

直交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

Stress analysis and optimization of gooseneck joint under uniaxial tensile load in consideration of orthotropic of wood material

精密工学専攻 57号 山上雄大朗
Yutaro Yamakami

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。そこで本研究では一軸引張荷重下での鎌継手に関してデジタル画像相関法(以下 DIC)を用いた応力解析を行う。

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⁾。

まず、鎌継手の最適寸法に関して中村⁽²⁾の提案した継手応力集中係数より得た計算式より導出した。

その後、鎌継手の最適寸法と伝統的に得られてきた従来寸法の鎌継手について、DICを用いて実験的に応力評価及び比較を行う。その際、DICで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。FEM解析は男木、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している。

また両寸法鎌継手について破壊試験を行うことで強度評価を行い鎌継手の最適寸法を実験的に評価する。

材料には節や年輪の影響が少ないアガチスを用いている。

2. 一軸引張での直交異方性材料最適寸法

2.1 鎌継手の応力集中係数

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⁽³⁾、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、継ぎ手の場合、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、以下のように定義する。なお最適寸法を導出する上で鎌継手に加わる引張荷重は200Nとしている(引張応力 $\sigma_0=1.67\text{MPa}$)。

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

2.2 継手応力集中係数を最小とする形状

中村は鎌継手の男木、女木の応力集中係数を以下のように定義している⁽²⁾。

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

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

ここで、 $L^*=L/W$, $D^*=D/W$, $D_f^*=D_f/W=1-D^* \cdot S^*$, $S^*=S/W$, $R^*=R/W$ 。無次元量 a_{Dm} , a_{Sm} , a_{Mm} , b_{Dm} , b_{Sm} , c_{Dm} , a_{Df} , a_{Sf} , a_{Mf} , b_{Df} , b_{Sf} , c_{Df} は係数である。これら10個の係数を、FEM解析により得られる男木部と女木部の継手応力集中係数結果と、式(2)と(3)から得られる継手応力集中値が一致するように、非線形最小二乗法によるカーブフィッティングにより求めている。数値解析は、各寸法パラメーターの全ての組み合わせ216通りに対して、行っている。

式(1)、式(2)の適用範囲は、FEM解析を行った寸法の範囲とし、 $L^*=1.0\sim 3.75$, $D^*=0.0625\sim 0.375$, $S^*=0.2\sim 0.4$, $R^*=0.025\sim 0.075$ とする。

Fig.2に、提案する式(2)、(3)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、寸法の範囲内において男木、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。

Fig.2は、 $L^*=1.25$, $S^*=0.2$, $R^*=0.05$ または $R^*=0.025$ としたときの、鎌首幅 D^* と継手応力集中係数の関係である。男木部では、 D^* が大きくなるにつれ α_m が小さくなる。これは、式(2)第1項において D^* が大きくなるにつれ鎌首部の断面積が大きくなり、鎌首部に作用する応力が小さくなるためである。女木部では、 D^* が大きくなるに従い、 α_f が大きくなる。これは、式(3)第1項において女木部の最小断面部 $D_f^*r=(1-D^* \cdot S^*)$ が、 D^* が大きくなるにつれ小さくなるためであると考えられる。継手全体の継手応力集中係数は、男木部または女木部いずれか大きい方の値であり、 D^* 以外のパラメーターが一定のとき($L^*=1.25$, $S^*=0.2$, $R^*=0.05$)、 $D^*=0.0625$ で継手応力集中係数が最小となる。

Fig.3は S^* と α_m , α_f の関係である。男木部は S^* の長さによらずほぼ一定である。これは、式(2)第2項において、 S^* が大きくなるにつれ女木部との接触断面積が大きくなり、 α_m が小さくなるためであるが、 a_{Dm} , a_{Sm} は S^* が大きくなるにつれ増大し、2つの要因が相殺され一定となっていると考えられる。女木部については S^* が大きくなるにつれ、 α_f が大きくなる。これは、式(3)第2項において S^* が大きくなるにつれ接触応力が小さくなることで α_f が小さくなるが、同時に第1項において D_f^*r が小さくなり α_f が大きくなる。ふたつの要因のうち、 D_f^*r の減少の影響が大きいため S^* が大きくなるにつれて、 α_f が大きくなるものと考えられる。継手全体では、 S^* 以外のパラメーターが一定のとき($L^*=1.25$, $D^*=0.25$, $R^*=0.05$)、 $S^*=0.2$ で継手応力集中係数が最小となる。

