

経年変化が斗拱の地震時挙動に与える影響

学部 正会員 洪 政延（東洋大学）

1. 研究の背景と目的

伝統木造建築物は、現代の建築技術とは異なる構造的特徴を有しており、その中でも特筆すべき点として「斗拱」と呼ばれる複数の部材が積層して構成された要素がある。斗拱は、鉛直荷重伝達や地震時のエネルギー吸収の役割を果たす部材であるが、伝統木造建築物は長い年月建ち続けているものが多く、経年変化により構造特性が変化する可能性がある。斗拱は部材が積層されて構築されていることから、摩擦係数が構造特性に及ぼす影響が大きいと、古材の特性や摩擦係数を考慮することは重要である。

既往の研究では、伝統木造建築物に使われた古材の圧縮試験¹⁾や曲げ試験²⁾をおこない古材の材料特性を把握する研究がおこなわれているが、摩擦係数に関しては調べられていない。一方、他分野では、気象劣化によって摩擦係数が材料に与える影響について確認したものはあるが³⁾、古材の摩擦試験をおこない、経年変化による摩擦係数への影響を把握した研究は見当たらない。また、汚染物質や太陽光、雨水、風などの様々な要因による斗拱の経年変化が及ぼす影響に関する研究はまだ明らかになっていないため、改修や耐震性能の評価には慎重なアプローチが必要である。

そこで、本研究では、伝統木造建築物における斗拱の経年変化が地震時挙動に与える影響を明らかにすることを目的に、伝統木造建築物から抜き取りをおこなったひのき古材と新材の材料試験、木材表面の摩擦試験、SEM撮影、画像解析をおこない、これらの結果を踏まえて斗拱の動的加力試験を再現する解析モデルを構築して検証をおこなった。

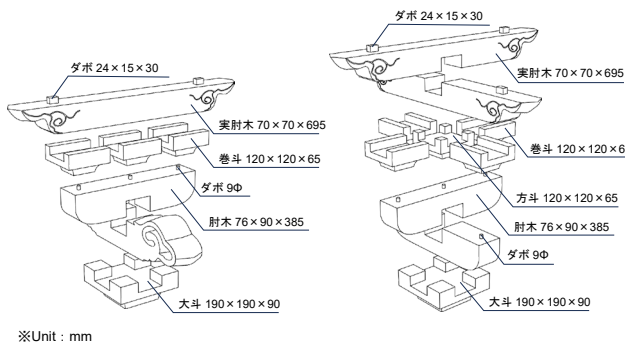


図1 斗拱の構成

(左：平三ツ斗，右：出三ツ斗)

2. ひのき古材と新材の材料特性に関する研究

2.1 試験体概要

古材による試験体は約167年前に再興された南泉寺御堂から採取された斗拱のうち、枅肘木から切り出した木材を用いて縦圧縮試験、横圧縮試験、部分圧縮試験をおこなった。新材による試験体は、古材の試験体と同仕様・同寸法で製作した新材の斗拱の枅肘木から切り出した。試験体の樹種はいずれもひのきであり、試験体寸法はJIS Z2101に準拠して、「縦圧縮試験試験体」、「横圧縮試験試験体」は30mm×30mm×60mm（各部寸法が±0.5 mmの誤差）とし、「部分圧縮試験試験体」は30mm×30mm×90mm（各部寸法が±0.5 mmの誤差）程度に切り出したものとした。写真1に縦・横圧縮試験の試験体を、写真2に部分圧縮試験の試験体（上：表面残し，下：内部）を示す。



写真1 縦・横圧縮試験体 写真2 部分圧縮試験体

2.2 ひのき古材と新材の材料試験

約350年前に建設された御堂から採取したひのき古材と新材の材料試験をおこない、圧縮強度、圧縮ヤング係数、ポアソン比を把握した。長手方向を繊維方向に平行にした「全面縦圧縮試験」と長手方向と繊維方向を直交にした「全面横圧縮試験」では、鉛直下向きに載荷速度1.0mm/minで載荷した。部分圧縮試験では、試験体の上面に30mm×30mmの鉄片を設置し、鉛直下向きに載荷速度1.0mm/minで載荷した。図2に縦・横圧縮試験の試験体セットアップを示す。

