

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450227

研究課題名(和文) CLT耐力壁の地震時特性の解析

研究課題名(英文) Analysis of seismic properties of CLT shear walls

研究代表者

安村 基 (Yasumura, Motoi)

静岡大学・農学部・教授

研究者番号：40143408

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、CLTパネル法に用いられる接合構法および耐力壁における資料を整備し、この構造による力学モデルの検討を行い、構造設計に有用な資料を整備することを目的とする。耐力壁のFEMモデルおよび動的モデルの開発を行い、CLTパネルの接合部の特性が構造物の地震時特性に及ぼす影響を調べた。耐力壁の履歴特性をモデル化し、時刻歴地震応答解析を行ない、種々のレベルにおける地震動に対する安全性の検討を行った。また、開口を有するCLTパネルについて、平均応力法を適用し、亀裂の発生を推定することが可能であることを示した。これらの成果は、CLTパネル工法に、有開口大版パネルを適用する際の有用な資料となる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop the mechanical model for CLT shear walls and provide useful data for the design of CLT structures. Finite Element model and dynamic model were developed for CLT shear walls and the influence of mechanical properties of joints on the seismic performance of building structures composed of CLT panels. The safety of CLT structure on the various seismic ground motions were studied by performing the time history earthquake response analysis. The failure mechanism of CLT shear walls due to the splitting of CLT at the corner of opening was also analysed by applying the average stress method in FEM analysis and it was shown that this method is appropriate to predict the crack initiation at the corner of opening. These results provide useful data for the design of large panel CLT with opening.

研究分野：木質構造

キーワード：CLTパネル FEM解析 耐力壁 時刻歴地震応答解析 開口部 平均応力法 亀裂 大版パネル

1. 研究開始当初の背景

わが国の森林面積は、国土の3分の2を占めており、森林の維持保全を勘案すると、森林の持続可能な有効活用が早急な課題となって来ている。しかしながら、わが国における木材供給は、外国産材が中心となっており、戸建住宅建設の低迷等を勘案すると、国産材の需要拡大は困難な課題である。欧州においても、地球環境保全の観点から、木材の有効利用が見直されており、公共建築物など非住宅に木材を適用することが進められている。欧州では、1990年代から挽き板を幅方向に並べたものを互いに直交させて積層接着したCLT (Cross Laminated Timber) が開発され、従来適用されなかった中・高層建築にCLTが適用されるようになった。CLTは、挽き板を幅方向に並べたものを互いに直交させて積層接着して厚さ90~210mm、幅3000mm、長さ10m以上の大型パネルの壁材、床材を製造するもので、部材の断面が大きいため、比較的強度の低い木材を用いて、大型の建築を建設することが可能となる。そこで、わが国においても国産材の有効活用を推進する目的で、CLTの導入が検討されているところであるが、わが国は地震国でもあり、CLTパネルを用いた建築物の構造特性を明らかにするための研究が求められた。

2. 研究の目的

本研究は、CLTパネル工法における耐震性能の中核をなす耐力壁について、その力学特性を記述するモデルを作成し、CLTパネルの寸法と配置および各部の接合部の特性が構造物の構造特性に及ぼす影響を調べ、CLTパネル工法の設計に有用な資料を提供することを目的とする。また、欧州で一般に行われている大版パネルから開口部分を切り貫いた構造において、パネルが水平力を受けた場合、開口隅角部に生じる亀裂発生メカニズムを明らかにし、設計のための資料を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) CLTパネル工法構造物の解析モデルの検討

CLTパネルによる2層構造物の実大加力実験および開口を有するCLTパネル耐力壁の水平加力実験の結果を基に、CLT構造物のFEM解析モデルを作成し、解析と実験結果を比較することにより、解析モデルの検証を行った。試験体は、図1に示す2層構面よりなる立体構造で、幅6m高さ2.7mの大版壁パネルを用いた試験体と、幅1m高さ2.7mの小割壁パネルを用いた試験体2体を用意した。試験体は2層構造であるが、3層を想定し、3層部分の積載荷重と固定荷重を2層頂部に付加した。2階および3階床の積載荷重は、床仕上げ材を考慮し3000N/m²とした。またRF階屋根面の積載荷重は1000N/m²とした。固定荷重はCLTパネル密度450kg/m³として算出した。

