

中層・大規模木造建築物の普及に資する設計・評価法の開発
構造研究グループ 主任研究員 荒木康弘

中層・大規模木造建築物の普及に資する 設計・評価法の開発

構造研究グループ 主任研究員 荒木 康弘

目次

- I はじめに
- II 材料に関する検討
 - (1) CLT に関する検討
 - (2) B種単板積層板 (LVL) に関する検討
- III 構造関係の取り組み
 - (1) CLT 構造の構造設計法に関する検討
 - (2) 中層集成材フレーム構造の構造設計技術に関する検討
 - (3) 中層枠組壁工法の構造設計技術に関する検討
 - (4) 平面混構造構造の構造設計技術に関する検討
- IV 防火関係の取り組み
- V 中層・大規模木造建築物の炭素収支の評価に関する検討
- VI まとめ
- 参考文献

I はじめに

第一約束期間において我が国に定められた地球温暖化ガス排出量削減目標は 6%である。このうち 3.8%は森林における二酸化炭素の吸収に期待されている。一方、我が国は 2020 年までに、地球温暖化ガスの排出量を 1990 年比で 25%削減するという目標を掲げている。この目標を達成するために、森林における二酸化炭素の吸収に対する期待がこれまで以上に高まることも考えられる。森林における二酸化炭素の吸収量を増加させるためには、木材の利用拡大をはかり、林業と林産業の活性化を促す必要がある。

木材の利用拡大を実現する上で、製紙パルプ産業に次いで木材の消費量が多い建築分野が担う役割は大きい。すなわち、建築分野における木材の利用拡大をはかることが、林業と林産業の活性化につながる。建築分野における木材の使用量を増やす

ためには、これまでに木材があまり使われてこなかった集合住宅、学校、事務所などの中層・大規模建築物の構造材として木材を積極的に利用し、木材に対する新しい需要を開拓する必要がある。海外では既に中層の木造建築物の建築が可能となっており、イギリスの 9 階建ての木造集合住宅をはじめ、中層の木造建築物が建てられ始め、木造建築物の新しい用途が開拓されている。しかしながら、我が国においては、これまで中層・大規模木造建築物に対するニーズが海外ほど多くはなかったため、中層・大規模建築物を木造で建設しようとする際に必要な基準類が必ずしも十分に整備されておらず、建設に至るハードルは高い。例えば、海外で普及し始めている新しい木質構造材料に対する材料認定の受け皿がない、高度な構造設計が必要となる、防火上の制限から建設できないなどの様々な障壁に当たる。

このような背景のもと、建築研究所では、平成 23 年度から 27

年度にかけて、中層・大規模木造建築物を建設しやすい環境を整備することを目的として、材料、構造、防火の各視点から、木造建築物の設計と評価に関わる検討を進めてきた。主な検討課題は以下の通りである^{1),2),3)}。

<材料>

●直交集成板 (CLT:クロス・ラミネーテッド・ティンバー) の材料強度に関する検討 (森林総合研究所と共同で検討)

●B 種単板積層板 (LVL) の材料強度に関する検討 (全国 LVL 協会との共同研究で検討)

●中層・大規模木造建築物の炭素収支の評価に関する検討

<構造>

●CLT 構造の構造設計法に関する検討 (CLT を用いた木造建築基準の高度化推進事業の事業主体との共同研究で検討)

●中層集成材フレーム構造の構造設計技術に関する検討

●中層枠組壁工法の構造設計法に構造設計技術に関する検討 (日本ツーバイフォー協会との共同研究で検討)

●木造と RC 造の平面構造の構造設計技術に関する検討

<防火>

●国内外の木造建築物の防火規制の考え方に関する検討

●実建物の火災条件を考慮した耐火試験の評価方法の検討

●LVL 及び CLT の燃えしろ設計のための検討 (基準整備促進事業の事業主体との共同研究で検討)

●木造 3 階建学校の防火基準に関する検討 (木造建築基準の高度化推進事業との共同研究で検討)

II. 材料に関する検討

(1) CLT の材料強度に関する検討

現在、CLT 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 年代に開発された新しい木質構造材料で、欧州では、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 の用途としては、多層建築をはじめ、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。

CLT の日本農林規格が 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。

基準強度を求める方法には 2 つの方法がある。一つは、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。もう一つの方法は、例えば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、理論と計算法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法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。

また、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についても特性値が必要となる場合がある。

建築研究所では、森林総合研究所をはじめとする関係機関と連携して CLT の基準強度策定に向けた検討を行い、平成 28 年度初め頃までに関連告示を制定する予定である。ここでは、CLT の各方向の基準強度の考え方を紹介する。

CLT の各方向の基準強度は、表 1 及び図 1 に示す計算方法等により算定し、実験結果と計算値が整合することを確認している。以下に各方向の強度の算定方法を示す。

1) 面外曲げ強度

最外層強軸の面外曲げ強度は、式 1 より求める。

$$F_b = \sigma_{b_oml} \frac{I_{vA}}{I_{vO}} k_b k_{5\tau h} \quad (式 1)$$

ここで

σ_{b_oml} : 最外層ラミナの曲げ強度 (N/mm²)

I_{vA} : 等価断面の I (mm⁴)

$I_{vA} = \sum(E_i I_i + E_i A_i z_i^2) / E_0$ により算定 (E_i は i 層ラミナの弾性係数、 I_i は i 層の断面二次モーメント、 A_i は i 層の断面積、 z_i は全層一体時の中立軸と i 層ラミナ重心の距離、 E_0 は最外層ラミナの弾性係数)。弾性係数は、ラミナの等級ごとに JAS で規定されている「曲げヤング係数 (平均値)」を使用。また、直交層の弾性係数は 0 とする。

I_{vO} : 実断面の断面二次モーメント (mm⁴)

k_b : 面外曲げ強度調整係数 : 0.65

$k_{5\%}$: 95% 下側許容限界値算出係数 (3/4)

CLT の面外曲げ強度を算定するに当たり、ラミナの曲げ強度を用いると実験値よりも計算値の方が大きくなる。これは、CLT が直交層を有する材料であるため、より最外層に働く力が引張力に近いと考えられる。 k_b は、その影響を考慮するための数値である。

また、最外層が加力方向に対して直交する (弱軸) 場合は、 σ_{b_oml} は最外層から 2 層目のラミナの曲げ強度、 I_{vA} 及び I_{vO} は、最外層を除いた断面で算定する。

2) 面内曲げ強度・圧縮強度・引張強度

最外層強軸の面外曲げ強度は式 2 より求める。

$$F_b = \sigma_{b_oml} \frac{A_A}{A_O} k_{bl} k_{5\%} \quad (\text{式 2})$$

最外層強軸の圧縮強度は式 3 より求める。

$$F_c = \sigma_{c_oml} \frac{A_A}{A_O} k_{5\%} \quad (\text{式 3})$$

最外層強軸の引張強度は式 4 より求める。

$$F_t = \sigma_{t_oml} \frac{A_A}{A_O} k_{5\%} \quad (\text{式 4})$$

ここで

σ_{b_oml} : 最外層ラミナの曲げ強度 (N/mm²)

