

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

1 概要 本研究では、トライボロジー(摩擦学)理論を背景に、滑り摩擦の機構について整理し、摩擦面に作用する荷重による依存性と速度による依存性とを同時に考慮した摩擦モデルを提案する。次に提案したモデルの適用性についての検討を行った。

2 滑り摩擦の機構

2.1 Coulomb(クーロン)の摩擦法則 乾燥摩擦について、以下のような経験則が成立する。

- 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、実際には摩擦面の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。また、現在では、Bowden-Taborによって提出された凝着理論が乾燥摩擦の基本原則と考えられている。

2.2 トライボロジー(摩擦学)理論 これは、摩擦力は凝着部をせん断するのに必要な力(凝着項 F_a)(図1)と、物体の移動する前方にある物体を押し退けるのに必要な力(掘り起こし項 F_p)の和によって与えられるとする理論である。ただし、摩擦滑り支承のように摩擦面の表面粗さが小さいときには、掘り起こし項は無視できる。

$$F = F_a + F_p \cong F_a \tag{1}$$

2.3 固体の接触形態と摩擦法則 面接触の実際の接触面積(これを真実接触面積と呼ぶ)は見かけの面積に比べて極めて小さく、高い接触圧力のために弾性または塑性変形をした、無数の接触部が分散して存在している。図2のような球の点接触の場合について、接触部が弾性変形の場合には接触円半径は次式となる。

$$a = \sqrt[3]{\frac{3R}{2E}W} \tag{2}$$

ここで、 R は等価(曲率)半径、 E は等価縦弾性係数。ゆえに、接触部の面積 A は次のようになる。

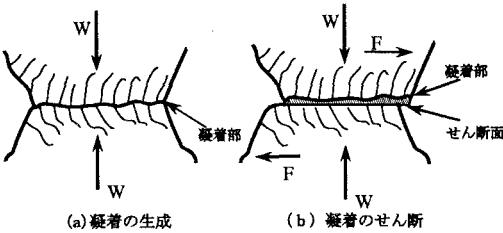


図1 凝着部の生成とせん断

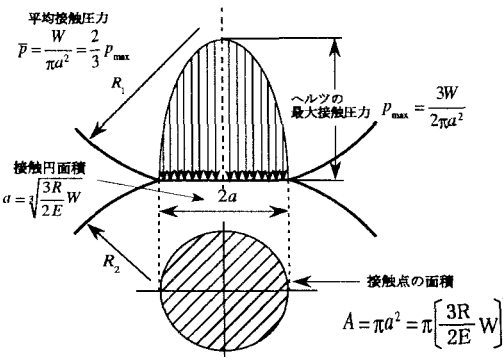


図2 集中接触(ヘルツ接触)

$$A = \pi a^2 = \pi \left(\frac{3R}{2E} W \right)^{\frac{2}{3}} \propto W^{\frac{2}{3}} \tag{3}$$

また、接触部において完全に塑性変形が生じていると考えるとき、接触荷重 W に対応する真実接触面積 A は、次式のように表すことができる。

$$A = \frac{W}{p_m} \propto W^1 \tag{4}$$

ここで、 p_m は真実接触部の平均降伏圧。

以上の(3)(4)式を一般化すると、荷重 W で接触させたときの真実接触面積 A は次式のように示される。

$$A = KW^n \tag{5}$$

ここで、 n は接触面が荷重を受けた時に生じる変形の性質で、完全塑性変形のときは $n = 1$ 、完全弾性変形のときは $n = 2/3$ となり、その間の範囲で変化する。

真実接触部は、高い接触圧力のため降伏して凝着しており、この凝着部分をせん断することが必要で、このせん断力が摩擦力となり、次式で表される。

$$F = sA = sKW^n \quad (6)$$

ここで、 s は凝着部のせん断強さ。

3 速度・荷重依存型滑り支承のモデル化

3.1 摩擦力の荷重・速度依存性 前章の議論より、面圧とは垂直荷重を見かけの接触面積で除した値であり、実際の摩擦機構に即していない便宜的なものであるといえる。従来は滑り支承の摩擦変動モデルとして摩擦係数に着目し、面圧依存性が検討されていたが、本研究では(6)式のように直接摩擦力を扱い、荷重依存性を検討することとする。(6)式には、滑り速度項が入っていないが、従来の研究より、 s や p_m が変形速度によって変化することが知られている。

