

# 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

## Strain Distribution of Nuki-Column Joint Using Digital Image Correlation

井上祥子<sup>1</sup>・村本真<sup>2</sup>

Sakiko Inoue and Makoto Muramoto

<sup>1</sup> 京都工芸繊維大学大学院 工芸科学研究科建築学専攻 博士後期課程

日本学術振興会特別研究員 (DC2) (〒 606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町)

Graduate Student, Kyoto Institute of Technology, Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science

<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

This paper illustrates the progress of the strain distribution of Nuki-column joints using image analysis by the digital image correlation method. In the cyclic loading tests of the Nuki-column joints, the Nuki was moved to the front for image measurement, and compressive displacement of perpendicular to the grain and the strain distribution were recorded without the effect of friction. The results of the image analysis show that the range of the compressive strain region is the width of the column and that the elastic range is generally less than 1/30 rad. It is also illustrated that the distribution shape of the elastic-plastic strain differed from that of the elastic strain.

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

## 1. はじめに

伝統木造建築の接合部は複数の部材で構成されており、引張、曲げ、めり込みや摩擦などの力が組み合わされて接合部の耐力を発現する。中でも、めり込みは接合部の耐力を考える上で非常に重要な要素であり、多くの報告<sup>1)~5)</sup>がある。

稲山<sup>1)~3)</sup>による方法は木造接合部の設計法<sup>6)</sup>に使用されており、代表的なめり込み耐力評価法である。稲山は、等変位部分横圧縮時の余長部の凹み形である表面変位形状を仮定した上でめり込み耐力評価式を提案し、それを応用することで通し貫接合部の耐力評価式を提案している。しかし、稲山の提案は試験体底面を剛体に支持される等変位部分横圧縮の表面変位形状を、通し貫接合部の回転めり込みのような、めり込みを受ける材の支持条件が必ずしも剛体支持とならないような場合にも適用しており、めり込み耐力を十分に評価できるとは限らない。

北守ら<sup>7)</sup>は支持条件の違いによる表面変位形状の変化に着目し、有限要素解析により得られた表面変位形状から、稲山の提案表面変位形状に支持条件の違いによる補正を加える表面変位決定係数を提案している。

以上の方法は、ひずみから応力とめり込み荷重を算出する評価式となっており、表面変位形状を正確に評価することが重要である。しかし、表面変位形状について検討されているものの、実際の接合状況で表面変位形状を計測した例は見当たらず、実現象と提案された表面変位形状の対応については不明なままである。よって、実際のめり込み挙動を把握する必要がある。

そこで、本研究では通し貫接合部の繰り返し載荷実験を行い、画像計測を用いて通し貫に生じるめり込みによる表面変位形状を直接的に計測した結果を述べる。さらに、めり込み方向のひずみ分布について述べる。

## 2. 通し貫接合部の繰り返し載荷実験

### (1) 試験体

試験体寸法を図1に示す。柱は120×120 mm、貫は120×30 mmであり、材質は全て目視等級区分1級のヒノキとした。試験体名と試験体条件、含水率を表1に示す。試験体はA-1とB-1シリーズの2種類であり、A-1は1体、B-1は3体用意した。B-1では画像計測を行うため、計測面が外部より撮影可能である必要があり、図2(b)に示すように、柱正面側に貫をずらした。

### (2) 実験概要

試験体設置図を図3に示す。柱脚部と貫端部は鋼製治具により支持し、柱頭部はスクリージャッキと接続した。治具接続部でのモーメント抵抗を除去するため、柱脚部をピン支持し、貫端部・柱頭部と治具の間にはベアリングを設置した。また、載荷中に貫の面外変形を防ぐため、横振れ止めを設置した。なお、貫と横振れ止め間にはボール支承を設置し、貫とボール支承間の摩擦抵抗は少ない。

柱頭部と貫芯位置の水平変位量は巻き込み変位計により計測し、柱の両側面に設置した一般変位計により貫の回転角を求める。

載荷は柱頭の水平変位で制御し、図3に示すように水平変位 $\delta$ を柱長さ $L$ で除した部材変形角 $\theta$ によって制御する。載荷履歴は部材変形角が1/240、1/120、1/90、1/60、1/45、1/30、1/15、1/10 radを正負2回ずつ繰り返した後、ジャッキ限界まで押し切る。その後、荷重を0として実験を終了した。

画像計測は試験体B-1シリーズの合計3体に対して行い、貫の表面変位形状とひずみ分布を計測した。図4(b)に示すように画像計測範囲には水性白色塗料を塗り、木目のパターンを消したのちに黒色スプレー塗料でランダムドットパターンを作成した。図5は、試験体正面に工業用カメラ（DAHENG IMAGING製、画像サイズ5496×3672 pixel）を設置し、撮影している様子である。撮影は載荷開始直前に1回、載荷開始後は柱頭部が2～3mm程度変位するごととする。

