

鋼板挿入集成材梁の樹種とせん断挙動

環境構造工学講座 07141 大黒屋 信英
指導教員 後藤 文彦

1. はじめに

ここ数年，林業推進や自然環境への配慮から木材を有効利用することが日本でも重要視されてきている．構造用集成材を鋼材などで補剛したハイブリッド型の近代木橋も架設されてきている．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 $1/12 \sim 1/20$ と非常に小さいが，それでも集成材のみで使用される際には，それほどせん断性能が問題になることはない．しかし，集成材に鋼板などを挿入して曲げ剛性を向上させ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曲げたわみは減少するが，せん断剛性はそれほど改善されずせん断たわみは減少しないため，集成材のみの梁よりも全体のたわみに対するせん断たわみの比率が大きくなる¹⁾．つまり，鋼板挿入集成材梁では曲げ剛性が高くなるために，むしろ，せん断破壊が生じやすくなる場合がある．また，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，このような鋼板挿入集成材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．ハイブリッド梁が曲げ破壊するか，せん断破壊するか，また，破壊後にじん性を発揮するかどうかは，集成材と鋼材の比率や集成材の曲げ強度とせん断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樹種を用いた鋼板挿入集成材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曲げ剛性，せん断剛性の変化を測定したのち²⁾，梁中央部でせん断が支配的な逆対称4点曲げ試験³⁾により破壊試験を行う．また，有限要素解析も行い，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実験値と有限要素解析値について考察する．

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，挿入鋼板の深さが，せん断剛性に対してどのような影響を与えるか調べるために，鋼板挿入深さを $0\% \sim 50\%$ に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．有限要素解析ツールには GPL ライセンスの 3次元有限要素解析ツール CalculiX⁴⁾ 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 $1/4$ と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：1m とする．要素分割は，10(幅方向) \times 40(桁高方向) \times 120(軸長方向) 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，載荷部断面の各節点に分散させて載荷する．

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．

$$v = \frac{P\ell^3}{3EI} + \frac{Pl}{kGA} \dots\dots\dots (2.1)$$

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．式 (2.1) 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．

$$v = \frac{P\ell^3}{3(E_w I_w + E_s I_s)} \dots\dots\dots (2.2)$$

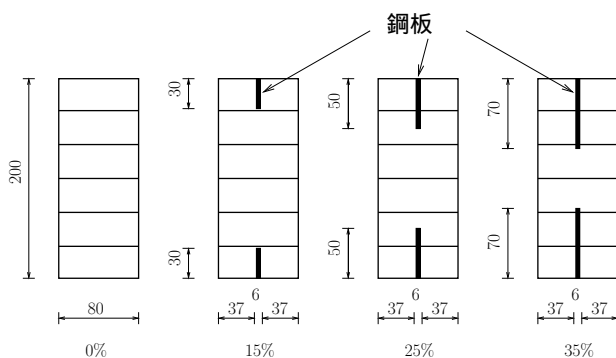


図-1 実験モデル

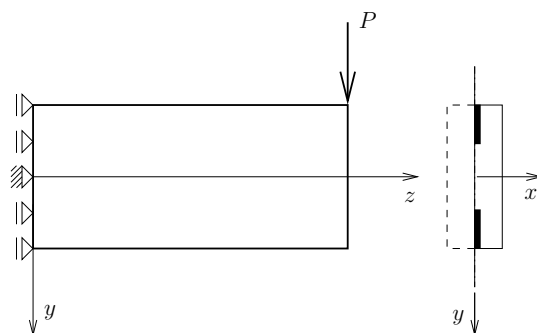


図-2 有限要素解析モデル

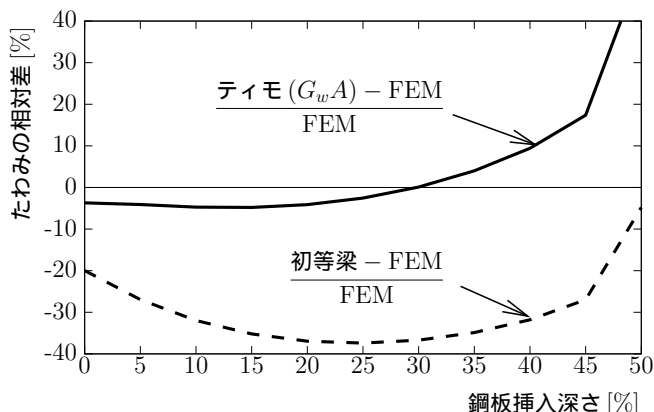


図-3 各梁理論との相対差

表-1 鋼板挿入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 鋼板挿入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