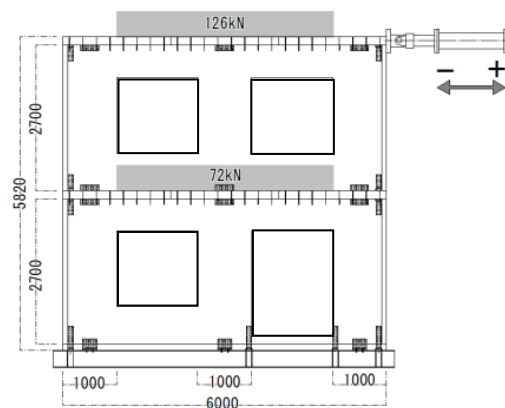


図1 大版パネル架構 (LP)

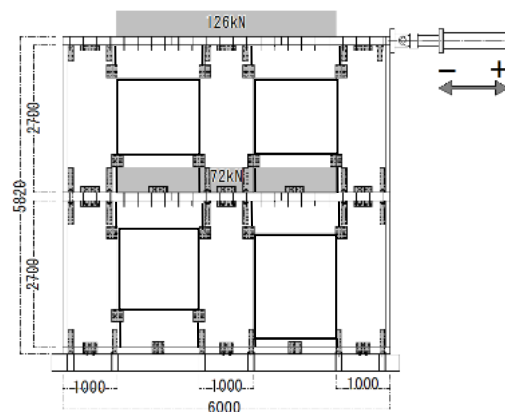


図2 小版パネル架構 (SP)

試験体壁パネルに用いたCLTは厚さ90mm (スギ3層3プライ S60相当)で、床パネルは幅2m、長さ4m、厚さ150mm (ヒノキ・スギ5層5プライ Mx120相当)とした。CLT壁を構成するラミナは幅120mm厚さ30mmのスギで、水性高分子・イソシアネート系接着剤を用い積層接着したもので、幅はぎ接着はしていない。1階壁パネルの下部には幅90mm、せい120mmの土台(構造用集成材 E95-F285 オウシュウアカマツ)を配した。

CLT壁パネルの緊結金物は、壁体の浮き上がり拘束する脚部接合金物と水平せん断力に抵抗するせん断金物の2種類とし、脚部接合金物はU字型で、ビス最大本数14本とし、有限要素法による線形解析により水平力251kN(ベースシア係数1.0に対応)に対する各部のネジ本数(山径6mm、長さ65mm)を決定した。

また脚部接合金物と基礎フレームとの緊結および上下階接合金物の緊結は直径20mmの両ネジボルト(強度区分10.9)とした。せん断補強金物は基礎フレームと1階壁パネル緊結のU字型金物と1階壁パネルと2階床パネル緊結、2階床パネルと2階壁パネル緊結および2階壁パネルとRF階床パネル緊結用L型金物の2種類とした。U字型せん断補強金物はCLT壁パネルに脚部接合金物と同様のビス12本、基礎フレームとはM20ボルト(強度区分4.6)2本で緊結した。L型金物はCLT壁

パネルと床パネルにそれぞれビス 12 本で緊結した。また CLT 床パネルと階下の壁パネルは、山径 8mm 長さ 280mm のスクリーを用い 250mm 間隔で緊結した。開口を含む大版 CLT 壁パネルを用いた試験体および小幅パネルを用いた試験体をそれぞれ図 1 および図 2 に示す。

これらの架構について、図 3 に示すバネ要素と異方性平面要素からなるモデルを用いて有限要素法解析を行った。解析に当たって、CLT パネルのヤング係数は、強軸（鉛直）および弱軸（水平）方向を、それぞれ 5244MPa および 2622MPa、せん断弾性係数を 403MPa とし、接合部に用いたビス 1 本当りあたりのせん断剛性を 2.43 kN/mm とした。

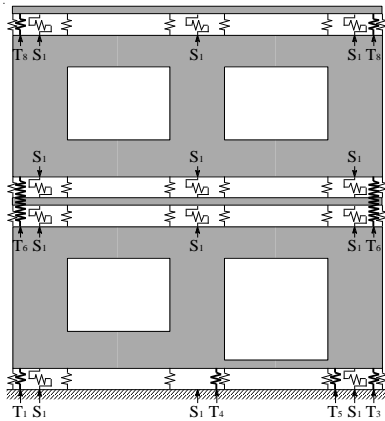


図 3 大版パネル架構の解析モデル

(2) モデル架構の時刻歴地震応答解析

2 層構造 CLT 架構の実験結果をもとに仮定した 3 層構造物について、時刻歴地震応答解析を行った。3 層構造物を 3 質点モデルと仮定し、各層の復元力特性を図 4 に示すようにモデル化した。