一軸引張荷重に対して最大主応力を最小にする形状として鎌継手の最適形状を提案式より求める。 $L^*=1.25$ で固定したとき、継手応力集中係数 α_m , α_f の大きい方が最小となる、 D^* ,

S^* , R^* の組み合わせを一般化簡約勾配法(GRG法)で求めると,
 $D^*=0.0625$, $S^*=0.2$, $R^*=0.075$ において最小値をとり, 継手
 応力集中係数は $\alpha_m = \alpha_f = 43.1$ を得ている. 従来形状における
 継手応力集中係数は, $\alpha_m = 46.3$, $\alpha_f = 80.9$ であり, 最適形状の
 継手応力集中係数は従来の形状に対して約半分となっている.

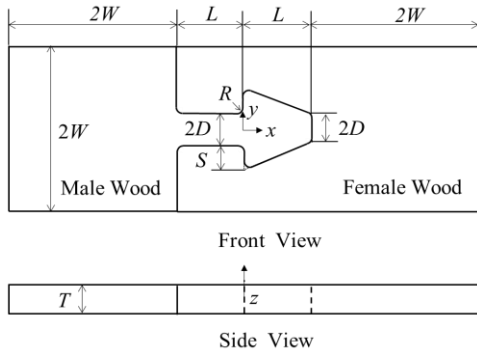


Fig.1 A schematic drawing of gooseneck joint

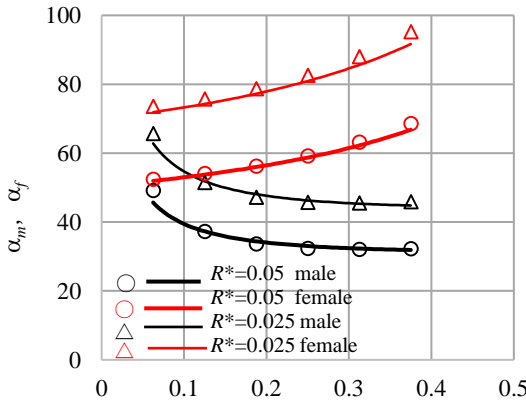


Fig.2 The relation between stress concentration factor and dimension parameters under tensile stress D^* (Line: proposed formulae, Symbol: FEM).

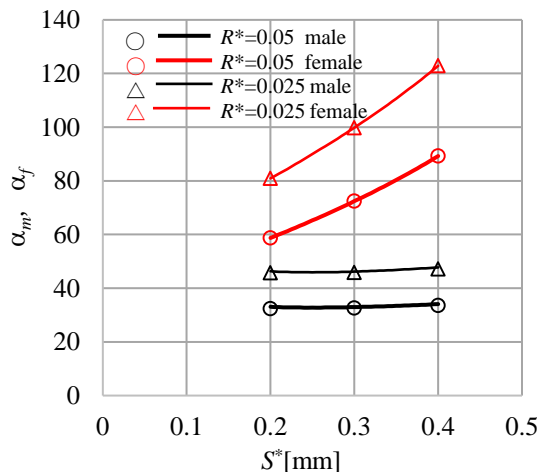


Fig.3 The relation between stress concentration factor and dimension parameters under tensile stress S^* (Line: proposed formulae, Symbol: FEM)

3. アガチスの鎌継手の一軸引張試験

3.1 鎌継手引張試験及びDIC測定

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⁽⁴⁾. 鎌継手の試験片はアガチスを使用し, 試験片モデルをAnsys Workbench専用のモデル作成3次元CADソフトDesignModeler(ANSYS社)で作成し, 3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. 提案式の最適寸法の値は $R^*=0.075$ であったが加工の兼ね合いより従来寸法, 最適寸法共に $R^*=0.05$ で統一させている. D の値2.5mmが最適寸法, 5mmの値が従来寸法である. 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⁽⁵⁾.

