

CLT を効果的に利用して大規模木造建築物を実現するための接合技術の開発

石山央樹, 脇田健裕

Development on the joint for the large-scale-wooden-structures by using Cross Laminated Timber

ISHIYAMA Hiroki, and WAKITA Takehiro*

Analysis and experiment was done for the development on the joint for large-scale-wooden-structures by using Cross Laminated Timber. As a result of analysis, the metal joint, which was angle-shaped, was proposed for the ability of adequate deformation and ability of the energy absorption. The experiment was done for estimating the performance of the metal joint, and the ability could be seen.

Keywords : *Cross laminated timber, Wooden structure, Metal joint*

1. はじめに

2010 年に「公共建築物等における木材利用の促進に関する法律」が施行され、木造建築を普及する機運が高まっている中、大規模木造建築を実現する材料として CLT という新しい木質材料が注目されている。CLT (Cross-Laminated-Timber=クロスラミナパネル) とは、低級材によるラミナを平置きで並列させた層を互いに直交積層接着させてパネル状に成形した木質建築材料である (図 1、写真 1)。1970 年代にスイスで開発、1998 年にオーストリア等で実用化され、現在では 3×20m 程度の大型フォーマットとして、乾式工法と高い剛性を活かした生産と施工の合理化がなされている。大型パネルであることは、部材接合点数が少ない、剛性が高い、壁面全体での荷重伝達が可能なため鉛直支持能力が高いなど、構造的な利点も多い。これを受けヨーロッパでは、CLT は住宅等の小規模建築物から 9 層の集合住宅や低層大規模建築まで幅広く利用されている (写真 2)。

一方、日本では現在、CLT が建築基準法施行令第 37 条の指定建築材料のいずれに相当するかの統一の見解がなく、また、許容応力度が設定されていないため、建築材料として構造耐力上主要な部分に使用することが難しい。このような中、学識経験者を中心とした勉強会が発足し、試作品を用いた実験検証などが行われている (写真 3) が、日本においては設備投資が進んでいないため、1×3m 程度の小型パネルの生産に留まっている。また、接合システムは木造軸組構法の既存技術を流用するに留まっている。

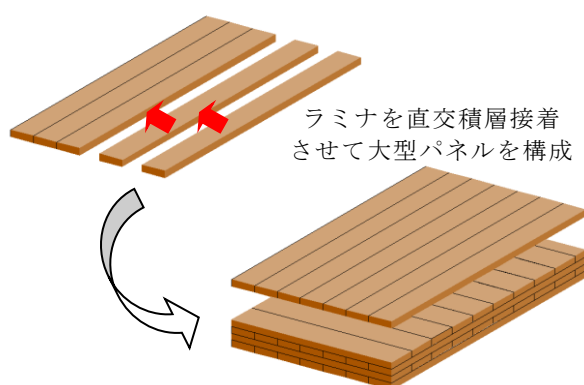


図1 新しい木質材料 CLT



写真1 住宅外壁として利用される CLT



写真2 CLTによる9階建て集合住宅



写真3 日本での CLT 実験検証

CLT を利用して高い構造性能と経済性を有する建築物を実現するためには、ヨーロッパと同様、大型パネルを利用することが合理的と考えられる。しかしながら、ヨーロッパと日本とでは構造的な要求水準が異なるため、CLT 構法の既存の構造システムを輸入するのではなく、日本の構造的な要求水準に適した接合システムを開発する必要がある。

そこで本研究では、建物の形状、パネルの形状を考慮し、かつ、日本の構造的な要求水準を考慮した接合システムの開発を目的とする。

2. パネル形状・接合性能を変数とした解析

2.1. 解析概要

パネル同士を接合する方法は、現場における品質管理の容易さを考慮すると、釘やねじ、ボルトなどの接合具を使用するのが望ましい。強度型設計を行うには非常に大きな接合部性能が必要であり、釘やねじ、ボルトなどの接合具では数が多くなり、施工性を低下させると考えられる。そのため、構造体に十分な変形性能を付与した靱性型設計を行う必要があるが、CLT パネルは靱性に乏しいため、接合部に十分な変形性能を持たせる必要がある。そこで、個別要素法に基づく非線形荷重増分解析を用いたパラメトリックスタディーにより、CLT パネル形状がどのような場合に、接合部がどのような力学的特性を持つのが望ましいのか検討することとした。