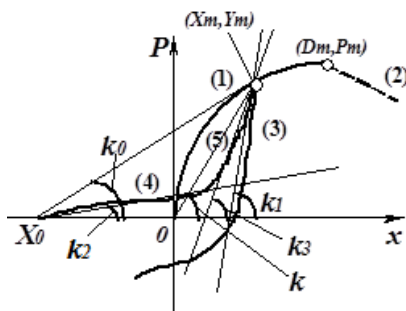


図 4 CLT パネル復元力特性のモデル化

- 1) 初期加力における最大荷重までの曲線
- 2) 最大荷重以降の曲線
- 3) ピーク荷重からの除荷直線 (k_1)
- 4) 再加力時の初期直線 (k_2)
- 5) 再加力時の 2 次直線 (k_3)

$$P = (P_0 + C_2 x) \left(1 - e^{-\frac{C_1 x}{R_0}} \right) \quad (1)$$

$$P = P_m - C_3 |x - D_m| \quad (2)$$

$$k_1/k = C_4 X_m + 1 \quad (3)$$

$$k_2/k_0 = 1 - C_5 |X_m - X_0|^6 \quad (4)$$

$$k_3/k = C_7 X_m + 1 \quad (5)$$

P: 水平荷重、x: 水平変位、 P_m : 最大荷重、 D_m : 最大荷重時の変位、 X_m : 初期曲線状のピーク変位、 X_0 : 初期直線状のピーク荷重、 X_0 : 曲線が X 軸を横切る変位、 $P_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$: 定数。

大版パネル架構 (LP) においては、(4), (5) 式の代わりに、X 軸を横切る点と直前のピーク (X_m, Y_m) を結ぶ直線 (傾き k_0) を用いた。

1 層および 2 層の質量が 10.5t、3 層の質量が 4.8t である 3 質点モデルについて前述のヒステリシスモデルを用いて時刻歴地震応答解析を行った。入力地震波は、1940 El Centro NS, 1995 JMA Kobe NS, BSL 告示波とし、最大加速度を JMA Kobe NS (0.818G), El Centro NS (0.341G) and BSL (0.579G) とし解析を行い、1 層の最大応答変位が実験の最大変位 (大版パネルで 41mm、小幅パネルで 78mm に達するまで入力加速度を増加させて解析を行った。

(3) 大判パネルにおける開口隅角部の亀裂発生荷重の推定

窓などの開口部を削り貫いた大版パネルが面内せん断力を受けると開口の隅角部に亀裂を生じる。この亀裂は大地震時などに進展しパネルの破壊につながるため、亀裂が発生する荷重を推定することが必要となる。ここでは、形状・寸法の異なる開口を有する CLT パネルのせん断試験の結果をもとに、亀裂発生荷重に関する解析法および設計式の検討を行った。

まず、3 層 3 プライの CLT パネル耐力壁を、図 5 に示す①単一の異方性の板としたモデル (モデル I)、②強軸方向、弱軸方向が直交する 2 枚の板を重ね合わせたモデル (モデル II)、③ラミナ 1 枚ずつをモデル化し作成した各層を互いに直交して重ね合わせたモデル (モデル III) を作成し、解析結果を比較したところ各モデルの解析結果に大きな差がなかったことから、モデル II を用いて実験結果との比較を行った。

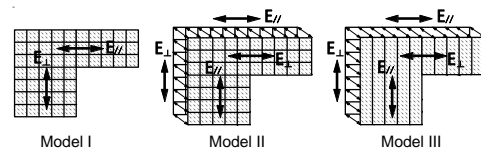


図 5 3 層パネルの解析モデルの概要

実験を行った CLT パネルのモデル II による解析モデルを図 6 に示す。パネルの上部に配置した梁要素の端部に水平方向に強制変位を加え、各部の応力を求めた。計算に用いた材料特性値は部材の実験により求め、ラミナの繊維方向のヤング係数および引張り強度、

圧縮強度をそれぞれ 7980MPa、28.7 MPa および 33.6 MPa、直交方向のヤング係数および引張り強度を、それぞれ 355MPa および 1.87MP とした。接合部に用いたスクリーンのせん断剛性は 1 本当たり $k_s=2.43\text{kN/mm}$ とした。

