CLTの基準強度とは

技術部　生産技術グループ　　高梨　隆也

■はじめに

欧州で開発された新しい木質材料であるCLT (Cross Laminated Timber, 日本農林規格では直交集成板)は，建築構造材料として多くの優れた点を持ち，中高層建築物への活用などが期待されています。2016年に材料強度や設計法などの国土交通省告示が施行され，日本においてCLTが一般的な建築材料として使用できるようになりました。関連する法令はデータの蓄積に伴い都度改正が行われ，2019年にカラマツが相当する強度等級（Mx120，S120），トドマツが相当する強度等級（Mx90，S90）に対応する材料強度を規定する告示改正が行われました。これにより，高い強度や剛性を活かした設計（**図1**）が可能となりました。この告示改正には道総研で行われてきた多くの研究成果が活用されています[1)]。

建物に荷重がかかったとき，部材には様々な方向に応力が発生します（**図2**）。材料強度を決めるための基準となる強度は，応力が作用する方向に対してそれぞれ「基準強度」として数値や数式の形で規定されています。その数式は複雑なものに見えますが，基本的には樹種，強度等級，層構成，寸法に応じた変数値を選択・代入することで基準強度が得られます。本稿では，それぞれの基準強度計算式を計算例と併せてご紹介します。

図1　カラマツ・トドマツCLTの高剛性を活かした軒のはね出し（林産試験場のCLT実験棟[2)]）

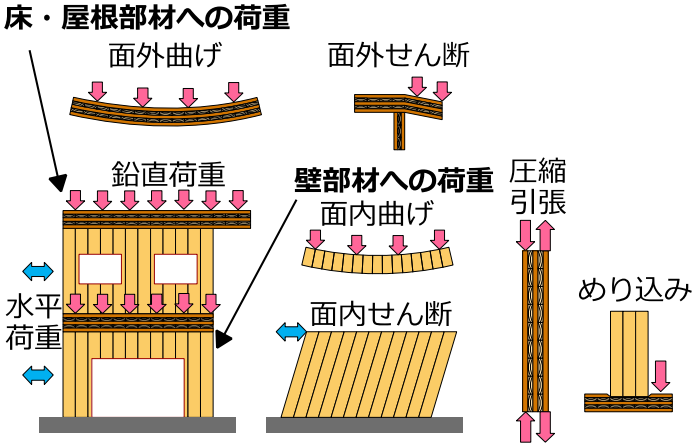


図2　CLT建築物で生じる変形と応力

■圧縮・引張強度

CLTの圧縮の基準強度F_c，引張の基準強度F_tは以下の式で計算されます。

$$F_c = 0.75 \times \sigma_{c_oml}\left(\frac{A_A}{A_o}\right) \qquad (1)$$

$$F_t = 0.75 \times \sigma_{t_oml}\left(\frac{A_A}{A_o}\right) \qquad (2)$$

ここで，σ_{c_oml}：応力が作用する方向と繊維方向が平行なラミナのうち最も外側にあるラミナの圧縮強度，σ_{t_oml}：応力が作用する方向と繊維方向が平行なラミナのうち最も外側にあるラミナの引張強度，A_A：以下の式で計算される値

