

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	高摩擦弾性すべり支承の摩擦係数の変化を考慮した解析モデルの構築 その1 すべり材の解析モデルの構築
Title(English)	Analytical Modeling of High Friction Elastic Sliding Bearing Considering Variation of Friction Coefficient Part1 Analytical modeling of sliding material
著者(和文)	牧平康也, 佐藤大樹, Alex Shegay, 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
Authors(English)	Koya Makihiro, Daiki Sato, Shegay Alex, Motoki Misu, Shinsuke Inai, Motohiko Kuwa, Tetsuya Kawamata, Takushi Ishida, Masaki Tokuno, Junya Maruo
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, Ⅰ, , pp. 385-388
Citation(English)	, Ⅰ, , pp. 385-388
発行日 / Pub. date	2024, 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摩擦係数の変化を考慮した解析モデルの構築

その1 すべり材の解析モデルの構築

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 摩擦係数 低速度領域正会員 ○ 牧平康也^{*1}〃 Alex Shegay^{*3}〃 稲井慎介^{*5}〃 川又哲也^{*6}〃 得能将紀^{*6}正会員 佐藤大樹^{*2}〃 三須基規^{*4}〃 桑素彦^{*6}〃 石田琢志^{*7}〃 丸尾純也^{*5}

1 はじめに

近年、高層建物にも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発生する風力が增大することや、同一規模の基礎を固定とした建物に比べて固有周期が長くなる傾向にあることなどから、免震建物の耐震性能だけでなく耐風性能についても配慮した設計の需要が増加している^{1,2)}。

主要な免震部材である弾性すべり支承は、その構成要素であるすべり材に PTFE 材がよく用いられる³⁾。PTFE 材の摩擦係数は速度に依存し、高速度領域ではほとんど変化しない一方、低速度領域では速度依存性の影響が顕著にみられる⁴⁻⁶⁾。そのため、地震力のような応答速度が高速度で安定する外力では速度依存の影響をほとんど無視することが出来るが、風力のような応答速度が低速度となる外力に対する設計では摩擦係数の速度依存性を把握することが重要である。これに関して、筆者らは文献 7) にて、低速度領域におけるすべり材の摩擦係数の速度依存式をすべり材の縮小試験体を用いた加振実験（以下、すべり材実験）から構築している。摩擦係数は面圧にも依存するが⁴⁾、提案式（以下、速度・面圧依存式）では面圧依存性の影響も同時に検討しているため、上部構造の設計に関わらず速度依存性を評価することが可能となる。ただし、文献 7) では実験の加振条件を統一しておらず、構築した式が妥当であるとは言い難いため、加振条件を統一した再実験およびパラメータの再検討を行う必要がある。

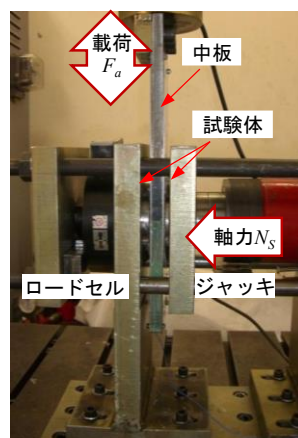
そこで、本報では文献 7) の速度・面圧依存式を改良した上で、式を組み込んだ弾性すべり支承解析モデルを提案し、耐風設計において摩擦係数の速度依存性を考慮できるようにする。本報その 1 では、加振条件を統一したすべり材実験から文献 7) と同様に摩擦係数の速度・面圧依存式を構築することで式の改良を行い、その結果を用いて、すべり材の解析モデル（以下、非線形 2 要素モデル）を構築する。また、そのモデルに対して変位制御解析を行い、すべり材

実験結果と比較することで、非線形 2 要素モデルが低速度領域においてすべり材を精度良く再現出来ていることを示す。

2 速度・面圧依存式の改良

2.1 すべり材実験概要

図 1 にすべり材実験の試験機セットアップを、図 2 に試験体詳細をそれぞれ示す。試験体には直径 90 mm の充填剤入り PTFE を用いた。これは、一般に高摩擦弾性すべり支承と呼ばれる、地震時を想定した正弦波 40 cm/s 時に摩擦係数 0.094 を発揮する弾性すべり支承のすべり材である。中板（図 1）は動的アクチュエーターと繋がっており、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、それぞれで中板を挟むように配置した（図 1）。そのため、アクチュエーターの荷重 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_s をかけながら、動的アクチュエーターによって変位 u_a を制御して加振した。計測項目として、アクチュエーター変位 u_a 、荷重 F_a 、軸力 N_s およびすべり材の温度 θ_s を計測した。 θ_s については、すべり板中央裏側の