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, 黒色のスプレーで下地処理し, 下地の上に白色のエアスプレーを用いてランダムパターンを付与する(Fig.4).

Fig.5に示すよう直径3.2mmの穴を男木, 女木の端にそれぞれ6つ開け, 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, 無荷重時および荷重が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, 18-300mm, F3.5-6.3)で撮影する. カメラと試験片の距離は, 約800mmとしている. このとき, 画像解像度は, 約0.025mm/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⁽⁶⁾を参考に1/2s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3pixel, ひずみ半径を10pixelに設定する.

3.2 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.

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. 材質はアガチス材でアガチス材については, 縦弾性係数は高橋らが実験より求めた値⁽⁷⁾, ポアソン比は澤田が求めた針葉樹林の平均的な値を採用しておりTable2のようにしている⁽⁸⁾. 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, 男木試験片の横断面端部に1.67MPa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.

3.3 鎌継手の応力解析結果と応力集中係数

Fig.6に男木, Fig.7に女木の従来寸法最大主応力分布, Fig.8に男木, Fig.9に女木の最適寸法応力分布を示す. (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, FEM, DICで得られた各寸法の応力集中係数をTable2に示す.

DICにおいて200Nの荷重が加わった際, 求めた最適寸法に生じる最大主応力は, 従来寸法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約10%小さい. ゆえに200Nの荷重下においては最適寸法の強度が従来寸法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, 2, 3割程度小さい. 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⁽⁹⁾, 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。

最適寸法の男木部に関しては鎌の根部に応力集中が見られるため破壊が生じる前段階の高荷重下で折れてしまう可能性が存在する。

最適寸法は導出時に 200N 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。^[2]そのため実験的に破壊試験を行うことで従来寸法と最適寸法の破壊強度に関する評価を行う。

Table.1 Dimensions of agathis test pieces

	<i>W</i>	<i>L</i>	<i>D</i>	<i>S</i>	<i>R</i>	<i>T</i>
最適	20	25	2.5	4	1	3
従来	20	25	10	4	1	3

Table.2 Young modulus and poison's ratio of agathiswoods.

E_L [GPa]	E_T [GPa]	G_{LT} [GPa]	ν_{LT}	ν_{TL}
16.38	0.66	0.98	0.38	0.029

Table.3 Joint stress concentration factors of the goose-neck joint under tensile load calculated by DIC and FEM

	male	female
	DIC(FEM)	DIC(FEM)
従来寸法	13.9(25.4)	37.7(48.6)
最適寸法	21.2(38.7)	33.5(44.1)

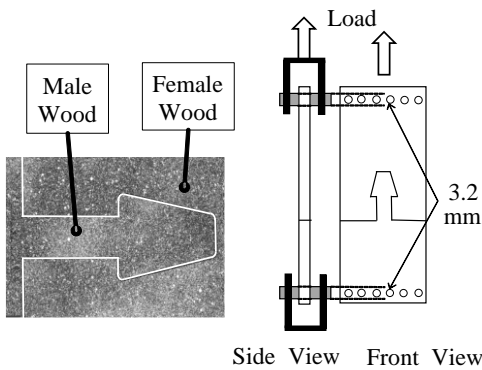


Fig.4 The Agathis specimen attached of the random pattern at surface

Fig.4 Setup of the tensile loading test

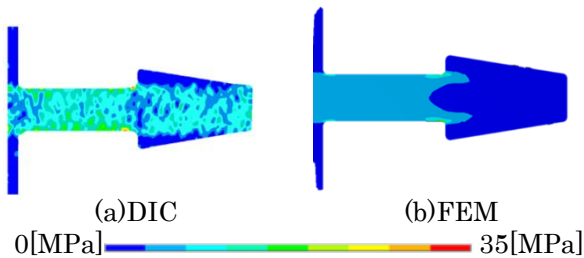


Fig.6 Distribution of 1st principal stress σ_1 on the Agathis male gooseneck joint (conventional shape) with tensile stress by (a)DIC and (b)FEM.

