

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	弾性すべり支承の摩擦係数における速度依存性を考慮した時刻歴風応答解析
Title(English)	Time-history analysis on wind-induced response considering the velocity dependence in the coefficient of friction of sliding bearings
著者(和文)	牧平康也, 佐藤大樹, Alex Shegay, 三須基規, 稲井慎介, 石田琢志, 丸尾純也
Authors(English)	Koya Makihira, Daiki Sato, Aleksey Vadimovich Shegay, Motoki Misu, Shinsuke Inai, Takushi Ishida, Junya Maruo
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 301-304
Citation(English)	, , , pp. 301-304
発行日 / Pub. date	2022, 3

弾性すべり支承の摩擦係数における速度依存性を考慮した時刻歴風応答解析

構造—振動

超高層免震建物 高摩擦弾性すべり支承
時刻歴解析 速度依存性

准会員 ○ 牧平康也^{*1} 正会員 佐藤大樹^{*2}
正会員 Alex Shegay^{*3} // 三須基規^{*4}
// 稲井慎介^{*5} // 石田琢志^{*5}
// 丸尾純也^{*5}

1 はじめに

近年、免震建物の高層化が進んでおり、風外力に対する応答解析の重要性が高まっている。その中で、免震構造部材である弾性すべり支承のすべり出し荷重はすべり材の摩擦係数に依存し、摩擦係数は速度依存性をもつ。

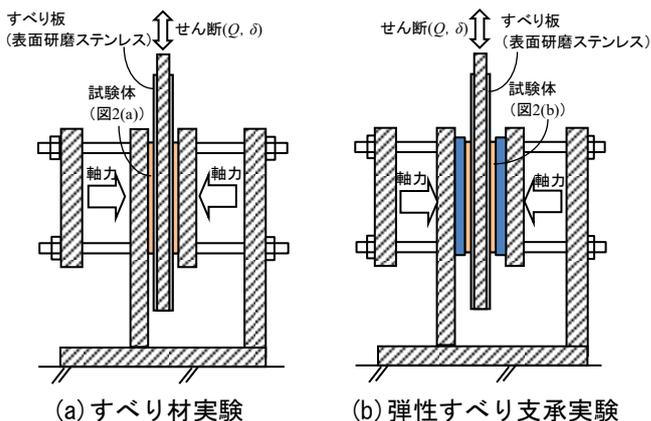
すべり材の摩擦係数は、地震応答での速度の範囲ではほぼ一定の値に収束するが、風方向風力は平均成分を持ち、応答速度が地震時に比べて小さい。免震層の応答速度が低くなると、すべり出し荷重が小さくなり、応答変位が増大すると懸念されるため、特に低速度領域において顕著である速度依存性による建物応答への影響について検討する必要がある。

先行研究¹⁾²⁾により、弾性すべり支承における速度と摩擦係数の関係が報告されている。しかし、実際の免震建物の応答に関して、どの程度影響を与えるのか、という点についてははっきりしていない。さらに、従来の解析モデル（以下、弾塑性モデル）は、弾性すべり支承のすべり材の摩擦作用を剛塑性ばねで模擬しており、これは速度依存性を無視したものである。そのためこれを用いて時刻歴風応答解析を行っても、速度依存性の影響は現れない。

そこで本報では、弾性すべり支承の速度依存性を考慮して構築した解析モデル（以下、非線形3要素モデル）と従来の弾塑性モデルの解析結果を比較して、速度依存性を与える影響を検討する。

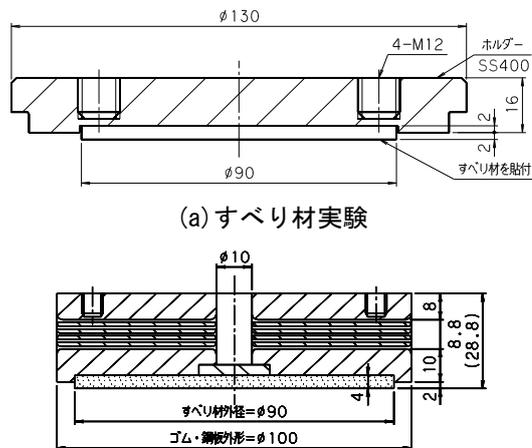
2 加振実験の概要および結果

非線形3要素モデルを構築するために、すべり材および弾性すべり支承に対して加振実験を行った。図1に各実験のセットアップ図を、図2に試験体の概要を示す。すべり材実験では速度の条件を変えた三角波および正弦波を、弾性すべり支承実験では軸力、振幅、速度の条件を変えた三角波および正弦波を変位制御で加振した。さらに、すべり板の温度を測るために、その中心の裏側に熱電対を取り付けた。なお、すべり材実験は試験体2つ分の水平荷重を測定している。



