

## 第8章 まとめと今後の課題

## 8.1 検討結果の要約

本事業で実施した検討結果は次のように要約できる。

### 第2章 CLT 壁パネル定軸力下水平加力実験

- 曲げ破壊型として幅 1m(S60-5-5, 150mm 厚)、せん断破壊型として幅 1.5, 2.0m(S60-3-3, 90mm 厚)の壁パネル単体の定軸力下水平加力実験により、鉛直耐力(鉛直荷重支持能力)を含む耐力保持限界を確認した。

#### ◆曲げ破壊型試験体

- 曲げ破壊型試験体は、引張接合部を引きボルト接合とした試験体では座金孔周辺に、鋼板挿入ドリフトピン接合とした試験体では最上部ドリフトピン孔周辺に圧壊および亀裂が生じ、その後、水平変位の増加にともなってそれらの部分の破壊が進展して、水平耐力、鉛直耐力の順に低下した。
- 水平耐力保持限界変形角 $\theta_{u,h}$ および鉛直耐力保持限界変形角 $\theta_{u,v}$ は上述の断面欠損部の弾性検定比 $\gamma_e$ と相関が認められ、それらを $\gamma_e$ の関数として定式化した。本実験によって確認された $\theta_{u,h}$ は 30～120 程度、 $\theta_{u,v}$ は 40～170 程度(いずれも $\times 1/1000\text{rad}$ )であった。なお、 $\theta_{u,v}$ の最大値は試験装置の加力限界によって決まっており、実際にはさらに大きいと考えられる。
- また、 $\gamma_e \leq 1.0$ を満足する試験体については、従来の耐震設計において考慮する変形範囲では壁パネルの破壊は生じず、 $\theta_{u,h} \geq 60$ 程度、 $\theta_{u,v} \geq 120$ 程度(いずれも $\times 1/1000\text{rad}$ )であった。

#### ◆せん断破壊型試験体

- せん断破壊型試験体は、いずれも面内せん断破壊によるラミナ分離が生じて水平耐力が低下し、その後、水平変位の増加にともなってラミナに圧縮座屈が生じて鉛直耐力が低下した。
- 終局水平耐力時の平均せん断応力度は基準強度にほぼ一致していた。
- 最終的な破壊形式がラミナの圧縮座屈であることを考慮して、平均圧縮応力度 $\sigma_c$ と水平耐力保持限界変形角 $\theta_{u,h}$ および鉛直耐力保持限界変形角 $\theta_{u,v}$ の相関を確認した。
- $\theta_{u,h}$ は $\sigma_c$ との相関が認められず、8( $\times 1/1000\text{rad}$ )程度以上であった。
- $\theta_{u,v}$ は $\sigma_c$ との相関が認められ、それらを $\sigma_c$ の関数として定式化した。本実験によって確認された $\theta_{u,v}$ は 30～100( $\times 1/1000\text{rad}$ )程度であった。

### 第3章 垂壁－壁接合部鉛直せん断実験

- 垂壁－壁接合部鉛直せん断接合部について、水平変形(相対回転角 $\theta_r$ )に伴うせん断耐力の変化(低下)を確認した。
- $\theta_r$ が 1/15rad まではせん断耐力の低下は緩やかであり、 $\theta_r = 0$ の試験体に対して 90%程度の耐力を保持していたが、 $\theta_r$ を 1/7.5rad とした試験体ではせん断耐力をほぼ喪失していた。
- その中間の $\theta_r$ におけるせん断耐力は未確認であり、せん断耐力保持限界に相当する $\theta_r$ は 1/15rad より大きい可能性は否定できない。

### 第4章 壁脚接合部水平せん断実験

- 壁脚水平せん断接合部について、水平変形(相対回転角 $\theta_r$ )に伴うせん断耐力の変化(低下)を確認した。
- $\theta_r$ が 1/15rad まではせん断耐力の低下は緩やかであり、 $\theta_r = 0$ の試験体に対して 85%程度の耐力を保持していたが、 $\theta_r$ を 1/7.5rad とした試験体のせん断耐力は $\theta_r = 0$ の試験体に対して 30%程度であった。
- ただし 3 章と同様に、その中間の $\theta_r$ におけるせん断耐力は未確認であり、せん断耐力保持限界に相

当する $\theta_r$ は 1/15rad より大きい可能性は否定できない。

## 第5章 CLT 壁パネル部分圧縮試験

- 2～4 章の試験体に用いた CLT パネルと同一マザーボードから採取した試験片の部分圧縮実験を行った。
- 最大加圧(支圧強度)は S60-3-3 のパネルで 29～33(N/mm<sup>2</sup>)程度、S60-5-5 のパネルで 24～27(N/mm<sup>2</sup>)程度であった。
- S60-5-5 の試験片については高さを 200, 400, 600(mm)の 3 種類とし、それらの見かけの弾性剛性に基づいて推定した加圧面の弾性剛性(支圧剛性)は 135(N/mm<sup>3</sup>)であり、マニュアル<sup>8.1.1)</sup>に記載される値(15.6 N/mm<sup>3</sup>)の 8.7 倍程度であった。

