

## 論文の内容の要旨

生物材料科学専攻

平成 27 年度博士課程進学

氏 名 : 小谷 竜城

指導教員名 : 稲山 正弘

論文題目 集成材の繊維平行方向に埋め込まれたラグスクリューボルト接合部の引抜抵抗メカニズムの解明と設計式の提案

ラグスクリューボルト (Lagscrewbolt、以下、LSB) 接合部は、先孔を開けた木材に LSB を埋め込む (振じ込む) ため美観性・施工性に優れる。また、木材と LSB が噛み合った状態となるため初期ガタが少なく、高剛性な接合部が実現可能であり、木質ラーメン構造の接合部として用いられることが多い。一方で LSB には、JIS 規格等の規格が存在せず、メーカー独自の規格のため、開発・研究は限られた企業や大学等の研究機関で行われており、限られた研究者による研究事例のみである。そのため、現状で提案された設計法は 1 種類で、この設計法は、LSB と木材の樹種・強度等級の組み合わせ毎に実験で設計に必要な値を評価する必要があり、実務的でない。本研究では、実務設計での有用性や合理性を考慮し、実験値や実験から求まる調整係数を用いず、基準強度等の既知の値から LSB 接合部の設計が可能で、新たな設計式の提案を目的とする。なお、本研究では、集成材の繊維平行方向に埋め込まれた LSB 接合部を対象とする。

本論文は、5つの章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、LSB 接合部の既往の研究や、現状の設計法の問題点や課題を提示し、本研究の位置付けを明確にした。

第 2 章では、Fig.1 に示す通り、本研究で想定する接合部の力学モデルを明確にし、これに対応した標点間距離で接合部変位を定義することで、モデル化と矛盾が生じないようにした。この定義に基づいて接合部実験結果を評価し、既存の LSB 接合部の設計法である中谷・小松が提案した理論式 (以下、理論式) と比較検討を行った。理論式は、LSB の  $E_s A_s$  ( $E_s$  は LSB のヤング係数、 $A_s$  は LSB の有効断面積) と木材の  $E_w A_w$  ( $E_w$  は木材のヤング係数、 $A_w$  は木材の有効断面

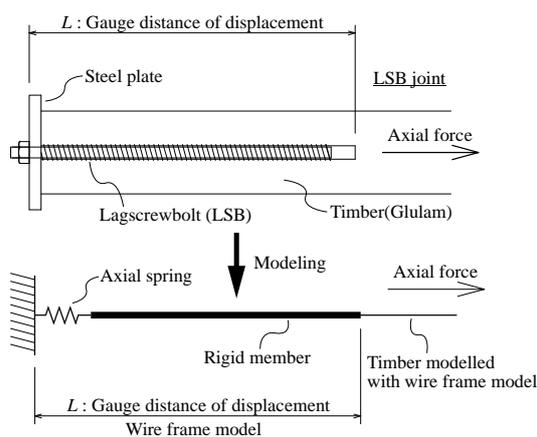


Fig.1 Modeling of joint and definition of deformation

積)の大小関係で接合部変位の評価位置が異なるが、第2章で対象とした LSB 接合部は、 $E_w A_w \leq E_s A_s$  であるため、LSB 先端位置での LSB とその断面位置における木材との相対変位が接合部変位となり、実験的に理論式の整合性を確認することができない。そこで、理論式と力学的に等価なモデルである線材置換モデルを用いた数値解析で接合部変位の標点間距離を接合部実験と一致させて比較検討したところ、初期剛性  $K$  と埋め込み深さの関係は概ね一致したが、値は実験値に対して解析値が大きく下回る結果となった。なお、最大耐力  $P_{max}$  は、LSB と木材の境界領域(以下、境界領域)のせん断強度に、境界領域のせん断特性を評価するための実験方法である薄板試験の結果の信頼水準 75%の 95%下側許容限界値を用いることで、接合部実験値に対して計算値が安全側の評価になることが確認された。

