

8. LVGの強度性能

試験体

- ◆道産カラマツ単板9～10枚を積層・再割したLVLラミナ（長さ2.4m）を縦継ぎして長さ4.7mのLVGを試作しました。LVLラミナは、縦継ぎ前にヤング係数によるグレーディングを行い、同一等級集成材のように同質ラミナを組み合わせました。縦継ぎ部は、隣接ラミナの縦継ぎ部が600mm以上離れるように、また一枚おきの縦継ぎ部がほぼ同位置となるように配置しました。
- ◆カラマツLVLラミナのヤング係数は9～16GPa（4ページのグラフ「カラマツ製材とLVLのヤング係数分布」を参照）となり、従来のカラマツ製材ラミナより高性能ですが、生産歩留まりと強度性能の確保しやすさを考慮して、ヤング係数が12GPa以上のラミナを除外してLVGを製造しました。すべての試験体は20°C・65%RHの恒温恒湿室で平衡状態に達してから供試しました

曲げ性能

- ◆曲げ試験体は長さ2360mmとし、LVG105mm角の試験体数は60体としました。比較として既製土台4種類についても10体ずつ試験しました。
- ◆曲げ試験は2160mmスパンの3等分点4点荷重により行い、曲げ強さと曲げヤング係数を求めました。
- ◆試験の結果、LVGの曲げヤング係数は概ねE105の集成材相当であること、LVGの曲げ強さはバラツキが小さいために下限値が有利となり、既製土台と同等かそれ以上となることが示されました。

曲げ試験結果



曲げ試験

| タイプ | 密度 kg/m ³ | ヤング係数 GPa | 曲げ強さ MPa | 含水率 |
|----------------------|-------------------------|--------------|----------------|-------|
| カラマツLVG 105mm角 | 550 | 10.5 | 39.2 (31.7) | 9.0% |
| ベイヒバ集成材 E105-F345 | 490 | 10.8 | 45.4 (31.3) | 11.8% |
| ヒノキ集成材 E105-F345 | 521 | 12.2 | 48.8 (33.3) | 12.5% |
| カラマツ集成材 E95-F270 | 553 | 10.1 | 38.0 (22.1) | 13.1% |
| ベイツガ製材 120E | 593 | 10.7 | 40.4 (27.7) | 37.1% |

※ 値は平均値、曲げ強さの下端カッコ内は統計的下限值（正規分布仮定における信頼水準75%の5%下限値）

せん断性能

- ◆せん断試験体は長さ1280mmとし、試験体数は60体としました。せん断試験は材せい×9倍に相当するスパンの3等分点4点荷重により行い、せん断強さとせん断弾性係数を求めました。
- ◆試験の結果、ほとんどの試験体が木部の曲げ破壊となりました。得られるせん断強さは本来のせん断強さより安全側となりますが、105mm角のせん断強さの平均値が3.9MPa、統計的下限值が3.2MPaとなりました。