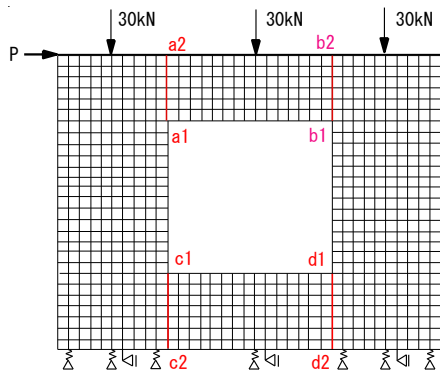


図 6 開口付 CLT 耐力壁の解析モデル

4. 研究成果

(1) CLT パネル工法構造物の解析モデルの検討

大版パネルおよび小幅パネルにおける 1 層および 2 層の荷重・変形関係と解析結果の比較を図 7 および図 8 に示す。解析値は、実験結果をよく記述しており、このような解析方法が CLT パネル工法の力学特性の把握に有効であることがわかった。

本研究の成果により、異方性面材要素とバネ要素よりなる有限要素解析を行うことにより、CLT パネル工法の構造特性を把握することが可能であるとともに、これにより、大版パネルを用いた架構と小幅パネルを用い

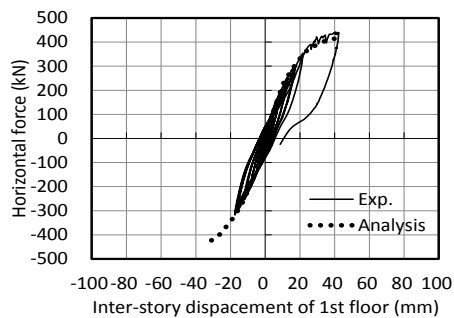


図 7 大版パネル架構 1 層の荷重・変位

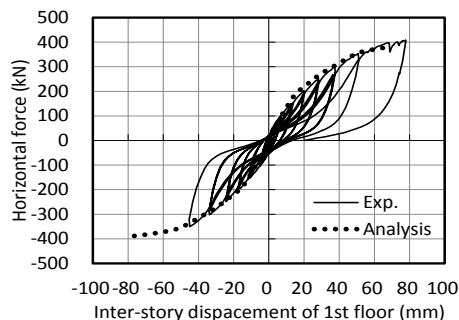


図 8 小幅パネル架構 1 層の荷重・変位

た架構の特性の違いが明確になり、小幅パネル架構における垂れ壁、腰壁の耐力寄与が示された。

また、図 9 は大版パネルにおける水平方向応力を示したもので、開口隅角部に応力が集中する様子がわかる。このような破壊性状は、大版パネルを用いた構法の耐震性能に重大な影響を及ぼす可能性があり、このような亀裂発生メカニズムを解明することが必要であることがわかった。

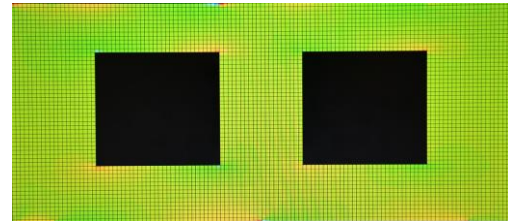


図 9 大版パネルにおける水平応力分布

(2) モデル架構の時刻歴地震応答解析

実大実験を行った CLT 架構をもとに、3 層のモデル架構を仮定して実施した時刻歴地震応答解析の結果を図 10 および図 11 に示す。これより、ベースシア係数 1.0 として設計した架構は、大版パネル、小幅パネルとも、地動加速度 0.6G レベルの加速度に対して、降伏に達しておらず、地動加速度 1.1~1.3G 程度の地震動に対して終局に達することが示

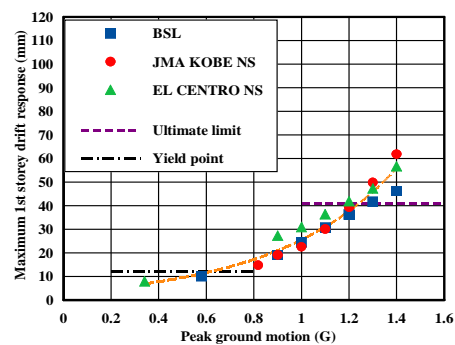


図 10 大版パネル架構における 1 層の最大応答層間変位と地動加速度の関係

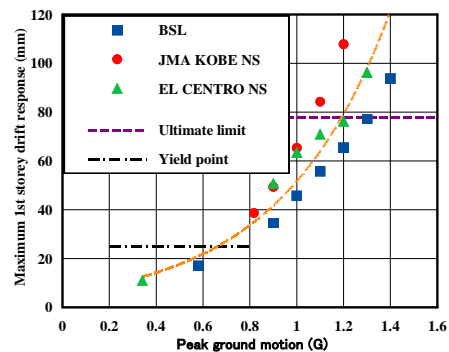


図 11 小幅パネル架構における 1 層の最大応答層間変位と地動加速度の関係

された。この研究結果から、大版パネルを用いた CLT パネル構造は、強度型の耐震設計を行うことにより、小幅パネルと同程度の耐震性能を持つことが示され、施工の合理化に対して有利であると考えられる大版パネルの利用の可能性が示された。

