

研究助成実施報告書

助成実施年度	2019 年度
研究課題（タイトル）	在来軸組 CLT フラットスラブ構法による都市型木造住宅の構造設計手法の開発
研究者名※	古田 智基
所属組織※	西日本工業大学 デザイン学部建築学科 教授
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

大林財団 2019 年度研究助成実施報告書

所属機関名

西日本工業大学

申請者氏名

古田 智基

研究課題	在来軸組 CLT フラットスラブ構法による都市型木造住宅の構造設計手法の開発
(概要)	
<p>在来軸組構法の床組や小屋組といった水平構面を CLT に置き換える「在来軸組 CLT フラットスラブ構法」について、CLT の面外曲げ実験、CLT 床板どうしの接合部の面内せん断実験および引張実験を実施し、得られた剛性をもとに、この構法のモデル住宅の静的増分解析を実施した。</p> <p>その結果、2 階床構面の CLT の面外変形が顕著であり、2 階の水平剛性が低下していることが分かった。今後は解析結果を精査し、CLT の面外変形を小さくするための柱配置や壁配置などの仕様規定を検討、提案する。さらに、モデル住宅を再設計し、提案した仕様規定の妥当性を検証する。</p>	

1. 研究の目的
<p>日本の小規模戸建住宅のほとんどは木造であり、そのうちの 75% (およそ 40 万戸/年) は在来軸組構法である。在来軸組構法では、1 階と 2 階の間取りを考慮しながら 2 階床組の横架材の配置を考える作業が必要であるが、概して、施主の求める間取りと構造安定性とを両立させることは難しいと考えられている。このような問題は、狭い敷地に建設せざるを得ない都市型木造住宅で顕著であり、このことを解決するためには、1 階と 2 階の間取りを独立して設計しても (間取りを設定しても)、建物の構造安定性に影響を及ぼさないような構法の開発が求められている。</p> <p>一方、CLT (Cross Laminated Timber、直交集成板) は、伐期を迎えた多量のスギやヒノキを有効に活用できる可能性があり、CLT の JAS 規格の制定、CLT パネル工法の告示の整備も進められてきたが、CLT の利用はまだ限定的であり、積極的な林産資源の活用結びついていない現状もある。</p> <p>上記のような状況に鑑みて、申請者らは、CLT の有効活用と在来軸組構法の木造住宅の構造の安定性を両立する「在来軸組 CLT フラットスラブ構法」を提案してきた。この構法は、在来軸組構法の床組や小屋組といった水平構面を CLT に置き換えるものである。</p> <p>本研究では、まず「在来軸組 CLT フラットスラブ構法」のモデル住宅を設定する。そして、この構法の住宅を実現するための各部の構造データを実験によって採取し、このデータをもとにモデル住宅の立体解析モデルを作成して静的増分解析を行う。これによって、この構法の仕様規定を検討する際の問題点を抽出する。</p>

2. 研究の経過

【モデル住宅の設定】

在来軸組 CLT フラットスラブ構法の特徴を生かした図 1、図 2 のようなモデル住宅を設定した。この構法を実現させるためには、床板としての CLT の面外曲げ実験、CLT 床板どうしの接合部の面内せん断実験および引張実験が必要であることを確認した。



図 1 モデル住宅の外観



図 2 モデル住宅の内観

【CLT 床板の面外曲げ実験】

CLT の面外への曲げについて、強軸方向、弱軸方向それぞれの曲げヤング係数は、ラミナの曲げヤング係数から集成材と同様の方法で計算することが可能であるが、柱で支持される在来軸組 CLT フラットスラブ構法では二方向の曲げとなるため、強軸、弱軸それぞれの曲げヤング係数から手計算でたわみ量を求めることは難しい。従って、設計においては、荷重に対するたわみ量の検定が容易にできない問題がある。そこで、CLT の二方向曲げの性状を把握するため、 $3,000\text{mm} \times 1,800\text{mm} \times 150\text{mm}$ (5 層 5 プライ) の CLT を柱で支持して面外加力実験を行った。

実験に用いた CLT は Mx60A-5-5 であり、設計用として示されている強軸方向と弱軸方向の曲げヤング係数は、 $4,728\text{N/mm}^2$ と 624N/mm^2 である。また、強軸方向および弱軸方向の設計用曲げ強度は 10.37N/mm^2 と 1.97N/mm^2 である。

