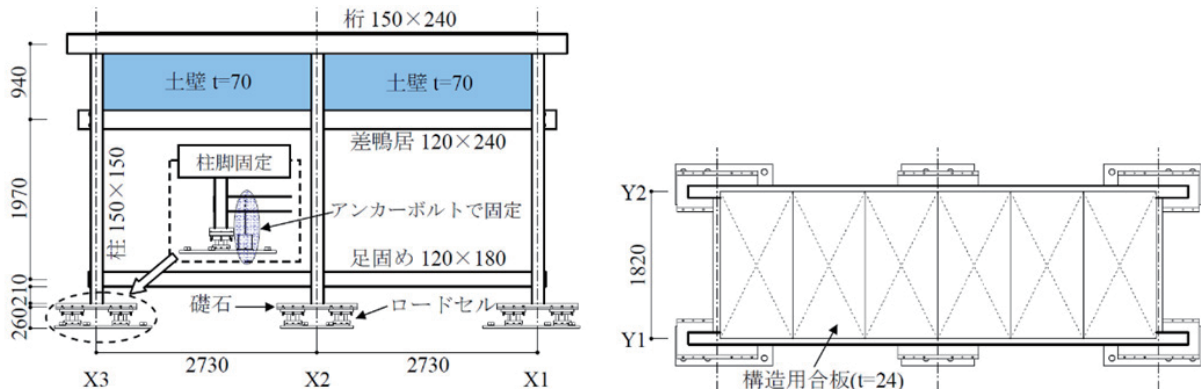


●姿図・寸法



試験体図 (左：立面図、右：天井伏図)

【使用材料】

木材：柱 150 × 150、樹種スギ

礎石：花崗岩（サンドブラスト処理仕上げ 平面 400 × 1000mm 厚さ 50mm）

●適用条件

スギ柱－サンドブラスト処理仕上げ礎石の組み合わせの柱脚部の動摩擦係数として参照可能である。1 構面当たりの上部構造と錘の重量は 19.03kN であることから、柱底面の垂直応力度は $0.2 \sim 0.4\text{N/mm}^2$ 程度と考えられる。

●概要

土塗り垂れ壁と柱からなる軸組の振動台実験である。礎石下に設置したロードセルによって水平せん断力を計測している。入力波は 1995 年兵庫県南部地震時の神戸海洋気象台記録（JMA 神戸 NS）、日本建築センター模擬波（BCJ レベル 2）を振幅調整したものである。

●文献・参照先

- 1) 和田幸子, 中川貴文, 五十田博, 岡部実, 河合直人, 箕輪親宏: 伝統的木造住宅の垂れ壁付き壁構面振動台実験 その 1～3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2008.9
- 2) 和田幸子, 中川貴文, 五十田博, 岡部実, 河合直人, 箕輪親宏: 伝統的木造住宅の垂れ壁付き構面振動台実験, 日本建築学会北陸支部研究報告集 (51), pp. 113-116, 2008.7

