

CLT による木造建築物の設計法の開発（その 2）

～構造設計法の開発～

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 CLT 構造の特徴
 - 1) 構法上の特徴
 - 2) 構造上の特徴
- III 構造設計法の策定に向けた取り組み
 - 1) 法令上の位置づけ
 - 2) モデル化の方法
 - 3) 解析モデルと実験結果の検証
 - 4) 実大実験による検証
- IV 今後の展望
- V おわりに
- 参考文献

I はじめに

欧米において既に多くの建設実績があるクロス・ラミネーテッド・ティンバー（以下「CLT」）による木造建築物の我が国における普及を図るために、現在、構造設計法を策定するために必要な検討が行われている。ここでは、CLT 構造の特徴、及び構造設計法の策定に向けた研究動向及び建築研究所が取り組んでいる研究について紹介する。

II CLT 構造の特徴

1) 構法上の特徴

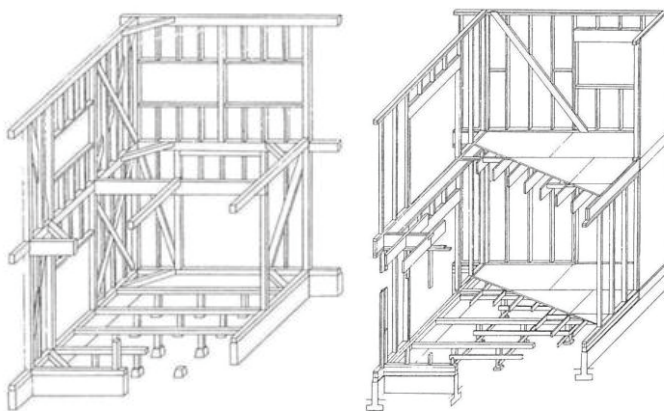
従来の木造建物は、柱と横架材からなる軸組または枠組で構成された枠組で鉛直荷重を支え、筋かいや構造用合板等の耐力壁で地震や風といった水平力に抵抗する。軸組構法や枠組壁工法がその典型的な例である（図 1 (1)、(2)）。一方 CLT 構造では、図 1 (3) のように基本的に壁や床を CLT で構成するところが、従来の構法と大きく異なる。つまり、鉛直荷重も水平力も

壁パネルが負担することになる。ここで「基本的に」と書いたのは、製造できる CLT のサイズの最大寸法が決まっているため、例えば「大空間を CLT で作りたい」といった時には、梁や柱を用いることもあるためである。

2) 構造上の特徴

①面内せん断性能

CLT の構造上の特徴の一つは、地震や風といった水平力に抵抗する性能を表す面内せん断性能が、従来の木造建物の耐震要素の面内せん断性能を大きく上回る点である。図 2 に、数種類の厚さを有する CLT パネルの面内せん断性能を確認した実験結果の一例を示す。これによると、最外層の方向に関係なく、最大せん断応力度は 3N/mm^2 弱程度、せん断靱性は $400\sim 600\text{N/mm}^2$ であった。このせん断性能がどの程度かをイメージしやすいように、図 3 に厚さ 90mm (3 層 3Ply) の CLT パネルと構造用合板耐力壁 (厚さ 9mm 、釘ピッチ 150mm) の壁長 1m あたりの面



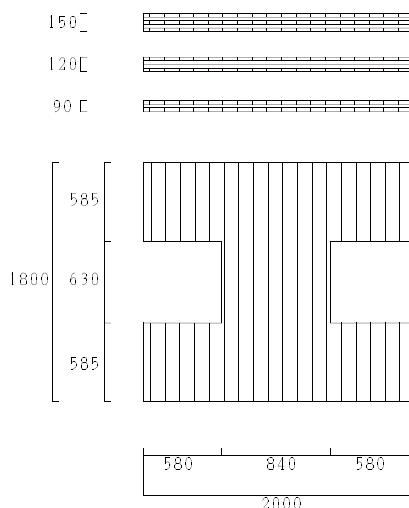
(1) 軸組構法¹⁾

(2) 柱組壁工法¹⁾

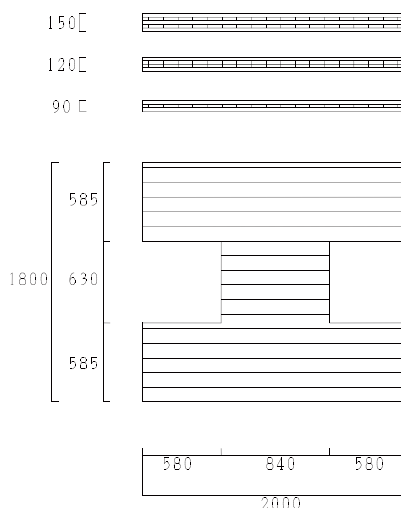


(3) CLT パネルによる工法 (murray-grove)²⁾

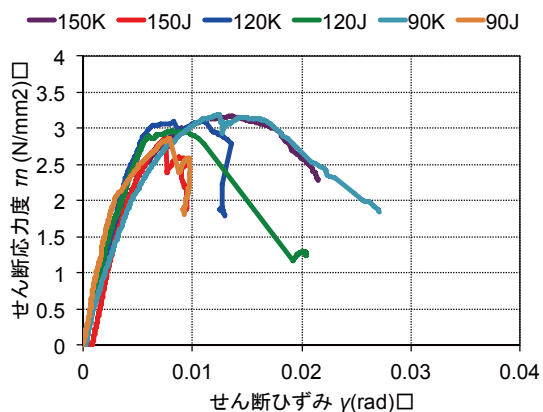
図1 CLTによる建物の構法上の特徴



(1) 面内せん断試験体：最外層強軸方向 (K)



(2) 面内せん断試験体：最外層弱軸方向 (J)



(3) 面内せん断試験体 τ - γ 関係

図2 CLT の面内せん断性能

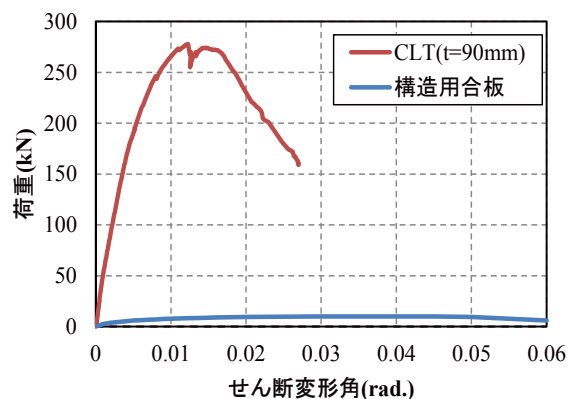
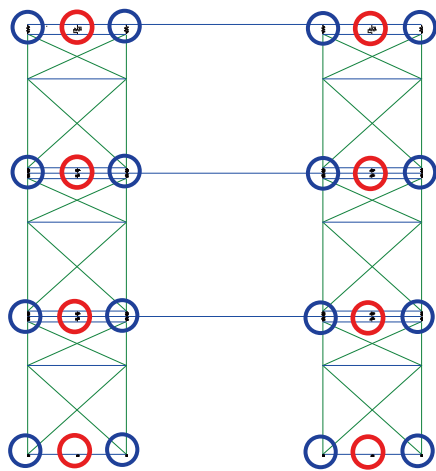
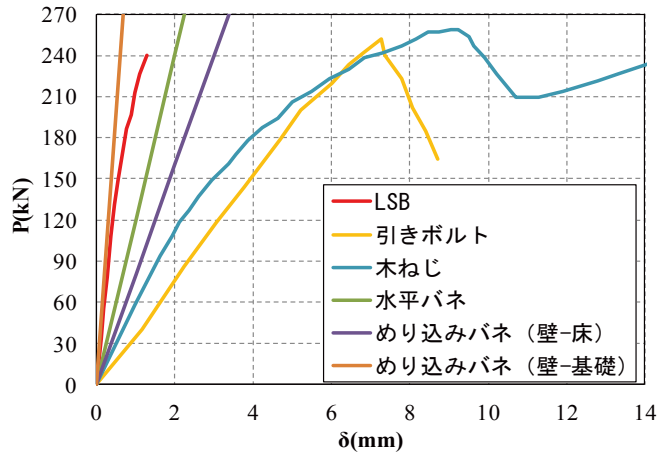


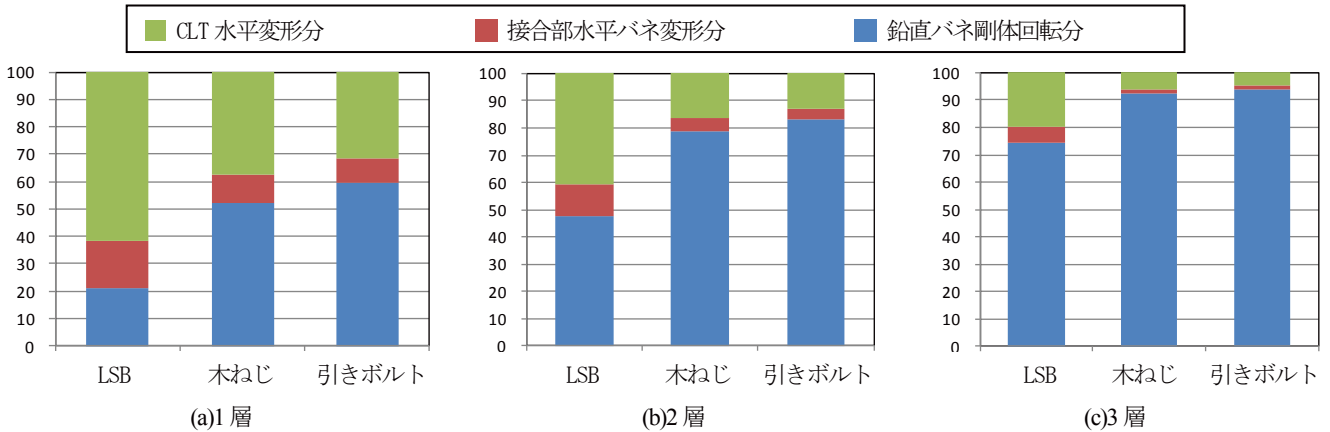
図3 CLT と構造用合板耐力壁のせん断性能比較



(1)解析モデル
○ 水平バネ
○ 鉛直バネ



(2)接合部荷重変形関係



(3)CLT 及接合部の水平変形成分の割合 (%)