σ_{c_oml} : 最外層ラミナの圧縮強度 (N/mm²)

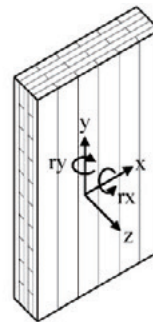
σ_{t_oml} : 最外層ラミナの引張り強度 (N/mm²)

A_A : 等価断面の断面積 (mm²)

$A_A = \sum(E_i A_i) / E_0$ により算定 (図 2)。 E_i は i 層ラミナの弾性係数、 A_i は i 層の断面積。 E_0 は最外層のラミナの弾性係数。等価断面を算定する際の弾性係数は、ラミナの

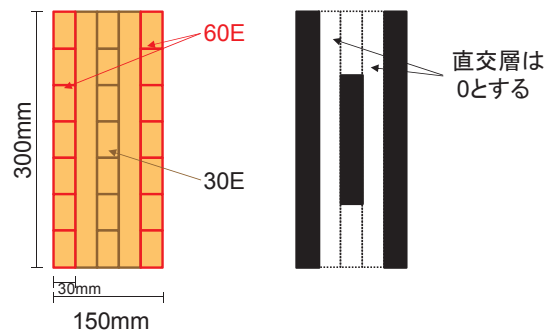
表 1 CLT 各方向の応力と算定方法

方向	応力	算定方法
x	圧縮 (最外層弱軸)	等価断面法 (直交層無視)
x	引張 (最外層弱軸)	
y	圧縮 (最外層強軸)	
y	引張 (最外層強軸)	
rz	面内曲げ (強軸)	
rz	面内曲げ (弱軸)	
rx	面外曲げ (強軸)	
ry	面外曲げ (弱軸)	
xz	面外せん断 (強軸)	
yz	面外せん断 (弱軸)	
xy	面内せん断	幅はぎ接着されていない CLT における接着層の変形を考慮したせん断強度算定式



x : 表層ラミナ直交方向
y : 表層ラミナ平行方向
z : CLT パネル厚さ方向
rx : x 軸回り (強軸)
ry : y 軸回り (弱軸)

図 1 CLT パネルの方向の定義



実断面 A_O
= 300 × 150
= 45,000 mm²

等価断面 $A_A = 60E/60E \times 300$
× 30 × 2 + 30E/60E × 300 ×
30 = 22,500 mm²

図 2 等価断面法の算定例

等級ごとにJASで規定されている「曲げヤング係数(平均値)」を使用する。直交層の弾性係数は0とする。

A_0 : 実断面の断面積 (mm²)

k_{bl} : 面内曲げ強度調整係数 (0.8)

k_{5ch} : 95%下側許容限界値算出係数 (3/4)

ラミナの曲げ強度は「平使い」の値であるのに対し、CLTの面内曲げではラミナの「縦使い」の方向に力が加わるが、両者の強度が異なる。面内曲げ強度調整係数 k_{bl} は、その調整係数に相当する。また、最外層が加力方向に対して直交する(弱軸)場合は、 $\sigma_{b,oml}$ 、 $\sigma_{c,oml}$ は、 $\sigma_{t,oml}$ は最外層から2層目のラミナの曲げ強度、 A_A 及び A_0 は、最外層を除いた断面で算定する。

3) 面内せん断強度

面内せん断強度は、式5により求める。

$$F_v = \begin{cases} \frac{f_{v,lam} \cdot t_{net}}{f_{v,lam90} \cdot t_{gross}} \\ \frac{b \cdot n_{ca}}{2t_{gross} \cdot \frac{1}{f_{v,tor}} \cdot \left(1 - \frac{1}{m^2}\right) + \frac{2}{f_R} \cdot \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{m^2}\right)} \end{cases} \quad (式5)$$

ここで、

$f_{v,lam}$: ラミナ繊維方向のせん断強度 (N/mm²)

$f_{v,lam90}$: ラミナ繊維直交方向のせん断強度 (N/mm²)

$f_{v,tor}$: ラミナ交差面の接着層のねじりせん断強度 (N/mm²)。スギで3とする。

f_R : ラミナ交差面の接着層のローリングシア強度 (N/mm²)。スギで1.125 (N/mm²)³⁾。

n_{ca} : パネル厚さ方向の接着面数

b : ラミナ幅 (mm)

t_{net} : 強軸方向または弱軸方向のラミナ総厚さのうち小さい方の厚さ (mm)

t_{gross} : CLT厚さ

m : 幅方向ラミナの枚数の最小値

面内せん断強度の算定式は、幅はぎ接着されていないCLTにおける接着層の変形を考慮したものである⁴⁾。 $f_{v,lam90}$ はラミナ繊維直交方向のせん断強度で、 $f_{v,lam}$ の3倍以上の強度があるとされている⁵⁾。また、式5の1番目の式は、CLTが一体となってせん断変形することで全断面にわたり生じるせん断破壊(図3I)、2番目の式は、各層ラミナの幅はぎ位置で直交する層のラミナが

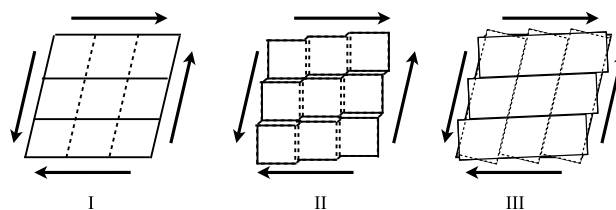


図3 面内せん断破壊の破壊モード

せん断変形することによるせん断破壊(図3II)、3番目の式は、2つの直交するラミナの接着面で生じるローリングシアやねじり変形によるせん断破壊(図3III)を意味している。

4) 面外せん断強度

面外せん断強度は、式6により求める。

$$F_s = \frac{\sigma_{s,oml} k_{5ch}}{3} \quad (式6)$$

ここで、

$\sigma_{s,oml}$: 最外層ラミナのせん断強度 (N/mm²)

k_{5ch} : 95%下側許容限界値算出係数 (3/4)

面外せん断強度は、ラミナに横引張方向の荷重が加わる時を想定した値であり、その値はせん断強度の1/3とされている⁷⁾。 $\sigma_{s,oml}$ には、乾燥による割れ等がないものとして、集材材ラミナのせん断強度を用いることとしている。

5) 座屈強度

座屈強度は、式7~9により求める。

$$1) \lambda \leq 30 \quad f_k = F_c \quad (式7)$$

$$2) 30 < \lambda \leq 100 \quad f_k = (1.3 - 0.01\lambda) \cdot F_c \quad (式8)$$

$$3) 100 < \lambda \quad f_k = 3000 \cdot F_c / \lambda^2 \quad (式9)$$

ここで、

F_c : CLTの圧縮の基準強度 (N/mm²)

l : 座屈長さ(mm)

