%	25.0%
Т	32	97	9.63	SE90	10.8%	0.0%
取	27	103	8.17	SE80	20.9%	0.0%
り	24	106	6.30	SE60	15.5%	25.0%
	30	110	7.44	SE70	25.6%	0.0%
	31	115	7.98	SE80	11.0%	0.0%
	25	120	7.50	SE70	26.1%	30.8%

表4.5 4丁取り製材試験体

表 4.6 4丁取り製品試験体

							加力側						非加力側		
	組合せ	構成	等級区分	丸太	製材	ヤング	ヤング	含水率	引張節径比	丸太	製材	ヤング	ヤング	含水率	引張節径比
				番号	番号	GPa	区分	%	%	番号	番号	GPa	区分	%	%
	82-84	同一等級	E70-F200	23	82	7.28	SE70	11.5%	0%	23	84	7.51	SE70	15.8%	46%
	83-86	非対称異等級(強)	E80-F240	23	83	7.16	SE70	14.2%	0%	29	86	8.89	SE90	12.8%	0%
	85-87	非対称異等級(強)	E60-F210	29	85	6.50	SE60	12.3%	0%	29	87	7.33	SE70	13.6%	0%
	90-92	同一等級	E80-F220	28	90	8.03	SE80	11.0%	0%	28	92	8.71	SE80	12.8%	0%
	94-91	非対称異等級(強)	E60-F210	26	94	5.04	SE50	16.2%	29%	28	91	7.88	SE80	11.4%	0%
4	96-95	同一等級	E60-F190	26	96	6.63	SE60	10.4%	13%	26	95	6.67	SE60	12.0%	0%
т Т	98-101	同一等級	E80-F220	32	98	8.34	SE80	11.0%	17%	27	101	8.70	SE80	18.1%	11%
ЦЛ Т	99-100	同一等級	E90-F240	32	99	9.64	SE90	11.0%	0%	32	100	9.76	SE90	10.3%	0%
4X h	102-104	非対称異等級(弱)	E70-F220	27	102	8.73	SE80	25.9%	0%	27	104	7.71	SE70	14.0%	0%
2	105-108	非対称異等級(強)	E50-F190	24	105	5.37	SE50	28.8%	25%	24	108	6.15	SE60	25.3%	8%
	107-111	非対称異等級(強)	E60-F210	24	107	6.68	SE60	14.2%	0%	30	111	7.41	SE70	26.3%	0%
	109-112	同一等級	E70-F200	30	109	7.47	SE70	26.1%	0%	30	112	7.54	SE70	26.4%	0%
	114-118	同一等級	E80-F220	31	114	8.12	SE80	10.8%	42%	25	118	8.04	SE80	20.5%	0%
	116-113	非対称異等級(強)	E70-F220	31	116	7.78	SE70	10.9%	0%	31	113	8.42	SE80	9.6%	0%
	119-117	同一等級	E70-F200	25	119	7.00	SE70	28.9%	0%	25	117	7.54	SE70	20.3%	0%

② 3 丁取り試験体

1本の丸太から3本の正角材が取れるため、1本を製材試験体、1本の丸太から2本を製品試験体とした。 ヤング係数の区分が1区分ずれるものも多くあり、「同一等級構成接着重ね材」と「非対称異等級構成」とした。

	丸太	製材	ヤング	ヤング	含水率	引張節径比
	番号	番号	GPa	区分	%	%
	37	123	7.25	SE70	27.3%	0.0%
	38	126	7.13	SE70	10.3%	0.0%
	41	128	7.59	SE70	11.8%	0.0%
3	34	131	8.48	SE80	11.3%	0.0%
丁	36	133	8.16	SE80	10.7%	0.0%
取	40	136	7.41	SE70	19.6%	0.0%
ŋ	33	140	6.36	SE60	9.8%	8.3%
	35	142	6.97	SE70	25.4%	0.0%
	39	147	4.66	×	23.9%	0.0%
	42	150	6.36	SE60	32.5%	0.0%

表4.7 3丁取り製材試験体

表4.8 3丁取り製品試験体

							加力側						非加力側		
	組合せ	構成	等級区分	丸太	製材	ヤング	ヤング	含水率	引張節径比	丸太	製材	ヤング	ヤング	含水率	引張節径比
				番号	番号	GPa	区分	%	%	番号	番号	GPa	区分	%	%
	122-121	非対称異等級(強)	E70-F220	37	122	7.03	SE70	21.0%	25%	37	121	7.91	SE80	37.8%	0%
	125-124	同一等級	E70-F200	38	125	7.22	SE70	15.6%	0%	38	124	7.40	SE70	13.3%	0%
	127-129	非対称異等級(強)	E70-F220	41	127	7.27	SE70	11.7%	0%	41	129	7.92	SE80	10.2%	0%
3	130-132	非対称異等級(強)	E70-F220	33	139	6.77	SE60	9.8%	0%	34	132	7.88	SE80	11.3%	0%
丁	134-135	非対称異等級(強)	E70-F220	36	134	7.77	SE70	11.4%	0%	36	135	8.36	SE80	13.2%	0%
取	137-138	非対称異等級(強)	E60-F210	40	137	6.69	SE60	18.9%	0%	40	138	7.00	SE70	16.0%	0%
り	139-141	同一等級	E60-F190	33	139	6.77	SE60	9.8%	0%	33	141	6.81	SE60	9.4%	0%
	143-144	同一等級	E60-F190	35	143	6.17	SE60	23.9%	0%	35	144	6.42	SE60	10.1%	0%
	145-146	非対称異等級(強)	-	39	145	4.88	×	43.0%	0%	39	146	5.07	SE50	41.3%	0%
	148-149	同一等級	E70-F200	42	148	7.11	SE70	27.2%	0%	42	149	7.15	SE70	21.6%	0%

③ 2 丁取り試験体

1本の丸太から2本の正角材が取れるため、1本を製材試験体、1本を次の丸太と合わせて製品試験体とした。ヤング係数の区分が1区分ずれるものも多くあり、「同一等級構成接着重ね材」と「非対称異等級構成」としたが、接着した材間で含水率の差が大きくなるものもあり、強度、接着性能に差が生じるか検討を実施することとした。

	丸太	製材	ヤング	ヤング	含水率	引張節径比
	番号	番号	GPa	区分	%	%
	43	152	6.38	SE60	12.5%	0.0%
	48	154	6.57	SE60	10.3%	0.0%
	57	156	8.32	SE80	9.0%	0.0%
	53	158	8.43	SE80	9.1%	0.0%
	61	160	8.12	SE80	8.9%	0.0%
	62	162	8.28	SE80	10.4%	0.0%
	52	164	9.29	SE90	24.4%	0.0%
	58	166	8.39	SE80	11.3%	20.8%
2	60	168	6.89	SE60	10.8%	0.0%
丁	46	170	8.03	SE80	15.1%	0.0%
取	44	172	8.40	SE80	10.6%	16.7%
ŋ	51	174	9.20	SE90	12.7%	0.0%
	45	176	7.45	SE70	36.9%	0.0%
	50	178	7.45	SE70	15.7%	0.0%
	49	180	8.61	SE80	13.0%	0.0%
	54	182	6.68	SE60	13.3%	0.0%
	56	184	6.37	SE60	11.9%	0.0%
	59	186	7.24	SE70	20.6%	27.5%
	47	187	7.06	SE70	19.3%	20.0%
	53	190	8.61	SE80	17.9%	0.0%

表4.9 2丁取り製材試験体

表 4.10 2 丁取り製品試験体

							加力側		-				非加力側		
	組合せ	構成	等級区分	丸太	製材	ヤング	ヤング	含水率	引張節径比	丸太	製材	ヤング	ヤング	含水率	引張節径比
				番号	番号	GPa	区分	%	%	番号	番号	GPa	区分	%	%
	151-153	非対称異等級(強)	E70-F220	43	151	6.48	SE60	10.9%	0%	48	153	8.32	SE80	19.5%	0%
	155-157	同一等級	E80-F220	57	155	8.24	SE80	10.8%	0%	53	157	7.88	SE80	13.6%	0%
	159-161	同一等級	E80-F220	61	159	7.96	SE80	9.6%	0%	62	161	8.42	SE80	10.8%	0%
2	165-163	非対称異等級(強)	E80-F240	58	165	7.89	SE80	10.0%	0%	52	163	9.33	SE90	30.4%	0%
丁	167-169	同一等級	E80-F220	60	167	8.53	SE80	11.1%	0%	46	169	8.25	SE80	13.2%	0%
取	173-171	非対称異等級(弱)	E70-F220	51	173	8.00	SE80	10.8%	0%	44	171	6.94	SE70	12.0%	33%
り	175-177	非対称異等級(強)	E70-F220	45	175	7.66	SE70	25.5%	0%	50	177	8.62	SE80	19.9%	0%
	181-179	非対称異等級(強)	E60-F210	54	181	5.52	SE50	19.3%	10%	49	179	8.48	SE80	14.2%	0%
	183-185	非対称異等級(強)	E70-F220	56	183	6.46	SE60	11.5%	0%	59	185	8.54	SE80	15.0%	0%
	188-189	同一等級	E80-F220	47	188	8.11	SE80	17.2%	0%	53	189	7.81	SE80	21.0%	0%

5.2 製材曲げ試験

製材曲げ試験をものつくり大学にて実施した。試験方法及び試験結果について以降に示す。

(1) 試験方法

図 4.21 に試験方法を示す。試験は、「構造用木材の強度試験マニュアル」(公財)日本住宅・木材技術センターにある曲げ試験に準じた試験方法とした。スパン(L)は 2,160 mm、荷重点間距離(S)は 720 mmである。

