

ドリフトピンと構造用接着剤を併用した鋼板挿入型木質ラーメン接合部の力学特性評価とその応用

MECHANICAL CHARACTERISTICS AND APPLICATION OF A NEW TIMBER JOINT USING A COMBINATION OF STEEL PLATES, DRIFT-PINS AND STRUCTURAL ADHESIVE

熊谷太希 — * 1 小笠原絢香 — * 2
 前田匡樹 — * 3

Taiki KUMAGAI — * 1 Ayaka OGASAWARA — * 2
 Masaki MAEDA — * 3

キーワード：
 中規模木質ラーメン構造, ドリフトピン接合, 構造用接着剤, 有限要素解析, 応答スペクトル

In this study, new timber joints utilizing structural adhesive that can ensure higher stiffness and strength were developed. Experimental testing was conducted to confirm the lateral capacity performance of the proposed joint. To develop structural design methods using the joint, the local shear characteristics of the proposed joint were confirmed by structural component tests and finite element analysis. By modeling and analyzing building frames utilizing the joint, it was found that modifying the geometry of the steel plates to ensure yielding or plasticizing the adhesive layer results in better ductility and energy dissipation characteristics.

Keywords:
 Middle scale timber frame structure, Drift pinned joint, Structural-adhesive, FEM analysis, Response spectrum

1. はじめに

近年森林資源の有効活用という観点で都市木造建築の普及が求められており、新たな木質構造部材や工法の開発に伴い木造建築物が大きく見直されている。しかし、現状の接合工法¹⁾²⁾では部材耐力に対して接合部耐力が著しく小さいこと等が課題となっている。またフレーム構造では現状の一般的な接合金物を用いた接合部の接合効率（接合部降伏耐力/部材材料曲げ強度）が三割程度¹⁾²⁾である。本研究では木材にスリットを設け鋼板を挿入し、ドリフトピンにより接合した従来型接合部に加え、構造用接着剤を木材と鋼板の空隙に注入する（図1）ことで高い剛性と耐力の確保を期待した接合部³⁾⁴⁾を提案し、フレーム解析により中規模木造建築物の木質ラーメン架構部分を対象に必要な性能を明確化した後、提案接合部の構造性能評価法の確立と中大規模木造建築への適応可能性を検討する。

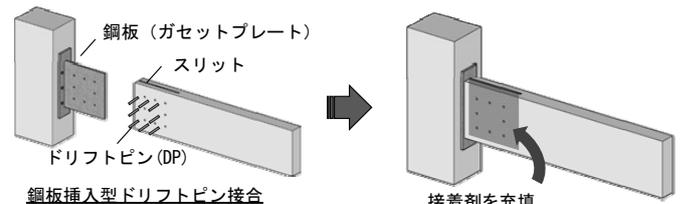


図1 提案型接合部の概要

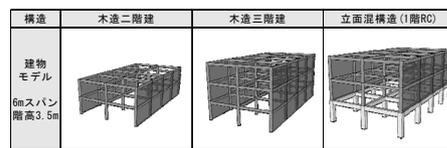


図2 対象建物モデル

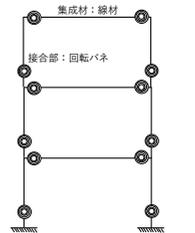


図3 半剛節モデル

2. 建物モデルの設定と構造用接着剤を用いた接合部の提案

2.1 建物モデルの設定

図2に示す一般流通集成材の最大サイズ(120mm×450mm×6m)を用いた6mスパンの事務所建築を対象とする。X方向を木質ラーメン構造、Y方向を壁構造とした、木造二階建て、木造三階建て、立面混構造（一階：RC造、二～三階：木造）の3ケースを対象にX方向のラーメンフレームを取り出して構造解析を行う。木質ラーメン構造の構造解析フレームモデルでは接合部が半剛節となるため、接合部の復元力特性を与えた回転バネを用いる（図3）。

2.2 各種接合部の回転剛性の算出

従来型の鋼板挿入型ドリフトピン接合および提案型接合部の応力伝達と抵抗機構は図4のようになる。接合部の補強に用いる構造用

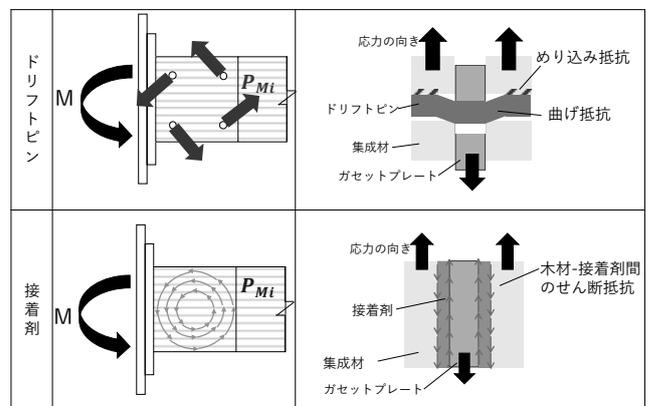


図4 応力伝達と抵抗機構

¹⁾ 清水建設(株) (元東北大学大学院工学研究科 大学院生)
 (〒104-0031 東京都中央区京橋2-16-1)
²⁾ 東北大学大学院工学研究科 大学院生
³⁾ 東北大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