λ : 細長比 (= l/i)

i : 断面2次半径 (= $\sqrt{I_0/A_0}$)

I_0 : 全断面の断面2次モーメント

A_0 : 全断面の断面積

多数の座屈試験を実施した検討、CLTも他の木材と同様に細長比と圧縮の基準強度により座屈荷重を計算する方法で安全側となる事を確認した。細長比を計算する際の断面2次半径は全

断面に対する断面2次モーメントと断面積を用いれば良い。

6) めり込み強度

めり込み強度は製材と同等と考えられることを実験的に確認した。

7) 荷重継続時間に係る調整係数

図4に、DOL 確認試験結果の一例を示す。実験の結果、荷重継続時間に係る調整係数は、全測定点を直線回帰したときは0.65であるが、平均値を直線回帰したときは0.56となるため、CLTの短期許容応力度に対する長期許容応力度の比は他の木材と同等と考えられる。

8) クリープによる変形増大係数

CLTのクリープ破壊試験の結果、変形増大係数の平均値は1.7であり、木材等に定められている変形増大係数2と同等とすることができると考えられる。

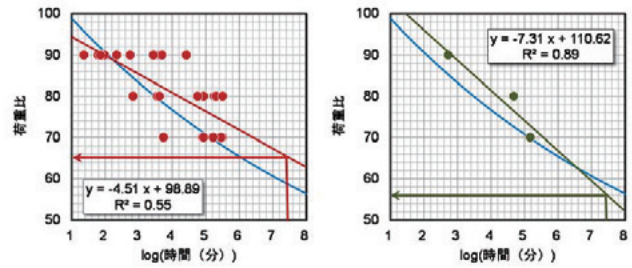


図4 DOL 確認試験結果

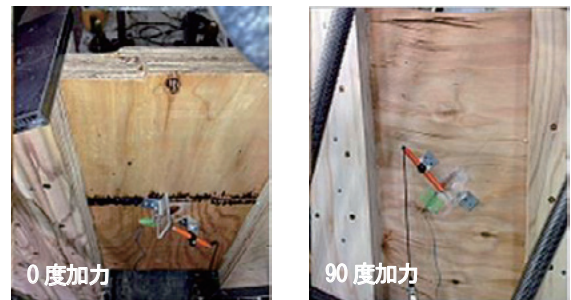


図5 直交4層のB種LVL 面内せん断試験

(2) B種単板積層板 (LVL)

2013年11月にJASが改正され、直交単板を複数枚用いたLVL (B種LVL)の生産が可能となった。従来の構造用LVLでは軸材料としての利用が主であったが、B種LVLは、面材としての利用や、中層大規模木造建築物での利用が期待される。

建築研究所では、全国LVL協会と共同で、B種LVLの面内せん断性能(図5)、クリープ破壊・変形性能及びボルト接合部のせん断性能(図6)に関する検討を行った⁸⁾。面内せん断性能に関しては、最外層の繊維方向が加力方向と同一の場合、直交層を有するLVLでは最大荷重の大幅な向上が確認された。ボルト接合では、最外層の繊維方向が加力方向と同一及び直交の両方において、最大荷重と変形性能に大幅な向上が見られた。またクリープ試験については、50年に相当するクリープたわみ比 K_{50year} の平均値は0.75 (0.67~0.85に分布)であり、変形増大係数の平均値は1.34 (1.18~1.50に分布)であった。現行の設計法の製材の値(2.0)を下回っていることを確認した。

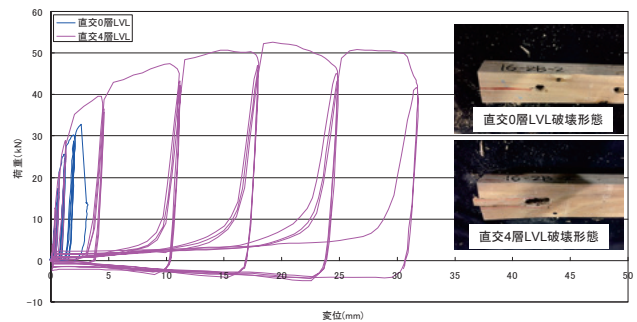


図6 ボルト試験の荷重変位曲線 (M16、0度方向、端距離7d)

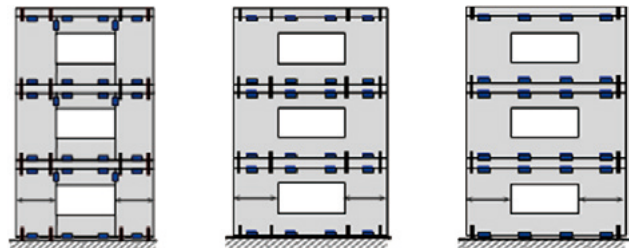


図7 想定する構造形式

III. 構造関係の取り組み

(1) CLT 構造の構造設計法に関する検討

CLTの基準強度が制定されると、時刻歴応答計算に依らない方法での設計が可能となる。しかし、我が国にはCLT構造に関する構造設計法が整備されていなかった。そこで建築研究所では、国土交通省及び関係機関や有識者とともにCLTの構造設計

法(案)を作成すべく、これまで検討を進めてきた(表2)。以下にその概要を紹介する。

1) 想定する構造形式

想定する構造形式としては、以下に示す3種類である(図7)。

- ①小幅パネル工法：1～2m 程度の壁パネルを用いて建物を構成する工法。開口部を無開口壁パネル、腰壁パネル、垂れ壁パネルで構成する。
- ②大版パネル工法1：開口部をくり抜いた大版パネルを用いて建物を構成し、無開口壁部分の四周に引張金物を設ける。
- ③大版パネル工法2：開口部をくり抜いた大版パネルを用いて建物を構成し、大版パネルの四周に引張金物を設ける。

2) 構造計算ルートと各ルートが対象とする建物規模

- ①限界耐力計算：高さ≤60m。階数、規模の制限はない。小幅パネル工法、大版パネル工法1、大版パネル工法2を用いる事ができる。
- ②保有水平耐力計算（ルート3）：高さ≤60m。階数、規模の制限はない。小幅パネル工法、大版パネル工法1、大版パネル工法2を用いる事ができる。
- ③許容応力度等計算（ルート2）：階数3以下、高さ及び規模の制限はない。小幅パネル工法、大版パネル工法1、大版パネル工法2を用いる事ができ、各工法ともに開口幅は4mまでとする。
- ④許容応力度計算（ルート1）：階数3以下、高さ13m、軒高9m。小幅パネル工法、大版パネル工法1を用いる事ができ、各工法ともに開口幅は4mまで、無開口壁部分の長さは0.9m～2mまでとする。

