

# 楔なし通し貫接合部の貫に生じるめり込み変形と 材料特性の評価に基づく接合部耐力の評価

Evaluation of Compressive Displacement of Perpendicular to the Grain at Nuki and  
Consideration about Strength of Nuki-Column Joint with Material Property

井上祥子<sup>1</sup>・村本真<sup>2</sup>

Sakiko Inoue and Makoto Muramoto

<sup>1</sup> 富山大学特命助教 芸術文化学系 (〒 933-8588 高岡市二上町 180 番地)

Project Assistant Professor, Faculty of Art and Design, University of Toyama

<sup>2</sup> 京都工芸繊維大学准教授 デザイン・建築学系 (〒 606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町)

Associate Professor, Faculty of Design and Architecture, Kyoto Institute of Technology

In our previous work, we developed a numerical analysis method for wood frames. One crucial factor in this analysis is modeling the compressive displacement perpendicular to the grain at joints. However, existing knowledge about compressive displacement, as demonstrated by previous research, is insufficient for accurately predicting Nuki-column joint strength. To provide useful information for developing analysis modeling rules, this paper presents measurements of compressive displacement perpendicular to the grain at the Nuki joint using Digital Image Correlation (DIC) and considers the material properties of the Nuki member.

**Keywords:** Wood, Nuki-column joint, Compressive displacement of perpendicular to the grain, Digital image correlation(DIC)

## 1. はじめに

筆者らは伝統木造建築を対象とした木造解析法の開発<sup>1)</sup>に取り組んでいる。伝統木造建築の数値解析では、接合部に生じるめり込み現象のモデル化が非常に重要な課題である。しかし、めり込み現象は接触部分に生じる局所的な変形と、その周りの余長部の変形が組み合わさって構成される複雑な現状であるため、その現象自体の解明には未だ多くの課題が残されている。そして、めり込みを表現するモデル化手法を確立するための情報が非常に少ない。

筆者らはめり込み現象を直接計測し、実現象を把握する実験<sup>2),3)</sup>を継続している。文献3)では画像計測を用いて通し貫接合部の貫に生じるめり込みひずみの計測を行った。画像計測により貫に生じるめり込みひずみ分布を得たものの、計測対象とした実験が繰り返し載荷実験であったことと、貫にある節が計測しためり込みひずみ分布に影響していた。

そこで、本論文では改めて通し貫接合部の一方向載荷実験を実施し、文献3)と同様に画像計測を用いて貫に生じるめり込み変形を計測した結果を述べる。さらに、貫の材料実験を実施し、材料特性を把握した上で、めり込み抵抗を評価し接合部耐力を予測する。予測した接合部耐力と実験値を比較し、接合部におけるめり込みによる耐力の評価について検討する。なお、本論文は文献4)に新たな検討を加えたものである。

## 2. 通し貫接合部の一方向載荷実験

### (1) 実験概要

通し貫接合部の実験の様子を図 1 に示す。貫の左右端部は鋼製治具と接続し、柱頭部はジャッキと接続した。貫の左右端部に接続した治具と試験体柱脚部はピン接合で加力枠に固定し、さらに鋼製治具と試験体の接続箇所にはベアリングを設置することにより、柱-貫接合位置以外の部分でモーメント抵抗が生じないように配慮してある。また、載荷中に貫が面外方向に移動することを防ぐため、横振れ止めを設置した。横振れ止めと通し貫の接触位置にはボール支承を設置し、摩擦抵抗は生じない。

載荷はジャッキ限界までの一方向載荷とし、その後ジャッキを引き戻し、荷重が 0 になる位置で実験を終了した。以降、柱頭部の水平変位量 $\delta$ を柱長さ $L$ で除した値を部材変形角とする。ジャッキ限界位置はこの部材変形角が約 0.16 rad に相当する。

画像計測用の画像は、図 1(b) に示すように試験体正面に設置した工業用カメラ (DAHENG IMAGING 製、画像サイズ 5496 × 3672 pixel) で撮影した。画像は実験開始直前に 1 枚、実験開始後の撮影間隔は柱頭部が 2 ～ 3 mm 水平移動するごとに撮影した。

### (2) 試験体

試験体は楔なし通し貫接合部であり、貫せいと柱寸法を変化させた C-1 ～ C-4、D-1、D-2 の計 6 種各種 1 体ずつを用意した。なお、柱寸法はめり込み領域に影響する柱幅長さのみを変化させた。試験体寸法を図 2 と表 1 に示す。部材は柱、貫ともにヒノキとし、表 2 に含水率を示す。文献 3) でめり込みひずみ分布に節の影響が確認されたため、本論文の試験体は全て無節とした。

画像計測を行うため、図 3 に示すように柱に切り欠きを施し、貫を嵌め込む接合形式とした。切り欠きは貫幅よりも 5 mm 大きくし、貫側面と柱間で生じる摩擦をなくし、めり込みによる耐力評価に着目している。画像計測範囲は全ての試験体で柱芯位置より左右に 160 mm の範囲とし、白色水性塗料と黒スプレーでランダムドットパターンを作成した。

