

# 引張、曲げ荷重及び熱負荷を受ける鎌継手の応力解析及び形状最適化に関する研究

理工学研究科精密工学専攻 中村 匠

## Stress Analysis and Shape Optimization of Goose-neck Joint under Tensile, Bending and Thermal Load

Takumi Nakamura

### 1. 緒言

カーボンニュートラルである木材を構造材として使用することでCO<sub>2</sub>を削減することができる。木材を構造材として使うためには、継手が必要となる。伝統的な継手形状は経験則から決定され、応力解析などによる継手形状の評価はあまり行われていない。そのため、効率的な継手形状を求めるため、継手の応力解析が必要となる。

本研究では、代表的な継手形状である鎌継手の強度向上に資するため、引張、曲げ荷重を受けるときの応力解析を行い、応力分布や応力集中を明らかにする。その結果を元に、男木、女木各々に対する応力集中係数を算出する計算式を提案している。さらに、提案した式を用いて、継ぎ手を一体の部材とするときの、引張荷重に対する最適な形状を求めている。

熱荷重を受ける鎌継手については、熱応力分布を画像相関法（DIC）による測定実験、FEMによる解析により、熱荷重により発生する熱応力が継手強度に与える影響を明らかにしている。

### 2. 応力集中の理論

円孔、楕円孔、双曲線切り欠きを有する平板の応力集中係数については、厳密解が求められているが、本研究の対象とする継手形状を含む多くの形状については厳密解を求めることは困難である。ノイバーは、厳密解ではないが、図2に示すような任意の切り欠き深さを有する帯板の応力集中係数について、楕円孔、双曲線切り欠きの応力集中係数計算式を合成して求めるノイバーの三角則を提案している<sup>①</sup>。ノイバーの三角則は、簡便な式のためこれまで広く用いられてきているが、最大10%程度の誤差があり、より正確な式が求められている。野田らは、任意の切り欠き深さを有する帯板について体積力法を用いて、より正確な応力集中係数を求め、ノイバーの三角則を補正する式を求めている<sup>②</sup>。野田らの式は、1%以内の誤差で精度よく応力集中係数を求めることができるが、式が複雑であるとともに、適用範囲により複数の式を使い分ける必要があるなどの課題がある。

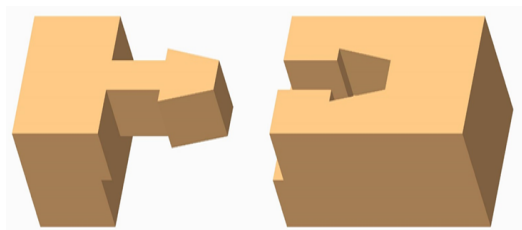


図1 鎌継手

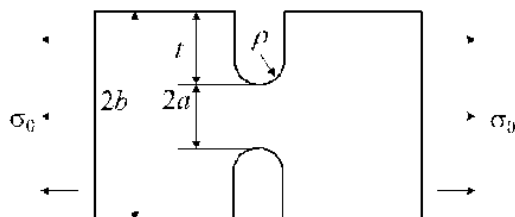


図2 任意の切り欠き深さを有する帯板

そこで、ノイバーの三角則を基に、FEMなどの結果を基に、任意の切り欠き形状をもつ帯板の応力集中係数を求めることができる簡易な計算式を提案した。

$$\alpha_N = c + \frac{\sum_{i=1}^n a_i \left(\sqrt{\frac{t}{\rho}}\right)^i \sum_{j=1}^n b_j \left(\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right)^j}{\sqrt{\left\{\sum_{i=1}^n a_i \left(\sqrt{\frac{t}{\rho}}\right)^i\right\}^2 + \left\{\sum_{j=1}^n b_j \left(\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right)^j\right\}^2}} \quad (1)$$

提案式について、野田らの式に一致するよう非線形最小二乗法でカーブフィッティングした結果、野田らの式に対して1%程度の誤差で一致し、精度よく応力集中係数を求めることができた。

