

## 第5章 まとめと今後の課題

## 5.1 検討結果概要

現時点では、CLT パネル工法建築物の地震動による倒壊限界は不明であることにより、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・面内耐力が高いことにより鉛直荷重による押え込み効果が大きく、他の構造方法に比べて倒壊限界変位は大きいと考えられる。したがって、CLT パネル工法建築物の地震動による倒壊限界および倒壊防止条件が明らかになれば、耐震基準の合理化(緩和)、接合部の簡易化などが可能になると期待できる。

このような背景を踏まえ、本事業では、3年計画の2年目として、水平加力倒壊実験およびその結果に基づく倒壊応答解析などが実施され、それらの結果に基づいて耐震基準緩和の内容が検討された。本報告書2～4章における検討結果概要を以下に示す。なお、1年目の検討は「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「昨年度事業」)として実施されている。

## 第2章 実大2層試験体の水平加力倒壊実験

昨年度事業で実施した振動台実験に用いた試験体と同仕様の試験体 W1、および新たに設定した試験体 A10N、A10K の3体を対象として、倒壊とみなし得る大変形を与えることを目的とした水平加力実験を実施した。いずれも2層であり、W1の水平構面はCLT パネル(Mx60-7-7, 210mm 厚)であるのに対して、A10N、A10Kの水平構面は、CLT パネル工法建築物の床版として面外性能が最も低いと考えられる床組としている。また、W1、A10Nでは腰壁が存在しないのに対してA10Kは2層部に腰壁を設けている。

実験結果として、W1 および A10K は1層部に水平変形が集中し、壁パネルのロッキング変位により対角2点のみが基礎(架台)・床版に接する状態となり、対角2点を中心とした面外回転変位、およびW1では壁パネル上部隅角部の圧壊が生じて水平耐力が低下した。A10Nは1, 2層の壁パネルが連層耐震壁に近い挙動を示し、W1 および A10K のような壁パネルの面外変位は生じず、水平変位の増加に伴う $P\cdot\delta$ 効果により水平耐力が低下した。また、W1の屋根・床CLT パネルには壁パネルのめり込みが生じたが、それ以外の損傷は認められなかった。A10N、A10Kの床組を構成する集成材梁(90×210mm)は壁パネルのロッキング変位に伴い1層の層間変形角が1/15rad程度に達した時点で曲げによる折損が生じたが、加力終了時まで破断(分離)は生じなかった。

本実験で確認された1層の最大層間変位はいずれの試験体も800mm前後であり、対応する等価1自由度系の代表変位 $\Delta$ は、W1で1.0m程度、A10Nで1.1m程度、A10Kで0.8m程度であった。いずれの試験体についても等価1自由度系の加速度 $A$ -代表変位 $\Delta$ 関係は既往の震度7級実地震動の $S_a$ - $S_d$ 関係(減衰定数0.1)と交点を持つことが確認され、震度7級実地震動によって倒壊には至らないものと推測された。

## 第3章 実大2層試験体に対応する倒壊解析

陽解法に基づく倒壊応答解析プログラム「wallstat」を用いて、昨年度事業による振動台実験および本事業による水平加力倒壊実験に対応する倒壊応答解析を行い、実験結果に対する解析結果の適合性を検討した。続いて、試験体 W1、A10N、A10K を最大5層まで多層化した解析モデル(以下それぞれ「W1 モデル」、「A10N モデル」、「A10K モデル」)を用い、震度7級実地震動を入力としたパラメトリックスタディを実施した。そこでは、平28国交告第611号第十に規定されるルート1における許容水平耐力を0.2で除したものをルート1限界重量とし、解析モデルの総重量をその $A_w$ 倍とした。 $A_w$ は1.0～2.0の範囲で0.2刻みとした。

結果として、W1モデルでは層数2～5のいずれも、 $A_w = 2.0$ としても倒壊に至ることは稀であることが確認された。A10Nモデルでは層数2～5のいずれも、 $A_w \leq 1.6$ の範囲では倒壊に至ることは稀であることが確認された。A10Kモデルでは、層数2では $A_w = 2.0$ としても倒壊に至らず、層数3以上の場合は腰壁の無い1層の層崩壊により $A_w = 1.2$ で倒壊に至る場合があることが確認された。