●理論式の例

摩擦力 F は以下の式によって表される。

$$F = \mu N$$

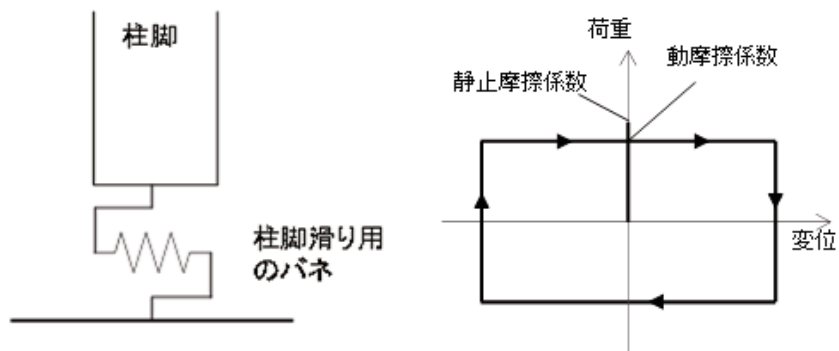
μ : 静止摩擦係数または動摩擦係数

N : 柱底面が受ける垂直抗力、柱軸力

静止状態において、柱脚部の水平せん断力が摩擦力 F を超えると滑り始める。また、滑り挙動中は、柱脚部の移動方向と逆向きに摩擦力 F が作用し続ける。

●モデル化

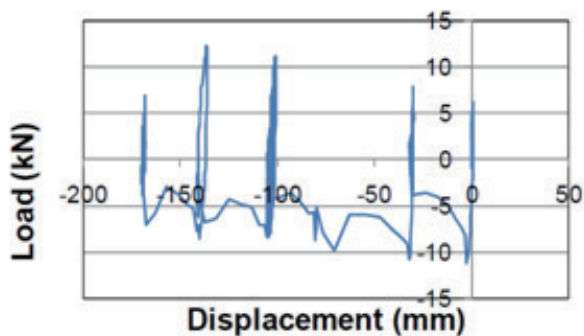
要素モデルの例：



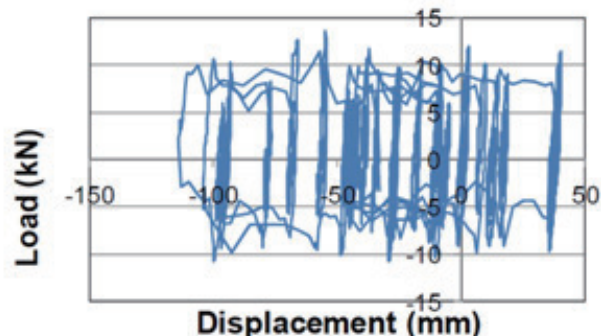
剛性 ∞ の完全弾塑性またはクーロン摩擦バネとしてモデル化が可能である。ただし、摩擦係数の設定にあたっては、現象のばらつきを考慮し、安全側の評価となるよう配慮すること。

●特性値

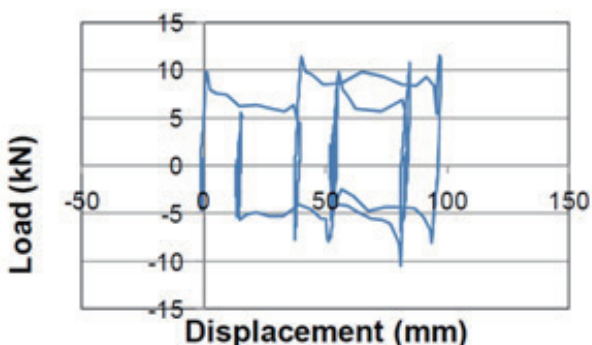
摩擦力は、静止から移動に移る時で9～15kN程度、移動時には正側6～9kN程度、負側4～6kN程度である。1構面当たりの上部構造と錘の重量は19.03kNである。これから、平均的な摩擦力を静止時10kN、移動時正側7.5kN、負側5.5kN程度として摩擦係数を算出すると、静止摩擦係数約0.53、動摩擦係数正側約0.39、同、負側約0.29と算出される。



