

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

Numerical and experimental analyses of shear strength of steel-plate-inserted glulam beams

千田 知弘*・後藤 文彦**・薄木 征三***・佐々木 貴信****・石川 和彦†

CHIDA Tomohiro, GOTOU Humihiko, USUKI Seizo, SASAKI Takanobu, ISIKAWA Kazuhiko

*修(工) 秋田大学博士後期課程, 生産・建設工学専攻(〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

**博(工) 秋田大学助教, 工学資源学部土木環境工学科

***工博 秋田大学教授, 工学資源学部土木環境工学科

****博(工) 木材高度加工研究所 秋田県立大学准教授(〒016-0876 能代市宇海詠坂 11-1)

†福島県庁, 土木部(〒960-8670 福島県福島市杉妻町 2-16)

In recent years various types of hybrid structures such as steel-plate-inserted glulam-beams are adopted for timber road bridges. Since glulams are materials with very low shear stiffness which is not always improved by the steel-plate insertion, it is very important to investigate elasto-plastic behaviors of the steel-glulam hybrid beams. In this study we try to experimentally and numerically investigate glulam beams and three types of steel-glulam hybrid beams with vertically inserted steel plates. We compare FEM analysis with experiment and discuss the influence of steel-plate insertion condition on shear stress.

Key Words :キーワード: 集成材, ハイブリッド構造, 有限要素法, *CalculiX*

1. はじめに

近年, 鋼板を集成材梁に鉛直に挿入接着した鋼板挿入集成材梁は, 実験, 解析ともに多く行われてきており¹⁾²⁾, また, 秋田県藤里町の坊中橋のように実際に架設されてきている. この種の梁の有用性は, 作成が比較的容易であること, 鋼板が梁全体の曲げ剛性を飛躍的に改善することなどが挙げられる. 作成が容易であることは, コスト削減にもつながり, 住居などの建築部材としての利用なども想定される. また, 景観を重視して山岳部に木橋を架設するような場合, 場所によっては, 強度を得るために必要な桁高をじゅうぶんに得られないことも予想されるが, 挿入された鋼板の効果でじゅうぶんな強度を得ることができる.

多くの場合, 鋼板挿入集成材梁の設計は, 最大モーメント部の曲げ強度に焦点を当て行われ, 続いて支点付近のせん断強度に合わせて修正する方法がとられる. この際, 曲げ, せん断問わず, 鋼板を木材に換算する合成断面で計算されるが³⁾, これは鋼板挿入が曲げにもせん断にも有効であるという仮定の基に行われてきた. 文献において¹⁾²⁾, 著者等は複数の鋼板挿入集成材梁の曲げ破壊試験を行うとともに, FEM 弾塑性解析を行ったところ, 実験, FEM 解析ともに, 鋼板挿入が梁全体の曲げ

剛性を飛躍的に増大させるとともに, 集成材部材のばらつきを大きく軽減させるという知見が得られた. 一方, FEM 解析において, 集成材部材引張側の応力が破断応力に達する前に, 集成材部中立軸のせん断応力が, せん断破壊応力 3~8MPa の範囲に達してしまい, せん断に関しては鋼板挿入の効果があまり期待できない可能性も示唆された.

そこで本研究では, 鋼板挿入集成材梁のせん断に着目し, 木材にも適用できるせん断耐力評価法として逆対称四点曲げの載荷方法⁴⁾⁵⁾で, 挿入条件が異なる複数の鋼板挿入集成材梁の破壊試験を行うとともに, ソリッド要素を用いた FEM 解析を行うことで, 鋼板挿入条件の違いがせん断破壊にどれほど影響があるのかを, 実験, 数値解析の両方の面から比較検討する.

2. 実験モデル

本研究では, できるだけ強度がせん断で支配される載荷条件で破壊試験を行いたい. そこで, 梁中央部の曲げモーメントを 0 にして, せん断を卓越させることのできる逆対称四点曲げ試験法を用いてせん断破壊試験を行う. 逆対称四点曲げ試験は, コンクリートや鋼においてはめずらしくない試験法だが, そもそもめり込みを生じやすい木材の破壊試験に用いられることは少ない. しか

し、参考文献⁴⁾⁵⁾などから、木材においても逆対称四点曲げ試験がじゅうぶんに適用可能であると判断した．実験においては、集成材はスギを用い、鋼板は SS400 を用いる．

本研究で用いる供試体の側面図と載荷点を図-1 に、3 種の鋼板挿入集成材梁の断面図を図-2 に、この供試体の逆対称四点曲げ試験におけるせん断力図と曲げモーメント図を図-3 に示す．梁の外形は図-1、2 に示すように、

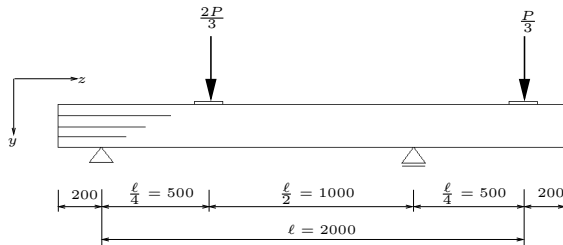


図-1 スパンと載荷点 (単位 mm)

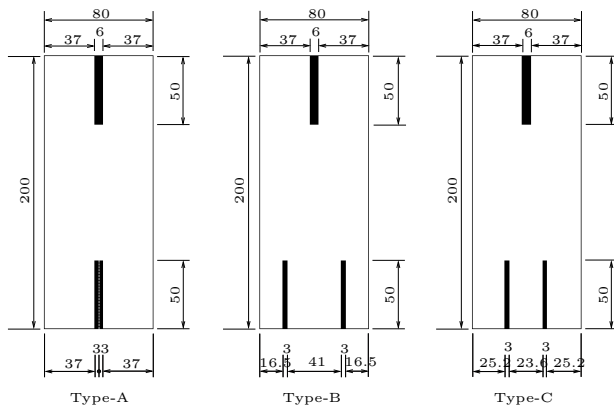


図-2 3 種の実験体の断面図 (単位 mm)

