

鋼板挿入集成材梁のせん断性能

Shear performance of steel-plate-inserted glulam beams

大黒屋 信英*・後藤 文彦**・佐々木 貴信***・長谷部 薫****

Daikokuya Masahide, Gotou Humihiko, Sasaki Takanobu, Hasebe Kaoru

*秋田大学大学院，工学資源学研究科土木環境工学専攻（〒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）

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

****工博 秋田大学教授，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）

Shear stiffness of glulam beams is very small compared with its bending stiffness. While hybridization of glulam beams with inserted steel plates improves the bending stiffness, it does not so improve the shear stiffness. As a result, ratio of shear deformation to bending deformation is greater in the steel-plate-inserted glulam beams than even in glulam-only beams. Since wood members, whose toughness is very small compared with those of steel members, have tendency to drastically lose strength after fracture, it is important to investigate fracture modes and toughness of wood-steel hybrid beams like steel-plate-inserted glulam beams. The fracture modes and toughness depend on ratio of Young's modulus of wood parts to steel parts and on ratio of shear strength to bending strength. In this study we perform three-point bending tests to experimentally estimate the shear elasticity and perform asymmetric four-point-bending tests to consider shear performance and toughness of the steel-plate-inserted glulam beams for both cedar and larch.

Key Words : *steel-plate-inserted glulam beams, shear elasticity, CalculiX*

キーワード：鋼板挿入集成材梁，せん断弾性，CalculiX

1. まえがき

近年，環境や自然景観への配慮などから木材の有効利用として木橋が見直されてきており，構造用集成材を鋼板で補強したハイブリッド型の車道橋も架設されている．集成材は曲げ面内のせん断変形に対するせん断弾性係数が軸方向ヤング率の $1/12 \sim 1/20$ と非常に小さい¹⁾が，それでも集成材部材のみで用いられる際には，それほどせん断性能が問題になることはない．一方，集成材に鋼板などを挿入して曲げ剛性を高めた鋼板挿入集成材などのハイブリッド梁では，曲げ剛性は大きく改善されるもののせん断剛性はあまり改善されないため，集成材のみの梁よりもたわみに占めるせん断たわみの比率が大きくなってしまふ^{2),3)}．つまり，曲げについて補強されたハイブリッド梁では，曲げ剛性や曲げ強度が高くなるため，せん断破壊が生じやすくなる場合がある．木材は鋼材などに比べて非常にじん性が低く，破壊後に急激に強度を失う傾向があるため，このようなハイブリッド梁では破壊モードと破壊後のじん性について調査しておくことが重要である．ハイブリッド梁の破壊が曲げに支配されるか，せん断に支配されるか，また，破壊後にじん

性を発揮するかどうかは，集成材と鋼材とのヤング率の比率や集成材のせん断強度と曲げ強度の比率が関係してくると思われる．

そこで，本研究では，樹種の違いが鋼板挿入集成材梁のせん断性能に与える影響を調べるため，スギ，カラマツの二種類の集成材を用いた鋼板挿入梁の試験体を製作し，3点曲げ試験により鋼板挿入によるせん断剛性の変化を測定したのち，逆対称4点曲げ試験^{4),5)}により破壊試験を行い，それぞれの樹種を用いた場合のせん断破壊性能やじん性の違い，鋼板の挿入深さと破壊モードの関係などについて考察する．

2. 鋼板挿入深さとせん断剛性

まず，図-1のような鋼板挿入集成材梁において，挿入した鋼板の深さが，せん断剛性に与える影響を調べるために，鋼板の挿入深さを変化させた梁に対して，有限要素解析によるたわみと各種梁理論の式によるたわみとを比較してみる．解析ツールには GPL ライセンスの3次元有限要素解析ツール CalculiX⁶⁾の8節点アイソパラメトリック要素を用いて，対称条件から単純梁の $\frac{1}{4}$ と

