

接着重ね梁(ツインビーム)の開発

—カラマツ接着重ね梁の製造と曲げ強度性能—

吉田孝久・伊東嘉文・橋爪丈夫

カラマツ間伐材の利用方法として、人工乾燥された心持ち無背割り正角数本を積層接着した接着重ね梁について検討した。その結果、心持ち無背割り正角(重ね梁を構成する部材:エレメント)の乾燥では、高温セット法により材面割れの少ない乾燥が可能であった。しかし、カラマツ特有のねじれの発生が大きく、歩止まりの点で課題を残した。

120℃で乾燥した正角2本を積層接着した接着重ね梁(ツインビーム)の曲げ試験の結果は、曲げヤング係数(MOE)と曲げ強度(MOR)の平均値は、それぞれ10.32 kN/mm²と35.3N/mm²であった。MOEについては、エレメントの適正な組合せにより、MOEの安定した材を得ることができた。また、MORについては、ややバラツキが見られ、国土交通省告示で示されている「カラマツ無等級材の基準強度(MOR)26.7N/mm²」を下回った材は50本中4本存在した。

最下部にカラマツ高品質ラミナを1枚接着した強化ツインビームでは、MOEの平均値が10.83 kN/mm²、MORが43.6N/mm²となり、曲げ強さを大幅に向上させることができた。

キーワード:カラマツ, 接着重ね梁, ツインビーム, 強化ツインビーム, 高温セット法

1 はじめに

戦後植えられてきたカラマツをはじめとする、アカマツやスギさらにヒノキと言った針葉樹は、長野県の主要人工林樹種であり、これら間伐材の利用開発は林業や林産業の発展にとって、極めて重要な課題となっている。

特にカラマツにおいては、長野県を代表する樹種であり、その造林面積も民有林の50%以上を占めていることから、その利用拡大への期待は大きい。カラマツ間伐材の利用は、以前より土木材を中心に行われてきたが、乾燥技術の開発と共にその利用範囲を拡大してきた。昭和57年の県立高校体育館への壁板使用を皮切りに、現在では集成材や無垢の柱材等、大型建築物の構造材料としてその地位を徐々に固めつつある。

このような中で、心持ち無背割り正角の利用が高温乾燥技術の開発により可能となったことから、これら心持ち正角を複数組合せた「接着重ね梁」への利用を検討した。

既往の接着重ね梁についての試験例はそれほど多くはないが、例えば栃木県木材業協同組合連合会では、1996年にスギの遠赤外線燻煙熟処理材を製材・乾燥して心持ち合わせ梁を製造し強度性能を確認している¹⁾。この時の合わせ梁を構成する正角の乾燥は、低温除湿乾燥と天然乾燥を行っており、乾燥日数や他の乾燥方法を採用した場合の欠点の発生状況において検討項目を残している。

また平嶋らは、2000年にスギ未乾燥材を用いた

3本重ねの接着重ね梁を製造し、これらの接着力試験と曲げ試験及びクリープ試験を実施している²⁾。いずれも僅かな本数の試験ではあるが、実用の可能性は高いと評価している。日本建築学会の「木質構造設計ノート」³⁾には、接着重ね梁の定義や製造方法等が記されている。

本試験においては、カラマツ間伐材から製材された心持ち無背割り正角(以下エレメントという)を、割れの抑制や乾燥時間の短縮の点から有効とされる高温セット法により人工乾燥し、これらを2本或いは3本を重ねて接着積層させることにより、寸法安定性の高い、また強度性能が確保された梁材「接着重ね梁」(以下2本重ね材をツインビーム、3本重ね材をトリプルビームと呼ぶ)を開発することを目的とした。

なお、本報告は林野庁国庫補助大型プロジェクト研究「地域材を利用した高信頼性構造用材の開発」(1998~2002)で行った研究を主にとりまとめたものである。

2 試験方法

第一段階として、短時間で材面割れの少ない、また強度劣化の少ないエレメントの適正な乾燥方法を確立するため乾燥スケジュールの検討を行った。

第二段階として、安定した強度性能を得るため、2本のエレメントの組合せを考慮しながら、ツインビームを作製し、曲げ強度性能を把握した。

試験全体の流れを図-1に示した。

接着重ね梁(ツインビーム)の開発

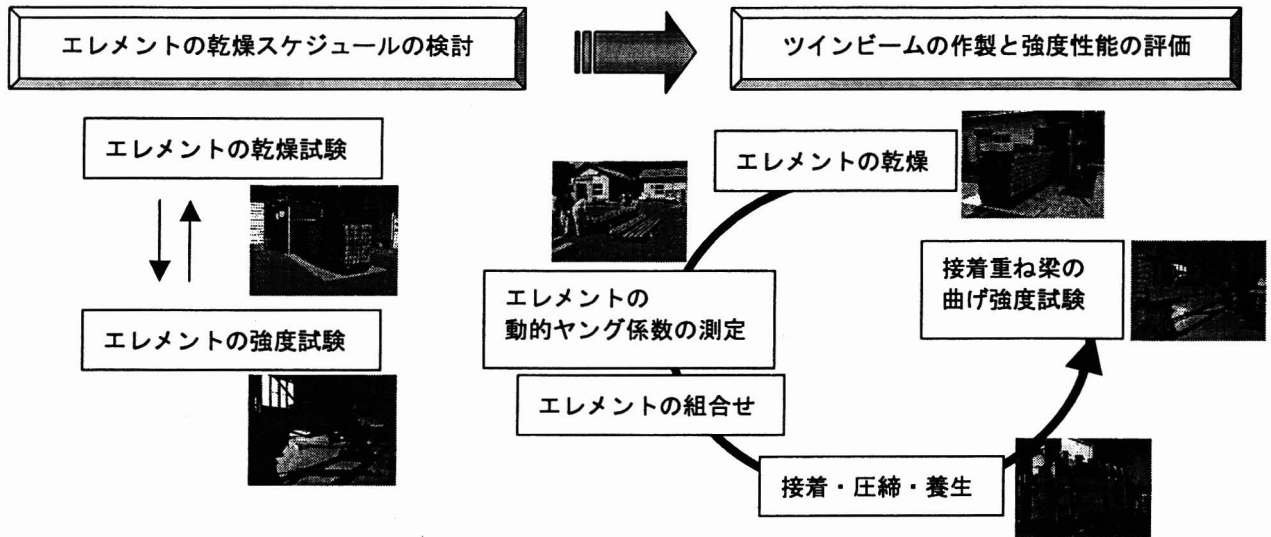


図-1 試験の流れ

2.1 供試材

長野県南信地区産の末口径 16~18 cm, 長さ 4 m のカラマツ丸太から製材された, 120mm 心持ち無背割り正角を供試材とした。

2.2 エレメントの乾燥試験と強度試験

エレメントの人工乾燥は, (株)新柴設備製の高温型蒸気式木材乾燥装置 (収容約 3 m³) を使用して行った (写真-1)。乾燥スケジュールは表-1, 2, 3 に示した高温セット法を採用したスケジュールとした。乾燥温度による強度的差異を把握するため, 乾燥温度は最高温度を 130℃と 120℃の 2 条件とし, さらにコントロールとして天然乾燥を加え, エレメントの曲げ強度試験を実施した。

