

# 中高層木造建築構法開発における 貫通孔付き継手を有する梁の構造実験と耐力評価

## Structural Experiment and Strength Evaluation of Beam Joints with Openings in Development of Mid- to High-Rise Timber Construction

白山 貴志\*<sup>1</sup>, 蛭田 駿\*<sup>1</sup>, 井上 樹里也\*<sup>1</sup>, 徳武 茂隆\*<sup>1</sup>

TAKASHI SHIRAYAMA, SHUN HIRUTA, JURIYA INOUE, SHIGETAKA TOKUTAKE

中高層木造建築の実現に向け、木質柱および梁に接着接合された一部アンボンド区間を有する鋼棒と、鋼製の柱梁接合部パネルを接合するラーメン架構を開発した。その一環として、GIR 接合を用いた継手に炭素繊維補強を施し、孔径が梁せいりの40～45%の大きさの貫通孔を木質梁に設けることが可能となる継手構法を開発した。貫通孔付き継手を有する梁の構造実験を行い、曲げ耐力とせん断耐力を評価し、設計式が妥当であることを確認した。

キーワード：中高層木造、梁継手、貫通孔、GIR 接合、炭素繊維

To implement mid- to high-rise timber buildings, a rigid frame system was developed in which glued-in rods (GIRs), with partially unbonded segments, are embedded into timber columns and beams and connected to a steel beam-column joint panel. As part of this development, a construction method was proposed wherein GIR-based beam joints are reinforced with carbon fiber, thereby enabling the formation of openings with diameters equivalent to 40–45% of the beam depth at the joint region. Structural experiments on beam joints with openings were conducted to evaluate their bending and shear strength. The test results confirmed the validity of the proposed design equations.

**Keywords:** Mid-to high-rise timber, Beam joint, Opening, Glued-in rod joint, Carbon fiber

### 1. はじめに

脱炭素社会の実現に向けた、炭素固定や二酸化炭素排出量削減を目的とする中大規模建築物への構造部材としての木材利用の社会的要求の高まりに応えるため、様々な建築用途に求められるスパンに対応できるだけでなく、中高層化を見据え、靱性のある高い耐震性能を建築物に与える木質ラーメン架構が開発されている<sup>1),2)</sup>。柱梁接合部パネル(仕口)を鋼製とし、木質柱および梁の端部に挿入接着された鋼棒の一部に降伏後の靱性確保を目的としたアンボンド区間を設け、その鉄骨仕口にボルトで締結して形成される架構である(図-1)。

様々な用途に応えることが目的の架構であるため、木質梁にはRC造やS造と同等の大きさの設備配管用貫通

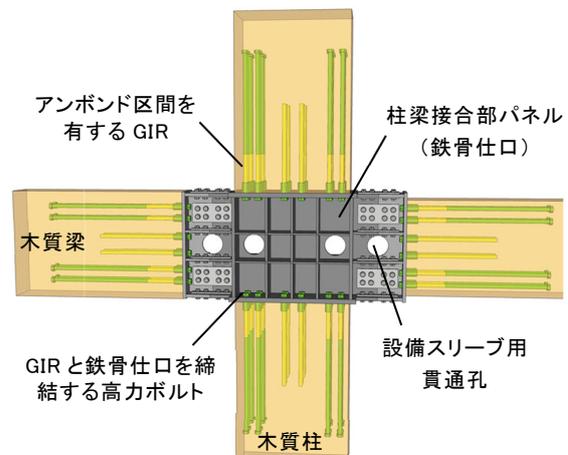


図-1 ラーメン架構概要

\*<sup>1</sup> 建築本部 構造・免制震開発部

孔が要求される。しかしながら、文献3)において貫通孔径は最大でも梁せいの25%かつ150mmまでに制限されており、様々な用途に対応できる設備配管用貫通孔を木質梁に設けることができない。そのため先に開発した架構では、図-1に示すように鉄骨仕口部に貫通孔を設けることとしていたが、位置が限定されるため、設備配置、配管経路等に大きな制約を与えるものとなっていた。その問題を解決するため、図-2に示すような、貫通孔のある梁端部(仕口部)や梁継手部をGIR接合し、炭素繊維による補強を施すことで、最大で梁せいの40~45%の径を持つ貫通孔を設けることが可能となる構法が新たに開発された。本報では、架構開発の一環として行われた貫通孔付き継手を有する木質梁のせん断実験と曲げ実験の結果、および両実験から得られたせん断耐力と曲げ耐力の評価について述べる。

## 2. 貫通孔付き継手を有する木質梁のせん断実験

### (1) 実験概要

本せん断実験は、貫通孔付き継手を有する木質梁のせん断耐力および剛性、並びに貫通孔付き継手に対する炭素繊維による補強効果の確認を目的としている。

図-3に載荷模式図を、表-1に試験体の諸元、並びに図-4に試験体D7、CSJ-40およびCSJ-50の継手部詳細図を示す。貫通孔付き継手を設けた試験体数は3体で、D7は中央に40%の開口率(孔径/梁せい)の継手を1か所、CSJ-40はD7と同様の継手がスパン中央部に2か所、CSJ-50は中央に開口率45%の継手を1か所設けた梁

で、貫通孔は図-3で示すS区間に配置され、その芯を梁芯と合わせて継手部に設けられている。すべての継手は120mmのアゴ掛けとなっており、貫通孔の上下でGIRによる接合がなされ、継手部に炭素繊維による補強が施されている。使用する炭素繊維補強材は、炭素繊維を一方に引き揃え、熱硬化型のエポキシ樹脂を含有させた炭素繊維プラスチック硬化板(以下、CFRP帯板)と、炭素繊維を使用した織物である一方炭素繊維シート(以下、CFクロス)である。炭素繊維補強は、まず梁上端および下端面にCFRP帯板(幅50mm×3枚)をエポキシペーストにより貼付する。次に、上からCFクロス