$$A_A = \frac{\sum E_i A_i}{E_o} \qquad (3)$$

E_i：外側から数えてi番目の層のラミナの曲げヤング係数（応力が作用する方向と繊維方向が直交するラミナではゼロとする），

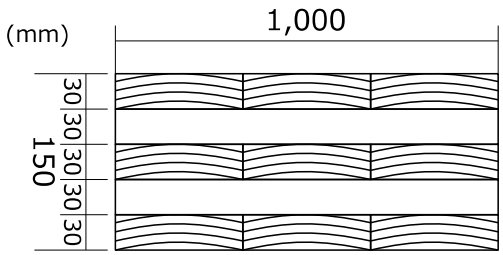
A_i：i番目の層の断面積，

E_o：応力が作用する方向と繊維方向が平行なラミナのうち最も外側にあるラミナの曲げヤング係数，

A_o：CLTの断面積

σ_{c_oml}とσ_{t_oml}はラミナの等級ごとに数値で与えられており，例えば機械等級区分ラミナでは**表1**の通りとなっています。

圧縮試験および引張試験によって，カラマツCLTとトドマツCLTでのこれらの式の妥当性が確認されています[3)]。



i層曲げヤング係数 (N/mm²)	i層断面積 (mm²)
E_1 = 12,000	A_1 = 30,000 (= 30 × 1,000)
E_2 = 0	A_2 = 30,000
E_3 = 3,000	A_3 = 30,000
E_4 = 0	A_4 = 30,000
E_5 = 12,000	A_5 = 30,000

$E_o = E_1, E_5 = 12{,}000$ N/mm²

$A_A = \Sigma E_i A_i / E_o = (E_1A_1 + E_2A_2 + E_3A_3 + E_4A_4 + E_5A_5) / E_O = 67{,}500$ mm²　(式(3))

$\sigma_{c_oml} = 33.6$ N/mm²　$\sigma_{t_oml} = 25.0$ N/mm²　(表1 M120)

$A_o = 150 \times 1{,}000 = 150{,}000$ mm²

$F_c = 0.75 \times \sigma_{c_oml} \times A_A / A_o = 11.3$ N/mm²　(式(1))

$F_t = 0.75 \times \sigma_{t_oml} \times A_A / A_o = 8.4$ N/mm²　(式(2))

図3　圧縮・引張基準強度の計算例（5層5プライMx120）

表1　圧縮・引張基準強度式で使用するラミナ強度

ラミナ強度等級	σ_{c_oml} (N/mm²)	σ_{t_oml} (N/mm²)
M120	33.6	25.0
M90	27.6	20.5
M60	21.6	16.0
M30	15.6	11.5

計算例として，層構成5層5プライ，強度等級Mx120，ラミナ厚さ30mm，パネル幅1,000mmのCLTの強軸方向の圧縮・引張基準強度を計算してみます。強軸方向とは外層ラミナの繊維方向が応力の作用する方向と平行な方向です。この場合のσ_{c_oml}およびσ_{t_oml}は**表1**のM120の欄の値，E_oは一番外側の層の曲げヤング係数が該当します。部材断面と各変数の対応関係およびその値は**図3**の通りとなり，F_c=11.3 N/mm²，F_t=8.4 N/mm²と算出されます。

■曲げ強度

CLTの曲げの基準強度Fbは，荷重が作用する方向別に計算式が決められています。

積層方向の曲げ (面外曲げ)では

$$F_b = 0.4875 \times \sigma_{b_oml} \frac{I_A}{I_o} \qquad (4)$$

幅方向の曲げ (面内曲げ)では

$$F_b = 0.6 \times \sigma_{b_oml} \frac{A_A}{A_o} \qquad (5)$$

ここで，σ_{b_oml}：応力が作用する方向と繊維方向が平行なラミナのうち最も外側にあるラミナの曲げ強度，IA：以下の式で計算される値

$$I_A = \frac{\Sigma(E_i I_i + E_i A_i z_i^2)}{E_o} \qquad (6)$$

I_i：i番目の層の断面二次モーメント，z_i：CLTの中立軸とi番目の層のラミナの重心との距離。I_o：CLTの断面二次モーメント

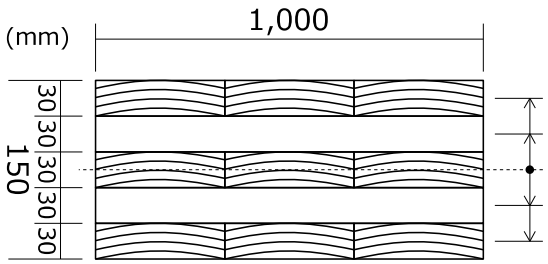
矩形（長方形）断面の断面二次モーメントの値は（幅）×（厚さ）^{3}÷12となります。また，現在の日本農林規格で定められているCLTでは，z_iは各ラミナ中央位置とCLT中央位置の間の距離と考えて差し支えありません。そのほかの変数は，圧縮・引張基準強度と同様です。また，σ_{b_oml}はラミナの等級ごとに数値で与えられており，例えば機械等級区分ラミナでは，**表2**の通りとなっています。

