

中低層建物での木材利用推進に資する高強度高靱性木質構造接合法の開発

京都大学 准教授 荒木慶一

概要：

本研究では、鋼構造における高力ボルト摩擦構法と接着接合を組み合わせこれを木質ラーメン構造に適用することで、高剛性と高靱性を両立した完全剛塑性に近い復元力特性を持ち、繰返し载荷の下でも安定したエネルギー吸収が可能な二種類の木質ラーメン接合法を提案し、その実現可能性を検討する。一つ目の接合法は、木材に厚肉鋼パイプを挿入接着し、円弧状長孔加工を施した添板を用いた高力ボルト摩擦接合を併用する鋼パイプ挿入接合法である。部分架構試験体の準静的繰返し载荷実験を通じて、鋼パイプ挿入接合法により、高い初期剛性と安定したエネルギー吸収性能を実現できることを確認した。二つ目の接合法は、木材孔に接着接合した上下ダブルナット付き全ねじ鋼棒を介して柱・梁両部材にT字形金物を接合し、円弧状長孔加工を施したT字金物ウェブをアルミ合金添板で挟んで摩擦接合するT字金物接合法である。本接合法では回転中心にボルトを配置し、トルシア型ボルトを使用することでボルト張力管理の容易化を図った。部分架構試験体の準静的繰返し载荷を通じて、回転中心位置にボルトを配置することですべり発生時の2次元配を抑制できることを明らかにし、T字金物接合法によって、高剛性と高靱性を両立した完全剛塑性に極めて近い復元力特性と安定したエネルギー吸収性能を実現できることを確認した。

キーワード：木質ラーメン、高力ボルト摩擦接合、接着接合、

1. 序

近年、全産業における CO₂ 削減の要請、自然材料としての木材への愛着、国策としてのグリーンイノベーションの推進などを背景に、一般住宅用の木質ラーメン構造の開発が盛んに進められている¹⁾。車庫一体型の住宅や店舗併用住宅など従来から壁を配しにくい間取りの建物に加えて、最近では一般住宅でも大きなスパン、大きな開口のものが増えてきており、それを可能としているのは集成材である。集成材は、自由な断面形状・寸法が可能であり、成材品よりも強度・剛性のばらつきが少ないという長所を持つ。集成材を使用すれば大スパンの架構やラーメン構造も可能となる。ラーメン構造は、単独で用いれば開放的な空間の実現が可能で、平面計画上の制約が少ない。また壁を耐力壁とする必要が無いので改築の自由度も高い。このような利点を持つ高性能な木質ラーメン構造への期待が高まってきている。木質ラーメン構造では、接合部の剛性や変形性能が建物全体の変形に大きく影響する場合が多く、接合部の高性能化は重要な課題の一つである。現在、各種接合法が考案されているが、いずれの接合法においても木材特有の性質であるめり込みや乾燥収縮により、繰返し载荷において強度の劣化と残留変形の増大が見られるスリップ形の特徴を示す。木質ラーメン構造において高剛性と高靱性の両立は困難であり、未だ安定した構造性能、特に地震時のエネルギー吸収性能を持たせるこ

とが難しい状況にある。

安定した構造性能を実現するため、鋼構造における SBC (slotted bolted connection) 構法を木質ラーメン構造に適用しようとする研究が進められている。SBC とは、長孔加工を施した板材と高力ボルトによる摩擦接合のことで、金属板間のすべりによってエネルギーを吸収するものである。長孔の許容範囲では、移動時における高力ボルトと母材孔縁との接触を避けられるため安定した履歴特性を持つ。これまでに SBC を木質ラーメン構造に適用した研究開発事例^{2,3)}が存在する。しかし、これらの研究では木材を直接ボルトで締め付けて添板を固定しているため、木材の収縮によりボルト張力が低下し、それに伴ってエネルギー吸収能力が低下することが予想される⁴⁾。このように、繰返し载荷下でも安定したエネルギー吸収性能を持ち、高剛性と高靱性を両立した接合法の提案は、筆者の知る限り未だ行われていない。