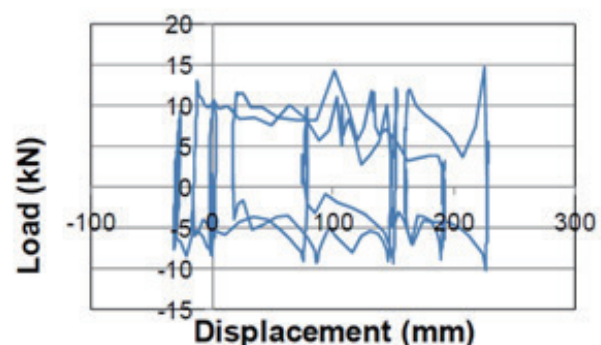
a) JMA 神戸 NS 50%



b) BCJ レベル 2



c) JMA 神戸 NS 50% R



d) JMA 神戸 NS 100% R

柱脚部の荷重－変位関係

●破壊性状

上部構造は JMA 神戸 100%R の加振でも土壁周囲等のわずかな損傷のみで、ほぼ弾性応答であった。

概要

建築物の柱脚部と基礎の境界条件としては、以下の3通りが考えられる¹⁾。

- ① 水平移動および浮き上がりともに拘束する（拘束していると仮定できる場合）。
- ② 水平移動を拘束し、浮き上がりのみ許容する。
- ③ 水平移動および浮き上がりともに許容する。

境界条件①は、例えば、基礎と緊結した土台を用い、柱は土台にほぞ差しとする場合が相当する。意匠的に柱勝ちに見せたい場合は輪難ほぞ等を用いる。境界条件②は、例えば、柱は土台にほぞ差しとするが込み栓等で留め付けない場合や、いわゆる「石場立て」仕様とし、ダボ等で水平移動を拘束する場合が相当する。境界条件③は、例えば、ダボ等を設けない「石場立て」仕様が相当する。境界条件②または③となるような建築物においては、壁量計算や現行の構造計算法（許容応力度計算、限界耐力計算）で想定されている前提から外れることになるので、モデル化や性能評価にあたっては慎重な取り扱いが求められる。

ここでは、境界条件②または③に相当する建築物の性能評価において、参考になるとと思われる既往の実験データを整理し、モデル化方法、モデルパラメータ、実験における破壊性状についてまとめる。

○力の伝達方法

(1) 境界条件②となる場合

水平移動に対してはダボおよび柱のせん断によって抵抗し、許容耐力等はダボおよび柱の有効断面積にせん断強度を乗じることで得られる。引抜き、すなわち浮き上がりに対しては抵抗要素を持たない。浮き上がりによって柱がダボから抜け出さないよう、ダボの高さを十分に取る必要がある。