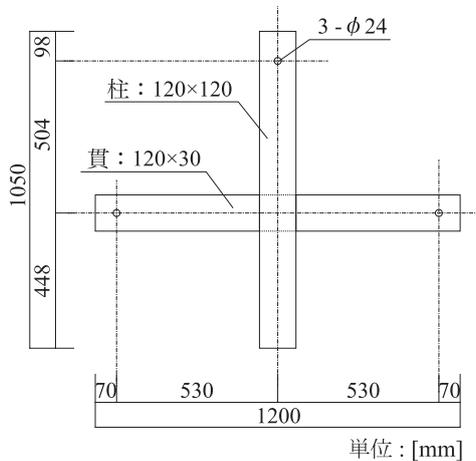
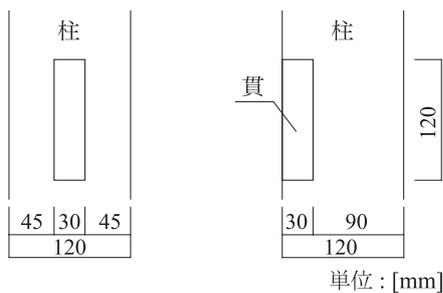


図1 試験体寸法



(a) A-1 (b) B-1

図2 柱と貫の関係

表1 試験体一覧

試験体名	貫芯の仕様	画像計測	含水率 [%]	
			柱	貫
A-1	図2(a)	-	17.5	12.5
B-1-1		○	11.4	12.5
B-1-2	図2(b)	○	19.0	16.3
B-1-3		○	17.5	16.0

なお、全ての試験体に楔はない。-は計測なしを示す。

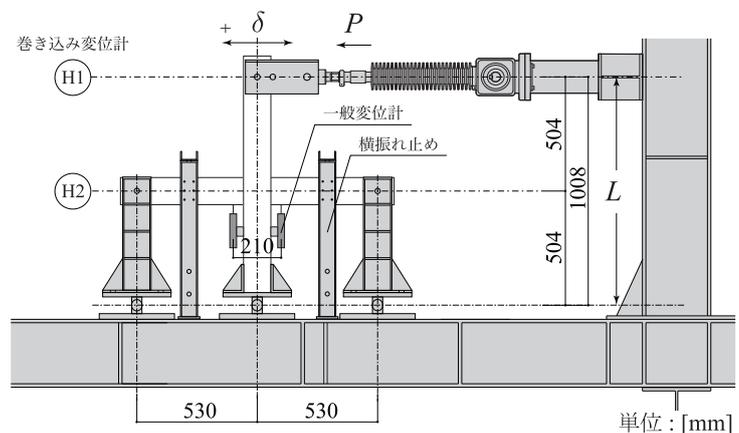
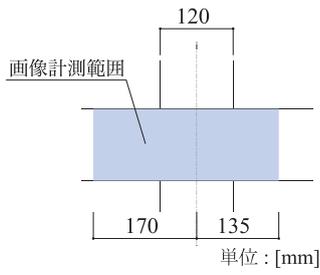


図3 試験体設置図



(a) 計測範囲



(b) ランダムドットパターン

図4 画像計測の範囲

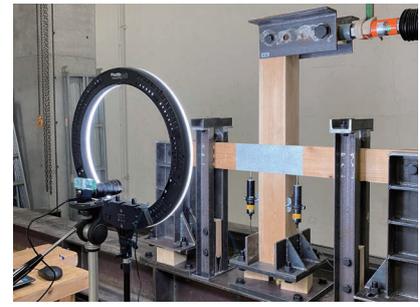


図5 画像計測の様子



図6 柱の変形  
(A-1)



図7 計測面より内側の  
貫上部のめり込み (B-1-1)

表2 貫の抜け出し部位

	N上	S上	N下	S下	めり込み位置名称
B-1-1	×	○	○	○	
B-1-2	○	×	○	○	
B-1-3	×	○	○	○	

×：画像計測面より内側でめり込んだ部分

### 3. 実験結果と貫に生じためり込み変位

#### (1) 目視により確認した部材の変形

前述したように、画像計測のために貫の位置を柱に対して偏心させている。そのため、試験体形状が通し貫接合部の変形状態に及ぼす影響を初めに確認する。

##### a) 接合部付近の柱の変形

A-1 と B-1 シリーズのいずれも貫と柱の接触部では、柱側が丸みを帯びた形状に変化した。その様子を図6に示す。ただし、B-1 シリーズでは柱の切り欠き部分から図7にあるような繊維にそった割れが生じたものがある。切り欠いて貫を通すと、貫の回転に伴って切り欠き部分がわずかに開くため、柱材にせん断破壊が生じたと考えられる。

