

第2章 建築物の規模・用途等に対する CLT 構法の適性に関する調査

2.1 CLT 建築物構法の類型化

製造原理的に大きさ、厚さの制限のない CLT パネルを構造躯体とする建築物には多様な構法があり得るが、建物 1 層分の高さの壁 CLT パネルの上に床 CLT パネルを載せて層を構成する、いわゆる床勝ちのプラットホーム構法とするのが、建物平面・立面のバリエーションへの対応力、所要の構造性能確保および施工性の点で合理的かつ一般的と考えられる。文献 1) に紹介される事例のほとんどがプラットホーム構法に該当することがその証左の一つと考えられ、本調査においても対象をプラットホーム構法に限定する。

先行する欧米の事例では図 2.1.1(a)のように、階高分の高さと 10m を超える幅を有する大型壁 CLT パネル(以下「大型パネル」)を用いたものが多い。文献 1) では CLT パネルの大きさについて、高さ 3m まで、幅 16~18m まで製造可能とされている。一方、H23 年度に国内で実施された振動台実験²⁾に用いられた試験体の壁は幅 1m 以下の CLT パネルによって構成されている。これは当時の国産 CLT パネルの製造限界が 1m×6m であったことによるが、主要な耐震要素である壁をこのような「小幅パネル」で構成する場合と、「大型パネル」で構成する場合とでは、建物の耐震性能が異なると予想される。欧米に比べて地震危険度の高い我が国においては特にその点を慎重に検討する必要がある。なお、現時点では国産 CLT パネルの製造限界は 2.7m×6m まで拡大されている。



図 2.1.1 CLT 構法の先行事例

大型パネルまたは小幅パネルで構成される壁構面のバリエーションを図 2.1.2 に例示する。図 2.1.2(a)は大型パネルを用いる場合である。図 2.1.2(b)~(d)は小幅パネルを用いる場合であり、図 2.1.2(b)は壁パネル間にまぐさパネルを配置する場合、図 2.1.2(c)はまぐさパネルを壁パネルの上に設ける場合、図 2.1.2(d)はまぐさを設けず、床パネルにまぐさの機能を期待する場合である。また、図 2.1.2(a)~(d)のバリエーションを組合せて壁構面を構成することも考えられる。これらのうち、図 2.1.2(b)については上述の振動台実験によって耐震性能が検証されているほか、対応

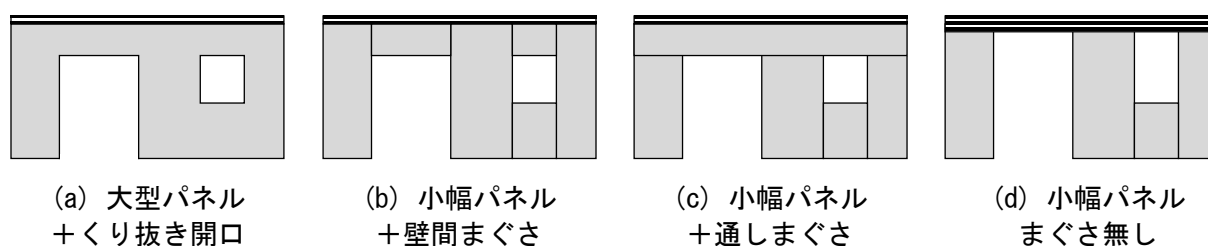


図 2.1.2 CLT 壁構面のバリエーション

する構造モデルの構成方法が提案されるとともに、同モデルを用いた解析結果と実験結果の適合性が確認されている^{2), 3)}。図 2.1.2(c), (d)の壁構面についてもこの構造モデルを用いて構造性能を確認することができる。ただし、図 2.1.2(c)についてはまぐさパネルの面外への転びを防止するために直交するまぐさパネルまたは壁パネルに接合する必要がある。

2.2 建築物の規模・用途等に対する各構法類型の適性検討

2.2.1 解析的検討に基づく各構法類型の耐震性能評価

(1) 解析条件

ここでは、図 2.1.2(a), (b)の構法類型を対象として、図 2.2.1 に示す多層構面に対する構造モデルを設定し、荷重増分解析および限界耐力計算によりそれらの耐震性能について検討する。大型パネルには一般に建物の用途に応じて開口部が設けられるが、ここでは無開口の全壁とする。開口が設けられる場合はその周辺の応力集中等により壁 CLT パネルの面内せん断耐力が低下するが、ここではその影響を無視して壁 CLT パネルには損傷は生じないものとする。

いずれのモデルについても、重量分布は最上階を 27.39(kN)、一般階を 43.19(kN)とし、解析上の水平力分布は A_i 分布とする。壁 CLT パネルは剛相当の線材要素で構成し、パネル間に接合部の変形を表すバネ要素を配置する。バネ用の応力-変形関係は非線形とし、その特性は図 2.2.2 のように文献 3)における事後解析の際に設定されたものとする。

