各種依存性を考慮した滑り型免震支承の数値モデルに関する一考察

Numerical model for frictional isolator considering multi-dependencies

高橋良和*・日比雅一**・家村浩和***

Yoshikazu TAKAHASHI, Masakazu HIBI and Hirokazu IEMURA

*正会員 工博 京都大学助手 工学研究科都市社会工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

**正会員 工修 NEC 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)

***フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

From the results of the past experiments, it is reported that the friction force and coefficient of frictional isolators are strongly dependent on the sliding velocity and pressure. In addition to them, the temperature is also the important factor for the property of materials. In this study, based on the tribology theory, a numerical model for frictional isolators, which consist of PTFE and SUS, is proposed. Compared with the experimental results of the shaking table tests, it is found that the model can simulate well the behavior of frictional isolators under variational normal pressure, sliding velocity and displacement.

Key Words : Frictional isolator, numerical model, tribology, multi-dependencies

1. はじめに

摩擦は最も身近な物理現象の一つであり、次のような摩擦特性は良く知られている。

1. 摩擦力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は無関係である。
3. 摩擦力は滑り速度には無関係である。
4. 静摩擦力は動摩擦力より大きい。

これは Amontons - Coulomb の法則、通称 Coulomb の法則として知られているものである。このような摩擦特性を利用して、土木・建築分野では滑り型免震支承が開発、供用されている。地震応答解析を行う場合、この摩擦特性をモデル化する必要があるが、Coulomb の法則に基づいた剛塑性あるいは実用的にはバイリニア型履歴特性¹⁾が用いられるのが一般的である。

しかしながら Coulomb の法則は経験則であり、そのメカニズムについてはまだ良く分かっているとはいえない²⁾。これは摩擦というものが理学と工学の学際的な学問であり、物理学においては摩擦を無視してニュートン力学が体系づけられてきたことも一因であろう³⁾。摩擦機構／理論についての理解が進んできたのは、Bowden - Tabor らによる一連の研究⁴⁾が進められてきた 1940 年代以降のことである。摩擦現象に関する理解が深まるにつれ、速度、面圧に関する依存性に着目した研究も進められてきた。滑り型免震支承に関する研究では、Mokha, Constantinou らは PTFE(四フッ化エチレン)と SUS (ステンレス)の摩擦現象に与える様々な要因について実験的研究を行い、特に摩擦係数の滑り速度依存性モデルを提案している^{5),6)}。岡本らは、滑り型免震システムを有する橋梁に対して実験のおよび解析的研究を行い、橋梁の応答変位や応答加速度には摩擦係

数の滑り速度依存性の影響は大きくないが、水平・上下動作用下では、上下動の影響を考慮しない場合に比べ鉛直荷重が大きく変化するため免震装置の摩擦力が変動し、応答が大きくなる場合もあること、などを明らかにした^{7),8),9)}。また面圧依存性については Mokha らも指摘しているが、富島ら¹⁰⁾は面圧が大きくなるにつれて摩擦係数が線形的に減少していくモデルを要素試験結果より提案している。しかしながら過去に提案されたモデルの多くは実験データより面圧や速度と摩擦係数との関係を直接フィッティングして導かれたものであり、その関数形やパラメータに理論的背景や物理的意味は特にないものがほとんどである。著者らは滑り型免震支承のモデル化の出発点を面圧、速度依存性の発生原因となる摩擦接触部の特性に関する実験に置き、その結果をトライボロジー^{4),11)}における凝着理論に基づき、複数の接触部による接触面からなる免震支承の挙動を解析し得るモデル式を提案した^{12),13)}。姫野らもまた同理論を用いたモデルを提案している¹⁴⁾。

現在の耐震設計では、性能設計法が積極的に採用されている。性能設計を成功させるためには、個々の性能を正しく評価する必要がある、特に減衰性能が期待される免震支承のモデル化は構造全体系の耐震性を正しく評価する上で極めて重要である。本研究では、従来取り組まれてきた速度・面圧依存性に加え、温度依存性を考慮した滑り型免震支承のモデル化を目的とし、凝着理論に基づく定式化について考察するものである。