¹⁾ Shimizu Corporation

²⁾ Graduate Student, Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.
³⁾ Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

接着剤は建築現場での作業性を考えて固着までの時間が長く作業湿度環境の制約を受けない2液型エポキシ系の接着剤の接着剤A(低粘度ひび割れ注入補強材)と接着剤B(板補強用注入接着エポキシ樹脂)を選定した。回転剛性の検討を行うにあたり、各接着接合部の最大せん断耐力とせん断弾性係数を JIS K6850⁵⁾の接着試験方法に準じて取得した。図5、表1に試験体の詳細を、表2に試験結果を示す。なお金属板の表面はサンドブラスト処理をし、各使用材料を接着し1週間養生後、インストロン万能試験機を用いて加力を行った。

表3に鋼板挿入範囲を450mmとした場合の回転剛性および曲げ強度の計算値を示す。本項で検討した従来型の鋼板挿入型ドリフトピン接合は後述する梁端要素試験体におけるG4試験体(表5)と同じ仕様であり、文献1)に基づき回転剛性を算出した。接着接合試験は接着接合要素試験より得た構造特性を用いて、接合部に生じた曲げモーメントに対して接着面が一様にねじり抵抗すると仮定して文献6)7)に基づき回転剛性を算出した。

2.3 検討モデル架構の応力解析

表4、図6に設定した荷重を示す。地域係数 $Z=1.0$ 、振動特性係数 $R_t=1.0$ 、標準層せん断力係数 $C_0=0.2$ として短期荷重時の検討を行った。2.2で求めた回転剛性から、鋼板挿入型ドリフトピン接合の回転剛性として $3000\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 、接着接合部Aの回転剛性として $20000\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 、接着接合部Bの回転剛性として $80000\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ を半剛節フレーム解析モデルの接合部回転剛性として入力した。また比較対象として $10000\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ の回転剛性を加えた、建物モデル3通り×回転剛性4通りの計12ケースの応力解析を行った。なお本研究では梁端側と柱の取り付け側の双方に鋼板挿入型ドリフトピン接合もしくはドリフトピンと構造用接着剤を併用した接合部を用いた場合の木質ラーメン架構を考えるので、鋼板を介して部材が接合される柱-梁接合部は、二つの接合部の直列結合と考えて2.2で求めた回転剛性に $1/2$ を乗じている(図7)。図8(a)に示す通り、短期荷重時の最大層間変形角が $1/120\text{rad}$ 以内となるかを確認すると、接合部の回転剛性が一定以上上がると変形を規定の $1/120\text{rad}$ 内に抑制でき、従来型接合だと検討モデルに関しては変形が過大となることが分かった。図8(b)では接合部のモーメントについては回転剛性が上がると必要強度も大きくなることとわかり、層間変形角とともに検討することで接合部に必要な曲げ強度が分かった。

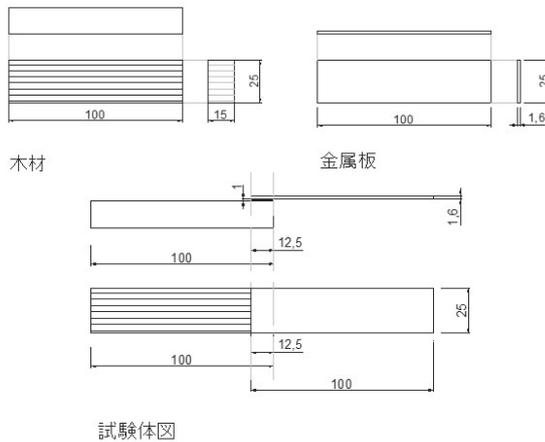


図5 一面引張せん断接着接合要素試験体図

表1 一面引張せん断接着接合要素試験体一覧

各材料名	幅 (mm)	厚さ (mm)	長さ (mm)	試験体数
木材	25	15	100	3
鋼板		1.6	100	
接着剤		1.0	12.5	

表2 一面引張せん断接着接合要素試験結果

接着剤	試験体	最大せん断応力度 (N/mm ²)		せん断弾性係数 (N/mm ²)	
		A	① 3.74	4.15	① 1.87
② 4.00	② 2.11				
③ 4.70	③ 2.24				
B	① 6.40	3.95	① 8.53	7.61	
② 2.88	② 5.76				
③ 2.56	③ 8.53				

表3 接合部回転剛性

接合	回転剛性	曲げ強度
	kN·m/rad	kN·m
ドリフトピン	3420	25
接着剤A	23900	122
接着剤B	87800	134

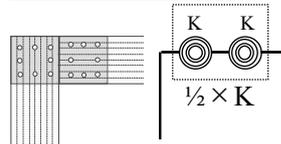


図7 柱梁接合部のモデル化

表4 設定荷重

床	設定荷重	
	種類	値
床	フローリング12mm	150 N/mm ²
	下地合板12mm	60 N/mm ²
	ポリスチレンフォーム	10 N/mm ²
	根太	90 N/mm ²
	構造用合板12mm	60 N/mm ²
	下地天井	150 N/mm ²
屋根	梁	340 N/mm ²
	計	860 kN/mm ²
	薄鉄板葺き(野地板含む)	210 N/mm ²
	屋根骨組	200 N/mm ²
	下階天井	150 N/mm ²
	梁	340 N/mm ²
計	900 kN/mm ²	