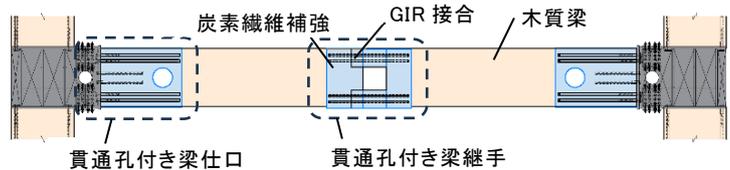


図-2 貫通孔付き梁仕口、継手概要図

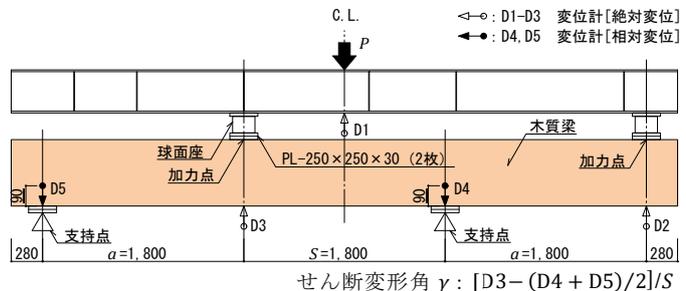


図-3 せん断実験載荷模式図(試験体D1)

表-1 せん断試験体諸元

試験体名称	母材		継手部		貫通孔			CFクロス	CFRP帯板	めり込み補強
	樹種 材種	強度 等級	寸法: B×D× 全長	箇所	鋼棒 (GIR)	形状	数	開口 率	重ね 幅 ×枚数	
D1	スギ		180	-	-	-	-	-	-	なし
D7	対称異等	E65-	×600	中央	8-M16 SNR490B	240角	1	40%	二重	50mm ×3枚
CSJ-40	級構成集	F225	×5,960			240角	2	40%	三重	
CSJ-50	成材		[mm]			270角	1	45%		

表-2 炭素繊維材料規格

項目	CFRP帯板	CFクロス
厚み(設計用)	(mm) 1.0	0.111
単位面積当たりの炭素繊維重量	(g/m <sup>2</sup> ) 1,200	200
引張強度	(kN/mm <sup>2</sup> ) 2.4	3.4
ヤング係数	(kN/mm <sup>2</sup> ) 167	230

表-2に使用した炭素繊維の材料規格<sup>4),5)</sup>を示す。他には比較用の試験体として、継手も貫通孔もない梁試験体D1が1体である。載荷方法は構造用木材の強度試験マニュアル<sup>6)</sup>に従い、逆対称4点荷重法を用いて、最大荷重に達するまでの時間が1分以上となるよう単調載荷を行った。図-3に示す通り、対称曲げが生じるS区間において、せん断力 $Q = a \cdot P / (a + S)$ が生じる載荷方式である。なお試験体D1の載荷時において、木材側の加力点および支持点部に顕著なめり込みが確認されたため、以降(D1以外)の試験体には木材側の加力点および支持点部に構造用ビス(長さ110mmまたは300mm)を打ち込み(図-5)、補強を行っている。

(2)破壊性状

図-6に荷重 $P$ -変形 $\delta_s$ (変位計D1)関係を、図-7にせん断力を梁の貫通孔を除いた断面積(有効断面積)で除して算出した平均せん断応力 $\tau_{ave}$ -せん断変形角 $\gamma$ (図-3)関係を示す。また実験後の破壊状況写真を図-8に示す。

試験体D1は $\delta_s$ が10mm程度からS区間端部の加力点および支持点が顕著にめり込み始め、剛性が低下した。その後もめり込み量の増大に伴い $\delta_s$ も増大し、荷重も緩やかに増大したが、 $\delta_s$ が100mm( $\gamma=0.0134$ )を超えたあたりで、荷重が大きく減少したため載荷を終了した。破壊性状から、加力点および支持点のめり込み破壊と判断される。

試験体D7は、 $\delta_s$ が15.1mm( $\gamma=0.0047$ )を超えたところで継手のアゴ欠き側の貫通孔角(図-4の貫通孔右下の角)を起点として、梁繊維方向に長さ800mm程度の幅方向への貫通割れが生じて荷重が減少した。しかし、すぐに増大に転じ、その後も貫通孔角付近のCFクロスや木母材の割裂が進展しながら荷重の増減を繰り返し、 $\delta_s$ が31.1mm( $\gamma=0.0133$ )で最大荷重を迎え、 $\delta_s$ が60mm付近で荷重が大きく減少したため載荷を終了した。

試験体CSJ-40は $\delta_s$ が16.4mm( $\gamma=0.0061$ )を超えたところで2つの貫通孔間において、孔の上の角を結ぶ線上にCFクロスの破断が生じて荷重が一旦減少したが、すぐに増大に転じ、その後は図-4での左側貫通孔の左側上下の角付近、および右側貫通孔の右側上下の角付近のCFクロスの破断が進展しながらも荷重は増大し続け、最終的には $\delta_s$ が50mm( $\gamma=0.0227$ )程度で荷重が大きく減少したため載荷を終了した。

試験体CSJ-50は $\delta_s$ が18.6mm( $\gamma=0.0074$ )を超えたあたりで、アゴ欠き側の貫通孔上側の角(図-4の貫通孔右上の角)を起点として梁繊維方向に長さ1200mm程度の貫通割れが生じて荷重は一旦減少したが、すぐに増大に転じ、 $\delta_s$ が22.0mm( $\gamma=0.0090$ )で最大荷重を迎えた。その後、荷重は大きく減少したが、再度緩やかな増大に転じた。 $\delta_s$ が42mm( $\gamma=0.0207$ )程度を超えて、アゴが嵌合している箇所の木梁上端の角でCFクロスの破断が進展し、荷重が緩やかに減少し始め、 $\delta_s$ が67.3mm( $\gamma=0.0360$ )で載荷を終了した。

めり込み破壊により耐力が決定した試験体D1以外では、モーメント0付近の継手、貫通孔周囲で破壊しており、継手全体としてせん断破壊したと判断しているが、詳細な破壊部位、破壊形式を特定することはできなかった。貫通孔周囲のCFクロスの破断を伴う梁の割裂や、孔周辺の集成材部のせん断や曲げ破壊などにより耐力が低下したと推定される。