幅 $b=80\text{mm}$ 、桁高 $h=200\text{mm}$ 、軸長 $l=2000\text{mm}$ の集成材梁中央上下に、 $b_s \times h_s = 6 \times 50\text{mm}$ の鋼板を挿入したもの (Type-A) を基準とし、この梁と鋼板部分の断面二次モーメントが等しくなるように、上側の鋼板はそのままに、下側に $b_s \times h_s = 3 \times 50\text{mm}$ の鋼板二本を、鋼板どうしの間隔を可能なかぎり広げて挿入 (Type-B)、同じ二本の鋼板を集成材の幅 80mm をほぼ三等分するように挿入 (Type-C) した 3 タイプを、各々 3 本、計 9 本の供試体を用意し実験を行う．ただし、鋼板は同じ SS400 でも、薄いほど降伏点が高くなる傾向があり、本解析で用いた鋼板においては、 6mm の鋼板の降伏点は 323MPa 、 3mm の鋼板の降伏点は 353MPa と 30MPa ほどの違いがあり、弾塑性挙動を追う場合、どうしてもその影響の方が大きくなり、鋼板挿入条件の違いによるせん断の影響の比較を困難にしてしまう．そこで、Type-A の下の鋼板は、Type-B、C で用いる 3mm の

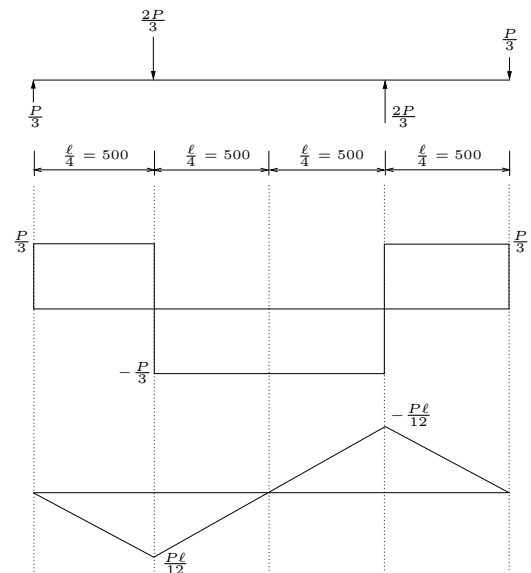


図-3 逆対称四点曲げにおけるモーメント図とせん断力図

鋼板二枚を部分的に溶接して 6mm の鋼板とし、降伏点と同じ鋼板を作成する．具体的には、二枚の鋼板の内、片方の 1 枚だけに図-4 に示すような穴を開け、その部分で 2 枚の鋼板を溶接する．この方法を用いれば、溶

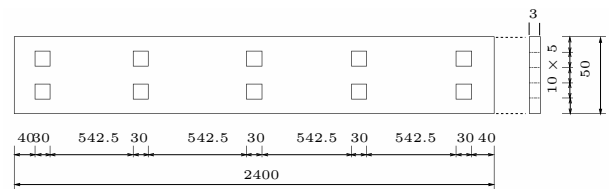


図-4 鋼板の溶接位置

接による歪みや残留応力を大幅に減少させることが可能となる．挿入する鋼板の外形、挿入条件は、以下に示す三つの理由から決定した．1．文献⁶⁾の数値解析において、たわみに対するせん断変形の影響がもっとも強く出る鋼板の挿入条件は、上下の鋼板の深さが各々梁高の 25% のときであり、また、集成材部分のせん断応力 τ_{yz} がもっとも大きくなる鋼板の挿入本数は一本で、もっとも小さくなる本数は二本であり、さらに、二枚の鋼板どうしの間隔が広がるほど、鋼板に隣接する集成材要素のせん断応力 τ_{yz} が低くなる、という結果が得られた．2．鋼板を挿入するための溝を作成する際は、集成材の欠損を防止するために、溝から外縁部までの距離、並びに溝どうしの距離が 15mm 程度必要となる．3．実際に架設されている鋼板挿入集成材を用いた多くの橋梁においては、鋼板の幅は全幅の 10% 以下である．

鋼板はエポキシ系接着剤 (サンスター、ペンギンセメント #1031) で接着する．実際の供試体作成時は、まず

溝に接着剤を流し込み、その後図-5 のように、鋼板をタコ糸などの細い紐で吊るしながら何度か出し入れすることで鋼板全体に接着剤をまんべなく付着させ、最後に鋼板を溝に完全に沈めてから紐を抜き取る方法を用いるので、作業を容易にするために、実際の溝の幅は図-2 の鋼板サイズよりも、幅、高さ方向にそれぞれ 2mm 程度広くとってある。尚、固化後の接着剤の材料定数は、集



図-5 鋼板接着

成材のそれとほぼ同じであり、また、過去著者等が行った実験¹⁾²⁾において、供試体の破壊が曲げ破壊、せん断破壊にかかわらず、接着剤層が破壊の原因となった例はなく、逆に強度を著しく上昇させる結果も出ていないので、数値解析においては、接着剤層は考慮せず、集成材として扱う。

荷重は、供試体のいずれかの箇所ですせん断破壊が生じるまで載荷することにする。本研究では曲げ破壊は想定していないが、仮に集成材引張部で破断を生じた場合にも、載荷を中止する。供試体に貼るひずみゲージの種類、位置、数については、次章で述べる FEM 解析の結果から決定することにする。

