

# 現場における伝統木造建築物のめり込み特性把握に関する研究

## In-situ Evaluation on Embedment Characteristics of Japanese Traditional Wooden Structures

大岡 優<sup>1</sup>・棚橋 秀光<sup>2</sup>・伊津野 和行<sup>3</sup>・鈴木 祥之<sup>2</sup>

Yu Ooka, Hideaki Tanahashi, Kazuyuki Izuno and Yoshiyuki Suzuki

<sup>1</sup>立命館大学ポストドクトラルフェロー R-GIRO (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)  
Post Doctoral Fellow, Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

<sup>2</sup>立命館大学教授 R-GIRO (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)  
Professor, Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

<sup>3</sup>立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)  
Professor, Dept. of Civil Engineering, Ritsumeikan University

The embedment characteristics of existing wood members are essential for accurate evaluation of seismic performances of Japanese traditional wooden structures. The restoring force characteristics of traditional wooden joints depend mainly on the compressive Young's moduli and yielding strengths perpendicular to the grain and the increasing rates of stiffness in embedment. Therefore, we carried out embedment tests for full-scale members of Japanese cypress. Then, the method for inspecting Young's moduli and yielding strengths perpendicular to the grain are discussed for promoting conservation of cultural heritage in Japan.

**Key Words :** *Japanese traditional wooden structure, embedment test, analytical parameter*

### 1. はじめに

神社・仏閣、古民家、町家を代表とする伝統木造建築物の多くは、国や地域の歴史的・文化的象徴であり、文化財として認定されているものも数多く存在する。日本は地震大国であるため、これらの建物を地震から保護し後世に健全な形で継承することは重要な課題である。

伝統木造建築物の主な耐震要素として、地震時における仕口のめり込み抵抗がある。したがって、伝統木造建築物の耐震性能評価と耐震補強を考える場合、対象とする実在の仕口の復元力特性の精度良い推定のために、その主要な材料特性として横圧縮ヤング係数と圧縮降伏応力度等の評価が必要となる。文化財建造物を対象とした場合などにおいては、その非破壊的な把握が重要であるが、参考文献<sup>1)</sup>が示すように、その方法が確立されていないのが現状である。筆者らは、弾塑性パステルナーク・モデル<sup>2)</sup>(以下EPMとする)を応用した非破壊的な把握を目的として、試験体や載架板サイズの違いによるめり込み解析パラメータ(以下EPMパラメータとする)の差異を検討してきた<sup>2)4)</sup>。既往の研究<sup>3)</sup>で示した3次元めり込み式においては、繊維方向・繊維直交方向でめり込みによる剛性増大率に関わる無次元特性値を個別に設定していたが、繊維直交方向のパラメータの設定に課題が残った。現場での実在部材の材料特性の把握を実現するには、この無次元特性値の課題を解決するとともに、開発した携帯式めり込み載荷装置<sup>3)</sup>によるめり込み実験により、軽微なめり込み痕跡は残るが、実験室の載荷試験機とほぼ同等なデータが得られることが必要となる。

そこで本研究では、既往の研究<sup>3)</sup>の3次元めり込み式を前提として剛性増大率に関わる無次元特性値を新た

に1個の等価な値に統一し、断面寸法100mm角のヒノキ材を用いた実験室の荷重試験機によるめり込み実験と携帯式めり込み荷重装置<sup>3)</sup>を用いた実験を行い、実用化の可能性について検討した。

## 2. めり込み実験概要

同じ原木より、図1に示す断面：100mm×100mm、長さ：1250mmの2本のヒノキ供試体（H1、H2とする）を対象にめり込み実験を行った。実験は、まず始めにEPMに必要なパラメータ（クロスヘッド間変位による横圧縮ヤング係数、横圧縮降伏応力度）を得るための材料実験を行った。その後、荷重試験機および、めり込み荷重装置による実大実験を行った。