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。曲げ剛性に $E_w I_w + E_s I_s$ を使い、せん断剛性に集成材のみの梁とみなした $G_w A$ を用いた式 (2.1) のたわみと有限要素解析のたわみとの相対差と、式 (2.2) のたわみと有限要素解析のたわみとの相対差を図-3 に示す。なお、ここでせん断補正係数 k は等方性材料の矩形断面に対する値 $\frac{5}{6}$ を用いた。

ここで、鋼板挿入深さ 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ている状態である。有限要素解が正解に近いと考えるなら、式 (2.2) のたわみと有限要素解のたわみとの差異は、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、相対差の絶対値が最大となる鋼板挿入深さ 25% 付近で最もせん断変形が大きくなることわかる。

一方、ティモシェンコ梁の式は、鋼板挿入深さ 0% ~ 35% では、有限要素解のたわみとの相対差が $\pm 5\%$ 程度以内になっている。鋼板部を無視した集成材のみのせん断剛性を用いているが、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。

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, $E_s=206\text{GPa}$, $G=79.2\text{GPa}$) 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。前章の有限要素解析による試算では、鋼板挿入深さ 25% 付近で最もせん断変形が大きくなること示されたので、その前後の深さのものを加えて、鋼板挿入深さは、0%、15%、25%、35% の 4 種類とする。主に鋼板挿入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鋼板挿入深さについて 2 本ずつ、主に樹種

の違いによる影響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。

4. 曲げ剛性・せん断弾性の測定

せん断弾性の測定のための 3 点曲げ試験においては、前章の実験モデルの各鋼板挿入集成材梁に対して支持スパンを 1.4~2.2m に変えながら測定する。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 $E_b = \frac{P\ell^3}{48I}$ のように逆算したヤング率はせん断変形の影響が含まれている曲げヤング率 E_b である。なお、軸方向ヤング率 E_z とは区別して扱う。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 (2.1) のたわみは同じと考え、等置して変形すると、次式が得られる^{2),5)}。

$$\frac{1}{E_b} = \frac{1}{E_z} + \frac{1}{kG} \left(\frac{h}{\ell}\right)^2 \dots\dots\dots (4.1)$$

つまり、試験体のスパン ℓ 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から軸方向ヤング率 E_z が得られ、回帰直線の傾きの逆数からせん断弾性係数 G 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。ここでは、鋼板挿入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 のとしての値を推定し、 kG が鋼板挿入深さによってどのように変化するかを考察する。

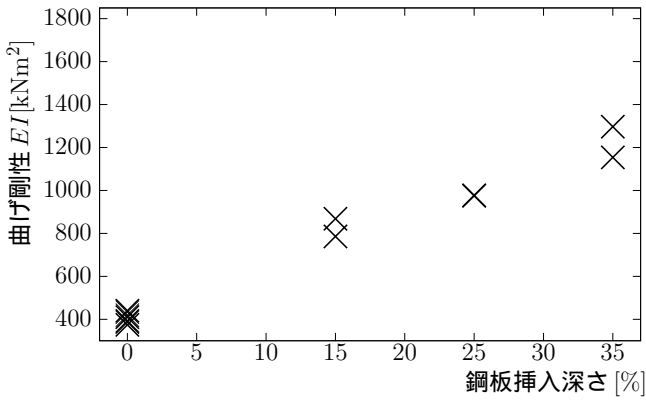


図-4 曲げ剛性と挿入深さの相関図 (スギ材)