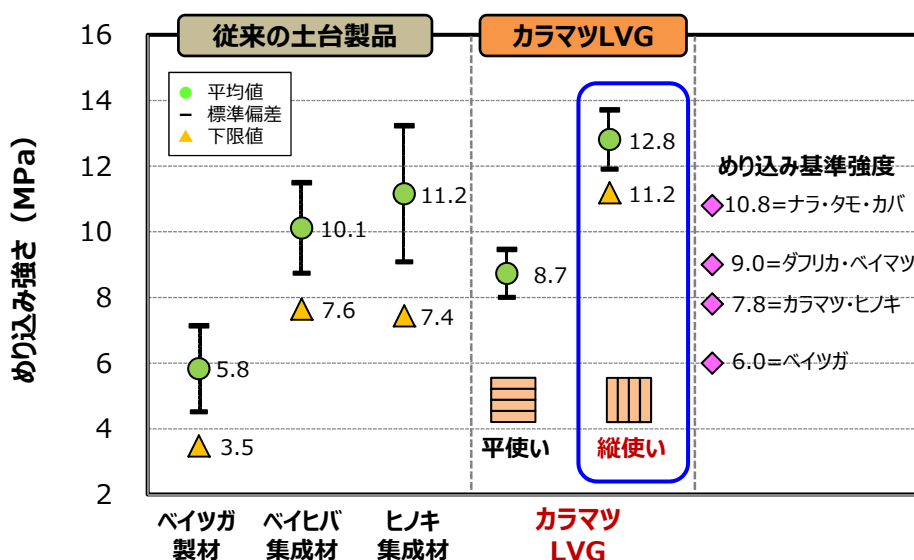
せん断試験

めり込み性能

- ◆めり込み試験体は長さ720mm、試験体数は60体としました。比較として既製土台4種類についても10体ずつ試験しました。
- ◆めり込み試験は加圧鋼板（長さ120mm）を長さ中央の上部に載せて加力を行い、底面は全面支持としました。めり込み量は加圧鋼板の2か所の平均変位量としました。めり込み強さは、めり込み量が材せいの5%に達した荷重を加圧面積で除した応力としました。
- ◆LVGのめり込み強さは、平使いより縦使いのほうが極めて高くなること、従来の土台製品よりも高くなること、下限値がナラ等の硬質広葉樹が属する樹種区分値（10.8）を上回ることが明らかとなりました。



めり込み試験



LVGのめり込み強さと従来製品との比較



めり込み破壊の様子

基準強度

- ◆今回試作したカラマツLVG（105mm角）の下限値と他のJAS製品の基準値を比較すると、曲げ性能については、構造用LVLでは100E-1級、構造用集成材では同一等級構成E105-F345と同程度であること、せん断強さについては、構造用LVLの45V-38Hと同程度で、構造用集成材のカラマツ樹種区分値より1割ほど低くなりました。
- ◆一方、土台として最も重要なめり込み強さについては、LVLと集成材ともにカラマツが属する樹種区分値に対して約1.4倍と高くなりました。

| Type | 曲げヤング係数 GPa | 曲げ強さ MPa | せん断強さ MPa | めり込み強さ MPa |
|--------------------|-------------|----------|-----------|------------|
| カラマツLVG (105mm角) | 10.5 | 31.7 | 3.2 | 11.2 |
| 構造用LVL (100E-1級) | 10.0 | 31.8* | 3.0 | 7.8 |
| 構造用集成材 (E105-F345) | 10.5 | 32.8* | 3.6 | 7.8 |

※ LVGの統計的下限值：強度は正規分布仮定による信頼水準75%の5%下限値、曲げヤング係数は平均値、他構造材料の基準値：曲げヤング係数は木質構造設計規準より引用、強度は建築基準法(平成13年建告第1024号)より引用、

*印：材せい105mmに応じた寸法効果係数 K_2 を乗じた補正值（LVLでは木質構造設計規準より $K_2=1.15$ 、集成材ではJASより $K_2=0.96$ ）

強度性能へ及ぼす水分の影響

- ◆ LVGが住宅土台として実際に施工される場合、施工時に雨水等の水掛かりによって、一時的に高含水率となる場合や、竣工後に床下環境が高湿度状態になる場合などが想定されます。
- ◆ 告示では、このような使用環境の影響を明らかにするために、高湿度処理（20℃85%RH）および72時間の散水処理による劣化処理を行い、強度性能への影響を調べる事が要求されています。ここでは、より厳しい処理方法として、20℃90%RHにおける調湿処理および72時間の浸せき処理を行い、曲げ性能、せん断性能、めり込み性能への影響を調べました。
- ◆ 強度試験の結果（下図）、高湿度処理では、各特性値の残存率は0.85～1.00の範囲となり、めり込み強さへの影響がやや大きくなる事がわかりました。また、浸せき処理では、残存率は0.96以上となり、事故的水掛かりによって吸水しても、材料が乾燥されれば初期性能と同等になる事がわかりました。