図 1 すべり材実験
試験機セットアップ図 2 すべり材実験
試験体詳細

温度を K 型熱電対によって測定した。なお、すべり材実験においてすべり材変位 u_s はアクチュエーター変位 u_a と等しいことに留意する。

本実験ではすべり材の荷重 F_s 、すべり材の摩擦係数 μ_s 、すべり材の摺動速度 v_s を式(1)～(3)によって算出した。

$$F_s(t) = 0.5F_a(t) \quad (1)$$

$$\mu_s(t) = F_s(t) / N_s(t) \quad (2)$$

$$v_s(t) = \frac{d}{dt} u_s(t) \quad (3)$$

表 1 にすべり材実験の加振条件を示す。実験は全て変位制御で行い、波形は正弦波とした。本実験はすべり材の摩擦係数における、速度および面圧に関する式を構築するために、これらのパラメータを変化させた複数の加振条件を設定し実験を行った。速度は、正弦波加振実験であるため最大速度をパラメータとして設定し、範囲は風応答速度を想定した 0.01 cm/s から 2.00 cm/s までとした。面圧 σ_s は、対象となる高層免震建物の設計で考えられる範囲である 10 MPa から 30 MPa まで、10 MPa 刻みで設定した。アクチュエーターの目標最大変位（振幅）は共通とし、これらを組み合わせた計 18 個の条件で 4 サイクル加振を行った。なお、速度 0.01 cm/s および 0.05 cm/s の加振条件は加振時間が長く、1 サイクル目から性能が安定していると考えられるため、1 サイクルのみ加振した。

図 3 にすべり材実験の μ_s - u_s の関係を示す。図より、速度が高いほど、また面圧が低いほど摩擦係数の値が大きくなることが確認された。また、サイクルごとの摩擦係数がほぼ一定であることから、本実験の範囲における摺動による温度上昇は摩擦係数にほとんど影響していないと考えられる（附録 A 参照）。

2.2 速度・面圧依存式の改良

文献 7)と同様の手順で、実験結果から摩擦係数の速度・面圧依存式を算出する。実験結果の μ_s - u_s および μ_s - v_s の関係の一例として DC-①-3 および DC-②-6 の実験結果を図 4、5 にそれぞれ示す。実験は全て正弦波加振であるため、図 4、5 に示すように u_s が 0 のときに最大速度 v_{smax} となる。よって、変位が 0 のときの μ_s の値（図中●）をその実験における摩擦係数とすれば、それぞれの加振条件から、速度と摩擦係数の関係プロットを正負荷重で各 1 点得られる。 u_s が 0 となる時刻は複数回存在するため、一般に加振が安定していると考えられ、免震製品の性能測定に用いられる 3 サイクル目の平均値を用いた。ただし、 $v_{smax} = 0.01$ cm/s、0.05 cm/s の実験に関しては加振時間が長く、1 サイクル目から性能が安定していると考えられるため、1 サイクル目の値を用いた。図 6 に全ての加振条件における μ_s - v_s の関係を示す。図より、すべり材の摩擦係数は面圧依存性をもつこと、および低速度領域においては摩擦係数が低下することがわかる。これらの結果から摩擦係数の速度および面圧依存式を構築する。式の構築に関しては、まず面

表 1 すべり材実験の加振条件一覧

実験名	波形	振幅 [cm]	面圧 [MPa]	サイクル数	最大速度 [cm/s]
DC-①-1	正弦波	± 1.0	10	1	0.01
DC-①-2				4	0.05
DC-①-3					0.10
DC-①-4					0.50
DC-①-5					1.00
DC-①-6					2.00
DC-②-1	正弦波	± 1.0	20	1	0.01
DC-②-2				4	0.05
DC-②-3					0.10
DC-②-4					0.50
DC-②-5					1.00
DC-②-6					2.00
DC-③-1	正弦波	± 1.0	30	1	0.01
DC-③-2				4	0.05
DC-③-3					0.10
DC-③-4					0.50
DC-③-5					1.00
DC-③-6					2.00