3) 一次設計

ルート1～3に関しては、標準ベースシア係数 $C_0=0.2$ における存在応力に対して、部材・接合部が許容応力度または許容耐力以下となる事を確認する。限界耐力計算に関しては、稀に発生する地震動に対して、建物全体が損傷限界耐力及び損傷限界変位を下回ることと部材・接合部が許容応力度または許容耐力以下となることを確認する。また、許容応力度計算（ルート1）では、CLT壁パネルの性能を腰壁・垂れ壁の有無等による10～20kN程度の水平抵抗要素として扱うことができる。

4) 二次設計

限界耐力計算及び保有水平耐力計算では、終局状態の安全性を計算により確認する。具体的には、 $C_0=1.0$ 相当の外力（限界耐力計算は極めて稀に発生する地震動）に対して、部材・接合部が基準強度または終局耐力以下である事を確認する。ルート3で設計する際の構造特性係数（Ds）は、解析的検討の結果、接合部仕様と無開口パネル部分の寸法により、0.55～0.75を用いることとしている（最終的に変更の可能性のある事を記載しておく）。

許容応力度等計算では、終局状態の安全性を直接的には確認しないため、1次設計に加え以下の検討を行う必要がある。

表2 CLT工法の設計法概要

		限界耐力計算	保有水平耐力計算	許容応力度等計算 (ルート2)	許容応力度計算 (ルート1)
階数・規模	規定	60m以下		3階以下 高さ31m以下	3階以下 高さ13以下 軒高9m以下
稀地震 または 1次 設計	C0	0.2以上	0.2以上		
	検定式	損傷限界時 層せん断力 Q_{dn} \leq 損傷限界耐力 Q_d 層間変形角 γ_{dn} \leq 損傷限界 変形角 γ_d ($\gamma_d: 1/200$)	$Q_d \geq Q_{dn} (= A_i \cdot R_t \cdot Z \cdot C_i \cdot \Sigma w_i)$ 応力解析: 存在応力で検定 全ての部材・接合部が短期許容応力度を超えない事		
極稀 地震 ・ 2次 設計	C0	1.0相当	1.0	-	
	Ds, Fh	Fh: 建告第1457号 第9に基づき算出 第2項第二号のhの 式の $\gamma_1: 0.20$	<引張接合部> ①1階壁脚: $\delta u \geq 40\text{mm}$ かつ 10%以下の 伸び能力、かつ その他の階の 壁脚部: $\delta u \geq 20\text{mm}$ かつ 10%以下の伸び能力 $\Rightarrow D_s = 0.5 \sim 0.6$ (暫定) ②上記以外: $D_s = 0.75$ (暫定)	-	
	検定式	安全限界時 層せん断力 Q_{sn} \leq 安全限界耐力 Q_s	$Q_u \geq Q_{un}$ (= $A_i \cdot F_{es} \cdot R_t \cdot Z \cdot D_s \cdot \Sigma w_i$)	-	
	変形制限	層間変形角 γ_{sn} \leq 安全限界 層間変形角 γ_s ①3階建まで: $\gamma_s = 1/30$ ②4階建以上: $\gamma_s = 1/75$ (暫定)	-	層間変位 \leq $H/200$ ($H/120$) (短期水平力に対し)	-
	剛性率	Fsで考慮		剛性率 ≥ 0.6	耐力壁の下には 同幅の耐力壁を 設ける
偏心率	Feで考慮		偏心率 ≤ 0.15 or 偏心率 ≤ 0.3 + 振じれ補正		
CLT・ 接合部 の検定	引張・せん断接合部応力(変位) \leq 終局耐力(変位)		(1)1階壁脚部 引張接合部の $\delta u \geq 40\text{mm}$ かつ 10%以下の伸び能力 かつ他の階の壁脚部 引張接合部の $\delta u \geq 20\text{mm}$ かつ 10%以下の伸び能力 各階の部材・ 引張接合部 ・せん断接合部: $P_a \geq F_L + F_E$ $\times 1.3 \sim 1.7$ (2) (1)以外 各階の部材・ 引張接合部 ・せん断接合部: $P_a \geq F_L + F_E \times 2.5$ P _a : 接合部 短期許容耐力 F _L : 長期荷重 F _E : 短期荷重		規定の部材・ 接合部仕様を 用いる場合、 部材・接合部の 応力度検定を 省略

①層間変形角の確認：短期の応力に対し、1/200rad.ないし1/120rad. 以下であることを確認する

②剛性率、偏心率を確認する

③部材・接合部の応力割増し：大地震時の安全性を保障するために、短期の部材・接合部の応力に 1.3~2.5 の割増し係数を乗じた値を求め、部材、接合部が短期許容応力度又は短期許容耐力以下であることを確認する。

許容応力度計算では、二次設計として、偏心率の確認を行うが、剛性率及び応力割増しによる部材・接合部の検討は必要ない。その一方で、以下の規定に従う必要がある。

- 60cm の垂れ壁を設ける
- 壁パネルの長さに応じて、表3に示す接合部を用いる
- 壁パネルの配置を全階連層とする。

その他、せん断接合部を用いる場合は、長期と短期の組合せ軸力に対して、摩擦係数0.3として摩擦力を考慮してせん断接合部の設計を行うこととしている。

また、ルート2において応力割増し係数を2.5倍とする場合、及びルート3においてDs =0.75を用いる場合、壁パネルの長さの上限や開口寸法の上限、接合部の規定は全て除外される

(2) 中層集成材フレーム構造の構造設計技術に関する検討

平成23年度の研究開始当初、4階建以上の中層木造建築物の構造設計技術を検討するためには、まず耐火構造とするために必要な各部仕様をまとめる必要があった。そこで建築研究所では、木材利用促進を目的として、有識者とともに集成材フレームを用いたプロトタイプ建築物を考案した。また、設計法開発のための具体的な構造検討課題を抽出することを目的として「耐火・準耐火木造軸組構造建築物標準詳細図集」を作成した(図8)⁹⁾。同資料は、平成24年3月時点で実現可能な、耐火木造及び準耐火木造のための技術を整理したものである。

同資料を用いて3階建(準耐火)、4階建(1時間耐火)、5階建(2時間耐火、1F:RC,2~5F:W)の引きボルト式接合による集成材構造に対する設計事例を取りまとめた(図9)。試設計建物の規模は、基準階平面が7.2m×14.4m、耐震要素としては、短辺方向が引きボルト式接合による集成材フレームを幅方向に2材合わせにした架構、長辺方向は構造用合板による耐力壁構造である。

引きボルト式接合部を設計するにあたり、破壊モードが靱性型となるような保証設計を提案した。例えば柱梁接合部の場合、

表3 許容応力度計算の接合部仕様(案)

CLT 等級 (以上)	無開口壁 パネル長	引張 接合部	引張接合部
S60-3 層 3 プライ	0.9m 以上 1.5m 以下	1階 壁脚部	ABR490 M16、有効長さ 400mm 以上
		その他	ABR490 M20 以上
Mx60-5 層 5 プライ	1.5m 超 2m 以下	1階 壁脚部	ABR490 M20、有効長さ 400mm 以上
		その他	ABR490 M20 以上