2.2. 解析方法

解析モデルおよび接合部パラメータを図 2 に示す。解析ケースは後述する表 1 に解析結果と併せて示す。パネル形状は高さ 3m×長さ 1m, 高さ 3m×長さ 4m の 2 種類、引張・圧縮ばねは 4 種類、せん断ばねは 3 種類とした。解析ケースは図 3 に示すように表記することとした。

加力はどちらかの接合要素（引張・圧縮またはせん断ばね）が破断するまでとし、モデルの頂部を加力点とした。CLT パネルはブレース置換し剛体として扱った。なお、各モデルに設定したせん断ばねの許容耐力を $Co=0.2$ で除したものを積載荷重としてパネル上部に鉛直下向きに付加した。

2.3. 解析結果

解析結果から耐力壁の評価方法¹⁾に準じて、 P_y 、 $2/3P_{max}$ 、 $P_u \times 0.2/D_s$ 、 $P_{1/120}$ を算出した。算出結果を表 1 に示す。W1 はロッキング変形が卓越し、引張ばねがせん断ばねよりも先に破断した。また、せん断ばね耐力を増加（10 本→20 本→30 本）させると最大耐力が増加した。一方 W4 は、水平荷重に対して引張ばねに作用する引張力が W1 に比べて小さく、スウェイ変形が卓越し、せん断ばねが引張ばねよりも先に破断した。せん断ばね耐力を増加させると最大耐力が増加し、その増加度合い W1 よりも顕著であった。

W4 は、W1 よりも耐力が全体的に高かった。W1 の許容耐力は概ね P_y および $P_u \times 0.2/D_s$ の値により決定するのに対して、W4 の許容耐力は全て $P_u \times 0.2/D_s$ により決定し、他の許容耐力指標(P_y , $2/3P_{max}$, $P_{1/120}$)に比べて著しく低い値であった。

表 1 解析結果

CASE	P_y (kN)	$2/3P_{max}$ (kN)	$P_u \times 0.2/D_s$ (kN)	$P_{1/120}$ (kN)	許容耐力 (kN)
W1-HD10-10	18.7	22.8	21.9	20.1	18.7
W1-HD10-20	20.6	26.2	18.6	20.8	18.6
W1-HD10-30	22.2	26.9	14.9	22.1	14.9
W1-HD25-10	21.9	22.8	22.3	23.4	21.9
W1-HD25-20	25.2	28.4	24.4	27.0	24.4
W1-HD25-30	24.5	36.0	14.4	22.2	14.4
W1-CPT3-10	20.6	22.9	25.1	21.5	20.6
W1-CPT3-20	20.6	26.2	18.8	20.8	18.8
W1-CPT3-30	24.5	36.0	14.3	22.2	14.3
W1-SB2-10	16.8	17.8	24.9	24.9	16.8
W1-SB2-20	25.7	23.1	22.7	27.1	22.7
W1-SB2-30	33.1	30.4	24.3	33.8	24.3
W4-HD10-10	29.8	26.0	23.7	27.8	23.7
W4-HD10-20	62.5	51.9	39.7	56.0	39.7
W4-HD10-30	108.0	77.9	47.8	84.6	47.8
W4-HD25-10	29.8	26.0	23.7	27.8	23.7
W4-HD25-20	62.5	51.9	39.7	56.0	39.7
W4-HD25-30	108.0	77.9	47.8	84.6	47.8
W4-CPT3-10	29.8	26.0	23.7	27.8	23.7
W4-CPT3-20	62.5	51.9	39.7	56.0	39.7
W4-CPT3-30	108.0	77.9	47.8	84.6	47.8
W4-SB2-10	29.8	26.0	23.7	27.8	23.7
W4-SB2-20	62.5	51.9	39.7	56.0	39.7
W4-SB2-30	108.0	77.9	47.8	84.6	47.8

