

鋼板挿入集成材梁のせん断応力に関する実験と FEM 解析

Experiment and elasto-plastic FEM analyses of shear stress of steel-plate-inserted glulam-beams

千田 知弘*, 佐々木 貴信**, 後藤 文彦***, 薄木 征三****, 飯島 泰男*****
CHIDA Tomohiro, SASAKI Takanobu, GOTOU Humihiko, USUKI Seizo, IJIMA Yasuo

*博 (工), 秋田県立大学流動研究員 木材高度加工研究所 (〒016-0876 能代市宇海詠坂 11-1)

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

***博 (工), 秋田大学准教授, 工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

****工博, 秋田大学名誉教授

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

In the beam theory the shear stress becomes maximum value on the neutral axis, which is also adopted for hybrid structures as to steel-plate-inserted glulam beams. However, in previous its shear failure test, every specimen did not break on the neutral axis but on stress concentration zone which was observed in FEM analysis. In this study we try to experimentally and numerically investigate three types of steel-glulam hybrid beams and evaluate stress transfer mechanism between steel and glulam. In FEM analysis we search the shear stress distribution on xy cross section and compare to experiment, discuss the influence of stress transfer between different materials on failure condition.

Key Words: glulam, shear stress, hybrid structure, FEM

キーワード: 集成材, せん断応力, ハイブリッド構造, 有限要素法

1. はじめに

国産木材の中で最も生産量が多いスギ材を構造材として用いる試みが各地で行われているが、スギ材は木材の中でも強度やヤング率が低い樹種である。鋼板挿入集成材梁は、スギ集成材の耐荷力や剛性を向上するとともに、木材特有の脆性的な破壊性状を改善させることを目的として考案されている。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、その有用性が確認されてきている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。鋼板挿入集成材梁の設計は、曲げ、せん断問わず、梁理論を用い、鋼板を木材に換算する合成断面で計算される⁵⁾が、断面の幅方向の形状を考慮できない梁理論では異種材料間の応力伝達を適切にモデル化できているとは言えない。とは言え、せん断において最も重要である中立軸上のせん断応力の値については、実験からも数値解析からも梁理論でおおよそ評価できていることが分かってきており、また、通常の曲

げ試験においては、曲げで破壊する前にせん断で破壊した事例は無く、このことから、梁理論による異種材料間の応力伝達のモデル化に問題はないと考えられてきた。

著者らは鋼板挿入集成材梁のせん断性能に着目し、強度がよりせん断に支配される大野式逆対称四点曲げ試験法を用い、FEM 解析と実験を行ったところ¹⁾、すべての供試体はせん断破壊したものの、梁理論で最もせん断応力の値が大きくなるとされる中立軸上の集成材部ではせん断破壊は生じなかった。実験前に行った FEM 解析においては、上部鋼板の下端部と下部鋼板上端部に隣接する集成材部に、中立軸上のせん断応力の値の 1.8 倍ほどの応力集中が見られたが、実際の実験ではすべての供試体においてこの箇所ではせん断破壊を生じた。

そこで本研究では、鋼板挿入集成材梁における異種材料間の応力伝達に着目し、断面内部に生じるせん断応力の分布を明らかにするとともに、梁の強度にどのような

影響を及ぼすのかをソリッド要素を用いた FEM 解析で考察し、また、FEM 解析で見られた応力集中を生じさせない断面の検討も行う。

2. 実験モデル

2.1 試験体

本研究では、文献¹⁾の結果を用い、異種材料間の応力伝達を考察していく。文献¹⁾で用いた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 に示す。

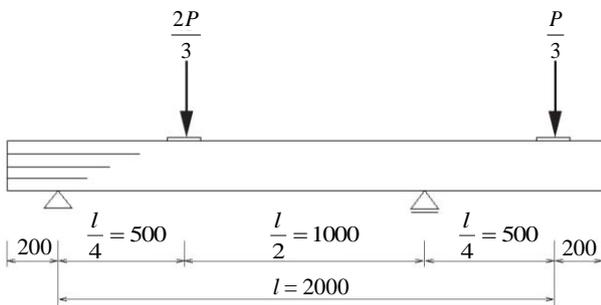


図-1 スパンと載荷点 (単位 mm)

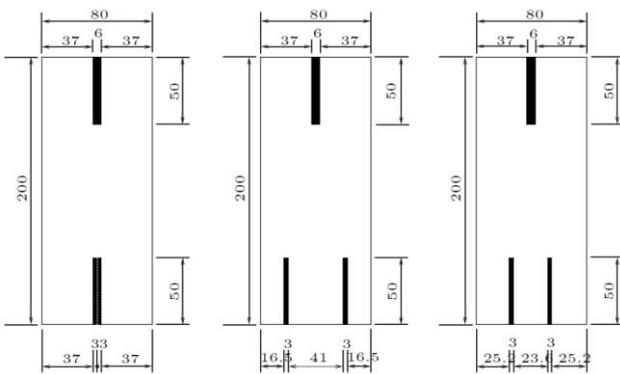


図-2 3種の実験体の断面図 (単位 mm)

梁の外形は図-1、2 に示すように、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 $b_s \times h_s=3 \times 50\text{mm}$ の鋼板二枚を、鋼板どうしの間隔を可能な限り広げて挿入 (Type-B)、同じ二枚の鋼板を集成材の幅 80mm をほぼ

三等分にするように挿入 (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った。尚、Type-B における、可能な限りとは、スリットを開ける作業において木材が折れたりすることを防ぐために、スリットの外側の集成材の厚さが最低 15mm 必要であることを指す。Type-A の下鋼板は 3mm の鋼板を2枚重ねて溶接して作成したが、これは 6mm の鋼板と 3mm の鋼板の降伏点に 30MPa もの差があり、Type-A のみ降伏点が異なるので、上部は上部、下部は下部どうしの鋼板の降伏点を一致させるためである。尚、集成材は上下1層に強度の強い部材を配した7層の異等級のスギ集成材を用い、鋼板は SS400 を用いた。また、鋼板を挿入する際の作業を容易にするために、スリットは、幅、高さ方向にそれぞれ 2mm 程度広くとってあり、その部分はエポキシ樹脂接着剤 (サンスター技研 (株) 製、ペンギンセメント#1031) が充填されている。

