

# 木材の繊維方向が摩擦特性に与える影響の実験的考察

石井 卓磨

## 1. はじめに

森林資源の利活用を目的とした木質構造に対する規制緩和の開始から 10 年が経過し、CLT や木質ラーメン構造に代表される新たな材料・技術を採用した木造建築は、着実に増加している。このような開発研究において、シミュレーション解析は本来、重要な役割を占めるが、木質構造、特にその接合部周辺を正確にモデル化する手法は未だ確立されていない。以上を背景に、本研究ではそれらシミュレーション解析に不可欠な摩擦特性に着目し、その基本的な力学的性質を木材表面の性状と照らし合わせて調べたものである。

摩擦特性の 1 つである凝着項と木材表面との対応関係を調べた先行研究として、山川らによる検討が挙げられる<sup>1)</sup>。当該研究では、試験・評価の方法など、木材表面の摩擦を調べる基本的な方針を示しており、本研究でもそれらを踏襲する。本論では特に、試験方法を再度見直し改良した他、木材の異方性が摩擦特性に与える影響を詳しく調べた結果を述べる。

## 2. 木材の異方性を考慮した摩擦試験

### 2.1 摩擦試験の試験方法と計測項目

本研究では、図 1 に示す試験装置<sup>1)</sup>を用いて摩擦試験を実施した。この試験装置は、木材と引抜板と称する鋼材面の摩擦特性を調べるもので、圧縮荷重  $N$  により定めた面圧を接触面に作用させる。その後、マニュアル制御により図 1 の右側にある高ナットを回転させ、それと連動する水平方向の強制変位に要する荷重をロードセルで計測するものである。

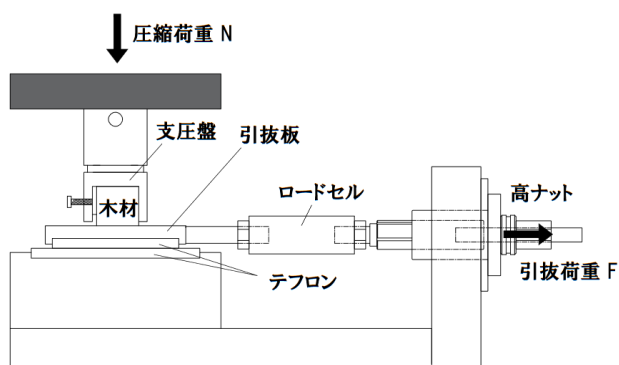


図 1 摩擦試験装置の基本構成

この装置は、先行研究<sup>1)</sup>で懸念された点を改善したもので、鋼板-テフロン間の摩擦の影響が比較的大き

いかった点を考慮し、試験目的である木材表面と接する面とは反対の引抜板表面にテフロンを固定し、さらにテフロンをもう一層設ける仕様を採用している。

図 1 に併記した鉛直荷重  $N$  は、後述する木材試験片各方向の材料試験の結果に基づき定めるもので、各試験条件の長期圧縮強度に対し、その 10%、30%、50%、100% の 4 段階を設定する。これらの荷重は試験機のフィードバック制御により一定荷重を保持するが、制御には限界がある点にも留意する必要がある。

計測項目は、圧縮荷重  $N$  とロードセルによる引抜荷重  $F$  の他、接触面の相対変位の計測を目的に、引抜板とその直上の木材の水平方向の移動量も計測した。

### 2.2 試験計画・方法と木取り

木材は、部材内の不均質性から 1 つの木材内でも特性が異なるため、比較対象となる試験シリーズを可能な限り近接した位置で採取する必要がある。本研究では、繊維方向の影響を考慮するため、図 2 に概要を示すように試験片を採取した。

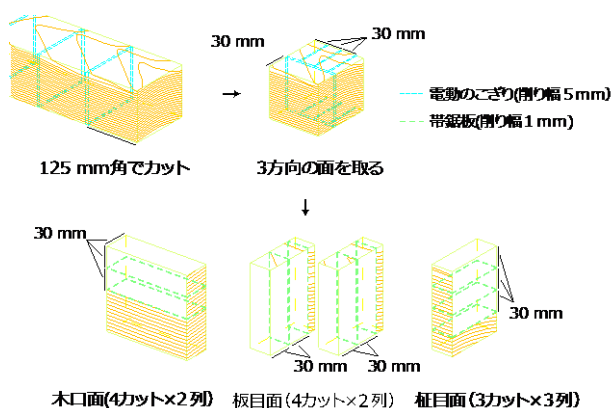


図 2 木材各方向の試験片の木取り

すべての試験片は、木理通直な断面 125 mm 角の二方桁のすぎ製材から切り出したもので、まず 125 mm 角の立方体を用意し、木口面、板目面、柁目面を試験条件にできるように断面 30 mm × 30 mm、長さ 27 mm の試験片 32 体を採取した。試験体採取にあたり、切断面に影響を与える切断の条件も検討し、検討の結果、先行研究で採用していた鋸速度を 5.0 m/s、自動送り装置の送り速度を 10.0 mm/s の条件では、鋸の変形による試験片の加工精度が不十分と考え、鋸速度を 15.0 m/s、送り速度を 1.0 mm/s とした。

