

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560696

研究課題名(和文) 木材繊維方向の組合せにより接合部剛性・強度および靱性を確保し制御する研究

研究課題名(英文) Study on control wooden joint rigidity, strength and ductility with combinations of wooden fiber directions.

研究代表者

那須 秀行 (NASU, Hideyuki)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：40611249

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：木質構造に大径のボルトや長ビスを用いて接合する場合、それらを埋没する木材の繊維方向を組み合わせることでその接合部特性を剛性型や靱性型或いはその両特性に制御できるか研究を進めた。本研究では木材繊維方向の組合せ比率としてRp率(Ratio of parallel)を定義し、ビスの径と長さの組み合わせを変えパラメトリックに振って引張実験と数値解析および画像処理解析を進めた。研究成果として、Rp率が上がるにつれて初期剛性は高くなり、逆に下がると繊維直交成分が増しビスに木材繊維が引っ掛かり靱性が高くなることを明らかにした。また、Rp率と接合部剛性、靱性の増減についての関係式を提案した。

研究成果の概要(英文)：We have tried to control behavior such as rigidity type or ductility type with combinations of wood fiber direction using screws in wooden structure for structural design. Conventionally, energy absorption of joints in wooden structure has been obtained by yield deformation of steel parts. We defined the combination ratio of wood fiber as Rp (Ratio of parallel). First year, we used special large diameter bolts to get high rigidity and ductility with combinations of parallel and orthogonal fiber directions. Second and third year, we used long-vis which are more common in the market. We made all CLT test pieces of Japanese cedar by ourselves. We compared the joint behavior with experiments and analysis. As a conclusion, we got following results of this study. When Rp rises, rigidity will be higher. On the other hand, ductility will be higher when Rp falls. We suggested the relationship equation for Rp and the rigidity and ductility of the increase or decrease by the theoretical value.

研究分野：木質構造

キーワード：木質構造 接合部 木材繊維方向 CLT 特性制御 スクリューボルト 長ビス 大径ボルト

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 地球温暖化等により環境問題に対する意識が高まる中、木材および木質構造への期待が高まっている。国内においても平成22年に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行され、木材需要は拡大すると予想される。一方、世界的に注目される新しい木質構造材である直交集成板(クロスラミネーテッドティンバー、以下CLTと呼ぶ)が国内でも活発に研究されつつあった。欧州においてはCLTを用いた中層の木造建築が実用化しているが、日本ではCLTがJAS認定されたばかりであること、地震国であり接合部の高強度化が必要であること等から普及しているとは言いがたい。しかしながら、CLTは木材の利用促進や遮音性等の向上も見込まれ、新しい構造材として期待できる。

## 2. 研究の目的

(1) 木質構造における接合部の高強度化および地震時のエネルギー吸収能力の向上に関する研究を行う。また、大径ボルト(図1)及びより入手しやすい長ビス(図2)による接合部の木材繊維の割合が接合性能に及ぼす影響についても研究考察を行った。従来、木質構造の接合部においては、接合金物の変形により靱性を確保してきたが、本研究では木材繊維方向の組合せによりその接合剛性と靱性を確保できないか、またそれを任意にコントロールできないか、について研究を進めた。試験体としては主にCLTを活用した。

## 3. 研究の方法

(1) 高い初期剛性と強度、高い靱性を有する接合方法としてまず大径ボルトを用いた接合部実験から研究を進めた。大径ボルトの径、タップのピッチ、羽の角度等をパラメータとして強度の向上と共に、スプリットフォースによる割裂を防ぐ手法等を研究した。国産材であるスギやヒノキ、カラマツを用いて試験体を試作した(図3)。並行して木材の直交異方性、繊維方向の組合せに注目しながら接合部として上手に力を発揮できるよう数値解析を行い、接合部の主に靱性によるエネルギー吸収能力を向上させるべくパラメトリックに寸法条件を振って最適解を探った。

