

論文 / 著書情報
Article / Book Information

| | |
|-------------------|---|
| 論題(和文) | 高摩擦弾性すべり支承の低速度領域における載荷履歴を高精度で再現する 修正非線形3要素モデルの提案 |
| Title(English) | Proposal of Modified Nonlinear Three-Element Model to Accurately Reproduce Loading History of High-Friction Elastic Sliding Bearing in the Low-Velocity Range |
| 著者(和文) | 崎谷俊太, 佐藤大樹, 陳引力, 三須基規, 稲井慎介, 桑素彦, 川又哲也, 得能将紀, 丸尾純也 |
| Authors(English) | Shunta Sakiya, Daiki Sato, Yinli Chen, Motoki Misu, Shinsuke Inai, Motohiko Kuwa, Tetsuya Kawamata, Masaki Tokunou, Junya Maruo |
| 出典 / Citation | 日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 565-568 |
| Citation(English) | , , , pp. 565-568 |
| 発行日 / Pub. date | 2025, 3 |
| 権利情報 | 一般社団法人 日本建築学会 |

高摩擦弾性すべり支承の低速度領域における载荷履歴を高精度で再現する 修正非線形 3 要素モデルの提案

構造—振動

高層免震建物 高摩擦弾性すべり支承

変位制御加振実験 低速度領域 解析モデル

正会員 ○ 崎谷俊太*1

〃 陳引力*3

〃 稲井慎介*5

〃 川又哲也*6

〃 丸尾純也*5

正会員 佐藤大樹*2

〃 三須基規*4

〃 桑素彦*6

〃 得能将紀*6

1 はじめに

近年、高層建物に免震構造を採用する事例が増えている。高層免震建物では頂部風速度の増加により作用する風力が增大することや、同一規模の基礎を固定した建物に比べ固有周期が長くなる傾向にあることから、免震建物の耐風設計の需要が増加している^{1,2)}。

主要な免震部材の1つに弾性すべり支承がある。弾性すべり支承は積層ゴムとすべり材によって構成され、すべり材には PTFE 材がよく用いられる³⁾。PTFE 材を用いた場合、耐震設計で用いられる高速度領域では摩擦係数は安定した値となるが、低速度領域では速度依存性の影響を受け摩擦係数が低下することが知られている⁴⁻⁶⁾。そのため、地震応答に比べ遥かに応答速度が低い風応答では、想定した設計風速より低い値ですべり出す可能性がある。これに関して、佐藤・牧平らは文献 8) にて、速度・面圧依存性を考慮した弾性すべり支承の解析モデル（以下、非線形 3 要素モデル⁸⁾）を構築している。しかし、当モデルによる解析では、解析直後の挙動が実験を再現できていない点、および短い時間刻みでは解析を行えず、それによって周期が長いケースしか解析を行えない点に課題を残す。

そこで、本報では非線形 3 要素モデルの修正を行い、新たなモデル（以下、修正非線形 3 要素モデル）を提案する。また、そのモデルに対して変位制御解析を行い、弾性すべり支承の縮小試験体を用いた変位制御加振実験の結果と比較することで、精度の向上及び解析時間刻みの適用範囲の拡大を示す。

2 弾性すべり支承実験概要⁸⁾

図 1 に弾性すべり支承実験のセットアップを、図 2 に試験体詳細をそれぞれ示す。試験体のすべり材には直径 90mm の充填剤入り PTFE を用いた、地震時を想定した正弦波 40cm/s 時に摩擦係数 0.094 を発揮する弾性すべり支