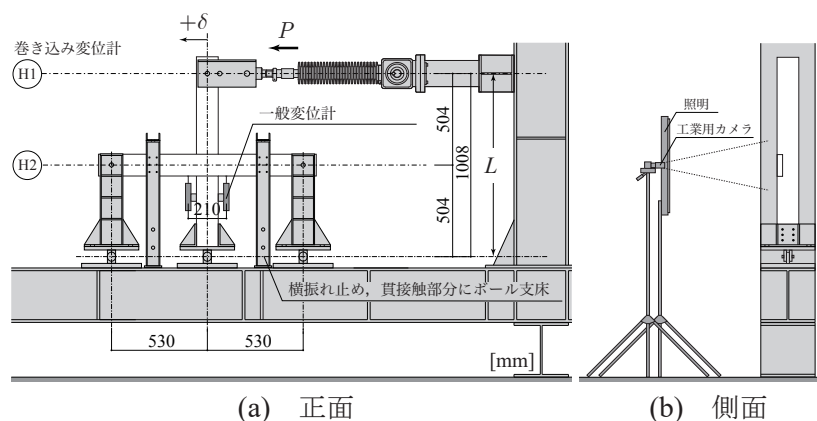


図 1 試験体設置図

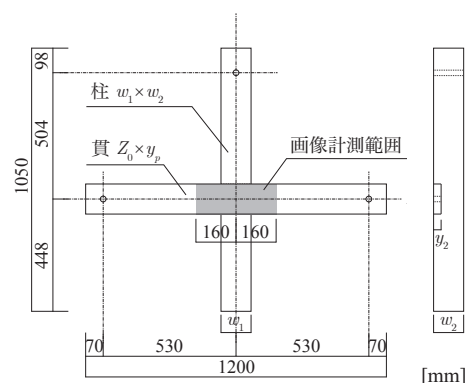


図 2 試験体寸法

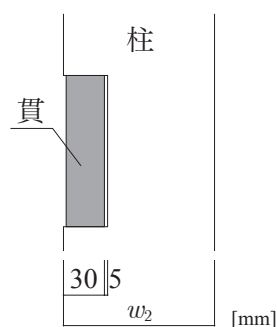


図 3 接合部の仕様

表 1 試験体寸法

| 試験体名 | 柱寸法 [mm] |          | 貫寸法 [mm]  |          |
|------|----------|----------|-----------|----------|
|      | 幅 $w_1$  | 奥行 $w_2$ | 貫せい $Z_0$ | 貫幅 $y_p$ |
| C-1  |          |          | 60        |          |
| C-2  | 120      | 120      | 90        | 30       |
| C-3  |          |          | 120       |          |
| C-4  |          |          | 150       |          |
| D-1  | 90       | 120      | 120       | 30       |
| D-2  | 150      | 120      | 120       | 30       |

表 2 含水率

| 試験体名 | 含水率 [%] |      |
|------|---------|------|
|      | 柱       | 貫    |
| C-1  | 15.0    | 18.0 |
| C-2  | 17.4    | 20.8 |
| C-3  | 18.1    | 23.8 |
| C-4  | 21.4    | 22.0 |
| D-1  | 19.5    | 17.5 |
| D-2  | 18.5    | 19.3 |

### (3) 実験結果

図4に荷重-部材変形角関係を示す。また、図4より得られる包絡線を図5と図6に示す。図5に貫せい寸法による比較を示し、図6に柱寸法による比較を示すが、試験体寸法の変化と荷重の関係性を明確に把握することはできなかった。図5で、貫せい寸法はC-1からC-4の順に大きくなるが、耐力が最も大きかった試験体はC-3であり、貫せい寸法による順序ではない。図6で柱幅寸法が異なる試験体C-3とD-2がほぼ同等の耐力を示した。これは、貫の材料特性が関係していると考えられ、詳しくは後述するが試験体C-3の貫の降伏強度は他の試験体よりも大きかった。このことより、試験体の寸法条件のみから接合部耐力を評価することは困難と言えよう。

