

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

Study on Non-destructive Estimation of Parameters for Embedment Analysis of Traditional Wooden Buildings

大岡優¹・棚橋秀光²・伊津野和行³・鈴木祥之²・土岐憲三⁴

Yu Ooka, Hideaki Tanahashi, Kazuyuki Izuno, Yoshiyuki Suzuki and Kenzo Toki

¹立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate student, Science and Engineering, Ritsumeikan University

²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

³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

⁴立命館大学教授 R-GIRO (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Professor, Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

The Young's modulus and yield stress of an actual member of buildings are very important to evaluate the seismic performance of traditional wooden culultural heritage. In order to evaluate them, a non-destructive test equipment is developed and some series of embedment tests including full-scale members are carried out. Applying the elasto-plastic Pasternak model which was proposed by some of the authors, the determination of suitable parameters is examined and discussed. As a result, it turned out that the parameters change with bearing plate sizes and embedment dimension.

Key Words : *traditional wooden building, embedment test, non-destructive test equipment, analytical parameter*

1. はじめに

社寺仏閣を代表とする伝統木造建築物の中には貴重な文化財が数多く存在している。その存在は我々の日常生活に安らぎと精神的豊かさをもたらせてくれており、これらの建築物を地震等の自然災害から保護し後世に健全な形で継承していくことは重要なことである。

文化財などの伝統木造建築物の精度良い耐震性能評価のためには、実在部材のヤング係数や降伏応力度等の設定が重要な課題となる。その際、貴重な建物を傷つけない非破壊での推定も必要となってくる。特に、仕口のめり込みによる復元力特性は、弾塑性パステルナークモデル（以下EPM）を応用して、横圧縮ヤング係数等を含むいくつかのEPM解析のパラメータによって決定される¹⁾⁴⁾。そこで、実在部材の横圧縮ヤング係数や横圧縮降伏応力度を推定するための非破壊の携帯式めり込み載荷装置の開発を試みた。携帯式めり込み載荷装置の実用化にあたっては、EPMによる精度よいシミュレーションを行うとともに、3次元めり込みの定式化、載荷板サイズ・試験体サイズによるパラメータの差異について検討する必要がある。

そこで本研究では、まず初めに3次元めり込みの定式化を行った。ついで、ヒノキ材を対象とした新しいめり込み試験や、載荷板サイズ・2次元と3次元載荷の異なるめり込み試験を実施し、その結果にEPM解析を行うことで、携帯式めり込み載荷装置の実用化に必要なパラメータの設定について検討した。最後に、実際に試作した携帯式めり込み載荷装置を使用した試験を行い、成果と今後の課題について整理した。

2. 3次元めり込み式の提案

今までは主として30mm角の部材の全面圧縮試験・部分圧縮試験結果の比較より、2次元のEPM解析モデルを用いてパラメータを設定してきた¹⁾⁴⁾。しかし、実在部材を対象としためり込みでは、3次元のめり込みとなり、従来の2次元めり込みでは誤差が大きくなる可能性がある。そこで図1のようにxz面、yz面の直交する2平面のz方向表面変位に2次元EPMを適用し、剛な荷板を介した荷重の表面変位により発生するめり込み反力Rの合計が荷重荷重Pと釣り合うことから、(2)式の剛性増大率を方向別の特性値 γ_x 、 γ_y を用いて定式化した。その他は2次元の場合と同じで(1) - (7)式に示す。

EPM解析のパラメータは、(1) - (7)式に示す、ヤング係数E、降伏歪 ε_y （または降伏応力度 σ_y ）、無次元特性値 $\gamma_x H$ 、 $\gamma_y H$ （2次元めり込みの場合は γH ）、降伏歪比 η 、定数Cの6つ（2次元では5つ）である。

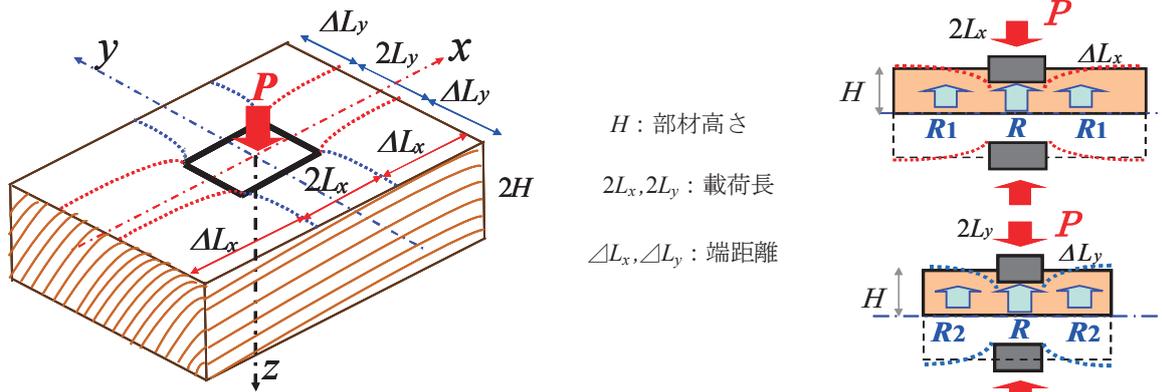


図1 3次元めり込みモデル

$$\text{応力度—歪関係} : \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E \zeta_p(\varepsilon)} \quad (1)$$