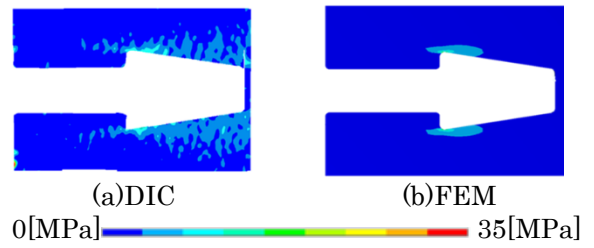


Fig.7 Distribution of 1st principal stress σ_1 on the Agathis female gooseneck joint (conventional shape) with tensile stress by (a)DIC and (b)FEM.

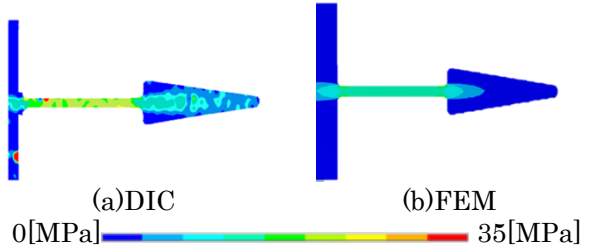


Fig.8 Distribution of 1st principal stress σ_1 on the Agathis male gooseneck joint (optimum shape) with tensile stress by (a)DIC and (b)FEM.

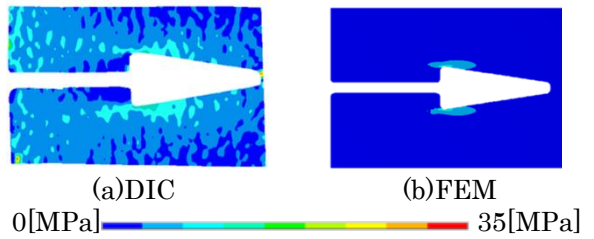


Fig.9 Distribution of 1st principal stress σ_1 on the Agathis female gooseneck joint (optimum shape) with tensile stress by (a)DIC and (b)FEM.

4 アガチス鎌継手の破壊試験

4.1 鎌継手の引張荷重による破壊試験条件

破壊強度評価を行う際、3項までに測定してきた従来寸法、最適寸法に加え寸法 D の値がおよそ中間にあたる $D=5$ [mm] の継手を作成し合計 3 種類の継手に破壊試験を行う。破壊試験を行う際、引張試験条件は 3 項同様ではあるが荷重は破断させるまで負荷を加える。試験片に加わる荷重の分布を測定するために 100N 枚に撮影を行う。従来寸法試験片 21 本、最適寸法試験片 16 本、中間寸法 11 本に対して破壊試験を実施した。

4.2 鎌継手の破壊試験結果

従来、最適及び中間寸法 3 種類の試験片を作成し一軸引張により試験片を破断させ強度評価を行った。

Fig.10 に 3 種類の寸法の破壊試験代表として従来寸法の破断後試験片、Fig.11、Fig.12 に 100N ずつ、荷重を増やした際の従来寸法男木、女木各々の DIC 主応力分布を示す。あご付け根近傍の局部破壊または鎌あご部の圧縮破壊により破壊することから、本実験は宇京^[1]らの実験結果に整合している。

Table4 に 3 種類の寸法鎌継手の最大荷重平均値、Fig.13 に各寸法形状平均に近い 3 本を抽出した荷重と変位の関係を示した。平均最大荷重は三寸法に差異は存在しなかった為、最適寸法に関して破壊強度の有利性はなく破断までの約 4 割の荷重下において優れていた。

5. 結言

代表的な継手形状である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験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、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、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最適寸法を求めた。次に、鎌継手について従来寸法の鎌継手と共に引張荷重を加え鎌継手のひずみ分布を画像相関法 (DIC) で測定した後、鎌継手の応力分布を導出した。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た。さらに、DIC の観測結果に整合するようにモデル条件を設定し FEM 解析を行った。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。DIC において 200N の負荷が加わった際、求めた最適形状に生じる最大主応力は、伝統的に決定された従来寸法の最大主応力に比べて約 10% 小さく、200N の荷重下においては最適寸法の強度が従来寸法の鎌継手に比べ優れていることを実験より求めた。