2. 提案接合法

本研究では、鋼構造における SBC 構法^{2,3)}を接着接合⁵⁾と組み合わせ木質ラーメン構造に適用することで、高剛性と高靱性を両立した完全剛塑性に近い復元力特性を持ち、繰返し载荷の下でも安定したエネルギー吸収が可能な木質ラーメン接合法を提案し、その実現可能性を検討することを目的とする。

図 1 に示すように、木材孔に挿入接着した厚肉鋼パイプを円弧状の長孔加工を施した添板で挟み、鋼パイプを貫通させて高力ボルトにより摩擦接合する。鋼パイプは木材母材表面より僅かに突出した位置で固定をすることで、木材を介すること無く鋼パイプのみにボルト張力を支持させる構造とし、ボルト張力低下を回避する。さらに、鋼パイプ(SS400)に対して安定した摩擦履歴が期待できる高強度アルミ合金(A2017)⁶⁾を添板材料として使用し、金属間のすべりによる安定したエネルギー吸収性能の実現を目指す。

鋼パイプ挿入接合法の主な特徴は以下の通りである。

- (1) ボルト張力を鋼パイプで支持するため、木材のクリープや乾燥収縮による張力低下を回避できる。
- (2) 長孔加工を施した添板と鋼パイプ間の摩擦接合に鋼パイプと木材間の接着接合を併用することで、高剛性を実現できる。長孔の許容範囲内では、安定したエネルギー吸収性能が期待できる。
- (3) 金属間のすべりが木材母材の破壊に先行して発生するように設計することで、木材のめり込みや割裂を回避し、高剛性と安定した復元力特性を持たせることが可能である。
- (4) 特殊な材料やデバイスを用いないので汎用性が高い。
- (5) パイプの接着工程までを事前に工場で済ませておくことで、現場では高力ボルトによる締付のみを行えば良く、短期間での施工が可能である。

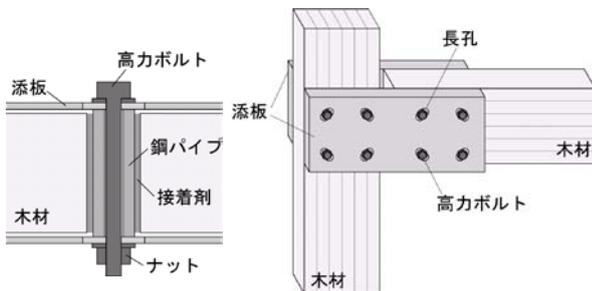


図 1 提案接合法概要

3. 鋼パイプ挿入接合法による部分架構実験

3.1 概要

図 2 のようにアクチュエータにより木材部材端部に荷重を与え、モーメント-回転角関係を得る。荷重は変位制御の正負交番準静的繰返し漸増荷重とする。荷重 P [kN]、荷重点-接合部回転中心間距離 L [m] より、接合部に作用するモーメント M [kNm] は次式で得られる。

$$M = P \times L \quad (1)$$

接合部の木材上端水平変位 u_1 と木材下端水平変位 u_2 の差分 Δu [mm]、上下の変位測定位置間の距離 d [mm] より、接合部回転角 θ [rad] は次式のように近似する。

$$\theta = \Delta u / d \quad (2)$$

3.2 試験体

試験体は、予め $\phi 40$ mm の孔をあけ厚肉鋼パイプを挿入接着し

た木材を 2 枚のアルミ合金添板で挟み、高力ボルトを添板長孔および鋼パイプ内を貫通させて接合する構成とした。本実験では 2 体の試験体を作成し、それぞれを試験体 A1、試験体 A2 とする。両試験体ではボルト本数、ボルト位置、初期導入張力が異なる。各試験体のボルト位置(木材孔位置)を図 3 に示す。ボルト初期導入張力は試験体 A1 で 80kN、試験体 A2 で 60kN とした。ボルトにはひずみゲージを貼付し、張力を管理しながら手締めした。木材には断面寸法 390mm×150 mm のベイマツ集成材(E105-F300)を使用した。添板には高強度アルミニウム合金(A2017)を使用し、許容回転角 1/20 の円弧状の長孔加工(図 4)を施して表面は無加工とした。厚肉鋼パイプは SS400 の直径 34mm、肉厚 4.5mm のものを使用し、接着強度向上のため表面に塩酸処理を施した。材料実験より得られた鋼パイプとアルミ合金添板のすべり係数の平均値は 0.30 である。