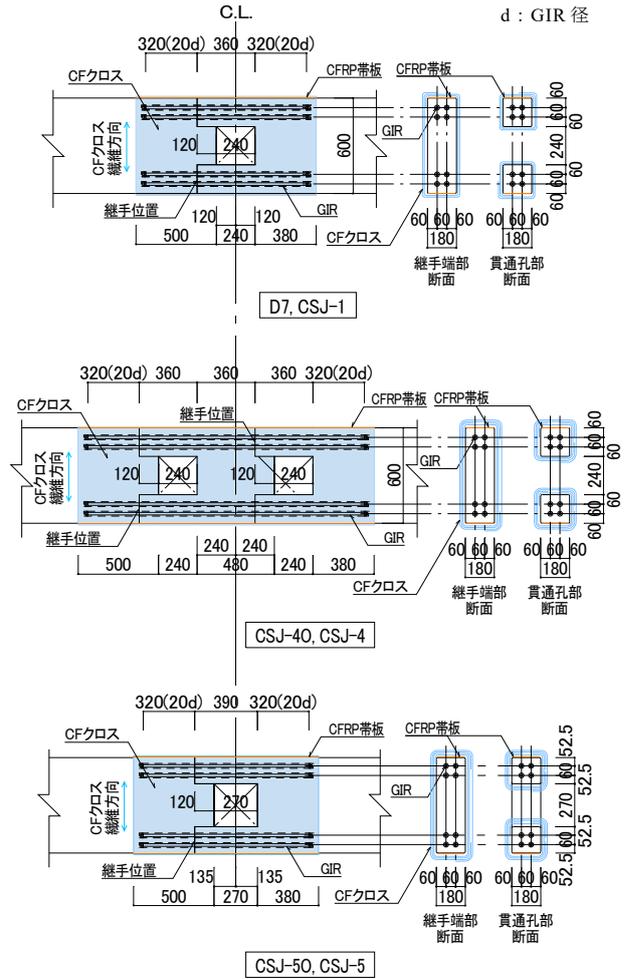


図-4 貫通孔付き継手部詳細図

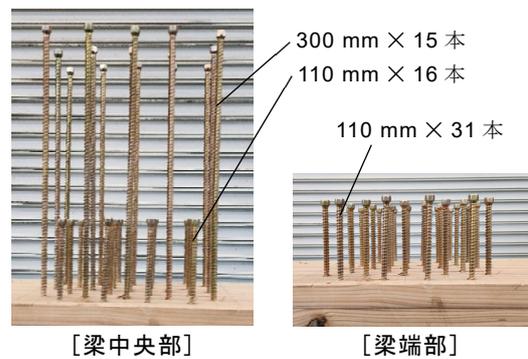


図-5 木材めり込み補強

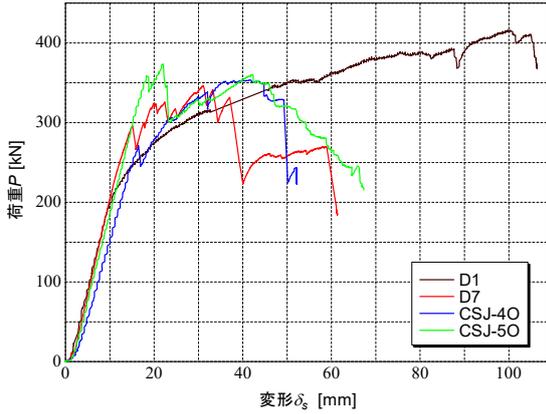


図-6 P- $\delta_s$  関係

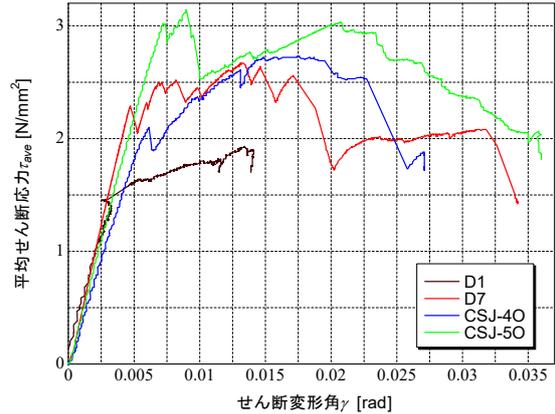


図-7  $\tau_{ave}$ - $\gamma$  関係



図-8 破壊状況 (せん断実験)

表-3 せん断実験結果一覧

試験体名称	$P_{max}$ [kN]	$Q_{max}$ [kN]	$\tau_{ave max}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$Q_{max}/Q_u$
D1	416	208	1.93	412	1.07
D7	347	173	2.67	515	0.89
CSJ-40	353	177	2.73	411	0.91
CSJ-50	373	187	3.14	407	0.96

$\tau_{ave max}$ :  $\tau_{ave}$ の最大値

$G$ :  $\tau_{ave}$ と $\gamma$ 関係の $\tau_{ave max}$ 10%- $\tau_{ave max}$ 40%区間により算定したせん断弾性係数

(3) 最大耐力と剛性

表-3に、実験による最大荷重 $P_{max}$ 、最大せん断力 $Q_{max}$ 、および $Q_{max}$ 時平均せん断応力 $\tau_{ave max}$ の一覧を示す。貫通孔付き継手を有する試験体の $\tau_{ave}$ - $\gamma$ 関係における初期剛性 $G$ (最大せん断力の10~40%間割線剛性)は、試験体D1と比較して大きな違いはなかった。貫通孔のない梁として、せん断基準強度(2.7 N/mm<sup>2</sup>)と矩形断面のせん断応力分布に関する断面係数(1.5)を用いて計算する、母材の設計用せん断耐力 $Q_u$ と比較すると、貫通孔付き継手を有する梁の耐力は10%程度低下したが $\tau_{ave max}$ は増大する傾向にあり、炭素繊維補強の効果があったと思われる。

3. 貫通孔付き継手を有する木質梁の曲げ実験

(1) 実験概要

本曲げ実験は、図-9の载荷模式図で示すように、3等分点4点荷重による载荷 $\theta$ を行い、貫通孔付き継手を有する梁の曲げ耐力および剛性、並びに貫通孔付き継手に対する炭素繊維による補強効果の確認を目的としている。

