

すべり系免震支承の摩擦特性に関する力学的考察

○独立行政法人土木研究所 正会員 姫野 岳彦

独立行政法人土木研究所 正会員 運上 茂樹

1. はじめに

支承部におけるすべり機構を摩擦減衰性能として評価し、その免震効果を期待した設計法が検討されつつあるが、この摩擦特性を表現する手法としては、一般にクーロンの摩擦法則が知られている。それによると摩擦係数 μ の概念によって摩擦力を $F=\mu W$ と表し、 μ は材料の面積および荷重条件等に依存しない定数をとるものとされている。しかしながら、すべり材として PTFE (Polytetrafluoroethylene) を用いた場合の特性は、その実験結果などから荷重条件に依存した傾向を示すことがすでに報告されている¹⁾。そこで本文では、トライボロジーの分野における理論を用いて摩擦発生機構を力学的に検討し、摩擦力を求める際における理論式の提案とその面圧依存性に関する検証を行った。

2. トライボロジー理論による摩擦力算出式の誘導

摩擦力の発生機構としては、1)材料の接触面において生じる凝着部をせん断するために必要な力（凝着項： F_a ）、2)表面の粗さや異物の介在などにより移動方向前面にある物体を押し退けるために必要な力（掘り起こし項： F_p ）、3)弾性的な材料が変形する際に生じるエネルギー的な損失に起因する力（弾性ヒステリシス損失項： F_h ）などが考えられている²⁾が、すべり支承の摩擦面のように表面粗さが小さく、また、ゴムのような高弾性体ではない場合には F_p 、 F_h による要因は相対的に小さく無視することができる。よって、摩擦力 F は下式により近似できる³⁾。

$$F = F_a + F_p + F_h \cong F_a \quad (1)$$

ここで、 F_a を算出するためには凝着が生じている面積を求める必要があるが、2つの材料が平面接触している場合を考えると、その表面粗さの影響などによって、見かけ上の接触面積と実際に接触が生じている面積（真実接触面積）とは全く異なる値をとる。この接触状態を表現するために、ある曲率半径 R をもった微小な球面が十分に平滑と見なせる平面に接触する状態（図-1）を想定すると、ヘルツの弾性接触理論により、微小面積 A_0 は、

$$A_0 = \pi a^2 = \pi \left\{ \frac{3}{4} RW \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \right\}^{\frac{2}{3}} = \pi (KRW)^{\frac{2}{3}} \propto W^n \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 R ：接触する球面の等価曲率半径、 W ：球面が受ける鉛直荷重、 ν_i 、 E_i ：材料のポアソン比および縦弾性係数、 K ：すべり材の材質による定数である。この微小面積をもとに、実際には図-2のような連続した突起の接触面の総和として凝着面積を考える。

これらのことから、接触面積 A_0 に対する摩擦力 F_0 は2つの材料のうち軟らかい方のせん断耐力を S とすれば、以下により与えられる。

$$F_0 = F_a = S \times A_0 = S \times \pi (KRW)^{\frac{2}{3}} = \left[S \times \pi (KR)^{\frac{2}{3}} \times W^{-\frac{1}{3}} \right] \times W = \mu W \quad (3)$$

よって、式(2)において接触面積 A_0 が荷重 W の n 乗（ここでは $2/3$ 乗）に比例し、式(3)においてクーロンの摩擦法則により一定と与えられている摩擦係数 μ に相当する項が W の $n-1$ 乗（ここでは $-1/3$ 乗）に比例することになるため、 $n=1$ でない場合にはこの法則が成立しないことが分かる。なお、この指数 n は接触部の変形状態を表すパラメータであり、金属材料の場合に見られる塑性接触状態から軟らかい材料の弾性接触状態の間で変化し、 $1 \sim 2/3$ の値をとる。

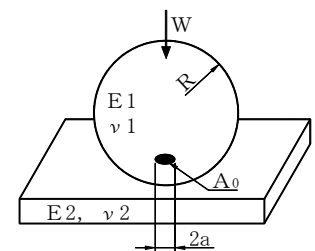


図-1 ヘルツの接触（球面と平面）

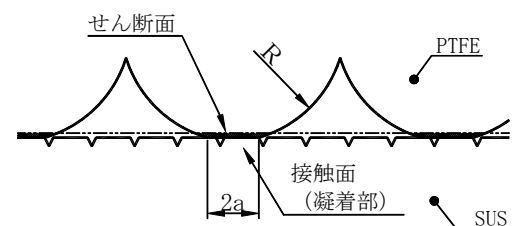


図-2 PTFE とステンレス(SUS)の凝着モデル

キーワード : すべり支承, 摩擦係数, PTFE, トライボロジー, 面圧依存性

連絡先 : 〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6 TEL 029-879-6773 FAX 029-879-6736

3. PTFE-ステンレス系すべり材料の摩擦特性

式(3)をもとにして実際に摩擦特性を求めるため、まず、単位面積あたりの真実接触面積を算出する。ここで、図-2のようにステンレス(SUS)は一定以上の表面仕上げ処理を行って十分に平滑と考えることができ、PTFEについては、その製造過程における PTFE 粉の粒径が表面に一様に分布している

ものと仮定する。面圧を σ 、PTFE 粒子半径を R とおけば単位面積あたりに存在する球面突起は $N=R^{-2}$ 個となり、また、1つの粒子が負担する荷重は $W=\sigma/N$ となるため、単位面積あたりの真実接触面積 A' としては、

$$A' = \sum \pi (KRW)^{\frac{2}{3}} = \pi \left(KR \frac{\sigma}{N} \right)^{\frac{2}{3}} \times N = \pi (K\sigma)^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

