

熱膨張と乾燥収縮を受ける鋼板挿入集成材梁の有限要素解析

FEM analysis of steel-beam-inserted GLT-beams under thermal expansion and drying shrinkage

高橋 明洋*・○後藤 文彦**・薄木 征三***

TAKAHASHI Akihiro, GOTOU Humihiko, USUKI Seizo

*大民施設工業株式会社 (〒 010-0941 秋田市川尻町字大川反 170-48)

**博(工) 秋田大学工学資源学部 (〒 010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

***工博 秋田大学工学資源学部

ABSTRACT In laminated timber beams with inserted steel plates, the steel plates thermally expand, while the laminated timber parts shrink due to drying. That can cause shearing stresses in the glued plane between the steel and the timber, and its adjacent parts. There are not many studies on the effect the stresses have on peeling of the glued parts. In this study we show a FEM approach for the beam under thermal expansion and drying shrinkage giving thermal strains and shrinkage strains as coefficients of linear expansion. We also compare the FEM solutions with those of the other free downloadable general-purpose FEM application.

Keywords : 熱膨張、乾燥収縮、立体要素、鋼板挿入集成材梁

thermal expansion, drying shrinkage, rectangular solid element, GLT-beam

1. はじめに

近年、集成材を鋼板や鉄筋で補剛することにより比較的スパンの長い道路橋にも集成材が用いられるようになってきている。こうした集成材と鋼材との合成構造や複合構造は、強度的に多くの利点を持っているが、そうした利点がじゅうぶんに発揮されるためには、応力を伝える木材と鋼材との接触面が適切に接着されていて、なめらかに応力を伝達できることが必要である。

一方、木材と鋼材とでは、熱膨張率が大きく違い、更に木材は乾燥収縮の影響を受けるため、自然環境下での温度や湿度の変化により、木材と鋼材との接着面付近に応力が集中したり、そのことで接着面にずれや剥離が生じる可能性もあるが、こうした影響については、まだじゅうぶんな研究がなされていない。

とはいえ、ある程度大きな試験体を製作して実験室内の温度変化や湿度変化を制御した実験を行うことは、様々な困難を伴うので、本研究では、熱膨張する鋼材と乾燥収縮する集成材との合成構造を、直方体要素を用いてできるだけ単純に有限要素モデル化し、有限要素法でこの種の問題を数値解析する手法を模索するとともに、無償版のある汎用ツール (FEMLEEG) による熱伝導を考慮した解析結果と比較・考察する。

2. 解析手法

2.1 本研究の FEM モデル

本研究では、まずは鋼板と集成材が接触した状態で熱膨張や乾燥収縮を受ける場合の基本的な力学特性を調査・比較したいので、二種類の材料の膨張率の違いにより梁に曲げなどが生じないように、**図-1**のように集成材梁の中央部に鋼板が差し挟まれている 2 軸対称な片持ち梁の右上 1/4 の部分を、8 節点 24 自由度の直方体要素¹⁾でモデル化する。また、温度変化と含水率変化によって発生するひずみを、垂直ひずみ成分で、次式のように与える²⁾。

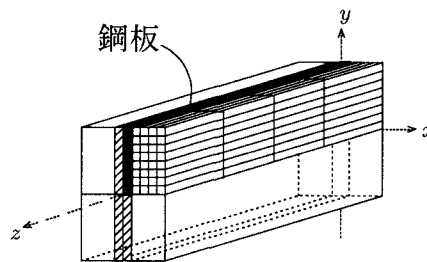


図-1 鋼補剛集成材梁

$$\epsilon_i = \alpha_i \Delta T + \beta_i \Delta H \quad (1)$$

ここに、 α_i と β_i はそれぞれ x, y, z 方向の線膨張係数と含水率 1% 当たり収縮率で、 ΔT は温度変化、 ΔH は含水率変化を表す。但し、温度変化はすべての要素で一様に、含水率変化はすべての集成材要素で一様に与える。式 (1) の歪に、応力-ひずみ行列と節点力-応力行列をかけて節点荷重としたものを外力として与え、節点変位を算出する。要素の応力を求める際には、求められた節点変位にひずみ-変位行列と応力-ひずみ行列をかけて求める。ここで、本 FEM 解析に用いた材料諸元を表-1 に示す。なお、 $\nu_{yx}, \nu_{zx}, \nu_{zy}$ は $E_x, E_y, E_z, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$ を使って、応力-ひずみ行列が対称行列になるように与えた。