図4 CLT 及接合部の水平変形成分の割合 (床パネルの曲げ戻し無視)

内せん断性能を比較したものを示す。ここで構造用合板耐力壁は、柱脚金物の浮き上がり等を含んだ「見かけのせん断変形角」であるのに対し、CLTは「真のせん断変形角」である点異なるが、それでもCLTの面内せん断剛性及び耐力が、従来の木造建物の耐震要素のそれを大きく上回ることが良く分かる。そのため、従来の木造建物の柱頭柱脚接合部では、「耐力壁がその性能を十分に発揮するまで接合部に破壊が生じないように設計する」という、いわゆる保有耐力接合の考え方をとっているが、それをCLT構造にも適用することは難しいと考えられる。

もう一つの特徴として、1番目と関連するが、従来の木造建物の耐震要素では水平力に対して水平変形するのは「耐震要素(壁)のせん断変形」が大部分と考えているが、CLT構造では、水平力に対し接合部による水平変形が大部分を占めると言える。

図4に、CLT及び接合部の水平変形成分の割合を検討した例を示す。図4(1)に示す3層モデルに対し、図4(2)に示す性能を有する接合部バネを設けて弾性解析を行った。パネル端部の頭部と脚部には、引張方向バネとして「LSB」、「鋼板ビス打ち接合部(=「木ねじ」)」、「引きボルト式」の3種類、圧縮方向バネとしてめり込みバネを設けている。水平方向の抵抗要素として水平バネを設けている。図4(3)は、1層～3層の水平変形成分に占めるCLT及び各接合部の層全体の変形量に対する割合で示したものである。「LSB」のように接合部剛性が高いものでは、1層の水平変形量に占めるCLTの水平変形成分が大きい、「木ねじ」や「引きボルト」では、CLTの水平変形成分が占める割合は30～40%程度である。さらに2層、3層になると、CLT自体の水平変形成分は小さくなり、逆に鉛直ばねの剛体回転による

水平変形が多くなることが分かる。一方、グラフに示していないが、従来の木造建物の耐力壁では、耐力壁の水平変形量が層全体の水平変形量の90%以上を占めるものと考えられる。

②大板パネルと小幅パネル

構法にも関係する内容であるが、開口部を有する壁パネルを1枚のパネルで作るか、複数のパネルを組み合わせるかで構造性能が大きく異なる。例えば、長さ4mの壁の中央に2mの窓開口を設ける場合に、長さ4mのCLTパネルに2mの窓開口を設ける方法（「大板パネル構法」と呼ぶ）と、長さ1mのCLTに腰壁と垂れ壁をつける、という方法（「小幅パネル構法」と呼ぶ）の2種類で、構造性能が大きく異なる、ということである。一例として、図5に、大板パネル構法と小幅パネル構法の壁試験結果を示す。いずれの試験体も、引張力が働く接合部仕様は引

きボルト式であり、パネル厚は150mm（5層5ply）ある。全体的な傾向として、小幅パネルで構成された壁は大板パネル構法に比べ変形性能が高いこと、大板パネル構法の剛性は、小幅パネル構法に比べ大きい（この例では2倍以上）ことが分かる。従って、大板パネルと小幅パネルを1つの建物に混在させると、剛性及び変形性能が異なるため、例えば、小幅パネルの性能が性能を発揮する前に大板パネルが破壊してしまう可能性があるといった、単純な加算が成り立たない恐れがあり、詳細な検討が必要である。

(3) CLT構造の特徴のまとめ

以上、簡単ではあるがCLT構造の構法及び構造上の特徴を紹介した。一言でいえば、「CLT構造は、従来の木造建物の構法や構造性能と大きく異なる」ということである。

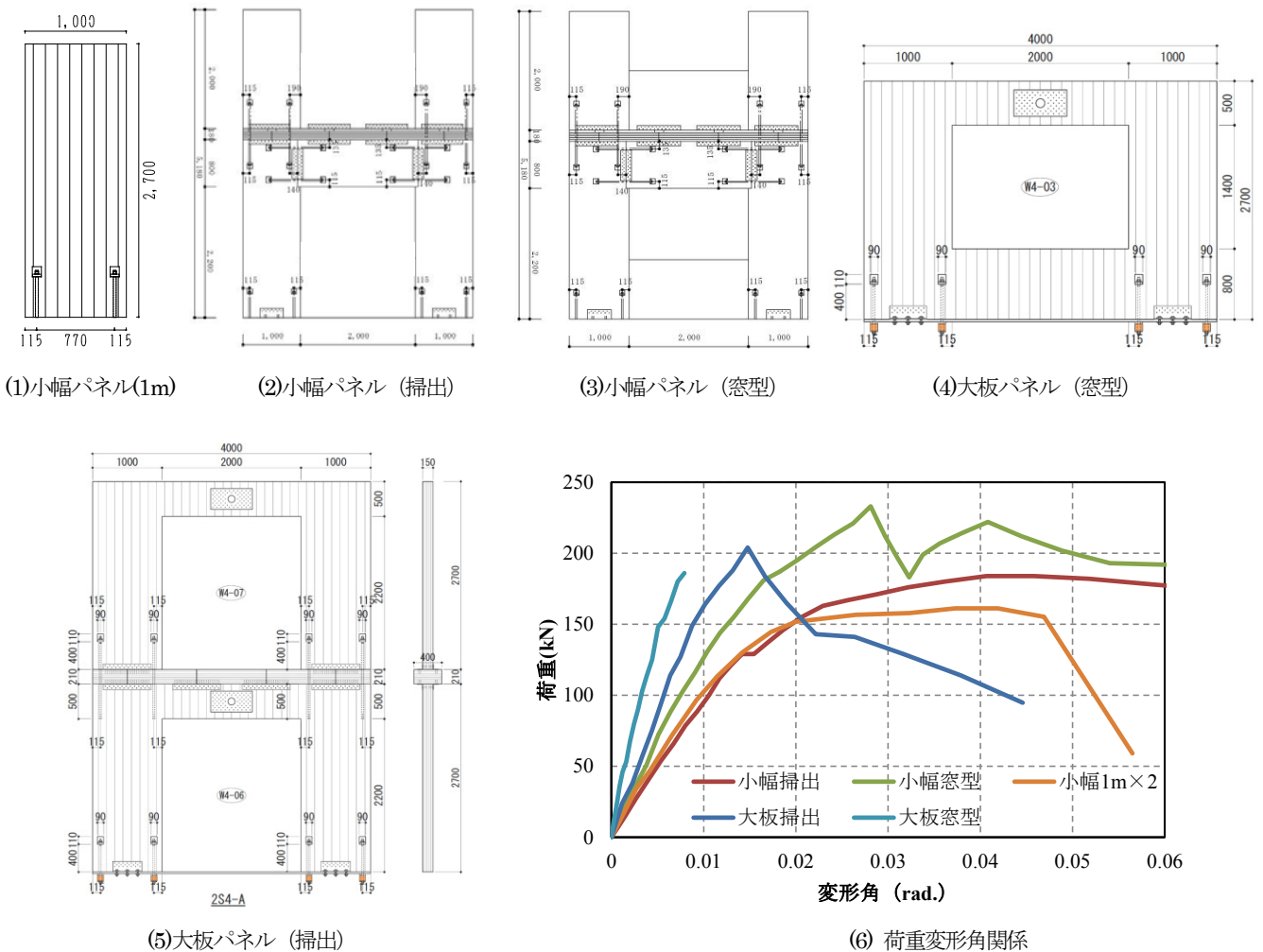


図5 大板パネル工法と小幅パネル工法の荷重変形角関係の比較^{3),4)}

III 構造設計法の策定に向けた取り組み

1) 法令上の位置づけ

次に、CLT 構造を日本で建設する場合の構造関係の法令上の位置づけについて説明する。

我が国で一定規模以上の木造建物を建設する場合、主要な構造部分（柱、梁、床等）に使用する木質材料は、建築基準法第 37 条で「日本農林規格に適合するもの」又は「国土交通大臣の認定を受けた材料」と規定されており、その材料強度は平成 12 年建設省告示第 1452 号で規定されている。一方、CLT が該当する「直集成板の日本農林規格」⁹⁾（以下、「JAS」）が 2014 年 1 月に施行されたが、この規格に規定されているのは面外方向の曲げ強度と剛性のみであり、構造設計に必要な、その他の面内曲げ、圧縮、せん断、引張に関する強度等は規定されていない。

我が国において、このような基準強度のない建築材料を用いて建設する場合は、「時刻歴応答計算」を行う必要があり、非常に高度な技術と知見、また裏付けとなる実験データ等が必要となる。一方、基準強度が制定されれば、限界耐力計算での設計が可能になり、また CLT 構造の構造特性係数 (Ds) を設定できれば、保有水平耐力計算での設計も可能となろう。一方、ルート 1 及びルート 2 では、基本的に弾性範囲での構造検討しか行わないため、大地震時の安全性を担保できるような仕様規定等を設ける必要があり、そのためには CLT 構造の大地震時の挙動や崩壊メカニズムに関する知見が必要となろう。

さて、いずれの構造計算ルートや構造計算手法を用いても、CLT 構造を「適切に」モデル化することが必要である。前述のとおり、CLT 構造は、壁や床を CLT で構成し、それらを接合金物等で繋結する構造であるから、CLT 自身の構造性能と、各接合部の構造性能が分かれば、全体のモデル化は可能という事である。そのため、近年、材料としての CLT の構造性能をはじめとして、接合部や接合部を有する壁構面や床構面、また立体架構の構造性能を把握するための実験及び解析的検討が精力的に行われてきた。

そこで、ここでは CLT のモデル化の方法、各部接合部の構造性能の例を紹介する。CLT 自体のモデル化に関しては、欧州で先に開発され、理論体系が確立されているので、そちらを参考にしたモデル化の方法を紹介する。なお、ここに示す各強度及び剛性の計算方法は複数ある計算方法の一例である。他の方法については、「CLT による木造建築粒の設計法の開発（その 1）～材料強度等の評価～」を参照して頂きたい。各部接合部の構造性能に関しては、実験例等を紹介する。