3. FEM 弾塑性解析を用いた性能予測

文献¹⁾では実験と有限要素解析を行い、合成断面であっても、一定のレベルの数値解析予測が可能であることが示せた。このとき用いた解析手法を用いて、図-1、2 に示したモデルの性能予測が可能であるかを調べるために、実験を行う前に数値解析を行い、その結果を文献⁷⁾に発表した。本章では、その解析結果を手短に報告する。

文献¹⁾と同様に、汎用有限要素解析ツール CalculiX⁸⁾を用い、8 節点 24 自由度のアイソパラメトリック要素 (C3D8) で図-1、2 の有限要素解析を行った。ただし、

解析時には各材料の材料定数が分からなかったため、文献¹⁾や公称値の値を用いた。具体的には、集成材の材料定数は、軸方向ヤング率 $E_z = 9.553\text{GPa}$ 、軸直角方向ヤング率 $E_x = E_y = \frac{E_z}{25} = 0.38\text{GPa}$ 、せん断弾性係数 $G_{xy} = G_{yz} = G_{zx} = \frac{E_z}{15} = 0.64\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yx} = \nu_{yz} = 0.016$ 、 $\nu_{zx} = \nu_{zy} = 0.4$ とする。鋼板の材料定数は SS400 の公称値 $E_s = 210\text{GPa}$ 、 $G_s = 80.8\text{GPa}$ 、 $\nu = 0.3$ 、降伏点 235MPa を用いた。尚、すべてのモデルは弱軸に対して対称な断面を有するので、解析する際は yz 面で 2 分割された梁の半分を解析対象とし、 $n_x \times n_y \times n_z = 10 \times 30 \times 240$ の要素分割で半解析で行った。

曲げを受ける集成材のみの梁の、曲げ面内の yz 面のせん断応力 τ_{yz} は次式で与えられる。

$$\tau_{yz} = \frac{3Q}{2A_w} \quad (1)$$

ここに、 Q はせん断力、 A_w は集成材梁の xy 断面の面積である。44kN 載荷時における、集成材のみの梁、Type-A、Type-B、Type-C の、FEM によって得られる図心のせん断応力 τ_{yz} の分布と、式 (1) から得られる図心の τ_{yz} (1.375MPa) の分布を図-6 に示す。この

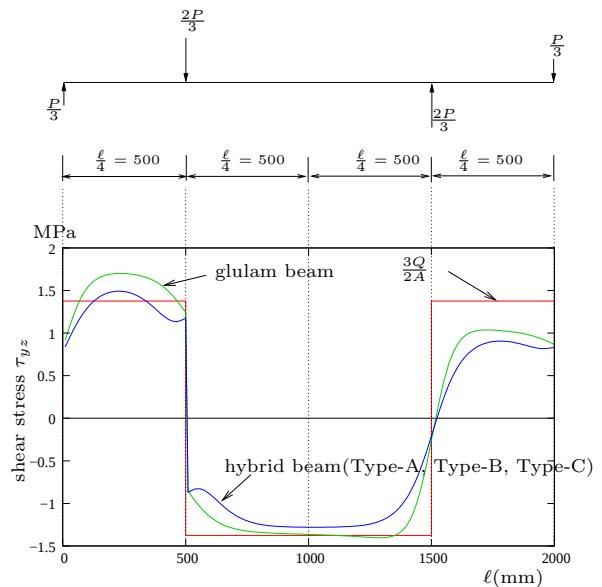


図-6 図心上の τ_{yz} の分布 ($P = 44\text{kN}$)

載荷時には、すべての梁の解析は弾性解析である。鋼板の挿入条件に違いがあるにもかかわらず、Type-A、Type-B、Type-C の τ_{yz} 値は非常に近い値となり、図上ではほとんど重なっている。それらの値は集成材のみの梁の値よりもすべての場所で下回っており、支間中央付近を除いて、各種鋼板挿入集成材梁の τ_{yz} の値は最大約 15% ほど集成材のみの梁よりも低い値であるのに対し

て、支間中央付近では、近い値になっている．集成材のみの梁の τ_{yz} の FEM の値と式 (1) から得られる τ_{yz} の値を比較すると、支間中央付近のせん断応力はほとんど一致するが、左载荷点よりも左の部分では FEM の値が式 (1) から得られる値よりも 27% 大きいのに対し、右支点よりも右の部分では 27% ほど小さい．この傾向は各種鋼板挿入集成材においても当てはまり、逆対称四点曲げ特有の挙動かもしれない．また、鋼板挿入により、曲げ面内のせん断応力 τ_{yz} を低く抑えられていることが見て取れるが、曲げ剛性を約 2 倍ほど上昇させる効果があることを考えると、せん断応力を減少させる効果はそれほど高くはないと考えられる．

この解析において、各種鋼板挿入集成材梁の集成材部分で、図心のせん断応力 τ_{yz} よりも高いせん断応力を持つ要素が何力所かで見受けられた．支間中央の xy 断面において、図心のせん断応力 τ_{yz} よりも大きい値を持つ要素の分布を図-7 に示す．CalculiX では、鋼板と集成

