

平成 21 年 5 月 11 日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18380101
 研究課題名（和文） 摩擦抵抗を考慮した木質構造設計の展開
 研究課題名（英文） Practical consideration of frictional resistance in structural design of timber constructions
 研究代表者
 平井 卓郎（HIRAI TAKURO）
 北海道大学・大学院農学研究院・教授
 研究者番号：20173205

研究成果の概要：木材と各種構造用面材との摩擦について実験的な検討を加え、静止・動摩擦係数が木材の比重と負の相関を持つことを明らかにした。枠組壁工法および丸太組構法の自重による部材間摩擦に関する静的・動的なモデル実験を行い、摩擦抵抗が建物の耐風・耐震性能に与える影響について検討した。木材ボルト接合部の摩擦力を考慮した変形耐力解析を行い、2次軸力による摩擦抵抗が接合部の終局耐力に与える影響を示した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2007年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	8,900,000	2,670,000	11,570,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・木質科学

キーワード：強度・木質構造

1. 研究開始当初の背景

これまで木質構造の構造設計では、部材間の摩擦抵抗が無視されてきた。これは、木材の応力緩和、摩擦と他の耐力要素との力学特性の違いなどを考慮したものである。しかし、実際の木質構造では摩擦抵抗が大きな効果を持ち、これを無視した構造計算との間に乖離を生じている。

事例の一部を挙げると、次のようになる。

(1) 枠組壁工法の壁下枠と床の標準接合仕様は、摩擦を無視すると計算上耐力不足となるが、経験的仕様として認められている。(2)

丸太組構法の水平剛性には自重による摩擦が関係するが、計算上これが考慮されておらず、損傷限界変形の評価が難しい。(3) 木材の機械的接合部では、仕様に応じた2次摩擦力によって終局耐力が増加するが、これが無視されているため、安全余裕に差が生じている。

これらの点に関しては、これまで定量的な取り組みが見られず、実態に即した構造設計体系を確立する上での検討課題となっている。

2. 研究の目的

この研究の目的は、木質構造の構造設計に

において無視されてきた摩擦抵抗を正しく評価し、整合性の高い構造設計体系を確立することにある。そのための具体的な課題として、次の点を取り上げた。(1)これまで設計資料の整えられていない、木材と各種構造用面材との摩擦係数を測定する。(2)自重による摩擦抵抗が木質構造の剛性や終局耐力に与える効果を、小型構造モデルを用いて実験的に評価する。(3)2次軸力による摩擦抵抗が木材接合部の終局耐力に与える影響を、数値解析によって評価する。

3. 研究の方法

(1) 木材と各種構造用木質面材との摩擦係数

気乾比重 0.30 ~ 0.56、含水率 12.0 ~ 13.4% の針葉樹構造用材（スギ、トドマツ、カラマツ混合：自動鉋盤により鉋削）と Table 1 のような構造用面材（針葉樹合板（以下 SPW）、広葉樹合板（以下 HPW）、OSB、MDF、火山性ガラス質複層板（以下 VSB））について、木材 - 面材間の静止摩擦係数 μ_{sta} と動摩擦係数 μ_{dyn} を測定した。木材、合板、OSB については、表面の繊維方向（強軸方向）を考慮し、可能なすべての組み合わせについて測定を行った。実験の繰り返し数は各条件 12 とした。

(2) 枠組壁工法における耐力壁 - 床組接合部の静的せん断耐力に及ぼす摩擦力の影響

枠組壁工法における耐力壁下枠 - 床組接合部のせん断耐力に及ぼす、鉛直荷重による摩擦力の効果を知るため、Fig.1 のような壁 - 床接合モデル試験体 6 体を用いた静的せん断試験を行った。壁下枠 - 床接合面に加わる鉛直荷重は約 10kN とした。枠組材、床面材としては、気乾比重 0.41 - 0.54、含水率 11.6 - 13.2% の SPF204 材と気乾比重 0.54 - 0.59、含水率 8.7 - 10.6% の 15mm 厚カラマツ合板を使用した。壁および床組は、枠組壁工法の標準的な接合仕様で作製した。実験は同じ試験体を用いて、図中の CN90 釘が無く摩擦のみで抵抗する状態と、CN90 釘で接合した、釘せん断と摩擦で抵抗する状態の 2 条件について行った。