また、提案した式の係数は3個であり、野田らの補正式の係数21個に対して大幅に少なくなっており、簡易な計算式となった。

### 3. 一軸引張荷重下での継手応力解析

鎌継手が一軸引張荷重を受ける場合における応力解析を実測および数値解析を用いて行い、継手部の応力集中について検討した。継手材質は、等方材料としてアクリル、直交異方性材料としてアガチス材を選定している。はじめに、引張荷重を加えたときの鎌継手のひずみ分布を画像相関法 (DIC) で測定し、鎌継手の継手応力集中部を調べた。アクリル材、アガチス材ともに男木部は鎌あご部根元、女木部は鎌あご部先端に応力集中が生じていることがわかった。また、直交異方性材料であるアガチス材の応力集中係数は、等方性材料であるアクリル材に対して2倍程度であった。これは、異方性材料で引張方向の縦弾性係数が横方向の縦弾性係数より大きい場合、応力集中係数が大きくなるためである。次に、DICの観測結果に整合するようにモデル条件を設定しFEMを行った。FEMの結果は、DICの結果によく一致し、両解析の解析結果は妥当性を持つことを確認できた。さらに、鎌継手の寸法パラメーターを変えて解析を行い、図3に示す鎌継手寸法と継手応力集中係数の関係を明らかにした。その結果を元に、以下に示す等方性材料、直交異方性材料それぞれに対する男木部、女木部各々に対する継手応力集中係数を算出する計算式を提案している。

$$\alpha_m = \left( c_{Dm} + a_{Dm} b_{Dm} \sqrt{\frac{S^* D^*}{R^* (a_{Dm}^2 S^* + b_{Dm}^2 D^*)}} \right) \frac{1}{D^*} + a_{Sm} \left( a_{Sm} b_{Sm} \sqrt{\frac{S^* D^*}{R^* (a_{Sm}^2 S^* + b_{Sm}^2 D^*)}} \right) \frac{1}{S^*} + a_{Mm} \sqrt{\frac{D^* 3S^*}{R^* L^{*2}}} \quad (2)$$

$$\alpha_f = \left( c_{Df} + a_{Df} b_{Df} \sqrt{\frac{S^* D_f^*}{R^* (a_{Df}^2 S^* + b_{Df}^2 D_f^*)}} \right) \frac{1}{D_f^*} + a_{Sf} \left( a_{Sf} b_{Sf} \sqrt{\frac{S^* D_f^*}{R^* (a_{Sf}^2 S^* + b_{Sf}^2 D_f^*)}} \right) \frac{1}{S^*} + a_{Mf} \sqrt{\frac{D_f^* 3S^*}{R^* L^{*2}}} \quad (3)$$

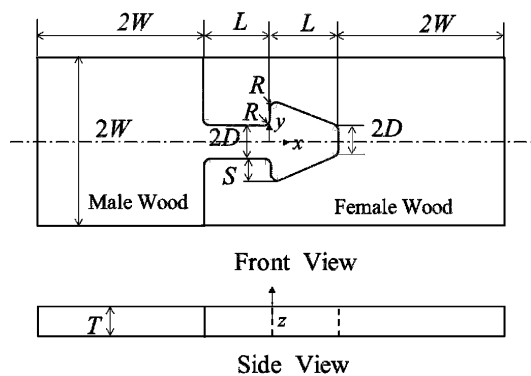


図3 鎌継手寸法

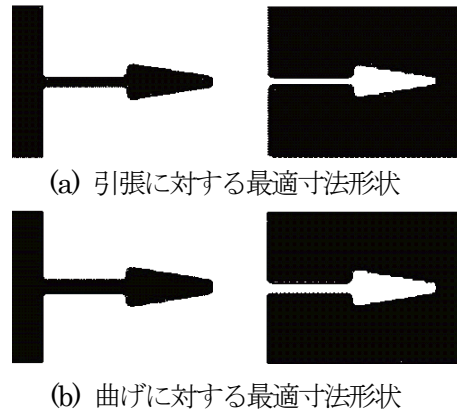


図4 最適寸法形状

提案した式は、FEM との平均誤差は、等方性材料は2%以下、直交異方性材料は3%以内の誤差であった。さらに、提案した計算式から、図 4(a)に示す鎌継手が一軸引張荷重を受ける時の最適寸法形状を求めた。求めた最適寸法形状に生じる最大主応力は、伝統的に決定された寸法形状の最大主応力に比べて約10%小さく、提案した計算式の有用性が確認された。

#### 4. 曲げ荷重下での鎌継手応力解析

鎌継手が曲げを受ける場合における応力解析を FEM により行い、継手部の応力集中について検討した。継手上半において、男木は鎌あご部の付け根、女木は鎌あご部先端に応力集中が生じており、応力分布は引張力が作用した場合の応力分布に近い。これは、継手上半分は、曲げにより引張応力が生じるためと考えられる。一方、継手下半分はほとんど応力集中が生じていない。これは、継手下半分は、曲げにより圧縮応力が生じるが、男木、女木の継手接触部が圧縮応力により密着するため、継手がない部材と同様、圧縮応力が一様に作用するためと考えられる。次に、寸法パラメータを変えて応力解析を行い、曲げ荷重について男木部、女木部各々に対する継手応力集中係数を算出する計算式を提案した。提案した式は、FEM との平均誤差が3~5%程度の誤差であった。

