

CLTによる木造建築物の設計法の開発（その1）

～材料強度等の評価～

建築生産研究グループ 上席研究員 中島 史郎

目次

- I はじめに
- II 研究の背景
 - 1) CLT（クロス・ラミネーテッド・ティンバ）とは
 - 2) CLT を木造建築物の構造材として使用するにあたっての課題
 - 3) CLT の普及に向けた建築研究所の取り組み
- III CLT の基準強度・許容応力度
 - 1) 既存の木質構造材料の基準強度・許容応力度
 - 2) CLT の材料規格
 - 3) CLT の基準強度・許容応力度を定めるための技術的な検討
- IV 今後の展望
 - 1) 基準強度・許容応力度の策定に向けたロードマップ
 - 2) 強度等の評価に関する検討
- V おわりに
- 参考文献

I はじめに

現在、クロス・ラミネーテッド・ティンバ（以下、「CLT」と呼ぶ）を我が国において普及させようとする大きな動きがある。CLT はオーストリアにおいて 1990 年代に産声をあげた新しい木質構造材料である。欧州では 1990 年代以降、同材料と同材料を用いた木造建築物に対する技術開発と研究が着々と行われ、CLT を構造材とする構造形式（以下、「CLT 構造」と呼ぶ）による木造建築物が既に多く建設されている。CLT 構造の象徴と言える建物がロンドンに建つ 9 階建ての集合住宅（写真 1 参照）である。CLT と CLT 構造の力学的特性が、このような木造による多層建築物の設計を可能としている。CLT の用途は多層建築に限らず、中層の集合住宅、事務所、学校、公共施設や低層の戸建住宅など幅広い（写真 2～5 参照）。

CLT の普及に向けた我が国の現状は、材料規格が 2013 年 12

月に制定、2014 年 1 月に施行されたが、材料の基準強度と許容応力度、並びに、構造設計基準は整備されていない状況にある。このため現在、我が国で CLT 構造による木造建築物を建設しようとする場合、1 棟 1 棟について時刻歴応答計算を行い、大臣認定を受ける必要がある。このような状況にあっても、2014 年 3 月に我が国で初めての CLT 構造による建物（写真 6 参照）が高知県に建設され、その後も CLT 構造による建物の建設実績は着実に増えつつある。

独立行政法人建築研究所では、2011 年より CLT に対する基準強度と許容応力度の制定、構造設計基準の整備、防耐火設計に関する基準の整備に必要な技術的な知見を収集するための研究を実施している。本稿では、その概要について紹介するとともに、材料の基準強度と許容応力度の制定に向けて実施している研究について紹介する。



写真1 ロンドンに建つ9階建ての集合住宅
(鍵屋浩司氏撮影)



写真5 戸建住宅
(Family house in Graz, KLH の HP より)



写真2 ウィーンに建つ4階建ての集合住宅
(筆者撮影)



写真6 国内のCLT構造による建物
(高知おとよ製材㈱の社員寮, 銘建工業㈱のHPより)



写真3 3階建ての公共施設
(Retirement community in Knittelfeld, KLH のHPより)



写真4 事務所建物
(Office Building "Meiberger" in Lofer, KLH のHPより)

II 研究の背景

1) CLT (クロス・ラミネーテッド・ティンバ) とは

CLTはCross Laminated Timberの頭文字C、L、Tであり、和表記はクロス・ラミネーテッド・ティンバである。同材料は、オーストリアのグラーツ工科大学 (Graz University of Technology) のGerhard Schickhofer氏が1990年から1995年にかけて開発した木質材料である。

CLTはラミナ(製材の挽き板)を積層接着している点において集成材と似ているが、集成材との最も大きな違いは、隣り合う層のラミナの繊維方向が原則互いに直交するように製造されているという点にある(図1参照)。ちなみに集成材は全ての層のラミナの繊維方向を同じ向きにして接着積層しているため、その材幅は原則ラミナ幅と同じとなる。したがって、幅の広い材料が製造することはできず、用途が柱や梁などの軸材に原則限定される。一方、CLTは前述のように隣り合う層のラミナの繊維方向が互いに直交するように製造されるので、板状の材料を製造することができる。したがって、壁や床を構成するパネルとすることができる。

写真7はヨーロッパにおけるCLT構造による建物の施工の様

子である。工場で予め開口部を切り抜いた壁パネルや床パネルを現場に搬入し、金物とビスを用いた接合などを用いてパネル間を接合し、建物の構造部分を施工する。この点において、CLT構造はPC版を用いた構造と類似している。



(a)CLT (日本CLT協会 HP より)



(b)集成材 (日本集成材工業協同組合 HP より)

図1 CLTと集成材

(解説) CLTは原則隣り合う層の繊維方向が互いに直交する。集成材は隣り合う層の繊維方向が互いに平行になる。



写真7 CLT構造による建物の施工

(ロンドンに建つ9階建ての集合住宅の施工, KLH資料より)

2) CLTを木造建築物の構造材として使用するにあたっての課題

CLTを木造建築物の構造材として使用する際の課題は多くあ

るが、一例として以下のような課題が挙げられる。

- ① CLTの基準強度並びに許容応力度を定める必要である。前述のように現在のところCLTに対する基準強度と許容応力度は定められていない。
- ② CLT構造に対する構造設計法を定め、関連する法令等を整備する必要がある。その一環として、CLT構造に用いる接合部と構面の力学的な特性に関する知見を整備したり、モデル化の方法を検討したりする必要がある。後者については知見が増えつつあるが、前者については未整備である。
- ③ CLT構造の耐火性能に関する知見を整備する必要がある。その一環として、CLT構造に対する燃えしる設計の考え方や、CLTの炭化速度に関する知見を整備する必要がある。いずれも現在検討中である。
- ④ CLTパネルの納まり、防腐防蟻処理、仕上げ材等の納まりなどを含め、CLT構造に対する耐久設計法を検討する必要がある。ようやく途についた状況にある。

3) CLTの普及に向けた建築研究所の取り組み

建築研究所では、重点研究課題「木材の利用促進に資する中層・大規模木造建築物の設計・評価法の開発」(平成23~25年度)と重点研究課題「CLT等を構造材とする木造建築物の普及促進に資する設計法の開発」(平成26~27年度)において、我が国におけるCLT構造の建設を実現するために必要な技術的な知見を収集している。後者の研究課題では、以下の各課題に取り組んでいる。

- ① 日本農林規格に定める仕様のCLTに対する基準強度と許容応力度を定める際に参考となる技術資料の作成
 - ② 引きボルト接合を主体とするCLT構造に対する構造設計法原案の作成と、実大実験による同設計法の妥当性の検証
 - ③ ビス接合等を主体とするCLT構造に対する構造設計法原案を作成と、実大実験による同設計法の妥当性の検証
 - ④ CLT等を構造材とするパネル構造に対する燃えしる設計法原案の作成
 - ⑤ パネル取り合い部等の耐火性能に関する技術資料の作成
- なお、検討は国土交通省、林野庁、独立行政法人森林総合研究所等が実施する以下の事業と連携して進めている。