$$\text{剛性増大率} : \zeta_p = \left(1 + \frac{1 - e^{-\gamma_x \Delta L_x}}{\gamma_x L_x}\right) \left(1 + \frac{1 - e^{-\gamma_y \Delta L_y}}{\gamma_y L_y}\right) \quad (2)$$

$$\text{剛性関数} : \zeta_p(\varepsilon) = \frac{\zeta_p}{1 + m h_y} \quad (3)$$

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

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

$$\text{ここで, } C : \text{定数, } \kappa = \frac{\varepsilon_1 \eta}{F \varepsilon_y} = \frac{\sigma_1}{p \sigma_y} : \text{降伏比} \quad (6)$$

$$\text{歪分布} : W_1 \phi_1' = \varepsilon_1 \eta e^{-\eta \frac{z}{H}}, \quad p \varepsilon_y = \frac{F \varepsilon_y}{\eta} \quad (7)$$

3. 実験計画

(1)めり込み試験法の提案

EPMによる精度よいシミュレーションのために新しいめり込み試験法を提案し、適切なパラメータの設定が可能か検討する。新しいめり込み試験法は、EPMにできるだけ忠実で、荷重時における試験体両端の跳ね上がり防止を意図して、図2に示す挟み式荷重とする。また、木口の年輪傾角の変化を含む試験体間のばらつきを極力少なくするため、1個のめり込み試験体（P）と繊維方向の両隣の2個の全面圧縮試験体（S）を1セットとし、めり込み試験結果と2つの全面圧縮試験結果の比較によりパラメータの特定を行う。具体的には、全面圧縮は完全弾塑性とみなして降伏点は図3に示すように降伏後の直線と弾性直線の交点と定義し、全面圧縮試験体2つのクロスヘッド間歪による横圧縮ヤング係数と降伏歪の平均値を用いる。その他のパラメータは全面圧縮試験結果とめり込み試験結果とを比較し、その剛性の比率より無次元特性値 γH 、降伏歪の比率より η 、降伏後の剛性を決めるパラメータCを順次決定する。

試験体寸法はめり込み試験体が断面30mm×30mm、長さ90mmの直方体、全面圧縮試験体が一辺30mmの

立方体とする。めり込み試験体長さは高さの3倍であるが、挟み式とすることで有効高さは15mmとなって、載荷長比は1、端距離比は2となり、ほぼ無限長のめり込み条件が確保される¹⁾。試験はクロスヘッド間の歪で20%程度まで載荷する。

(2) 新しいめり込み試験法による実験

今回提案した新しい試験法を用い、LR（半径方向）、LT（接線方向）、LTR（LR、LTの中間）の3シリーズの木口を持つヒノキ貫試験体（30mm×100mm、長さ1200mm）から切り出した試験体を対象に試験を行った。LRの試験体切り出し例を図4に示す。ここで、S1～S9は全面圧縮試験体（Y1～Y6は予備）、P1～P6がめり込み試験体である。また、試験体寸法の違いが横圧縮ヤング係数にどう影響するのか検討するため、F1～F6に示す30mm×30mm、長さ60mmの全面圧縮試験体も切り出した。試験体数は、各木口でそれぞれ2枚の貫から試験体を切り出したため、1シリーズで全面圧縮試験体30個（S:18個、F:12個）、めり込み試験体12個である。試験体の密度はLRが0.48g/cm³、LTが0.45g/cm³、LTRが0.41g/cm³であり、含水率は木口別で大きな差はなく11%程度であった。