2.2 FEMLEEG(無償版)

有限要素構造解析ツール FEMLEEG(<http://www.hoctsystem.co.jp/frefemleeg/>) の無償版 Free FEMLEEG(ソースは非公開) を用い、等方性である鋼材の材料定数と異方性である木材の材料定数や、各々の熱伝導率・熱容量などを設定し、熱伝導解析を行うことにより節点温度を求める。また、そのデータを用いて行う連成解析から節点変位や要素の応力等を算出する。但し、このソフトでは乾燥収縮による影響を考慮した解析ができないため、木材の線膨張係数には式 (1) の β_i に相当する負の線膨張率を与えることにより、含水率変化の影響を考慮する。また、FEMLEEG でも本研究の FEM モデルと同様に、8 節点 24 自由度の直方体要素でモデル化する。ここで、FEMLEEG の解析に用いた材料諸元を表-2 に示す。

表-1 本 FEM 解析での材料特性

| | 鋼材 | 木材 |
|------------------------------|----------------------|---|
| ヤング率 (N/mm ²) | 2.0×10^5 | $E_x=0.5 \times 10^3$ $E_y=1.0 \times 10^3$ $E_z=10.0 \times 10^3$ |
| ポアソン比 | 1/3 | $\nu_{xy}=0.2$ $\nu_{xz}=0.025$ $\nu_{yz}=0.03$ |
| せん断弾性係数 (N/mm ²) | 7.5×10^4 | $G_{xy}=0.03 \times 10^3$ $G_{xz}=0.6 \times 10^3$ $G_{yz}=0.7 \times 10^3$ |
| 線膨張係数 | 1.2×10^{-5} | $x, y: 3.0 \times 10^{-5}$ $z: 3.5 \times 10^{-6}$ |
| 収縮率 | | $x, y: 0.2 \times 10^{-2}$ $z: 0.015 \times 10^{-2}$ |

表-2 FEMLEEG での材料特性

| | 鋼材 | 木材 |
|---------------------------------|-----------------------|---|
| ヤング率 (N/mm ²) | 2.0×10^5 | $E_x=0.5 \times 10^3$ $E_y=1.0 \times 10^3$ $E_z=10.0 \times 10^3$ |
| ポアソン比 | 0.33 | $\nu_{xy}=0.2$ $\nu_{xz}=0.025$ $\nu_{yz}=0.03$ |
| せん断弾性係数 (N/mm ²) | | $G_{xy}=0.03 \times 10^3$ $G_{xz}=0.6 \times 10^3$ $G_{yz}=0.7 \times 10^3$ |
| 線膨張係数 | 1.2×10^{-5} | $x, y: -0.2 \times 10^{-2}$ $z: -0.015 \times 10^{-2}$ |
| 熱伝導率 (kcal/mm ³ ・°C) | 9.64×10^{-5} | 3.06×10^{-8} |
| 熱容量 (kcal/mm ³ ・°C) | 8.58×10^{-7} | 1.25×10^{-7} |

3. 解析例

3.1 解析例 1(突き抜け鋼板、接着剤なし)

図-2に示すような断面のモデルを解析の対象とした。モデルの要素分割は、鋼材要素の x 方向 \times y 方向 \times z 方向の分割を $1 \times 8 \times 4$ 、集成材要素の分割を $19 \times 8 \times 4$ として解析を行った。与える温湿度の変化は、文献²⁾等を参考に、想定されるやや厳しい条件として、温度変化は $+10^\circ$ を、含水率変化は -10% を与えた。このときの自由端面の変位を図-3、図-4に示す。

