

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22001

研究課題名（和文）都市木造建築を実現するCLTパネルの高強度・高剛性接合法の開発と構造設計法

研究課題名（英文）Development of Joint of CLT Panels with High Strength and Stiffness and Structural Design for Urban Timber Buildings

研究代表者

前田 匡樹（Maeda, Masaki）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：30262413

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、仙台などの大都市の中心市街地に多く見られる3階建～10階建程度の集合住宅、オフィスビル、商業施設、学校などの中層建築を木造化する工法の開発するため、(1)標準ユニット構法によるCLT中層建築の可能性の検討、(2)これに適用する接合部などのディテールの検討、(3)構造設計実務に用いるための一軸曲げばねモデルによる構造解析法の提案を行った。さらに、これら(1)～(3)の成果を用いたCLT中高層建物の試設計を通して、提案した構造解析モデルの適用性を示すとともに、CLT標準ユニットを用いた普及型実現の可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CLTパネル工法は、高い強度と剛性を有する新しい木質系建築の工法であるが、設計・施工法が未だ十分に成熟していないこと、構造解析・設計法が極めて難しいことから普及が進まない現状にある。本研究の成果により、標準ユニット化、接合法の合理化、また、構造解析・設計法の簡略化により、RC造、鉄骨造に変わる構造として選択できる可能性が広がる。中高層建築を木造化することで、コンクリートや鋼材に変わり再生可能資源である木材の使用を促進することで低炭素社会の実現に貢献することも期待される。

研究成果の概要（英文）：Main purpose of this research was a development of middle-rise timber buildings such as 3-story to 10-story apartment buildings, office buildings, commercial facilities, schools, etc., which are often found in central urban areas of large cities such as Sendai. Research items and outcomes are (1) feasibility study of a CLT middle-rise apartment building using a standardized unit construction, (2) development and examination of joint details of CLT panels, and (3) proposal of an alternative structural analytical model using a uniaxial bending spring model for use in structural design practice. Furthermore, through a trial design of CLT mid-to-high-rise buildings using the results of (1) to (3), an applicability of the proposed structural analysis model was shown. Moreover, the possibility of proposed CLT standardized unit for promotion of timber construction was shown.

研究分野：耐震構造

キーワード：CLT（直交積層板） 接合部 都市木造建築 小幅パネル 低炭素社会

1. 研究開始当初の背景

近年、森林資源の有効活用という観点で都市木造建築が注目され、2010年には公共建築物等木材利用促進法が施行されるなど、中大規模の都市木造建築への関心が高まっている。そこで中高層木造建築に有効な木質部材として、CLT(Cross Laminated Timber)の利用拡大が進んでいる。しかし、CLTを用いた中高層木造建築の実現には、CLTパネル寸法や部材等が規格化されていないために、生産・加工コストが高いこと、設計用解析モデルが複雑で一般の構造設計者が用いるには難しいこと、などの課題があり、普及が進まない要因となっている。

2. 研究の目的

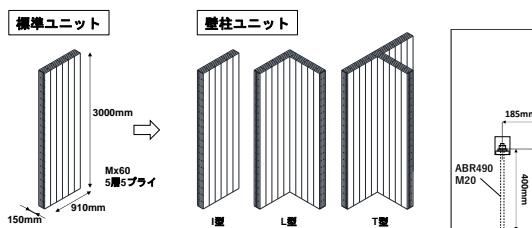
以上2つの課題から、本研究ではパネル寸法・部材の規格化標準ユニットによる設計の提案、及び、簡易で実用的な解析モデルの開発を行い、これらによる普及型CLT中層建築物の可能性の検討を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 標準ユニットによる設計の可能性

① CLTユニット工法の提案

CLTパネルの寸法等を規格化した標準ユニットを用いた構造部材としての壁柱ユニットと床パネルで建物を構成する工法を提案した。本研究では、図-1(a)のようにMx60-5層-5プライ(厚さ150mm)、幅910mm、高さ3000mmのCLTパネルを標準ユニットとし、I型、L型、T型の3つの壁柱ユニットを考える。引張接合部の詳細を図-1(b)に示す。各壁柱ユニット間は垂れ壁で架構を構成する。



(a)CLTパネルユニット (b) 引張接合部詳細

図-1 壁柱ユニット

② CLT標準ユニットの略設計例

標準ユニットの基準耐力について、パネル端接合部が降伏する時の平均せん断終局応力を $1\text{N}/\text{mm}^2$ と仮定して、必要保有水平耐力時のせん断力係数 $C=0.55$ に対して略算的に壁量計算を行った。その結果、図-2に示す平面を有する4層集合住宅が建設可能であることが分かった。