供試体と支持架台・加力ローラーの間には、供試体のめり込みを防ぐための鋼板を挟み、さらに水平の移動 を阻害させないため、テフロンシートを挟んだ。

加力は1方向単調加力とした。荷重速度はほぼ一定とし、供試体が曲げまたはせん断破壊するまでとした。



図 4.21 製材曲げ試験

(2) 算出方法

試験結果は、以下の算出式により性能を評価する。なお、「構造用木材の強度試験マニュアル」(公財)日本 住宅・木材技術センターに記載のある各種補正のうち、含水率による補正を全ての試験結果に対して行い、 120 角で抽出できなかった 105 角の試験体 2 体については、さらに適正スパンに補正を実施した。

$$f_m = \frac{aF_{ult}}{2Z}$$

ここに, f_m : 曲げ強さ(N/mm²)

a : 支点から加力点までの長さ(mm)

- Fult : 最大荷重 (N)
- Z : 断面係数(mm³)

$$E_m = \frac{a(3L^2 - 4a^2)\Delta F}{48I\Delta w}$$

ここに, *E_m* : 曲げ弾性係数(kN/mm²)

L : 支点間の長さ (mm)

a : 支点から加力点までの長さ(mm)

- ΔF : $0.4F_{ult}$ と $0.1F_{ult}$ の差 (kN)
- Δw : 0.4F_{ult}時変形と0.1F_{ult}時変形の差 (mm)
- *I* : 断面二次モーメント(mm⁴)

$$E'_{b} = E_{b} k_{S-E} k_{M}$$

$$F'_{b} = F_{b} k_{S-F}$$
ここで $k_{S-E} = \left(1 + \frac{36H^{2}}{3L^{2} - 4a^{2}}\right) / \left(1 + \frac{36H^{2}}{3L_{0}^{2} - 4a_{0}^{2}}\right),$

$$k_{S-F} = \left\{(L + 5s) / (L_{0} + 5s_{0})\right\}^{0.2},$$

$$k_{M} = \begin{cases} 0.9 & (M < 10) \\ 1 + 0.02(M - 15) & (10 \le M \le 19) \\ 1.08 & (M > 19) \end{cases}$$

$$L: 試験条件 \subset O$$
支持スパン, L_{0} : 標準荷重条件 $\subset O$ 支持

L:試験条件での支持スパン, L₀:標準荷重条件での支持スパン,
 a:試験条件でのせん断スパン, a₀:標準荷重条件でのせん断スパン
 s:試験条件での純曲げスパン, s₀:標準荷重条件での純曲げスパン,
 H:試験体厚, M:含水率

(3) 試験結果

試験結果一覧を以下に示す。終局時の破壊性状は、曲げスパン範囲内で木材の繊維に沿って破壊するものがほとんどであり、一部側面の節に影響されるものも生じた。破壊までは弾性的に挙動して破壊するものもあれば、繊維が徐々にはがれていき破壊するものもあり、含水率によって影響がみられたものと考えられる。



図 4.22 製材曲げ試験の包絡線例

表 4.11 試験結果一覧(4丁取り)

			試験	結果			測定結果	1		補正後			
丸太	製材	Pm	ax時	MOR	MOE	ヤング	'測定値	含水率	補正	含水補	補正		
No.	No,	荷重	変位	Fb	Eb	Efr		1	Fb	正係数	Eb	破壞性状	備考
		kN	mm	MPa	GPa	GPa	ビカ	%	MPa	К	GPa		
23	81	24.7	39.2	30.9	7.1	7.4	SE70	12.4%	30.9	0.95	6.7	荷重点(左)より曲げ破壊(節無し)	
29	88	19.3	60.5	36.0	8.0	7.5	SE70	11.8%	37.0	0.9	7.5	C面中央より曲げ破壊 A面圧縮の歪みあり	105角
28	89	31.7	50.4	39.6	8.6	8.7	SE80	12.7%	39.6	1.0	8.2	荷重点(右)より曲げ破壊	
26	93	34.9	68.1	43.6	7.0	6.5	SE60	12.0%	43.6	0.9	6.6	中央左寄りのA面からC面に通る節からの曲げ破壊	
32	97	35.6	54.5	44.5	9.4	9.6	SE90	10.8%	44.5	0.9	8.6	荷重点(左)より曲げ破壊(節無し)	
27	103	30.6	65.6	38.3	8.0	8.2	SE80	20.9%	38.3	1.1	8.6	中央C面曲げ破壊	
24	106	24.9	43.8	31.1	6.5	6.3	SE60	15.5%	31.1	1.0	6.6	中央C面曲げ破壊	
30	110	29.5	66.8	36.9	7.0	7.4	SE70	25.6%	36.9	1.1	7.6	荷重点(左)より曲げ破壊	
31	115	38.0	64.7	47.5	8.0	8.0	SE80	11.0%	47.5	0.9	7.3	中央C面曲げ破壊	
25	120	30.0	65.1	37.5	7.3	7.5	SE70	26.1%	1% 37.5 1.		7.8	中央C面曲げ破壊	

表 4.12 試験結果一覧(3 丁取り)

			試験	結果			測定結果	Ļ		補正後			
丸太	製材	Pm	ax時	MOR	MOE	ヤング	"測定値	含水率	補正	含水補	補正		
No.	No,	荷重	変位	Fb	Eb	Efr		1	Fb	正係数	Eb	破壊性状	備考
		kN	mm	MPa	GPa	GPa	区历	%	MPa	К	GPa		ĺ
37	123	27.7	55.9	34.6	7.6	7.2	SE70	27.3%	34.6	1.08	8.2	中央C面曲げ破壊 A面圧縮の歪みあり	
38	126	22.1	73.1	27.6	7.2	7.1	SE70	10.3%	27.6	0.91	6.5	中央C面曲げ破壊	
41	128	37.4	99.0	46.8	8.3	7.6	SE70	11.8%	46.8	0.94	7.7	中央C面曲げ破壊 A面圧縮の歪みあり	
34	131	27.4	84.9	34.3	8.2	8.5	SE80	11.3%	34.3	0.93	7.6	中央C面曲げ破壊	
36	133	30.0	44.0	37.5	8.0	8.2	SE80	10.7%	37.5	0.91	7.3	荷重点(左)より曲げ破壊	
40	136	27.7	59.7	34.6	7.5	7.4	SE70	19.6%	34.6	1.08	8.1	中央C面曲げ破壊 右荷重点節からの歪みあり	
33	140	26.1	50.2	32.6	6.5	6.4	SE60	9.8%	32.6	0.90	5.8	荷重点(右)より曲げ破壊	
35	142	23.1	53.9	28.9	6.8	7.0	SE70	25.4%	28.9	1.08	7.4	荷重点(右)より曲げ破壊	
39	147	19.7	80.0	24.6	5.1	4.7	適用外	23.9%	24.6	1.08	5.5	中央C面曲げ破壊	
42	150	24.6	59.8	30.8	6.5	6.4	SE60	32.5%	30.8	1.08	7.0	中央C面曲げ破壊	

表 4.13 試験結果一覧(2 丁取り)

			試験	結果			測定結果			補正後	補正		
丸太	製材	Pm	ax時	MOR	MOE	ヤング	"測定値	含水率	補正	含水補	補正		
No.	No,	荷重	変位	Fb	Eb	Efr			Fb	正係数	Eb	破壞性状	備考
		kN	mm	MPa	GPa	GPa	КЛ	%	MPa	К	GPa		
43	152	26.9	54.6	33.6	6.5	6.4	SE60	12.5%	33.6	0.95	6.2	荷重点(左)より曲げ破壊	
48	154	23.2	37.4	29.0	6.6	6.6	SE60	10.3%	29.0	0.91	6.0	中央C面曲げ破壊	
57	156	28.3	37.8	35.4	8.1	8.3	SE80	9.0%	35.4	0.90	7.2	中央C面曲げ破壊	
55	158	30.6	39.6	38.3	8.4	8.4	SE80	9.1%	38.3	0.90	7.6	中央C面曲げ破壊	
61	160	29.3	53.8	36.6	8.2	8.1	SE80	8.9%	36.6	0.90	7.4	荷重点(左)より曲げ破壊 A面圧縮の歪みあり	
62	162	44.1	64.2	55.1	8.9	8.3	SE80	10.4%	55.1	0.91	8.1	荷重点(左)より曲げ破壊	
52	164	30.5	50.1	38.1	9.6	9.3	SE90	24.4%	38.1	1.08	10.4	中央C面曲げ破壊 A面圧縮の歪みあり	
58	166	33.7	45.0	42.1	8.3	8.4	SE80	11.3%	42.1	0.93	7.7	中央C面曲げ破壊	
60	168	30.7	49.1	38.4	7.1	6.9	SE60	10.8%	38.4	0.92	6.5	中央C面曲げ破壊	
46	170	26.4	38.3	33.0	7.6	8.0	SE80	15.1%	33.0	1.00	7.6	中央C面曲げ破壊	
44	172	40.0	62.2	50.0	8.6	8.4	SE80	10.6%	50.0	0.91	7.8	中央C面曲げ破壊	
51	174	25.1	92.6	46.8	8.5	9.2	SE90	12.7%	48.1	0.95	8.1	中央C面曲げ破壊 A面圧縮の歪みあり	105角
45	176	26.1	59.4	32.6	7.6	7.4	SE70	36.9%	32.6	1.08	8.2	荷重点(左)より曲げ破壊	
50	178	25.4	39.2	31.8	7.2	7.5	SE70	15.7%	31.8	1.01	7.3	中央C面曲げ破壊	
49	180	28.8	115.9	36.0	8.6	8.6	SE80	13.0%	36.0	0.96	8.3	荷重点(左)より曲げ破壊 A面圧縮の歪みあり	
54	182	28.4	78.8	35.5	6.6	6.7	SE60	13.3%	35.5	0.97	6.4	中央C面曲げ破壊	
56	184	30.5	57.1	38.1	6.6	6.4	SE60	11.9%	38.1	0.94	6.2	中央C面曲げ破壊	
59	186	32.6	62.8	40.8	7.6	7.2	SE70	20.6%	40.8	1.08	8.2	中央C面曲げ破壊 D面節からの割れ A面節からの歪みあり	
47	187	30.8	53.2	38.5	6.8	7.1	SE70	19.3%	38.5	1.08	7.4	中央C面曲げ破壊	
53	190	27.9	41.0	34.9	8.1	8.6	SE80	17.9%	34.9	1.06	8.5	中央C面曲げ破壊	