2. 滑り型免震支承

滑り型免震支承は、摩擦機構によりエネルギーを吸収することを期待した支承であり、滑り面は PTFE と

図-1 真実接触面積

図-2 凝着

SUS とを接触させたものが多い。PTFE は高分子材料であり、その構造は $(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$ で表され、炭素とフッ素から成り立っている。フッ素原子は電気的陰性度が大きく、分子鎖は熱的にも化学的にも安定であり、また他の化合物に対して親和力が極めて小さい。また PTFE の結晶は独特なバンド構造をしていることから、潤滑性に優れており、また極めて安定していることから、固体潤滑剤として広く用いられている。低摩擦係数を目標とする場合には他の組合せの材料が用いられる場合もあるが¹⁵⁾、本研究ではこの PTFE と SUS の組合せによる免震支承を対象とする。

3. 凝着理論

摩擦に関する法則性が確定してきた Amontons の時代には、表面の凹凸の噛み合いが摩擦の原因であると考えられてきたが、加工技術が高まるにつれ、凹凸説を否定する事実が次々に明らかになり、摩擦機構の説明としては凹凸説から凝着説へと移ってきた。

固体の表面はどんなに平らに見えても細かく見れば凸凹している。この凹凸のため、二つの固体が接触している部分は、特に金属同士の接触においては、見かけの接触面積に比べ非常に小さいものとなる(図-1)。この接触点の面積は真実接触面積と呼ばれている。

真実接触部においては非常に大きな圧力が作用するので、摩擦面同士の化学的親和性により、二つの固体を形成する分子の分子間力によって凝着が起こっている(図-2)。この凝着部をせん断するのに必要な力が摩擦力である、という摩擦機構を Bowden-Tabor が提唱した⁴⁾。これは凝着理論と呼ばれ、次式で表される。

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

ここで、 s は凝着部をせん断するために必要なせん断強さ、 A_r は真実接触面積である。

図-3 Hertz 接触

また硬い物体の突起が軟かい物体の中に押し込まれた状態で互いに滑るためには、前面にある部分を掘り起こさねばならない。これに必要な力もまた摩擦力となり、摩擦力は凝着項と掘り起こし項の和と表されるが、一般に機械要素として使用される摩擦面の表面粗さは小さいため、掘り起こし項は凝着項に比較して小さく無視できる。したがって滑り摩擦力は凝着項で近似できる。この式(1)が、本研究で提案するモデルの基本式となる。式(1)によると、接触部の真実接触面積 A_r とせん断強度 s の特性が摩擦力に大きく影響を与えることになる。

4. 面圧依存性に関する考察

Coulomb の法則によると、摩擦係数は面圧によらず一定であるが、様々な要素試験結果より、PTFE と SUS 間の摩擦(係数)には面圧が大きいほど摩擦係数が小さくなるという、面圧(荷重)依存性があることが報告されている。本節ではこの面圧依存性について、接触問題および材料特性の観点から考察する。

4.1 接触問題

先にも述べた通り、一般に面接触をしていると考えられる 2 物体間の接触は、実際には真実接触部の接触の集合となる。この 1 つの真実接触部は集中(点)接触と見なすことができ、弾性接触時の集中接触の応力解析は、Hertz によって理論解が導かれたので、Hertz 接触とも呼ばれている。

ヤング係数 E_1, E_2 、ポアソン比 ν_1, ν_2 、半径 R_1, R_2 の 2 つの球が荷重 W_i で接触する場合(図-3)の接触部(円)の面積 A_i は次式で表される。