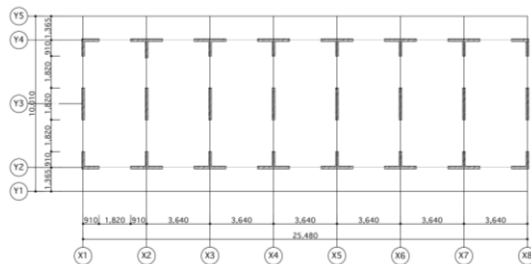


図-2 集合住宅平面図

③ 詳細解析による壁量計算妥当性の検証

上記②の平均せん断応力度に基づく壁量計算による設計の妥当性を弾塑性解析ソフトSNAP ver7を用いた詳細解析により検証した。なお、解析モデルはCLTを用いた建築物の設計施工マニュアル¹⁾(以下、CLTマニュアル)による解析モデルを用いた。静的増分解析から求めた地震層せん断力係数—層間変形角関係を図-3に示す。解析の結果、許容応力時(層間変形角 $1/120$)は、せん断力係数 $C=0.2$ を超えたが、終局時(層間変形角 $1/30$)は、1層2層において $C=0.55$ (構造特性係数 $D_s=0.55$)を下回り、CLTパネルの平均せん断応力度を過大に設定していたことが分かった。終局時の1層のせん断力から逆算的に平均せん断応力度を算出し安全側に考えると、本ユニットの設計では、 $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ として壁量計算を行うことが妥当であると分かった。

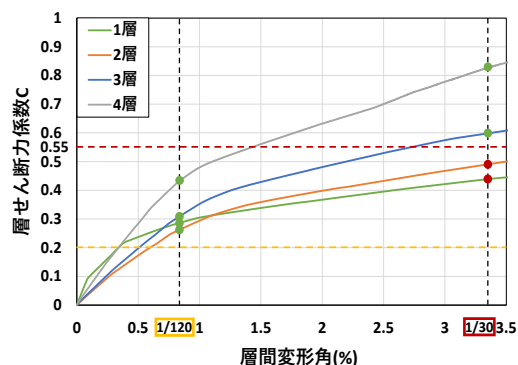
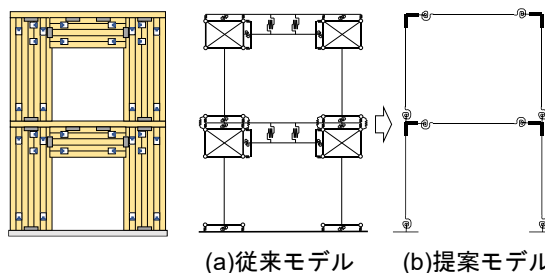


図-3 地震層せん断力—層間変形角関係



(a)従来モデル (b)提案モデル

図-4 設計用構造モデルの簡易化

(2) 簡易で実用的な解析モデルの開発

① 簡易化手法

図-4のように、CLT マニュアルによる現在の標準的構造モデル（以下、従来モデル）は接合部を個別に非線形バネ要素でモデル化する精緻であるが複雑なものであることから、一般的な実務の構造設計にはなじまない。そこで、鉄筋コンクリート造の構造モデルのように、弾性要素の線材と弾塑性を示す回転バネのみによる一軸曲げバネモデル（以下、提案モデル）でモデル化した。

CLT パネル工法では、図-5 で示すように地震力に対し CLT パネルをロッキング変形させ、引張接合部（引きボルト）の降伏とパネルのめり込みによる曲げ破壊を先行させるような設計となっているため、今回のモデルの簡易化においては、引張接合部に注目し、回転バネのみでの置換を行った。