写真 4.5 主な破壊性状

縦振動によるヤング係数と曲げ試験によるヤング係数の比較結果を図 4.23 に示す。大きく外れた結果はなく、 全体として縦振動によるヤング係数が高い傾向がみられた。4 丁取り、3 丁取り、2 丁取りでそれぞれ分布を比較 したが、取り方によって縦振動によるヤング係数と曲げ試験によるヤング係数の傾向の変化は見られなかった。

また、曲げ試験によるヤング係数と曲げ強さについて分布を図 4.24 に示す。強度分布についても、木取りの仕 方によっての影響はあまり出ておらず、測定したヤング係数との相関が大きい結果であると考えられる。接着重ね 材の製材ラミナの規格作成段階で想定されている強度及びヤング係数は、機械等級区分製材のヤング係数と強 度の関係(表 4.14)とされているが、その値と比較すると概ねヤング係数区分ごとの下限値を十分上回る結果が得 られていた。



図 4.23 縦振動によるヤング係数と曲げ試験によるヤング係数



図 4.24 曲げ試験によるヤング係数と曲げ強さ



図 4.25 等級区分との比較

表 4.14 機械等級区分製材 (樹種区分皿、スギ)のヤング係数と強度性能

	ヤン	ング係数C	BPa
	下限	中央	上限
E30	1.9	2.9	3.9
E50	3.9	4.9	5.9
E70	5.9	6.9	7.8
E90	7.8	8.8	9.8
E110	9.8	10.8	11.8
E130	11.8	12.8	13.7
E150	13.7		

樹種 区分	ヤング 区分	Fc N/mm ²	<i>Ft</i> N/mm ²	<i>Fb</i> N/mm ²
	E50	19.2	14.4	24.0
	E70	23.4	17.4	29.4
т	E90	28.2	21.0	34.8
ш	E110	32.4	24.6	40.8
	E130	37.2	27.6	46.2
	E150	41.4	31.2	51.6

5.3 製品曲げ試験

製品曲げ試験もものつくり大学にて実施した。試験方法及び試験結果について以降に示す。

(1) 試験方法

図 4.26 に試験方法を示す。試験は、「構造用木材の強度試験マニュアル」(公財)日本住宅・木材技術センターにある曲げ試験に準じた試験方法を原則とするが、スパンを確保できなかったことから 2 等分点 3 点曲げ試験とし、スパン(L)は 2,880 mm、支点-荷重点間距離(S)は 1,440 mmである。

供試体と支持架台・加力ローラーの間には、供試体のめり込みを防ぐための鋼板を挟み、さらに水平の移動 を阻害させないため、テフロンシートを挟んだ。

加力は1 方向単調加力とした。荷重速度はほぼ一定とし、供試体が曲げまたはせん断破壊するまで加力 した。試験に体組合せを以下に示す。



(2) 算出方法

試験結果は、以下の算出式により曲げ強さ及び曲げ弾性係数を評価する。なお、「構造用木材の強度試験 マニュアル」(公財)日本住宅・木材技術センターに記載のある各種補正のうち、含水率による補正を全ての試 験結果に対して行ったが、材長による補正はせん断スパンを規定と同じ 6h(材せい)で取って試験を実施したこ とから行わなかった。

$$f_m = \frac{aF_{ult}}{2Z}$$

ここに, f_m : 曲げ強さ(N/mm²) a : 支点から加力点までの長さ(mm) F_{ult} : 最大荷重 (N) Z : 断面係数(mm³)

$$E_m = \frac{\Delta F L^3}{48 I \Delta w}$$

ここに, E_m : 曲げ弾性係数(kN/mm²) L : 支点間の長さ (mm) ΔF : $0.4F_{ult}$ と $0.1F_{ult}$ の差 (kN) Δw : $0.4F_{ult}$ 時変形と $0.1F_{ult}$ 時変形の差 (mm) I : 断面二次モーメント(mm⁴)

$$E'_b = E_b k_M$$

$$F'_b = F_b$$

$$\text{CCC} \quad k_M = \begin{cases} 0.9 & (M < 10) \\ 1 + 0.02(M - 15) & (10 \le M \le 19) \\ 1.08 & (M > 19) \end{cases}$$

M:含水率

(3) 試験結果

試験結果の包絡線及び各特性値一覧表を以下に示す。等級区分は、同一等級構成で4区分、非対称異等級構成で4区分の計4区分に分類される試験が混ざっているため、それぞれの包絡線を分類して記載した。また一覧表もそれぞれの区分にて示した。

① 同一等級構成接着重ね材 E60-F190

3体の曲げ強さに大きな差があり、ヤング係数も多少のばらつきがあった。破壊性状は主に曲げ破壊で、1体目が4丁取りで繊維に沿った割れに加えて側面の節を起点とした曲げ破壊であり、残りが3丁取りの試験体で繊維に沿って割れる破壊であり、特殊な破壊性状ではなかった。スパン中央付近の材側面に欠点があった試験体が曲げ弾性係数、曲げ強さが高い結果であった。



図 4.27 荷重-変形関係と特殊な破壊性状

表 4.15 試験結果一覧

		試験	結果		測定結果				補正後		
No.	Pma	ax時	MOR	MOE	ヤング	ヤング測定値		補正	含水補	補正	
	荷重	変位	Fb	Eb	樺式	▽ △		Fb	正係数	Eb	破壞性状
	kN	mm	MPa	GPa	1件/以	区历	%	MPa	K	GPa	
96-95	61.6	44.8	38.5	7.4	同一	E60-F190	13%	38.5	0.95	7.1	中央左寄り節からの曲げ破壊
139-141	44.6	27.7	27.9	6.6	同一	E60-F190	11%	27.9	0.93	6.1	中央C面曲げ破壊
143-144	35.7	29.1	22.3	6.1	同一	E60-F190	16%	22.3	1.02	6.2	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり

② 同一等級構成接着重ね材 E70-F200

5体の試験体が該当し、1~3体目までが4丁取り、残り2体が3丁取りとなった。含水率に多少ばらつきはあったが、曲げ強さ及びヤング係数は比較的安定した結果となった。破壊性状は主に加力点直下の曲げ破壊で、No.119-117のみ側面節も影響した曲げ破壊であった。非加力側の破壊性状と製材の破壊性状を比較したが、No.119-117以外は大きな違いはなく、その他は繊維に沿って木材が割れる挙動がみられた。



図 4.28 荷重-変形関係と特殊な破壊性状

表 4.16 試験結果一覧

		試験	結果		測定結果				補正後		
No.	Pma	ax時	MOR	MOE	ヤング	ヤング測定値		補正	含水補	補正	
	荷重	変位	Fb	Eb	樺式	▽ △		Fb	正係数	Eb	破壊性状
	kN	mm	MPa	GPa	1件/以	区历	%	MPa	К	GPa	
82-84	46.2	28.1	28.9	6.9	同一	E70-F200	14%	28.9	0.98	6.8	中央C面曲げ破壊
109-112	40.6	46.2	25.4	6.9	同一	E70-F200	20%	25.4	1.08	7.5	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり
119-117	49.8	45.2	31.1	6.6	同一	E70-F200	21%	31.1	1.08	7.1	B面中央節より中央C面曲げ破壊
125-124	54.4	70.1	34.0	6.9	同一	E70-F200	16%	34.0	1.03	7.1	中央C面曲げ破壊
148-149	44.6	44.8	27.9	6.3	同一	E70-F200	24%	27.9	1.08	6.8	中央C面曲げ破壊



写真4.6 特殊な破壊性状

③ 同一等級構成接着重ね材 E80-F220

6 体の試験体が該当し、1~3 体目までが 4 丁取り、残り 4 体が 2 丁取りであった。曲げ強さ及びヤング係数 はばらつきが小さく、安定した結果となった。破壊性状はスパン中央部近傍で曲げ破壊が生じた。下端に配さ れた製材の破壊性状と概ね同じ破壊性状を示していたことから、



