

第6章 まとめと今後の展望

6.1 検討結果概要

CLTパネル工法建築物では既往の震災・振動台実験等における倒壊事例が無いことにより倒壊限界が不明であり、耐震基準は限定的な知見に基づく安全側の評価とならざるを得ない。一方で、CLT壁パネルは、面内剛性・面内耐力が従来の木質耐力壁等に比べて高いため鉛直荷重による押え込み効果が大きく、その結果として倒壊限界変位が増大すると考えられる。したがって、CLTパネル工法建築物の倒壊限界を把握することによって、大地震に対する検定条件緩和または検定省略、引張接合部の簡易化などのほか、誰もが納得できる耐震設計法の構築が可能になると期待できる。

このような背景を踏まえて、令和3～5年度には本年度検討事業(以下、「本事業」)に先立ち、下記のような3ヶ年計画に基づいて倒壊限界を考慮した耐震基準案策定に関する検討を実施した。

令和3年度¹⁾: 倒壊解析の可能性検討、倒壊限界等確認実験および耐震基準緩和の方向性検討

令和4年度²⁾: 倒壊解析手法の構築、倒壊解析手法検証実験、耐震基準緩和の内容検討

令和5年度³⁾: 低層建築物の倒壊限界を考慮した耐震基準案の提案および中高層建築物の耐震基準合理化に向けた課題の整理

これらの事業により得られた主要な知見は下記の通りである。

- 振動台実験と静的水平加力実験によるCLTパネル工法・小幅パネル架構の地震倒壊限界層間変形角は1/5rad程度であった。
- 小幅パネル架構のように上下に連なる壁列全体が傾斜する場合は壁傾斜復元力(鉛直荷重による押え込み効果)の効果は減少し、垂壁一壁接合部の面内曲げ抵抗が倒壊限界変位増加の支配的要因となる。
- しかし、垂壁一壁接合部の面内曲げ抵抗性能を数種類の方法で分析したところ、方法ごとに異なる結果となり、倒壊限界を考慮した耐震基準案策定のためには垂壁一壁接合部の面内曲げ抵抗性能の確実化が必要である。
- 層数が多いほど倒壊に対する耐性が大きくなる。また、2, 3層架構について、壁パネル上下端引張接合部の耐力・終局変形の両方を1/3に縮小しても倒壊耐性の減少は限定的である。
- 耐震基準案の骨子として「ルート1相当」と「ルート3相当」の2種類を立案した。
- 「ルート1相当」では、許容水平耐力は倒壊限界を考慮することにより、平28国交告第611号(以下、「告示」)第10に規定される許容水平耐力の1.8倍程度に増加する可能性が確認された。
- 「ルート3相当」では、建物ごとに実施する不倒壊判定方法を立案し、小規模の解析モデルを用いてその妥当性を確認した。
- そのほか、4層以上の中層建築物に関して同様の検討を実施するためには標準的接合部の設定が必要であることが確認された。

本事業ではこれらの成果を踏まえ、倒壊限界を考慮した耐震基準案の提示を目的として、以下の検討を実施した。

① 垂壁・腰壁一壁接合部面内曲げ性能の確実化……………【第2章】

- 1) 日本システム設計, 京都大学生存圏研究所: 令和2年度 木材製品の消費拡大対策のうち CLT 建築実証支援事業のうち CLT 等木質建築部材技術開発・普及事業, CLT パネル工法建築物の地震時限界性能把握による接合部簡易化・壁量低減等耐震基準緩和に関する検討事業報告書, 令和4年2月
- 2) 日本システム設計, 京都大学生存圏研究所: 令和3年度 木材製品の消費拡大対策のうち CLT 建築実証支援事業のうち CLT 等木質建築部材技術開発・普及事業, CLT パネル工法建築物の地震時限界性能把握を踏まえた耐震基準緩和に関する検討事業報告書, 令和5年2月
- 3) 日本システム設計, 京都大学生存圏研究所: 令和4年度 木材製品の消費拡大対策及び国内森林資源活用・建築用木材供給力強化対策事業のうち CLT 建築実証支援事業のうち CLT 等木質建築部材技術開発・普及事業, CLT パネル工法建築物の倒壊限界を考慮した耐震基準策定に関する検討事業報告書, 令和6年2月