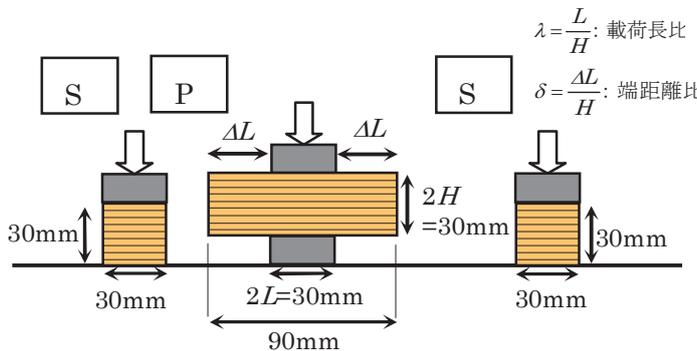


図2 めり込み試験法

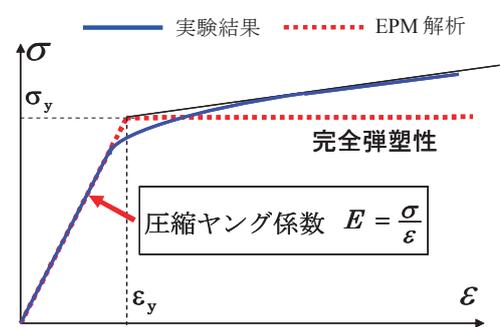


図3 降伏歪・応力度の算定法

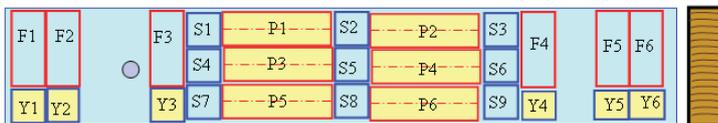


図4 試験体切り出し例

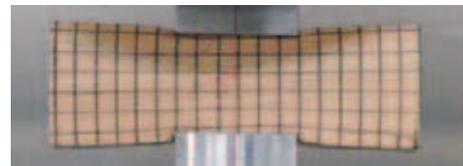


図5 めり込み試験の様子

(3) 載荷板、試験体サイズの異なる実験

実在部材にEPMを適用する際に、部材と載荷板サイズによるパラメータの差異を確認する必要がある。そこで3種類のサイズの載荷板と載荷板エッジの丸みの影響を見るためのJシリーズ、実大貫部材に3種類の載荷板を用いて載荷したLR/LT/LTRシリーズ、接線方向に長さを持つ部材の繊維直角方向のめり込みを対象としたRシリーズの実験を行った。いずれも2次元EPMのシミュレーションを前提とする。

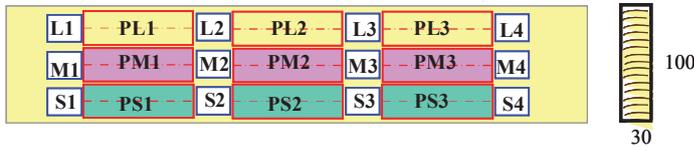
Jシリーズの試験体は図6(a)に示すように、めり込み試験体（PL、PM、PS）を全面圧縮試験体（L、M、S）で挟むよう切り出した。載荷板長（載荷実長の1/2）はL=15mm（PL）、10mm（PM）、5mm（PS）の3種類（幅は30mm以上）であり、載荷板エッジが丸みを持たないJ1シリーズと半径1mmの丸みを持つ載荷板のJ2シリーズの組み合わせである。Lの変化は、載荷長比の影響を見るためと、現場での小型の携帯式めり込み載荷装置用の10mm角の載荷板（L=5mm）によるめり込み試験を想定したものである。載荷板エッジの丸みはエッジの応力集中によるパラメータの差異およびめり込みの痕跡の程度を把握することを意図した。載荷要領・評価法は(1)で提案した挟み式載荷方法による。

実大貫部材に対する試験においては、(2)で用いた試験体と同じLR/LT/LTRシリーズの貫各2本の一部（30mm×100mm、長さ500mm）にJシリーズで用いた2種類の丸エッジの載荷板を用いて、図6(b)の矢印のように挟み式載荷とした。載荷点は100mm程度離して、相互の載荷履歴の影響を避けた。

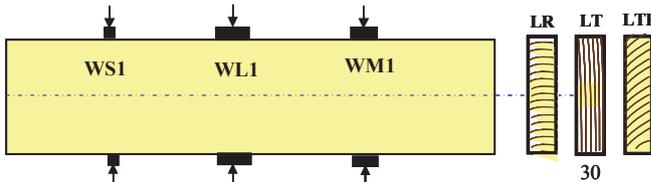
Rシリーズは、載荷板より幅の広い部材にめり込む場合の幅方向のめり込みの剛性・強度の変化を見るもので、図6(c)に示す全面圧縮試験体R1～R7と連続的に繊維方向に交互に採取した6セット（RT1～RT6）を角エッジ載荷板で半径方向挟み式載荷とした。

表1に、各試験における載荷板サイズ、載荷板エッジの形状、試験体数について示す。なお、試験体の平均密度はJシリーズが0.39g/cm³、Rシリーズが0.44g/cm³、平均含水率は、Jシリーズが10.7%、Rシリーズが9.8%であった。

(a) Jシリーズ



(b) LR/LT/LTR シリーズ



(c) Rシリーズ

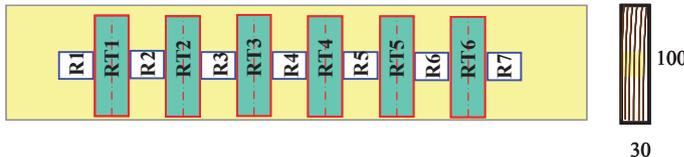


表1 めり込み試験体一覧 (単位 mm)