今回実験に使用したヒノキ供試体の密度は平均412kg/m<sup>3</sup>（変動係数2%）、全乾法による含水率は平均10.6%（変動係数6%）であった。

### (1) 材料実験

材料実験は、図1に示す供試体より縦圧縮試験および横圧縮試験用の試験片を切り出した。供試体の両端よりL方向（繊維方向）、R方向（年輪半径方向）、T方向（年輪接線方向）の標準圧縮試験体（断面30mm×30mm、高さ60mm）を各6体、H1、H2の2本で総計36体採取し、圧縮試験を行った。ひずみは荷重試験機のクロスヘッド間変位と中間部変位計（試験片中央部30mm間の変位を計測）により求めた。

### (2) 実大実験（荷重試験機）

試験機による実大実験は、図1のH1、H2の4面A、B、C、Dの幅中央の荷重ポイントで、厚さ12mm、隅に半径1mmの丸みを持つ3種類の荷重鋼板（断面30mm×30mm：SL、断面20mm×20mm：SM、断面10mm×10mm：SS）を各面3点ずつの計72点でめり込み荷重を行った。標準よりサイズの小さいSM、SSの荷重板は、荷重長比 $\lambda=H/L$ （H：部材高さ、L：荷重長）の変化を見るためと、実在部材を対象とした現場めり込み試験を意図している。なお、A、B面がR方向、C、D面がT方向である。

### (3) 実大実験（携帯式めり込み荷重装置）

めり込み荷重装置による実大実験は、図2に示す装置を用いて行った。レバーを手動で押し、テコの作用で荷重板（断面10mm×10mm、厚さ12mm）が対象部位にめり込み、荷重板上部の小型ロードセルが荷重を、その両端に配置された変位計でひずみを計測する。その結果得られた応力度-歪曲線から、EPMを応用して部材そのものの横圧縮ヤング係数と横圧縮降伏応力度の把握を行うことを目的としている。この装置を用い、図1に示す供試体の1面でK1～K6の6点、計48点でめり込み荷重を行った。荷重は現場での実施を想定し、部材に大きな傷を付けない様1.0mm～1.5mm程度のめり込みとした。