乾燥前にエレメントの長さ, 幅, 厚さ, 重量を測定した。また乾燥終了後に幅, 厚さ, 重量, 含水率 (全乾法), 水分傾斜, ねじれ, 曲がり, 材面割れ, 内部割れの測定を行った。含水率測定用試

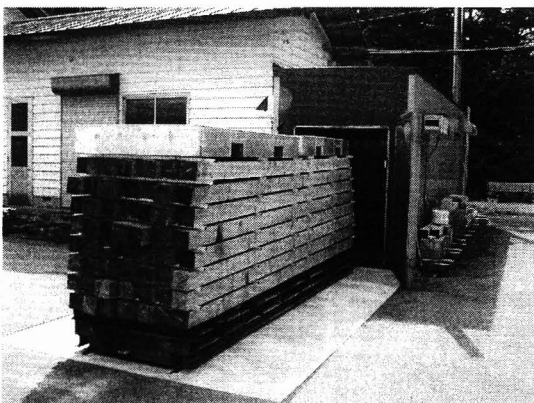


写真-1 エレメントの乾燥 (蒸気式高温乾燥)

験片は, 長さ方向に片木口より 1 m 入った位置で採取し, 水分傾斜測定用試験片はその隣接した位置より採取した。残りの 3 m は曲げ強度試験用とした。

材面割れは, 木口より 10cm までの割れと, 割れ幅 1 mm 以下の割れは除外して割れ長さを測定した。同一材面に並行して複数の材面割れが存在

表-1 乾燥スケジュール① (130℃乾燥)

| 乾燥時間 (h) | 乾球温度 (°C) | 湿球温度 (°C) | 備考 |
|--------------|-----------|-----------|----------|
| α^*+6 | 95 | 95 | 蒸煮 |
| 48 | 130 | 80 | 高温セット+乾燥 |
| 24 | - | - | クーリング |

*乾燥装置内の温度が 90℃に達するまでの時間

表-2 乾燥スケジュール② (120℃乾燥)

| 乾燥時間 (h) | 乾球温度 (°C) | 湿球温度 (°C) | 備考 |
|--------------|-----------|-----------|----------|
| α^*+6 | 95 | 95 | 蒸煮 |
| 60 | 120 | 80 | 高温セット+乾燥 |
| 24 | - | - | クーリング |

*乾燥装置内の温度が 90℃に達するまでの時間

表-3 乾燥スケジュール③ (120℃乾燥)

| 乾燥時間 (h) | 乾球温度 (°C) | 湿球温度 (°C) | 備考 |
|--------------|-----------|-----------|----------|
| α^*+6 | 95 | 95 | 蒸煮 |
| 48 | 120 | 80 | 高温セット+乾燥 |
| 48 | 107 | 67 | 乾燥 |
| 24 | - | - | クーリング |

*乾燥装置内の温度が 90℃に達するまでの時間

する場合は1本の割れと見なし4材面の割れの総延長を材面割れ長さとした。

内部割れは、含水率測定用試験片にて確認した。ねじれは、スパン4mの平面上に3点を固定し、残り1点の平面からの浮き上がりを計測した。

曲がり、スパン4mでの最大矢高を計測した。

曲げ強度試験は、(株)島津製作所製 UH-1000kNを使用し、スパン270cmの3等分点4点荷重方式により実施し、曲げヤング係数(MOE)と曲げ強度(MOR)を定法により算出した。

なお、高温セット法とは、乾燥過程で乾燥初期に高温低湿処理を行うことにより、材表面に引張りのドライグセットを与え、乾燥中期から末期にかけてこれが圧縮応力に転じることにより、材面割れを抑制する乾燥方法である。

2.3 ツインビームの作製と曲げ強度試験

エレメントの試験とは別に、乾燥を終了したエレメントをモルダにより108mm正角に仕上げた。

仕上げたエレメントは、(株)小野測器製FFTサウンドアナライザーを用い、縦振動法による動的ヤング係数(Efr)を測定した(図-3)。測定後、ヤング係数の高い順に順位化し、2本のエレメントの組合せを検討した。

2本のエレメントの組合せは基本的に、作製時の1ロット(1回の乾燥)内でEfrが一番高い材と一番低い材、二番目に高い材と二番目に低い材という具合に組合せ、出来上がったツインビームのヤング係数が計算上同一になるよう設定した。

ツインビームの住宅使用時には、より強度を得るため、ヤング係数が高いエレメントが下側に配置されることを前提に考えた。その組合せ例を表-4に示した。

組合せを決定した後、接着剤を塗布しコールドプレスで圧縮した。接着は水性高分子イソシアネート系接着剤(大鹿振興:PIボンドNo6000)を使用し、手作業でローラーにより塗布した。塗布量は250g/m²、圧縮圧は10kgf/cm²で24時間以上常温で圧縮接着した(写真-2)。

最終仕上げとして、図-4に示す様に幅105mm、高さ210mmのツインビームにモルダにて仕上げた。



図-3 FFTサウンドアナライザーによる動的ヤング係数(Efr)の測定

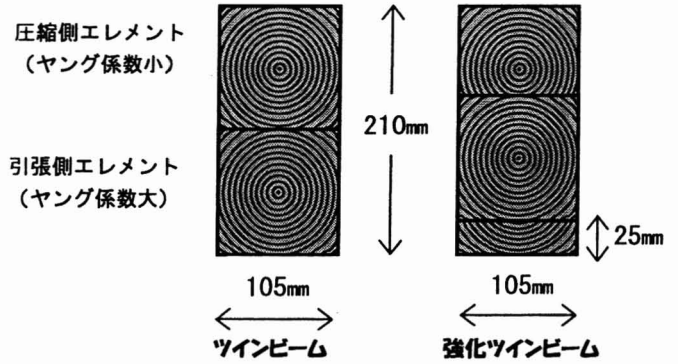


図-4 作製したツインビームの概念図

表-4 エレメントの組合せ例

| | 動的ヤング係数 (kN/mm ²) | | |
|--------------|-------------------------------|-----------------------|-------|
| | 引張側エレメント (下側エレメント) | 圧縮側エレメント (上側エレメント) | 平均 |
| ツインビーム NO. 1 | 12.94 | 8.34 | 10.64 |
| ツインビーム NO. 2 | 12.85 | 8.28 | 10.57 |
| ツインビーム NO. 3 | 11.75 | 9.03 | 10.39 |
| ツインビーム NO. 4 | 11.02 | 9.36 | 10.19 |
| ツインビーム NO. 5 | 10.98 | 9.84 | 10.41 |
| ツインビーム NO. 6 | 10.21 | 10.06 | 10.14 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |

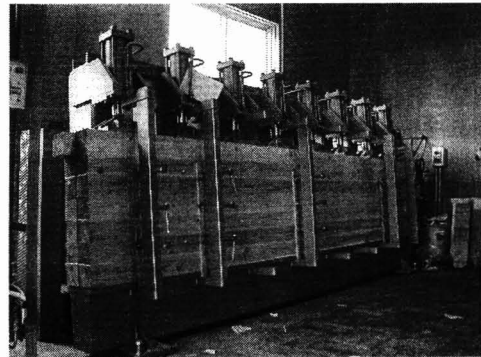


写真-2 コールドプレスにより圧縮

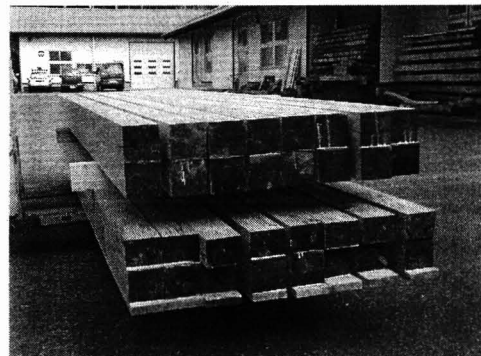


写真-3 上段: ツインビーム
下段: 強化ツインビーム

また、一部について強度性能の向上をねらって、上部に配置する圧縮側エレメントを 25mm 削り、下部引張側へ Efr が 14~17 kN/mm² のカラマツ高品質ラミナ (25mm 厚) を配置した強化ツインビームを作製した (図-4)。

なお、130℃乾燥材をエレメントとしたツインビームは Efr の高いもの同士、低いもの同士の組合せも一部作製した。

ツインビームは全 76 体、強化ツインビームは全 31 体を作製した。

曲げ強度試験は、全スパン 378cm の 3 等分点 4 点荷重方式で行い、定法により MOE と MOR を算出した。荷重負荷に際しては、ツインビームを構成する 2 本のエレメントのうち、Efr の高い方が引張り側 (下側) になるように設置した。

3 試験結果

3.1 エレメントの乾燥

3.1.1 乾燥仕上がり含水率

カラマツ心持ち材を利用する場合、その阻害因子となるものの一つにねじれの発生がある。このねじれの大きさは繊維傾斜に依存し、未成熟材ほど、また髓に近い部分ほど繊維傾斜は大きい⁴⁾。言い換えれば、髓に近い部分ほどねじれは大きい。

従って、心持ち材の乾燥過程で、ねじれは材中心部の乾燥に伴って発生するものと推測される。

乾燥スケジュール①や②においては、全体の仕上がり含水率は 15% 程度となるものの、材内の水分傾斜を確認すると、材中心部の含水率は依然 20% 以上の材が多く見られた。

乾燥後、修正挽きを行った後に中心部の含水率が高いと、その後の平衡含水率までの養生過程で、前述の理由から、さらにねじれが発生する恐れがあると思われた。

このため試験の後半年度では、材中心部の含水率が 20% を下回ることを目標に、乾燥スケジュール③を採用した。その結果、仕上がり含水率は 10% 程度となり、ほとんどの材の中心部での含水率は 20% を下回った。この場合の乾湿球温度と含水率減少経過の一例を図-4 に、この時の水分傾斜を図-6 に示した。

含水率 (全乾法) は 48 時間経過時にはほぼ 15% を下回り、その後の減少は少なかった。これは、材外層部は既に平衡状態にあるのに対して、材内部の高含水率部分の水分が、非常にゆっくりなスピードで移動し蒸発していったものと推測された。

乾燥スケジュール③での仕上がり含水率範囲

は 8%~14% であった。

水分傾斜については、材表層部では 10% 以下に乾燥され、一方材中心部はおよそ 9%~18% で、ほとんどの材の中心部の含水率は 20% を下回った。中心部の含水率が 20% を下回っていれば、その後のねじれ発生が少ないものと考えられた。この点についてはさらに追求した試験を行う予定である。

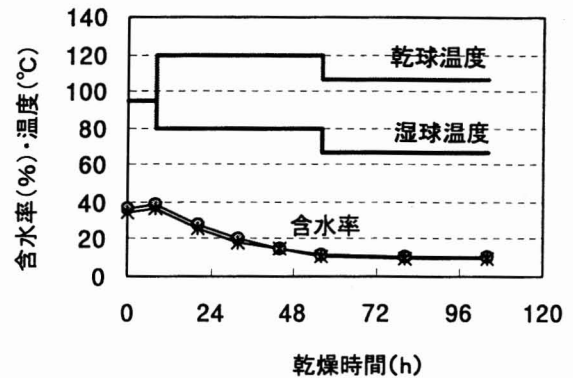


図-5 カラマツ 120mm 角エレメントの乾燥経過

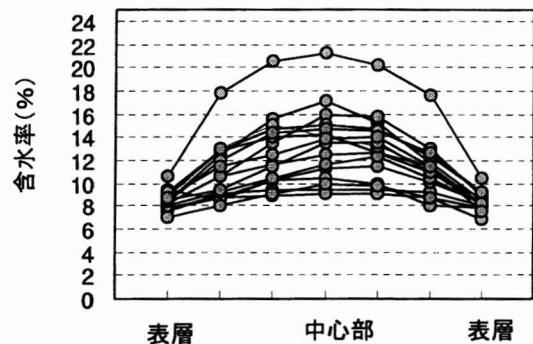


図-6 乾燥後の水分傾斜 (カラマツ 120mm 角エレメント)

3.1.2 乾燥後の形質変化

前項において仕上がり含水率が好結果であったスケジュール③について、乾燥後の形質変化を表-5 に示した。以下の形質変化の検討は、スケジュール③の試験結果について行った。

表-5 エレメントの 120℃乾燥結果 (4m, 120mm 正角)

| 区分 | 全乾法 含水率 (%) | ねじれ (mm/4m) | 曲がり (mm/4m) | 収縮率 (%) | 材面割れ (cm) |
|-----|-------------------|----------------|----------------|------------|--------------|
| AVG | 9.6 | 13.5 | 3.6 | 2.60 | 87 |
| STD | 2.0 | 8.5 | 2.8 | 0.72 | 118 |
| MIN | 7.6 | 0.0 | 0.0 | 1.03 | 0 |
| MAX | 14.8 | 54.0 | 12.0 | 4.92 | 511 |

*材面割れは試験材 1 本当りの長さの延長

*乾燥スケジュール③での結果

*試験材数 282 本

(1) ねじれと曲がり

製品製造過程において、ねじれの発生量は歩止りの点で最も問題となり、モルダ仕上げ時での削り量にかなり影響を与える。特にカラマツ心持ち材の場合は、繊維傾斜が大きく乾燥時のねじれもこれと相関して大きくなり、歩止りへの影響は大きい。

図-7に4m正角のねじれ量を、また写真-4には、乾燥後のねじれの様子を示した。

ねじれの平均は 13.5mm/4m であった。また、乾燥時にはねじれ抑制のため、棧積み上部に死荷重約 4 t を積載したが、試験材の約 2 割の材は 20mm/4m 以上の大きなねじれ量であった。

今回は、製材寸法を仕上げ寸法 105mm に対して 15mm 上乗せした 120mm としたが、モルダ仕上げ時に、ねじれのための削り残しが存在した材もあり、実用的にはさらに 3mm 程度上乗せした製材寸法が必要と思われた。