図-10に試験体DJ-1、CDJ-1、CSJ-1およびCSJ-4の立面図を、表-4に各試験体の諸元を示す。貫通孔付き継手を設けた試験体はCSJ-1、CSJ-4およびCSJ-5の3体で、各々の継手詳細は図-4に示す通り、せん断試験に用いた貫通孔付き継手と同形状、および補強とし、貫通孔付き継手はすべて等曲げ区間に配置される。その他の試

表-4 曲げ試験体諸元一覧

試験体名称	母材			スパン L	継手部		貫通孔			CF クロス 重ね	CFRP 帯板 幅 ×枚数
	樹種 材種	強度 等級	寸法: B×D× 全長		箇所	鋼棒 (GIR)	形状	数	開口 率		
J0					-	-				-	-
DJ-1	スギ 対称異 等級構 成集成 材	E65- F225	180 ×600 ×11400 [mm]	10800 [mm]	L/4.5	8-M16 SNR490B	-			二重	50mm ×3枚
CDJ-1					L/2		240角	1	40%		
CSJ-1							240角	2	40%		
CSJ-4							270角	1	45%		
CSJ-5							270角	1	45%		

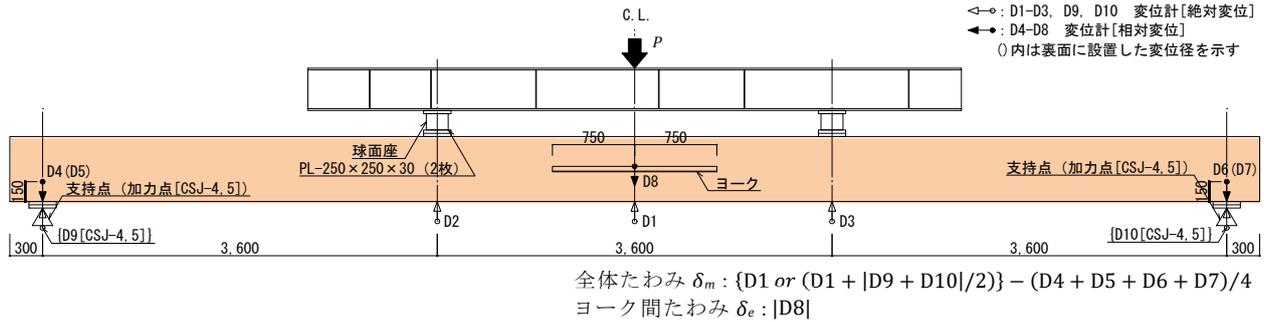


図-9 曲げ実験載荷模式図 (試験体 J0)

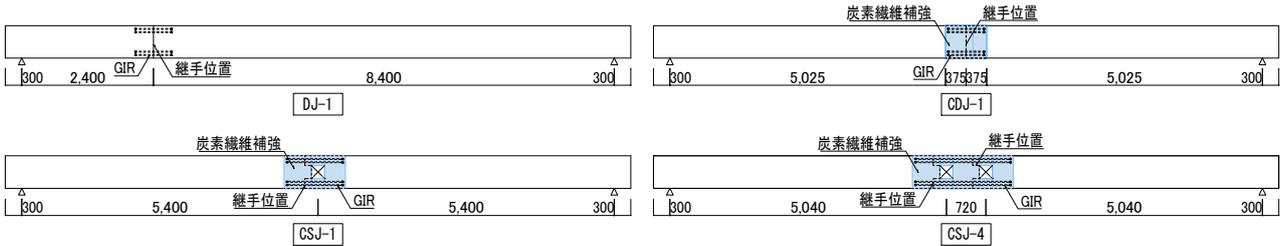


図-10 曲げ試験体図 (DJ-1, CDJ-1, CSJ-1, CSJ-4)

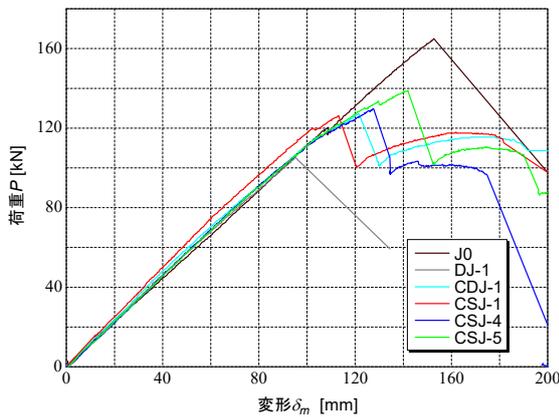


図-11 P- $\delta_m$  関係

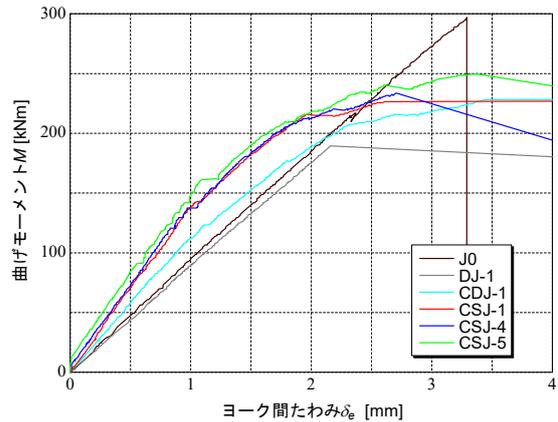


図-12 M- $\delta_e$  関係

験体として、J0 が継手および貫通孔のない梁、DJ-1 はせん断力の生じる区間に GIR 接合のみの継手を有する梁、CDJ-1 はスパン中央に CSJ-1 と同様の炭素繊維補強が施された、貫通孔とアゴ掛けのない、GIR 接合による継手を有する梁である。なお CSJ-4、および CSJ-5 については試験機の都合により、梁両端部を押し上げる形式で載荷した。また等曲げ部での相対たわみを計測するため、図-9 に示す梁 C.L. から左右に 750mm ずつ離れた梁中立軸高さ位置に金物を取り付け、その上に載せる形で L 型アングルを渡してヨークとした。

