

江戸後期に建てられた古民家解体古材のめり込み抵抗性能

Embedment resistance performance of demolished members of old wooden houses
built in late Edo period大岡優¹・棚橋秀光²・佐々木康寿³・山崎真理子⁴・伊津野和行⁵・鈴木祥之²Yu Ooka, Hideaki Tanahashi, Yasutoshi Sasaki, Mariko Yamasaki,
Kazuyuki Izuno and Yoshiyuki Suzuki¹立命館大学ポスドク研究員 グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
Researcher, Ritsumeikan University, Global Innovation Research Organization²立命館大学教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
Professor, Ritsumeikan University, Global Innovation Research Organization³名古屋大学教授 大学院生命農学研究科 (〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)
Professor, Nagoya University, Graduate school of Bioagricultural Sciences⁴名古屋大学准教授 大学院生命農学研究科 (〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)
Associate Professor, Nagoya University, Graduate school of Bioagricultural Sciences⁵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, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

In order to preserve the authenticity of cultural heritage wooden structures, it is important to evaluate the seismic performance of such buildings considering aging and deterioration. This paper examined embedment characteristics of aged and deteriorated members of old demolished wooden houses. First, the embedment tests for clear specimens of aged members were conducted. As a results, the specimens of tangential loading direction showed brittle failure. Furthermore, the tendency is found that yield stress depends on Young's modulus. Second, the embedment tests for deteriorated specimens were conducted. The results showed that the yield strength at 5% strain of deteriorated specimens decreased greatly comparing with clear specimens.

Keywords :traditional wooden structure, embedment characteristics, aged member, deteriorated member

1. はじめに

神社・仏閣、古民家などの伝統木造建築物においては、仕口接合部のめり込み抵抗が重要な耐震要素となる。したがって、築後長年経過している建物の正確な耐震性評価のためには、古材のめり込み性能の把握が必要となる。著者らはこれまで、主に寺院で使用されていたヒノキ・アカマツ・ケヤキ古材を対象としためり込み試験を実施し、そのめり込み性能について検討してきた¹⁾。しかしながら、古民家や町家などの住宅で用いられている古材および、これらの建物に頻繁に使用されているスギ古材に対する検討はあまり行っていない。伝統木造建築物においては、仕口部が経年や虫害によって劣化していることも多く、それらが建物の耐震性能に大きな影響を与える可能性も考えられる。伝統木造建築物で頻繁に確認される虫害としては、シロアリの他にシバンムシなどの甲虫類による食害がある²⁾。甲虫類の中でもシバンムシは新材よりも古材を好むとされているため³⁾、特に伝統木造建築物で注意すべき虫害である。シバンムシによって食害を受け

た部材は、内部に蟻の巣状の食孔が開いており、表面からは内部の状況が把握困難なことが特徴である。また、仕口ほぞが食害を受けている場合、仕口部のめり込み性能が大きく低下することも予想される。

本研究では、推定築後189年と170年のスギ古材を含む古民家解体材に対し、劣化のない無欠点古材および虫害を含む経年劣化古材を対象としためり込み試験を実施し、そのめり込み性能について検討した。

2. 無欠点古材を対象としためり込み試験

(1) 対象古材

無欠点古材を対象としためり込み試験には、江戸時代後期に建てられたと考えられる、埼玉県川越市の古民家（推定築後189年）解体古材と滋賀県湖南市の古民家（推定築後170年）解体古材を用いた。部材は、川越市古民家がスギ柱（C189）、ケヤキ造作材（Z189）、湖南市古民家がスギ柱（C170）、アカマツ差鴨居（P170）である。なお、これら解体古材の最も外側の年輪付近における放射性炭素年代測定結果（木材が伐採されてからの年代に近いと考えられる）はそれぞれ、C189：232±20年、Z189：172±20年、C170：252±20年、P170：262±30年であった。

(2) 試験方法

めり込み試験は、JISZ2101の部分圧縮試験を基本とし、参考文献⁴⁾と同様の方法である「挟み込み式載荷」とした。無欠点古材を対象としためり込み試験の評価法には、弾塑性パステルナークモデル⁴⁾（以下EPMと略す）を用いた。EPMは、めり込み（部分圧縮）周辺部の表面変位分布を指数関数で近似してめり込みによる剛性増大効果を評価するとともに、塑性段階にあっては、木材内部の横圧縮におけるひずみ分布とひずみ硬化現象に着目して塑性進行に伴う剛性減少過程を評価し、弾塑性にわたるめり込み挙動を統一的に表現した解析モデルである。部分圧縮試験結果と全面横圧縮試験結果（いずれも載荷面積あたりの応力度と元の高さあたりのひずみ<クロスヘッド間ひずみ>で示す）の比較により、均等めり込みの弾塑性応力度-ひずみ関係のシミュレーションを行い、EPMのパラメータの特定を行った。そのため、木口の年輪傾角など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、めり込み試験体は図1に示すように、1個の部分圧縮試験体（P）と繊維方向の両隣の2個の全面横圧縮試験体（S）を1セットとする。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、全面横圧縮試験体が1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、挟み込み式とすることで有効高さは15mmとなっており、載荷長比λは1、端距離比δは2となり、ほぼ無限長のめり込み条件が確保される。EPMパラメータは、 E 、 ϵ_y （または σ_y ）、 γH 、 η 、 C の5つで、 E 、 ϵ_y は部分圧縮試験体の両隣の全面横圧縮試験体2つのクロスヘッド間ひずみによる横圧縮ヤング係数と降伏ひずみの平均値である。その他のパラメータは、全面横圧縮試験結果と部分圧縮試験結果の剛性の比率より無次元特性値