## 第6章 実大 2 層試験体の振動台倒壊実験

- 小幅パネル架構による鉛直構面を有する 2 層試験体を用いた振動台実験を行い、倒壊ないしは倒壊とみなせる状態に至るまでの水平耐力・変形状態・損傷状態等の過程を確認した。なお、試験体は壁パネル幅を 1m としたもの(W1)と 2m としたもの(W2)の 2 種類とした。
- 試験体 W2 は、JMA 神戸(1995)NS 成分を 160%に増幅した入力により、1 層壁パネル脚部の水平変位を拘束するストッパーが壁パネル脚部を破壊し、1 層の層間変位が 450mm(1/6.4rad)程度に達したが、倒壊には至らず、その状態で最大水平耐力の 60%程度の水平耐力を保持していた。また、それ以前の加振により 1 層壁パネル脚部引張接合部(アンカーボルト)はすでに破断していたが、加振終了後に試験体はほぼ元の位置に復帰した。
- 試験体 W1 は、大阪ガス葺合(1995)NS 成分を 120%に増幅した入力により、1 層の層間変位が 620mm(1/4.7rad)程度に達したが、倒壊には至らず、試験体 W2 と同様にその状態で最大水平耐力の 60%程度の水平耐力を保持していた。また、加振終了後に試験体はほぼ元の位置に復帰した。
- 実験後に行った倒壊解析(事後解析)により、接合部の応力変形性能等を適切に調整すれば、解析結果が上述の実験結果に概ね適合することが確認された。

## 第7章 階数に応じた倒壊限界の予想

- 5 層の小幅パネル架構を対象とした解析の結果として、壁パネルが 2 章で得られた鉛直耐力保持限界に達し、壁パネルの破壊に伴う鉛直耐力喪失による倒壊が生じる可能性が確認された。

### 8.2 倒壊解析手法の構築・検証

6 章で実施した事後解析により CLT パネル工法建築物の地震倒壊過程追跡の可能性が確認された。

### 8.3 耐震基準緩和の方向性

6 章における振動台実験、およびそれに対応する倒壊解析の結果として、これまでに記録された最大級の地震動に対しても CLT パネル工法建築物は倒壊限界に至らない可能性が確認された。ただし、この知見は限定的な試験体を対象として得られたものであり、それを任意の CLT パネル工法建築物に適用するためには一定の条件が必要と考えられる。それが明らかとなって、CLT パネル工法建築物の倒壊限界の予測が可能になれば、下記の A が評価可能となり、 $A \leq B$  であれば許容応力度計算のみを満足す

<sup>8.1.1)</sup> 日本住宅・木材技術センター:2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル, 2021 年構造・材料増補版, 令和 3 年 11 月

れば良いことになる。

A 震度 7 級の極大地震による応答を倒壊限界以下とするための壁量・接合部仕様等

B 中地震時の応力・変形を許容値以下とするための壁量・接合部仕様等

現時点で  $A \leq B$  とするための条件を明らかにすることはできないが、例えば次のものが挙げられる。

- 架構形式(小幅パネル架構、大版パネル架構、その他)
- 階数の上限
- アスペクト比(塔状比)の上限
- 壁幅の上下限
- 壁パネル破壊の防止
- 壁パネル水平せん断接合部破壊の防止

また、振動台実験における最大加振の段階では、すでに壁パネル下端の引張接合部は破断していた。すなわち、引張接合部は倒壊限界の大小に寄与していない。したがって、引張接合部は中地震に対する許容応力度計算のみを満足することを検定条件とできる可能性が高いと言える。

#### 8.4 今後の課題

CLT パネル工法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て、優先度の高い課題として「倒壊限界予測手法の構築・適用条件の明確化」が挙げられる。そのためには倒壊解析手法の拡充・高精度化が必須であり、当面の課題として下記の検討を継続する必要があると考えられる。

実大実験結果への適合性確保

解析モデルの改良

静的実大実験(本年度振動台実験試験体について)

実際の倒壊限界

部材・接合部の詳細な応力・変形

— いずれも振動台実験では確認が困難

実大実験結果の拡充

立体的試験体 — 実建物に近いもの／直交壁効果

面外最弱の水平構面(床組) — 水平構面の面外性能を評価パラメータから排除

壁パネルの限界性能

データ拡充 — 現在の知見は限定的／当面低層建築物に限定するとしても必要

接合部の限界性能

破壊に至る応力変形関係データ拡充

複数要因の相互作用 — 軸力・曲げ・せん断の応力・変形／直交 2 方向の応力・変形

パネル回転角追従性の高いせん断接合部 — 特に壁脚部