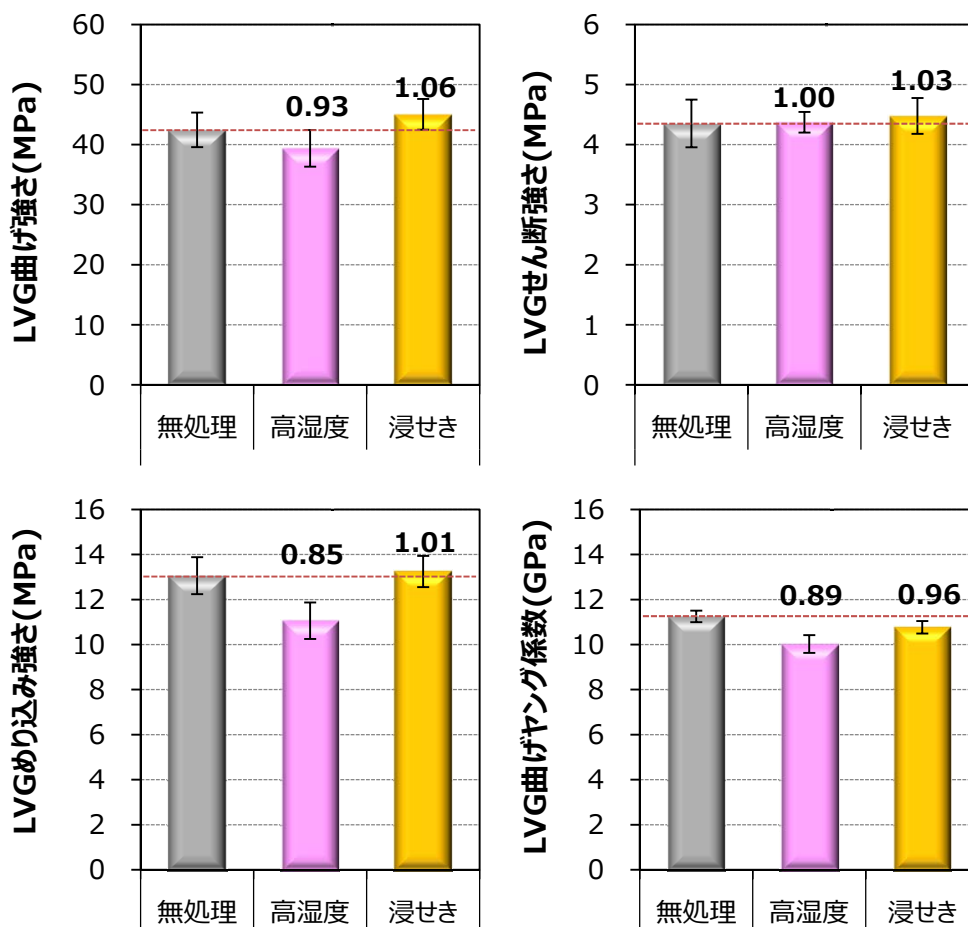


木造住宅床下の高湿度状態

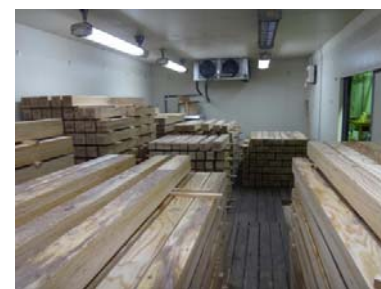


施工中の雨水による水濡れ

※図中の赤点線は無処理の平均値、数値は劣化処理による残存率（＝劣化処理の平均値／無処理の平均値）を示しています



劣化処理条件と各種強度性能



高湿度処理
(90%RHで吸湿)



浸せき処理
(72時間水中浸せき)



実大強度試験を実施
(曲げ・せん断・めり込み
特性の残存率評価)

