画像相関法による伝統的蟻継手のひずみ分布解析[†]

宮内一成* 増田 稔** 村田 功二**

Analysis of Strain Distributions of Wooden Dovetail Joints Using Digital Image Correlation Method

by

Kazunari MIYAUCHI*, Minoru MASUDA** and Koji MURATA**

In Japan, the shapes of traditional wooden joints are based upon carpenters' experiences. However, in terms of strength, it is not revealed whether these shapes are optimum or not. For dovetail joints (ari-tsugi in Japanese), which have been frequently used in traditional timber constructions, an inclination of 1/6 is empirically and often used. In this paper, we conducted the tension tests with dovetail joint specimens of various inclinations and base widths, and examined whether empirical shape is optimum or not. Then strain distributions were calculated by digital image correlation (DIC). The results were as follows: (1) Joints with the inclination of 1/3 were 25 ~ 35% stronger than that of 1/6, therefore empirical shape was not optimum. In comparison with the inclination, the effect of the base width to tensile strength was not significant. (2) Radial tensile strain concentrated on the corner of notches in the mortise side (female part of joint), where more than 2% of tensile strain was observed just before the fracture occurred. However, there was little difference between radial strain distributions whether inclination and base width were large or small. On the bottom of the mortise, approximately 0.7% of tensile strain observed in early wood just before the fracture occurred, but there was little strain in late wood. (3) On shear strain, concentration on the notch was remarkable with inclination increase. Consequently, the fracture of dovetail joints was caused due to the complex stress state, though the main factor of it can be radial tensile stress or strain.

Key words: Dovetail joint, Traditional construction, Digital image correlation, Strain distribution, Inclination, Complex stress

1 緒 言

わが国の伝統木造建築において、部材の接合に用いられている伝統的継手・仕口の形状は、永年にわたる大工棟梁の知恵と経験が積み重なって確立したものであり、その形状が力学的にみて妥当であるかどうかは明らかにされていない場合が多い。従来、部材寸法や継手長を変えて荷重-変位関係を比較したり、破壊形態から耐力発現に寄与する因子を推定したりする実験的研究^{1)~4)}は数多く行われてきた。しかし接合部の変形挙動や、接合部形状が強度に及ぼす影響を定量的に扱うことができないという問題があった。一方、有限要素法による応力やひずみの分布解析を行う解析的研究^{5), 6)}は、木材の持つ異方性、不均質性など材料特性の複雑さや接触問題などのため、実際の挙動を正確に再現した解析が困難であり、研究例は少ない。これらの問題を解決するためには実際に破壊試験を行いつつ、破壊に至る挙動を正確かつ詳細に把握する必要がある。この実験的研究と解析的研究を結びつける解析手法として画像相関法⁷⁾が有効である。画像相関法は変形前と変形後のデジタル画像から注目画素の移動量を測定する手法であり、実際の変形挙動を明らかにすることができる。また、従来の手法では測定

が困難であった2次元のひずみ分布を容易に測定することが可能である。

本研究では伝統木造建築の接合部に多用されている蟻継手の引張試験を行い、画像相関法により接合部に生じる半径方向ひずみおよびせん断ひずみを2次元的に計測した。また、様々な接合部形状の試験体を作製し、経験に基づいた形状⁸⁾が力学的に最適であるかどうかについても検討した。

2 実 験

2・1 試験体

試験体にはベイマツ (*Pseudotsuga menziesii*) を用い、破壊面が板目面となるような木取りとした。Fig. 1 に試験体の全体図を、Table 1 に接合部形状の詳細を示す。通常蟻継手は材厚の半分をほぼ加工するが、本研究では厚さ方向に一樣に加工した試験体を作製した。材寸法は半径方向80mm × 接線方向30mmであり、継手長さは30mmで一定とした。接合部の根幅および傾斜角度をそれぞれ3種類に変化させ、計9種類の接合部形状とした。このうち、試験体Eは経験的によく用いられている形状である。画像相関法による解析のために、試験体表面に黒色塗料をエアブラシで噴射しランダムドットパターン

[†] 原稿受理 平成17年6月30日 Received June 30, 2005

* 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, Div. of Forest and Biomaterials Sci., Graduate School of Agriculture, Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

** 正 会 員 京都大学大学院農学研究科森林科学専攻 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, Div. of Forest and Biomaterials Sci., Graduate School of Agriculture, Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

Fig. 1 Schematic diagram of specimen and loading apparatus.