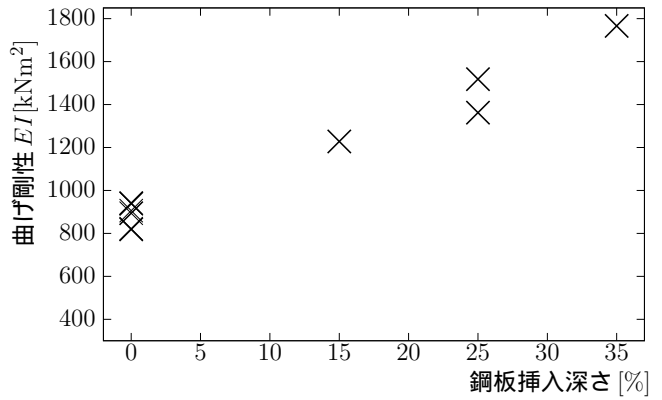


図-5 曲げ剛性と挿入深さの相関図 (カラマツ材)

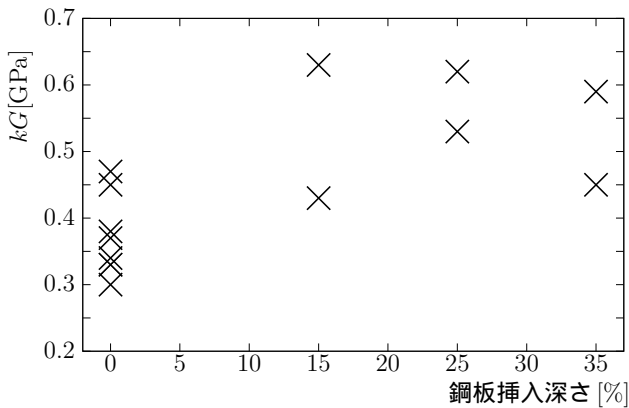


図-6 せん断弾性と挿入深さの相関図 (スギ材)

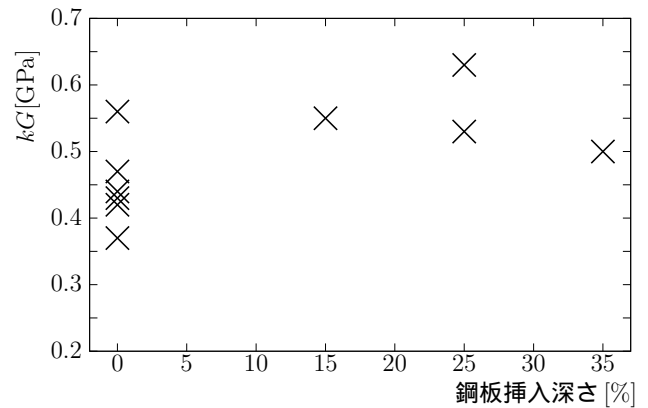


図-7 せん断弾性と挿入深さの相関図 (カラマツ材)

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試験体の測定値を表し、 $E_s I_s$ は鋼板 (SS400) のヤング率 $E_s = 206\text{GPa}$ と鋼板部分の断面 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 (4.1) 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 (4.1) の線形関係から得られる kG である。曲げ剛性に関しては、図-4,5 から分かるように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、鋼板挿入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。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図-6,7 から分かるようにほとんどの試験体で集成材のみの梁よりも、鋼板を挿入した梁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、鋼板を挿入した梁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挿入深さとの間には、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。曲げ剛性に関しては、 $E_w I_w + E_s I_s$ と合成 EI が比較的近いことから、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、鋼板の接着具合のばらつきなどが、合成断面としてのせん断弾性に敏感に影響するというものかも知れない。

5. 破壊試験

前章の 3 点曲げ試験では、鋼板挿入集成材梁のせん断弾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、鋼板挿入深さや樹種の違いが破壊モードやじん性に与える影響について調べる。載荷方法は、図-8 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

