

(47) GFRP板挿入補強したスギ集成材梁の曲げ性能に関する研究

則武 佑理¹・佐藤 顕彦²・杉浦 邦征³・北根 安雄⁴

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: noritake.yuri.44w@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院研究員 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: sato.akihiro.45m@st.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kitane.yasuo.2x@kyoto-u.ac.jp

集成材は近代木橋の構造部材として使用されているが、鋼やコンクリートと比べ曲げ性能が低く、活荷重の大きな道路橋への適用例は少ない。そこで本研究では軽量かつ高強度な GFRP 板を集成材と複合させることで曲げ性能の向上を試みた。補強方法としては、GFRP 板を集成材に挿入する方法、集成材梁の断面に GFRP 板を貫通させる方法を検討し、無補強の集成材梁と合わせて 3 種類の供試体に対して 4 点曲げ載荷実験を行った。実験の結果、補強によって曲げ剛性および曲げ強度が増加したことが確認された一方、破壊に節が関わっていることが破壊形態から示唆された。そこで、集成材の節や圧縮側の弾塑性応力-ひずみ関係を再現した集成材の有限要素解析モデルを作成し 4 点曲げ載荷実験の再現解析を行い、節の存在が集成材梁の曲げ剛性や破壊形態へ与える影響を検証した。

Key Words: Glue-laminated timber, GFRP, FEM, Bending performance, Composites beam

1. 研究背景および目的

木質材料は、成長に伴い炭素を吸収固定した森林を伐採して作られることから、材料内部に大気中の炭素を貯蔵しているといわれている¹⁾。すなわち、木質材料は材料の製造時に排出される二酸化炭素量がマイナスであるため、土木構造物への活用を促すことはカーボンニュートラルな社会の形成に貢献することができると考えられる。

土木主構造部材として活用が期待される木質材料としては集成材が挙げられる。集成材は、ひき板を繊維方向に積層接着して作成される木質材料である。特徴としては、比較的大断面かつ長い部材を製作可能である。材料のばらつきが低減されるという点が挙げられ、いわゆる近代木橋の主部材として使用されることが多い²⁾。しかし、集成材は鋼やコンクリートに比べて曲げ性能が低く、活荷重の大きな道路橋、特に曲げを受ける桁橋への適用例は限られている。以上のような背景から、集成材に補

強を施し曲げ性能を向上させる技術が確立されれば、土木主構造部材としての適用範囲が拡大するものと期待される。

既往の研究では、鋼板を集成材に挿入することで、木材の景観性を保ちつつ曲げ・せん断性能の向上が試みられている³⁾⁴⁾。一方で、補強材料として軽量かつ高強度・高耐久な GFRP(Grass Fiber Reinforced Polymer)を用いた場合は、木材の軽量性を損なわない補強が期待できる。

そこで本研究では、GFRP 板で補強した集成材梁を 2 種類設計し、無補強の集成材梁と比較して 3 種類の梁の曲げ性能を評価した。まず、4 点曲げ試験を行い、補強が曲げ剛性や曲げ強度、破壊形態に与える効果について確認した。さらに、破壊形態から節の存在が曲げ性能に影響を与えることが示唆された。そこで、集成材に含まれる節の存在および弾塑性応力-ひずみ関係を反映した有限要素解析モデルを作成し、曲げ試験の再現を行った。

2. 曲げ試験概要

(1) 供試体梁の概要

本研究で使用した供試体の寸法は曲げ試験の JAS 規格³⁾に準拠し、長方形断面の断面幅 75mm、断面高 120mm、部材長 2500mm、支間長 2160mm とした。本研究では 3 種類の供試体 (梁 A,B,C) を用意した。梁 A は無補強の集成材梁であり、梁 B,C は別々の方法で補強した集成材梁である。集成材梁の補強方法は、①梁 B : 集成材梁にスリットを入れ GFRP 板をそこに埋め込み接着する方法 (図-1(a))、②梁 C : 2 つに分割した集成材梁で GFRP 板を挟み接着する方法 (図-1(b)) とした。