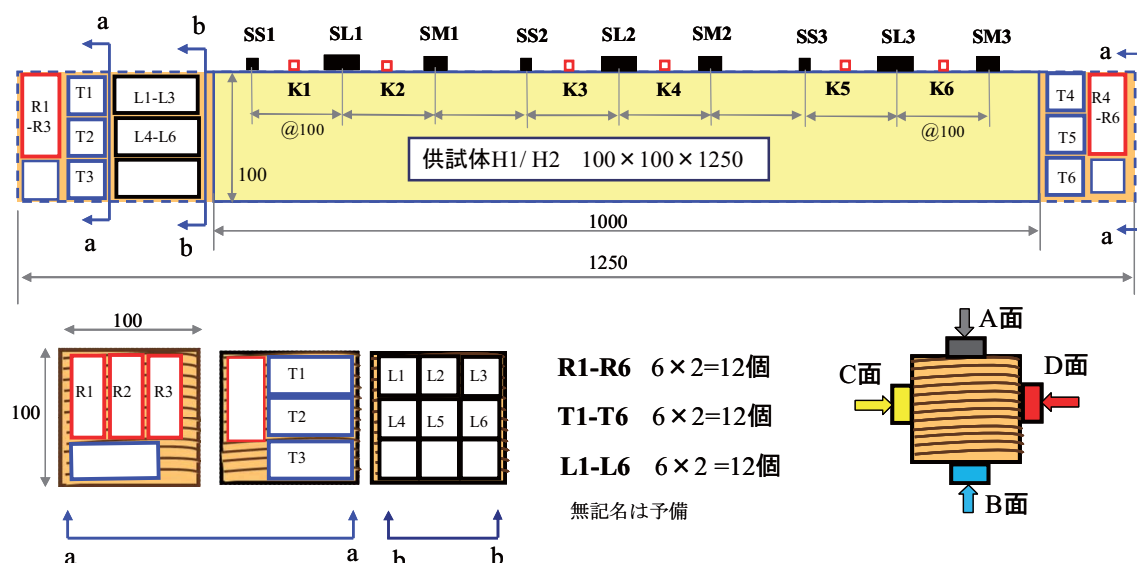


図1 圧縮試験体木取り図とめり込み荷重要領

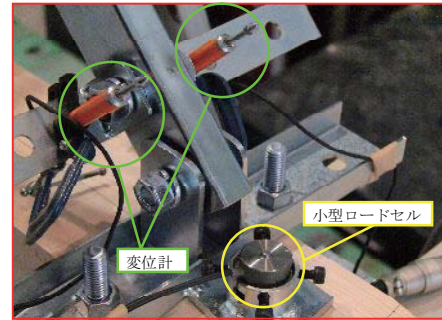
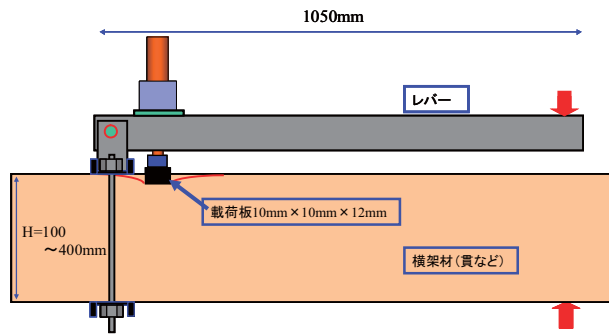


図2 携帯式めり込み载荷装置

### 3. 実験結果

#### (1) 材料実験

表 1 に、圧縮試験結果の平均値として、クロスヘッド変位測定と中間部変位測定によるヤング係数 ( $E_a$ 、 $E_b$ )、降伏ひずみ ( $\varepsilon_y$ )、降伏応力度 ( $\sigma_y$ ) を示す。また、表 1 には、試験結果の変動係数とともにひずみ測定位置の違いによるヤング係数の比も併せて示す。各試験結果の横圧縮降伏応力度は、既往の文献<sup>3)</sup>と同様に弾性域における直線と降伏後の近似直線との交点とした。ひずみゲージ計測によるヤング係数を見ると、縦圧縮ヤング係数、横圧縮ヤング係数ともに H1、H2 で供試体間に大きな違いはなかったが、R 方向の横圧縮ヤング係数の平均値は既往の研究<sup>2)</sup>に比べ H1 で 32%低下、H2 で 15%低下する結果となった。また、クロスヘッド間変位測定による  $E_a$  の値は、H1 と H2 の R 方向で大きく異なる結果となった。全体的に横圧縮ヤング係数のばらつきも大きく、今回使用したヒノキ供試体に一部辺材が含まれていたことが原因だと考えられる。なお、実現象におけるめり込みは部材表面で生じるため、EPM ではクロスヘッド変位から求めた横圧縮ヤング係数  $E_a$  の 6 個の平均値を用いる。

表1 圧縮試験結果の平均値と変動係数 (%)

( $E_a$ :クロスヘッド変位測定による  $E_b$ :中間部変位測定による)

Specimen	$E_a$ (MPa)	$E_b$ (MPa)	$\varepsilon_y$	$\sigma_y$ (MPa)	$E_a/E_b$
H1-R1~R6	275 (48)	412 (69)	0.013 (24)	3.58 (29)	0.67 —
H1-T1~T6	220 (32)	281 (40)	0.021 (29)	4.62 (12)	0.78 —
H1-L1~L6	4771 (8)	10593 (8)	0.0079 (5)	37.3 (4)	0.45 —
H2-R1~R6	410 (31)	513 (37)	0.0111 (19)	4.50 (19)	0.80 —
H2-T1~T6	255 (17)	315 (22)	0.0179 (12)	4.56 (9)	0.81 —
H2-L1~L6	4724 (7)	10238 (4)	0.0084 (6)	39.6 (2)	0.46 —

( ) : 変動係数

#### (2) 実大実験 (载荷試験機)

3次元 EPM のめり込み復元力特性は、図 3 のめり込み周辺部の表面変位を直交する  $xz$ 、 $yz$  面内の 2次元 EPM で表現できると仮定して (1)–(7) 式<sup>3)</sup>となる。

