

文献調査に基づく木質構造の接合形式に関する解析的検討

石川 太陽

1. はじめに

木質構造は、主たる構造材料である木材・木質材料の柔性から、所謂ラーメン構造を成す剛接合を形成することが困難で、接合部の変形を許容した半剛節による架構を区別して木質ラーメンと呼んでいる。架構全体への影響が大きい接合部の開発は、現在でも国内外で継続的に進められており、近年の木質構造の適用範囲の拡大も相まって、個性が高かった多様な接合形式を体系的に整理する時期にあると言える。

本研究は、以上の社会情勢を鑑み、文献調査を基に接合形式の特性を分析し、その特性の差異が木質ラーメンに与える影響をフレーム解析により検討するものである。以降では、まず文献調査の方針を整理した後、調査結果を基に具体的な復元力特性を導出する。その後、調査結果に基づく復元力特性を用いたフレーム解析を行い、接合形式の影響を調べた結果を示す。

2. 解析モデルの設定と文献調査の方針

本研究では、接合形式の差異が木質ラーメンに与える影響を、解析的に明らかにすることを目的としている。ここでは、木造住宅の技術を基本とする引きボルト接合と、現状最も高い剛性を確保できる GIR 接合を対象とし、それらで柱-梁接合部を構成した場合の力学モデルを設定するために、文献調査を実施した。文献調査は、図 1 に示す解析モデルにおいて、梁端に設けた回転バネの復元力特性を、図 2 に示すような完全弾塑性型とする場合を想定し、それらを設定するために必要な内容を整理した。

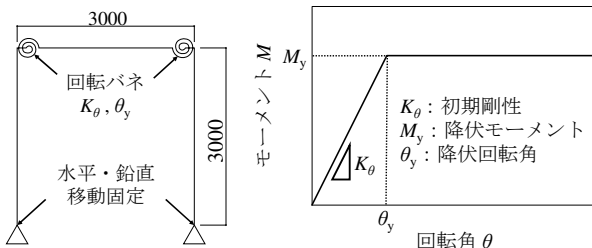


図 1 解析モデル 図 2 回転バネの復元力特性

図 2 に示す復元力特性が、ここで着目する 2 種類の接合方式の性質が反映されるもので、曲げモーメント M と回転角 θ の関係を

$$M = K_{\theta} \cdot \theta \quad (1)$$

としたとき、回転剛性 K_{θ} とそれが 0 となる降伏モ

ーメント M_y を文献より導く必要がある。本研究では接合形式の影響に着目するため、鋼材配置等を含む部材断面が等しい方が望ましいが、接合部の仕様に個性が高い既往研究において、条件を等しくすることは難しい。この点を踏まえ、以降ではまず各接合形式における力学的な釣り合いを検討し、回転剛性 K_{θ} を数式で陽に表現した上で、その整理を基に既往研究の実験結果から解析条件を導くこととする。

ここで、降伏モーメント M_y については、仕様毎に破壊形式が異なることから整理が困難なため、両接合部とも引張側の鋼材が先行降伏する仕様とし、

$$M_y = A_t \cdot F_t \cdot j \quad (2)$$

により、定めることとした。式 (2) で A_t : 鋼材の断面積、 F_t : 降伏応力度、 j : 応力中心間距離である。応力中心間距離 j は、引きボルト接合で圧縮縁から引張側の鋼材までの距離、GIR 接合で鋼材間の距離とした。

3. 木質ラーメン接合部の力学的理解

3.1 引きボルト接合の剛性評価

ここで対象とする、引きボルト接合を採用した柱-梁接合部の概要を図 3 にまとめて示す。なお、各部の記号は同図に示す通りとする。

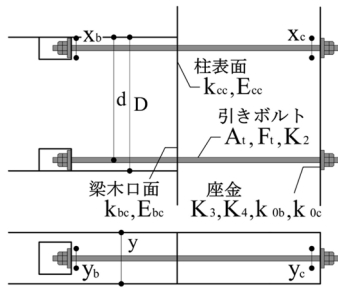
図 3 (a) に示した各部の記号に従い、以降では回転剛性 K_{θ} を数式で表現する。まず、図 3 (b) に示した変形時の力の釣り合いから、中立軸位置 x_n を求めることにする。圧縮・引張、それぞれの力を考えると、まず圧縮側では、接触面である梁の繊維方向と柱の繊維直交方向に三角形のめりこみが生じると考えられている^{1),2)}。それらの合力を C_1 とすれば、