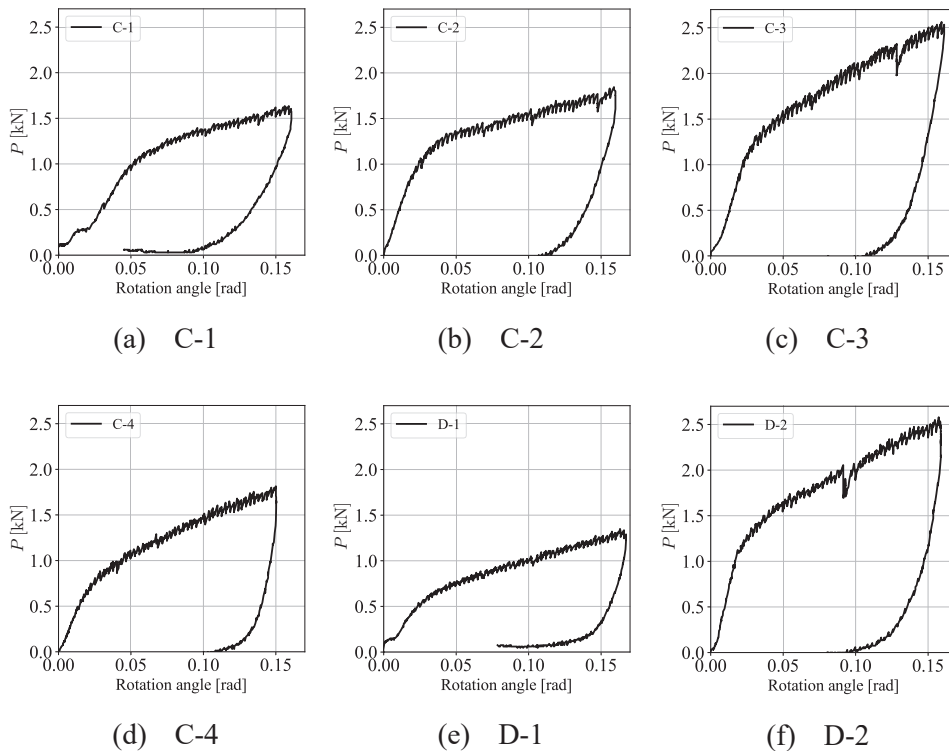


図4 通し貫接合部の一方方向載荷実験の結果

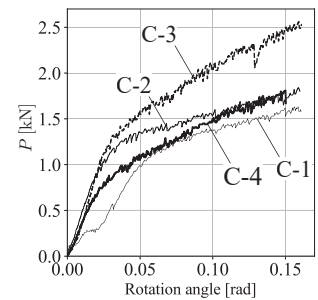


図5 貫せい寸法が異なる試験体の包絡線

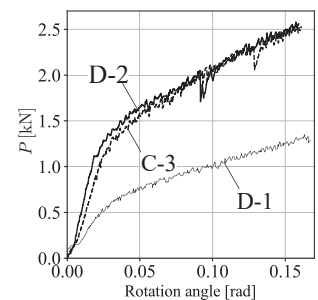


図6 柱幅寸法が異なる試験体の包絡線

## 3. 画像計測により得られた貫のめり込み変形

### (1) 解析条件

画像計測は画像相関法 (DIC)<sup>5)</sup> による画像計測ソフト VARSE (Acuity 社製、ver0.9.10)<sup>6)</sup> を用いる。画像計測では、画像計測範囲を任意のサイズでセル分割した上でランダムドットパターンを追跡し、各セルの中心位置で代表変位とひずみを算出する。ランダムドットパターンの追跡は、解析対象画像の直前に撮影された画像を基準としてテンプレートマッチング処理を行った。

全ての試験体において画像計測の範囲を 5 mm 角にセル分割し分析する。図7にセル分割例を示す。ここで、貫せい方向の分割数を行とし、貫の長さ方向の分割を列とした。

### (2) 貫のめり込み変形

画像計測により得られた各セルの変位情報をもとに貫のめり込み変形を算出する。ここで、貫のめり込み変形は図8に示すように同列の最上行と最下行に位置するセルのy方向（めり込み方向）変位の差から算出した。