(a) すべり材実験 (b) 弾性すべり支承実験

図1 実験セットアップ



(a) すべり材実験

(b) 弾性すべり支承実験

図2 試験体概要

3 弾性すべり支承モデルの構築

図3に実験で得られた速度 v と摩擦係数 μ の関係を示す。この図から、すべり材の摩擦係数は速度の上昇に応じて緩やかに増加すること、速度が0に近づいても摩擦係数が0とはならないことが確認できる。

Time-history analysis on wind-induced response considering the velocity dependence in the coefficient of friction of sliding bearings

Koya Makihira, Daiki Sato, Shegay Alex, Motoki Misu, Shinsuke Inai, Takushi Ishida, Junya Maruo

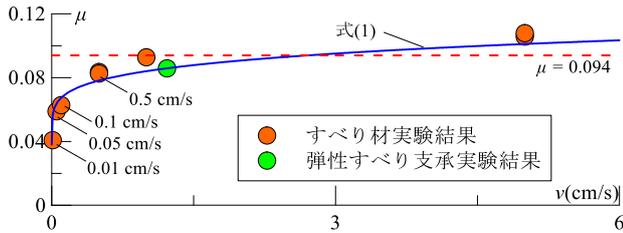


図3 実験結果とモデル式

よって本報では、すべり材の摩擦作用を剛塑性ばねと非線形ダッシュポット（以下、NLDP）の並列結合（以下、非線形 kelvin モデル）によってモデル化し、このモデルの摩擦係数を、図3のように実験結果を近似した式(1)より決定した。

$$\mu = \mu_0 + \text{sgn}(v) * \eta |v|^\alpha \quad (1)$$

なお、 μ_0 ：剛塑性ばねの降伏荷重 Q_{k0} を実験での軸力 N で除した値、 η ：NLDP の係数 C_k を軸力 N で除した値、 α ：NLDP の係数であり、これらの値は実験結果から算定した。算定については、 μ_0 を最初に決定した上で、 η と α を差の最小二乗近似によって求めた。なお、実験データは、速度が 0 cm/s から 20 cm/s までの結果を用いた。ここで、40 cm/s などのさらに高速度領域の実験結果を用いなかったのは、速度が高くなりすぎると、温度依存性による影響を無視できなくなると考えたためである。非線形3要素モデルの模式図および復元力特性を図4、5にそれぞれ示す。

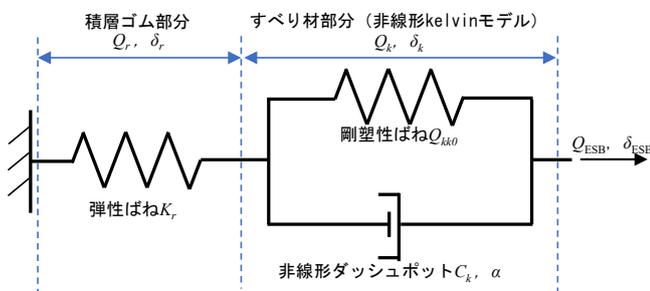


図4 非線形3要素モデルの模式図

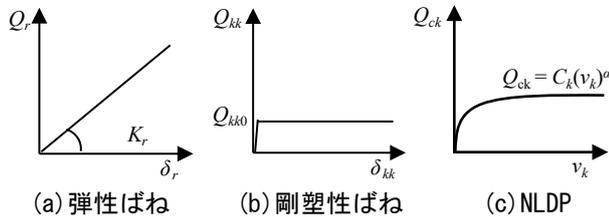


図5 非線形3要素モデル各種部材の復元力特性

一方、弾塑性モデルではすべり材部分を剛塑性ばねのみで模擬している。図3中の点線で示す通り、このモデルでは速度の値に関わらず、常に一定の摩擦係数を取る。このすべり出し荷重となるとき摩擦係数の値は、地震応答における収束値から 0.094 と定めた³⁾。弾塑性モデルの模式図および復元力特性を図6、7にそれぞれ示す。