##### b) 貫の変形

貫に生じるめり込みが大きくなるにつれて、めり込み部分の貫側面に膨れ出しが確認された。この膨れ出しによって、B-1 シリーズの試験体では貫がわずかに前面に抜け出し、図7に示すように柱が画像計測面より内側でめり込んだものがあった。表2に各試験体の貫の抜け出し状況を示す。

#### (2) 荷重-部材変形角関係

図8に各試験体の荷重-部材変形角関係を示す。また、図9に図8より作成した包絡曲線をまとめて示す。

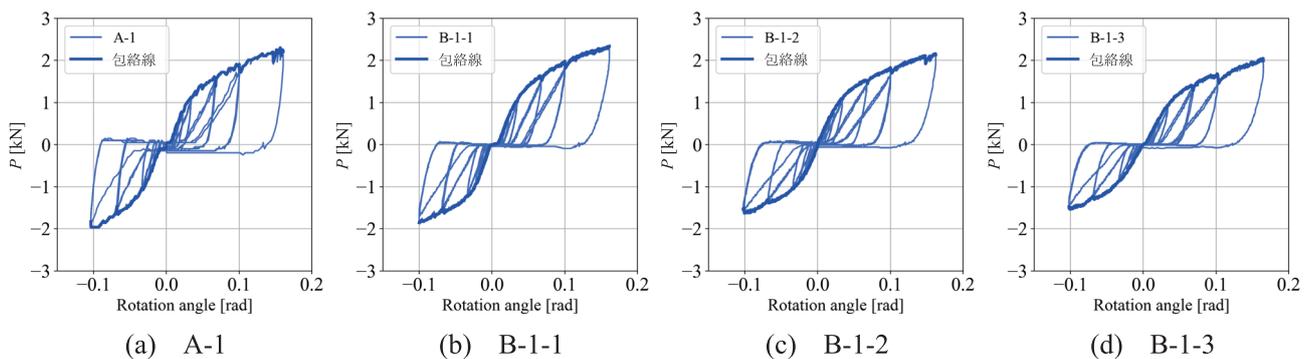


図8 荷重-部材変形角関係

図9よりA-1とB-1シリーズの荷重-部材変形角関係の包絡曲線にはほとんど差がないことが確認でき、図2に示した貫の仕様が荷重-部材変形角の包絡曲線に与える影響は見られない。

ただし、図8(a)の試験体A-1では载荷中に初期位置を通る付近で0.1 kNほどの耐力を示し続けた。これは図8(b)～(d)のB-1シリーズではみられない。B-1シリーズは貫手前面の拘束がなく、貫面に作用する摩擦力が異なるためである。3.(1)で述べたように、貫の上下面で柱がめり込み、その部分が面外方向へ膨れ出すことで貫穴内で摩擦力が作用するが、貫側面の拘束がないB-1シリーズでは摩擦力が作用しない。B-1シリーズではめり込み抵抗による荷重のみが計測されていると考えられ、めり込み変形と荷重の関係が明快になっている。

いずれの試験体においても、部材変形角 1/30 rad あたりで剛性の変化がみられ、その後も耐力低下はなく最終変形時まで耐力が上昇した。

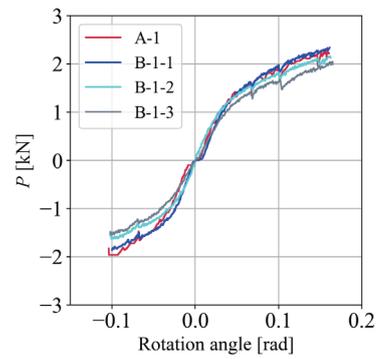


図9 包絡曲線

### (3) 画像計測により得られためり込み変位形状とひずみ分布

本節では画像計測結果の解析条件とその結果について述べる。ここで、貫に生じるめり込みの範囲と、貫せい方向のひずみ分布を確認し、実際に貫に生じているめり込み挙動を把握する。

#### a) 解析条件

画像計測は画像相関法 (DIC)<sup>8)</sup> による VARSE (Acuity 社製、ver.0.9.10)<sup>9)</sup> を用いる。画像計測では図4(a)の解析対象範囲を図10に示すようにセル分割し、ランダムドットパターンを追跡することで各セルの変位とひずみを算出する。ここで算出される変位は各セルの中央部分での代表変位である。本論文の計測では、セルサイズが5 mm 角となるように分割を行い、貫は24×61に分割した。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たテンプレートマッチング処理による。

