

なじみ現象を考慮した滑り型免震支承に関する 数値モデルの開発

高橋良和¹・日比雅一²・家村浩和³

¹京都大学工学研究科助手 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail:yos@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²NECシステムテクノロジー(株) (〒540-8551 大阪市中央区城見1-4-24 NEC関西ビル)

³京都大学工学研究科教授 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail:iemura@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

近年数多く採用されるようになってきた滑り型免震支承は摩擦現象により減衰効果を期待するものであるが、その摩擦現象(摩擦係数)は面圧や滑り速度に依存することが明らかとなってきている。著者らはこれらを数値的にモデル化するために、トライボロジー分野における凝着説および支承材料特性に基づく面圧・速度依存型モデルを提案している。しかしながら提案したモデルは定常状態の摩擦挙動を対象としており、地震が発生して滑り開始直後の摩擦係数の減少を説明することはできない。そこで本研究では、なじみ現象に着目し、温度依存性を考慮した数値モデルを提案・検証するものである。

Key Words: 滑り型免震支承, 複合依存性, 数値モデル, なじみ現象, 温度依存

1. はじめに

近年、摩擦現象によってエネルギー吸収を期待した滑り型免震支承が着目されつつあり、従来のゴム系免震支承と同等の免震効果を発揮する支承と期待されている。

摩擦は最も身近な物理現象の一つであり、以下のような摩擦法則が成立することが、Amontons(1699)やCoulomb(1785)により提案されており、Coulombの摩擦法則として広く認知されている。

1. 摩擦面は接触面に加えられる垂直荷重に比例する。
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。

しかしながら、このCoulombの摩擦法則は経験則であり、そのメカニズムはよく分かっているとは言えない。その一方で、過去の支承実験から、面圧や滑り速度等々の摩擦面における環境下の変化にしたがって、摩擦係数が変化することが報告されている。これら摩擦係数の変動について、支承実験の結果を用いてモデル化を行っている報告は多い。しかしながら、そのモデル式は実験式であり、理論に基づくものは少ないのが現状である。

著者らは、トライボロジー(摩擦学)分野における凝着理論を背景に、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いる^{1,2)}。しかしながら本数値モデルでは定常状態にある摩擦現象を精度よく再現できるものの、実験でよく観察される滑り出し直後の摩擦係数の減少を表現することはできない。そこで本研究では、摩擦の繰り返しによる摩擦係数の変動理由としてなじみ現象に着目し、モデル式の改良を行い、検証するものである。

2. 過去に提案しているモデル

(1)面圧・滑り速度依存型モデル

摩擦現象は機械や材料また土木・建築分野などにまたがる学際的な分野であり、トライボロジー分野とも呼ばれている。現在では、摩擦理論としてはBowden-Taborらによる凝着説³⁾というものが主流となっている。凝着説とは、摩擦表面を微細な視点で見た場合、摩擦面は凹凸しており、真に接触している面積はみかけよりも非常に小さい(真実接触面積)ことから、接触部には非常に大きな圧力がかかり、接触部では凝着が生じている。この凝着をせん断するのに必要な力が摩擦力である、というものである。この凝着理論および滑り型摩擦支承の滑り面材料としてよく用いられているPTFEとSUSの材料特

性を組み合わせ、滑り型免震支承の面圧・滑り速度依存型モデルを提案した。提案した摩擦係数モデルは以下の通りである。

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

ここで V は滑り速度、 P は荷重を見かけの面積で除した面圧であり、 s' 、 n 、 k 、 α はPTFE材料特性に関するデータである。特に s' 、 n は速度、 k 、 α は圧力に関するパラメータである。これらパラメータは、面圧一定下で滑り速度を変化させた実験および滑り速度一定下における面圧を変化させた実験という、最小限の実験ケースで同定できるようになっている。

本式の妥当性を検証するため、様々な研究者によって行われた過去の研究論文より得られた実験データ、および京都大学防災研究所3次元振動台による実験データを用いて検証した²⁾。以上の検証より、定常時（摩擦が開始してから十分時間がたって、摩擦の変動の様子が安定している状態）におけるこの提案モデル式の妥当性が確認されている。

