

第9章 まとめ

9.1 検討結果概要

本事業では、3年計画の3年目として実施した。1年目事業は「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」(以下「2021年度事業」として、2年目事業は「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」(以下「2022年度事業」として実施されている。

CLTパネル工法建築物については既往の震災・振動台実験等における倒壊事例がないため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。CLTパネル工法ではCLT壁パネルの面内剛性・面内耐力が従来の木質耐力壁構造に比べて高いため、鉛直荷重による押え込み効果(傾斜復元力)が大きく、それが倒壊限界を伸ばすと考えられる。一方、CLTパネル工法において標準的とされる小幅パネル架構では層崩壊を避けて、上下に連続する壁列全体が傾斜する全体崩壊形とすることが構造計画の基本となっている。この場合は傾斜復元力が減少するが、垂壁・腰壁一壁間の面内曲げ抵抗がそれを補い、その効果は階数が多いほど大きいことが2021、2022年度事業により確認されている。したがって、このようなメカニズムを明らかにし、倒壊限界を把握することにより耐震基準を緩和できる可能性がある。

本事業では、このような背景の下で、2021、2022年度事業で実施した実大実験から得られた成果等を踏まえ、それに引き続いて実験・解析等による倒壊限界の把握と、それに基づく耐震基準緩和案の検討が行われた。検討の概略フローを図9.1に示す。