以降の分析ではめり込み方向であるy方向の変位とひずみについてのみ分析する。

#### b) 貫のめり込み変位形状

画像計測により計測した貫のめり込み変位形状について分析する。以降、各セルの初期位置からのy方向変位をめり込み変位とし、x軸方向の分布をめり込み変位形状とする。3.(1)に示したように、貫上側では画像計測面よりも内側でめり込んだ試験体が多かったため、B-1シリーズ全ての試験体の貫下側でのめり込み変位形状を分析する。ここでは、貫上下でのめり込みは対称に生じているものとした。

図11にB-1-1の計測範囲最下行(24行目)のめり込み変位形状を示す。同図は、各制御変形角正側1回目到達時と実験終了時(荷重0時)の変位形状を示しており、横軸は柱芯からセル中心位置までの距離を、縦軸は各セルの初期位置からのy方向変位を示す。図中の破線は柱側面の初期位置を示している。変位形状は柱端とのめり込み位置で山形に変形している様子が確認できる。しかし、図11中に示された変位形状は

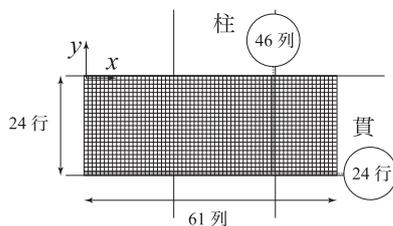


図10 セル分割

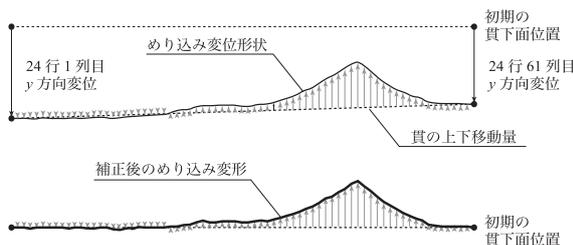
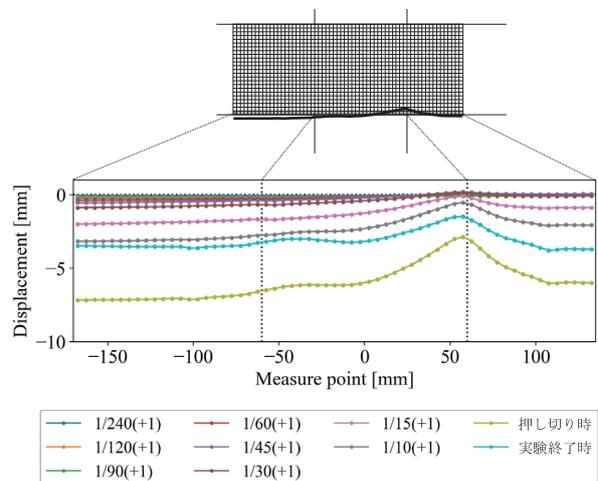


図12 貫の上下移動量の除去



(+1)は正側載荷1回目を示す。以降同じ。

図11 めり込み変位形状 (B-1-1の例)

部材変形角の増大に伴う貫全体での上下移動の変位を含む。ここで、図 11 より山形のめり込み変位形状が左右端部付近に近づくにつれ直線的で平坦なものに変化していることが確認でき、左右端部のセルではめり込みによる変位ではなく、貫の上下移動による付加変位のみが計測されている。そこで、図 12 に示すように  $y$  方向変位を補正する。計測範囲の最下行左右端部のセルでの変位量を線形補間することで、各セル位置での貫全体の上下移動量を算出する。こうして求めた各セル位置での貫の上下移動量を、図 11 に示した変位量に補正して貫の正味のめり込み変形とする。

算出しためり込み変形を図 13 に示す。ここで、柱芯より 105 mm 程度離れた位置で変位形状に凹みが確認できる。これは、貫下部に設置された一般変位計の先端の影響によるものである。画像解析時に変位計の先端の反射光による輝度の変化の影響を受けた可能性がある。

図 13 より、柱のめり込み位置を頂点として、ほぼ左右対象にめり込み変形が生じていることが確認された。このとき、頂点より左側は柱の切り欠き部（貫穴）と接触しているが、右側は接触のない余長部となっている。接触条件が異なるものの、左右でのめり込み形状にはほぼ差がない。計測結果より、めり込みの影響範囲がめり込み頂点位置より左右に約 60 mm と評価できる。この長さは柱断面寸法の半分である。試験体寸法が異なる場合に、柱外側での余長部のめり込みの影響範囲長さや貫せいや貫厚寸法、柱寸法が関連する可能性を否定できないものの、めり込み変形が左右対象に生じていることと、貫と貫穴の接触長さがめり込み影響範囲と同じであることを考慮すると、通し貫接合部のめり込み影響範囲は柱寸法により決まる可能性がある。