(2) 破壊性状

試験体 J0 が等曲げ区間での母材曲げ破壊、その他の試験体は継手部の曲げ破壊となった。図-11 に荷重 P-全体たわみ  $\delta_m$  関係を、図-12 に等曲げ部モーメント M-ヨーク間たわみ  $\delta_e$  関係を示す。また実験後の破壊状況写真を図-13 に示す。

試験体 J0 は  $\delta_m$  が 153 mm ( $\delta_e=3.3$  mm) 程度まで線形に荷重が増大し、その後、梁中央部付近の曲げ引張側最外層ラミナのフィンガージョイントの破断、およびその割裂の斜め上方向への進展により、脆性的に破壊し最大耐力に達した。

試験体 DJ-1 は  $\delta_m$  が 95 mm ( $\delta_e=2.2$  mm) まで線形に荷重が増大し、その後、継手部付近において、GIR に沿った割裂が生じ、脆性的に破壊し最大耐力に達した。

試験体 CDJ-1 は  $\delta_m$  が 121 mm ( $\delta_e=3.5$  mm) 程度で CF クロスの曲げ引張側に亀裂が生じ、その後、最大耐力

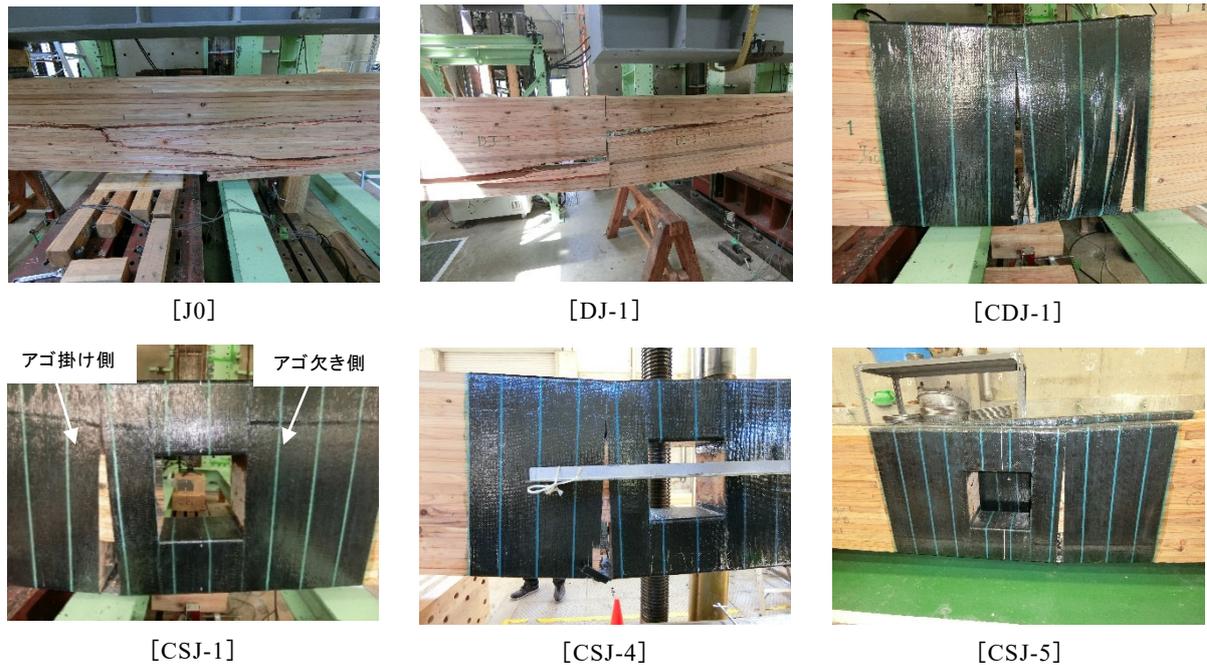


図-13 破壊状況（曲げ実験）

表-5 曲げ実験結果一覧

試験体名称	$P_{max}$ [kN]	$M_{max}$ [kNm]	$\sigma_{bmax}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_a$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$E_e$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	破壊形態	$E_{fr}$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$E_l$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{cmax}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
J0	165	297	27.5	7.42	8.06	母材曲げ	6.87	7.78	27.6
DJ-1	105	189	17.5	7.96	7.83	継手部曲げ	7.17	6.18	28.9
CDJ-1	127	229	21.2	8.24	9.47	継手部曲げ	6.85	6.84	28.8
CSJ-1	126	227	21.0	8.36	11.78	継手部曲げ	7.55	7.76	29.2
CSJ-4	130	233	21.6	8.01	11.92	継手部曲げ	7.62	5.69	29.0
CSJ-5	139	250	23.2	8.11	12.30	継手部曲げ	8.89	6.94	32.0

$E_a$ :  $P$ と $\delta_m$ 関係における $P_{max}10\%-P_{max}40\%$ 区間により算定した見かけの曲げヤング係数  
 $E_e$ :  $P$ と $\delta_e$ 関係における $P_{max}10\%-P_{max}40\%$ 区間により算定した等価曲げヤング係数

に達した。荷重は減少したものの、わずかな増大を伴いある程度の大きさを保持してたわみが進行し、最終的に継手位置での目開きが大きく生じ、GIRの破断とCFRP帯板と木材との接着面における木材表面部の破壊が確認され、荷重が大きく減少したため載荷を終了した。

試験体CSJ-1は $\delta_m$ が113 mm ( $\delta_e=2.6$  mm)で最大耐力を迎え、荷重が減少したものの、わずかな増大を伴いある程度の大きさを保持してたわみが進行し、最終的に継手位置での目開きが大きく生じ、GIRの破断とCFRP帯板と木材との接着面における木材表面部の破壊が確認され、荷重が大きく減少したため載荷を終了した。

試験体CSJ-4は $\delta_m$ が128 mm ( $\delta_e=2.7$  mm)で最大耐力を迎え、荷重が減少したものの、ある程度の大きさを保持してたわみが進行し、最終的に図-4で示す左側の継手位置での目開きが大きく生じ、GIRの破断とCFRP帯板と木材との接着面における木材表面部の破壊が確認され、荷重が大きく減少したため載荷を終了した。