材料について、集成材梁には JAS 規格品であるスギ集成材 5 層同一等級構成集成材 E65-F255 を使用した。GFRP 板にはロービングクロス GFRP 積層板 ([0/90]₁₀) を使用した。接着剤には二液混合型エポキシ樹脂系接着剤 WB グラウトを使用した。接着の際は、接着面に接着剤を塗布したのち、梁の両側からクランプを用いて固定し一日以上養生した。供試体断面の外観を図-2 に示す。

各材料の材料定数について、集成材の材料定数を表-1、GFRP の材料定数を表-2 に示す。集成材は異方性材料として定義した。集成材の材料定数は 5 層同一等級構成集成材 E65-F255 の弾性率 $E_z = 6.5\text{GPa}$ ⁹⁾ を用い、他の定数については $E_x = E_y = \frac{E_z}{25}$ 、 $G_{xy} = G_{yz} = G_{xz} = \frac{E_z}{15}$ 、 $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = 0.016$ とした⁹⁾。GFRP の材料定数は同様の GFRP 板を使用した既往研究を参考に定義した⁷⁾。接着剤の材料定数は JISK7164-2⁹⁾ を参考に行った材料実験の結果から弾性率 2.890GPa、ポアソン比 0.4 とした。

(2) 曲げ試験方法

曲げ試験は図-3 に示すように、荷重・荷重点間距離 500mm の 4 点曲げ試験とし、スパン中央に変位計を設置した。ひずみゲージは図-4 に示すように、供試体の上下および側面に貼り付けた。供試体は 5 層からなるスギ集成材であるため、側面のひずみゲージは各層に 1 枚ずつ配置した。

荷重方法について説明する。まず、0.57mm/min で 1kN まで荷重し、曲げ剛性を得た。その後一旦除荷したのち、10mm/min で破壊まで再荷重し曲げ強度を得た。試験機には島津製作所製動的・疲労試験機サーボパルサ EHF-U 型を使用した。また、支点および荷重点で供試体がめりこむのを防ぐため、供試体との間に 5.90mm 厚の鋼板を設置した。

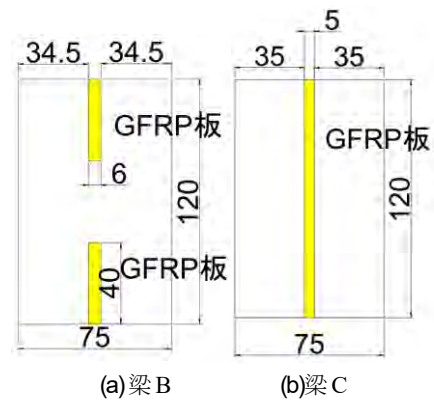


図-1 補強した梁の断面 (寸法単位 : mm)

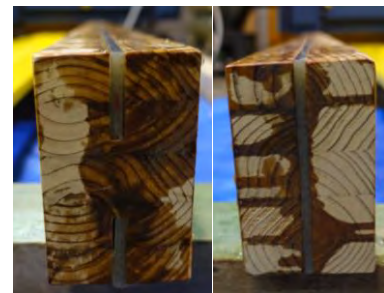


図-2 作成した梁 B,C の外観

表-1 $E_z = 6.5\text{GPa}$ における集成材の材料定数(X軸:断面幅方向, Y軸:断面高さ方向, Z軸:部材長方向)

Direction	X	Y	Z
Elastic modulus [GPa]	0.3408	0.3408	8.519
Direction	XY	XZ	YZ
Shear modulus [GPa]	0.5679	0.5679	0.5679
Poisson's ratio	0.016	0.016	0.016

表-2 GFRP の材料定数(X軸:断面幅方向, Y軸:断面高さ方向, Z軸:部材長方向)

Direction	X	Y	Z
Elastic modulus [GPa]	6.02	22.31	22.31
Direction	XY	XZ	YZ
Shear modulus [GPa]	4.64	4.44	3.91
Poisson's ratio	0.41	0.39	0.13

