

1. 緒言

木材の構造材としての効果的利用には、継手が必要であり、昔より種々の継手が用いられてきている。鎌継手は図1に示すような、男木の先端に蛇の鎌首のような台形のほぞを持った伝統的な継手である。鎌継手は、長手方向に引張力を受けたとき、鎌あご部分の付け根に応力集中が生じ、この部分から鎌頭部にせん断破壊が生じる。右京らによると、鎌あご部幅に対して鎌頭部長さを大きくすると、引張耐力が大きくなることが明らかにされている¹⁾。しかし、フィレット半径を変化させた際の応力集中などの強度評価はあまりされていない。そこで本研究では、フィレット半径の変化が鎌継手の強度へ与える影響について調べることを目的とする。

まず、中村の提案した継手応力集中係数²⁾より得た計算式から鎌継手におけるフィレット半径と応力集中係数の関係について調べる。その後、従来寸法($R=1[\text{mm}]$)のフィレット半径を $R=2[\text{mm}]$, $R=3[\text{mm}]$ とした寸法に対して、DICを用いた一軸引張荷重下での応力評価及び破壊試験による強度評価を行い、先行研究において山上が強度評価をおこなった従来寸法の鎌継手³⁾の結果と比較する。材料にはアガチスを用いる。得られた応力分布をFEM解析結果と比較することで、DICの妥当性を評価する。

2. 一軸引張での木材鎌継手応力集中係数

脆性材料の破壊条件は最大主応力説によく適合する。木材は引張に対して脆性破壊を示すため⁴⁾、木材の破壊も他の脆性材料と同様、最大主応力説に従うと考える。通常、応力集中係数は、最大応力値と最小断面部の平均応力値との比として与えられるが、継手の場合、男木部と女木部で最小断面積が異なることから、部材の幅全体の断面の平均応力値と最大主応力値との比を継手応力集中係数として、先行研究において中村は鎌継手の男木を α_m 、女木を α_f として応力集中係数を以下のように定義した²⁾。

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

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

本研究では、最適寸法を導出する上で鎌継手に加わる引張荷重は200[N]としている(引張応力 $\sigma_0=1.67[\text{MPa}]$)。ここで、 $L^*=L/W$, $D^*=D/W$, $D_f^*=D_f/W=1-D^*-S^*$, $S^*=S/W$, $R^*=R/W$ 。