次に曲がりの発生量について図-8 に示した。

曲がり量は、乾燥スケジュールよりはアテ材の有無或いは芯の位置のずれによる縦収縮の差異に

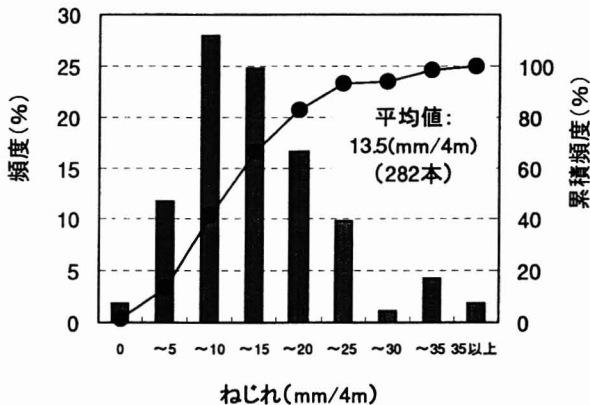


図-7 カラマツ 120mm 角エレメントのねじれ量



写真-4 ねじれのため棧積み全体が右側に傾く（乾燥後の養生）

影響されると思われるが、今回の試験での曲がり量の平均は 3.6mm/4m であった。また、試験材の 90% 以上の材は 10mm 以下の曲がり量であり、この程度のものであればモルダ仕上げでクリアできるものであった。

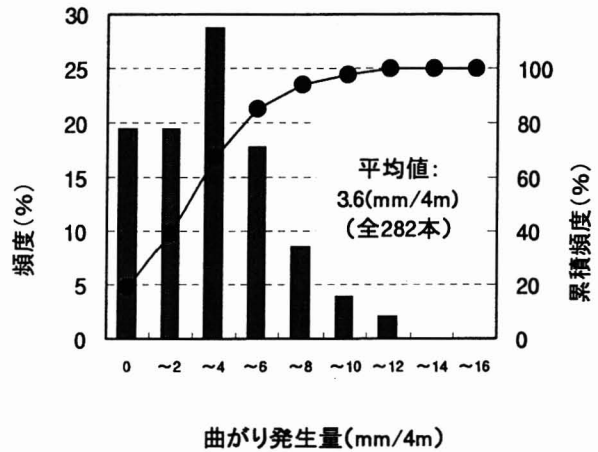


図-8 カラマツ 12mm 角エレメントの曲がり量

(2) 材面割れ・内部割れと収縮率

材面割れは、高温セット法による乾燥のため、割れ幅も小さく、かなり少ない発生量であった。

試験材 1 本当たりの材面割れ総延長で平均 87cm であった。また、材面割れの発生が無い材も、1 回当たりの乾燥で 40% 程度存在した。これは乾燥スケジュール①の 130℃ の乾燥であってもほぼ同様の結果であった。

内部割れは、含水率測定用に切断した材において目視にて確認したが、全てのスケジュールにおいてほとんど存在せず、発生した材でも利用上支障になりそうな大きなものは無かった（写真-5）。

以上のように、材面割れや内部割れの少ないエレメントが生産でき、例えば、材面割れが存在したとしても、この面を重ね合わせることによって外

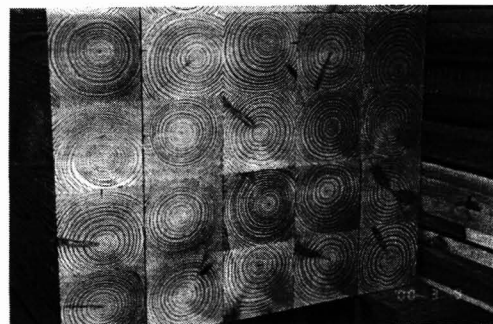


写真-5 乾燥後の内部割れの様子
内部割れは僅かである

観的に割れの無いツインビームを数多く製造できた。

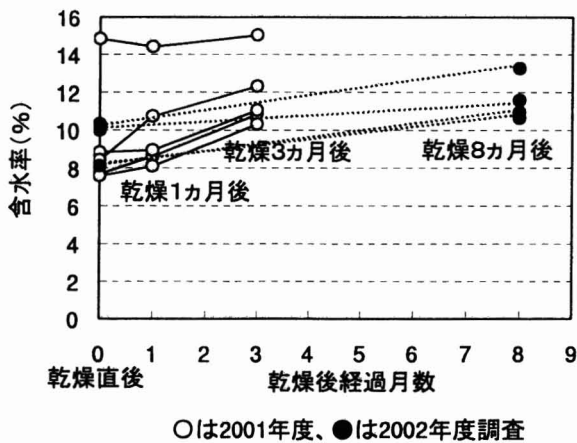
収縮率は、平均が 2.60%で標準偏差が 0.72%であり、収縮による乾燥後の歩減りはおよそ 3mm程度であった。

3.1.3 エレメントの養生中での含水率変化

乾燥後のエレメントは、写真-4 に示す様に屋外の天然乾燥場で数ヶ月間養生を行った。同時に試験材数本について、含水率の変化を観察した。

その結果を図-9 に示した。乾燥スケジュール③の 2001 年度の試験では、乾燥終了後 10%以下の含水率であった 4 本の材は、3 ヶ月の養生期間中に吸湿し、およそ 10~12%の含水率となった。また、乾燥終了後 15%の含水率であった 1 本の材は、3 ヶ月後においても含水率の変化はあまり見られなかった。

一方、2002 年度の試験においては、乾燥終了後 8~10%の含水率であった材は、8 ヶ月の養生期間後にはおよそ 11~13%の含水率となった。



○は2001年度、●は2002年度調査
図-9 養生中のエレメントの含水率変化

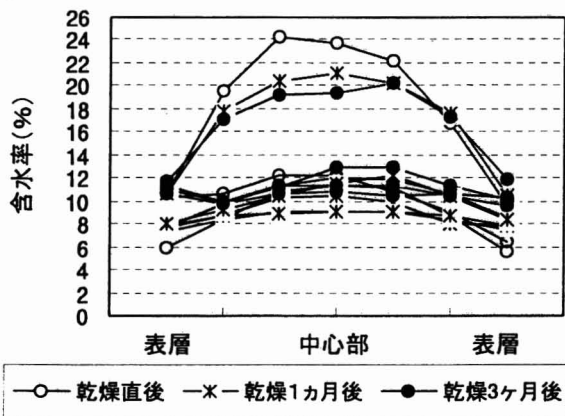


図-10 養生3ヶ月後のエレメントの水分傾斜

これらの結果を既往のデータ⁵⁾と合せて考えると、含水率が安定するまでには、3ヶ月以上の養生が必要であり、また安定する含水率はおよそ 12~13%程度と思われた。

前出の試験材について、養生終了時点での材内水分傾斜を図-10 と図-11 に示した。

図-10 の上部に膨らんだ 3 本の線は、1 本の試験材の測定値を経時的に示しており、この 1 本については材中心部の含水率低下が非常に遅かった。図-10 の残りの試験材と図-11 の試験材については、乾燥後に含水率がおよそ 8%であった材表面層部は、吸湿により 11%程度の含水率となった。材中心部の含水率は 12~15%程度に落ち着き、全体として水分傾斜が緩和された状態となった。

以上のように、水分傾斜の変化からも数ヶ月間の養生期間が必要と思われた。

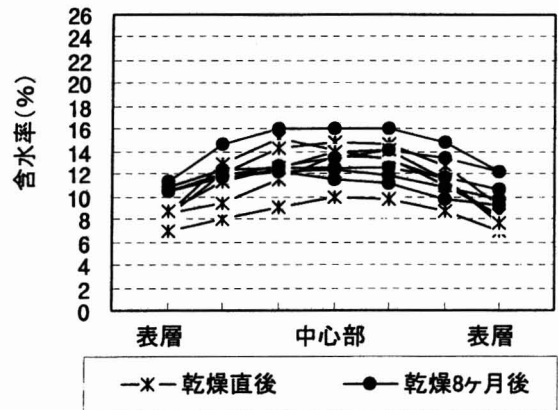


図-11 養生8ヶ月後のエレメントの水分傾斜

3.2 エレメントの曲げ強度性能

乾燥温度別にエレメントの曲げ強度試験の結果を表-6 に示した。またその様子を写真-6 に示した。ここでのデータは、既往の試験値と今回の試験で得られたものを併せて示した。