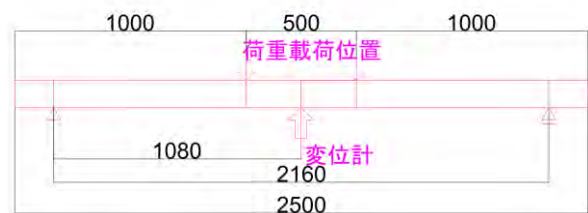


図-3 曲げ試験の荷重・荷重位置および変位計設置位置 (寸法単位 : mm)

3. 曲げ試験の結果および考察

(1) 曲げ剛性

荷重速度 0.57mm/min で 1kN まで荷重した際の各梁における荷重—スパン中央の変位の関係を図-5に示す。等価曲げ弾性率 E_b は曲げ試験結果から次式を用いて求めた⁹⁾。

$$E_b = \frac{\Delta P(L-s)(2L^2 + 2Ls - s^2)}{\Delta y 8bh^3} \quad (1)$$

ここで、 ΔP ：比例域における上限荷重と下限荷重の差、 Δy ： ΔP に対応するスパン中央の変位である。 $\Delta P/\Delta y$ には図-5の荷重—変位関係を線形近似した傾きを用いた。また供試体寸法と各材料の材料定数を用いた求めた曲げ剛性も併せて求めた。各供試体の等価曲げ弾性率 E_b 、断面二次モーメント I 、曲げ剛性 $E_b I$ を表-3に示す。

表-3より、梁Aに対して梁Bの曲げ剛性は5.57%、梁Cの曲げ剛性は15.9%増加したことがわかる。補強部材の断面積が大きい方が曲げ剛性も増加するという結果が得られた。一方、供試体と同じ4層以上の同一等級構成集成材でヒノキやベイマツが該当する強度等級 E105-F345の曲げ弾性率の平均値は10.5GPaであることから⁹⁾、GFRP板で補強したスギ集成材の曲げ剛性と無補強のヒノキやベイマツ集成材の曲げ剛性はほぼ同じであり、曲げ剛性を高める際は補強するより他の樹種を用いた方が効率的であると言える。また GFRP 板を引張縁に設置して曲げ性能の向上させることを目的とした既往研究もあり⁹⁾、補強によって効率的に曲げ剛性を高めるためにはこのような方法をとることがよいと考えられる。

(2) 曲げ強度

荷重速度 10mm/min で荷重した際のスパン中央における荷重—変位関係を図-6に示す。また、最大荷重及び曲げ強度を表-4に示す。曲げ強度 F_b は次式で求めた⁹⁾。

$$F_b = \frac{3P_b(L-s)}{2bh^2} \quad (2)$$

ここで、 P_b ：最大荷重、 $L = 2160\text{mm}$ ：支間長、 $s = 500\text{mm}$ ：荷重載荷点間距離、 b ：梁断面幅、 h ：梁断面高である。無補強の梁Aでは約13kN 荷重時に部分的な破壊を伴って荷重の低下が生じた。その後も段階的な荷重の低下を伴いながら荷重は上昇し、17.08kN で全体破壊に至った。一方、補強した梁Bおよび梁Cでは全体破壊まで荷重は単調に増加したの低下は生じなかった。

表-4より、梁Aに対して梁Bの曲げ強度は27.6%、梁Cの曲げ強度は12.6%増加したことが確認できる。前節で述べたように曲げ剛性は梁Bより梁Cの方が大きくなったが、曲げ強度は梁Cより梁Bの方が大きくなった。梁Cの節は図-8(c)にあるようにスパン中央の引張縁付近に位置しており、一方で梁Bの節は梁Cのように破壊し