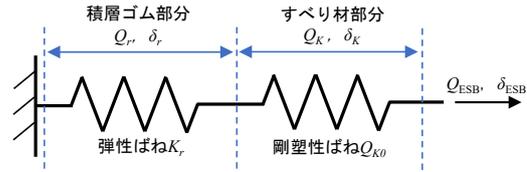


図6 弾塑性モデルの模式図

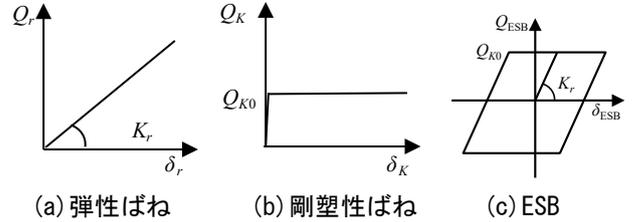


図7 弾塑性モデル各種部材の復元力特性

ここで、非線形 kelvin モデルおよび非線形3要素モデルがそれぞれすべり材、弾性すべり支承の挙動を正確に模擬出来ていることを確認するために、実験と同じ条件の強制変位解析を行った。解析には三角波と正弦波の2種類をそれぞれ用いた。この結果を図8および図9に示す。図8、9より、解析結果が概略の傾向を示せたことが確認できる。なお、振幅は全て 10cm であり、速度および正弦波加振における周期は図の表題に示している。

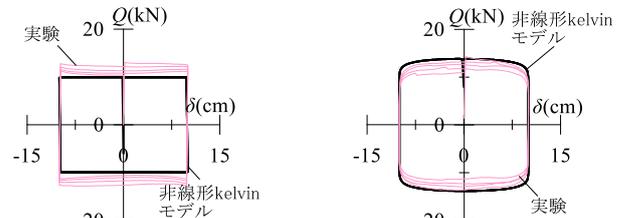


図8 すべり材実験結果と強制変位解析結果

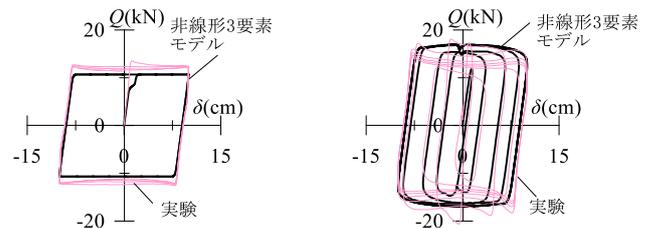


図9 弾性すべり支承実験結果と強制変位解析結果

4 時刻歴風応答解析の概要

4.1 解析モデルの概要

摩擦係数の速度依存性が風応答に与える影響を確認するために、免震建物の解析モデルに対して時刻歴風応答解析を行った。解析モデルには、上部構造縮約 10 質点、免震層 1 質点の 11 質点等価せん断モデルを用いた。高さ $H = 150$ m、辺長比 $D/B = 1$ (D, B ：幅、奥行き、 $D = B = 50$ m) とする。免震層には積層ゴム、弾性すべり支承、オイ

ルダンパーの3つの部材を入れ、このうち弾性すべり支承に弾塑性モデル(図6, すべり出し変形7.7cm)と、非線形3要素モデル(図4)を用いた2種類の解析モデルを用意した。さらに、免震部材の設定による違いを確認するために、弾性すべり支承のみ増やした解析ケースと、オイルダンパーのみ増やした解析ケースも用意した。ここで、弾性すべり支承のすべり出しせん断係数が $0.01 \times n$ 、オイルダンパーのリリーフせん断係数が $0.01 \times m$ としたとき、その建物モデルをSnDmと呼称する。以上より、本報ではS1D1, S4D1, S1D4の3つに2種類の弾性すべり支承のモデル化を合わせた、計6つのモデルに時刻歴風応答解析を行った。