(3) 枠組壁工法における耐力壁 - 床組接合部の動的挙動に及ぼす摩擦力の影響

耐力壁下枠 - 床組接合部の動的せん断挙動を知るため、上記と同じモデル試験体を用いて Fig.2 のような振動台実験を行い、壁下枠 - 床面材間の水平相対変位と床面、下枠の応

答加速度を測定した。試験体は静加力試験に使用した 6 体の試験体から 3 体を抽出し、下枠 - 床組間に新たに CN90 釘を打直したものを使用した。釘の配置、積載荷重等の実験条件は静加力試験と同様である。この試験体 3 体に周期 4、8、12 Hz、床面加速度 0.1 ~ 1.0g の範囲で強制調和振動を与えた。

Table 1. Specific gravity and moisture content of structural sheet materials.

Material	r_u	u (%)
Steel	7.85	—
VSB	0.724-0.766	—
MDF	0.779-0.800	7.5-8.2
OSB	0.686-0.737	8.7-9.5
HPW	0.549-0.620	10.7-11.7
SPW	0.538-0.590	10.0-10.4

Legend: VSB: Volcanic silicates fiber reinforced multi-layer board, HPW: Hardwood plywood, SPW: Softwood plywood.

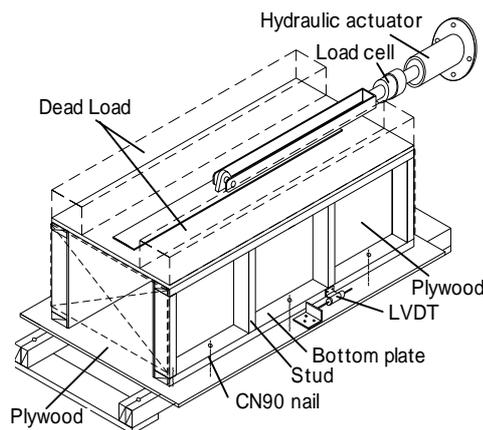


Fig.1. Static test of a light frame construction model.



Fig.2. Shaking table test of a light frame construction model.

(4) その他の研究方法

この研究では、上記のほか下記の項目について検討を加えた。

丸太組構法耐力壁のせん断耐力に及ぼす摩擦力の影響について、小型モデル試験体を用いた静的試験と動的試験を行った。

木材ボルト接合部の初期締め付けによる摩擦効果を考慮したせん断耐力試験と、摩擦力の経時的消失を考慮した応力緩和試験を行った。

木材ボルト接合部のせん断耐力に及ぼす2次摩擦力の影響について数値解析を行った。

4. 研究成果

(1) 木材と各種構造用木質面材との摩擦特性

木材の気乾比重と摩擦係数

実験の結果、木材と各面材との摩擦係数は、静止摩擦係数 μ_{sta} 、動摩擦 μ_{dyn} とともに、すべての面材について、木材の気乾比重 r_v と負の相関を持つことが分かった。この定量的な理由は明らかではないが、定性的には以下のような考察が可能である。木材の比重は細胞壁の実質率に依存する。例えば全乾比重0.3と0.5の木材の実質率は、細胞壁自体の全乾比重を1.5とすると、それぞれ20%、33%に相当し、他は空隙である。このような木材を鉋削すると、切削面には実質率に応じた繊維(仮道管)方向に細長い凹凸が現れ、これが摩擦抵抗に影響する。この直接的影響の他に、細胞壁実質率が低いと切削時の細胞壁変形とはね戻りにより表面の凹凸が増し、これが摩擦抵抗を増大させている可能性もある。

実験結果に基づき、木材 - 各種面材間の摩擦係数を木材の気乾比重を指標として、実験式で表すと、(1)、(2)式ようになる。

$$\mu = A \cdot r_v + B_{50} \quad (1)$$

$$\mu = A \cdot r_v + B_5 \quad (2)$$

ただし、 μ は静止摩擦係数 μ_{sta} または動摩擦係数 μ_{dyn} を、 r_v は木材の気乾比重を、 B_{50} は係数の下側50%値(信頼水準75%に対する平均値の下限推定値)を、 B_5 は下側5%値(信頼水準75%に対する下限推定値)を示す。各面材に対する上式中の係数 A, B を Table 2 に一括して示す。

測定された静止摩擦係数はおおむね0.2から0.4の範囲で、概観的に MDF > SPW > HPW > VSB > 鋼板 > OSB という関係になった。

Table 2 Empirical coefficients of Eq.(1) and (2).