$$C_1 = \frac{1}{2} x_n^2 \cdot y \cdot k_w \cdot \theta \quad (3)$$

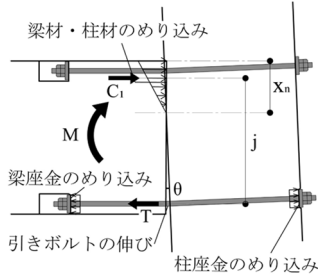
と表される。ここで k_w は、梁の繊維方向の面圧剛性 k_{bc} ならびに柱の繊維直交方向の面圧剛性 k_{cc} の直列バネとして与えられるもので、先行研究によれば繊維方向ヤング係数 E_{bc} と繊維直交方向ヤング係数 E_{cc} ($= E_{bc}/3.4$) を用いて表され、具体的な計算には経験的に次式で与えられている³⁾。

$$k_w = \frac{1}{\frac{1}{E_{bc}} + \frac{1}{E_{cc}}} / (31.6 + 10.9 \cdot x_n / 2) \quad (4)$$

次に、引張側に着目すると、ボルトに生じる引張軸力 T に対して、柱および梁に対する座金のめりこみ



(a) 各部の寸法等の定義



(b) 変形状態における力の釣り合い

<p><柱材> E_{cc} : 繊維直交方向ヤング係数 k_{cc} : 繊維直交方向の面圧剛性 <梁材> D : 梁せい, d : 有効せい, y : 梁幅, E_{bc} : 繊維方向のヤング係数, k_{bc} : 梁木口の面圧剛性 <引きボルト> A_t : 断面積, F_t : 降伏応力度, K_2 : 引張剛性 <座金> x_b : 梁座金の高さ, y_b : 梁座金の幅 x_c : 柱座金の高さ, y_c : 柱座金の幅 K_3 : 梁座金の面圧剛性, K_4 : 柱座金の面圧剛性 k_{ob} : 梁材の面圧定数, k_{oc} : 柱材の面圧定数 <力学要素> C_1 : 圧縮側めり込み合力, T : 引きボルトの引張合力 x_n : 圧縮縁から中立軸位置までの距離 j : 応力中心間距離, θ : 回転角</p>

図 3 引きボルト接合の概要と計算条件

とボルトの伸びの計 3 種類の変形が生じる²⁾. すなわち, これら各部の剛性 $K_2 \sim K_4$ の直列バネにより, 変形の合計である δ_T と釣り合い,

$$\delta_T = T \left(\frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} \right) \quad (5)$$

と評価され, さらに平面保持を仮定すれば,

$$\delta_T = (d - x_n) \cdot \theta \quad (6)$$

とも表現されるため, 圧縮・引張とも中立軸位置 x_n を含む形で記述されたことになる. 力の釣り合いから両者は等しいため, それらを整理すれば, 目的であった中立軸位置は,

$$a = y \cdot k_w \left(\frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} \right), \quad b = 2, \quad c = 2d \quad \text{とおくと,}$$

$$x_n = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (7)$$

$$\text{応力中心間距離 } j = d - \frac{1}{3}x_n \quad (8)$$

として得られる. 次に式 (5) および式 (6) より, 回転角 θ は,

$$\theta = \frac{T \left(\frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} \right)}{(d - x_n)} \quad (9)$$

となり, 柱梁接合部のモーメントは,

$$M = \Sigma N \cdot j = T \cdot j \quad (10)$$

であるため, 回転剛性 K_θ は次式のようになる.

$$K_\theta = \frac{T \cdot j}{\frac{T \left(\frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} \right)}{(d - x_n)}} = \frac{(d - x_n)j}{\left(\frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} \right)} \quad (11)$$

ここで, 引きボルトの引張剛性 $K_2 = \frac{E_t A_t}{l}$, 梁座金の面圧剛性 K_3 及び柱座金の面圧剛性 K_4 は,

$$K_3 = x_b \cdot y_b \cdot k_{ob}, \quad k_{ob} = E_{bc} / (31.6 + 10.9x_b) \quad (12)$$

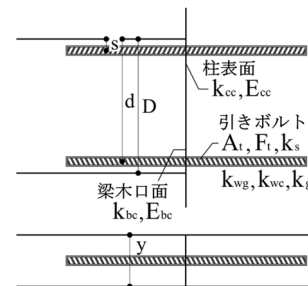
$$K_4 = x_c \cdot y_c \cdot k_{oc}, \quad k_{oc} = E_{cc} / (31.6 + 10.9x_c)$$

で, $\alpha = (d - x_n) / D$, $\beta = j / D$, $\frac{1}{K_{all}} = \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4}$ とおくと, 次式のように梁せい D の 2 乗に比例する形式となることが分かる.