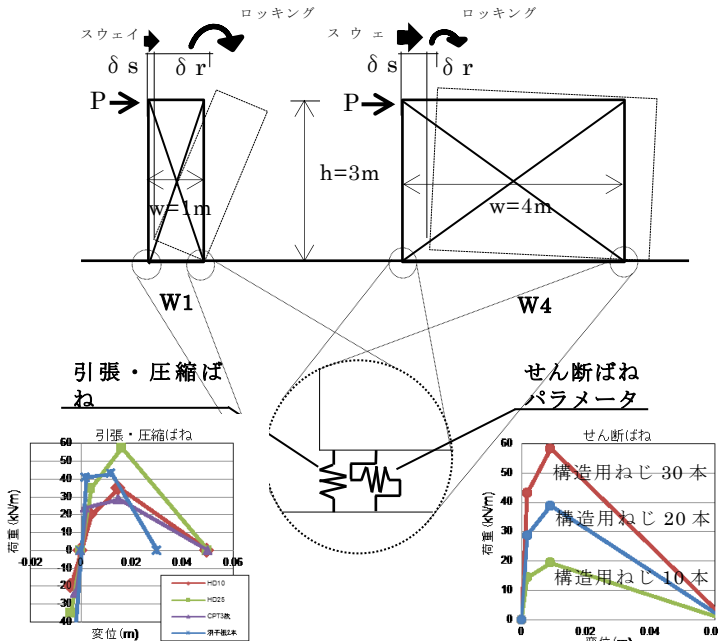


図 2 解析モデルおよび接合部パラメータ

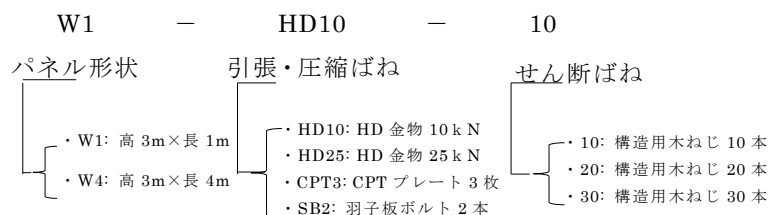


図 3 解析ケースの表記方法

3. 接合部設計

3.1. 基本方針

前節より、施工上合理的な横長の CLT パネルに最適なものとして、十分な塑性変形能力を持つ接合金物を設計することとした。基本方針は下記に示すとおりである。

- ・ 100mm の変形能力を確保する。
- ・ 降伏点は 10kN 程度とする。

階高 3000mm の時に 1/15rad.以上の変形能力を確保するためには、壁体脚部側と壁体頭部側それぞれ 100mm の変形能力があればよい。また、スギ無等級材の基準強度は 1.8kN/mm^2 であり、CLT パネルの全断面が有効であると仮定すると、150mm 厚、壁長さ 1000mm の CLT パネルの短期基準耐力は 180kN となる。しかしながら、ここでは金物を降伏させることを目的とするため、150mm 厚、壁長さ 1000mm の CLT パネルの短期基準耐力を 40kN と設定し、さらに、壁長さ 1000mm あたり 4 個の金物を設置（両面 @500mm）することとした。

塑性変形してエネルギー吸収するためには、図 4 のようなエの字型接合金物として、中央の棒状部分の上下端を塑性変形させることが考えられるが、大変形時に棒に引張力が作用し、変形能力を阻害することが予想されるため、図 5 に示すようなくの字型接合金物を考案した。

3.2. 荷重変形予測

図 6 に示すように、接合金物の有効高さを h 、せん断力 P を作用させた時のせん断変形を δ とすると、くの下半分（上半分）は片持梁に先端集中荷重が作用した時と同様の変形状態となり、その梁長さは $\sqrt{2}/2h$ 、先端たわみは $\sqrt{2}/2\delta$ 、集中荷重は $\sqrt{2}/2P$ となる。これを、片持梁に先端集中荷重が作用した時の荷重と変形の関係を示す式(1)に代入すると、見かけの剛性 K は式(2)のようになる。また、反曲点高