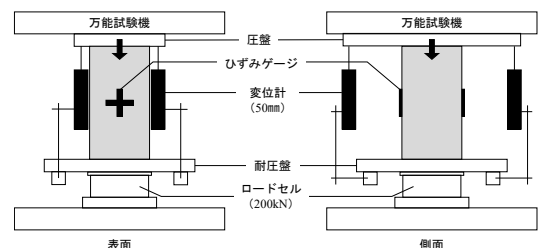


図2 縦・横圧縮試験セットアップ

表 1 に材料試験の結果を、図 3 から 5 にそれぞれの試験の荷重－変位の関係を示し、赤線が古材を示している。これらの結果から、古材と新材の比較をおこなうと、いずれの試験も古材の方が圧縮強度が高く、ヤング係数も大きいことが明らかとなった。また、古材の横圧縮ヤング係数は縦圧縮ヤング係数よりも 1/15 程度小さく、新材の横圧縮ヤング係数は縦圧縮ヤング係数よりも 1/24 程度小さいことが確認できた。

表 1 ひのき古材と新材材料試験

試験方法		古材	新材
縦圧縮	圧縮強度(N/mm ²)	49.88	42.88
	ヤング係数(N/mm ²)	5989	4777
横圧縮	圧縮強度(N/mm ²)	5.07	2.33
	ヤング係数(N/mm ²)	367	172
部分圧縮	圧縮強度(N/mm ²)	9.57	5.46
	ヤング係数(N/mm ²)	924	697

3. 経年変化による木材表面摩擦特性

3.1 木材表面の摩擦試験

木材の摩擦試験方法は JIS に規格化されてなく、JAS でも規格化されていない。そこで、紙の表面粗さを測定する際に使用される JIS P8147 を適用し、木材の表面の静摩擦係数を評価する。部分圧縮試験体を切り出

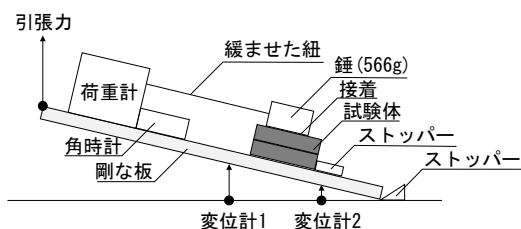


図 6 傾斜法

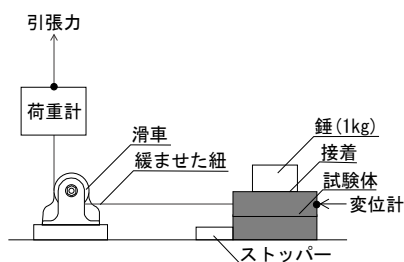


図 7 水平法

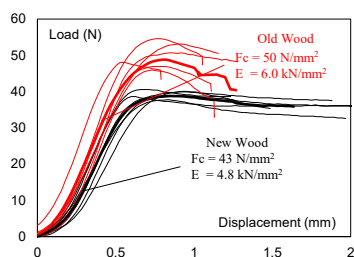


図 3 全面縦圧縮試験（変位-荷重）

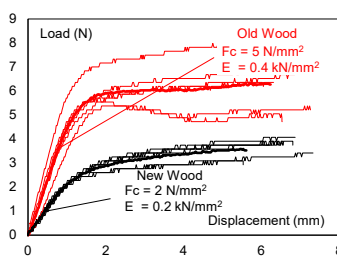


図 4 全面横圧縮試験（変位-荷重）

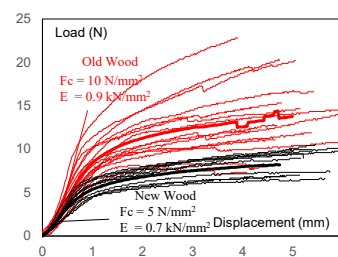


図 5 部分圧縮試験（変位-荷重）

した際に得られた材を用いて、傾斜法と水平法の二つの方法から摩擦試験をおこなった。接触面が約 30mm × 90mm = 2700mm² となるように試験体を試験機に設置した。また、接触面に節が無い試験体を試験に用いた。図 6～7 に試験体設置状況をそれぞれ示す。

傾斜法による摩擦試験は、角度計、荷重計および変位計の関係からの二つの方法から摩擦係数を算出した。試験速度は、剛な板の角度が毎秒 1° 程度となるように、板の一端を一定の速度で引き上げた。水平法による摩擦試験は、荷重計から摩擦係数を算出した。表面同士をお互いに水平でかつ均等な圧力で接触させ、試験速度は 5mm/min の速度で水平方向に動かした。両試験方法において同じ仕様の試験体を重ねて、試験体数は古材 16 組と新材 5 組で構成し、摩擦試験の上部の試験体と下部の試験体とした。試験回数は 1 試験体あたり 5 回とし、摩擦試験の結果を表 2 に示す。