γH （値が小さいほど剛性増大率が大きくなる）、降伏ひずみの比率より η 、降伏後の剛性に沿うように定数 C を順次決定する。

めり込み試験は、図2

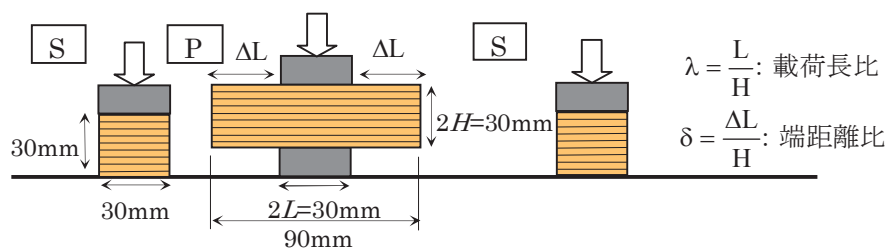


図1 めり込み試験

表1 試験体概要

古材	年輪方向	試験体数(セット)	密度(kg/m ³)	
C189	スギ	LR	6	375
		LT	6	365
		LTR	6	349
Z189	ケヤキ	LR	6	620
		LT	6	615
		LTR	6	612
P170	アカマツ	LR	6	462
		LT	6	464
		LTR	6	543
C170	スギ	LR	6	420
		LT	6	433
		LTR	6	442

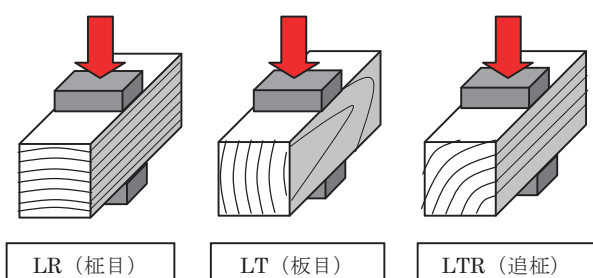


図2 年輪方向

に示すように、柁目方向（LR 方向載荷）、板目方向（LT 方向載荷）、追柁方向（LR と LT の中間で LTR と称する）の 3 種の年輪方向に対し試験を行った。

載荷速度は、部分圧縮、全面横圧縮ともに 0.5mm/min とし、各年輪方向それぞれ 2 セットは、大ひずみの挙動を確認するためにひずみ 0.6 を越える大ひずみまで載荷した。残りはひずみ 0.2 までの載荷とした。試験体数は 1 つの年輪方向で 6 セット（1 つの古材で 3 方向 18 セット）とした。試験体概要を表 1 に示す。