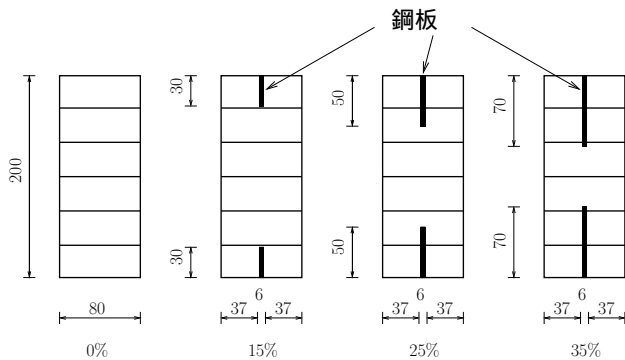


図-1 実験モデル

見なせる片持ち梁を解析モデルとし、図-2 のように幅方向に x 軸、桁高方向に y 軸、軸長方向に z 軸をとる。また、幅：80mm、桁高：200mm、軸長：3m とする。要素分割は、6(幅方向) $\times$ 30(桁高方向) $\times$ 120(軸方向) とし、そのうち鋼板部分の幅方向は 2 要素、桁高方向は鋼板の挿入深さに比例させた配分で要素を割り当てる。荷重載荷方法は、文献^{7),8)} に倣って、載荷部断面の各節点に分散させて載荷する。

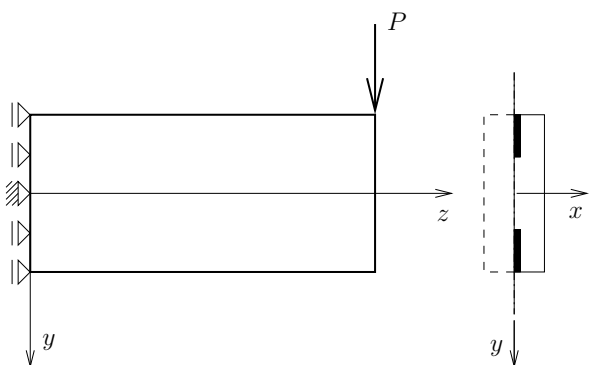


図-2 有限要素解析モデル

さて、せん断変形を考慮したティモシェンコ梁の式による片持ち梁先端のたわみは次式で表される⁹⁾。

$$v = \frac{P\ell^3}{3EI} + \frac{P\ell}{kGA} \quad (1)$$

ここに、 E はヤング率、 I は断面 2 次モーメント、 P は荷重、 ℓ は梁の軸長、 G はせん断弾性係数、 A は断面積、 k はせん断補正係数である。以後、鋼板挿入集成材梁の集成材部分と鋼板部分の諸元を表す際に、それぞれ添字 w と s を用いて $E_w I_w$ や $E_s I_s$ のように表記する。式 (1) の曲げ剛性に $E_w I_w + E_s I_s$ を用い、せん断剛性に集成材のみの梁とみなした $G_w A$ を用いたティモシェンコ梁の式のたわみを前述の有限要素解析のたわみに対する相対差として図-3 に示す。式 (1) のせん断たわみの

項を無視した初等梁の式は次式で表される。

$$v = \frac{P\ell^3}{3(E_w I_w + E_s I_s)} \quad (2)$$

式 (2) によるたわみも同様に、相対差として図-3 に示す。ちなみに、平均せん断剛性 $G_w A_w + G_s A_s$ を用いたティモシェンコ梁のたわみは、むしろこの初等梁のたわみに近くなる¹²⁾。なお、せん断補正係数は等方性材料の長方形断面に対する値 $\frac{5}{6}$ を用いた。ここで、鋼板深さ 0% とは集成材のみの状態、50% とは鋼板が上縁から下縁まで突き抜けた状態である。鋼板の挿入状態が立体的要素として考慮されている FEM 解を正解に近いと考えるなら、初等梁の式と FEM 解との差異は、せん断たわみの大きさに相当していると考えられる。よって、相対差の絶対値が 35% 程度で最大となる鋼板深さ 25% 付近で最もせん断変形が大きくなることがわかる。これ以上の鋼板深さになると、中立軸付近の集成材のみの領域が少なくなっていく、せん断変形量は小さくなっていくものと思われる。一方、ティモシェンコ梁の式は、鋼板深さ 0% ~ 35% では、FEM 解との相対差が $\pm 5\%$ 程度以内におさまっており、鋼板部を無視したせん断剛性を用いているものの、鋼板挿入集成材梁のたわみの式として十分な近似になっている。