曲げ強さ (MOR) については、天然乾燥材よりも人工乾燥材が、また人工乾燥材の中でも 120℃乾燥材よりも 130℃乾燥材の方が弱い傾向にあった。しかし、曲げヤング係数 (MOE) についてはほとんど差は認められなかった。

MOE と MOR の関係を図-12 に示した。各乾燥条件ごとに相関関係が認められるが、乾燥温度が高いほど MOR が低くなることが明らかであった。

以上により、乾燥温度が高い方が乾燥時間は短くて済むが、強度的な面からすると乾燥温度が高い方が MOR の低下が大きいことがわかった。

表-6 エレメントの曲げ強度試験結果

| | 曲げ強度 (MOR) (N/mm ²) | | | 曲げヤング係数 (MOE) (kN/mm ²) | | |
|---------|---------------------------------|---------|---------|-------------------------------------|---------|---------|
| | 天然乾燥材 | 120℃乾燥材 | 130℃乾燥材 | 天然乾燥材 | 120℃乾燥材 | 130℃乾燥材 |
| 平均値 | 46.2 | 42.3 | 37.2 | 10.29 | 11.08 | 11.22 |
| 標準偏差 | 11.0 | 8.6 | 9.6 | 1.64 | 1.83 | 1.56 |
| 変動係数(%) | 23.7 | 20.5 | 25.7 | 15.9 | 16.5 | 13.9 |
| 最小値 | 11.3 | 21.2 | 16.2 | 3.51 | 7.35 | 6.54 |
| 最大値 | 69.9 | 61.6 | 65.6 | 14.45 | 15.97 | 16.49 |
| 5%下限値 | 28.2 | 28.0 | 21.4 | 7.60 | 8.08 | 8.65 |
| 試験本数 | 173 | 85 | 249 | 173 | 85 | 249 |

* 5%下限値=平均値-(1.645×標準偏差)



写真-6 エレメントの曲げ強度試験の様子

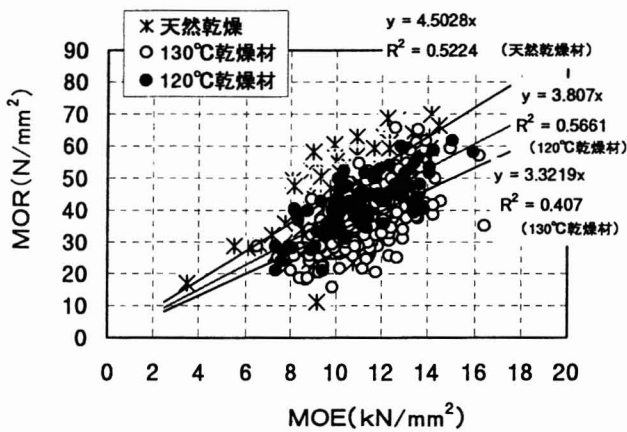


図-12 エレメントのMOEとMORの関係

このようにエレメントの強度は、乾燥温度さらには乾燥時間にも大きく左右されると考えられ、今後、さらに「高温乾燥材の強度と乾燥温度及び乾燥時間との関係」を明らかにする必要がある。

なお、表-6のMORの5%下限値は天然乾燥材が28.2N/mm²、120℃乾燥材が28.0N/mm²、130℃乾燥材が21.4N/mm²であり、国土交通省告示で示されているカラマツの基準強度26.7N/mm²と比較すると、5%下限値でこれを下回るものは130℃乾燥材であった。

3.3 カラマツ接着重ね梁の製造と性能評価

3.3.1 エレメントの組合せ（ツインビームの製造）

ツインビームを製造するため、エレメントの組合せについて検討した。

強度性能の優れた梁材を作るのであれば、1ロットの中からヤング係数の高い材同士を組合せることが考えられるが、こうした場合、残ったエレメントは必然的にヤング係数の低い材となってしまう。これら低い材同士の組合せでは強度性能があまり期待できない梁材となってしまうことが考えられ、こうなると安定した強度性能を確保するといった意味では、全体的にばらつきの大きな梁材となる可能性があった。

そこで、今回作製したツインビームは、乾燥した1ロットのエレメントを全て使い、ばらつきの少ない安定した強度性能を得るという視点から、圧縮側エレメント（上部エレメント）にはヤング係数の低い材、引張側エレメント（下部エレメント）にはヤング係数の高い材を配置して作製した（表-4の組合せ例を参照）。

また、さらなる強度性能の向上を期待した強化ツインビームでは、引張側最下部にEfrが14kN/mm²以上のカラマツ高品質ラミナ（25mm厚）を配置した（図-4、写真-3参照）。

3.3.2 エレメントのEfrの分布

ツインビーム作製に使用した乾燥後のエレメントのEfrの分布を図-13に示した。Efrは7～15kN/mm²に分布し、その平均は11.16kN/mm²であった。

サンプル数は十分ではないが、現在のカラマツ林から得られるEfrの分布をある程度推定できるものと思われた。

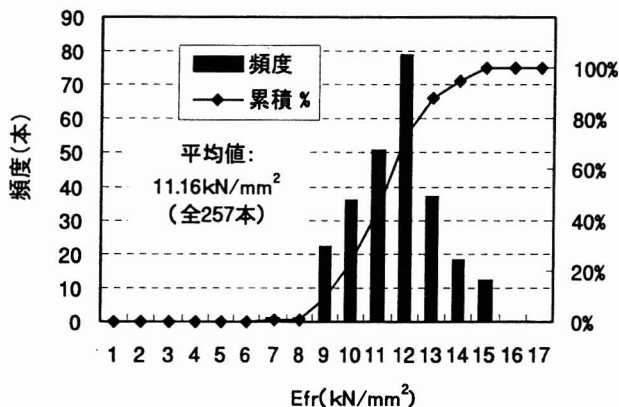


図-13 エレメントのEfrの頻度分布

3.3.3 ツインビームの曲げ強度性能

(1) ツインビームのMOEとMOR

130℃乾燥エレメントを使用したツインビームと120℃乾燥エレメントを使用したツインビーム及び強化ツインビーム(120℃乾燥)の強度試験結果を表-7に示した。また試験の様子を写真-7に示した。

130℃乾燥ツインビームには、その一部に予備試験として行ったEfrの低いもの同士或いは高いもの同士を組合せたツインビームが含まれている。

図-14に130℃で乾燥したエレメントを使用し、Efrの低いもの同士或いは高いもの同士を組合せたツインビーム(△)とEfrの低いものと高いものを組合せたツインビーム(▲)の強度性能を示した。

Efrの低いもの同士を組合せたツインビーム(△)には、MOEが8 kN/mm²台と低い値となる梁も存在した。図からは高いもの同士であってもMOEが低いように思われるが、これは使用したエレメント自体にEfrが12 kN/mm²以上の材が存在しなかったことが原因したと考えられ、もう少しEfrの高いエレメントで構成されたツインビームが存在すれば、傾向がさらにはっきりしたのではないかと思われた。また、同時にツインビームのMOEの範囲も広がり、結果的にMOEのばらつきが大きなものとなることが推測された。