Timber grain	Material (grain)		A	B ₅₀	B ₅
PL	Steel	Static	-0.325	0.406	0.377
		Dynamic	-0.225	0.314	0.284
PP	Steel	Static	-0.386	0.463	0.416
		Dynamic	-0.304	0.354	0.333
PL	VSB	Static	-0.157	0.359	0.341
		Dynamic	-0.145	0.319	0.303
PP	VSB	Static	-0.124	0.362	0.338
		Dynamic	-0.153	0.341	0.340
PL	MDF	Static	-0.395	0.507	0.471
		Dynamic	-0.343	0.319	0.289
PP	MDF	Static	-0.433	0.542	0.500
		Dynamic	-0.399	0.428	0.392
PL	OSB (PL)	Static	-0.237	0.347	0.328
		Dynamic	-0.190	0.262	0.251
PL	OSB (PP)	Static	-0.206	0.338	0.320
		Dynamic	-0.174	0.259	0.247
PP	OSB (PL)	Static	-0.235	0.343	0.323
		Dynamic	-0.186	0.260	0.250
PP	OSB (PP)	Static	-0.166	0.331	0.311
		Dynamic	-0.161	0.264	0.250
PL	HPW (PL)	Static	-0.261	0.400	0.366
		Dynamic	-0.266	0.345	0.320
PL	HPW (PP)	Static	-0.395	0.507	0.471
		Dynamic	-0.289	0.356	0.327
PP	HPW (PL)	Static	-0.298	0.424	0.394
		Dynamic	-0.305	0.355	0.334
PP	HPW (PP)	Static	-0.247	0.437	0.400
		Dynamic	-0.274	0.383	0.356
PL	SPW (PL)	Static	-0.387	0.476	0.435
		Dynamic	-0.429	0.401	0.370
PL	SPW (PP)	Static	-0.357	0.480	0.433
		Dynamic	-0.477	0.453	0.397
PP	SPW (PL)	Static	-0.362	0.462	0.421
		Dynamic	-0.411	0.401	0.365
PP	SPW (PP)	Static	-0.216	0.464	0.421
		Dynamic	-0.405	0.460	0.409

PL: Parallel to the grain, PP:

Perpendicular to the grain.

木材・面材の繊維方向(強軸方向)と摩擦係数

面内等方性の鋼板、VSB、MDFと木材繊維に直交方向の摩擦係数は繊維平行方向の摩擦係数に比べて大きくなる傾向が認められた。一

方、OSB、合板のように面材自体が異方性を持つ場合は、4種の方向の組み合わせについての比較となる。これらの組み合わせについては、面材の強軸に直交方向と木材の繊維直交方向の組み合わせが、それぞれの平行方向の組み合わせに比べ、摩擦係数が高くなる傾向が認められたが、平行、直交の組み合わせについては、明確な大小関係は検出されなかった。

動摩擦係数と静止摩擦係数の比

動摩擦係数の静止摩擦係数に対する比は、木材の比重や繊維方向による差は特に認められなかったが、面材の種類によって差が見られた。その比はおおよそ0.6から0.9の範囲となり、平均値で見ると、VSB > 鋼板 > HPW > OSB > SPW > MDFの順となった。

各面材の実用的摩擦係数評価

各面材と木材の摩擦係数は、面材の原材料や製造条件(比重や表面特性)によって変動し、(1)、(2)式、Table 2で与えられる摩擦係数は、必ずしも市販製品に対する標準値を示すものではないが、その範囲内で実用的な評価を行うと以下ようになる。