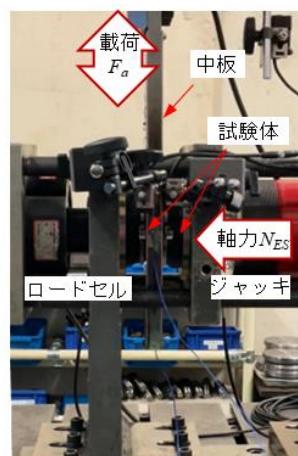


図 1 弾性すべり支承実験
セットアップ

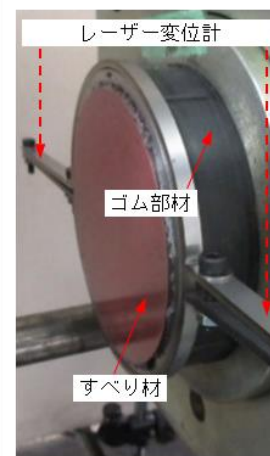


図 2 弾性すべり支承実験
試験体詳細

承（高摩擦タイプ）のすべり材である。試験体のゴム部材には総厚 4mm、水平剛性 $K_E = 10.3\text{kN/cm}$ の天然ゴム系積層ゴムをそれぞれ用いた。図 1 より試験体セットアップは、中板は動的アクチュエータと繋がっており、中板にはステンレス鋼のすべり板が取り付けられている。試験体は同じ形状のものを 2 つ用いており、図 1 に示すようにそれぞれで中板を挟むように配置した。そのため、アクチュエータの荷重 F_a は試験体 2 体分の値となる。実験ではジャッキを用いて軸力 N_{ES} をかけながら、動的アクチュエータによって変位 u_a を制御して加振した。計測項目として、アクチュエータ変位 u_a 、荷重 F_a 、軸力 N_{ES} 、すべり材の温度 θ_s 、およびゴム変形 u_E を計測した。ゴム変形 u_E についてはジャッキ側の試験体とロードセル側の試験体それぞれに対して、試験体の左右から伸びている鋼材をターゲットにレーザー変位計を当てることで測定した（図 2）。本実験では、ロードセル側の試験体で測定した 2 つのデータを平均したものを全体の u_E とした。また、本実験では弾性すべり支承の

Proposal of Modified Nonlinear Three-Element Model to Accurately Reproduce Loading History of High-Friction Elastic Sliding Bearing in the Low-Velocity Range

Shunta Sakiya, Daiki Sato, Chen Yinli, Motoki Misu, Shinsuke Inai, Motohiko Kuwa, Tetsuya Kawamata, Masaki Tokuno, Junya Maruo

荷重 F_{ES} 、すべり材のすべり板に対する相対変位 u_s をそれぞれ式 (1), (2) によって算出している。

$$F_{ES}(t) = 0.5F_a(t) \quad (1)$$

$$u_s(t) = u_a(t) - u_E(t) \quad (2)$$

表 1 に文献 8)で行われた弾性すべり支承強制変位実験の加振条件および新たな加振条件を示す。最大速度が 2.0cm/s 以下のケースが文献 8)で扱われたケースであり、その他が新たな加振条件となっている。波形は全て正弦波であり、速度および面圧の値を変化させた複数の加振条件となっている。いずれもアクチュエータの目標最大変位(振幅)およびサイクル数は共通としている。

3 非線形 3 要素モデルの適用性と修正モデルの提案

3.1 非線形 3 要素モデル⁸⁾の概要

非線形 3 要素モデルは、すべり材を表すモデルと、積層ゴムを表現する弾性ばねを直列にしたモデルとなっている。すべり材は剛塑性ばねと非線形ダッシュポットを並列結合したモデルとなっている。図 3 に非線形 3 要素モデルの模式図を、図 4 にすべり材の $F_S - v_S$ 関係を、図 5 に積層ゴムの $F_E - u_E$ 関係をそれぞれ示す。ここで、剛塑性ばねの折れ点荷重 F_{F0} は摩擦係数 μ_{d40} の面圧依存式⁷⁾およびすべり材実験に関する既往研究⁸⁾より、式 (3), (4) で表されるものとする。

$$\mu_{d40}(\sigma_S) = 0,094(-0,4388\ln(\sigma_S) + 2,3094) \quad (3)$$

$$F_{F0} = 0,33N_S\mu_{d40}(\sigma_S) \quad (4)$$

非線形 3 要素モデルにおける、適合条件および各要素の構成則を式 (5) ~ (8) に示す。

$$F_S(t) = \text{sgn}(v_S(t))(F_{F0} + C_D|v_S(t)|^\alpha) \quad (5)$$

$$F_E(t) = K_E u_E(t) \quad (6)$$

$$u_s(t) + u_E(t) = u_{ES}(t) \quad (7)$$

$$v_s(t) + v_E(t) = v_{ES}(t) \quad (8)$$

これらより微分方程式 (9) を得る。数値計算アルゴリズムは Runge-Kutta 法を用いている。

$$\begin{aligned} v_{ES}(t) &= \frac{\dot{F}_{ES}(t)}{K_E} \\ &+ \text{sgn}(F_{ES}(t)) \left\{ \frac{|F_{ES}(t) - \text{sgn}(F_{ES}(t))F_{F0}|}{C_D} \right\}^{\frac{1}{\alpha}} \end{aligned} \quad (9)$$

