

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760425

 研究課題名（和文） 破壊力学を用いた繊維直交方向荷重を受ける
複数本のボルト接合部の耐力推定手法の開発

 研究課題名（英文） An estimation method of multi-bolted connections
loaded perpendicular to the grain with fracture mechanics

研究代表者 神戸 渡（KAMBE WATARU）

東京理科大学・工学部第一部建築学科・嘱託助教

研究者番号：90453000

研究成果の概要（和文）：

本研究では、木質構造において、繊維直交方向に荷重を受ける複数本のボルトを用いた接合部の耐力を推定する手法の開発を目的としている。

実験においては、複数行ボルト接合、複数列ボルト接合、格子配置ボルト接合と3段階でボルトの配置計画を変化させた実験を行った。各段階において、端距離、ボルト相互の距離を変化させ、それらの寸法がどのように構造性能に影響するかを検討することとした。

実験結果に関して、複数行ボルト接合と複数列ボルト接合では、き裂の発生が確認され、既往の提案式で対象としている破壊形式と同様であった。格子配置ボルト接合では、ほぼすべての試験体において脆性的な破壊が看守された。そこで、先の二つの接合に対して、既往の式を本接合部の構造性能にフィットさせるように応用し、その耐力の推定を行うこととした。その結果、その下限値もしくは平均値を推定できることが分かった。よって、新たな耐力推定手法を提案することができた。格子配置ボルト接合に対しては、現行の木質構造設計規準の方法によって、その下限値を推定できることを確認した。一方で、端距離が大きくなった場合、実験値が計算値を大きく上回ってしまうことがあり、過大な設計となってしまうケースがあることがわかり、今後の課題として取り組みたいと考えている。

研究成果の概要（英文）：

In this project, we would propose the estimation method of multiple bolted connection loaded perpendicular to the grain in timber engineering. Considering the arrangement of bolts in a joint, we could image the followings, with bolts in multiple-row, with a few bolts in a row and with gridded ones. Then we conducted loading tests with those types and applied the new strength-estimation method proposed by our past study.

As a result, we could confirm that the method is useful to estimate the crack initiation strength of multiple bolted connections loaded perpendicular to the grain.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22年度	1,000,000	300,000	1,300,000
23年度	900,000	270,000	1,170,000
24年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：木質構造、ボルト接合、集成材、破壊力学、割裂耐力

1. 研究開始当初の背景

木質構造建築物の接合部を作製する場合、ボルトなどの金属接合具を用いることが多い。日本建築学会 木質構造設計規準(木規準)において、このような接合部の設計耐力は、ヨーロッパ型降伏理論式(通称、EYT式)に基づき定式化されており、この式は世界的なスタンダードと言っているほど、各国の規準において使われている。この式で想定している破壊形式は、接合具の曲げ降伏もしくは木材部分がめり込み破壊、のいずれかである。しかしながら、木材部分に割れが発生するような場合が実際には存在している。そこで2006年に改訂された木規準では、破壊力学を応用した割裂耐力式が新たに追加された。この式はPut、Leijtenの成果に基づくもので、図1に示すように比較的長い梁が繊維直交方向に単一の接合具で加力された状態をモデルとして作成されたものである。

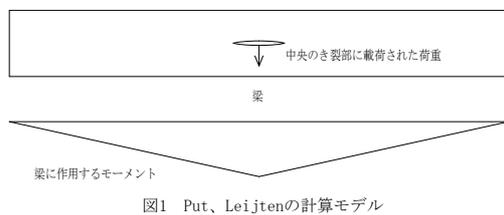


図1 Put、Leijtenの計算モデル

本申請者の実験や、他者の発表などを鑑みるに、現行の規準には次のような問題点が挙げられる。

- 1) 実際の実験の観察の中では、接合部を起点として、脆性的に破壊や、き裂が徐々に進展するように破壊見られ、それはボルト径や寸法によって異なるが、割裂耐力式ではそれらを考慮できない。唯一終局耐力を算出できるのみである。
- 2) 複数ボルトを用いた場合に適用できない(規準では、実験式による低減係数を示している)。
- 3) 加力角度を変えた場合の破壊性状を考慮できない。(角度を変えると破壊モードが変わるが、それらについては一般的なせん断力の検定となっており、割裂に関する検討はできない)。