採取した 32 体は、すべて異なる試験条件を設定するもので、先に述べた圧縮荷重 4 段階に加え、木材の繊維方向における摩擦特性を調べるため、摩擦面 3 種類 × 滑動方向 2 種類を試験変数とした。さらに板目面では、早材と晩材の表面積が特性に影響を与えると考え、板目面を合計 2 種類製作し、圧縮荷重 4 段階 × 摩擦面 4 種類 × 滑動方向 2 方向 = 32 体である。試験体の呼称はこれら試験条件と対応させ、摩擦面 (L: 木口, R: 板目, T: 柃目) 滑動方向 (L: 繊維方向, R: 年輪半径方向, T: 年輪接線方向) ハイフン (一) 圧縮荷重 (10 %, 30 %, 50 %, 100 %) を順に並べるものとし、例えば LR-10 % は、接触面を木口とする R 方向への滑動を調べたもので、そのときの圧縮荷重  $N$  は L 方向の長期圧縮強度の 10 % であることを意味する。

### 2.3 木材の機械的性質と試験条件

試験条件を定める根拠とした、木材各方向の機械的性質として、材料試験により得られた圧縮強度等の物性を表 1 にまとめて示してある。

表 1 試験片の基本物性と圧縮強度

摩擦面	密度 $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	平均年輪間隔 $l$ [mm]	含水率 $u$ [%]	重量 $w$ [g]	圧縮強度 $\sigma_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]
L方向	0.44	1.37	13.1	10.73	45.6
R方向	0.44	—	12.6	10.65	2.5
T方向	0.44	1.40	13.5	10.71	1.9

この他、摩擦試験の相手となる引抜板の表面は #1200 相当の粗さとした。これは比較的平滑な鋼材表面の仕上げで、先行研究に見られた掘り起こし項の摩擦を極力生じさせないためである。参考として表 2 に、鋼材表面の算術平均粗さと最大粗さを示す。

表 2 鋼材の表面粗さ指標

算術平均粗さ [μm]	最大高さ粗さ [μm]
2.3	440.8

## 3. 試験結果に基づく摩擦特性の評価

### 3.1 テフロンの摩擦係数の評価

本研究で実施した摩擦試験は、図 1 に示す通り引抜板に対する 2 面摩擦で、テフロン間に生じる摩擦係数  $\mu_t$  の影響をロードセルの計測値である引抜力  $F$  を圧縮荷重  $N$  で割った値より差し引き、

$$\mu = \frac{F}{N} - \mu_t \quad (1)$$

として木材各方向の摩擦係数  $\mu$  を評価する。ここでは、テフロンの摩擦係数  $\mu_t$  を調べるため、本試験装置を用い、別途テフロンのみが滑動面となる条件で、圧縮荷重  $N$  を変動させ、試験を実施した。テフロンの

摩擦試験の結果を図 3 に示す。

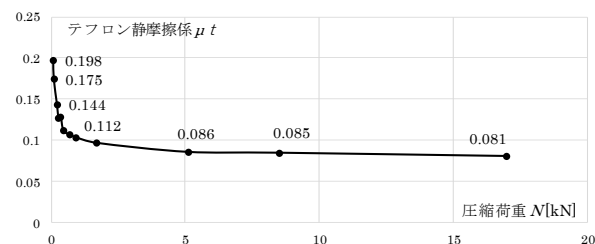


図 3 テフロンの摩擦係数の圧縮荷重の関係

図 3 より、圧縮荷重が概ね 2 kN 以下の領域で最大  $\mu_t = 0.2$  程度の摩擦係数となるのに対し、それより圧縮荷重が大きい領域では安定して、 $\mu_t = 0.08$  程度であると判断される。標準的なテフロンの摩擦係数が、0.03 ~ 0.10 と知られていることを踏まえると、小さい圧縮荷重下では、試験精度や製品の加工精度により、全面が接触する条件ではなかったものと推察される。