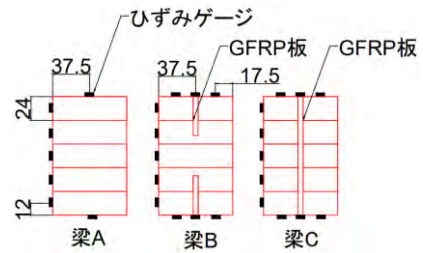


図-4 ひずみゲージ貼付位置 (寸法単位：mm)
図中の横線は集成材の層間を示す。

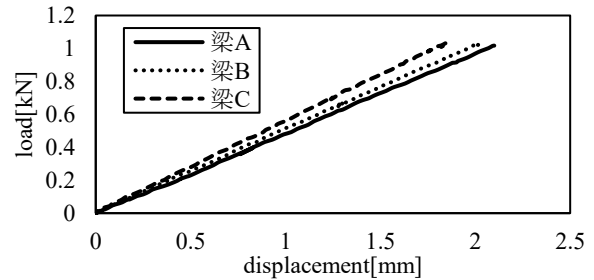


図-5 各梁の荷重速度 0.57mm/min における荷重—変位関係の比較

表-3 各梁の曲げ剛性

	曲げヤング率 E_b [GPa]	断面二次モーメント I [mm ⁴]	曲げ剛性 (実験結果) $E_b I$ [kN·mm ²]	曲げ剛性 (供試体寸法と材料定数から算出) $E_b I$ [kN·mm ²]
梁 A	8.519	1.103×10^7	9.398×10^7	7.170×10^7
梁 B	9.044	1.097×10^7	9.921×10^7	8.055×10^7
梁 C	9.717	1.121×10^7	1.089×10^8	8.468×10^7

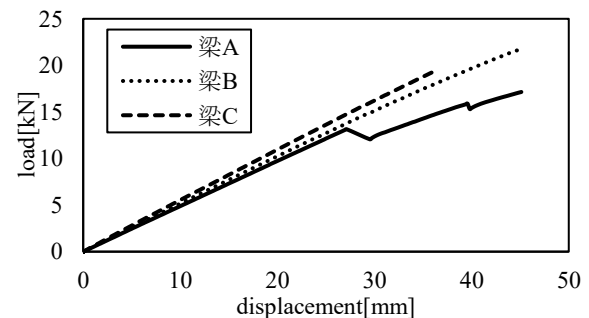


図-6 各梁の荷重速度 10mm/min における荷重—変位関係の比較

表-4 各梁の最大荷重および曲げ強度

	最大荷重[kN]	曲げ強度[MPa]
梁 A	17.08	38.82
梁 B	21.72	49.55
梁 C	19.54	43.72

やすい位置になかったため、集成材の節による影響で最大荷重が梁Bの方が大きくなったと考えられる。本研究ではそれぞれの補強方法に対して1つの供試体のみで実験を行ったため、追加実験が必要である。

(3) ひずみ分布

荷重が 10kN のときのひずみ分布を図-7 に示す。梁 B に関しては、荷重載荷時に載荷点上の鋼板が GFRP 板の出っ張りにより傾いてしまい梁に対して垂直に荷重をかけることができなかったため、梁直交方向に変形してしまったことでひずみが少し減じられたが、ほぼ直線状に分布しており、平面保持の仮定が成り立っていると言える。このことをもとに次章にて提案する解析モデルを用いて考察する。

(4) 破壊形態

各梁の破壊形態を図-8 に示す。どの梁においても、破壊時に節を起点にした亀裂が発生していたことが確認された。また、梁 A では図-4 からわかるように約 13kN、約 16kN で荷重が低下しており、それぞれの荷重で局所的な破壊が生じた。一方梁 B と梁 C では局所的な破壊は起こらず、最大荷重において脆性的な破壊が生じた。また、補強した梁において GFRP 板および接着層には破壊は見られず、集成材のみが破壊した。以上のことより、GFRP 板を挿入したことで段階的な破壊が抑制され、また GFRP 板が効果的に層間破壊を抑制したと考えられる。

4. 節の影響、弾塑性を考慮した有限要素解析

(1) 解析モデルおよび解析方法

既往研究において君島らは、圧縮を受けるスギ集成材について、部材内の節を円柱で表現する解析モデルを提案した¹⁰⁾。解析モデル中の節は一般部より高剛性な円柱で定義され、節外縁部には剛性の小さい境界部が配置された。提案も出るによる解析結果は圧縮試験の結果とよく適合することが確認された。また千田らは、集成材の曲げ試験において圧縮側には塑性域があるのに対し引張に対しては破断までほぼ線形の挙動を示したことから、中立軸より圧縮側と引張側で材料特性を区別した集成材のモデルを提案し、実験結果とよく適合することを確認した⁹⁾。