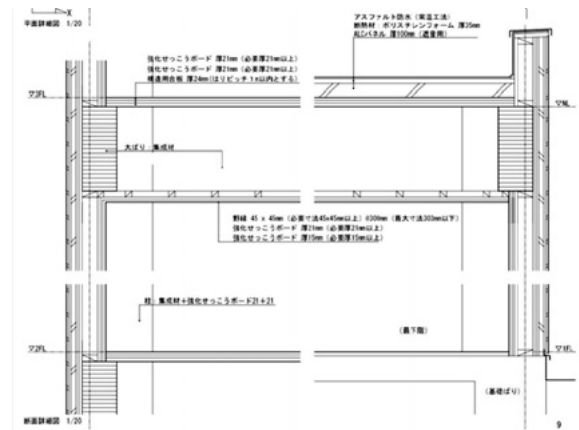


図8 耐火・準耐火木造軸組構造建築物標準詳細図集

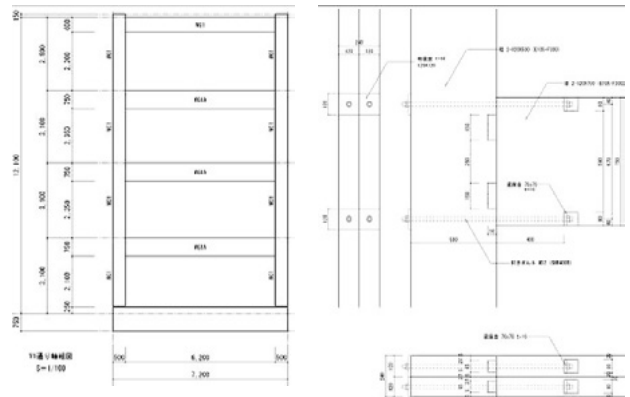


図9 4階建耐火建築物の設計事例

想定される5つの破壊モード(①引きボルトの引張破壊、②座金から梁木口へのせん断破壊、③梁座金の繊維方向への圧縮による木部降伏(→最終的に②の破壊モードを発生)、④柱の曲げ破壊、⑤梁の曲げ破壊)のうち、①に誘導する必要がある。そのためは、式(1)を満足する必要がある¹⁰⁾。

$$M_{ult} \leq \min (M_{us}, M_{uk}, M_{uc}, M_{ub}) \quad (1)$$

ここで

M_{ult}: 引きボルトの引張による終局モーメント

M_{uk} : 定着金物の繊維方向への圧縮による木部降伏によるモーメント

M_{us} : 座金から梁木口へのせん断破壊が生じる時のモーメント

M_{uc} : 柱の曲げ破壊時モーメント

M_{ub} : 梁の曲げ破壊時モーメント

M_{us} 、 M_{uc} 、 M_{ub} の算定の際の木質材料の基準強度 F_s 、 F_{bc} 、 F_{bb} には、正規分布を仮定した 75%信頼水準の 5% 下限値を用いている。一方、引きボルトには変形性能を確保するため、JIS B 1220 ABR アンカーボルト(いわゆる「ABR アンカーボルト」)を用いることとするが、引張強さの上限値は平均値の約 7 σ に相当する。従って M_{ut} の算定に引張強さの上限値を用いると、木質材料の材料強度に基準強度を用いる場合に比べかなり安全側の数値となる。そこで、引きボルトも木質材料と同様に 5% 上限値を用いることとし、使用する変形性能に応じて上限強度を設定する方法とした(表 4)。

上記の考え方は、基本的に他の接合形式の集成材構造やプレーン構造でも適用可能であるため、それらを取りまとめた技術資料を作成している。

(3) 中層枠組壁工法の構造設計技術に関する検討

平成 23 年度の研究開始当初、国内では 4 階建枠組工法が 40 棟程度建設されていたが、それより高層の枠組壁工法は建設されていなかった。そこで、6 階建以上の木造建築物の建築実績のある米国の中層木造建築物の構造計算事例を分析し、海外と日本の構造計算の比較検討を行った。また、中層木造建築物では耐力壁の柱脚引抜き抵抗にタイダウン金物を使用した設計法が多く用いられている為、米国におけるタイダウン関係資料を分析し、日本と米国の耐力壁の柱脚引抜き抵抗の比較検討も行った。「American Wood Council」に掲載された 6 階建て木造建築物の設計例を分析し、日本と米国の設計用地震力の比較検討を行った結果、米国の設計用地震水平力は日本の 1/3 程度であり、日本では米国よりも多くの耐力壁もしくは高強度耐力壁が必要になることが分かった。

上記検討を踏まえ、我が国において枠組壁工法による中層木造建築物を実現する上で必要な構造設計法について検討する為、モデルプランを用いた試設計を行い、必要な構造仕様の検討を行った(図 11)。モデルプランは 6 階建てとし、1~2 階は 2 時間耐火、3~6 階は 1 時間耐火仕様としている。このモデルプランに対する構造検討を基に、外壁耐力壁に要求される許容耐力

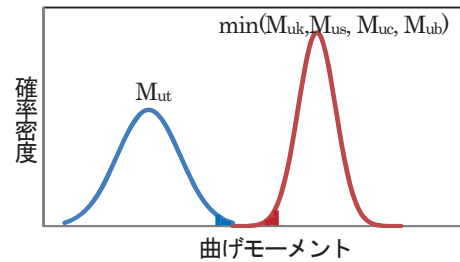


図10 M_{ut} と (M_{uk} , M_{us} , M_{uc} , M_{ub}) の関係

表 4 引きボルト引張応力度の 5% 上限値 (単位 : N/mm²)

	ABR400B			ABR490B		
	平均	標準偏差	5% 上限値	平均	標準偏差	5% 上限値
10%歪時応力 $\sigma_{10\%e}$	441	9.8	458	531	9.5	546



(1) 耐力壁両側に金物設置 (2) 開口係数適用時の金物配置

図 11 6 階建モデルプランによる検討

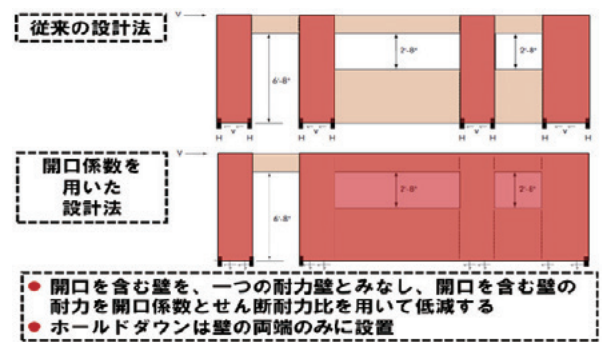


図 12 開口係数を用いた耐力壁の設計方法

と終局耐力を定め、要求を満たす耐力壁の仕様検討をした。この検討結果によると、1 階の耐力壁両端に作用する軸力は許容時に約 300~350kN となる。この軸力に抵抗する方法としてタイダウン金物を設置などの方法が用いられるが、耐力壁(無開口壁)の両端にタイダウン金物を設置しようとする図 11 (1) に示すように、膨大な量のタイダウン金物を設置する必要が生じる。このタイダウン金物の設置数を軽減する方法として、開口