4.2 検討用風外力の概要

風力は風洞実験(地表面粗度区分III)⁴⁾の結果を用いた。時刻歴データは、高さ方向に7点で測定している。このデータを免震建物の解析モデルの高さ、上部構造の質点数および基準風速 $U_0 = 36 \text{ m/s}$ での再現期間500年風外力(設計風速 $U_H = 54.7 \text{ m/s}$)へと変換を行った。その後、負担面積に応じた補間により上部構造の質点数へと変換した⁵⁾。風向角は 0° (建物に正対する方向)であり、1組につき上部構造10質点分の波形を0.05秒刻み14000(700秒)ステップとし、9組取り出した。さらに、本報では過渡応答の影響を避けるため、各波形の前後に50秒のエンベロープを設け⁶⁾、中間の600秒(10分間)での応答を評価に用いた。また、9波のアンサンブル平均により応答値を評価した。図8に頂部風外力の一例を示す。なおS1D1に対しては風方向風力と風直交方向風力を作用させ、S4D1およびS1D4に対しては風方向風力のみ作用させた。

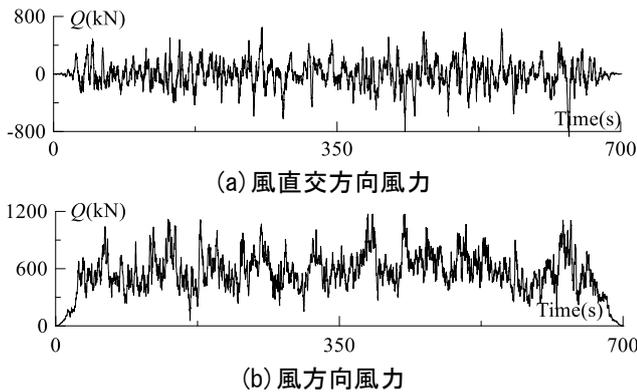


図8 検討用頂部風外力の一例

5 時刻歴風応答解析の結果

5.1 速度依存性の影響

S1D1に対する解析結果として、各層最大変位 x_{\max} のアンサンブル平均を図10に、免震層の荷重 Q と変形 δ の関係の一例を図11, 12に、免震層変形の一部を図13に示す。

図10(a), 11, 13(a)より、風直交方向風力による変位応答は、弾性すべり支承のモデルによらずほぼ一致していることが確認できる。これは、風直交方向風力は平均成分を持

たないため速度依存性による影響が小さいためと考えられる。

一方、図10(b), 12, 13(b)より、風方向風力による変位応答は、非線形3要素モデルの方が大きいことが確認できる。これは、風方向風力は平均成分、つまり応答速度を低くする成分を多く持つため速度依存性による影響が大きいためと考えられる。なお、図13(b)に示すS1D1の免震層変位の平均値は弾塑性モデルの1.10倍、図10に示す免震層変位の最大値のアンサンブル平均は弾塑性モデルの1.06倍となった。