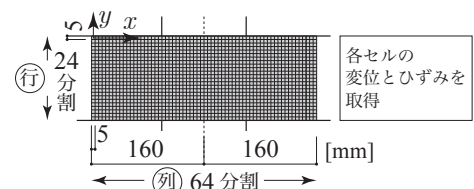


図7 セル分割（試験体C-3）

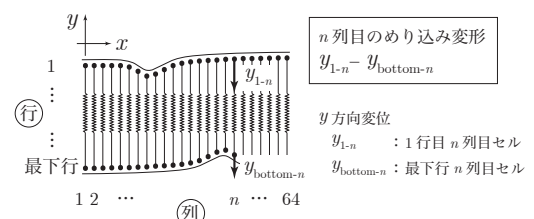


図8 めり込み変形の算出

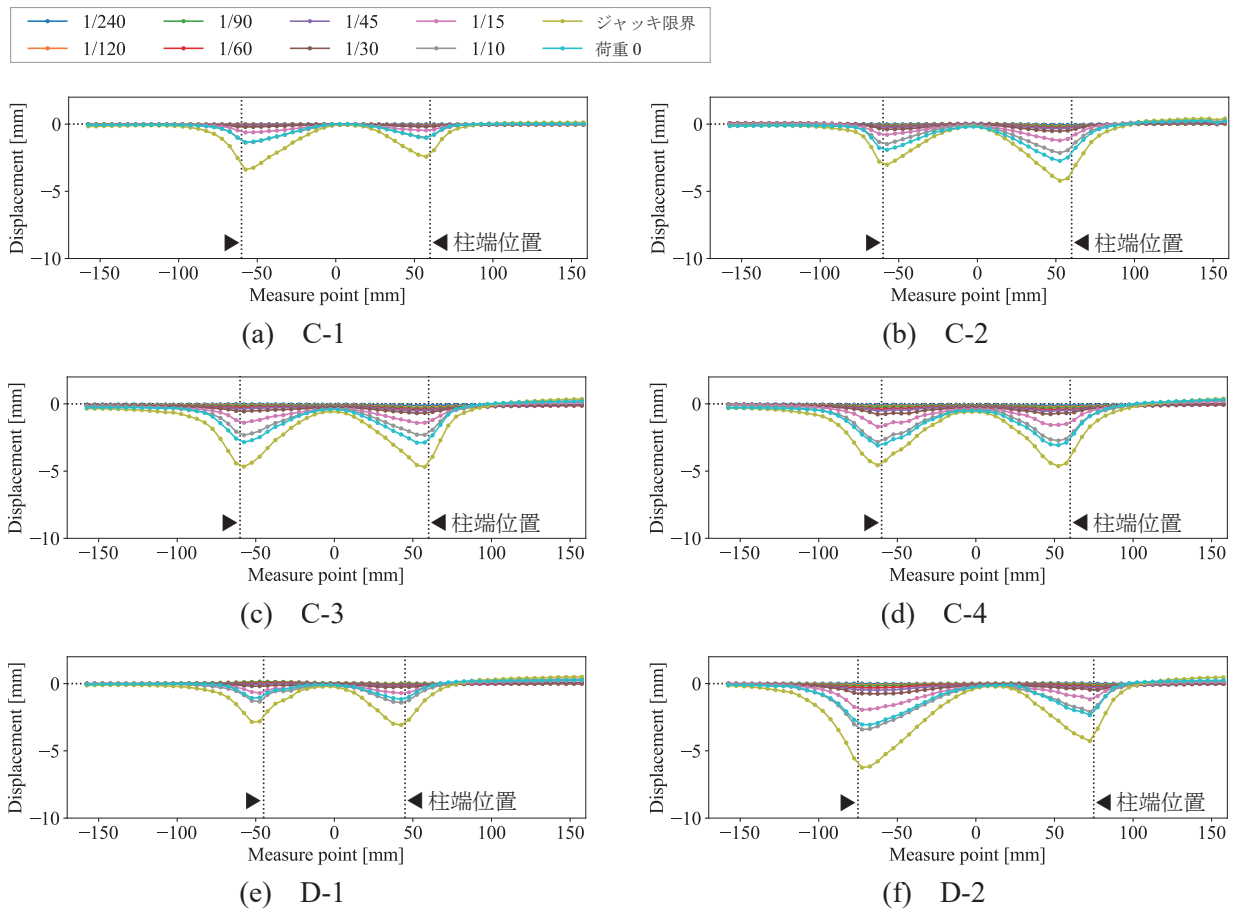


図9 めり込み変形

図9にめり込み変形の算出結果を示す。縦軸はめり込み変形、横軸は柱芯から該当セルの中央位置までの距離である。図中の各線は部材変形角が1/240、1/120、1/90、1/60、1/45、1/30、1/15、1/10 rad 時とジャッキ限界時、実験終了時のめり込み変形を示しており、波線は柱端の初期位置を示している。めり込み変形は柱端位置付近を頂点とした山形を示し、同部材変形角時と比較すると貫せい寸法が大きいほど柱外の余長部でのめり込み領域が広がる傾向があった。また、柱幅が大きくなると回転中心位置から柱端までの距離が大きくなるため、同じ部材変形角時と比較した場合に大きなめり込み変形を示した。

### (3) 稲山と北守らによる表面変位形状の提案式と計測結果の比較

ここで、稲山<sup>7)</sup>と北守ら<sup>8)</sup>による既往研究において仮定された表面変位形状（本論文ではこれをめり込み変形と呼んでいる）と画像計測により得られためり込み変形を比較する。表面変位形状はめり込み耐力を評価する上で非常に重要な要素であるため、実現象との適切な対応が望まれる。

まず、稲山は文献7)で式(1)のように表面変位形状 $f(x)$ を仮定した。これは、試験体底面を剛体支持された等変位めり込みにおける余長部の変形を評価したものであるが、同様の表面変位形状を通し貫接合部の耐力評価式でも使用した。

$$f(x) = \delta e^{-\frac{3x}{2Z_0}} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $\delta$ は加圧部でのめり込み量、 $x$ は加圧端部からの距離、 $Z_0$ は材厚（貫せい寸法に対応）である。その後、北守ら<sup>8)</sup>はめり込みを受ける材の支持条件に着目した上で、稲山の表面変位形状に補正を加え、通し貫接合部のような両側回転めり込みの場合の表面変位形状として式(2)を提案した。