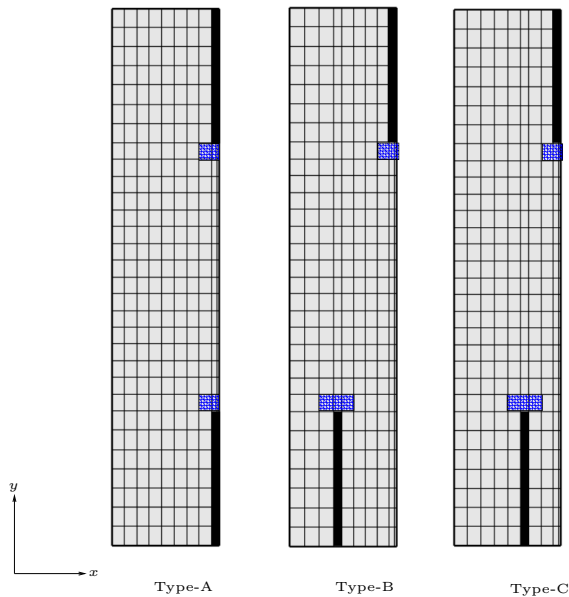


図-7 図心のせん断応力 τ_{yz} よりも大きい値を持つ要素の分布

材が共有する節点であっても、各々別々にデータが出力されるため、鋼板の値と集成材の値で節点の応力が補間されることはない．ただし、鋼板と共有する集成材の節点の応力は、ある程度鋼板の応力に引きずられてはいるので、一つの節点だけでの応力では判断せず、1 要素に含まれる 8 節点すべての値が半解析の対称面上にある図心のせん断応力よりも高い要素の分布を図-7 に示している．さて、Type-A においては、上部鋼板の下端と下部鋼板の上端の y 方向に一つ分の要素と、それらと隣接する x 方向の一要素のせん断応力 τ_{yz} が約 2.27MPa

となっており、この値は図心上のせん断応力よりも 1.8 倍ほど大きな値となっている．Type-B、Type-C においては、中立軸よりも上側では、 τ_{yz} の値、分布ともに Type-A のものとほとんど同じ値、分布を示した．中立軸よりも下側では、分布は Type-A 同様、鋼板のすぐ上の一つ分の要素と、その要素と x 方向に隣接する一つ分の要素のせん断応力が高く、鋼板の位置が違うのにもかかわらず、ともに約 1.85MPa となり、図心上のせん断応力よりも 1.45 倍ほど高い値を示す．これらの現象が、FEM 解析特有のものかどうか分からないが、もし実際の実験でも生じ得るのであれば、いずれのタイプの鋼板挿入集成材梁も、筆者等の考えている荷重よりもずっと低い値でせん断破壊を生じる可能性がある．弾性域においては、せん断応力の値に差が見られなかった Type-B と Type-C であるが、塑性域においては、差が生じる可能性があるので、Type-B と Type-C について、弾塑性解析を行った．尚、Type-A に関しては、中立軸に対し上下対称であり、Type-B、C の中立軸より上側の挙動とほとんど一致するので、ここでは除外する．120kN 载荷時における、Type-B、Type-C の、FEM によって得られる図心のせん断応力 τ_{yz} の分布と、式 (1) から得られる図心の τ_{yz} の分布を図-8 に示す．120kN 载荷

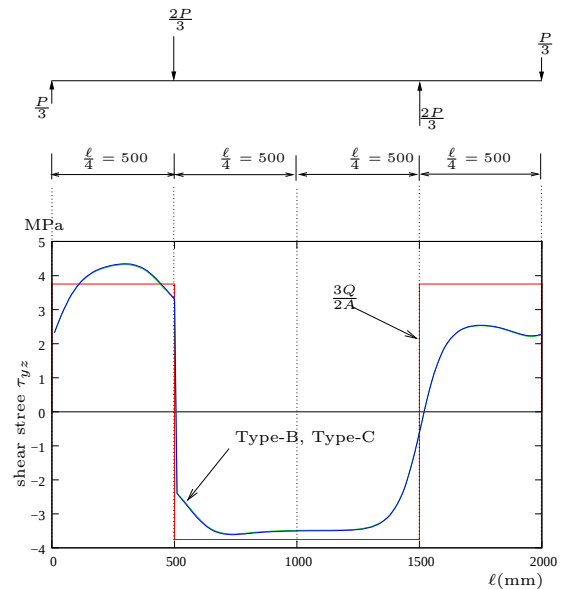


図-8 図心上の τ_{yz} の分布 ($P = 120\text{kN}$)

時の、左载荷点の引張側の集成材の軸方向応力 σ_z は、Type-B で 50.0MPa、Type-C で 50.4MPa であり、ともに破断応力 65.6MPa よりも 16MPa ほど小さいが、図心のせん断応力 τ_{yz} はすでに 4.3MPa を越えており、この値は集成材のせん断破壊応力 $\tau_{max} = 3 \sim 8\text{MPa}$ の範囲に達してしまっている．また、図-7 に示した、せん断

応力が図心上の値よりも大きくなる箇所のせん断応力は、10MPa を優に越えている。しかし、弾塑性解析においても、タイプの違いによるせん断応力の値の差は見られなかった。

この章では、3 種の鋼板挿入集成材梁の弾塑性解析を行ったが、図心上のせん断応力の値においては、いずれのタイプにおいても差は見られなかった。集成材のみの梁と比較しても、ある程度の改善は見られるものの、破断応力に達するよりもはるかに低い荷重レベルで、せん断破壊応力に達しており、曲げ破壊よりも、中立軸近辺のせん断破壊がより支配的であることが示唆された。また、FEM 解析の結果を信じるならば、挿入条件に関係なく、中立軸近辺のせん断破壊ではなく、上部の挿入鋼板の y 方向に隣接した集成材部材付近で、せん断破壊を生じ得ることが示唆された。Type-A の上下、Type-B、Type-C の上の鋼板近辺でこそ、値は非常に大きいですが、鋼板端部付近に局所的に集中しており、それが梁全体のせん断破壊につながるかは実験を試みないと分からない。また、Type-B、Type-C のように、下部鋼板付近の値は上部鋼板付近よりも小さいものの、より外縁部に応力集中の箇所が存在するため、こちらの方が梁全体のせん断破壊につながる可能性がある。よって、応力集中が実際に生じるとして、もし、応力の値の大きさがより支配的であるとすれば、Type の違いによらず、上部鋼板の下側でせん断破壊を生じるであろうし、応力集中の場所がより支配的であるとすれば、Type-B の下部鋼板の上側でせん断破壊を生じるであろう。