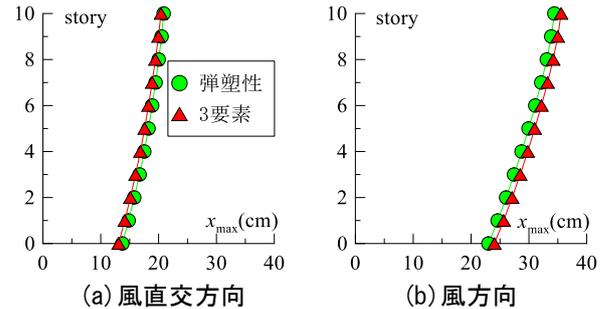


図10 S1D1の各層最大変位のアンサンブル平均

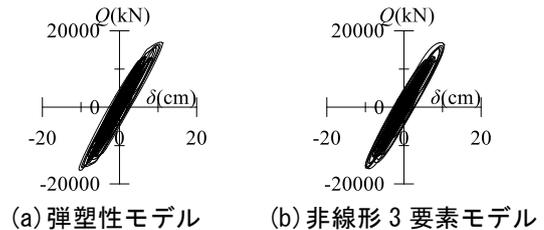


図11 S1D1の風直交方向風力での免震層履歴曲線

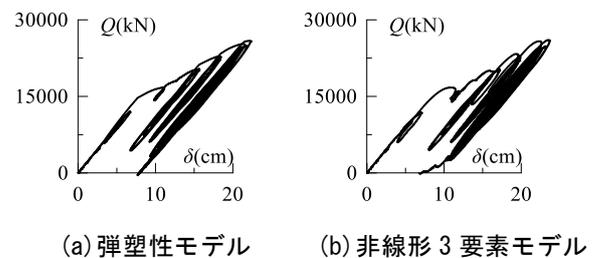


図12 S1D1の風方向風力での免震層履歴曲線

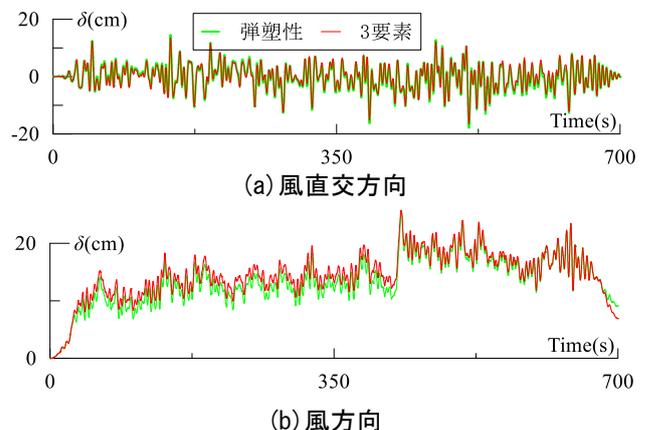


図13 S1D1の免震層変位の時刻歴波形

5.2 免震部材の量設定による影響確認

S4D1 および S1D4 に対する結果として、各層最大変位 x_{max} のアンサンブル平均を図 14 に、免震層の荷重-変位関係の一例を図 15, 16 に、免震層変位の一例を図 17 に示す。

図 14, 15, 17 から、弾性すべり支承が増えるほど弾性すべり支承モデルによる応答変位の差が小さくなることが確認できる。ここで、第 1 章でも述べた通り、2 種の弾性すべり支承モデルの応答変位に差が生じるのは、すべり出し荷重の値が変化することが原因である。つまり、弾性範囲内では差は生じない。図 15 に示すように、弾性すべり支承が増えるとその分すべり出し荷重も大きくなるため、すべり出し変位に到達せず、差が小さくなる。

また、図 14, 16, 17 からオイルダンパーが増えるほど弾性すべり支承モデルによる応答変位の差が大きくなることが確認できる。これは、オイルダンパーが増えるとその分応答速度が減少し、速度依存性による影響をより強く受けるからである。

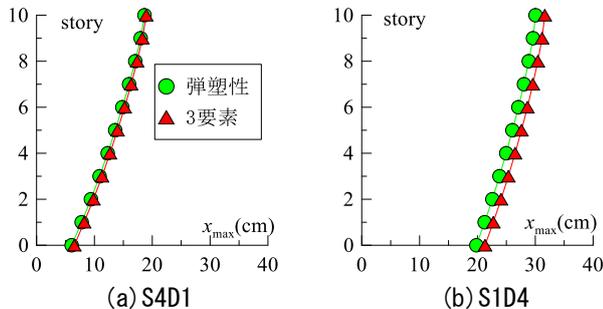


図 14 各層最大変位のアンサンブル平均 (風方向)