(2) 境界条件③となる場合

水平移動に対しては柱底面と礎石間の摩擦によって抵抗する。摩擦力は、柱軸力に摩擦係数を乗じることで算出する。浮き上がりに対しては、抵抗要素を持たない。

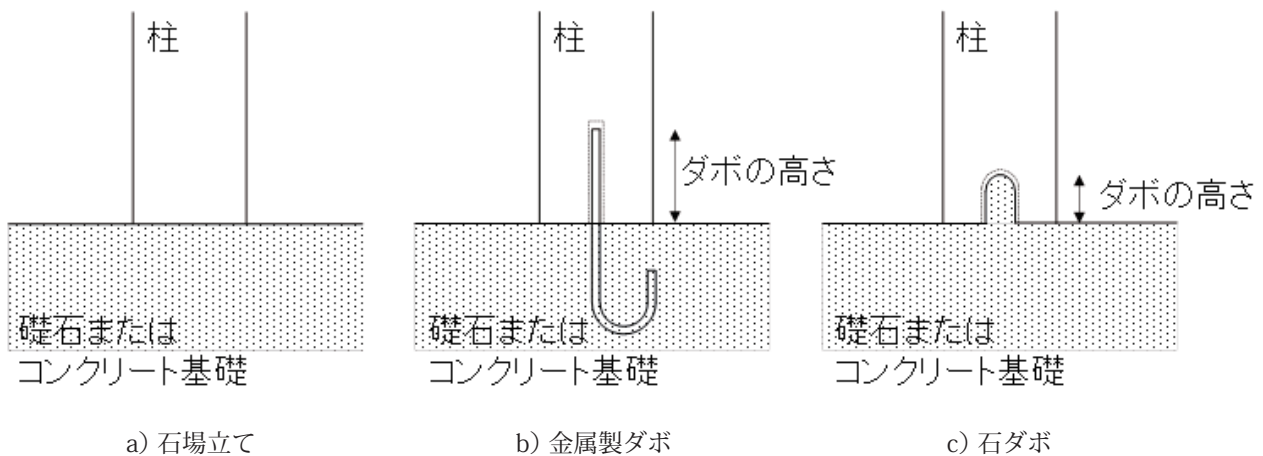
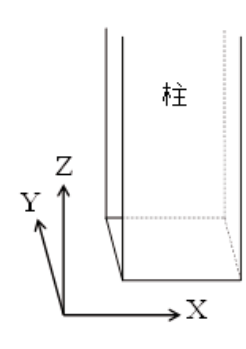
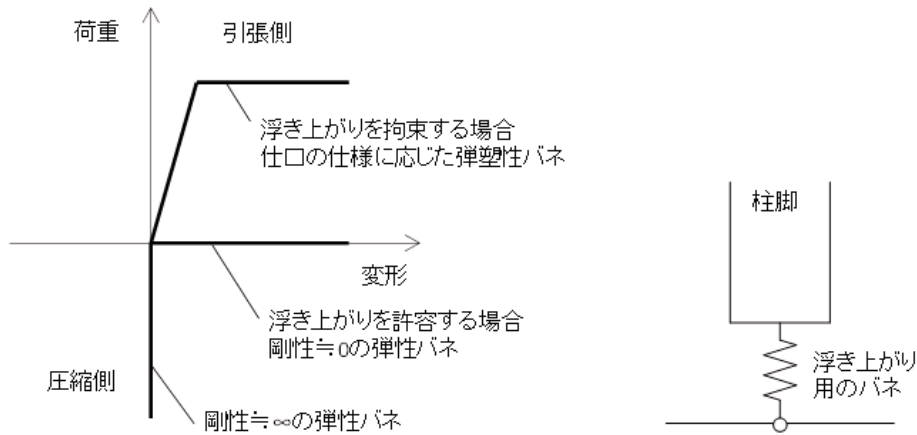


図 柱脚部と基礎の仕様による境界条件の差違

表 柱脚バネの考え方の例

		境界条件①	境界条件②	境界条件③
	X 軸周りの回転	仕口の仕様に応じた弾塑性バネ	剛性 = 0	剛性 = 0
	Y 軸周りの回転		剛性 = 0 ^{注1)}	剛性 = 0 ^{注1)}
	Z 軸周りの回転			
	X 軸方向変位	剛性 = ∞	剛性∞の完全弾塑性またはクーロン摩擦バネ	剛性∞の完全弾塑性またはクーロン摩擦バネ
	Y 軸方向変位	剛性 = ∞		
Z 軸方向変位	圧縮：剛性∞ 引張：仕口の仕様に応じた弾塑性バネ	圧縮：剛性∞ 引張：剛性 = 0	圧縮：剛性∞ 引張：剛性 = 0	

注1) 地震時には柱が傾斜し、一方の柱底面が浮いた状態になるため剛性ゼロと考えられるが、実験で確かめられた例は見当たらない。



a) 浮き上がりのモデル化のための柱脚のバネの特性

b) 柱脚のバネ

図 柱脚の浮き上がりのモデル化

(日本建築学会：限界耐力計算による伝統的木造建築物構造計算指針・同解説，丸善，2013、p. 113 の図を参考に作図)

○設計における考え方と適用範囲

(1) 境界条件②となる場合

上部構造の設計にあたっては、浮き上がりが生じる構面のせん断耐力の低減を考慮する必要がある。柱軸力を超える引き抜き力が作用することによって柱脚の浮き上がりが生じた場合、当該箇所のせん断抵抗要素（耐力壁、仕口接合部など）の耐力が頭打ちになり、それ以上の耐力を発揮し得ない。したがって、N 値計算法等を用いて引抜き力を算定した結果、浮き上がりが生じると判定される箇所については適切にせん断耐力を低減するなどの対応が必要となる。また、浮き上がりによって柱がダボから抜け出すと、水平移動に対する拘束が無くなるだけでなく、ダボに乗り上げて予期できない挙動を示す場合があるため、ダボの高さを十分に取っておく必要がある。