本研究ではこれらの既往研究を参考に解析モデルを作成した。解析には汎用有限要素解析ソフト Abaqus2020¹¹⁾を用いた。解析モデルではソリッド要素を用い、図-1、図-3 と同じ寸法で供試体をモデル化した。メッシュサイズは 10mm である。GFRP と接着剤の材料定数は 2 章で示した通りだが、集成材の材料定数については梁 A の曲

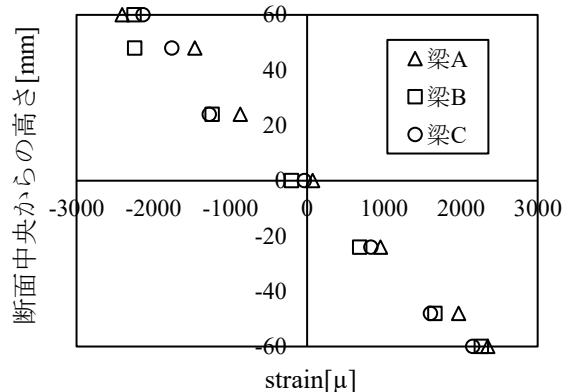


図-7 各梁のひずみ分布



(a)梁 A



(b)梁 B



(c)梁 C

図-8 各梁の破壊形態

表-5 $E_z = 8.519\text{GPa}$ における集成材の材料定数(X軸:断面幅方向, Y軸:断面高さ方向, Z軸:部材長方向)

Direction	X	Y	Z
Elastic modulus [GPa]	0.3408	0.3408	8.519
Direction	XY	XZ	YZ
Shear modulus [GPa]	0.5679	0.5679	0.5679
Poisson's ratio	0.016	0.016	0.016

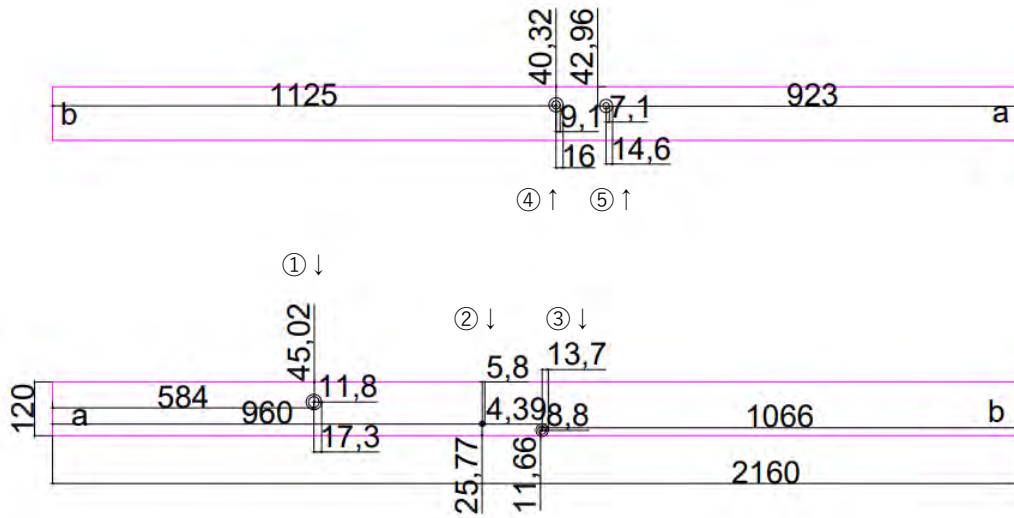


図-9 供試体梁の節の位置 (寸法単位: mm) (図中の ab は同じ側であることを指し, 丸番号は節の番号を示す)