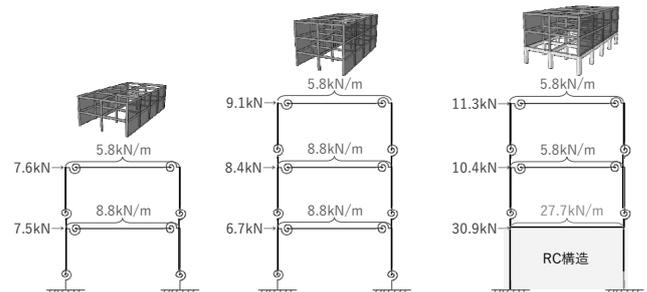
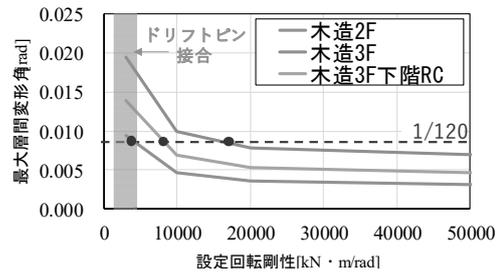
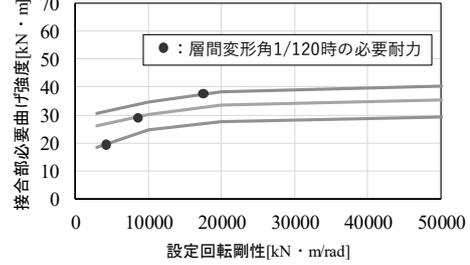


図6 長期荷重と地震荷重



(a)回転剛性と最大層間変形角



(b)回転剛性と必要曲げ耐力

図8 応力解析結果

3. 提案型梁端接合部の性能評価試験

3.1 実験計画

提案型接合部の構造性能を明らかにするために梁端接合部の静的加力試験を行った³⁾⁴⁾。梁はスギ集成材 (E65-F225, 対称異等級構成)、鋼板はSN490B材 (先孔径17mm)、ドリフトピンは16mm径のSGD3M材を用いた (図9, 10)。鋼板のサイズ (接着面積) を三種類、接着剤の有無、接着剤の種類とした。加力は水平ジャッキを用いて正負交番静的載荷実験を行った。繰り返しの履歴は、変形角 1/450、1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50、1/30、1/20、1/15 の順で3回ずつの繰り返し載荷とした (梁下端に対する加力点変位より算出)。

3.2 実験結果

図11に各試験体の接合部モーメント-接合部回転角関係を示す。G3は変形角0.5%付近まではほとんど耐力が上昇せずピンのような挙動を示した。変形角3.0%付近で急激な耐力低下が見られ、ドリフトピンに沿った鉛直方向の木材の割裂とドリフトピンの曲げ塑性変形を確認した。接着剤を用いた試験体は初期剛性、耐力の向上を確認した。G3-Aは変形角1.0%で木材に繊維平行方向の割裂が生じ最大耐力に到達した後、G3と同じようなドリフトピン抵抗機構に移行し、変形角3.0%時に割裂が進展し再度急激な耐力低下が起きた。G3-Bは変形角0.1%時に最大耐力に達し、ドリフトピンを結ぶ割裂に加えて、ガセットプレート端部に繊維直角方向の割裂が見られ、木材側で脆性的な破壊が生じた。G4、G5はG3と同じように変形角0.5%付近まではピンのような挙動を示し、破壊状況も同様になった。接着剤を使用した試験体はドリフトピンのみの試験体に比べ、初期剛性と最大耐力が大きく向上し、木部が曲げ破壊した。その結果、変形性能に乏しい、脆性的な破壊となった。試験結果のまとめを図12、最終破壊状況を図13に示す。ドリフトピン抵抗機構によって破壊した試験体は、繊維平行方向の割裂が見られ、接着面積及び接着強度が強くなると接合部の剛性・強度が高くなり、ガセットプレート端部で木材の曲げ破壊が見られた。表3に示した計算結果とG4試験体シリーズの結果を比較すると2.2で算出した必要剛性 (図8)は確保しているが、2章の検討による計算値¹⁾²⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾は実験値より過大評価していることが分かった。

