4本のドリフトピンを用いたモーメント抵抗接合における 木材の画像相関法による破壊解析[†]

宇 京 斉一郎* 増 田 稔**

Fracture Analysis of Wood in Moment-Resisting Joints with Four Drift-Pins Using Digital Image Correlation Method (DIC)

by

Seiichiro UKYO* and Minoru MASUDA**

The deformation behaviour of wood around moment-resisting joints was analysed using digital image correlation method (DIC) and finite element method (FEM). The joints were consisted of four drift-pins. The distribution of the strain perpendicular to grain and the shear strain parallel to the grain were examined around each drift-pin to evaluate the large deformed area and the location of initial failure. Results were as follows.

Areas of large compression strain perpendicular to the grain and large shear strain were observed in the predicted loading area of each drift-pin. Large tensile strain perpendicular to the grain was observed at the area close to the loading (contacting) area of the drift-pins, and the tension area was partly overlapped with the area of large shear strain. The overlapped area coincided with the location of initial cracks propagated parallel to the grain. This coincidence suggested that the cracks occurred by mixed-mode fracture in this joints. The numerical results by finite element analysis were compared with the experimental results obtained with DIC and they gave good agreement with each other.

Key words : Moment-resisting joints, Digital image correlation, Strain distribution, Initial crack, Mixed mode fracture

1 緒 言

複数ドリフトピンによる木材接合は、一般的によく用いられる接合法でありながら、応力状態が複雑で解析することが難しいため、これまで破壊に至る挙動を詳細に検討した例は少なく、不明な点を多く残している。それは木材部の応力分布を実験的に計測することが難しかったことも1つの要因と考えられる。Wilkinson^{1), 2)}らは、1本のボルト接合について、摩擦およびボルト孔とボルトの接触を考慮した非線形解析を行い、モアレ法およびストレインゲージを用いた実験結果との検証を行った。しかしながら、ボルト孔境界上の放射応力および接線応力のみしか評価しておらず、ボルト孔周りの応力・ひずみ分布についての詳細は不明である。また、Stelmokas³⁾らは、複数ボルト接合の繊維方向加力時の材の変形を画像相関法を用いて計測し、材全体での変位分布について報告しているが、応力集中の大きいボルト付近の詳細な変形挙動については不明である。

実用的な面で、ボルトおよびドリフトピン加力下において問題となる破壊は、多くの場合、モードⅠの割裂破壊とモードⅡのせん断破壊の複合モードによって生じると考えられる。そのため破壊挙動を明らかにするには、これら2つの影響を定量的に評価することが重要となる。

これら2つの影響を検証するのに適したひずみ計測法として画像相関法が挙げられる。画像相関法とは、変形前後の画像を比較することによりひずみ分布を求める方法である。変形前のある点Aの周辺の画像データ(濃淡マトリックス)は変形後もほぼ同一であるので、変形前の濃淡マトリックスと最も相関の高い点A'を変形後の点Aであると同定し、ひずみ分布を求める方法である。著者らはマイクロランダムドットの付与方法の工夫により画像相関法の解析精度の改善をはかり、既に木材の圧縮変形⁴⁾や水分吸収による膨潤挙動の計測⁵⁾および繊維方向ならびに繊維直交方向への引張加力下でのドリフトピンまわりのひずみ分布計測において良好な結果を得ている^{6), 7)}。

そこで本研究では複数ドリフトピン問題の基本的な解析例として4本のドリフトピンによるモーメント抵抗接合部におけるピン孔周りの2次元ひずみ分布をデジタル画像相関法(DIC)を用いて観察し、ドリフトピン加力下におけるせん断および繊維直交方向の引張りの応力状態から、破壊の起点となる初期クラックの発生を考察した。また、有限要素法による応力解析も行い、両者の比較検討を行った。

† 原稿受理 平成13年7月10日 Received July 10, 2001

* 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., Grad. School of Agric., 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., Grad. School of Agric., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

2 材 料 と 方 法

2・1 試験方法

試験体は北米産スプルース (*Picea spp.*) 2×8 材を用いた (Table I 参照). ドリフトピンの先孔または加力点付近に節による繊維走行の乱れがない材を選定した. 側材および主材別に 4 ヶ所に先孔 (径 $D = 21\text{mm}$) をあけ, 4 本のドリフトピン ($d = 20\text{mm}$, $l/d = 7.6$) で 4 つの部材を接合した (Fig. 1, 2 参照). 径 20mm のドリフトピンを用いたのは, ピンが曲げ変形を生じないほど十分に太い場合の木材の破壊挙動および終局耐力を観察するためである. この径のドリフトピンを用いて予備試験を行い, ドリフトピンの変形および部材間に開きが生じないことを確認した. そのため, 試験体には開き止めのためのクランプなどを用いていない.