部材の検定においては、作用する水平せん断力に対してダボおよび柱が破断しないよう断面設計する必要がある。施工上、ダボ孔とダボ間には若干のクリアランスが生じることから水平せん断力は衝撃的に作用する点に留意する必要がある。

(2) 境界条件③となる場合

上部構造の設計にあたって、浮き上がりが生じる構面のせん断耐力の低減を考慮する必要がある点は前項と同様である。

水平移動を許容するが、水平移動量の評価にあたっては、変動軸力や偏心などの上部構造の構造特性、柱底面一礎石間の摩擦係数の評価とばらつき、入力地震動の特性（特に上下動の影響）等、影響を及ぼす因子が多いため、設計にあたっては慎重な取り扱いが必要となる。入力地震

動以外の不確定要素による影響を極力除くためには、1) 水平構面の剛性を十分に確保する、2) 上部構造の剛性偏心および重量偏心を避ける、3) 出来るだけ密に柱を配置する、4) 礎石の傾きや凹凸等、施工誤差を最小化する、5) 礎石のサイズを大きく取り礎石の踏み外しを避ける、等の処置が必要となる。

表 データシートに示した実験の実験パラメータ一覧

使用データ No.	実験方法		柱樹種	柱寸法	基礎	柱底面の垂直応 力度 [N/mm ²]	すべり速度 [mm/s]
	静的	動的					
No.1		○	スギ	120mm 角	びしゃん仕上げ 花崗岩	0.5 ~ 0.85	-
No.2~6	○	○	スギ	120mm 角	びしゃん仕上げ 花崗岩、コンク リート、テフロ ン	0.7	動的：- 静的：3 ~ 6
No.7~10	○		ヒノキ	100mm 角、 φ 100mm 丸柱	びしゃん仕上げ 花崗岩、コンク リート	0.4 ~ 0.7	0.3 ~ 0.5
No.11		○	スギ	150mm 角	サンドブラスト 処理仕上げ花崗 岩	0.2 ~ 0.4	-
No.12		○	スギ	150mm 角	サンドブラスト 処理仕上げ花崗 岩	0.15 ~ 0.4	100 ~ 800

文献

- 1) 日本建築学会：限界耐力計算による伝統的木造建築物構造計算指針・同解説、丸善、2013

○データ収集の対象とした文献

使用データ No.	文献
No.1	<ul style="list-style-type: none"> 向坊恭介，川上沢馬，鈴木祥之：礎石建て構法木造建物の地震時挙動に関する研究（その1）振動台実験，日本建築学会大会学術講演会梗概集（中国），22088, Sep. 2008. 川上沢馬，向坊恭介，鈴木祥之：礎石建て構法木造建物の地震時挙動に関する研究（その2）地震応答解析，日本建築学会大会学術講演会梗概集（中国），22089, Sep. 2008
No.2~6	<ul style="list-style-type: none"> 特定非営利活動法人 緑の列島ネットワーク：平成22年度国土交通省補助事業報告書 伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験検討委員会報告書、平成23年（伝統的構法の設計法作成および性能検証委員会：平成22年度事業報告書 4.2.1 脚部モデルの加振実験）
No.7~10	<ul style="list-style-type: none"> 荒木慶一，李東潤，遠藤俊貴，吉田亘利，上谷宏二：伝統木造柱脚—礎石間の静摩擦係数，日本建築学会技術報告集，Vol. 15, No. 30, pp. 405-409, Jun. 2009
No.11	<ul style="list-style-type: none"> 和田幸子，中川貴文，五十田博，岡部実，河合直人，箕輪親宏：伝統的木造住宅の垂れ壁付き壁構面振動台実験 その1～3，日本建築学会大会学術講演梗概集，2008.9 和田幸子，中川貴文，五十田博，岡部実，河合直人，箕輪親宏：伝統的木造住宅の垂れ壁付き壁構面振動台実験，日本建築学会北陸支部研究報告集（51），pp.113-116，2008.7
No.12	<ul style="list-style-type: none"> 和田幸子，中川貴文，五十田博，岡部実，河合直人，桂川晋：伝統的木造住宅の垂れ壁付き壁構面振動台実験 その6，日本建築学会大会学術講演梗概集，2009.8