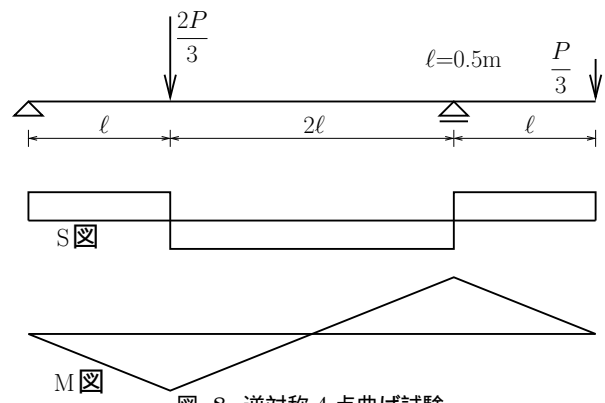


図-8 逆対称 4 点曲げ試験

逆対称四点曲げ試験法³⁾による破壊を行う。図-8において曲げモーメントが最大となる $\frac{2P}{3}$ 荷重点部の圧縮側やその逆対称点となる右支点部付近の引張側で図-9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-10のように梁の端部や中央部で、軸長方向に裂けて破壊した場合にはせん断破壊と判断する。

荷重 P と $\frac{2P}{3}$ 荷重点のたわみの関係をスギ材を用いた試験体について図-11に、カラマツ材を用いた試験体について図-12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挿入深さが深くなると、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、鋼板挿入深さが15%の梁では、荷重ピーク時に曲げ破壊が起きているが、鋼板挿入深さが25%以上になると、荷重ピーク時にせん断破壊が起きている。鋼板が深くなると曲げ剛性は大きくなっているが、鋼板が深くなると破壊モードが曲げ破壊からせん断破壊に変わることもあり、破壊荷重は、必ずしも鋼板挿入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。

カラマツ材を用いた試験体は鋼板を挿入していない集成材のみの梁を含め、すべての試験体で荷重ピーク時に

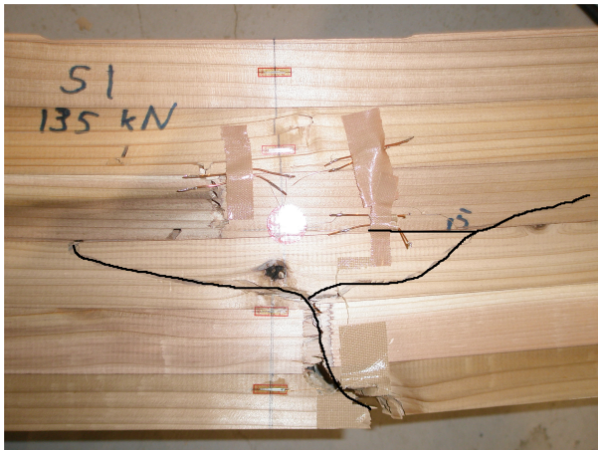


図-9 曲げ破壊状態 (スギ試験体 No.3)

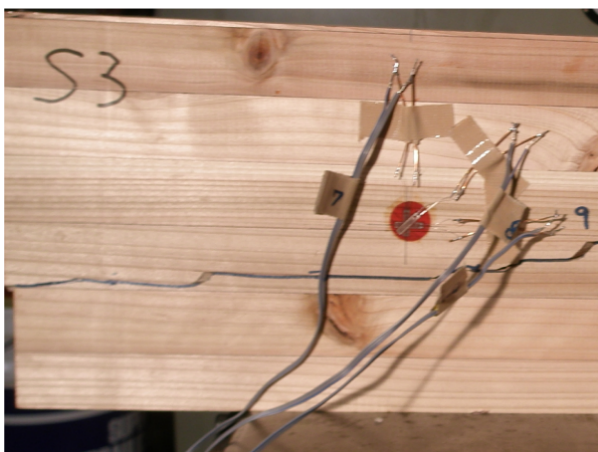


図-10 せん断破壊状態 (スギ試験体 No.5)