ここで、めり込みの影響範囲の検討を進めるため、図 14 に最下行セルで計測された  $y$  方向（めり込み方向）ひずみを示す。B-1 シリーズの全試験体で、めり込み位置で圧縮ひずみが生じ、めり込み位置と反対側では引張ひずみが生じた。B-1-1 では押し切り時と実験終了時にめり込みが生じていない側でひずみが引張側から圧縮側に生じている。これは繰り返し载荷による残留変形によるものと考えられる。

さらに、図 14 より B-1 シリーズのどの試験体においても、柱中心付近にひずみが 0 となる中立軸が存在

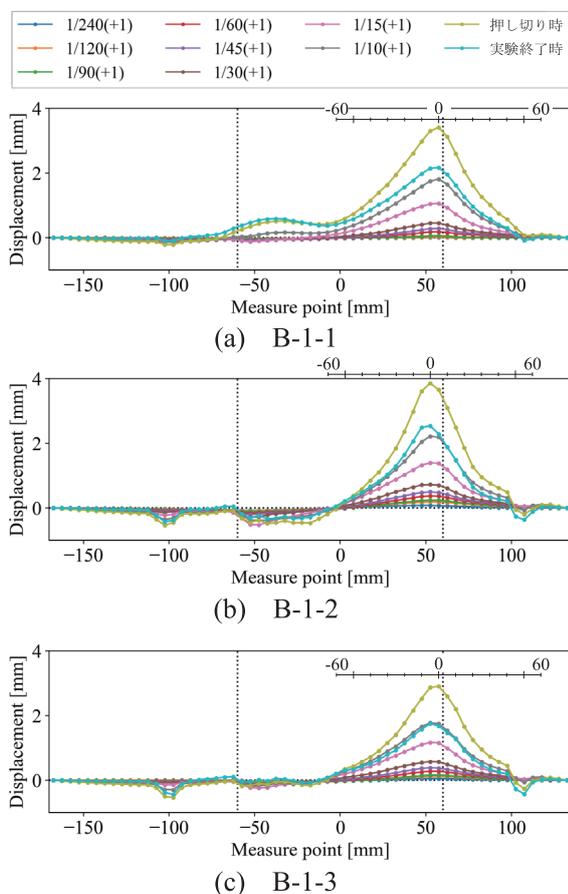


図 13 めり込み変形の分布

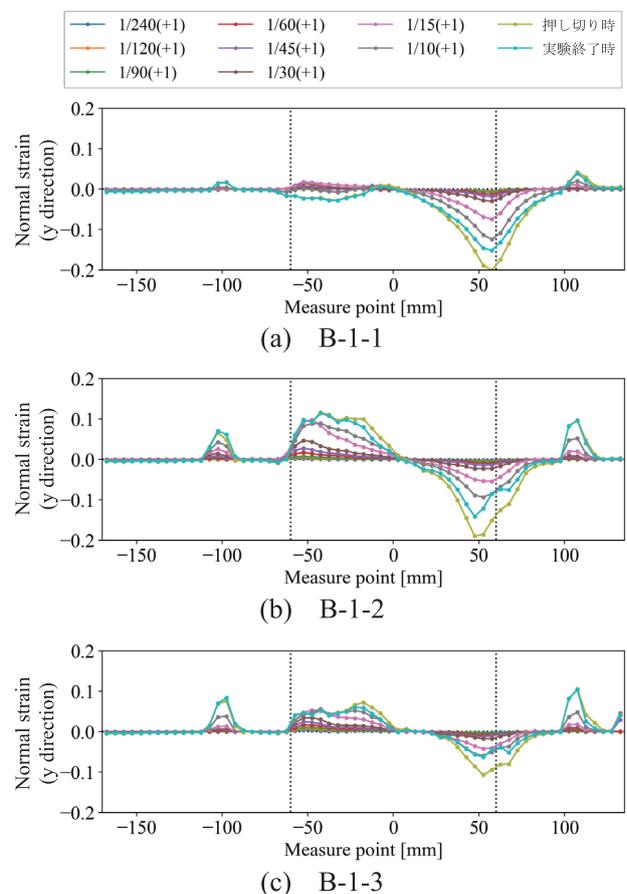


図 14 最下行（24 行）セルの  $y$  方向ひずみ分布

することが確認できる。めり込みの影響範囲は柱貫の境界付近を中心として柱幅と同じ長さとなる可能性がある。

### c) 貫せい方向のめり込みひずみ分布

図 15 にめり込み頂点位置となった 46 列目のセルに生じた y 方向ひずみ分布を示す。縦軸は貫の上端から各セル中央までの距離を示している。図 15(a) ~ (c) を見ると、貫芯位置より下部で顕著なひずみの進展があることが確認できる。特に、部材変形角  $1/15 \text{ rad}$  以降で貫下端部での急激なひずみの増大が見られ、直前の部材変形角  $1/30 \text{ rad}$  付近で貫下端のめり込み部分の一部が降伏し、塑性化したと考えられる。この時、急激なひずみの増大がみられる部分以外は弾性状態であると予想され、測定されたひずみ分布は弾性状態と塑性状態が混在する弾塑性状態のひずみ分布であると考えられる。めり込み変形で降伏したひずみ分布の変化は後述する。

