

## 鋼板挿入集成材梁のせん断弾性の推定

### Estimation of shear elasticity of steel-plate-inserted glulam beams

○大黒屋 信英\* 後藤 文彦\*\* 佐々木 貴信\*\*\* 金高 悟\*\*\*\*

DAIKOKUYA Masahide, GOTOU Humihiko, SASAKI Takanobu, KANETAKA Satoru

\*秋田大学工学資源学研究科博士前期課程 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

\*\*博 (工) 秋田大学工学資源学部土木環境工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

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

\*\*\*\*(財) 秋田県木材加工推進機構 (〒016-0876 秋田県能代市海詠坂 11-1)

**ABSTRACT** Shear stiffness of glulam beams is very small compared with its bending stiffness. While hybridization of glulam beams by 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. Therefore it is very important to estimate shear stiffness of the steel-plate-inserted glulam beams. In this study we experiment three-point bending test and experimentally estimate the shear elasticity (including shear coefficient) of the steel-plate-inserted glulam beams.

**Keywords** : せん断弾性, 有限要素法, *CalculiX*, 鋼板挿入集成材

*shear elasticity, FEM, CalculiX, steel-plate-inserted glulam beams*

#### 1. はじめに

近年、環境や景観への配慮など様々な面から木橋が見直され、全国各地に架設されてきており、そのなかには鋼板挿入集成材梁など、鋼板で補強したハイブリッド型の道路橋もある。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  $\frac{1}{12} \sim \frac{1}{20}$  程度であり<sup>1)</sup>、曲げ剛性に比べてせん断剛性が非常に低い直交異方性材料であることに注意が必要である。例えば、集成材梁に鋼板を挿入して補強すると、曲げ剛性は大きく改善されるが、せん断剛性はそれほど変わらないため、たわみに占めるせん断たわみの比率は集成材のみの梁に比べて極めて大きくなり得る<sup>2)</sup>。このため、鋼板挿入集成材梁では、ティモシェンコ梁の式でたわみを予測する際に、せん断弾性 ( $kG$ ) を適切にあたえることが重要となる。これまで著者らは、文献<sup>2),3),4)</sup>で集成材を直交異方性材料として有限要素モデル化し、曲げ試験の数値シミュレーションから得られる荷重とたわみの関係をティモシェンコ梁の式に代入することでせん断補正係数  $k$  やせん断弾性係数  $G$  を逆算することを試みている。本研究では、鋼板挿入集成材梁のせん断弾性を曲げ試験と有限要素解析により推定し、せん断弾性に対する鋼板挿入の影響を調べてみる。

#### 2. 挿入鋼板の影響

鋼板挿入が、せん断剛性に与える影響を調べるために、図-1 のよう鋼板挿入集成材梁の鋼板挿入深さを変化させて、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比較してみる。数値解析には GPL ライセンスの FEM 解析ツール *CalculiX*<sup>5)</sup> 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  $\frac{1}{4}$  と見な

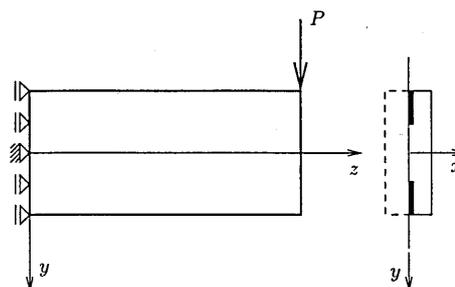


図-1 有限要素解析モデル

せる片持ち梁を解析モデルとし、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、桁高方向は挿入深さに比例して要素を割り当てる。荷重載荷方法は、文献<sup>6)</sup>を参考に各節点に分散させて面載荷している。梁中央部に集中荷重を受ける単純支持梁の中央のたわみは、ティモシェンコ梁理論では次式で与えられる。

$$v = \frac{P\ell^3}{48EI} + \frac{P\ell}{4kGA} \quad (1)$$

ここに  $E$  はヤング率、 $I$  は断面2次モーメント、 $k$  はせん断補正係数、 $G$  はせん断弾性係数、 $A$  は断面積である。このティモシェンコ梁の式を利用して、鋼板挿入集成材梁のたわみを以下の3種類の近似式で計算し、有限要素解析によるたわみと比べてみる。添字  $w$  と  $s$  はそれぞれ集成材と鋼板についての値を示すものとする。

a) 初等梁

$$v_a = \frac{P\ell^3}{48(E_w I_w + E_s I_s)} \quad (2)$$

b) ティモシェンコ梁 (せん断剛性に集成材のみを使用)

$$v_b = \frac{P\ell^3}{48(E_w I_w + E_s I_s)} + \frac{P\ell}{4 \times \frac{5}{6} G_w A} \quad (3)$$

c) ティモシェンコ梁 (せん断剛性に集成材部と鋼板部の和を使用)

$$v_c = \frac{P\ell^3}{48(E_w I_w + E_s I_s)} + \frac{P\ell}{4 \times \frac{5}{6} (G_w A_w + G_s A_s)} \quad (4)$$