Series	Types	L	ΔL	H	Edge	Number	
J1	PL1-3	15	30	15	□	3	
	PM1-3	10	35	15	□	3	
	PS1-3	5	40	15	□	3	
J2	PL1-3	15	30	15	○	3	
	PM1-3	10	35	15	○	3	
	PS1-3	5	40	15	○	3	
LR1	WL1	15	>85	50	○	3	
	WM1	10	>90	50	○	3	
	LTR1	WS1	5	>95	50	○	3
LR2	WL1	15	>85	50	○	3	
	LT2	WM1	10	>90	50	○	3
	LTR2	WS1	5	>95	50	○	3
R	RT1-6	15	30	15	□	6	

図6 めり込み試験体



図7 3次元めり込み試験体

(4) 実大材の3次元めり込み実験

実大材に対する3次元めり込み試験を行い、載荷板サイズによる違いや2次元載荷との差異を検討する。3次元めり込み試験は、図7に示すヒノキ実大材 (100mm×100mm、長さ1000mm) 2本 (H1、H2とする) を対象に行った。実大材では挟み載荷は困難になるため、矢印のように片側載荷としている。試験に用いた載荷板はSL:30mm×30mm、SM:20mm×20mm、SS:10mm×10mmの3種類であり、全てエッジに丸みを持つものである。なお、3次元めり込み試験結果に対してEPM解析を行う際に使用する E と σ_y の値は、対象試験体の両側から切り出した全面圧縮試験体6個 (30mm×30mm、高さ60mm) のクロスヘッド間変位で求めた平均値を用いた。

4. 実験結果

(1) 新しいめり込み試験法による実験結果

実験計画3(1)で示した、新しいめり込み試験法で、EPMパラメータを精度良く決定できるか検討した。図8～図10に応力度—歪曲線の代表的なものをシリーズ別に示す。LRはLT、LTRに比べ、全面圧縮試験結果とめり込み試験結果とで剛性の差が小さい結果となった。降伏後においては、LRは亀裂を繰返し応力が上下しながらも緩やかに上昇しているが、LT、LTRにおいてはほぼ横ばいになる結果となった。EPMの解析例を図11に示す。図11が示すように、パラメータを適切に設定することにより、実験値と解析値がよく合致し、今回のめり込み試験方法でパラメータを精度よく決定できる結果となった。表2に本試験によって得られたパラメータの平均値と変動係数を示す。表2より η に関しては木口の違いにかかわらず試験体間でのばらつきは小さかった。その他のパラメータにおいてはLTRにおける E と γH のばらつきが大きくなった。図12と図13に E と σ_y 、 γH との相関図を示す。図12より参考文献³⁴⁾と同様、 E と σ_y の相関性がかなり高いことが確認できた。 γH は従来2～3程度の定数と考えてきた¹⁾⁴⁾が、横圧縮ヤング係数に依存する傾向が明らかになっ

た。この結果は、LR以外においては、 E から σ_y 、 γH を推定できる可能性を示唆している。 C においては E との間に高い相関はみられなかった。全面圧縮試験体SとFとのクロスヘッド間歪による横圧縮ヤング係数を比較すると、その差異はLRで5%、LTで11%、LTRで7%と小さく試験体寸法の違いによる影響はあまりみられなかった。

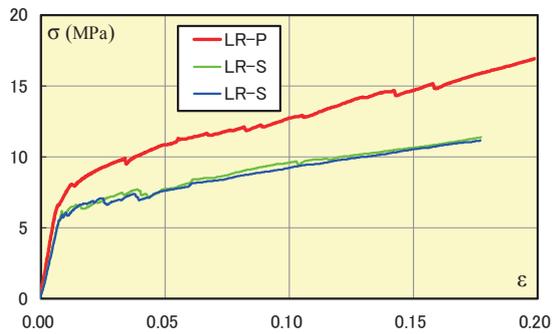


図8 応力度—歪曲線 (LR)

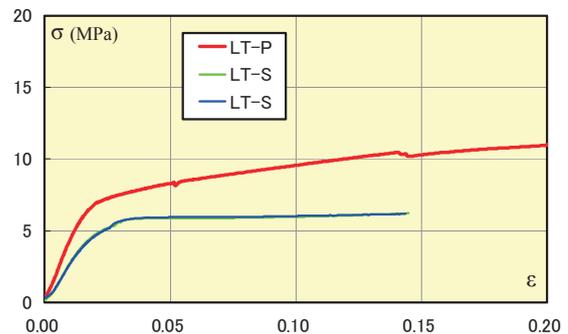


図9 応力度—歪曲線 (LT)

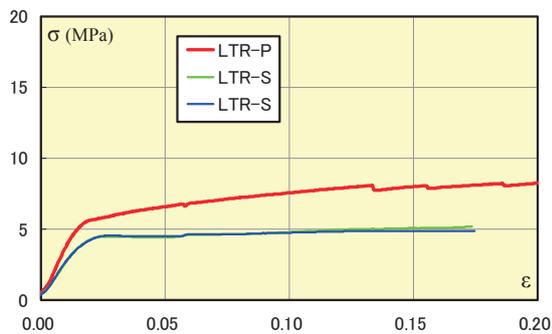


図10 応力度—歪曲線 (LTR)