(2) 提案モデルの問題点

図-1に、正弦波2.5Hz 300galを入力したケースにおける摩擦係数の時刻歴、滑り速度の時刻歴、面圧の時刻歴、相対変位の時刻歴を示す。これを見ると分かるように、正弦波加振のため、滑り速度、面圧、相対変位はほぼ同じような周期性のある挙動を繰り返し、ピーク値もほぼ一定であるのに対し、摩擦係数の時刻歴を見ると、そのピーク値は徐々に減少している。つまり、滑り速度、面圧といった摩擦係数の依存性に関する項目がほぼ一定値を示しているにも関わらず、摩擦係数は違った値になることを示している。

また図-2に、連続して行った振幅や周波数の異なる5回の正弦波加振による摩擦係数の時刻歴とそのピーク値のみをプロットしたものを示す。各加振はおよそ3～4分間隔で行った。この図より、実験中は徐々に摩擦係数が減少しているものの、中断後毎回摩擦係数は再び大きな値を示し、徐々に減少していることがわかる。

以上のような現象は、従来提案していた面圧・速度依存型モデルでは再現できないものである。そこで本研究では、摩擦係数の変動理由として、新たになじみ現象に着目した。

3. 摩擦係数のなじみ現象

摩擦係数におけるなじみ現象を改めて定義しておく。滑り直後は摩擦係数が大きな値をしめしていたものが、摩擦とともに徐々に減少し、摩擦面がなじむことでほぼ一定値に収束する、この一連の現象をなじみ現象として取り扱う。ここでいうなじみとは摩擦面が磨耗していくことと異なり、一度摩擦を停止し、再び開始するとほぼ同じ現象が再現されるこ

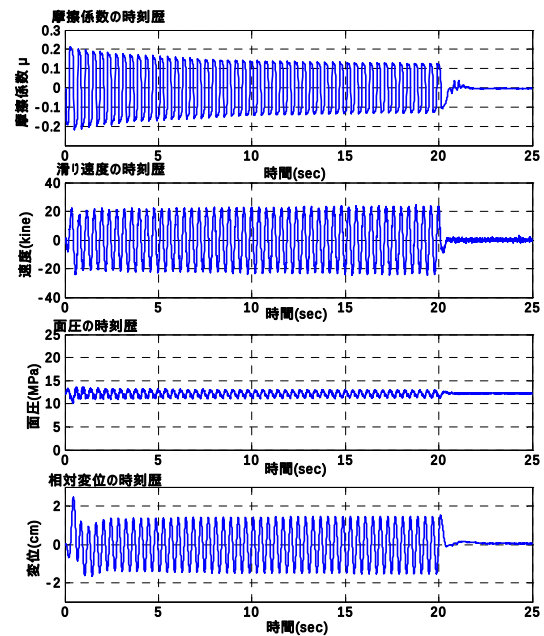


図-1 摩擦係数の時刻歴、滑り速度の時刻歴、面圧の時刻歴、相対変位の時刻歴（2.5Hz 300gal入力）

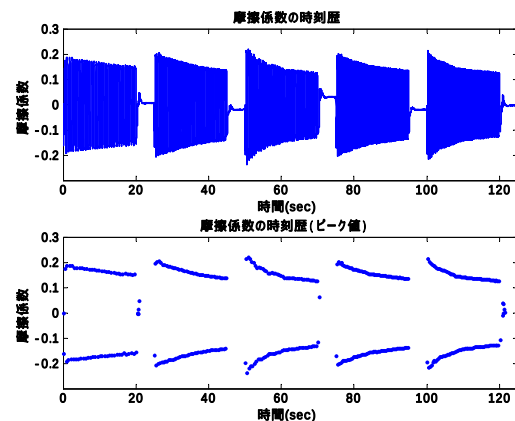


図-2 連続して正弦波加振した実験における正弦波摩擦係数の時刻歴とそのピーク値

とをいう（例えば図-2）。

従来行われている実験においてもこのような現象は確認されており、研究者によって繰り返し回数依存性などと呼ばれることもある。しかしながら、繰り返し回数というものは、物理量ではなく、定量的に扱うことはできない。Pleskachvsky-Smurugovらは、PTFEの扇形リングをスチール製のローラ - に一方に擦りつけ、摩擦面の温度や摩擦力、摩擦時間を計測した⁴⁾。この実験では一方に摩擦しており、ローラの滑り速度や擦りつける荷重、室温の温度調整は自由にでき、滑り距離と摩擦係数の関係を検討した。その結果、試験中断時間が長いと摩擦係数は回復するが、中断時間が短いと摩擦係数が回復せず、中断直前とほぼ同じ値を示すことから、摩擦係数変動の原因として、摩擦面温度を挙げている。