試験機によるめり込み実験結果において、载荷面積当たりの応力度と高さ  $H$  当たりの平均ひずみで復元力特性をグラフ化し、EPM パラメータを求めた。その際、2次元 EPM と異なり、2方向の無次元特性値  $\gamma_x H$ 、 $\gamma_y H$  が未知である。 $\gamma_y H$  は繊維直交方向部材のめり込み実験 R シリーズ<sup>2)</sup>で 8~20、平均 13.5 が得られているが、载荷長比が 0.1 より小さくなる ( $H/L \geq 10$ ) と、 $y$  方向の剛性増大率が実態より過大になり妥当な  $\gamma_x H$  が得られなかった<sup>3)</sup>。(1)–(7)式においては、実験結果に合うような  $\gamma_x H$ 、 $\gamma_y H$  の 2 つの特性値の組合せは無数に存在するが、どの組合せでも EPM パラメータ  $\eta$ 、 $C$  はほとんど変化しないことが確認できた。そこで、

無数の組合せのうち、 $\gamma_y H$ を無限大とした場合の $\gamma_x H$ を統合特性値 $\gamma_{xy} H$ とし、 $x$ 方向の特性値で $y$ 方向の剛性増大効果を加味した等価な特性値として評価した。この統合剛性増大率を含めた(1)–(8)式により2次元の場合と同じ要領でシミュレーションを行い、 $\gamma_{xy} H$ などのパラメータおよび統合剛性増大率 $\zeta_{pxy}$ 、めり込み剛性 $E \zeta_{pxy}$ を求めた。その結果の載荷板サイズごとの平均値の一覧を表2に示す。なお、実大実験結果においては、試験体名称として供試体名(H1、H2)と面(A、B、C、D)を併せて表記する(例：H1A→供試体H1のA面における実験結果)。H2Dの3種類のサイズの復元力特性各3曲線にEPMシミュレーションの平均値(表2に示す)の曲線を重ねて図4に示す。また、EPMパラメータ $\eta$ と $H/L$ の相関図を、前年度のデータ<sup>4)</sup>を含めて図5に示す。図4が示すように、T方向載荷においては、同じ載荷板サイズ毎で応力度-ひずみ曲線がほぼ同じ形状となり、載荷位置の違いによるばらつきは小さかった。それに対し、R方向載荷では、同じ面の載荷においても、位置の違いによるばらつきが多少見られる結果となった。また、図5が示すように、載荷板エッジの応力集中が激しくなるためか、載荷長比が小さくなると $\eta$ が大きくなる結果となっている。 $\gamma_{xy} H$ の平均値は各々SL：1.36、SM：1.61、SS：2.29となり、 $\zeta_{pxy}$ の平均値はSL：5.61、SM：7.30、SS：10.3であった。高さに比べ載荷板サイズが小さくなると集中載荷条件に近づくため、(3)式のままでは幅方向の剛性増大率が過大評価となるものと推察される。したがって、EPM解析の適用限界を含めて(1)–(8)式の妥当性を引き続き検証する必要がある。

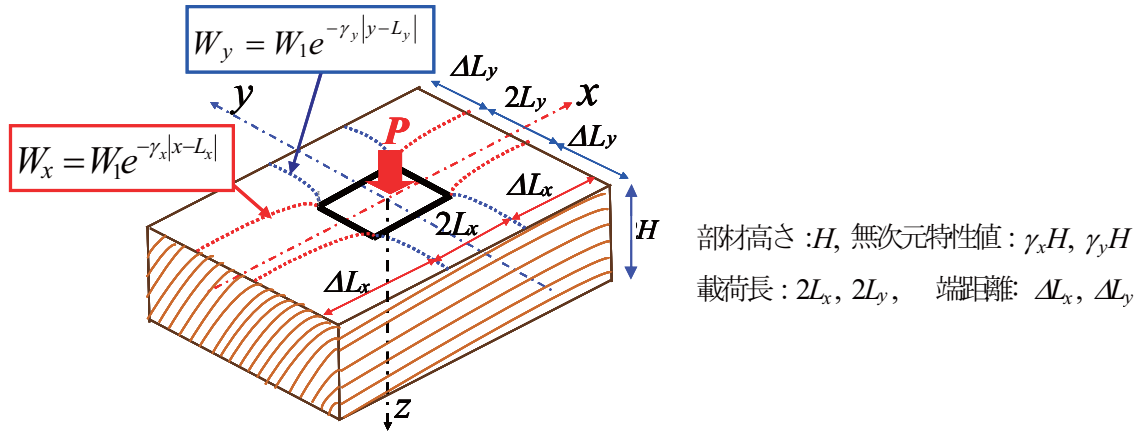


図3 3次元EPMの表面変位の仮定

$$\text{応力度-ひずみ関係: } \varepsilon_p = \frac{\sigma_1}{E \zeta_p(\varepsilon_1)} \quad (1)$$