住宅規模の建築物の場合、構造要素として耐力壁、中柱など耐力を負担も存在していることから、その全体としての構造性能は塑性能力を有するものとなる傾向がある。よって、従来のEYT式に基づく設計耐力式が想定している延性的な構造性能を想定していることが問題となることは比較的少ないと考えられる。ただし近年開発が進められている木質ラーメンなどに用いられる接合部では、木材に割れが発生するケースも見られる。このような接合部耐力に依存する傾向が大きい構法の場合、割裂に関する耐力も精度良く推

定できる手法が必要となると考えられる。近年様々な金物工法を用いた木質ラーメン工法の提案がなされているが、多くは実験的に一つの仕様に対して安全に使用できることを確認しているのみで、理論的な解明ができていないわけではない。それらにも対応できるような理論的に耐力を求める手法の開発が重要である。

本申請者は破壊力学を応用し、構造用集成材を用いた繊維直交方向荷重を受けるボルト接合部の耐力を求める手法の開発を近年行っている。この手法は有限要素解析(FEM)により、接合部近傍から発生する脆性破壊時の荷重と延性的に破壊する時のき裂発生荷重を推定するものである。提案しているモデルの例を図2に示す。この研究における実験観察から、端距離が短いものは脆性破壊しやすく、長いものは延性破壊しやすいことが分かり、それぞれに対する破壊クライテリアが適用できることを明らかとしている。よって、上記の1)の問題点に関しては、ある程度解決できている(ただし、FEMによるものであるため、簡易的な計算モデルの提案も今後は必要)。

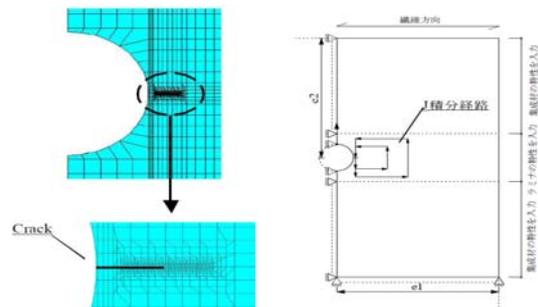


図2 ボルト接合のFEMモデル

2. 研究の目的

本研究では、繊維直交方向に荷重を受ける複数本ボルト接合を対象とし、破壊のメカニズムの解明と、き裂発生耐力の推定手法の開発を目的としている。既往の推定手法に関する説明は、実験結果との比較を行う際に改めて、説明する。本研究で対象とする接合部のボルトの配置例を図3に示す。左から、複数行ボルト接合、複数列ボルト接合、格子配置ボルト接合と呼ぶ。

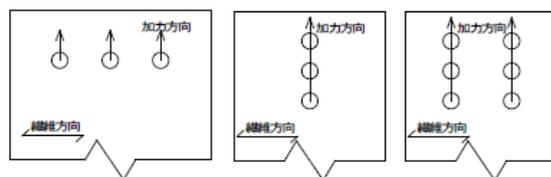


図3 ボルトの配置例

3. 研究の方法

本研究における実験の方法は、申請者が既往の実験で採用した方法を参考に行う。試験体に対し、静的加力実験を行い、ビデオカメラによって、き裂の発生挙動を把握する。実験状況の例を図4に示す。

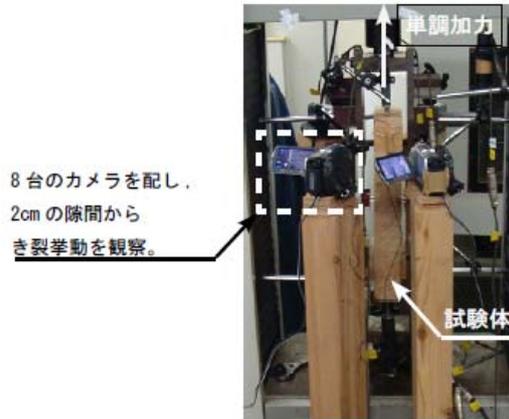


図4 実験状況 (1年目の実験)