試験体CSJ-5は $\delta_m$ が142 mm ( $\delta_e=3.4$  mm)で最大耐力を迎え、荷重は減少したものの、わずかな増大を伴いある程度の大きさを保持してたわみが進行し、最終的に継手位置での目開きが大きく生じ、GIRの破断とCFRP帯板と木材との接着面における木材表面部の破壊が確認され、荷重が大きく減少したため載荷を終了した。

### (3) 実験結果

表-5に最大荷重 $P_{max}$ 、最大曲げモーメント $M_{max}$ 、ヤング係数、および破壊形態について一覧を示す。同表に示される最大曲げ応力 $\sigma_{bmax}$ や、曲げヤング係数 $E_a$ 、 $E_e$ は貫通孔や継手を考慮しない木材全断面による断面係数と断面二次モーメントを用いて算定している。継手部曲げ破壊となった試験体の $\sigma_{bmax}$ は、DJ-1を除き母材の曲げ基準強度(20.9 N/mm<sup>2</sup>)と同等の値であったが、等曲げ区間での母材曲げ破壊となったJ0の $\sigma_{bmax}$ よりは小さい

結果であった。CDJ-1とCSJ-1の比較では、貫通孔の有無による強度差は見られなかった。DJ-1の最大荷重時における継手位置での曲げ応力は、 $11.7 \text{ N/mm}^2$  ( $126 \text{ kNm}$ )と炭素繊維補強を施した試験体と比較して小さい値であることから、炭素繊維補強による耐力、および靱性能の増大効果は大きいと考えられる。全体たわみに対する見かけの曲げヤング係数  $E_a$  にあまり差はみられなかったが、ヨーク間で算出した等価曲げヤング係数  $E_e$  では、炭素繊維補強が施された梁の値は、母材の規格値及びヨーク間が母材のみとなる試験体の値より高くなった。表-5には、試験終了後、健全であった試験体端部より長さ  $1,080 \text{ mm}$  で切り出した部分の繊維方向に対して実施した縦振動法によるヤング係数  $E_{fr}$  と、縦圧縮試験により求めた縦圧縮ヤング係数  $E_l$  及び縦圧縮強度  $\sigma_{cmax}$  を参考までに示している。

図-12によると、 $L/2$ の位置に継手部がある試験体は、ヨーク間でのたわみが  $1 \text{ mm}$  に達したあたりからわずかに剛性が低下したが、目視において損傷は確認されなかった。また、たわみが  $3 \text{ mm}$  前後となった時に最大耐力に達して荷重が減少している。上記の性状や実験の状況、また破壊した断面等から判断して、すべての貫通孔付き継手は、まず、たわみが  $1 \text{ mm}$  程度に達したあたりから GIR が降伏し始め、その後、最大耐力に達して CFRP 帯板と木材との付着が切れて荷重が減少し、最後に GIR が破断するまでその荷重を保持したと考えられる。

#### 4. 貫通孔付き継手の耐力評価

##### (1) せん断耐力の評価

貫通孔付き継手は、せん断力に対して CF クロス、曲げ圧縮側 GIR、およびアゴ掛けにより抵抗する機構となっている。貫通孔付き継手のせん断耐力  $uQ_{ja}$  は、継手部の構成から考えられる各終局せん断強度を対象とし評価を行うこととし、図-14に示す①継手際のせん断耐力、②アゴ掛け部のせん断耐力、③開口部の各部のせん断耐力、④アゴ部めり込み耐力と GIR のせん断耐力の和、および⑤貫通孔上下の木材の曲げ耐力到達時のせん断耐力、の中から最小値を採用する。 $uQ_{ja}$ 、および①～⑤を対象とするせん断耐力の評価式は以下とする。

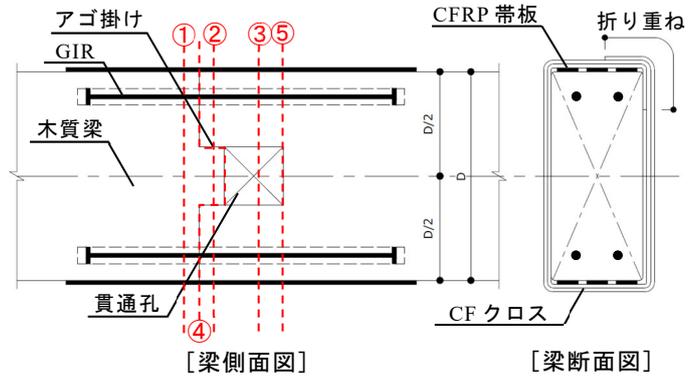


図-14 継手部せん断力検討断面位置

$$uQ_{ja} = \min(uQ_{ja1}, uQ_{ja2}, uQ_{ja3}, uQ_{ja4}, uQ_{ja5}) \quad (1)$$

$$uQ_{ja1} = wF_s \cdot A_{c1} / \kappa_1 + 1/2 \cdot \sigma_{ytc} \cdot A_{tc1} / \kappa_1 \quad (2)$$

$$uQ_{ja2} = wF_s \cdot A_{c2} / \kappa_2 + 1/2 \cdot \sigma_{ytc} \cdot A_{tc2} / \kappa_2 \quad (3)$$

$$uQ_{ja3} = wF_s \cdot A_{c3} / \kappa_3 + 1/2 \cdot \sigma_{ytc} \cdot A_{tc3} / \kappa_3 \quad (4)$$

$$uQ_{ja4} = wF_{cv} \cdot A_{cv} + n_g \cdot P_{yg} \quad (5)$$

$$uQ_{ja5} = wF_b \cdot wZ_c / l_h \quad (6)$$

ここで、 $A_{c1} \sim A_{c3}$  : ①～③の各部の集成材有効断面積( $\text{mm}^2$ )、 $\kappa_1 \sim \kappa_3$  : ①～③の各部の形状係数、 $\sigma_{ytc}$  : CF クロスの引張強度( $\text{N/mm}^2$ )、 $A_{tc1} \sim A_{tc3}$  : ①～③の各部のCF クロスの断面積( $\text{mm}^2$ )、 $wF_{cv}$  : 木材のめり込み基準強度( $\text{N/mm}^2$ )、 $A_{cv}$  : アゴ掛け部の面積( $\text{mm}^2$ )、 $n_g$  : 継手部の圧縮側の GIR 本数(本)、 $P_{yg}$  : GIR のせん断耐力(N)、 $wF_b$  : 木材の曲げ基準強度( $\text{N/mm}^2$ )、 $wZ_c$  : アゴ受け部の断面係数( $\text{mm}^3$ )、 $l_h$  : アゴ受け部の長さ( $\text{mm}$ )である。