げ試験から得られた集成材の弾性率 $E_z = 8.519\text{GPa}$ を用いた。また, 千田ら⁹⁾の研究を参考に, 圧縮側は弾性-完全塑性, 引張側は線形弾性体とした。圧縮側の降伏応力については, 図-5 で荷重-変位曲線において線形性が失われる点の荷重レベル $P = 13.145\text{kN}$ を用いて次式で定義した⁹⁾。

$$\sigma = \frac{7Pl}{36I}y \quad (3)$$

計算の結果, $\sigma = 30.67\text{MPa}$ となった。

節については君島らの研究⁷⁾を参考に等方性材料として節部分の弾性率を 10GPa , 節周辺の弾性率を 3.5GPa , ポアソン比をどちらも 0.4 とした¹⁰⁾。

節の位置については, 曲げ試験で使用した梁 A の節の位置と節周辺の色が母材と異なる領域を記録しており, それらをモデルに反映させた。記録された節の位置を図-9 に示す。FEM モデルは A1): 梁 A の節を反映したもの, A2): 梁 A の節を反映していないもの, B2): 梁 B の節を反映していないもの, C2): 梁 C の節を反映していないもの, の 4 種類作成した。節を反映するモデルについては, 図-10 のように, 節がある位置に穴を開け, 深さを梁断面幅の半分としてそこに円柱型の節部分と円筒型の節周辺部分を埋め込むことで作成した。

境界条件は単純梁を再現できるように一方は全方向固定, もう一方はスパン方向以外の変位 u_x, u_z を固定した。荷重は 4 点曲げを模擬し, 2 点の荷重の合計が 15kN となるように静的解析を行った。作成したモデルを図-11 に示す。

(2) 有限要素解析の結果

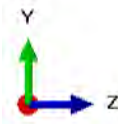
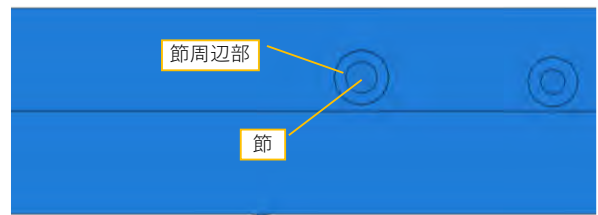


図-10 節モデルの作成方法

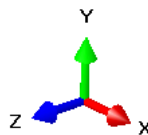
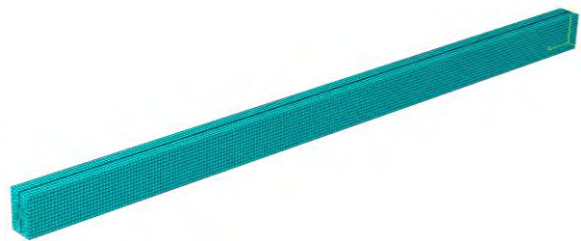


図-11 作成した FEM モデル (B2)

はじめに, 各モデルのスパン中央における荷重 15kN での変位について表-6 に示す。A1) と A2) を比較すると, 節の存在によって変位が増大したことが確認できる。ま

た A2),B2),C2)を比較すると、解析上でも GFRP 板の挿入によって変位が抑えられることが確認できる。次に解析結果と実験結果を比較すると、梁Aに関しては節が無い A2)の方が実験結果に近く、いずれの梁についても節のないモデルの変位は実験結果の変位と 5~12%程度の誤差であった。節があることでより変位が増大するという結果となった。

続いて節を反映したモデル A1)について荷重 15kN での節周辺の応力分布を調べる。節および節周辺部の最大主応力、最小主応力、およびミーゼス応力のコンター図を図-12 に示す。引張側に位置する③の節で高い応力が発生していることが確認される。特に、図-12 (a)から載荷荷重 15kN の時に③の節では 34.8MPa の最大主応力が発生していた。本研究では供試体の引張強度、圧縮強度を調べていないため、代わりに使用した集成材 E65-F255 の材料強度引張強度 18.0MPa、圧縮強度 20.6MPa¹²⁾と比較すると、③の節で引張強度に達し破壊が起こることが解析から予測される。実際曲げ試験においても③の節で破壊が生じており、スパン中央に近く引張縁にある節は特に破壊しやすいということが解析からも実証された。また、節のないモデル A2)においても、15kN 載荷時に引張縁のスパン中央で 33.4MPa の最大主応力が発生しており、節のないモデルでも基準強度を超えていた。