提案した計算式を用いて、図 4(b)に示す曲げ荷重を受ける鎌継手に生じる応力集中係数を最小にする最適形状を求めた。曲げ荷重に対する最適形状は、ほぼ引張に対する最適形状と同形状であった。これは、引張及び曲げ荷重が作用すると、継手部には共に引張応力が生じ、同様の応力集中が生じるためであると考えられる。このことから、引張に対する最適形状は、曲げ荷重に対する継手応力集中係数も同様に減少させ、従来形状に比べて引張及び曲げの両方に強い形状であることを確認した。

#### 5. 熱荷重を受けるときの継手部の熱応力解析

継手部に、図5に示すような熱荷重が作用したときに継手部に生じる熱ひずみ及び熱応力を解析し、熱応力が引張強度に与える影響を明らかにした。

継手試験片の材質は、等方性材料としてアクリル材、直交異方性材料としてアガチス材を選定した。

DIC による熱ひずみ解析実験では、アルミフィルムヒーターによる加熱により熱荷重が与えられた鎌継手試験片について、DIC による熱ひずみ分布およびサーモグラフィによる温度分布を観察し、これらの結果から熱ひずみを測定した。

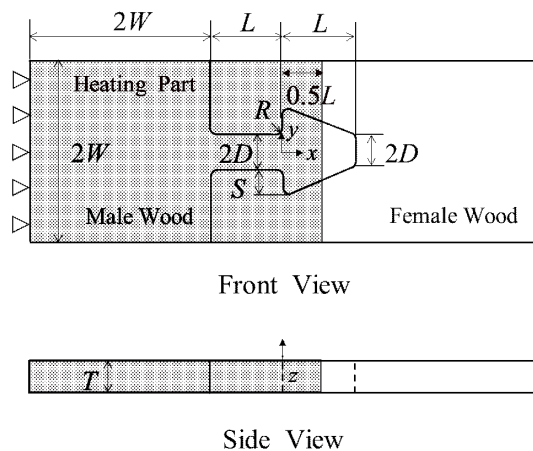


図5 鎌継手の熱荷重試験

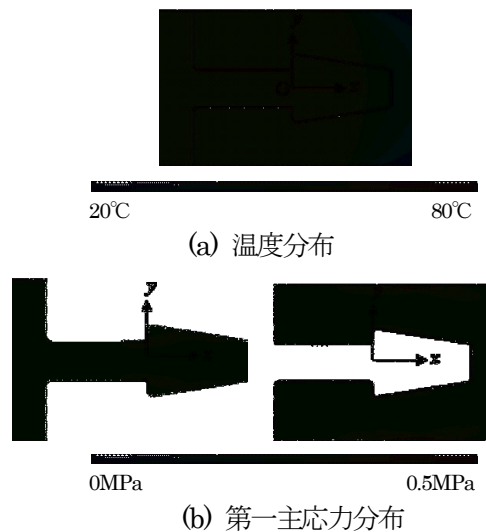


図6 熱応力分布(アガチス材)

次に、FEMにおいて、解析モデルを熱ひずみ解析試験に適合するよう設定し、DIC 解構造—伝熱の連成解析を行った。両者のひずみ解析結果を比較検討した結果、温度分布、熱ひずみ分布の傾向はよく一致しており、FEMにより継手の熱応力解析が十分可能であることがわった。そのうえで、FEMにより熱応力分布を求めた。

図6に示すように、引張及び曲げを受けるときの応力集中箇所である鎌あご部に熱応力が生じていた。加熱による熱荷重は、継手の引張及び曲げ強度に影響を及ぼすことが明らかになった。

## 6. 結 言

本研究では、代表的な継手形状である鎌継手の強度向上に資するため、引張、曲げ荷重及び熱荷重を受けるときの応力解析を行い、応力分布や応力集中を明らかにした。

一軸引張荷重及び曲げ荷重を受けるときの応力分布や応力集中について DIC による測定実験及び FEM による応力解析をおこなった。その結果を元に、男木、女木各々に対する応力集中係数を算出する計算式を提案した。さらに、提案した式を用いて、継ぎ手を一体の部材とするときの、引張荷重に対する最適な形状を求めた。

熱荷重を受ける鎌継手については、熱応力分布を DIC による測定実験、FEM による解析により、熱荷重により発生する熱応力が継手強度に与える影響を明らかにした。

## 参考文献

- (1) Neuber, H., Kerbspannungslehre, Springer-Verlag(1937), p.6
- (2) 野田尚昭, 世良政春, 高瀬康, 切欠きを有する段付丸棒および帯板試験片の応力集中係数の近似式, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.60, No.570(1994), pp.586-590.