

# 木材と鋼材の接着接合に関する実験的研究

織田 祥輝

## 1. はじめに

脱炭素社会の実現に向け、国内外で木質構造の大規模化、高層化が検討されている中、剛性の確保が難しい接合部の開発は特に活発と言える。接合部の要求性能は、建築物の条件に因って様々であるが、高い剛性が期待される場合に、鉄筋挿入接着接合、所謂 Glued in Rod 工法（以下、GIR と呼ぶ）が選ばれることが多い。GIR は、1970 年代後半から技術的な蓄積が成されてきたが（例えば 1) ~ 3)）、我が国では未だ実験的評価を基本としている 4)）。その要因として、GIR の剛性・強度の発現機構が不明瞭な点が挙げられ、例えば鋼棒を挿入する先穴の径に関する議論に限っても、統一的な見解に至っているとは言えない状況にある 5)、6)。

以上を背景に、本研究ではまず GIR の応力伝達機構を力学的に解釈し、その整理に基づき知見に乏しい接着剤の基礎物性を調べる実験を実施することで、GIR に関する諸性状を検討した結果について述べる。

## 2. GIR の応力伝達機構

GIR は先穴を設けた木材に鋼棒を挿入し、接着剤を充填することでそれらを一体化させる接合法である。ここでは、挿入する鋼棒に引張力が作用する場合を例に、応力伝達機構を整理する。構成概要を図 1 に示す。

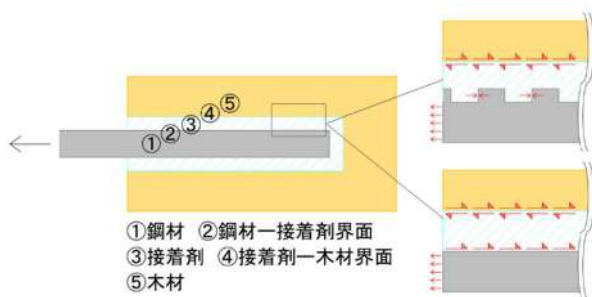


図 1 GIR の応力伝達機構

図 1 に示すように、鋼材に作用する引張軸力は、接着剤を介して木材に伝達される。これら 3 種類の材料に加え、鋼材-接着剤、接着剤-木材の界面でも応力が伝達されることから、併せて 5 つの要素で GIR の力学的性質が決定されると考えられる。このうち、メーカー主導で開発される接着剤単体の性質と、各界面の特性には未解明な点も多く、検討の余地が残る。

木材-接着剤の界面に着目すると、多孔質である木材への含浸が想定され、接着剤の粘度や養生条件に因

る差異が力学的性質に影響すると考えられる。一方、鋼材-接着剤の界面に着目すると、鋼材表面の状況により、所謂、凝着理論で言う掘り起こし成分と凝着成分の割合に違いはあれど 7)、含浸の影響はないことが予想され、先行してその特性を評価することで、木材-接着剤の界面に応用が可能と言える。以上から、本研究では、これら接着剤自体、ならびに鋼材-接着剤の界面の特性に着目し、その評価を試みる。

## 3. 接着剤の圧縮試験

### 3.1. 試験体の概要

本研究ではまず、接着剤の基本的な力学的性質を明らかにするため、材料単体の圧縮試験を行った。図 2 に示すように、ポリアセタールの型枠に接着剤を充填し、一定期間の養生後に硬化した接着剤を指定寸法に切り出して試験体を作成した。寸法効果や加圧面の局所的な変形などの影響を考慮し、試験体は加圧面の断面積および高さの異なる 6 種類、計 8 体とした。

試験体番号	D [mm]	H [mm]
C-15-30①	15	30
C-15-30②	15	30
C-15-60	15	60
C-15-90	15	90
C-30-60①	30	60
C-30-60②	30	60
C-30-120	30	120
C-30-180	30	180

図 2 接着剤の圧縮試験の試験体概要

本研究で採用した接着剤は、GIR として複数の施工実績があるアルファ工業製のエポキシ樹脂モルタル接着剤 AK レジン 500 を用いた。なお試験体の養生について、接着剤の JIS 規格において温度 0 °C 以上 23 °C 以下で接着剤の接着強さに変化がないことを踏まえ 8)、平均温度 21.5 °C、平均湿度 25.5 % の空調環境下で養生した。養生期間は 14 日間である。