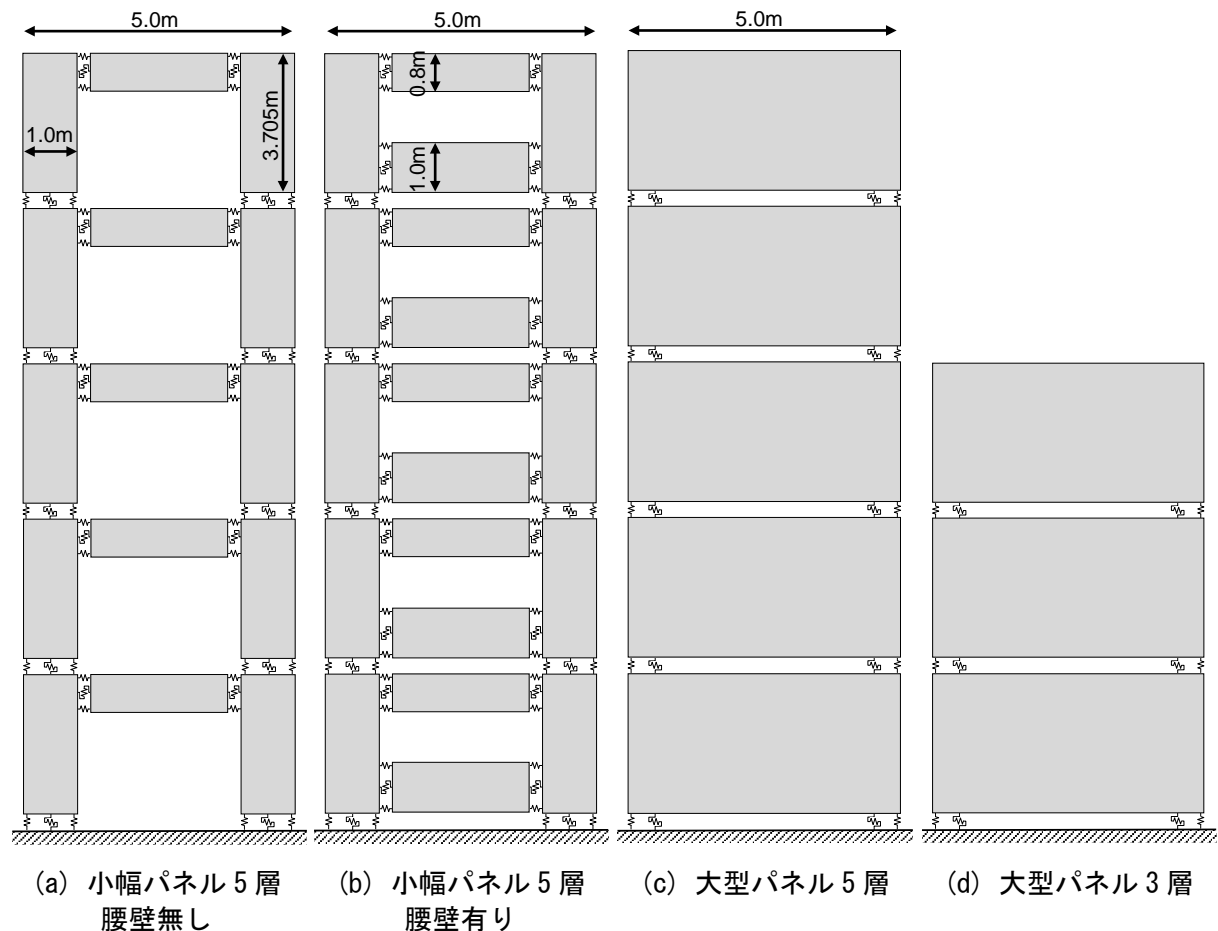
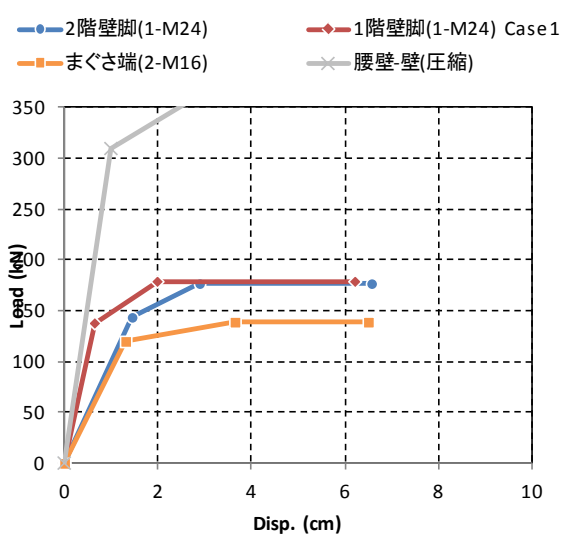


図 2.2.1 多層構面解析モデル



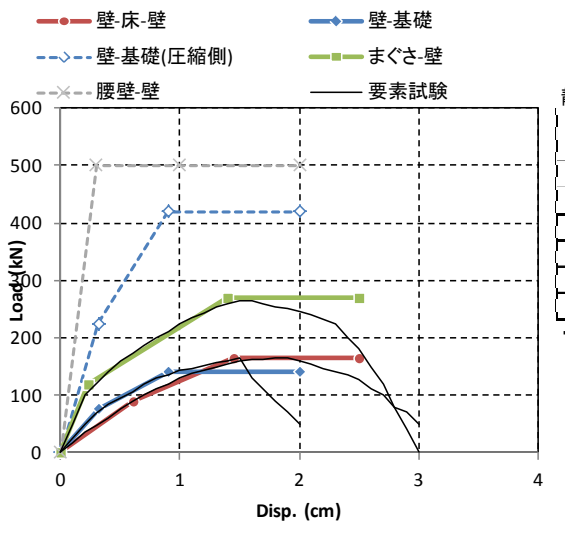
応力中心間距離と材せいの比率による調整率
 2階壁脚接合部 $(1000-(205+105)/2)/1000*0.9=0.761$
 1階壁脚接合部 $(1000-105)/1000*0.9=0.806$
 まぐさ端接合部 $(800-(105+125)/2)/800*0.9=0.771$
 耐力に調整率を乗じ、変形を調整率で除す。