2) モデル化の方法⁹⁾

2-1) CLT パネル

CLT を構造材料として構造設計に用いるには、以下の剛性や耐力が必要となる。

- ①面外曲げ・面外せん断（強軸）
- ②面外曲げ・面外せん断（弱軸）
- ③引張・圧縮（強軸・弱軸）
- ④面内曲げ（強軸・弱軸）
- ⑤面内せん断
- ⑥座屈（強軸・弱軸）
- ⑦めり込み

JAS で明記されているのは、①のうち強軸方向の面外曲げヤング係数と面外曲げ強度のみであり、その他の値は、現状、これまでの研究結果や文献を根拠に、構成するラミナや組み合わせ、類似する材料の規格から考える必要がある。そこで、ここでは各諸言の計算方法の例を示すこととする。なお、計算に当たり、以下の点を前提条件とする。

- (a) CLT パネルの諸元を導く際は、全断面に対する値を算出する
- (b) 機械等級区分による A 種構成とし、CLT パネル全体の曲げヤング係数と、曲げ強度が判明しているものとする
- (c) 許容応力度は、各強度を 1/3 倍した後に荷重継続係数を乗ずる一般的な方法で算出する

①面外曲げ・面外せん断（強軸）

強軸方向の面外曲げは、

- a) JAS の規格をそのまま使う方法
- b) JAS の試験方法から、面外せん断の変形を取り除いて計算する方法

の 2 種類が考えられる。a) の場合は、JAS のヤング係数をそのまま使えるが、せん断変形はしないものとして計算する必要がある。ただし、せん断力に関しては、耐力を計算する必要がある。一方、b) の場合は、新たに面外方向曲げに対するヤング係数、および面外せん断に対するせん断弾性係数を計算する必要がある。b) の場合の計算方法を以下に示す。

<剛性>

CLT ハンドブック^{7),8)}では、Shear Analogy Method により、面外方向の有効曲げ剛性、有効せん断剛性の計算方法が以下のように示されている。

$$(EI)_{eff} = (EI)_A + (EI)_B$$

$$= \sum_{i=1}^n \left(E_i \cdot b_i \cdot \frac{h_i^3}{12} \right) + \sum_{i=1}^n \left(E_i \cdot A_i \cdot z_i^2 \right) \quad (式1)$$

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

- n : ラミナプライ数
- E_i, G_i : i プライラミナのヤング係数、せん断弾性係数
- A_i : i プライラミナの断面積
- b_i, h_i : i プライラミナの幅、せい
- z_i : 全プライ一体時の中立軸と i プライラミナ重心の距離
- a : 最外プライラミナ重心間の距離

解析の際には、 $\kappa=1.2$ とする。これは、直方体に対する形状係数であり、解析の際に一般的に用いられている。

JAS にあるラミナの曲げヤング係数をラミナの繊維方向ヤング係数(E_0)と考え、以下の式で繊維直交方向ヤング係数(E_{90})、繊維平行方向-繊維直交方向のせん断弾性係数(G_0)、繊維直交方向-繊維直交方向のせん断弾性係数(G_R)を計算することができる。

CLT Handbook : $E_0/E_{90}=30, E_0/G_0=16, G_0/G_R=10$
 文献9) : $E_0/E_{90}=30, E_0/G_0=13, G_0/G_R=4$

<強度>

JAS においては、強軸方向の面外曲げ強度は規定されている。そのため、曲げ強度に関してはこの値を用いる。JAS の値を用いない場合は、以下の方法による。全断面有効とすると、

$$Z = bt^2 / 6 \quad (式3)$$

$$\sigma_b = M / Z \quad (式4)$$

Z : 断面係数

b, t : CLT パネル全体の幅、せい

σ_b : 曲げ応力度

M : 曲げモーメント

である。実際の応力度 (σ_{breal}) と有効断面係数 Z_{eff} は以下のように

に計算される。

$$\sigma_{breal} = \frac{M}{Z_{eff}} \quad (式5)$$

$$Z_{eff} = \frac{(EI)_{eff}}{E_s \cdot y_s} \quad (式6)$$

E_s : 曲げモーメントの加わる方向と同じ方向のラミナのうち、最も外側の層のラミナのヤング係数

y_s : 中立軸から上記ラミナの外側の面までの距離

従って、 σ_b と σ_{breal} の間には以下の関係がある。

$$\sigma_{breal} = \frac{Z}{Z_{eff}} \sigma_b \quad (式7)$$

従って、全断面有効として σ_b を計算した後、 Z/Z_{eff} を応力調整係数として乗じた値が、曲げモーメントの加わる方向と同じ方向のラミナのうち、最も外側の層のラミナの引張強度を F_t 以下となることを検定すればよい。

せん断強度に関しては明確な規定はないが、文献8)では規格外の大きさのラミナを使用した場合のせん断強度の規定があり、図6の試験方法で算出した場合の値は $1.5N/mm^2$ となっている。せん断力は $1/2P_b$ となるので、 $F_s=1.5Q/bh$ となる。長方形断面のせん断力分布係数として 1.5 を考慮していると考えられる。

CLT のせん断力分布係数は、より複雑な形状であり、最大でも 1.5 とはならないが、仕様を決定する実験式自体に 1.5 を用いているので、応力調整係数として 1.5 倍することとし、強度としては $1.5N/mm^2$ とする。ただし、各種実験においては、強度はこれ以上あることが報告されている。

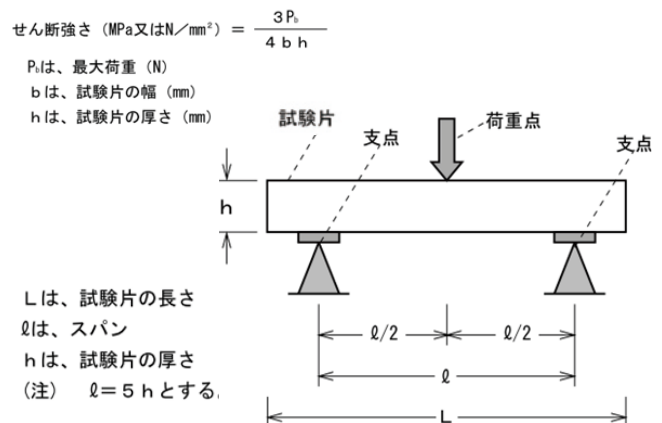


図6 木材のせん断試験の方法⁵⁾

②面外曲げと面外せん断（弱軸）

<剛性>

弱軸方向の面外曲げと面内せん断は強軸と同じ方法で計算できる。JASには曲げに関する規格もないため、強軸方向の分離する場合の計算方法を用いざるを得ない。

<強度>

JASでは、弱軸方向の面外曲げ強度は規定されていない。そのため、曲げ強度に関しては強軸と同様の計算をする。せん断強度に関しても規定がないので、強軸方向と同じとする。

③引張・圧縮・曲げ（強軸・弱軸）

<剛性>

面内方向の引張・圧縮は直交層ラミナの剛性を無視する。圧縮は繊維直交方向の剛性が寄与する可能性があるが、値が小さいので無視する。曲げに関しては、幅はぎ無の場合でも、直交方向のラミナが接着されているため、格子梁と面材の中間の性状を示すと考えられる。各種実験では面材として挙動する結果が得られているので、ここではそのように考える。

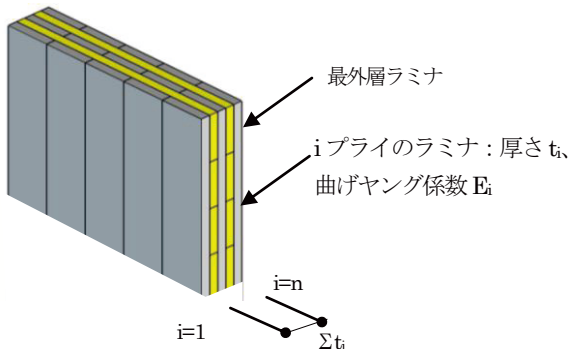


図7 面内方向のヤング係数の考え方

以下の式でヤング係数Eを計算する（図7参照）。

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (式8)$$

E_i : CLTの方向（強軸又は弱軸）に対するiプライのラミナの曲げヤング係数（平均値）。CLTの方向が繊維直交方向の場合0
 t_i : CLTを構成するiプライのラミナの厚さ
 n : CLTパネルを構成するラミナのプライ数

<強度>

JASにラミナの引張強度が記載されているが、同様なラミナで構成された集成材では、ラミナの引張強度よりも大きい値が集成材の引張強度として規定されている。集成材ではひき板の積層数により、圧縮と引張りの基準強度が異なる。ラミナの枚数から統計学を用いて計算されたものと考えられるが、その根拠は明記されていない。CLTパネルでも同様の扱いができるかどうかは詳細な検討が必要だが、引張強度算定の方法の一つとして、同様のラミナで構成された集成材の引張強度を援用する方法は考えられる。また断面検定の際には、計算された応力度に調整係数を乗じて応力度を算出する。構成するラミナの繊維平行方向には、ラミナのヤング係数に比例した応力度となる。以下の式で調整係数Rが計算される。

$$R = \frac{E}{E_i} \quad (式9)$$

同一等級構成としている場合は、強軸方向と弱軸方向の2つの調整係数のみが算出される。

ラミナの圧縮強度はJASに記載されていないため、圧縮強度の計算方法としては、引張強度と同様に類似のラミナで構成された集成材の圧縮強度を用いる方法がある。

④面内曲げ（強軸・弱軸）

曲げに関しては、幅はぎ無しの場合もあるため、集成材の曲げと同じ扱いはできない。引張側は引張強度、圧縮側は圧縮強度を用いる方法が考えられる。

⑤面内せん断（強軸・弱軸）

<剛性>

せん断弾性係数について、各ラミナのせん断方向のせん断弾性係数は慣用的に繊維方向ヤング係数の1/15としている。CLTパネルでは、あるラミナにせん断力が加わった場合に、そのラミナと直交するラミナは接着され、かつ直交ラミナも幅方向に幅はぎが無いという複雑な状況である。また、直交ラミナのせん断弾性係数は、繊維方向に加力した場合の木口面のずれであるなど、さらに複雑な状況のため、実験から導かれた値を用いる方法が考えられる。せん断剛性は既往の研究結果から、全厚さに対して、400~500N/mm²である。