なおここでは、柱の位置を変えて繰り返し加力を行うため、弾性範囲内の加力にとどめた。CLT の面外方向への変位は、載荷点と柱の位置で計測し、載荷点での変位から柱の位置での変位を差し引いた値を CLT の変位とした。実験の状況を図 3 に示す。



図 3 実験の状況

【CLT 床板どうしの接合部の面内せん断実験】

試験体は図 4 のような 2 面せん断とし、図 5 のような強軸方向、弱軸方向の試験体を各 3 体とした。試験体の CLT は Mx60A-5-5 で、厚さは 150mm である。ハーフラップドジョイントに対して 45 度方向に打ち込むスクリーの本数は、強軸 1 体、弱軸 1 体については片側に 2 本（両側で 4 本）としたが、残りの試験体については治具の剛性不足が判明したため、片側に 1 本（両側で 2 本）とした。試験体の両側のパーツを治具に固定し、中央のパーツに対して 1mm～30mm で正負 3 回繰り返し載荷を行った。図 6 に実験の状況を示す。試験体の密度は $0.40 \sim 0.46\text{g/cm}^3$ 、含水率は 13～18%であった。

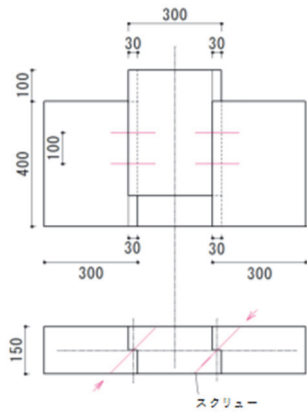


図4 せん断試験体

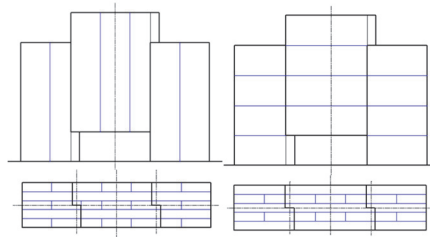


図5 ラミナ方向
(左：強軸方向、右：弱軸方向)

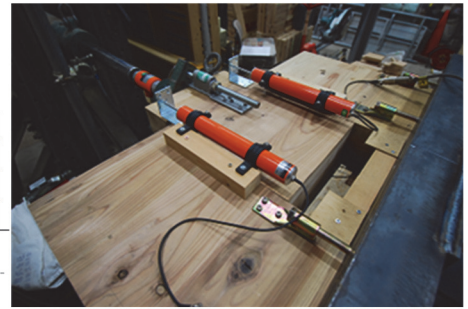


図6 実験の状況

【CLT床板どうしの接合部の引張実験】

試験体は図7および図8に示すように、強軸方向、弱軸方向を各3体とした。試験体のCLTは、せん断試験と同じMx60A-5-5で、厚さは150mmである。スクリューの本数は2本とし、試験体の片側のパーツを治具に固定し、もう片方のパーツに対して単調な引張力を载荷した。図9に実験の状況を示す。

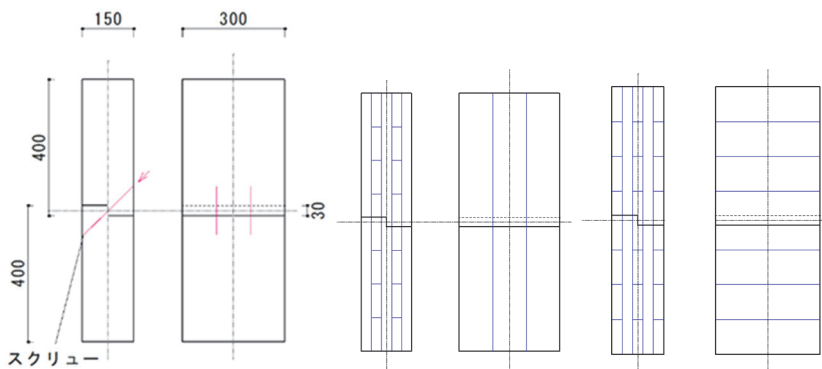


図7 引張試験体

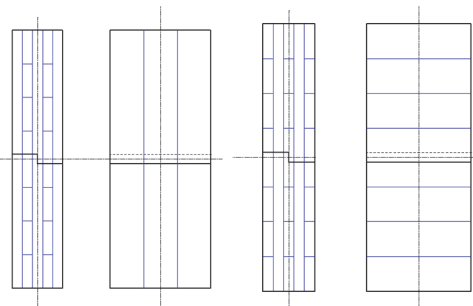


図8 ラミナ方向
(左：強軸方向、右：弱軸方向)



