

1. 研究の背景と目的

本研究は、鉄骨架構に耐震要素として挿入された CLT の構造設計手法に関する研究である。2016 年に CLT (Cross Laminated Timber) に関する関連告示が施行されて以来、設計に関するマニュアルも整備され CLT を用いた建築物が普及しつつある。CLT を用いた構造システムとしては CLT のみで構成される CLT パネル工法や、従来の木造軸組工法における耐力壁や床として部分的に CLT を併用する方法などマニュアルに整備された方法が主流となっており、主として 3 階建て程度までの低層建物に適用されている。

このような中、筆者らは大規模、高層建築物への CLT の利用を拡大するべく、Fig.1 に示すように、CLT を耐震要素として鉄骨架構に挿入した構造システムを提案しその実用化に向けて取り組んできた。従来の様に木質架構に CLT を耐震要素として用いる場合や CLT パネルのみで構造を組んだ場合、CLT が負担する水平力に対して周辺の木造架構が先行破壊し、CLT が有する耐力を十分に発揮できないことから、高層建築物への適用には難がある。また、CLT パネル工法や在来軸組工法との組み合わせによる構造システムでは高層建築物に必要な高軸力の支持や大スパン架構を、経済性を含めて合理的に達成することが困難である。更に、建築物に対して区域や規模に応じて 1 時間～3 時間の耐火性能を確保することが建築基準法で規定されており、木質構造部材を安易に耐火被覆すると木を空間に表現したいという意匠面での要求と相反するだけでなく、耐火被覆に施工手間とコストがかかる問題があり、木質構造の耐火性能の確保には多面的な課題が含まれる。

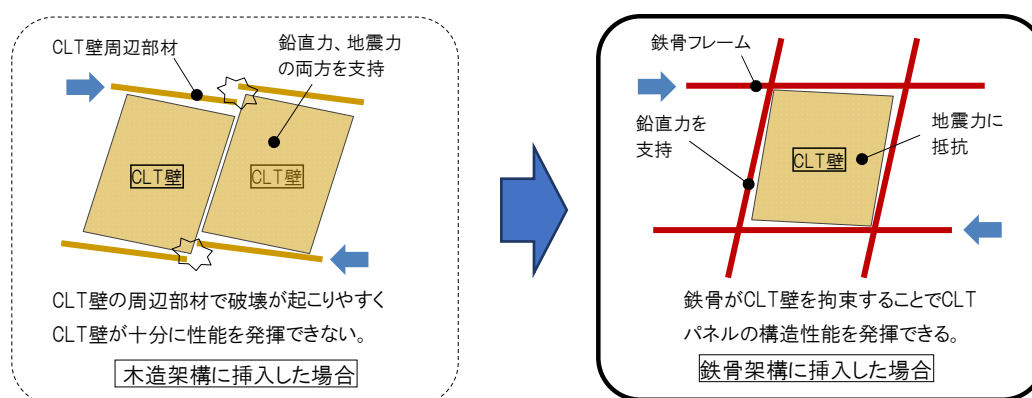


Fig. 1 鉄骨架構に挿入された CLT

そこで、CLT の周辺架構を鉄骨造とし周辺フレームの部材耐力を確保することで CLT が本来保有する水平耐力を発揮させることができれば、高耐力を必要とする高層建築物への CLT の活用が可能であると考えた。更に CLT パネルを耐震要素として特化し耐火被覆を無くすことで、意匠性、施工性、経済性の向上を目指した。

2. 初期の設計事例と抽出された課題

以上の様な背景のもと、筆者らは 5 階建ての鉄骨造に CLT を耐震要素として配置し、従来から用いられている引きボルトとドリフトピンによるせん断接合を用いた構造設計を実施して 2019 年に竣工に至った。この設計事例において、CLT 耐震パネルを鉄骨架構に組み込むことにより CLT の構造性能を効率よく発揮させることが可能であることを示した。また、保有水平耐力計算までを含めた一連の構造設計手法を提示し、耐火性能まで含めた本構造システムの有用性を確認した。