### 3.2. 試験方法と計測計画

圧縮試験は最大荷重 500 KN の材料試験機で実施した。荷重時間 120 秒程度で試験体が破壊するよう、荷重速度 = 60 N/mm<sup>2</sup>/min とし、試験体の破壊が視認できた時点で試験を終了した。計測項目は、荷重荷重と試験機のストロークに加えて、荷重方向およびその直交方向の歪みを計測した。歪みは、歪みゲージに

より計測し、図 3 に示すように、側面を時計回りに A ~ D 面として、A 面と C 面で載荷方向、B 面と D 面で載荷直交方向に歪みゲージを貼り付けた。

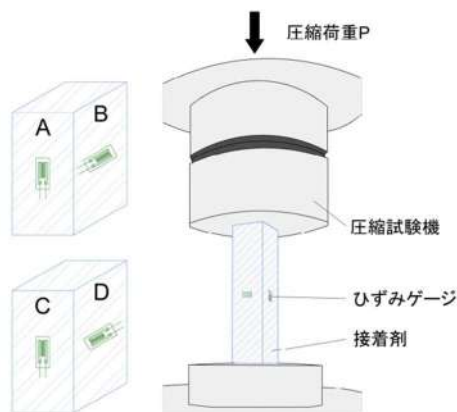


図 3 圧縮試験の試験体セッティング概要

### 3.3. 試験結果と力学的性質の評価

試験結果として、図 4 に載荷方向の応力—歪み関係を、図 5 に載荷方向とその直交方向の歪みの関係を示す。同図で、応力は載荷荷重を試験前に測定した加圧面の断面積で除すことで、歪みは同一方向の歪みの平均値より評価した。なお、図 4 に併記したヤング係数は各試験体の平均値で、個々の試験体では最大応力の 10 % と 40 % の範囲におけるデータより、線形回帰によってヤング係数を評価した。

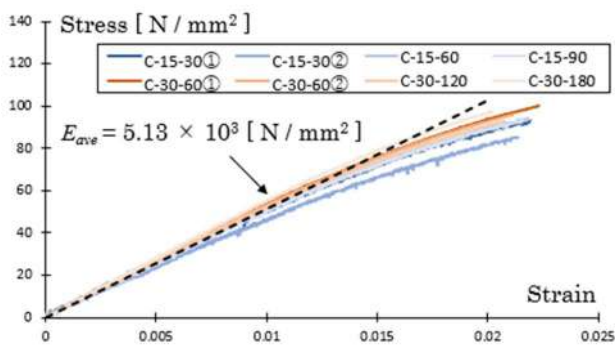


図 4 圧縮試験による応力—歪み関係

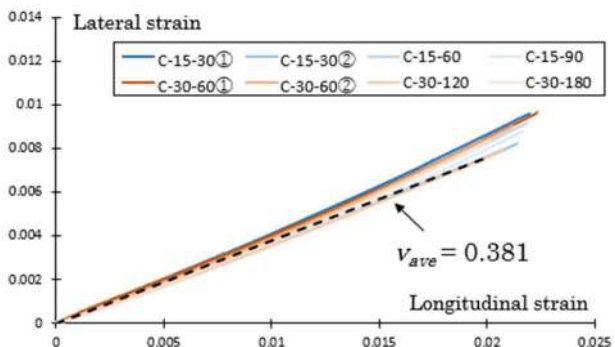


図 5 載荷方向と直交方向の歪み関係

試験体の破壊は、図 6 に示すように試験体の辺長比によって異なる破壊形式を呈したが、いずれも最大荷重に達すると同時に急激な荷重低下が生じるものであった。荷重の急落という観点から、一種の脆性的な破壊であるが、木材のそれとは異なり、飛散する様子は少ない点も特徴として挙げられる。

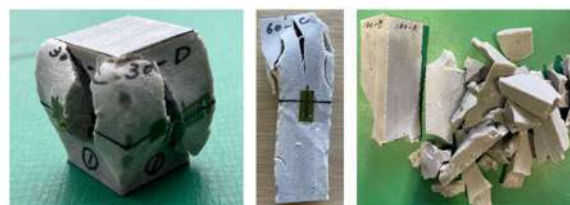


図 6 圧縮試験体の破壊形式

試験体形状により破壊形式に相違はあったが、前述の通り、応力—歪み関係における差異は小さいため、本研究ではこれらの平均値を接着剤の特性とした。表 1 に本試験で得られたヤング係数  $E$ 、ポアソン比  $\nu$ 、せん断弾性係数  $G$  ならびに最大応力より評価した材料強度  $f$  を示す。