接着耐久性に関する強さの残存率

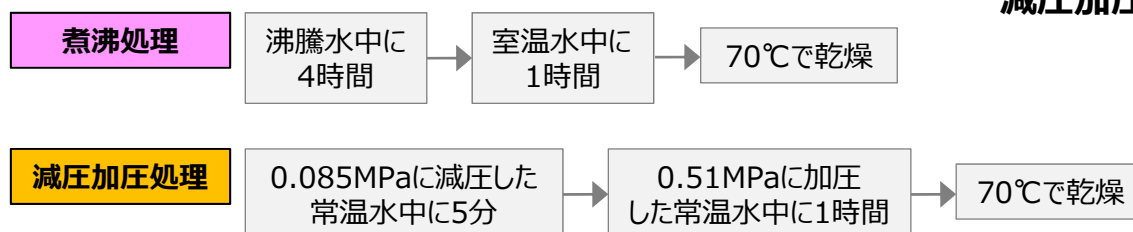
- ◆材料を長期間使用していくためには、接着剤の性能が使用環境に応じたものであることが非常に重要です。告示法においては、使用環境ごとに材料に劣化処理を施し、強度性能の残存率が一定の基準を満たすことが要求されます。
- ◆今回のLVGでは、耐久性が求められる接着強度としては、LVLラミナのフィンガージョイント部、LVLラミナの一次接着部およびラミナ相互の二次接着部があります。それらの接着耐久性を効率的に評価するべく、たて継ぎされたLVLラミナの曲げ試験、105mm角の半割製品の水平せん断試験を行い、劣化処理による強度への影響を調べました。
- ◆今回は、住宅の土台に該当する「断続湿潤環境」に求められる劣化処理として、以下に示す煮沸処理と減圧加圧処理を2回繰り返しを行い、接着部に関連する強度の残存率を算出しました。



煮沸処理

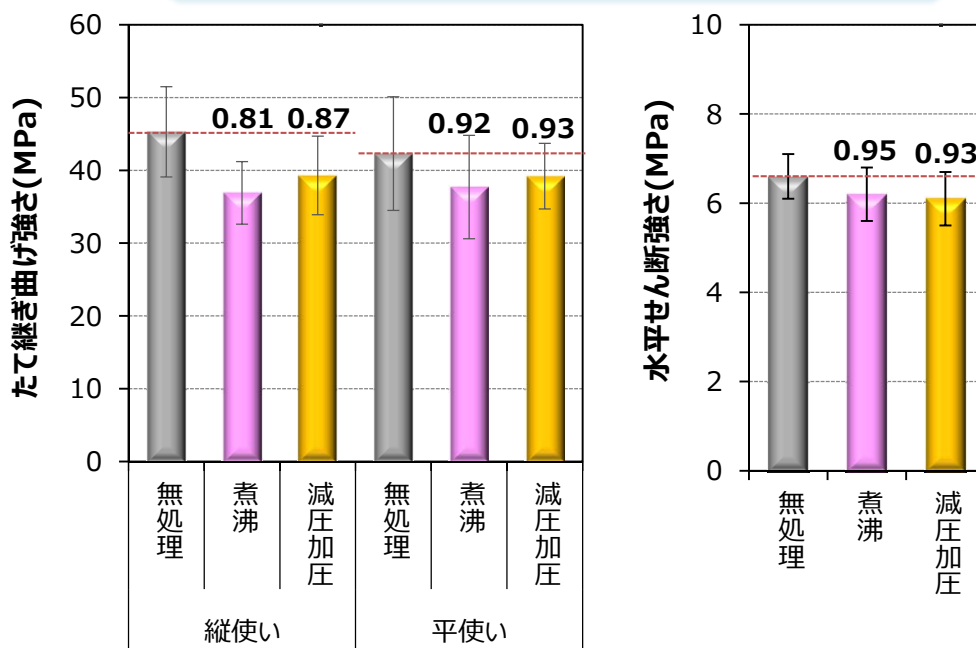


減圧加圧処理



- ◆強度試験の結果、曲げ強さ、せん断強さともに、告示で要求される残存率0.5以上であり、十分な接着耐久性を有することが確かめられました。

※図中の赤点線は無処理の平均値、数値は劣化処理による残存率 (=劣化処理の平均値/無処理の平均値) を示しています



たて継ぎ部曲げ試験



水平せん断試験

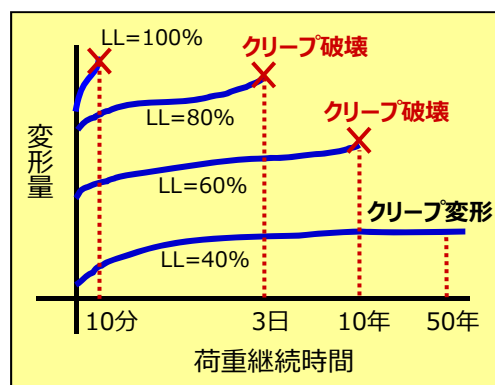
劣化処理条件と強度の残存率

クリープ変形特性とクリープ破壊特性

木材に荷重をかけ続けると時間の経過とともに変形が増大していきます。これはクリープ現象と呼ばれるもので、長期間にわたって荷重を受ける場合のたわみは、短期間でなたわみよりも大きく見積もる必要があります。また、荷重レベル（LL：短時間の実験で求める破壊強度に対する荷重の比）がある限度を超えるとクリープ破壊を起こすようになり、荷重継続時間が長くなると、より低い荷重でも破壊するようになります。