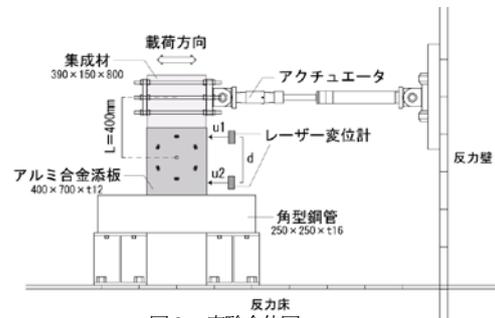


図 2 実験全体図

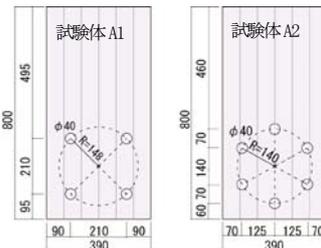


図 3 木材孔位置

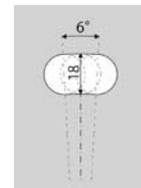


図 4 長孔

3.3 実験結果

実験結果を表 1 に、モーメント-回転角関係を図 5 に示す。両試験体の実験結果より、鋼パイプ挿入接合法により高い初期剛性と完全剛塑性に近い復元力特性、安定したエネルギー吸収性能が実現できることを確認した。各試験体では、×印位置で木材母材に破壊が発生したが、破壊発生後も接合部耐力に大きな低下は見られず安定した履歴ループが継続した。想定に反して木材母材に破壊が発生したのは、すべり発生後の緩やかなモーメント上昇が原因と考える。この 2 次勾配発生の原因としては、(1)せん断力とモーメントの相互作用、(2) 回転中心のずれ、(3) 回転中心がずれたことで生じた、高力ボルト側面とアルミ合金添板の長孔間での支圧や摩擦、などが考えられ、回転中心位置にせん断力を負担するピンを設置することで解消可能であると考えられる。その他、本実験における課題としては、鋼パイプ接着工程の施工性の悪さや高力ボルトの張力管理の問題、金属部分が全面的に露出しているという耐火性能の低さが挙げられる。これらの課題を踏まえ、次章にて各課題の解決を目指した改良型接合法を提案する。

	試験体A1	試験体A2
初期剛性[kNm/×10 ⁻³ rad]	22.2	44.3
すべり発生モーメント [kNm]	26.7	20.5
予想モーメント耐力 M_c [kNm]	28.4	30.2
最大モーメント [kNm]	43.1	43.4