部を含む所定の長さの壁を一つの耐力壁（以下、「有開口耐力壁」と呼ぶ）とみなし、開口部を含む所定の長さの壁の両端にタイダウン金物を設置するという方法がある（図12）。この方法により、タイダウン金物の数量を軽減することができる（図11(2)）。

一方、この方法を用いる場合、開口幅や開口面積の大きさに応じて有開口耐力壁の耐力の評価を行う必要がある。有開口耐力壁の耐力を評価する方法としては、杉山英男先生による開口係数とせん断耐力比との関係を示した実験式（以下「開口低減係数」と呼ぶ）が有用であり、前述のように米国において枠組壁工法の耐力壁を設計する一つの方法として採用されている^{11),12)}。一方、この開口低減係数は低層枠組壁工法住宅で用いられる耐力壁について提案されたものであり、中層枠組壁工法で用いる高強度耐力壁に適用可能かは明確ではない。そこで、開口を有する高強度耐力壁について面内せん断試験を実施し、高強度耐力壁における開口低減係数の適用可能性（図13）、耐力壁の浮上りを防止するためのタイロッドの配置方法の検討を行った¹³⁾。また、タイロッドに関する試験法及び構造性能評価方法が明確でないため、試験法及び評価方法案を作成した。

(4) 平面混構造構造

建築における木材利用を促進する方法として、木造と他の構造を併用する方法、いわゆる混構造がある。混構造のうち、特に木造と他構造を平面的に併用する平面混構造については、具体的な耐震設計法が明示されていないものもあり、耐震設計に高度な判断が必要となる。そこで建築研究所では、有識者及び一般社団法人日本建築構造技術者協会の協力を得て、木造と鉄筋コンクリート造（以下、RC造）を平面的に組み合わせた構造のうち、片側にRC造をコアとして有する構造形式（「片側コア」と呼ぶ）について検討を行ってきた。特に、片側コアでは平面方向の外力分布や直交方向のねじれ挙動の影響等が明確ではないことから、解析的検討により地震時挙動を分析した。そして、片側コアを有する平面混構造に関して、平面混構造の構造設計方法を提案している（図14）。また、提案する方法を用いて木造とRC造の3階建平面混構造の設計事例を作成し、同ガイドラインの有効性を確認している（図15）。

IV. 防火関係の取り組み

大規模な木造建築物に対しては、過去の市街地火災における被害などを踏まえて、建築基準法が厳しく防火規制を行ってきたが、建築分野における木材利用を促進するためには、これま

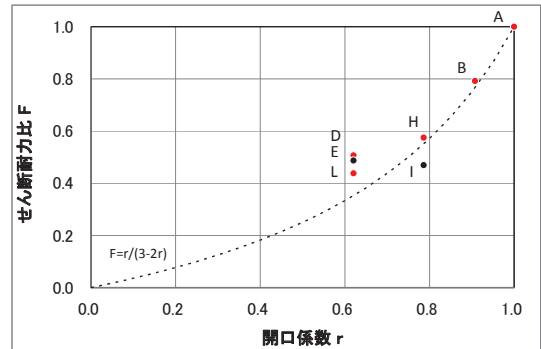


図13 高耐力壁の開口係数とせん断耐力比の関係

- ①RC造のコア部分については、RC造と木造の合計の地震力算定用重量に対して設計する。
- ②ねじれに十分抵抗できる構造とする。具体的には、RC造部分のねじれを抑制する方向はルート1相当の壁量を確保する。
- ③水平構面に一様な性能を持たせ、建物の全体変形が1/200rad程度におさまるように設計する。具体的には、木造部分の全重量に対する設計用せん断力がコア側に伝達するとして水平構面を設計する。水平震度はK=0.3以上とする。（ただし、木造部分のスパンが10.8m程度までの場合。それ以上については別途割増しを行う）
- ④木造部分の鉛直構面の耐力要素がほとんどないような状態では、木造部分のアスペクト比を1.0以下に抑える計画とする。さらに、RC造と木造部分の重量比も1.0程度までとする。スパン比にするとRC：木=1：5程度までとする。
- ⑤振れがほぼ無視できる構造では、静的な応力と動的な応力に大きな違いはないことから、静的解析の存在応力を用いて検証が可能である。水平構面については、水平構面のRC造部分と接する部分で検証をすれば、先端部や中央部分は安全となる。

図14 平面混構造の構造設計方法案

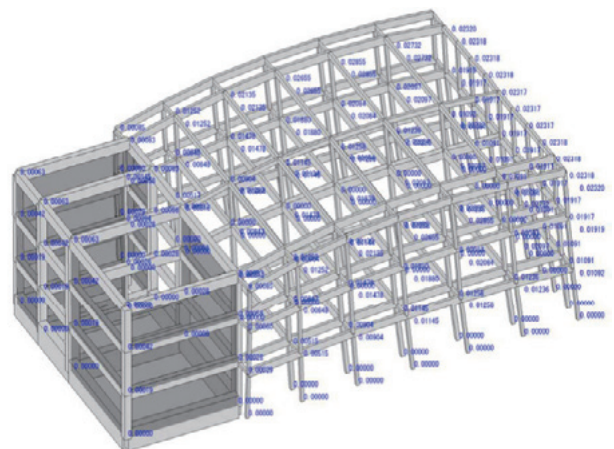


図15 平面混構造モデルプランを用いた検討



図 16 木造3階建学校を準耐火建築物として設計するための木造3階建学校の実大火災実験

で木材利用が困難であった集合住宅や学校、事務所ビルなどの中層・大規模建築物を木造で建築することが効果的である。海外でも従来、大規模な木造建築は制限されてきたが、1990年代から規制緩和が進められ、現在では中層の木造建築物が建てられている。ヨーロッパを中心に中層の木造建築物が建てられており、例えば、イギリスでは9階建ての木造集合住宅までが建築されている。日本においても、2000年の建築基準法の改正により、防火基準の性能規定化が行われ、耐火建築物を木造で建てるできるようになった。このような状況の中で、「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」(2010年10月施行)が施行され、国土交通省は木造3階建て学校について、必要な研究を進めた上で規制見直しを行う方針を示した。そこで建築研究所では、有識者及び関係機関とともに以下の検討を実施し、以下のような検討結果を取りまとめている。詳細は、平成25年度及び26年度建築研究所講演会資料を参照していただきたい。