初期剛性  $K$  の解析値が、実験値に対して過小評価することに対し、有限要素解析(以下、FEM 解析)を用いて検討を行った。Fig.2 に示す FEM 解析モデルは、LSB 埋め込み時の摩擦や捩じりによる境界領域のせん断性能低下を考慮して、FEM 解析モデルの境界領域の材料定数を薄板試験結果と一致するように低減し、モデル化を行った。同解析モデルを用いた解析結果は、線材置換モデルを用いた解析結果と同様に、実験値に対して過小評価する結果となった。この原因は、薄板試験で境界領域のせん断性能を評価することであり、接合部実験結果と FEM 解析結果が一致するように FEM 解析モデルの境界領域の材料定数を調整したところ、薄板試験結果と一致するように調整した場合に対して約 3.3 倍の調整率となった。この原因は、薄板試験は境界領域のせん断変形のみが生じるように、試験体を LSB の外径+5mm の孔が開いた鋼板で挟んで境界領域以外の変形を拘束するが、実際の接合部では境界領域以外の変形も生じるためと考えられる。ゆえに、薄板試験の境界条件は、接合部実験の境界領域のせん断性状を完全に再現できていない可能性が見出された。

上記以外に第2章では、理論式が実験結果から工学的に判断して評価を行っている木材の有効断面積  $A_w$  を FEM 解析結果から力学的に評価する方法を提案した。FEM 解析結果から木材の有効断面積  $A_w$  を評価する場合、木材側の応力分布は三次元的に広がっており、直接的に有効断面積  $A_w$  を評価することは困難である。そこで、Fig.3 に示す力学モデルを用いて、LSB に生じる引張軸力の埋め込み深さ方

積)の大小関係で接合部変位の評価位置が異なるが、第2章で対象とした LSB 接合部は、 $E_w A_w \leq E_s A_s$  であるため、LSB 先端位置での LSB とその断面位置における木材との相対変位が接合部変位となり、実験的に理論式の整合性を確認することができない。そこで、理論式と力学的に等価なモデルである線材置換モデルを用いた数値解析で接合部変位の標点間距離を接合部実験と一致させて比較検討したところ、初期剛性  $K$  と埋め込み深さの関係は概ね一致したが、値は実験値に対して解析値が大きく下回る結果となった。なお、最大耐力  $P_{max}$  は、LSB と木材の境界領域(以下、境界領域)のせん断強度に、境界領域のせん断特性を評価するための実験方法である薄板試験の結果の信頼水準 75%の 95%下側許容限界値を用いることで、接合部実験値に対して計算値が安全側の評価になることが確認された。

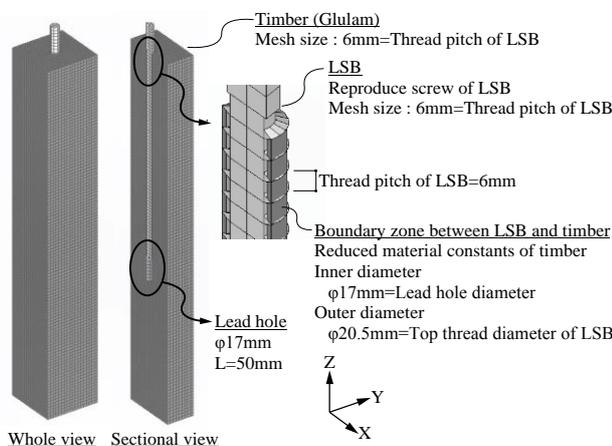


Fig.2 FEM analysis model of LSB joint

向の変化から、木材に生じる力とひずみを求め、木材の有効断面積  $A_w$  を逆算した。その結果、理論式では埋め込み深さによらず木材の有効断面積  $A_w$  は一定としているが、LSB の埋め込み深さ毎に設定する必要性が見出された。