表1 実験結果数値一覧

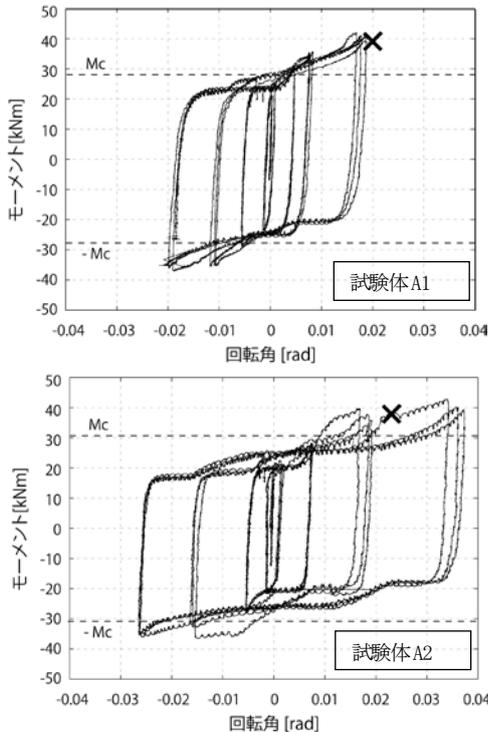


図5 モーメント-回転角関係

4. 改良型接合方法

前章実験結果を踏まえ、改良型接合方法を提案する。

図6はその概要図である。柱・梁両部材にT字形の金物(図7)を接合し、2枚のアルミ合金添板でT字金物ウェブを挟んで摩擦接合する。梁側T字金物に円弧状の長孔加工を施してSBC構法を適用する。ボルト張力は金属板で支持する構造であるため摩擦接合部は木材の材料特性の影響を受けず、安定した復元力特性およびエネルギー吸収性能が期待できる。図8にはT字金物-木材接合部の構成を示す。T字金物と木材の接合には木材孔に予め挿入接着した上下ダブルナット付き全ねじ鋼棒を使用し、木材めり込みによる剛性の劣化を回避する。上部ダブルナットは木材表面非接触位置でT字金物を支持し、下部ダブルナットは木材孔底に設置することで金属-エポキシ界面での接着剤剥離の抑制と剥離発生後の引き抜き力抵抗の役割を果たす。また、前実験で観察されたすべり発生後の2次勾配を抑制するため、回転中心位置にボルトを配置する。

T字金物接合法の特徴は、鋼パイプ挿入接合法の特徴に加え以下に示す通りである。

- (1) ボルト張力はアルミ合金添板およびT字金物が支持するため木材の材料特性の影響を受けず、鋼構造の摩擦接合同様に設計することが可能である。
- (2) T字金物を木材孔に挿入接着した全ねじ鋼棒が支持すること

で木材のめり込みを回避し、高剛性および安定した復元力特性を確保する。

- (3) 回転中心位置にボルトを配置することで回転中心のずれによる2次勾配の発生を抑制する。
- (4) 接着工程の施工性を改善できる。
- (5) トルシア型ボルトを使用することでボルトの張力管理が容易になる。
- (6) 木材カバーを装着して耐火性能を向上できる。

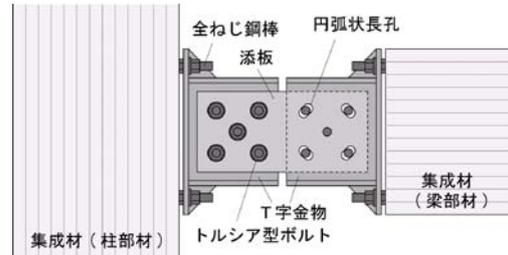


図6 改良型接合方法概要

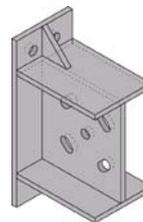


図9 T字金物

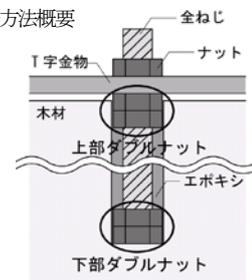


図8 T字金物-木材接合部

5. T字金物接合法による部分架構実験

5.1 概要

図9のようにアクチュエータにより木材部材端部に荷重を与え、モーメント-回転角関係を得る。載荷は変位制御の正負交番準静的繰返し漸増載荷とする。接合部に作用するモーメントは項3.1の式(1)で算出し、接合部回転角は摩擦接合部分の相対変位から式(2)で近似して算出する。

改良型接合方法ではトルシア型ボルトの使用を目標としているが、それに先立ち、張力測定可能な同径のひずみゲージ付き高力ボルトを使用しトルシア型ボルトの設計ボルト導入張力の約1/4にあたる張力を導入して改良型接合方法の作動性を確認し(以下、試験体DI-1)、その後同試験体でトルシア型ボルトを使用して載荷を実施した(以下、試験体DI-2)。