図 4.29 荷重-変形関係

表 4.17 試験結果一覧

		試験	結果			測定結果			補正後		
No.	Pma	ax時	MOR	MOE	ヤング	"測定値	含水率	補正	含水補	補正	
	荷重	変位	Fb	Eb	構成 区分		1	Fb	正係数	Eb	破壊性状
	kN	mm	MPa	GPa	1件/以	区历	%	MPa	К	GPa	
90-92	62.5	82.1	39.1	8.1	同一	E80-F220	12%	39.1	0.94	7.7	中央C面B面中央から曲げ破壊
98-101	65.8	37.2	41.1	8.2	同一	E80-F220	14%	41.1	0.98	8.0	中央C面曲げ破壊
114-118	61.6	34.0	38.5	7.9	同一	E80-F220	14%	38.5	0.97	7.7	中央C面曲げ破壊
155-157	72.8	71.6	45.5	7.6	同一	E80-F220	13%	45.5	0.97	7.4	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり
159-161	57.5	37.8	35.9	8.4	同一	E80-F220	12%	35.9	0.95	8.0	中央C面曲げ破壊
167-169	62.1	31.7	38.8	8.1	同一	E80-F220	13%	38.8	0.97	7.8	中央C面曲げ破壊
188-189	56.5	44.0	35.3	7.6	同一	E80-F220	15%	35.3	1.00	7.6	中央C面曲げ破壊



写真 4.7 主な破壊性状

④ 同一等級構成接着重ね材 E90-F240

1 体の試験体が該当し、4 丁取りであった。曲げ強さは規格値より高い結果となり、ヤング係数も規格値同等 であった。破壊性状は繊維に沿った割れがスパン中央部に生じる曲げ破壊であった。



図 4.30 荷重-変形関係

		試験	結果		測定結果				補正後		
No.	Pma	ax時	MOR	MOE	ヤング測定値		含水率	補正	含水補	補正	
	荷重	変位	Fb	Eb	楼式	# +		Fb	正係数	Eb	破壊性状
	kN	mm	MPa	GPa	件成	区刀	%	MPa	К	GPa	
99-100	67.3	44.6	42.1	8.8	同一	E90-F240	13%	42.1	0.96	8.4	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり

表 4.18 試験結果一覧



写真 4.8 破壊性状

⑤ 非対称異等級構成接着重ね材 E50-F190

No.105-108は4丁取りで本区分に該当し、規格にない1ランク下の区分としてNo.145-146の3丁取りが該当したことから、併せて試験結果を示した。No.145-146は含水率が高く、荷重-変形関係ではその影響がみられた。最大荷重、ヤング係数ともに規格値を満足し、破壊性状は繊維に沿った曲げ破壊が生じた。



図 4.31 荷重-変形関係

表 4.19 試験結果一覧

		試験	結果		測定結果				補正後		
No.	Pm	ax時	MOR	MOE	ヤング	"測定値	含水率	補正	含水補	補正	
	荷重	変位	Fb	Eb	楼式			Fb	正係数	Eb	破壊性状
	kN	mm	MPa	GPa	1件/以	区历	%	MPa	К	GPa	
105-108	47.1	37.1	29.4	5.6	非対称(強)	E50-F190	17%	29.4	1.04	5.9	中央C面曲げ破壊
145-146	43.5	40.4	27.2	4.5	非対称(強)	-	31%	27.2	1.08	4.8	ーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー



写真4.9 主な破壊性状

⑥ 非対称異等級構成接着重ね材 E60-F200

5 体の試験体が該当し、1~3 体目までが 4 丁取り、1 体が 3 丁取り、残りが 2 丁取りの試験体であった。曲げ 強さ及びヤング係数のばらつきは小さく安定した結果となった。また規格値を満足した。破壊性状は主に繊維 に沿って割れるか、スパン中央近傍で引張縁から裂ける曲げ破壊であったが、No.107-111 のみ支点から加力 点まで裂けるような割れが生じた。曲げスパン下端の曲げ破壊に合わせて支点のテフロンシートでうまくローラ ーのようにスライドができず、せん断が卓越してしまった可能性があったものと考えられた。



図 4.32 荷重-変形関係

表 4.20 試験結果一覧

		試験	結果			測定結果			補正後		
No.	Pma	ax時	MOR	MOE	ヤング	ヤング測定値		補正	含水補	補正	
	荷重	変位	Fb	Eb	樺式	RA		Fb	正係数	Eb	破壞性状
	kN	mm	MPa	GPa	伸成	区历	%	MPa	К	GPa	
85-87	50.3	32.7	31.4	6.3	非対称(強)	E60-F210	14%	31.4	0.98	6.1	中央C面曲げ破壊
94-91	57.3	98.3	35.8	6.1	非対称(強)	E60-F210	14%	35.8	0.97	5.9	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり
107-111	58.5	69.9	36.6	6.8	非対称(強)	E60-F210	17%	36.6	1.03	7.1	中央C面曲げ破壊支点右から中央にかけて割れ
137-138	49.6	29.8	31.0	6.8	非対称(強)	E60-F210	16%	31.0	1.02	6.9	中央C面曲げ破壊
181-179	49.3	33.6	30.8	6.5	非対称(強)	E60-F210	16%	30.8	1.03	6.7	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり



写真 4.10 特殊な破壊性状

⑦ 非対称異等級構成接着重ね材 E70-F220

10 体の試験体が該当し、1,2 体目が 4 丁取り、4 体が 3 丁取り、残りが 2 丁取りの試験体であった。基本的 に高強度側が下端に配するように加力したが、2 体のみ低強度側を下端に配した試験を実施した。ヤング係数 は 7.0kN/mm² 収まった。曲げ強さは低強度側を下端とした方が低下することが想定されたが、大きな低下は見 られなかった。破壊性状は加力点近傍の曲げ破壊であった。



図 4.33 荷重-変形関係 表 4.21 試験結果一覧

		試験	結果			測定結果			補正後		
No.	Pma	ax時	MOR	MOE	ヤング	'測定値	含水率	補正	含水補	補正	
	荷重	変位	Fb	Eb	堆代			Fb	正係数	Eb	破壊性状
	kN	mm	MPa	GPa	伸戍	区方	%	MPa	К	GPa	
102-104	59.1	52.3	36.9	7.6	非対称(弱)	E70-F220	16%	36.9	1.03	7.9	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり
116-113	69.6	47.9	43.5	7.8	非対称(強)	E70-F220	12%	43.5	0.94	7.3	中央C面曲げ破壊
122-121	62.3	109.4	38.9	7.1	非対称(強)	E70-F220	24%	38.9	1.08	7.6	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり
127-129	69.1	52.5	43.2	7.6	非対称(強)	E70-F220	13%	43.2	0.96	7.3	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり
130-132	49.1	30.2	30.7	6.2	非対称(強)	E70-F220	14%	30.7	0.98	6.1	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり
134-135	61.0	33.0	38.1	7.8	非対称(強)	E70-F220	13%	38.1	0.96	7.5	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり
151-153	47.3	72.8	29.6	7.1	非対称(強)	E70-F220	14%	29.6	0.98	7.0	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり
173-171	53.2	32.9	33.3	7.0	非対称(弱)	E70-F220	12%	33.3	0.95	6.6	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり
175-177	47.6	44.3	29.8	7.6	非対称(強)	E70-F220	22%	29.8	1.08	8.3	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり
183-185	60.9	32.7	38.1	7.4	非対称(強)	E70-F220	13%	38.1	0.97	7.2	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり



写真 4.11 特殊な破壊性状

⑧ 非対称異等級構成接着重ね材 E80-F240

2 体の試験体が該当し、1 体目が 4 丁取り、残りが 2 丁取りの試験体であった。ヤング係数及び曲げ強さに ばらつきが生じた。ヤング係数は理論上、高強度側の加力と低強度側の加力の影響はないことから、一定範囲 内に収まった。曲げ強さは低強度側を下端とした方が低下することが想定されたが、大きな低下は見られなか った。破壊性状は節があるなどの破壊ではなく、引張縁が繊維に沿って避ける加力点近傍の曲げ破壊であっ た。



図 4.34 荷重-変形関係

表 4.22 試験結果一覧

		試験	結果		測定結果 ヤング測定値				補正後		
No.	Pma	ax時	MOR	MOE			含水率	補正	含水補	補正	
	荷重	変位	Fb	Eb	堆式	VA		Fb	正係数	Eb	破壞性状
	kN	mm	MPa	GPa	件ル	区历	%	MPa	K	GPa	
83-86	47.7	40.0	29.8	7.0	非対称(強)	E80-F240	15%	29.8	1.00	7.0	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり
165-163	70.8	56.4	44.3	8.0	非対称(強)	E80-F240	17%	44.3	1.04	8.3	中央C面曲げ破壊A面圧縮の歪みあり



写真 4.12 特殊な破壊性状

5.4 品質管理試験結果

製品曲げ試験を実施した試験体の品質管理試験を実施した。項目は、接着重ね材の日本農林規格に記載の ある煮沸・浸漬剝離試験、ブロックせん断試験、含水率試験である。詳細は資料編にて記載し、試験方法と結果 のみ以降に示す。

(1) 試験概要

品質管理試験として、接着重ね材で要求されている試験項目は、促進劣化剝離試験(浸漬剝離試験及び煮 沸剝離試験、又は減圧加圧剝離試験)について試験を実施した。試験体の抽出は下図として抽出。また、それ ぞれの試験体数は以下とした。



図 4.35 試験体の抽出

試験内容	74	試験体数	試験場
浸漬剝離試験	小試験片	140	WOODBP関東
	全断面	70	
煮沸剝離試験	小試験片	140	WOODBP関東
	全断面	70	
ブロックせん	断試験	70	ものつくり大学
含水率試	験	70	WOODBP関東