(2) 大径ボルトを用いた引抜き実験により得た結果(Rp率(図4)を変えると接合特性が変わること、接合部にかかる木材繊維方向の組み合わせを変えることで、接合部を剛性型や靱性型に制御できる可能性があること)を基に、より汎用性のある接合部を目指し、長ビス(径6φ、8φ、長さ170~290mm)を用いて実験を行った。木材繊維方向の組合せ比率をRp率(Ratio of parallel)として定義し、それをパラメータに数値解析および画像処理解析を行った。Rp率は接合部にかかる木材繊維の平行方向の割合を示し、例えば、全ビスを繊維平行方向に挿入すると100%、全ビスが繊維

直交方向だと0%、直交および平行方向に同数挿入すると50%となる。ビスの径と長さの組み合わせを変えRp率を0%~100%までパラメトリックに振って実験と解析により接合挙動を比較検証した。具体的には以下の図に示すRp率100, 50, 40, 0%等について実験を行った(図5~10)。Rp率と剛性、靱性の増減について考察を行った。

(3) 理論値の算出は次の手順により行った。実験から各仕様の平均値を求め、平均値を求めたRp率0%と100%の長ビスの引き抜けに対する定着面積のせん断応力度をそれぞれ $\tau_{xc}$ 、 $\tau_{xp}$ とした(式3.1、3.2)。 $\tau_{xc}$ と $\tau_{xp}$ それぞれに2本分の定着面積を乗じて足し合わせたもの(式3.3)をRp率50%の理論値として実験値と理論値の整合性を確かめた。靱性はその傾向を見るために引抜け変位5mmまで求めた。次に、Rp率を0%から100%までの10%刻みで求めるために長ビスを10本分と仮定し、Rp率10%の理論値ではRp率0%の応力度 $\tau_{xc}$ に9本分の定着面積を、Rp率100%の応力度 $\tau_{xp}$ に1本分の定着面積をそれぞれ乗じて足し合わせた(式3.3)。この手法により初期剛性・最大耐力・靱性を求めた。

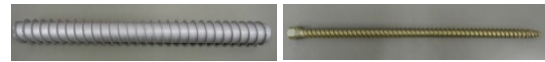


図1 大径ボルト

図2 長ビス

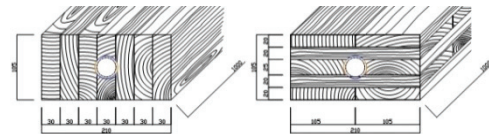


図3 大径ボルト試験体(集成材型, CLT)