腰壁・壁接合部
 引張 $K=0.1\text{kN/cm}$
 圧縮 まぐさ・壁引張耐力の2倍

壁・壁		壁・基礎		まぐさ・壁		腰壁・壁接合	
変形	引張	変形	引張	変形	引張	変形	引張
0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
1.45	144	0.66	137	1.30	119	1.00	310
2.89	177	1.99	179	3.63	139	2.80	360
6.57	177	6.21	179	6.49	139	5.00	360

$K_c=750\text{kN/cm}$ $K_c=1500\text{kN/cm}$ $K_c=500\text{kN/cm}$ $K_t=0.1\text{kN/cm}$

(a) 引張・圧縮バネ(引きボルト接合部)



静的解析用

壁・床・壁		壁・基礎				まぐさ・壁		腰壁・壁	
変形	荷重	変形	引張側	変形	圧縮側	変形	荷重	変形	荷重
0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0
0.60	90	0.32	75	0.32	225	0.23	120	0.30	500
1.45	165	0.90	140	0.90	420	1.40	270	1.00	500
2.50	165	2.00	140	2.00	420	2.50	270	2.00	500

・壁・基礎(圧縮側)の荷重は引張側の3倍とした

(b) せん断バネ(鋼板ビス打ち接合部)

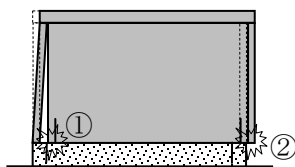
図 2.2.2 バネ要素の応力変形特性

(2) 解析結果

解析結果として、各層の層せん断力-層間変位曲線、縮約等価一自由度系の加速度-変位関係および解析モデルの変形図・降伏バネ要素分布を図 2.2.3～2.2.6 に示す。これらの中で、縮約一自由度系の必要性能曲線(Required)を求める際の減衰定数の算定方法は平 12 建告第 1457 号(限界耐力計算告示)第 9 第 2 項第三号の規定に従った。

「小幅パネル 5 層・腰壁無し」(図 2.2.3)の場合は水平変形能力が高く、縮約一自由度系の加速度-変位曲線(Equivalent SDOF)は必要性能曲線と交差しており、限界耐力計算による所要の耐震性能を満足している。「小幅パネル 5 層・腰壁有り」(図 2.2.4)の場合は腰壁の影響により水平変形能力が減少するが、縮約一自由度系の加速度-変位曲線は必要性能曲線と交点を持ち得ており、限界耐力計算による所要の耐震性能をぎりぎり満足している。「大型パネル 5 層」(図 2.2.5)の場合は耐力・水平変形性能が小さく、限界耐力計算による所要の耐震性能を満足していない。大型パネルについては壁上下端接合部のせん断変形により水平変形性能を向上することは可能と考えられるが、以下の点が懸念される。

- ✓ せん断変形による引張接合部の破壊(下図①)。
- ✓ せん断変形による直交構面の接合部破壊、踏み外し(下図②)。
- ✓ 特定層の水平変位増大(全体崩壊系を形成しにくい)。



「大型パネル 3 層」(図 2.2.6)の場合は 5 層と同様に水平変形性能が小さいが、耐力が高いことにより限界耐力計算による所要の耐震性能を満足している。

大型パネルによる壁構面は、接合部が少ないことおよび部品点数が少ないことによる工期短縮というメリットが考えられ、その点から CLT 建築物では積極的に大型パネルを採用すべきといえるが、以上の解析結果からは、小幅パネルによる壁構面は中高層建築物に適し、大型パネルによる壁構面は低層建築物に適するという傾向が指摘できる。

ただし、CLT パネルのせん断強度を既往の実験結果に基づき $2.5(\text{N}/\text{mm}^2)$ 、全断面有効として)とし、パネル厚さを $150(\text{mm})$ とすれば、CLT パネル自体のせん断強度から決まる最大水平耐力は小幅パネルを用いた壁構面で $750(\text{kN})$ 、大型パネルを用いた壁構面で $1875(\text{kN})$ となり、本解析による最大耐力を大きく上回る。したがって、CLT パネル自体は大きな耐力的余裕を有しているので、壁上下端の引張接合部に伸び能力の高いボルト等を用い、それが CLT パネルの破壊に先立って降伏するように設計するなどの方法で大型パネルを用いた壁構面についても水平変形能力が増大して耐震性能が向上する可能性はある。