実験におけるパラメータとして、複数列ボルト接合では、端距離に関して4d、7d、10d、相互距離s1に関して3d、7d、10d、14dを設定した。複数行ボルト接合では、端距離に関して4d、7d、10d、相互距離rに関して1.87d、5.62d、7.50d、9.37dを設定した。格子配置ボルト接合では、端距離に関して7d、10d、相互距離sに関して3d、7d、10d、相互距離rに関して5.6d、7.5dを設定した。各パラメータで3体ずつ試験体を用意し、複数列ボルト接合では48体、複数行ボルト接合では72体、格子配置ボルト接合では72体、合計192体による実験を行った。

用いた樹種は、オウシュウアカマツ、カラマツ、スギである。ボルト径は16mmのもので、ボルト孔加工には径17mmのショートビットを用いた。

4. 研究成果

本研究で対象とするボルト接合における破壊挙動は、既往の研究により次のような破壊挙動に分類できることが予想される。まず、その定義を示す。ただし、ここでの定義は破壊力学で定義されるものとは異なる。

1. 脆性的な破壊：き裂の発生が確認できずに脆性的に破断したもの
2. 延性的な破壊：ボルト孔周辺でき裂が発生し、その後進展が明らかに確認でき、その後破断したもの
3. ほぼ脆性的な破壊：1と2の間に当たるもので、き裂の発生は見られたがその後ほとんど進展せず、大きな音とともに破断したもの

4. 1 複数行ボルト接合

複数行ボルト接合における荷重-変位関係の例を図5、破壊状況の例を図6に示す。端距離が規準より小さいものでは脆性的な破壊が見られた。また、相互距離s1と端距離が規準ギリギリの場合でも、脆性的な破壊となることが多かった。一方、端距離と相互距離がどちらも規準の値を超えている場合には、延性的な破壊もしくはほぼ脆性的な破壊となり、き裂の発生が明確に確認できた。端距離が小さい場合に脆性的な破壊となりやすいことは、既往の研究でも見られ、同様の傾向であると判断できる。

パラメータと実験結果の関係例として、(最大荷重とき裂発生荷重) - 相互距離との関係例を図7に示す。同図では、端距離が7dのもののみ示す。同図に示すとおり、最大荷重は相互距離が大きくなるにつれて大きくなる傾向がみられた。一方き裂発生荷重は一定に近い傾向を示した。

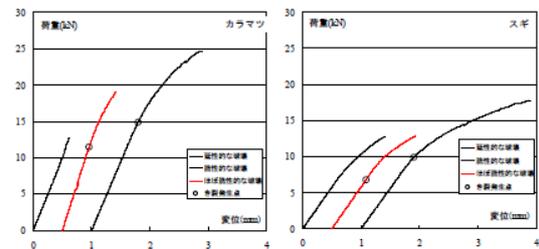


図5 荷重-変位関係(複数行ボルト接合)



図6 破壊状況(複数行ボルト接合)

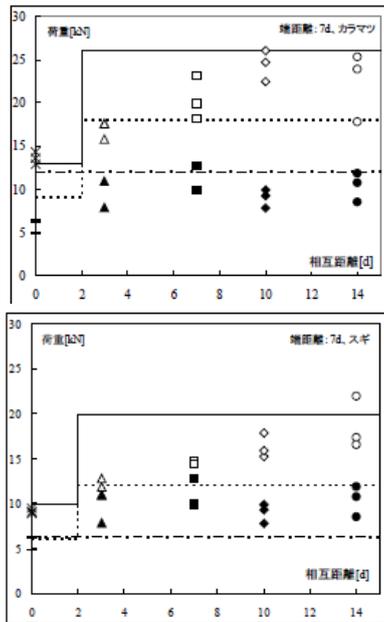


図7 耐力分布と計算値との比較
(上:カラマツ, 下:スギ, 複数行ボルト接合)