(3) 大版パネルにおける開口隅角部の亀裂発生荷重の推定

開口部を有する CLT 大版パネルにおける開口隅角部の応力を推定する目的で、種々の形状・寸法を有する CLT パネルについて有限要素法解析を行ない、図 12 に示す平均応力法により亀裂発生時の応力分布を求めた。図 13 は、亀裂発生荷重の実験値と解析値の比較を示したもので、解析値が実験値を良く推定しており、このような解析手法により、大版パネルにおける開口隅角部の亀裂発生荷重の推定が可能となる。しかしながら、このような解析は、実際の設計では煩雑となるため、杉山の開口係数 r による設計式適用の検討を行った。

$$r = \frac{1}{1 + \alpha/\beta} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{l_w \cdot h_w}{L \cdot H} \quad \beta = \frac{L - l_w}{L}$$

ここに、 L, H : パネルの幅と高さ、 l_w, h_w : 開口部の幅と高さ

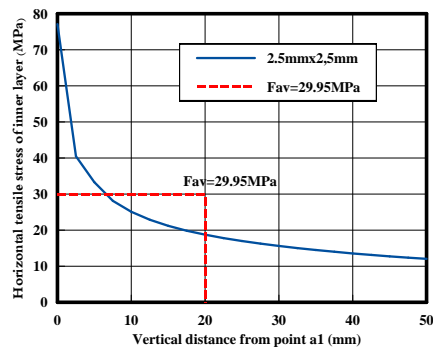


図 12 平均応力法による亀裂発生時の推定

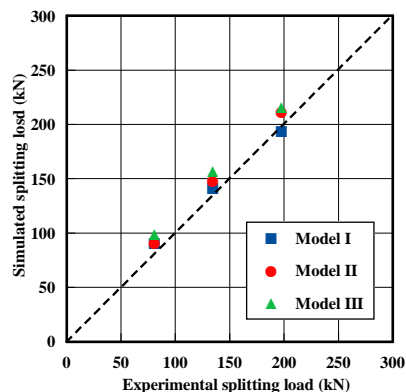


図 13 亀裂発生荷重の実験値と解析値

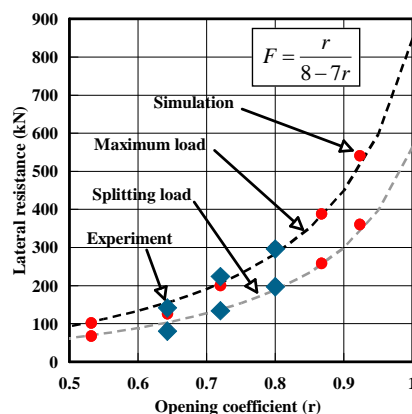


図 14 亀裂発生荷重、終局耐力と開口係数

図 14 は、亀裂発生荷重、終局耐力と開口係数の関係を示したもので、設計式がこれらを良く推定していることがわかった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① [Motoi Yasumura](#), [Kenji Kobayashi](#), Minoru Okabe, Tatsuya Miyake, Kazuyuki Matsumoto, Full-scale tests and numerical analysis of low-rise CLT structures under lateral loading, J. Struct. Eng., 査読有, 142(4), 2016, E4015007 1-12
DOI: [10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001348](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001348)

[学会発表] (計 2 件)

- ① [Motoi Yasumura](#), [Kenji Kobayashi](#), Minoru Okabe, Seismic performance of CLT low-rise structures with small and large wall elements with openings, Proc. INTER 2016, 16-19 August 2016, Graz (Austria)
- ② [Motoi Yasumura](#), [Kenji Kobayashi](#), Minoru Okabe, Failure analysis of CLT shear walls with openings subjected to horizontal and vertical loads, Proc. WCTE 2016, 22-25 August 2016, Vienna (Austria)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安村 基 (Yasumura, Motoi)
静岡大学・農学部・教授
研究者番号: 40143408

(2) 研究分担者

小林 研治 (Kobayashi, Kenji)
静岡大学・農学部・准教授
研究者番号: 90576240