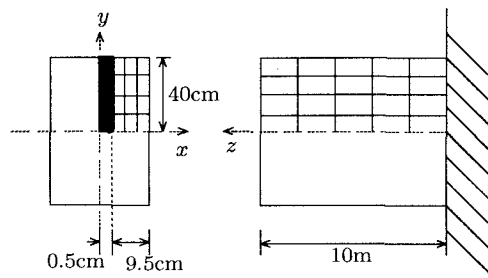


図-2 解析モデル

FEMLEEG での解析結果では、鋼板の端面が 3.5mm 程度収縮し、鋼板の近傍から離れるにしたがって、集成材がなだらかに 3.8mm 程度まで収縮している。一方本 FEM 解析では、鋼板の端面が 6.36mm 程度収縮し、鋼板の近傍から離れるにしたがって、集成材がなだらかに 6.48mm 程度まで収縮している。本解析は FEMLEEG と比べると、約 2 倍程度の収縮量を与える。

本解析が、FEMLEEG での解析よりも収縮量が FEMLEEG では、無償版の制限でこれ以上要素分割数を増やせないため、要素分割を 10 (うち鋼材は 1) $\times 4 \times 2$ と粗くした場合の解析と結果を比較してみたが、FEMLEEG、本 FEM 解析ともに、1% 程度の違いしか見られず、いずれの解析でも、この要素分割数で、有効数字 3 桁程度の十分な収束値が得られているものと考えられる。

さて、このときの自由端面のせん断応力を図-5~図-10に示す。 τ_{xz} においては、自由端面の下縁から 1 要素目の鋼板に隣接する集成材要素で最大値をとり、FEMLEEG では -0.53MPa 、本解析では -0.52MPa 程度である。また、

鋼板に隣接する集成材要素の τ_{xz} は、多少の数値の違いは見られるがほぼ一様に分布している。 τ_{xy} においては、いずれの解析でも、自由端面上部の鋼板に隣接する集成材要素で最大のせん断応力が生じており、その値は、FEMLEEG では -5.55MPa 、本解析では -6.40MPa 程度である。また τ_{yz} においては、両解析とも自由端面上縁から 3 要素目の鋼材要素に最大のせん断応力が生じ、その値は、FEMLEEG では -0.48MPa 、本解析では 0.41MPa 程度であった。 τ_{xz} と τ_{yz} においては両解析でそれほどの違いは見られなかったが、 τ_{xy} においては、本解析が FEMLEEG での解析に比べ大きな値となっている。この結果は、鋼材要素と、鋼板に隣接する集成材要素の高さ方向の

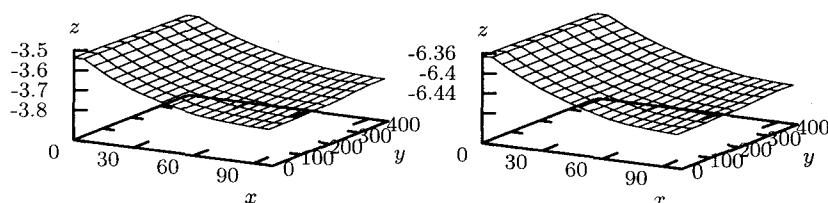


図-3 端面の変位 (mm)(FEMLEEG)

図-4 端面の変位 (mm)(本解析)

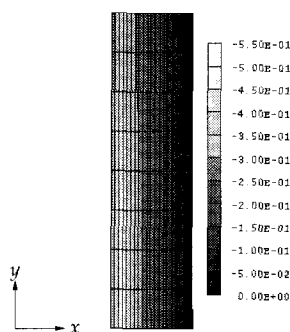


図-5 τ_{xz} (MPa)(FEMLEEG)