木材側にあける先孔は, ドリフトピンと孔が密着するようにクリアランスはできるだけ小さく設定するのが理想的であるが, 2×8 材を 1 枚ずつ孔開けする加工精度を考慮して, 1mm のクリアランスを設け 21mm の孔を開けた. ピン間距離は $5d$, 縁距離は $2d$, 端距離は $2d$ または $10d$ とした. DIC によるひずみ分布測定のため, ドリフトピン孔近傍に耐水性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を形成した.

試験体の隅部分 (Fig. 2 参照) に 4.6mm 厚の直角型鉄板を当て万能試験機により加力した. 加力速度は 2kN/min を目安にほぼ一定とし, 最大荷重の後, クラ

Table I. Properties of lumbers used for specimens.

End distance	Density [kg/m^3]	SD [kg/m^3]	COV [%]	Moisture content [%]
2d [N=60]	441	15	3.3	15.4
10d [N=44]	474	27	5.8	16.8

SD : Standard deviation

COV : Coefficient of variation

Fig. 1. Plan view and cross section of moment-resisting joints. DD : End distance, GD : Edge distance.

Fig. 2. Schematics of loading and a captured area for DIC. Left and Right figures show the cases of end distance : $10d$ and $2d$ respectively. SLP : steel loading plate.

ック進展による繊維に沿った割裂破壊が生じるまで荷重を行った.

なお, 端距離を $2d$ および $10d$ の 2 種類としたのは以下の理由による. まず, 初期クラックの発生は端距離によらずドリフトピン近傍の応力状態で決まると予想され, その発生挙動が両者共ほぼ同じとなることを異なる端距離により確認するためである. また, 端距離 $10d$ のほうが $2d$ よりも初期クラックと終局破壊との時間差があり, 初期クラック発生前後の様子を安定的に観察できると期待されたためである.

2・2 画像相関法 (DIC) によるひずみ分布計測

注目するドリフトピン孔付近 (Fig. 2 参照) を, 荷重前および荷重後の一定荷重ごとに, デジタルカメラで $1280\text{pixel} \times 1000\text{pixel}$ のフレームサイズで撮影した. その際フレームの辺が繊維方向とそろうようにデジタルカメラを三脚上で回転させ調節した. 取込まれた画像サイズは実寸法で約 $72\text{mm} \times 56\text{mm}$ に相当し, 1pixel は 0.056mm に相当した. また撮影範囲には, 高輝度冷光源による均一スポット光で照射した. これは, DIC のアルゴリズムが移動後も注目点付近の画像パターン, すなわち輝度分布情報がほとんど変化しないという前提に基づいているため, 安定的な照明を行うためである. 撮影はデジタルカメラ 1 台で行ったため, 測定箇所は各試験体につき 1 つのドリフトピン孔周りに限定された.

取込まれた変形前の画像を参照画像とし, 変形後の各荷重レベルにおけるひずみ分布の計算を行った. その際, 剛体移動の計算では $51\text{pixel} \times 51\text{pixel}$ のサブセット (パターンマッチングを行う領域) を用い, 注目点の移動の追跡では $31\text{pixel} \times 31\text{pixel}$ のサブセットを用いた.

2・3 有限要素法 (FEM) による数値解析

このような試験体を, 有限要素法を用いて忠実に解析するためには, 3 次元的に各部材とドリフトピンを表現

し、かつ、接触問題として解くのがベストである。しかしながら本研究の目的は、4本のドリフトピンで接合された接合部が、Fig. 4で示されるような単純な仮定で予測される通りの変形挙動をしているかどうかを、DICを用いて確かめるところにある。したがって、本研究における有限要素法解析では、材の厚さ方向において応力が一定、すなわち2次元平面応力問題としてモデル化(Fig. 3参照)を行ない、かつ、各ドリフトピンから木材に作用する力を分布強制荷重として与え、木材とドリフトピンの間はすべりが可能であるとした。なお、ドリフトピンが木材を押す力 F とドリフトピン上の各節点に作用する力との関係はFig. 5に示す通りである。また、万能試験機による加力点となる試験体隅部は回転可能な拘束点とした。