表 1 接着剤の力学的性質

ヤング係数 $E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	ポアソン比 $\nu$	せん断弾性係数 $G$ [N/mm <sup>2</sup> ]	材料強度 $f$ [N/mm <sup>2</sup> ]
$5.13 \times 10^3$	0.381	$1.86 \times 10^3$	$1.21 \times 10^2$

## 4. 鋼材間の接着接合に対する引張せん断試験

### 4.1. 試験体の概要

本研究のもう 1 つの目的である鋼材—接着剤の界面の特性を調べるため、引張せん断試験を実施した。凝着理論に基づけば、鋼材の表面性状により特性が変化すると予想されるため、ここでは表面粗さの異なる 2 種類の鋼材を用意した。試験体の概要を図 7 に示す。

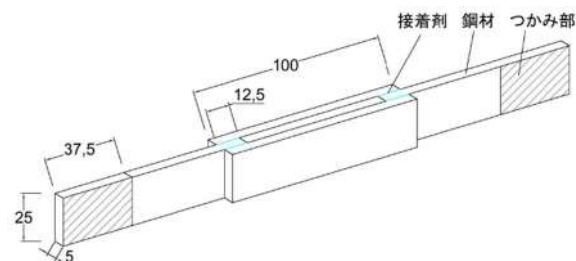


図 7 引張せん断試験の試験体概要

図 7 に示すように、試験体は 100 mm × 25 mm × 5 mm の鋼材 (SS 400 材) の板 4 枚を、JIS に準拠して 1 ヶ所当たり 25 mm × 12.5 mm の接着領域で接合したものである<sup>9)</sup>。接着剤は、前述の圧縮試験と同様に、

AK レジン 500 である。鋼材は、ロータリー研磨仕上げのままとした B シリーズ、粒度 120 の布やすりで研磨した R シリーズの 2 種類を用意した。表面粗さは、算術平均粗さ  $R_a$  として B シリーズで 1.8 ~ 2.5  $\mu\text{m}$ 、R シリーズで 0.63 ~ 1.51  $\mu\text{m}$  であった。

接着剤は、一般に養生 14 日で強度が安定することから<sup>10)</sup>、ここでは 7 日と 14 日の 2 種類とし、圧縮試験と同じく空調環境下(平均温度 22.4  $^{\circ}\text{C}$ 、平均湿度 29.8%)で養生した。表 2 に試験体情報をまとめる。

表 2 引張せん断試験の試験体一覧

試験体名	表面処理	養生日数	試験体数
B-14	ロータリー研磨	14	6
B-7	ロータリー研磨	7	6
R-14	布やすり	14	6
R-7	布やすり	7	6

#### 4.2. 試験方法

引張せん断試験は、最大荷重 50 KN の材料試験機で実施した。載荷速度は、載荷時間 65 秒程度で試験体が破壊することを旨に、2100 N/min とし、破壊まで試験を実施した。試験体の掴み部分の長さは 37.5 mm である<sup>9)</sup>。試験の概要を図 8 にまとめる。