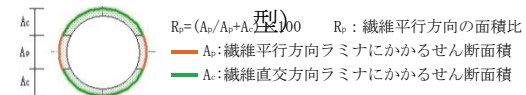


図4 大径ボルトのRp率

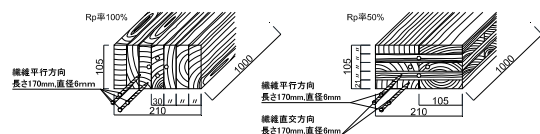


図5 Rp100 試験体図

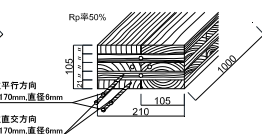


図6 Rp50 試験体図

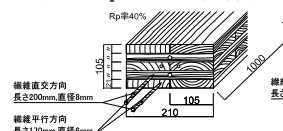


図7 Rp40 試験体図

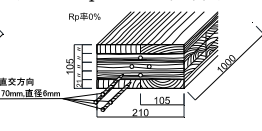


図8 Rp0 試験体図

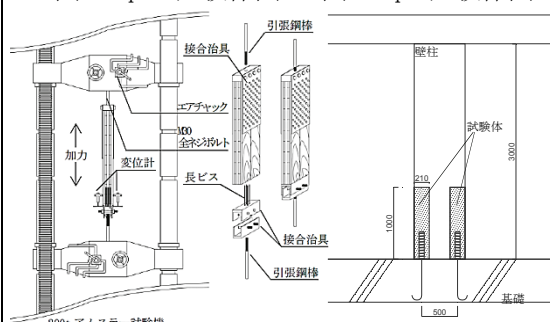


図9 試験体の設置

図10 想定する接合部

## 理論値の算出式

$$\tau_{xc} = \frac{Y_{xc}}{A \cdot n_c} \quad (\text{式 3.1}) \quad \tau_{xp} = \frac{Y_{xp}}{A \cdot n_p} \quad (\text{式 3.2})$$

$$Y_x = \left( \tau_{xc} \cdot A \cdot n_c \right) + \left( \tau_{xp} \cdot A \cdot n_p \right) \quad (\text{式 3.3})$$

$\Sigma_{xc}$  : Rp 率 0%の変位 X 時の応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\Sigma_{xp}$  : Rp 率 100%の変位 X 時の応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

A : 長ビス一本分の定着面積 (mm<sup>2</sup>)

$n_c$  : Rp 率 0%の長ビスの埋込み本数

$n'_c$  : 任意の Rp 率の繊維直交方向への長ビスの埋め込み本数

$n_p$  : Rp 率 100%の長ビスの埋込み本数

$n'_p$  : 任意の Rp 率の繊維平行方向への長ビスの埋め込み本数

$Y_x$  : 任意の Rp 率の変位 X 時の荷重 (N)

$Y_{xc}$  : Rp 率 0%の変位 X 時の荷重 (N)

$Y_{xp}$  : Rp 率 100%の変位 X 時の荷重 (N)

## 4. 研究成果

(1) 繊維平行方向では初期剛性が高く、繊維直交方向ではエネルギー吸収能力が高く粘りのある破壊性状を示すことが確認できた。また、繊維平行方向の成分 (Rp 率) の増加に伴い初期剛性が高くなり、繊維直交方向の成分の増加に伴いエネルギー吸収能力が高く粘りのある破壊性状を示すことが検証できた。

(2) 大径ボルトの外径を大きくすると最大耐力と初期剛性が上がり、CLT ではエネルギー吸収能力も上がった (図 11、12)。しかし、集成材 (Rp 率 100%) の場合、大径ボルト径を大きくすると縁端距離方向に割裂を生じやすくなる。CLT では集成材に比べ割裂しにくい、これは繊維直交方向のラミナが割裂防止材 (バンド材) として働いたためと考えられる。

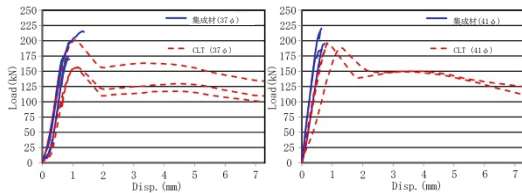


図 11 大径ボルト 37φ の荷重変位曲線      図 12 大径ボルト 41φ の荷重変位曲線

(3) 大径ボルトを用いた接合部実験の結果、CLT は割裂しにくく粘りのある破壊性状を示し、初期剛性は集成材とほとんど同じか若干劣る程度であった。また最大耐力後であっても、CLT は集成材より高い耐力を保持していた。

(4) CLT を用いた大径ボルト接合は、剛性をほとんど下げずに靱性を大幅に上げられエネルギー吸収能力の高い接合部を実現し、高い剛性と靱性を両得することができた。

(5) 長ビスを用いた引抜き実験の結果、Rp 率が上がるにつれて初期剛性は高くなり、最大耐力と靱性は低くなる傾向があった (図 13~18)。直交方向の繊維は剛性が低いが、ビスの引き抜けに対して木材繊維が引っかかり易く強い抵抗力を発揮すると考えられる。Rp 率が上がるにつれ最大耐力と靱性は低くなり初期剛性が高くなった。