以下に、各ドリフトピンが負担する力 F の計算手順⁸⁾について述べる。まず、Fig. 4左図に示すように、4本のドリフトピンの中心にモーメント抵抗の回転中心があると仮定し、かつ、“木材との接触面において作用するモーメント抵抗力”，および“4つのピン間で均等に分担されると仮定した荷重点の負荷の1/4の力”，これら2つの合力を求め、各ドリフトピンごとの負担力および方向をFig. 4上右図のように得た。

Fig. 3. Finite element mesh of 2d member.

Fig. 4. Diagrams of prediction of forces exerting drift-pins. Left : Moment resisting force, and 1/4 of resisting force to the loading force. Upper right : Resultant forces of the left figure, when the load is 13.73kN.

有限要素法で用いた要素は、4角形4節点の直交異方性平面要素であり、応力の集中が予想されるドリフトピンと孔の境界付近の要素のサイズは繊維方向：0.25mm、繊維直交方向：0.125mmとし、要素の長辺を材料の繊維方向とそろえた、これは孔境界付近での繊維直交方向での応力の変化を高精度に得るためである。解析に用いた材料定数は、スプリースの文献値⁹⁾をもとにした。Table IIにその値を示す。解析には汎用構造解析プログラムMSC/Nastran for Windows ver.4.6を使用し、パーソナルコンピュータ(Pentium III 600MHz)で計算を行った。

3 結果と考察

3・1 画像相関法による実験結果

(1) 端距離2d試験体の結果

Fig. 6に、端距離2dの試験体における各ドリフトピンの繊維直交方向ひずみ(ϵ_y)分布およびせん断ひずみ(γ_{xy})分布の代表例を示す。繊維平行方向のひずみは小さく、破壊にも大きくは関与していないので、ここでは表示を省略することとした。画像に設けたひずみ分布表示用のマス目間隔は20pixel(約1.1mm)で一定である。図中に示した点線は、Fig. 4で求めた各ドリフトピンに予想される加力方向を示す。

4本の各ドリフトピンに共通して、ピンの予想加力点付近に圧縮ひずみがあり、そのすぐそばに繊維直交方向(ϵ_y)の引張りひずみが観察された。せん断ひずみに関しては予想加力点付近において、せん断の方向(正負)が逆となっていることが観察される。

また、 ϵ_y 分布において、引張りひずみの大きい領域は、せん断ひずみの大きい領域と一部重なっている。このことは、ドリフトピンの加力点付近の木材部が、せん断応力と繊維直交方向への引張応力の複合応力状態にあるこ

Table II. Material properties used for FEM.

$E_x(E_L)$	$E_y(E_T)$	$G_{xy}(G_{LT})$	$\mu_{xy}(\mu_{LT})$	$\mu_{yx}(\mu_{TL})$
[MPa]	[MPa]	[MPa]		
10500	471	579	0.50	0.022

Fig. 5. Schematic diagram of nodal load. F : Resultant force of each pin the same as the force in Fig. 4 upper right.

Fig. 6. Strain distribution maps measured by DIC. The circle in each map shows location of pinned hole ($D = 21\text{mm}$). Pin A : 12.75kN, B : 13.73kN, C : 9.81kN, D : 12.75kN. Grain direction is vertical.

とを示している。特に、ドリフトピン B, C では、クラックの発生が観察された位置とこの領域とが一致していた。この結果より、破壊に対して、せん断応力、引張応力の両者が複合的に寄与していることが推定できる。

(2) 端距離 $10d$ 試験体の結果

端距離 $10d$ の試験体の DIC による解析の結果、ひずみ分布の傾向は端距離 $2d$ のものとほぼ同じであることがわかった。ここでは後の FEM 解析において破壊の起点となる確率が最も高いと予想されるドリフトピン C における荷重変化に伴うひずみ分布の変化を示す。

Fig. 7 の ϵ_y 分布の変化より、荷重が増加するとひずみの絶対値は増すが、圧縮・引張りひずみの生じている領域の位置は変化していないことが分かる。また、同図において、引張りひずみの領域が荷重増加とともに徐々に繊維方向に沿って伸長しているのがわかる。

次に、Fig. 8 に、荷重 10.79kN の時のドリフトピン C のひずみ分布の代表例を 2 つの試験体について示す。

Fig. 7. Change of distributions of ϵ_y around Pin C with increase of load.