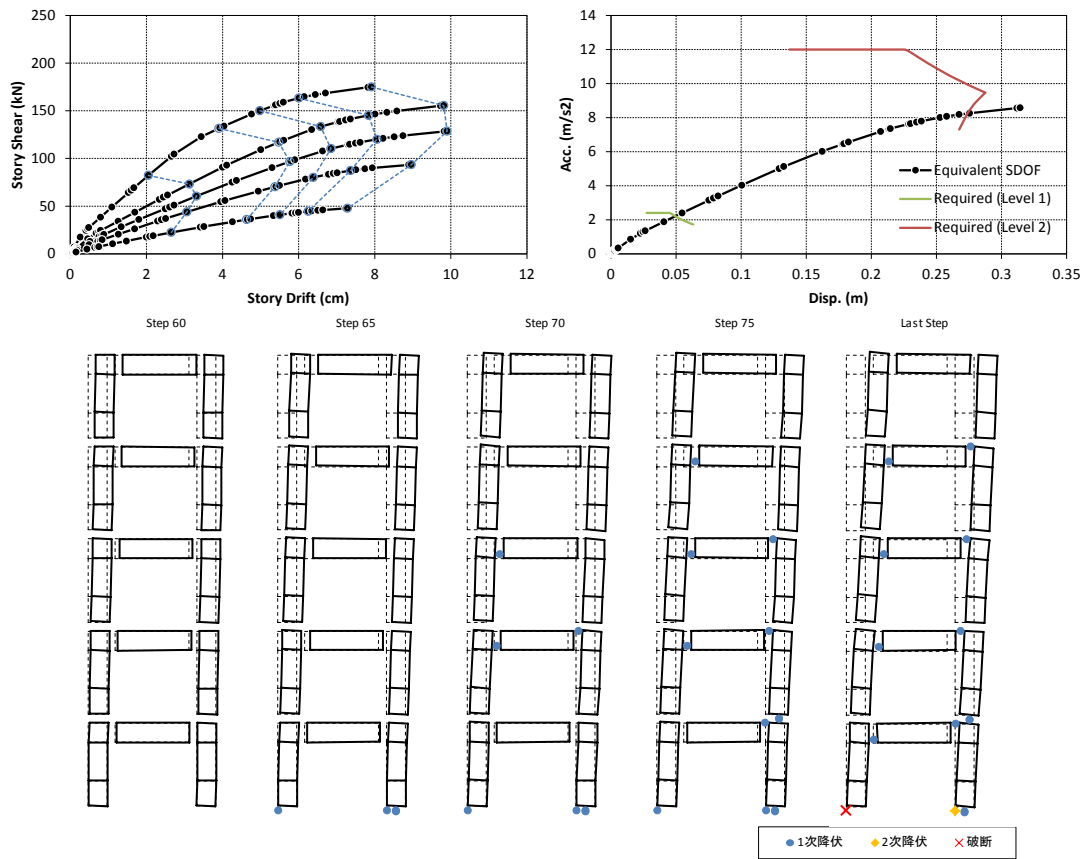


図 2.2.3 解析結果(小幅パネル5層・腰壁無し)

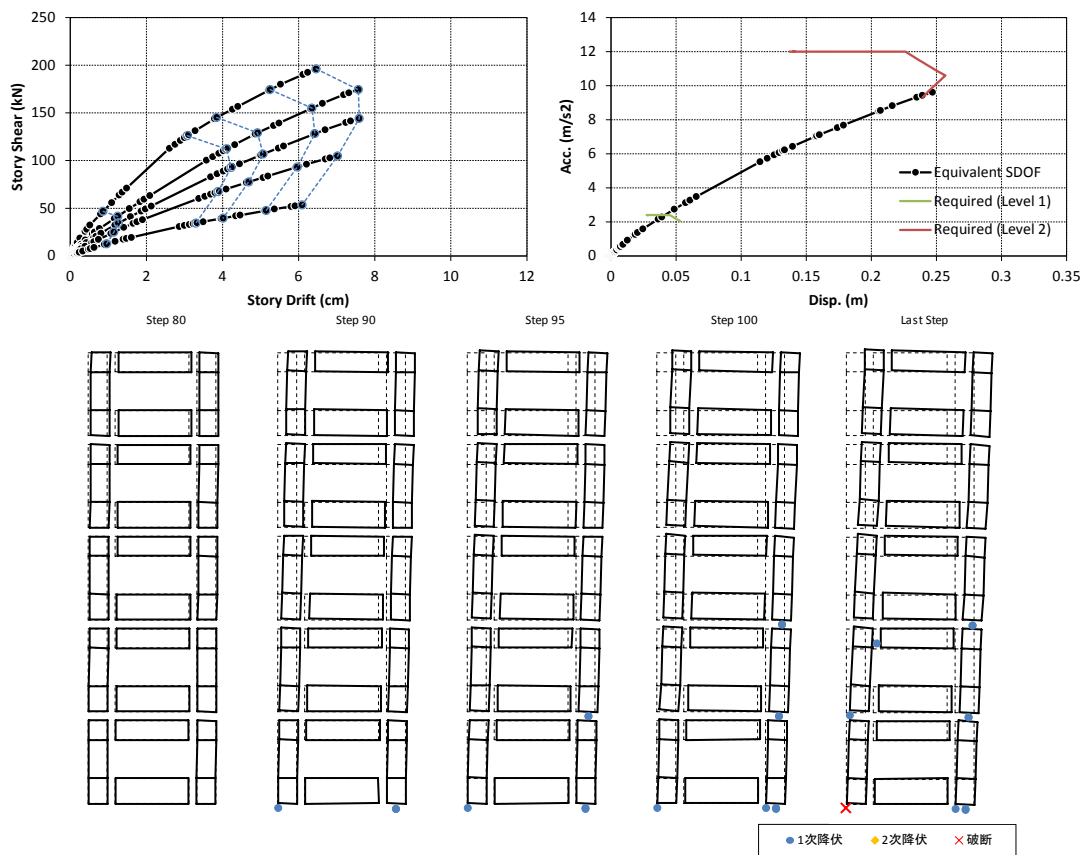


図 2.2.4 解析結果(小幅パネル5層・腰壁有り)