この温度依存性の物理的意味を考えると次のよう

になる．まず温度上昇により滑り面を構成する材料 (PTFE) が軟化し、せん断強度が減少する．凝着説では摩擦力は次式で表している．

$$F = sA \quad (2)$$

ここで s は摩擦面を構成する材料の軟らかい方のせん断強度、 A は真実接触面積である．(2) 式を見ると分かるように、 s の減少は直接摩擦力の減少につながり、温度上昇に伴う摩擦力 (係数) の減少を表すことになる．摩擦に伴う温度上昇は、摩擦面からの放熱と平衡するところで収束し、摩擦係数もある値に収束することとなる．摩擦が停止して温度が常温まで低下すると、再び初期の材料せん断強度に回復するため、摩擦係数も回復することとなる．

さて、このように温度が与える影響は大きい、実際に実験等で接触部の温度を計測することは非常に困難である．これは摩擦はみかけの接触面積ではなく、はるかに小さな真実接触部で生じているので、この部分の温度を計測する必要があるためであり、試験体に取り付けた計測器が示す温度は真実接触部における温度よりはるかに小さなものとなり、参考程度にしかならない．そこで本研究では温度情報を代替するものとして、熱量を発生させる原因となる支承の吸収エネルギー量を指標とすることとした．

5. なじみ現象の確認

図-2 に示した正弦波加振の摩擦係数の時刻歴について、横軸を吸収エネルギー量に変換したものを図-3 に示す．この図を見ると、加振条件 (入力加速度振幅、周波数) が異なる場合においても、なじみ現象の傾向はほぼ同じであることが分かり、先に示した物理的解釈が誤りでないことを裏付けている．つまりなじみ現象は加振条件に関わらず、温度上昇に関するエネルギー吸収量を変数とする1つの包絡線で表すことができる可能性を示している．

6. 吸収エネルギー量と速度依存性との相関

摩擦に関する速度依存性について、数多くの実験的研究が行われているが、実験結果を元に速度依存曲線を同定するには、困難な作業であるのが現状である．これは摩擦係数のばらつきは大きく (例えば図-4、正弦波2.5Hz 300gal加振)、平均値を通る線は求められても、その分散は大きなものとなり、求めた関数の信頼性が低いように思われるためである．このばらつきは、温度依存すなわち吸収エネルギー量を考慮すると小さくすることができる．図-4 に示した実験結果に対し、吸収エネルギー量 100kN・cm単位で区切り、順次示したのが図-5 である．これらの図を一つずつ見ていくと、図-4 ではばらつきが大きかった摩擦係数が、吸収エネルギー量で区切るとばらつきが小さくなること、また吸収エネルギー