Fig. 8. Strain distributions of Pin C at 10.79kN. Top : Specimen Q without crack, Bottom : Specimen R with visible crack at the left bottom.

Fig. 8 の上図はクラックが発生していない試験体 Q であり、繊維直交方向引張りひずみは最大で 1% 程度である。それに対して下図は 10.79kN において既にクラックが生じている試験体 R (最大荷重 18.39kN) のひずみ分布である。この時点でドリフトピン孔の境界上に肉眼で確認できるクラックが生じているものの、そのすぐ真下の DIC によるひずみ解析の対象領域では肉眼で確認可能なクラックは存在していない (後に肉眼で分るき裂が現れる)。しかしながら、直交方向引張りひずみは矢印で示した位置で 4 ~ 6% を示しており、この時点で既に割裂破壊が生じていると考えられる。なおこの試験体 R において、クラック発生後も、加力方向に対して初期クラック発生領域と対称に位置する領域の繊維直交方向引張りひずみが増大し、やがてその位置でも目視可能なクラックが生じた。以上で述べた傾向はドリフトピン B の結果においても確認された。

また、せん断ひずみに関しては、クラックの生じていない Fig. 8 上図の試験体では、先に述べたように引張もせん断（負のせん断）も大きなひずみ状態にある複合応力領域が観察できる。一方、クラックの生じた試験体では、クラックの右側のせん断ひずみがクラックにより解放され消失している。

3・2 FEM 解析結果と画像相関法解析結果との比較

FEM の解析結果は端距離 $2d$ および $10d$ とほぼ同じ結果となった。ここでは $2d$ の結果を提示する。

Fig. 9 および Fig. 10 に、FEM による解析結果を繊維直交方向ひずみおよびせん断ひずみについて示す。図中には、 $\pm 0.5\%$ ひずみの等高線を示す。

まず、繊維直交方向の圧縮ひずみの領域（黒線範囲）について見ると（Fig. 9 参照）、いずれのドリフトピンに

Fig. 9. Calculated ε_y distributions by FEM. Grain direction is vertical. 13.73kN, DD : $2d$.

Fig. 10. Calculated γ_{xy} distributions by FEM. Grain direction is vertical. 13.73kN, DD : $2d$.

おいても、ピンの加力方向の繊維直交方向側の位置に 0.5% 以上の圧縮ひずみが現れていることが分かる。これを Fig. 6 の DIC による結果と比較すると、FEM の結果がよく一致していることが分かる。

また繊維直交方向の引張りひずみの大きい領域（白線範囲）についても DIC による結果 (Fig. 6) とよく一致している。

次に、FEM によるせん断ひずみ分布の解析結果をみると (Fig. 10 参照)、加力方向付近に絶対値が 0.5% 以上のせん断ひずみの領域が現れていることがわかる。これらの傾向は Fig. 6 の DIC の結果ともよく一致している。また、加力点とせん断ひずみの正負の方向変化の位置との位置関係もよく一致している。

Fig. 11 に、ドリフトピン C におけるせん断ひずみおよび繊維直交方向引張りひずみそれぞれの 0.5% 以上の領域の相互関係を示す。FEM の結果においても、両ひずみが重なる領域が現れていることが見られる。初期破壊がこのような領域で発生することが示唆される。

3・3 終局破壊

端距離 $2d$ および $10d$ の終局破壊の違いについては、今回の解析対象としていないが、今後の解析のため、参考までに述べる。Table III に示すように、終局破壊時の接合部材相互の軸方向間の角度変位および最大荷重ともに $10d$ のほうが大きい。端距離 $2d$ の試験体では、ドリフトピン B-A または C-D (Fig. 1 および Fig. 2 参照) の 2 つの孔をつなぐクラックがまず生じ、孔 A または D から材端に至る割裂破壊が瞬時に生じた。そのため、クラックがいずれの孔からどのような順序で発生したかを目視で正確に観察するのは困難であった。

それに対し端距離 $10d$ では、ドリフトピン B または C の孔でクラックが確認され、それらが繊維方向に沿って成長する様子が観察された。B または C で初期クラックが発生した後も荷重は増大し続けた。その後、ドリフトピン A または D の孔からもクラックが発生しているのが観察されたが、そのクラックが材端まで至る前に最大荷重を記録した。なお、B、C でのクラックを伴わずに A、D で単独に割裂破壊が生じるケースは観察されなかった。

以上の観察結果に加えて、有限要素法解析および DIC による結果から総合的に判断して、端距離 $2d$, $10d$ ともに、ドリフトピン C もしくは B で最初のクラックが生じ

Fig. 11. Overlapped area of tensile and shear strains above 0.5% .