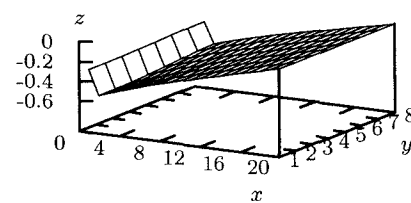


図-6 τ_{xz} (MPa)(本解析)

収縮の差が、それぞれの解析で異なるために生じているのではないかと考えられる。

ここで高さ方向の変位であるが、自由端面上縁において、本解析では鋼板が 0.11mm 程度、鋼板に隣接する集成材部分では 1.5mm 程度収縮し、FEMLEEG での解析では鋼板が 0.12mm 程度、鋼板に隣接する集成材部分では 1.4mm 程度収縮している。また、集成材の強度³⁾は長期許容応力の3倍をとったとして、せん断応力では 2.4~3.6MPa 程度であるので、 τ_{xy} において、どちらの解析結果とも破壊強度に近い値となっており、鋼板近傍の集成材によるせん断破壊の可能性を示唆する結果となった。なお、文献²⁾で著者等が行った同様の解析において、鋼材要素と集成材要素の隣接部付近で、変位や応力がなめらかに変化せずに乱れが入っていたが、これはせん断弾性係数のオーダーが違っていたことが原因だった。

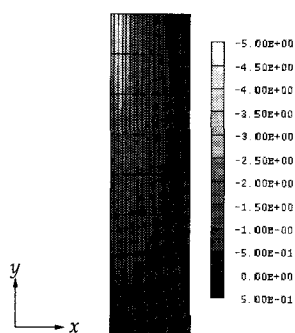


図-7 τ_{xy} (MPa)(FEMLEEG)

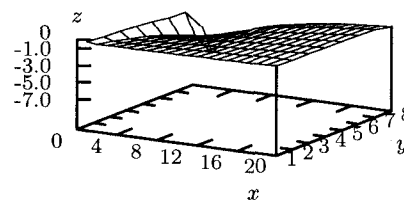


図-8 τ_{xy} (MPa)(本解析)

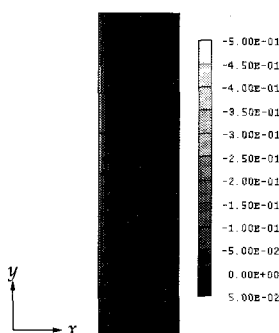


図-9 τ_{yz} (MPa)(FEMLEEG)

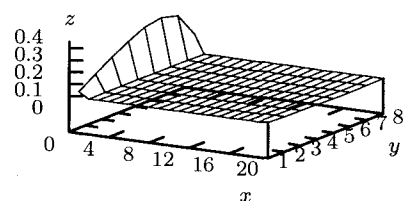


図-10 τ_{yz} (MPa)(本解析)

3.2 解析例 2(突き抜け鋼板、接着剤あり)

前述の解析例 1 での解析モデルの鋼板と集成材の間に、幅 1mm の接着剤の層を入れて解析を行った。本解析において、モデルの要素分割は、鋼材要素の x 方向 \times y 方向 \times z 方向の分割を $1 \times 8 \times 4$ 、接着剤要素の分割を $10 \times 8 \times 4$ 、集成材要素の分割を $9 \times 8 \times 4$ とし、接着剤の部分に 10 要素と細かく

分割した。FEMLEEG での解析では、モデルの要素分割は、鋼材要素の x 方向 \times y 方向 \times z 方向の分割を $1 \times 8 \times 4$ 、接着剤要素の分割を $1 \times 8 \times 4$ 、集成材要素の分割を $18 \times 8 \times 4$ とした。

与える温度変化と含水率変化は、前述の解析例 1 の条件と同じ数値を与えた。ここで、接着剤の材料特性を表-3 に示す。また、このときの自由端面の変位を図-11、図-12 に示す。