を得る。よって、一様な分布が期待できる場合には R に依存しなくなる。

次に、支承部に用いる PTFE には、その耐摩耗性を向上させるために無機系の材料を充填させていることから、この影響をパラメータとして考慮する⁴⁾。充填材は材料中に均等に分布しており、PTFE との体積比と同じ割合で摩擦表面にも存在しているものと考え、充填材体積比を V_f と与えれば、PTFE および充填材のそれぞれの接触面積 A'_p 、 A'_f は、

$$A'_p = (1-V_f)A' \quad , \quad A'_f = V_f A' \quad (5)$$

となる。ここで、PTFE、充填材のせん断耐力をそれぞれ S_p 、 S_f とおき、また、凝着部の清浄さ・強さを示すせん断耐力 S にかかる係数を α ($0 < \alpha < 1$) とすると、最終的に摩擦特性は以下の式で表すことができる。

$$F = \alpha S \times \sum A' = \alpha \{ S_p (1-V_f) + S_f V_f \} \times \pi (K\sigma)^{\frac{2}{3}} \times A \propto \sigma^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

$$\mu = \alpha \{ S_p (1-V_f) + S_f V_f \} \times \pi K^{\frac{2}{3}} \sigma^{-\frac{1}{3}} \propto \sigma^{-\frac{1}{3}}$$

4. 実験結果との比較と摩擦力の面圧依存性

式(6)の摩擦特性算出式を用いて、各パラメータを表-1のように設定⁵⁾した場合の計算結果と各研究機関により実施された既往の摩擦係数測定結果¹⁾ (合計 77 測定点) の分布を図-3に示す。このとき、充填材の配合については明確な規格が存在しないため供試体には数種類のパターンが含まれていると思われるが、一般的にはグラスファイバー (GF) を重量比で 15%~20% 充填することが多いため、ここでは、GF15%、20% 充填および参考として充填材なし (純 PTFE) の 3 ケースで検証した。この図から、提案した式(6)は実験結果の傾向と比較的良く一致しており、弾性接触状態として仮定した指数 $n=2/3$ は PTFE の接触機構では適当であると考えられる。図-4には摩擦力としてとらえた時の面圧依存性を示すが、正比例と考えるクーロンの摩擦法則と比較して、基準とした面圧 (ここでは $\sigma=20\text{MPa}$) から軸力が変化するとともに、約 20% 程度の差が生じることが分かる。

5. まとめ

提案した摩擦特性を求めるための理論式は、PTFE のすべり特性を精度良く表現することができ、また、このときの面圧依存性は高分子材料である PTFE の接触状態が弾性的であることによるものと考えられる。

参考文献 1)例えば、炭村透，鶴野禎史，北澤理仁：各種すべり材の摩擦特性に関する基礎的研究，第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.397-402，2003.1.など 2)例えば，田中久一郎：摩擦のはなし，日本規格協会，2002. 3)田中寛人，高橋良和，家村浩和：滑り支承の速度・荷重依存性のモデル化と免震効果に関する研究，土木学会第 57 回年次学術講演会，pp.905-906，2002.9. 4)坂ロー彦，藤井輝彦：低速・高荷重下での PTFE および充てん PTFE のすべり摩擦特性，潤滑，vol.28，No.9，pp.691-696，1983. 5)例えば，テフロン実用ハンドブック，三井・デュポンフロロケミカル株式会社，2001.

表-1 材料特性値

材料	仕様	弾性係数 E_i (MPa)	ポアソン比 ν_i	せん断耐力		体積比 V_f (%)
				S_p (MPa)	S_f (MPa)	
PTFE	純PTFE	420	0.46	6.5	-	-
	GF15%充填	690	0.46	6.5	41.0	13.2%
	GF20%充填	760	0.46	6.5	41.0	17.6%
SUS	No.2B仕上げ以上	2.0E+05	0.30	-	-	-

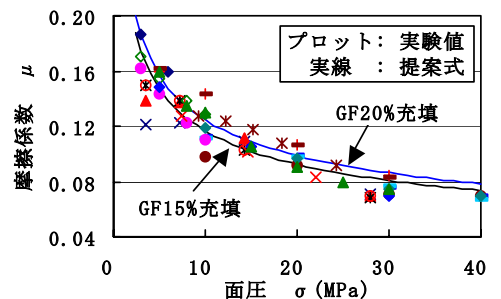
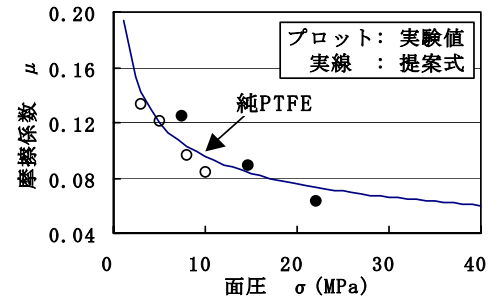


図-3 実験結果と提案式の比較

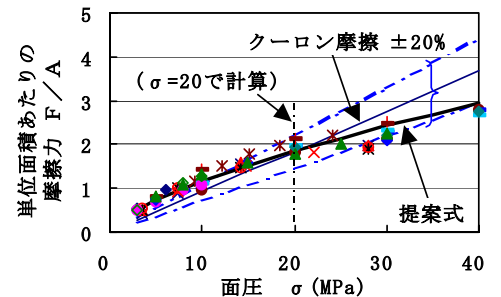


図-4 摩擦力の面圧依存性