Table III. Maximum load and displacement.

End distance	$F_{\max}$ [kN]	SD [kN]	COV [%]	Maximum Disp. [rad]	SD [rad]	COV [%]
2d [N=15]	13.92	2.57	18.4	0.024	3.7×10^{-3}	15.2
10d [N=11]	18.29	2.30	12.6	0.031	3.9×10^{-3}	12.8

易く、そのクラックが繊維方向に伸長する過程で、ドリフトピン A、D の孔につながったり、ピン A、D から材端方向に向かってクラックが発生することが予想された。

なお、端距離の長い試験体では端距離の短い試験体よりも、クラックが成長し終局破壊に至るまでにより大きな荷重増加がみられた。このクラックの進展と荷重の増加の関係を有限要素法によって予測するには、木材の横圧縮およびせん断変形において応力-ひずみ曲線での非線形性が大きく関与していることを考慮する必要がある。木材のせん断変形の非線形性については現在研究中であり、この結果を用いれば、今後、終局耐力の予測が可能になるものと思われる。また、クラックの発生に関する理論解析については著者の 1 人が提案している有限小領域破壊理論^{10)~12)}を用いて行うことができ、クラック進展後の終局最大耐力の理論予測、特に端距離による終局耐力の違いについては、今後の課題としたい。

4 結 言

画像相関法 (DIC) を用いて、“4 本のドリフトピンによるモーメント抵抗接合”における各ドリフトピン孔周りの 2 次元ひずみ分布状態の計測を行った。その際、木材接合部の破壊に最も大きく関与する繊維直交方向ひずみおよびせん断ひずみの分布を解析した結果、以下のことが分かった。

(1) 接合部の部材の回転中心が、4 本のドリフトピンの中央にあると仮定して予測される加力点付近において、繊維直交方向の引張りおよび圧縮ひずみ、ならびにせん断ひずみの大きい領域が観察された。

(2) 有限要素法解析によるひずみ分布解析の結果と画像相関法による計測結果とは非常によい一致がみられた。

(3) 繊維直交方向での引張りひずみの大きい領域と、せん断ひずみの大きい領域は、一部重なっており、クラックの発生位置と、この重なり位置はほぼ一致していた。

このことから、ドリフトピン周りのクラックが複合応力状態で生じていることが推察される。

今回の解析を通して、画像相関法が 2 次元ひずみ分布を求めるのに非常に有効な手段であることが確認でき、今後種々のひずみ計測において用いることができるものと期待される。

参 考 文 献

- 1) T. L. Wilkinson and R. E. Rowlands, Wood Science, **14**, 15 (1981).
- 2) T. L. Wilkinson and R. E. Rowlands, Exp. Mech, **21**, 408 (1981).
- 3) J. W. Stelmokas, A. G. Zink and J. R. Loferski, Wood and Fiber Science, **29**, 210 (1997).
- 4) 村田功二, 増田 稔, 市丸美幸, 木材学会誌, **45**, 375 (1999).
- 5) 村田功二, 伊藤真浩, 増田 稔, 材料, **50**, 397 (2001).
- 6) M. Masuda, M. Ohtani and K. Murata, Proceedings of Pacific Timber Engineering Conference, Rotorua, **2**, 333 (1999).
- 7) M. Masuda and K. Tabata, Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Whistler, 2.5.2 (2000).
- 8) 日本建築学会編, “木質構造設計ノート, モーメント抵抗接合” p.184 (1995) 日本建築学会.
- 9) Forest Products Laboratory, “Wood Handbook-Wood as an engineering material”, Chap.4 (1999) USDA, Forest Service, FPL
- 10) 増田 稔, 京都大学農学部演習林報告, **58**, 241 (1986).
- 11) 増田 稔, 田浦 理, 京都大学農学部演習林報告, **67**, 158 (1995).
- 12) M. Masuda, A. Iwabuchi and K. Murata, Proceedings of 1st RILEM Symposium on Timber Engineering, Stockholm, 151 (1999).