せん断破壊が起きている。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分かる。スギ材に比べるとかなりのじん性があるが、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章の手法による有限要素解析の結果とともに図-13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や有限要素解に近いが、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。ただし有限要素解の場合、荷重点から離れた位置 ($\frac{1}{8}$ 点) でのひずみ分布は図-13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章の手法による有限要素解析の結果とともに図-14に示す。ロゼットゲージによる測定値は、有限要素解析の結果と比較的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、破壊時の縁応力、中立軸のせん断応力を試

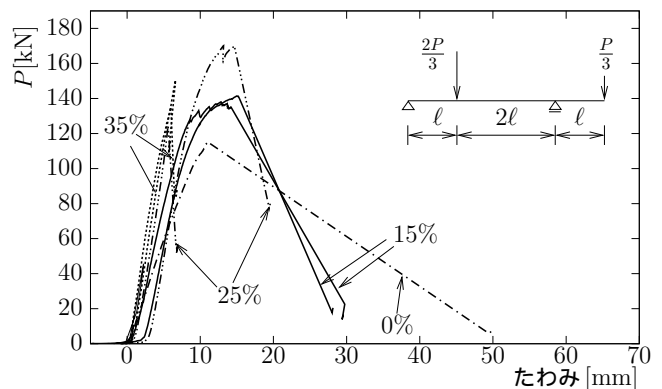


図-11 荷重-たわみ曲線 (スギ材)

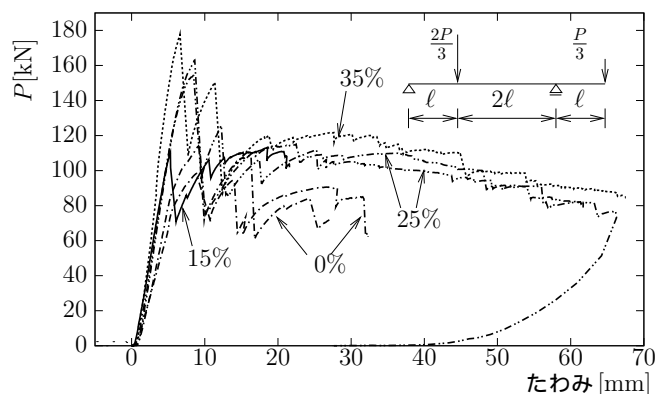


図-12 荷重-たわみ曲線 (カラマツ材)

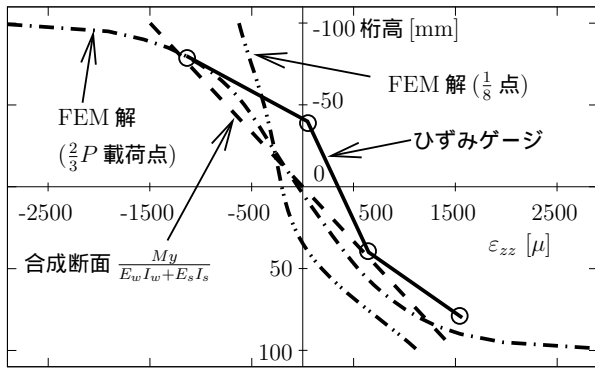


図-13 軸方向ひずみ分布 (スギ試験体 No.6)

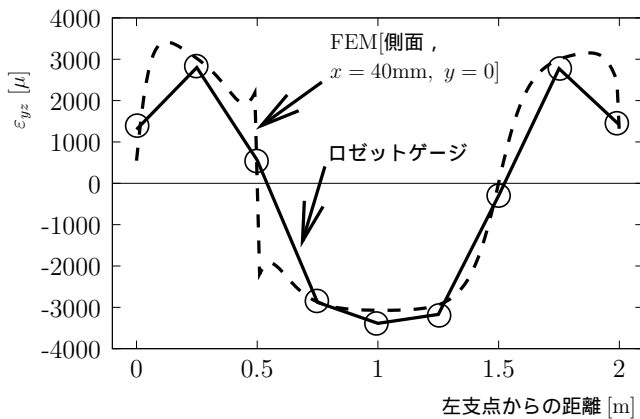


図-14 せん断ひずみ分布 (スギ試験体 No.6)