古材では、木材表面の色調の変化が目視で確認できる表面の方が静摩擦係数が最も高く、接触面と内部はほぼ同等の結果となった。新材の場合、静摩擦係数は古材とは異なり、内部の方が表面よりも高い結果となった。古材と新材で比較すると、古材の方が摩擦係数が高いことが確認できた。また、両方の摩擦試験の結果はよく一致し、摩擦試験の妥当性が検証された。

表 2 摩擦係数の結果

試験体	古材			新材	
	内部	接触面	表面	内部	表面
静摩擦係数	0.45	0.48	0.57	0.48	0.43

3.2 木材表面の SEM による観察

古材と新材木材の摩擦試験の結果から、経年変化による摩擦係数の上昇が確認できたため、木材表面の形態や微細な凹凸や、へこみなどを観察することを目的として、SEM（走査型電子顕微鏡）撮影をおこなった。試験装置は「HITACHI 卓上顕微鏡「TM-1000」Miniscope」を用いて試験をおこなった。部分圧縮試験体を約 10 mm 角に再加工した試験体を用い、加速電圧

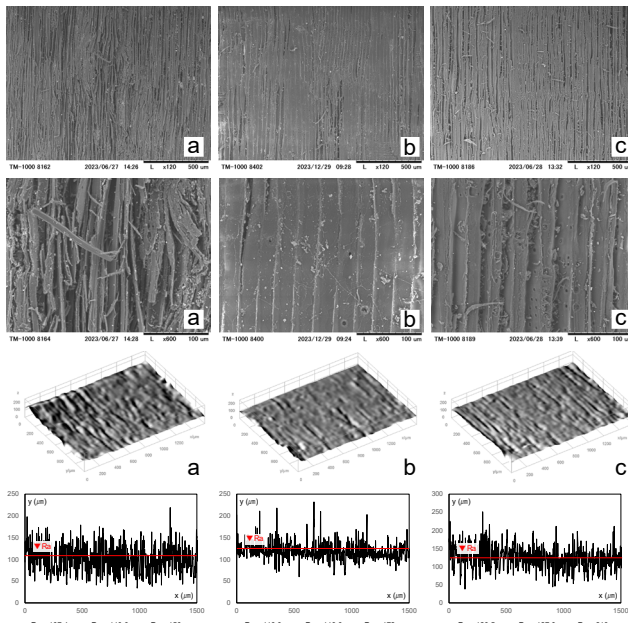


図8 SEM画像(500 μm , 100 μm), 3次元像, Plot Profile
(a: 古材表面, b: 古材接触面, c: 新材表面)

15kV の条件で反射電子像を観察した。図8に木材表面のSEM画像の結果とSEM画像のPlot profileと3次元像の一例を示す。

まず、古材の表面と新材の表面を比較すると、古材の表面は新材に比べて凹凸がより顕著であることが観察できた。500 μm の画像では、古材の表面が劣化によって新材に比べて著しく損なわれていることが明らかとなった。さらに、100 μm のSEM画像を観察すると、古材の方が細胞壁の毛羽が多く、肉眼で見るだけでなく平滑ではないことが示された。また、およそ20kNの鉛直荷重を負担していた斗拱から切り出した古材の接触面を観察すると、古材の表面と新材の表面とは違う傾向がみられる。古材の表面ほど細胞壁の劣化は観察されず、繊維壁や仮道管が座屈し、繊維間隙が観測されない。新材の表面と比較すると、どちらの試料も平滑に見えるが、新材の表面は仮道管が切断された断面が確認でき、繊維間隙も接触面より広いことがわかる。

このような観察結果から、古材と新材の木材表面および接触面には顕著な違いが存在し、古材の方が劣化が進行していることが明らかになった。

木材の劣化程度を定量的に評価するために、木材表面のSEM画像を用いて、画像解析をおこなった。JIS B0601: 製品の幾何特性仕様(GPS)―表面性状: 輪郭曲線方式―用語, 定義及び表面性状パラメータに定義されている高さ方向のパラメータである算術平均高さ(Ra), 二乗平均平方根高さ(Rq), 最大高さ(Rz)