一方で、以下のような課題も明らかとなった。

1) 構造特性係数 D_s 値の合理性について

本構造設計を実施した時点では、構造実験による破壊性状や構造性能に関する知見が不足しており、構造特性係数 D_s 値に対する合理的な根拠がなく、脆性的な破壊を呈する RC 造の $D_s=0.55$ よりも高い値となり、設計上の合理性を欠く結果となった。

2) 引きボルトの水平耐力への寄与率について

接合要素として用いた引きボルトは角孔周囲のせん断破壊や引張破壊を避けるため大きな引張降伏耐力を確保することができないことから、CLT 耐震パネルが発揮する水平耐力への寄与が低く、角孔が CLT 加工上の上手となり美観上の欠点ともなった。

3) 応力解析モデルの煩雑さについて

構造設計に用いた応力解析モデルは、CLT 耐震パネルの接合要素を全てバネでモデル化するため、煩雑で設計実務上多大な労力を要する上、構造実験との比較によるモデル化の妥当性の検証も不十分であった。

本研究では、このパイロットプロジェクトにおける構造設計で得られた成果と課題が開始点となり、CLT 耐震パネルと鉄骨架構の新たな接合形式を提案するとともに、構造性能評価手法、応力解析手法の提案へと展開することとなった。

3. 新たな接合形式による構造システム

先の設計例では、鉄骨造と CLT 耐震パネル（以下、「CLT」と略す）の接合として引きボルトを採用した設計事例を示したが、引きボルトの角孔の端あき部での破壊が生じやすく、その耐力が設計上支配的で引きボルトが発揮できる引張力が頭打ちとなり、引きボルトの水平耐力への寄与が薄いことが判った。また、応力解析においては、引きボルトや CLT 支圧部などの接合要素を全てバネ要素でモデル化する必要があり、応力解析モデルが煩雑で設計実務上多大な労力を要する。その上に、そもそも CLT を鉄骨架構に挿入した場合の実験データがほとんど無く、応力解析における実験結果の再現性が十分に検証された研究資料も現状では存在していない。

これらの課題を受けて、筆者らは CLT の接合部の簡易化と CLT の水平耐力確保の両立、及び簡便でかつ実挙動との適合性が高い応力解析手法の構築を目指し、引きボルトがない接合方法を用いた前例のない構造システムを新たに考案した。

3.1 架構実験の概要

この構造システムに対して、まずは架構実験を実施し実験データを得ることとした。CLT の破壊性状や CLT が発揮する剛性と耐力、及び繰り返し加力による履歴特性を明らかにするため、CLT の配置枚数をパラメータとした第 1 シリーズと、CLT のアスペクト比及び鉄骨の梁断面を変化させた第 2 シリーズの架構実験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・ 鉄骨架構に CLT を挿入することで、全ての試験体の CLT で支圧破壊、又はせん断破壊に至り CLT が保有する最大耐力を発揮させることができた。また、鉄骨架構のみの場合に比べて水平剛性で最大 3.48 倍、水平耐力で最大 2.67 倍まで増大し、耐震要素としての有用性が確認された。
- ・ CLT はいずれもスリップ型に近い復元力特性を示し、CLT にせん断破壊が発生する場合、層間変形角が $1/71\text{rad}$ 以上で生じた。また、支圧破壊が卓越する場合は、最大耐力後の耐力低下が少なく変形性能に優れる結果となった。
- ・ CLT 単体での等価減衰定数 h_{eq} は、せん断破壊を生じる場合で $h_{eq} = 0.08 \sim 0.14$ となったが、せん断破壊を生じなかった試験体では $h_{eq} = 0.07$ 程度が上限となりせん断破壊を生じた試験体よりも小さくなった。
- ・ CLT の破壊モードは CLT のアスペクト比 (H/L) に影響し、(H/L) が小さい場合にせん断破壊を生じやすい傾向にある。ただし、本構造システムにおいては、せん断破壊を生じるときの CLT のせん断強度、せん断弾性係数は、材料試験結果に対して 7 割程度低下する結果となった。その要因となる CLT 内部のせん断抵抗機構の解明については、今後の課題である。
- ・ CLT の層間変形をせん断変形、接合面のずれ変位、CLT の回転変形の変形成分に分離