図9 実験の状況

【モデル住宅の増分解析】

モデル住宅の解析モデルは3次元とし、2階床構面のCLTについては、断面が240mm×30mmのラミナ全てを梁要素でモデル化した。図10に解析モデルを示す。2階床構面のCLTの節点数は8675、要素数は15042である。CLT同士のハーフラップドジョイントには、スクリューを概ね960mm間隔で斜め打ちすることとした。このスクリューのせん断および引張剛性は、実験結果を参考に0.8kN/mm、4.0kN/mmとした。なお、圧縮剛性は引張剛性と同じとした。

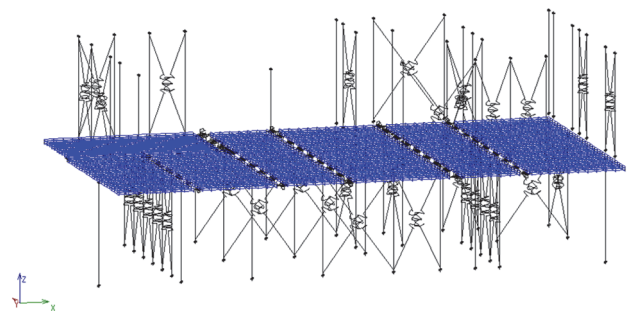


図10 建物全体の解析モデル

3. 研究の成果

【CLT 床板の面外曲げ実験】

まず、設計に用いる計算値との差を把握するため、強軸方向と弱軸方向の一方向曲げの実験を行って、それぞれの方向の曲げヤング係数を求めた。図 11 に実験結果の一例を示す。荷重と載荷点におけるたわみ量との関係は線形であり、弾性範囲内であることが分かる。曲げヤング係数は、強軸が $6,735\text{N/mm}^2$ 、弱軸が $1,927\text{N/mm}^2$ であり、強軸方向については、設計用の値の 1.4 倍、弱軸方向については 3.1 倍であり、弱軸方向の面外剛性は計算値よりかなり大きいことが分かった。

次に、柱を任意の位置に配置して CLT の中央を面外方向に加力し、測定したたわみ量から面外剛性を求めた。面外剛性は、「載荷した荷重」 / (「載荷点における変位」 - 「柱の位置での変位」) とした。図 12 は、面外剛性と載荷点 - 柱距離との関係であり、載荷点と柱との距離が大きいほど面外剛性が低く、負の相関があることが分かる。最小二乗法による回帰直線としては、 $y = -0.0164x + 31.1$ が得られた。