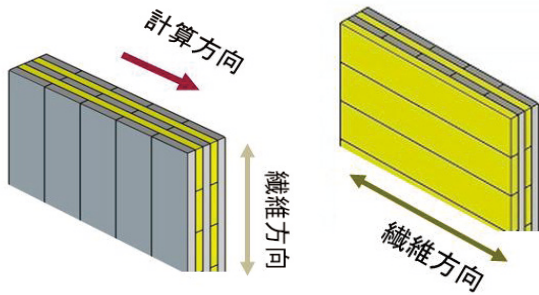


図8 面内せん断剛性の繊維方向と計算方向

計算方向と直交方向のラミナを無視する場合は、以下のよう
に計算できる (図8 参照)。

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n G_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (\text{式 } 10)$$

G_i : CLT の方向 (強軸または弱軸) に対する i プライのラミナ
のせん断弾性係数 (平均値)

CLT の方向が計算方向と平行方向の場合、 $G_i=0$ とする

t_i : CLT を構成する i プライのラミナの厚さ

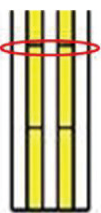
n : CLT を構成するラミナのプライ数

<強度>

JAS には、面内せん断に対して強度が示されていない。その
ため、同じ樹種のラミナで構成された集成材の基準強度を用い
る方法が考えられる。せん断力は、計算方向と直交方向にも加
わるので、弱軸方向のラミナの厚さの和で有効断面積を計算す
る。従って、応力度に関しては、

CLT の厚さ / 弱軸方向のラミナの厚さの和 $\times 1.5$

を応力調整係数とし、計算された応力度に乗ずる (図9)。



幅はぎが無いことがあるので、
この断面で検討

図9 せん断応力度の検討方法の例

計算方向と直交方向のラミナを無視する場合は、下記のように
各ラミナ毎に応力調整係数を算出し、応力度を計算する。

$$R_i = \frac{G_i}{G} \times 1.5 \quad (\text{式 } 11)$$

⑥座屈 (強軸・弱軸)

座屈 (λ_{eff}) に関しては、強度のみの計算となる。CLT Handbook
に基づき、有効断面二次半径 (i_{eff}) を計算し、告示式を用いる。

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{L}{i_{\text{eff}}} \quad (\text{式 } 12)$$

$$i_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{I_{\text{eff}}}{A_{\text{tot}}}} \quad (\text{式 } 13) : \text{有効断面二次半径}$$

L : 材の長さ

A_{tot} : 繊維方向が圧縮力方向に平行なラミナの合計断面積

$$I_{\text{eff}} = \frac{\phi(EI)_{\text{eff}}}{E_{\text{mean}}} \quad (\text{式 } 14)$$

I_{eff} : 有効断面二次モーメント ($\phi=0.85$)

E_{mean} : 繊維方向が圧縮方向に平行なラミナの平均ヤング係数
以下の式により、CLT の設計用圧縮強度 F_k を求める。

$$\lambda_{\text{eff}} \leq 30 : F_k = F_c$$

$$30 < \lambda_{\text{eff}} \leq 100 : F_k = (1.3 - 0.01\lambda_{\text{eff}}) \cdot F_c$$

$$100 < \lambda_{\text{eff}} : F_k = \frac{3000}{\lambda_{\text{eff}}^2} \cdot F_c$$

7) 面内圧縮・引張・曲げの複合応力

面内圧縮と面内曲げ、面内引張と面内曲げの複合応力は以下
のように計算し、検定する方法が考えられる。

$$\text{圧縮と曲げの場合} : \frac{\sigma_b}{f_c} + \frac{\sigma_c}{f_k} \leq 1 \quad (\text{式 } 15)$$

f_c : 許容圧縮応力度、 f_k : 許容座屈応力度

$$\text{圧縮と引張の場合} : \frac{\sigma_b}{f_t} + \frac{\sigma_t}{f_t} \leq 1 \quad (\text{式 } 15)$$

f_t : 許容引張応力度

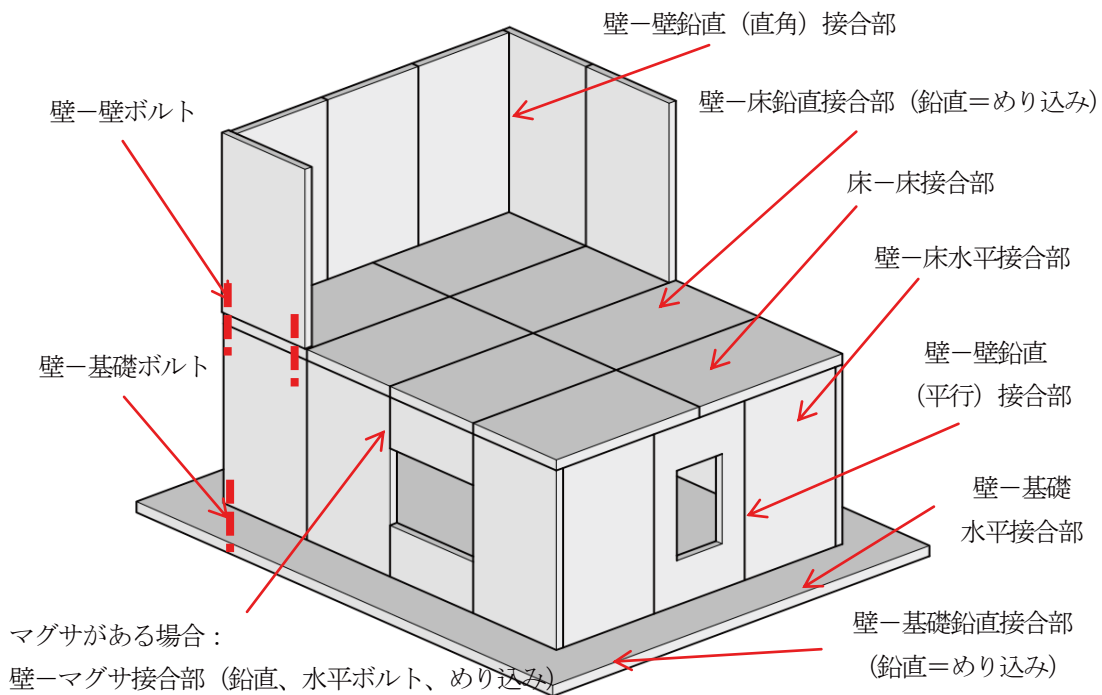


図10 CLT接合部の例⁹⁾

2-2) 接合部⁹⁾

CLT構造で想定される接合部を図10に示す。接合位置としては以下の部位が考えられる。

- ①床-床接合部、
- ②壁-床水平接合部・
壁-基礎水平接合部
- ③壁-壁鉛直(直角)接合部
- ④壁-壁鉛直(水平)接合部
- ⑤壁-壁引張接合部・
壁-基礎引張接合部
- ⑥壁-垂れ壁接合部

以下に、各接合部の既往の研究例等を紹介する。

①床-床接合部

床-床間の接合方法として、海外では図11に示す接合方法が一般的に用いられている。Splineと呼ばれる合板またはLVLの板を最外層の片面または両面にビス等で接合する方法やCLTの中央にはさみビスで留める方法、またいわゆる「相欠き」にして、ビス等で留める方法である。これ以外にも、CLT床の木口面を突き合わせ、ビスを斜めに交差打ちして固定する方法もあり、図12に示す2種類の床-床接合部に

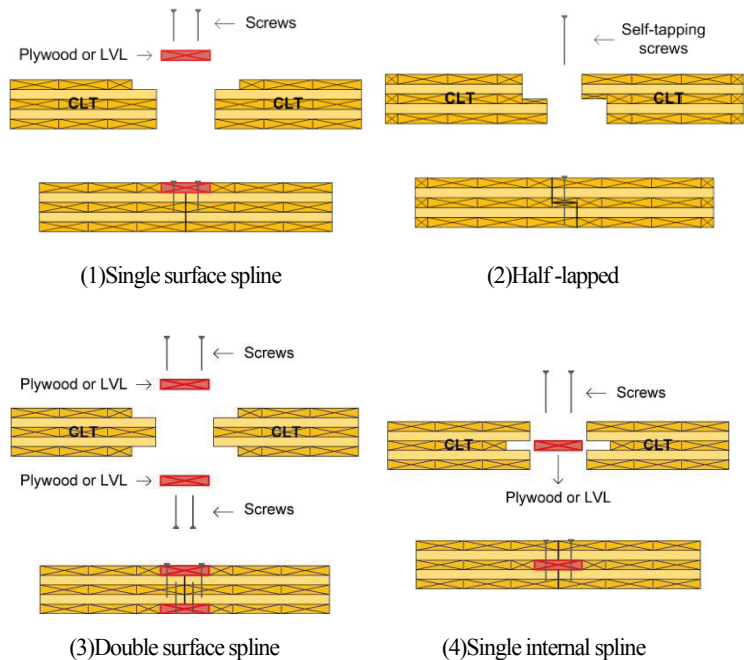
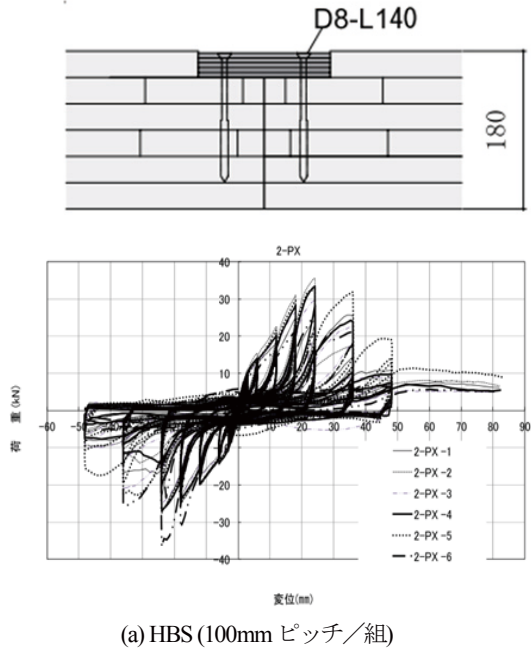