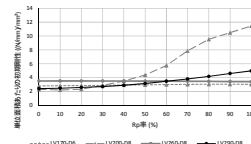


図 13 単位面積当たりの初期剛性

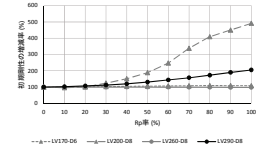


図 14 初期剛性の百分率

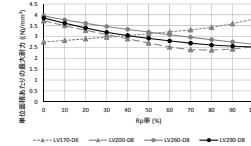


図 15 単位面積当たりの最大耐力

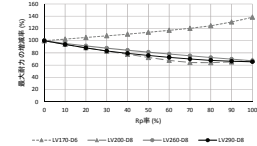


図 16 最大耐力の百分率

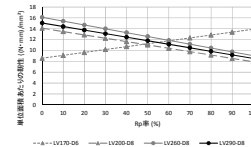


図 17 単位面積当たりの靱性

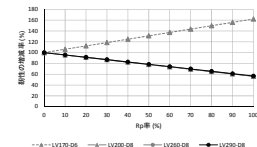


図 18 靱性の百分率

(6) 長ビス接合では Rp 率が 10%上がると最大耐力は約 3.3%減少し、靱性は約 4.4%減少した。初期剛性は節などの影響を受け易く明確な上昇率は示せないが Rp 率が上がると高くなる傾向があった。Rp 率による関係式 (式 4.1、式 4.2) を提案した。長ビスを用いて接合特性を制御できる可能性がある。

## 関係式

$$P_x = P_0 \times \left( 1 - \frac{0.33 \cdot X}{100} \right) \quad (\text{式 4.1})$$

$$D_x = D_0 \times \left( 1 - \frac{0.44 \cdot X}{100} \right) \quad (\text{式 4.2})$$

$P_0$  : Rp 率 0%の単位面積あたりの最大耐力 (N/mm<sup>2</sup>)

$P_x$  : 任意の Rp 率の単位面積あたりの最大耐力 (N/mm<sup>2</sup>)

$D_0$  : Rp 率 0%の単位面積あたりの靱性 (N・mm/mm<sup>2</sup>)

$D_x$  : 任意の Rp 率の単位面積あたりの靱性 (N・mm/mm<sup>2</sup>)

0.33 : 最大耐力の減少定数

0.44 : 靱性の減少定数

X : 任意の Rp 率

## <引用文献>

① 方波見 雅彦、野口 弘行、内山 善明、中里 匡陽、数納 宣吾、全ねじボルト埋込み接着接合の基本性状に関する研究 その 24 木材繊維方向が引張耐力・剛性に及ぼす影響 有限要素法解析結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、2013 年 8 月

② 野口 弘行、那須 秀行、岩崎 誠司、柳澤 瑞穂、小林 幹大、萩生田 秀之、複合応力下(曲げモーメント・せん断力・軸力)における大径ボルトを用いた木質ラーメン接合部に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 77 巻、第 673 号、2012 年 3 月、pp. 389-396

- ③ 坪内 啓一、本岡 淳一、深澤 大樹、野口 弘行、全ねじボルト埋込み接着接合の基本性状に関する研究 その3 有限要素立体解析による接合引張耐力の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、2009年8月
- ④ 本岡 淳一、坪内 啓一、内山 善明、野口 弘行、全ねじボルト埋込み接着接合の基本性状に関する研究 その2 ボルト付着面積と引張耐力の関係、日本建築学会大会学術講演梗概集、2008年9月