以上のことを踏まえて決定した各種ゲージ位置を図-9、10 に示す。ひずみゲージは、左载荷点と、梁中央の

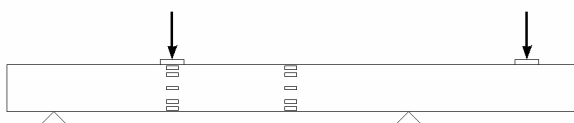


図-9 ひずみゲージの位置

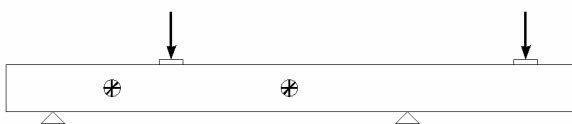


図-10 ロゼットゲージの位置

モーメントが 0 になる箇所に 5 枚ずつ計 10 枚貼ることにする。具体的には、本研究に用いる集成材は異等級構成の 7 層であるので、上下 2 層の中央に一枚ずつ、中央

のラミナに一枚貼る。ロゼットゲージは、左支点と左载荷点の間の中央の位置の、中立軸位置に一枚、モーメントが 0 になる箇所の中立軸位置に一枚、計 2 枚貼ることにする。均等に配置しなかった理由は、上下 2 層目のラミナ中央付近が上部鋼板の下端、下部鋼板の上端に当たるため、鋼板付近の集成材にせん断応力集中が生じ得るかどうか調べるために不均等に配置した。尚、ロゼットゲージの配置については、図-6、8 を参考に、支間中央部の中立軸のせん断応力と左支点と左载荷点の間の中立軸のせん断応力に差が生じるかどうかを調べるために貼り付ける。

4. 実験結果

2. 章の実験モデルを作成し、逆対称四点曲げ試験法により、せん断破壊試験を行う。図-1 の二点载荷は、実際には、図-11 のように、载荷点に幅 20cm の鋼板を敷き、その上に鋼の円柱を縦に二つに割ったものを置き、その上に剛な H 型鋼を設置し、その上から载荷している。尚、このモデルにおいては、支間中央部の真上から载荷すると、図-1 のように分配して载荷できる。Type-A3 本、Type-B3 本、Type-C2 本のモーメントが



図-11 逆対称四点曲げ試験

最大となる左载荷点における荷重-たわみ曲線を図-12 に示す。ただし、破壊後の挙動はいずれの供試体もほぼ同じなので、図を見やすくするために、Type-B の一本についてのみ破壊後の挙動も示す。Type-C の一本においては、偏心を起こしてしまい、左载荷部にめり込みが生じ、鋼板の载荷部付近に局部座屈が生じたのでデータからは削除している。また、木材の実験をする場合、強度がじゅうぶんに発現するまである程度荷重をかける必要があり、供試体ごとに傾きが一定になるまでにはある程度の誤差が生じる。たわみを調整し傾きが一定と

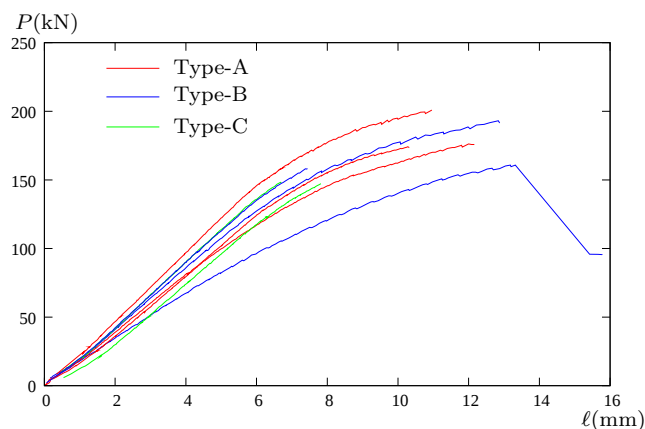


図-12 各供試体の荷重-たわみ曲線

なる箇所を 0 点とし，データを見やすくすることは可能だが，本研究では，タイプの違いで破壊モード，破壊位置，破壊荷重に差が出るかどうか，FEM 解析と実験で挙動の違いが出るかどうかを調べることが目的なので，敢えて合わせることはしていない．さて，今回の実験において，タイプの違い，破壊荷重の大小にかかわらず，すべての供試体の破壊は，図-13 のように軸方向に沿って割れが生じるせん断破壊であった．また，ほと



図-13 せん断破壊した供試体

んどの供試体において，梁理論でもっともせん断応力が大きくなるとされている³⁾(降伏後の) 中立軸でのせん断破壊ではなく，FEM 解析において応力が集中していた上部鋼板下端付近でせん断破壊を生じ（図-14），軸方向で言えば，支間中央のモーメントが 0 になる箇所から右支点の間辺りで最もせん断破壊を生じた．Type-A と Type-B の供試体の内，各々一本ずつ 200kN 近くまで耐力を維持している供試体があるが，その 2 本を除くと，Type-C，Type-B，Type-A の順で 150kN ほどか