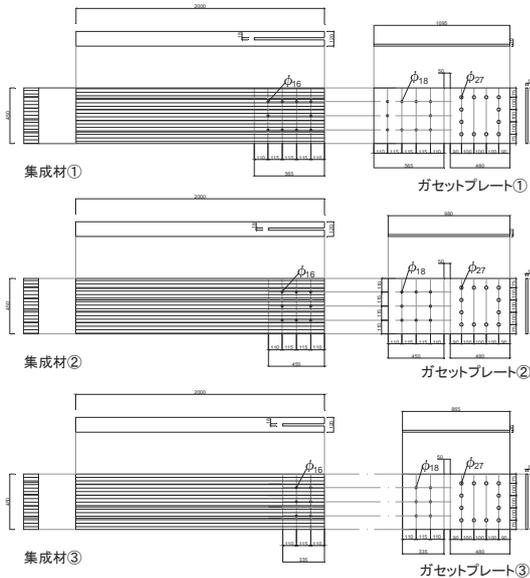


図9 梁端要素試験体図

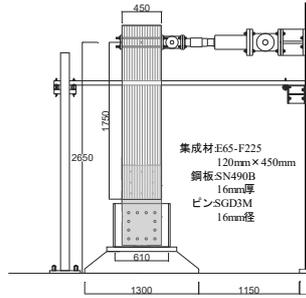


図10 加力装置

表5 試験体一覧

試験体名	埋め込み	ピン数	接着剤
G3	335mm	6	無
G3-A			A
G3-B			B
G4	450mm	8	無
G4-A			A
G4-B			B
G5	565mm	10	無
G5-A			A
G5-B			B

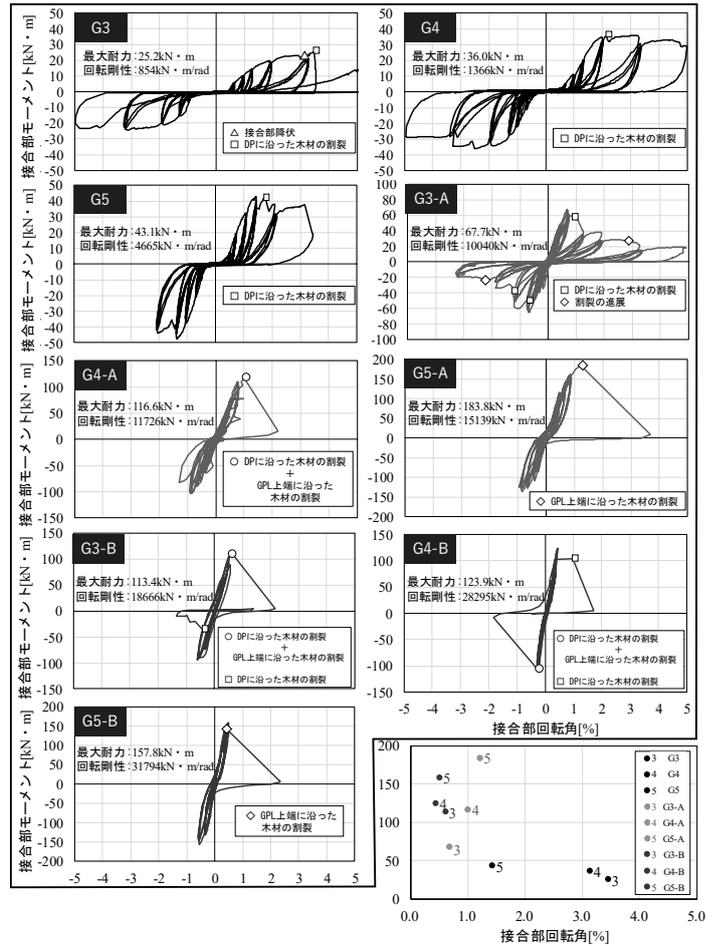


図11 接合部モーメント-回転角関係

図12 実験結果まとめ

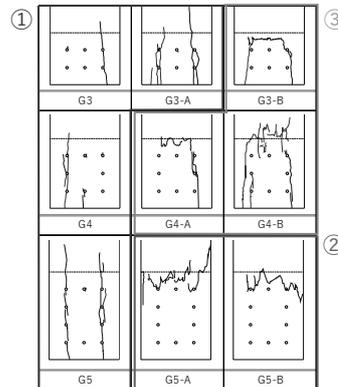


図13 最終破壊性状

- ① ドリフトピンに沿った繊維方向の割裂 (ドリフトピンの降伏)
- ② 鋼板の端部に沿った割裂 (木部の脆性的な破壊)
- ③ ①②混合型

4. 接着接合試験と逆解析による真のせん断弾塑性特性の推定

4.1 接着せん断要素試験

提案接合部の性能評価方法を確立すべく、JIS⁵⁾に準拠した小面積での接着接合試験に対して、第3章で用いた試験体の接着接合部分に近いサイズの接着接合せん断試験を行った(図14)。集成材(スギ集成材 E65-F255, 同一等級構成)はX:50mm/Y:240mm/Z:240mm、鋼板(SN490材)はX:16mm/Y:240mm/Z:300mmとして、接着剤は集成材と鋼板の間に1mmのクリアランスを設けて接着剤を注入した。二面せん断形式を採用し、曲げ成分が卓越することを防ぎ、繊維方向での差異についても検討するため、木材の繊維方向をパラメータとして加えた。また第3章で用いた接着剤A及びBは高い剛性・耐力を実現したが脆性破壊が生じたため、以後検討は接着剤Bに加え変形能力の高い接着剤C(弾性エポキシコーキング剤)とする。せん断応力度は鋼板に与える荷重をせん断有効面積全体で除し、せん断ひずみは鋼板の木材に対する相対変位を接着層厚さで除して算出した。本研究では前者を見かけのせん断応力度、後者を見かけのせん断ひずみとして、「見かけのせん断特性」とする。図15に試験結果を示す。