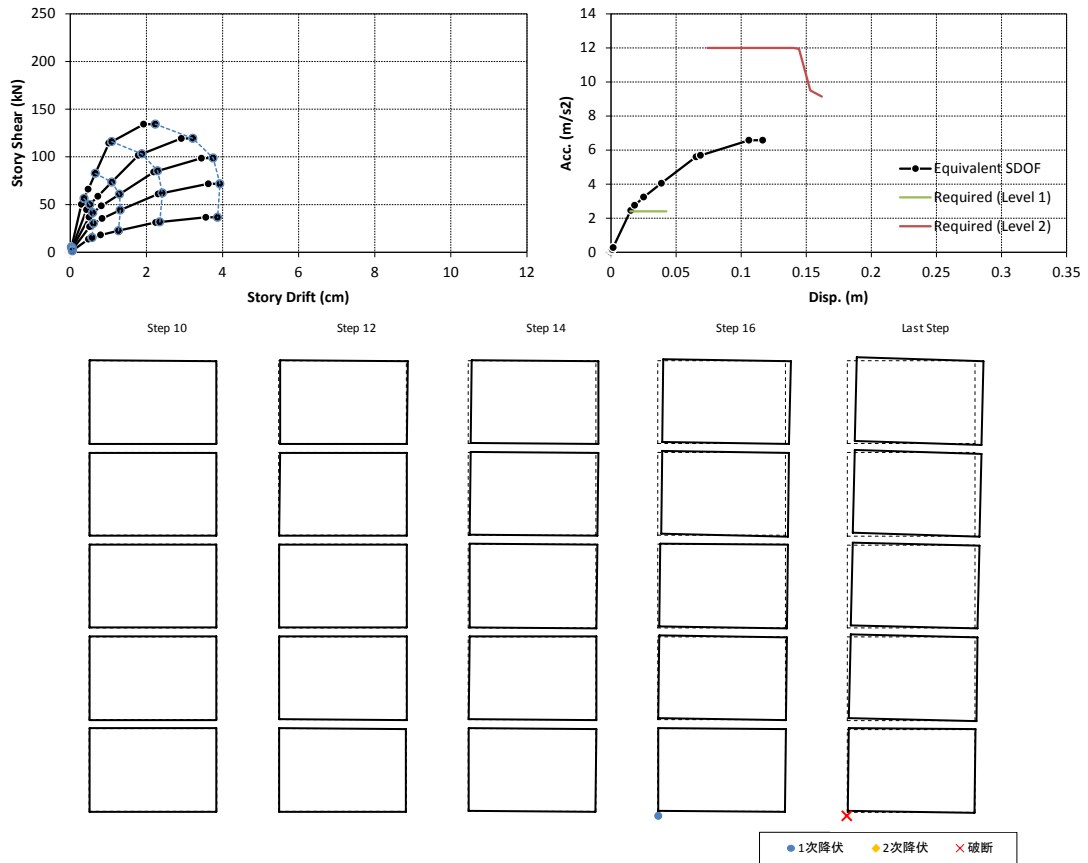


図 2.2.5 解析結果(大型パネル5層)

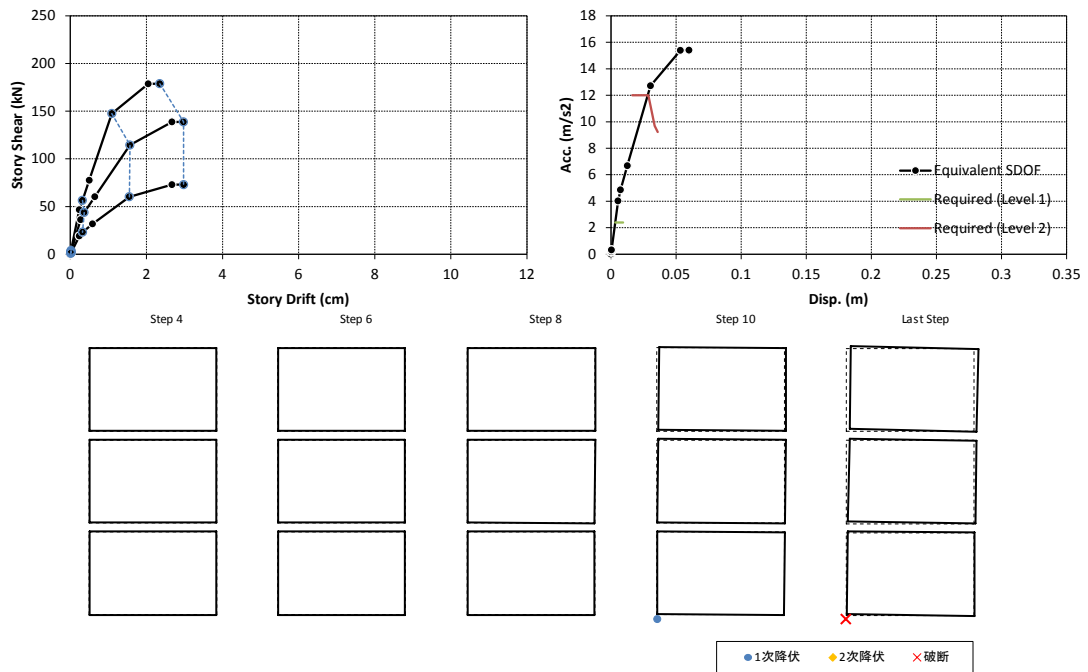


図 2.2.6 解析結果(大型パネル3層)