- ①-1 接合部仕様の抽出
- ①-2 垂壁・腰壁一壁接合部面内曲げ実験
- ①-3 事後解析:構造モデル・接合部ばね特性の設定
- ② 倒壊限界を考慮した耐震基準の提案……………【第3章】
 - ②-1 ルート1相当
 - ・ 許容転倒モーメント・水平剛性の定式化
 - ・ 追加仕様規定の設定(水平耐力向上の保証条件として)
 - ②-2 ルート3相当
 - ・ 実規模建築物の動的Pushover(耐力限界までのA-Δ関係算出)の実行性
 - ・ 様々なA-Δ関係への不倒壊判定の適用性
 - ・ 実用耐震基準(D_s への読み替えなど)
- ③ 接合部の簡易化検討(木造軸組構法住宅用金物等の適用) ……【第4章】
 - ・ 実現可能な許容転倒モーメント・水平剛性の把握
- ④ 中層建築物の接合部仕様に関する検討 ……………【第5章】
 - ・ 適用可能な接合部仕様・構造性能等の調査
 - ・ 耐震性能推定のためのケーススタディ

本報告書2～5章における検討結果概要を以下に示す。

第2章 垂壁・腰壁一壁接合部面内曲げ実験

● 試験体

垂壁・腰壁一壁接合部の面内曲げ抵抗性能の確実化を目的として、「1階壁脚」と「各階床レベル」の2シリーズの試験体を用いた水平加力実験を実施した。いずれの試験体も腰壁の有無を実験変数の1つとした。垂壁・腰壁・壁パネルはルート1相当を前提としてすべてS60-3-3(90mm厚)とし、接合方法はクロスマーク金物およびクロスマーク金物と類似の製作金物を用いたビス打ちとした。「1階壁脚」試験体の壁脚水平せん断接合部については令和4、5年度事業で設定した回転変位追従型接合部とした。また、垂壁・腰壁一壁接合部の面内曲げ抵抗性能には水平構面の仕様も影響を及ぼすことを考慮して、「各階床レベル」試験体について下記の4仕様を設定した。

CLT床版・目地一致 / CLT床版・目地ずれ / 集成材床組 / 集成材床組+鋼製頭つなぎ

そのほか、今後の参考として「各階床レベル」には大版パネル架構①による試験体を加えた。なお、腰壁一壁接合部の面内曲げ抵抗性能の直接的確認は本実験が初である。

● 実験結果 (1階壁脚)

腰壁の無い試験体では壁パネルの回転角が $1/40 \sim 1/20 \text{rad}$ に達した時点でアンカーボルトが破断し、水平耐力をほぼ喪失した。また、水平加力終了後に $1/5 \text{rad}$ 程度の回転角を維持した状態で壁脚部に水平力を加えたところ、回転変位追従型接合部は 200kN 以上のせん断耐力を保持していた。腰壁のある試験体でもアンカーボルト破断が生じる壁パネルの回転角はほぼ同じであったが、最大耐力は腰壁がないものの2～3倍となった。アンカーボルト破断後も最大耐力の6～7割の水平耐力を維持し、その後、壁パネルが腰壁パネルを面外に割裂くことで水平耐力が緩やかに低下した。

● 実験結果 (各階床レベル)

いずれの試験体も最大耐力に達するときの上下壁パネル平均回転角 θ_{ave} は $1/15 \text{rad}$ 程度であり、その後、壁パネルによる垂壁・腰壁の面外割裂により耐力が低下した。耐力が最大耐力の $1/2$ に低下するときの θ_{ave} は $1/7 \text{rad}$ 程度であった。また、腰壁のある試験体では、腰壁による補強効果により下層壁パネルと上層壁パネルの相対回転角が増大し、それらを繋ぐ引張ボルトの破断により $\theta_{ave} = 1/7.5 \text{rad}$ 程度で急激な耐力低下を示す