解説

建築物を基礎に緊結しない場合、特に境界条件③となる場合、建築物の移動量を推定する必要があり、推定にあたっては、上部構造の特性、建築物と基礎の境界条件を適切に評価する必要がある。以下、設計に際して留意すべき点について示す(文献1)に加筆・修正した部分を含む)。

○上部構造のモデル化

(1) 建築物の立体的挙動

建築物の立体的挙動が、柱脚の移動量に大きな影響を及ぼすため、下記のような点が検証可能な適切なモデル化が必要である。

- ・ 上部構造耐力および剛性 (荷重-変形関係)
- ・ 軸力変動
- ・ 建築物全体のロッキング挙動 (塔状比)
- ・ 各構面の挙動 (構面ごとの挙動)
- ・ 偏心 (剛性偏心、重量偏心)
- ・ 水平構面 (柔床、レベル)

柱脚の水平移動を推定するためには、上部構造の性能と境界条件の適切な設定が重要となる。特に、摩擦による滑り量を推定するためには、動的効果、立体的挙動も考慮しなければならない。

摩擦力は、 $\text{摩擦力} = \text{摩擦係数} \times \text{軸力}$ で算出されるため、1階下半分質量 M_0 (1階壁下半分重量 + 1階床の重量 + 1階床下重量) による軸力の増加 (M_0 効果) も考慮しながら、1階床の応答に影響を及ぼす1階床下の性能も考慮する必要がある。また、建築物内の軸力の変動に応じて摩擦力は変動すると考えられる。一般的な重量配置による軸力分布や壁のせん断抵抗による軸力変動だけでなく、塔状比が大きい場合には建築物全体のロッキング挙動、偏心による各構面の応答差も検証可能なモデル化が必要となる。

建築物全体の立体的挙動を評価するためには、水平構面のモデル化も重要である。伝統木造建築物では、梁、桁、床のレベルが同一ではないために水平構面が明確ではなく、剛床仮定も成立しない場合が多いため、上屋、下屋の関係も考慮しながら、拘束条件を適切に評価する必要がある。同様に1階の屋根と2階の屋根が連続する葺き下ろしの屋根では、層(階)の概念も適用しにくいので注意が必要である。

(2) 摩擦力

摩擦力の設定にあたっては、摩擦係数 (静止摩擦係数、動摩擦係数)、軸力を適切に評価する。摩擦力は、 $\text{摩擦力} = (\text{摩擦係数}) \times (\text{軸力})$ で現される。各柱の軸力は、上部構造のモデル化が適切であれば解析モデルから算定することができるが、1階床重量については、柱だけでなく束などによって支持される場合もあるので注意が必要である。

柱と基礎の摩擦係数については、静止摩擦係数と動摩擦係数を適切に設定する必要がある。また、繰り返し入力による摩擦係数の変化も考えられるが、その傾向は明らかにされていないため注意が必要である。

○入力地震動の影響

境界条件③として、水平移動の拘束を摩擦力にのみ期待する場合には、柱脚の移動は、柱に生じるせん断力 (水平2方向の合成成分) と軸力に大きな影響を受けるため、方向ごとの1次元入力による検討だけでなく、平面2次元入力や上下動との組み合わせについても適切に検討する必要がある。また、1回の滑りによる移動量と累積移動量、残留移動量をそれぞれ適切に