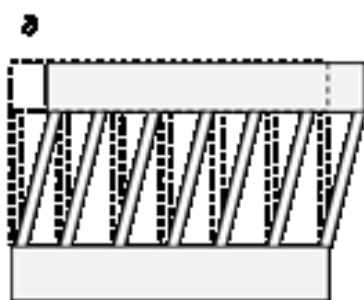


図 4 エの字型接合金物

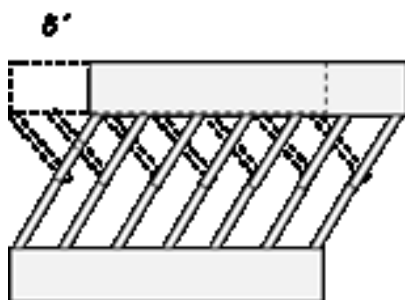


図 5 くの下字型接合金物

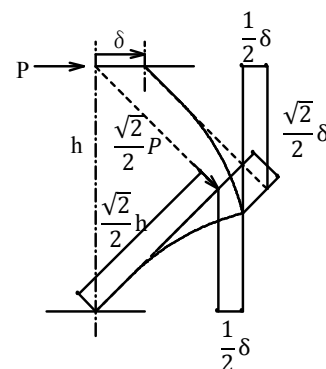


図 6 接合金物の変形概念図

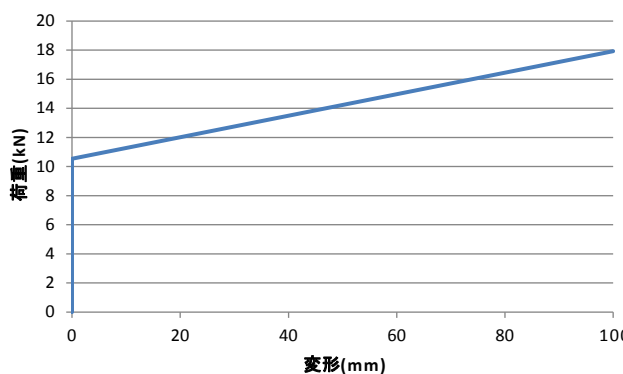


図 7 予測荷重変形関係

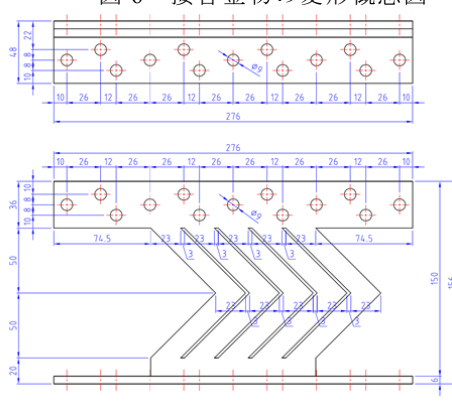


図 8 接合金物

さ比を 1/2 とすると、棒状部分の上下端に作用するモーメントは $P \times h/2$ となる。したがって、棒状部分の上下端の全断面が降伏する荷重を接合金物の降伏荷重 P_y とすると、降伏応力度 σ_y 、塑性断面係数 Z_p を用いて、式(3)のように表すことができる。さらに、全断面が破断荷重に達する荷重を終局荷重 P_u とし、その時の変形を 100mm とすると、図 7 のような荷重変形関係となる。ここでは、図 8 に示すような接合金物を想定した。実際には塑性変形する部分の大きさによって変形性能は異なるが、ここでは簡単のため、前述のように設定した。