F00-Bシリーズでは破壊時まで0.1mm~0.3mm程度の変形のみ生じ高い剛性を示したが、最大耐力を迎えた後は急激な耐力低下を生じ、片面の木材が剥がれる形で破壊を迎えた(図16左)。グラフを見ると最大耐力後に再び耐力が上昇しているが、片面の破断後に逆側の接着面で耐力を保持していたためだと思われる。本接合部の特性としては最大耐力時までを考えることとする。F90-Bシリーズでは最大耐力時に試験体底部にめり込み破壊が生じ、加力を中止した。接着層はF00-Bシリーズのように面全体が剥離するような破壊性状ではなく、徐々に接着剤が剥がれ部分的に木材が剥離するかたちとなった。F-CシリーズはF-Bシリーズより剛性は低い、最大耐力を迎えた後に緩やかに耐力が下降していく形となり、木部ではなく接着層の剥離による破壊で粘りのある接合部となった(図16右)。繊維方向の違いとして、繊維平行方向で比較的大きな耐力を示した。

4.2 有限要素法による逆解析

二面せん断形式の接着接合要素試験の結果を用いて逆解析により真の接着接合部のせん断弾塑性特性を推定する。図17に有限要素解析モデルを、表6~9に各材料特性⁸⁾を示す。要素サイズは変形が集中すると思われる接着層を5mmとして、鋼板は50mm、集成材は20mmとした。有限要素解析にはANSYS2019 R1を用いた。接着接合では接着剤・被着体自身のせん断変形及び接着界面の変形が起こるが、本研究では単純化して考えるために接着界面の境界条件は完全固着として界面の変形も含めたせん断特性を接着層要素に入力した。よって接着剤自体は等質材料であるが、本解析モデル上のYZ方向のせん断特性は接着剤自身の特性とし、XY・XZ方向では各材料との界面の変形を考慮したせん断特性とした。

逆解析では、まず接着層のせん断特性として見かけのせん断特性を入力する。その後、解析結果を用いて実験と同様に見かけのせん断応力度-見かけのせん断ひずみ関係を算出し、見かけのせん断弾性係数を比較する。解析上で入力する接着層のせん断弾性係数のみをパラメータとして、実験結果と解析上での見かけのせん断弾性係数が同程度になるときの接着層のせん断弾性係数を推定する。このときのせん断弾性係数を「真のせん断弾性係数」と呼ぶ。

図18、表10に推定した真のせん断特性を、図19に真の特性値を

入力した解析モデルにおける実験最大荷重時の接着層のせん断応力度分布を示す。応力度分布は接着層のせん断遅れにより端部にせん断応力度の集中が見られ中央に向かって下がっていくため、見かけのせん断特性に比べて逆解析により推定した真の特性値は高い値を示していることが確認できた。なおF00-B試験体に関して、変形域が微小であったことや解析結果が実験値より低い値で収束したことから加力時に偏心が起きたと考えられるため推定値は弾性限界の50N/mm²とした。

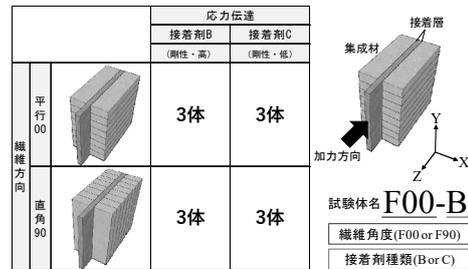


図14 二面せん断接着接合要素試験体

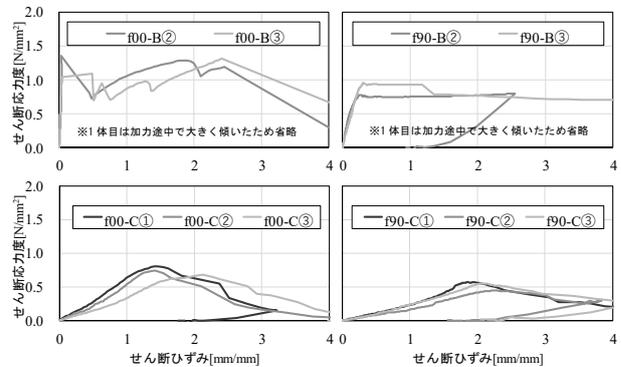


図15 二面せん断接着接合要素試験結果

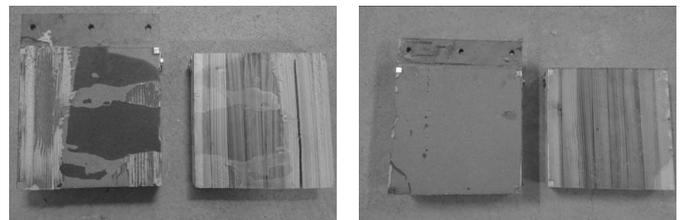


図16 最終破壊性状(左:F00-B, 右:F00-C)