2.2 試験方法

実験ではせん断応力を調べるために、ロゼットゲージを用いた。ロゼットゲージの位置を図-3、4 に示す。図-3 においては、左支点と左載荷点の中間の位置の中立軸位置に一枚ずつ、曲げモーメントが0となる梁中央に一枚貼った。図-4 においては、梁を8等分にした内の8箇所の中立軸上に一枚ずつ貼り、軸方向のせん断応力分布を見た。ただし、図-4 のケースについては、Type-A の一本についてのみ調べた。また、たわみが最大となる左載荷点にたわみ計を設置し、たわみを調べた。

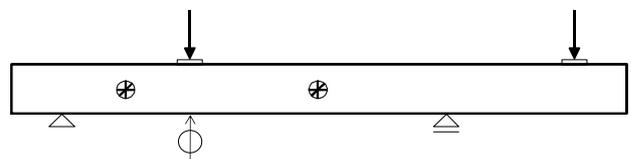


図-3 ロゼットゲージ位置

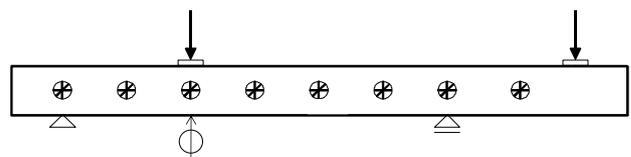


図-4 一列に配置したロゼットゲージ位置

3. FEM 解析モデル

3.1. 構造モデル

本研究では、GPL ライセンスのフリーの有限要素解析ツール CalculiX^{7,8)}を用いて、弾塑性解析を行う。集成材と鋼板を部分ごとに大きさの異なる立方体で分割し、それぞれの立方体を8節点24自由度のアイソパラメトリック要素 (C3D8) でモデル化する。実験で用いた集成材は上下に強度の強い部材を配した異等級材料であるが、ここでは全体に強度を平均化した直交異方性材料と見なし、ラミナー一枚ごとに要素を設定することはしていない。これについては次節で説明する。板厚方向に x 軸、桁高方向に y 軸、梁軸方向に z 軸を取る。すべてのモデルは弱軸に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する。FEM 解析においては、ある節点を拘束すると、その節点を中心に周りの節点の応力が極端に大きくなる現象が見られる。これは軸方向ヤング率に対してせん断弾性係数が $1/15$ 程度と非常に小さいことによるものであろう。また、実際の実験において、特に木材を扱う場合、支点の上に供試体を直に設置したり、荷重を供試体に直に載荷するといったことはせず、鋼板を敷いてめり込み防止するため、FEM 供試体モデルの節点を直に拘束したり、節点に載荷したりすることは、実験を正確にモデル化できているとはいえない。

そこで本研究では、図-5 のように、元々の梁の要素の上下に1要素ずつ増やし、実験で用いた支点上と載荷点上に敷く鋼板を考慮し解析を行う。ただし、簡易に鋼板のみをモデル化するために、上下に増やした要素のうち、実際に鋼板を敷いた位置の要素のみ鋼板として考慮する。具体的には、鋼板以外の要素は実際には存在しない要素なので、非常に柔らかい弾性体とし、軸方向ヤング率は集成材の 10^6 ほどの値を入力する。支点、載荷点上の鋼板のヤング率は、鋼板の 10^6 ほどのヤング率を持つ非常に剛な弾性体とする。この方法により、節点拘束によるせん断挙動の過剰評価を抑制できると考えられる。実際の xy 断面における要素分割を図-6 に示す。梁全体では、 $n_x \times n_y \times n_z = 10 \times (30+2) \times 240$ の要素分割で半解析を行う。境界条件は、左支点上の剛な弾性体の支間中央上にある節点の z 向変位と y 方向変位を拘束、右支点上の剛な弾性