2.2.2 建築意匠設計の見地から望まれる大型パネルの開口形状

前項で述べたように、解析的検討結果から小幅パネルによる壁構面は中高層建築物に適し、大型パネルによる壁構面は低層建築物に適する傾向が指摘できる。一方、大型パネルには接合点数、部品点数が減少することによる工期短縮などのメリットがあり、先行する欧米の事例では有開口大型パネルにより壁構面を構成することが多い。また、大型パネル上下端の引張接合に変形能力の高い接合方法を採用することによる耐震性能向上の可能性も残されている。小幅パネルによって構成される壁構面の構造性能についてはすでに文献2),3)のように一定の知見が得られているが、有開口大型パネルに関する知見は極めて限られている。有開口大型パネルに面内水平力が作用する場合は開口隅角部周辺の応力集中により脆性的破壊が生じることがH24度の予備実験³⁾により確認されている。このような破壊が生じると建物の耐震性能は著しく低下する。したがって、任意の開口パターンを有する大型パネルの構造性能の把握と評価方法の確立は優先度の高い検討課題であり、これを踏まえて4章、5章では有開口大型パネルの面内性能に関する実験的検討を行う。ここではそれに先立ち、建築意匠設計の見地から望まれる大型パネルの開口形状を整理する。

(1) 開口周辺の高さ設定

居住系用途および業務系用途それぞれについて、壁 CLT パネルの高さを 2.7(m)とする場合の開口部周辺の一般的な高さ設定を図 2.2.7 に示す。まぐさ(垂壁)の高さは 450~500(mm)程度、腰壁の高さは 800~1800(mm)程度となる。