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

ここで R および E は等価曲率半径、等価ヤング係数と

図-4 見かけの面接触

呼ばれ、

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (4)$$

となる。式 (2) より、弾性接触の場合は個々の真実接触面積が鉛直抗力 W_i の $2/3$ 乗に比例していることになる。

一方、接触面全てが塑性変形をしていると考え、その塑性流動圧力を p_m とすると、外力との釣り合い式は、

$$p_m A_i = W_i \quad (5)$$

すなわち接触面積は、

$$A_i = \frac{W_i}{p_m} \propto W_i^1 \quad (6)$$

となり、鉛直抗力 W に比例する。

以上の点接触問題を（見かけの）面接触へと拡張する。実際の面接触は個々の真実接触面積の集合であるので、見かけの面接触における真実接触面積は、先に示した点接触の集合として得ることができる。真実接触部では滑り出す前には高い圧力のため完全に塑性接触をしているが、繰返し摩擦されることで摩擦面も次第に馴染み、定常状態に達した後は突起間の接触は弾性変形の範囲に留まり、荷重は弾性的に支持されるようになると考えられる。姫野らによるモデル化は¹⁴⁾、Hertz 接触している点接触部が面に一様に分布していると仮定し、これより面接触時における摩擦係数の面圧依存性を導出している。しかしながら、これでは一般的に支持されている Coulomb の法則を説明できないことになる。弾性接触時における Amontons-Coulomb の法則との矛盾を、Greenwood-Williamson は統計的扱いを行なうことにより説明している¹⁷⁾。彼らは粗面の粗さ突起 (asperity) をすべて同じ曲率半径 R を持つ球状突起と仮定し、その高さ分布は統計的分布に従うものと仮定し（図-4）、弾性接触の場合もみかけの面接触における真実接触面積を導出した。高さ分布の確率密度関数を指数分布とするとみかけの面接触における真実接触面積の和の期待値が閉じた形で導かれ、接触荷重との関係は次のように表される。

$$A_r = \sqrt{\pi} E^{-1} (\sigma/R)^{-1/2} W \propto W^1 \quad (7)$$

つまり面接触においては真実接触面積 A_r は鉛直抗力 W に比例することが分かり、接触問題だけを取り扱う場合、Coulomb の法則を支持する結果を得る。

4.2 PTFE の材料特性

接触問題による考察の結果は、滑り型免震支承の面圧依存性を説明できないことになる。滑り型免震支承の摩擦機構をミクロ的に見ると、PTFE と SUS の凝着部のせん断であり、PTFE 側の摩擦面に極めて近いところでバンド構造のせん断が生じ、PTFE が SUS 側に移着することにより安定した滑り面が構成される。つまり PTFE の材料特性が摩擦特性に大きく影響を与えることから、本節では材料特性に着目した面圧依存性の考察を行う。

高分子材料の薄膜に関する研究より、せん断強さ s は次のように平均圧力 P_r 、滑り速度 V の関数として次式が提案されている¹⁸⁾。

$$s = s'_0 \ln(V/h\phi) + \alpha_0 P_r \exp(-V/d\theta) \quad (8)$$

ここで h は薄膜厚、 d は接触長さ、その他はある温度における定数である。これを簡略化した式、

$$s = s_0 + \alpha P_r \quad (9)$$

は滑り速度などの変数を一定にした場合の多くの高分子材料のせん断強さに関する実験結果と良い近似を示している。摩擦係数は式 (1),(9) より、

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{s A_r}{W} = \frac{s}{P_r} = \frac{s_0}{P_r} + \alpha \quad (10)$$

と表せる。つまり、高圧力の範囲では、摩擦係数は一定になるが、 s_0 が大きい時（凝着が強い時）や荷重が大きく変化する時には、Amontons-Coulomb の法則は破れることを意味している。

PTFE のヤング係数は SUS に比べて極めて小さく（600 ~ 800 MPa 程度。SUS は 200 GPa 程度）、塑性流動圧力 p_m も純テフロンで約 25 MPa、充填剤入りテフロンで 30 ~ 50 MPa であるため¹⁹⁾、金属同士の接触に比べて真実接触面積は極めて大きなものとなると考えられる。PTFE では高荷重下では見かけの接触面積に漸近して飽和するようになり、これが面圧依存性の一要因であると考えられる。

この面圧依存性について過去に実施された試験結果を元に検証する。滑り型免震支承については数多くの実験がなされており、ここでは速度および面圧依存性が確認できる実験として、Mokha ら⁵⁾、富島ら¹⁰⁾、鶴野ら²⁰⁾、中村ら²¹⁾、江森ら²²⁾、河合ら²³⁾そして遠山ら¹⁵⁾の論文より 15 タイプの支承のデータを抽出し、新