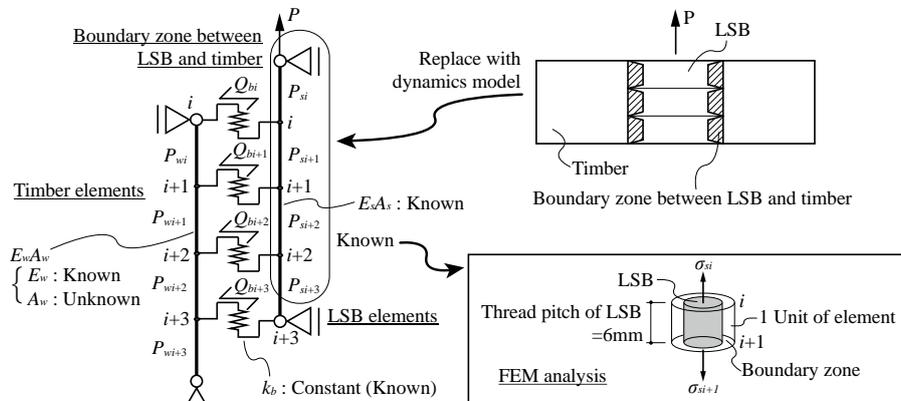


Fig.3 Calculation of effective cross-sectional area of timber

第3章では、LSB の引抜抵抗メカニズムを仮定し、線材置換モデルを用いた数値解析で検証することで、①耐力発現メカニズムと、②弾性範囲における接合部変形の発生メカニズムについて知見が得られた。

①耐力発現メカニズム

境界領域のせん断応力は、理論式より、LSB の根元もしくは先端で最大となる。そのため、Fig.4 に示す通り、接合部の降伏耐力  $P_y$  は、せん断応力が最大となる位置が境界領域のせん断特性を完全弾塑性モデルで仮定した際の降伏点  $p_y$  に達した時点となり、その後、LSB の根元側及び先端側から LSB の埋め込み深さ方向の中央に向けて順次塑性化が進行する。境界領域のせん断性状に十分な塑性変形能力がある場合は、境界領域全域が塑性状態  $p_y$  に達した（以下、全塑性状態とする）時点が、接合部の最大耐力  $P_{max}$  となる。一方、境界領域の塑性変形能力が小さい場合は、接合部の最大耐力  $P_{max}$  は全塑性状態の耐力よりも低くなり、接合部の破壊モードは脆性的となる。なお、理論式で最大耐力  $P_{max}$  時に想定する境界領域のせん断応力分布は、本論文にあてはめると降伏耐力  $P_y$  時の応力分布となる。これは、一般的に LSB 接合部は脆性的な破壊挙動を示す接合形式であることから、境界領域の塑性変形能力が小さく、接合部の降伏耐力  $P_y$  は最大耐力  $P_{max}$  とほぼ一致するためと考えられる。

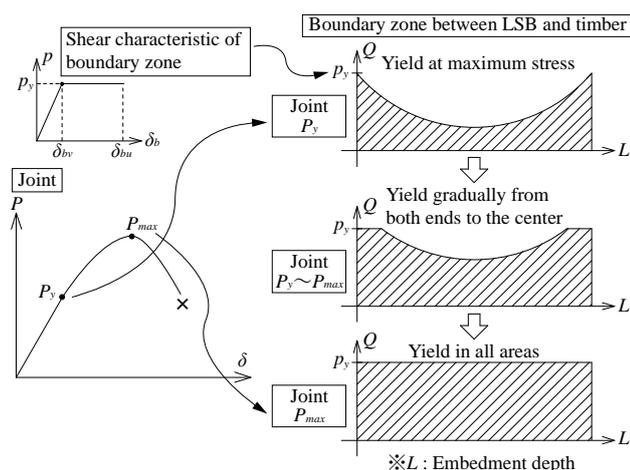


Fig.4 Mechanism of pull-out resistance

②弾性範囲における接合部変形の発生メカニズム

第2章冒頭で示した接合部のモデル化より、接合部変位は、LSB 根元と LSB 先端位置での木材との相対変位となる。そのため、Fig.5 に示す通り、LSB の伸び量+LSB 先端位置での境界