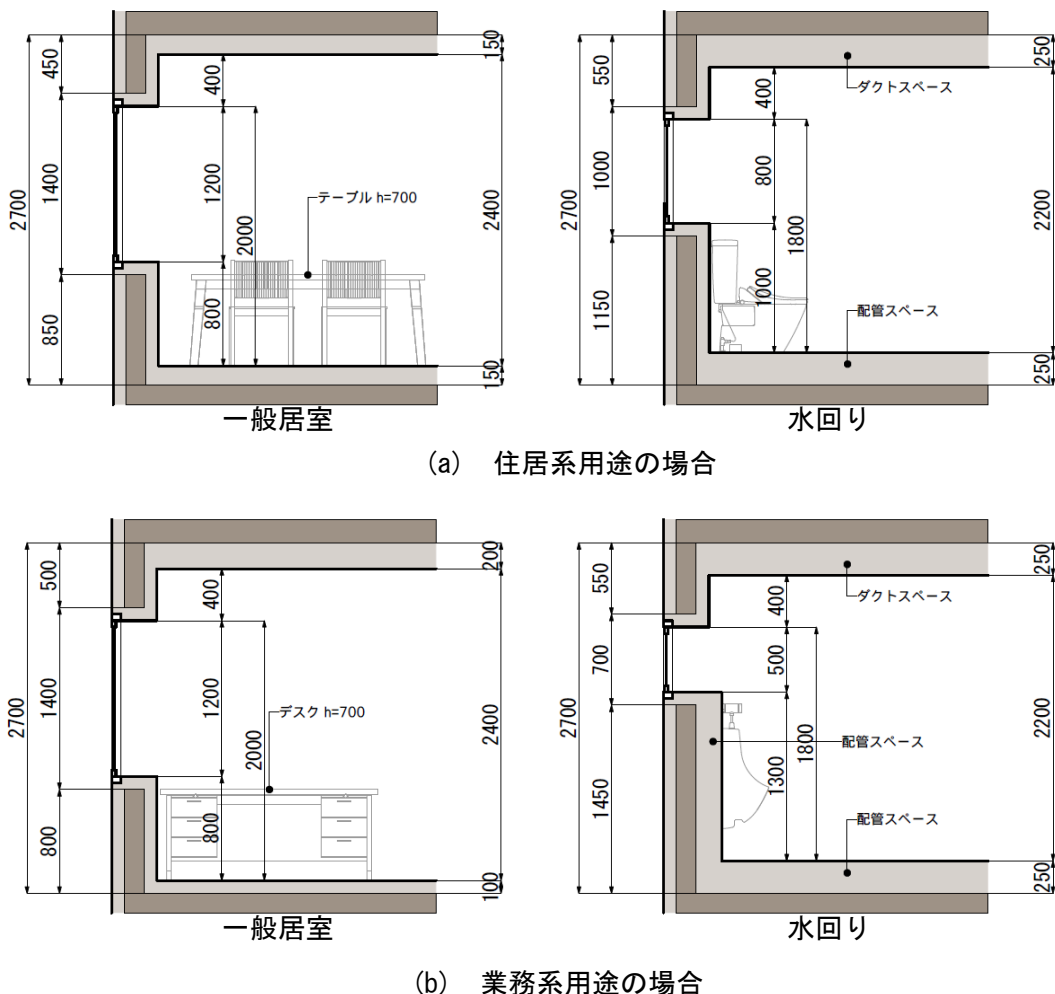


図 2.2.7 開口部周辺の一般的な高さ設定

(2) 一般的な外壁開口パターン

居住系用途および業務系用途それぞれについて、壁 CLT パネルの高さを 2.7(m)、幅を 6.0(m) とする場合の一般的な外壁開口パターンを図 2.2.8 に示す。開口部間の壁の幅は 650~1000(mm) 程度となる。

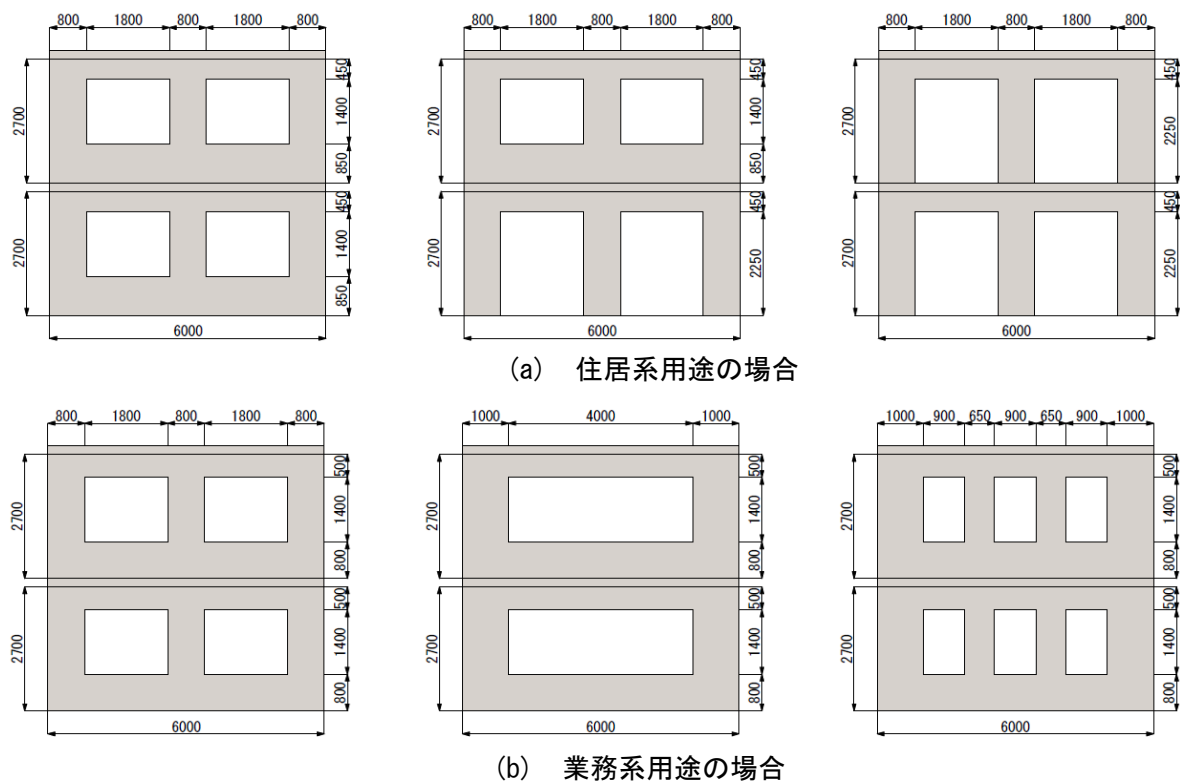


図 2.2.8 一般的な外壁開口パターン

2.3 CLT 構法の設計法素案の検討

今後の設計法構築の基礎的準備として設計法 A, B, C の 3 種類を設定することを考える。設計法 A から C に向かって上位の設計法とし、設計法が上位であるほど設計手続きは複雑になるが設計の自由度は拡大するものとする。一方、設計法構築の観点からは下位の(簡易な)設計法ほど検討課題が多く、構築に要する時間が長くなること、および上位の設計法が下位の設計法構築に関する課題検討のツールになり得ることを考えれば、設計法 C, B, A の順で構築作業を行うことが合理的である。以下、その順でその概略イメージを示す。

(1) 設計法 C

限界耐力計算に基づく設計法の構築を優先し、その後、保有水平耐力計算に基づく設計法を検討する。

■荷重増分解析

第 6 章において、平面シェル要素等によって構成される FEM モデルを用いた解析結果が有開口大型パネルの面内水平加力実験結果と一定の適合性を有することが示され、設計法としても FEM 解析により有開口大型パネルを含む CLT 建築物の荷重増分解析を行うことは可能である。ただし、FEM モデルでは要素分割の細かさによって解析結果が変化するなどの特徴があるため、解析の妥当性の確認には高度な知識が必要となる。したがって、FEM モデルを用いた解析は特別な調査研究に位置付け、標準的な設計法としては図 2.3.1 に示すような簡易モデルを用いることを想定する。これらのモデルでは CLT パネルに相当する線要素は線形、CLT パネル間の接合部に相当するバネ要素は非線形の応力変形特性を有する。