木質構造設計規準では、構造用材を比重を指標として3樹種グループ、J1、J2、J3に区分し、それぞれに対して設計用平均比重と下限比重(J1:平均0.47、下限0.42、J2:平均比重0.42、下限0.37、J3:平均0.37、下限0.32)が示されている。これは木材の材料定数や強度が、一般に比重(密度)と正の相関を持つという考え方に基づいている。摩擦係数は木材の比重と負の相関を持つので、下限値推定には上限比重が必要になるが、この値は示されていない。また現状では、摩擦のみに依存した耐力設計は考えにくく、比重と正の相関を持つ他の耐力要素との相互補完関係が成り立つと考えられる。

以上の点から、実用的な摩擦係数は(1)、(2)式とTable 2で与えられる各回帰式に、各樹種グループの平均比重を代入して概算するのが妥当であると考えられる。一般的な住宅構造などでは、摩擦係数は(1)式で評価すればよいと考えられるが、現在使用頻度の高い比較的比重の低い樹種に対する静止摩擦係数は、相対的に摩擦係数の小さいOSBを除いて、面材の種類やすべり方向に関わらず0.3程度、動摩擦係数はその75%程度と考えれば、おおまかな目安となる。ただし、不静定次数の

低い骨組構造の主要な接合部設計で、終局耐力計算に摩擦効果を考慮する場合などは、(2)式の下側5%値を採用するのが安全であろう。(2) 枠組壁工法における耐力壁 - 床組接合部の静的せん断耐力に及ぼす摩擦力の影響

見かけの下枠 - 床面材間の見かけの摩擦係数

摩擦のみによる荷重 - 変位曲線の例と、同じ試験体を釘接合した場合の荷重 - 変位曲線の例をFig.3に示す。

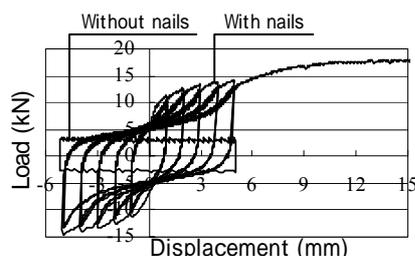


Fig.3. Load-displacement curves of the light frame construction model.

6体の試験から得られた見かけの摩擦係数は0.21~0.35(平均0.29)となり、変動係数19%という大きな変動幅を示した。この実験結果から、実際の構造における見かけの摩擦係数は、部材間の接触条件や力の偏心によるねじれ変形などの影響を受け、純粋な摩擦に比べて大きな変動幅を示すことがわかった。この変動により、正規分布仮定に基づいて信頼水準75%における下側5%値を求めると0.15となり、前出の実験式から求められる動摩擦係数0.20よりかなり低い値となった。しかし、見かけの摩擦挙動を平滑面間の純粋な摩擦とその他の不確定要素との複合挙動と考えると、設計上は動摩擦係数を下限値とするのが妥当であると考えられる。

ここで注目している摩擦抵抗は風圧力や地震力に対する安全性に関わるため、設計用にはこの下限値(動摩擦係数)を採用するのが1つの方法である。一方、実際の建物では同様の部分が多数存在し、床、壁どうしが適切に接合されていれば、各部分に水平力が分配されるので、複数部材効果に期待して、下側50%値を採用するという考え方にも合理性がある。実用的評価としては、どちらかと言えば後者の方がより実態に近いように思われる。

下枠 - 床組間の接合せん断耐力に対する摩擦抵抗の寄与

下枠 - 床組間の接合せん断は、釘1面せん断に摩擦が加算された複合挙動として捉える

ことができる。耐力壁上部に加わる鉛直荷重は正確には算定しにくい、少なくとも見積もって 2.0kN/m、多く見積もると 10.0~20.0kN/m またはそれ以上となる。摩擦力はこの鉛直荷重に比例するので、最大釘 1 面せん断耐力にこの摩擦力を加えることによって、下枠 - 床組間の最大せん断耐力を概算することが可能となる。