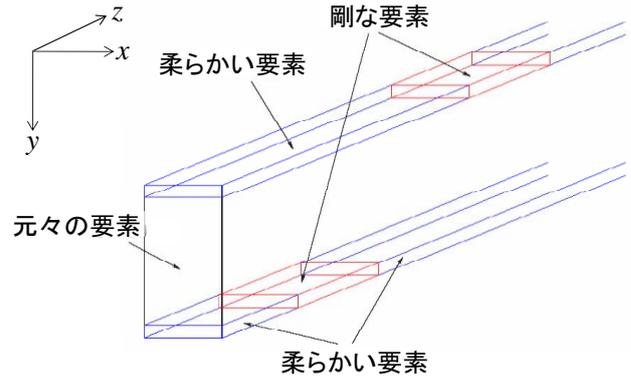


図-5 支点、載荷点における鋼板の考慮

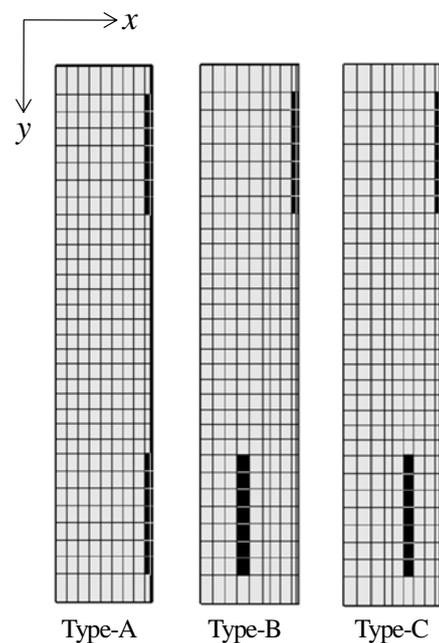


図-6 xy 断面における要素分割

体の支間中央上にある節点の y 方向変位を拘束、 yz 対称面上にある節点の x 方向変位を拘束する。載荷条件は、剛な弾性体としてモデル化した載荷板の中央で線載荷とし、支点の拘束条件も実験条件と同様に支点の回転を拘束しないように支点部に敷いた鋼板の中央を線拘束させたモデルで解析を行った。各材料定数は、実験で使用した集成材の軸方向ヤング率 $E_z=7.3\text{GPa}$ を基に、軸直角方向ヤング率 $E_x=E_y=E_z/25=0.29\text{GPa}$ 、せん断弾性係数 $G_{xy}=G_{yz}=G_{zx}=E_z/15=0.49\text{GPa}$ とし、ポアソン比は $\nu_{xy}=\nu_{xz}=\nu_{yz}=\nu_{yx}=0.016$ 、 $\nu_{zx}=\nu_{zy}=0.4$ とする²⁾。各供試体の軸方向ヤング率は実際には異なるが、 7.3GPa の $\pm 3\%$ 程度の範囲に収まるので、各タイプの比較を容易にする意味で

もヤング率を 7.3GPa に統一した。鋼板と集成材との間に充填された接着剤は特に考慮せず、その部分は集成材要素とした。降伏判定は、集成材の圧縮部は完全弾塑性体、引張部は線形弾性体とし、比例限度を 30MPa とした。鋼材の降伏点はミルシートより、6mm の鋼板(上鋼板)で 323MPa、3mm の鋼板(下鋼板)では、317MPa を用いた。

3.2 異等級の考慮

本研究では実験で異等級集成材を用いているが、FEM 解析においてはそのことを考慮していない。その理由を以下に 2 つ示す。

1. 文献¹⁾²⁾において、実際の実験から得られる各供試体の軸方向ヤング率、比例限度だけを用いる簡易手法を提案し解析を行ったが、一定のレベルでの解析が可能であることが示すことができた。
2. せん断の解析で最も影響してくるであろうせん断弾性係数の値を変化させ、強度の違いがどれほど影響してくるか文献²⁾のモデルで追加解析を行った。外層と内層の軸方向ヤング率比が 2/3 であると想定し、せん断弾性係数のみを $G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = E_z/15$ から $G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = E_z/10$ に変更し解析を行ったが、弾性域においても塑性域においてもその誤差は 1% 未満であった。

4. 実験結果

4.1 FEM 解析値

実験に先駆けて性能予測を行った結果¹⁾⁶⁾、図-7 の青色で示す要素においてせん断応力 τ_z の集中が見られた。その値は、梁理論においてせん断応力が最大となるとされる中立軸上の値よりも、各タイプの上部鋼板ならびに Type-A の下鋼板と隣接する集成材要素で 1.8 倍、Type-B、Type-C の下鋼板と隣接する集成材要素で 1.4 倍前後の高い値を示す。また、Type-B、Type-C においては、黄色で示す要素において、青色程ではないが、1.1~1.2 倍ほどの高い値を示すことから、左右の下鋼板の間で高い応力集中が広範囲にわたって存在している。この応力集中が FEM 特有の挙動であるのか、実際の実験でも生じ得るものなのかどうかはこの時点では分からなかったが、仮に後者であるとすれば、2 種類の破壊モードが考えられ、も

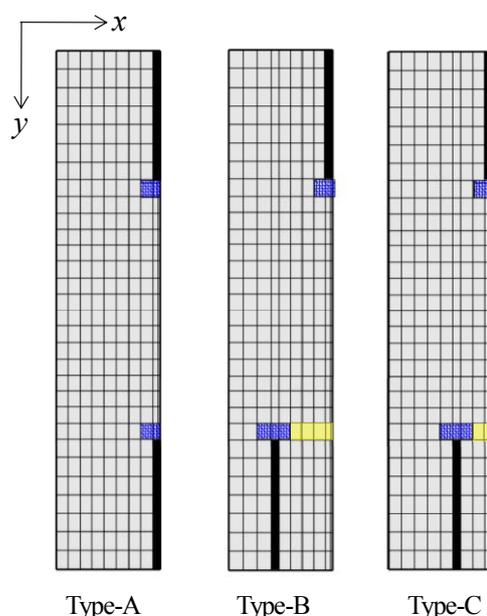


図-7 図心のせん断応力 τ_z よりも大きい値を持つ集成材要素の分布

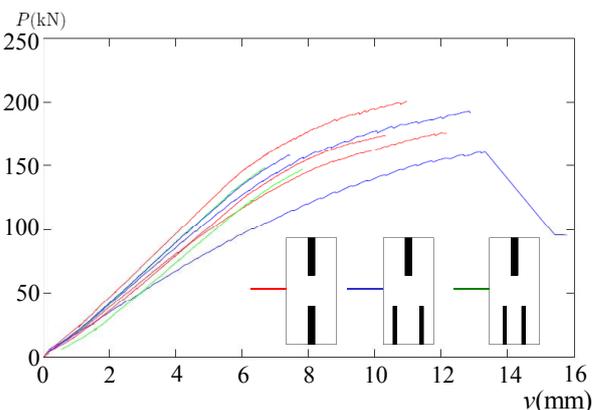


図-8 各供試体の荷重-たわみ曲線

し、応力集中の値の大きさがより破壊にクリティカルに作用するならば、Type-A においては鋼板と隣接する上下の集成材部のいずれかで、Type-B、C においては上部鋼板下端と隣接する集成材部で破壊し、その時の破壊荷重はいずれのタイプもほぼ同じになると考えられる。高い応力集中箇所が広範囲に分布していることがより破壊にクリティカルに作用するのであれば、応力の分布範囲の広さによって、Type-B、Type-C、Type-A の順に破壊すると考えられる。

4.2 せん断破壊性状

曲げモーメントが最大となる左載荷点における荷重-たわみ曲線を図-8 に示す。破壊後の挙動はいずれの供試

体もほぼ同じなので、Type-B の 1 本のみ破壊後の挙動も示す。この 1 本のみ他の供試体と弾性域における傾きが極端に異なるが、傾きより軸方向ヤング率を計算すると、鋼板のみの軸方向ヤング率とほぼ同じになることから、単純にたわみ計の設置ミスと考えられる。Type-C の 1 本においては、荷点に置いた鋼板の設置ミスで、鋼板が傾きながら集成材にめり込んでしまったために、局所座屈が生じたのでデータから除外している。