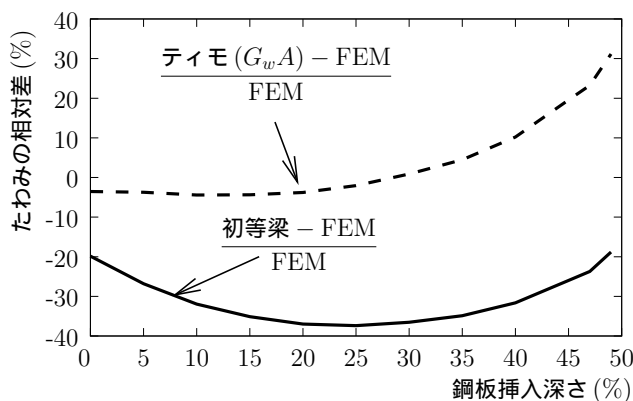


図-3 各梁理論との相対差

3. 実験モデル

実験モデルは、図-1 に示すように集成材梁の上下縁に溝を彫って鋼板 (SS400, $E_s=206\text{GPa}$) を鉛直に挿入し、樹脂系接着材 (ペンギンセメント #1031) で接着して製作する。前章の FEM 解析による試算では、鋼板深さ 25% 付近で最もせん断変形が大きくなることが示されたので、その前後の深さのものを加えて、鋼板深さは、0%、15%、25%、35% の 4 種類とする。主に鋼板深さの影響について調べる目的でスギ集成材のものを各挿入深さについて 2 本ずつ、主に樹種の違いによる影響

表-1 鋼板深さと各剛性の関係 (スギ材)

試験体	鋼板深さ [%]	$E_w I_w$ [kNm ²]	$E_w I_w + E_s I_s$ [kNm ²]	合成 EI [kNm ²]	kG_w [GPa]	合成 kG [GPa]
1	0	419	419	419	0.38	0.38
2	0	386	386	386	0.47	0.47
3	15	374	897	868	0.33	0.43
4	15	392	914	786	0.30	0.63
5	25	344	1042	975	0.45	0.53
6	25	410	1104	977	0.37	0.62
7	35	433	1203	1154	0.33	0.59
8	35	440	1210	1297	0.31	0.45

表-2 鋼板深さと各剛性の関係 (カラマツ材)

試験体	鋼板深さ [%]	$E_w I_w$ [kNm ²]	$E_w I_w + E_s I_s$ [kNm ²]	合成 EI [kNm ²]	kG_w [GPa]	合成 kG [GPa]
1	0	906	906	906	0.42	0.42
2	0	894	894	894	0.37	0.37
3	15	822	1322	1228	0.44	0.55
4	25	938	1597	1362	0.47	0.63
5	25	941	1601	1518	0.43	0.53
6	35	819	1561	1766	0.56	0.50

について調べる目的でカラマツ集成材のものを、0% と 25% が 2 本ずつ、15% と 35% を 1 本ずつ作製する。次章のせん断弾性の測定のための 3 点曲げ試験においては、1 本の試験体について支持スパンを 1.4~2.2m に変えながら測定する。

4. せん断弾性の測定

前章の実験モデルの鋼板挿入集成材梁に対して 3 点曲げ試験を行い、せん断弾性を測定する。載荷方法は単純支持梁の中央 1 点載荷による 3 点曲げとする。曲げ試験で得られた荷重とたわみを初等梁の式に代入して $E_b = \frac{P\ell^3}{48I}$ のように長方形断面の I を用いてヤング率を逆算すると、このヤング率にはせん断変形の影響が含まれているので、これは曲げヤング率 E_b と表記することにし、軸方向ヤング率 E_z とは区別して扱う。さて、この曲げヤング率 E_b を用いた初等梁の式のたわみと、軸方向ヤング率 E_z を用いたティモシェンコ梁の式 (1) のたわみとは同じと考えて等置して変形すると、次式が得られる^{10),11),12)}。

$$\frac{1}{E_b} = \frac{1}{E_z} + \frac{1}{kG} \left(\frac{h}{\ell} \right)^2 \quad (3)$$

つまり、試験体のスパンを変えながら $\frac{1}{E_b}$ と $\left(\frac{h}{\ell} \right)^2$ をプロットすれば、回帰直線の切片の逆数として軸方向ヤング率 E_z が得られ、回帰直線の傾きの逆数としてせん断