一方、Efrが高いものと低いものとの組合せ(▲)では、ツインビームのMOEのばらつきは少なかった。これは両者エレメントのEfrの平均値が全体的に平均化されたためと判断された。

120℃乾燥ツインビームと強化ツインビームについては、全てをEfrの高いものと低いものとの

組合せとした。これらのMOEの平均値はそれぞれ10.32 kN/mm²、10.83 kN/mm²であり、変動係数が4.8%、5.6%とばらつきが少なく、曲げヤング係数に関しては安定した梁材が作製できた。これは、意図的なエレメントの組合せにより、平均的なMOEを期待したためで当然の結果であった。

また、強化ツインビームのMOEは5%下限値と比較すると、120℃乾燥ツインビームに比べ約3%ほど向上した。

以上のように、Efrの低いもの同士或いは高いもの同士を組合せたツインビームでは、MOEのばらつきが大きくなってしまい、「強度的に安定した材料」といった意味からすると、Efrの高いものと低いものを組合せたツインビームの方が、MOEの安定した材料が得られることが確認できた。

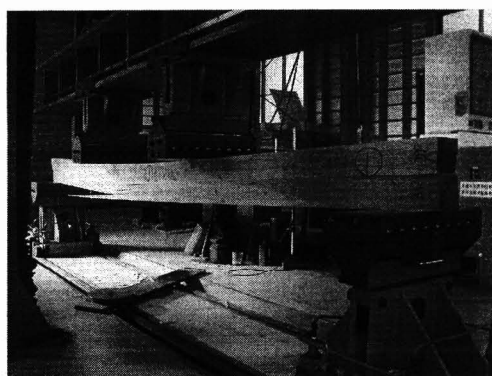
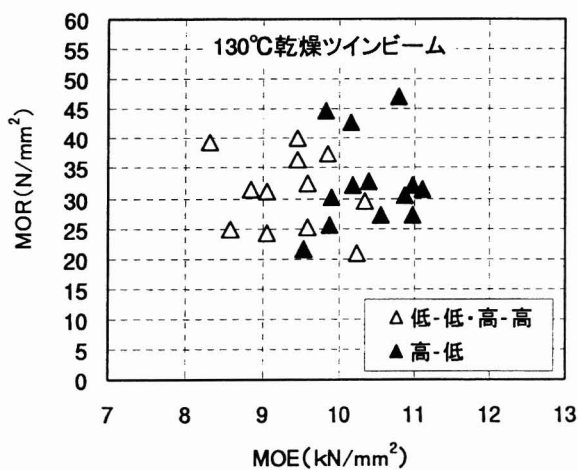


写真-7 ツインビームの曲げ強度試験の様子



(Efrの高いもの同士、低いもの同士の組合せと高いものと低いもの組合せ)

図-14 エレメントの組合せの違いによる130℃ツインビームの強度性能

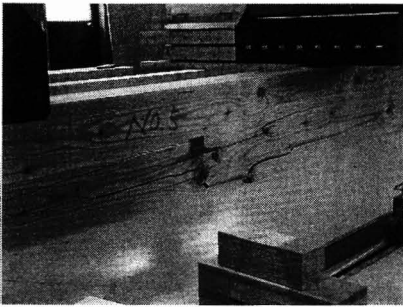


写真-8 ツインビームの破壊の様子
節からの破壊が大部分を占める。



表-7 ツインビームの強度試験結果

| 区 分 | | 130℃乾燥 ツインビーム ¹⁾ | 120℃乾燥 ツインビーム ²⁾ | 強化 ツインビーム ³⁾ |
|------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| MOE (kN/mm ²) | 平均値 | 9.90 | 10.32 | 10.83 |
| | 標準偏差 | 0.77 | 0.50 | 0.60 |
| | 変動係数(%) | 7.8 | 4.8 | 5.6 |
| | 最小値 | 8.32 | 9.44 | 9.63 |
| | 最大値 | 11.12 | 11.79 | 12.34 |
| | 5%下限値 ⁴⁾ | 8.58 | 9.50 | 9.84 |
| | 試験体数(本) | 25 | 50 | 31 |
| MOR (N/mm ²) | 平均値 | 32.0 | 35.3 | 43.6 |
| | 標準偏差 | 6.8 | 6.3 | 6.4 |
| | 変動係数(%) | 21.3 | 17.8 | 14.7 |
| | 最小値 | 20.9 | 24.4 | 22.9 |
| | 最大値 | 47.0 | 45.5 | 54.5 |
| | 5%下限値 | 20.8 | 24.9 | 33.1 |
| | 試験体数(本) | 26 | 50 | 31 |
| 破壊荷重 (kN) | 平均値 | 35.9 | 40.7 | 53.8 |
| | 標準偏差 | 8.0 | 7.7 | 7.6 |
| | 変動係数(%) | 22.3 | 18.9 | 14.1 |
| | 最小値 | 22.2 | 27.0 | 29.7 |
| | 最大値 | 49.5 | 56.9 | 66.7 |
| | 5%下限値 | 22.7 | 28.0 | 41.3 |
| | 試験体数(本) | 26 | 50 | 31 |
| 試験時含水率 (%) | 平均値 | 11.5 | 13.3 | 13.8 |
| | 標準偏差 | 1.8 | 1.6 | 1.5 |
| | 変動係数(%) | 15.8 | 11.9 | 10.7 |
| | 最小値 | 7.8 | 10.0 | 10.7 |
| | 最大値 | 14.7 | 18.7 | 17.3 |
| | 5%下限値 | 8.5 | 10.7 | 11.3 |
| | 試験体数(本) | 26 | 50 | 31 |

注1) 130℃乾燥ツインビームとは、エレメントを最高温度130℃乾燥したツインビーム

2) 120℃乾燥ツインビームとは、エレメントを最高温度120℃乾燥したツインビーム

3) 強化ツインビームとは、120℃乾燥ツインビームに高品質ラミナを1枚接着したツインビーム

4) 5%下限値=平均値-(標準偏差×1.645)

120℃乾燥ツインビームと強化ツインビームの MOR の平均値は、それぞれ 35.3 N/mm²、43.6N/mm² であり、高品質ラミナにより MOR は 2 割程度向上した。しかし、MOR の変動係数はそれぞれ 17.8%、14.7%であり、ややばらつきのある材料となった。

これは破壊形態の観察から、節での破壊が多く見られ(写真-8)、安定性のある材料を得るためには、Efr のみでなく目視等級も MOR を決定する重要な因子になるものと判断された。

国土交通省告示で示されているカラマツ無等級材の基準強度 26.7N/mm² と比較すると、これを下回った材は 120℃乾燥ツインビームでは 50 本中 4 本、強化ツインビームでは 31 本中 1 本であった。

全ツインビームの MOE と MOR の関係を図-15 に示した。

一般に、正角においては MOE と MOR の間には、図-12 に示したエレメントの曲げ強度試験結果でもそうであったように、正の相関関係が強いとされている。しかし、120℃乾燥ツインビームの場合は、図-15 に示すようにエレメントの組合せにより MOE がほぼ 10 kN/mm² 前後にコントロールされており、そのばらつきの範囲が狭いためこの傾向はつかめなかった。