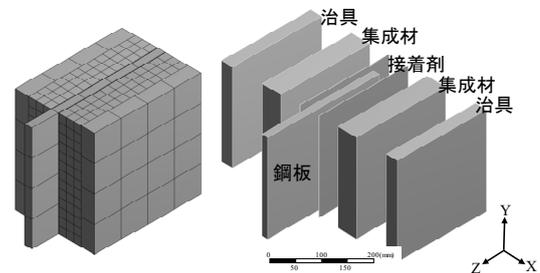


図17 二面せん断接着接合要素有限要素解析モデル

表6 集成材モデル材料特性

ヤング率X方向	5.00E+08	Pa
ヤング率Y方向	5.00E+08	Pa
ヤング率Z方向	7.35E+09	Pa
ポアソン比XY	0.40	-
ポアソン比YZ	0.0016	-
ポアソン比XZ	0.0016	-
せん断弾性係数XY	5.00E+08	Pa
せん断弾性係数YZ	5.00E+08	Pa
せん断弾性係数XZ	5.00E+08	Pa

表7 鋼板モデル材料特性

ヤング率	2.00E+11	Pa
ポアソン比	0.3	-
体積弾性率	1.67E+11	Pa
せん断弾性係数	7.69E+10	Pa
降伏強度	3.25E+08	Pa

4.3 推定した真のせん断特性による解析値と実験値の比較

本節では第3章で示したG4-B試験体の有限要素解析モデルを作成し、実験値と解析値を比較することで真の接着層のせん断特性を用いた接合部評価の妥当性の検証を行った。材料特性及び境界条件は前節の条件を用いて、接合部と反対側の梁端に荷重をかけることで接合部に曲げモーメントを生じさせた。解析モデル上で接着層におけるヤング率はJIS試験より測定した接着剤そのもののヤング率を入力し、面外のせん断特性に関して接着接合要素試験と逆解析より推定した真のせん断特性をそれぞれの方向で入力して弾性解析を行った。図20に実験値との比較を示す。第3章での検討では計算値が実験値を過大評価していたが前述した方法で推定を行った結果、剛性に関して良好な予測ができた。また実験最大荷重時の解析モデルのせん断応力度分布と試験体の破壊後の接着層の状態を比較した(図21)。破壊後の試験体の接合部を取り出し、木部分をノミで取り除き接着層の状態を確認した。接着層が破断している部分(破線範囲)の木材は容易にはがれ、破断が起こっていない箇所は木材が強く接着されていた。よって図21の破線範囲が接着層の破断箇所と考える。応力図上の最も濃い色が真の最大せん断応力度以上の部分を示しており、接着層が破断していた範囲がよく対応していることから真のせん断特性を用いた解析の有用性が確認できた。

表10 推定した真のせん断特性

	見かけのG	推定した真のG	平均 τ_{max}	τ_{max}
	実験値	N/mm ²	実験値	解析値
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
F00-B	4.44	50	1.15	2.47
F90-B	2.14	2.0	0.85	1.98
F00-C	0.44	5.0	0.74	0.85
F90-C	0.25	0.5	0.52	0.66