(3) 試験結果

a) 応力度-ひずみ曲線

応力度-ひずみ曲線と載荷後の試験体形状の例として、C189（川越古民家スギ）と Z189（川越古民家ケヤ

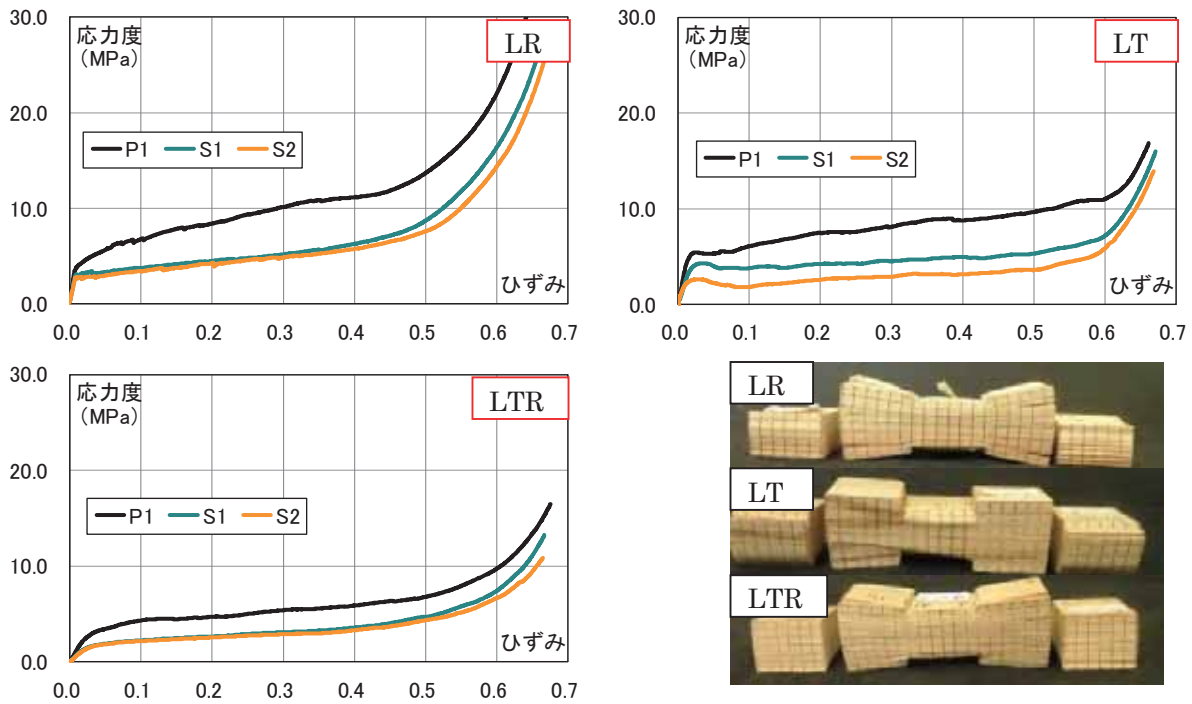


図3 C189（スギ）の応力度-ひずみ曲線と載荷後形状

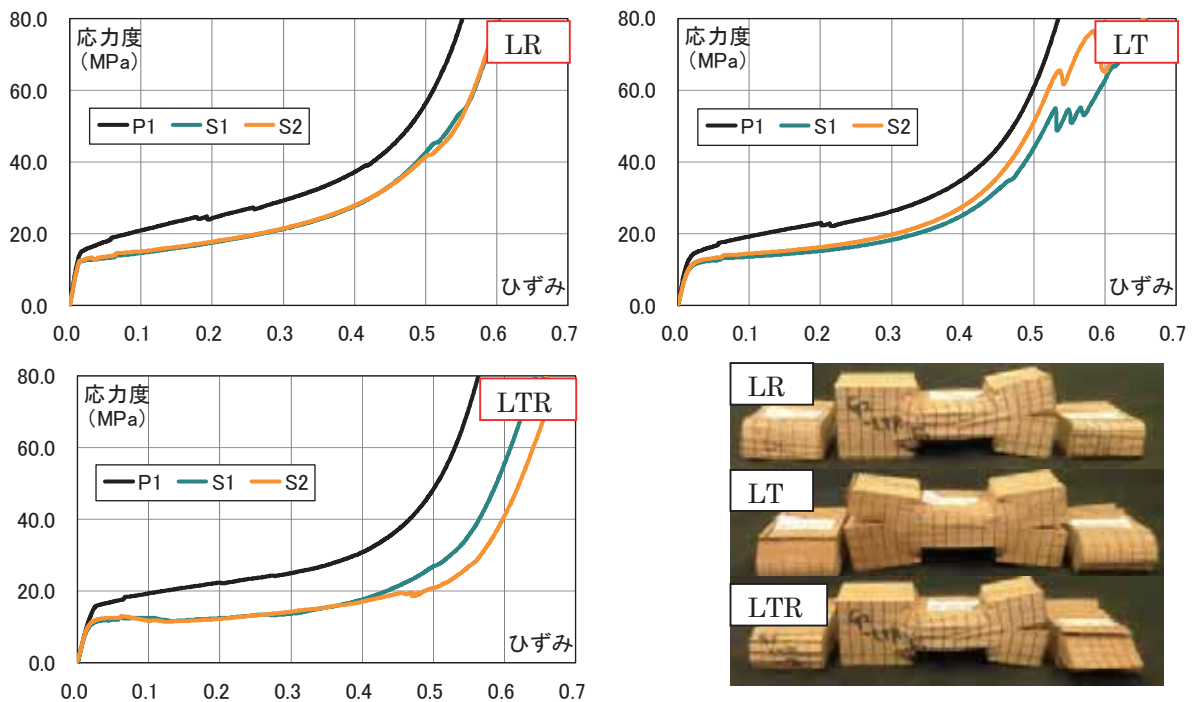


図4 Z189（ケヤキ）の応力度-ひずみ曲線と載荷後形状

キ)における、ひずみ 0.6 以上まで載荷した際の結果を図 3、4 に示す。図中の P、S はそれぞれ部分圧縮試験結果、全面横圧縮試験結果を示す。なお、それぞれの古材において、各試験体間で応力度-ひずみ曲線や載荷後形状に大きな違いは見られなかった。また、スギにおいては C189 と C170 で応力度-ひずみ曲線および載荷後形状に違いはあまり見られず、アカマツ (P170) においては、曲線の傾向はスギに、載荷後形状はケヤキに似る結果となった。