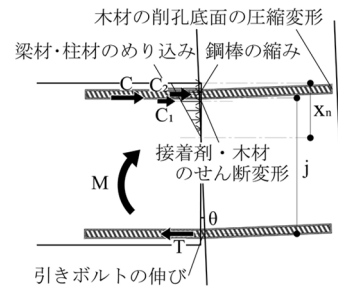
$$K_\theta = K_{all} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot D^2 = K_{HB} \cdot D^2 \quad (13)$$

3.2 GIR 接合の剛性評価

ここで対象とする, GIR 接合を採用した柱-梁接合



(a) 各部の寸法等の定義



(b) 変形状態における力の釣り合い

<p><柱材> E_{cc} : 繊維直交方向ヤング係数 k_{cc} : 繊維直交方向の面圧剛性 <梁材> D : 梁せい, d : 有効せい, y : 梁幅 s : 圧縮縁から圧縮鋼棒中心までの距離 E_{bc} : 繊維方向のヤング係数, k_{bc} : 梁木口の面圧剛性 <鋼棒> A_t : 断面積, F_t : 降伏応力度, k_s : 鋼棒の引張剛性 k_g : 接着剤のせん断剛性, k_{wg} : 木材のせん断剛性 k_{wc} : 木材の削孔底面の圧縮剛性 <力学要素> C_1 : 圧縮側のめり込み合力, C_2 : 鋼棒の圧縮力 C : C_1 と C_2 の合力, T : 鋼棒の引張合力 x_n : 圧縮縁から中立軸位置までの距離 j : 応力中心間距離, θ : 回転角</p>

図 4 GIR 接合の概要と計算条件

部の概要を図 4 にまとめて示す。なお、各部の記号は同図に示す通りとする。

図 4 (a) に示した各部の記号に従い、以降では回転剛性 K_θ を数式で表現する。まず、図 4 (b) に示した変形時の力の釣り合いから、中立軸位置 x_n を求めることにする。圧縮・引張、それぞれの力を考えると、まず圧縮側では、引きボルト接合同様の変形に加え、鋼棒の縮み、鋼棒端部による木材の削孔底面の圧縮変形、接着剤のせん断変形及び接着面の木材のせん断変形の計 4 種類の変形が生じると考えられている⁴⁾。それらの合力を C とすれば、

$$C = C_1 + C_2 = C_1 + k_{sc}(x_n - s)\theta \quad (14)$$

と表される。ここで k_{sc} は、鋼棒の剛性 k_s 、木材の削孔底面の圧縮剛性 k_{wc} 、接着剤のせん断剛性 k_g 及び接着面の木材のせん断剛性 k_{wg} の直列バネとして与えられるもので、次式のように与えられる。

$$k_{sc} = \frac{1}{\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_{wc}} + \frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_{wg}}} \quad (15)$$

次に、引張側に着目すると、鋼棒に生じる引張軸力 T に対して、鋼棒の伸び、接着剤のせん断変形及び接着面の木材のせん断変形の計 3 種類の変形が生じる⁴⁾。すなわち、これら各部の剛性 k_s 、 k_g 、 k_{wg} の直列バネにより、変形の合計である δ_T と釣り合い、

$$\delta_T = T \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_{wg}} \right) \quad (16)$$

と評価され、さらに平面保持を仮定すれば、

$$\delta_T = (d - x_n) \cdot \theta \quad (17)$$

とも表現されるため、圧縮・引張とも中立軸位置 x_n を含む形で記述されたことになる。力の釣り合いから両者は等しいため、それらを整理すれば、目的であった中立軸位置は、

$$a = y \cdot k_w \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_{wg}} \right)$$

$$b = 2k_{sc} \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_{wg}} \right) + 2$$

$$c = -2s \cdot k_{sc} \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_{wg}} \right) - 2d$$

$$\text{とおくと、} \therefore x_n = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (18)$$

$$\text{応力中心間距離 } j = D(\alpha_1 C_1 + \alpha_2 C_2 + \alpha_3 T) \quad (19)$$

$$\alpha_1 = \frac{D}{2} - \frac{1}{3}x_n, \quad \alpha_2 = \frac{D}{2} - \frac{1}{3}s, \quad \alpha_3 = d - \frac{D}{2}$$

ここで、式 (16)、式 (17) より、回転角 θ は、

$$\theta = \frac{T \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_{wg}} \right)}{(d - x_n)} \quad (20)$$