### 3.2 摩擦特性の評価方法

試験結果の一例として LR-30 % の試験結果より、摩擦係数を求めた結果を時刻歴にして図 4 に示す。

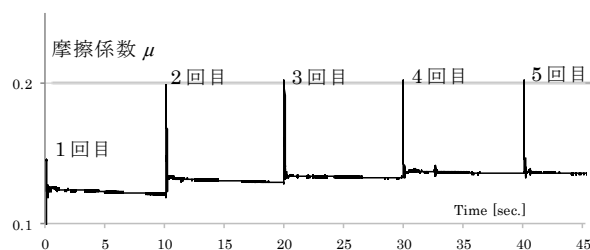
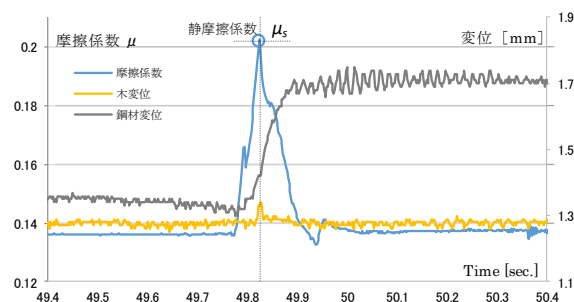


図 4 摩擦係数の時刻歴

図 4 では、摩擦試験の開始時を時刻歴 0 として表示したものである。同図より、各試験の開始に合わせて摩擦係数が増加、その後急激に低下し、10 s の空白期間に応力緩和が生じることがわかる。このように求めた摩擦係数から静摩擦係数を評価する。木材の引抜板の相対変位は、接触面に作用する圧縮荷重により、木材が変位しない場合、木材が試験途中に滑動する場合、木材が滑動しない場合の 3 種類の挙動を示した。先行研究で見られた掘り起こし摩擦による影響が小さくなったことによってより簡素な結果として、これらの挙動を順に取り上げ、静摩擦係数の評価方法を述べる。該当する摩擦係数の時刻歴を図 5 に示す。



(a) 木材が変位しなかった場合の試験結果

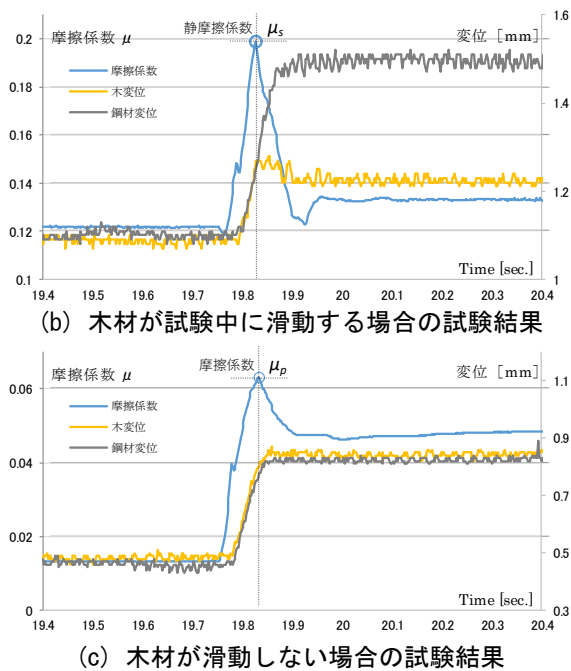


図 5 静摩擦係数の決定

図 5 (a) より、木材は変位せず、引抜板の変位開始と共に、摩擦係数がピークに達することが分かる。これは明らかに滑动開始であるため、このような結果が得られた場合、摩擦係数のピークを静摩擦係数  $\mu_s$  として評価した。

図 5 (b) より、摩擦係数の遷移は木材が変位しなかった場合と酷似した挙動を示しており、木材の変位が停止し、引き抜き板との相対変位が生じた時刻に摩擦係数がピークに達することが分かる。この点から、このような結果が得られた場合も、摩擦係数のピークを静摩擦係数  $\mu_s$  として評価した。これに対し、図 5 (c) に示すように、木材と引抜板に相対変位が生じない場合も見られた。同図の結果では、変位が停止する直前にピークが見られるが、これは引き抜き速度が低下した影響による摩擦力の低下と推察される。このような結果が見られた場合は継続して行った摩擦の繰り返しによる摩擦係数の増加が見られた。そのため、静摩擦係数に達する前の木材のせん断応力に関与するものと、ここでは純粋な静摩擦係数として評価せずこのときの結果を  $\mu_p$  として記録した。ここで木口面に関しては以上の 3 種類で静摩擦係数の評価を行うが、柃目面、板目面に対しては圧縮荷重が小さく、先述したような明白な評価をすることが難しかったことを言及しておく。