ものがあつた。設定した4種類の水平構面仕様による差異は顕著ではないが、「CLT床版・目地一致」の方が「CLT床版・目地ずれ」より最大耐力がやや小さく、「集成材床組」の方が「CLT床版」より水平耐力低下が緩やかな傾向があつた。

● 事後解析

各試験体に対応する解析モデルを作成し、wallstatを用いた動的Pushover(1方向応答解析)による加力点の水平力-水平変位関係が実験結果に適合することを条件として、垂壁・腰壁と壁の間に設定したMS(Multiple Spring)要素の圧縮ばね特性を同定した。MS要素以外のばね特性は既往実験等に基づく平均的特性とした。なお、対象には令和5年度事業で実施した垂壁-壁接合部面内曲げ実験試験体を加えた。結果として、MS要素圧縮ばね特性を降伏後に一定の耐力を維持する完全弾塑性型とし、終局変形に達した時点で耐力が低下するように設定することで解析結果が実験結果に適合することが確認された。その降伏耐力、終局変形は試験体ごとに異なり、降伏耐力は6~8N/mm²程度、終局変形は20~60mm程度であつた。また、腰壁-壁接合部の方が垂壁-壁接合部より降伏耐力・終局変形ともに小さい傾向があつた。

第3章 倒壊限界を考慮した耐震基準の検討

● ルート1相当

建物ごとの耐震検定では、上下に連層する壁列ごとに、地震時($C_0 = 0.2$)転倒モーメントが許容転倒モーメント M_{Ta} 以下であることを確認することとし、 M_{Ta} について動的Pushoverパラメトリックスタディ(以下、「パラスタ」)に基づく定式化を行った。パラスタでは1~3層の1, 2スパン架構を対象とし、第2章・事後解析の検討結果に基づいて構造モデルを設定した。ここでは、MS要素の設計用圧縮ばね特性として、第2章・事後解析による試験体ごとの特性に対する50%下限値を採用し、その他のばね特性についても既往時検討に基づく50%下限相当の性能とした。設計用特性を50%下限とする理由は、CLTパネル工法架構の水平力に対する耐力・変形能力は主に接合部性能に依存するため、それら接合部の耐震設計上の役割は在来軸組構法、枠組壁工法等における耐力壁と同じとみなせることによる。

パラスタの耐力評価クライテリアは次のように設定した。

✓ 中地震時($C_0 = 0.2$)

- 層間変形角 $\leq 1/150\text{rad}$ (耐火要件がない場合は $1/120\text{rad}$)
- CLT 壁パネルの面内応力度 \leq 短期許容応力度
- 等価 1 自由度系の応答加速度 \leq 等価 1 自由度系の比例限加速度 A_y

A_y は、等価 1 自由度系の加速度 A -代表変位 Δ 関係の降伏加速度(弾性限界)であり、木造耐力壁の許容水平耐力評価法における降伏耐力 P_y と同じ方法で算出する。

✓ 大地震時

極稀地震動をもとに、最大応答変位が 1.5 倍になるように増幅し、平 12 建告第 1457 号第 4 に規定される階数に応じた係数 p を乗じた地震動に対して、

- CLT 壁パネルの面内応力 \leq 終局面内耐力
- 倒壊しない。

なお、大地震時の最大応答は動的Pushoverによる A - Δ 関係と「必要耐力曲線」の交点として求める。 A - Δ 関係と必要耐力曲線が交点を持つ場合を不倒壊、交点を持たない場合を倒壊とし、これを「不倒壊判定方法」として、後述のルート3相当では建物ごとにその判定を行う。必要耐力曲線を算出する際に参照する等価減衰定数については、判定結果が倒壊応答解析結果に適合するように低減したものをを用いる。