すべての供試体は梁理論においてせん断応力が最大となるとされる中立軸上ではなく、FEM 解析でせん断応力が最も大きくなると予想された各タイプの上部鋼板下端付近の集成材部、Type-A の下鋼板上端付近の集成材部でせん断破壊を生じた。各タイプより 1 本ずつ選んで、曲げモーメントが 0 となる梁中央を中心として 30cm 長さで供試体を切断したものを図-9～11 に、座屈した Type-C1 本を除くすべての供試体の破壊形状を図-12～19 に示す。図-9～11 を見ると、図-7 の応力集中箇所で破壊を生じていることがよく分かる。また、破壊箇所はあくまで集成材部であり、鋼板と集成材の接着層や集成材ラミナの接着層では破壊していなかった。これは図-12～19 を見ても明らかである。図-12 (Type-A) を見ると、この供試体のみ下部鋼板上端部付近の集成材部で破壊している。FEM 解析において、Type-A のみ上下対称であるため、上下いずれでも壊れ得ると予想したが、このことも FEM 解析で見られた応力集中が、実際の供試体でも生じていたということを示していると言えるだろう。

このように、FEM 解析結果と実験結果が一致するにもかかわらず、耐荷力に関しては FEM 解析と実験は一致していない。FEM 解析においては、上部鋼板付近で破壊する場合には各タイプとも耐荷力には差が生じないと予測されたが、図-8 に示すように、実験においては、各タイプによって耐荷力に差が生じた。この差がどうして生じたかを含め、次章では xy 断面に生じるせん断応力の分布を各タイプを比較しつつ考察していく。また、ロゼットゲージから得られた値についても、FEM 解析と比較検討していく。



図-9 梁中央における Type-A のせん断破壊 (xy 断面)



図-10 梁中央における Type-B のせん断破壊 (xy 断面)



図-11 梁中央における Type-C のせん断破壊 (xy 断面)

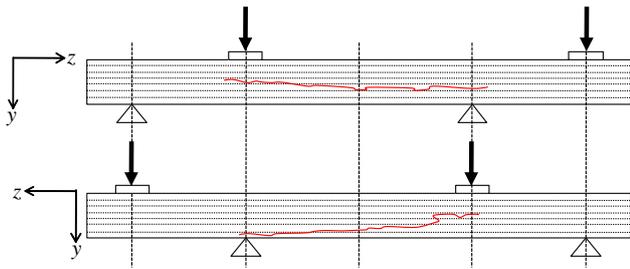


図-12 軸方向におけるせん断破壊 (Type-A-1, yz 面)

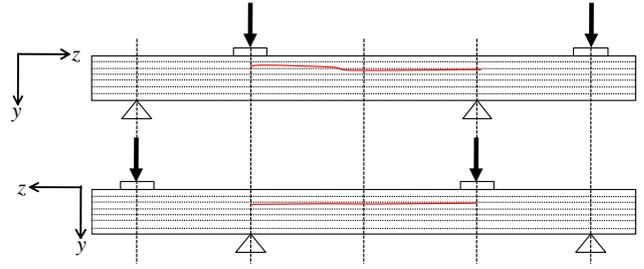


図-16 軸方向におけるせん断破壊 (Type-B-2, yz 面)

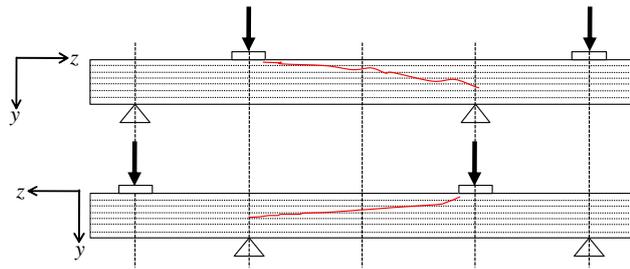


図-13 軸方向におけるせん断破壊 (Type-A-2, yz 面)

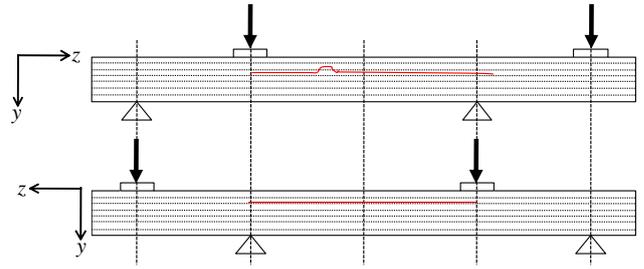


図-17 軸方向におけるせん断破壊 (Type-B-3, yz 面)

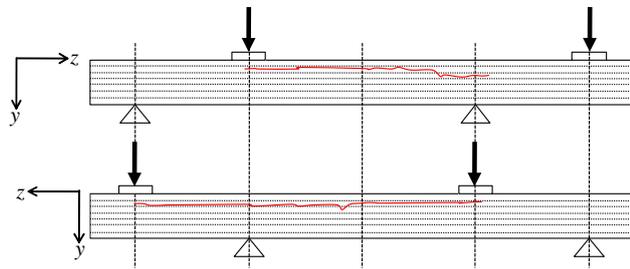


図-14 軸方向におけるせん断破壊 (Type-A-3, yz 面)

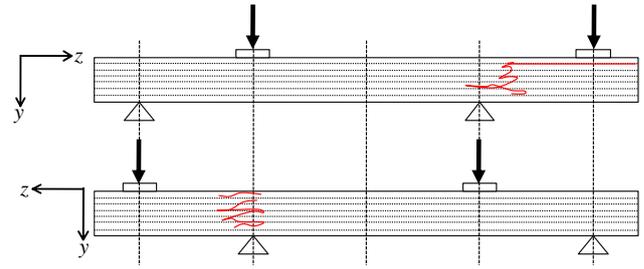


図-18 軸方向におけるせん断破壊 (Type-C-1, yz 面)