5.2 試験体

試験体は、予めφ36mmの孔をあけ上下ダブルナット付き全ねじ鋼棒を挿入接着した木材に、全ねじ鋼棒を介してT字金物を接合し、両部材のT字金物ウェブ部分を2枚の添板で挟んで摩擦接合する構成とした(図10)。木材には断面寸法390mm×150mmのベイマツ集成材(E105-F300)を使用した。添板には高強度アルミニウム合金(A2017)を使用し、許容回転角1/10の円弧状の長孔加工を施し、表面は無加工とした。全ねじ鋼棒は、B7(M20)を使用し、接着力確保のために脱脂した。摩擦接合部のトルシア型ボルトはS10TM16、高力ボルトはF10TM16を用いた。

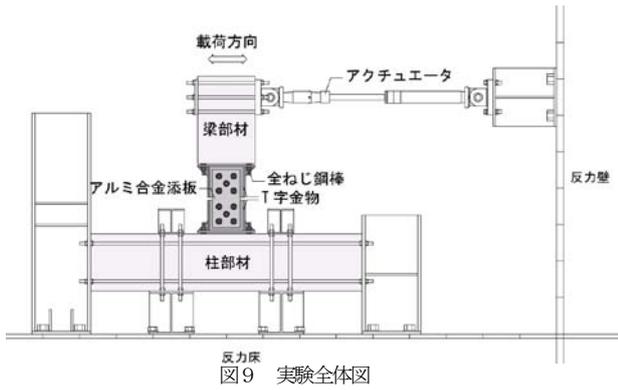


図9 実験全体図

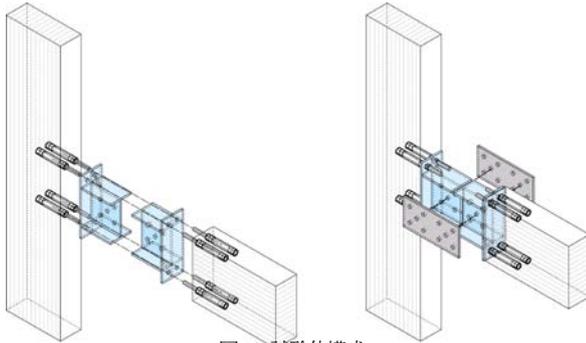


図10 試験体構成

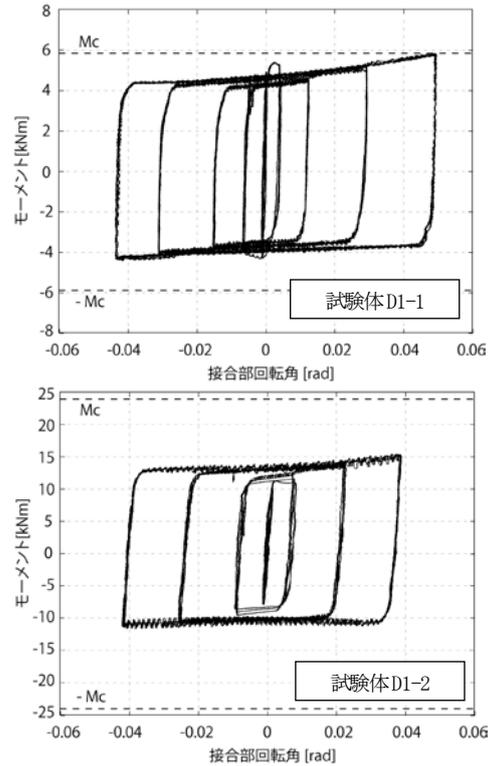


図11 モーメント-回転角関係

5.3 実験結果

実験結果を表2に、モーメント-回転角関係を図11に示す。予想モーメント耐力 M_c は材料実験より得られたアルミ合金-鋼板間のすべり係数0.35を用いて算出した。実験結果より、回転中心位置にボルトを配置することですべり発生時の2次勾配を抑制できることを明らかにし、T字金物接合法により高い初期剛性と完全剛塑性に極めて近い復元力特性、安定したエネルギー吸収性能が得られることを確認した。両試験で木材母材に破壊が生じることは無く、すべり発生を想定している梁側T字金物-添板間以外で回転は発生していないことを確認した。また、前実験での課題であった接着工程における施工性を向上できることを確認した。