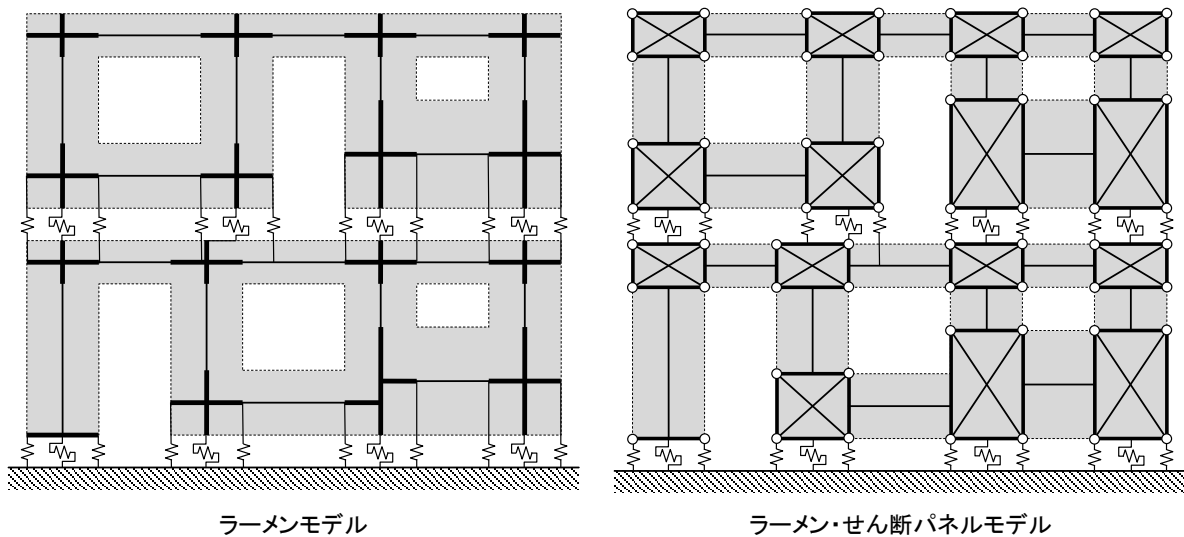


図 2.3.1 簡易構造モデルの例

■部材検定

限界耐力計算の規定に従って次のクライテリアを設定する。

損傷限界時： CLT パネルの応力度 \leq 短期許容応力度
接合部の応力 \leq 短期許容応力

安全限界時： CLT パネルの応力度 \leq 基準強度以下。
接合部の変形 \leq 接合部の安全限界変形

ただし、壁 CLT パネル上下端の水平せん断接合部については 2.2.1 項(2)で述べた理由により、安全限界時においても弾性範囲内とするなど過大な変形を防止する必要があると考えられる。また、CLT パネルおよびすべての接合部について、詳細(FEM)モデルによる解析結果に対する簡易モデルの解析結果の誤差が無視できない場合は応力の割増率を設定することも考えられる。

減衰定数の算定方法については原則として現行の限界耐力計算の規定によることとし、今後、CLT パネルを用いた実大架構の水平加力実験などの結果に基づいてその妥当性を検証するとともに、必要に応じて修正案を検討する。

■保有水平耐力計算について

限界耐力計算による設計法構築後に、それをツールとして CLT 構法の構造特性係数 D_s の設定方法を検討する。

(2) 設計法 B

現行法令に規定されるルート 2 (許容応力度等計算)に対応し、簡易モデルを用いた弾性解析により長期荷重、積雪荷重、風圧力および $C_0 = 0.2$ に相当する地震力に対する応力・変形を把握することを前提とする。

終局耐震性能が直接確認されないことに対する安全性をいかに確保するかが設計法構築上の要点であり、次のような仕様規定に関する検討が必要と考えられる。

CLT の先行破壊防止を目的として

- ・大型 CLT パネルに設ける開口の大きさ、位置、個数等の制限
- ・CLT パネルの検定応力の割増

壁構面の変形能力確保を目的として

- ・接合部の仕様、配置方法の制限
- ・壁 CLT パネルの配置方法の制限
- ・水平構面の構成方法の制限

(3) 設計法 A

現行の「壁量計算+N 値計算」に相当する設計法とする。この場合は構造性能の評価精度が低くなることを考慮して、構造躯体の安全率に相当の余裕が確保できるような設計法とする必要がある。設計法 B で設定される仕様規定をさらに強化するとともに、垂れ壁、腰壁は無視した全壁部分のみを耐力壁とみなすなどの措置が必要になると考えられる。

参考文献

- 1) FPIInnovations : CLT Handbook, Chapter 1 Introduction to cross-laminated timber, 2011
- 2) 株式会社日本システム設計：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(木造長期優良住宅の総合的検証事業), 平成 22 年度追加提案分報告書, 平成 24 年 3 月
- 3) 株式会社日本システム設計：クロス・ラミネイティド・ティンバー構法の損傷限界・安全限界に関する検討(木造長期優良住宅の総合的検証事業), 平成 24 年度報告書, 平成 25 年 3 月

