

振動台実験による滑り免震支承の速度・面圧依存型数値モデルの検証

京都大学工学部 学生員 ○ 日比 雅一
 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

1 概要 著者らは、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ている[1]。本研究では、速度、面圧が大きく変化する振動台実験結果とモデル式による履歴曲線を比較し、その再現性について検証するものである。

2 滑り摩擦機構の整理と数値モデルの提案 [1]

2.1 現代摩擦理論（凝着説） 従来、広く認知されている Coulomb の法則は、摩擦力は接触面に加えられる鉛直荷重に比例するという経験則であり、現在では、「面接触における実際の接触部（真実接触面積）は見かけの接触面積よりも極めて小さく、真実接触部における接触圧力は非常に大きい。このため接触部は凝着している。この凝着をせん断するのに必要な力が摩擦力である。」という Bowden-Tabor の凝着説[2]が乾燥摩擦の原理と認められている。この理論によると摩擦面の表面粗さが小さいときには、次式のように摩擦力 F は凝着部のせん断強さ s と真実接触面積 A_r の積で表される。

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

2.2 荷重 W と真実接触面積 A_r の関係 Hertz によると真実接触面の一つ一つは集中（点）接触しており、接触部は円形でその面積 A_i は荷重 W_i の $2/3$ 乗に比例することが導かれている。またこの集中接触について、Greenwood-Williamson[3]の接触時の表面粗さの確率的取り扱いを用いて面接触へと拡張すると（図1）、真実接触面積 A_r 全体で考えれば接触面積は鉛直荷重 W に比例することが導かれる。せん断強さは荷重よりもむしろ速度の影響が大きいと考えられるため、これと式(1)により摩擦力 F は鉛直荷重 W に比例する。つまり Coulomb の法則は満足するものの、従来の支承実験結果である面圧依存性は説明できないことになる。

ここで滑り支承で一般的に用いられる PTFE の性質を考える。PTFE は高分子材料であり、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 $30 \sim 50\text{MPa}$ である。過去の支承実験を見ると、その値に近い高圧力下で実験されているため、このとき真実接触面積 A_r は非常に大きなものとなり、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。これより以下のような真実接触面積モデルを提案する。

$$A_r = A[1 - \exp(-kP)] \quad (2)$$

ここで、 P は見かけの圧力である。

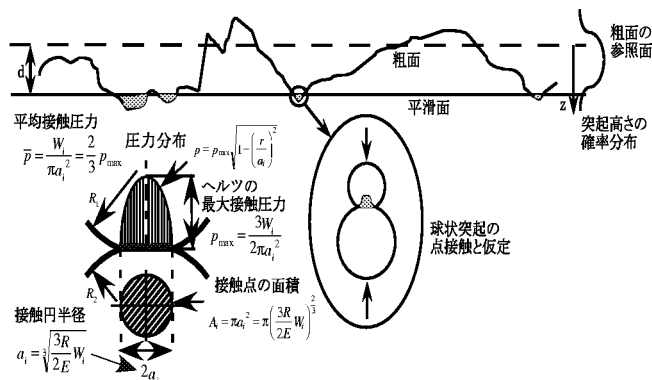


図1 Hertz 接触と表面粗さの確率的取り扱い

2.3 速度・面圧依存型数値モデルの提案 滑り速度及び面圧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。ここでは、式(2)に加え、トライボロジーにおける研究よりせん断強さ s に関する式 ($s = s_0 + \alpha P_r$) 及び速度が増加するにつれて一定値へと漸近していく速度依存に関する研究を参考に、次のような摩擦力 F 、摩擦係数 μ の変動モデル式を提案した。

$$F(P, V) = -\text{sign}(V) \cdot A$$

$$[s'(1 - e^{-nV})(1 - e^{-kP}) + \alpha P] \quad (3)$$

$$\mu(P, V) = -\text{sign}(V) \left[s'(1 - e^{-nV}) \frac{1 - e^{-kP}}{P} + \alpha \right] \quad (4)$$

ここで、 F 、 V 、 A 、 μ 、 $\text{sign}(V)$ はそれぞれ摩擦力、滑り速度、見かけの接触面積、摩擦係数及び滑り速度 V に関するシグナム関数を意味し、 s' 、 n 、 k 、 α は材料パラメータである。

キーワード 滑り型免震支承、速度依存性、面圧依存性、モデル式

連絡先 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL(075)753-5088 FAX(075)753-5926

3 振動台実験 提案モデル式の妥当性を検証するために振動台実験を行った。実験に用いた振動テーブルは幅3.0m×長さ5.0mで、その上に総重量10tfの実験モデルを4箇所の滑り支承(上面:SUS板、滑り材:充填剤入りのPTFE)で支持する。それぞれの支承に荷重が均等にかかる。振動によるせん断に対する抵抗は4箇所の滑り支承の摩擦によるエネルギー吸収と2箇所のゴム支承の復元力による(図2)。入力波は全て10秒の正弦波であり、滑り支承の面圧の依存性は軸力変動によって考慮する。入力波2.5Hz;300galの実験結果について、面圧の時刻歴及び滑り速度の時刻歴を図3に示す。