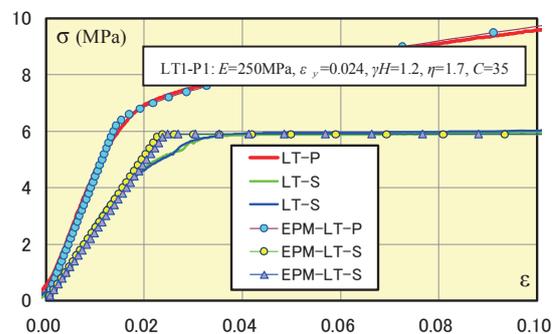


図11 EPM解析例

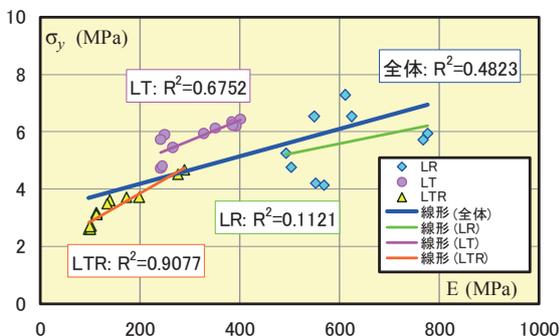


図12 E - σ_y 相関

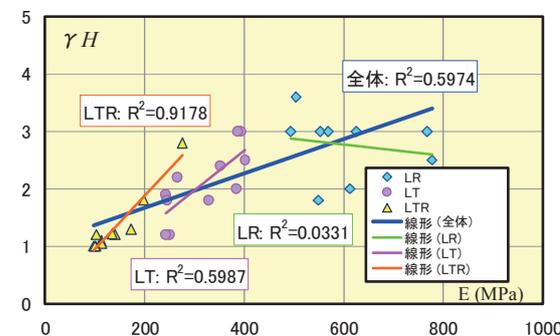


図13 E - γH 相関

表2 EPMパラメータ

Series	E (MPa)	ϵ_y	γH	η	C	σ_y (MPa)
LR	605	0.009	2.8	1.2	29	5.59
	(0.16)	(0.20)	(0.19)	(0.11)	(0.30)	(0.19)
LT	317	0.019	2.1	1.3	46	5.82
	(0.21)	(0.15)	(0.28)	(0.14)	(0.24)	(0.10)
LTR	153	0.024	1.6	1.3	35	3.39
	(0.42)	(0.18)	(0.57)	(0.07)	(0.18)	(0.20)
全体平均	337	0.018	2.1	1.3	37	4.84
	(0.59)	(0.37)	(0.41)	(0.11)	(0.30)	(0.28)

() 内の数値は C_v : 変動係数

(2) 載荷板、試験体サイズの異なる実験結果

図14、15にJシリーズ、LRシリーズのEPM解析代表例を、図16に η と H/L との関係図を、図17にRシリーズのEPM解析例を示す。また、表3に各試験におけるEPM解析結果のパラメータの平均値を示す。図14、15が示すように載荷長比が小さくなると、応力度—歪曲線は全面圧縮の場合より剛性、降伏応力度とも大きくなる。既往の試験体の範囲では、 η は平均1.1~1.3程度で変化が少なかったが、図16、表3に示すように、部

材高さが増加、または荷板のサイズが減少して $1/\lambda=H/L$ が10程度まで増大すると η は3~7程度まで大きくなるのが分かった。これは、荷板が相対的に小さくなると、エッジの応力集中が激しくなり、めり込みの応力度-歪曲線上で低い歪で降伏が発生するためと推察される。荷板エッジ形状によるパラメータやめり込み痕跡の差異は、今回の実験では明らかにならなかった。また、今までLTRにおける γH は2に近い値をとると考えられてきたが、4(1)で示されたように、横圧縮ヤング係数に依存する傾向が明確となっている。針葉樹では年輪傾角が45度付近で横圧縮ヤング係数が特に小さくなるのに対して、せん断弾性係数は比較的变化が少ないためにEPMの無次元特性値 γH が $\sqrt{E/G}$ に概ね比例する関係¹⁾から理論的にも小さくなり、横圧縮ヤング係数が100MPa程度では最小1程度となることが確認できた。

Rシリーズでは、図17、表3が示すように η は平均1.1でばらつきは少なく、 $\gamma H=8\sim 20$ 、平均13.5程度の値をとり、接線方向の剛性・強度の増大効果は少ないこととなった。この点は既に理論的¹⁾にもベイヒバで実験的⁵⁾にも確認したもので、今回ヒノキでも再確認した。

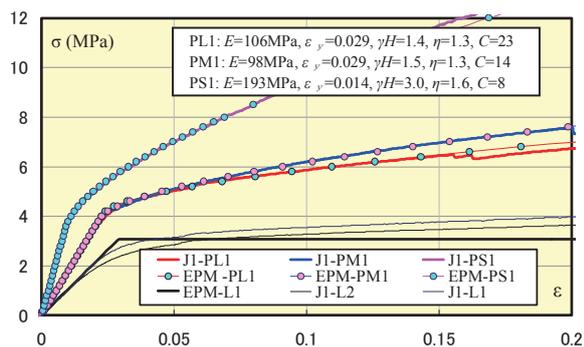


図14 EPM解析例 (J1)

