

なじみ現象を考慮した滑り型免震支承の摩擦係数変動モデルの開発

京都大学工学研究科 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 - (摩擦学)理論を背景に、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きた[1]。しかしながら摩擦係数は滑り出し直後よりしばらくの間減少していくことが各種実験より確認されている。本研究では、この摩擦係数の変動理由をなじみ現象として扱い、モデル式の改良を行い、検証するものである。

2 過去に提案した数値モデル[1] 過去の研究では、摩擦面をミクロな視点からとらえたトライボロジー理論に基づいて、摩擦係数 μ に関する以下のような速度・面圧依存型数値モデルを提案した。

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

ここで、 P は面圧(MPa)、 V は滑り速度(kine)であり、その他は材料パラメータである。本モデルにより、ロッキング振動により大きな軸力変動を伴う摩擦係数変動を精度良く再現することができた[2]。

図1に正弦波加振時の摩擦係数の振動台実験結果を示す。この図を見ると、正弦波加振で支承部の滑り速度、面圧の変動の仕方がほぼ同様であるにも関わらず、摩擦係数のピーク値は徐々に減少し、一定値に近づいている(定常状態)ことがわかる。過去に提案したモデル式はこの定常状態時の摩擦係数の変動を評価するには妥当であるが、実際の地震は初期に短

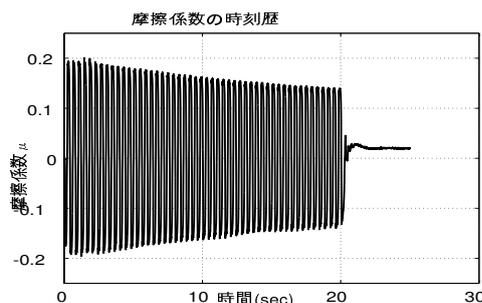


図1: 摩擦係数の時刻歴

い大きな揺れがあり、その大きな揺れの際の摩擦挙動を評価することが重要であり、この提案モデル式で摩擦係数を評価することは不十分であると言える。

3 Pleskachvsky らの実験[3] Pleskachvsky らは等速で回転する鋼材に PTFE を等荷重で擦りつけ、その摩擦力と摩擦面の温度を計測する実験を行った。その実験結果から、以下のことが報告されている。

- 摩擦時間とともに徐々に摩擦面の温度は上昇し、一定値に安定する。その一方で、摩擦力は時間とともに徐々に減少し、温度が安定し始めるとほぼ同時に安定し始める。
- 長時間摩擦により摩擦力が安定した後、作業を中断し、再び作業を行う場合、この後の摩擦挙動は中断時間に左右される。短い中断の後、再度作業を行うと、中断前と同じ安定した摩擦力がそのまま持続する。一方、長い中断の後再度作業すると、最大値が作業開始直後に表れ、摩擦時間とともに徐々に摩擦力が減少し、安定する。

この実験結果を考察すると、摩擦係数の減少は熱の影響が大きく、摩擦面の温度が上昇すると、摩擦面を構成する真実接触部の固さが軟らかくなり、摩擦力は小さくなるが、熱的平衡状態とともに摩擦力は安定することが考えられる。

4 摩擦係数と吸収エネルギー量との相関性 真実接触部における温度を測定することは非常に困難であるため、本研究では温度の代わりとして吸収エネルギー量を指標として用いることにする。本研究で用いた実験結果に関して、まず入力加速度振幅および周波数を変化させた5回の正弦波加振時の摩擦係数時刻歴を図2示す。これは同じ日に2~3分の間隔を空けて連続して行ったものであり、Pleskachvsky らの「長い中断の後再度摩擦する」という実験条件に相当するものとみなすことができる。図下には摩擦