そのため、建築基準法ではクリープによる変形増大と荷重継続時間による強度の低下を考慮に入れた設計をするため、クリープおよび荷重継続期間の調整係数を定めることとしています。クリープの調整係数は、50年後の推定たわみに対する初期たわみの比で表わされ、一般的な木材の場合は0.5とされ、言い換えれば50年後のたわみが初期たわみの2倍になると想定されています。また、50年間荷重が継続した木材の強度は、短時間の実験で求める破壊強度の55%まで低下するものとみなして、荷重継続期間の調整係数を0.55としています。

ここでは、LVGのクリープ変形およびクリープ破壊特性を評価するために、長期荷重試験を行い、クリープの調整係数および荷重継続期間の調整係数を求めました。



荷重継続時間と変形の関係図

長期性能試験の概要

長期曲げ試験体は、長期荷重装置の加力容量により、105mm角の半割サイズ（50×105mm）としました。長さ2mの105mm角の単板集成材50体を半割りし、長期荷重用試験体と短期荷重用試験体に振り分けました。長期荷重用試験体50体のうち、クリープ試験には12体、長期荷重破壊試験（DOL試験）には38体を用いました。

長期試験は右図に示す長期載荷装置10台を用いて行いました。試験スパンは1800mm、3等分点2点荷重方式としました。載荷荷重の荷重レベル（マッチング試験体の平均破壊荷重に対する比）は、クリープ試験では0.40、DOL試験では0.70、0.80、0.90の3種類としました。クリープ試験では載荷から6週間までのスパン中央たわみを測定しました。DOL試験では載荷から破壊までの時間を計測しました。試験は、温湿度無調整環境下の林産試験場内実験棟にて実施しました。



長期荷重試験の様子



クリープ破壊の一例

長期性能試験の結果

クリープ試験で観測されたスパン中央たわみは、環境の温湿度の日変動に伴い細かな増減を繰り返しながら総体的には増加していきました。温湿度無調整環境下における試験では、このようなたわみの日変動が観察されるため、増減の日変動のピークがある日の最大値を選択し、クリープたわみ（経過時間ごとのたわみから荷重1分後のたわみを引いた値）と経過時間の両対数プロットで回帰計算した結果、たわみ実測値に対する回帰曲線の適合が良好となりました。クリープ試験の結果、クリープの調整係数は0.68となり、現行の許容応力度設計法の木材の値（0.5）を上回ることが明らかとなりました。

DOL試験の結果、荷重継続時間の調整係数（回帰直線上で荷重継続時間が50年に相当する応力レベル）は0.66となり、現行の許容応力度設計法の木材の値（0.55）を上回ることが明らかとなりました。