## 第4章 倒壊限界に関する解析パラメトリックスタディ

陰解法に基づく倒壊応答解析プログラム「CRAWS」を用い、A10Nと同様の仕様による1スパン多層架構を対象として、接合部をルート1仕様とし、層数(2~4)、壁幅(1.0, 1.5, 2.0m)、開口幅(1.0, 3.0m)および $A_w$ をパラメータとしたパラメトリックスタディを実施した。入力は震度7級実地震動である。結果として、層数2の場合は、壁幅1.0mで $A_w \leq 1.2$ 、壁幅1.5mで $A_w \leq 1.6$ 、壁幅2.0mで $A_w \leq 2.0$ の範囲では倒壊に至ることは稀であること、層数3以上の場合はいずれの壁幅についても $A_w \leq 2.0$ の範囲では倒壊に至ることは稀であることが確認された。また、層数2, 3について、引張接合部の耐力・変形能力を1/3に縮小した低減仕様として同様のパラメトリックスタディを実施したところ、震度7級実地震動による倒壊を防止するための $A_w$ の上限値は上記より大きくなることが確認された。

続いて、水平抵抗要素をアンカーボルトの引張耐力、垂壁一壁接合部の曲げ耐力および壁傾斜復元力のみとした簡易モデルを設定して、対応する等価1自由度系の $A$ - $\Delta$ 関係を算出し、上記の解析結果と比較した。その結果として、水平耐力が0となるときの $\Delta$ ( $\Delta_0$ とする)は、層数2では壁幅の増加によってほとんど増加しないこと、層数3以上では逆に壁幅の増加に伴い減少することが確認された。また、層数の増加によって $\Delta_0$ は増加することが確認された。なお、壁幅の増加が $\Delta_0$ の増加にほとんど寄与しないことは、上述の解析パラメトリックスタディの結果と整合しないが、その理由として、応答解析では壁幅が大きい場合に2次以上の振動モード成分が増加し、1次の振動モード成分が減少することにより最大応答変位が抑制される可能性が指摘された。

そのほか、本章のパラメトリックスタディにおける壁幅1.0m、開口幅3.0mのモデルの耐震性能は第3章のA10Nモデルとほぼ等しいと考えられるが、倒壊防止条件としての $A_w$ の上限値は必ずしも整合していない。その原因は主に接合部の応力-変位関係の相違にあり、今後の調整により不整合は解消されると考えられる。

### 5.2 耐震基準緩和の内容について

本事業により、震度7級地震動に対する主要な倒壊防止条件として、ルート1上限重量に対する建物総重量の倍率 $A_w$ の上限値を規定することが提案された。今後、層数、壁幅、開口幅、壁CLT・接合部仕様などに応じた $A_w$ を整備することを前提として、次のような設計クライテリアを仮定する。

- 中(基準法稀)地震時

$$Q_e \leq Q_{ap} \quad (\text{弾性限界以下})$$

ここで、 $Q_e$  : 中地震時層せん断

$Q_{ap}$  :  $A$ - $\Delta$ 関係比例限界層せん断力

層間変形角  $\leq 1/120$ (150)

$$R_e \leq 0.15, R_s \geq 0.6$$

※注記

-  $Q_{ap}$ を求めるためには増分解析が必要。値は小さくなるが弾性検定OKの層せん断力も可。

- 大(基準法極稀)地震時

極大(震度7級)地震時検定を満足することを条件として検定省略。

- 極大(震度7級)地震時

$$W \leq A_w \cdot W_1 \quad (\text{倒壊限界以下})$$

ここで、 $W$  : 建物総重量

$W_1$  : ルート1上限重量

また、 $A_w$ の導出条件を考慮して下記の付則を設ける。

- 架構形式

小幅パネル架構、耐力壁連層配置、腰壁は非CLT

層数6以下

- 接合部

$A_w$ 算定の前提とした接合部性能以上

関連して下記の点について今後の確認が必要である。

- 接合部を低減仕様とした方が $A_w$ は大きい。上限性能(下限性能ではなく)を規定する必要もあり得る。層数3程度以下では引張接合部の軽減化も可能性あり。
- せん断接合部の破断防止規定が必要(実態性能として)
- 特に層数4以上の場合に壁厚・接合部耐力増加に対する $A_w$ 整備が必要。

以上の耐震基準はルート1~2に相当する。将来的には、付則(仕様規定)緩和のためにルート3相当の耐震基準も必要と考えられる。そのためには付則(仕様規定)を外れる建築物の倒壊防止条件を明らかにする必要がある。