図 3、4 が示すように、ケヤキは、他の樹種よりも降伏後の 2 次勾配が大きく、ひずみ硬化現象による応力度上昇もひずみ 0.3 あたりの比較的載荷の早い段階で発生していることがわかる。載荷後 (大変形時) の試験体形状においては、スギに比べアカマツとケヤキは端部が脆く崩れている試験体が多く見られた。

年輪方向別で見ると、LR 方向においては全樹種で大変形時においても、目立った破損のないめり込みが起きている。それに対し、LT 方向は全樹種で、LTR 方向においてはケヤキ・アカマツで大変形時に脆く崩れる結果となった。特に LT 方向においては、載荷の途中で年輪が座屈するような現象が確認されている。

b) EPM パラメータ特定

試験結果の応力度-ひずみ曲線に対し、EPM シミュレーションを行った。例として C189 の LR 方向における EPM シミュレーション結果を図 5 に示す。また、得られた EPM パラメータの平均値 (av) と変動係数 (cv) を表 2 に示す。なお、EPM パラメータにおいては、既往の研究「新材<スギ・ヒノキ・アカマツ・ケヤキ>・古材<ヒノキ (経過年数 375 年)・アカマツ (経過年数 155 年・300 年)・ケヤキ (経過年数 167 年・375 年)>を対象」の結果¹⁾も含めた検討を行う。図 5 が示すように、スギおよびケヤキにおいては、ほぼ全ての試験体で EPM シミュレーションが適切に行えた。それに対しアカマツにおいては、全面圧縮の弾性直線が部分圧縮の直線より傾きが大きくなるなどによって γH が理論的に求められない試験体がいくつかあった。原因は特定できなかったため、全体評価に取り入れるのは適切ではないと判断して、表 2 では除いて平均値を算定した。

表 2 より、全面圧縮による降伏ひずみと部分圧縮における降伏ひずみとの比を表す η においては、樹種・年輪方向によって大きな変動はなく、全体の平均で 1.2 程度の値となった。この結果は、既往の研究¹⁾においても同様の傾向が示されている。

塑性ひずみ倍率 C においては、ばらつきも大きく他のパラメータとの相関も見られないため、傾向の把握が困難な結果となった。 C の値には樹種・ヤング係数・降伏ひずみと最大ひずみ・年輪方向・全面圧縮の塑性剛性・せん断破壊・割裂破壊など多くの要因と関連する可能性があるが、現段階ではそれらの相関関係は明らかではない。

なお、全面圧縮試験における横圧縮ヤング係数 E と降

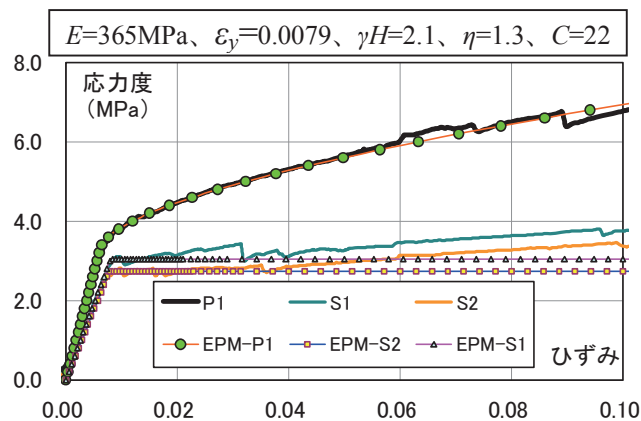


図 5 EPM 解析結果 (C189-LR)