ただし、実際に摩擦力を計算するには、それに寄与する鉛直荷重の大きさや、地震力の鉛直方向成分による有効鉛直荷重の周期的増減に対する考慮が必要となる。

なお、現行の木質構造設計規準では木材から合板を通して木材に釘打ちされる場合の許容耐力は示されていないが、参考値として下枠と床根太を直接釘接合した場合の許容耐力を考えると、今回使用した下枠材および床根太材の気乾比重に対しては耐力短期許容耐力 7.3kN、保証終局耐力 10.9kN 程度となる。この終局耐力に今回の実験から得られた平均摩擦力 2.9kN を加えると計 13.9kN となる。ちなみに、この実験と同仕様の耐力壁の許容せん断耐力は 5.88kN/m (壁倍率 3)、この実験で配置した壁 2 枚の合計壁長に対しては計 16.0kN (保証終局耐力比を 1.5 とすると、終局耐力は 24.0kN 以上) となる。実際の耐力壁では、片面に石膏ボードが張られることが多いので、許容耐力、終局耐力は更に高くなる。

履歴減衰と摩擦減衰

水平力が見かけの摩擦力以下の場合、下枠 - 床組間にはすべりが発生せず、履歴減衰は生じない。一方、見かけの摩擦限界を超えると、下枠 - 床組間にすべりが生じ、釘接合部のせん断変形による履歴減衰と下枠 - 面材間の摩擦減衰を生じるようになる。

Fig.3 に例示した履歴曲線から、試験体 6 体の各繰り返し変位における全履歴減衰容量 (図中の各履歴曲線で囲まれる部分の面積) に対する摩擦減衰容量 (摩擦履歴曲線で囲まれる部分の面積を各繰り返し変位に換算した値) の比を求めると、41%~64% (平均 55%) となった。このように、摩擦減衰容量の全履歴減衰容量に占める比は顕著で、この摩擦減衰効果は、下枠 - 床組間の接合せん断特性の重要な要素となっている。摩擦減衰容量は摩擦力に比例するので、耐力壁に加わる鉛直荷重がわかれば、計算そのものは容易である。

摩擦減衰の特徴の 1 つは、地震力の鉛直成

分に影響されないことである。地震力の鉛直成分により一方向の有効鉛直荷重が低下しても、逆方向の有効鉛直荷重はほぼ同じだけ増加するため、摩擦履歴曲線が一方に偏るだけで、減衰容量はほとんど変化しないからである。

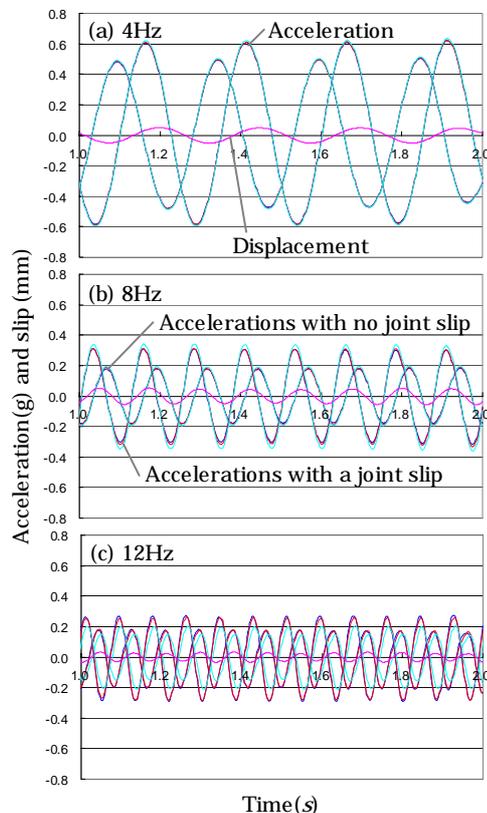


Fig.4. Time-histories of acceleration and displacement.

(3) 枠組壁工法における耐力壁 - 床組接合部の動的挙動に及ぼす摩擦力の影響

実験結果を Fig.4 に示す。図中の時系列加速度波形は摩擦により下枠 - 床面材間にすべりの生じていない状態と摩擦限界を超えてすべりが生じた後の状態を示している。青線は振動台、赤線は床面、水色線は下枠の加速度である。また、これらと対応させて、摩擦限界を超えた後の下枠 - 床面材間の相対すべりを赤紫色線で示してある。

8Hz (b) 図) の場合、加速度 0.2g までは振動台、床組、壁下枠が一体化して振動しているが、加速度が 0.3g 程度になり、壁下枠 - 床組接合部が摩擦限界を超えてすべりを生じると、壁下枠は床面よりもやや大きく応答するようになる。これに対し、4Hz (a) 図) の場合は、すべりが生じても床組と下枠の応答には大きな差がない。一方、周期 12Hz (c) 図)