4. 2 複数列ボルト接合

複数列ボルト接合における荷重-変位関係の例を図8、破壊状況の例を図9に示す。この接合において、その荷重-変位挙動はほぼ直線形が主体であった。一部、勾配が大きくなるような第二折れ点が見られた。これは、ボルト孔の初期ガタにより、二つのボルトに均一に力が作用していないことが要因であると判断できる。破壊は、下側のボルト孔からによるものがほとんどあり、ボルトが直列配置であるため、下側のボルトに力が多く作用したためと判断できる。破壊性状は、端距離が4dのものでは多くが脆性的な破壊であったが、端距離が7dより大きくなると延性的な破壊が主体であった。ほぼ脆性的な破壊は、各パラメータにおいて数体ずつ見られた。パラメータと実験結果の関係例として、(最大荷重とき裂発生荷重)-相互距離との関係例を図10に示す。同図では、端距離が7dと10dのものを示す。同図に示すとおり、最大荷重、き裂発生荷重の分布に明確な傾向は見取れなかった。材料もしくはボルトの接触状態によるバラツキが影響していたと考えられるが、明確な判断はできない。ただし、スギは比較的安定している傾向が見取れるため、接触問題の方がバラツキへの影響が大きいのではないかと予測できる。

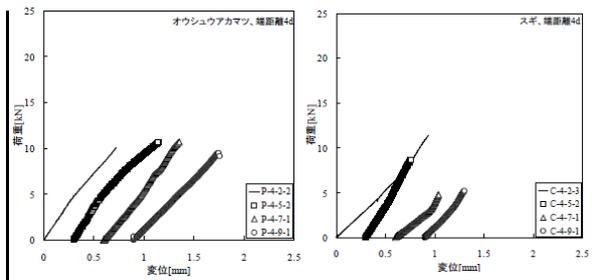


図8 荷重-変位関係(複数列ボルト接合)



図9 破壊状況(複数列ボルト接合)

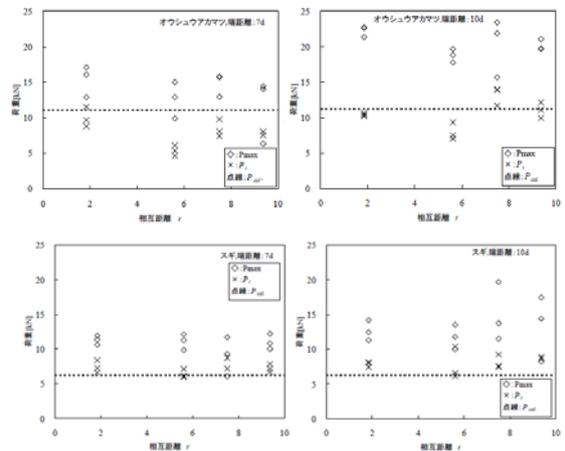


図10 耐力分布と計算値との比較
(上:カラマツ, 下:スギ, 複数列ボルト接合)

4. 3 格子配置ボルト接合

複数行ボルト接合における荷重-変位関係の例を図11、破壊状況の例を図12に示す。破壊性状は、ほぼすべての試験体で脆性的な破壊であった。その荷重-変形関係も直線的であり、破断は下側のボルトを起点とするものがほとんどであった。複数列ボルト接合で見られた二次勾配は見られなかった。このことから、本試験体のような鋼板添え板形式の接合部の構成の場合、ボルトが増えることで脆性的な破壊に移行する傾向が見られた。

パラメータと実験結果の関係例として、短期基準耐力と-相互距離との関係例を図13に示す。基準耐力の算出方法は、日本住宅・木材技術センター発刊の「木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2008年度版)」に準拠した。同図に示すように、相互距離sが大きくなるにしたがって、基準耐力が大きくなる傾向が見取れた。