曲げ試験によって，カラマツCLTとトドマツCLTでのこれらの式の妥当性が確認されています[4, 5]。

表2　曲げ基準強度式で使用するラミナ強度

ラミナ強度等級	σ_{b_oml} (N/mm²)
M120	42.0
M90	34.5
M60	27.0
M30	19.5

計算例として，層構成5層5プライ，強度等級Mx120，ラミナ厚さ30mm，パネル幅1,000mmのCLTの強軸方向の面外曲げ基準強度を計算してみます。この場合のσ_{b_oml}は**表2**のM120の欄の値，E_oは一番外側の層の曲げヤング係数が該当します。部材断面と各変数の対応関係およびその値は**図4**の通りとなり，F_b = 16.1 N/mm²と算出されます。



i層距離 (mm)	i層曲げヤング係数 (N/mm²)	i層断面積 (mm²)
z_1 = 60	E_1 = 12,000	A_1 = 30,000 (= 30 × 1,000)
z_2 = 30	E_2 = 0	A_2 = 30,000
z_3 = 0	E_3 = 3,000	A_3 = 30,000
z_4 = 30	E_4 = 0	A_4 = 30,000
z_5 = 60	E_5 = 12,000	A_5 = 30,000

I_i(i=1～5) = 1,000 × 30^3 / 12 = 2,250,000 mm^4

$E_o = E_1, E_5$ = 12,000 N/mm^2

$I_A = \Sigma(E_iI_i+E_iA_iz_i^2)/E_o = (E_1I_1+E_1A_1z_1^2+E_2I_2+E_2A_2z_2^2+E_3I_3+E_3A_3z_3^2+E_4I_4+E_4A_4z_4^2+E_5I_5+E_5A_5z_5^2)/E_o$

= 221,062,500 mm^4 (式(6))

σ_{b_oml} = 42.0 N/mm^2 (表2 M120)

I_o = 1,000 × 150^3 / 12 = 281,250,000 mm^4

$F_b = 0.4875 \times \sigma_{b_oml} \times I_A / I_o$ = 16.1 N/mm^2 (式(4))

図4　面外曲げ基準強度の計算例（5層5プライMx120）

■せん断強度

CLTのせん断の基準強度F_sは曲げ基準強度と同様に荷重が作用する方向別に定められています。積層方向のせん断強度（面外せん断強度）は樹種群に対して数値で規定されており，主要国産樹種では**表3**の通りとなっています。

表3　主要国産樹種のCLTの面外せん断基準強度

樹種	F_s (N/mm²)
カラマツ，ヒノキ	1.2
トドマツ	1.0
スギ	0.9

幅方向のせん断強度（面内せん断強度）では3つの計算値を算出し，その最小値が基準強度となります。式は以下の通りです。

$$F_s = min\left\{\begin{array}{ll} f_{v_lam_0} & ① \\ f_{v_lam_90}\dfrac{t_{net}}{t_{gross}} & ② \\ \dfrac{3bn_{ca}}{8t_{gross}}\cdot\dfrac{1}{\frac{1}{f_{v_tor}}\left(1-\frac{1}{m^2}\right)+\frac{2}{f_R}\left(\frac{1}{m}-\frac{1}{m^2}\right)} & ③ \end{array}\right\} \quad (7)$$