したところ、回転による変形成分が最も大きく、幅が小さくなる (H/L が大きくなる) ほど、接合面のずれ変位とせん断変形の割合が低下し、回転変形の比率が支配的となる。このことから、回転変形に関わる支圧部の挙動が全体の構造性能に影響を及ぼすことが確認された。

以上の様に、本構造システムの設計手法、応力解析手法の構築に向けて、基本的な構造特性を明らかにしたとともに、解析的な検討を実施する上で有用な実験データを獲得することができた。

3.2 構造設計手法の構築

次に、CLT の剛性、耐力、破壊性状に影響を及ぼすと考えらえる支圧部での応力伝達に注目し、設計手法、応力解析手法の構築を目指した。

実験結果と併せて静的弾塑性解析を用いた検討を実施し、CLT 隅角部における支圧力の伝達について定量的に検証し、更に CLT の水平剛性評価手法と簡易な応力解析モデルの構築を行った。その結果、以下の知見を得た。

1) CLT 支圧部の耐力評価について

- ・上下を剛体により拘束された CLT に水平力が作用した場合の応力伝達をモデル化し、CLT 支圧部の支圧領域幅と、水平剛性の理論的な計算方法を誘導した。
- ・CLT 支圧部の支圧剛性は圧縮ヤング係数と比例する傾向にあり、支圧剛性は圧縮ヤング係数の $1/290$ とする剛性計算式を提案した。
- ・この支圧剛性算定式を用いた静的弾塑性解析を実施したところ、実験結果と良好に適合した。
- ・解析結果から支圧バネの変形を詳細に検討したところ、鉄骨梁の変形により支圧変形の分布に曲率が生じ、直線的な分布と仮定した場合と比べて、本実験結果の範囲では支圧領域幅が平均で 80%程度に縮小することが明らかとなった。
- ・静的弾塑性解析を用いたパラメトリックスタディにより、鉄骨の梁剛性と CLT の回転剛性の比率と支圧領域幅との関係を検討し、理論計算値に対する支圧領域幅の低減係数算定式を導いた。
- ・以上の知見をもとに、CLT 支圧部の弾性限界時、終局時における耐力式を提案し実験結果と良く適合することを確認した。

2) CLT の剛性評価、及び解析モデルの構築について

- ・単純化された状態として、上下を剛体により拘束された CLT に水平力が作用した場合の応力伝達をモデル化し、CLT の隅角部の支圧部の変形、及び CLT 全体の軸変形に起因する固有水平剛性 K_H を導いた。

- ・ CLT の固有水平剛性 K_H 、せん断剛性 K_S 、接合部剛性 K_J を直列バネとして CLT の水平剛性 K を評価し、等価な水平剛性を有するブレース要素に置換した応力解析モデル（ブレースモデル）を提案した。
- ・ ブレース要素にバイリニア型の弾塑性特性を与えて静的弾塑性解析を実施した結果、初期剛性、CLT の荷重変形関係、鉄骨架構の応力状態が良好に再現され、ブレースモデルの有用性を確認した。

3) 構造特性係数 D_s 値について

- ・ 破壊モードに関わらず CLT のみを取り出した場合の D_s 値は 0.3~0.5 となり全試験体の平均値で約 0.35 となった。
- ・ CLT の負担水平力比 β と D_s 値との関係は明確ではないが、建築基準法との関係では筋交いとしての C ランクと評価することですべての実験結果を包含する結果となった。

以上のように、CLT と鉄骨梁接合面間における支圧力の伝達について耐力評価方法、CLT の固有水平剛性 K_H による水平剛性評価方法、及び CLT をブレース要素に置換した応力解析モデルを提案することができ、本構造システムの汎用性の高い構造設計手法として活用されることが期待される。

一方で、CLT パネルに圧縮ストラットが発生することでせん断抵抗が発揮されたときの CLT 面内の応力度の状態やメカニズムについては不明点が多く、圧縮ストラットに対する CLT の任意方向のヤング係数も明らかでない。今後、これらの点を明らかにすることで、より汎用性、普遍性の高い構造性能評価が可能だと期待している。

また、超高層建築物等に適用する場合、時刻歴応答解析による耐震性能評価が必要となるが、鉄骨造に挿入された CLT の履歴特性のモデル化や、破壊モードに応じた限界変形の定量化については課題であり、今後の研究発展につなげていく。

以上