表 4.23 試験項目と試験体数

(2) 浸漬剝離試験

試験方法

試験方法は、JAS を基本とする。通常の①小試験片を抽出する方法(試験体数の都合で両木口面から1個ず つ作成)と、②全断面を抽出する方法の2通りにて試験を実施する。

② 試験片の作製

各試料接着重ね材の両端から図 16-a) に示す木口断面寸法をそのままとした長さ 75mm のものを 2 個ず つ作製する。

①小試験片の抽出 試験片は、a) に示す長さ 75mm のものからすべての接着層を b) のように抜き出し,

試験片は75mmに切り出したものそのままとする。

c) に示す試験片をそれぞれの接着層において2 個ずつ作製する。

②全断面の抽出



図 4.37 ②全断面の抽出

③ 手順

試験片を室温(10℃~25℃)の水中に 24 時間浸せきした後,70±3 ℃の恒温乾燥器中に入れ,器中に湿気がこもらないようにして質量が試験前の質量の100~110%の範囲となるように乾燥する。ただし,使用環境Aの表示をしてあるものにあっては,上記処理を2 回繰り返すものとする。

その後,試験片の両木口面における剝離の長さを測定し,剝離率並びに各木口面の同一接着層における 剝離の長さのそれぞれの合計を算出する。

※エポキシ樹脂は使用環境 C 相当として1回の処理とした。

④ 算出方法

剝離率は,下式によって算出する。

$$Se = \frac{\sum L_i}{\sum L_0} \times 100$$

ここに, Se : 剥離率(%)

L_i : 1 試験体の両木口面の剝離長さ(mm)

ΣL_i : 全試験片の両木口面の剝離長さの合計(mm)

L₀ : 1 試験体の両木口面の接着長さ(mm)

ΣL₀: 全試験片の両木口面の接着長さの合計(mm)

注 剝離の長さの測定にあたっては、干割れ、節等による木材の破壊、節が存在する部分のはがれは、剝 離とみなさない。

(3) 煮沸剝離試験

試験方法

浸漬剝離試験と同様とする。

② 試験片の作製

浸漬剝離試験と同様とする。

③ 手順

試験片を沸騰水中に4時間浸せきし、更に室温(10℃~25℃)の水中に1時間浸せきした後、水中から取り 出した試験片を70±3 ℃の恒温乾燥器中に入れ、器中に湿気がこもらないようにして質量が試験前の質量の 100~110%の範囲となるように乾燥する。ただし、使用環境Aの表示をしてあるものにあっては、上記処理を2 回繰り返すものとする。

その後,試験片の両木口面における剝離の長さを測定し,剝離率並びに各木口面の積層接着に係る同一 接着層における剝離の長さのそれぞれの合計を算出する。

④ 算出方法

浸漬剝離試験と同様とする。

(4) ブロックせん断試験

試験片の作製

試験片は,各試料接着重ね材の両端からそれぞれ1個ずつ,全ての接着層について図17又は図18に示す形のものを作成する。試験時の含水率は12%を標準とする。



注記 a 及び b は, 25mm 以上 55mm 以下の任意の長さとする。
 図 4.38 試験体抽出方法(いす型ブロックせん断試験用試験片)

2 手順

試験片の破壊時の荷重が試験機の容量の 15%から 85%に当たる試験機及び試験片のせん断面と荷重軸 が平行であって,試験片に回転モーメント等が生じないように設計されたせん断装置を用い,荷重速度毎分約 15.7MPaを標準として試験片を破断させる。

③ 算出方法

せん断強さ及び木部破断率は,下式により求める。

$$\tau = \frac{Qa}{a \times b}$$

ここに, τ : せん断強さ(MPa 又は N/mm²)

- *Qa* : 試験片が破断したときの荷重(N)
 - *a* : 試験片の長さ方向の接着長さ(mm)
- *b* : 試験片の幅方向の接着長さ(mm)
- **注記** 接着層に沿って測定部に節,やにつぼその他の欠点が存在する試験片は,測定から除外することができるが, 除外された接着層については,その接着層の他の位置から試験片を採取して再試験を行い,その結果を測定す るものとする。

(5) 含水率試験

試験片の作製

試験片は,各試料接着重ね材の長さ方向の両方の端部から約 30cm 内側で欠点の影響が最も少ない部分から,切断により質量 20g 以上のものを各 1 個,合計 2 個ずつ作成する。

② 手順

試験片の質量を測定し、これを乾燥器中で 103±2℃で乾燥し、恒量に達したと認められるとき(6 時間以上の間隔をおいて測定したときの質量の差が試験片質量の 0.1%以下のとき、又はそれが判断できる状態をいう。)の質量(以下「全乾質量」という。)を測定する。次の式によって 0.1%の単位まで含水率を算出し、同一試料接着重ね材から作成された試験片の含水率の平均値を 0.5%の単位まで算出する。ただし、これ以外の方法によって試験片の適合基準を満たすかどうかを明らかに判定できる場合は、その方法によることができる。

③ 算出方法

含水率は,下式により求める。

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100$$

ここに,	W	:	含水率(%)
	W_1	:	乾燥前の質量(g)
	W_2	:	全乾質量(g)

(6) 試験結果まとめ

試験結果のまとめとして、それぞれの試験の判定結果を以降に示す。なお、それぞれの判定基準は以下と している。心去り材の接着は経験がなく、煮沸剝離にて多くの NG が生じた。剝離試験については、全ての試 験体を一度に試験を実施したことにより乾燥状態の管理がうまくいかなかったことも影響したものと勘がられる。 今後精度を向上すること、また、含水率が高すぎると接着の安定性が低下することから表層含水率の管理や温 度管理を徹底することが必要となることが確認された。

含水率: 8%以上18%以下

ブロックせん断試験: せん断強さ 5.4N/mm² 以上、かつ、木部破断率 70%以上

煮沸・浸漬剝離試験: 接着層の剝離長さの25%以下、試験片の両木口面の剝離率

小試験片は10%以下

全断面は5%以下

	含水率	ブロック		煮沸剝離			浸漬剝離		全体
番号		せん断	全断面	小試験片	判定	全断面	小試験片	判定	判定
	判定	判定	判定	判定	合格	判定	判定	合格	
82-84	0	0	×	0	×	0	0	0	NG
83-86	0	0	×	0	×	0	0	0	NG
85-87	0	0	×	×	×	0	0	0	NG
90-92	0	0	×	×	×	×	0	×	NG
94-91	0	0	0	0	0	×	0	×	NG
96-95	0	0	×	0	×	0	×	×	NG
98-101	0	0	×	×	×	×	×	×	NG
99-100	0	0	×	0	×	×	0	×	NG
102-104	0	0	×	0	×	×	×	×	NG
105-108	0	×	×	×	×	×	×	×	NG
107-111	0	0	0	0	0	0	0	0	ok
109-112	×	0	×	0	×	×	0	×	NG
114-118	0	0	×	×	×	0	0	0	NG
116-113	0	0	×	0	×	0	0	0	NG
119-117	×	0	×	×	×	×	0	×	NG
122-121	×	0	0	0	0	0	0	0	NG
125-124	0	×	0	0	0	0	0	0	NG
127-129	0	0	×	0	×	0	0	0	NG
130-132	0	0	0	0	0	0	0	0	ok
134-135	0	0	0	0	0	0	0	0	ok
137-138	0	0	×	0	×	0	×	×	NG
139-141	0	×	×	0	×	0	0	0	NG
143-144	0	×	0	0	0	0	0	0	NG
145-146	×	0	×	×	×	×	×	×	NG
148-149	×	0	0	0	0	0	0	0	NG
151-153	0	×	0	0	0	0	0	0	NG
155-157	0	0	×	0	×	×	0	×	NG
159-161	0	×	×	×	×	0	0	0	NG
165-163	0	0	×	0	×	0	0	0	NG
167-169	0	×	×	0	×	0	0	0	NG
173-171	0	0	0	×	×	0	0	0	NG
175-177	×	×	×	0	×	0	×	×	NG
181-179	0	0	×	0	×	0	0	0	NG
183-185	0	0	0	0	0	0	0	0	ok
188-189	0	0	×	0	×	0	0	0	NG

表 4.24 品質管理試験判定結果まとめ

6. 試験検証

6.1 製品曲げ性能計算値の算出

製品曲げ試験結果との比較として、計算値を算出する。算出式は「木質構造基礎理論」日本建築学会 3.6.2 ラミナを任意配置した場合の力学的特性 を用い、MOR の算出は曲げと引張の一次式によって算出する方法を 採用した。なお、ヤング係数は各製材において縦振動にて測定したヤング係数の値とし、曲げ強さは同じ丸太か ら抽出した曲げ試験結果の曲げ強さ、引張強さは曲げ強さ×0.6 として設定した。

■算出式

(1) 曲げ剛性の算出

計算対象とする接着重ね材の断面に対して、諸値を以下に定義する。各製材ラミナは,異なる幅,異なる厚 さ,異なるヤング係数を有するものとする。梁に関する力のつり合い条件より,接着重ね材の曲げ剛性は,(2.2) で表現される等価断面法によって求められる。

$$(EI_{\nu A})_e = \sum_{i=1}^{n} E_i I_{i-NN'}$$
(2.1)

$$I_{i-NN'} = I_i + g_i^2 A_i = \frac{b_i t_i^3}{12} + g_i^2 b_i t_i$$
(2.2)

$$g_i = -\lambda - \frac{t_i}{2} + h_i \tag{2.3}$$

$$\lambda = \frac{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} E_i (h_i^2 - h_{i-1}^2)}{\sum_{i=1}^{n} E_i t_i}$$
(2.4)