$$\text{剛性関数: } \zeta_p(\varepsilon_1) = \frac{\zeta_{pxy}}{1 + m h_y} = \frac{\zeta_{px} \zeta_{py}}{1 + m h_y} \quad (2)$$

$$\text{剛性増大率: } \zeta_{px} = 1 + \frac{1 - e^{-\gamma_x \Delta L_x}}{\gamma_x L_x}, \quad \zeta_{py} = 1 + \frac{1 - e^{-\gamma_y \Delta L_y}}{\gamma_y L_y} \quad (3)$$

$$\text{実用近似式: } m = C(1 - 1/\kappa): \text{平均ひずみ増大率} \quad (4)$$

$$h_y = \frac{1}{\eta} \ln \kappa: (0 \leq h_y \leq 1): \text{降伏深さ比} \quad (5)$$

$$\text{ここで, } C: \text{塑性ひずみ倍率, } \kappa = \frac{\varepsilon_1 \eta}{F \varepsilon_y} = \frac{\varepsilon_1}{P \varepsilon_y}: \text{降伏比}$$

$$\text{実用ひずみ分布: } W_1 \phi' = \varepsilon_1 \eta e^{-\eta \frac{z}{H}} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{F \varepsilon_y}{P \varepsilon_y}: \text{部分圧縮降伏ひずみに対する全面圧縮降伏ひずみの比} \quad (7)$$

$$\text{統合剛性増大率: } \zeta_{pxy} = 1 + \frac{1 - e^{-\gamma_{xy} \Delta L_x}}{\gamma_{xy} L_x} \quad (8)$$

表2 解析結果のパラメータ平均値一覧

		$E$ (MPa)	$\varepsilon_y$	$\gamma_{xy}H$	$\eta$	$C$	$\sigma_y$ (MPa)	$\zeta_{pxy}$	$E\zeta_{pxy}$
H1A	SL1-3	275	0.013	1.22	5.4	55	3.58	6.0	1650
	SM1-3			2.33	5.6	31		6.2	1705
	SS1-3			3.43	6.7	16		7.1	1962
H1B	SL1-3	275	0.013	1.15	3.9	34	3.58	6.3	1723
	SM1-3			1.22	5.6	39		8.5	2338
	SS1-3			1.80	12.0	27		11.9	3273
H1C	SL1-3	220	0.021	1.24	5.0	53	4.62	6.0	1313
	SM1-3			1.22	10.2	55		8.5	1870
	SS1-3			1.67	14.7	42		12.6	2772
H1D	SL1-3	220	0.021	1.36	3.9	47	4.62	5.6	1232
	SM1-3			1.15	7.0	54		8.8	1936
	SS1-3			1.78	12.7	33		11.9	2618
H2A	SL1-3	410	0.011	1.45	5.4	60	4.50	5.3	2170
	SM1-3			1.74	6.9	60		6.6	2703
	SS1-3			3.02	11.7	38		8.3	3399
H2B	SL1-3	410	0.011	1.58	4.2	40	4.50	5.0	2048
	SM1-3			1.97	5.0	38		6.0	2443
	SS1-3			2.70	9.3	29		8.4	3440
H2C	SL1-3	255	0.018	1.42	4.2	55	4.56	5.5	1403
	SM1-3			1.57	5.6	53		7.1	1819
	SS1-3			1.78	10.9	39		11.9	3035
H2D	SL1-3	255	0.018	1.48	3.9	43	4.56	5.2	1335
	SM1-3			1.68	5.2	39		6.7	1709
	SS1-3			2.13	12.0	31		10.3	2618