$$f(x) = \delta e^{-\frac{5.5x}{Z_0}} \quad \text{式(2)}$$

なお、北守らによる補正は有限要素解析結果を根拠とするものであり、実際のめり込みを受ける材

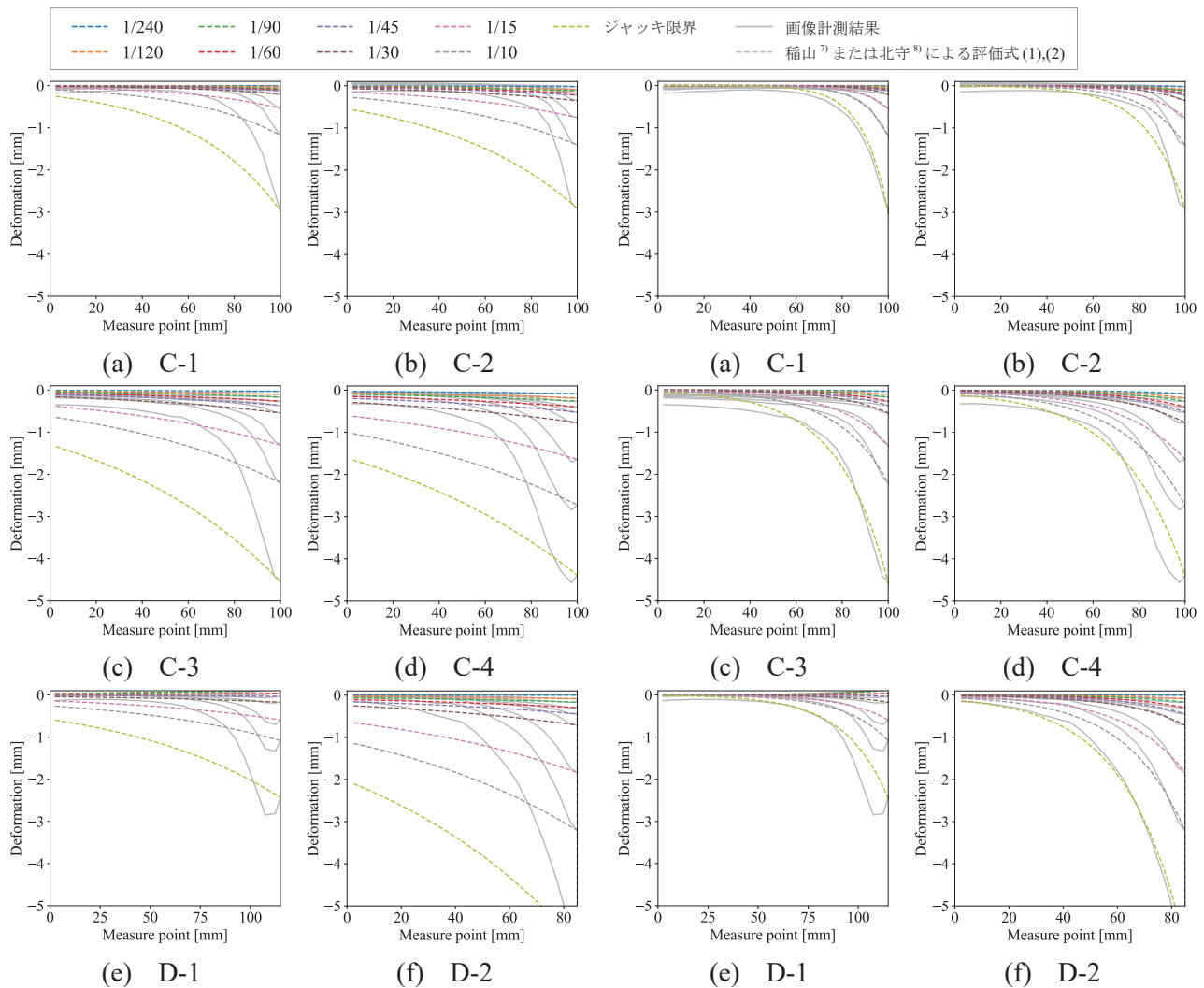


図 10 稲山による表面変位形状<sup>7)</sup>との比較

図 11 北守による表面変位形状<sup>8)</sup>との比較

の変形形状を計測し、決定されたものではない。木材を対象として有限要素解析を行う際には、設定が難しい材料特性値があるために、実現象を直接計測し対応を確認する必要がある。

表面変位形状は部材に生じるめり込みひずみを決定するために使用され、めり込み耐力の評価に大きな影響を与える要素であるため、実現象と 2 つの式の表面変位形状の対応を確認する必要がある。

画像計測による計測結果と式 (1)、または式 (2) を比較し図 10 と図 11 に示す。式 (1) と式 (2) 中の  $\delta$  は柱端位置でのめり込み量とし、柱端位置の左右の列でのめり込み変形の平均値を採用した。図は、柱の左側の画像計測範囲について示しており、縦軸が表面変位形状、横軸が画像計測範囲の左端からセル中心までの距離を示している。波線が式 (1) または式 (2) による既往の文献<sup>7)</sup>と<sup>8)</sup>による提案表面変位形状であり、実線が画像計測により計測しためり込み変形である。

図 10 と図 11 を見ると、稲山の提案表面変位形状はめり込み変形を過大評価しており、北守らによる提案表面変位形状は計測結果とよく対応している。特に、北守らによる提案表面変位形状は加圧部でのめり込み変形が大きくなる大変形時の対応がよい。