図11 床-床接合部の例¹⁰⁾

関しては、国内での実験例がある¹¹⁾。接合具1組(2本)当たりの荷重変形関係も合わせて示す。

②壁-床水平接合部、壁-基礎水平接合部

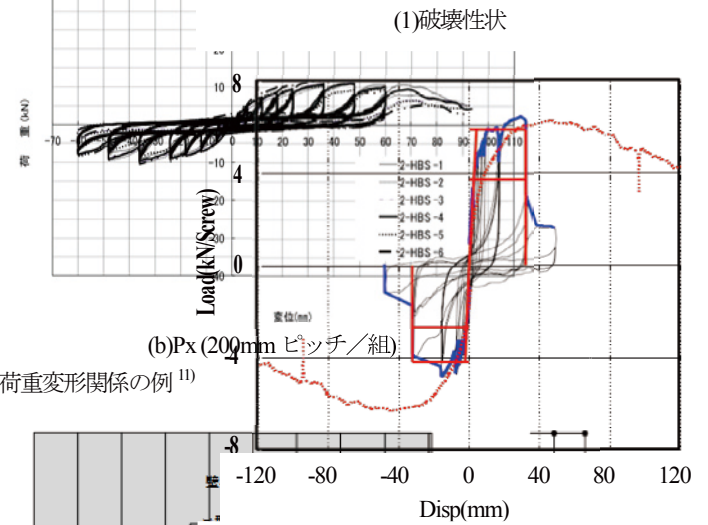
図13に示すU型、L型、まぐさ接合部のせん断試験が報告さ



(a) HBS (100mm ピッチ/組)

れている¹²⁾。せん断試験結果の骨格曲線を図13に合わせて示す。

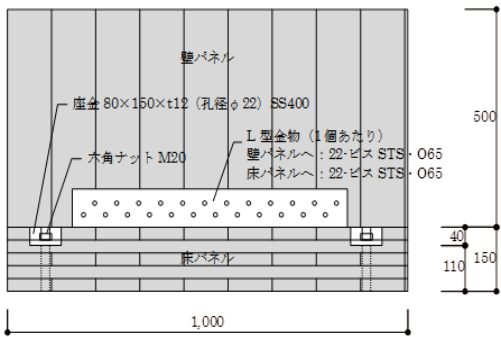
③壁-壁鉛



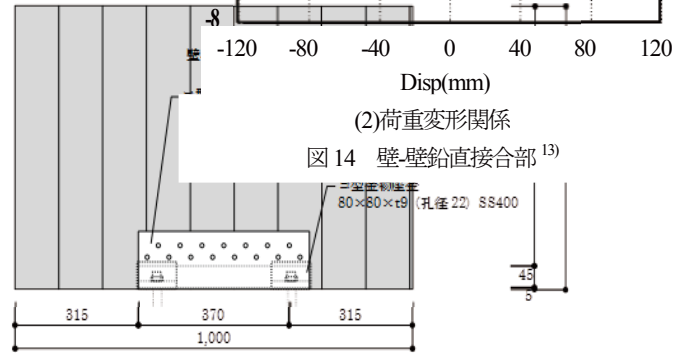
(1)破壊性状

(b) Px (200mm ピッチ/組)

図12 床-床接合部のの荷重変形関係の例¹¹⁾

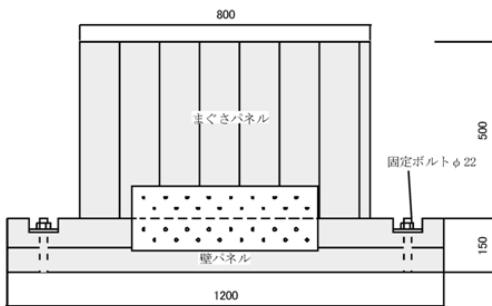


(a) L型金物 (壁パネル-床パネル)

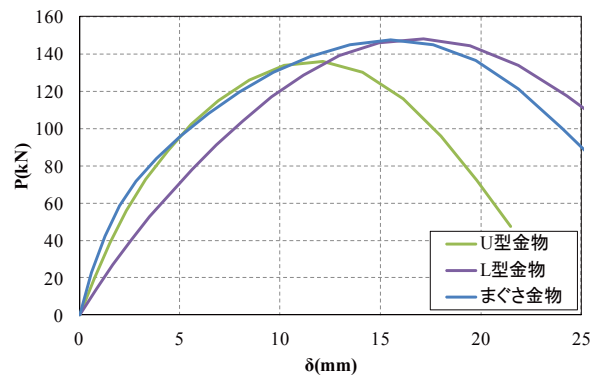


(b) U型金物 (壁パネル-基礎)

図14 壁-壁鉛直接接合部¹³⁾



(c)まぐさ接合部金物の例



(d)荷重変形関係

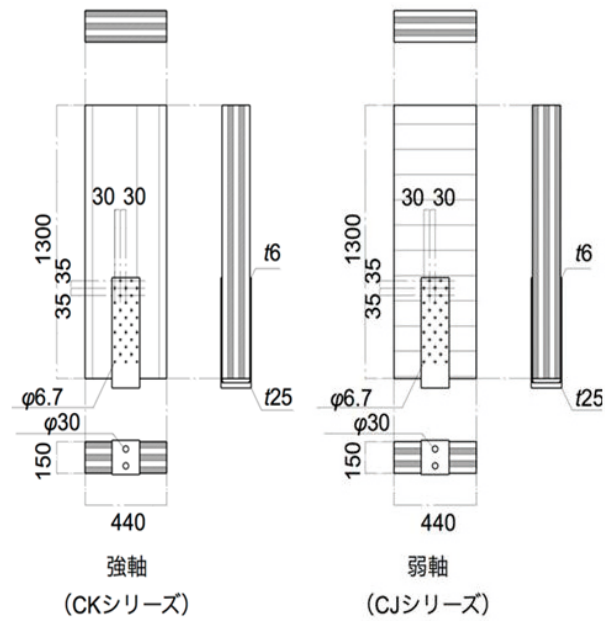
図13 U型、L型金物の荷重変形関係¹²⁾



図 16 壁-基礎接合部実験の例^{11) 12) 14)}

壁-基礎接合部が直列に配され、かつボルト長さが変更されたものとして計算が可能である。

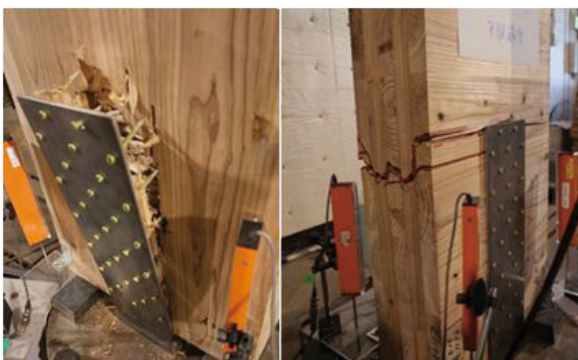
図 17 に、U 字型ビス止め金物の実験結果の例を示す¹³⁾。最外層を加力方向に対し、強軸としたものと弱軸としたもの（図 17 (1)）、また CLT を Mx60A と Mx60B の 2 種類、合計 4 仕様について各 6 体ずつ実験を行った。破壊性状を図 17 (2) に示す。強軸方向はビス部分の木部が破壊することにより、最大耐力が決まるのに対し、弱軸方向は、割れが横方向に貫通する形で破壊するのが主な破壊性状の特徴である。図 17(3)に荷重変形関係を示す。B 種については強軸と弱軸で差が見られたが、A 種では強軸の性能が高いものの、弱軸との間にそれ程大きな差は見られなかった。強軸については、概ね最大 400kN 程度の引張性能が確認された。



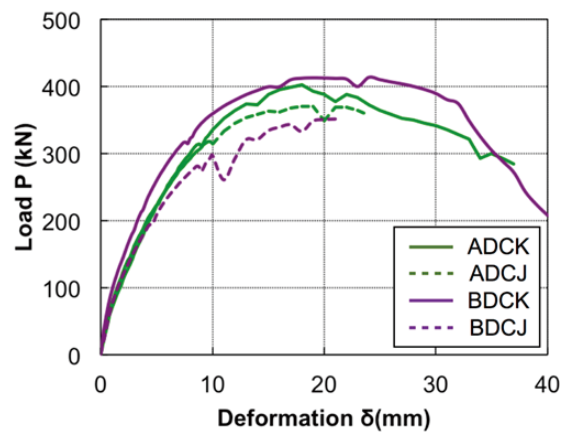
(1) 接合部試験体図 (CK,CJ)

2-3) 境界梁としての CLT 床パネル有効幅の計算方法⁶⁾

境界梁として、どの程度の幅が寄与するかは以下の方法で計算する。強軸方向に配される場合のみを対象とする。



(2) 破壊性状 (左: CK 試験体、右: CJ 試験体)



(3) 荷重変形関係

図 17 U 字型ビス止め金物の実験結果の例¹⁵⁾

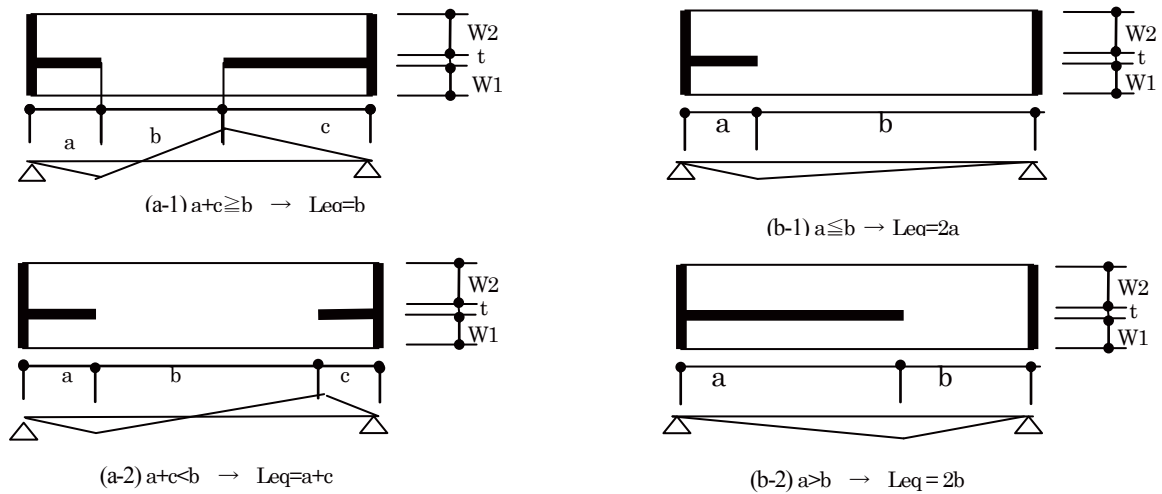


図 18 CLT 床パネルの有効幅の計算方法⁶⁾

①床パネルと壁パネルの位置関係により、境界梁計算用長さ

(Leq) を計算(図 18 参照)