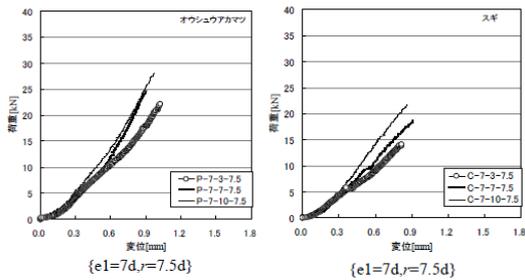


図 11 荷重-変位関係(格子配置ボルト接合)



図 12 破壊状況(格子配置ボルト接合)

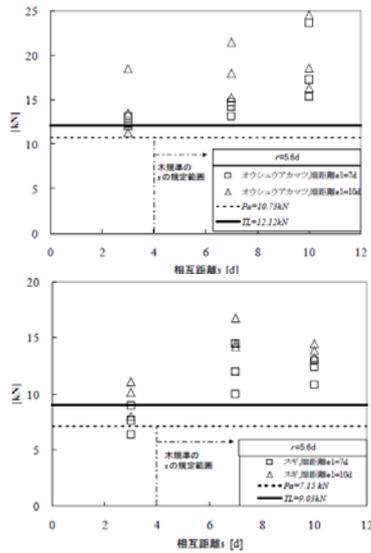


図 13 耐力分布と計算値との比較
(上:オウシュウアカマツ,下:スギ,格子配置ボルト接合)

4. 4 耐力の推定手法

以上示した試験体に対して、耐力の推定手法に関する検討を行う。

既往の研究において、延性的な破壊に対する“き裂発生荷重”の推定を行うに当たり“き裂の発生に対応する支圧応力度”を定義した。これを現行の木質構造設計規準に示されている耐力式に入力することで、き裂発生荷重を推定できるというものである。耐力式は式 1) に示すものである。

$$P=C \times d \times l \times Fe \quad \text{式 1)}$$

ここで、 C : 係数(本接合部では 1)、 d : ボルト径、 l : 主材厚さ、 Fe : 支圧強度。これを“き裂の発生に対応する支圧強度”に置き換える。

複数行ボルト接合と複数列ボルト接合において、き裂の発生位置を考慮すると、ボルト一本分の力の負担が顕著になっていると判断できるため、複数本ボルトではあるが、一本分の耐力を算出することとする。計算結果を図 7 において一点鎖線、図 10 において点線で示している。これらの図に示す通り、複数行ボルト接合では、その下限値もしくは平均値を推定できていることが分かる。複数列ボルト接合では、おおよそその平均値を推定できていることが分かる。ただし、試験体によっては脆性的な破壊をしたものも含まれているため、それを考慮すると適用範囲を考慮した方が適切であるといえる。オウシュウアカマツでは、端距離 10d 以上、スギでは 7d 以上という結果であった。以上のことから、既往の研究で提案してきた方法を応用することで、繊維直交方向に荷重を受ける複数本ボルト接合における、き裂発生耐力を簡易に評価することが可能であるといえる。

格子配置ボルト接合は、そのほとんどが脆性的な破壊であったことから、本方法を適用することは適当ではないと判断できる。そこで、日本建築学会規準に示されている手法で評価した結果を図 13 の点線で示す。同図に示す通り、相互距離が 4d 以上であれば、その下限値を評価できることが分かる。同図に示す通り、相互距離が大きくなるに従い耐力が大きくなる傾向がみられるが、現行規準の耐力式はその傾向をとらえることができない。このことは、今後解決すべき課題と考える。また、注意すべき事項として、本提案式はあくまでき裂が発生する点の耐力を推定するものであり、規準式はそれよりも前の段階のものを推定するものであるため、同列に評価することが適切であるかは今後の検討が必要であると考え。本検討を通して、ボルト本数を増やすことにより、脆性的な破壊に移行する傾向が見て取れた。言い換えるならば、これよりボルトが増えた場合は、同様な破壊性状になることが予測される。その点では、規準式の有効性が再認識できる。