- ① CLTを用いた木造建築基準の高度化推進事業(国土交通省)
- ② 基準整備促進事業「CLT燃えしる設計法に関する検討」(国

土交通省)

- ③ 伐採木材の高度利用技術の開発 (森林総合研究所)
- ④ CLT 等新製品・新技術利用促進事業のうち CLT 実用化促進—強度データ等の収集・分析 (林野庁・森林総合研究所)
- ⑤ CLT 等新製品・新技術利用促進事業のうち CLT 実用化促進—長期挙動データ等の収集・分析 (林野庁・森林総合研究所)
- ⑥ CLT 等新製品・技術の開発促進事業のうち中高層建築物等に係る技術開発等の促進—CLT 強度データの収集 (林野庁・森林総合研究所)
- ⑦ CLT 等新製品・技術の開発促進事業のうち中高層建築物等に係る技術開発等の促進—CLT 長期挙動データの収集 (林野庁・森林総合研究所)

本稿では、建築研究所が取り組んでいる課題のうち、CLT の基準強度並びに許容応力度を定めるために必要な技術的知見を収集するために実施している研究の概要について紹介する。

II CLT の基準強度・許容応力度

1) 既存の木質構造材料の基準強度・許容応力度

木造建築物の構造材として良く用いられる構造用製材、構造用集成材、構造用単板積層材については、その材料規格が日本農林規格において定められている。そして各材料規格が定める各強度等級に属する材に対して、その基準強度が建築基準法の関連告示に示されている。例えば、製材の日本農林規格が定める目視等級区分構造用製材と機械等級区分構造用製材については、曲げ、圧縮、引張、せん断の各基準強度が、平成 12 年建設省告示第 1452 号に定められている (表 1 参照)。また、枠組壁工法用構造用製材の日本農林規格が定める枠組壁工法構造用製材についても、曲げ、圧縮、引張、せん断の各基準強度が、平成 12 年建設省告示第 1452 号において定められている。

さらに、集成材の日本農林規格が定める構造用集成材については、曲げ、圧縮、引張、せん断の各基準強度が平成 13 年国土交通省告示第 1024 号に定められている。また、単板積層材の日本農林規格が定める構造用単板積層材についても、曲げ、圧縮、引張、せん断の各基準強度が平成 13 年国土交通省告示第 1024 号に定められている。同告示には、製材や集成材のめり込み及び座屈に対する基準強度も定められている。

一方、構造用製材 (木材) の許容応力度の求め方については建築基準法施行令第 89 条に規定されており、材料強度の求め方については建築基準法施行令第 95 条に規定されている。また、

構造用集成材、構造用単板積層材の許容応力度と材料強度の求め方については、平成 13 年国土交通省告示第 1024 号に定められている。同告示には構造用製材、構造用集成材、構造用単板積層材のめり込みと座屈の許容応力度と材料強度の求め方も示されている。

表 1 製材の日本農林規格が定める目視等級区分構造用製材の基準強度

樹種	区分	等級	基準強度 (単位 N/mm ²)			
			圧縮	引張	曲げ	せん断
あかまつ	甲種構造材	一級	27.0	20.4	33.6	2.4
		二級	16.8	12.6	20.4	
		三級	11.4	9.0	14.4	
	乙種構造材	一級	27.0	16.2	26.4	
		二級	16.8	10.2	16.8	
		三級	11.4	7.2	11.4	
べいまつ	甲種構造材	一級	27.0	20.4	34.2	2.4
		二級	18.0	13.8	22.8	
		三級	13.8	10.8	17.4	
	乙種構造材	一級	27.0	16.2	27.0	
		二級	18.0	10.8	18.0	
		三級	13.8	8.4	13.8	
からまつ	甲種構造材	一級	23.4	18.0	29.4	2.1
		二級	20.4	15.6	25.8	
		三級	18.6	13.8	23.4	
	乙種構造材	一級	23.4	14.4	23.4	
		二級	20.4	12.6	20.4	
		三級	18.6	10.8	17.4	
ダフリカからまつ	甲種構造材	一級	28.8	21.6	36.0	2.1
		二級	25.2	18.6	31.2	
		三級	22.2	16.8	27.6	
	乙種構造材	一級	28.8	17.4	28.8	
		二級	25.2	15.0	25.2	
		三級	22.2	13.2	22.2	
ひば	甲種構造材	一級	28.2	21.0	34.8	2.1
		二級	27.6	21.0	34.8	
		三級	23.4	18.0	29.4	
	乙種構造材	一級	28.2	16.8	28.2	
		二級	27.6	16.8	27.6	
		三級	23.4	12.6	20.4	
ひのき	甲種構造材	一級	30.6	22.8	38.4	2.1
		二級	27.0	20.4	34.2	
		三級	23.4	17.4	28.8	
	乙種構造材	一級	30.6	18.6	30.6	
		二級	27.0	16.2	27.0	
		三級	23.4	13.8	23.4	
べいつが	甲種構造材	一級	21.0	15.6	26.4	2.1
		二級	21.0	15.6	26.4	
		三級	17.4	13.2	21.6	
	乙種構造材	一級	21.0	12.6	21.0	
		二級	21.0	12.6	21.0	
		三級	17.4	10.2	17.4	
えぞまつ及びとどまつ	甲種構造材	一級	27.0	20.4	34.2	1.8
		二級	22.8	17.4	28.2	
		三級	13.8	10.8	17.4	
	乙種構造材	一級	27.0	16.2	27.0	
		二級	22.8	13.8	22.8	
		三級	13.8	5.4	9.0	
すぎ	甲種構造材	一級	21.6	16.2	27.0	1.8
		二級	20.4	15.6	25.8	
		三級	18.0	13.8	22.2	
	乙種構造材	一級	21.6	13.2	21.6	
		二級	20.4	12.6	20.4	
		三級	18.0	10.8	18.0	

以上のように木造建築物の構造材として用いられる主要な木

質構造材料については、樹種や強度等級ごとに細かく基準強度が定められおり、許容応力度と材料強度の求め方が示されている。基準強度の値、許容応力度と材料強度の求め方は、膨大な実験研究の結果より定められたものであり、歴代の研究者、行政官、業界関係者の努力によるものである。

基準強度を求める方法には2つの方法がある。方法のひとつは、材料規格に定められている強度等級ごとに所定の量（一般に数百体から数千体）の試験体を用意し、曲げ、圧縮、引張りなどの強度試験を行い、強度を誘導する方法である。この方法は北米ではじめられたものであり、**Ingrade Test**（イングレードテスト）と呼ばれる。我が国でも構造用製材や枠組壁工法構造用製材の基準強度はこの方法によって求められている。一方、構造用集成材等の基準強度は、集成材等を構成するラミナ等の強度を用いて、理論と計算によって求めている。この場合、理論と計算が正しいかどうかを確認するために試験を行う必要がある。したがって、試験体の数は**Ingrade Test**を行うときほど多くは必要ないが、しかるべき理論と計算が検討されている必要がある。CLTの基準強度は、後者（理論と計算による方法）によって定められることになる。