いずれの式も、曲げ剛性に関しては集成材部と鋼板部の和で与えている。式(2)は、せん断たわみ項を無視した初等梁の式である。式(3)は、せん断剛性を集成材のみとして与えている。式(4)は、せん断剛性を集成材部と鋼板部の和で与えている。それぞれの式で求めたたわみと挿入鋼板深さの関係を、FEM解に対する相対誤差として、図-2に示す。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。FEM解を正しいと考えるなら、式(2)とFEM解との誤差は、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、誤差が-35%程度と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。式(3)は、鋼板深さ0%~40%では、FEM解との誤差が $\pm 5\%$ 程度以内におさまり、最もよい近似になっている。式(4)とFEM解との誤差は、初等梁に近く、鋼板挿入によるせん断剛性の増加を過大に評価したために近似精度が悪くなっていることが分かる。

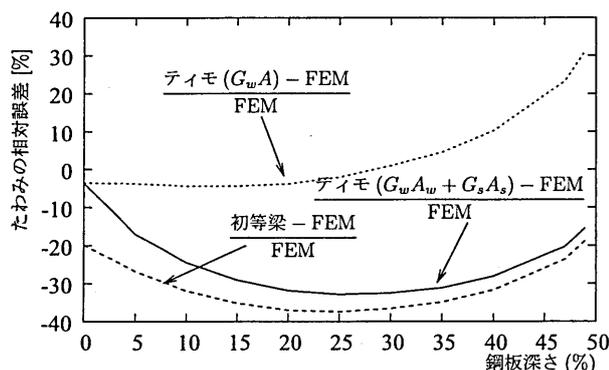


図-2 各種梁理論との相対誤差

### 3. 曲げ試験

実験モデルは、図-3に示すように、集成材梁の上下縁に溝を彫って鋼板を鉛直に挿入し、樹脂系接着材で接着して製作する。鋼板挿入深さの異なる、4種類の梁で実験を行う。FEM解析でせん断変形が最大となる25%前後の鋼板を挿入した。鋼板深さは、0%、15%、25%、35%とする。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。曲げ試験で得た荷重とたわみを初等梁の式に代入

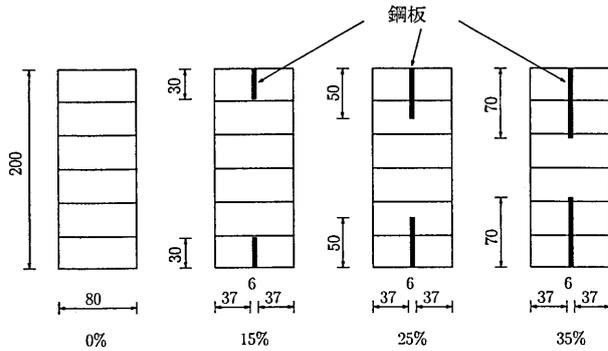


図-3 実験モデル

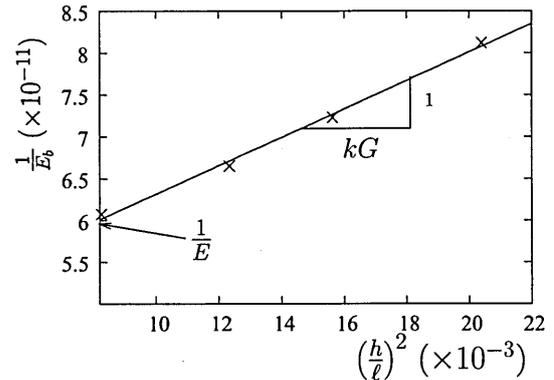


図-4 ASTM の逆算方法

して得られる曲げヤング率を  $E_b = \frac{P\ell^3}{48I_w}$  とおく、この曲げヤング率を用いた初等梁の式と軸方向ヤング率  $E$  を用いたティモシェンコ梁の式を等置して、

$$\frac{P\ell^3}{48E_b I} = \frac{P\ell^3}{48EI} + \frac{P\ell}{4kGA} \quad (5)$$

と書ける。これを変形すると次式が得られる<sup>7)</sup>。

$$\frac{1}{E_b} = \frac{1}{E} + \frac{1}{kG} \left(\frac{h}{\ell}\right)^2 \quad (6)$$