3.2 非線形 3 要素モデルの適用性

図 6 に非線形 3 要素モデルを用いた解析結果の例として、各面圧における最大速度 0.1 cm/s のケースを実験結果とともに示す。図 6 より、非線形 3 要素モデルは実験結果の履歴曲線を概ね捉えている一方で、原点付近での挙動が実験値と異なっている。また、非線形 3 要素モデルは、荷重の符号が変化する X 軸付近で解析が不安定になりやすい。そのため、非線形 3 要素モデルでの解析では時間刻みを 1 s 以上としており、実験時の最大速度が 5 cm/s や 10

表 1 弾性すべり支承強制変位実験の加振条件

| 実験名 | 波形 | 振幅 [cm] | 面圧 [MPa] | ゴム剛性 [kN/cm] | サイクル数 | 最大速度 [cm/s] | 文献 |
|--------|-----|---------|----------|--------------|-------|-------------|----|
| DC-A-1 | 正弦波 | ±2.0 | 10 | 10.3 | 4 | 0.1 | 8) |
| DC-A-2 | | | | | | 0.5 | 8) |
| DC-A-3 | | | | | | 1.0 | 8) |
| DC-A-4 | | | | | | 2.0 | 8) |
| DC-A-5 | | | | | | 5.0 | - |
| DC-A-6 | | | | | | 10.0 | - |
| DC-B-1 | 正弦波 | ±2.0 | 20 | 10.3 | 4 | 0.1 | 8) |
| DC-B-2 | | | | | | 0.5 | 8) |
| DC-B-3 | | | | | | 1.0 | 8) |
| DC-B-4 | | | | | | 2.0 | 8) |
| DC-B-5 | | | | | | 5.0 | - |
| DC-B-6 | | | | | | 10.0 | - |
| DC-C-1 | 正弦波 | ±2.0 | 30 | 10.3 | 4 | 0.1 | 8) |
| DC-C-2 | | | | | | 0.5 | 8) |
| DC-C-3 | | | | | | 1.0 | 8) |
| DC-C-4 | | | | | | 2.0 | 8) |
| DC-C-5 | | | | | | 5.0 | - |
| DC-C-6 | | | | | | 10.0 | - |