引きボルト同様、柱梁接合部のモーメント M と回転

角 θ の関係から、回転剛性 K_θ は、式 (21) で表せる。

$$K_\theta = \frac{T \cdot j}{\frac{T \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_{wg}} \right)}{(d - x_n)}} = \frac{(d - x_n)j}{\left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_{wg}} \right)} \quad (21)$$

また、 $\alpha = (d - x_n)/D$ 、 $\beta = j/D$ 、 $\frac{1}{K_{all}} = \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_{wg}}$ 、とおくと、式 (22) と表すことができる。

$$K_\theta = K_{all} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot D^2 = K_{GIR} \cdot D^2 \quad (22)$$

初期剛性は、梁せいの 2 乗に比例することを示す。

4. 試験結果を基にした復元力特性の設定

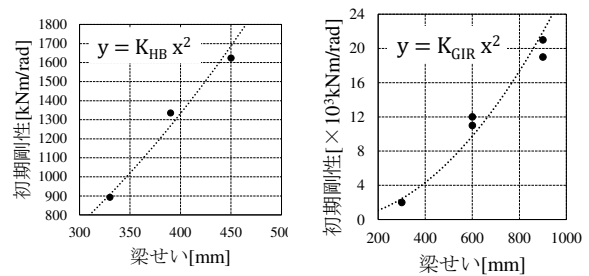
4.1 引きボルト接合の初期剛性

引きボルト接合部の挙動に関する既往研究⁵⁾では、実務上の設計で考えられる様々な設計条件を変動因子として、同一接合部により実験を行い、比較検証を行っている。図 5 (a) に梁せい・初期剛性 ($D \cdot K_\theta$) 関係を示す。既往研究中の試験体の梁せいは、330mm、390mm、450mm となっており、初期剛性は梁せいの約 2 乗に比例することがわかる。したがって、式 (13) を用いて、試験結果から求まる各梁せいの K_{HB} は、平均値を採用し、 $K_{HB} = 8332 \text{ [N/mm} \cdot \text{rad]}$ とした。

4.2 GIR 接合の初期剛性

GIR 接合部のモーメント抵抗性能を示す既往研究^{6),7)}では、いくつかの特徴を推測することができる。

図 6 に示すように、挿入する鋼棒の本数による初期剛性への影響は小さい。既往研究中の試験体の梁せいは、300mm、600mm、900mm となっており、引きボルトの場合と同様の考え方で多項式近似した場合、図 5 (b) に示すように、初期剛性は梁せいの約 2 乗に比例している⁷⁾ことが推測できる。



(a) 引きボルト接合 (b) GIR 接合

図 5 $D \cdot K_\theta$ 関係

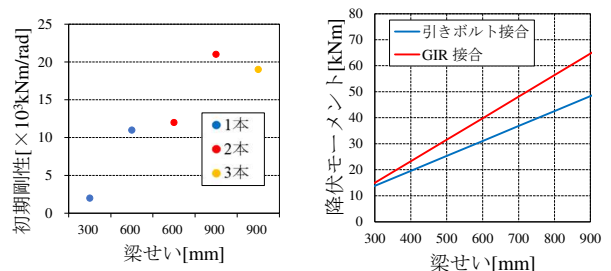


図 6 初期剛性 (GIR)

図 7 両者の $D \cdot M_y$ 関係

したがって、式 (22) を用いて、試験結果から求まる各梁せいの K_{GIR} は、平均値を採用し、 $K_{GIR} = 27099$ [N/mm・rad]と設定した。

4.3 引きボルト接合及び GIR 接合の降伏回転角

降伏回転角は、2 章で述べた関係から算出するものとし、図 7 に、梁せい-降伏モーメント ($D-M_y$) 関係を示す。引きボルト接合及び GIR 接合の同一梁せいの文献では、GIR 接合の方が鋼材の断面積が大きいものが多い^{5)~8)} ため、鋼材の断面積は、引きボルト接合：245 mm²、GIR 接合：353 mm² とした。

5. フレーム解析

5.1 解析手法と解析モデルの概要

本解析では、半剛接合節点を含む有限要素法による非線形解析を行う。解析には、既往の試験結果⁶⁾⁷⁾ を、4 章で得られた知見を基に試験条件をそろえた引きボルト接合部及び GIR 接合部の復元力特性を採用する。図 8 に、接合部の復元力特性、図 9 に、解析に用いる解析モデルを示す。解析モデルは、柱梁接合部のフレームに与える影響を取り出すために、柱脚部分をピン接合とした。また、回転剛性のフレームへの影響度を抽出するため、接合部を剛接合とした場合の解析も行った。