図-14 上部鋼板下端付近でのせん断破壊

ら約 10kN ずつ破壊荷重が上がっている．200kN 近くまで耐力を維持した 2 本の供試体においても，Type-A の方が Type-B よりも約 10kN ほど破壊荷重が大きい．今回破壊できた供試体の数は 8 本と決して多くは無く，これらの違いは集成材そのもののばらつきの範囲に収まると取れなくもないが，同じ様なせん断強度を持つ供試体が 2 グループあったとも考えられる．木材そのもののせん断強度は総じて低く，本研究では供試体作成に当たって，これ程せん断強度に差が生じることを想定していなかったため，ヤング率を個別に調べることは行なったが，せん断強度を個別に調べることは行わなかった．同様の実験をする場合には，せん断強度も調べておく必要があるだろう．とは言え，もし仮にせん断強度の違う 2 種類の集成材を用いて実験を行っていたとするならば，FEM 解析から筆者等が予想していた結果とは違う結果が得られた．もし，応力集中の大きさがより支配的に破壊に作用するならば，どのタイプの供試体もほぼ同じ荷重レベルで壊れるであろうし，より外縁に近い箇所で応力集中が生じることがより支配的に破壊に作用するならば，Type-B，Type-C，Type-A の順番にせん断破壊するであろうと事前に予測していたが，実際には Type-C，Type-B，Type-A の順番に破壊している．これについては，さらに実験数を増やして，継続的に調査する必要があるであろう．

次に，各タイプから 1 本ずつ代表的なものを選び，各ゲージから得られたひずみについて考察する．Type-A においては，173.6kN でせん断破壊した供試体で考察する．左載荷点における荷重-ひずみ曲線を図-15 に，支間中央における荷重-ひずみ曲線を図-16 に示す．また，

桁高方向のひずみの分布を各々図-17, 18 に示す。尚、図-17 と図-18 は、Type-B と Type-C と比較したいので、140kN 時の分布を示している。図-15, 17 を見ると、曲げが支配的であるため、ほぼ三角形分布している。

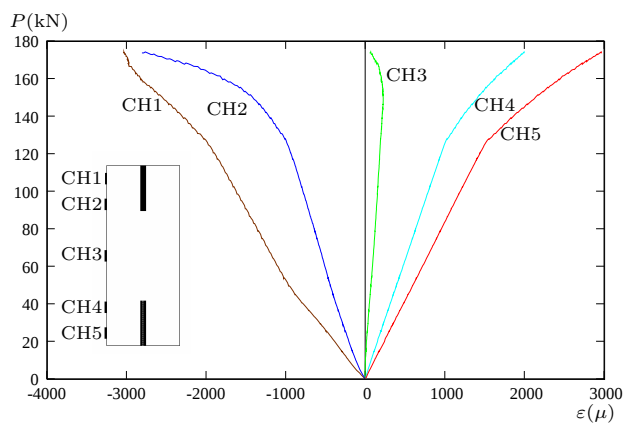


図-15 Type-A の左載荷点における荷重-ひずみ曲線

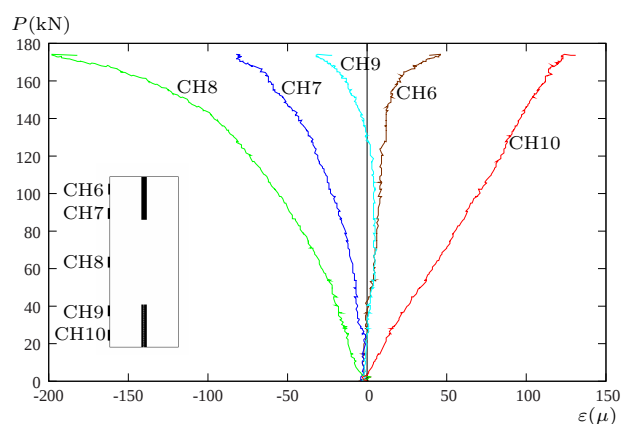


図-16 Type-A の支間中央における荷重-ひずみ曲線

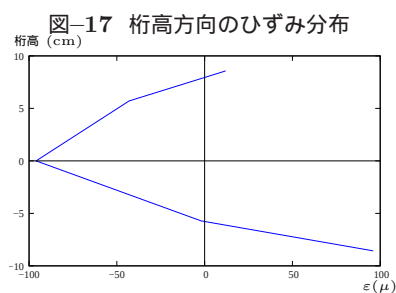
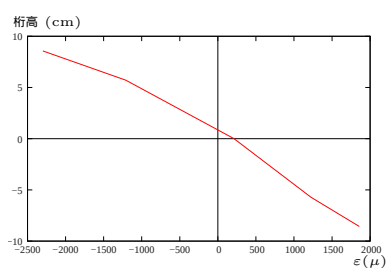