キーワード 滑り型免震支承、なじみ現象、数値モデル

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

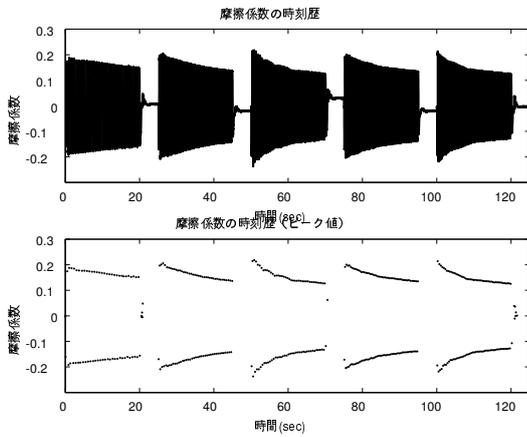


図 2: 摩擦係数の時刻歴（一日分）

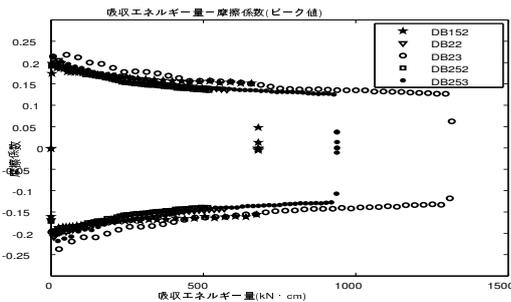


図 3: 吸収エネルギー量 - 摩擦係数（ピーク値）

係数のピーク値のみを表したものも示すが、これを見ると各加振時において、ほぼ同じ摩擦係数減少傾向が確認できる。このピーク値について、横軸を吸収エネルギー量で整理し、重ね合わせたものが図3である。各実験ケースによって、ピーク値の滑り速度と面圧が異なるものの、その包絡線は同様であり、面圧や速度とは別のパラメータ（熱）に関する相関性の高さが確認できる。この包絡線の減少傾向をなじみ現象としてモデル化する。

5 なじみ現象を考慮した摩擦係数変動モデルの提案 摩擦係数のピーク値の包絡線をなじみ項として次式でモデル化する。

$$\mu(\mu_{st}, E) = \frac{\Omega}{\lambda - \exp(-\beta \cdot E)} \times \mu_{st} \quad (2)$$

ここで、包絡線が800kN・cm以上で安定し、定常状態であるとみなせることを踏まえて、 μ_{st} は定常状態（本試験体では800kN・cm以上）の摩擦係数の平均値とし、 E は吸収エネルギー量(kN・cm)、 Ω 、 λ 、 β は材料パラメータである。

モデルパラメータの同定法は次の通りである。まず、なじみ項に関するパラメータを最小二乗法で同

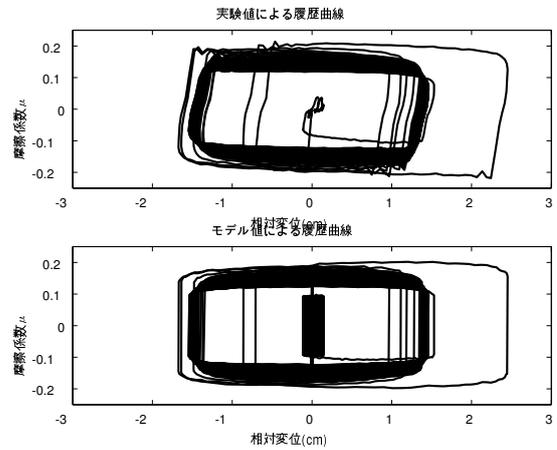


図 4: 履歴曲線の比較

定する。次に、面圧に関するパラメータを同定する。この際、なじみ項を用いて、全ての摩擦係数を定常時のものに換算した摩擦係数を用いる。さらに、過去に提案したモデルが滑り速度が十分大きいとき、滑り速度項が1に近づくことを利用し、 n 以外のパラメータを同定する。最後に、面圧を固定し、速度項を同定する。以上より、本試験体では、 $\Omega = 2.0732$ 、 $\lambda = 2.2472$ 、 $\beta = 0.0017$ 、 $s' = 0.8091$ 、 $k = 0.0879$ 、 $\alpha = 0.0871$ 、 $n = 0.0593$ となった。

6 履歴曲線の比較 以上で提案したモデル式、パラメータを用いた履歴曲線を描くことで、実験値と比較した。その図が図4である。ここで、上図が実験値、下図がモデル値の履歴曲線である。これを見て分かるように、実験値に見られるみかけの1次剛性を除いて、細部までほぼ再現できていることがわかる。これにより、モデルの妥当性が検証された。

7 結論 振動台実験結果より摩擦係数の減少の仕方と摩擦面の温度との相関性に着目し、なじみ現象について考察した。さらに、なじみ現象を吸収エネルギー量をパラメータとした項としてモデル化し、摩擦係数変動モデルを改良した。その結果、実験値を精度良く再現することができた。

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，2003.
- [2] Y. Takahashi, et. al.: Shaking table test for frictional isolated bridges and tribological numerical model for frictional isolator, Proc. of 13WCEE, Paper No.1531, 2004.
- [3] Yu.M.Pleskachevsky,V.A.Smurugov:Thermal fluctuations at PTFE friction and transfer,Wear 209 123-127,1997.