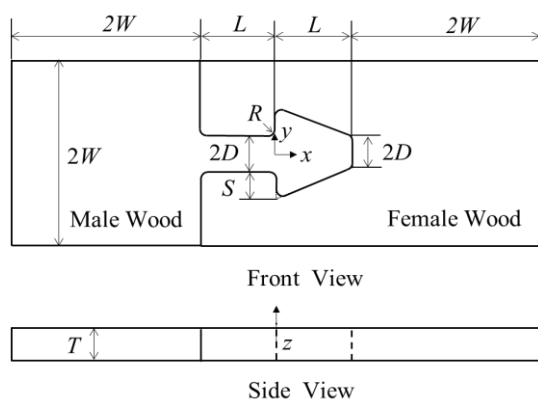


図1 鎌継手の概略図

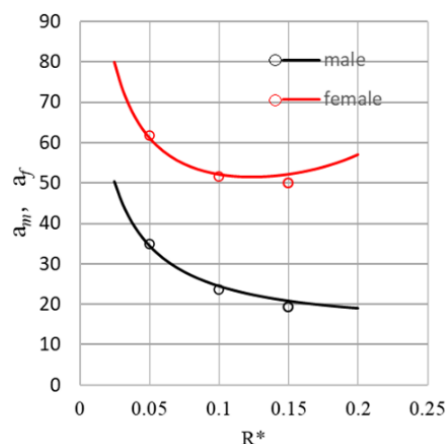


図2 フィレット半径と応力集中係数の関係

図2に、提案する式(1), (2)より得られる継手応力集中係数 α_m , α_f と各寸法パラメーターとの関係を、実線で示してある。同時に、記号でFEMの結果を示している。計算式とFEMとの差は、男木、女木共に平均3%程度である。従って、提案する継手応力集中係数の計算式により、数%程度の誤差で、継手応力係数を算出することができる。図2は R^* と S^* と α_m , α_f の関係である。式(1), (2)による計算から、応力集中が生じる女木部では R^* が大きくなるにつれ α_f が小さくなり、 S^* が大きくなるにつれて、 α_f が大きくなることがわかった。また、図1からわかるように寸法の定義上 R^* が大きくなると S^* が大きくなる。ここでは R^* と S^* を同時に変化させた際の関係について調べるために、 $L^*=1.25$, $D^*=0.5$ で固定し、従来寸法の定義に基づいて R^* と S^* の関係を以下のように定義した。

$$S^* = 2R^* + 0.1 \quad (3)$$

図2で女木部の継手応力集中係数は男木部よりも常に大きい値となっている。 $R^*=0.1$ から $R^*=0.15$ にかけて応力集中が生じる女木部の継手応力集中係数が最小となっているが、加工の兼ね合いにより本研究では $R^*=0.1$, $R^*=0.15$ に注目する。 $R^*=0.1$ において継手応力集中係数は $\alpha_m=24.4$, $\alpha_f=52.1$, $R^*=0.15$ において継手応力集中係数は $\alpha_m=20.7$, $\alpha_f=52.1$ を得ている。従来形状($R^*=0.05$)における継手応力集中係数は $\alpha_m=34.5$, $\alpha_f=61.3$ であり、 $R^*=0.1$, $R^*=0.15$ の女木部継手応力集中係数は従来の形状に対して約15%小さい値となっている

3. アガチスの鎌継手の一軸引張試験

鎌継手の一軸引張試験を行い、引張荷重下での男木の応力分布をDICで測定した。DICは、測定対象表面にスベックルパターンと呼ばれるランダムな模様を塗布し、サンプルの変形前後の画像を比較解析することにより、計測範囲全体の変位・ひずみ分布やその方向を非接触に求めることができる手法である⁹⁾。表1に示す寸法で試験片を作成し、ランダムパターンを付与する。直径3.2[mm]の穴を男木、女木の端こそれぞれ6つ開け、ピンを介して引張試験機に接続した。試験荷重付与は変位制御で行い、クロスヘッドの変位速度は0.5[mm/min]、荷重はクロスヘッドに取り付けられたロードセル(定格荷重1[kN]、分解能0.01[N])で計測している。DICに用いる画像は、無載荷時および荷重が200[N]のときに試験機を一時停止させて、試験片をデジタルカメラで撮影する。カメラと試験片の距離は、約800[mm]としている。このとき、画像解像度は、約0.025[mm/pixel]となる。また、カメラのシャッタースピードは、出水らによるDICの精度に関する既往の研究⁹⁾を参考に1/2[s]に設定する。画像相関解析は、MatLabで動作する2次元DIC解析ソフトNcorr(Ver.2.1)⁹⁾を用いる。サブセット半径は、30[pixel]、サブセット間隔は3[pixel]、ひずみ半径を10[pixel]に設定する。有限要素法解析は、汎用ソフトであるANSYSを用い