## 4. 材料特性とめり込み変形に基づく接合部耐力の考察

### (1) 材料実験

3. でめり込みを受ける貫に生じるめり込み変形が得られた。本章では、得られた変形と材料特性の情報から接合部耐力を予測し、実験結果と比較する。

貫の材料特性を得るため、全面横圧縮試験を行った。図 12 に試験体寸法と木取りを示す。接合部試



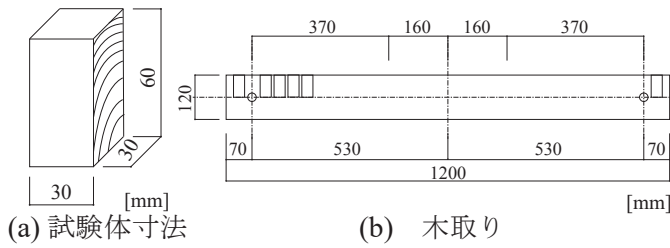


図 12 材料実験の試験体情報

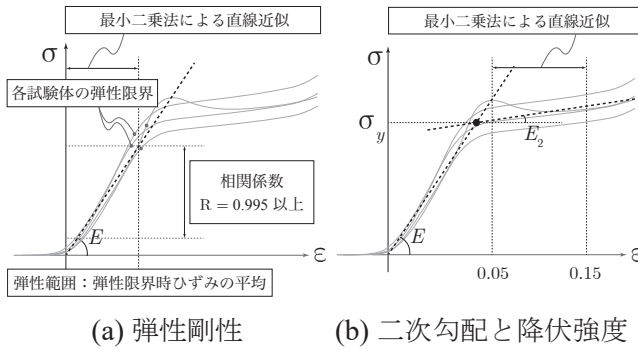


図 13 材料特性値の算出

表 3 材料特性値

| 試験体 | 弾性係数<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 二次剛性<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 降伏強度<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 降伏時<br>ひずみ |
|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------|
| C-1 | 350.41                       | 4.86                         | 5.54                         | 0.0158     |
| C-2 | 360.37                       | 1.18                         | 5.79                         | 0.0161     |
| C-3 | 400.27                       | 6.58                         | 7.45                         | 0.0186     |
| C-4 | 235.56                       | 4.47                         | 4.20                         | 0.0178     |
| D-1 | 220.31                       | 4.72                         | 4.95                         | 0.0225     |
| D-2 | 239.72                       | 6.59                         | 5.27                         | 0.0220     |

験体 1 体につき、全面横圧縮試験体を 6 体作成した。実験は精密万能試験機を使用し、圧子は固定座厚板とした。載荷速度は 1 mm/min とし、ストロークひずみ 0.2 を目標に載荷した。ただし、ひずみが 0.2 に到達する以前に試験体が破壊し、急激な耐力の低下が確認された場合はその時点で実験終了とした。得られた応力-ストロークひずみ関係は、載荷開始から試験体と圧子が接触

するまでに生じるストロークひずみを除く処理を行った。

次に、得られた応力-ストロークひずみ関係から材料特性値を以下のように整理する。図 13 に材料特性値の算出について示す。まず、弾性限界位置は、相関係数が 0.995 以上となる直線部分を抽出し、その範囲で最大圧縮ひずみを示す位置とする。次に、試験体毎に弾性限界時のひずみを求め、それらの平均ひずみを貫の弾性限界時のひずみとする。原点と貫の弾性限界時のひずみまでを弾性範囲とする。弾性係数  $E$  は、この弾性範囲において、試験体 6 体分の応力-ひずみ関係を原点を通る直線に近似し求めた。二次剛性  $E_2$  は、ひずみ 0.05 ～ 0.15 までの範囲を直線近似し求めた。弾性係数を決定した直線と二次剛性を決定した直線の交点を降伏強度  $\sigma_y$  とし、バイリニア型の構成則モデルを作成する。

## (2) 並列ばねモデルによる接合部耐力の推定

並列ばねモデルは稲山によるめり込み評価式<sup>7)</sup>と通し貫接合部のめり込み評価式<sup>7),9)</sup>の基礎となるもので、図 14 のように材料特性を構成則とするばねが並列に並ぶモデルである。このモデルにおいて、各ばねの縮み量を評価する表面変位形状は非常に重要な要素である。そこで、画像計測により計測した実際の通し貫接合部に生じるめり込み変形と貫の材料特性から並列ばねモデルにより貫の接合部耐力を算出し、実際の実験耐力と比較する。

図 15 に並列ばねモデルによる通し貫接合部の耐力予測手法を示す。初期の貫芯と柱芯交点を回転中心とし、各並列ばねが負担する荷重  $p_n$  に回転中心からの距離  $l_n$  を乗じ、全てのばね  $N$  個について合計することでめり込み抵抗モーメント  $M_{cv}$  を算出する。よって、式 (3) のように求められる。

$$M_{cv} = \sum_{n=1}^N p_n l_n \quad \text{式 (3)}$$

ここで、ばねの数  $N$  はセル分割数に依存し、各ばねのひずみは最上行と最下行に位置するセルの  $y$  方向変位とセル間の距離から求める。ただし、画像計測結果には微小に引張を示すばねがあることが確認された。この原因は、柱の左右でめり込み変形が全く対称となることはなく片側のめり込み部で大きなめり込みが生じた場合に、反対側の貫の余長部で引張が生じることによると思われる。しかしながら、

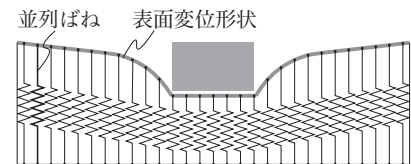


図 14 並列ばねモデル

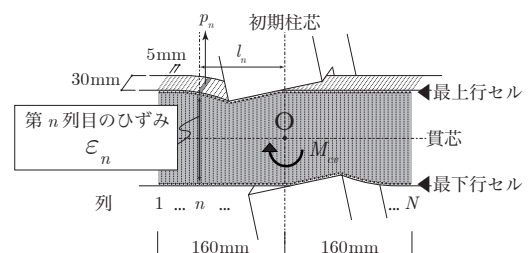


図 15 めり込み抵抗モーメントの算出

この引張ひずみを示すばねの取り扱いが難しく、議論の余地があるが、以下ではめり込みモーメントの合計から除外する<sup>2)</sup>こととした。また、式(3)を適用すべきめり込み範囲については判断が難しいところであるが、図9から画像計測範囲の左右端ではめり込み量がほぼ0であることが確認でき、それらから計算される左右端でのめり込みひずみは十分小さい。これより、画像計測範囲を並列ばねモデルの適用範囲とした。なお、各ばねのひずみは画像計測ステップごとに随時更新し、めり込み抵抗モーメントを計算する。このようにして算出されためり込み抵抗モーメントと、ジャッキ計測荷重による実験モーメントが同等であった時、通し貫接合部に並列ばねモデルが適用可能であることが確かめられる。実験モーメントはジャッキ荷重に柱長さ $L$ を乗じて算出した。