2) CLTの材料規格

CLTの材料規格は、「直交集成板の日本農林規格」に定められている。同規格では対象とする木質材料として、「ひき板又は小角材（これらをその繊維方向を互いにほぼ平行にして長さ方向に接合接着して調整したものを含む。）をその繊維方向を互いにほぼ平行にして幅方向に並べ又は接着したものを、主としてその繊維方向を互いにほぼ直角にして積層接着し3層以上の構造を持たせた一般材」と定めており、規格自体にクロス・ラミネーテッド・ティンバ（CLT）の表記はないが、CLTは直交集成板に含まれると考えて良い。

同規格を理解する上で重要なキーワードとして、「ラミナ」「プライ数」「層数」がある。図2に示すように、「ラミナ」は直交集成板を構成するひき板、「プライ数」は厚さ方向に重ねているラミナの数、「層数」は繊維方向が異なる厚さ方向の層の数である。したがって、図2に示す直交集成板は、5層7プライとなる。また、「層」には「外層」と「内層」があり、外層と内層に同じ強度等級のラミナを用いる「同一等級構成」のものと、外層と内層に強度等級が異なるラミナを用いる「異等級構成」のものがある。前者は“Same”の頭文字“S”によって表され、後者は“Mix”の文字“Mx”を用いて表される。

直交集成板を構成するラミナには、等級区分機により区分されたラミナ、又は、目視等級区分により区分されたラミナが用いられる。本稿では以降、等級区分機により区分されたラミナを用いる場合について記述する。等級区分機により区分されたラミナの強度等級は表2に示すとおりである。ラミナは曲げヤング係数の平均値によって4つの強度等級に区分されている。また、各強度等級には、ラミナの曲げヤング係数の下限値、曲げ強さの平均値と下限値、引張り強さの平均値と下限値が定められている。これらの値を用いて、直交集成板自体の曲げヤング係数や各種強度値を計算によって求めることとなる。

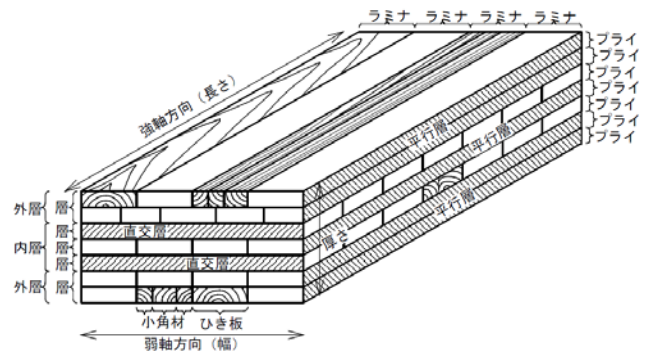


図2 直交集成板の各部の名称
(直交集成板の日本農林規格より)

表2 等級区分機により区分されたラミナの強度等級

等級区分機による等級	曲げヤング係数 (GPa)		曲げ強さ (MPa)		引張り強さ (MPa)	
	平均値	下限値	平均値	下限値	平均値	下限値
M120A	12.0	10.0	42.0	31.5	25.0	19.0
M90A	9.0	7.5	34.5	26.0	20.5	15.5
M60A	6.0	5.0	27.0	20.0	16.0	12.0
M30A	3.0	2.5	19.5	14.5	11.5	8.5

一方、直交集成板の強度等級は表3のように定められている。異等級構成による直交集成板には Mx120、Mx90、Mx60 の3種類の強度等級がある。強度等級の Mx120 は、外層ラミナの強度等級が M120A（曲げヤング係数の上限値が定められている M120B の場合もあるが、本稿では説明を省略する）、内層ラミナの強度等級が M30A とする強度等級であり、Mx90 は外層ラミナの強度等級が M90A、外層ラミナの強度等級が M30A、Mx60 は外層ラミナの強度等級が M60A、外層ラミナの強度等級が M30A とする。また、それぞれの強度等級に対して6種類の層数とプライ数の組み合わせが用意されている。各強度等級に対しては、曲げヤング係数の平均値と下限値、並びに曲げ強さの基準が定められている。

同一等級構成による直交集成板には S120、S90、S60、S30 の 4 種類の強度等級がある。各強度等級とも構成するラミナの強度等級は 1 種類であり、S120 が M120A、S90 が M90A、S60 が M60A、S30 が M30A となっている。異等級構成による直交集成板と同様に、それぞれの強度等級に対して 6 種類の層数とプライ数の組み合わせが用意されている。また、各強度等級に対して、曲げヤング係数の平均値と下限値、並びに曲げ強さの基準が定められている。

表3 直交集成板の曲げヤング係数及び曲げ強さの基準

	強度等級	構成の区分	曲げヤング係数 (GPa)		曲げ強さ (MPa)
			平均値	下限値	
異等級構成	Mx120-3-3	3層3プライ	10.4	8.6	16.4
	Mx120-3-4	3層4プライ	9.4	7.8	12.6
	Mx120-5-5	5層5プライ	8.4	7.0	14.6
	Mx120-5-7	5層7プライ	9.8	8.0	15.4
	Mx120-7-7	7層7プライ	7.0	5.8	12.8
	Mx120-9-9	9層9プライ	6.0	5.0	10.6
	Mx90-3-3	3層3プライ	7.8	6.4	14.0
	Mx90-3-4	3層4プライ	7.0	5.8	11.0
	Mx90-5-5	5層5プライ	6.2	5.0	12.2
	Mx90-5-7	5層7プライ	7.4	6.0	13.2
	Mx90-7-7	7層7プライ	5.2	4.2	10.4
	Mx90-9-9	9層9プライ	4.6	3.8	8.8
	Mx60-3-3	3層3プライ	5.2	4.2	11.6
	Mx60-3-4	3層4プライ	4.6	3.8	9.4
	Mx60-5-5	5層5プライ	4.2	3.4	9.8
	Mx60-5-7	5層7プライ	4.8	4.0	11.0
	Mx60-7-7	7層7プライ	3.6	3.0	8.2
	Mx60-9-9	9層9プライ	3.2	2.6	6.8
同一等級構成	S120-3-3	3層3プライ	10.4	8.6	19.0
	S120-3-4	3層4プライ	9.4	7.8	16.2
	S120-5-5	5層5プライ	8.6	7.0	15.8
	S120-5-7	5層7プライ	10.0	8.2	18.0
	S120-7-7	7層7プライ	7.6	6.2	13.0
	S120-9-9	9層9プライ	7.2	6.0	10.8
	S90-3-3	3層3プライ	7.8	6.4	15.6
	S90-3-4	3層4プライ	7.0	5.8	13.2
	S90-5-5	5層5プライ	6.4	5.2	12.8
	S90-5-7	5層7プライ	7.4	6.0	14.8
	S90-7-7	7層7プライ	5.8	4.8	10.6
	S90-9-9	9層9プライ	5.4	4.4	8.8
	S60-3-3	3層3プライ	5.2	4.2	12.2
	S60-3-4	3層4プライ	4.6	3.8	10.4
	S60-5-5	5層5プライ	4.2	3.4	10.0
	S60-5-7	5層7プライ	5.0	4.0	11.6
	S60-7-7	7層7プライ	3.8	3.0	8.2
	S60-9-9	9層9プライ	3.6	3.0	6.8
	S30-3-3	3層3プライ	2.6	2.0	8.8
	S30-3-4	3層4プライ	2.2	1.8	7.4
	S30-5-5	5層5プライ	2.0	1.6	7.2
	S30-5-7	5層7プライ	2.4	2.0	8.4
	S30-7-7	7層7プライ	1.8	1.4	6.0
	S30-9-9	9層9プライ	1.8	1.4	5.0