弾性 kG が得られる。せん断補正係数 k は、等方性材料の長方形断面では $\frac{5}{6}$ となるが、集成材は直交異方性材料であり、それに鋼板が挿入された合成断面では更に異方性が高くなるので、簡単には計算できない。合成断面としての断面 1 次関数を面積積分することで、せん断補正係数 k を算定する試み²⁾もあるが、ここでは、鋼板深さとせん断弾性の関係を調べることを主目的としているので、適当な k を仮定して与えることはせずに、せん断補正係 k を含めたせん断弾性 kG の値を推定し、 kG が鋼板深さによってどのように変化するかを考察する。さて、以上のような試験方法と算定方法により求めた試験体の曲げ剛性とせん断弾性を、スギ材について表-1 に、カラマツ材について表-2 に示す。表中の $E_w I_w$ と kG_w は鋼板挿入加工前の溝を彫っていない集成材のみの状態での測定値を表し、 $E_s I_s$ は鋼材 (SS400) のヤング率 $E_s = 206\text{GPa}$ と鋼材部分の断面 2 次モーメント I_s の積を表す。合成 EI は鋼板を挿入した試験体に 3 点曲げ試験を行い、式 (3) の線形関係から得られる E_z と長方形断面としての断面 2 次モーメント I との積である。合成 kG は鋼板を挿入した試験体に 3 点曲げ試験を行い、式 (3) の線形関係から得られる kG である。曲げ剛性に関しては、スギ材、カラマツ材両者とも、 $E_w I_w + E_s I_s$ と合成 EI は比較的近い値をとる。多少のばらつきはあるものの鋼板挿入による明らかな改善がみられ、鋼板深さが深いほど剛性も大きく改善されているのがわかる。

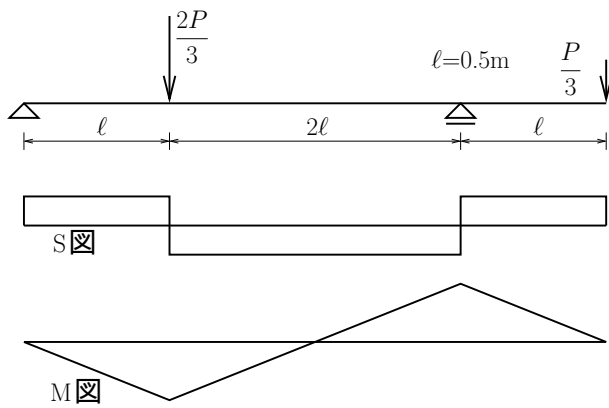


図-4 逆対称 4 点曲げ試験

スギ材を用いた試験体の曲げ剛性は、集成材のみの梁に対して最大で 3 倍程度まで増加しているが、カラマツ材を用いた試験体では、集成材のみの梁に対して 2 倍程度である。これは、カラマツ材の方がスギ材に対してヤング率が 2 倍程度大きく、鋼板のヤング率との比率がそのぶん小さくなるためである。一方、せん断弾性に関してはほとんどの試験体で集成材のみの状態よりも、鋼板を挿入した状態の方がやや大きくなっているが、中にはカラマツ試験体 No.6 など、鋼板を挿入した状態の方が小さくなっているものもある。また、せん断弾性の大きさと鋼板深さとの間には、はっきりとした相関は認められず、更には加工前の集成材のみの状態で測定したせん断弾性の大小との相関も特に認められない。もっとも、 kG を FEM から推定した場合³⁾は、鋼板深さが深くなるほど kG が大きくなる傾向がある。曲げ剛性に関しては、 $E_w I_w + E_s I_s$ と合成 EI がある程度近いことから、測定誤差によるばらつきはそれほど大きくはないと思われる。せん断弾性に関しては、集成材に鋼板挿入用の溝を彫ることで状態が変わったり、鋼板の接合具合のばらつきなどが、合成断面としてのせん断挙動に敏感に影響するということなのかも知れない。

5. 破壊試験

前章の 3 点曲げ試験では、鋼板挿入による集成材梁試験体のせん断剛性の改善効果が特にはっきりとは認められなかったが、この章では同じ試験体に対して破壊試験を行い、鋼板挿入の深さや樹種の違いが破壊モードや破壊じん性に与える影響について調べる。今回は特にせん断破壊性能について調べるため、載荷方法は、図-4 に示すように、梁中央部で曲げモーメントが 0 となりせん断が支配的になる逆対称四点曲げ試験法^{4),5)}による破壊を行う。図-4 のように曲げモーメントが最大となる $\frac{2P}{3}$ 載荷点部やその逆対称点となる右支点部付近の引張側で

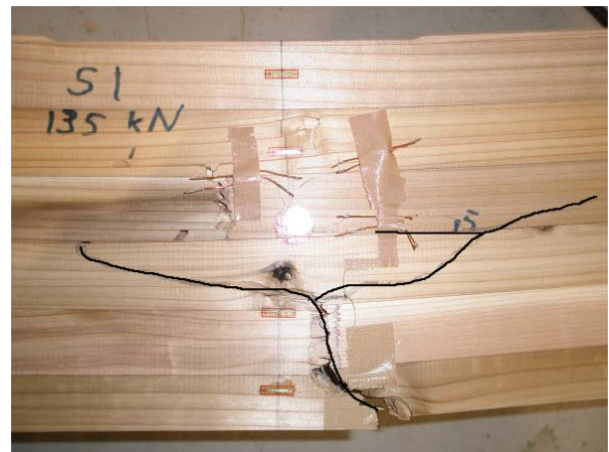


図-5 曲げ破壊状態 (スギ試験体 No.3)