FEMLEEG での解析結果では、鋼板および接着剤の端面が 3.5mm 程度収縮し、鋼板の近傍から離れるにしたがって、集成材がなだらかに 3.7mm 程度まで収縮している。一方本 FEM 解析では、鋼板および接着剤の端面が 6.3mm 程度収縮し、鋼板の近傍から離れるにしたがって、集成材がなだらかに 6.4mm 程度まで収縮している。本解析と FEMLEEG の解析結果を比較すると、前述の解析例 1 の結果と同様に本解析の方が、FEMLEEG での解析よりも収縮量が 2 倍近く大きくなったが、どちらも同じような端部の変形を示した。また、接着剤を鋼板と集成材の間に入れた

表-3 接着剤の材料特性

| | 本 FEM 解析 | FEMLEEG |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|
| ヤング率 (N/mm ²) | 2.4×10^3 | 2.4×10^3 |
| ポアソン比 | 0.41 | 0.41 |
| せん断弾性係数 (N/mm ²) | 0.85×10^3 | |
| 線膨張係数 | 10.0×10^{-5} | 10.0×10^{-5} |
| 熱伝導率 (kcal/mm·s·°C) | | 4.0×10^{-6} |
| 熱容量 (kcal/mm ³ ·°C) | | 0.278×10^{-9} |

ケースと入れないケースでは、どちらのケースでもほぼ同じ端部の変位量を示したので、接着剤の層は端部変位にはさほど影響を与えないのではないかと考えられる。

このときの自由端面のせん断応力を図-13~図-18に示す。 τ_{xz} においては、自由端面の下縁から1要素目の接着剤要素で最大値をとり、FEMLEEGでは-0.55MPa、本解析では-0.53MPa程度である。また、接着剤要素の τ_{xz} は、多少の数値の違いは見られるがほぼ一様に分布している。 τ_{xy} においては、いずれの解析でも、自由端面上部の集成材に隣接する接着剤要素で最大のせん断応力が生じており、その値は、FEMLEEGでは-6.87MPa、本解析では-7.76MPa程度である。また τ_{yz} においては、両解析とも自由端面上縁から3要素目の鋼材要素に最大のせん断応力が生じ、その値は、FEMLEEGでは-0.49MPa、本解析では0.41MPa程度であった。前述の解析例1の結果と同様に、 τ_{xz} と τ_{yz} においては両解析でそれほどの違いは見られなかったが、 τ_{xy} においては、本解析がFEMLEEGでの解析に比べやや大きい値となっている。

また、解析例1よりも解析例2のほうが τ_{xy} が大きな数値ででていますが、これは高さ方向における接着剤要素の収縮と、隣接する集成材要素の収縮の差が、解析例1の鋼材要素の収縮と隣接する集成材要素の収縮の差よりも大きいことによるものと考えられる。 τ_{xz} と τ_{yz} においては

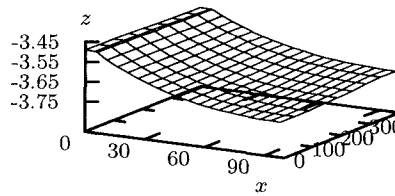


図-11 端面の変位 (mm)
(FEMLEEG)

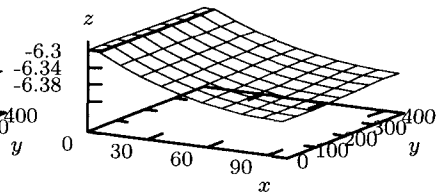


図-12 端面の変位 (mm)
(本解析)

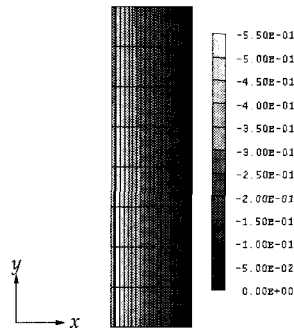


図-13 τ_{xz} (MPa)(FEMLEEG)

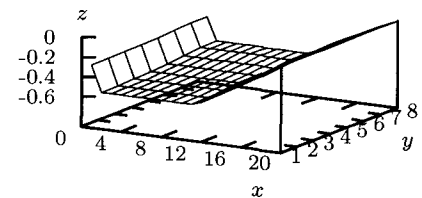


図-14 τ_{xz} (MPa)(本解析)