図-18 支間中央における桁高方向のひずみ分布

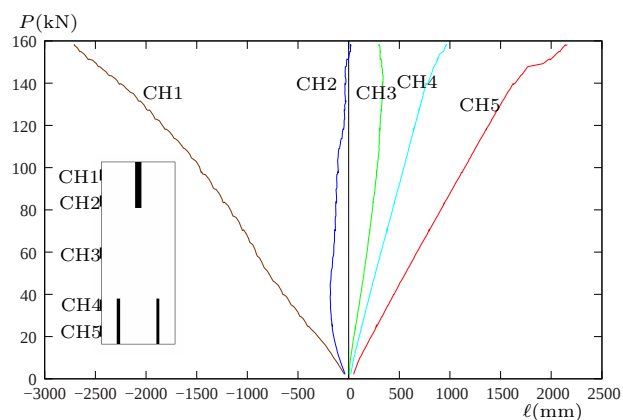


図-19 Type-B の左載荷点における荷重-ひずみ曲線

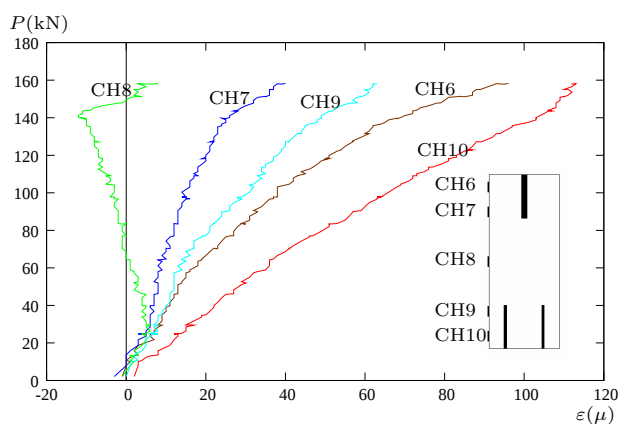


図-20 Type-B の支間中央における荷重-ひずみ曲線

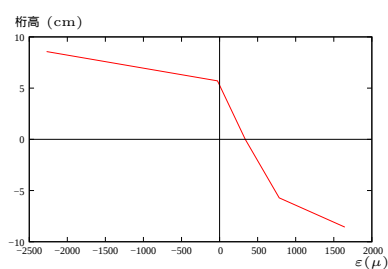


図-21 桁高方向のひずみ分布

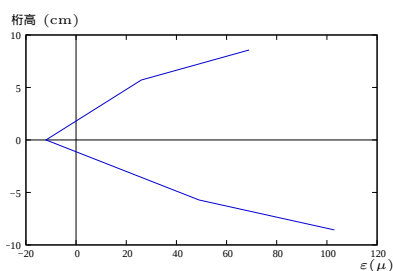


図-22 支間中央における桁高方向のひずみ分布

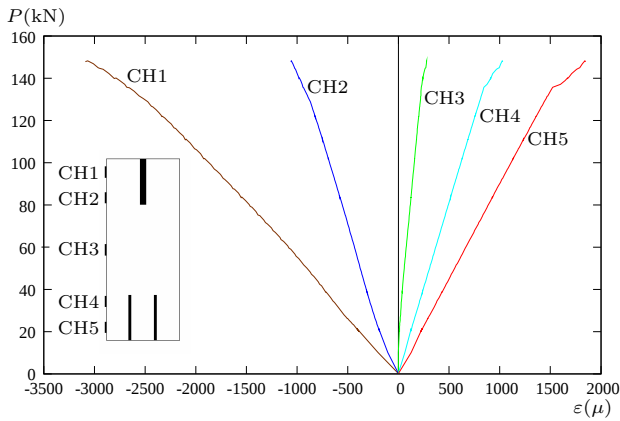


図-23 Type-C の左荷点における荷重-ひずみ曲線

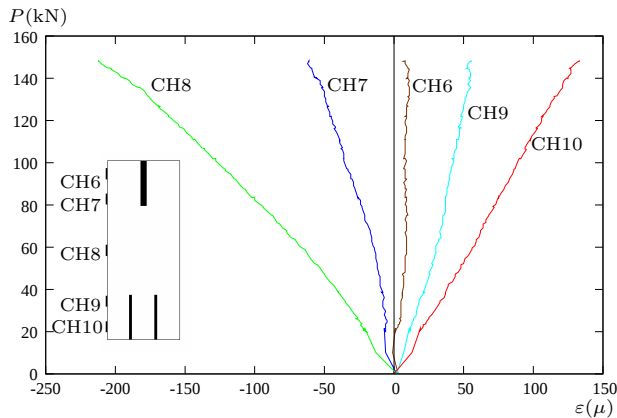


図-24 Type-C の支間中央における荷重-ひずみ曲線

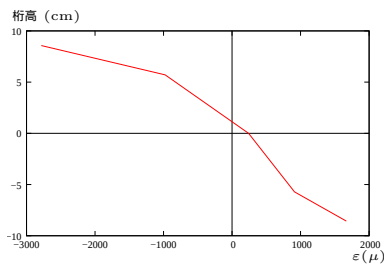


図-25 桁高方向のひずみ分布

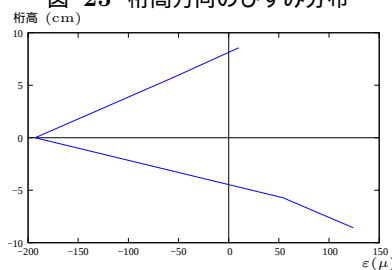


図-26 支間中央における桁高方向のひずみ分布

一方、図-16, 18 は逆に、曲げを受けないために、三角形分布をしておらず、ひずみのオーダーも二桁小さく、軸方向ひずみがほとんど発生していないことが分かる。ここで、ロゼットゲージの値を基にせん断応力 τ_{yz} を求めてみると、左支点と左荷点の間では $\tau_{yz}=7.92\text{MPa}$ 、