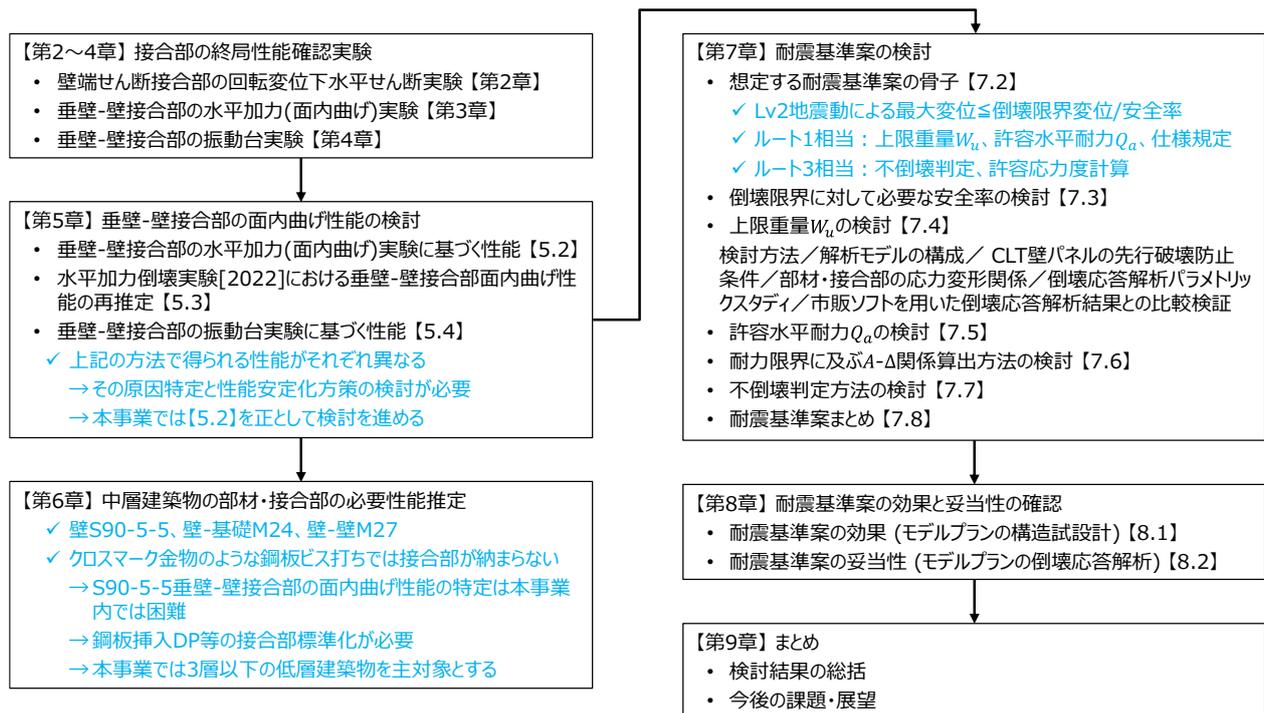


図 9.1 検討の概略フロー

本報告書2～8章における検討結果概要を以下に示す。

第2章 壁端せん断接合部の回転変位下水平せん断実験

壁パネルに回転変位が生じた状態における壁端せん断接合部の終局耐力を確認した。CLTパネル工法・小幅パネル架構の倒壊限界変形角は1/5～1/3rad程度であり、2022年度事業では、このような大変形時にも耐力を保持し得る壁端せん断接合部を考案し、水平加力倒壊実験試験体に適用した。この大変形対応せん断

接合部の他に、コの字形金物を用いた壁－梁水平せん断接合部およびクロスマーク金物を用いた接合部も対象に加えた。大変形対応せん断接合部については、一部の試験体で回転変位導入過程において壁パネルの浮き上がりが生じたが、実際には鉛直荷重による抑え込みと、せん断接合部近傍の引張接合部によりそのような現象は生じないと推測された。

第3章 垂壁－壁接合部の水平加力(面内曲げ)実験

垂壁－壁接合部の面内曲げ応力－回転角関係、および回転角が生じた状態における垂壁端せん断接合部の終局耐力を確認した。垂壁－壁接合部の面内曲げ抵抗性能は倒壊限界に及ぼす影響が大きいことを考慮して、2022年度事業の水平加力倒壊実験試験体に適用した垂壁－壁接合部のほか、終局変形性能の増加を意図して設定した計6種類の試験体を対象とした。2022年度事業の水平加力倒壊実験試験体に適用した垂壁－壁接合部については、面内曲げ耐力および終局変形角のいずれも2022年度事業の水平加力倒壊実験に基づく推定値を下回った。

第4章 垂壁－壁接合部の振動台実験

垂壁－壁接合部の振動台実験により動的な面内曲げ性能を確認した。2022年度事業の水平加力倒壊実験試験体に適用した垂壁－壁接合部のうち、集成材・合板床組を用いたものは「第3章 垂壁－壁接合部の水平加力(面内曲げ)実験」の結果と同等であった。CLT床パネルを用いたものは、応答過程における垂壁端部の跳ね上げにより、その直上のCLT床パネル間引張接合部のビスが損傷したため、終局変形性能は「第3章 垂壁－壁接合部の水平加力(面内曲げ)実験」の結果より小さかった。垂壁端部の跳ね上げは比較的軽微な措置で防止可能であり、それが講じられれば終局変形性能が向上すると推測された。

第5章 垂壁－壁接合部の面内曲げ性能の検討

「第3章 垂壁－壁接合部の水平加力(面内曲げ)実験」による面内曲げ耐力および終局変形角が2022年度事業の推定値を下回ったことを踏まえて、2022年度事業の水平加力倒壊実験の倒壊限界状態近傍における残存水平耐力に寄与していた可能性のある垂壁－壁接合部以外の耐力要素を、適切と考えられる範囲で最大限に考慮することとして、垂壁－壁接合部の水平加力実験による面内曲げ応力－変形角関係を再度推定した。その結果として、終局変形角は2022年度事業推定値にほぼ一致したが、面内曲げ耐力は同推定値よりやや大きかった。しかし、その面内曲げ性能を用いた応答解析結果は2015年度の振動台実験結果にほぼ適合し、この再推定性能が実態に近いと推測された。

第6章 中層建築物の部材・接合部仕様の検討

静的増分解析等に基づく検討により、4,5階建てに対応するためには壁パネルはS90-5-5(150mm厚)以上、壁-基礎引張接合部はM24(ABR490)以上、壁-壁引張接合部はM27(ABR490)以上の耐力が必要であること、および接合部の構成を現実的なものとするためには、クロスマーク金物等のビス打ち接合に代えて、鋼板挿入ドリフトピン接合等の標準化が望まれることが確認された。併せて、現時点では壁パネルにS90-5-5を用いた場合の垂壁－壁接合部の特定は困難であるため、以降の検討では4階建て以上の中層建築物は主対象から除することとした。