表 2 EPM パラメータ

古材	年輪方向		E (MPa)	ϵ_y	γH	η	C	σ_y (MPa)	$E\zeta_p$ (MPa)	
C189	スギ	LR	av	358	0.0074	2.7	1.2	17	2.63	497
			cv	0.04	0.07	0.16	0.12	0.21	0.05	0.08
	LT	av	259	0.0153	1.7	1.2	70	3.98	413	
		cv	0.04	0.08	0.24	0.08	0.15	0.09	0.08	
	LTR	av	67	0.0198	1.0	1.1	5	1.33	127	
		cv	0.07	0.02	0.20	0.04	0.14	0.05	0.04	
Z189	ケヤキ	LR	av	1179	0.0122	5.9	1.2	42	14.29	1388
			cv	0.10	0.05	0.23	0.04	0.03	0.06	0.09
	LT	av	885	0.0150	5.8	1.2	41	13.22	1052	
		cv	0.02	0.06	0.30	0.06	0.04	0.04	0.03	
	LTR	av	817	0.0151	7.4	1.1	41	12.24	992	
		cv	0.09	0.10	0.80	0.15	0.08	0.03	0.15	
P170	アカマツ	LR	av	732	0.0080	4.2	1.1	87	5.81	910
			cv	0.03	0.03	0.12	0.10	0.05	0.01	0.03
	LT	av	457	0.0152	3.8	1.4	41	6.95	579	
		cv	0.02	0.04	0.13	0.07	0.24	0.04	0.04	
	LTR	av	436	0.0135	3.0	1.0	52	4.98	585	
		cv	0.44	0.37	0.05	0.05	0.53	0.13	0.45	
C170	スギ	LR	av	511	0.0094	3.1	1.2	40	4.79	680
			cv	0.10	0.09	0.17	0.08	0.40	0.07	0.11
	LT	av	300	0.0182	2.7	1.2	38	5.43	414	
		cv	0.10	0.05	0.17	0.05	0.22	0.08	0.08	
	LTR	av	296	0.0176	2.1	1.2	25	4.20	433	
		cv	0.61	0.32	0.21	0.12	0.47	0.21	0.57	

伏応力度 σ_y との間には、既往の研究¹⁾と今回の試験結果を統合して図6が示すように、高い相関関係（決定係数 $R^2=0.76$ ）が得られている。したがって、樹種・部材の経過年数・年輪方向に関係なく、 E と σ_y のどちらか一方を把握することで、もう一方の数値を予測することが可能だと考えられる。

めり込みによる剛性増大率を決定するパラメータ γH においては、今回実施した古材において決定係数0.68と高い結果が得られている。既往の研究¹⁾も含めて検討すると、図7が示すように、様々な樹種の新材・古材を含めた場合において決定係数は0.50となった。ただし、古材の方が新材と比べ γH が大きい傾向があり、剛性増大率では小さめになる。

また、横圧縮ヤング係数 E とめり込み剛性増大後の弾性めり込み剛性 $E\zeta_p$ の相関関係においては、図7に比べばらつきが大きく減少し、図8に示すように非常に高い相関関係（決定係数0.98）にあることがわかった。このことは、めり込み試験のめり込み剛性から横圧縮ヤング係数を推定する可能性を示唆するが、載荷長比 λ 、端距離比 δ や寸法効果等に依存することを考慮する必要がある。

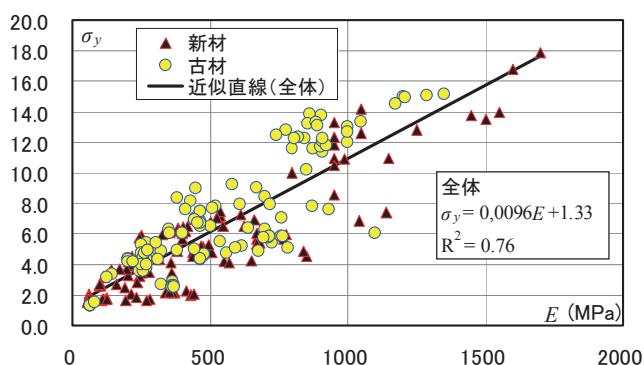


図6 E と σ_y の相関関係

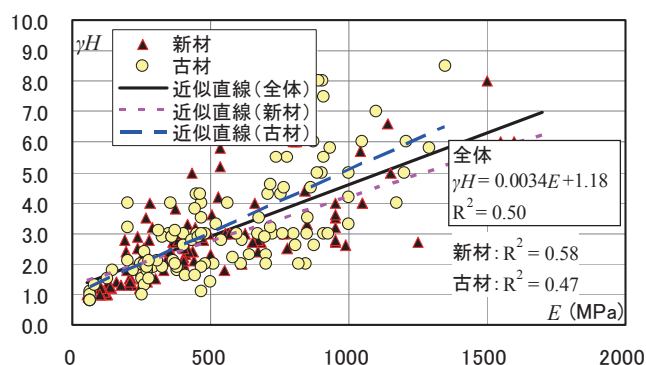


図7 E と γH の相関関係

3. 経年劣化古材を対象としためり込み試験

シバンムシによる劣化箇所を含む解体木材に対し、劣化部分の有無に着目しためり込み試験を実施し、虫害・劣化の差異によるめり込み性能について検討した。

(1) 対象古材

本試験に用いた古材は、2章「無欠点古材を対象としためり込み試験」に用いた古材のうち、湖南省古民家より解体されたスギ(C170)とアカマツ(P170)である。これらの解体古材の中で、シバンムシによる劣化部材(写真1、2)を選定し、表面劣化及び甲虫被害に着目しためり込み試験を実施した。