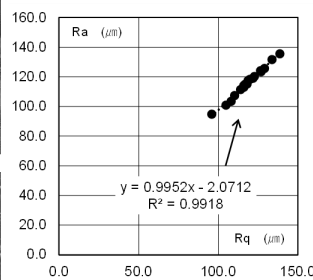


図9 Ra-Rqの関係

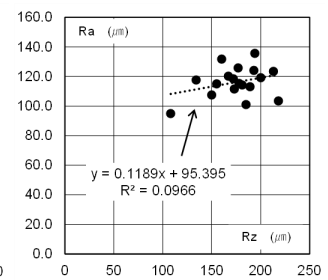


図10 Ra-Rzの関係

と各パラメータとの相関を求めた。RaとRqの関係を図9に、RaとRzの関係を図10に示す。Ra-Rqの場合、相関係数は0.99であり、RaとRqの間には高い相関が認められた。一方で、Ra-Rzの場合、相関係数が0.10であり、RaとRzの間には相関が見られなかった。

4. 斗拱の動的加力試験および時刻歴応答解析

斗拱の地震時の挙動を把握するために、既往研究⁴⁾から得られた知見を基に、ひのき古材と新材の材料実験および摩擦試験の結果を反映した斗拱の時刻歴応答解析モデルを構築し、地震時の挙動を把握するために時刻歴応答解析をおこなう。図11に斗拱のモデル図を、図12に斗拱の解析モデルの加力時の試験台の平面軌跡の一例を示す。変形角は、長軸加力方向(X軸)および短軸加力方向(Y軸)に設置した油圧アクチュエータの変位を試験体高さ250mmで除して求めた。(a)は1/600radから1/50radまで、(b)は1/30radから1/10radまでの結果をそれぞれ示している。軌跡はオービットとなっており、実験結果とよく一致した。

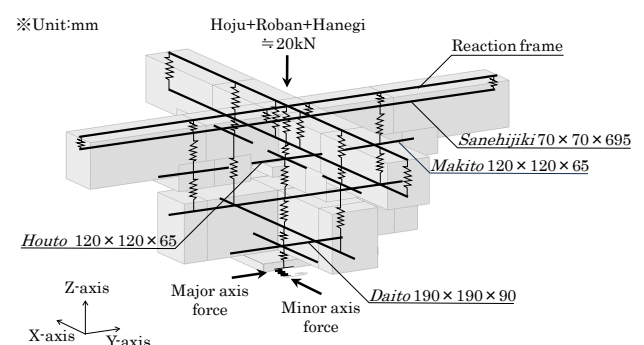
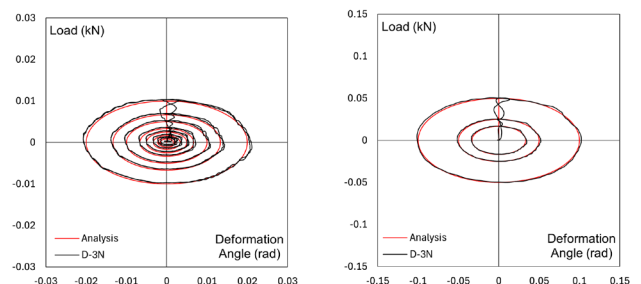


図11 斗拱モデル図(出三ツ斗)

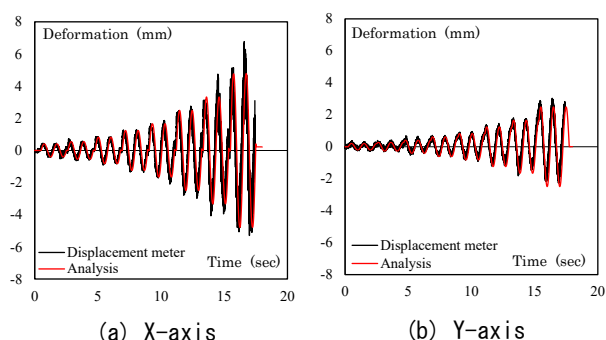


(a) 1/600-1/50

(b) 1/30-1/10

図12 加力時の平面軌跡

また、変位計によって得られた変位とモーションキャプチャによって得られた変位をそれぞれ時刻歴応答解析結果と比較した一例を図 13 に示す。いずれの結果においても、概ね一致することが確認できた。