### 3.3 静摩擦係数の分析

摩擦試験の繰り返しによる静摩擦係数の遷移を、木口面は 50% 以上と 50% 未満、加えて板目面、柃目面で平均してまとめた結果を図 6 に示す。

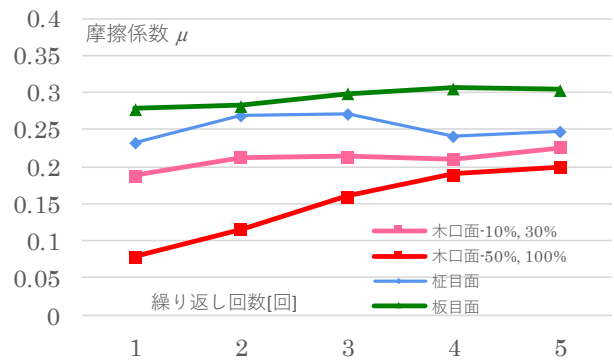


図 6 各摩擦面の静摩擦係数

まず、木口面に関して結果を見ると荷重が大きくなると初期の摩擦係数が減少し、繰り返しによって摩擦係数が 0.25 に収束していくことが確認できる。

柃目面に対する静摩擦係数の結果は、木口面と比べて大きい値となり、摩擦方向や繰り返し回数に関係なく一定の値をとることが確認できた。板目面に関しては木口面、柃目面よりも値が大きく、繰り返しによる増加も見られなかった。続いて、板目面 RL-10 ~100% に関して、2 体の試験片を板目面 1・板目面 2 として 5 回の摩擦係数を平均したものを荷重ごとに分けて図 7 に示す。

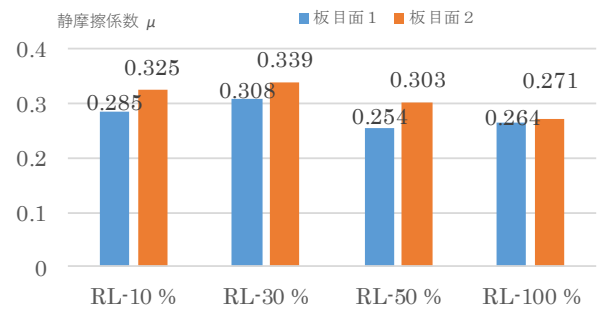


図 7 板目面 1・2 の静摩擦係数の差異

図 7 より、各荷重で板目面 2 の静摩擦係数が大きいことが読み取れる。含水率に関しては板目面 2 の方が高く、その分摩擦係数が大きくなることが推測できる。ここで木材表面の違いで摩擦特性を整理する。

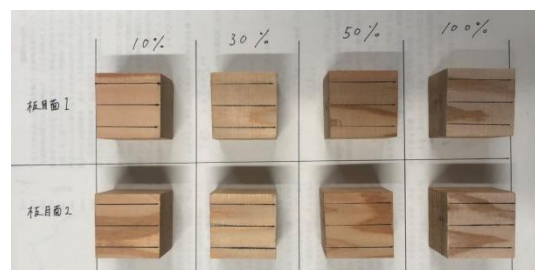


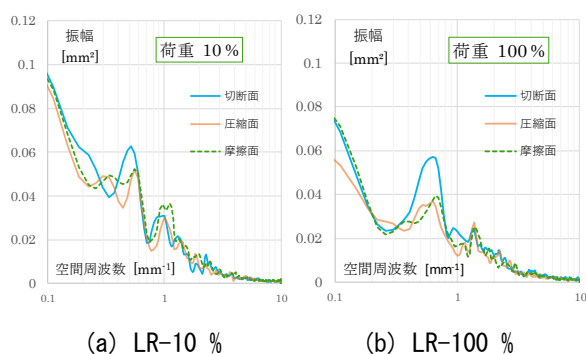
図 8 板目面の表面の様子

図 8 から、晩材の表出面積として、RL-100% が酷似しており、純粋な含水率の差によって摩擦係数に差が生じたと考えられ、他の 3 つの試験片の静摩擦係数の差異は別の要因が影響を及ぼしたと考えられる。RL-

10%, RL-50% に関して板目面 2 の方が晩材の面積が大きいことにより摩擦係数が増大したと推察できるが、RL-30% については晩材の面積の差は見られなかった。以上の木材表面と摩擦係数との関係をフーリエ解析によって細かく検討する。