図-6 せん断破壊状態 (スギ試験体 No.5)

図-5 のように桁高方向に裂けて破壊した場合には曲げ破壊と判断し、図-6 のように梁端部や中央部で、軸方向に裂けて (ずれて) 破壊した場合にはせん断破壊と判断する。荷重 P と $\frac{2P}{3}$ 載荷点のたわみの関係のスギ材を用いた試験体について図-7 に、カラマツ材を用いた試験体について 図-8 に示す。スギ材を用いた試験体、カラマツ材を用いた試験体ともに鋼板深さが深くなるにつれて、剛性が上がり初期接線の傾きが大きくなっている。スギ材を用いた試験体では、集成材のみの梁、鋼板深さが 15% の梁では、荷重ピーク時に曲げ破壊により破壊しているが、鋼板深さが 25% 以上になると、荷重ピーク時にせん断破壊により破壊している。鋼板が深くなるほど曲げ剛性は大きくなっているが、鋼板が深くなるほど破壊モードが曲げ破壊からせん断破壊に移行することもあり、破壊荷重自体は、必ずしも鋼板深さの深い方が大きくなる訳ではない。また、試験体の一部に破壊が生じると、一気に強度を失い、極めてじん性が低い。曲げによる破壊よりもせん断による破壊の方がじん性を失いやすいようだ。カラマツ材を用いた試験体は鋼板

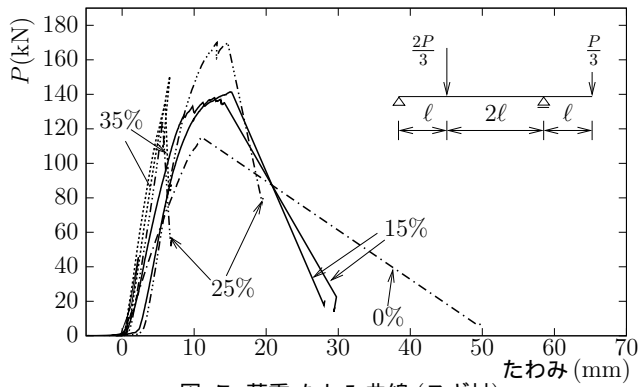


図-7 荷重-たわみ曲線 (スギ材)

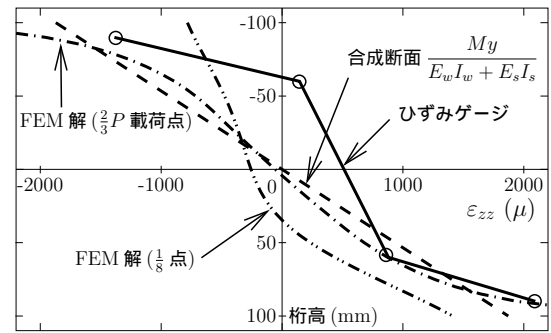


図-9 軸方向ひずみ分布 (スギ試験体 No.6)

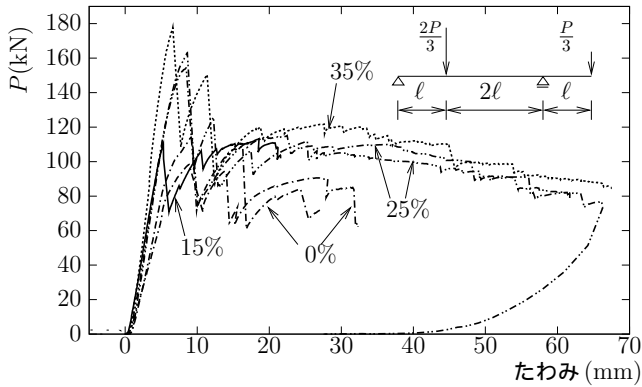


図-8 荷重-たわみ曲線 (カラマツ材)