(a) X-axis

(b) Y-axis

図 13 変位計で測定した大斗の変位と時刻歴応答解析結果の比較

次に、どのパラメータが伝統的木造建築における斗拱の地震時挙動にどのような影響があるかを把握するため、パラメトリックスタディをおこなった。表 3 にパラメトリックスタディのパラメータ項目と各ケースの最大耐力を示す。パラメトリックスタディのパラメータは、木材のヤング係数、木材表面の静摩擦係数、 R_x 、 R_y 、 R_z 軸におけるめり込み剛性の 3 種類であり、実験値および算出値の 50%、75%、125%、150% の各 5 パターンとした。実験値・算出値を基準とし、各パラメータを 1 つ変更させて解析をおこなった。

表 3 パラメータ概要と最大荷重

変動率	50%	75%	100%	125%	150%
入力値 (N/mm ²)	4500	6750	9000	11250	13500
E					
X 方向					
最大荷重 (kN)	9.55	9.55	9.55	9.55	9.55
入力値	0.24	0.36	0.48	0.60	0.72
μ					
X 方向					
最大荷重 (kN)	4.78	7.17	9.55	11.94	14.33
入力値 (%)	50	75	100	125	150
K_θ					
X 方向					
最大荷重 (kN)	9.55	9.55	9.55	9.55	9.55

E : 部材のヤング係数

μ : 木材静摩擦係数

K_θ : めり込み剛性

また、パラメトリックスタディの結果から、木材の静摩擦係数が大きくなるほど、どの方向から最大耐力が平均で約 1.32 倍ずつ増加する傾向が見られた。

一方、木材のヤング係数と各部材間のめり込み剛性は、その値が大きくなっても最大耐力にはほとんど変化がなく、斗拱の地震時の挙動には影響を与えないことが明らかとなった。さらに、静摩擦係数を 150% にしたケースは、第 3 章でおこなった摩擦試験の結果か

ら得られた最大の静摩擦係数と一致し、静摩擦係数を 75% にしたケースは、同章でおこなった摩擦試験の結果において最小の静摩擦係数に対応している。この結果から、摩擦係数が斗拱の地震時の挙動に最も大きな影響を与えており、ヤング係数とめり込み剛性はあまり影響が見受けられないことが明らかとなった。

5. 結論

本研究は、大阪府泉南市の南泉寺境内において 1856 年（安政 3 年）に再興された保存登記記録が残る御堂から採取したひのき古材と新材の材料特性について（第 2 章）、経年変化による木材表面摩擦特性について（第 3 章）それぞれ実験的・解析的に闡明し、斗拱の動的挙動の把握および時刻歴応答解析モデルの構築（第 4 章）をおこなった。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 圧縮試験の結果、いずれの試験も古材の方が新材より圧縮強度およびヤング係数が大きいことが明らかとなった。
- (2) 経年変化によって木材表面の色調の変化が目視で確認できる表面の方が静摩擦係数が約 1.29 倍高くなる結果となった。SEM 撮影の結果、古材の表面の方が細胞壁の毛羽が多く、経年変化により新材に比べて著しく損なわれていることが明らかとなった。
- (3) 斗拱の時刻歴応答解析をおこない、木材のヤング係数と木材表面の摩擦係数をパラメータとしてパラメトリックスタディをおこなった結果、摩擦係数が斗拱の地震時の挙動に最も大きな影響を与えていることが確認できた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を賜った高岩先生に感謝の意を表す。本研究で参考にした斗拱は、大阪府泉南市、南泉寺より提供いただいたものであり、南泉寺住職様にはご指導ご鞭撻を頂いた。一部の費用は、高岩建築研究室の支援を受けて実施した。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 小原二郎 : 木材の老化に関する研究 (第 1 報) 法隆寺建築占材の機械的性質, 西京大学学術報告農学, 第 2 号, pp. 117~131, 1952
- 2) 岡本一: 古材の研究 (第 23 報) ヒノキ新材の曲げヤング率とセルロース含有率との関係, 木材学会誌, 5 巻, 5 号, pp. 161-166, 1956
- 3) 保久原均, 寺田剛: 路面とすべりの関係, アスファルト Vol. 46 No. 214, 2003
- 4) 高岩裕也: 出三斗組および平三斗組による斗拱の水平 2 次元挙動の把握, 日本建築学会構造系論文集, 88(813), 1535-1544, 2023