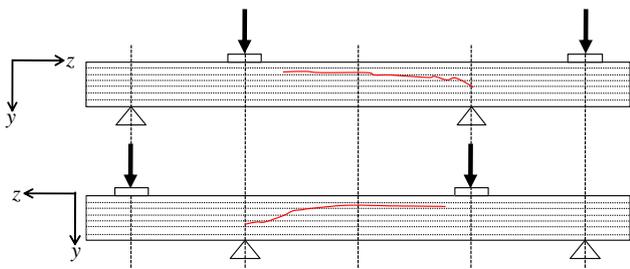


図-15 軸方向におけるせん断破壊 (Type-B-1, yz 面)

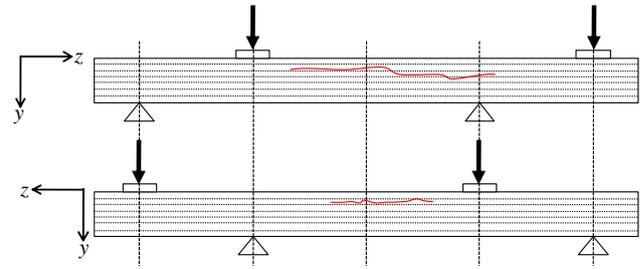


図-19 軸方向におけるせん断破壊 (Type-C-2, yz 面)

5. FEM 解析結果

5.1 各タイプの xy 断面における応力分布

5.1.1 応力集中箇所の分布

3. でモデル化した手法で弾塑性解析を行い、xy 断面におけるせん断応力 τ_{yz} の分布を、CalculiX に付属しているグラフィックツール CalculiX GraphiX (cgx) で可視化し、鋼板の挿入条件の違いによる影響を比較、検討する。尚、図-13～19 に示すように、ほとんどの供試体は梁中央でせん断破壊しているが、cgx の配色の関係で見づらくなっているため、左支点と左載荷点の間の xy 断面を用いる。この断面におけるせん断応力 τ_{yz} の分布を図-20～22 に示す。各供試体の荷重は同一のものではなく、それぞれの破壊荷重、Type-A=175.75kN、Type-B=158.25kN、Type-C=148.25kN を載荷して解析したものである。図-20～22 を見ると、いずれの供試体においても上鋼板下端、下鋼板上端に隣接する集成材部に応力集中が見られる。図-7 においては、下鋼板上端付近で応力集中の範囲が広いことが示されているが、図-20～22 においては、上鋼板下端付近では値自体が大きいだけでなく、応力集中の範囲が下鋼板付近よりも広いことが示されている。図-7 は以前の解析手法によるものであるが¹⁹⁾、その手法を修正した 3. の解析手法を用いることにより、応力の値、分布範囲が実験における破壊箇所とともに一致し、精度が上昇したことが示唆される。上鋼板下端の応力集中範囲で各タイプを比較すると、荷重が低いにもかかわらず、Type-B (図-21) の方が、Type-A (図-20) よりも応力集中範囲が広いことが見て取れる。実際の実験においては、Type-B の耐荷力の平均値と Type-A の平均値では、Type-B の方が 10kN ほど低い値を示すことから、応力集中の範囲が破壊にクリティカルだったことが示唆される。Type-B (図-21) と Type-C (図-22) を比較すると、耐荷力が低い Type-C の方が範囲が狭いが、同一荷重レベルでは若干であるが Type-B の方が狭いので、荷重レベルの差によるものであろう。これを踏まえ図-9～11 をもう一度見てみると、応力集中箇所に年輪が位置しており、これに沿って破壊していることが見て取れる。つまり、木材のように節や年輪といった局所的に脆弱性を持つ材料の場合、応力集中

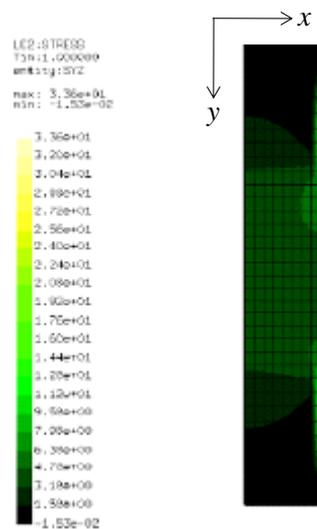


図-20 左支点と左載荷点の間の xy 断面に働くせん断応力 τ_{yz} (Type-A, 175.75kN)

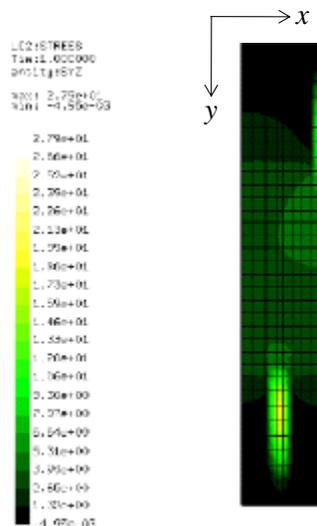


図-21 左支点と左載荷点の間の xy 断面に働くせん断応力 τ_{yz} (Type-B, 158.25kN)

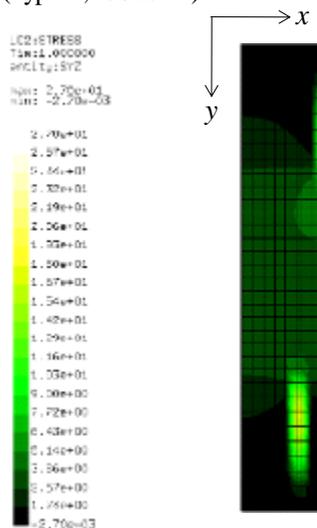


図-22 左支点と左載荷点の間の xy 断面に働くせん断応力 τ_{yz} (Type-C, 148.25kN)

が局所的であっても、その箇所に脆弱な部分が存在すれば、梁全体の破壊につながり得ることを示唆している。年輪に関して言えば、例えば LVL を用いるなどして、応力集中が生じ得ると予測される個所のラミナのみ、年輪が縦 (x) 方向に向くようにカットしたものを用いれば、応力集中による破壊を防ぐことができると考えられる。