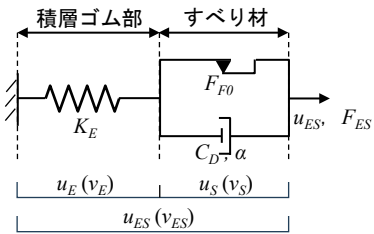


図 3 非線形 3 要素モデルの模式図

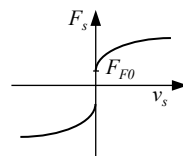


図 4 すべり材の $F_S - v_S$ 関係

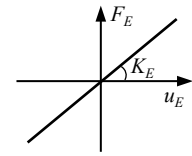


図 5 積層ゴムの $F_E - u_E$ 関係

cm/s のように入力波の周期が短くなると解析を行えないという問題点がある。そこでこれらの問題点を解消するために、非線形 3 要素モデルの修正を行った。

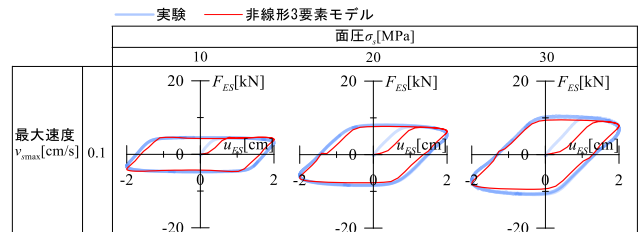


図 6 弾性すべり支承実験と非線形 3 要素モデル解析の $F_{ES} - u_{ES}$ 関係比較

3.3 修正非線形 3 要素モデルの提案

図 7 に修正非線形 3 要素モデルのアルゴリズムを示す。当モデルは、剛塑性ばねの折れ点荷重 F_{F0} とモデル全体の

荷重 F_{ES} の大小関係より解析手法を分岐させている。 F_{ES} が F_{F0} を下回る場合は式(10)より、積層ゴム部のみを用いた解析方法としている。一方で、 F_{ES} が F_{F0} を上回る場合は、非線形3要素モデル(3.1節)と同様の数値計算方法としている。以上のようなアルゴリズムとすることで、原点付近では積層ゴム部のみを用いた計算となるため、解析における原点付近での挙動が改善されると考えられる。また、荷重の符号変化が生じるX軸付近では弾性範囲での計算となるため、解析結果が時間刻みに影響されにくい。そのため、時間刻みを短く設定することが可能であり、周期が短い実験ケースにおいても解析を行うことができる。当モデルを用いた解析結果と実験結果の比較を次章で示す。

$$F_a(t) = F_{ES}(t) = u_{ES}K_E \quad (10)$$

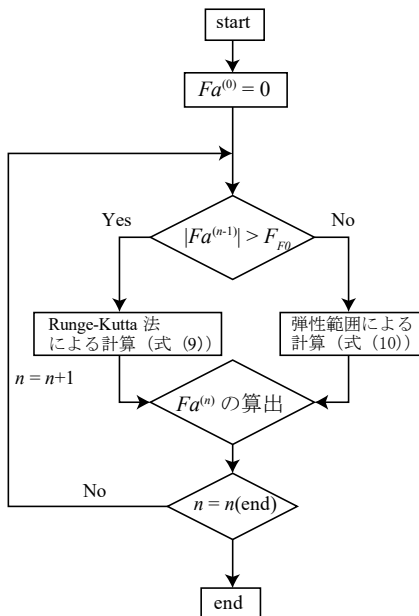
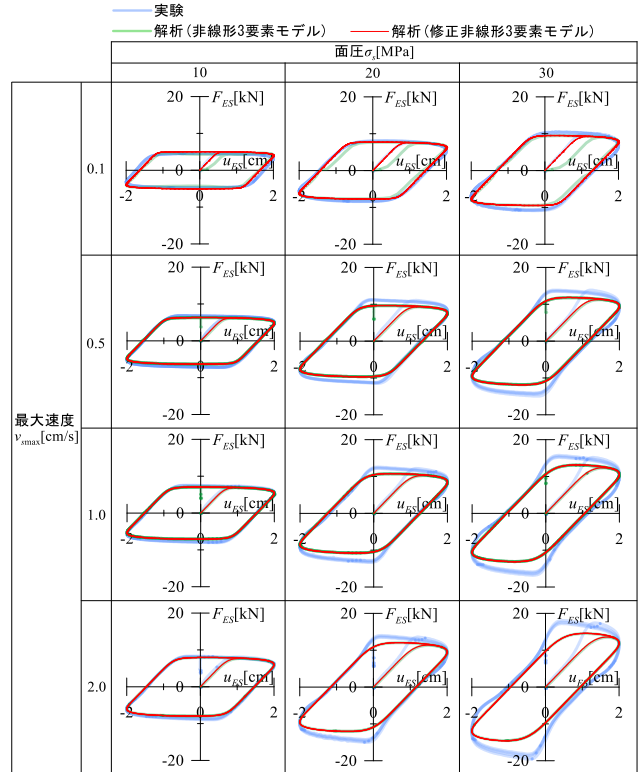