ここで、
$$(EI_{vA})_e$$
 :曲げ基準強度(N/mm²)
 E_i :当該ラミナのヤング係数
 $I_{i-NN'}$:各層の中立軸に関する断面 2 次モーメント(mm⁴)
 I_i :当該ラミナの断面 2 次モーメント(mm⁴)
 g_i :中立軸と当該ラミナの図心間の距離(mm)
 A_i :当該ラミナの断面積(mm²)
 b_i :当該ラミナの幅(mm)
 t_i :当該ラミナの厚さ(mm)
 λ :中立軸までの距離(mm)
 h_i :当該ラミナまでの厚さ(mm)

(2) i 層ラミナにおける応力, ひずみ分布

接着重ね梁として積層接着面に相互のずれがないと仮定をした場合,製材ラミナを多数枚積層して構成さ れる接着重ね材における各製材ラミナの軸方向ひずみ ε_i は、曲げモーメント M_i に起因するひずみ ε_{ib} と軸力 F_t に起因するひずみ*ɛ_{it}の*和であると考えることができる。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{ib} + \varepsilon_{it} \tag{2.5}$$

i層の製材ラミナの曲げモーメントMiによる応力度 σibは、接着重ね材全体の曲率と各製材ラミナの曲率が一 致するという仮定から,下式が得られる。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{(EI)_e} = \frac{M_i}{E_i I_i}$$
(2.6)

$$\sigma_{bi} = \frac{M_i}{E_i I_i} = {\binom{t_i}{2}} \left\{ \frac{E_i}{(EI)_e} \right\} M$$
(2.7)

製材ラミナに働く軸力に起因する引張力は、平面保持の法則が成り立つとすれば、以下の関係が得られる。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{bi} + \varepsilon_{ti} = \frac{(y - \lambda)}{\rho}$$
 (2.8)

ここで、曲げ成分によるひずみ ϵ_{ib} は、 $y - \lambda = g_i$ の場合に $\epsilon_{it} = 0$ となることから、

$$\varepsilon_{it} = \frac{g_i}{\rho} = \frac{\left(\frac{F_i}{A_i}\right)}{E_i}$$
(2.9)

以上の式及びフックの法則より

$$\sigma_{it} = \frac{F_i}{A_i} = \left\{ \frac{g_i E_i}{(EI)_e} \right\} M \tag{2.10}$$

(3) 接着重ね材の曲げ破壊条件における曲げ強度

複合応力状態の破壊条件式として,曲げと引張りに関する1次条件式を用いる。

$$\frac{\sigma_{bi}}{f_{bi}} + \frac{\sigma_{ti}}{f_{ti}} = 1 \tag{2.11}$$

ここで、*f_{bi}*:製材ラミナの曲げ基準強度(N/mm²) :製材ラミナの引張基準強度(N/mm²) fti

接着重ね材の最大曲げモーメントは下式で表せる。

$$M_{cal} = \left\{ \frac{(EI)_e}{E_i} \right\} \left\{ \frac{2f_{ti}f_{bi}}{t_i f_{ti} + 2g_i f_{bi}} \right\}$$
(2.12)

接着重ね材の等価断面係数を Z_e ,曲げ破壊係数をMORとし, $r_i = f_{ti}/f_{bi}$ とすると下式で算出できる。

$$MOR_i = \left\{ \frac{(EI)_e}{E_i Z_e} \right\} \left\{ \frac{2f_{ti}}{t_i r_i + 2g_i} \right\}$$
(2.13)

① 同一等級構成接着重ね材 E60-F190

ヤング係数の計算値は、製材ラミナのヤング係数として縦振動の測定値をそのまま用いており、試験結果と 近い値を示した。曲げ強さは、143-144の試験体でほぼ一致し、その他は計算値が若干低い結果となった。製 材のマッチングでは、96-95は製材試験をした製材と概ね同じヤング係数で構成された試験体であり、139-141 も製材試験体と同じ区分の材であったことから、用いた製材の強度の影響とは考えにくい結果であった。

同一等級構成	戓	E60-F190		
製品番号		96-95	139-141	143-144
試験結果	Е	7.07	6.09	6.21
	F	38.50	27.88	22.31
製品組合せ	幅	12	12	12
	せい	24	24	24
	最外層			
	外層			
	中間層			
	内層			
ラミナ	幅	12	12	12
	厚さ	12	12	12
積層薄		2	2	2
Ai	cm2	288	288	288
I0	cm4	13824	13824	13824
Z0	cm3	1152	1152	1152
<i>E</i> ₁	kN/mm ²	6.6	6.8	6.2
E 2		6.7	6.8	6.4
f_1+	N/mm ²	26.2	19.6	17.3
f2t		26.2	19.6	17.3
f_1b	N/mm ²	43.6	32.6	28.9
f 2b		43.6	32.6	28.9
$(EI_e)/I_0$	kN/mm ²	6.65	6.79	6.29
E _{ave}	kN/mm ²	6.65	6.79	6.30
E 試験結果	kN/mm ²	7.07	6.09	6.21
MOR1 次式		32.7	24.5	21.7
MOR2 次式	N/mm ²	44.9	33.6	29.8
σ b試験結果		38.5	27.9	22.3

表 4.25 算出結果
② 同一等級構成接着重ね材 E70-F200

ヤング係数の計算値は、試験結果と近い値を示したが、82-84 試験体のみ大きく低い値となった。曲げ強さ は、109-112 試験体で計算値が高くなり、125-124 試験体で試験結果が大幅に高い値を示したが、その他は計 算値が若干低い結果となった。製材のマッチングにおいては、82-84 と製材試験体はおおむね一致しており、 試験結果が大きく下がる要因は見られなかった。また、109-112 と製材試験体のヤング係数はおおむね一致し ていたが、製材試験体と製品の圧縮試験体の含水率が 25%前後と高めであり、製品は破壊時に圧縮縁のひ ずみが発生しており、これらが影響した可能性がある。125-124 と製材試験体のヤング係数もほぼ一致しており、 製材及び製品の破壊に特殊な状態は見られなかったが、製材試験で得た強度が低めになっていることが影響 しているものと考えられる。

表 4.26 算出結果

同一等級構成		E70-F200				
製品番号		82-84	109-112	119-117	125-124	148-149
試験結果	Е	6.76	7.45	7.08	7.07	6.78
	F	28.88	25.38	31.13	34.00	27.88
製品組合せ	幅	12	12	12	12	12
	せい	24	24	24	24	24
	最外層					
	外層					
	中間層					
	内層					
ラミナ	幅	12	12	12	12	12
	厚さ	12	12	12	12	12
積層薄		2	2	2	2	2
Ai	cm2	288	288	288	288	288
10	cm4	13824	13824	13824	13824	13824
Z0	cm3	1152	1152	1152	1152	1152
<u> </u>	kN/mm ²	7.3	7.5	7.0	7.2	7.1
E 2		7.5	7.5	7.5	7.4	7.1
f_1+	N/mm ²	18.5	22.1	22.5	16.6	18.5
f _{2t}		18.5	22.1	22.5	16.6	18.5
f1b	N/mm ²	30.9	36.9	37.5	27.6	30.8
f2b		30.9	36.9	37.5	27.6	30.8
$(EI_e)/I_0$	kN/mm ²	7.40	7.51	7.27	7.31	7.13
E_{ave}	kN/mm ²	7.40	7.51	7.27	7.31	7.13
E 試験結果	kN/mm ²	6.76	7.45	7.08	7.07	6.78
MORI 次式		23.2	27.7	28.2	20.7	23.1
MOR2 次式	N/mm ²	31.9	38.0	38.9	28.5	31.7
σ b試験結果]	28.9	25.4	31.1	34.0	27.9

③ 同一等級構成接着重ね材 E80-F220

ヤング係数の計算値は、試験結果に対し全体的に高くなる傾向を示した。曲げ強さは、全体を通じて計算値 より試験結果が大幅に高い値を示した。製材のマッチングにおいて、167-169 試験体の圧縮縁側で2 区分製 材試験体のヤング係数が低く、188-189 試験体のうち下端の製材と製材試験体では、1 区分製材試験体のヤ ング係数が高い結果となっていた。また、114-118 試験体及び159-161 を構成する製材のヤング係数はそれぞ れ同じ区分であったが、丸太をまたいで構成したこともあり曲げ強度に差が出ており、これらが計算値と試験結 果の差に影響している可能性も考えられる。

同一等級構	成	E80-F220						
製品番号		90-92	98-101	114-118	155-157	159-161	167-169	188-189
試験結果	Е	7.68	8.04	7.73	7.35	7.95	7.83	7.56
	F	39.06	41.13	38.50	45.50	35.94	38.81	35.31
製品組合せ	幅	12	12	12	12	12	12	12
	せい	24	24	24	24	24	24	24
	最外層							
	外層							
	中間層							
	内層							
ラミナ	幅	12	12	12	12	12	12	12
	厚さ	12	12	12	12	12	12	12
積層薄		2	2	2	2	2	2	2
Ai	cm2	288	288	288	288	288	288	288
IO	cm4	13824	13824	13824	13824	13824	13824	13824
Z0	cm3	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152
<i>E</i> ₁	"kN/mm ²	8.0	8.3	8.1	8.2	8.0	8.5	8.1
E_{2}		8.7	8.7	8.0	7.9	8.4	8.2	7.8
f_1+		23.8	26.7	28.5	21.2	22.0	23.0	23.1
<i>f</i> 2t		23.8	23.0	22.5	23.0	33.1	19.8	23.0
f_1b	N/mm ²	39.6	44.5	47.5	35.4	36.6	38.4	38.5
f2b		39.6	38.3	37.5	38.3	55.1	33.0	38.3
$(EI_e)/I_0$	kN/mm ²	8.36	8.52	8.08	8.06	8.19	8.38	7.96
E ave	kN/mm ²	8.37	8.52	8.08	8.06	8.19	8.39	7.96
E 試験結果	kN/mm ²	7.68	8.04	7.73	7.35	7.95	7.83	7.56
MOR1 次式		29.9	28.8	28.1	26.0	28.2	24.7	28.4
MOR2 次式	N/mm ²	41.1	39.6	38.5	35.8	38.5	33.8	39.0
$\sigma b 試験結果$		39.1	41.1	38.5	45.5	35.9	38.8	35.3