って設計しようとする場合、材料の基準強度、許容応力度、材料強度が必要となる。CLT の基準強度が仮に製材や集成材と同じような形で定められるとすると、直交集成板の日本農林規格に定める各強度等級に対して、曲げ、圧縮、引張り、せん断、めり込み、座屈の基準強度が与えられることになる。

CLT を木造建築物の構造材として使用する場合、構造設計に必要な材料の特性値は概ね以下のとおりとなる。

- (1)面外曲げ強度と弾性係数
- (2)面内曲げ強度と弾性係数
- (3)圧縮強度と弾性係数
- (4)引張強度と弾性係数
- (5)せん断強度と弾性係数
- (6)めり込み強度
- (7)座屈強度
- (8)面内せん断強度と弾性係数
- (9)荷重継続時間に係る調整係数
- (10)クリープによる変形増大係数

また、いずれの特性値についても、CLT の使い方によっては強軸方向のみならず弱軸方向（強軸方向と弱軸方向については図2を参照のこと）についても特性値が必要となる場合がある。

(1) 面外曲げ

面外方向に対する曲げ強度及び曲げ弾性係数は、構成するラミナの曲げ強度、引張強度、曲げ弾性係数から計算によって求めることができる。計算の方法は、北米において出版されている CLT Handbook に記載されている。表3に示す曲げ強度と曲げヤング係数の基準値も同計算法によって誘導されたものである。CLT Handbook には、曲げ強度と曲げ弾性係数を求める方法として以下の3つの方法が示されている。

- ① Mechanical Jointed Beams Theory
- ② Composite Theory
- ③ Shear Analogy Method

各方法において用いられている計算は以下に示す通りである。

Mechanical Jointed Beams Theory (曲げ強度)

Mechanical Joint Theory では、平行層のみが曲げに対して抵抗し、直交層はせん断変形するものとして、最外層ラミナに生じる応力を求めている。最外層ラミナに生じる応力（最大曲げ応力 σ_{max} ）はラミナ自体の曲げによる応力（ σ_{local} ）と部材全体の曲げによる応力（ σ_{global} ）の和として求められる。

3) CLT の基準強度・許容応力度を定めるための技術的な検討

CLT 構造による建物を時刻歴応答計算以外の構造計算法によ

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{local}} + \sigma_{\text{global}} \quad \dots\text{式1}$$

両応力は式2と式3によって表される。

$$\sigma_{\text{local}} = \frac{M}{I} \cdot \frac{h_i}{2} \quad \dots\text{式2}$$

$$\sigma_{\text{global}} = \gamma_1 \cdot \frac{M}{I} \cdot a_1 \quad \dots\text{式3}$$

ただし、
$$I = \frac{(EI)_{\text{eff}}}{E_1} \quad \dots\text{式4}$$

$$(EI)_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad \dots\text{式5}$$

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \left(\pi^2 \cdot \frac{E_i \cdot A_i}{l^2} \cdot \frac{d_i}{G_{Ri} \cdot b} \right)} \quad \dots\text{式6}$$

- ここで、
 M : 梁に生じる曲げモーメント
 h_i : i 番目の平行層ラミナの厚さ
 a_i : i 番目の平行層ラミナ中立軸の梁の中立軸からの距離
 E_i : i 番目の平行層ラミナの曲げ弾性係数
 A_i : i 番目の平行層ラミナの断面積
 d_i : i 番目の直交層ラミナの厚さ
 G_{Ri} : i 番目の直交層ラミナのせん断弾性係数
 b : 梁幅

Composite Theory (曲げ強度)

Composite Theory は合板の設計において用いられる平行層理論を適用したものである。合板の設計を行う場合には、直交層の弾性係数は0 ($E_{90} = 0$) として有効曲げ剛性を算出するが、CLT については、直交層も所定の弾性係数を有するものとして計算を行う。以下、CLT に平行層理論を適用する場合に用いられる幾つかの前提条件を示す。

- (ア) 各層は一体化しており、かつ、応力と歪みは線形関係にある。
- (イ) 全ての層の強度と弾性係数を考慮して計算を行う。計算では、直交層の弾性係数は平行層の弾性係数の 1/30 とする ($E_{90} = E_0 \times (1/30)$)。
- (ウ) せん断変形は考慮しない。したがって、所定の梁せい/スパン比を有する場合 (例えば、 $L/h \geq 30$) にした適用できない。
- (エ) 荷重条件に対して複合効果係数が定められている (表5参

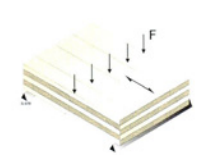
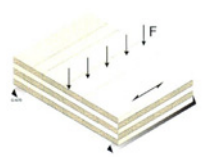
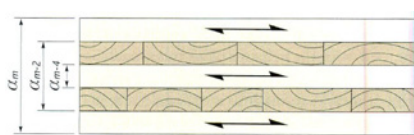
照)。

表4に表5に示す複合効果係数を用いて有効強度を算出するとき用いる式を示す。

表4 有効強度を算出するための式

荷重種類	最外層ラミナ の方向	有効強度
曲げ	平行方向 (強軸方向)	$f_{b,0,eff} = f_{b,0} \cdot k_1$
	直交方向 (弱軸方向)	$f_{b,90,eff} = f_{b,0} \cdot k_2 \cdot \frac{a_m}{a_{m-2}}$

表5 複合効果係数

荷重条件	複合効果係数 (k_i)
	$k_1 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0} \right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$
	$k_2 = \frac{E_{90}}{E_0} - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0} \right) \cdot \frac{a_{m-2}^3 - a_{m-4}^3 + \dots \pm a_1^3}{a_m^3}$
	

Shear Analogy Method (曲げ強度)

Shear Analogy Method では、Steiner 理論に基づいて、CLT の強軸方向の各ラミナの曲げ剛性の合計と強軸方向の各ラミナの中立軸まわりの面積モーメントを考慮して、以下の各特性値を算出して加算するものである。