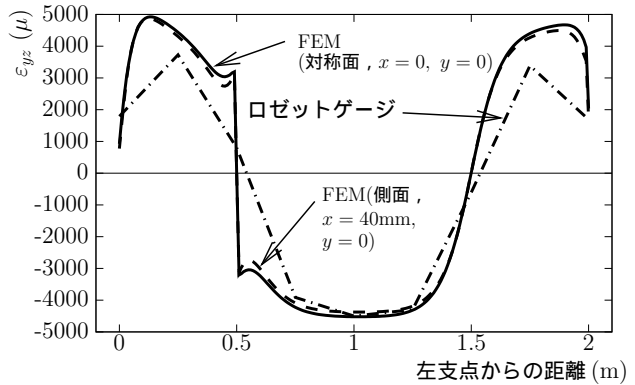


図-10 せん断ひずみ分布 (スギ試験体 No.6)

を挿入していない集成材のみの梁を含め、すべての場合でせん断破壊を起こしている。また、試験体の一部にせん断破壊が生じた後も強度を保ち、じん性を発揮しているのがわかる。鋼板を挿入しないカラマツ材のみの試験体でも、スギ材に比べるとかなりのじん性があることがわかるが、鋼板を挿入することで、更にじん性が向上している。なお、せん断ひび割れの発生箇所は、桁高方向には、中央付近のこともあれば縁付近のこともあり、軸長方向には、端部のこともあれば梁中央付近のこともあり、挿入鋼板と集成材の境界付近に集中している訳ではない。

単軸ゲージにより測定した $\frac{2P}{3}$ 荷重位置での代表的な軸ひずみ分布を 2 章の手法による FEM 解析の結果とともに図-9 に示す。いずれの試験体でも、縁部付近のひずみは合成断面としての三角形分布に近いが、縁部より少し中立軸側に離れた部分では合成断面としての三角形分布よりも小さくなっていて、中立軸から逆対称的な分布をしている。この傾向は FEM 解でも認められる。ただし FEM 解の場合、荷重部から離れた位置 ($\frac{1}{8}$ 点) での応力分布は図-9 のようにまた別の分布傾向を示す。

次に梁側面の中立軸部 9 箇所でのロゼットゲージにより測定した代表的なせん断ひずみ分布のグラフを 2 章の手法による FEM 解析の結果とともに図-10 に示す。ロゼットゲージによる測定値は、FEM 解析の結果と比

較的に近い分布をしている。

6. 破壊時の応力

前章のようなスギ材とカラマツ材の破壊モードの違いが曲げ強度とせん断強度から説明できるかどうかを確認するために、破壊時の最大縁応力、中立軸のせん断応力を試算してみる。最大縁応力は、次式で表される。

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{I_n} y \quad (4)$$

ここに、 M_{max} は破壊時の $\frac{2P}{3}$ 荷重点部の曲げモーメント $\frac{P_{max} \ell}{3}$ 、 y は中立軸から縁までの高さ 0.1m、 I_n は集成材に換算した断面二次モーメントで $I_n = \frac{E_w I_w + E_s I_s}{E_w}$ で与える。中立軸のせん断応力は、次式で表される⁹⁾。

$$\tau = -\frac{S(z)Q(y)}{b(y)I_n} \quad (5)$$

ここに、 $S(z)$ は断面のせん断力、 $Q(y)$ は断面一次関数である。 $b(y)$ は高さ y における断面の幅なので今回の長方形断面では、 $b(y) = b = 0.08\text{m}$ である。鋼板が挿入されている部分と集成材のみの部分に場合分けして高さ方向に積分する¹³⁾ ことで断面一次関数 $Q(y)$ を求めて整理すると、最終的には、次式が得られる。

$$\tau_{max} = -\frac{E_w S(z)}{b(E_w I_w + E_s I_s)} \left\{ \frac{b_n}{2} (y_w^2 - \frac{h^2}{4}) - \frac{b}{2} y_w^2 \right\} \quad (6)$$

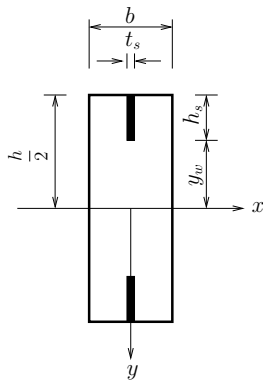


図-11 断面図

表-3 鋼板深さと各応力の関係 (スギ材)

No.	鋼板 [%]	E_w [GPa]	P_{max} [kN]	σ_{max} [MPa]	τ_{max} [MPa]
1	0	7.85	115	36.0	3.60
3	15	7.01	137	18.4	3.85
4	15	7.35	141	22.0	4.47
5	25	6.45	170	18.7	5.13
6	25	7.68	124	16.2	3.98
7	35	8.12	150	17.6	4.68
8	35	8.25	135	14.3	3.77