貫上部では、部材変形角が小さい段階で引張ひずみが計測されたが、その後、部材変形角が大きくなるにつれ圧縮側にひずみが進展する様子が確認できた。部材変形角  $1/15 \text{ rad}$  正側 1 回目载荷時では貫上端から  $12.5 \text{ mm}$  の位置で部分的に圧縮ひずみが増大し、部材変形角  $1/10 \text{ rad}$  正側 1 回目以降では範囲を広げ貫上端から  $27.5 \text{ mm}$  までの範囲で圧縮ひずみを示している。引張ひずみの部分が圧縮ひずみとなった理由は、逆载荷時のめり込みにより、めり込みの一部で残留変形が生じたためと考えられる。

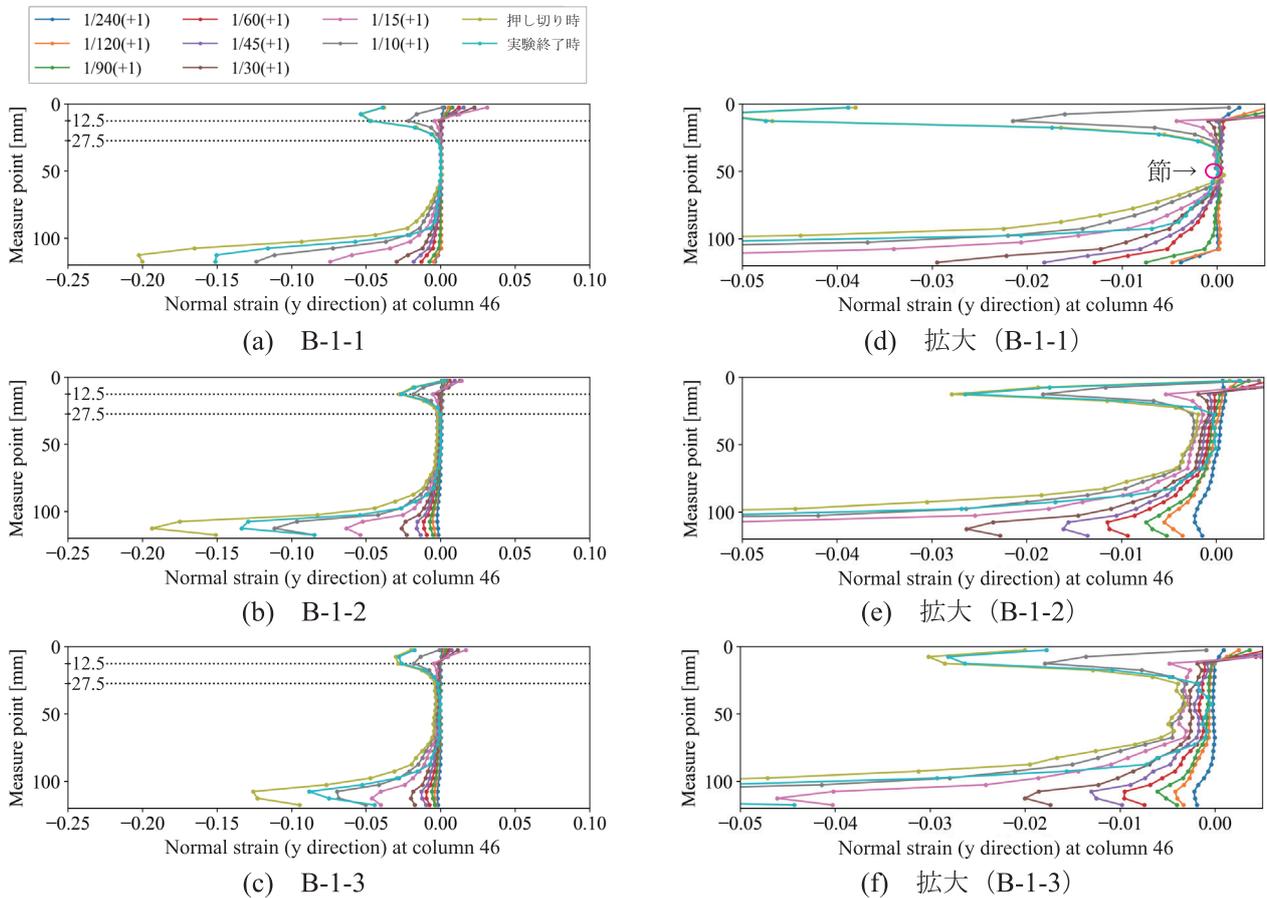


図 15 46 列セルの y 方向ひずみ分布

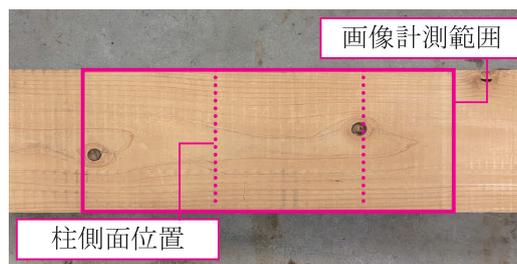


図 16 貫の節位置 (B-1-1)