高力ボルトを使用した場合と比較して、トルシア型ボルトを使用した場合に予想を大幅に下回る荷重ですべりが発生した。この原因として、アルミ合金添板とトルシア型ボルトを併用した場合に設計ボルト張力が確保できていない可能性があるかと推察しており、ボルト張力の管理がT字金物接合法の今後の課題である。

	D1-1	D1-2
初期剛性[kNm/ $\times 10^{-3}$ rad]	25.7	19.3
すべり発生時の回転角 [rad]	1/120	1/60
すべり発生モーメント [kNm]	4.2	11.6
予想モーメント耐力 M_c [kNm]	5.9	24.1
最大モーメント [kNm]	5.8	15.4

表2 実験結果数値一覧

6. 結論

木材-金物間の接合には接着接合、金物-金物間の接合にはSBC構法による摩擦接合を併用した2種の新たな木質ラーメン接合法を提案し、その実現可能性を検討した。

1. 木材に厚肉鋼パイプを挿入接着する手法と、円弧状長孔加工を施した添板を用いた高力ボルト摩擦接合を併用した鋼パイプ挿入接合法を提案した。部分架構試験体の準静的繰返し荷重実験を通じて、鋼パイプ挿入接合法により、高い初期剛性と安定したエネルギー吸収性能を実現できることを確認した。また、木材母材に破壊が発生した後も耐力は低下することなく安定した履歴ループを描くことを明らかにした。すべり発生時に2次勾配の発生が観察されたが、この原因としては回転中心のずれが挙げられ、回転中心位置にピンを設置することで改善可能であると考えた。
2. 木材孔に接着接合した上下ダブルナット付き全ねじ鋼棒を介して柱・梁両部材にT字形金物を接合し、円弧状長孔加工を施したT字金物ウェブをアルミ合金添板で挟んで摩擦接合するT字金物接合法を提案した。本接合法では回転中心にボルトを配置し、トルシア型ボルトを使用することでボルト張力管理の容易化を図った。部分架構試験体の準静的繰返し荷重を通じて、回転中心位置にボルトを配置することですべり発生時の2次勾配を抑制できることを明らかにし、T字金物接合法によって、高剛性と高剛性を両立した完全剛塑性に極めて近い復元力特性と安定したエネルギー吸収性能を実現できることを確認した。一方、トルシア型ボルトを使用した場合に、すべり発生時のモーメントが予想モーメント耐力を大幅に下回る結果となった。

今後の課題として、アルミ合金添板を用いた場合のトルシア型ボルトの張力管理方法を確立し、トルシア型ボルトを使用して目

標モーメント耐力を達成する。その際に、極めて大きな変形に対して木材母材に破壊が生じないことを確認する。その後、実験で得られた知見および力学的考察から接合部設計式を導出する。

参考文献

- 1) 日本建築学会：木質構造接合部設計マニュアル、2010
- 2) Duff SF, et al.: Friction damped energy dissipation timber connections, Proceedings of the 5th World Conference on Timber Engineering, 1998
- 3) Leichti RJ et al.: Design and behavior of friction dampers for two-dimensional braced and moment-resisting timber frames, Proceedings of the 7th World Conference of Timber Engineering, 3:267-274, 2002
- 4) Ali A, et al: One-year stress relaxation of timber joints assembled with pretensioned bolts, The Japan Wood Research Society 2008, 54:456-463, 2008
- 5) 徳田裕英他：国際花と緑の博覧会「政府苑」の木造建築群、ビルディングレター、89.12、8-15
- 6) 吉岡智和：高力ボルト摩擦すべり接合に関する研究 その1. アルミニウム合金板を摺動材に利用した接合要素実験、日本建築学会構造系論文集、No. 573、217-222、2003