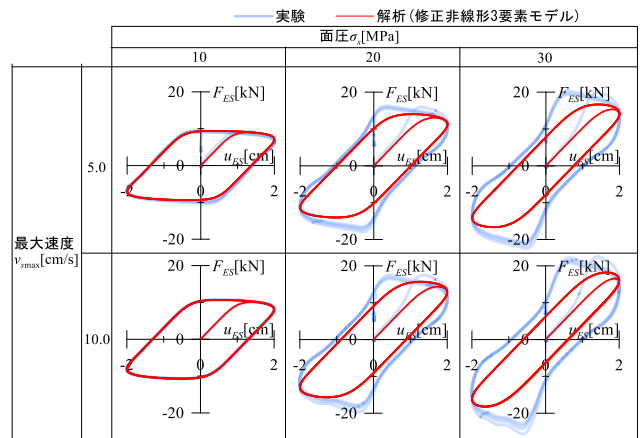
図7 修正非線形3要素モデルのアルゴリズム

4. 修正非線形3要素モデルの精度検証

図8に、実験結果と解析モデルの履歴曲線の比較を示す。最大速度が5cm/s、10cm/sのケースについては非線形3要素モデルでは解析を行えないため、修正非線形3要素モデルの結果のみを示す。修正非線形3要素モデルを用いた解析では1サイクル当たり100点以上をプロットできるように時間刻みを設定した。図8(a)より最大速度0.1cm/sのケースを見ると、いずれの面圧においても修正非線形3要素モデルを用いることで原点付近の挙動が改善されていることが確認できる。また、図8(b)より、最大速度が大きいケースでは低面圧時には概ね実験結果を捉えられている。一方で、高面圧時に実験結果と解析結果が合わないのは、治具剛性の影響であると考えられる。図9に実験と修正非線形3要素モデルの1サイクル間でのエネルギー吸収量の比較を示す。本報では、3サイクル目におけるエネルギー吸収量の累計値を算出している。高面圧時かつ速



(a) 非線形3要素モデルと修正非線形3要素モデルによる解析結果



(b) 修正非線形3要素モデルのみの解析結果

図8 弾性すべり支承実験と解析結果の

F_{ES} - u_{ES} 関係比較

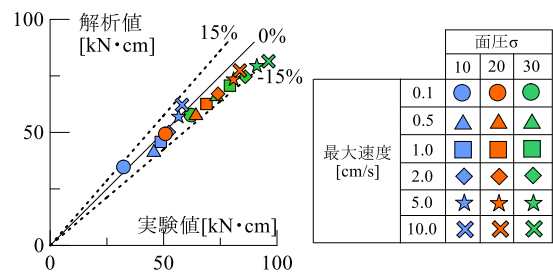


図9 実験と解析(修正非線形3要素モデル)のエネルギー吸収量比較

度が大きいケースでは解析値がやや過小評価となっているが、概ね誤差率 15%以内に収まっており、解析モデルが実験結果を精度よく再現できていることが定量的に読み取れる。

5. 時間刻みを変えた場合の解析安定性

図 10 に時間刻みを変えた場合の解析結果を示す。用いた実験ケースは面圧 10MPa, 最大速度 0.1cm/s (DC-①-1) である。図 10 より、修正前の非線形 3 要素モデルでは時間刻み Δt を 1s より短くすると解析が不安定となり、履歴曲線が出力されていない。一方で、修正非線形 3 要素モデルでは、いずれの時間刻みでも解析を行えており、解析を安定して行えることが分かる。本報では時間刻みの下限値を 0.01s としているが、当モデルでは下限値の制限はなく解析を行えることを確認している。

6. まとめ

本報では、非線形 3 要素モデルの修正を行い新たなモデルの提案を行った。新たなモデルに対して変位制御解析を行い、既往の変位制御実験の結果と比較することでモデルの精度向上及び適用範囲の拡大を示した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 修正非線形 3 要素モデルは変位制御実験の荷重変形関係を概ね精度よく再現できていることを確認した。
- 2) 修正非線形 3 要素モデルと実験結果をエネルギー吸収量で比較することで、定量的に当モデルの妥当性を検証した。
- 3) 修正非線形 3 要素モデルを用いることで時間刻みによらず解析を安定的に行える。

参考文献

1) 日本免震構造協会 “免震建物の最近の動向”, 2017
 <https://www.jssi.or.jp/wordpress/wpcontent/uploads/society_economy/keizoku2.pdf>