以上のような総合的な検討により、繊維直交方向に荷重を受ける複数本ボルト接合における、き裂発生耐力を評価する手法を開発することができた。また、その式が適用できる範囲であっても、その評価を適切にするためには規準式が有効であることも確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- 1) 神戸 渡、藤岡拓史、鎌倉優門、中込忠男：2 本のボルトによる繊維直交方向加

- 力を受けるボルト接合のき裂発生性状に関する実験的検討、構造工学論文集、Vol. 58B, pp. 271-276、2012年3月(査読有)
- 2) 神戸 渡、弘末幹明、中込忠男、板垣直行、飯島泰男：2 タイプの実験法によるき裂発生評価手法の一提案 構造用集成材木材を対象としたモード I 破壊靱性性能の評価方法に関する考察 その 3、日本建築学会構造系論文集、Vol. 76, No. 666, pp. 1461-1468、2011年8月(査読有)
 - 3) Wataru Kambe, Naoyuki Itagaki, Yasuo Iijima, Tadao Nakagomi: Mode I fracture toughness for crack initiation by CT tests and three-pointed-bending tests with structural glulam, Proceedings of 2012 World Conference on Timber Engineering (on USB memory), pp. 91-92, 2012(査読有)
 - 4) 河野孝太郎、中畑拓巳、神戸 渡、田中 圭、井上正文：繊維直交方向荷重を受ける格子状配置したボルト接合の割裂破壊に関する実験的研究(その1) 木質構造設計規準に示される靱性係数 JC の妥当性についての検討、日本建築学会研究報告・九州支部 第52号.1、構造系、pp. 709-712、2013.3(査読無)
 - 5) 神戸 渡、藤岡拓史、鎌倉優門、中込忠男：繊維直交方向加力を受ける2本用いたボルト接合におけるき裂進展挙動に関する実験的研究、日本木材加工技術協会第29回年次大会 要旨報告集、pp. 61-62、2011年(査読無)
 - 6) 藤岡拓史、鎌倉優門、弘末幹明、中込忠男、神戸 渡：直交異方性を考慮した3次元 FEM による木材のモード I 破壊靱性値算出方法に関する検討 その1 素材試験、日本建築学会学術講演梗概集、C-1、pp. 213-214、2011年(査読無)
 - 7) 鎌倉優門、藤岡拓史、弘末幹明、中込忠男、神戸 渡：直交異方性を考慮した3次元 FEM による木材のモード I 破壊靱性値算出方法に関する検討 その2 破壊靱性試験、日本建築学会学術講演梗概集、C-1、pp. 215-216、2011年(査読無)
 - 8) 弘末幹明、藤岡拓史、鎌倉優門、中込忠男、神戸 渡：直交異方性を考慮した3次元 FEM による木材のモード I 破壊靱性値算出方法に関する検討 その3 解析結果、日本建築学会学術講演梗概集、C-1、pp. 217-218、2011年(査読無)
 - 9) 鎌倉優門、神戸 渡、中込忠男、弘末幹明：モード I 破壊靱性値の算出方法に関する研究 その2 3点曲げ形式実験による破壊挙動、日本建築学会学術講演梗概集 C-1、pp. 13-14、2010年(査読無)

- 10) 神戸 渡、鎌倉優門、弘末幹明、中込忠男、飯島泰男：モード I 破壊靱性値の算出方法に関する研究 その1 2タイプの実験方法による算出、日本建築学会学術講演梗概集 C-1、pp. 11-12、2010年(査読無)

[学会発表] (計1件)

神戸 渡、藤岡拓史、鎌倉優門、中込忠男：2本のボルトによる繊維直交方向加力を受けるボルト接合のき裂発生荷重、木材学会大会要旨集、2012年3月16日、札幌 北海道大学

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神戸 渡 (KAMBE WATARU)
東京理科大学・工学部第一部建築学科・
嘱託助教
研究者番号：90453000

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし