

画像相関法による継手の応力解析に関する研究

Study on stress analysis of joint by image correlation method

精密工学専攻 4号 荒井優子
Yuko Arai

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。伝統的な継手形状は経験的に求められたもので、応力集中などの強度評価に関する解析的な評価はあまりなされていない。そこで本研究では、デジタル画像相関法 (DIC) により引張り荷重下での鎌継手の応力解析を行う。

鎌継手は、Fig.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ると、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⁾。

DIC の結果を評価するため、FEM 解析の結果と比較する。鎌継手は男木、女木二つの部材をはめ合わせて構成されていることから、継手部を接触領域とする FEM 解析を行う。鎌継手試験片の一軸引張試験を行い、デジタル画像相関法 (DIC) により応力分布を測定する。材料には中質繊維板 (MDF) とアガチスを用いる。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。また、種々の形状で DIC による応力解析を行い、鎌頭部長さ L が決まっているときの最適な鎌あご部幅 S を求める。

2. MDF の鎌継手の引張試験

2.1 引張試験による MDF の縦弾性係数の測定

MDF とは、木材及びその他の植物繊維を主な原料として成形した板状製品で、密度 0.35g/cm^3 以上のものをいう⁽²⁾。引張試験により MDF の引張方向の縦弾性係数 E 、ポアソン比 ν を求める。4mm×450mm×25mm の MDF 材試験片を用いる。試験片に 3 軸ひずみゲージ (共和電業, 三軸重ね配置, ゲージ長 2mm) を貼り、ひずみを測定している。島津製万能オートグラフ AGS-J を用いて、引張速度 0.5mm/min 、最大試験力 0.1kN で引張試験を行う。試験結果より応力—ひずみ線図を Fig.2 に示す。縦弾性係数 E は 4.08GPa となる。Fig.3 に横ひずみと縦ひずみの関係を示す。ポアソン比 ν は 0.34 となる。

2.2 画像相関法による MDF の鎌継手の応力解析

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 で測定している。DIC は、測定対象表面にスペ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⁽³⁾。鎌継手の試験片は MDF を使用し、試験片モデルを 3DCAD ソフト creo3.0 (PTC 社) で作成し、三次元加工機で継手形状を加工する。継手試験片寸法を Table.1 に示す。鎌あご部長さ S を 4, 6, 8mm と変化させる。試験片作成後、試験片表面にランダムパターンを付与するため、白色のスプレーで下地処理し、下地の上に黒色のスプレーによりランダムパターンを付与する (Fig.4)。

Fig.5 に示すよう直径 9.5mm の穴を男木、女木の端にそれぞれ開け、ピンを介して引張試験機に接続している。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 0.5mm/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 1kN 、分解能 0.01N) 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 200N 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 (ニコン D40X, 解像度 3872×2592 , 画素数 10.2Mpixel , レンズ: シグマ光機, $17\text{-}70\text{mm}$, $F2.8$) で撮影する。カメラと試験片の距離は、約 200mm としている。このとき、画像解像度は、約 0.045mm/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⁽³⁾を参考に $1/2\text{s}$ 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)⁽⁴⁾ を用いる。サブセット半径は、 30pixel 、サブセット間隔は 2pixel 、ひずみ半径を 5pixel に設定する。

2.3 FEM 解析による MDF 鎌継手の応力解析

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、Fig.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。

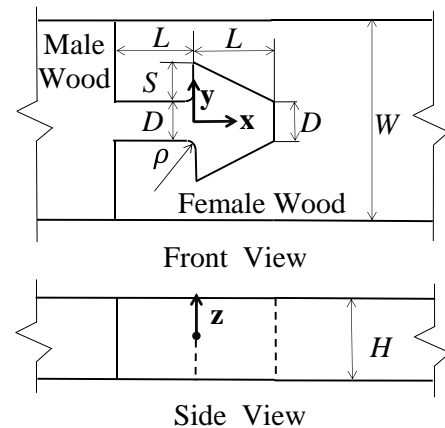


Fig.1 A schematic drawing of kama-tsugite

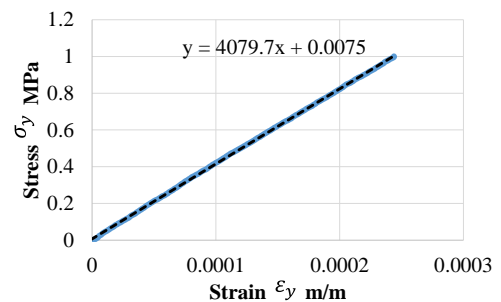


Fig.2 Relationship between stress and strain

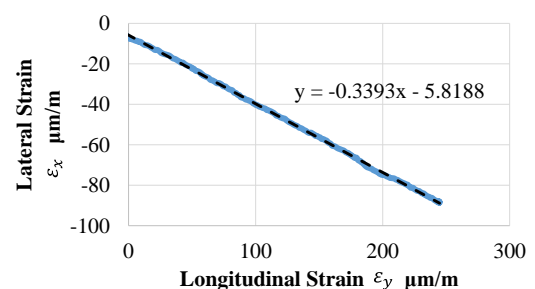


Fig.3 Relationship between longitudinal strain and lateral strain

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。また、本モデルの対称性を考慮して、幅方向について上半分をモデル化する。材質は MDF で、材料定数は引張試験を行って求めて得られた値を使用する。荷重は、試験片の長さ方向に 200N の引張り荷重が作用するように、MDF の男木試験片の横断面端部に 1.25MPa 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。応力集中中部付近の最小要素寸法は、フィレット半径 ρ の 1/200 とする。

2.4 MDF の鎌継手の応力解析結果と応力集中係数

Fig.6 に男木, Fig.7 に女木の鎌あご長さ $S=8\text{mm}$ の女木の引張り方向 (x 方向) の応力分布, Fig.8 に男木, Fig.9 に女木の幅方向 (y 方向) の応力分布, Fig.10 に男木, Fig.11 に女木のせん断応力分布を示す。(a)は FEM, (b)は DIC による応力分布である。各応力の分布は、FEM・DIC で概ね一致する。また、各応力成分は鎌あご部に集中している。これは、鎌継手に引張り荷重が作用した時、鎌あご部付け根から破壊が進む結果と整合する。

Table.1 Dimensions of MDF test pieces

W	40 mm
L	30 mm
D	10 mm
H	4 mm
ρ	1 mm
S	4,6,8 mm

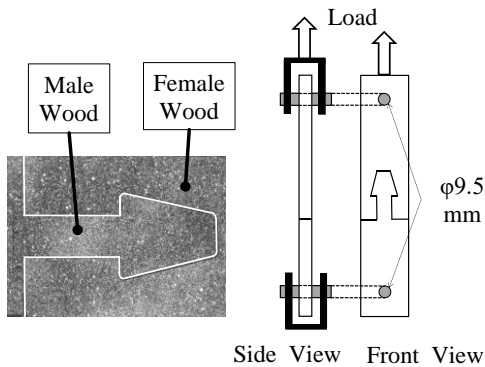


Fig.4 Random pattern attached on the surface of the MDF test pieces

Fig.5 Setup of the tensile loading test

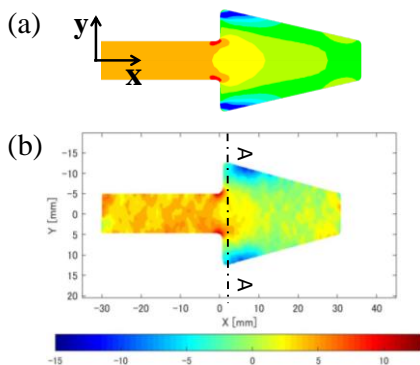


Fig.6 X direction normal stress on MDF male wood test pieces with $S = 8\text{mm}$ ((a)FEM, (b)DIC) [MPa]

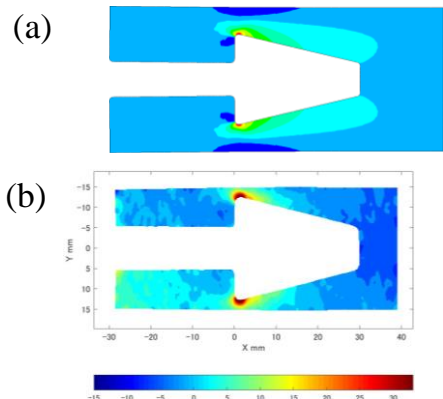


Fig.7 X direction normal stress on MDF female wood test pieces with $S = 8\text{mm}$ ((a)FEM, (b)DIC) [MPa]

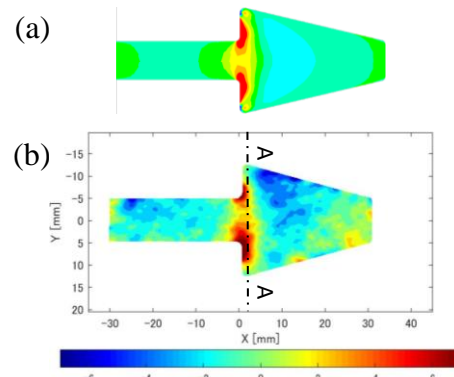


Fig.8 Y direction normal stress on MDF male wood test pieces with $S = 8\text{mm}$ ((a)FEM, (b)DIC) [MPa]

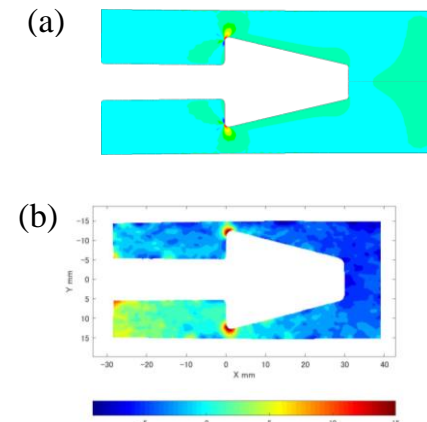


Fig.9 Y direction normal stress on MDF female wood test pieces with $S = 8\text{mm}$ ((a)FEM, (b)DIC) [MPa]

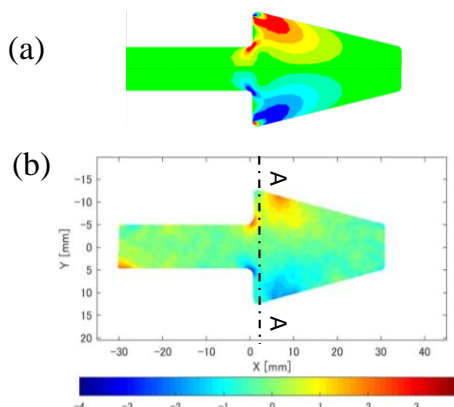


Fig.10 Shear stress on MDF male wood test pieces with $S = 8\text{mm}$ ((a)FEM, (b)DIC) [MPa]

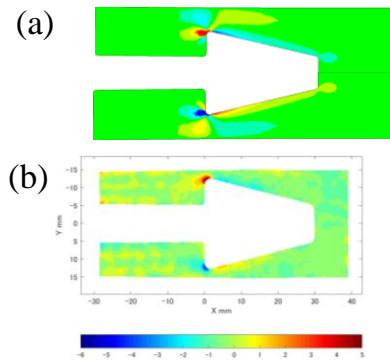


Fig.11 Shear stress on MDF female wood test pieces with $S = 8\text{mm}$ ((a)FEM, (b)DIC) [MPa]

Fig.12, 13, 14 に $S = 8\text{mm}$ の男木の鎌あご部近傍 A-A 断面 ($x = 0.5\text{mm}$) の各方向の応力成分の分布を示す。横軸は、引張方向中心線からの距離を、縦軸は各応力成分を表す。実線は FEM 結果、プロットは DIC 結果である。x 軸方向応力については、DIC のピーク値に偏りがあるが概ねよく一致している。鎌あご部での応力集中の偏りは、試験片の加工精度の悪さによるものと考えられる。y 軸方向応力については、鎌首部間 ($y = -5 \sim 5\text{mm}$) と鎌あご部フィレット付近 ($y = -5\text{mm}, 5\text{mm}$ 付近) の値は概ね一致している。鎌あごの先端部分 ($y < -5\text{mm}, 5\text{mm} < y$) の最小値が一致していないのは、DIC の分解能の限界によりピーク値が測定できないことによるものだと考えられる。せん断応力についても同様に、鎌首部間と鎌あご部フィレット付近の値は概ね一致している。

以上から、DIC と FEM の結果は、ピーク値を除きひずみ分布が一致していることから、FEM の解析結果は実際のひずみ分布を再現していると考えられる。

次に、鎌継手の最適形状を簡便に求めるため、FEM と DIC の結果から男木、女木の応力集中係数を導出する。

応力集中係数を以下に示す。

$$\alpha = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \quad (1)$$

女木端部に作用する引張応力を公称応力 σ_0 とし、応力集中部の最大主応力を σ_1 とする。

Table.3 に、FEM, DIC による $S = 4, 6, 8\text{mm}$ の男木・女木の応力集中係数の結果を示す。DIC の結果は、男木が FEM の 70% 程度、女木が 88~107% 程度となる。この差は、DIC の測定精度によるものと考えられる。また、FEM と DIC の両者とも、 S が大きくなると、男木は応力集中係数が小さく、女木は大きくなるのが分かる。

3. アガチスの鎌継手の引張試験

3.1 引張試験によるアガチスの縦弾性係数の測定

アガチスとは、ナンヨウスギ科の針葉樹で、大陸部を除く東南アジアから太平洋地域を主産地としている。主に建築、家具などに用いられる⁽⁶⁾。

2.1 節と同様に、引張試験によりアガチスの繊維方向の縦弾性係数 E_L 、柁目面でのポアソン比 ν_{LR} を求める。3mm×450mm×25mm の MDF 材試験片を用いる。縦弾性係数 E_L は 16.4GPa となった。ポアソン比 ν_{LR} は 0.38 となった。半径方向の縦弾性係数 E_R 、接線方向の縦弾性係数 E_T 、柁目面でのせん断弾性係数 G_{RL} は針葉樹の弾性係数の平均値⁽⁶⁾より、それぞれ 1.23GPa, 0.66GPa, 0.98GPa とした。

3.2 画像相関法によるアガチスの鎌継手の応力解析

2.2 節と同様に鎌継手の引張試験を行い、引張荷重下での応力分布を DIC で測定した。継手試験片寸法を Table.3 に示す。S を 4, 6, 8mm と変化させた。荷重は 200N とした。

Fig.15 に男木の鎌あご長さ $S = 8\text{mm}$ の引張方向 (x 方向) の応力分布、Fig.16 に幅方向 (y 方向) の応力分布、Fig.17 にせん断応力分布を示す。Fig.18, 19, 20 に $S = 8\text{mm}$ の男木の鎌あご部近傍 A-A 断面 ($x = 0.5\text{mm}$) の各方向の応力変化のグラフを示す。横軸は、引張方向中心線からの距離を、縦軸は各応力成分を表す。丸プロットは DIC による MDF の結果、三角プロットは DIC によるアガチスの結果である。どの方向についても、アガチスは MDF と同様の応力分布がみられる。

Table.4 にアガチスと MDF の男木・女木の応力集中係数の結果を示す。アガチスの応力集中係数は、 $S = 8\text{mm}$ の女木を除いて MDF よりも小さくなる。アガチスは、男木の応力集中係数は $S = 6\text{mm}$ で最も小さくなる。女木は MDF と同様に、 S が大きくなると応力集中係数は大きくなる。 $S = 8\text{mm}$ で男木と女木がどちらも極端に大きくなっているため、試験片の加工精度の悪さによりかみ合わせに偏りが生まれ、片方の鎌あご部に応力が集中したと考えられる。

4. 結言

鎌継手の強度を解析的に評価するため、代表的な継手形状である鎌継手が、一軸引張を受ける場合の応力解析を行った。MDF の鎌継手に引張試験を行い DIC でひずみ分布を観測した。得られたひずみ分布を FEM 解析結果と比較した結果、両者の結果はよく一致し FEM の解析結果は妥当性を持つことを確認した。また、アガチスについても MDF と同様のひずみ分布を観測した。応力集中係数については、MDF では S が大きくなると男木は小さく、女木は大きくなるのが分かった。アガチスでは、男木は $S = 6\text{mm}$ で最も小さくなり、女木は S が大きくなると大きくなるのが分かった。 $S = 4 \sim 8\text{mm}$ の範囲では男木より女木の応力集中係数が大きくなるため、女木の応力集中が最も小さい $S = 4\text{mm}$ が最適形状であると考えられる。

参考文献

- (1) 宇京齊一郎, 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) 森林総合研究所, 木材工業ハンドブック, 丸善出版, (2004), pp.513-514.
- (3) 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.
- (4) Ncorr v1.2 <<http://www.ncorr.com/index.php>>, (accessed on 25 August, 2019).
- (5) 森林総合研究所, 木材工業ハンドブック, 丸善出版, (2004), p.22.
- (6) 岡野健, 祖父江信夫, 木材科学ハンドブック, 朝倉書店, (2006), p.155.

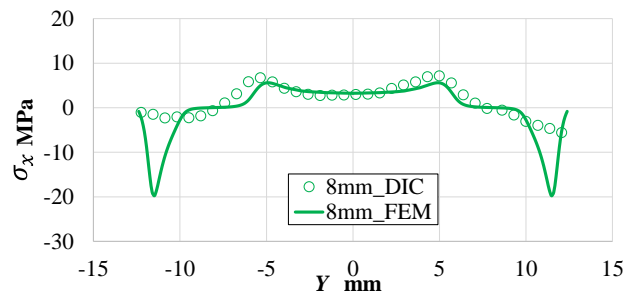


Fig.12 The distribution of σ_x along A-A cross section of MDF test pieces with $S = 8\text{mm}$

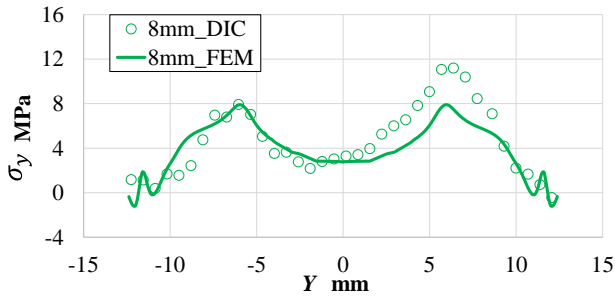


Fig.13 The distribution of σ_y in X direction along A-A cross section of MDF test pieces with $S = 8\text{mm}$

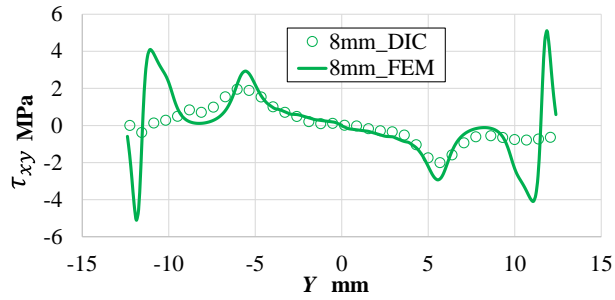


Fig.14 The distribution of τ_{xy} along A-A cross section of MDF test pieces with $S = 8\text{mm}$

Table.3 Stress concentration factor of MDF test pieces

	male		female	
	FEM	DIC	FEM	DIC
4 mm	17.4	11.9	24.9	23.6
6 mm	16.1	11.8	28.0	24.7
8 mm	15.8	10.9	32.9	35.4