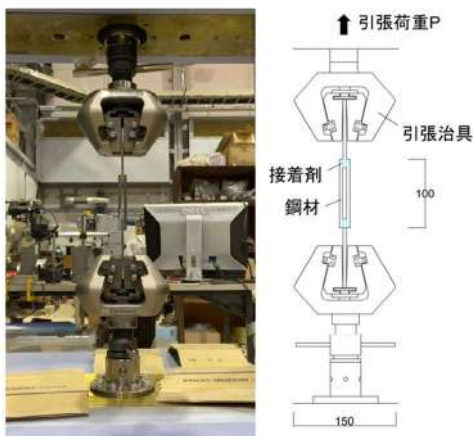


図 8 引張せん断試験体セッティングの概要

#### 4.3. 引張せん断試験の結果

試験結果として、まず破壊性状を図 9 に示す。

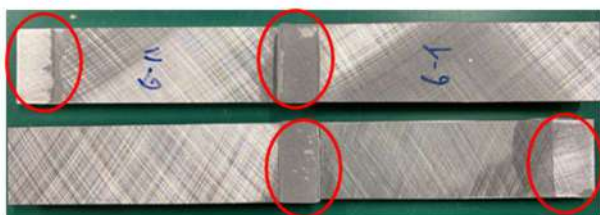


図 9 引張せん断試験の試験体の破壊性状

同図に示すように、すべての試験体で接着剤の中間部で破壊を生じる、所謂凝集破壊でなく、界面での凝着部が破壊に至ったことが観察された。

次に、引張せん断試験で得られたシリーズごとの最大せん断応力を図 10 に示す。最大せん断応力  $\tau_{max}$  は、最大荷重  $P_{max}$ 、破断面の面積  $A$  より、

$$\tau_{max} = \frac{P_{max} / 2}{A} \quad (1)$$

として求めた。なお、R-14 のうち 1 体が、鋼材—治具間で滑動したため、この結果は同図より除外した。

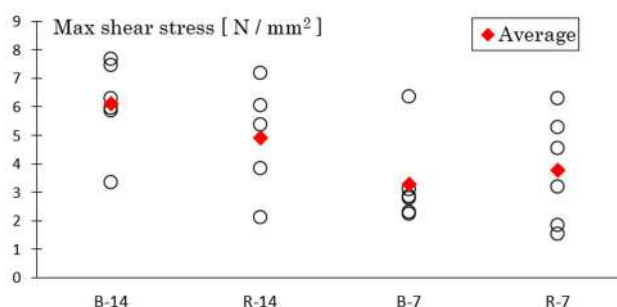


図 10 各試験シリーズの最大せん断応力

図 10 より、養生 7 日に比べ 14 日の試験体の接着強度が平均的に大きいと判断される。圧縮試験の結果を振り返ると、養生 14 日でばらつきが小さかったことから、養生 14 日で接着剤の強度発現には十分と考えられる。共に養生 14 日で表面粗さの異なる B シリーズと R シリーズに着目すると、接着面の表面が粗い B-14 シリーズの方が滑らかな R-14 シリーズに比べ、接着強度はわずかに大きいと判断され、以降ではこの点を凝着理論に基づいて考察する。

#### 5. 鋼材—接着剤界面の接着強度の影響

##### 5.1. 凝着説における凝着と掘り起こしの効果

凝着説に基づけば、摩擦力は凝着効果と掘り起こし効果の影響を受ける。材料の硬度が近い場合、両者間の摩擦は真実接触面の凝着した面積に比例し、そのせん断破壊に必要な力を凝着項  $F_a$  と呼んでいる。他方、硬軟の差が大きい場合は柔らかい材料が硬い材料に押し込まれ、その結果、滑動時に前面となる部分を掘り起こす力が必要となり、これを掘り起こし項  $F_p$  としている。図 11 には、これらを模式的に示した図を示してあるが、以上を整理すると、凝着効果と掘り起こし効果は、表面の粗さに対して逆の傾向を示すもので、硬軟が大きい場合、硬い材料の表面が粗いほど、掘り起こし効果の影響が大きくなる。

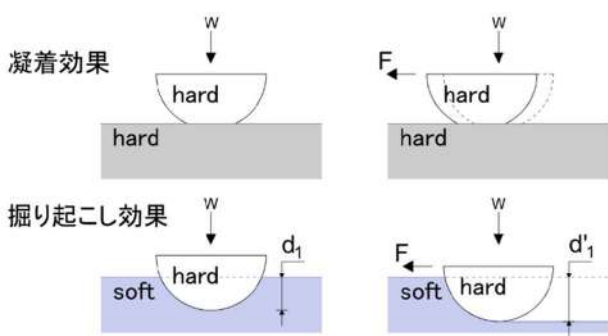


図 11 凝着効果と掘り起こし効果

前述の圧縮試験の結果より得られた接着剤及び、引張せん断試験で使用した鋼材のヤング係数はそれぞれ  $5.13 \times 10^3$ ,  $2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$  であり、硬さに大きな差があるため、鋼材—接着剤界面では掘り起こし項の摩擦抵抗への寄与度が大きなものとなると考えられる。以上の理解を踏まえると、B シリーズが R シリーズよりも算術平均粗さ  $R_a$  が大きいため、接着面全体での接着剤に対する鋼材の食込み深さが大きくなることで、摩擦力の掘り起こし項が大きくなり、B-14 シリーズの方が R-14 シリーズよりも最大せん断応力が小さくなったと考えられる。