Table 1 Properties and results.

Specimen Type		Density [g/cm ³]	MC [%]	P _{max} [N]	BW [mm]	tan θ
A	AV	0.54	11.2	1169	15	1/12
	CV [%]	10.2	6.6	18.5		
B	AV	0.52	10.8	1232	20	1/12
	CV [%]	13.8	5.3	19.5		
C	AV	0.49	10.7	957	25	1/12
	CV [%]	11.2	5.3	21.2		
D	AV	0.50	11.0	1353	15	1/6
	CV [%]	10.2	3.5	20.5		
E	AV	0.50	10.9	1346	20	1/6
	CV [%]	10.1	1.6	19.0		
F	AV	0.47	10.7	1144	25	1/6
	CV [%]	9.7	6.2	9.6		
G	AV	0.51	10.6	1845	15	1/3
	CV [%]	5.6	1.5	15.2		
H	AV	0.51	10.9	1681	20	1/3
	CV [%]	7.7	4.7	9.5		
I	AV	0.55	10.5	1666	25	1/3
	CV [%]	7.1	4.9	10.6		

Legend : Density: oven dry density, AV : average, CV : coefficient of variation, MC : moisture content, P_{max} : maximum load, BW : base width, tan θ : inclination.

を施した。試験体は 20℃, 65%RH の恒温恒湿の状態 で調湿し, 試験体の含水率 (全乾法) および全乾密度は Table 1 に示すとおりであった。各形状につき 5 体の破壊試験を行った。

2・2 試験方法

油圧式強度試験機に専用のジグを取り付け, 試験体に通したドリフトピン ($\phi = 20\text{mm}$) を介して引張荷重をかけた。荷重速度は 0.3mm/min とした。

破壊に至るまでの接合部の変形過程が撮影できるように, デジタルカメラ 2 台を試験体の両面から等距離に配置し, 2 台同時に撮影を行った。画像サイズは縦 3008pixel × 横 2000pixel で 1pixel は約 0.033mm に相当する。撮影は

変形前および一定変位 (0.10mm) ごとに行った。照明にはハロゲン冷光源を用いた。試験体表面では鏡面反射が見られ, そのままでは画像相関法解析に影響を及ぼすので, レンズに円偏光フィルターを取り付け, 鏡面反射をできる限り除去した。

2・3 画像相関法によるひずみ分布解析

蟻継手の終局破壊は, 女木の切欠き隅から材内部に向かってき裂が生じて起こると予想される^{4), 8)}そこで, 女木接合部に 1580pixel × 1840pixel の解析範囲を設定し, 10pixel 間隔で節点を定めた (Fig. 2)。変形前に撮影した画像を参照画像として, 変形後の各節点の変位量を画像相関法により計算し, それをもとに 2 次元ひずみ分布解析を行った。また, 2 つの切欠き隅を結ぶ直線 PQ 上のひずみについて, ひずみプロファイルを作成した。

3 結果および考察

3・1 接合部形状と引張強度の関係

Table 1 に引張試験の結果を示す。本研究で用いた接合部の形状においては, 傾斜角度が大きくなるほど最大荷重は大きくなり, 傾斜が 1/3 のものは 1/12 の 1.56 倍, 1/6 の 1.36 倍の引張強度であった。

女木に作用する力のベクトル図を Fig. 3 に示す。斜辺のある一点には, 斜辺に垂直な力 p_n と平行な力 p_t が作用している。男木と女木がずれる速度は極めてゆっくりであるので, p_n と p_t の関係は静止摩擦係数 μ を用いて次式で表せる。

Fig. 2 Schematic diagram of joint region and analyzed area.