$\kappa_1 \sim \kappa_3$ の値については FEM 解析による検討を行い決定する。解析に用いた各要素、および境界条件の設定を図-15に示す。解析ソフトには MIDAS iGen (株式会社マイダスアイティジャパン, Ver. 945R1x) を使用し、解析対象は試験体 CSJ-40 と CSJ-50 とした。解析モデルの継手位置では集成材同士を連続させず、境界面に弾性連結要素を配置した。また実験では、木材外周面からの加力であったが、解析では断面中央の節点を加力点とした。集成材の各弾性係数は異方性を考慮し、繊維方向 (L) のヤング係数  $E_L$  を  $6,500 \text{ N/mm}^2$  とし、半径方向 (R) およ

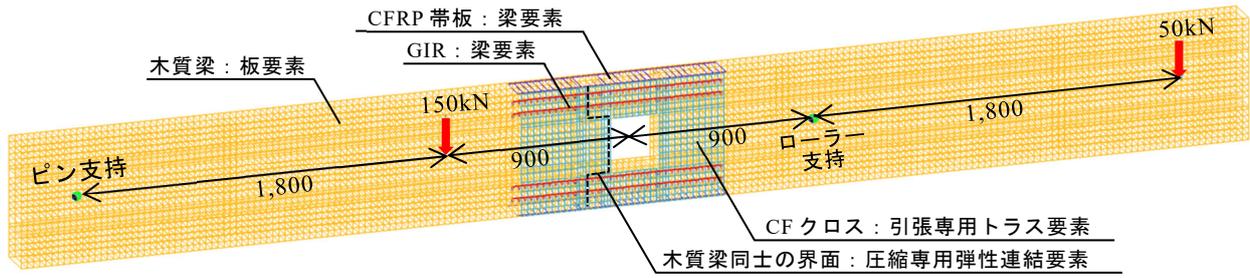


図-15 FEM 解析モデル

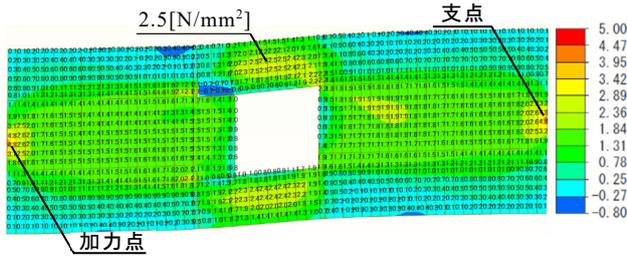


図-16 継手部せん断応力分布解析結果 (CSJ-50)

表-6 せん断耐力計算値と実験値

試験体名称	$uQ_{ja1}$ [kN]	$uQ_{ja2}$ [kN]	$uQ_{ja3}$ [kN]	$uQ_{ja4}$ [kN]	$uQ_{ja5}$ [kN]	$uQ_{ja}$ [kN]	$Q_{max}/uQ_{ja}$
D7	154	185	111	137	146	111	1.56
CSJ-40	183	220	132	137	146	132	1.34
CSJ-50	183	220	121	137	111	111	1.68

び接線方向 (T) との比率が  $E_L : E_R : E_T = 1.0 : 0.1 : 0.05$  となるよう設定した<sup>7)</sup>。またせん断弾性係数についても  $E_L$  を基準とし,  $G_{LR}$  と  $G_{LT}$  については  $E_L/15$ ,  $G_{RT}$  については  $E_L/300$  とした<sup>7)</sup>。せん断応力の解析結果を図-16 に示す。解析によるせん断応力の分布と全断面による平均せん断応力 (せん断力を貫通孔を考慮しない木質梁全断面面積で除した値 $[0.93 \text{ N/mm}^2]$ ) の関係から,  $\kappa_1 \sim \kappa_3$  をそれぞれ 3.0, 2.5, 2.5 とした。

表-6 に D7, CSJ-40 および CSJ-50 について, 式(1)~(6)による終局時のせん断耐力の計算値と実験の  $Q_{max}$  との比較を示す。実験値が計算値に対し 1.5 倍前後となっており, すべての試験体について, 計算値は安全側の評価となった。しかし, 破壊形式と耐力評価式の整合が明確に取れていないため, 今後のさらなる検証が必要であると思われる。

(2) 曲げ耐力の評価

貫通孔付き継手は, 曲げ引張力に対しては CFRP 帯板と GIR が抵抗する機構となっている。継手位置 (境界面) において平面保持を仮定した場合, 材料の引張強度とヤング係数の関係から, CFRP 帯板より GIR の方が先行して降伏すると考えられる。GIR にはある程度の靱性能を期待し, GIR の降伏から破断までの間に CFRP 帯板の引張強度, または CFRP 帯板と木材との付着強度に達することを前提として, 貫通孔付き継手の終局曲げ耐力  $uM_{ja}$  は, 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説<sup>8)</sup>にならい, 式(7)より評価を行うこととする。

$$uM_{ja} = 0.9 \cdot \min \left( \sum a_{cl} \cdot \sigma_{ytl}, \sum A_{ul} \cdot \tau_{utl} \right) \cdot d_{il} + 0.9 \cdot \sum a_g \cdot \sigma_{yg} \cdot d_g \quad (7)$$