第7章 耐震基準案の検討

「ルート1相当」と「ルート3相当」の2種類の耐震基準案を設定した。

ルート1相当の耐震基準案として、現行ルート1の規定を満足する仕様の架構を対象とし、地震転倒モーメントが許容転倒モーメント M_{Ta} 以下、かつ、建物総重量が上限重量 W_u 以下というクライテリアを設定した。

倒壊応答解析パラメトリックスタディにより、 M_{Ta} が決まるときの1階層せん断力の現行ルート1による許容水

平耐力に対する比率 A_q 、および現行ルート 1 による許容水平耐力による負担可能重量に対する W_u の比率 A_w を、最も不利と考えられる1スパン架構を対象として確認したところ、いずれも1.8以上であることが確認された。なお、上記の2つのクライテリアは、最終的には一つのクライテリアにまとめられると考えられる。

ルート3相当耐震基準案として、建物ごとに、増分解析等により水平耐力が0となる(耐力限界)までの加速度 A -代表変位 Δ 関係を求め、その A - Δ 関係に基づいて、安全率を考慮した地震動に対して倒壊しないことを確認する(不倒壊判定)こととし、その実行可能性を確認した。

地震動に考慮する安全率については、Lv2(極稀)地震時の応答変位を倒壊限界時変形の1/1.5倍以下とすることとして、上限重量 W_u を設定する際、およびルート3の不倒壊判定の際に想定する地震動の加速度をLv2地震の $\sqrt{1.5}$ 倍とすることとした。

また、2021年度事業成果に基づいて、曲げ破壊防止条件として弾性検定 $\gamma_e = N/(A \cdot F_c) + M/(Z \cdot F_b)$ を1.0以下とすること、せん断破壊防止条件として平均せん断応力度 $\tau = Q/A$ を 2.0N/mm^2 以下とすることとした。 N, M, Q は軸応力、曲げ応力、せん断応力、 A, Z は断面積、断面係数、 F_c, F_b は圧縮、曲げの基準強度である。

第8章 耐震基準案の効果と妥当性の確認

CLT設計施工マニュアル・付属DVDに収録されている設計例のうち、下記の3階建て共同住宅を対象として、第7章で設定した耐震基準案に基づいて水平耐力について検討した。結果として、現行ルート1に対する許容水平耐力の増加率 A_q は2.54であること、および倒壊応答解析により、震度7級地震動に対して $A_w = 2.125$ としても倒壊しないことが確認された。これらの結果は7章による A_q, A_w より大きい、その原因は、対象架構が多スパンであることによると推測された。

9.2 今後の課題と展望

9.2.1 低層建築物の耐震基準案の確定に向けて

- 小幅パネルの倒壊限界変位は大きく、それを考慮した耐震基準により許容水平耐力の増加、必要壁量の減少が可能である。
- ただし、倒壊限界変位の大きさは垂壁・腰壁端部の曲げ性能に強く依存するので、それを確実にするための条件を明らかにする必要がある(例えば図9.2, 9.3)。

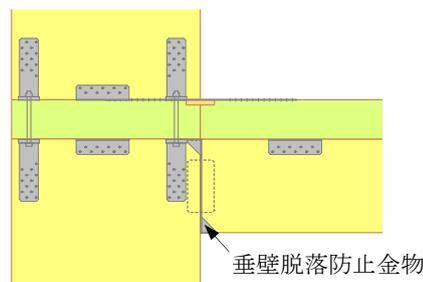


図 9.2 大変形時の垂壁脱落防止措置の例(図 5.2.6 再掲)