結果として、 M_{Ta} を換算して得られる許容水平耐力は現行ルート1の許容水平耐力 Q_a (平28国交第611号第十)の1.8~2.0倍となつた。また、CLT設計施工マニュアル第7章の方法による許容転倒モーメント M_a に対しては1.1~1.3倍であつた。 M_a に対する増加率が低いのは、 M_a 算定式に開口幅が含まれるなどパラメータ設定が Q_a と異なることによると考えられる。本事業のパラスタでは Q_a を基準として解析パラメータを設定したが、これ

を M_a 基準とすることで増加率が向上する可能性がある。

そのほか、上記の水平耐力増加の保証条件として追加する必要があると考えられる仕様規定について検討した。

● ルート3相当

前述のように、ルート3相当では建物ごとに不倒壊判定を行うこととし、その精度を倒壊応答解析結果と比較することで検証した。また、不倒壊判定に必要な動的Pushoverについて実規模建物に対する実行性を確認した。そこでは、解析ソフトとしてwallstatのほかに市販ソフトを用いて、必要な解析時間を確認した。wallstatでは動的Pushoverの実行に支障はないが、解析時間は1方向当り2～3時間であった。市販ソフトの動的Pushoverでは、アンカーボルト破断時の急激な耐力低下により解析が発散して解析不能となったため、静的Pushoverによりアンカーボルト破断前の結果と、アンカーボルトを配置しない解析モデルによる解析結果をアンカーボルト破断後の挙動として、それらを一につなぐこととした。そのようにして求めた解析結果はwallstatによる解析結果に対して耐力がやや過小評価となった。その原因は、垂壁・腰壁端部MS要素圧縮ばね特性設定に関するソフトの制約にあり、それを解消することで適合性は改善すると考えられる。解析時間は1方向当り30分間程度であった。

● 偏心の影響

偏心が倒壊限界に及ぼす影響を確認するために、偏心率 R_e が0, 0.3のモデルを用いた動的Pushoverの結果を比較した。結果として、 $R_e = 0.3$ のモデルを不倒壊とするための負担可能重量は $R_e = 0$ のモデルの0.87倍となり、動的Pushoverによる等価1自由度系の加速度に $1/F_e$ を乗じれば安全側であることが確認された。ここで、 F_e は昭55国交告第1792号第7による偏心率に応じた割増し係数である。

● 実用耐震基準案

ルート3相当について、技術的には上述の不倒壊判定により保有水平耐力の検定は省略可能であるが、従来のルート3との連続性・親和性を考慮して保有水平耐力の検定も行うとすれば、「不倒壊判定を満たす場合、 $D_s = 0.2Q_u/Q_a$ とすることができる」等とすることが考えられる。ここで、 Q_u は保有水平耐力、 Q_a は許容水平耐力である。

第4章 接合部簡易化に関する検討

第3章のパラスタの対象とした鉛直架構の引張接合部に木造住宅用金物を適用する場合の耐震性能を概観した。木造住宅用金物は鋼管とドリフトピンによるいわゆる「ほぞパイプ」とし、その応力変形性能は既往の実験結果に基づいて推定した。倒壊応答解析の結果として、許容水平耐力を現行ルート1(平28国交国第611号第十)の1.2～1.4倍としても不倒壊であることが確認された。

第5章 中層建築物に関する検討

5階建て程度以下の中層建築物を対象とし、令和5年度検討に基づいてCLT壁パネルをS90-5-5(150mm厚)、壁-基礎引張接合ボルトをM24(ABR490)、壁-壁引張接合ボルトをM27(ABR490)とすることを前提として架構構成・接合部構成を仮定した。ボルトとCLT壁パネルとの接合部、およびせん断接合部について、令和5年度検討によりクロスマーク金物のような鋼板ビス打ち形式では接合部が大きくなりすぎて空間的に納まりが困難になることが確認されていることを考慮して、主として鋼板挿入ドリフトピン接合を用いることとした。接合部の応力変形関係は、鋼板挿入ドリフトピン接合については既往研究による計算式により、その他の接合部については既往の実験結果等に基づいて推定した。