表-1 データセット一覧

データセット名	PTFE	受圧面積	特記事項
mokha90-1	Unfilled, ϕ 253mm, 厚さ 3.175mm	0.0502m ²	より目に沿って载荷
mokha90-2	Unfilled, ϕ 253mm, 厚さ 3.175mm	0.0502m ²	より目直角に载荷
mokha90-3	15% Grass-filled, ϕ 253mm, 厚さ 3.175mm	0.0502m ²	より目に沿って载荷
mokha90-3	25% Grass-filled, ϕ 253mm, 厚さ 3.175mm	0.0502m ²	より目に沿って载荷
tomishima95-1	充填材補強, ϕ 5.0cm	0.00196m ²	
tomishima95-2	充填材補強, ϕ 44.0cm	0.152m ²	
tomishima95-3	充填材補強, ϕ 150mm	0.0177m ²	
tomishima95-4	充填材補強, ϕ 150mm	0.0177m ²	
uno98-1	純テフロン, ドーナツ状 ϕ 475mm	0.0810m ²	
uno98-2	補強材入り, ドーナツ状 ϕ 475mm	0.0810m ²	
uno98-3	充填材入り, ドーナツ状 ϕ 475mm	0.0810m ²	
nakamura98	純テフロン, ϕ 85mm, 厚さ 1.2mm	0.00567m ²	
emori98	純テフロン, ϕ 100mm, 厚さ 2mm	0.00785m ²	
kawai99	充填材入り, ϕ 74mm, 厚さ 4mm	0.00430m ²	
toyama99	充填剤入り, ϕ 80mm, 厚さ 2mm	0.00502m ²

図-5 面圧依存性 (純テフロン)

図-7 真実接触面積と見かけの接触面積の比 (純テフロン)

図-6 面圧依存性 (充填剤/補強剤入りテフロン)

たにデータ整理を試みた。用いたデータセットを表-1に示す。

PTFE のタイプを純テフロンと充填剤/補強剤入りテフロンに分け、摩擦係数の面圧依存性を示したのが図-5, 図-6である。これを見ると、異なる実験であるが良い一致を示している。また圧力が小さい範囲では摩擦係数の変化率が大きい、圧力が大きくなるとその変化率は小さくなり、一定値に近づいてくことを示しており、式 (10) の考察と一致する。また式 (5)

と (10) より、

$$\mu = \frac{s}{p_m} = \frac{F}{W} = \frac{sA_r}{PA} \quad (11)$$

つまり、 $P/p_m = A_r/A$ なる関係があり、見かけの圧力と塑性流動圧力の比は真実接触面積と見かけの接触面積の比に相当する。図-5 の x 軸を純テフロンの塑性流動圧力 $p_m = 25$ MPa で除すると、図-7 を得る。これを見ると、PTFE は軟らかいため、圧力の増大とともに真実接触面積が増大し、ほぼ見かけの面積と一致する範囲では摩擦係数が一定値になることが分かる。つまり PTFE の真実接触面積の増大と摩擦係数の面圧依存性との間に密接な関連があることを裏付けている。

5. 速度依存性に関する考察

様々な実験結果より、PTFE と SUS 間の摩擦 (係数) には速度が小さい領域では摩擦係数は小さいが、速度が大きくなるにつれ摩擦係数も大きくなるという、速度依存性があることが報告されている。面圧依存性と同様に、速度依存性も PTFE の材料特性が大きな影響を与えていると考える。PTFE は高分子材料であるこ

とから、結晶構造と非晶構造からなるが、結晶構造は弾性を示し非晶部分は粘性を示すため、高分子に外力が加わると粘弾性挙動をする。つまり PTFE の変形は変形量だけでなく速度項に依存することとなり、これが速度依存性となって表れる。式 (8) においても、せん断強度 s に速度依存項が含まれている。

高分子材料の摩擦力 F における滑り速度依存性については、例えば次のような式が提案されている^{19),24)}。

$$F = a + bV^n \quad (12)$$

$$F = a - b \exp(-nV) \quad (13)$$

ここで V は滑り速度、 a, b, n は任意のパラメータである。粘弾性挙動をすることを考えると、式 (12) で表すことが一般的であると考えられるが、滑り型免震支承における従来の研究では、式 (13) タイプのモデルが用いられることが多い^{6),8),9)}。

6. 温度依存性に関する考察

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²⁵⁾。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。