Fig. 3 Diagram of force vectors.

$$p_t = \mu \cdot p_n \quad (1)$$

p_n と p_t の合力を繊維方向成分 p_L と繊維直交方向成分 p_R に分解すると、 p_L と p_R の関係は次式ようになる、

$$p_L = \frac{1}{\mu} \left(\frac{1+\mu^2}{1-\mu \tan \theta} - 1 \right) p_R \quad (2)$$

ここで、 θ は傾斜角度である。切欠き隅には、 p_L と p_R をそれぞれ斜辺全体で積分した力と釣り合う、繊維方向のせん断力 P_L と繊維直交方向の引張力 P_R が作用している。 P_L と P_R の関係は

$$P_L = \frac{1}{\mu} \left(\frac{1+\mu^2}{1-\mu \tan \theta} - 1 \right) P_R \quad (3)$$

となる。また、 P_L は加えた引張荷重 P の半分の大きさであるので、次式が成り立つ、

$$P = 2P_L \quad (4)$$

終局破壊は繊維直交方向の引張によって決まる、すなわち、破壊時の P_R の大きさは接合部の形状によらず一定であると仮定し、静止摩擦係数を 0.6⁹⁾ すると、 P の値は傾斜が 1/3 のものは 1/12 の 1.62 倍、1/6 の 1.37 倍となり、引張強度の比に近い値であった。

式 (3)、(4) より、傾斜角度が大きくなると引張強度が増大する。ただし、傾斜角度のとりうる値の範囲は試験体幅や根幅、継手長さによって限定される。また、 P_L は切欠き隅に作用するせん断力であるので、傾斜角度が大きくなるとせん断力の影響が大きくなり、より複合的な応力状態で破壊が起こると考えられる。しかし、今回用いた試験体に対しては、式 (3)、(4) から求めた P の値の比が実験結果から求めた引張強度の比に近く、蟻継手の破壊の主な要因は半径方向の引張であると考えられる。

根幅が引張強度に及ぼす影響は傾斜角度の影響に比べて小さかった。ただし、根幅を大きくすると、切欠き隅から材縁までの距離が短くなり、女木が変形しやすくなるため、強度は低下する傾向にあった。

引張強度が最も優れていたのは試験体 G であり、その最大荷重は、慣例的によく使われている形状である試験体 E の 1.37 倍であった。また、傾斜角度のみを大きくした試験体 H でも試験体 E の 1.25 倍の強度であった。したがって、経験に基づいた蟻継手の形状は力学的に最適なものではなく、傾斜角度を大きくするだけで引張強度が改善できることが示された。

3・2 接合部形状とひずみの関係

画像相関法解析によって得られた半径方向のひずみ分布およびひずみプロファイルを Fig. 5 に示す。I、II、III はそれぞれ傾斜が 1/12、1/6、1/3 の場合の一例である。分布の形態はすべての接合部形状に共通しており、次のような特徴があった。引張ひずみは切欠き隅の早材部 (Fig. 4) に集中し、切欠き隅から材縁側および材内側に斜めに広がっている。一方、圧縮ひずみは男木と接触する部分から材縁に向かって斜めに分布している。破壊直前では切欠き隅に 2% 以上の引張ひずみが生じているが、それ以外の部分では、早材部でも 0.7% 程度のひずみしか生じておらず、晩材部にはほとんどひずみは生じていな

Fig. 4 Macrostructure of specimen.

Note: Light colored region is earlywood of low density, and darker region is latewood of high density.

い。早晩材に生じるひずみの違いは、画像相関法解析において設定した節点の間隔に対して、年輪間隔が十分に広い試験体ではっきりと確認できる。このことは、有限要素法などの数値解析において、実際の挙動をより正確に再現するには、早晩材の弾性率の違いなど組織構造を考慮した解析モデルが必要であることを示唆するものである。