- (ア) ラミナ i に生じる曲げモーメント ($M_{A,i}$) とせん断力 ($V_{A,i}$)
- (イ) ラミナ i に生じる曲げ応力の和 ($\sigma_{A,i}$) とせん断力の和 ($\tau_{A,i}$)
- (ウ) ラミナ i に生じる軸方向力 ($N_{B,i}$)
- (エ) ラミナ i に生じる軸方向応力 ($\sigma_{B,i}$)
- (オ) ラミナ i とラミナ $i+1$ 間に生じるせん断応力 ($\tau_{B,i \rightarrow i+1}$)

各特性値は式 7 から式 13 によって求めることができる。

$$M_{A,i} = \frac{E_i \cdot I_i}{(EI)_A} M_A \quad \dots \text{式 7}$$

$$V_{A,i} = \frac{E_i \cdot I_i}{(EI)_A} V_A \quad \dots \text{式 8}$$

$$\sigma_{A,i} = \pm \frac{M_{A,i}}{I_i} \cdot \frac{h_i}{2} \quad \dots \text{式 9}$$

$$\tau_{A,i} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{A,i}}{b \cdot h_i} \quad \dots \text{式 10}$$

$$N_{B,i} = \frac{E_i \cdot A_i \cdot z_i}{(EI)_B} M_B \quad \dots \text{式 11}$$

$$\sigma_{B,i} = \frac{N_{B,i}}{b_i \cdot h_i} \quad \dots \text{式 12}$$

$$\tau_{B,i \rightarrow i+1} = \frac{\sum_{j=i+1}^n E_j \cdot A_j \cdot z_j}{(EI)_B} V_B \quad \dots \text{式 13}$$

a_i : i 番目の平行層ラミナの中立軸の梁の
中立軸からの距離

E_i : i 番目の平行層ラミナの曲げ弾性係数

A_i : i 番目の平行層ラミナの断面積

d_i : i 番目の直交層ラミナの厚さ

G_{Ri} : i 番目の直交層ラミナのせん断弾性係
数

b : 梁幅

l : スパン

Composite Theory (曲げ弾性係数)

Composite Theory を用いて曲げ弾性係数を求める方法は、同理論を用いて曲げ強度を求める方法と基本的な考え方は同じである。表 5 に示す複合効果係数を用いて、表 6 に示す式により有効弾性係数を算出する。

表 6 有効弾性係数を算出するための式

荷重種類	最外层ラミナ の方向	有効弾性係数
曲げ	平行方向 (強軸方向)	$E_{b,0,eff} = E_{b,0} \cdot k_1$
	直交方向 (弱軸方向)	$E_{b,90,eff} = E_{b,0} \cdot k_2$

Mechanical Jointed Beams Theory (曲げ弾性係数)

Mechanical Joint Theory では、平行層のみが曲げに対して抵抗し、直交層はせん断変形するものとして、有効曲げ剛性 $((EI)_{eff})$ を求めている。

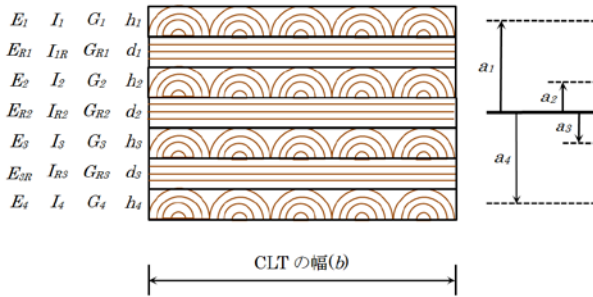


図 3 CLT の断面及び諸元の例 (7 層 7 プライ)

例えば、図 3 に示される CLT の有効曲げ剛性 $((EI)_{eff})$ は式 14 によって求めることができる。

$$(EI)_{eff} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2) \quad \dots \text{式 14}$$

$$\gamma_i = \frac{1}{1 + \left(\pi^2 \cdot \frac{E_i \cdot A_i}{l^2} \cdot \frac{d_i}{G_{Ri} \cdot b} \right)} \quad \dots \text{式 15}$$

ここで、 M : 梁に生じる曲げモーメント
 h_i : i 番目の平行層ラミナの厚さ

Shear Analogy Method (曲げ弾性係数)

Shear Analogy Method では、Steiner 理論に基づいて、CLT の強軸方向の各ラミナの曲げ剛性の合計と強軸方向の各ラミナの中立軸まわりの面積モーメントを考慮して、有効曲げ剛性 $((EI)_{eff})$ と有効せん断剛性 $((GA)_{eff})$ を求め、両剛性の値を用いて所定の荷重が作用したときの梁のたわみ量を求め、梁の見かけの曲げ弾性係数を求めるものである。

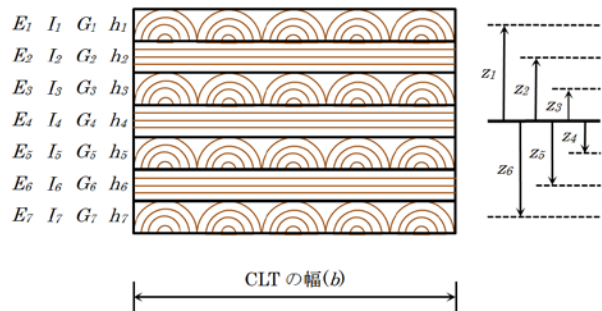


図 4 CLT の断面及び諸元の例 (7 層 7 プライ)

例えば図4に示されるような CLT の有効曲げ剛性 $((EI)_{eff})$ は式16により与えられる。

$$(EI)_{eff} = (EI)_A + (EI)_B \quad \dots \text{式 16}$$

ここで、 $(EI)_A = \sum_{i=1}^n E_i \cdot I_i = \sum_{i=1}^n E_i \cdot b_i \cdot \frac{h_i^3}{12} \quad \dots \text{式 17}$

$$(EI)_B = \sum_{i=1}^n E_i \cdot A_i \cdot z_i^2 \quad \dots \text{式 18}$$

- また、
- n : ラミナの総数
 - E_i : i 層ラミナのヤング係数
 - A_i : i 層ラミナの断面積
 - b_i : i 層ラミナの幅
 - h_i : i 層ラミナの高さ
 - z_i : 全層一体時の中立軸と i 層ラミナ重心の距離

また、有効せん断剛性 $((GA)_{eff})$ は式19より与えられる。

$$(GA)_{eff} = \frac{a^2}{\frac{h_1}{2 \cdot G_1 \cdot b_1} + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{h_i}{G_i \cdot b_i} + \frac{h_n}{2 \cdot G_n \cdot b_n}} \quad \dots \text{式 19}$$