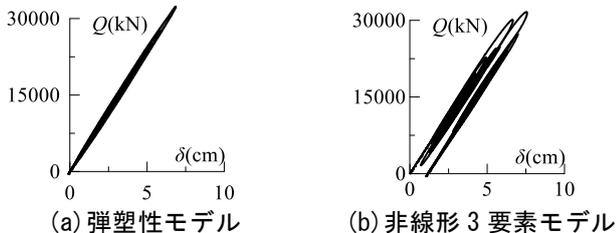


図 15 S4D1 の風方向風力での免震層履歴曲線

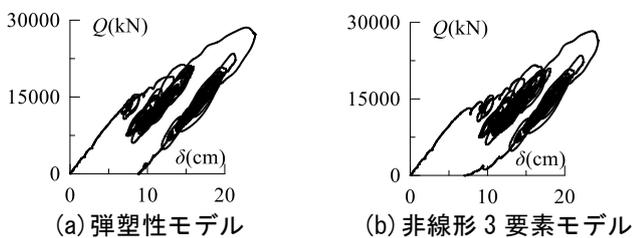


図 16 S1D4 の風方向風力での免震層履歴曲線

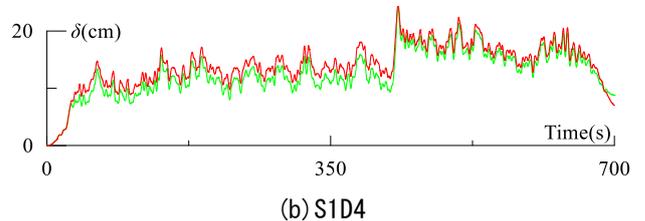
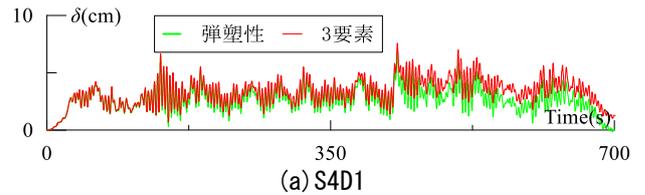


図 17 免震層変位の時刻歴波形 (風方向)

6 まとめ

本報では、弾性すべり支承の速度依存性を考慮した解析モデルで時刻歴解析を行い、風力を受けた時の摩擦係数の変化による影響を確認した。以下に得られた知見を示す。

- ① 摩擦係数が低速領域で半分以下になる速度依存性を有する弾性すべり支承を、剛塑性ばねと非線形ダッシュポットによる非線形 3 要素モデルを用いることで、速度依存性による影響を相応の精度で模擬できた。
- ② 免震建物の時刻歴風応答解析では、従来の弾塑性モデルと比較して、非線形 3 要素モデルの風応答による免震層の最大変位は約 6% 増大した。
- ③ 免震建物に用いる弾性すべり支承の数が多いほど弾塑性モデルと非線形 3 要素モデルによる応答変位の差は小さくなり、併用するオイルダンパーが多いほど弾性すべり支承モデルによる応答変位の差が大きくなることを確認した。

謝辞

本報告は、戸田建設株式会社、昭和電線ケーブルシステム株式会社および東京工業大学佐藤研究室の共同研究の成果の一部をまとめたものです。本報をまとめるにあたり、戸田建設株式会社の桑素彦氏、川又哲也氏、平井宏幸氏および得能将紀氏にはご教示を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 高橋良和, 日比雅一, 家村浩和: 各種依存性を考慮したすべり型免震支承の数値モデルに関する一考察, 土木学会, 応用力学論文集, 第 8 号, 2005.8
- 2) 日本建築学会: 免震構造設計指針, 2013
- 3) 弾性すべり支承カタログ, 入手先 <https://www.swcc.co.jp/cs/products/catalog/pdf/esb.pdf>, (参照 2021.12)
- 4) 二村夏樹, 佐藤大樹, 稲井慎介, 石井琢志, 丸尾純也: 高摩擦弾性すべり支承を有する超高層免震建物の時刻歴風応答解析 その 1, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.305-308, 2021.3
- 5) 建築物荷重指針・同解説 (2015), 日本建築学会, 2015.2
- 6) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 635 号, pp.75-82, 2009.1

*1 東京工業大学環境・社会理工学院 学部生 Undergraduate Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology
 *2 東京工業大学未来産業研究所 准教授・博士 (工学) Associate Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
 *3 東京工業大学未来産業研究所 助教・Ph. D. Assistant Prof., FIRST, Tokyo Institute of Technology, Ph.D.
 *4 昭和電線ケーブルシステム株式会社 SWCC SHOWA CABLE SYSTEMS
 *5 戸田建設株式会社 技術開発センター Technology Development Center, TODA Corporation