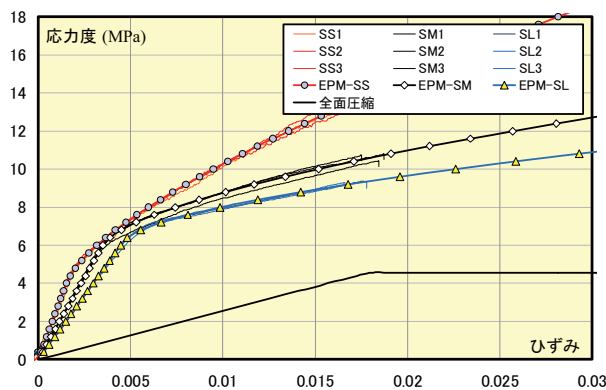


図4 EPMシミュレーション結果 (H2D)

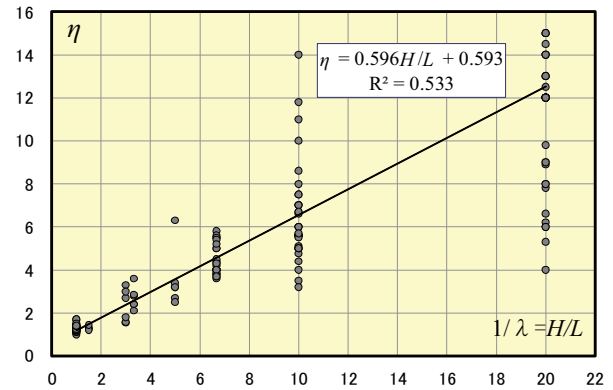


図5  $\eta$ と $H/L$ の相関関係

### (3) 実大実験 (携帯式めり込み载荷装置)

H1A (R方向载荷) のK1~K6および、H2C (T方向载荷) のK1~K6における応力度-ひずみ曲線とそれぞれのEPMシミュレーション結果を図6、図7に示す。図6が示すように、R方向であるA、B面は载荷位置によって応力度-ひずみ曲線がばらつく結果となった。この傾向は、H2のA、B面においても同様であった。それに対し、図7が示すT方向のC、D面は、载荷位置によるばらつきは比較的少なかった。この原因としては、今回用いたヒノキ供試体の年輪の目が細かい (年輪間隔が狭い) ことが影響している可能性がある。写真1に、R方向、T方向の载荷面を示す。R方向に比べT方向の方が、年輪の硬い部分である夏材が細かく直線的に存在していることが分かる。载荷板が比較的小さいことにより、R方向においては、T方向と比べて载荷位置の違いにより载荷板直下の春材と夏材の状況が変わるため、その結果ばらつきが大きくなったものと推察される。

めり込み载荷装置によるEPMパラメータの平均値を表3に示す。表3には、試験機におけるSSの载荷板を用いた場合のEPMパラメータも ( ) に併記した。表3より、めり込み载荷装置を用いた場合においても、H1B、H2C、H2Dなどにおいては試験機での载荷とEPMパラメータが比較的近い値をとる結果となった。したがって、人力以外による载荷や装着方法などを改善し、载荷板のサイズの拡大、装置の改良とともに要素実験や数値解析による3次元めり込みの検討が進むことで、現場での横圧縮強度特性の詳細な把握を行える可能性は高いものと考えられる。



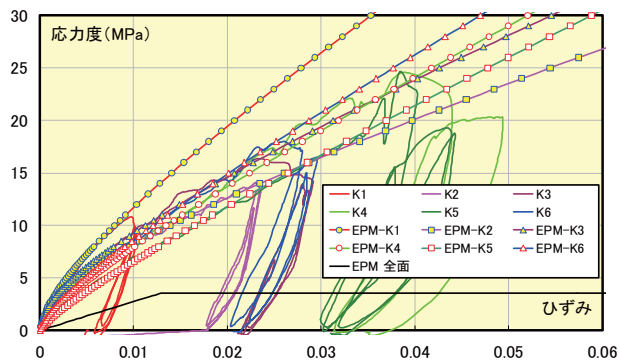


図6 EPMシミュレーション結果 (H1A)