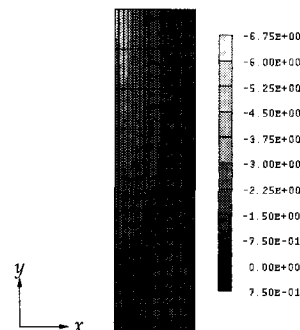


図-15 τ_{xy} (MPa)(FEMLEEG)

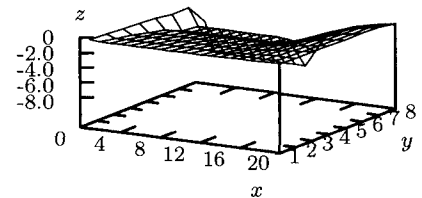


図-16 τ_{xy} (MPa)(本解析)

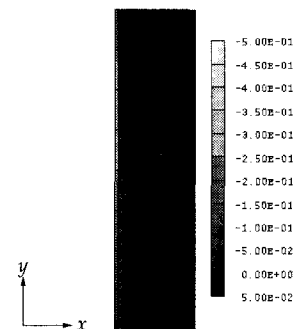


図-17 τ_{yz} (MPa)(FEMLEEG)

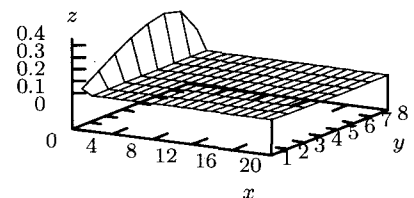


図-18 τ_{yz} (MPa)(本解析)

両ケースともほぼ同様の数値であった。そしてこのケースでも同様に、せん断破壊の危険性を示唆する結果となった。

3.3 解析例 3(現実に近いモデル)

本ケースではより現実に近いモデルとして集成材の上下に鉛直に鋼板を挿入したモデルを考え、**図-19**に示すような断面の、右上 1/4 モデルを解析の対象とした。モデルの要素分割は、 x 方向 \times y 方向 \times z 方向の分割を $20 \times 8 \times 4$ とし、そのうち、鋼材要素の分割を $1 \times 4 \times 4$ として解析を行った。前 2 ケースと同様に、与える温度変化は、 $+10^\circ$ を、含水率変化は、 -10% を与えた。このときの自由端面の変位を**図-20**、**図-21**に示す。FEMLEEG での解析

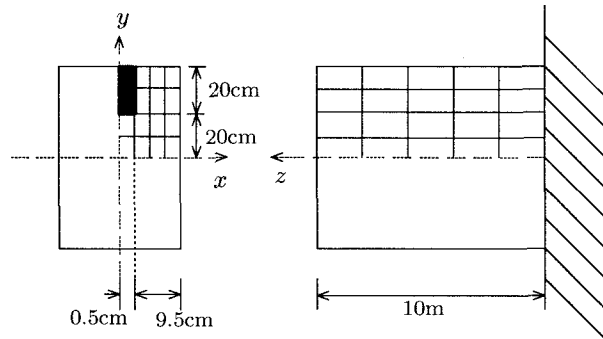


図-19 解析モデル

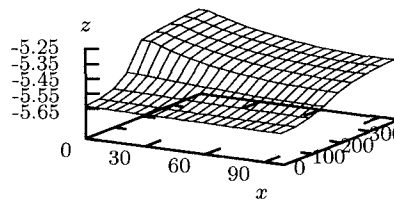


図-20 端面の変位 (mm)
(FEMLEEG)

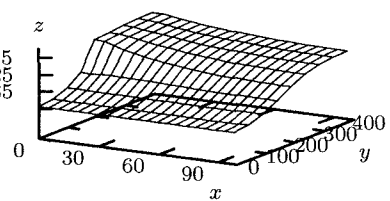


図-21 端面の変位 (mm)
(本解析)