5. 結論

本研究では、GFRP 板で補強した 2 種類の集成材梁の曲げ性能を検証するため、供試体の 4 点曲げ試験および有限要素解析を行った。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 集成材梁にスリットを入れ、GFRP 板を挿入した梁 B は、無補強の梁 A に比べて曲げ強度が 27.6%、曲げ剛性が 5.57%増加した。また 2 本の集成材梁で GFRP 板を挟んだ梁 C は無補強の梁 A に比べて曲げ強度が 12.6%、15.9%増加した。いずれの補強梁においても曲げ強度および曲げ剛性が増加したことから GFRP 板の挿入によって曲げ性能の向上が可能であることがわかった。
- (2) 集成材梁の破壊形態について、節を起点としたせん断破壊がどの梁においても発生した。したがって節のサイズ、位置などの把握が性能確保において重要であることがわかる。
- (3) 曲げを受ける集成材の特徴を踏まえ、圧縮側を弾性—完全塑性、引張側を完全弾性としたモデルを作成し、曲げ試験で得られた弾性率と降伏応力を用いて解析を行った結果、スパン中央の変位について実験値に近い解析値が得られた。

表-6 スパン中央変位の解析結果と実験結果の比較

	解析モデル 節の有無	解析結果 [mm]	実験結果 [mm]
A1)	O	45.52	37.05
A2)	X	35.25	37.05
B2)	X	31.51	29.71
C2)	X	31.04	27.54

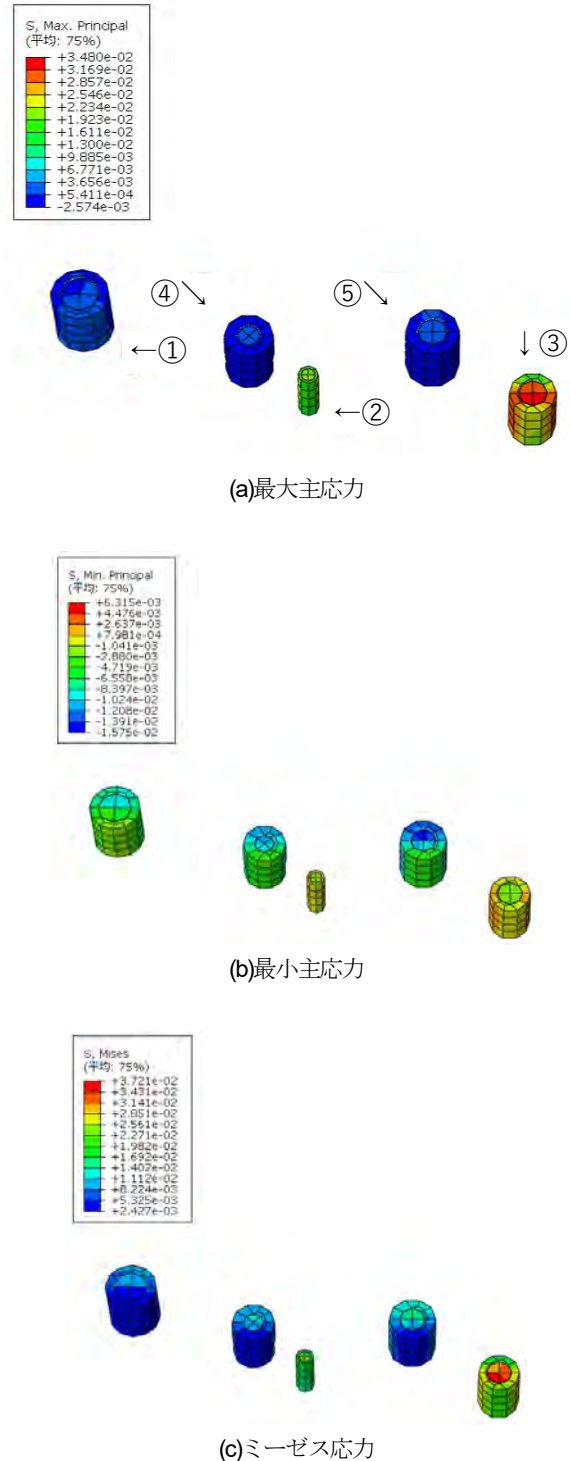


図-12 節および節周辺部の応力分布 (丸番号は図-9 に対応)