算してみる．縁応力は，次式で表される．

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{I_n} y \dots\dots\dots (6.1)$$

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 は中立軸から外縁までの高さ 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．

$$\tau = -\frac{S(z)Q(y)}{b(y)I_n} \dots\dots\dots (6.2)$$

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， $b(y) = b = 0.08m$ 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．

$$\tau_{max} = -\frac{E_w S(z)}{b(E_w I_w + E_s I_s)} \left\{ \frac{b_n}{2} (y_w^2 - \frac{h^2}{4}) - \frac{b}{2} y_w^2 \right\} \dots\dots\dots (6.3)$$

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．

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，3.0MPa⁶⁾ に近い応力範囲で破壊している．一方，カラマツ材は $\sigma_{max} = 36MPa$ 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，3.6MPa⁶⁾ となっている．今回の試験に用いたカラマツ材はこれよりも曲げ強度がやや高めだったために，すべての試験体が曲げ破壊に達する前にせん断破壊したものと思われる．最大縁応力，最大せん断応力ともにばらつきは大きいですが，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強度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．

各鋼板挿入深さの応力 σ_{max} と τ_{max} を破壊時の応力の平均値で無次元化したをスギ材とカラマツ材について，それぞれ図-15，16 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

表-3 鋼板挿入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 鋼板挿入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

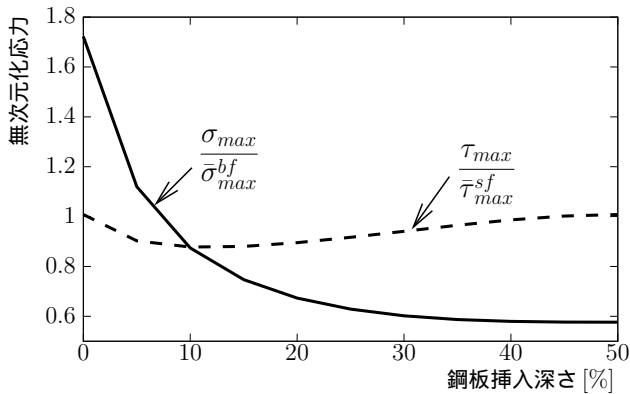


図-15 鋼板挿入深さと無次元化応力 (スギ材)

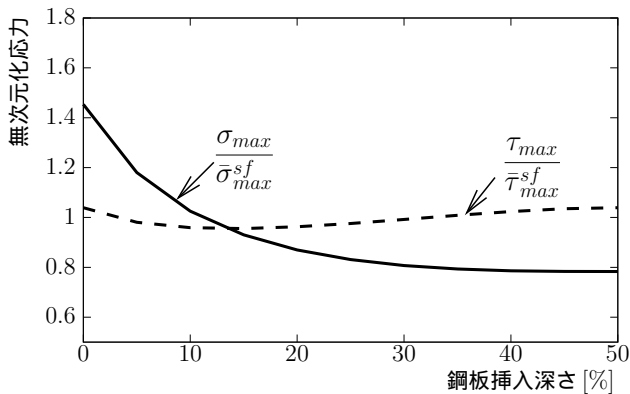


図-16 鋼板挿入深さと無次元化応力 (カラマツ材)

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、鋼板挿入深さが浅ければ曲げで破壊し、鋼板挿入深さが深くなると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ってしまい、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ち、更に鋼板を挿入することによって、じん性が改善も認められる。
- 有限要素解析と実験で測定したひずみが比較的一致したことから、有限要素解析や式から、ひずみや応力の推定がある程度可能である。
- 式からの応力算定より、スギ材、カラマツ材ともに鋼板挿入深さ15%程度からせん断破壊に支配されやすくなる。

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。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る。

参考文献

- 1) 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.
- 2) American Society for Testing and Materials: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes, ASTM Standards, D198-05a, 2005.
- 3) 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.
- 4) <http://www.calculix.de/>
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 大黒屋信英, 後藤文彦, 佐々木貴信, 長谷部薫: 鋼板挿入集成材梁のせん断性能, 構造工学論文集, Vol.55A, 2009.