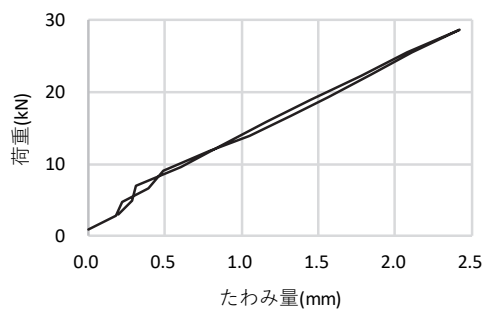


図 11 荷重－たわみ量関係

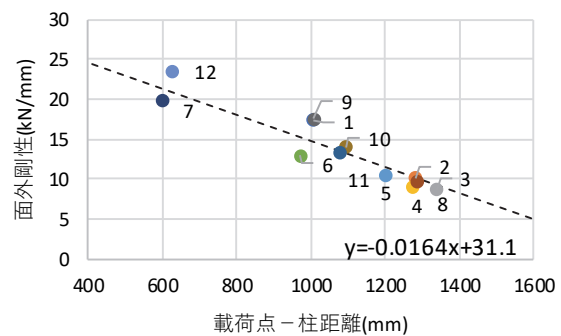


図 12 面外剛性と載荷点－柱距離との関係

【CLT 床板どうしの接合部の面内せん断実験】

図 13 に各試験体のせん断力と変位の関係の一例を示す。縦軸のせん断力は、スクリューの本数で除した 1 本あたりの平均負担せん断力である。最大のせん断力は 20mm 前後で約 10kN であり、強軸、弱軸の顕著な違いはなかった。図 14 に、全試験体の正側の包絡線を示す。強軸の方がややばらつきが大きいですが、平均値は弱軸も概ね同程度である。破壊性状としては、図 15 のようにスクリューの破断のほか、大きく曲がっているものもあった。

許容せん断耐力は、 P_y (降伏せん断力) と $2/3P_{max}$ (最大せん断力の $2/3$) の小さい方の値とし、強軸が 5.24kN、弱軸が 6.65kN であった。強軸では P_y は比較的小さいために許容せん断耐力が低くなっており、包絡線の形状が影響していると考えられる。 $2/3P_{max}$ は強軸と弱軸で同等であるが、包絡線の形状が異なった理由についてはさらに検討が必要である。なお、この許容せん断耐力には、ばらつきなどによる低減率は考慮されていない。

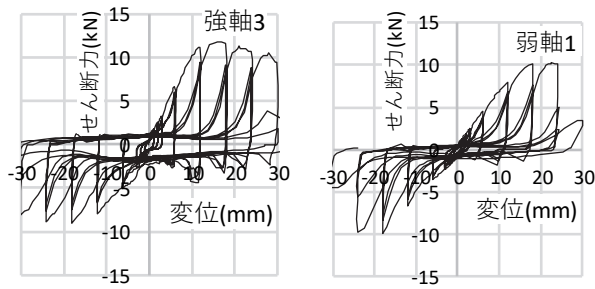


図 13 せん断力-変位関係の一例

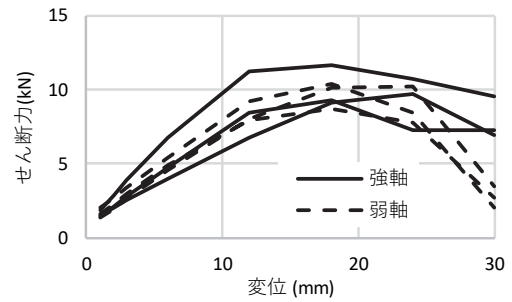


図 14 正側加力時の包絡線

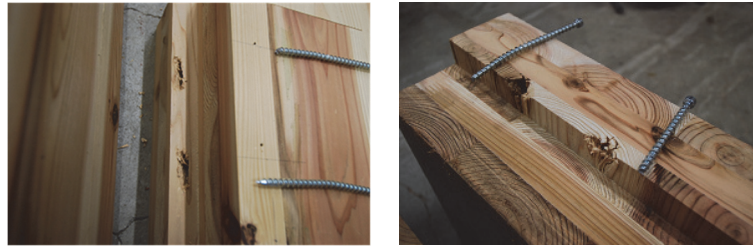


図 15 実験後の状況 (左：強軸、右：弱軸)

【CLT 床板どうしの接合部の引張実験】

図 16 に各試験体の引張力と変位の関係を示す。縦軸の引張力は、スクリーの本数で除した 1 本あたりの平均負担引張力である。最大の引張力は 3mm 前後で 12~13kN であり、弱軸ではややばらつきが大きい。平均は強軸、弱軸とも同程度であった。破壊性状については、図 17 のように、強軸ではスクリーの周辺が損傷していたのに対し、弱軸では加力方向に直角の繊維に沿って割れが生じた。強軸、弱軸とも、スクリーの変形はほとんどなかった。

包絡線から求めた許容引張耐力は、強軸 8.42kN、弱軸 7.03kN であり、弱軸は強軸より 15%程度低かった。

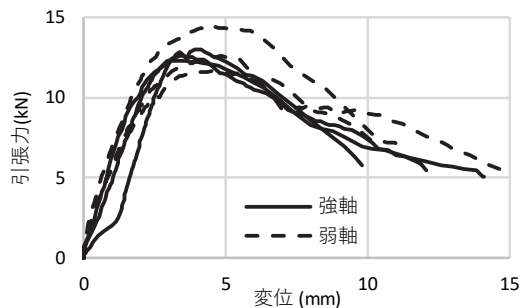


図 16 引張力-変位関係



図 17 破壊性状 (左：強軸、右：弱軸)