回転バネの復元力特性（図-6）は、トリリニアモデルとし、第 1 折れ点の曲げモーメント M_y と回転角 θ_y は、接合部応力分布を平面保持の仮定に基づいて図-7 のように仮定し求めた。引張側ボルト降伏時の強度 M_{ty} と圧縮縁が許容圧縮応力度時の強度 M_{cy} の最小値を M_y とする（式(1)）。曲げモーメント M は式(2)より、引きボルトの引張力 T とパネルのめり込みの圧縮力 C から算出する。中立軸距離 x_n は、断面内の引張力と圧縮力及び軸力の釣り合いから算出し（式(3)）、その際 C 、 T は曲率分布から求めることとする。

$$M_y = \min(M_{ty}, M_{cy}) \quad (1)$$

$$M = T \times \left(\frac{D}{2} - d_c\right) + C \times \left(\frac{D}{2} - \frac{x_n}{3}\right) \quad (2)$$

$$C = N + T \quad (3)$$

また、回転角 θ_y は、引きボルトの伸び ΔL と中立軸距離 x_n から式(4)で算出する。

$$\theta_y = \frac{\Delta L}{d - x_n} = \frac{\varepsilon_t \times L_b + T/K_{CT}}{d - x_n} \quad (4)$$

第 2 折れ点の終局曲げモーメント M_u は、図-8 のように圧縮側を等価な四角形の応力ブロックに置換して考える。また回転角 θ_u は、引きボルト接合において塑性変形が木材のめり込み変形により生じる場合、二次勾配が一次勾配の 1/8 程度になる²⁾ことから、式(5)によって算出することとする。

$$\theta_u = \theta_y + \frac{(M_u - M_y)}{M_y/8\theta_y} \quad (5)$$

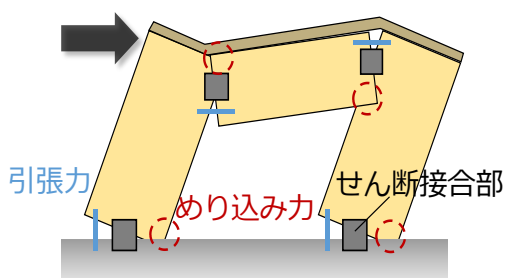


図-5 水平力に対する設計

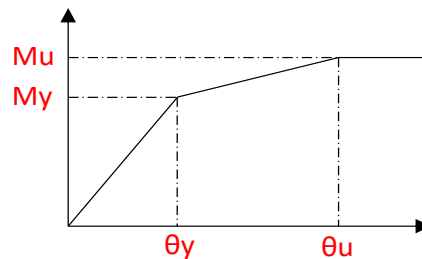
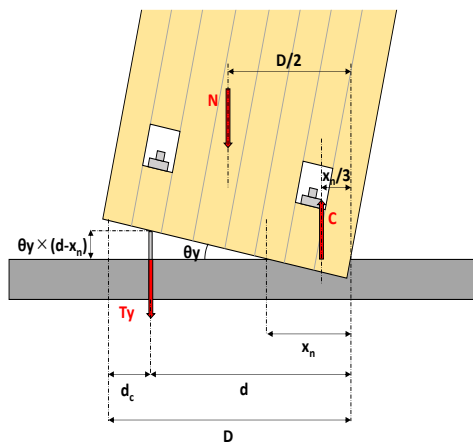
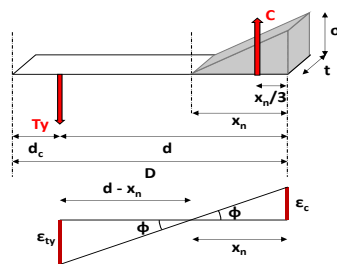


図-6 回転バネの特性

- σ_c : 壁パネル圧縮基準強度
- T_y : 引きボルト降伏強度
- x_n : 中立軸距離
- ε_{ty} : 引きボルトの降伏ひずみ
- L_b : 引きボルト長さ
- K_{CT} : 木材の面圧による剛性と木材の引張による剛性の直列和（マニュアル9.4.2.(1).3)



(a) 応力変形状態



(b)提案モデル

図-7 CLT パネル端接合部の応力変形(引張側降伏時)

上述の方法で、各パネル端接合部部分(壁-基礎、壁-床、壁-垂壁)において回転バネを作成する(図-4参照)。また、梁端部では、壁-床、壁-垂壁に2箇所接合部があるが、提案モデルではこの部分を一つのバネと換算している。

② 従来モデルとの比較

静的増分解析を行い、提案モデルと従来モデルを比較した。片持ち壁1枚、1層1スパン(床なし)、1層1スパン(床あり)をそれぞれ従来モデルと提案モデルで解析し比較した。解析で得られた層せん断力-層間変形角関係を図-9に示す。床を考慮すると、壁脚降伏後の剛性が提案モデルでは大きくなった。これは、床の曲げ変形を無視した梁端部のバネの設定によると考えられる。

また、設計例を提案モデルで解析した結果を2モデルで比較して図-10に示す。提案モデルの剛性が大きくなる傾向があるが、架構全体の復元力特性を簡易な一軸曲げバネモデルの解析法によりある程度再現できた。