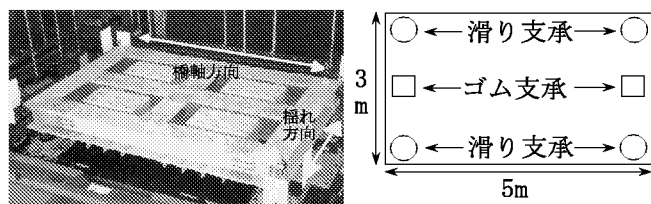


図2 実験モデル支承配置図

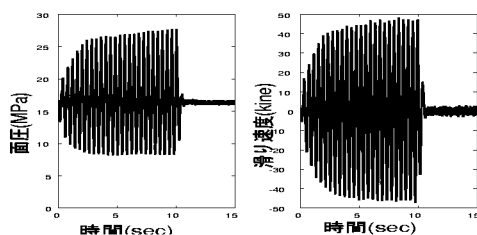


図3 面圧、滑り速度の時刻歴

4 パラメータの同定 この結果について面圧を一定(ここでは10MPa)に固定し、滑り速度－摩擦係数のグラフを描くと図4のようになる。ここで、パラメータを同定するための1次フィッティングとして、十分速度が速いときの速度項 $[1 - \exp(-nV)]$ を1に近似、固定し、各面圧の速度が十分大きなものとして最大速度の摩擦係数をその面圧の摩擦係数として、それを集めた面圧－摩擦係数の関係からモデル式のフィッティングをする(図5)。また、得られたパラメータを用いて図4のグラフについてフィッティングすることで残りのパラメータを同定する。これらにより、 $s'=1.3787$ 、 $k=0.1017$ 、 $\alpha=0.0458$ 、 $n=0.1967$ を得る。

5 モデル式の検証 先程得られたパラメータを用いて描かれる履歴曲線と実験結果から得られる履歴曲線とを比較する(図6)。これを見るとその履歴形状がよく再現できていることが分かる。また、エネルギー吸収量の誤差は10%以内であった。これにより提案モデル式の妥当性が確認できる。しかし、変位の小さな領域で摩擦係数がバラついており、モデル式

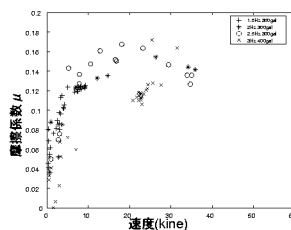


図4 滑り速度－摩擦係数グラフ(10MPa)

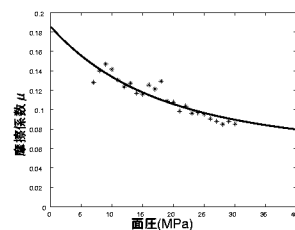


図5 1次フィッティング

これは再現出来ていない。ここで波全体の履歴曲線と定常時(5～10秒)の履歴曲線を比較する(図7)。これを見ると定常時の履歴には波全体の履歴で見られた摩擦係数のバラつきは見られず、モデル式の履歴形状は定常時とよく近似している。この摩擦係数のバラつきを再現するためには、繰り返し回数等の別の要素を考慮する必要があると考えられる。

6 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数値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、特に定常時における、モデル式の妥当性を確認した。

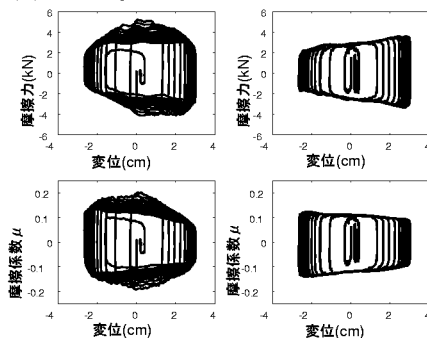


図6 履歴曲線の比較(左：実験値、右：モデル値)

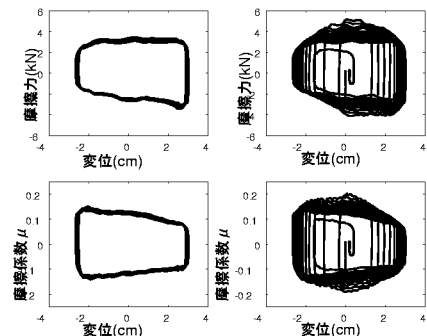


図7 履歴曲線の比較(左：波全体、右：定常時)

参考文献

- [1] 高橋良和・家村浩和・日比雅一：滑り型免震支承の速度・面圧依存型数値モデルの提案, 土木学会関西支部年次大会, 2003年.
- [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 Royl Society London, Vol.295, pp300-319, 1961.