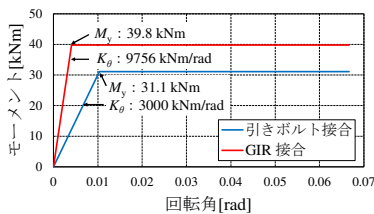


図 8 接合部の復元力特性

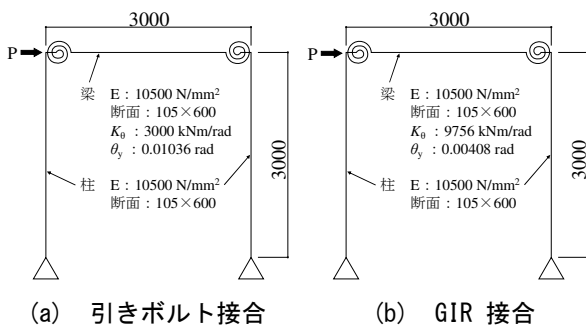


図 9 解析モデルの詳細

5.2 解析結果

解析結果の水平力-層間変形角関係を図 10 に示す。各試験体の降伏前の勾配より、引きボルト接合の層剛性は、4861 kNm/rad、GIR 接合の層剛性は、11074 kNm/rad となっている。接合部の回転剛性は GIR 接合の方が 3.25 倍大きい結果であったが、層剛性に関しては、GIR 接合の方が 2.28 倍大きいという結果となった。

剛接合における層間変形角は、部材剛性のみの影響で生じるものであるため、各接合形式の層剛性と剛接合における層剛性の差をとることで、回転剛性の変化による影響を取り出すことができる。引きボルト接合の差は、20828 kN・m/rad、GIR 接合の差は、14615 kN・m/rad となり、GIR 接合は、引きボルト接合の 0.7 倍となり、回転剛性の影響度は小さくなった。

剛接合と比較して両者とも層剛性が低下している。これは、剛接合ではすべての力が部材変形に使用されていたが、半剛接合とすることで節点の回転変形が加わり、層の変形が増加しているためと考えられる。

最大モーメントは、両者とも降伏モーメントの 2 倍となった。このフレームでは、モーメントを負担できる接合部が梁両端部分しか存在しないため、単純に接合部の数の影響であると考えられる。

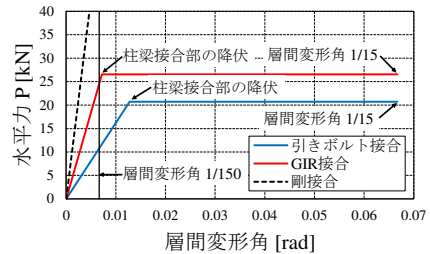


図 10 水平力-層間変形角関係

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 引きボルト接合および GIR 接合は、その力の釣り合いから、回転剛性が梁せいの 2 乗に比例する関係が示唆され、参照した既往の実験結果にもその傾向が認められた。
- 2) 層剛性は、接合部の回転剛性が増加すれば大きくなるが、単純に回転剛性に比例するわけではない。
- 3) 接合部の回転剛性の層剛性への影響度は、接合部の回転剛性が大きいほど小さくなる。

参考文献

- 1) 稲山正弘：引きボルト式木造ラーメン柱脚接合部の設計に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp.621-622，2013.8.
- 2) 稲山正弘，他：引きボルトを利用した木造ラーメン接合部の設計法に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp.355-356，2008.9.
- 3) 日本建築学会：木質構造接合部設計マニュアル，2009.12
- 4) 江坂佳賢，村上勝英，他：軸力作用下における GIR 接合部のモーメント抵抗性能の評価手法の開発および設計事例への適用，日本建築学会技術報告集 第 24 巻 第 57 号，pp.637-642，2018.6.
- 5) 山口和弘：引きボルト式木質ラーメン架構の挙動の解明と解析モデルの提案，pp.16-55，2013.11
- 6) 竹内麻美子，藤川将登，田中圭，後藤泰男，井上正文：GIR (Glued-in Rod) 接合法を用いた木質構造接合部の回転剛性に関する研究 (その 1) 推定方法の検討及び継ぎ手接合部実験による検証，日本建築学会九州支部研究報告 第 44 号，pp.477-480，2005.3.
- 7) 田中圭，植月和輝，佐藤希，井上正文：接合金物と接着剤を併用した木材接合法の開発に関する実験的研究 (その 20) 靱性型コネクターを用いた GIR 接合部のモーメント抵抗性能，日本建築学会九州支部研究報告 第 56 号，pp.653-656，2017.3.
- 8) 中層大規模木造研究会：設計支援データベース，2 接合部のデータシート。