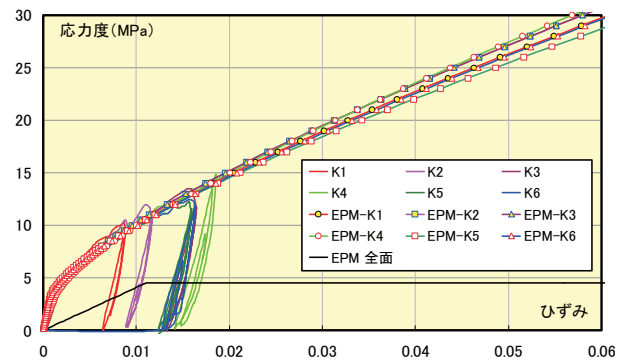


図7 EPMシミュレーション結果 (H2C)

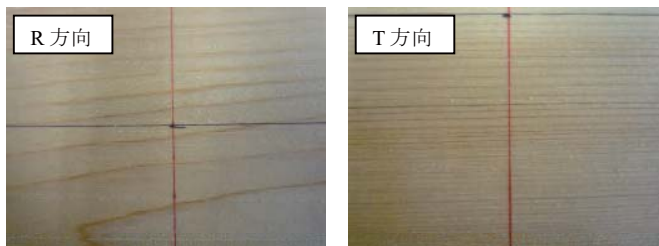


写真1 載荷面

表3 解析結果のパラメータ平均値一覧

	$\gamma_{xy}H$		$\eta$		$C$	
H1A	4.17	(3.43)	16.0	(6.7)	14	(16)
H1B	1.96	(1.80)	16.3	(12.0)	41	(27)
H1C	2.57	(1.67)	18.0	(14.7)	23	(42)
H1D	1.35	(1.78)	27.7	(12.7)	57	(33)
H2A	4.02	(3.02)	20.3	(11.7)	65	(38)
H2B	4.62	(2.70)	11.4	(9.3)	25	(29)
H2C	1.75	(1.78)	19.2	(10.9)	56	(39)
H2D	2.85	(2.13)	13.3	(12.0)	26	(31)

## 5. 結論

ヒノキの実大部材を対象にサイズの異なる載荷板を用いてめり込み実験を行い、3次元EPM解析パラメータのオーダーを確認した。その後、携帯式めり込み載荷装置による実大実験を行い、現場での横圧縮強度特性把握の可能性について検討した。本研究で明らかになったことを以下に示す。

- 1) 部材高さに比べ載荷板サイズが小さくなると集中載荷条件に近づくため、現状の3次元めり込み式のままでは幅方向の剛性増大率が過大評価となる可能性がある。
- 2) 部材高さに対する載荷板サイズの比が小さい場合を含め、EPM解析の提案式の妥当性と適用限界などの検証を進める必要がある。
- 3) 実大実験の結果、年輪の目が細かい（年輪間隔が狭い）ことが影響しているためか、接線方向載荷の方が半径方向載荷に比べ、載荷位置による応力度-ひずみ曲線のばらつきが小さくなる結果となった。
- 4) 人力以外による載荷や装着方法などを改善し、載荷板のサイズの拡大、装置の改良とともに要素実験や数値解析による3次元めり込みの検討を行うことで、現場での横圧縮強度特性の詳細な把握を行える可能性は高いと考えられる。

**謝辞：**本研究の一部は立命館大学グローバルCOE『歴史都市を守る「文化遺産防災学」推進拠点』（代表大窪健之）および科学研究費補助金基盤研究(S)（課題番号19106010、研究代表者鈴木祥之）による。実験にあたっては、立命館大学理工学部耐震工学研究室の皆さんの協力を得た。ここで謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 山岸恵子・宮島章・奥石直行：木質建造物における非破壊検査法に関する研究，第1報 劣化診断法に関する文献調査と現状分析，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.45-47, 2000.
- 2) 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，Vol.76, No.662, pp.811-819, 2011.4.
- 3) 大岡優・棚橋秀光・伊津野和行・鈴木祥之：伝統木造建築物のめり込み解析用パラメータの非破壊的評価の試み，歴史都市防災論文集，Vol.4, pp.189-196, 2010.7.
- 4) 棚橋秀光・大岡優・伊津野和行・鈴木祥之：伝統木造仕口の横圧縮特性（その4 実大部材のめり込み解析パラメータ），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，構造Ⅲ，pp.5-6, 2010.9.