Table.3 Dimensions of Agathis test pieces

W	40 mm
L	30 mm
D	10 mm
H	3 mm
ρ	1 mm
S	4,6,8 mm

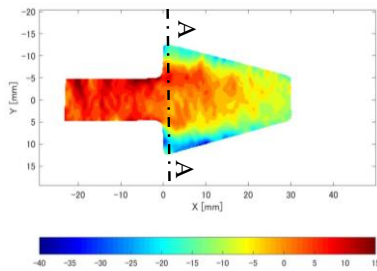


Fig.15 X direction normal stress on Agathis male wood test pieces with $S = 8\text{mm}$ [MPa]

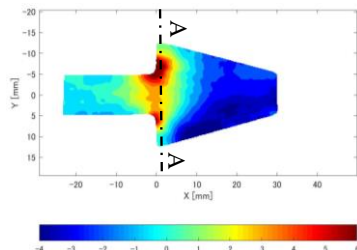


Fig.16 Y direction normal stress on Agathis male wood test pieces with $S = 8\text{mm}$ [MPa]

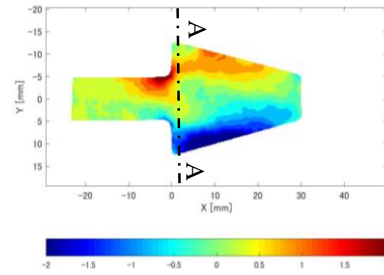


Fig.17 Shear stress on Agathis male wood test pieces with $S = 8\text{mm}$ [MPa]

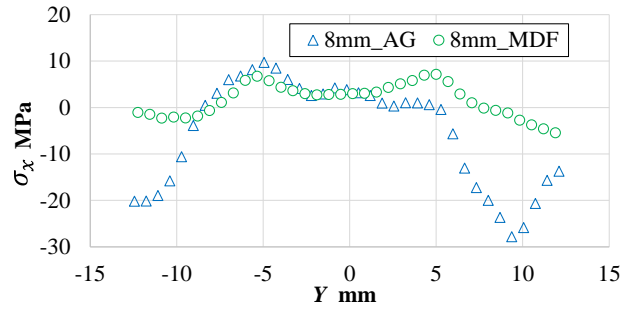


Fig.18 The distribution of σ_x along A-A cross section of Agathis test pieces with $S = 8\text{mm}$

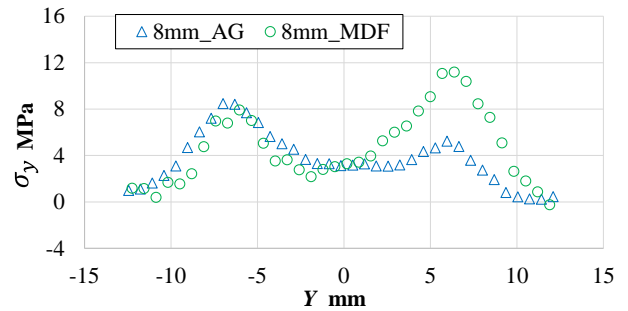


Fig.19 The distribution of σ_y along A-A cross section of Agathis test pieces with $S = 8\text{mm}$

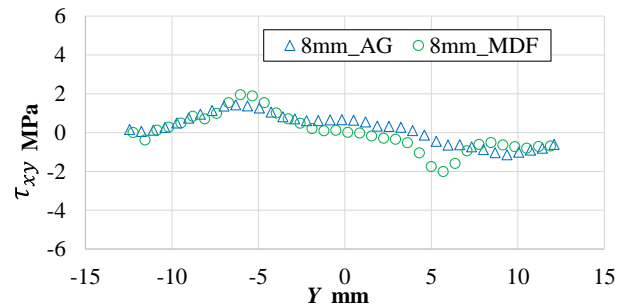


Fig.20 The distribution of τ_{xy} along A-A cross section of Agathis test pieces with $S = 8\text{mm}$

Table.4 Stress concentration factor of Agathis and MDF test pieces by DIC

	male		female	
	MDF	Agathis	MDF	Agathis
4 mm	17.4	6.4	24.9	19.3
6 mm	16.1	5.7	28.0	20.9
8 mm	15.8	10.1	32.9	44.1