#### 4. 静摩擦係数と木材表面の対応関係

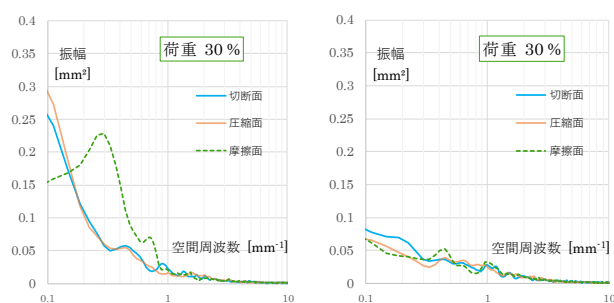
本研究でも先行研究に倣って木材表面のフーリエスペクトルによる評価を行った。木材試験片の両端から 1.5 mm のデータを除去した 27 mm の範囲において、切断面・圧縮面・摩擦面ごとにアンサンブル平均を求めた。まず、LR-10%, LR-100% の解析結果を図 9 に示す。



(a) LR-10% (b) LR-100%

図 9 木口面のフーリエ解析結果

木口面に関しては空間周波数  $0.4 \sim 0.8 \text{ mm}^{-1}$  の範囲にピークが認められ、年輪間隔と対応している。これは先行研究で確認されており、ピークの振幅において、LR-100% の方が摩擦後の振幅の減少が大きいことが確認できる。次に、板目面 1・2 の RL-30% の解析結果を図 10 に示す。



(a) 板目面 1 (b) 板目面 2

図 10 RL-30% の解析結果

図 10 より、板目面 1 における摩擦時に表面形状が大きく変化していることが確認できる。試験後に表面を観察すると摩擦方向に対して晩材の手前で晩材に引っかかるように凹んでいる様子が確認された。

先述した摩擦試験結果とフーリエ解析結果をもとに各摩擦面の摩擦特性を整理する。木口面について、先行研究より木材表面の摩擦特性には晩材が強く影響していることが考察されていた。本試験でも図 6, 9 より、

大きい荷重において、静摩擦係数の増大とフーリエ解析における年輪に対応する空間周波数の振幅の減少が比例関係にあり、摩擦により晩材部分が平滑化していき、晩材部分の真実接触面積が増えたことによって摩擦係数が増加するという考察の妥当性が確認できる。また、大きな圧縮荷重をかけた時の初期の摩擦抵抗が小さい理由について、塑性変形による応力の低下によるものと考えられる。本来、木材表面の静摩擦係数は真実接触部分におけるせん断抵抗によって決定されるべきであるが、木材内部のせん断応力がせん断強さに達した場合、木材の塑性変形によってせん断抵抗及び表面の摩擦力に頭打ちが発生する。一定の圧縮荷重からそれ以上摩擦力が大きくなることはなくなるが、圧縮荷重は大きくなるので結果として算出される摩擦係数が低減すると推察される。柁目面も表面の状態は木口面と酷似しているが、木口面と比較して静摩擦係数が大きい。これは、圧縮荷重が木口面より小さいという条件が影響して静摩擦係数が大きくなったと推察され、木材表面の現象としては木口面と同じ考察が可能である。

板目面に関しては、木材の表面特性が木材表面の凹凸、晩材の表出面積によって決定されると考察できる。図 7, 8 より、RL-100 は摩擦係数の差が小さく、RL-10%, RL-50% では晩材の表出面積に比例して板目面 2 の静摩擦係数が増大している。RL-30% では図 10 より摩擦時における凹凸の程度が大きくなっており、摩擦時の表面の変化によって真実接触面積が減少し摩擦係数が小さくなったことが試験片の差異が開いた要因と考えることができる。

#### 5. まとめ

本研究では、木材の異方性が摩擦特性に与える影響を解釈した。得られた知見を整理すると次のとおりである。

- ・木口面では木材が滑動しない場合に木材のせん断変形による引抜荷重の上限が影響し、荷重が大きいほど静摩擦係数は小さく評価される。
- ・木口面では凝着摩擦による晩材の真実接触面積の増加に伴って静摩擦係数が増加する先行研究の考察の妥当性を確認できた。
- ・板目面では木材表面における晩材の表出面積と表面の凹凸が静摩擦係数に影響している。

#### 参考文献

1) 山川僚太, 佐藤利昭: 接触面圧で変化する表面性状を考慮した木材と鋼材の摩擦特性-木材表面の摩擦に関する研究-, 日本建築学会構造系論文集, pp.549-550, 2019.3