

京都大学工学研究科 正会員 高橋 良和
 京都大学工学研究科 フェロー 家村 浩和
 京都大学工学部 学生員 ○ 日比 雅一

1 概要 本研究では、トライボロジー（摩擦学）理論を背景に、滑り摩擦機構について整理し、摩擦面に作用する面圧と速度による依存性を同時に考慮した滑り型免震支承の摩擦（係数）数値モデル式を提案した。また、振動台実験による結果とモデル式による履歴曲線を比較し、再現性を確認した。

2 滑り摩擦機構

2.1 Coulomb（クーロン）の摩擦法則 従来、乾燥摩擦の法則として、以下のようなCoulombの摩擦法則が広く認知されている。

1. 摩擦力は接触面に加えられる荷重に比例する。
2. 摩擦力は見かけの接触面積に無関係である。
3. 摩擦力は滑り速度に無関係である。
4. 静摩擦力は動摩擦力より大きい。

ただし、この法則は経験則であり、実際には摩擦面における圧力や滑り速度が変化する場合には、この経験則は成立しない。

2.2 現代摩擦理論（凝着説） 「面接触における実際の接触部（これを真実接触面積と呼ぶ）は見かけの接触面積よりも非常に小さく、真実接触部における接触圧力は極めて高いものとなる。これにより摩擦面同士の分子間の化学親和性により凝着が起こる。」という摩擦機構は、Bowden-Taborによって提唱され[2]、凝着説と呼ばれ、金属同士の接触における乾燥摩擦の基本原則と現在考えられている。

この理論では、摩擦面の表面粗さが小さいときには、摩擦力は凝着部をせん断するために必要なせん断強さ s と真実接触面積 A_r の積で表され、この二つの性質を把握すれば、滑り摩擦力 F を導くことができることとなる。

$$F = sA_r \quad (1)$$

2.3 荷重 W と真実接触面積 A_r の関係 真実接触面の一つ一つは集中（点）接触しており、実際の接触部は弾性変形あるいは塑性変形するため、有限の広さを持つ。この点接触についてはHertzによって検討さ

れており、これによると接触部は円形であり、その面積 A_i は以下のように示される（図1）。

$$A_i = \pi a_i^2 = \pi \left(\frac{3R}{2E} W_i \right)^{2/3} \propto W_i^{2/3} \quad (2)$$

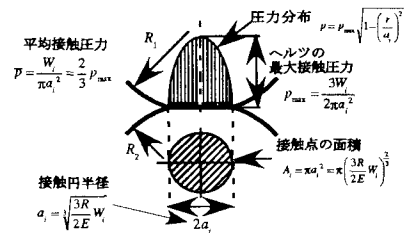


図1 Hertz 接触

ここで、 R 、 E はそれぞれ等価（曲率）半径及び等価縦弾性係数（ヤング係数）と呼ばれる。この式によると、接触面積 A_r は荷重 W_i の $2/3$ 乗に比例し、先に述べたCoulombの法則を満たさない。ここで、Greenwood-Williamsonの接触時の表面粗さの確率的取り扱いを導入する[3]。つまり、粗面の粗さ突起を全て同じ曲率半径 R を持つ球状突起と仮定し、その高さ分布を統計的分布に従うと仮定すると（図2）、接触面積は以下のように導け、真実接触面積 A_r は鉛直荷重 W に比例する。

$$A_r = \sqrt{\pi} E^{-1} (\sigma/R)^{-1/2} W \propto W^1 \quad (3)$$

ここで、 σ は突起高さの標準高さである。これと式(1)によると、 s は荷重よりむしろ速度に依存すると考えられるため、摩擦力は鉛直荷重に比例し、Coulombの第一法則を満たすことが分かる。

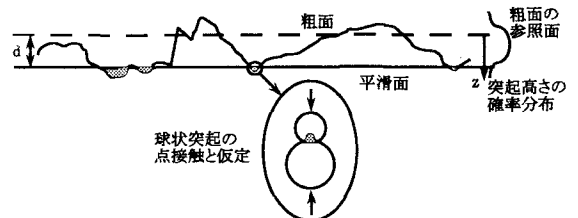


図2 見かけの面接触

3 PTFEとSUS間の滑り現象の数値モデルの提案

3.1 Coulombの法則が破れる理由 先に述べたように真実接触面積には荷重依存性が認められないにも関わらず、様々な実験結果より、一般的に滑り支承

に用いられるPTFEとSUSの間の摩擦(係数)には速度依存性と荷重(面圧)依存性があることが報告されている。この矛盾を説明するために、PTFEとSUSの間の特性について注目する。