$$\delta = \frac{Pl^3}{3EI} \dots \text{式(1)}$$

$$K = \frac{6\sqrt{2}EI}{h^3} \dots \text{式(2)}$$

$$P_y = \frac{Z_p \cdot \sigma_y \cdot 2}{h} \dots \text{式(3)}$$

4. 接合金物の静的繰返し加力せん断実験

4.1. 試験体および加力方法

試験体図を図 9 に示す。実際には壁パネルと床パネルとの間に鉛直荷重に応じた摩擦力が作用するが、ここでは接合金物の性能のみに着目するため、壁パネルと床パネルの間にスライダーを設置し、摩擦力を極力除去することとした。加力スケジュールは耐力壁の評価方法¹⁾に準じて、壁高さを 3000mm として設定し、 $\pm 2.5\text{mm}$ 、 $\pm 3.3\text{mm}$ 、 $\pm 5.0\text{mm}$ 、 $\pm 7.5\text{mm}$ 、 $\pm 10.0\text{mm}$ 、 $\pm 12.5\text{mm}$ 、 $\pm 15.0\text{mm}$ 、 $\pm 20.0\text{mm}$ 、 $\pm 30.0\text{mm}$ 、 $\pm 50.0\text{mm}$ （それぞれ、 $1/600\text{rad.}$ 、 $1/450\text{rad.}$ 、 $1/300\text{rad.}$ 、 $1/200\text{rad.}$ 、 $1/150\text{rad.}$ 、 $1/100\text{rad.}$ 、 $1/75\text{rad.}$ 、 $1/50\text{rad.}$ 、 $1/30\text{rad.}$ に対応）で各 3 回正負交番繰返しすることとした。加力速度は約 6.0mm/s とした。

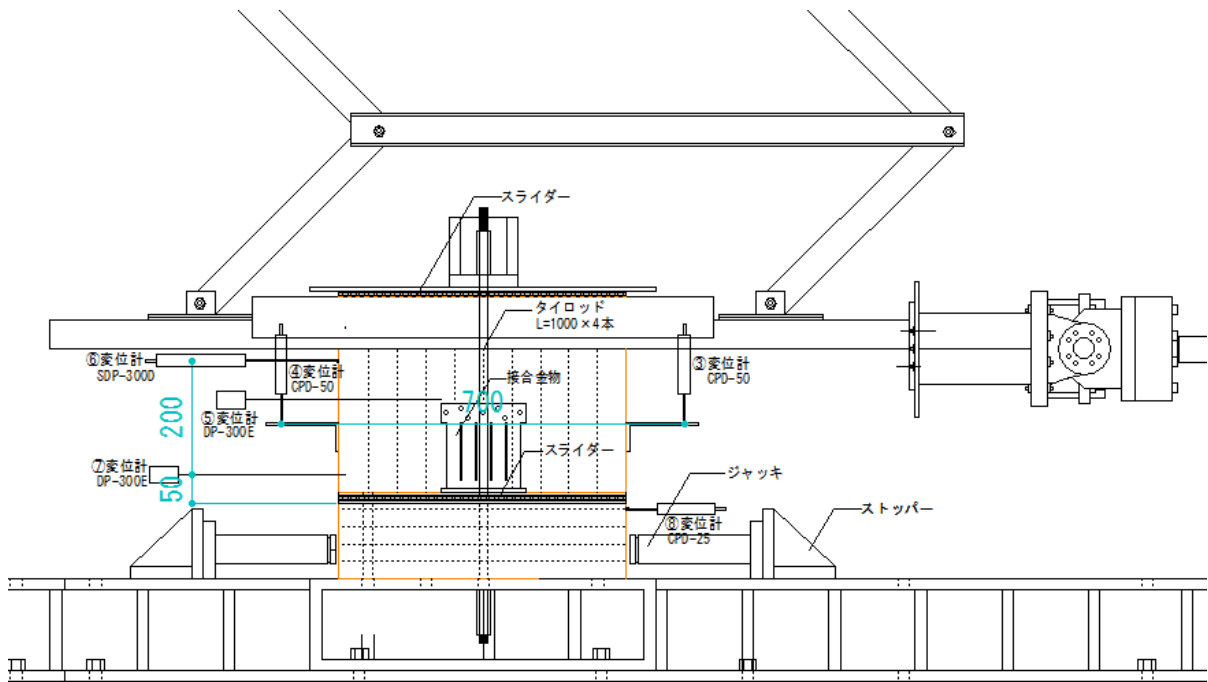


図 9 試験体図

4.2. 実験結果

実験で得られた荷重変形曲線を図 10 に示す。前節による荷重変形予測結果を併せて示す。±7.5mm (1/200rad.) からループが大きくなり、塑性変形によりエネルギー吸収していることがわかる。降伏点は明確ではないが、15kN 程度と看取される。また、±20mm (1/75rad.) で荷重増分が再び増加するが、これは鋼の歪み硬化および大変形による棒状部分の引張抵抗によると思われる。