図 15(d) ~ (f) は図 15(a) ~ (c) をそれぞれ横軸で拡大表示したものである。貫中央位置でのひずみが図 15(d) の B-1-1 ではほぼ 0 なのに対して、図 15(e), (f) の B-1-2 と B-1-3 では部材変形角の増大に伴い徐々にひずみが増加した。この原因は、B-1-1 の 46 列目上部には図 16 に示すような節があり、節の影響により貫中央部のひずみが増大しなかったためと考えられる。ただし、節の位置は貫中央部であり、貫の上下端のひずみ分布は図 15(e) と (f) と同様の傾向となっており、めり込み変形に与える影響は小さいと思われる。

以上より、貫にめり込みが生じるときの貫の変位およびひずみ分布形状が画像計測により示された。部材変形角 1/30 rad 付近でめり込み降伏が生じることが確認され、それ以降、めり込み部分の一部は塑性化し、急激にひずみが進展する弾塑性状態のひずみ分布が記録された。

ここで、弾性ひずみ分布の進展を検討し、どのような分布形であるかを調べる。部材変形角 1/45 rad までは確実に全てのセルが弾性状態であるとする。その上で、1/45 rad 変形時のひずみ分布形状を基本形状とし、各制御変形角での最下行セルのひずみを指標にひずみ分布形状を係数倍し、計測されたひずみ分布形状と比較する。図 17 に貫芯位置から貫下端までの範囲の比較結果を示す。図 17 より、基本形状を係数倍した想定ひずみ分布と計測されたひずみ分布がおおむね一致している。図 17(b) と (c) のように、貫の下端では必ずしもひずみ分布が最大値をとるわけではないため、弾性時といえどもひずみ分布の基本形状をどのように決定すべきかについてはさらなる検討が必要である。

さらに、部材変形角 1/15 rad 以降の弾塑性状態のひずみ分布と、部材変形角 1/45 rad のひずみ分布から決定した基本形状より、各部材変形角における弾性限界位置について確認する。ここで、ひずみ分布形状より貫下部分から降伏が始まると考えられ、弾性状態で試行したような最下行セルのひずみを指標にした想定ひずみ分布の計算は適切ではない。そこで、弾性状態では比例的にひずみ分布形状が変化するという仮定のもと、降伏するタイミングが最も遅いと考えられる 13 行目セル（貫上端より 62.5 mm）のひずみを指標としてひずみ分布の基本形状を係数倍してひずみ分布形状を求めた。ただし、B-1-1 の貫中心付近には節があったため、この試験体の想定ひずみ分布は算出しない。

図 18 に計測結果と想定ひずみ分布形状を示す。図 18 より、ひずみが比較的小さい貫芯位置（60 mm）付近では計測されたひずみ分布と想定ひずみ分布がほぼ一致しており、弾性状態であることが確認できる。一方で、めり込みが生じる貫下端部に近づくにつれて計測されたひずみ分布と想定ひずみ分布にずれが生じ、