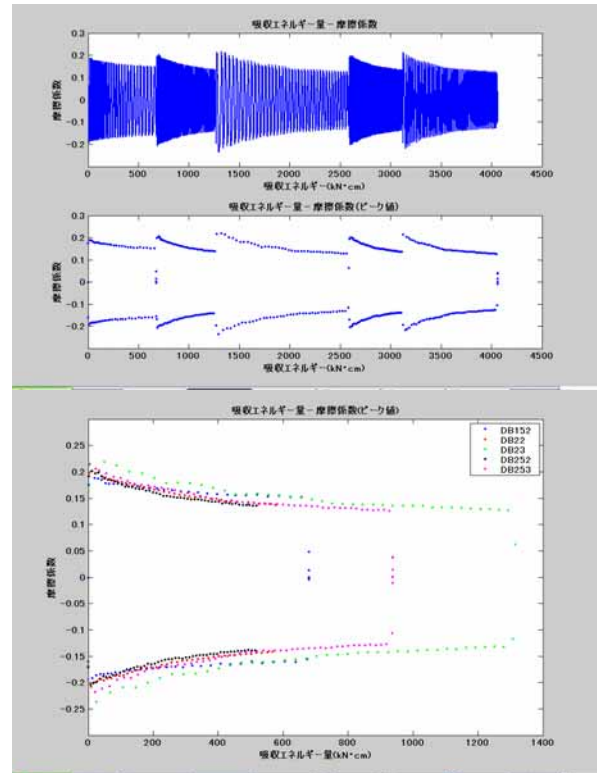


図-3 吸収エネルギー量 - 摩擦係数関係

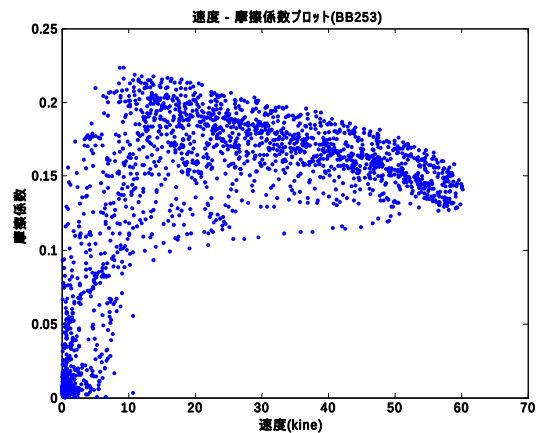


図-4 滑り速度 - 摩擦係数関係

ことなどが分かる．これらグラフを同一グラフ上に表すと図-6 のようになる．これより、滑り出し直後の吸収エネルギー量が小さい場合には摩擦係数が大きく、また速度が大きくなるにつれてピークを示した後減少すること、吸収エネルギー量が大きく平衡状態になったと考えられる場合には、摩擦係数の速度依存性は、従来よく用いられている一定値に収束する指数関数モデル、

$$F = a - \exp(-bV) \quad (3)$$

とよく一致することなどが分かる．これは式(1)でも用いている関数形である．ばらついて見える摩擦係数の値も、吸収エネルギー量による分類を適切に

行えば、精度良いモデル式を同定することが可能となる。

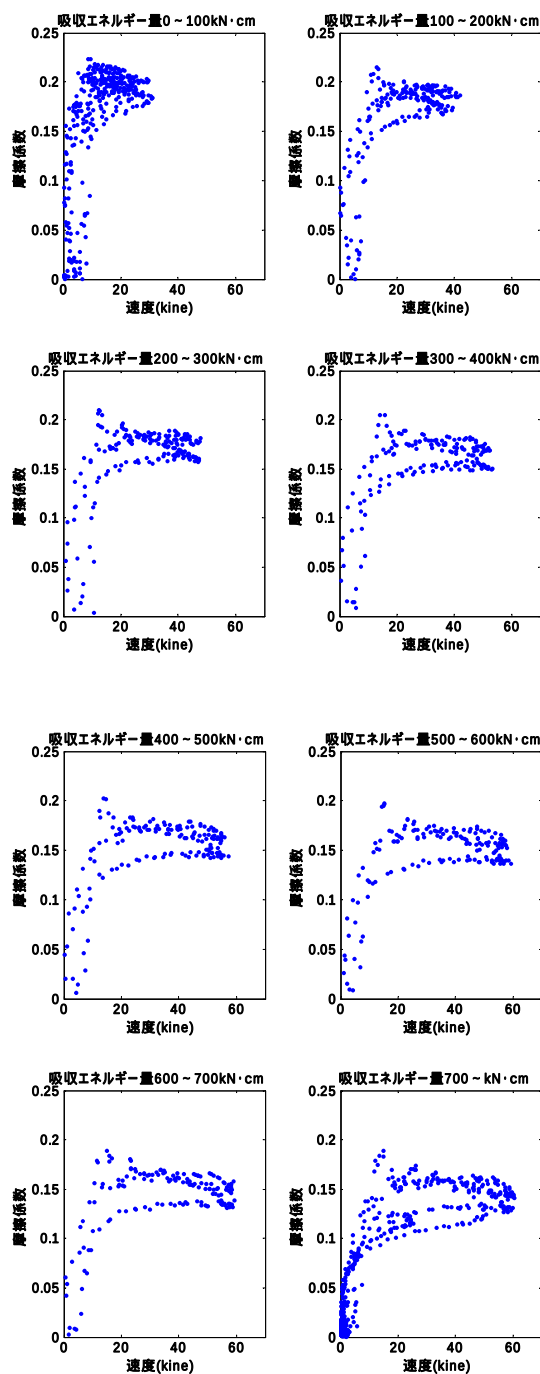


図-5 吸収エネルギー量別に分解した図-4 の摩擦係数の速度依存性

7. なじみ現象を考慮したモデル式の提案

以上の検討に基づき、本設では従来提案していた摩擦係数モデルを拡張する。モデル式は、
・熱平衡状態における面圧・滑り速度依存モデル
・なじみ現象を表す吸収エネルギー量包絡線関数により構成される。