3.2 モデル化 滑り支承の摩擦力の変動を次のようにモデル化した。荷重依存については既に(6)式に考慮されているので、速度依存については岡本らの研究を参考にしてモデル化した((8)式)。

$$F = kf(v)W^n \quad (7)$$

$$f(v) = 1 - \exp(-av) \quad (8)$$

ここに、 v は速度、 W は荷重。 k 、 n は荷重依存性を規定する係数。 a は速度依存性を規定する係数。

4 提案摩擦モデルとその精度

4.1 パラメータの決定 提案したモデルの妥当性と適用性を評価するために、Constantinouらによる滑り支承の摩擦試験のデータを用い、(7)式の荷重依存性を規定する係数 k 、 n と、(8)式の数値依存性を規定する係数 a を最小自乗法により決定した。まず第1段階として、速度15(cm/sec)の時に、(7)式に合う係数 k 、 n を決定した。次に第2段階として、垂直荷重 W が10.48(kN)の時に、係数 k 、 n には前段階で求めた値を用い、(8)式の中の係数 a を決定した。以上より、図3で求めたモデルは次式で表される。

$$F(v, W) = 0.151 [1 - \exp(-0.44v)] W^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

ただし、(9)式はConstantinouらによる滑り支承の摩擦試験より求めたものであり、パラメータは対象とする滑り支承ごとに決定をする必要がある。

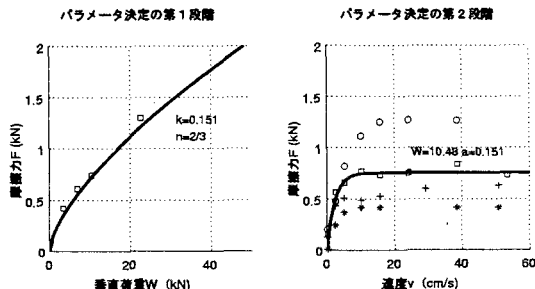


図3 提案モデルのパラメータ決定

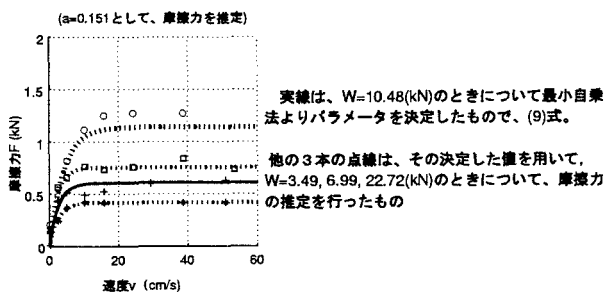


図4 摩擦力の推定

4.2 本モデルによる摩擦力の推定 (9)式を用いて、 $W = 3.49, 6.99, 22.72(\text{kN})$ の時ににおける実験値の推定を試みた(図4)。必ずしも厳密ではないが、荷重や速度の変化の傾向を良好に推定できている。よって、本モデルは速度と荷重の両者に依存する問題に適用できると考えられる。

5 結論 トライボロジー理論に基づいて、荷重と速度による依存性を考慮した摩擦力の変動のモデル化を行なった。またこのモデルを用いて、Constantinouらの滑り支承の摩擦試験データを推定し、本モデルの妥当性と適用性を確認した。

参考文献

- [1] 山本雄二：トライボロジー，理工学社，1998年。
- [2] 岡本晋・深沢泰晴・藤井俊二・尾崎大輔：すべり方式免震システムを有する橋梁の地震時挙動特性，土木学会論文集No.513，I-31，pp191-200，1995年4月。
- [3] Constantinou, M.C et al :Teflon Bearings in Base Isolation,1990.