- ここで、
- G_i : i 層ラミナのせん断弾性係数
 - a : 最外層ラミナ重心間の距離

有効曲げ剛性、及び、有効せん断剛性を実際に計算するためには、繊維方向のヤング係数 (E_p) 、繊維直交方向のヤング係数 (E_c) 、繊維方向のせん断弾性係数 (G_p) 、繊維直交方向のせん断弾性係数 (G_c) の値が必要となる。このうち、繊維方向のヤング係数 (E_p) については一般に既知であるので、繊維方向のヤング係数 (E_p) と他の係数との関係を示す以下の式によって、他の係数を定めることができる。ただし、式 20～式 22 に用いられている係数については検証を要する。

$$E_c = \frac{E_p}{e_1} \quad \dots \text{式 20}$$

$$G_p = \frac{E_p}{e_2} \quad \dots \text{式 21}$$

$$G_c = \frac{G_p}{e_3} \quad \dots \text{式 22}$$

ここで、 $e_1=30$ 、 $e_2=16$ 、 $e_3=10$

上記により有効曲げ剛性と有効せん断剛性が求まるので、梁に係る荷重分布の形状に応じて、荷重量 P とせん断変形を含む梁のたわみ量 δ を求めることができる。

適用

一般に前述の各理論のうち、曲げ強度の推定には Mechanical Jointed Beams Theory、曲げ弾性係数の推定には Shear Analogy Method が合うとされている。

(2) 圧縮・引張・面内曲げ

圧縮、引張、及び面内曲げに対する強度と弾性係数は、前述の3つの計算法の中の Composite Theory を用いて計算することができる。

圧縮・引張・面内曲げの強度

圧縮強度、引張強度、面内曲げの強度は、表7に示す複合効果係数を表8に示す式に代入することによって計算することができる。

表7 複合効果係数

荷重条件	複合係数 (k_i)
	$k_3 = 1 - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$
	$k_4 = \frac{E_{90}}{E_0} - \left(1 - \frac{E_{90}}{E_0}\right) \cdot \frac{a_{m-2} - a_{m-4} + \dots \pm a_1}{a_m}$

圧縮・引張・面内曲げの弾性係数

圧縮弾性係数、引張弾性係数、面内曲げの弾性係数は、表7に示す複合効果係数を表9に示す式に代入することによって計算することができる。

表8 有効強度を算出するための式

荷重種類	最外層ラミナの方向	有効弾性係数
曲げ	平行方向 (強軸方向)	$f_{b,0,eff} = f_{b,0} \cdot k_3$
	直交方向 (弱軸方向)	$f_{b,90,eff} = f_{b,0} \cdot k_4$
引張り	平行方向 (強軸方向)	$f_{t,0,eff} = f_{t,0} \cdot k_3$
	直交方向 (弱軸方向)	$f_{t,90,eff} = f_{t,0} \cdot k_4$
圧縮	平行方向 (強軸方向)	$f_{c,0,eff} = f_{c,0} \cdot k_3$
	直交方向 (弱軸方向)	$f_{c,90,eff} = f_{c,0} \cdot k_4$

表9 有効弾性係数を算出するための式

荷重種類	最外層ラミナの方向	有効弾性係数
曲げ	平行方向 (強軸方向)	$E_{b,0,eff} = E_{b,0} \cdot k_3$
	直交方向 (弱軸方向)	$E_{b,90,eff} = E_{b,0} \cdot k_4$
引張り	平行方向 (強軸方向)	$E_{t,0,eff} = E_{t,0} \cdot k_3$
	直交方向 (弱軸方向)	$E_{t,90,eff} = E_{t,0} \cdot k_4$
圧縮	平行方向 (強軸方向)	$E_{c,0,eff} = E_{c,0} \cdot k_3$
	直交方向 (弱軸方向)	$E_{c,90,eff} = E_{c,0} \cdot k_4$

(3) 座屈強度

平成13年国交省告示第1024号第2の二のイにおける圧縮材の座屈の材料強度は、有効細長比(λ)に応じて、表10のように定められている。

表10 圧縮材の座屈の材料強度

有効細長比	圧縮材の座屈の材料強度 (N/mm ²)
λ ≤ 30 の場合	F_C
30 < λ ≤ 100 の場合	$(1.3 - 0.01λ)F_C$
100 < λ の場合	$\frac{3000}{λ^2} F_C$

(注) λ : 有効細長比

F_C : 圧縮の基準強度

100 < λ の場合の座屈の材料強度

100 < λ の場合の座屈の材料強度 $\sigma_{cb} = \frac{3000}{\lambda^2} F_C$ は、オイラーの座屈荷重式より誘導されている。オイラーの座屈荷重式は式23による。

$$P_{CB} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad \dots \text{式23}$$

ここで、 E : 曲げ弾性係数

I : 断面二次モーメント

l : 座屈長さ

座屈強度は座屈荷重を部材の断面積で除した値になるので、式24となる。

$$\sigma_{cb} = \frac{P_{CB}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{l^2 A} \quad \dots \text{式24}$$

ここで、 A : 有効断面積

また、断面二次半径と細長比は式25と式26で表されるので、座屈強度は式27で表される。

$$\text{断面二次半径} : k = \sqrt{\frac{I_{eff}}{A}} \quad \dots \text{式25}$$

$$\text{細長比} : \lambda = \frac{l}{k} \quad \dots \text{式26}$$

$$\text{座屈強度} : \sigma_{cb} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad \dots \text{式27}$$

製材等（製材、集成材、単板積層材）については、圧縮強度と曲げ弾性係数との間に式 28 の関係があることが、過去の研究により知られているため、式 28 を式 27 に代入して、細長比が 100 より大きい場合の座屈強度の告示式（式 29）が得られている。

$$E \cong 300F_C \quad \dots\text{式 28}$$

$$\sigma_{cb} = \frac{3000}{\lambda^2} F_C \quad \dots\text{式 29}$$

$\lambda \leq 30$ の場合の座屈の材料強度

$\lambda \leq 30$ の場合の座屈の材料強度は、材の圧縮の基準強度となる。

$30 < \lambda \leq 100$ の場合の座屈の材料強度

$30 \leq \lambda < 100$ の場合の座屈の材料強度は、

$$(\lambda, \sigma_{cb}) = (30, F_C) \text{ と}$$

$$(\lambda, \sigma_{cb}) = (30, 0.3F_C)$$

を直線回帰した値となる。

CLT の座屈の材料強度（荷重）の求め方に対する提案

細長比 $100 < \lambda$ の場合の CLT の座屈の材料強度を求めるにあたっては、製材等（製材、集成材、単板積層材）について定めている圧縮強度と曲げ弾性係数との関係（式 28）が必ずしも成り立つとは言えないので、オイラーの座屈荷重式（式 23）を用いるのが適当と考えられる。ちなみに、CLT に対して行った曲げ試験の結果からは、 $E \cong 200F_C$ という結果も得られている。

オイラーの座屈荷重式（式 23）を CLT に適用するにあたっては以下の点に留意する必要がある。

- ① EI には有効曲げ剛性を用いること
- ② A には部材の有効断面積を用いること

なお、CLT の有効曲げ剛性は強軸方向については、直交集成板の日本農林規格に定める曲げヤング係数の値に全断面に対する断面二次モーメントを乗じて求めることができる。また、弱軸方向については、ラミナの曲げ弾性係数から CLT の曲げ剛性を計算によって求めることができる。