表 4.27 算出結果

④ 同一等級構成接着重ね材 E90-F240

ヤング係数の計算値は、試験結果と比べ高くなる傾向を示した。曲げ強さは、計算値より試験結果が大幅に 高い値を示した。製材のマッチングにおいては、同じ丸太から抽出していることもありほぼ一致していた。

同一等級構成	E90-F240	
製品番号		99-100
試験結果	Е	8.42
	F	42.06
製品組合せ	幅	12
	せい	24
	最外層	
	外層	
	中間層	
	内層	
ラミナ	幅	12
	厚さ	12
積層薄		2
Ai	cm2	288
IO	cm4	13824
Z0	cm3	1152
<i>E</i> ₁	kN/mm ²	9.6
E 2		9.8
f_1+	N/mm ²	26.7
f 2t		26.7
f_1b	N/mm ²	44.5
f2b		44.5
$(EI_e)/I_0$	kN/mm ²	9.70
E _{ave}	kN/mm ²	9.70
E 試験結果	kN/mm ²	8.42
MOR1 次式		33.4
MOR2 次式	N/mm ²	45.9
σ b試驗結果		42.1

表 4.28 算出結果

⑤ 非対称異等級構成接着重ね材 E50-F190

ヤング係数の計算値は、試験結果と概ね一致した。曲げ強さは、全体を通じて計算値より試験結果が高い 値を示した。製材のマッチングにおいて、どちらも同じ丸太から抽出しており、マッチングする材の強度性能が 同じ値としている。また、マッチング試験体と製品に用いた製材のヤング係数も大きな差はなかったことから、1 次式の計算値と試験結果のずれにこれらの影響は考えにくく、2次式の方が近い値を示す結果となった。

非対称異等約	汲	E50-F190	
製品番号		105-108	145-146
試験結果	E	5.87	4.81
	F	29.44	27.19
製品組合せ	幅	12	12
-	せい	24	24
-	最外層		
	外層		
	中間層		
	内層		
ラミナ	幅	12	12
	厚さ	12	12
積層薄		2	2
Ai	cm2	288	288
IO	cm4	13824	13824
Z0	cm3	1152	1152
<i>E</i> ₁	kN/mm ²	5.4	4.9
E 2		6.1	5.1
f_1+	N/mm ²	18.7	14.8
f _{2t}		18.7	14.8
<i>f</i> 1b	N/mm ²	31.1	24.6
f2b		31.1	24.6
$(EI_e)/I_0$	kN/mm ²	5.74	4.97
E _{ave}	kN/mm ²	5.76	4.98
E 試験結果	kN/mm ²	5.87	4.81
MOR1 次式		23.5	18.5
MOR2 次式	N/mm ²	32.5	25.4
$\sigma b 試験結果$		29.4	27.2

表 4.29 算出結果

⑥ 非対称異等級構成接着重ね材 E60-F210

ヤング係数の計算値は、試験結果と概ね一致する結果を得た。曲げ強さは、全体を通じて計算値より試験 結果が高い値を示したが、他の構成と比べると比較的近い値を示していた。製材のマッチングにおいて、同じ 丸太から抽出したもの、異なる丸太から抽出したものが混在しているが、計算値と試験結果の曲げ強さに最も 差が出た 107-111 試験体でも製品に用いた製材のヤング係数と製材試験体のヤング係数はおおむね一致し ていた。破壊性状についても、製材-製品間で大きな差はなかった。

非対称異等級		E60-F210				
製品番号		85-87	94-91	107-111	137-138	181-179
試験結果	Е	6.12	5.90	7.06	6.92	6.72
	F	31.44	35.81	36.56	31.00	30.81
製品組合せ	幅	12	12	12	12	12
	せい	24	24	24	24	24
	最外層					
	外層					
	中間層					
	内層					
ラミナ	幅	12	12	12	12	12
	厚さ	12	12	12	12	12
積層薄		2	2	2	2	2
Ai cm2		288	288	288	288	288
IO	I0 cm4		13824	13824	13824	13824
Z0	cm3	1152	1152	1152	1152	1152
<u> </u>	kN/mm ²	6.5	5.0	6.7	6.7	5.5
E ₂		7.3	7.9	7.4	7.0	8.5
f_1+	N/mm ²	22.2	26.2	18.7	20.8	21.3
f_2t		22.2	23.8	22.1	20.8	21.6
f_1b	N/mm ²	37.0	43.6	31.1	34.6	35.5
f2b		37.0	39.6	36.9	34.6	36.0
$(EI_e)/I_0$	kN/mm ²	6.90	6.23	7.03	6.84	6.76
E _{ave}	kN/mm ²	6.92	6.46	7.05	6.84	7.00
E 試験結果	kN/mm ²	6.12	5.90	7.06	6.92	6.72
MOR1 次式		27.9	30.2	24.4	26.0	27.4
MOR2 次式	N/mm ²	38.6	42.4	33.3	35.8	38.5
σ b試驗結果		31.4	35.8	36.6	31.0	30.8

表 4.30 算出結果

⑦ 非対称異等級構成接着重ね材 E70-F220

ヤング係数の計算値は、試験結果と概ね一致する結果を得たが、116-113 試験体及び 130-132 試験体で試 験結果が 1 区分程度低下する傾向がみられた。曲げ強さは、全体を通じて計算値より試験結果が高い値を示 し、175-177 の低強度側試験体のみほぼ一致する結果となった。製材のマッチングにおいては、⑥同様に同じ 丸太から抽出したもの、異なる丸太から抽出したものが混在しているが、116-113、130-132 ともに同じ丸太から の抽出で製材試験体と概ね変わらないヤング係数であった。173-171 は 2 丁取りであり、製材試験体が製品用 の製材と比べ 1 区分ヤング係数が高い材を用いてことから、MOR の一次式で概ね近い値が算出されたものと 考えられる。

表 4.31 算	出結果
----------	-----

非対称異等	級	E70-F220									
製品番号		102-104	116-113	122-121	127-129	130-132	134-135	151-153	173-171	175-177	183-185
試験結果	Е	7.85	7.33	7.64	7.30	6.09	7.47	7.00	6.60	8.26	7.18
	F	36.94	43.50	38.94	43.19	30.69	38.13	29.56	33.25	29.75	38.06
製品組合せ	幅	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	せい	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	最外層										
	外層										
	中間層										
	内層										
ラミナ	幅	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	厚さ	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
積層薄		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Ai	cm2	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288
10	cm4	13824	13824	13824	13824	13824	13824	13824	13824	13824	13824
Z0	cm3	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152	1152
E 1	kN/mm ²	8.7	7.8	7.0	7.3	6.8	7.8	6.5	8.0	7.7	6.5
E 2		7.7	8.4	7.9	7.9	7.9	8.4	8.3	6.9	8.6	8.5
f _{1t}	N/mm ²	23.0	28.5	20.8	28.1	19.6	22.5	20.2	28.9	19.6	22.9
f 2t		23.0	28.5	20.8	28.1	20.6	22.5	17.4	30.0	19.1	24.5
f.1h	N/mm ²	38.3	47.5	34.6	46.8	32.6	37.5	33.6	48.1	32.6	38.1
f2b		38.3	47.5	34.6	46.8	34.3	37.5	29.0	50.0	31.8	40.8
$(EI_e)/I_0$	kN/mm ²	8.20	8 09	7.45	7.58	7 29	8.05	7.31	7.45	8.12	7.39
E ave	kN/mm ²	8.22	8.10	7.47	7.59	7.32	8.06	7.40	7.47	8.14	7.50
E 試験結果	kN/mm ²	7.85	7.33	7.64	7.30	6.09	7.47	7.00	6.60	8.26	7.18
MORI 次式		27.1	35.8	26.1	35.2	25.9	28.2	22.0	33.9	24.0	31.0
MOR2 次式	N/mm ²	37.5	49.3	36.1	48.6	35.5	38.9	30.6	46.8	33.1	43.1
σ b試験結果		36.9	43.5	38.9	43.2	30.7	38.1	29.6	33.3	29.8	38.1

⑧ 非対称異等級構成接着重ね材 E80-F240

ヤング係数の計算値は、83-86 試験体で試験体の方が大きく低下し、165-163 試験体は近い値を得た。曲げ 強さは、83-86 試験体で1次式の計算値と概ね一致したが、165-163 では2次式の方が近くなった。製材のマ ッチングにおいては、どちらも異なる丸太から抽出しているが、83-86 のうち 86 は丸太内でヤング係数の区分 がばらついており、86 は製材試験体と比べ2区分高いヤング係数となっていることにより計算値が高くなってい ると考えられる。また、曲げ強さで1次式とよく合うのも製材試験体の強度が2区分低いことが要因として挙げら れる。165-163 試験体は、2 丁取りということもあり製材試験体と近いヤング係数のもので構成されており、強度 に関しても、他の構成・区分の試験体の比較と同様の傾向がみられたものと考えられる。