上記の結果に基づき、5層・2スパン架構の水平耐力を動的Pushoverと不倒壊判定により評価した。結果として、許容水平耐力は層間変形角($\leq 1/150\text{rad}$)で決まり、1階で48.3kN/m(換算壁倍率24.6)となった。また、不倒壊とするための負担可能重量から決まる許容水平耐力は96～120kN/m(換算壁倍率49.0～61.2)と推定された。ただし、これらの値はCLT壁パネルの面内応力に対する検定を行っていない値である。

6.2 今後の課題と展望

● 中地震時の層間変形算定精度の向上

- 本事業で得られた許容水平耐力は層間変形角 ($\leq 1/150\text{rad}$) で決まるものが多かった。
- 一方で、2015年度震動台実験試験体E棟では、現行ルート1の許容負担可能重量の2.28倍の重量であったが、中地震時の層間変形角は $1/406\text{rad}$ と極めて小さかった。
- この点で、本事業の構造モデル設定方法は見直しが必要である。特にCLT壁パネル上下端の支圧剛性・めり込み剛性が実態性能に対して過小評価になっている可能性がある。
- それにより、中層建築物を含めた全般の許容水平耐力が向上する可能性がある。

● ルート1相当の耐震基準案

- 本事業では、平28国交国第611号第十による許容水平耐力 Q_a を基準として、その増加率を検討した。
- その結果として倒壊限界を考慮した許容水平耐力は Q_a の1.8~2.0倍に増加したが、CLT設計施工マニュアル・第7章による許容転倒モーメント M_a に基づく許容水平耐力に対しては1.1~1.3倍にとどまった。
- Q_a と M_a は算定パラメータが異なることがその理由の一つと推定される。
- したがって、 M_a を基準とした増加率検討を行うことで、許容水平耐力がさらに向上する可能性がある。

● ルート3相当の耐震基準案

- ルート3相当では、任意の架構形状を対象とすることを前提として、建物ごとに不倒壊判定を行うこととしたが、そのために必要な動的Pushoverに要する時間が1方向当り2~3時間に及ぶ、あるいはアンカーボルト破断前後で2回の解析を行う必要があるなど実用性は乏しいと言わざるを得ない。
- この問題に対して、ルート1と同様に「耐力壁の連層配置」等の制限を設けて、架構形状を限定することにより、ルート1相当と同様の簡便な耐震基準を構築できる可能性がある。
- 加えて、4層以上の中層建築物では「耐力壁の連層配置」は構造計画としてむしろ常識的であり、それが設計上の障害になることは少ないと考えられる。
- 技術的には、この方法を「ルート2相当」とみなすことも可能であり、その場合は構造計算書適合判定が不要になるなど、設計負荷の軽減が期待できる。ただし、平28国交国第611号への適合については確認が必要である。

● 接合部の簡易化

- 接合部の簡易化を「市販金物適用を含む引張接合部仕様の最適化」ととらえ、市販の木造住宅用金物の適用だけでなく、接合ボルトの低耐力化を含めて検討する。
- それにより、単に低コスト化だけでなく、引張接合部とCLT壁パネルの耐力バランスの改善による許容水平耐力向上の可能性もある。

● 中層建築物

- 上述の「層間変形算定精度の向上」は特に中層建築物に対して重要である。
- 上述の「ルート3相当(あるいはルート2相当)の簡易耐震基準」は特に中層建築物に対して有用と考えられる。
- ただし、本年度までに実験の対象としたCLT壁パネルは低層建築物用としてS60-3-3(90mm厚)であり、中層建築物の耐震基準案提示のためにはCLT壁パネルをS60-5-5(150mm厚)等とし、接合部を鋼板挿入ドリフトピン等とした試験体を用いた実験が必要である。