強化ツインビームに関しては、試験本数は少ないもののある程度の相関が見られた。これは引張り側外層の高品質ラミナの MOE が 14~17 kN/mm² の範囲に適度にばらついており、これにより、相関関係が現れたものと思われた。

120℃乾燥ツインビームのみに注目し、MOE が 10 kN/mm² 程度での MOR を推定しようとする、25~45N/mm² の範囲にばらついており、安定した曲げ

強度は得られなかった。これは、前述のとおり心持ち正角では節の出現が多く見られ、これらの節が破壊に起因したためと思われた。また同時に、乾燥温度による節部の強度劣化が正常部と同様に作用したのかという疑問も残った。

(2)ツインビームの強度性能に与えるエレメントの影響

まずツインビームの MOE に与える影響について、それを構成するエレメントの Efr について検討した。

図-16 に引張側エレメントの Efr とツインビームの MOE との関係、及び圧縮側エレメントの Efr とツインビームの MOE との関係を示した。

引張側エレメント及び圧縮側エレメント共に、ツインビームの MOE に与える影響はほとんど認められなかった。

しかし、両者のエレメントの Efr が 10~11 kN/mm² に近づくほど、ツインビームの MOE が向上することが覗える点から、両者に平均的な Efr のエレメントを使用したツインビームの方が、高い MOE を示す可能性があることを示した。

そこで、引張側エレメントと圧縮側エレメントとの Efr の差を求め (ΔE)、この差と両者で構成されたツインビームの MOE との関係を図-17 に示した。その結果、両者の間にはある程度の相関が認められ、引張側エレメントと圧縮側エレメントの Efr の差が小さいほどこれらで構成されたツインビームの MOE は高くなる傾向にあった。

つまり、Efr の高いエレメントと低いエレメントとの組合せでは、同レベルの Efr を組合せる方がツインビームの MOE は高く、計算上での平均 Efr

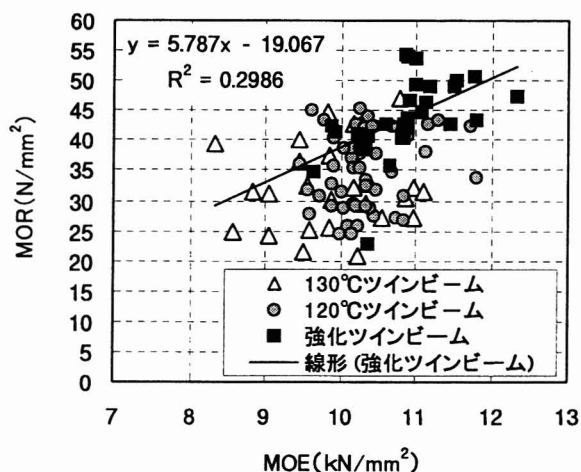


図-15 ツインビームの MOE と MOR の関係

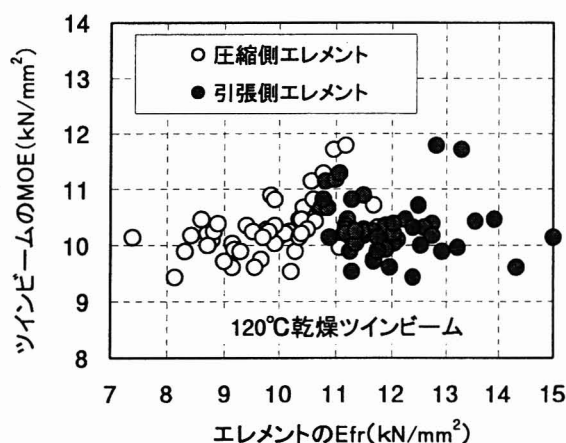


図-16 引張側エレメント、圧縮側エレメントの Efr とツインビームの MOE との関係

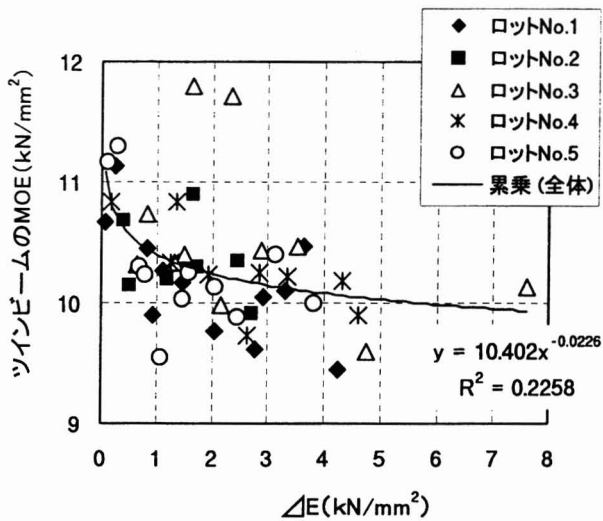


図-17 「引張側元素の Efr と圧縮側元素の Efr との差 ΔE 」とツインビームの MOE との関係

*ロット No はツインビームを作製した回数を示す。それぞれのロットの中で元素の組合せを決めている。

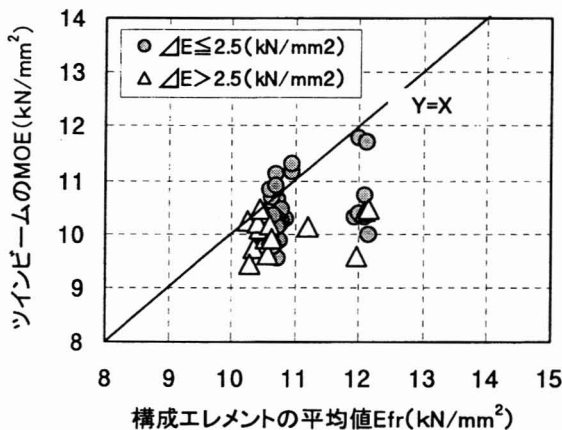


図-18 ツインビーム構成元素の Efr 平均値とツインビームの MOE との関係

* ΔE = 引張側元素 Efr - 圧縮側元素 Efr

に近い値が得られる可能性があることが明らかとなった。

図-18 にはツインビームを構成する元素の Efr の平均値とツインビームの MOE との関係を示した。

全体的には直線 $y=x$ より下方にくるプロットが多かった。また、 ΔE が 2.5 kN/mm^2 以上のプロットは、全てが $y=x$ より下方に存在した。

以上の結果より、ツインビームを作製する場合には、構成する元素の Efr の差が小さいとツインビームの MOE はほぼ Efr の平均値と同値となり、また、Efr の差が大きいと MOE は Efr の平

均値より小さくなる傾向が認められた。

このことは等価断面法からも確認された。

次にツインビームの MOR に与える影響について、それを構成する元素の Efr について検討した。図-19 に元素の Efr とツインビームの MOR との関係を示した。

引張側元素の Efr が高いからといって、或いは圧縮側元素の Efr が高いからといって、これを用いたツインビームの MOR が高くなることはなく、両者の関係は認められなかった。

ツインビームの MOR が $25 \sim 45 \text{ N/mm}^2$ の範囲にばらついている中で、MOR の推定には、Efr の他に元素の節、密度、年輪幅と言った材質的因子の分析がさらに必要と思われた。