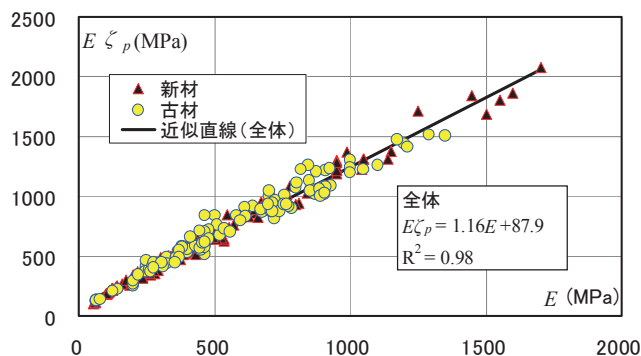


図8 E と $E\zeta_p$ の相関関係



写真1 シバンムシによる劣化



写真2 仕口ほぞの虫害

本試験においては、試験結果を比較するため、解体古材より以下の3種類の試験体を切出した。

- ①無欠点試験体 (CS) : 無欠点小試験片を部材内部から切出したもの。同一木材間における経年劣化古材との比較をするため、2章の試験体と同様の条件で切出す。
- ②表面付試験体 (SS) : 解体部材の表面を試験体の1面に残して切出したもの。主に実際の仕口ほぞから切出す。
- ③虫害試験体 (IS) : 虫害のある箇所から部材表面を1面に残して切出したもの。

解体古材の状態にもよるが、年輪方向などの試験体間のばらつきを極力減らすため、CS・SS・ISの試験体は可能な限り近い部位から切出した。また、SSの表面付試験体においては、建物として変形する際、実際にめり込みが発生する方向に荷重が行えるように試験体の切出しを行っている。

(2) 試験方法

めり込み試験体は2章の試験と同様の寸法で解体部材から切出した。しかし、部分圧縮試験体(P)と隣り合う全面横圧縮試験体(S)の数は古材の状態により1~2個とする。めり込み試験はJISZ2101の「木材の試験方法」に準拠した片側荷重(幅30mmの鋼板を使用)とし、SS・IS試験体においては解体部材表面を荷重面とした。荷重速度は、部分圧縮、全面横圧縮ともに0.5mm/minとした。荷重は大変形時のめり込み・横圧縮挙動を把握するため、クロスヘッド変位で20mm(ひずみ約0.66に相当)まで行った。試験体切出し例を図8に、試験の種類および試験体数を表3に示す。

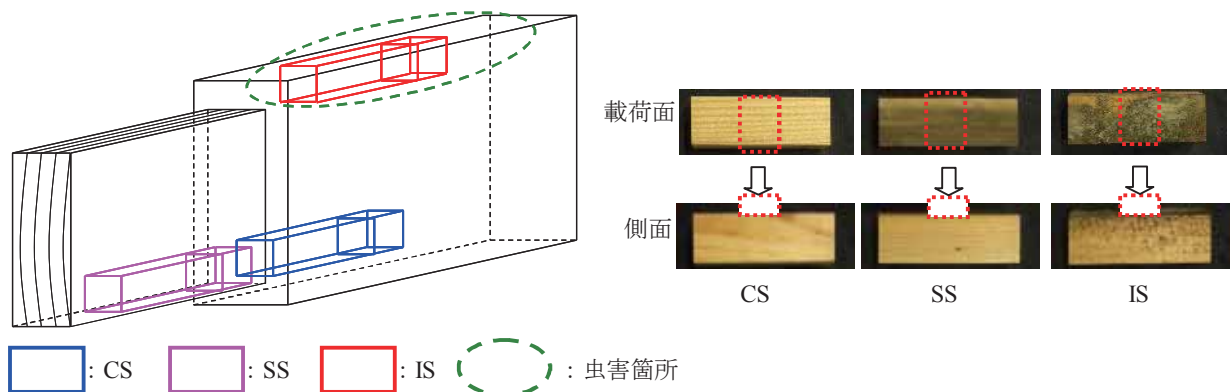


図8 試験体切出し例

表3 試験体数

古材		試験体の種類	試験体数(セット)	密度(kg/m ³)
P170	アカマツ	無欠点試験体(CS)	7	523
		表面付試験体(SS)	3	564
		虫害試験体(IS)	8	459
C170	スギ	無欠点試験体(CS)	6	415
		表面付試験体(SS)	2	493
		虫害試験体(IS)	10	388

図8より、仕口ほぞから切出した試験体(SS)においては、目視で確認したところ、表面(荷重面)に僅かな経年劣化は存在するものの、部材内部まで進行している腐朽などの劣化はなかった。また、虫害箇所から切出した試験体(IS)においては、全ての試験体で虫害による食孔が広範囲に認められた。