Proc. 28th JSCE Earthquake Engineering Symposium, 2005
熱平衡状態におけるモデルは、式(1)を用いる。
このモデルによる摩擦係数を μ_{st} と表し、次の包絡線

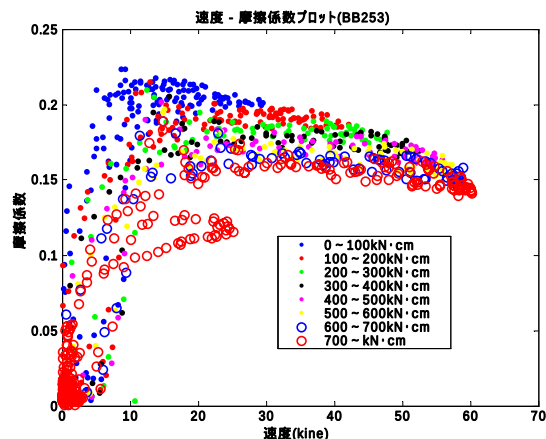


図-6 吸収エネルギー量別速度—摩擦係数関係

関数を乗じた、面圧・滑り速度およびなじみ現象を考慮した数値モデルを提案する。

$$\mu(\mu_{st}, E) = \frac{\Omega}{\lambda - \exp(-\beta E)} \times \mu_{st} \quad (4)$$

ここで、Eは吸収エネルギー量であり、他は熱に関する材料パラメータである。摩擦係数という無次元量に対し、エネルギーの関数となる包絡線を用いることには議論があるところであるが、ここで提案しているモデル式のパラメータは、実験により同定しようとしていること、また計測しやすい量を用いることを考え、式(4)の形で提案した。

式(1), (4)で表されるモデル式のパラメータを同定する方法は以下の通りである。

1. 面圧を固定し、滑り速度を変化させた試験を行う。その際、摩擦係数のなじみ現象を確認しながら、熱平衡状態になったと思われる実験結果を用いて、滑り速度—摩擦係数関係を作成する。この関係より、パラメータs, nを同定する。
2. 先の実験より摩擦係数がほぼ一定となる滑り速度を用い、面圧を変化させた試験を行う。熱平衡状態における値を用い、面圧—摩擦係数関係を作成し、面圧に関するパラメータk, α を同定する。
3. 1.あるいは2. で実施した試験より、なじみ現象を表す包絡線パラメータを同定する。

以上の方法より、最小限の試験数により数値モデルを決定することができる。

8. 実験結果との比較

前節で提案したモデル式・パラメータ同定法に基づき、振動台実験結果の再現を試みる。実験では

PTFEとSUSの組み合わせによる滑り型免震支承を用い、入力加速度の最大値や周波数を変化させたデータを収集した。その結果、同定したパラメータは、 $\Omega = 2.0732$ 、 $\lambda = 2.2472$ 、 $\beta = 0.0017$ 、 $s' = 0.8091$ 、 $n = 0.0593$ 、 $k = 0.0879$ そして $\alpha = 0.0871$ である。

図-7から9に、実験結果と上記パラメータを用いた数値モデル結果を示す。数値モデルには実験により得られた速度・面圧を入力値として与えている。図-7は正弦波加振によるものであり、始めに大きく応答し、その後ほぼ一定振幅で振動しているものであるが、特に一定振幅時における摩擦係数の現象をうまく表現できていることが分かる。図-8は同じく正弦波加振であるが、振幅が徐々に大きくなっていくケースである。この場合は図-6と大きく履歴形状が異なるものの、同じパラメータでよく実験を再現できていることが分かる。図-9は地震波入力したものである。振幅や速度は大きく変動しているケースであるが、実験値を精度よく再現できている。以上より、面圧・速度および温度が変化する場合におけるPTFE-SUS系滑り型免震支承の摩擦係数を提案モデルにより表現できていることを確認した。