床パネル上に壁パネルが 2 組ある場合、以下の通りとする。

- (a-1) $a+c \geq b$ の場合 : $Leq=b$
- (a-2) $a+c < b$ の場合 : $Leq=a+c$

床パネル上に壁パネルが 1 組ある場合、

- (b-1) $a \leq b$ の場合 : $Leq=2a$
- (b-2) $a > b$ の場合 : $Leq=2b$

②境界梁幅を計算する

Wi は図 18 のように、壁パネルと床パネルの位置から定める。

(a) $Leq / (Wi \times 2)$ 計算

(b) Wi に対する α 計算

- $0 < Leq / (Wi \times 2) \leq 1.5$: $\alpha_i = 0.55 \times Leq / (Wi \times 2)$
- $1.5 < Leq / (Wi \times 2) \leq 4$: $\alpha_i = 0.825 + 0.07 \times \{Leq / (Wi \times 2) - 1.5\}$
- $4 < Leq / (Wi \times 2)$: $\alpha_i = 1$

(c) Beq 計算

$$Beq_i = \alpha_i \times W_i \quad Beq = \sum Beq_i$$

(d) 壁 CLT 厚 t との和の計算

$$Beq + t$$

(4) 解析モデルの妥当性検証⁴⁾

ここまで、構造検討のための解析モデル構築に必要な CLT 及び各部接合部のモデル化の方法の例を示した。この方法で作成した壁パネル及び接合部を有する解析モデルと、接合部を有する壁パネルの水平加力試験結果を比較した結果を以下に示す。試験体は窓型開口と掃出開口を有する大板パネルであり、壁-基礎引張接合部は引きボルト、壁-基礎水平接合部は U 型金物である。解析は、FEM モデルによるもの (CLT : 弾性シェル要素、メッシュ分割は最大 200mm × 200mm) と、パネルゾーンをブレース置換し、壁及び腰壁垂れ壁部分を梁要素に置換したモデル (「簡易モデル」と呼ぶ) の 2 種類について解析を実施した。壁-基礎鉛直接合部及び壁-基礎水平接合部は、実験結果をトレースするように決定している。図 19 に FEM モデルを、図 20 に簡易モデルを、図 21 に FEM モデルの荷重変形関係と実験結果を比較したものを、図 22 に簡易モデルの荷重変形関係と実験結果を比較したものを示す。図より、CLT パネル自体に割れ等が生じる前までは、いずれのモデルも精度よく荷重変形関係を追跡できていると考えられる。またこのことから、設計法の検討においては、CLT 自体に破壊を生じさせない応力レベルで設計することが破壊性状をコントロールするためには必要であることも示唆される。

(4) 実大実験での検証¹⁰⁾

CLT 構造の地震応答解析及び限界耐力計算等の応答予測手法の精度検証、及び CLT 構造の終局時の地震時挙動を検討するた

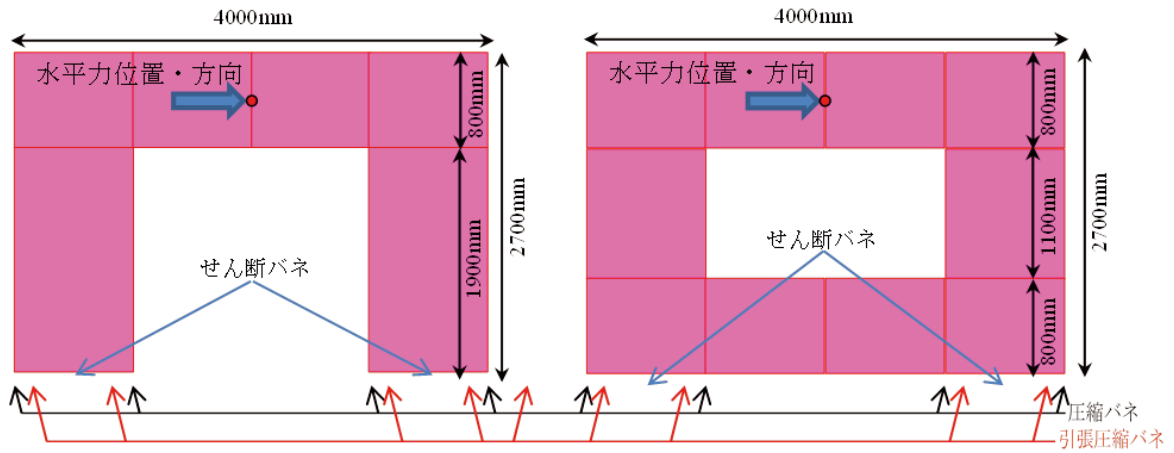


図19 FEMによるモデル化 (左：掃出型、右：窓型)⁴⁾

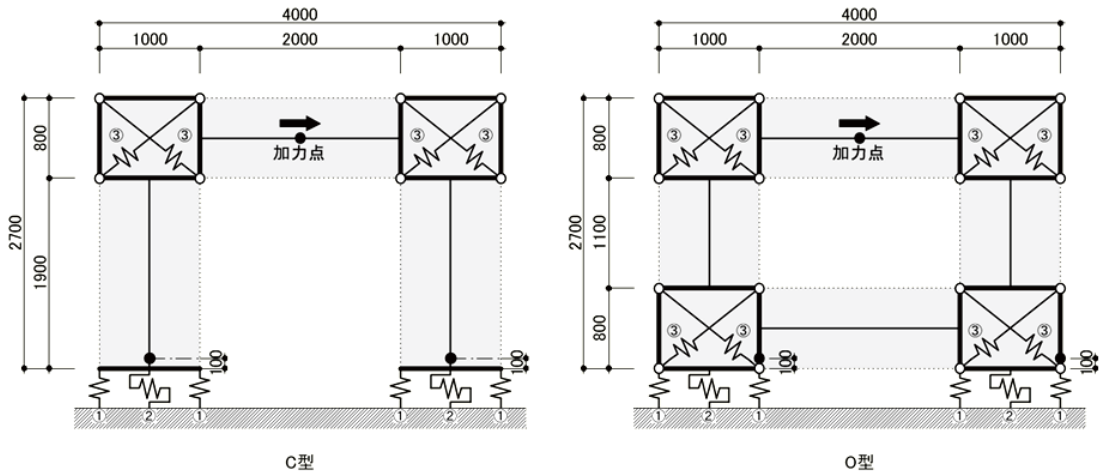


図20 簡易モデルによるモデル化 (左：掃出型、右：窓型)⁴⁾

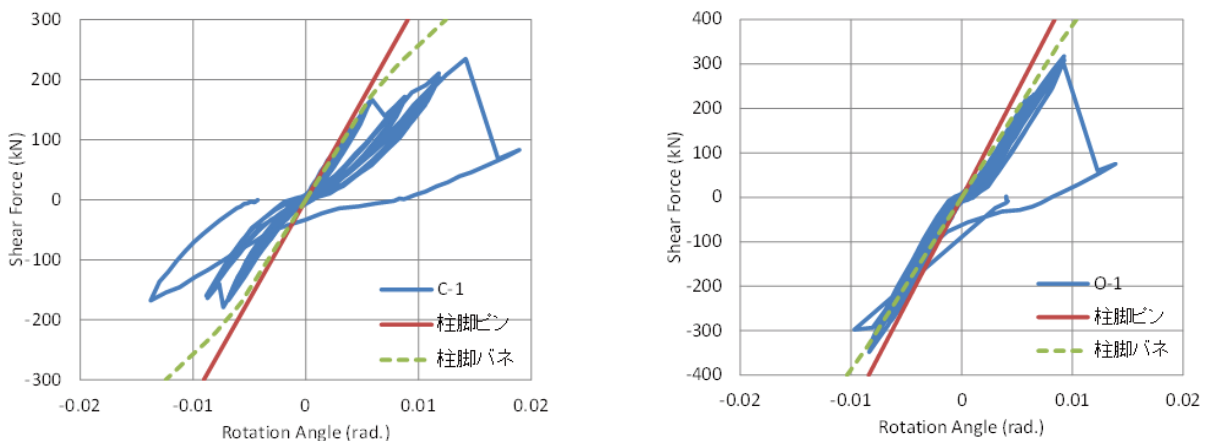


図21 実験結果とFEMモデルによる解析結果の比較 (左：掃出型、右：窓型)⁴⁾

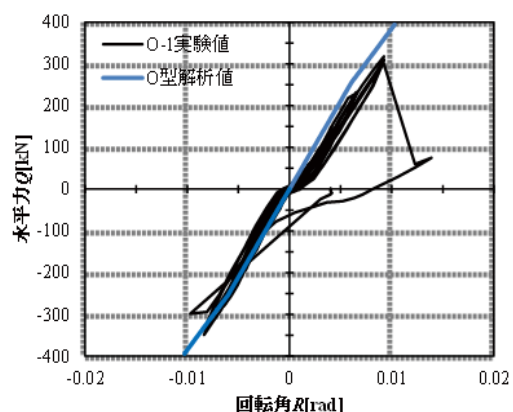
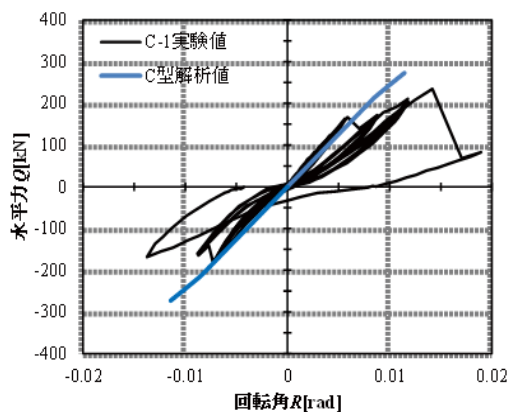


図 22 実験結果と簡易モデルによる解析結果の比較（左：掃出型、右：窓型）⁴⁾

め、兵庫県三木市にある三次元震動台（Eディフェンス）を用いた実大振動台実験を2015年2月に実施する。実験は、5階建共同住宅を想定したものと3階建て戸建住宅を想定した2棟を用いて実施する。図23に5層試験体および3層試験体の解析モデル図を、表1に振動台実験試験体の仕様の概要を、図24に5層試験体の平面図及び立面図を、図25に3層試験体の立面図を示す。地震波としては、建築基準法で規定する極稀地震相当の加速度応答スペクトルに適合するように作成した人工地震波（第2種地盤補正スペクトル：ランダム位相）1方向入力、または、過去の地震で記録された地震波等を入力する予定である。加振方向は、5層試験体は長辺方向、3層試験体は短辺方向が主加振方向である。3層試験体については、崩壊までの挙動を実験的に追跡する予定である。