先に述べた凝着理論では、真実接触面積は極めて小さいと考えている。PTFEは高分子材料であり、その塑性流動圧力 p_m は純テフロンで約25MPa、充填材入りテフロンで30～50MPa程度である。支承実験を見てみると、この値に近い高圧力で実験されている。このとき真実接触面積 A_r は非常に大きなものとなるため、見かけの接触面積 A に漸近して飽和するようになると考えられる。これが過去の支承実験に見られる面圧依存性の一因であると考え、以下のような真実接触面積モデルを提案した。

$$A_r = A[1 - \exp(-k'W)] = A[1 - \exp(-kP)] \quad (4)$$

ここで、 k 、 P はそれぞれ材料パラメータおよび見かけの面圧である。

3.2 摩擦モデル式の提案 式(4)を用い、面圧及び速度依存性を考慮した滑り型免震支承の数値モデル式を提案する。まず、真実接触面積と見かけの接触部における外力の釣り合いより、次式が成立する。

$$W = P_r A_r = PA \quad (5)$$

ここで、 P_r は真実接触部の圧力である。またトライボロジーにおける研究より、せん断強さ s に関する次式を用いる。

$$s = s_0 + \alpha P_r \quad (6)$$

ここで、 s_0 、 α はそれぞれ材料パラメータであり、 s_0 に速度依存性があると考えられている。これと高分子材料の滑り速度依存性について提案されている実験式、

$$F = a - b \exp(-nV) \quad (7)$$

の関数形を参考にして、せん断強さ s に関して以下の式を提案する。

$$s = s'(1 - e^{-nV}) + \alpha P_r \quad (8)$$

ここで、 s' 、 n は材料パラメータである。式(1)、(4)、(5)、(8)より以下のようなモデル式が導かれる。

$$F(P, V) = -\text{sign}(V) \cdot A \left[s'(1 - e^{-nV}) (1 - e^{-kP}) + \alpha P \right] \quad (9)$$

ここで、 $\text{sign}(V)$ は滑り速度に関するシグナム関数を意味する。また定義的に摩擦係数 μ は、摩擦力を鉛直荷重で除した値なので、(5)、(9)式より、

$$\mu(P, V) = -\text{sign}(V) \left[s'(1 - e^{-nV}) \frac{1 - e^{-kP}}{P} + \alpha \right] \quad (10)$$

となる。

4 モデル式の検証 過去の支承実験に関する論文より面圧－摩擦係数のデータを読み取り整理した。式(10)の面圧依存項と過去の実験結果を比較したものが図3である。これより、面圧依存性に関するモデルの関数形の妥当性が確認できた。

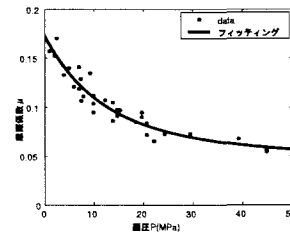


図3 面圧依存性に関する関数形の妥当性

次に提案モデル式の妥当性を検証するため履歴曲線の概形を振動台実験結果と比較する(図4)。本実験から面圧、速度とも大きく変動する結果を用いた。ここでは定常振動時と考えられる5～10秒の正弦波応答結果を比較した。これを見るとその履歴形状はよく再現できていることが分かる。さらに、滑り支承のエネルギー吸収量の誤差も10%程度であった。

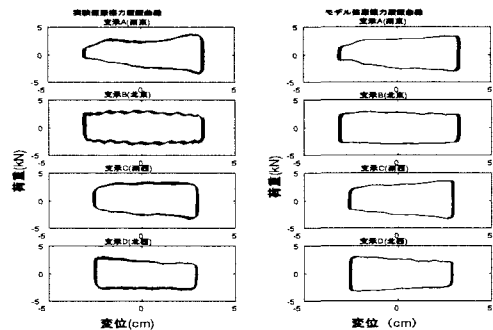


図4 変位-摩擦力の履歴曲線の比較

5 結論 トライボロジー理論を背景にして、面圧・滑り速度依存性を考慮した摩擦力の変動モデル式を提案した。さらに、振動台実験結果と履歴曲線を比較することでモデル式の妥当性を確認した。

参考文献

- [1] 山本雄二・兼田禎宏: トライボロジー, 理工学社, 1998.
- [2] Bowden, F. and Tabor, D.: 固体摩擦と潤滑, 曾田範宗訳, 丸善, 1961.
- [3] Greenwood, J. and Williamson, J.: Contact of nominally flat surfaces, Proceedings of Royal Society London, Vol. 295, pp300-319, 1961.