結果では、鋼板の端面が 5.3mm 程度収縮している。集成材においては、端部断面の上縁側に位置している要素は、鋼板近傍から離れるにしたがって 5.45mm 程度までなだらかに収縮している。一方、端部断面の下縁側では、ほぼ一様に 5.6mm 程度収縮している。また、端部断面の上縁側から下縁側に向かうにしたがって、集成材がなだらかに収縮している様子が**図-20**から読み取れる。本 FEM 解析においては、鋼板の端面が 9.1mm 程度収縮し、集成材の端部断面の上縁側に位置している要素は、鋼板近傍から離れるにしたがって 9.2mm 程度までなだらかに収縮している。また、端部断面の下縁側ではほぼ一様に 9.4mm 程度収縮している。そして本解析でも FEMLEEG の結果と同様に、端部断面の上縁側から下縁側に向かうにしたがって、集成材がなだらかに収縮していることがわかる。本ケースにおいても、前の 2 ケース同様、本 FEM 解析の方が FEMLEEG での解析よりも収縮量が 2 倍近く大きくなったが、どちらも同じような端部の変形を示した。このときの自由端面のせん断応力を**図-22**~**図-27**に示す。 τ_{xz} においては、端部断面の上縁から 4 要素目の、鋼板に隣接する集成材要素で最大値となり、FEMLEEG では -0.55MPa 、本解析では -0.66MPa 程度であった。 τ_{xy} においては、端部断面の上縁から 1 要素目の、鋼板に隣接する集成材要素で最大のせん断応力が生じており、その値は、FEMLEEG では -3.57MPa 、本解析では -4.06MPa 程度である。また、端部断面の上縁から 4 要素目の鋼材要素付近では反対方向のせん断応力が生じており、その最大値は、FEMLEEG では 2.66MPa 、本解析では 2.46MPa 程度であった。また τ_{yz} においては、端部断面の上縁から 4 要素目の鋼材要素に最大のせん断応力が生じており、その値は、FEMLEEG では 4.19MPa 、本解析では -8.68MPa 程度であった。前 2 ケースでは、 τ_{xz} と τ_{yz} においては両解析でそれほど数値の差はなく、 τ_{xy} においては本解析が FEMLEEG での解析に比べ、大きな値となる傾向があった。しかし本ケースにおいては、 τ_{xz} と τ_{xy} の両解析における数値の差は多少であり、 τ_{yz} において本解析が FEMLEEG での解析に比べ、大きな値となる結果が

得られた。

確かに、鋼材要素を含む列と、隣接する集成材要素の高さ方向の収縮の差は、前の2ケースの結果に比べると、両解析間でそれほど違いは見られなかったもので、 τ_{xy} の両解析における数値の差が多少であるのも理解できる。しかし τ_{yz} においては、本解析の結果が FEMLEEG での結果に比べ2倍近い数値で得られたにもかかわらず、その要因であると考えられた端部断面の上縁から4要素目の鋼材要素と、その下に位置している集成材要素の軸方向の収縮の差は両解析間でそれほど違いは見られなかった。要素分割方法も要因のひとつと考えられるが、用いたソフトでは節点数に制限があり、細かい分割ができなかったため、これらの問題についてはこれからの課題としたい。また、このケースでも前2ケースと同様に、破壊強度に近い値のせん断応力が生じており、鋼板近傍の集成材によるせん断破壊の可能性を十分に示唆する結果となった。

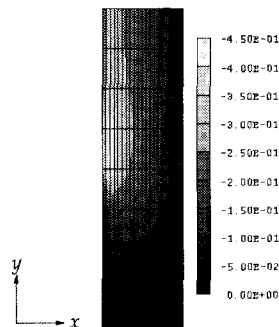


図-22 τ_{xz} (MPa)(FEMLEEG)

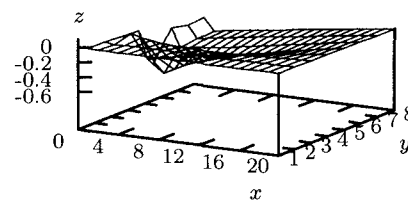


図-23 τ_{xz} (MPa)(本解析)