5.1.2 x, y 方向の応力分布

局所的な応力集中以外に目を向けてみると、すべての供試体で上下の鋼板に挟まれた集成材の部分（鋼板が挿入されていない部分）に、大きな値の応力分布が見られる。この分布は x 方向に一樣に推移しているため、図心のせん断応力と、その x 軸上の外縁部のせん断応力に差がない事が分かる。FEM 解析のせん断応力は図心の値を用い、ロゼットゲージから得られた値と比較したが¹⁾、その値が多く箇所で一致したことでそのことが裏付けられる。また、次式から得られる²⁾ y 方向の応力分布ともほぼ一致する。

$$\tau = \frac{V}{b_{(y)} I_n} Q(y) \quad (1)$$

$$I_n = \frac{E_w I_w + E_s I_s}{E_w} \quad (2)$$

ここに V はせん断力、 $b_{(y)}$ は高さ y における桁幅、 I_n は(2)式から得られる木換算断面二次モーメントで $E_w I_w$ は集成材の曲げ剛性、 $E_s I_s$ は鋼材の曲げ剛性であり、 $Q(y)$ は断面一次関数である。高さ方向のせん断応力の分布は、鋼板挿入部分、集成材のみの部分に場合分けし、高さ方向に積分して求めた。

図-23 に示すように、梁理論では鋼板が入っていない箇所から鋼板が入っている箇所へとただらかに推移し、その値から桁の上下端の 0MPa にかけて線形で推移する。一方、FEM 解析においては、鋼板の入っていない箇所のせん断応力の分布はほぼ一致するにもかかわらず、鋼板の入っている部分の応力は入っていない箇所の応力と比べ極端に小さい。また、その境目は連続しておらず、2つの明確に異なる応力分布が存在していることが示唆される。これは鋼板の横に位置している集成材部材の変位が、想像以上に鋼板によって拘束されているからかもしれない。

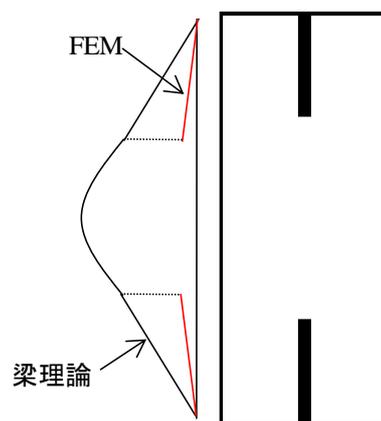


図-23 梁理論と FEM の y 方向のせん断応力の分布

れない。そう考えると、上鋼板付近の集成材部に応力が集中する理由は、最もひずみが小さい位置と、最もひずみが大きい位置が重なり、その部分の集成材部に非常に大きいひずみを生じさせるためではないだろうか。

Type-B, Type-C においては、下の鋼板の間隔を変化させることで鋼板と鋼板の間の集成材のせん断応力、または鋼板の外側の集成材のせん断応力に変化が生じるのではないかと予想し設計を行ったが、FEM 解析においては、そのどちらにも特別な差は見られない。むしろ上下の鋼板に挟まれた領域でせん断応力が大きく、それ以外の部分では極端にせん断応力が低くなっていることから、鋼板の挿入条件は、桁幅方向 (x 方向) に対してではなく、桁高方向 (y 方向) に極端に影響する可能性が示唆される。このことについては、同じ断面二次モーメントを持つように、鋼板を太く短いもの、もしくは細く長いものに変更した供試体で実験・FEM 解析を行い、本論文の結果と比較検討することが今後の課題となろう。しかし、現時点では、供試体の作成の容易さ、耐荷力が最も高いということから、せん断性能に対しては、Type-A が最も優れていると言える。

5.2 応力が集中する部材の考慮

本節では前節の FEM 解析値と、上・下鋼板の下・上端に隣接した集成材要素を y 方向に 1 つ分抜いて解析を行った FEM 解析値とを比較、検討する。抜いた要素を図-24 に示す。赤い部分が抜いた要素を示すが、実際には集成材のヤング率の 10^6 ほどの柔らかい材料を挿入して解析

を行っている。これは、鋼板と隣接した集成材部の応力集中が破壊にクリティカルに働くならば、隣接部に設けない、つまり空洞を作るか、多めにスリットを作り、その部分に緩衝材として接着剤などを数 mm 充填し、その上に鋼板を接着する方法を想定したものである。Type-A, Type-B, Type-C の左支点と左载荷点の間の xy 断面におけるせん断応力 τ_{yz} の分布を、前節の解析値と集成材要素を抜いた解析値とで並べたものを図-25~27 に示す。すべての供試体において、高い値を示していた集成材要素を抜いた影響で、明らかに左右の供試体の応力分布に差が生じている。高い応力を示す要素が無くなった分、各図の右側の集成材要素を抜いた供試体の方が、上下鋼板の端部付近から中立軸上の縁部付近にかけて応力が大きい部分が分散している。また、集成材部における最も大きいせん断応力の箇所が中立軸上に移っており、その値も梁理論から得られる値と近い値となる。実際の実験においては、各供試体でばらつきは大きいにせよ、予想と極端に異なる荷重レベルでの破壊や、中立軸以外での破壊は避けることができそうである。

各タイプの右側の図のみで比較すると、各タイプによって応力の分布に差は見られるが、破壊にクリティカルに働くような局所的に大きな応力の分布もなく、中立軸上で最大値を取ることも共通しており、やはり鋼板の挿入条件は y 方向に敏感で、 x 方向には鈍感であり、本研究で用いた下部鋼板の挿入条件の差は、せん断破壊にあま