## 5.2. 既往研究との比較による分析

次に、GIR の既往研究<sup>5)</sup>で行われた試験の結果との比較を行う。この文献で行われた試験は先穴を設けた木材に鋼材のねじ棒を挿入し、接着剤を充填した試験体の一軸引張試験であり、その概要を図 12 に示す。



図 12 既往研究の試験概要

この試験では鋼材と接着剤の界面での凝着破壊が確認された試験体は存在せず、鋼材の径及び埋め込み長さから算出される破壊荷重時の鋼材と接着剤界面のせん断応力の最大値は  $\tau_{adh/steel} = 11.9 \text{ N/mm}^2$  である。一方で、本報の引張せん断試験で観測された破壊時のせん断応力の最大値は  $\tau_{max} = 7.66 \text{ N/mm}^2$  であった。つまり、本報の引張せん断試験の方が、既往研究で行われた試験に比べて、全ての試験体で鋼材—接着剤界面

のせん断耐力が小さい。既往研究で使用された鋼材は表面の凹凸の大きいねじ切りのものであったため、本報の試験よりも掘り起こし項の影響がより大きく出たのだと考えられる。以上より、鋼材—接着剤界面のせん断耐力と接着面の凹凸の深さには、程度は不明であるが、正の相関関係があることが推測される。その要因は接着剤と鋼材の硬さの大きな差による掘り起こし項の影響が大きく表れることであると考えられるが、決定的な要因であるかは未だ検討の余地が残る。

## 6. まとめ

本報では、GIR の力学要素の内、鋼材—接着剤界面と接着剤の特性に着目し、圧縮試験と引張せん断試験を行った。得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 圧縮試験の結果から、養生期間 14 日で接着剤の強度の発現は十分であると考えられ、接着剤の基礎物性は、材料強度  $f = 1.21 \times 10^2$ 、弾性係数  $E = 5.13 \times 10^3$ 、せん断弾性係数  $G = 1.86 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比  $\nu = 0.381$  であった。
- 2) 引張せん断試験の結果から、養生期間 7 日間に比べて 14 日間の方が接着強度は平均的に大きい。
- 3) 既往研究との比較により、鋼材—接着剤界面において、せん断耐力と接着面の凹凸の深さには、程度は不明であるものの、正の相関関係が確認され、掘り起こし効果によるものであると推測された。

今回明らかになったことを踏まえて、今後は接着剤のさらなる理解を深めていくことに加えて、他の力学要素についての研究を行っていき、GIR の応力伝達機構を解明していく計画である。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—, 2006, 6
- 2) 井上正文, 後藤靖ほか：接着剤と接着金物を併用した木質構造仕口接合部に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 498 号, pp105-111, 1997. 8
- 3) 鴛海四郎, 小野泰ほか：集材材梁継手の曲げせん断試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.129-130, 1990. 10
- 4) 小野泰, 鴛海四郎ほか：木質ラーメン構造の接合部に関する構造耐力実験（その 4）鉄筋接着接合による柱—はり接合部, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 79-80, 1992.8
- 5) A.Rossingnon, B.Espion : Experimental assessment of the pull-out strength of single rods bonded in glulam parallel to the grain, Holz Roh Werkst 66, pp.419-432, 2008.12
- 6) J.G. Broughton, A.R. Hutchinson : Pull-out behaviour of steel rods bonded into timber, Materials and Structures, Vol.34, pp.100-109, 2001.3
- 7) A.Thelin, P.Feldt : Glued-in Rods in Timber Structures Finite Element Analyses of Adhesive Failure, 2018
- 8) 財団法人 日本規格協会：JIS K 6831 接着剤—接着強さの温度依存性の求め方, 2003
- 9) 財団法人 日本規格協会：JIS K 6850 接着剤—剛性被着材の引張せん断接着強さ試験方法, 1999
- 10) 井上正文, 後藤靖ほか：接着剤と接着金物を併用した木質構造継手接合部に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 489 号, pp59-66, 1996. 11