表-4 鋼板深さと各応力の関係 (カラマツ材)

No.	鋼板 [%]	E_w [GPa]	P_{max} [kN]	σ_{max} [MPa]	τ_{max} [MPa]
1	0	16.8	98	30.3	3.03
2	0	17.0	114	36.1	3.61
3	15	15.4	113	23.6	3.48
4	25	17.7	163	35.3	5.64
5	25	17.6	154	29.8	4.77
6	35	15.4	177	25.7	4.75

ここに、 b_n は集成材換算幅 $b_n = (b - t_s) + \frac{E_s}{E_w} t_s$ で、 y_w は中立軸から鋼板までの距離である (図-11)。以上の式にピーク荷重時の最大曲げモーメントとせん断力を代入して求めた最大縁応力 σ_{max} と最大せん断応力 τ_{max} を、スギ材とカラマツ材についてそれぞれ表-3、表-4 に示す。スギ材の曲げ破壊時の σ_{max} は 18.4~36.0MPa、せん断破壊時の τ_{max} は 3.77~5.13MPa となっており、E75-F270 のスギ集成材の曲げ強度、せん断強度の公称値 27MPa、3.0MPa¹⁴⁾ に近い応力範囲で破壊している。一方、カラマツ材は $\sigma_{max} = 36\text{MPa}$ でも曲げ破壊を生じておらず、せん断破壊時の τ_{max} は 3.60~5.64MPa となっている。E105-F345 のカラマツ集成材の曲げ強度、せん断強度の公称値はそれぞれ 34.2MPa、3.6MPa¹⁴⁾ と

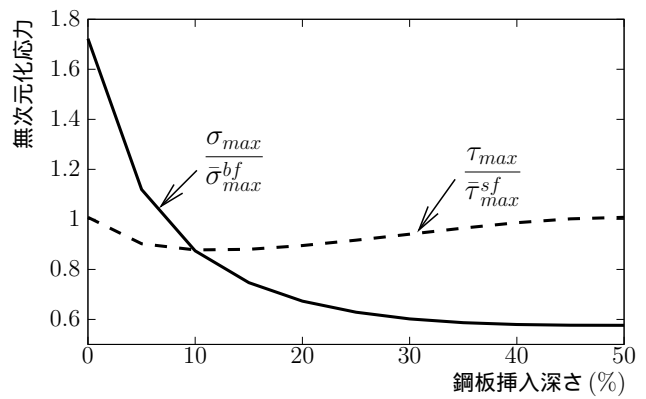


図-12 挿入深さと無次元化応力 (スギ材)

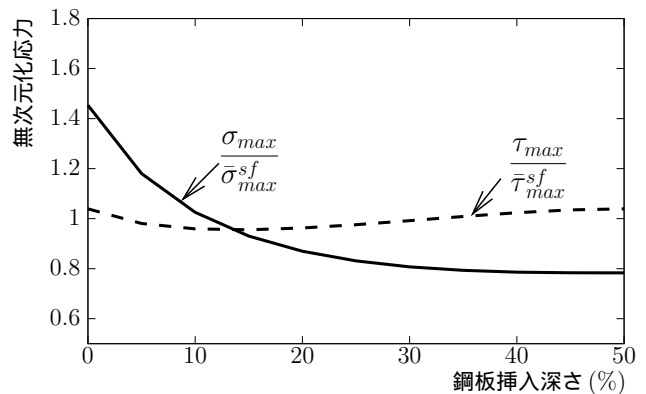


図-13 挿入深さと無次元化応力 (カラマツ材)

なっているが、今回の試験に用いた集成材はこれよりも曲げ強度がやや高めだったために、すべての試験体がせん断破壊したと思われる。最大縁応力、最大せん断応力ともにばらつきは大きい、やはりカラマツ材の方が最大縁応力は大きく、最大せん断応力については、スギ材でもカラマツ材でも特に差はないようである。つまり、スギ材は曲げ強度が低いため、曲げ剛性が十分に補強されていない状態では、せん断応力がせん断強度に達する前に縁応力が引張応力に達してしまい曲げで破壊するが、曲げ剛性が十分に補強されれば、縁応力が緩和され、せん断応力が先にせん断強度に達してせん断で破壊するというところだろう。一方のカラマツ材は、スギ材に比べて曲げ強度は大きいもののせん断強度はそれほど差がないため、曲げ剛性を補強しない集成材のみの状態でもせん断応力が先にせん断強度に達してせん断で破壊するというところだろう。破壊時の応力の平均値で無次元化した σ_{max} と τ_{max} をスギ材とカラマツ材について、それぞれ図-12、13 に示す。スギ材は σ_{max} については曲げ破壊したケースの破壊時最大縁応力の平均値 $\bar{\sigma}_{max}^{bf}$ で無次元化し、 τ_{max} についてはせん断破壊したケースの破壊時最大せん断応力の平均値 $\bar{\tau}_{max}^{sf}$ で無次元化している。カラマツ材はいずれのケースもせん断破壊したた