摩擦作業の中断期間は、放熱時間と関係がある。つまり、中断期間が長いと摩擦によって得た吸収エネルギーを放熱し、摩擦面の温度が作業前と同等に戻るため、中断後の摩擦力は再び先の作業の時と同様大きなものとなる。一方、中断期間が短いと吸収エネルギーを放熱することなく作業に入るため、摩擦面の温度は中断前と同様で、摩擦力も中断前とほぼ同じ大きさとなる。以上より、摩擦係数の変動と摩擦面の温度変化に相関性があることがわかる。

著者らは滑り型免震支承を用いた振動台実験を実施している²⁶⁾が、図-8 に正弦波加振時の摩擦係数時刻歴

図-8 正弦波加振における摩擦係数時刻歴例

例を示す。本実験では応答振幅はほぼ一定であり、支承部における滑り速度、面圧の変動傾向が試験中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ていることがわかる。この特性については、過去の研究においても指摘されており、繰り返し回数依存性^{22),27)}として扱われる場合もあるが、温度依存性とするのが自然である。

高分子材料のせん断強度 s は温度が高くなるにつれ小さくなる。例えば式 (8) においても、温度に関するパラメータが考慮されているものの、真実接触部は微小であり、接触点での温度を測定することは不可能に近い。そこで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 (200, 300 gal) および周波数 (1.5, 2.0, 2.5 Hz) を変化させた 5 回分の正弦波加振時の摩擦係数時刻歴を図-9 に示す。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。図中には摩擦係数のピーク値のみを表したのもを示すが、これをみ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-10 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、再現性も高い。つまり面圧や速度とは別のパラメータ (温度) に関する相関性も高く、この包絡線の減少傾向を温度依存性として取り扱う。

7. 滑り型免震支承の数値モデルの構築

7.1 面圧・速度依存性モデルの構築

以上の知見を受け、まず面圧および速度依存性を考慮した滑り型免震支承の数値モデルの構築を試みる。ここでは真実接触部の面積や圧力ではなく、我々が計測しやすい見かけ量を用いた定式化を行う。

基本となる式は凝着理論に基づく式 (1) である。ここで面圧依存性に関する考察に従い、真実接触面積 A_r は軟らかい PTFE 材料特性のために大きな荷重ではみかけの面積に飽和していくと考え、面圧が大きい領域で 1 に漸近する関数を用いた次式で表現できるとする。

$$A_r = A [1 - \exp(-k'W)] = A [1 - \exp(-kP)] \quad (14)$$

図-9 連続5回行った実験における摩擦係数の時刻歴

図-10 吸収エネルギー量-摩擦係数 (ピーク値)

ここで、 A, P はそれぞれ見かけの接触面積、見かけの圧力である。荷重は真実接触面積 A_r 、見かけの接触面積 A を用いると $W = P_r A_r = PA$ と表せるので、式(14)により圧力 P_r は見かけの圧力 P を用いて次のように書ける。

$$P_r = \frac{P}{1 - \exp(-kP)} \quad (15)$$

せん断強さについては、面圧および速度依存性に関する考察に従い、式(8)、(13)を参考に、簡略化した次式を用いる。

$$s = s' (1 - e^{-nV}) + \alpha P_r \quad (16)$$

$$= s' (1 - e^{-nV}) + \alpha \frac{P}{1 - e^{-kP}} \quad (17)$$

以上を整理すると、式(1)、(14)、(17)より次のように摩擦係数、摩擦係数モデルを得る。

$$F = A_0 [s' (1 - e^{-nV}) (1 - e^{-kP}) + \alpha P] \quad (18)$$

$$\mu = s' (1 - e^{-nV}) \frac{1 - e^{-kP}}{P} + \alpha \quad (19)$$

ここで s', n, k, α は PTFE 材料特性に関するパラメータであり、特に s', n は速度、 k, α は圧力に関する係数である。

図-11 面圧依存性 (純テフロン)

図-12 面圧依存性 (充填剤/補強剤入りテフロン)