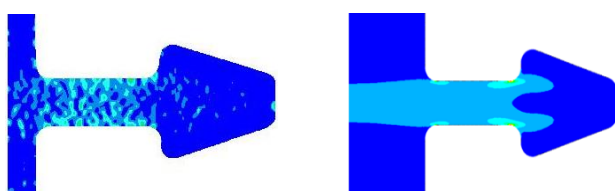
て行う。本モデルは、図1に示すように男木と女木をはめあうようモデルを作成し、継手部を接触領域として弾性解析を行う。モデルの座標は、試験片長さ方向を x 軸、幅方向を y 軸、厚さ方向を z 軸とする。寸法は継手の試験片寸法と同様にする。荷重を試験片の長さ方向に200[N]の引張り荷重が作用するよう、男木試験片の横断面端部に1.67[MPa]を作用させる。また、拘束条件は、女木試験片の横断面端部の X 方向変位を拘束する。また、DIC、FEMで得られた各寸法の応力集中係数を表2に示す。DICにおいて200[N]の荷重が加わった際、求めた $R=2$ [mm]、 $R=3$ [mm]に生じる最大主応力は、 $R=1$ [mm]の最大主応力に比べて小さく、女木の応力集中係数を比較すると $R=2$ [mm]で約18%、 $R=3$ [mm]で約19%小さい。ゆえに200[N]の荷重下においては $R=2$ [mm]、 $R=3$ [mm]の強度が $R=1$ [mm]の鎌継手に比べ優れている。DICで測定している最大主応力は、FEMの計算値より、半分程度となっている。これは、DICにおいては、各サブセットで観測されるひずみ値がサブセット内の平均的なひずみ値となるため、サブセット内の最大値と差異が生じたものと考えられる。このことは、サブセット半径を変えて上記のDIC解析を行った結果、サブセット半径が大きくなるにつれ、測定される最大ひずみ値が小さくなる傾向であることから確認できる。また、図3に男木、図4に女木の $R=3$ [mm]とした際の最大主応力分布をDIC、FEMそれぞれ示した。各応力の分布は、DIC、FEMで概ね一致している。応力集中係数は導出時に200[N]の荷重を加えた際の継手応力集中係数に基づいて導出されている。そのため実験的に破壊試験を行うことで $R=1$ [mm]、 $R=2$ [mm]、 $R=3$ [mm]の破壊強度に関する評価を行う。

表1 試験片の寸法

W	L	D	S	R	T
20	25	10	4	1	3
20	25	10	6	2	3
20	25	10	8	3	3

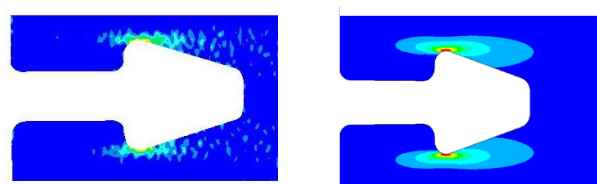
表2 DICとFEM解析によって求めた応力集中係数

	male		female	
	DIC	FEM	DIC	FEM
$R=1$ [mm]	13.9	35.0	37.7	61.7
$R=2$ [mm]	12.8	23.7	31.1	51.6
$R=3$ [mm]	11.6	19.2	30.7	49.9



DIC(male) FEM(male)
0[MPa] 35[MPa]

図3 男木主応力分布($R=3$ [mm])



DIC(female) FEM(female)
0[MPa] 35[MPa]

図4 女木主応力分布($R=3$ [mm])

4. アガチス鎌継手の破壊試験

3章までに測定してきた $R=2$ [mm]、 $R=3$ [mm]の合計2種類の継手に破壊試験を行い、先行研究において山上が行った $R=1$ [mm]の試験片の破壊試験結果⁶⁾と比較する。破壊試験を行う際、引張試験条件は3章同様ではあるが荷重は破断させるまで荷重を加える。 $R=1$ [mm]を22本、 $R=2$ [mm]を12本、 $R=3$ [mm]を12本の試験片に対して破壊試験を実施した。図5に3寸法鎌継手の破壊時の最大荷重平均値、図6に各寸法形状平均に近い3本を抽出した荷重とストロークの関係を示した。平均最大荷重は $R=1$ [mm]と比べて $R=2$ [mm]で約10%、 $R=3$ [mm]で約15%大きい値となり、破壊強度においても $R=2$ [mm]、 $R=3$ [mm]の強度が $R=1$ [mm]の鎌継手に比べ優れていることがわかる。