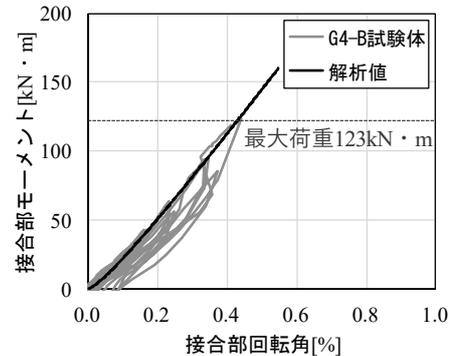


図20 実験値と解析値の荷重変形関係の比較

表8 接着剤B材料特性

ヤング率	3.10E+09	Pa
ポアソン比	0.3	-
せん断弾性係数	1.00E+09	Pa

表9 接着剤C材料特性

ヤング率	6.00E+05	Pa
ポアソン比	0.3	-
せん断弾性係数	2.60E+05	Pa

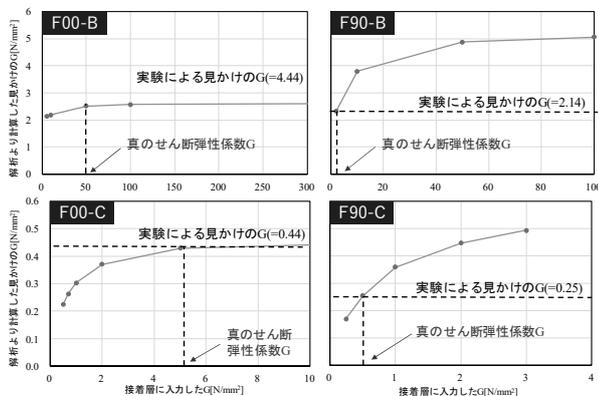


図18 逆解析過程

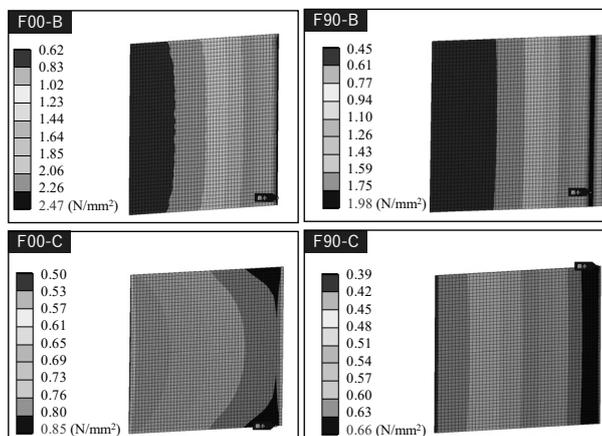


図19 最大荷重時の接着層XZせん断の応力度分布

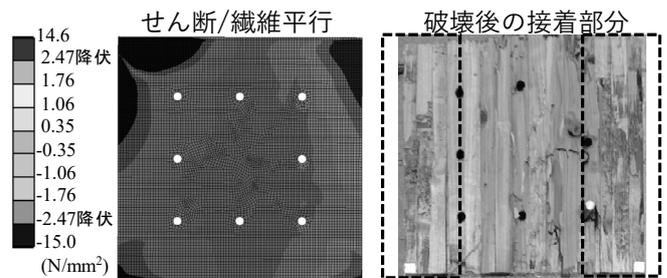


図21 試験体の破壊性状と応力度分布解析値の比較

5. 靱性型接合部の設計と木質ラーメン架構の靱性性能評価

5.1 靱性型接合部の設計(鋼板降伏型)

これまでの提案接合部の性能評価をもとに、2.2で設定した建物モデルのうち三階建てのラーメン架構を対象に、鋼板の先行降伏により靱性の確保を期待した新たな接合部(以下G4-B(靱性型))を設計し、有限要素解析により構造性能について検討した。G4-B試験体のガセットプレート部(本設計ではSS400とした)に設けたドックボーン形状の切り欠きにより塑性ヒンジを発生させることを意図したG4-B(靱性型)接合部では、一次設計で短期荷重時の最大層間変形角を1/120以内に収め、鋼板の欠き込み部分が先行して降伏するよう形状の検討を行った。また鉄骨造の構造設計の考え方に基づき、十字接合部において柱が梁の全塑性モーメントの1.5倍の曲げ耐力となるよう耐力を決めた⁹⁾。G4-B(靱性型)接合部の最大耐力はガセットプレートのドッグボーン部分の全塑性モーメントに等しく、回転剛性は鋼板部分と接着接合部分の直列合成として求める(図22)。以上の条件よりドックボーン形状はh=260mm、 $\ell=100$ mmと設定した。

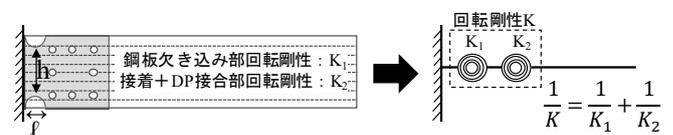


図22 G4-B(靱性型)鋼板降伏時応力

5.2 靱性型接合部の設計（接着層降伏型）

前節に続き、本節では接着層の塑性化により靱性の確保を期待した接合部（以下接着C接合部）を設計し、有限要素解析により構造性能について検討した。接着C接合部では従来型の鋼板挿入型ドリフトピン接合より高い初期剛性を与えつつ変形が進むと接着剤が徐々に降伏していき、従来型接合本来の抵抗機構に移行し、ドリフトピンの木部へのめり込み抵抗となる。図23に接着層降伏時の応力度分布を示す。鋼板と木材部分は降伏値（SS400降伏強度325N/mm²、集成材の基準曲げ強度：22.5N/mm²）に達しておらず、接着層が端部から降伏していることが分かる。図24に接合部復元力特性を示す。

5.3 木質ラーメン架構の靱性性能評価

5.1で設計した靱性の確保を期待した接合部の復元力特性を3階建木質ラーメンモデルの接合部回転バネに入力して静的荷重増分解析を行い、一質点系に縮約した耐力曲線と限界耐力計算法における基準地震動の加速度応答スペクトルを用いて木質ラーメン架構の靱性性能を評価した¹⁰⁾。対象の地盤は第二種地盤とし、地域係数は1.0とする。比較対象として従来型の鋼板挿入型ドリフトピン接合のG4接合部と提案型のG4-B接合部を用いた架構の解析結果も併せて示す。図25に各モデルの一質点系の耐力曲線の比較を、図26に耐力曲線と応答スペクトルの関係を示す。G4-B接合部を適用した建物は従来型（DP接合）のみの場合と比較して高い剛性と耐力を持つが安全限界角に達する前に一階柱の接合部が最大耐力に達し、層崩壊となった。G4-B（靱性型）接合部は鋼板の降伏により木部での脆性破壊が起こる前に塑性化している。接着C接合部を用いた場合、従来型に比べ高い初期剛性を保持しつつ木部へのめり込み抵抗に至っている。図26を見るとG4接合部を用いた架構では安全限界では変形が大きく進むため減衰が大きくなり余裕度1.03となったが先述した通り一次設計で規定値以上の変形が生じるため0.87となっている。G4-B接合部を用いた架構では、損傷限界時では1.36と最も高い余裕度を持つが、安全限界時には接合部が降伏を迎えているため0.77となった。靱性型の提案接合部を適用した木質ラーメン架構では損傷限界時および安全限界時で高い余裕度を示した。