$\lambda \leq 30$ の場合の座屈の材料強度は、圧縮方向に対して繊維方向が平行なラミナのみが圧縮力を負担すると仮定して、部材の耐圧縮荷重を求め、これを全断面積で除した値とする。

$30 \leq \lambda < 100$ の場合の座屈の材料強度は、 $\lambda = 30$ のときの座屈の材料強度 σ_{cb} と $\lambda = 100$ のときの座屈の材料強度 σ_{cb} を直線

回帰した値とする。

計算式の検証

前述の CLT の座屈の材料強度（荷重）の求め方に対する提案が妥当であるかどうかを確認した結果について報告する。検証は、強度等級が Mx120 の CLT について行っており、試体の仕様は表 1 1 に示す通りである。試験体名の“3-3”などの表記は 3 層 3 プライであることを表し、“s”は強軸方向加力、“w”は弱軸方向加力を表す。写真 8 に試験の様子を示す。

表 1 2 に座屈荷重の計算値と測定値を比較した結果を示す。なお、座屈荷重は各試験体について実測した曲げ弾性係数を用いて計算したものである。強軸方向については、オイラーの座屈荷重式を用いて計算した値と実測した値は、実測値の方がやや低かったものの概ね同じ値とであった。一方、弱軸方向については、実測値がオイラーの座屈荷重式を用いて計算した値の約 2 倍になっていたが、原因は最外層のラミナ（圧縮側）が座屈に対して抵抗していたことが考えられる。最外層のラミナは CLT の製造方法によっては座屈荷重に寄与しない場合もある。したがって、安全側の評価となるように、最外層はないものとして、座屈荷重を計算するのが妥当と考えられる。

今後の検討課題としては、細長比 λ の計算方法、すなわち有効断面を用いて計算するか、全断面を用いて計算するかについて整理する必要がある。また、現行 $\lambda = 100$ としている長柱と中間柱の境界、並びに現行 $\lambda = 30$ としている中間柱と短柱の境界が CLT にも適用可能かどうかについて確認する試験を行う必要がある。

表 1 1 座屈試験体の仕様

試験体名	試験体寸法			外層の繊維方向と加力方向
	幅(mm)	長さ(mm)	厚さ(mm)	
3-3-s	296	2493	75	平行（強軸）
3-3-w	296	2493	75	直交（弱軸）
3-4-s	296	2890	100	平行（強軸）
3-4-w	296	2890	100	直交（弱軸）
5-5-s	296	2999	125	平行（強軸）
5-5-w	296	2999	125	直交（弱軸）
5-5-s	296	1084	125	平行（強軸）
5-5-w	296	1084	125	直交（弱軸）
5-7-s	296	3035	175	平行（強軸）
5-7-w	296	3035	175	直交（弱軸）



写真8 座屈試験の様子
(解説) 左：強軸方向加力、右：弱軸方向加力

表12 座屈荷重についての試験結果と計算結果

試験体名	細長比	曲げ弾性係数 (kN/mm ²)	座屈荷重計算値 (kN)	座屈荷重測定値 (kN)
3-3-s	95.8	11.10	210	329
3-3-w	345.4	0.60	10	21
3-4-s	75.7	9.76	440	335
3-4-w	200.2	1.33	39	84
5-5-s	72.3	9.58	697	552
5-5-w	115.3	2.14	113	207
5-5-s	26.1	5.60	988	927
5-5-w	41.7	1.73	820	541
5-7-s	52.8	9.90	1467	1201
5-7-w	116.6	1.06	150	238

(4) 荷重継続時間に係る調整係数

木造建築物の構造体を構成する横架材に長期間、継続的に荷重（以下、「長期継続荷重」と呼ぶ）が作用し続けると、たとえその荷重の大きさが横架材の曲げ耐力よりも小さな値であっても、材の中で微視的な破壊が徐々に進行し、この微視的な破壊の蓄積量が一定レベルを超えた時点で材が破壊することが一般に知られている。この現象は一般に「クリープ破壊」と呼ばれている。荷重継続時間に係る調整係数は、長期、中長期、中短期、短期に作用する荷重に対して木材や木質材料などによる曲げ部材がクリープ破壊しないように、基準強度に乗じる調整（低減）係数である。「荷重継続時間に係る調整係数」という用語は用いられていないが、建築基準法施行令第89条と平成13年国土交通省告示第1024号に定められている木材、集成材、単板積層材の許容応力度を求める際に基準強度に乗じる値がこれに相

当する。木材等に対する荷重継続時間に係る調整係数は、無欠点小試験片に対して行った長期荷重載荷試験の結果を用いてWoodらが誘導した実験式 (Madison Curve) を参考としてその基本的な値が定められている (図5参照)。Woodら以降、実大材を用いた長期荷重載荷試験がMadsenらによって行われ、長期載荷荷重に対する実大材の性状についての知見も蓄積されてきている (図6参照)。

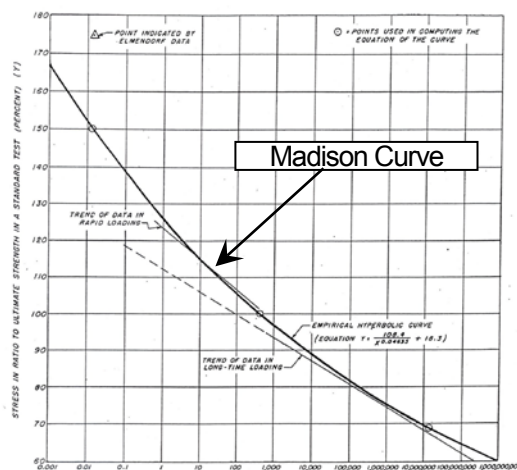


図5 Woodらによる研究結果

(解説) 縦軸が応力比、横軸が荷重継続時間の対数である。実線がMadison Curveであり、下に凸の曲線となる。

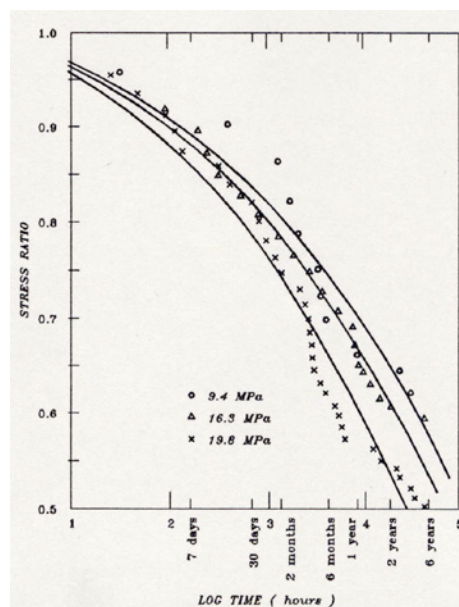


図6 Madsenによる研究結果

(解説) 縦軸が応力比、横軸が荷重継続時間の対数である。実大材については上に凸の曲線となる。

CLTは、ラミナの繊維方向を隣り合う層で互いに直交させているという点と、同じ層の中でラミナの幅はぎを行わずに平面的に並べているという点において、製材や集成材と構造が異なっており、このことによりCLTのクリープ破壊性状が製材や集成材と同じにならないことも考えられる。したがって、CLTの荷重継続時間に係る調整係数を製材等と同じとして良いかどうかについて確認する必要がある。