- ①国内外の木造建築物の防火規制の考え方や基準をとりまとめた資料の作成
- ②木質系部材の耐火性能を評価する試験方法について、耐火試

験における条件と実建物における条件を比較し、防火上安全側の評価となる試験の適用範囲について整理した技術資料の作成

- ③LVLおよびCLTの壁や床に対して燃えしろ設計を適用するために必要となる、炭化速度、防火被覆の効果等に関する技術資料の作成
- ④木造3階建学校の実大火災実験(図16)の結果を整理し、木造3階建学校を準耐火建築物として設計する場合に必要なとされる仕様等の整理及び防火基準案の作成

V. 中層・大規模木造建築物の炭素収支の評価に関する検討

木材製品にひとたび炭素の形で固定された二酸化炭素は木材製品が燃やされる、或いは、木材製品が腐朽して分解しない限り、未来永劫、木材製品の中に炭素として蓄えられ続けられる。すなわち大気中の二酸化炭素量の軽減に寄与する。このような木材製品の炭素固定を適切に評価しようとする動きがある。代表的なものはIPCC(気候変動に関する政府間パネル)の動きである。気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書に定められた第一約束期間においては、森林において樹木が吸収した

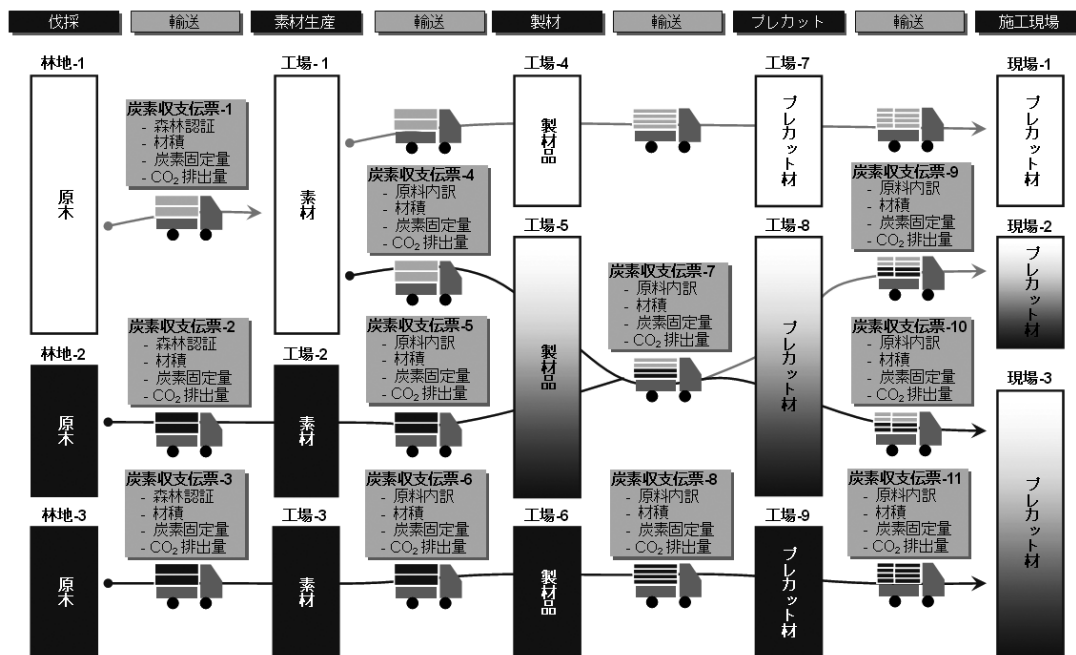


図 17 森林（川上）から建設現場（川下）に至る木材製品の流れを表した概念図

(注) 図中の黒い網掛け部分は持続可能な森林管理が行われている森林を起源とする木材・木材製品、白い網掛け部分は持続可能な森林管理が行われていない森林を起源とする木材・木材製品を表す。

二酸化炭素（以下、CO₂ と表記する）は樹木を伐採した時点で大気中に排出されるものとされている。すなわち、伐採後の木材は、炭素を固定していないものと見なされている。現在、IPCC では伐採された木材（Harvested Wood Products : HWP）も焼却または腐朽するまでは炭素を固定し続けるという考えに基づいて、木材製品の継続使用による CO₂ 削減効果に関する評価の考え方について整理している。木造建築物は他の木材製品と異なり、長い期間、膨大な量の炭素を固定し続けることができる。今後、合意される HWP に対する評価内容の如何によっては、建築は大きな炭素の貯蔵庫となりうる。

近年、内外の自治体において木材製品の炭素固定を評価する動きがある。例えば木造建築物に森林認証材や地場産材を用いた場合に優遇措置を講ずることなども行われている。炭素を蓄積する努力を行っている事業者や個人に対して努力に見合った優遇措置を講じるためには、木材製品や木造住宅に固定される炭素の量を精緻に評価することが重要になる。そして精緻な評価を行うための基本原則が必要となるとともに、評価業務の実務を支援する仕組みが重要となってくる。

建築研究所では、有識者とともに木造住宅等の木造建築物の躯体に使用する木材製品が固定する炭素量を適切かつ簡易に算定するための手法を開発した（図 17）¹⁴⁾。開発した手法は、川

上の生産者が自製品の炭素固定量とエンボディ CO₂ を記載した伝票を製品に添付して、川下の生産者に出荷し、川下の生産者が当該伝票に記載された内容に基づいて自製品の炭素固定量とエンボディ CO₂ を計算し、製品に添付してさらに川下の生産者に情報を提供するというものである。

開発した手法の特徴は、

- ①木材 1 本 1 本のトレーサビリティを明らかにすることを目的としておらず、製品に占める原料の内訳に応じて体積按分を行い、製品の炭素固定量とエンボディ CO₂ の概算値を計算する
- ②木材 1 本 1 本のトレーサビリティを明らかにすることを目的としないため、現場への負担が少なく、実用性が高い
- ③製品に占める原料の内訳に応じて炭素固定量等を計算（体積按分）するので、例えば、森林認証材の炭素固定量と非森林認証材の炭素固定量に違いを設けるなど、原料の起源に応じて炭素固定量に重み付けを行うことができる。すなわち、施策的な誘導などに応用することができる。

本研究では、開発した手法とツールを、栃木県環境森林部の協力を得て、栃木県内の事業者において試行した。試行の結果、同手法とツールが実務レベルにおいて活用可能であることが確認できた。さらに、同手法とツールを用いて、中層木造建築物を構成する木材製品の炭素収支（製造・輸送に係る CO₂ 排出量