(3) 試験結果

スギにおける、図8と同様の形式で切出した場合の無欠点試験体(CS)・表面付試験体(SS)の代表的な応力度-ひずみ曲線を図9、10に示す。図9、10が示すように、SSにおいても、CSと同様のめり込み(全面横圧縮に比べ、部分圧縮の剛性や強さ、2次勾配が大きくなる)が生じる結果となった。これは、経年劣

化が表面のごく僅かな部分にしか存在しなかったためと考えられる。また、年輪方向などの木口の状況がほぼ同じだったことから、部分圧縮・全面横圧縮ともに応力度-ひずみ曲線の形状が非常に酷似している。CSとSSの結果にあまり違いがみられないのは、アカマツにおいても同様であった。

虫害試験体 (IS) においては、スギの応力度-ひずみ曲線に劣化の影響が反映される結果となった。スギの IS の応力度-ひずみ曲線の代表例を図 11 に示す。図 11 が示すように、初期変形領域において、部分圧縮が全面横圧縮よりも低剛性になる、明確な降伏点が見当たらないなど、CS・SS とは異なる挙動が示された。しかしながら、変形が進むにつれ徐々に食孔が消失していくことで、大変形時ではひずみ硬化が発生する CS・SS に近いめり込み・横圧縮挙動に移行していくことが確認された。アカマツの IS においては、図 12 が示すように、初期変形領域でも CS・SS と同様のめり込み・横圧縮挙動であった。スギとアカマツで異なる結果となったのは、樹種による違いの影響が考えられるが、詳細な原因は不明である。

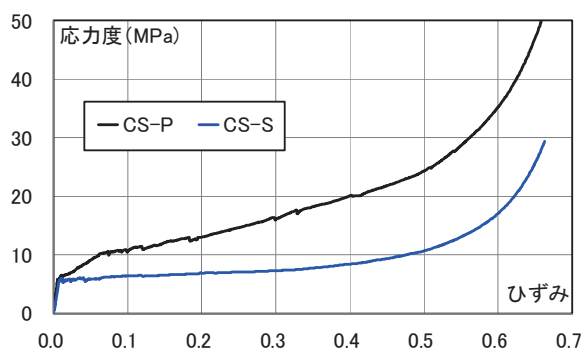


図9 応力度-ひずみ (CS:無欠点-スギ)

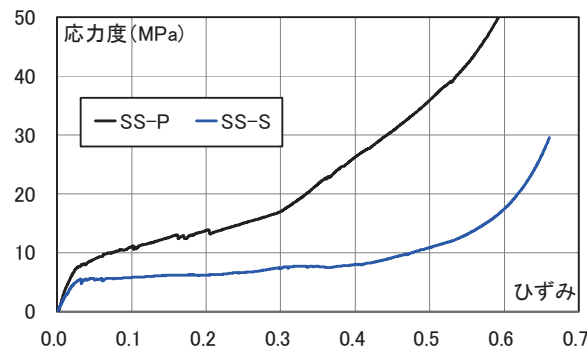


図10 応力度-ひずみ (SS:表面付-スギ)

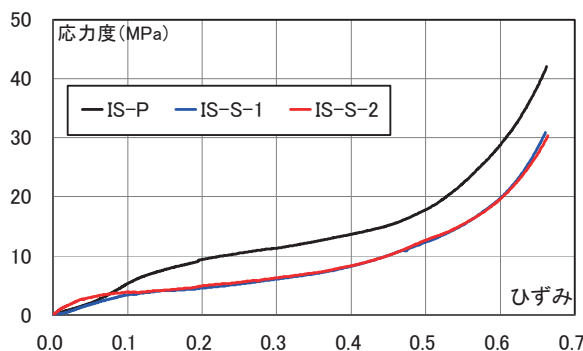


図11 応力度-ひずみ (IS:虫害-スギ)

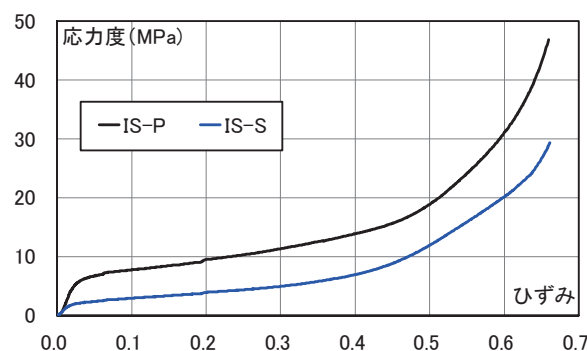


図12 応力度-ひずみ (IS:虫害-アカマツ)