式(6)は  $\frac{1}{E_b}$  と  $\left(\frac{h}{\ell}\right)^2$  の関係をプロットすれば、回帰直線の切片と傾きから  $\frac{1}{E}$  と  $\frac{1}{kG}$  が得られることを示している。鋼板深さ 35% の供試体についてこのように回帰直線を描いたものを図-4 に示す。そして、この回帰直線の切片と傾きから  $E$  と  $kG$  を推定する。せん断補正係数  $k$  は、等方性材料の長方形断面で  $\frac{5}{6}$  となるが、集成材のような直交異方性材料、更には鋼板挿入された合成断面では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<sup>2)</sup>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  $kG$  としての値を推定することにする。製作した鋼板挿入集成材梁に対して、スパンを変えながら中央 1 点載荷の 3 点曲げ試験により測定した荷重とたわみの関係から求めた<sup>7),4)</sup>曲げ剛性とせん断弾性を表-1 に示す。表中の  $E_w I_w$  と  $G_w$  は鋼板を挿入しておらず、溝も彫っていない加工前の集成材のみの状態での測定値を表し、合成  $EI$  と合成  $kG$  は鋼板を挿入した合成断面としての測定値である。曲げ剛性

表-1 鋼板深さと各剛性の関係

供試体	鋼板深さ [%]	$E_w I_w + E_s I_s$ [kNm <sup>2</sup> ]	合成 $EI$ [kNm <sup>2</sup> ]	$kG_w$ [GPa]	合成 $kG$ [GPa]
1	0	418	418	0.38	0.38
2	0	386	386	0.37	0.37
3	15	897	868	0.33	0.43
4	15	914	786	0.30	0.63
5	25	1042	975	0.45	0.53
6	25	1104	977	0.37	0.62
7	35	1203	1154	0.33	0.59
8	35	1210	1313	0.31	0.45

については鋼板深さが深くなるにつれて、ほぼ加工前の材料定数から見積もられる通りに剛性が大きくなっていくのが確認できるが、せん断弾性については、鋼板を挿入した方が加工前より大きくなってはいるが、鋼板深さとの間にはっきりとした相関は認められず、更には集成材自体のせん断弾性の大小との相関も特に認められない。曲げ剛性の方は加工前の材料定数から予測される測定結果が得られていることから、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。ここで、合成  $kG$  と  $kG_w$  の変動係数を計算すると、合成  $kG$  では、0.13 となり、 $kG_w$  では、0.20 となった。このことから、木材の持つばらつきだけでなく、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、鋼板の接着具合などのばらつきが、敏感にせん断弾性に影響するというものなのかも知れない。FEM 解析の結果から得られる荷重とたわみを式 (1) に代入し、合成  $kG$  の推定を行ったものを図-5 に示す。図から分かるように、スパン/桁高比が大きくなるほど  $kG$  も大きくなる傾向がみられ、鋼板挿入深さが大きくなるほど、せん断弾性が改善している傾向がみられる。しかし、材料のばらつきなどの影響を受けない FEM による推定でも、もっとも効果のある鋼板深さ 35% の場合のせん断弾性の増加でもせいぜい 1.5 倍程度である。

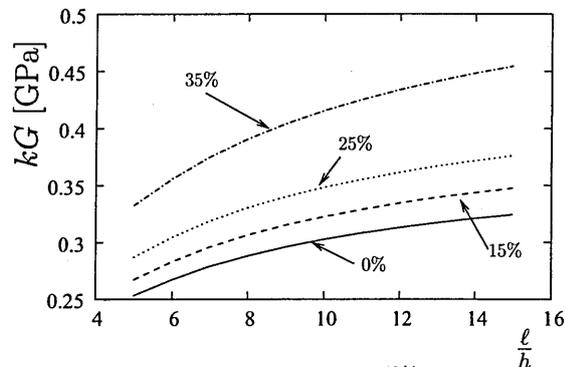


図-5 FEM から  $k$  の逆算

#### 4. まとめ

- ティモシェンコ梁の式で鋼板挿入集成材梁のたわみを見積もる場合、せん断剛性は、集成材のみの断面として計算して十分な近似となる。
- 鋼板挿入集成材梁の曲げ剛性は鋼板深さに応じて 2~3 倍まで改善される。実験によると、せん断剛性も鋼板挿入の前後で比べれば一定の改善が認められるが、ばらつきが大きく鋼板深さとの相関はない。
- 材料や接着状態のばらつきを考慮していない FEM 解析においても、せん断剛性の改善効果は鋼板深さ 35% で 1.5 倍程度であり、曲げ剛性の改善効果の方が 3 倍程度と大きいので、曲げ剛性に対するせん断剛性の比率が集成材のみの梁よりもむしろ小さくなってしまふ。

このように鋼板挿入集成材梁ではせん断の影響が大きくなり得るので、せん断に対する十分な注意が必要であると思われる。

#### 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) 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
- 4) 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.
- 5) CalculiX の公開ウェブサイト: <http://www.calculix.de/>
- 6) 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
- 7) American Society for Testing and Materials: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes, ASTM Standards, D198-05a, 2005.