以上より、LVGの長期性能が従来の木材を上回り、長期設計上も有利となることが示されました。

クリープ試験の結果

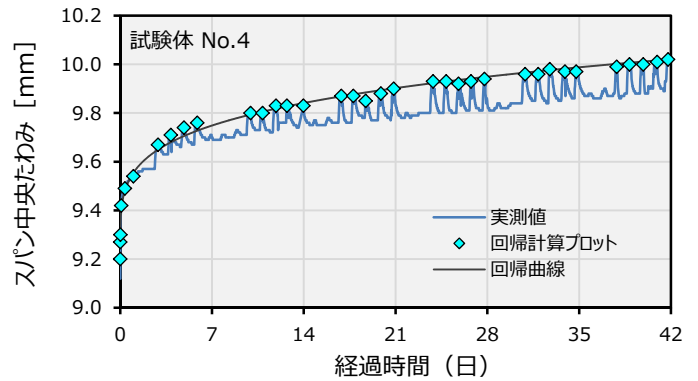
| 試験期間 | No. | d_{1min} | d_{50year} | d_{50year}/d_{1min} | K_{50year} |
|-------------------------------|-----|------------|--------------|-----------------------|--------------|
| 2012/10/6 ～ 2012/11/16 | 1 | 9.12 | 13.90 | 1.52 | 0.656 |
| | 2 | 8.78 | 13.52 | 1.54 | 0.649 |
| | 3 | 8.78 | 16.29 | 1.86 | 0.539 |
| 2012/11/16 ～ 2012/12/28 | 4 | 9.20 | 12.42 | 1.35 | 0.741 |
| | 5 | 8.99 | 13.05 | 1.45 | 0.689 |
| | 6 | 9.02 | 11.72 | 1.30 | 0.770 |
| 2012/12/28 ～ 2013/2/8 | 7 | 8.69 | 12.60 | 1.45 | 0.690 |
| | 8 | 8.54 | 11.77 | 1.38 | 0.726 |
| | 9 | 9.39 | 14.32 | 1.52 | 0.656 |
| 2013/2/8 ～ 2013/3/22 | 10 | 8.92 | 14.56 | 1.63 | 0.613 |
| | 11 | 8.40 | 14.31 | 1.70 | 0.588 |
| | 12 | 8.36 | 12.71 | 1.52 | 0.658 |
| 平均 | | 8.85 | 13.43 | 1.52 | 0.680 |

※ d_{1min} : 荷重1分後の中央たわみ (mm)
 d_{50year} : 50年後の中央たわみの予測値 (mm)
 K_{50year} : クリープの調整係数

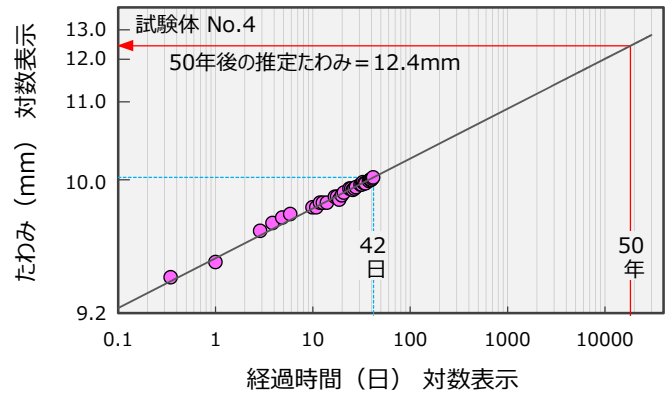
DOL試験の結果

| 応力レベル (実施数) | 荷重継続時間 |
|----------------|--|
| 0.90 (10体) | 2.6分、2.7分、23.8分、32.4分 92.1分、14.7時間、1.4日、4.0日 11.2日、72.1日* |
| 0.80 (11体) | 2.0時間、5.4日、6.0日、6.5日 7.1日、11.9日、19.1日、27.8日 34.6日、41.0日、89.1日 |
| 0.70 (11体) | 1.9日、3.7日、32.7日、39.0日、54.5日 *72.1日*、80.7日、89.3日* 140日*、172日*、180日* |

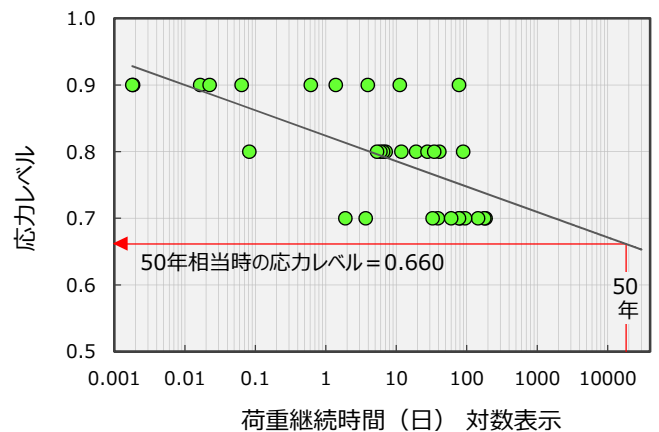
※ *印は2013年4月1日時点で未破壊の試験体



スパン中央たわみの実測値と回帰曲線の一例



クリープたわみと経過時間の両対数表示の一例



応力レベルと荷重継続時間の関係