ここで,  $\Sigma a_{cl}$ : 曲げ引張側 CFRP 帯板の全断面積 ( $\text{mm}^2$ ),  $\sigma_{ytl}$ : CFRP 帯板の引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $\Sigma A_{ul}$ : 曲げ引張側 CFRP 帯板の付着面積 ( $\text{mm}^2$ ),  $\tau_{utl}$ : CFRP 帯板と木材の終局付着強度 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $d_{il}$ : 曲げ引張側 CFRP 帯板から集成材圧縮縁までの距離 ( $\text{mm}$ ),  $\Sigma a_g$ : 曲げ引張側 GIR の全断面積 ( $\text{mm}^2$ ),  $\sigma_{yg}$ : GIR の材料強度 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $d_g$ : 曲げ引張側 GIR から集成材圧縮縁まで距離 ( $\text{mm}$ ) である。なお, CFRP 帯板と木材の終局付着強度については, 集成材のせん断基準強度  $wF_s$  以上となる場合は  $wF_s$  を採用する。

また, CFRP 帯板の材料強度は式(8)より算出したものを採用する<sup>5)</sup>。

$$\sigma_{ytl} = 0.8 \cdot \epsilon_{tl} \cdot E_{tl} \quad (8)$$

ここで,  $\epsilon_{tl}$ : CFRP 帯板の有効ひずみ度 (=0.007),  $E_{tl}$ : CFRP 帯板のヤング係数 ( $\text{N/mm}^2$ ) である。

式(7)の右辺第一項が CFRP 帯板による曲げ耐力  $uM_{atl}$ , 第二項が GIR による曲げ耐力  $uM_{ag}$  である。表-7 に試験体 DJ-1, CDJ-1, CSJ-1, CSJ-4 および CSJ-5 について, 式(7)による継手の終局曲げ耐力の計算値と実験での継手位置における最大曲げモーメント  $jM_{max}$  の比較を示す。炭素繊維補強を施したすべての試験体で, 実験値が計算値

の1.3倍以上となり、計算値は安全側の評価となった。CFRP帯板と木材の終局付着強度を木材のせん断基準強度としており、安全側となる値を採用していることが要因の1つと考えられる。

式(7)の適用は、それぞれの耐力要素の靱性能に基づくため、前述の通り式(8)による強度はGIRの降伏後から破断までの間に発揮される必要があるが、その条件までは確認できていない。CFRP帯板の強度が高いため、一般的には実験結果と同様、引張強度に達する前に接着剤の剥離や被接着材の破壊が先行すると想定され、またCFRP帯板と木材との付着強度により算定される曲げ耐力も脆性的であると考えられる。本試験体では中立軸を梁芯とする平面保持を仮定した場合において、 $uM_{atl}$ より $uM_{ag}$ に先に達することを計算で確認しているが、上記と同様の時期に確実に $uM_{atl}$ に達することが保証できるよう、変形評価についてのさらなる検証が望まれる。現状、設計に用いる場合は、GIRに靱性を持たせるため文献1)に記載のアンボンド区間を有するGIRを採用した場合も含め、梁の曲率と鋼棒の降伏ひずみ、およびCFRPによる耐力の関係や、 $uM_{atl}$ と $uM_{ag}$ の耐力比について、実験を基に考慮する必要がある。

表-7 曲げ耐力計算値と実験値との比較

試験体名称	$uM_{atl}$ [kNm]	$uM_{ag}$ [kNm]	$uM_{ja}$ [kNm]	$jM_{max}/uM_{ja}$
DJ-1	-	103	103	1.22
CDJ-1	60	103	163	1.40
CSJ-1	60	103	163	1.39
CSJ-4	60	103	163	1.43
CSJ-5	60	103	163	1.53

$jM_{max}$ : 実験における継手位置での最大曲げモーメント

## 5. まとめ

貫通孔付き継手を有する木質梁のせん断実験と曲げ実験を行い、それぞれの耐力の評価式について検討し、以下の知見を得た。

- ① 炭素繊維補強を施した貫通孔付き継手のせん断実験の結果、実験によるせん断耐力は計算により求められる母材の耐力より小さくなるが、有効断面積による、 $Q_{max}$ 時の平均せん断応力は増大し、炭素繊維補強による継手のせん断耐力の増大に対する効果が見られた。
- ② 炭素繊維補強を施した貫通孔付き継手の曲げ実験の結果、炭素繊維による曲げ耐力への補強効果が確認された。実験による曲げ耐力は、貫通孔による断面欠損、および継手のない単一の木部材の計算による曲げ耐力と同等となった。
- ③ 炭素繊維補強を施した貫通孔付き継手のせん断耐力および曲げ耐力の評価について、計算結果と実験結果を比較した。計算値に対する実験値の比は、せん断耐力については1.5前後、曲げ耐力については1.3以上となり、評価式は実験値を安全側に評価するものとなった。
- ④ せん断耐力の評価式においては、詳細な破壊形式と評価式の関係について、曲げ耐力の評価式においては、各部の変形と耐力の関係について、さらなる検討が必要である。

**謝辞:** 本研究開発は「P&UA 構法共同技術開発グループ」(市浦ハウジング&プランニングを代表とする共同研究開発グループで、京都大学 五十田教授、近畿大学 松本教授、織本構造設計、広島県総合技術研究所 林業技術センター、藤田 K 林産技術士事務所、東急建設、東レ建設、戸田建設、西松建設、長谷工コーポレーション、三井住友建設、アルファ工業、内田技建、ウッドワン、エイコー、キーテック、響製缶、河本組、桜設計集団、中東、藤寿産業、本間興業、銘建工業により構成される)の共同研究開発の一環として実施されたものである。関係各位に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 田中 純一、江口 司津、中澤 昭伸、藤田 和彦、松本 慎也、五十田 博：汎用型中高層木造建築物の構法開発 その1 一方向ラーメン構造の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造III、pp.185-186、2024
- 2) 三井住友建設株式会社：中高層木造建築構法 P&UA 構法、<https://www.smcon.co.jp/service/p-and-ua/>、2025.6 参照
- 3) 日本木材学会、日本工業標準調査会：JIS A3301 木造校舎の構造設計標準、pp.183-184、2015
- 4) 東レ株式会社：トレカクロス工法技術資料、2015.9

- 5) 東レ株式会社：トレカミネート工法技術資料，2008.10
- 6) 日本住宅・木材技術センター：構造用木材の強度試験マニュアル，2011
- 7) 日本建築学会：木質構造基礎理論，pp.37，2014
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2024