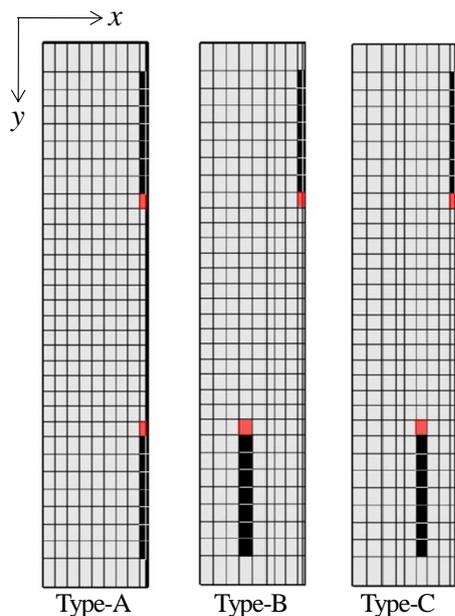


図-24 鋼板と隣接する y 方向の要素を抜いたモデル

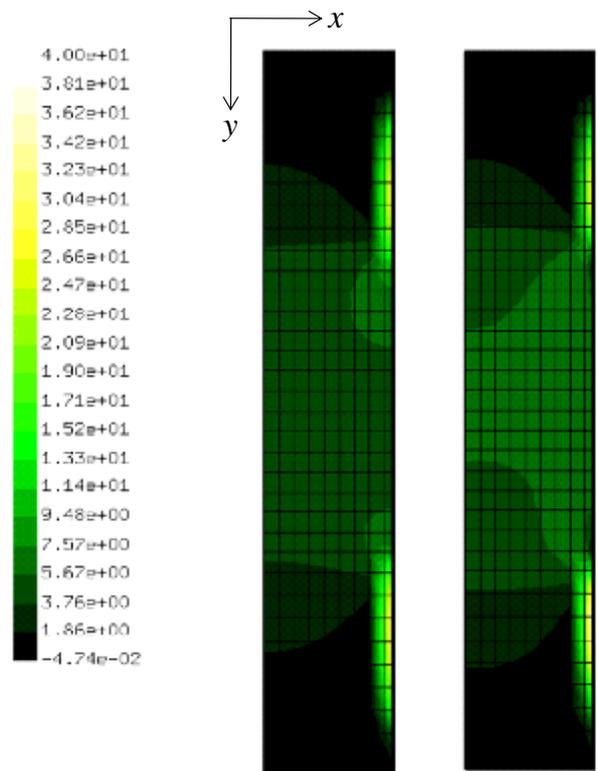


図-25 Type-A の左支点と左载荷点の間の xy 断面に生じるせん断応力 τ_{yz} (左要素有り, 右要素なし)

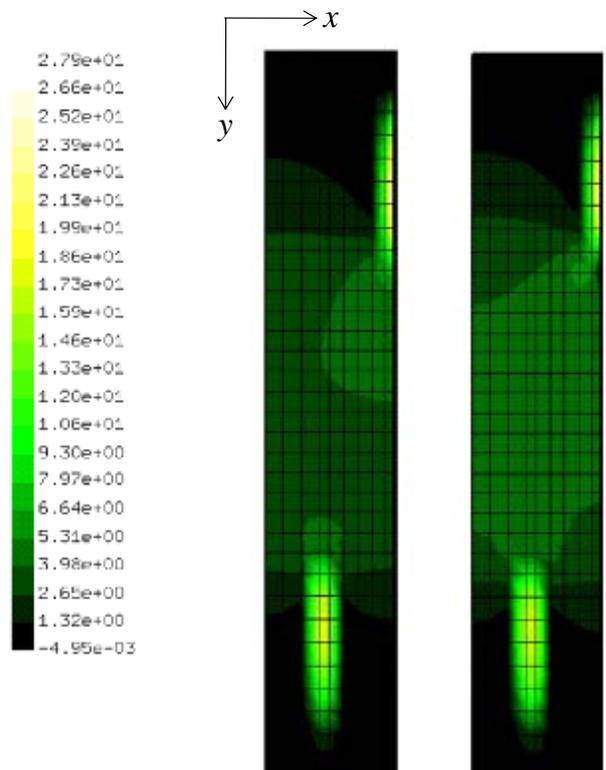


図-26 Type-B の左支点と左载荷点の間の xy 断面に生じるせん断応力 τ_{yz} (左要素有り, 右要素なし)

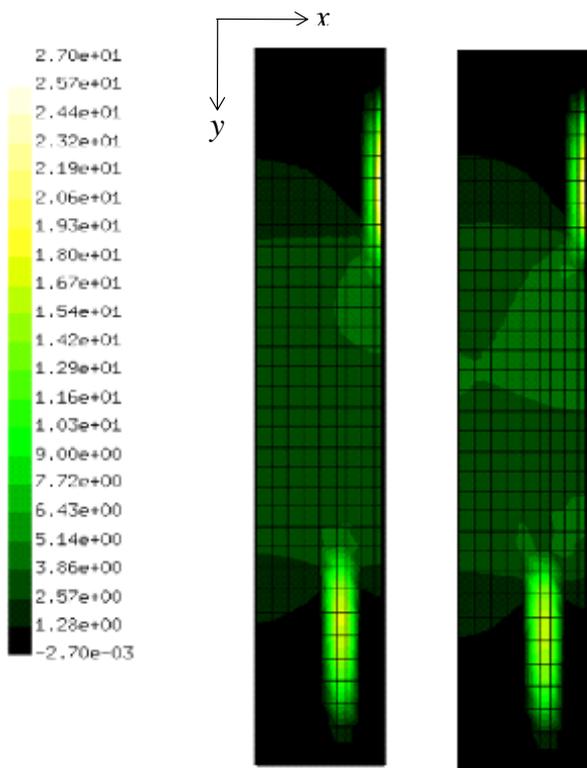


図-27 Type-C の左支点と左载荷点の間の xy 断面に生じるせん断応力 τ_{yz} (左要素有り, 右要素なし)