2) 日本免震構造協会: 免震建物の耐風設計指針 (2023), 2023.3

3) 日本免震構造協会: 免震構造 部材の基本から設計・施工まで, 2022.3

4) 松川宏: 摩擦の物理, 岩波書店, 2015.6

5) 渡辺真, 笠原又一, 関口勇, 広中清一郎: 高分子トライボマテリアル, 共立出版, 1990.11

6) 日本トライボロジー学会固体潤滑研究会: 固体潤滑ハンドブック, 株式会社養賢堂, 2013.3

7) 日本免震構造協会: 免震部材標準リスト 2023, 2023.5

8) 佐藤大樹, 牧平康也, シガイ・アレックス, 三須基規, 稲井慎介, 桑素彦, 川又哲也, 石田琢志, 得能将紀, 丸尾純也: 低速度領域における摩擦係数の変化を考慮した弾性すべり支承の解析モデルの構築, 日本建築学会構造系論文集, 第 89 巻, 第 821 号, pp.719-726, 2024.7

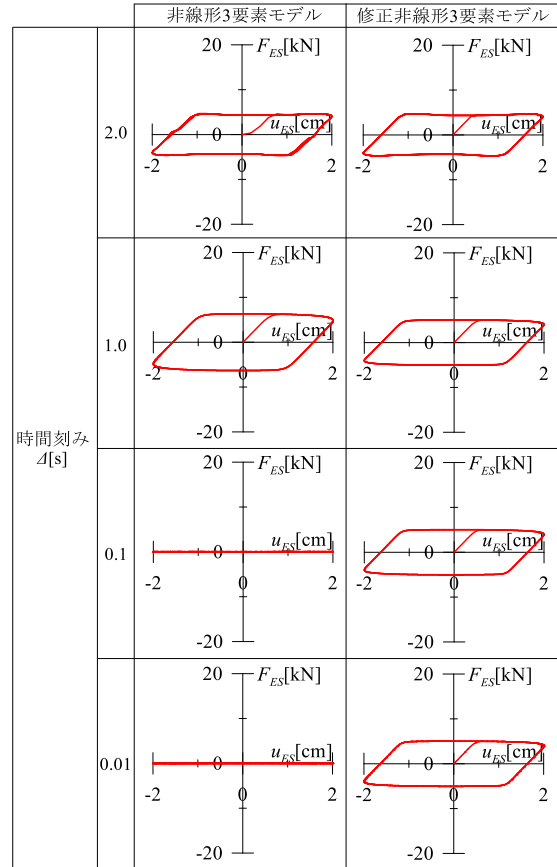


図 10 時間刻み Δt を変えた場合の解析結果

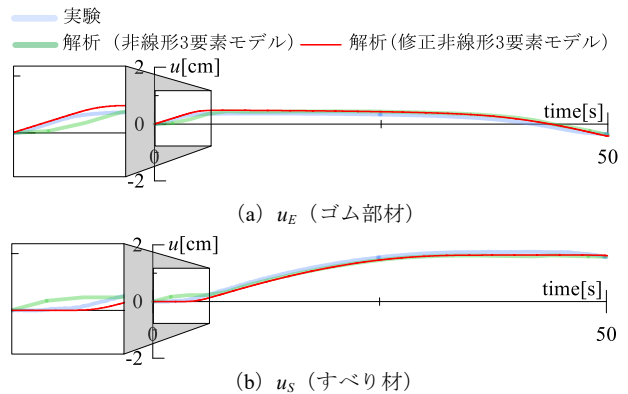


図 A 変位の時刻歴波形 (DC-①-5)

附録 A 変位の時刻歴波形による比較

図 A に実験と解析の変位時刻歴波形を示す。図 A より修正非線形 3 要素モデルは非線形 3 要素モデル同様実験結果を概ね捉えていることが確認できる。原点付近に注目すると、修正非線形 3 要素モデルを用いることで解析の挙動が改善されている。

*1 東京科学大学環境・社会理工学院 大学院生
 *2 東京科学大学 総合研究院 准教授・博士 (工学)
 *3 東京科学大学 総合研究院 助教・博士 (学術)
 *4 SWCC 株式会社
 *5 戸田建設株式会社 技術研究所
 *6 戸田建設株式会社 構造設計部

Grad. Student, School of Environment and Society, Institute of Science Tokyo
 Associate Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Dr. Eng.
 Assistant Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Ph.D.
 SWCC Corporation
 Technology Research Institute, TODA Corporation
 Structural Design Department, TODA Corporation