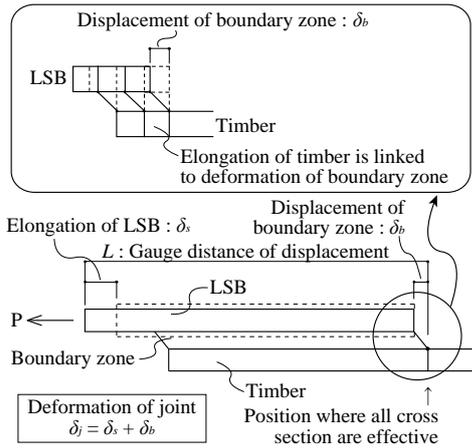


Fig.5 Schematic diagram of joint deformation

領域のせん断変位の合計値が接合部変位となる。この時、接合部内の木材に伸びが生じたとしても、変位の基点が木材の木口側でないため接合部変位には影響を与えない。なお、LSBの伸び量は埋め込み深さに比例するが、LSB先端位置での境界領域のせん断変位は応力分布と関係しているため埋め込み深さに比例しない。ゆえに、LSBの伸び量と境界領域のせん断変位の割合によって、接合部の初期剛性 $K$ と埋め込み深さの関係性が変わることが知見として得られた。

第4章では、理論式で示された境界領域のせん断応力度分布を基に、第2章及び第3章の検討で得られた

知見を取り込んだ新たな設計式を提案した。提案した設計式は、接合部耐力の決定要因がLSBの降伏や破断、もしくは木材の割裂等の破壊ではなく、LSBの引抜け、即ち、境界領域の降伏及び破壊によるものに限定した。そして、幾何学的な物理量と材料定数に分離して定式化し、応力分布を無次元化することで任意の材料定数に対して計算の簡素化を図った。設計式の妥当性は、異なる2種類のLSBで、樹種及び埋め込み深さを変数とした接合部実験結果と比較することで検証を行った。その結果、最大耐力 $P_{max}$ は、境界領域のせん断強度 $f_{bs}$ に既知の値であるせん断の基準強度 $F_s$ を用いて計算することで、Fig.6に示す通り、実験値に対して概ね妥当な結果になることが確認された。降伏耐力 $P_y$ は、最大耐力 $P_{max}$ と同様にせん断の基準強度 $F_s$ から計算可能であるが、施工性向上のためのLSB先端のテーパ加工や、製造上の問題でねじ山が不完全な部分（以下、不完全ねじ部）がLSBの全長によらず一定の範囲に生じてしまう影響を考慮し、LSBの全長に対する不完全ねじ部を除くLSBの有効長さの割合で耐力を低減する必要がある。また、初期剛性 $K$ は、計算時にLSB先端位置での境界領域の見かけのせん断弾性係数 $G'$ を用いるが、LSB先端の不完全ねじ部の影響で他の部分と比較してせん断剛性が低下することを考慮し、見かけのせん断弾性係数 $G'$ を細径タイプのLSBは $G'=E_0/40$ 、太径タイプは $G'=E_0/200$ とすることで、複数の仕様で実施した接合部実験結果に対して概ね妥当な結果になることが確認された。しかしながら、設計式の精度向上やLSB接合部の一般解として用いるためには、境界領域のせん断強度 $f_{bs}$ や見かけのせん断弾性係数 $G'$ 及び塑性変形能力の評価が今後の課題として残った。

第5章では、本研究で得られた知見をまとめた。

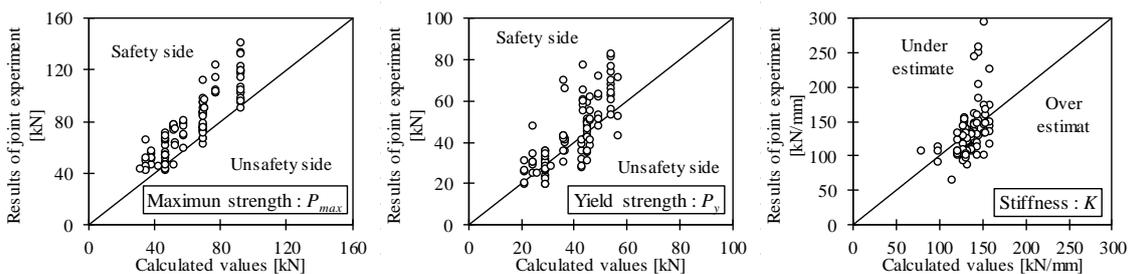


Fig.6 Comparison of experimental and calculated values