### 5.3 今後の課題

本年度上は3年計画の2年目として実施された。3年目(最終年度)は、低層建築物の倒壊限界を考慮した耐震基準緩和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を目的とする。それに向け、1,2年目の成果を踏まえて、今後の課題を以下のように挙げる。

#### (1) 垂壁－壁接合部の曲げ抵抗性能の確認と拡充

本年度事業により、垂壁－壁接合部は層間変形角が $1/4\sim 1/3\text{rad}$ 程度に達するまで曲げ耐力を保持し、架構の倒壊限界変位の増大に寄与していることが確認された。ただし、垂壁－壁接合部の曲げ耐力－変形角関係は水平加力倒壊実験結果に基づいて推定されており、対象とした試験体数が限定的である。また、水平加力倒壊実験では大変形領域はほぼ一方向加力となっている。これを考慮して下記の課題を挙げる。

- 床組梁の折損後の繰り返し変形に対する性能確認、試験体数の拡充
- 接合部仕様の拡充 — CLT床パネルの場合

また、上記の結果に基づいて垂壁－壁接合部の曲げ耐力－変形角関係を更新し、必要に応じて地震倒壊解析パラメトリックスタディおよび倒壊限界、倒壊防止条件を再度検討する。

#### (2) CLT壁パネルの先行破壊防止条件

本年度の地震倒壊解析パラメトリックスタディではCLT壁パネル自体の破壊への考慮が不十分である。この点に関し、本年度の地震倒壊解析パラメトリックスタディ結果に対して、CLT壁パネルの終局耐力検定(CLTMニユアル、実強度)、鉛直支持力保持限界変形角(令和3年度事業)検定を行い、必要に応じて倒壊限界、倒壊防止条件を更新する必要がある。

#### (3) 中地震に対する損傷防止を考慮した耐震基準緩和案の検討

低層建築物の倒壊限界を考慮した耐震基準緩和案の提案に向け、ルート1を対象として、5.2節に示す設計クライテリアに準じ、中地震に対する損傷防止を考慮した耐震基準緩和案を検討する。その結果は、許容水平耐力の見直し(増加)および引張接合部の簡易化などに集約されると予想される。

#### (4) 倒壊防止条件検証のための振動台実験

本年度の検討により、層数、壁幅が大きい場合および引張接合部耐力が小さい場合に、地震応答の高次モード成分が増加することが倒壊防止に有利となる可能性が指摘された。この点を含め、耐震基準緩和案の妥当性検証を目的として2~3層架構の振動台実験を実施する。

## (5) 中高層建築物の耐震基準合理化に向けた課題の整理

本年度事業では、4, 5 層架構についても地震倒壊解析パラメトリックスタディを試行し、その結果として、3 層以下の架構と比べて倒壊の可能性がむしろ減少することが確認された。したがって、中高層架構についても倒壊限界を考慮した耐震基準緩和が可能と考えられる。今後、中高層建築物の耐震基準緩和案の提案に向けた課題を整理する。現時点で想定される課題として次のものがある。

- 接合部の応力-変形性能情報の拡充(破断・破壊に至る大変形領域まで)
  - 壁上下端引張接合部 — ボルトの太径化(M20, M24, M27 など)
  - 垂壁-壁接合部 — CLT 壁パネルの高耐力化(5 層 5 プライ、7 層 7 プライ、5 層 7 プライなど)
- 中高層架構の地震倒壊解析パラメトリックスタディ
- 倒壊限界の確認・倒壊防止条件の策定
- ルート 3 相当の耐震基準案の策定

## (6) その他

- せん断接合部の先行破壊防止条件
  - 1 階壁脚せん断接合部については、本年度実施した水平加力倒壊実験の試験体に採用した仕様であれば、先行破壊は生じていない。1 階壁頭より上のせん断接合部については、同試験体ではルート 1 相当のクロスマーク金物を用いたが、こちらも先行破壊が生じていない。ただし、壁幅の増加、壁パネルの高耐力化に対応するための仕様は今後の検討が必要である。
- 実架構に対応した地震倒壊解析パラメトリックスタディの拡充
  - 下記のようなパラメータに対する倒壊限界の依存性を確認する必要がある。
    - 引張接合部の耐力・変形能力が大きい場合
    - 壁幅が混在する場合
    - 多スパン架構、セットバック架構、腰壁架構、他