表 4 部分圧縮試験結果

古材	試験の種類	比例限度応力 (MPa)			5%部分圧縮強さ (MPa)		
		LR	LT	LTR	LR	LT	LTR
P170 アカマツ	無欠点試験体 (CS)	-	10.6	5.2	-	14.7	7.5
	表面付試験体 (SS)	10.9	11.5	-	14.1	14.0	-
	虫害試験体 (IS)	-	-	-	2.5	7.4	6.5
C170 スギ	無欠点試験体 (CS)	6.7	-	4.5	9.5	-	6.8
	表面付試験体 (SS)	7.4	-	-	10.6	-	-
	虫害試験体 (IS)	-	-	-	4.2	-	2.9

表 4 に部分圧縮試験結果における、比例限度応力および 5%部分圧縮強さの平均値を試験体の年輪方向別 (LR・LT・LTR) に示す。試験体が切出せなかった年輪方向および試験結果より算出が困難な箇所については(-)で示してある。表 4 より、スギ・アカマツともに、比例限度応力・5%部分圧縮強さは無欠点試験体 (CS) と表面付試験体 (SS) で大きな差異はみられなかった。それに対し虫害試験体 (IS) においては、スギおよびアカマツともに 5%部分圧縮強さが大きく低下する結果となった。

なお、CS・SS の横圧縮ヤング係数および降伏応力度は、新材を対象とした既往の研究⁵⁾と比較して大きな低下などはみられなかった。

4. まとめ

本研究で明らかになったことを以下に示す。

・無欠点古材のめり込み性能

1. 樹種（スギ・アカマツ・ケヤキ）の違いに関係なく、柾目方向（LR 方向）に比べ板目方向（LT 方向）・追柾方向（LTR 方向）が大変形時に脆くなる結果となり、特に板目方向（LT 方向）においては、载荷の途中で年輪が座屈するような挙動が確認できた。この挙動は年輪の曲率などにも依存し新材でも見られ、古材特有のものとは限らないと考えられるが、新材との差異までは確認できていない。
2. EPM 解析パラメータの傾向を見ると、全面圧縮と部分圧縮の降伏ひずみの比率を示す η においては、古材・新材・樹種・年輪方向関係なく、既往の $\eta = 1.1 \sim 1.4$ の範囲に収まる結果となった。塑性ひずみ倍率 C においては、ばらつきも大きく他のパラメータとの相関も見られないため、傾向の把握が困難な結果となった。
3. めり込みによる剛性増大率を決定するパラメータ γH においては、新材・古材ともに横圧縮ヤング係数との相関が比較的高いことが分かった。しかし、古材の方が新材と比べ γH が大きい傾向があり、剛性増大率では小さめになる。

・経年劣化古材のめり込み性能

1. 本試験においては、スギ・アカマツともに表面付試験体と無欠点試験体とで、めり込み性能に大きな違いはみられなかった。
2. 虫害試験体においては、スギの応力度-ひずみ曲線における初期変形領域で、部分圧縮が全面横圧縮よりも低剛性になる、明確な降伏点が見当たらない結果となった。それに対し、アカマツの応力度-ひずみ曲線では、無欠点古材や表面付試験体と同様のめり込み・横圧縮挙動であった。
3. スギ・アカマツともに虫害試験体の部分圧縮強さが無欠点試験体・表面付試験体の値より大きく低下したため、虫害による劣化が仕口の復元力に大きな影響を及ぼすことが示唆された。

謝辞：本研究の一部は、平成23年度国土交通省「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会（委員長：鈴木祥之）の古材に関する調査研究として実施した。協力頂いた検討委員会委員に感謝の意を表す。また、本研究は科学研究費・研究活動スタート支援（課題番号23860055、研究代表者：大岡優）および立命館大学G-COE「歴史都市を守る『文化遺産防災学』推進拠点」（代表者：大窪健之）の補助を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 大岡優・棚橋秀光・伊津野和行・鈴木祥之・土岐憲三：伝統的木造建築物で用いられた古材の強度・めり込み特性，日本建築学会構造工学論文集，Vol.57B，pp.335-342，2011.
- 2) 小峰幸夫・木川りか・原田正彦・藤井義久・藤原裕子・川野邊渉：日光山輪王寺本堂におけるオオナガシバンムシ *Priobium cylindricum* による被害事例について，保存科学，Vol.48，pp.207-213，2008.
- 3) 岡野健・祖父江信夫：木材科学ハンドブック，朝倉書店，2006.
- 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，Vol. 76，No.662，pp.811-819，2011.
- 5) 大岡優・棚橋秀光・伊津野和行・鈴木祥之：伝統木造仕口の横圧縮特性（その 5 いくつかの樹種のめり込み特性），日本建築学会大会（関東）学術講演梗概集，C-1，構造Ⅲ，pp.423-424，2011.