り差を生じさせないことが示唆される。本節の解析においては、材料定数を極端に低いものを用いており、鋼板の隣接部に空洞を作るモデルをシミュレートしていると言えるが、本構造の木橋等への適用を考えた場合には、このような空洞は集成材の腐朽を生じさせる原因となり得る。よって、緩衝材として接着剤などを充填させ、鋼板上下端が集成材と直接隣接しないモデルが有効であろう。また、木橋の構造では、主桁に床版を合成することを想定しているため、中立軸が上方に移動することを利用して、中立軸が上鋼板の位置にくるように設計すれば、よりせん断に有効となるだろう。

5.3 z 軸方向の応力分布

本節では、図4に示したように、z 軸方向に一系列にロゼットゲージを貼った供試体について、実験値と FEM 解析値とを比較する。図-28 に実験値と FEM 解析値を示す。载荷点と支点到敷いた鋼板を考慮しない FEM 解析においては⁹⁾、左载荷点上で、正のせん断応力と負のせん断応力が垂直に入れ替わっていたが、図-26 ではなだらかに

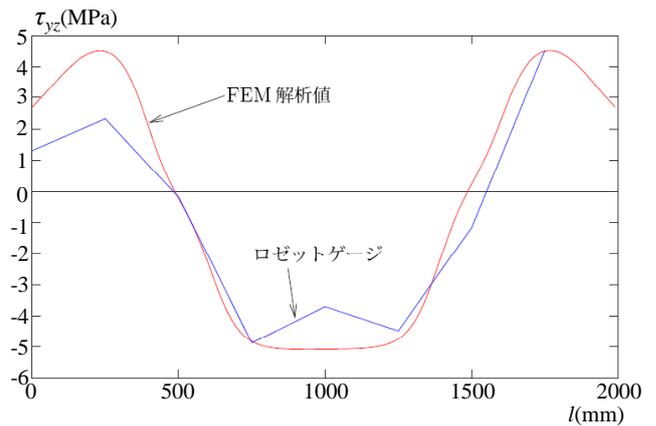


図-28 ロゼットゲージから得られるせん断応力 τ_{yz} と FEM 解析から得られるせん断応力 τ_{yz} の分布

変化している。支点と载荷点に敷いた鋼板を考慮したことはもちろんだが、拘束する箇所を供試体モデル本体ではなく敷いた鋼板に設けたため、節点拘束の影響が少なくなり、より実際の供試体の挙動に近付いたといえる。図-28 に示したロゼットゲージを添付した供試体の破壊モードは図-14 であるが、実験値と解析値がよく一致している。また、FEM 解析値では、正のせん断応力の最大値よりも、負のせん断応力の最大値の方が大きな値を示すが、この点についても FEM 解析は実験値の挙動を追えている。しかし、梁中央のせん断応力と左支点と左载荷点の間のせん断応力に関しては、大きな開きが生じている。支間中央のせん断応力に関しても、実験値と解析値とでは大きな差が生じているが、他の供試体においても同様の挙動が見られたので、実際に支間中央ではせん断応力が小さいのかもしれない。詳細な解析のためには、試験体数を増やし、ロゼットゲージを両面にはるなどが必要と考える。この点を除けば、軸方向のせん断応力分布においても、一定の精度でせん断応力の分布をモデル化できていると思われる。

6. まとめ

- ・実験で破壊した箇所のデータをまとめ、FEM 解析手法を改良し、 xy 断面における応力分布を比較検討したところ、各タイプで応力分布に差が見られるようになった。
- ・せん断応力の集中箇所の大きさ、分布範囲が、実験に

おける破壊箇所，耐荷力の順番と一致する結果が得られ，応力集中が実際に生じ，そのことがせん断破壊にクリティカルであったことが示された。

・FEM 解析においては，y 方向のせん断応力の分布が，鋼板のある位置，無い位置によって極端に変化している様子が見られた。これは鋼板によって集成材の変形が想像以上に拘束されるためと考えられるが，応力集中箇所は最も変形の小さな箇所と大きな箇所の境目にあり，その部分の集成材部に非常に大きいひずみを生じさせるものと考えられた。

・応力集中が生じる集成材部の要素を 1 つ分だけ取り除いて解析を行ったところ，応力集中箇所が無くなり，梁理論でもっともせん断応力が大きくなるとされる中立軸上で最大値を取るようになった。実構造物への応用としては，実際に鋼板との境目部分の集成材部材を取り除いて空洞にするという方法も考えられるが，腐朽などのことを考えると，この部分にヤング率の低い接着剤などを充填させる方法が望ましいだろう。

・軸方向のせん断応力の分布についても実験と FEM 解析を比較したが，実験値と FEM 解析値がよく一致した。

以上のことから，鋼板集成材梁のせん断性能を FEM 解析で精度良く評価できることが確認された。鋼板挿入集成材梁においては，せん断破壊に対しては中立軸上のせん断応力を基に設計が行われてきたが，本論文においては鋼 - 集成材界面付近の集成材部により大きいせん断応力が生じ得ることが確認され，今後，より慎重な設計が必要となることが示唆された。

謝辞

本研究は「文部科学省都市エリア産学官連携促進事業（米代川流域エリア H18～H20）」の補助の下に行われた。

参考文献

- 1) 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，Vol54A(CD-ROM)，2008.
- 2) 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，Vol53A(CD-ROM)，2007.
- 3) 薄木征三，後藤文彦，キッシュ ラヲシュ：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) 佐々木貴信，薄木征三，寺田寿：鋼・集成材ハイブリッド木橋の載荷実験とモニタリング，第 1 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp.11-14，2001
- 5) 薄木征三，篠原義則，千田知弘，後藤文彦：ハイブリッド木桁橋の支点近傍の桁幅の必要性について，第 6 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集(要旨審査部門)，pp. 35-42，2007.
- 6) CHIDA Tomohiro, GOTOU Humihiko, USUKI Seizo, TOYODA Atusi, SASAKI Takanobu : Elasto-plastic shear behavior of steel-inserted glulam-beams, International Conference on 9th STEEL, SPACE & COMPOSITE STRUCTURES, 2007.
- 7) <http://www.calculix.de/>
- 8) <http://www.str.ce.akita-u.ac.jp/~chida/calculix.html>

(2008 年 9 月 18 日受付)