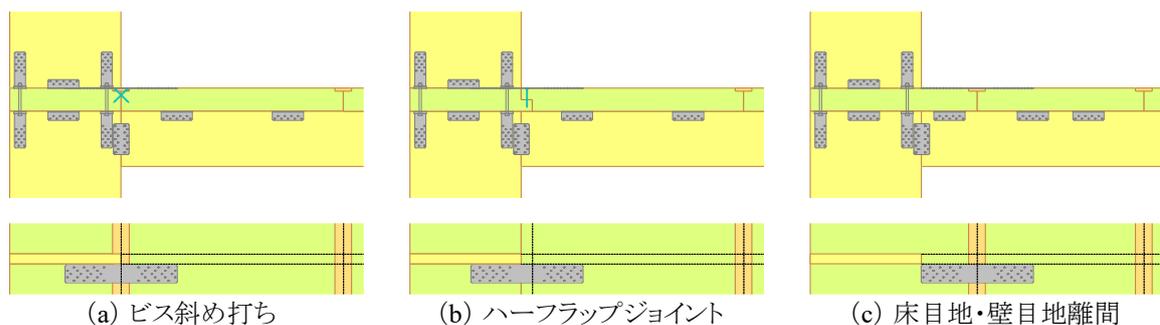


図 9.3 垂壁端部の跳ね上げ防止策の例(図 5.4.4 再掲)

- 架構のスパン数が多いほど許容水平耐力の増加率が大きくなることが確認された。ルート1相当における許容水平耐力・上限重量の設定にはスパン数をパラメータに加えることが許容水平耐力増加に対して有効である。
- ルート1相当の許容水平耐力・上限重量に関するパラメトリックスタディにおいて、上記の他に壁幅・開口幅・階高の範囲、壁パネル連続配置・上階セットバック等の壁配置バリエーションなどを考慮したパラメータを拡充し、その結果に基づいて許容水平耐力・上限重量の定式化を行うことでルート1相当の耐震基準案が整備される。
- 最終的には許容水平耐力・上限重量はひとつの検定条件にまとめられると考えられる。
- ルート3相当の耐震基準案については、上記のパラメトリックスタディの結果等に基づいて不倒壊判定方法の精度を確認し、壁配置バリエーション等への対応性に関するケーススタディ等を行うことで内容を確定できると考えられる。
- ただし、保有水平耐力検定を不倒壊判定に置き換えることは現行ルート3と成り立ちが異なるので、最終的には D_s 値に集約する必要があるかもしれない。例えば、不倒壊判定を満足することを条件として $D_s = 0.3$ とするなど。
- 大変形対応の壁－基礎せん断接合部(下図)の終局断耐力について、本年時の実験では壁パネルの浮き上がりが生じて本来の性能が確認できなかった。今後、定軸力下水平加力実験等により確認する必要がある。

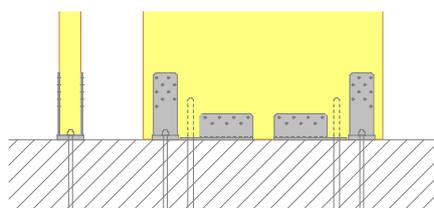


図 9.4 大変形時対応せん断接合部

9.2.2 中層建築物の耐震基準案について

- 中層建築物では低層建築物に比べて倒壊限界が大きいいため、倒壊限界を考慮した耐震基準立案による許容水平耐力増加・必要壁量減少の効果は低層建築物より大きいと考えられる。
- 本来、高強度・高剛性のCLTパネルは中層建築物に対する適性が高いので、この点に関する検討を深める意義は大きい。
- ただし、高耐力化・コンパクト化を目的とした接合部の標準化が必要である。それを踏まえて垂壁－壁接合部の面内曲げ性能と安定化策について検討する必要がある。
- また、層数が多いことにより、非構造部材の損傷・脱落等防止条件(最大層間変形角)を低層建築物より厳しくする必要があるとの指摘もあり、今後、耐震性能把握と並行して検討する必要がある。

9.2.3 接合部仕様の簡易化について

- 2022年度事業の検討では、壁上下端の引張接合部が無い状態では倒壊頻度がむしろ減少することが確認されている。
- その後、垂壁・腰壁端部の曲げ性能が更新されているが、その状態においても同様の傾向となる可能性がある。
- 前述のルート1相当耐震基準案パラメトリックスタディにおいて引張接合部性能をパラメータに加えることで、同接合部の簡易化あるいは省略が実現する可能性がある。