IV. 今後の展望

表2に、限界耐力計算、保有水平耐力計算及び許容応力度計算等による構造計算ルートで設計するために必要な検討項目（案）を示す。大別して「モデル化に必要な項目」と「外力の設定方法」の2つの部分からなる。実大振動台実験結果を通して、限界耐力計算及び保有水平耐力計算におけるFhやDsを決定するための実験データが収集できると予想している。また、詳細な検討がまだまだ必要ではあるものの、許容応力度設計等を整備する際に、どの程度の安全率を見込むかに関する知見も振動台実験を通して得られるものと考えている。

さらに、CLT構造と他の木質構造を部材レベル、架構レベルで併用する方法について、技術的及び法制度の整備に向けた取り組みが今後期待される。

V. まとめ

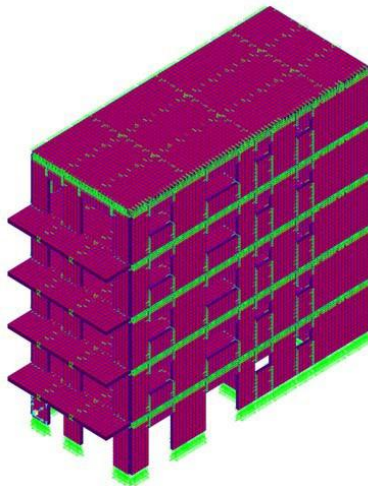
CLT構造の構法及び構造上の特徴とモデル化に関する情報、また、設計法策定にむけた取り組みについて紹介した。近い将来、我が国においてもCLT構造が中層木造建築物の主要な工法の1つなることであろう。

参考文献

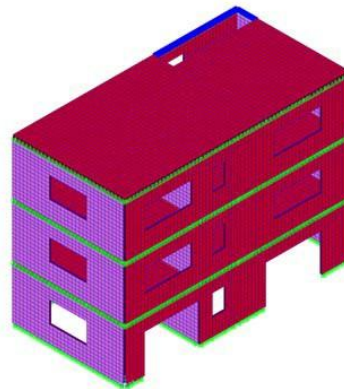
- 1)木質構造設計基準・同解説、日本建築学会
- 2)<http://www.e-architect.co.uk/london/stadthaus-murray-grove>
- 3)平成 23 年度クロス・ラミネイティド・ティンバー構法の損傷限界に関する検討 報告書、木造長期優良住宅の総合的検証事業平成 22 年度追加提案分、2012 年 3 月
- 4) CLT パネル構法の構造性能と設計法に関する調査 報告書、平成 25 年度建築基準整備促進事業、2014 年 3 月
- 5) 直交集成板の日本農林規格（農林水産省告示第 3079 号）
- 6) CLT 中層オフィスビルの試設計、「新しい木造 CLT 構造の力学特性と構造設計事例」講習会（一社）日本建築構造技術者協会木質系部会、2014 年 11 月
- 7) CLT Handbook Canadian Edition、FPInnovations、2011 年
- 8) CLT Handbook U.S. Edition、FPInnovations、2013 年
- 9) わが国初の CLT による 3 階建て共同住宅、Journal of Timber Engineering、2013 年 3 月
- 10) Structural Performance and Design of CLT Building, FP Innovations, CLT Symposium and Workshop October 12, 2011 Moncton, NB
- 11) CLT パネルを用いた中高層建築物の接合部性能の検証事業 報告書、木構造振興（株）、2014 年 3 月
- 12) CLT パネルを用いた中高層建築物の構造計画と接合部性能の検証事業報告書、木構造振興（株）、2012 年 3 月
- 13) 国産材（杉）直交積層材（クロスラミナ）の製作および性能実験の報告、銘建工業（株）、2011 年 3 月
- 14) CLT パネルを用いた中高層建築物の構造計画と接合部性能の検証事業報告書、木構造振興（株）、2013 年 3 月
- 15) 中島昌一、荒木康弘他、「CLT 鋼板添え板木ねじ接合部の引張性能」、2014 年度日本建築学会大会学術講演梗概集、2014 年 9 月
- 16) 平成 26 年度（住宅市場整備推進事業）CLT を用いた木造建築基準の高度化推進事業 設計法 WG 資料

表1 振動台実験試験体仕様

		5層試験体 (A棟)	3層試験体 (B棟)
高さ(m)		14.5	8.7
平面(m×m)		6×14.5	6×10
壁パネル仕様		Mx60A 5層 5Ply(t=150mm)	MS60A 3層 3Ply(t=90mm)
床パネル仕様		Mx60A 7層 7Ply(t=210mm)	Mx60A 7層 7Ply(t=210mm)
接合部	壁-基礎鉛直	引きボルト M24	U型金物(ビス止め)
	壁-床鉛直	引きボルト M24	U型金物(ビス止め)
	壁-基礎水平	U型金物(ビス止め)	U型金物(ビス止め)
	壁-床水平	L型金物(ビス止め)	L型金物(ビス止め)
	壁-壁鉛直	-	-
	壁-垂れ壁せん断	鋼板(ビス止め)	- (大板パネル: 一体)
	壁-垂れ壁引張	引きボルト M16×2	-
	壁-腰壁せん断	-	-
	壁-腰壁引張	-	-
	床-床	スプライン接合 (構造用合板)	スプライン接合 (構造用合板)
重量	5層(t)	32	-
	4層(t)	64	-
	3層(t)	64	20
	2層(t)	64	32
	1層(t)	67	32
予測最大 層間変形角 (限界耐力: 極稀時)	5層(rad.)	1/85	-
	4層(rad.)	1/53	-
	3層(rad.)	1/42	1/137
	2層(rad.)	1/38	1/97
	1層(rad.)	1/50	1/95

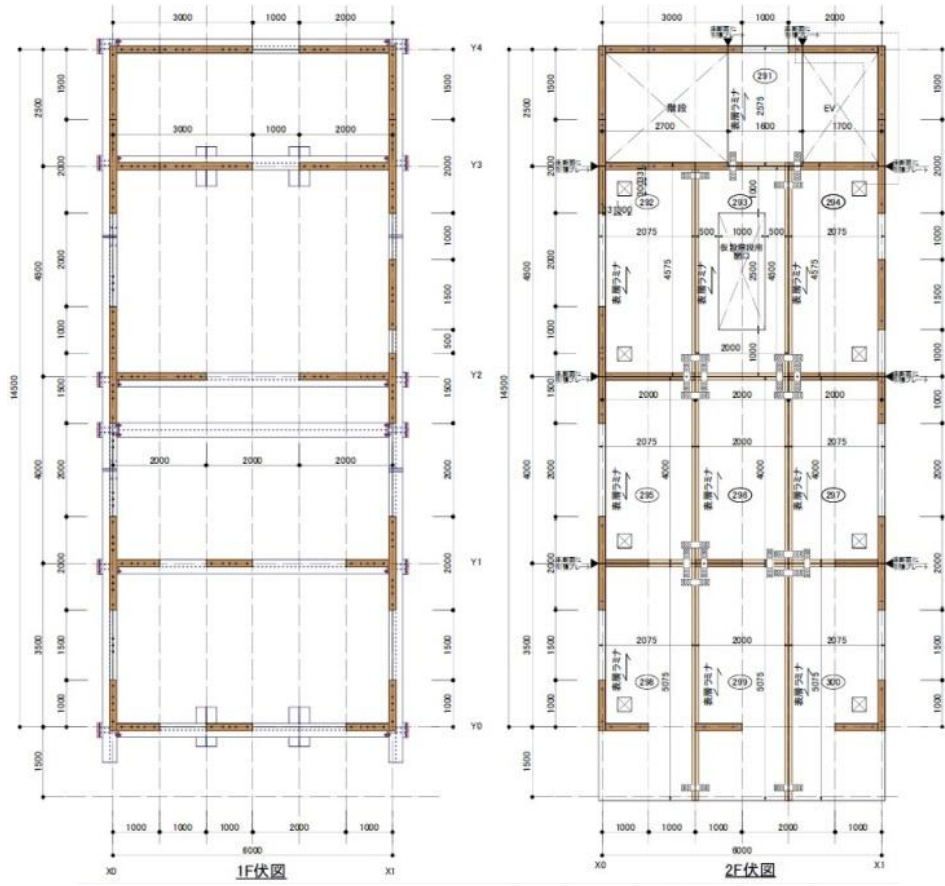


(1) 5層試験体 (A棟)

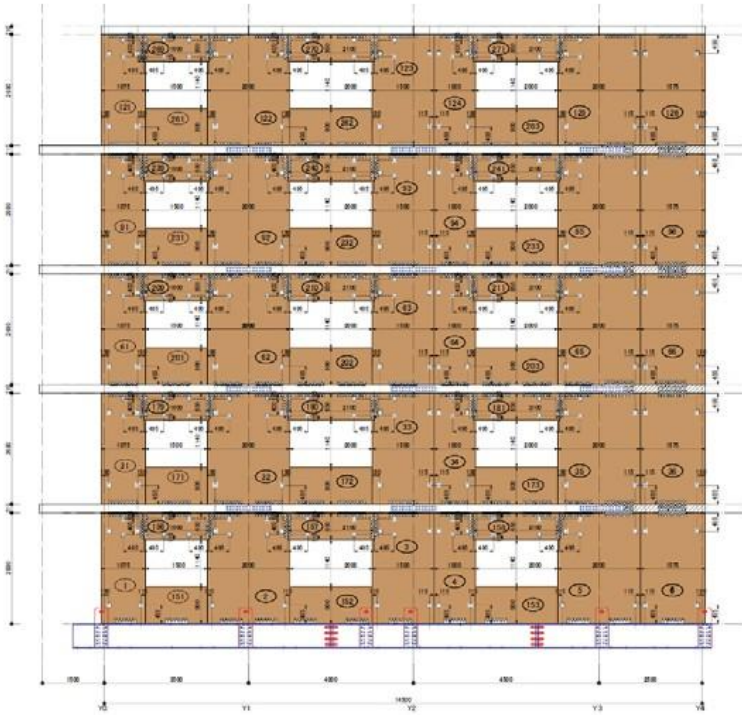


(2) 3層試験体 (B棟)