【モデル住宅の増分解析】

モデル住宅の静的増分解析は、標準せん断力係数 $C_0=0.2$ に相当する層せん断力に達するまで実施した。各階の層せん断力-層間変位関係を図 18 に示す。1 階の最大層せん断力は 103kN、2 階は 65kN である。

たすき掛けの筋かい耐力壁の許容せん断耐力を 7.84kN/m (壁倍率 $4.0 \times 1.96kN$) として計算した 1 階と 2 階の耐力壁の許容せん断耐力の合計を表 1 に示す。1 階、2 階とも作用する最大層

せん断力とほぼ同じであるが、1階の層間変形角はおよそ 1/190rad、2階はおよそ 1/90rad であり、大きな違いがある。

耐力壁の荷重-変位関係の荷重は壁長に比例するとして、壁長が 1P (910mm) の荷重-変位関係を各階の壁長分に換算した荷重-変位関係も図 18 中に示している。増分解析による 1階の剛性は、壁長比例で計算した剛性より 16%大きい、2階については 35%小さい。

このように 2階では、耐力壁の壁長と剛性が対応していないが、これは、筋かいの軸力の反力として、耐力壁が取り付く柱に軸力が作用したときに、CLT が面外に変形しているためと考えられる。特にオーバーハング部にある耐力壁の柱脚では、10mm 以上鉛直上向きに変位が生じている節点があるが、壁長が 2P (1820mm) の耐力壁では水平変位が 15mm 以上増加することになる。

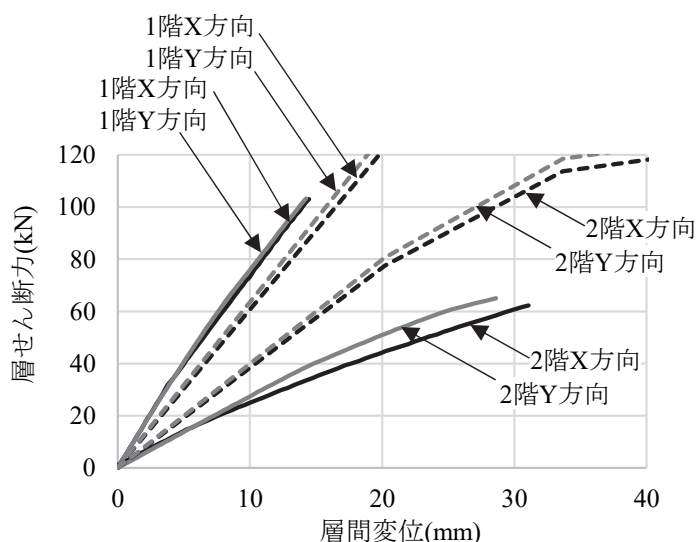


表 1 各階各方向の耐力壁の許容せん断耐力の合計

	X 方向	Y 方向
2 階	64.5kN	67.2kN
1 階	102.2kN	107.0kN

図 18 層せん断力-層間変位関係

(実線：立体増分解析、破線：壁長比例)

4. 今後の課題

在来軸組構法の床組や小屋組といった水平構面を CLT に置き換える「在来軸組 CLT フラットスラブ構法」の各部の構造データを実験によって採取し、設定したモデル住宅の静的増分解析を実施した結果、2階床構面の CLT の面外変形が顕著であり、2階の水平剛性が低下していることが分かった。

この剛性低下を防止するためには、柱配置や壁配置のルールを策定し、CLT に大きな面外曲げ応力が作用しないようにする必要がある。CLT が曲げ破壊に至らない場合には、2階の剛性に低減係数を乗じて建物の耐震性能を評価する方法も考えられるが、今後は解析結果を精査し、柱配置や壁配置などの仕様規定を検討、提案する。また、モデル住宅を再設計し、提案した仕様規定の妥当性を検証する。