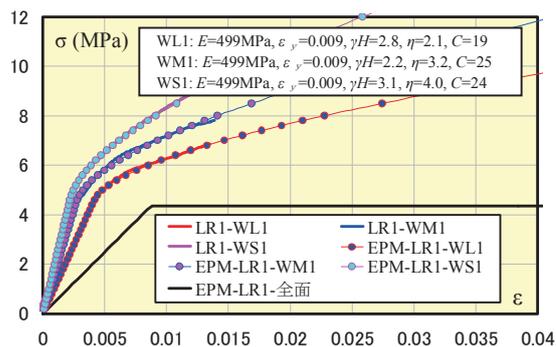


図15 EPM解析例 (LR)

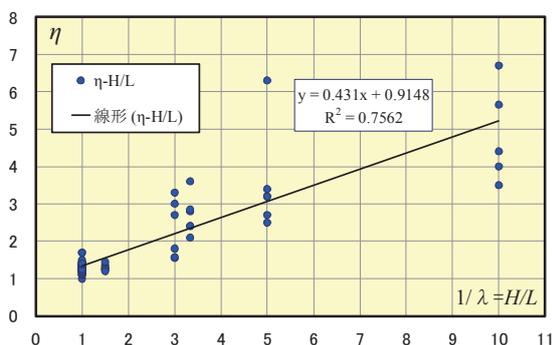


図16 η -H/L 相関

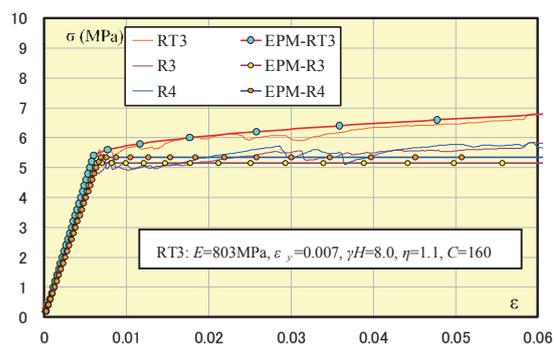


図17 EPM解析例 (R)

(3) 実大部材の3次元めり込み実験結果

図18にSLの荷板における、図19にSSの荷板におけるEPM解析結果を示す。なお、今回の3次元EPM解析においては図1に示す3次元めり込み式における無次元特性値 $\gamma_y H$ の値をRシリーズの結果に従い13程度では整合しなかったため、無限大としてほぼ接線方向端距離の影響がないものとした。図18より荷板サイズの大きいSLの結果に関しては、荷板位置によってその応力度-歪曲線に大きな違いはみられなかった。それに対し、図19に示す荷板サイズの小さいSSの結果においては、その応力度-歪曲線に荷板位置によるばらつきがみられる結果となった。これは、荷板サイズが小さいことで木材の表面の局所的な影響を受けたためだと考えられる。また、荷板サイズがSSの場合、降伏後の応力が激しく上下するためCの特定が困難であった。表4に試験結果のパラメータ一覧を示す。表4より実大部材を対象とした3次元めり込み試験を行った場合、JシリーズやLR/LT/LTRシリーズと同様に荷板サイズが小さくなるにつれ η が

表3 EPM解析結果のパラメータ

Series	Types	E (MPa)	ϵ_y	γH	η	C	σ_y (MPa)
J1	PL1-3	99	0.031	1.4	1.3	19	3.07
	PM1-3	102	0.025	1.5	1.3	14	2.55
	PS1-3	206	0.014	3.0	1.6	8	2.88
J2	PL1-3	195	0.014	1.7	1.4	24	2.73
	PM1-3	111	0.022	1.8	1.3	11	2.44
	PS1-3	83	0.033	1.0	3.0	16	2.74
LR1/LR2	WL1	617	0.009	3.1	2.3	15	5.55
	WM1	617	0.009	2.7	3.0	20	5.55
	WS1	617	0.009	3.5	4.2	22	5.55
LT1/LT2	WL1	279	0.017	1.9	2.6	19	4.74
	WM1	279	0.017	1.8	3.0	35	4.74
	WS1	279	0.017	4.4	7.8	41	4.74
LTR1/LTR2	WL1	141	0.022	1.3	3.2	15	3.10
	WM1	141	0.022	1.4	4.8	22	3.10
	WS1	141	0.022	1.5	6.2	27	3.10
R	RT1-6	820	0.007	13.5	1.1	133	5.74

大きくなる傾向がみられた。2次元载荷と3次元载荷を比べた場合、全体的に3次元载荷の方がパラメータの数値が大きい値になる結果となった。今後、载荷板サイズや部材とのプロポーシヨンのパラメータの設定が重要な課題となる。