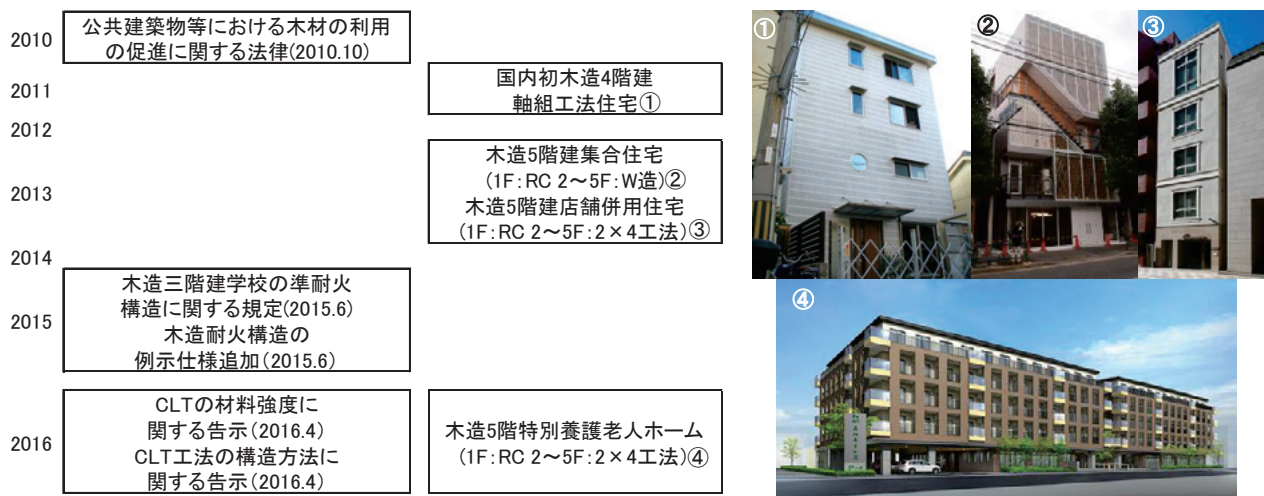


図18 最近5年間の国内の木造建築物に関する動向^{15)~18)}

と木材製品の炭素固定量の差)の算定事例を作成した。

VI. まとめ

図18に、最近5年間の国内の木造建築に関する動向を示す。2016年4月以降のCLTの構造方法及び材料強度告示の制定が、木材の利用促進を後押しするものと期待される。また2015年6月に、3階建木造学校の防火基準及び1時間耐火の例示仕様が発令されたことも、木材の利用促進を後押しするものと期待している。一方、国内の中高層木造建築物は耐火規程の関係上5階建までにとどまっているのが現状である^{15)~18)}。一方、図19は最近5年間の海外の中高層木造建築物の建設実績を示したものであり、いずれも7階建以上の木造建物である¹⁹⁾。

我が国における、中層・大規模化に向けた環境が整備された状況とはいえ、海外ではより高層の木造建築物が定着しつつある。我が国において7階建の木造建築物が建設可能となるためにも、木造建築物の中層・大規模化の更なる普及促進が期待される。

参考文献

- 1) 中島史郎：CLTによる木造建築物の設計法の開発(その1)、平成26年度建築研究所講演会テキスト、平成27年3月
- 2) 萩原一郎：火災軽減被害に向けた取り組みの現状と課題、平成25年度建築研究所講演会テキスト、平成26年3月
- 3) 成瀬友宏：CLTによる木造建築物の設計法の開発(その3)、平成26年度建築研究所講演会テキスト、平成27年3月
- 4) 岡部 実、安村 基、小林研治：スギCLTパネル層ないせん断耐力の推定、木材学会誌、Vol.60.No.3.p.169-176、2014

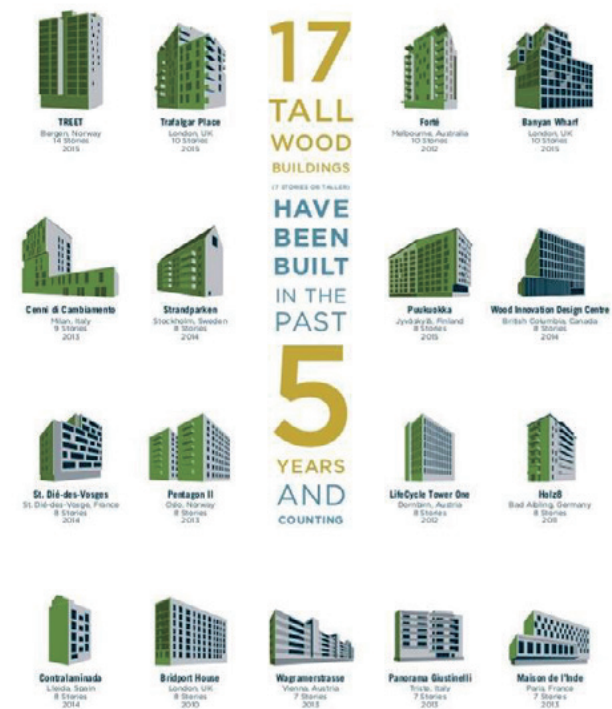


図19 最近5年間の海外の木造建築物に関する動向¹⁹⁾

- 5) M.Flaig, H.J.Blaß: Shear strength and shear stiffness of CLT-beams loaded in plane, proceedings of CIB-W18, 46-12-3, pp.1-14, 2013
- 6) 青木謙治：構造用材料としての木材・木質材料の現状と今後の課題、木材学会誌、Vol. 61 No. 3, pp. 169-173, 2015年6月
- 7) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説、P.207 (2011)
- 8) 村山 和繁、李 元羽、中島 史郎、成田 敏基：直交単板の有無がLVLのボルト接合部せん断性能に及ぼす影響、2013年度日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.11-12、2013年8月
- 9) 建築研究所、「耐火・準耐火木造軸組構造建築物標準詳細図集」、

2013年3月

- 10) 荒木 康弘、稲山 正弘、五十田 博、腰原 幹雄、宮田 雄二郎、中島 史郎、山口 修由：中層木造建築を想定した集成材フレーム接合部試験、2014年度日本建築学会大会学術講演梗概集学術講演梗概集 2014(構造Ⅲ)C-1、pp.159-160、2014年09月
- 11) 杉山英男、木材工業、Vol.36、No.7、1981.
- 12) American Forest & Paper Association, American Wood Council, ASD/LRFD Wind & Seismic, 2008.
- 13) 木本 勢也、中島 史郎、山口 修由、荒木 康弘、中川 貴文、辻村 行雄、小松 弘昭、永井 渉：枠組壁工法による中層木造建築物実現に向けた構造検討、2014年度日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、pp.553-554、2014年9月
- 14) 中島史郎、大橋好光、斎藤百樹、根本泉、橋本敏男、恒次祐子、古賀純子、中川貴文、根本かおり：伝票を利用した木造躯体の炭素収支算定手法の開発、日本建築学会技術報告集 18(38)、pp.37-42、2012年
- 15) <http://amanojakus.exblog.jp/21105894/>
- 16) http://www.mitsuihome.co.jp/technology/strength/taika_2/
- 17) <http://www.mitsuihome.co.jp/company/news/2015/1209.html>
- 18) http://www.mokujukyo.or.jp/homeinfo/mokume/pdf/2010_winter.pdf
- 19) http://www.rethinkwood.com/sites/default/files/reThink_Wood_Looking_Up_Tall_Wood_Buildings_Around_the_World.pdf