支間中央では $\tau_{yz}=5.19\text{MPa}$ となり、せん断破壊した支間中央よりも、破壊しなかった左支点と左荷点の間の方が高いせん断応力を示している。この結果はせん断破壊が FEM 解析で最も高い値を示す上部鋼板付近で破壊した事とともに、3. 章の解析結果と同じような挙動を示している。しかし、実験値、解析値ともに、せん断破壊を生じた箇所以外の値の方が大きいことは興味深い。そこで、実験値を基に再度 FEM 解析を行い、各箇所のせん断応力を求めてみた。左支点と左荷点の間では、上鋼板付近のせん断応力が 11.0MPa 、ゲージ位置のせん断応力が 5.19MPa 、支間中央では、上鋼板付近のせん断応力が 5.74MPa 、ゲージ位置のせん断応力が 3.11MPa であった。鋼板付近のせん断応力は別として、ゲージ位置のせん断応力は、実験値よりもかなり下ってしまった。実験ではめり込みを防ぐために支点や荷点に幅 20cm と少し大きめの鋼板を敷いたが、その幅を FEM で考慮する場合、支点部分は拘束幅を 20cm にし、荷点は 20cm の間隔で等分布荷重とみなして考慮すると、実験値よりも低い値になってしまうようだ。

Type-B においては、 158.2kN でせん断破壊した供試体で考察する。左荷点における荷重-ひずみ曲線を図-19 に、支間中央における荷重-ひずみ曲線を図-20 に示す。また、 140kN 荷重時の桁高方向のひずみの分布を、各々図-21, 22 に示す。曲げをあまり受けないので軸方向のひずみが小さい。ロゼットゲージからせん断応力を求めてみると、左支点と左荷点の間では $\tau_{yz} = 5.99\text{MPa}$ 、支間中央では $\tau_{yz} = 4.89\text{MPa}$ となり、こちらも破壊した支間中央よりも、左支点と左荷点の間のせん断応力の方が大きい結果となった。Type-A と同様、Type-B においても、左荷点では曲げが支配的であるため、ほぼ三角形分布しているのに対し、支間中央ではひずみのオーダーが二桁も小さい。

Type-C においては、 148.3kN でせん断破壊した供試体で考察する。左荷点における荷重-ひずみ曲線を図-23 に、支間中央における荷重-ひずみ曲線を図-24 に示す。また、 140kN 荷重時の桁高方向のひずみの分布を、各々図-25, 26 に示す。Type-C においても、他のタイプと同じ挙動が見られる。しかし、ロゼットゲージからせん断応力を求めてみると、左支点と左荷点の間では $\tau_{yz} = 4.06\text{MPa}$ 、支間中央では $\tau_{yz} = 4.37\text{MPa}$ となり、Type-C のみせん断破壊を生じた支間中央のせん断応力の方が高い値を示している。しかし、Type-C の他の供試体では、Type-A, Type-B 同様左支点と左荷点の間のせん断応力の方が大きいことを考えると、ロゼットゲージの 3 方向のひずみから求めたせん断応力は、集成材の異方性を考慮していないため、軸方向応力

に比べると測定精度は低いのかもしない。

5. まとめ

本研究では、できるだけ強度がせん断で支配される載荷条件で破壊試験を行うために、逆対称四点曲げで破壊試験を行うとともに、FEM 解析により、性能予測を行った。FEM 性能予測においては、文献¹⁾で用いた解析手法をそのまま用いたが、軸方向の応力分布、せん断破壊箇所の応力集中、鋼板の挿入条件によるせん断への影響等、一定の性能予測が可能であることが確認できた。特に、せん断破壊箇所の応力集中については、せん断応力が最も大きくなるとされる中立軸上ではなく、FEM 解析で確認された上下挿入鋼板の下端、上端と接する集成材部材の τ_{yz} の集中箇所と、実験におけるすべての供試体の破壊箇所が一致するなど、FEM 解析と実験では高い関連性が得られた。一方、FEM 解析では挿入鋼板の本数、場所によって応力集中の値が減少することから、せん断性能が改善される可能性が示唆された。ただし、応力集中の値の大きさの順番と、実際の破壊荷重の大きさの順番は異なり、実験数を増やして継続的に調査する必要はあるであろう。また、集成材のみの梁では、確実に「曲げ破壊」することが数値的にも実験的にも確認されているサイズの梁に、鋼板を挿入して補強することによって、曲げ剛性は改善されるもののせん断剛性は改善されないで、「せん断破壊」で破壊してしまうことが FEM 解析からも実験からも確認された。よって、鋼板挿入集成材梁のように、集成材を鋼板で補剛す

る際には、せん断破壊に対しての注意が必要となることが示唆された。

参考文献

- 1) 千田知弘・後藤文彦・薄木征三・佐々木貴信：鋼板挿入集成材梁の有限要素弾塑性解析，構造工学論文集，Vol.53A (CD-ROM)，2007
- 2) 薄木征三・千田知弘・佐々木貴信・後藤文彦：集成材一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，Vol.53A (CD-ROM)，2007
- 3) 薄木征三，後藤文彦，キッシュ ララシュ：挿入リブ鋼板で補剛した集成材の曲げ耐荷力，構造工学論文集，Vol.49A
- 4) 小泉章夫、佐々木貴信、藤田誠、播繁、樋口聡：平成 13 年度 農林水産省補助事業 木材産業技術実用化促進緊急対策事業課題番号 1307『大断面木質材料の接合に利用する木ダボの性能調査』報告書，2002 年 10 月
- 5) 森田秀樹・藤本嘉安・小松幸平・村瀬安英：実大構造用木材のせん断試験法の開発，木材学会誌，52 巻 6 号，2006
- 6) 川原将，千田知弘，後藤文彦，薄木征三：鋼板挿入集成材梁におけるせん断変形評価，平成 18 年度 土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集 (CD-ROM)，I-18，2007
- 7) CHIDA Tomohiro, GOTOU Humihiko, USUKI Seizo, TOYODA Atusi, SASAKI Takano, Elastoplastic shear behavior of steel-inserted glulam-beams, International Conference on 9th STEEL, SPACE & COMPOSITE STRUCTURES, 2007
- 8) <http://www.dhondt.de/>

(2007 年 9 月 18 日 受付)