式(19)を用いて、速度に関するパラメータを固定し、表-1について補間したものが図-11、図-12である。純テフロンの場合 $k = 0.1807, \alpha = 0.0426$ であり、充填剤/補強剤入りテフロンの場合 $k = 0.0762, \alpha = 0.0208$ であった。これを見ても分かるように、実験データにおける面圧依存性をうまく表現できていることが分かる。

この面圧依存パラメータを用いて、速度依存パラメータを同定する。例えばmokha90-2のデータセットから、 $P = 6.9$ MPaのデータに対してパラメータを決めた。図-13中の実線が速度依存パラメータを推定したものであり、これにより決定した解析モデルを用いて各速度・面圧について推定したものが図中の点線である。速度が低いところについて、まだ実験結果を再現できていないところもあるが、速度が早い領域については良好に再現できている。

7.2 温度依存性を考慮した摩擦係数変動モデルの構築

温度依存性に関する考察に基づき、摩擦係数のピーク値の包絡線を温度依存項として次式でモデル化する。

$$\mu(\mu_{st}, E) = \frac{\Omega}{\lambda - \exp(-\beta \cdot E)} \times \mu_{st} \quad (20)$$

ここで、 μ_{st} は式(19)であり、定常状態より各種パラメータを同定したものとし、 E は吸収エネルギー量 (kN·cm)、 Ω, λ, β は熱に関する材料パラメータである。こ

図-13 mokha90-2 データセットの摩擦係数推定

ここで定常状態に乗じる関数形は、 E が大きな領域において 1 に漸近する関数であればよいが、本研究では熱平衡状態に関わる要因としては摩擦面面積、摩擦面およびその治具材料比熱特性、摩擦治具の形状などがあり、各種要因に対応できるよう、3つのパラメータを用いた関数を設定した。

モデルパラメータの同定法は次の通りである。まず、温度依存項に関するパラメータを包絡線より同定する。次に、面圧に関するパラメータを同定する。この際、温度依存項を用いて、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、式 (19) 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、振動台実験で用いた試験体では、 $\Omega = 2.0732$, $\lambda = 2.2472$, $\beta = 0.0017$, $s' = 0.8091$, $k = 0.0879$, $\alpha = 0.0871$, $n = 0.0593$ となった。

8. 履歴曲線の比較

式 (20) で提案したモデル式および同定した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。図-14 に実験における支承部の滑り速度・面圧・相対変位時刻歴および支承履歴を示し、同じ条件下の数値モデルによる履歴を示す。実験では、ボルト取付部等がわずかに変形することが除去できなかったことから、その履歴曲線に 1 次剛性が見受けられるが、この 1 次剛性を除き、その履歴特性をほぼ再現できていることがわかる。また同じ支承を用いた異なる実験条件による結果について再現したものを図-15 に示す。この場合においても同じパラメータを用いているにも関わらず精度よく再現できていることが分かる。

9. 結論

本研究では、凝着説に基づき、各種依存性を考慮した滑り型免震支承の摩擦力・摩擦係数の数値モデルの構築を試みた。まず面圧・速度および温度依存性のそ

図-14 実験による時刻歴と履歴曲線の比較 (2.5Hz 300gal)

れぞれについて、実験および理論より発生原因に関する考察を行った。面圧依存性については、接触問題による原因よりも PTFE の材料特性によるものが多い。つまり PTFE のヤング係数が SUS に比べて小さいため、鉛直抗力が大きくなるにつれて真実接触面積が飽和し、見かけの接触面積に漸近することが面圧依存の一因と考える。また速度依存性については、高分子である PTFE の粘弾性的性質によるものと考察できる。温度依存性についても PTFE の材料特性によるものと考察できる。

これら依存性には各種原因があるものの、真実接触部における面積や圧力および温度測定は困難であるため、測定できるみかけ量およびエネルギー吸収量を用いて数値モデルの構築を行った。実験結果と比較することにより、履歴特性を精度よく再現することができた。

図-15 実験による時刻歴と履歴曲線の比較 (2.5Hz 200gal)