6. まとめ

- 構造用接着剤を用いた木質接合部の提案及び構造実験・解析による性能評価法の確立と架構の靱性評価を行い、以下の知見を得た。
- 1) 構造用接着剤により一般流通した断面の集成材でも中規模事務所建築の一次設計を満たす剛性及び耐力を持つ接合部が実現した。
 - 2) 二面せん断形式の接着接合要素試験及びその試験結果を用いた逆解析により提案型接合部の構造性能評価法を確立した。
 - 3) 鋼板の先行降伏または接着層の塑性化により従来型より高い剛性・耐力を持ち、大変形に耐え得る接合部を設計した。
 - 4) 靱性型提案接合部を用いた三層木質ラーメン架構を、応答スペクトルを用いて評価し高い靱性性能を保持していることが分かった。

[謝辞]

本研究第3章における梁端接合部の性能評価試験は株式会社熊谷組との共同研究によるものである。また本研究を行うにあたり物林株式会社、アイカ工業株式会社から木材及び接着剤関連する試験材料や情報をご提供頂いた。関係各位に感謝の意を表す。

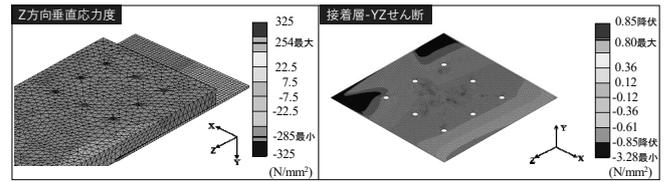


図23 接着C接合部接着層降伏時応力

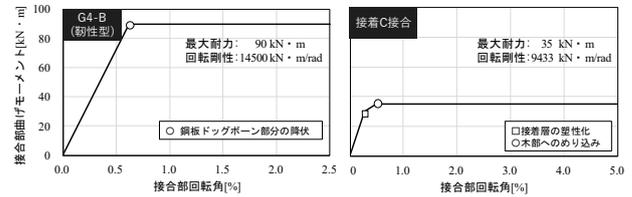


図24 接合部復元力特性

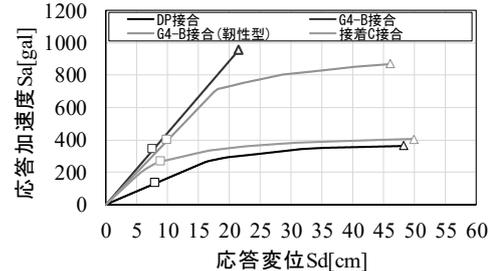


図25 一質点系耐力曲線

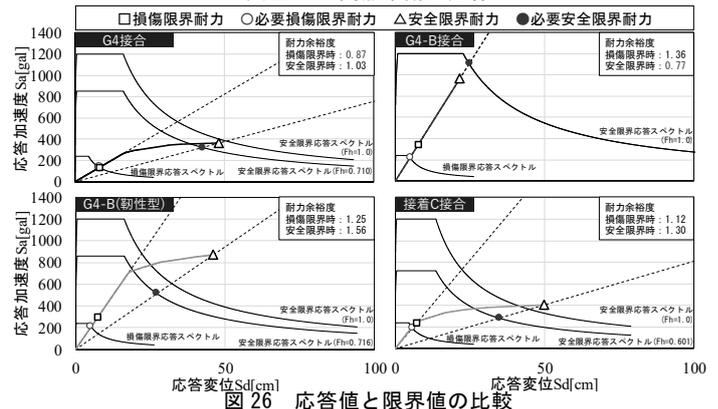


図26 応答値と限界値の比較

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，2009
- 2) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説，2002
- 3) 増子寛ほか4名：木質ラーメン架構を対象とした接着剤とドリフトピンを併用した鋼板挿入型柱梁接合部の構造性能に関する実験的研究 その1 構造フレームの提案と実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集C1，P.169-170，2019
- 4) 熊谷太希ほか4名：木質ラーメン架構を対象とした接着剤とドリフトピンを併用した鋼板挿入型柱梁接合部の構造性能に関する実験的研究 その2 実験結果と構造性能の評価，日本建築学会大会学術講演梗概集C1，P.171-172，2019
- 5) JIS K6850：接着-剛性被着材の引張せん断強さ試験方法，1999
- 6) Jan Francu, Petra Novackova, Premysl Janicek：Torsion of non-circular bar, Engineering MECHANICS, Vol19, No.1, P45-60, 2012
- 7) 桑村仁：「建築力学-塑性論とその応用」，井上書院，2014
- 8) 千田智弘，佐々木貴信，後藤文彦，薄木征三：土木学会論文集A1 67(1)，108-120，2011
- 9) 川島敏夫，小川厚治：「鋼構造骨組における柱梁耐力比及び柱梁剛性比の調査検討」，鋼構造論文集，第14巻，第53号，2007
- 10) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：「伝統建物を生かす木造耐震設計マニュアル」学芸出版社，2004

[2020年1月31日原稿受理 2020年4月24日採用決定]