め、 σ_{max} については、せん断破壊したケースの破壊時最大縁応力の平均値 $\bar{\sigma}_{max}^{sf}$ で無次元化し、 τ_{max} についてはせん断破壊したケースの破壊時最大せん断応力の平均値 $\bar{\tau}_{max}^{sf}$ で無次元化している。このように無次元化して整理してみると、鋼板が深くなるにつれて最大縁応力よりも最大せん断応力が大きくなっていき、破壊がせん断に支配されやすくなるということがわかる。

7. まとめ

- 鋼板挿入集成材の曲げ剛性は、樹種にかかわらず鋼板挿入により 2~3 倍程度改善されるが、せん断弾性に関してはそれほどはっきりとした改善効果は認められない。
- 曲げ強度の低いスギ材を用いた鋼板挿入集成材梁では、逆対称 4 点曲げに対して、鋼板挿入が浅いほど曲げで破壊し、鋼板挿入が深いほどせん断で破壊する傾向がある。
- 曲げ強度の高いカラマツ材を用いた鋼板挿入集成材梁では、逆対称 4 点曲げに対して、鋼板挿入の深さにかかわらずせん断で破壊する。
- スギ材を用いた鋼板挿入集成材梁では、梁の一部に最初の曲げ破壊またはせん断破壊が生じた後に急激に強度を失い、鋼板挿入によるじん性の改善はあまり認められない。
- カラマツ材は、集成材のみの梁でも梁の一部にせん断破壊を生じた後にある程度の強度を保つが、鋼板を挿入することによって、更にじん性が改善する。

以上より、カラマツ材のようなせん断じん性の高い樹種の方が鋼板挿入集成材梁としての補強性能を有効に利用しやすいことがわかるが、一方、スギ材のようなせん断じん性の低い樹種を鋼板挿入集成材梁に用いる場合には適切なせん断補強を考慮すべきであろう。

謝辞

この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）の補助を得た。

参考文献

- 1) 長谷部薫・薄木征三：集成木材はりの横座屈解析と実験，構造工学論文集，Vol.38A，1992.
- 2) GOTOU Humihiko, DAIKOKUYA Masahide, CHIDA Tomohiro, USUKI Seizo： Estimation of shear modulus by FEM bending simulation of steel-plate-inserted glulam wood beams, WCTE 2008, Conference Proceedings, 10th World Conference on Timber Engineering, 2008 (CD-ROM).
- 3) 大黒屋 信英，後藤 文彦，佐々木 貴信，金高 悟：鋼板挿入集成材梁のせん断弾性の推定，第 7 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp. 79-82, 2008.
- 4) 森田英樹・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，Vol.52，No.6，pp.376-382，2006.
- 5) 井道裕史：実大材を用いたせん断試験方法，木材工業，Vol.63，No.5，2008.
- 6) <http://www.calculix.de/>
- 7) 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，2007.
- 8) 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，Vol.54A，pp.650-658，2008.
- 9) 西野文雄・長谷川彰夫：構造物の弾性解析，新体系土木工学 7，技報堂，1983.
- 10) American Society for Testing and Materials：Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes, ASTM Standards, D198-05a, 2005.
- 11) 後藤文彦・麓貴行・薄木征三・佐々木貴信：曲げ試験による木材梁せん断弾性係数推定の精度，構造工学論文集，Vol.49A，2003.
- 12) 大黒屋 信英，後藤 文彦，千田 知弘，薄木 征三：木材梁の曲げ載荷方法とせん断弾性係数の推定精度について，第 6 回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp. 81-86，2007.
- 13) 薄木征三・佐々木貴信・熱海昭彦・Mohan P.sharma：集成材・鋼床版ハイブリッド桁リブ鋼板のせん断応力度，構造工学論文集，Vol.47A，2001.
- 14) 財団法人林業土木コンサルタンツ：実務者のための木橋の設計と施工，2005.

(2008 年 9 月 18 日 受付)