参考文献

- 川島一彦：動的解析における摩擦力のモデル化に関する一考察，土木学会論文集，No. 309，p. 151，1981.
- 河野彰夫：摩擦のクーロンの法則はなぜ成り立つのか？どこまで成り立つのか？，固体物理，Vol. 36，No. 2，pp. 113-120，2001.
- 中野隆：摩擦－物理と工学の学際領域における摩擦研究－，固体物理，Vol. 35，No. 12，pp. 986-990，2000.
- Bowden, F. and Tabor, D.: 固体の摩擦と潤滑，丸善，1961. 曾田範宗 訳.
- Mokha, A., Constantinou, M. and Reinhorn, A.: Teflon Bearings in Base Isolation. I: Testing, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 2, 2 1990.
- Constantinou, M., Mokha, A. and Reinhorn, A.: Teflon Bearings in Base Isolation. II: Modeling, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 2, 2 1990.
- 岡本晋，藤井俊二，尾崎大輔，Constantinou, M., Tsopelas, P.: すべり方式免震システムを有する橋梁の動特性に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol. I-30，No. 507，pp. 167-177，1 1995.

- 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，Vol. I-31，No. 513，pp. 191-200，4 1995.
- 岡本晋：すべり方式免震橋梁の地震時挙動に及ぼす上下動の影響に関する基礎的検討，第23回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 517-520，1995.
- 富島誠司，大橋智樹，佐藤啓治：すべり支承方式の免震に用いるすべり材の動摩擦係数に関する研究，日本建築学会技術報告集，Vol. 1，pp. 140-145，12 1995.
- Persson, B.: *Sliding Friction*, NanoScience and Technology Series, Springer, 2nd edition, 2000.
- 田中寛人，家村浩和，高橋良和：滑り摩擦支承の荷重・速度依存性のモデル化，土木学会関西支部年次学術講演概要，pp. I-99-1-I-99-2，5 2002.
- 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，pp. I-62-1-I-62-2，5 2003.
- 姫野岳彦，運上茂樹：支承部における摩擦特性のモデル化とその評価式に関する検討，土木学会地震工学論文集，Vol. 27，2003. CD-ROM.
- 遠山幸太郎，東野雅彦，浜口弘樹，安部裕，冲芳郎：低摩擦特性のすべり支承に関する研究（その1）すべり支承の選定，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 697-698，9 1999.
- 高岡栄治，飯塚真巨：滑り支承と積層ゴムを併用した免震構法の開発，鹿島技術研究所年報，Vol. 44，1996.
- Greenwood, J. and Williamson, J.: Contact of nominally flat surfaces, *Proceedings of Royal Society of London, A*, Vol. 295，pp. 300-319，1966.
- Briscoe, B. and Evans, D.: The shear properties of Langmuir-Blodgett layers, *Proceedings of Royal Society London, A*, Vol. 380，pp. 389-407，1982.
- 坂口一彦，藤井輝彦：低速-高荷重下での PTFE および充てん PTFE の滑り摩擦特性，潤滑，Vol. 28，No. 9，pp. 691-696，1983.
- 鶴野禎史，比志島康久，小川一志，玉木利裕：摩擦減衰型免震装置の実験的研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 491-492，9 1998.
- 中村庄滋，北村佳久，小川雄一郎，猿田正明，上田栄：積層ゴムとすべり支承による複合免震システムに関する研究 その1 圧縮せん断実験，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 501-502，9 1998.
- 江森純一，山中久幸，谷垣正治，平田裕一，山岸邦彰：弾性すべり支承の基本性能に関する実験的研究，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 487-488，9 1998.
- 河合俊直，上田栄，大山秀美，三山剛史，増田圭司，中川輝雄，鳥居次夫：滑り支承を用いた免震構法の研究 その2. 滑り支承の水平性能試験，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 693-694，9 1999.
- Bartenev, G. and Lavrentev, V.: *Friction and Wear of Polymers*, Tribology Series, Vol. 6, Elsevier, 1981.
- Pleskachevsky, Y. M. and Smirugov, V.: Thermal fluctuations at PTFE friction and transfer, *Wear*, Vol. 209，pp. 123-127，1997.
- 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*, p. No.1531，8 2004. DVD-ROM.
- 松崎浩，森利弘，渡辺則雄，滝沢賢一：すべり支承とせん断型コイルばねによる免震構法 その2 すべり支承加力試験，日本建築学会学術講演梗概集，pp. 495-496，9 1998.

(2005年4月15日 受付)