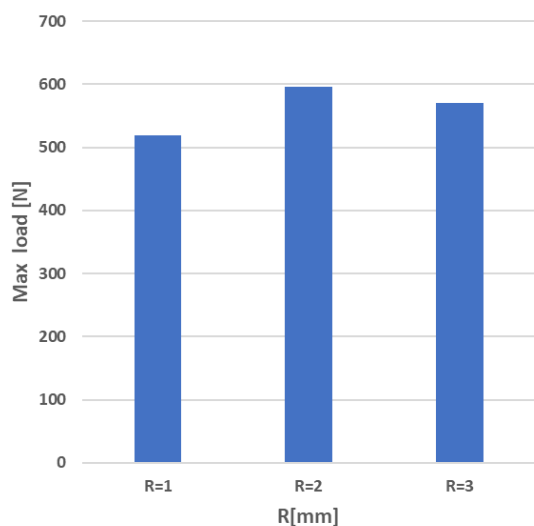


図5 最大平均荷重

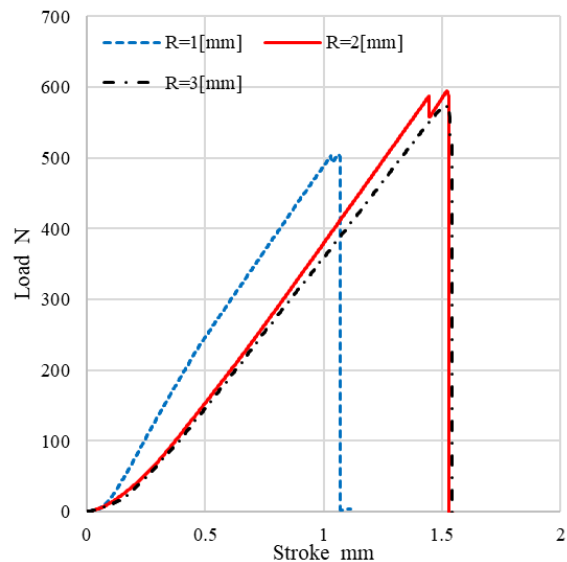


図6 各寸法平均値代表

5. 結言

本研究では、フィレット半径の変化が鎌継手の強度へ与える影響について調べることを目的とし、DICを用いた引張試験と FEM 解析より得た応力分布から応力集中に関する評価を行った。また、それらの鎌継手の破壊試験を行い、破壊強度について調べた。以下に得られた結果を示す。

- 1) 中村の提案した継手応力集中係数を算出する計算式²⁾より鎌継手が一軸引張荷重を受ける際のフィレット半径と鎌あご部長さの関係を確認した。
- 2) 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。
- 3) 女木部継手応力集中係数は $R=3[\text{mm}]$ で $\alpha_r=30.7$ が最小の値となり、 $R=3[\text{mm}]$ のときに破断までの約 4 割の荷重下においては最も強度が優れていることが確認できた。
- 4) 最大荷重平均値は $R=2[\text{mm}]$ で $598.1[\text{N}]$ が最大の値となり、 $R=2[\text{mm}]$ のときに最も破壊強度が優れていることが確認できた。

6. 参考文献

- 1) 宇京斉一郎, 林知行, 原田真樹, 軽部正彦, “鎌継手におけるせん断面の繊維方向長さが引張強度に与える影響” 木材学会誌 Vol. 55, No. 2 (2007), pp. 90-98.
- 2) 中村匠, 引張, 曲げ荷重及び熱荷重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, 中央大学博士論文, (2021), pp. 17-86
- 3) 山上雄大朗, 直行異方性を考慮した引張を受ける鎌継手の応力解析及び最適化, 中央大学修士論文, (2021), pp. 30-63
- 4) 岡野健, 祖父江信夫, 木材科学ハンドブック, 朝倉書店, (2006), p.36
- 5) 出水亨, 松田浩, 戸次翔, 森崎雅敏, 内野正和, デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 68, No. 2(2012), pp.I_683-I_690.
- 6) 岡野健, 祖父江信夫, 木材科学ハンドブック, 朝倉書店, (2006), pp.350-363
- 7) 有川秀一, 村田学, 吉田陸, 米山聡, 藤本慶久, 大本洋平, 画像相関法の測定精度に対するサブセットサイズとゲージ長の影響, 実験力学論文集, Vol.16, No.2, (2016), pp.162-167