算出しためり込み抵抗モーメントと実験モーメントを比較して図16に示す。めり込み抵抗モーメントが実験モーメントよりも小さくなった。さらに、めり込み抵抗モーメントには降伏に伴う剛性の変化が見られない試験体がある。通し貫接合部の耐力発現機構を考えると、めり込み降伏が接合部耐力の降伏要因であると考えられ、めり込み抵抗モーメントに降伏が見られないのは実現象と対応しない。

通し貫接合部には摩擦による抵抗があると考えられることもできるが、摩擦抵抗は面に垂直な荷重に応じて変化する荷重であるため、接合部耐力の降伏要因とはならないと考えられる。図17に例として試験体C-1の左側柱外の画像計測範囲に位置する各ばねのひずみと接合部耐力の関係性を示す。黒の実線で各ばねのひずみを示し、グレーの実線で接合部耐力を示した。左縦軸は並列ばねのひずみ、右縦軸は実験モーメント、横軸は部材回転角である。図中に示した横の破線は材料実験から得られた降伏ひずみであり、縦の破線は初めにばねのひずみが降伏ひずみに到達したタイミングを示している。この縦の破線が実験モーメントの剛性変更点と対応すると思われるが、図17では対応していない。これは、通し貫接合部では貫せい全体が圧縮されるのではなく、柱と接触する部分に局所的なめり込みが生じるために貫せい全体をばねとして表現するような並列ばねモデルでは、めり込みひずみを適切に評価できていないためと考えられる。さらに、柱と接触のない余長部でのめり込みひずみ分布に着目すると、柱との接触位置に近い貫の上下端ではなく、貫芯寄りの位置にあるセルでひずみが集中する様子が確認された。このめり込みひずみが集中するセルの位置は、柱端位置から水平方向（貫の材長方向）に離れた列ほどめり込み側から離れるように変化する様子が計測された。

以上の検討より、局所的な変形であるめり込みを評価するひずみを評価する領域に課題がある。そこで、めり込みが集中する領域の局所的な変形を評価することを重視し、大胆ではあるが図18に示すように、各列に位置するセル中で最も大きな圧縮ひずみを示したセルのひずみを該当列のばねのひずみとして採用することとし、めり込み抵抗モーメントの算出を試みる。その結果を図19に示す。並列