ここで，$f_{v_lam_0}$：ラミナの繊維方向のせん断強度，$f_{v_lam_90}$：ラミナの繊維方向と直交する方向のせん断強度，t_{net}：外層に直交する層の厚さの合計，t_{gross}：CLTの厚さ，b：ラミナの幅，$n$ca：CLTの直交接着層の数，f_{v_tor}：直交接着面の交差面のねじりせん断強度，f_R：ローリングシア強度，m：各層のラミナの幅方向の数のうち最小の値

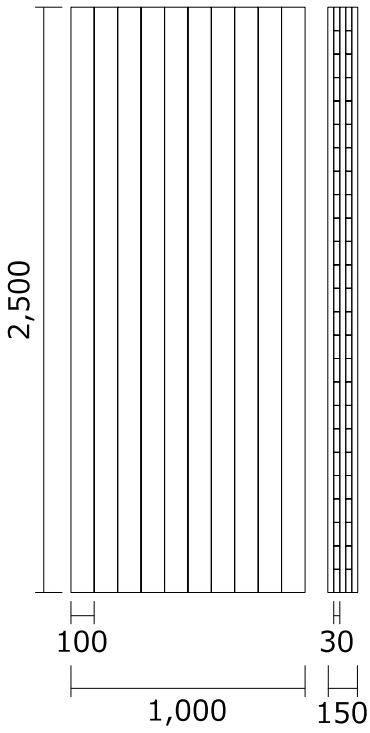
$f_{v_lam_0}$，$f_{v_lam_90}$，f_{v_tor}，f_Rは樹種群に対して数値で与えられており，主要国産樹種では**表4**の通りとなっています。

せん断試験によって，カラマツCLTとトドマツCLTでのこれらの式の妥当性が確認されています[6-9]。

表4　面内せん断基準強度式で使用する各変数値

樹種	$f_{v_lam_0}$ (N/mm²)	$f_{v_lam_90}$ (N/mm²)	f_{v_tor} (N/mm²)	f_R (N/mm²)
カラマツ ヒノキ	3.6	10.8	4.7	2.0
トドマツ	3.0	9.0	3.0	1.6
スギ	2.7	8.1	3.0	1.5

計算例として，樹種カラマツ，層構成5層5プライ，ラミナ厚さ30mm，ラミナ幅100mm，パネル幅1000mm，パネル高さ2500mmのCLTの面内せん断基準強度を計算してみます。部材と各変数の対応関係とその値は**図5**の通りとなり，**表4**のカラマツに該当する数値と合わせて（7）式に代入すると①3.6N/mm²，②4.3N/mm²，③3.3N/mm²となります。③が最小値なのでF_s = 3.3N/mm²と算出されます。



$f_{v_lam_0}$ = 3.6 N/mm^2 (表4 カラマツ)
$f_{v_lam_90}$ = 10.8 N/mm^2 (表4 カラマツ)
t_{net} = 60 mm (2層目と3層目の厚さの合計)
t_{gross} = 150 mm (CLTの厚さ)
b = 100 mm (ラミナの幅)
n_{ca} = 4 (5層5プライだと直交接着層は4層)
f_{v_tor} = 4.7 N/mm^2 (表4 カラマツ)
f_R = 2.0 N/mm^2 (表4 カラマツ)
m = 10 (ラミナの幅方向の数: 1,3,5層目=10, 2,4層目=25 → 小さい方10)

$$F_s = \begin{cases} f_{v_lam_0} = 3.6\ \text{N/mm}^2 & \text{(式(7)①)} \\ f_{v_lam_0} \times t_{net} / t_{gross} = 4.3\ \text{N/mm}^2 & \text{(式(7)②)} \\ \dfrac{3bn_{ca}}{8t_{gross}} \cdot \dfrac{1}{1 / f_{v_tor} \cdot (1 - 1 / m^2) + 2 / f_R \cdot (1 / m - 1 / m^2)} = 3.3\ \text{N/mm}^2 & \text{(式(7)③)} \end{cases}$$