また、十分な変形が得られる前に金物に亀裂が発生し、荷重の急激な低下が見られた。荷重変形予測はやや過小評価していると言っていることができる。

5. まとめ

CLT を効果的に利用して大規模木造建築物を実現するための接合技術の開発のため、解析と実験による検討を行った。じゅうぶんな塑性変形能力とエネルギー吸収能力を付与するため、くの字型の金物を考案し、一定の効果を得たが、亀裂の発生を防ぐ等により、さらに大きな塑性変形能力が必要である。

謝辞

本研究は中部大学総合工学研究所 平成 25 年度の第 6 部門の援助を受け遂行されたものであり、ここに謝意を表す。また、本研究の遂行にあたり、中部大学大学院生の李煥哲君の協力をいただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) (財) 日本・住宅木材センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2008 年度版），2009.1

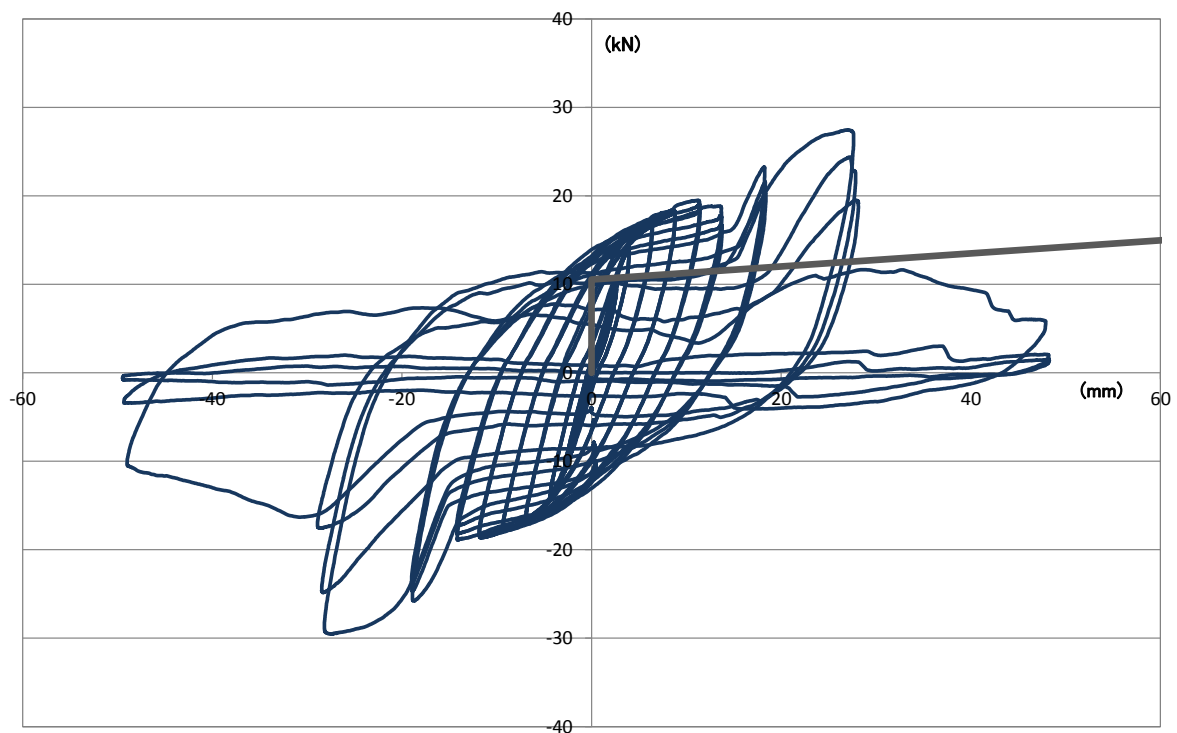


図 10 荷重変形関係