評価する必要があるが、これらは入力地震動の位相特性に大きく影響されることが判っており、原則として時刻歴応答解析によることが望ましい。

○ばらつきの考慮

上部構造と摩擦力を適切に評価することにより、建築物の移動量を算定することが出来るが、木、土、石といった自然材料を多く用いた伝統構法では、材料特性のばらつきが大きいいため、次のようなばらつきを考慮した性能検証も必要となる。

- 1) 上部構造の性能のばらつき
- 2) 摩擦係数のばらつき

柱脚の移動量の算定にあたっては、建築物全体での滑り量を算定するとともに局部的に大きな移動が生じることにより上部構造に大きな損傷を生じることがないように、各要素の性能のばらつきとを考慮した検討も併せて行う。

1) 上部構造性能のばらつき

一般に、上部構造の耐力が大きくなると柱脚の水平移動量は大きくなる傾向にある。このため、上部構造の性能評価においては、耐力の下限值だけでなく上限値についても検討を行う必要がある。

一般に構造計算にあたって、建築物の重量は安全のためやや大きめに算定されることが多いが、柱脚の滑りを時刻歴応答解析で推定する場合には、大きめの重量算定が必ずしも安全側にならないことに注意する。1F床レベルの応答加速度が柱脚の水平移動に直接関係することから、1階下半分質量 M_0 を適切に評価することが必要である。また、積載重量については不確定な要素と考えて、必要に応じて複数のパターンで検討を行うことが望ましい。

2) 摩擦係数のばらつき

柱脚と礎石の動摩擦係数は一般に、 $\mu = 0.3 \sim 0.4$ 程度といわれているが、自然材料であるため材料自体のばらつき、移動方向、施工誤差（傾斜など）によるばらつきがある。摩擦係数のばらつきについては、建築物全体での摩擦係数のばらつきによる挙動の違いと、建築物内での摩擦係数のばらつきについて検討する必要がある。特に、建築物内での摩擦係数のばらつきは、上部構造の耐力要素が偏心していなくても、構面ごとの移動量が異なることによるねじれ挙動などが生じるため注意が必要である。一般に、建築物内で摩擦係数のばらつきがあると、摩擦係数の小さい柱脚が動きやすい傾向にある。

○摩擦係数の実験値

本データシートで示した実験から得られた摩擦係数の一覧を実験パラメータとともに下表に示す。実験結果からも摩擦係数あるいは滑り摩擦現象はばらつきの大きいことが示唆される。さらに、各実験パラメータが摩擦係数に及ぼす影響も明らかになっておらず、現時点での摩擦係数の値としては一定の幅を持つことを許容せざるを得ない。

データシートに示した実験の実験パラメーター一覧

使用データ No.	実験方法		柱樹種	柱寸法	基礎	柱底面の垂直応 力度 [N/mm ²]	すべり速度 [mm/s]	摩擦係数
	静的	動的						
No.1		○	スギ	120mm 角	びしゃん仕上 げ花崗岩	0.5 ~ 0.85	-	0.3 ~ 0.5
No.2~6	○	○	スギ	120mm 角	びしゃん仕上 げ花崗岩、コ ンクリート、 テフロン	0.7	動的：- 静的：3 ~ 6	0.35 ~ 0.6、 テフロン：0.1
No.7~10	○		ヒノキ	100mm 角、 φ 100mm 丸 柱	びしゃん仕上 げ花崗岩、 コンクリート	0.4 ~ 0.7	0.3 ~ 0.5	静止摩擦係数 0.6 ~ 0.9
No.11		○	スギ	150mm 角	サンドブラ スト処理仕上 げ花崗岩	0.2 ~ 0.4	-	静止摩擦係数約 0.53、 動摩擦係数：0.3 ~ 0.4
No.12		○	スギ	150mm 角	サンドブラ スト処理仕上 げ花崗岩	0.15 ~ 0.4	100 ~ 800	0.3 ~ 0.5

文献

- 1) 日本建築学会：限界耐力計算による伝統的木造建築物構造計算指針・同解説，丸善，2013