4. 研究成果

本研究の提案 CLT ユニットを用いた、平均せん断応力度に基づく壁量計算による普及型中層建築物の設計の可能性を示すことができた。また、CLT パネル工法建築物を設計するにあたり、簡易な一軸曲げバネモデルを開発したが、現段階では剛性・耐力に差異が生じているものの、崩壊メカニズムや全体の傾向は再現できることが分かり、モデルの詳細なパラメータを今後検討して修正することで、実務構造設計への導入の可能性を示すことができた。

参考文献

- (1) 日本 CLT 協会：2016年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル
- (2) 日本建築学会：木質構造接合部設計マニュアル

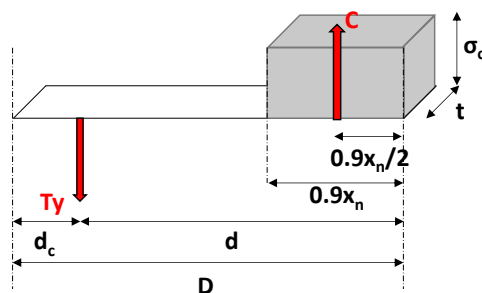


図 - 8 終局時の応力分布の仮定
(引張側降伏時)

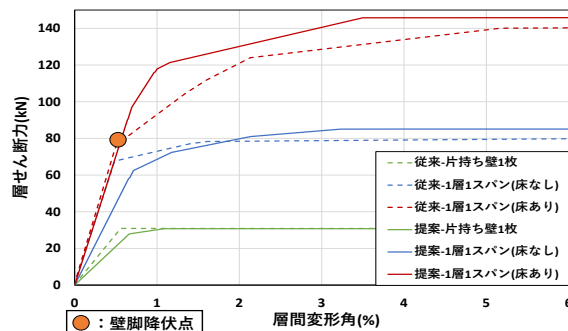


図 - 9 提案モデルと従来モデルの比較

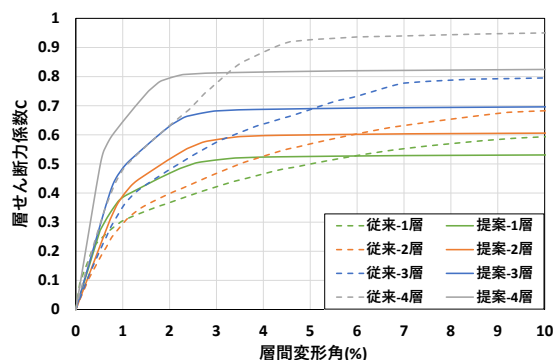


図 - 10 設計例の提案モデルによる解析

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 熊谷太希, 小笠原絢香, 前田匡樹	4. 巻 26
2. 論文標題 ドリフトピンと構造用接着剤を併用した鋼板挿入型木質ラーメン接合部の力学特性評価とその応用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 911, 916
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.26.911	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 前田匡樹, 遠藤広大, 小笠原絢香
2. 発表標題 鋼板添え板ドリフトピン接合工法を用いて小幅パネルを接合し大判化するCLT 架構形式の開発 その1 開発する接合部概要とドリフトピンによる引張性能実
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小笠原絢香, 遠藤広大, 前田匡樹
2. 発表標題 鋼板添え板ドリフトピン接合工法を用いて小幅パネルを接合し大判化するCLT 架構形式の開発 その2 接合部せん断性能評価実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤広大, 小笠原絢香, 前田匡樹
2. 発表標題 鋼板添え板ドリフトピン接合工法を用いて小幅パネルを接合し大判化するCLT 架構形式の開発 その3 CLT 耐力壁の性能評価実験
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小笠原絢香, 厚澤瑛人, Ahmad Ghazi Aljuhmani, 前田匡樹, Hamood Alwashali, Alex Shegay
2. 発表標題 CLT パネルのせん断耐力・剛性に開口が及ぼす影響に関する研究 その1 研究の目的と実験計画
3. 学会等名 日本建築学会大会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小笠原絢香, 厚澤瑛人, Ahmad Ghazi Aljuhmani, 前田匡樹, Hamood Alwashali, Alex Shegay
2. 発表標題 CLT パネルのせん断耐力・剛性に開口が及ぼす影響に関する研究 その2 実験結果と構造性能の評価
3. 学会等名 日本建築学会大会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関