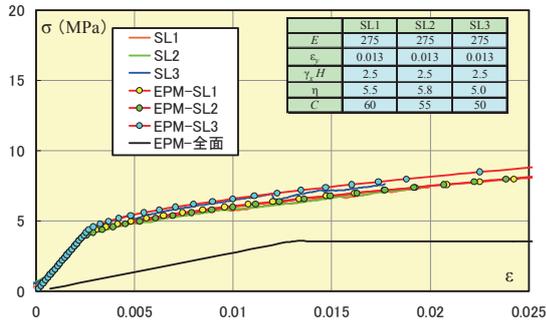


図 18 EPM 解析例 (SL)

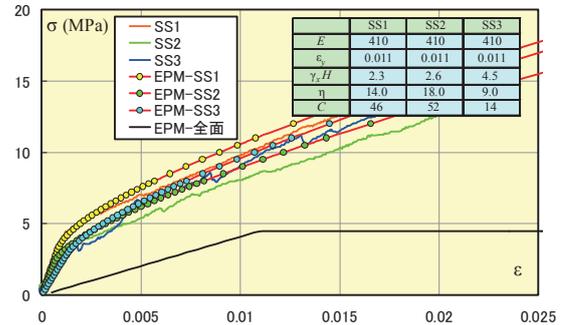


図 19 EPM 解析例 (SS)

表 4 パラメーター一覧表

	Types	E (MPa)	ϵ_y	$\gamma_x H$	η	C	σ_y (MPa)		Types	E (MPa)	ϵ_y	$\gamma_x H$	η	C	σ_y (MPa)
H1-SL	H1-SL1	275	0.013	2.5	5.5	60	3.58	H2-SL	H2-SL1	410	0.011	3.0	5.8	60	4.51
	H1-SL2	275	0.013	2.5	5.8	55	3.58		H2-SL2	410	0.011	2.6	6.5	75	4.51
	H1-SL3	275	0.013	2.5	5.0	50	3.58		H2-SL3	410	0.011	2.8	5.8	62	4.51
H1-SM	H1-SM1	275	0.013	4.5	2.9	9	3.58	H2-SM	H2-SM1	410	0.011	2.0	7.0	55	4.51
	H1-SM2	275	0.013	1.2	7.8	70	3.58		H2-SM2	410	0.011	1.4	10.0	95	4.51
	H1-SM3	275	0.013	2.0	5.7	18	3.58		H2-SM3	410	0.011	2.0	6.3	65	4.51
H1-SS	H1-SS1	275	0.013	3.0	6.5	16	3.58	H2-SS	H2-SS1	410	0.011	2.3	14.0	46	4.51
	H1-SS2	275	0.013	2.5	12.0	26	3.58		H2-SS2	410	0.011	2.6	18.0	52	4.51
	H1-SS3	275	0.013	3.0	7.5	16	3.58		H2-SS3	410	0.011	4.5	9.0	14	4.51

5. 携帯式载荷装置の実験

実在部材のヤング係数を非破壊で把握する方法として、図20に示す携帯式めり込み载荷装置を開発した。この装置はレバーを手動で押すことによって、テコの作用で10mm×10mm、高さ12mmの载荷板が対象部材にめり込み、载荷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歪を計測するものである。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。

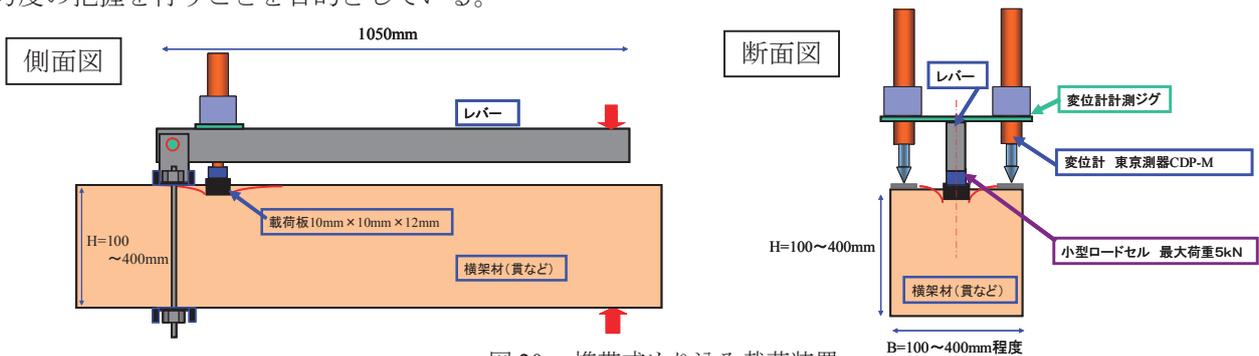


図 20 携帯式めり込み载荷装置

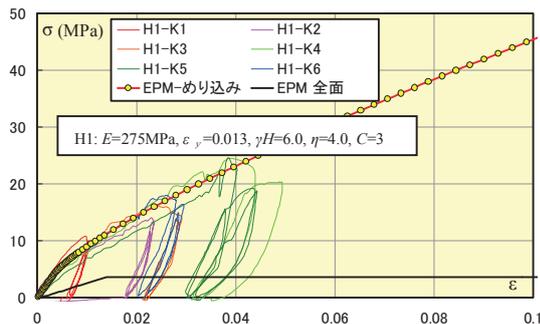


図 21 応力度—歪曲線 (H1)