1 1 . 結論

- 従来提案している滑り型免震支承の摩擦モデルを拡張し、面圧・速度依存モデルになじみ現象を考慮した包絡線に乗じるモデルを提案した。なじみ現象は接触部における温度上昇に伴う材料のせん断強度低下に起因するものであるが、温度の測定が困難であるため、履歴吸収エネルギー量で代替し、その現象を表現した。
- 摩擦係数のばらつきが大きい実験においても、履歴吸収エネルギー量により分類すると、ばらつきの小さなデータを得られることを明らかにした。
- 提案する摩擦モデルのパラメータを同定する手順を示し、少ない試験数で同定することができることを示した。

正弦波および地震波を入力した振動台実験結果と本提案モデルによる滑り型免震支承の履歴を比較し、大きく速度・面圧等摩擦面条件が変化する場合でも同じパラメータで精度よく再現できることを示した。

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, 土木学会関西支部年次学術講演概要, I-62, 2003.
- 2) Takahashi, Y., Iemura, H., Yanagawa, S. and Hibi, M.: Shaking table test for frictional isolated bridges and tribological numerical model for frictional isolator, *Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, No.1531, DVD-ROM, 2004.
- 3) Bowden, F. and Tabor, D.: 固体の摩擦と潤滑, 丸善, 1961.
- 4) Pleskachevsky, Y.M. and Smurugov, V.: Thermal

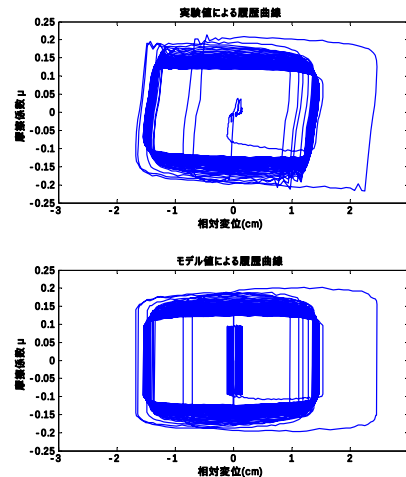


図-7 正弦波加振(1)による実験結果とモデルの比較

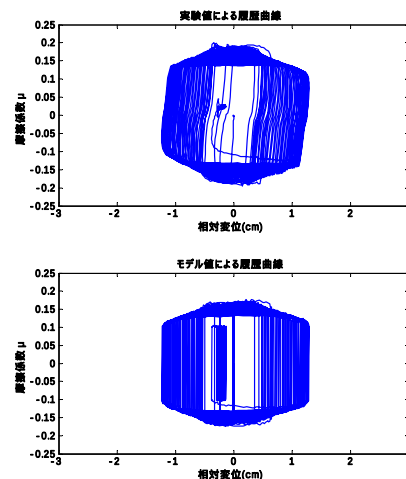


図-8 正弦波加振(2)による実験結果とモデルの比較

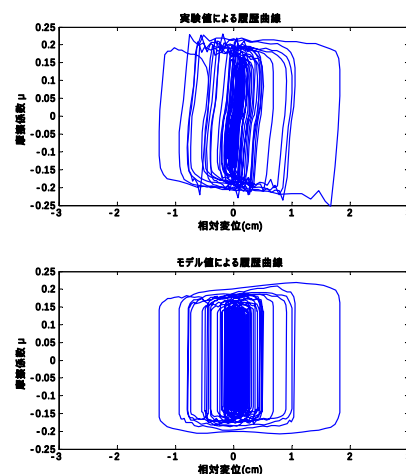


図-9 地震波加振による実験結果とモデルの比較

(2005. 6. 16 受付)

NUMERICAL MODEL FOR FRICTIONAL ISOLATOR UNDER VARIATIONAL VELOCITY, PRESSURE AND TEMPERATURE

Yoshikazu TAKAHASHI, Masakazu HIBI and Hirokazu IEMURA

In the present study, in order to express the normal pressure and sliding velocity dependency of frictional force, the numerical model was developed based on the tribology theory and the property of materials. This model could show the good agreement with the experimental results in the stationary vibration state, but it is impossible to present the decrease of the friction coefficient just after the beginning of frictional motion. Taking account with the temperature characteristics, the proposed model is revised. Since it is very difficult to measure the temperature at the real contact area, the hysteresis energy of the isolator is used instead of the temperature. Compared with the experimental results, it is found that the numerical model can simulate well the behavior of frictional isolators under variational normal pressure, sliding velocity and temperature.