最後に従来寸法と最適寸法及び両者の鎌首 D の値が中間の 3 種類の寸法に関して一軸引張荷重を加え破断させ強度評価を行った。

各々の寸法について、破断が生じる平均最大荷重を求め、比較を行った。平均最大荷重は差異は存在しなかった為、最適寸法に関して破壊強度の有利性はなく破断までの約 4 割の荷重下において優れていた。

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) 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), p17-86
- (3) 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
- (4) 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.
- (5) 岡野健, 祖父江信夫, 木材科学ハンドブック, 朝倉書店, (2006), p350-363
- (6) 森林総合研究所, 木材工業ハンドブック, 丸善出版, (2004), p.22
- (7) 川口信隆, 高橋政治, アガチス材の材質について, 北海道立林産試験場月報 No220, (1970), pp11-16.
- (8) [14]澤田稔, 木材の変形挙動, 材料 Vol32No59, (1983), pp2-11
- (9) 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

Table.4 Dimensions of MDF test pieces

	平均最大荷重[N]
従来寸法	519.0
最適寸法	523.2
中間寸法	522.4



Fig.10 broken specimen

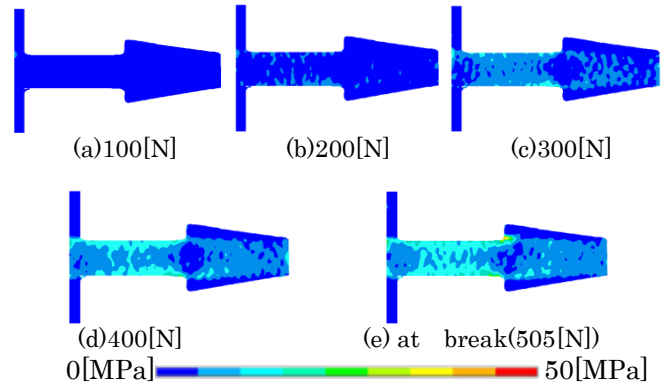


Fig.11 Distribution of 1st principal stress σ_1 on the Agathis male gooseneck joint (conventional shape) with tensile load every 100[N] by DIC

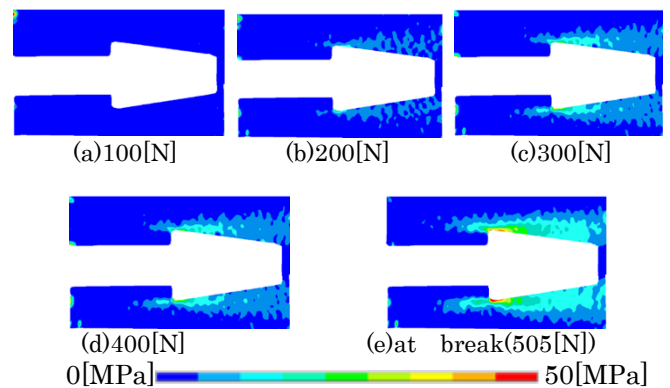


Fig.12 Distribution of 1st principal stress σ_1 on the Agathis female gooseneck joint (conventional shape) with tensile load every 100[N] by DIC

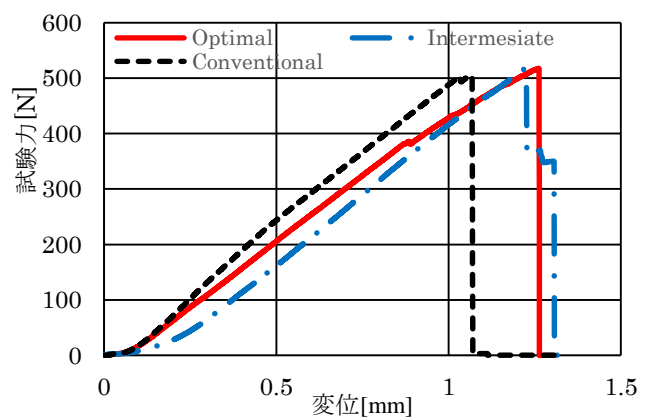


Fig.13 Relationship between load and displacement