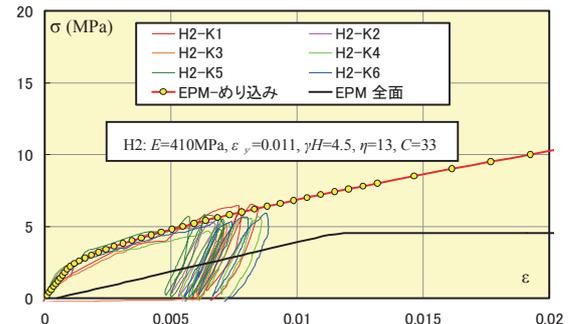


図 22 応力度—歪曲線 (H2)

この装置を3次元めり込み試験を行った実大部材H1、H2に使用し、装置の現状と実用化への課題を検討した。試験は1本の部材に対し、図7に示す他の載荷位置の中間6箇所（K1～K6）で行い、載荷は1.0～1.5mm程度のめり込みにより降伏に至る応力度—歪曲線を得た。6個の応力度—歪曲線はある程度まとまりをもっており、EPMシミュレーション結果を含めて図21、22に試験結果を示す。なお、3次元めり込み試験と同様、 $\gamma_y H$ の値は無限大とした。

試験で得られたパラメータと3次元めり込み試験における同じ載荷板サイズであるSSのパラメータ結果とを比較すると、パラメータで差異が出る結果となった。この理由としては、載荷板サイズが小さいことによる木材の局所的な影響とともに、手動載荷による荷重スピードの不安定さが影響しているものと考えられる。

今回開発した携帯式めり込み載荷装置によって、EPM解析を行える応力度—歪曲線を得ることに成功した。実用化のためには、手動載荷による不安定さの改善とともに、実際に使用する載荷板サイズや3次元載荷のめり込み試験を数多く行うことで、詳細なパラメータの設定を行っていく必要がある。また、1.0～1.5mm程度のめり込みでも、載荷板のエッジの丸みに拘らず、部材に多少の傷が付くため、文化財での使用可能性の検討とともに、荷重の掛け方などにも工夫していく必要がある。

6. 結論

本研究では、実在部材のヤング係数や降伏応力度を非破壊で把握できる携帯式めり込み載荷装置の開発を行い、そのためのいくつかの課題をヒノキ材を用いた実験によって検討した。本研究で明らかになったことを以下に示す。

- 1) 3次元めり込みを対象とした3次元めり込みの算定式を提案した。
- 2) 弾塑性パステルナーク・モデルによる精度よいシミュレーションを行うための新しいめり込み試験法を提案し、精度よいパラメータの推定が可能になった。
- 3) 横圧縮ヤング係数と降伏応力度、パラメータの1つである γH の間には高い相関がみられた。この結果は横圧縮ヤング係数を把握することでこれらの値が予測できることを示唆している。
- 4) 載荷板サイズを変化させためり込み試験を行った結果、載荷板サイズの違いによってパラメータに大きな差異がでることがわかった。
- 5) 実大部材に対する3次元めり込み試験を行った結果、2次元載荷と3次元載荷とでパラメータに差異がでることがわかった。
- 6) 携帯式めり込み載荷装置により応力度—歪曲線が得られたが、その結果から横圧縮ヤング係数・降伏応力度の精度よい推定のためには、装置の改善とともに載荷板サイズ・3次元載荷による詳細なパラメータの設定が不可欠であることがわかった。

謝辞：本研究の一部はグローバル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) 棚橋秀光・清水秀丸・堀江秀夫・楊 萍・鈴木祥之：パステルナーク・モデルに基づく有限長直交異方性木材の弾性めり込み変位, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.625, pp.417-424, 2008.3.
- 2) Tanahashi, H., Okamura, M., and Suzuki, Y.: Simple formulation of elasto-plastic embedment behavior of orthotropic wood considering densification, Proc. of WCTE2008, Miyazaki, Japan, 2008.6.
- 3) 廣川貴則・棚橋秀光・鈴木祥之：伝統木造仕口の横圧縮特性（その1 横圧縮ヤング係数と降伏応力度）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.7-8, 2009.8.
- 4) 棚橋秀光・廣川貴則・鈴木祥之：伝統木造仕口の横圧縮特性（その2 降伏メカニズムと形状関数）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.9-10, 2009.8.
- 5) 棚橋秀光・清水秀丸・鈴木祥之：木材の部分圧縮特性に関する研究（その2 ベイヒバの均等部分圧縮の場合）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.475-476, 2006.9.