の場合は、下枠 - 床組間にすべりが生じると、下枠の追従が遅れて応答が減じる傾向を示している。この結果は、動的加力に対する摩擦限界はおおむね前出の静加力試験から得られる動摩擦係数から推定可能であるが、摩擦限界を超えてすべりが生じ出してから応答特性は周波数依存性を持つということを示している。

(4) その他の成果

その他の検討結果の概要は以下の通りである。

丸太組構法耐力壁では、自重により上下部材間に摩擦力が生じ、剛性を増大させる。しかし、直交壁との噛み合わせ部分ですべての部材が理想的に密着していない限り、摩擦に寄与する有効自重は一部に留まる。したがって、摩擦に対する過度な期待は危険である。

動的外力に対しては、摩擦限界以下では丸太組耐力壁が一体となって応答するが、部材間にすべりが生じ出すと、高次モードの応答挙動を示す。

木材ボルト接合部では、初期締め付けによる主材 - 側材間の摩擦力により耐力が増大するが、特に摩擦減衰効果が顕著である。

しかし、初期締め付け力は放置すると1年で20%強程度、数年でほぼ0となるため、摩擦力に期待する場合は、適切な締め直しが不可欠で、それが期待できない場合は、摩擦力を無視するのが安全である。

ただし、仮に初期締め付け力が低下しても、履歴減衰に対する摩擦減衰の付加的効果はある程度期待できる。また、主材 - 側材間の密着度が保たれていれば、小変形時から2次軸力による摩擦力が期待できる。

木材ボルト接合部では、せん断変形の増大に伴って生じる2次軸力が主材 - 側材間に摩擦力を生じさせ、それによってせん断耐力と最大変形能が上昇する。

この効果は、鋼板側材型で径長比の大きい接合ほど顕著である。このため、降伏耐力を指標とした許容耐力に対する安全率や靱性は接合形式と径長比によって大きく異なる。

したがって、設計上もこの安全余裕の差を考慮するのが合理的である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

孟慶軍、平井卓郎、澤田圭、佐々木義久、

小泉章夫、植松武是、枠組壁工法における壁 - 床接合部のせん断耐力に及ぼす摩擦力の影響、木材学会誌、査読有(採録決定)

Awaludin,A., Hirai,T., Hayashikawa,T., Sasaki,Y. Oikawa,A., Load-carrying capacity of steel-to-timber joints with a pre-tensioned bolt, J. Wood Science, 54, 362-368, 2008, 査読有

Awaludin,A., Hirai,T., Hayashikawa,T., Sasaki,Y. Oikawa,A., Effect of pre-tension in bolts on hysteretic responses of moment carrying timber joints, J. Wood Science, 54, 114-120, 2008, 査読有

孟慶軍、平井卓郎、小泉章夫、木材と各種構造用面材との摩擦係数、木材学会誌、54、281-288、2008、査読有

〔学会発表〕(計4件)

Awaludin,A., Sasaki,Y., Oikawa,A., Hirai,T., Hayashikawa,T., Frictional damping of pre-stressed timber joints, 10th WCTE, Miyazaki, Jun. 3, 2008

Hirai,T., Meng,Q., Sawata,K., Koizumu,A., Sasaki,Y., Uematsu,T., Some aspects of frictional resistance in timber construction, 10th WCTE, Miyazaki, Jun. 3, 2008

Meng,Q., Hirai,T. and Koizumi,A., Frictional Coefficients between Timber and Other Structural Materials, IUFRO All-Division-5 Conference in Taiwan, Taipei, Nov.2, 2007

孟慶軍、平井卓郎、小泉章夫、木材と各種構造用面材との摩擦係数について、日本木材加工技術協会第25回年次大会、旭川、2007年9月26日

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

平井 卓郎 (HIRAI TAKURO)

北海道大学・大学院農学研究院・教授

研究者番号：20173205

(2) 研究分担者

小泉章夫 (KOIZUMI AKIO)

北海道大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号：40183040

佐々木義久 (SASAKI YOSHIHISA)

北海道大学・大学院農学研究院・技術職員

研究者番号：20396302