非対称異等約	汲	E80-F240	
製品番号		83-86	165-163
試験結果	E	6.99	8.29
	F	29.81	44.25
製品組合せ	幅	12	12
	せい	24	24
	最外層		
	外層		
	中間層		
-	内層		
ラミナ	幅	12	12
	厚さ	12	12
積層薄		2	2
Ai	cm2	288	288
I0	I0 cm4		13824
Z0	cm3	1152	1152
<u> </u>	kN/mm ²	7.2	7.9
Е 2		8.9	9.3
f_1+	N/mm ²	18.5	25.3
f 2t		22.2	22.9
<i>f</i> 1b	N/mm ²	30.9	42.1
f2b		37.0	38.1
$(EI_e)/I_0$	kN/mm ²	7.96	8.56
E _{ave}	kN/mm ²	8.03	8.61
E 試験結果	kN/mm ²	6.99	8.29
MORI 次式		25.4	28.9
MOR2 次式	N/mm ²	34.4	39.9
$\sigma b 試驗結果$		29.8	44.3

表 4.32 算出結果

6.2 製品性能と計算値の検証結果

製品の試験結果と計算値をグラフにて示すことで、全体的な傾向を再度確認する。

- ヤング係数は、同一等級と非対称異等級ともに概ね近い値を示したが、試験の方が低めに出る傾向が みられた。計算値は縦振動で個別に測定したヤング係数を用いて算出しており、製品ヤング係数に多 少の幅がみられたが、試験結果も同程度のばらつきとなっていた。
- ・ 曲げ強さは、試験結果が計算値よりも高くなる傾向があった。1次式の計算値としてあれば製品性能を 満足する傾向にあることが確認されたが、2次式の方が試験結果とよく合うものも多くあることが確認され た。同じ区分でも製材にばらつきがあるのと同様に製品もばらつく傾向があったが、今回試験した心去り 製材の品質が担保されていれば、十分計算値で評価可能であることが確認された。





非対称異等級 E50-F190 非対称異等級 E60-F210 35 40 35 30 • 30 25 (zmm/N)25 15 15 10 (zmm/N)を能行曲 15 • • 10 10 ● 試験結果 5 5 ● 計算値 0 0 0.00 2.00 2.00 4.00 6.00 8.00 10.00 0.00 4.00 ヤング係数(kN/mm²) ヤング係数(kN/mm²)



•

....

•

6.00

● 試験結果

● 計算値

8.00

10.00

図 4.40 非対称異等級結果比較

7. まとめ

■製材品質について

心去り材で製造した接着重ね材は、心持ちの接着重ね材と比べ、材面に大径材ならではの特殊な形状の節 や入り皮などの欠点が生じることはあったが、接着性能が十分担保されていれば現行の接着重ね材と同等の性 能を確保することが可能であることが確認できた。

■曲げ性能と理論式について

曲げ試験では、節などの欠点の少ない材での試験であったこともあり、試験結果が計算値に比べ十分に高い 性能を有することが確認された。計算値のうちヤング係数は高めに算出される傾向があり、曲げ強さは1次式で 算出すると低めに、2次式で算出すると低めから少し高めに算出される傾向があった。今後、性能に影響するよう な欠点を考慮した試験体や、適切な曲げスパンを取った試験体について検討していく必要がある。

■接着性能に関して

品質確保の観点では、接着の剝離試験で多くの NG が生じた。これは、心去り材の特徴を考慮した接着品質 には、心持ち材で考慮している項目のみでは対応しきれていない可能性があること、全ての試験体を一度に処理 したことから全体をうまく管理できていなかったことも影響していると考えられた。

今後多く要望が挙げられる可能性が高い、大径材から切り出した心去り材を利用した接着重ね材の製造と性 能の評価に関して、検証を進めていきたい。

第5章 大径材製材の方向性と課題

本章では、事業の成果をふまえて大径材製材の今後の方向性と課題について考察し、報告のまとめとさせていただきたい。

1. 大径材製材の方向性

表 5.1 に、我が国の製材工場の工場数および従業者数の推移を示す。近年、製材工場数は 減少を続けており、令和3年には4,000工場を下回った。工場の規模別では、出力300kW未 満の比較的中小規模な製材工場の減少割合が、出力300kW以上の比較的大規模な製材工場の 減少割合と比較して大きくなっている。一方、製材工場数の減少に伴い製材工場従業者の総 数も減少を続けているものの、1工場当たりの従業者数はこの10年間で増加傾向に転じてい る。これらのことは製材工場の大規模化が進んでいることを示しているが、出力300kW未満 の製材工場数は依然として全工場数の約90%を占めている。

こうした製材工場の実態と現在供給が増加している大径材は一般材が主体であることをふ まえると、生産品目をある程度絞って製材生産の効率化を図り、また、量産化による安定供 給を目指すことが必要であると考えられ、今後の大径材製材の方向性として、当面以下のよ うなパターンが想定される。

① 少品目少量生産型

需要が特に少ない末口径 36cm 以上の大径材から心去り平角や心去り正角等の大断面のひ き角製材品を生産する。こうした製材品の生産においては木取りがやや複雑になり、大規模 製材工場を中心に普及している高性能なツイン帯鋸盤での製材が難しいことから、送材車付 き帯鋸盤の保有率が高い中小規模製材工場が当面の生産の担い手になると考えられる。

		製材工場数				1工場当
	7.5kW以上 ~75.0kW未満	75.0kW以上 ~300.0kW未満	300.0kW以上	合計	(人)	従業者数 (人)
平成15年	6, 874	2, 550	496	9, 920	58, 593	5.9
平成16年	6, 479	2, 444	497	9, 420	55, 118	5.9
平成17年	6, 189	2, 334	488	9, 011	49, 159	5.5
平成18年	5, 787	2, 215	480	8, 482	45, 389	5.4
平成19年	5, 344	2, 078	483	7, 905	42, 127	5.3
平成20年	4, 919	1, 990	469	7, 378	38, 260	5. 2
平成21年	4, 521	1, 890	454	6, 865	34, 970	5. 1
平成22年	4, 282	1, 837	450	6, 569	33, 479	5. 1
平成23年	4, 058	1, 743	441	6, 242	32, 482	5. 2
平成24年	3, 802	1, 683	442	5, 927	31, 638	5.3
平成25年	3, 615	1, 643	432	5, 690	31, 124	5.5
平成26年	3, 455	1, 597	417	5, 469	30, 323	5.5
平成27年	3, 239	1, 551	416	5, 206	29, 110	5.6
平成28年	3, 030	1, 491	413	4, 934	28, 057	5.7
平成29年	2, 924	1, 466	424	4, 814	—	-
平成30年	2, 750	1, 405	427	4, 582	—	—
令和元年	2, 583	1, 370	429	4, 382	—	—
令和2年	2, 414	1, 261	440	4, 115		
令和3年	2, 100	1, 322	526	3, 948	—	—

表 5.1 製材工場数、従業者数の推移

注) 平成29年以降は従業者数に関する統計データは取られていない。

資料:木材需給報告書(農林水産省)

② 少品目量産型

無人機のツイン帯鋸盤については、現在製材機械メーカーによって大径材に対応した改良・ 開発が進められている。こうした新たに開発された製材機械を導入し、大径材から間柱、枠 組壁工法用部材等のひき割類を量産する方式で、原料調達や設備投資の面から、量産型の製 材生産は大規模製材工場が担い手の中心になると考えられる。

2. 大径材製材の課題

本事業の製材試験の結果からも示されるように、送材車付き帯鋸盤を用いて大径材から心去り 平角や心去り正角を製材する場合、挽き材の回数も多くなり製材能率が上がらないことが課題と なっている。今後は、送材車付き帯鋸盤の高性能化を図ることにより、大径材から大断面の製材 品を採材する場合の生産性の向上が期待される。これにより、例えば、送材車付き帯鋸盤と無人 機のツイン帯鋸盤の2種類の製材ラインを有する工場では、原木の選別を適切に行うことにより (例:高ヤング係数、低含水率の原本→ひき角類の生産、低ヤング係数、高含水率の原本→ひき割 り類の生産)多品目量産型の製材生産も可能となる。

原木のヤング係数による製材前の選別に関しては、要求される強度性能を有する製磁品の 生産に有効なことが本事業の結果から確認できた。製材品の強度性能に対する消費者ニーズ は高まっているが、原木の選別についてはその実施場所やコストの負担構造など、効率的な 仕組み作りが必要である。

ハウスメーカーや工務店を対象とした調査結果¹によれば、木造住宅の横架材における国 産材(製材)の利用割合は、ハウスメーカーでは2%であるのに対し、工務店では50%であり、 半数が国産材製材品であるとされている。工務店など無垢の製材品を指向する消費者は、大 径材から生産される大断面の製材品の有望な仕向け先と思われるが、横架材は製材品の寸法 が多種多様であり、量的な供給面でも中小規模製材工場が生産の担い手の場合には課題があ る。また、大断面の製材品の効率的な乾燥技術開発も重要な課題である。今後は、産学官が 連携し、技術的な課題の解決と、乾燥材生産の共同化など安定供給体制の構築に向けた取り 組みを進めることが重要と考えられる。

79