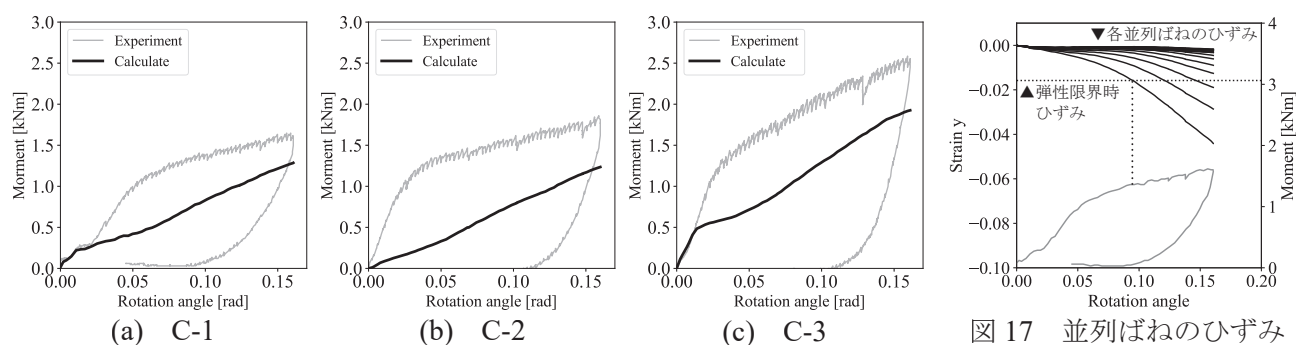


図17 並列ばねのひずみ

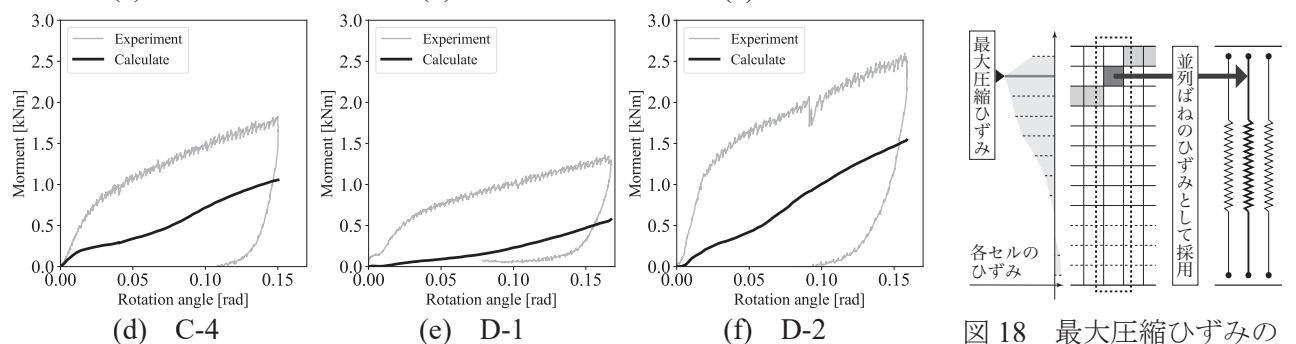


図18 最大圧縮ひずみのばねひずみへの採用

図16 めり込み抵抗モーメントと実験モーメントの比較

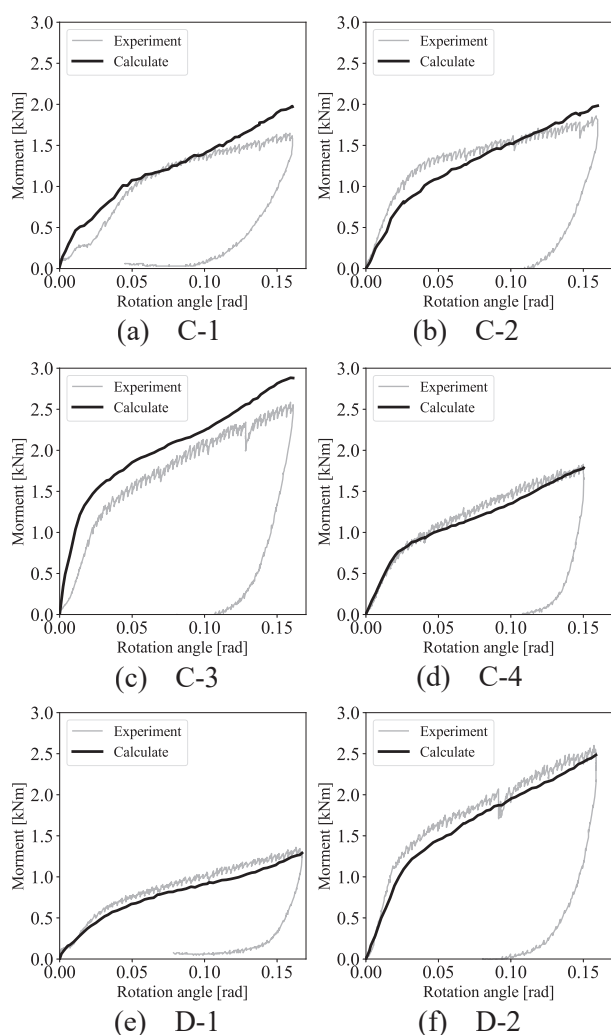


図 19 めり込み抵抗モーメントと実験モーメントの比較

ばねのひずみとして該当列のセルの最大圧縮ひずみを採用した場合、算出しためり込み抵抗モーメントと実験値がよく対応した。特に、降伏位置の対応がよい。

## 5. おわりに

本研究では画像計測により通し貫接合部に生じるめり込み変形を計測した。さらに、材料特性を把握した上でめり込みによる耐力を予測し、接合部実験結果と比較し検証した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 接合部耐力を予測する場合は部材寸法だけでなく、材料特性の評価が必要である。
- (2) 画像計測により得た表面変位形状は、北守らにより提案された表面変位形状とよく対応した。
- (3) 通し貫接合部のように貫の上面もしくは下面の片側からのみめり込みを受ける場合、貫せい全体をばねとして置き換える並列ばねモデルでは接合部耐力を過小評価する可能性がある。
- (4) 並列ばねモデルのばねのひずみとして、該当部分での最大圧縮ひずみを採用すると、並列ばねモデルで予測した接合部耐力が実験とよく対応した。

謝辞：本研究は JSP 科研費 JP20J11590 の助成を受けたものです。また、画像計測システムは Acuity の支援をいただきました。ここに感謝の意を表すとともにお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 井上祥子, 村本 真: 木造軸組解析のための梁-柱有限要素モデルの提案, 構造工学論文集, Vol. 65B, pp. 247-255, 2019.
- 2) 井上祥子, 村本 真: 木材のめりこみ試験時の弾塑性表面変位形状の計測と全面横圧縮応力ひずみ関係を用いためりこみ荷重の予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 88 巻, 第 805 号, pp. 467-478, 2023.
- 3) 井上祥子, 村本 真: 楔なし通し貫接合部の貫に生じるひずみ分布の画像計測, 歴史都市防災論文集, Vol. 16, pp. 17-24, 2022.
- 4) 井上祥子, 村本 真: 通し貫接合部の貫に生じるめり込みと接合部耐力の関係, 日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系, 第 63 号, pp. 281-284, 2023.
- 5) Yuan-Sen Yang, Chang-Wei Huang, Chiun-lin Wu: A simple image-based strain measurement method for measuring the strain fields in an RC-wall experiment, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Volume 41, Issue 1, pp. 1-17, 2011.
- 6) VARSE: <https://www.acuity-inc.co.jp/products/varse/> (2022.4.15 参照)
- 7) 稲山正弘: 木材のめりこみ理論とその応用-靱性に期待した木質ラーメン接合部の耐震設計法に関する研究-, 東京大学学位論文, 1991.
- 8) 北守顕久, 森 拓郎, 片岡靖夫, 小松幸平: 木材の部分横圧縮における余長効果の影響-支持条件における違いの検討-, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 642 号, pp. 1477-1485, 2009.
- 9) 日本建築学会: 木質構造接合部設計マニュアル, 2009.