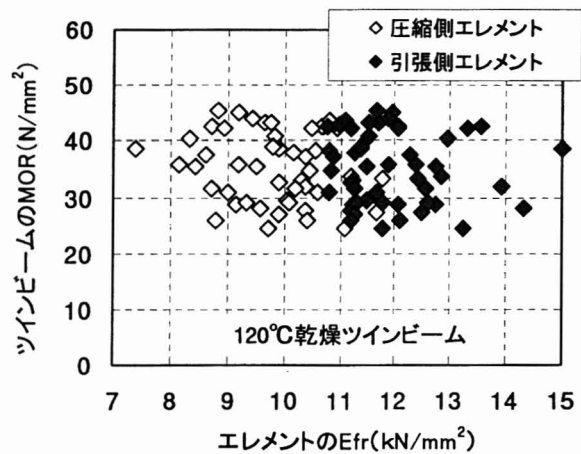


図-19 引張側元素の Efr とツインビームの MOR との関係

(3) 元素の強度性能とツインビームの強度性能との関係

図-20 に 130°C 乾燥元素と 130°C 乾燥ツインビームについて、また、図-21 に 120°C 乾燥元素と 120°C 乾燥ツインビームについての MOE と MOR の関係を示した。

130°C 乾燥ツインビーム、 120°C 乾燥ツインビーム共に、その強度性能はほぼ元素の集団内に位置していた。

130°C 乾燥ツインビームについては、3.3.3 (1) で述べたとおり、元素の組合せは基本的に Efr の低いものと高いものとの組合せであったが、一部に Efr の低いもの同士或いは高いもの同士の組合せも含まれたため、ツインビームの MOE にはある程度のばらつきがあった(図-14)。さらに Efr の高いもの同士の組合せであってもその程度が低

かったため、ツインビームの Efr が 11~12 kN/mm² とエレメントの平均値程度の値であり、全体にツインビームの MOE と MOR はエレメントの集団の下位に位置した (図-20)。

一方、エレメントの組合せが全て Efr の上位のものと同位のものと組合せであった 120℃乾燥ツインビームについては、ツインビームの MOE のばらつきが少なく、エレメントのばらつきのほぼ中位に位置した (図-21)。

また、MOR については、エレメントとツインビームの強度性能 (表-6 と表-7) と図-21 とを併せて検討すると、母集団が違うため単純には比較できないが、ツインビームの MOR のばらつきは、同レベルの MOE のエレメントと比較すると若干下位に位置した。

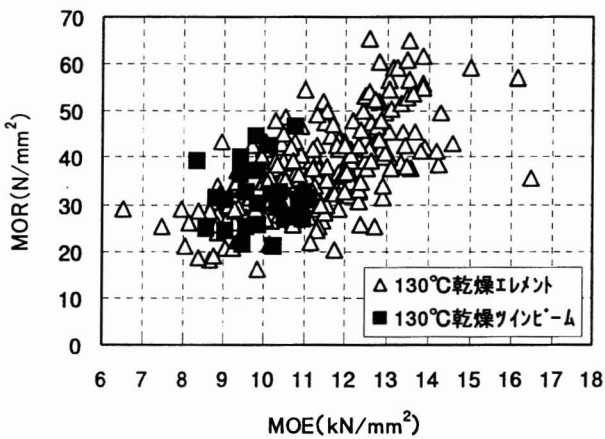


図-20 130℃乾燥エレメントと
130℃乾燥ツインビームの MOE と MOR の関係

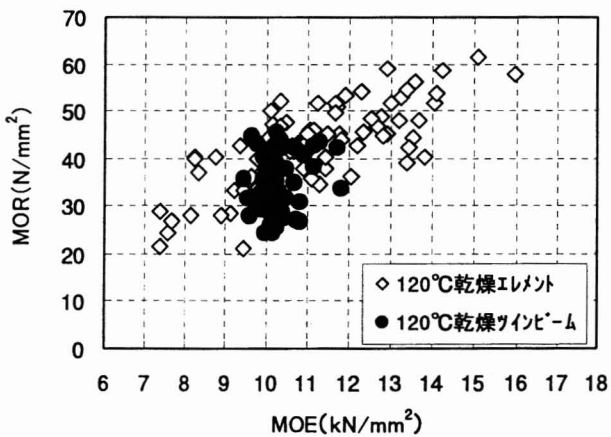


図-21 120℃乾燥エレメントと
120℃乾燥ツインビームの MOE と MOR の関係

4 まとめ

接着重ね梁は、大径材からしか得ることが出来なかった大きな断面の構造材を製造でき、特に中径の間伐材から梁桁材が得られるという点は大きな特徴である。また無垢材に近い質感が得られることも特徴の一つである。

製造上では 2~3 本のエレメントの組合せのため、集成材に比べて接着剤の使用量は格段に少ないものの、強度調整に当っては、これを構成するエレメントの強度性能に影響され、その自由度は低かった。

乾燥されたエレメント 2 本を積層接着したツインビーム (120℃乾燥エレメント使用) の曲げ試験の結果では、曲げヤング係数 (MOE) と曲げ強度 (MOR) の平均値は、それぞれ 10.32 kN/mm² と 35.3N/mm² であった。

MOE については、重ね梁を構成する部材 (エレメント) を平均的に組合せることにより、MOE の安定した材を得ることができた。また、MOR についてはややバラツキが見られ、国土交通省告示で示されている「カラマツ無等級材の基準強度 (MOR) 26.7N/mm²」を下回った材は 50 本中 4 本存在した。

最下部に高品質カラマツラミナを 1 枚接着した強化ツインビームでは、MOE の平均が 10.83 kN/mm²、MOR が 43.6N/mm² となり、曲げ強さを大幅に向上させることができた。

今後、強度的にさらに安定した値を確保した接着重ね梁を製造するため、強度劣化の少ない乾燥スケジュールの究明や、エレメントの材質が接着重ね梁の強度へ与える影響等を含め、さらなる強度値の蓄積が必要と思われる。

本試験の最終年度には、これまで蓄積したデータを基に民間でも接着重ね梁 (2 本重ね: ツインビーム, 3 本重ね: トリプルビーム) や接着合せ柱 (4 本合せ: テトラポール) 等が製造され、これらを利用した建物が建築され始めた (写真-9, 10, 11)。

最後に、等価断面法についてご教示頂いた信州大学農学部武田孝志助教授に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 栃木県木材業協同組合連合会（1997），平成 8 年度とちぎ材新需要開発促進事業委託試験報告書
- 2) 平嶋義彦・鴛海四郎・井上明生・小野泰・小松幸平(1988)，正角を用いた接着重ね梁の曲げ性能，木材工業，Vol143-2，14-19
- 3) 日本建築学会（1996），木質構造設計ノート，47-53，丸善
- 4) 橋爪丈夫・吉田孝久・石原茂久（1997），カラマツラミナの性質と集成材の強度性能（第 3 報）乾燥工程におけるラミナの狂いと適正製材寸法との関係，木材学会誌，Vol. 43，No. 11，965-970
- 5) 吉田孝久・橋爪丈夫（2000），カラマツ及びスギ心持ち柱材の高温乾燥特性，長野県林業総合センター研究報告，第 14 号，3-18



写真-9 建築設計事務所（松本市）



写真-10 集会所（生坂村）



写真-11 一般住宅（塩尻市）