建築研究所ではCLTに対する荷重継続時間に係る調整係数を求めるために、森林総合研究所等と連携しながらCLTのクリープ破壊試験を行っている(写真9参照)。試験に供しているCLTの仕様はMx60-5-5であり、試験は継続中であるが、現在のところ図7に示す実験結果が得られている。なお、図中の青実線はMadison Curveである。赤実線は測定点の直線回帰であり、荷重継続時間に係る調整係数は暫定的に0.66と求まった。なお、試験は継続中であるため0.66という数値は今後変わることが十分に考えられる。また、著者が木質材料に対して同様の試験を行って求めた荷重継続時間に係る調整係数は0.66であり、施行令や告示で定められている0.55よりも高くなる傾向にあることを付記する。

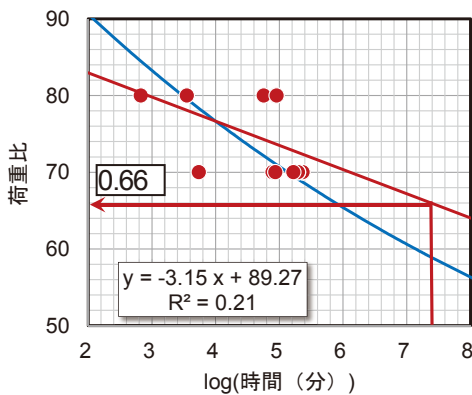


図7 クリープ破壊試験の結果

(解説) 図中の青実線はMadison Curve。赤実線は測定点の直線回帰。荷重継続時間に係る調整係数は暫定的に0.66と求まった。

(5) 変形増大係数

木材等の木質材料はクリープ変形する。このため、長期間荷重が作用し続け梁などの横架材の例えば50年後のたわみ量は、初期たわみの2倍程度になるとされている。平成12年建設省告示1459号では、「木造に対する長期間の荷重により変形が増大することの調整係数(変形増大係数)」を2と定めている。荷

重継続時間に係る調整係数と同様にCLTの変形増大係数についても、製材、集成材、単板積層材の変形増大係数と同じとして良いかどうかを確認する必要がある。

建築研究所ではCLTに対する変形増大係数を求めるために、森林総合研究所等と連携しながらCLTのクリープ試験を行っている(写真9参照)。試験に供しているCLTの仕様は、クリープ破壊試験と同じくMx60-5-5であり、試験は継続中であるが、現在のところ、変形増大係数の暫定値として1.9という試験結果を得ている。



写真9 クリープ破壊試験の様子

(解説) 温度20℃、相対湿度65%の恒温恒湿室内にて試験を実施。下段の試験がクリープ破壊試験、上段の試験がクリープ(変形)試験。

IV 今後の展望

1) 基準強度・許容応力度の策定に向けたロードマップ

林野庁と国土交通省は平成26年11月に「CLTの普及に向けたロードマップ」を発表した。図8はその一部を抜粋したものである。同ロードマップには、基準強度等の整備に向けた強度等のデータ収集を平成27年まで実施し、平成28年には基準強度の告示を制定することとしている。

		CLTの普及に向けたロードマップ			林野庁 国土交通省	
目標	現状	26年度	27年度	28年度	目指す成果	
CLT工法での建築を可能にする。壁、床等の構造の全てをCLTとする建築物	国土交通大臣の認定を受けて建設。	強度データ収集		基準強度告示	追加データ収集	国土交通大臣認定を受けず、比較的目的な計算により建設可能に
		一般的な設計法を確立するための検討・実大実験		一般的な設計法告示(注1)		
	規模等に応じた耐火性能を確保することで建設。	「燃えしろ」に係る検討・実験等		燃えしろ設計(注2)告示		3階程度以下の建築物について、CLTを「現し」(注2)で使用可能に(※)準耐火建築物が求められる規模等の建築物

図8 CLTの普及に向けたロードマップ(抜粋)

2) 強度等の評価に関する検討

独立行政法人建築研究所、並びに、独立行政法人森林総合研究所をはじめ、関係機関はロードマップの実現に向けて、平成27年度以降も引き続き、連携して試験研究を行う予定である。

V おわりに

CLT 構造を取り巻く現在の状況は、枠組壁工法に対する技術基準が検討された1970年代前半、或いは、大断面集成材構造に対する技術基準が検討された1980年代中盤と似ている。両構法については、その後、技術基準が整備され、現在では我が国を代表する木造構法として広く普及している。CLT 構造も近い将来、我が国を代表する木造構法の一つとなるであろう。

参考文献

- 1) 直交集成板の日本農林規格(農林水産省告示第3079号)。
- 2) “CLT Handbook, Cross-Laminated Timber”, FPIInnovations, ISBN 978-0-86488-547-0.
- 3) Schickhofer, G. Thiel, A. 2011, “CLT - Research and Testing at TU Graz”, Cross-Laminated Timber Symposium, Vancouver.
- 4) 渋沢龍也, 藤田和彦, 宮武敦, 新藤健太, 平松靖, 長尾博文, 井道裕史, 青木謙治, 渡部博, 中島史郎: スギを用いた CLT の面外曲げ性能, 木材工業, Vol.68, No.11, pp. 526-531, 2013.
- 5) 中島史郎, 宮武敦, 渋沢龍也, 新藤健太, 荒木康弘, 孕石剛志, 中島洋: クロス・ラミネイティド・ティンバー (CLT) の座屈性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp. 319-320, 2014.
- 6) Wood, L.W. 1951, “Relation of Strength of Wood Duration of Load”, F.P.L. Report No. R1916.
- 7) Liska, J.A. 1950, “Effect of Rapid Loading on the Compression and Flexural Strength of Wood”, F.P.L. Report No. R1767.
- 8) 中島史郎, 宮武敦, 渋沢龍也, 荒木康弘, 山口修由, 孕石剛志, 安藤直人, 安村基: スギを用いて製造した CLT の長期鉛直荷重に対する力学的特性, 木材工業, Vol.68, No.11, pp. 538-543, 2013.
- 9) Nakajima S, Miyatake A, Shibuwasa T, Araki Y, Yamaguchi N, Haramiishi T, Ando N and Yasumura M: Creep and duration of load characteristics of cross

laminated timber, Proceedings of 13th World Conference on Timber Engineering, Quebec, Canada, 2014.