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① 那須 秀行、カナダケベック出張報告 WCTE 2014 木材技術国際学会での論文発表、日本工業大学 研究報告、査読無、第45巻 第1号、2015
- ② Satoshi Oonishi, Hideyuki Nasu, Yasuteru Karube, Masahiro Inayama, Study on Compressive Strain of CLT Wall bottom under the Extreme Vertical Load, 12<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering, 査読有、2014、ABS140
- ③ 那須 秀行、研究室の紹介 日本工業大学 那須研究室、Journal of Timber Engineering, 査読無、木質構造研究会 Vol. 27 No. 5、2014、pp. 161-166
- ④ 那須 秀行、CLT(Cross Laminated Timber) 工法の実用化に向けて、木の建築フォーラム、査読無、NPO 木の建築 35号、2013年3月、pp. 38-41

[学会発表] (計10件)

- ① 苅部 泰輝、大西 郷、那須 秀行、木材繊維方向の組合せにより接合部の特性を制御する研究 実験による接合特性の推測および特性変化の関係式の提唱、日本建築学会大会 2015 学術講演梗概集(講演番号 22016)、2015年9月4日、東海大学(神奈川県・平塚市)
- ② 並木 淳史、大西 郷、苅部 泰輝、那須 秀行、長ビスを用いた CLT 接合部のせん断性能に関する研究【その3】打込み角度と端空き距離の影響について、日本建築学会大会 2015 学術講演梗概集(講演番号 22055)、2015年9月4日、東海大学(神奈川県・平塚市)
- ③ 並木 博一、那須 秀行、デジタル画像相関法を用いた木材の割裂性状に関する研究、日本建築学会大会 2015 学術講演梗概集(講演番号 22031)、2015年9月4日、東海大学(神奈川県・平塚市)

- ④ 那須 秀行、苅部 泰輝、大西 郷、長ビスを用いた CLT 接合部のせん断性能に関する研究【その1】実験概要と試験体説明、日本建築学会大会 2014 学術講演梗概集(講演番号 22249)、2014年9月12日、神戸大学(兵庫県・神戸市)
- ⑤ 大西 郷、那須 秀行、苅部 泰輝、長ビスを用いた CLT 接合部のせん断性能に関する研究【その2】実験結果と考察、結論、日本建築学会大会 2014 学術講演梗概集(講演番号 22250)、2014年9月12日、神戸大学(兵庫県・神戸市)
- ⑥ 崔賢喆、那須 秀行、苅部 泰輝、稲山 正弘、長ビスを用いた CLT 接合部に関する研究、日本建築学会大会 2013 学術講演梗概集(講演番号 22011)、2013年8月31日、北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑦ 大西 郷、那須 秀行、稲山 正弘、苅部 泰輝、極大鉛直力による CLT 壁脚部の潰れに関する研究、日本建築学会大会 2013 学術講演梗概集(講演番号 22288)、2013年8月31日、北海道大学(北海道・札幌市)
- ⑧ 那須 秀行、崔賢喆、野口 弘行、方波見 雅彦、大径ボルトを用いた CLT 接合部に関する研究 その1 実験目的・概要、日本建築学会大会 2012 学術講演梗概集(講演番号 22286)、2012年9月12日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)
- ⑨ 崔賢喆、那須 秀行、野口 弘行、方波見 雅彦、大径ボルトを用いた CLT 接合部に関する研究 その2 実験結果・考察、日本建築学会大会 2012 学術講演梗概集(講演番号 22287)、2012年9月12日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)
- ⑩ 方波見 雅彦、野口 弘行、那須 秀行、内山 善明、崔賢喆、大径ボルト接合の木材繊維方向による力学的挙動に関する研究、日本建築学会大会 2012 学術講演梗概集(講演番号 22285)、2012年9月12日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

[その他]

那須研究室 [木質構造]

[http://www.nit.ac.jp/gakka/subject/kyoin/7/arc\\_nasu.html](http://www.nit.ac.jp/gakka/subject/kyoin/7/arc_nasu.html)

Nasu Lab. Timber Engineering Lab.

<http://leo.nit.ac.jp/~nasu.hid/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

那須 秀行 (NASU, Hideyuki)

日本工業大学・工学部・教授

研究者番号：40611249