- (4) 節の特徴を反映した集成材のモデルを用いて解析を行った結果、曲げ試験において破壊を生じた箇所と同じ位置の節において材料強度を超える応力が生じることを確認した。

一方で、節の材料定数は同じスギ集成材ということから先行研究と同じ値を使用しており、実際に曲げ試験で使った集成材と同じ集成材の材料実験によって得られた値ではない。今後節に関する材料実験を行い節の挙動について調べることや、GFRP板挿入梁にも節のモデルを導入して応力集中を調べることなどが今後の課題である。

謝辞：本研究の遂行にあたり使用したGFRP板は(株)ヒビに、接着剤は(株)ショーボンド建設に提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木における木材の利用拡大に関する横断的研究会：2022年度土木における木材の利用拡大に関する横断的報告書, 2022.
- 2) 土木学会鋼構造委員会木橋技術小委員会：木橋技術の手引き 2005, 2005.
- 3) 薄木征三, 千田知弘, 佐々木貴信, 後藤文彦：集成材—複数挿入鋼板型ハイブリット梁の曲げ弾塑性挙動に関する実験と解析, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.53A, pp.871-879, 2007.
- 4) 千田知弘, 後藤文彦, 薄木征三, 佐々木貴信, 石川和彦：鋼板挿入集成材梁のせん断強度についての数値的・実験的解析, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.54A, pp.650-658, 2008.
- 5) 農林水産省：集成材の日本農林規格, 2019.
- 6) 千田知弘, 後藤文彦, 薄木征三, 佐々木貴信：挿入集成材梁の有限要素弾塑性解析, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.53A, pp.880-887, 2007.
- 7) 佐藤顕彦, 北根安雄, 杉浦邦征, 日比英輝, 五井良直：ハンドレイアップ成形GFRPの疲労損傷が構造部材の残存剛性に与える影響, 第9回FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 土木学会, pp.1-9, 2022.
- 8) 日本規格協会：JISK7164-2プラスチック引張特性の求め方—第2部：型成形, 押出成形及び注型プラスチックの試験条件, 2014.
- 9) Gary M. Raftery and Fiona Kelly: Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber, Composites: Part B, 70, pp.9-19, 2015.
- 10) 君島真美, 青木由香利, 後藤文彦, Hamid VALIPOUR：節の影響を考慮した木部材の数値モデル化, 土木学会論文集 E2, Vol.77, No.5, pp.I_1-I_7, 2021.
- 11) Dassault Systems Simulia: ABAQUS Analysis User's Manual, Version 2020.
- 12) 一般財団法人建築行政情報センター：2015年版建築物の構造関係技術基準解説書 2018年追補, pp.505-523-9, 2018.

(Received August 25, 2023)

STUDY ON BENDING PERFORMANCE OF GFRP-PLATE-INSERTED CEDER GLULAM BEAMS

Yuri NORITAKE, Akihiko SATO, Kunitomo SUGIURA and Yasuo KITANE

Glue-laminated timber has been used as a structural member of modern wooden bridges, but its bending performance is not comparable with that of steel or concrete, and there are limited number of wooden bridges in roadways with high live loads. In this study, an attempt was made to improve bending performance by inserting lightweight, high-strength GFRP plates with glue-laminated timber. The size of GFRP plates inserted into the glue-laminated timber on stiffness and strength was discussed. Four-point bending loading tests were conducted on three types of specimens, including an unreinforced glue-laminated timber beam. The experimental results showed that the reinforcement increased the bending stiffness as well as bending strength, while the failure modes suggested that the failure started from the nodes. In order to assess experimental observation, a finite element analysis was carried out for glue-laminated timber considering the elastic-plastic properties of compression side and the knots. It was concluded that the stiffening and strengthening by GFRP plate to glue-laminated timber is very effective.