図5 面内せん断基準強度の計算例（カラマツ5層5プライ）

■めり込み強度

CLTのめり込みの基準強度Fcvは樹種群に対して数値で規定されており，主要国産樹種では**表5**の通りとなっています。

表5　主要国産樹種のCLTのめりこみ基準強度

樹種	F_{cv} (N/mm^2)
カラマツ，ヒノキ	7.8
トドマツ，スギ	6.0

■短期許容応力度と長期許容応力度

以上のような計算によって得られた基準強度Fに各種の係数を乗じることによって許容応力度が得られます。圧縮，引張，曲げ，せん断を例にあげると，地震力や風圧力に対応する短期許容応力度は安全係数2/3を乗じた2/3Fとなり，自重や積載荷重，固定荷重に対応する長期許容応力度は短期許容応力度に0.55を乗じた1.1/3Fとなります。カラマツCLTおよびトドマツCLTでの長期荷重試験によって，0.55という係数の妥当性が検証されています[10,11]。

■変形増大係数

ここまでは強度（どれだけの荷重に耐えられるか）についてご紹介してきましたが，剛性（どれだけの変形が生じるか）についても一部をご紹介します。建築設計では，自重や積載荷重，固定荷重といった継続する荷重に対して，長期間経過後の変形は最初の変形と比べてどれだけ増大しているかという係数（変形増大係数）が必要となります。これについてもカラマツCLT，トドマツCLTでの長期荷重試験により，従来の木造建築で用いられる変形増大係数2.0という値の妥当性が検証されています[11,12]。

■おわりに

林産試験場及び全国各地の試験研究機関による研究の結果として，カラマツを筆頭とした高い強度等級のCLTに基準強度を与える告示改正が行われました。CLTを用いた建築物の設計自由度がより高まり，北海道産カラマツ・トドマツCLTの利用拡大が期待されます。

■参考文献

1) 高梨隆也：道産CLTの各種材料性能のデータ整備. 林産試だより 2019年7月号，p. 5（2019）.
2) 大橋義徳 （他2名）：道産CLTを用いた実験棟の建設，林産試だより 2019年5月号，pp. 1-8,（2019）.
3) 原田真樹（他8名）：トドマツ・カラマツCLTの強度性能評価　その4　圧縮・引張り，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造III，pp. 121-122,（2017）.
4) 高梨隆也（他4名）：トドマツ・カラマツCLTの強度性能評価　その1　面外曲げ性能，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造III，pp. 115-116,（2017）.
5) 松本和茂（他4名）：トドマツ・カラマツCLTの強度性能評価　その2　面内曲げ性能，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造III，pp. 117-118,（2017）.
6) 高梨隆也（他4名）：CLTの面外方向の曲げ及びせん断に及ぼす樹種の影響　その1 カラマツの場合，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造III，pp. 13-14，（2015）.
7) 大橋義徳（他3名）：北海道産木材を用いたCLTの材料性能 その3 面外せん断性能，第67回日本木材学会大会，福岡，（2017）.
8) 石原亘（他3名）：トドマツ・カラマツCLTの強度性能評価 その3　面外せん断強さ，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造III，pp. 119-120,（2017）.
9) 石原亘（他6名）：国産針葉樹を用いたCLT接着層のねじりせん断強度，第69回日本木材学会大会，函館，（2019）.
10) 大橋義徳（他3名）：北海道産カラマツを用いたCLTの長期曲げ性能　7層7プライの長期荷重試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造III，pp. 133-134，（2017）.
11) 大橋義徳（他3名）：海道産トドマツを用いたCLTの長期曲げ性能　温湿度変動下における5層5プライの長期荷重試験，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造III，pp. 349-350，（2018）.
12) Ryuya Takanashi（他3名）：Long-Term Bending Properties of Cross Laminated Timber with Japanese Larch., The 15th World Conference on Timber Engineering, Seoul, Republic of Korea，（2018）.