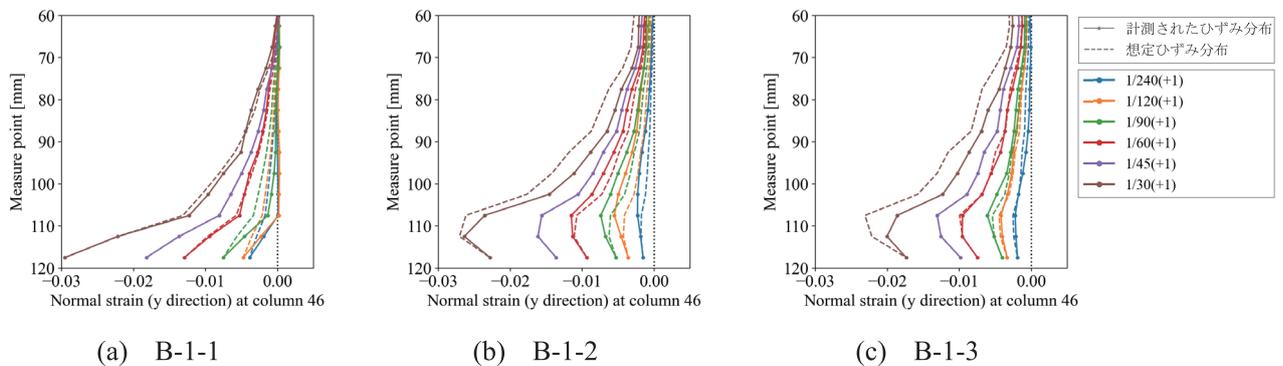


図 17 弾性状態のひずみ分布形状

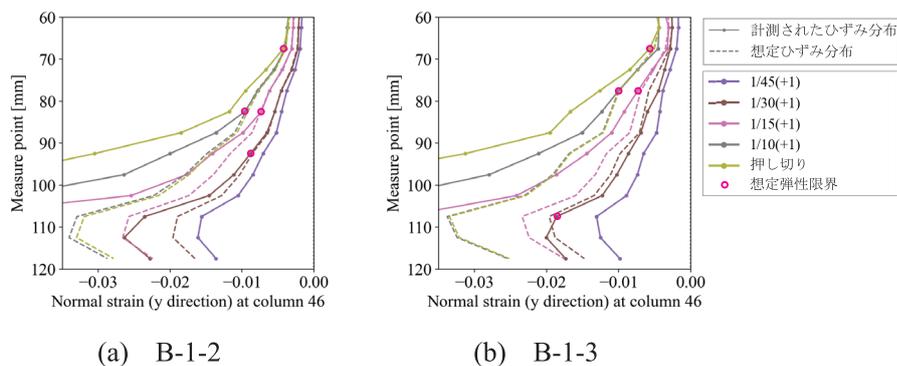


図 18 弾塑性状態の計測ひずみ分布形状と想定ひずみ分布

ひずみ分布形状が比例的な変化を示していない。ここで、計測されたひずみ分布形状と想定ひずみ分布形状を比較し、想定される弾性限界位置を赤丸により示す。この点は、計測されたひずみ分布形状と想定ひずみ分布形状を比較し、差が生じ始める位置として想定される弾性限界位置である。

図 18 より、载荷が進むと想定弾性限界位置が徐々に貫芯付近へ移動している様子が確認できる。これは、めり込みによって、貫下端から貫芯位置に向けて段階的に降伏が生じていることを意味している。しかし、想定弾性限界位置におけるひずみは若干ばらついた。

#### 4. まとめ

本研究では、通し貫接合部の貫に生じるひずみ分布を把握するための繰り返し载荷実験を行い、同時に画像計測を行った。以下に本研究により得られた知見を示す。

- (1) 貫のめり込み変形は柱側面位置を頂点とする左右対称の山形となり、柱芯位置でめり込み変形量がほぼ 0 となる。
- (2) 弾性状態における貫せい方向のひずみ分布形状は初期の分布から比例的に変化するが、必ずしも三角形分布とならない場合がある。
- (3) めり込み変形が大きくなるとめり込み部分の一部が塑性化する。塑性化した部分のひずみが大きく進展し、弾性状態でのひずみ分布形状とは形状がかなり変化する。
- (4) めり込みの長さは柱断面寸法によって決まる可能性がある。

今後、計測結果に基づいて弾性状態および弾塑性状態における貫せい方向のひずみ分布形状を予測する手法を構築する。

**謝辞：**本研究は JSPS 科研費 JP20J11590 の助成を受けたものです。実験では京都工芸繊維大学 高度技術センター技術職員の小山清司氏（当時）、澤井伸吾氏、同 大学院生・学部生の胡 蓉、吉田勇哉（当時）、山口咲子、大澤 陸の諸氏にご協力いただきました。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) 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.
- 2) 稲山正弘：木材のめりこみに関する研究 その 4：等変位めり込みの弾性剛性の計算式の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.907-908，1993.
- 3) 稲山正弘：木材のめりこみに関する実験的研究 その 3：縁端距離，材厚，加圧面寸法が  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\sigma_y$  に及ぼす影響の一般的傾向，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.13-14，1992.
- 4) 棚橋秀光，大岡 優，伊津野和行，鈴木祥之：木材のめり込み降伏メカニズムと均等めり込み弾塑性変位の定式化，日本建築学会構造系論文集，第 76 巻，第 662 号，pp.811-819，2011.
- 5) 野口弘行，小林幹大，橋爪靖彦：許容めり込み応力度に関する検討と提案-木材の繊維に直角方向の圧縮に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 64 巻，第 518 号，pp.65-70，1999.
- 6) 日本建築学会：木質構造接合部設計マニュアル，2009.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) VARSE : <https://www.acuity-inc.co.jp/products/varse/> (2022.04.15 参照)