せん断ひずみ分布およびひずみプロファイルを Fig. 6 に示す。切欠き隅周辺から放射状にひずみ分布がみられ、傾斜角度の増加とともに、切欠き隅のひずみの集中が顕著になっている。一方、斜辺部から材端かけて広がる分布は、傾斜角度が大きくなると繊維方向にシフトしてくる。したがって、傾斜角度や継手長さによっては、材端側でせん断破壊が起こる可能性がある。切欠き隅を結ぶ直線上では、せん断ひずみは $\pm 0.5\%$ の範囲内におさまっている。傾斜が 1/12 の場合 (I) では破壊箇所でもひずみの集中はみられないが、傾斜が 1/3 の場合 (III) では、破壊が生じた側の切欠き隅に 1.5% 以上のひずみが生じている。Fig. 6 では、傾斜が 1/6 の場合 (II) も破壊が生じた側の切欠き隅に大きなひずみが生じているが、これは材表面に生じた微小なき裂によるものであると考えられる。

4 結 論

様々な接合部形状を有する伝統的蟻継手の引張試験を行い、接合部形状と引張強度の関係について調べた。また、画像相関法を用いて、破壊に至る過程に生じるひずみを 2 次元的に計測した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 傾斜角度が大きいほど引張強度に優れており、経験に基づく形状は力学的に最適ではなかった。傾斜を 1/3 にすると引張強度は 25 ~ 35% 改善された。このことは蟻継手以外の伝統的継手についてもその形状を再検討する価値が高いことを示している。

(2) 半径方向のひずみ分布には、接合部形状による違いはなく、破壊箇所である女木側切欠き隅の早材部に引張ひずみが集中し、破壊直前では 2% 以上となっていた。

Fig. 5 Distributions of strain perpendicular to the grain.

Legend : I : specimen type A, II : type F, III : type H.

Note : Top : radial direction strain distributions at each load level. Displacements are multiplied by 10.
Bottom : strain profiles along the line PQ in Fig. 2. Each profile is corresponding to the upper strain distribution respectively. Dotted lines represent 1.0% tensile strain.

Fig. 6 Distributions of shear strain.

Legends : I : specimen type A, II : type F, III : type H.

Note : Top : shear strain distributions at each load level. Displacements are multiplied by 10. Bottom : strain profiles along the line PQ in Fig. 2. Each profile is corresponding to the upper strain distribution respectively. Dotted lines represent $\pm 0.5\%$ shear strain.

ひずみは主に早材部に生じており, 晩材部はほとんど変形していなかった。

(3) 切欠き隅のせん断ひずみの集中は, 傾斜角度が大きくなるほど顕著になった。したがって, 蟻継手の破壊は切欠き隅に生じる半径方向の引張応力あるいは引張ひずみが主な要因であるが, 傾斜角度が大きくなるにしたがって破壊に及ぼすせん断の影響が大きくなり, より複合的な応力あるいはひずみ状態で破壊が起こると考えられる。

参 考 文 献

- 1) S. Kawamura, T. Yoshioka and T. Miyakuni, "On strength of wood joint Tensile strength of Koshikake-Kamatsugi joint part 1", Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute of Japan, pp.75-76 (1991).
- 2) M. Karube, K. Komatsu and M. Harada, "Mechanical properties of Japanese traditional designed timber joint using G.L.T. part 1 tensile strength", Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute of Japan, pp.123-124 (1995).
- 3) S. Sato, E. Fujino and Y. Ohashi, "A study on tensile strength of traditional wooden joints", Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute of Japan, pp.97-100 (2002).
- 4) E. Fujino and Y. Ohashi, "Setsugo-bu Tsugite", The kenchiku gijutsu, Japan, No.641, pp.147-153 (2003).
- 5) N. Kawai, "Elastic analysis on a traditional wooden joint", Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute of Japan, pp.1235-1236 (1986).
- 6) N. Yamada, M. Tezuka and H. Kawamura, "Study on the strength of traditional wooden joints", Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute of Japan, pp.83-84 (1989).
- 7) K. Murata, M. Masuda and M. Ichimaru, "Analysis of radial compression behavior of wood using digital image correlation method", Mokuzai Gakkaishi, Japan, Vol.45, No.5, pp.375-381 (1999).
- 8) "Encyclopedia of wood architecture", pp.100-102 (1995) Gakugei Shuppan-sha Co., Ltd., Japan.
- 9) H. Watanabe, "Mokuzai rigaku soron", pp.417-428 (1978) Norin Syuppan, Japan.