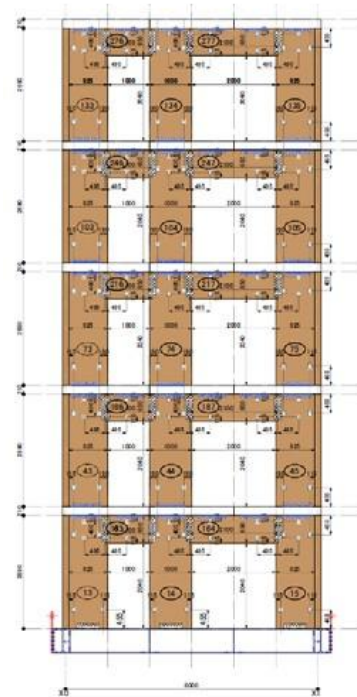
図23 振動台実験試験体



(1) 1, 2階伏図

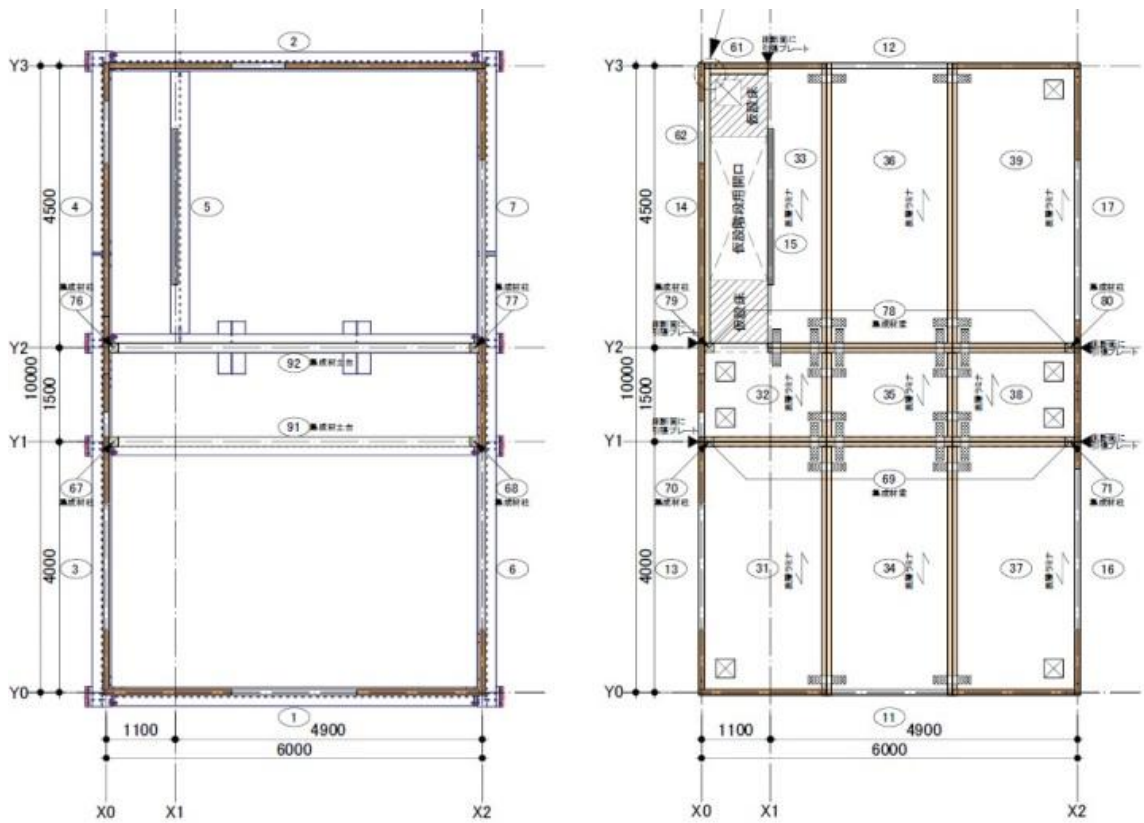


(2) 長辺方向立面図

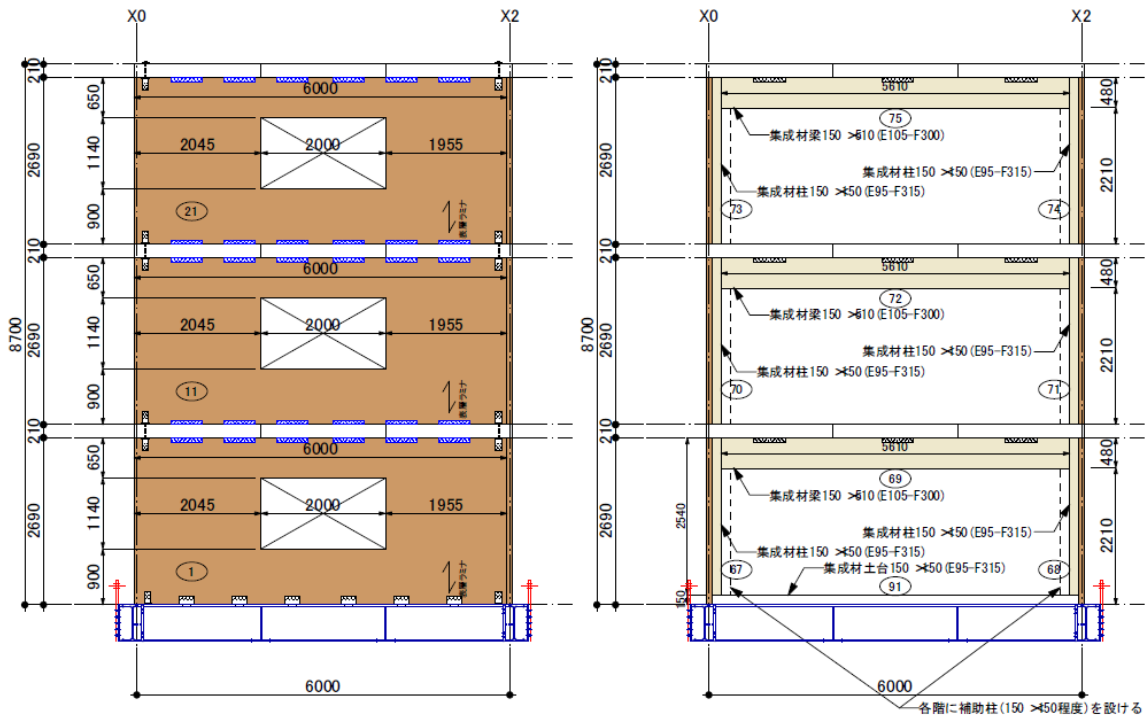


(3) 短辺方向立面図

図 24 5層試験体平面図及び立面図



(1) 1, 2 階伏図



(2) Y0 通り立面図

(3) Y1 通り軸組図

図 25 3 層試験体平面図及び立面図

表2 設計法策定に必要な検討項目 (案)

部位	検討項目	許容応力度等計算 +仕様規定 (高さ≤31m)	限界耐力計算(保有水平耐力計算) (高さ≤60m)
構法	構法種類	プラットフォーム構法等	制限なし
材料	仕様	基準強度・許容応力度・ヤング係数の設定方法	
土台	剛性・耐力	・土台の有無、仕様に応じた耐力壁脚部の圧縮剛性、許容耐力、終局耐力	・土台の有無、仕様に応じた耐力壁脚部の圧縮荷重変形性能、許容耐力、終局耐力
床版	パネル割	・パネル割のルール化	・パネル割のルール化(2Dモデル) ・パネル割の原則(3Dモデル)
	面内せん断耐力	・パネル間接合部の仕様に応じた面内せん断耐力開口部入隅の応力集中による面内せん断耐力の低減方法 ・面内せん断応力の算定方法	2Dモデルの場合：同左 3Dモデルの場合：水平構面のモデル化方法 線材要素モデルを前提として開口部入隅の応力集中の評価方法
	支持スパン	2Dモデルの場合 ・面外応力、たわみの算定方法 ・1方向板の場合、2方向板の場合開口部周辺の支持方法	2Dモデルの場合：同左 3Dモデルの場合：水平構面のモデル化方法 ・2方向板の場合は線材要素3Dモデルでは応力・変形の解析は困難(シェル要素FEMが必要)
	梁併用	・モデル化方法	
壁等	耐力壁線配置	・偏心率・剛性率の算定方法 (⇔耐力壁水平剛性の評価方法と同義)	・偏心率の算定方法 (⇔耐力壁水平剛性の評価方法と同義)
	層の水平耐力	・簡易2Dモデル(ラーメン・せん断パネルモデル等)の設定方法、検定方法 ・弾性解析とする ・鉛直荷重による耐力壁水平剛性増大の考慮 終局耐力と靱性に対する配慮 ・短期許容耐力 = 終局耐力 / 2.5? ・または、引張接合部の許容耐力を終局耐力と靱性を考慮して調整。ただし、Dsは新たに検討 ・せん断接合部、CLTパネルの先行破壊防止	・(ラーメン・せん断パネルモデル等)の設定方法、検定方法 ・荷重増分解析(鉛直荷重考慮)とする ・接合部は鉛直荷重時応力を初期応力とする ・解析過程で応力増分が反転することがある ・3Dモデルは剛床(剛体変位)仮定 ・柔床の場合は水平力分布を設定(MAP解析等) ・(限界耐力計算) Fhの設定方法 ・(保有水平耐力計算) Dsの設定方法
	垂壁スパン	・簡易モデルの応力による	
横架材	—	—	
小屋組等	面内せん断耐力	・軒レベル水平面にCLTパネルを配置する ・その他は「④床版」に同じ	
	支持スパン	・「④床版」に同じ	
接合部	引張	・引張接合部剛性、許容耐力 (、終局耐力、塑性率)	・引張接合部の応力変形関係、許容耐力、終局耐力
	圧縮	・圧縮接合部剛性、許容耐力 (、終局耐力)	・圧縮接合部の応力変形関係、許容耐力、終局耐力
	せん断	・せん断接合部剛性、許容耐力 (、終局耐力)	・せん断接合部の応力変形関係、許容耐力、終局耐力