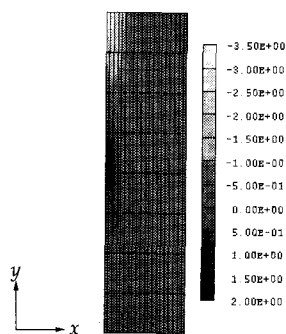


図-24 τ_{xy} (MPa)(FEMLEEG)

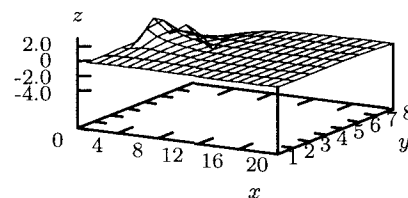


図-25 τ_{xy} (MPa)(本解析)

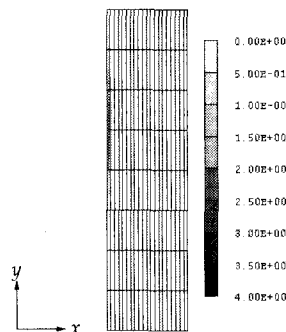


図-26 τ_{yz} (MPa)(FEMLEEG)

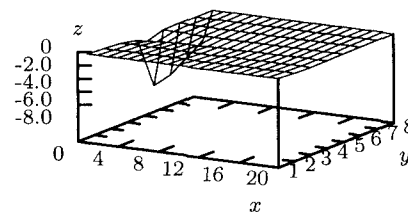


図-27 τ_{yz} (MPa)(本解析)

4. まとめ

鋼材と木材の合成構造を、本 FEM 解析と無償版の FEMLEEG とで解析し、比較してみた。集成材梁の中央部に鋼板が差し挟まれている2軸対称な片持ち梁の右上1/4のモデル、鋼板と集成材の間に接着剤を入れたモデル、集成材梁の上下に鋼板が鉛直に挿入されている片持ち梁の右上1/4のモデル、この3モデルを解析の対象としてそれぞれ解析を行った。その結果、どのモデルにおいても節点荷重を与えて解析した本解析と FEMLEEG による熱伝導解析では、変位量では違

いがみられたが、自由端面の変形においてはどちらもなだらかな変形を示し、かつ同様の変形が得られた。また自由端面のせん断応力において、解析例1と解析例2では、 τ_{xz} と τ_{yz} においては両解析でそれほどの違いは見られなかったが、 τ_{xy} においては本FEM解析がFEMLEEGでの解析に比べ、大きな値となっていた。この結果は、それぞれの材料における高さ方向の収縮の差が、両解析によってそれぞれ違うために生じるのではないかと考えられる。一方解析例3においては、 τ_{xz} と τ_{xy} については両解析間でそれほどの差は生じていなかったが、 τ_{yz} においては本FEM解析の結果がFEMLEEGでの結果に比べ2倍近い数値となった。両解析間における、端部断面の上縁から4要素目の鋼材要素と、その下に位置している集成材要素の軸方向の収縮の差の違いが原因だと考えられたが、それほどの違いは生じておらず、さらに、FEMLEEGでの解析の方が収縮の差は大きくなってしまっていた。また、それぞれのケースの解析結果において、両解析とも破壊強度に近い値のせん断応力が生じており、鋼板近傍の集成材によるせん断破壊の可能性を十分に示唆する結果となった。

参考文献

- 1) 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，pp. 875-894，構造工学論文集，Vol. 49A，2003.
- 2) 後藤文彦・高橋明洋・薄木征三・佐々木貴信：第2回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp. 97-100，2003.
- 3) 小松幸平・薄木征三・池内巖・園部宝積・亀井岳志・坂田典之：平成14年度公開研修「木造林道橋の設計と施工」研修教材テキスト，(財)林業土木コンサルタンツ，2002.