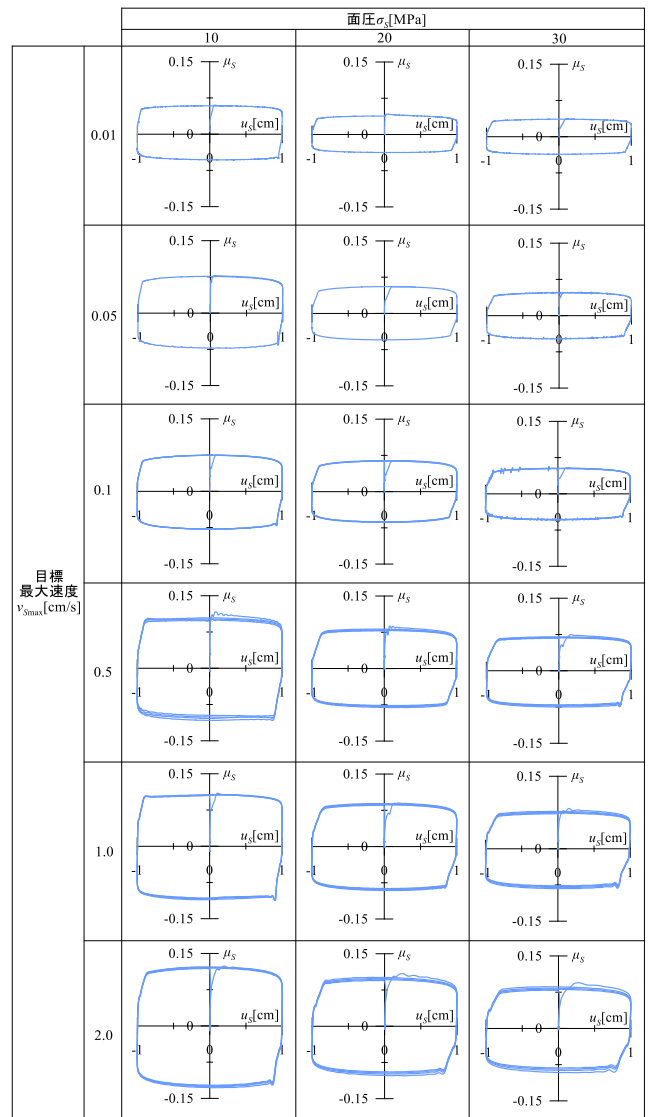


図 3 すべり材実験の μ_s - u_s の関係

圧による違いを確認する。ここで 40 cm/s における摩擦係数 μ_{d40} の値については、面圧依存式が $5 \text{ MPa} \leq \sigma_s \leq 40 \text{ MPa}$ の範囲で式(4)のように提案されている⁸⁾。

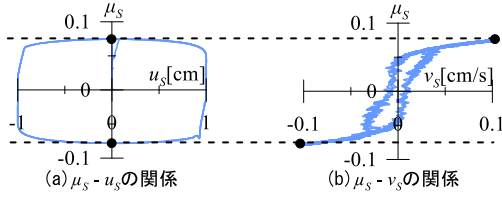


図4 DC-①-3における $\mu_s - u_s$ および $\mu_s - v_s$ の関係

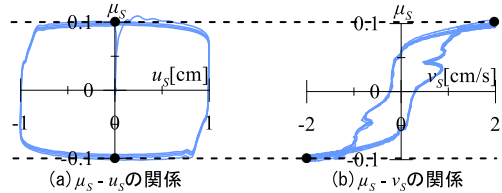


図5 DC-②-6における $\mu_s - u_s$ および $\mu_s - v_s$ の関係

$$\mu_{d40}(\sigma_s) = 0.094(-0.4388 \ln(\sigma_s) + 2.3094) \quad (4)$$

図6の摩擦係数 μ_s を、それぞれの実験における面圧を式(4)に代入した $\mu_{d40}(\sigma_s)$ で除すことで基準化する。以下、 $\mu_s / \mu_{d40}(\sigma_s)$ を摩擦係数比と呼ぶ。図6に示したすべてのプロットに関して、摩擦係数比を算出した結果を図7に示す。面圧の値が異なる場合においても v_s が同じであれば、摩擦係数の値は基準化によってほとんど一致することが確認できる。よって、 $\mu_s / \mu_{d40}(\sigma_s)$ に関する速度依存性を構築すれば、面圧および速度両方の依存性を考慮した摩擦係数の式を構築できる。

式の構築について、まずは摩擦係数比の下限値を定める。速度0.01 cm/sにおける3つの実験DC-①-1, DC-②-1, DC-③-1は、摩擦係数比の平均を取ると0.40となる。実際には速度が限りなく0に近い時の値を算出する必要があるため、速度0.01 cm/sにおける結果に対して20%程度の安全率を考慮し、本報では摩擦係数比の下限値を0.33とする。なお下限値に対応する荷重を静的に与えた場合、すべり材が摺動しないことを確認している(附録B参照)。

得られたプロットに対して最小二乗法を適用し、かつその式が速度0において0.33を通るような式を算出すると、摩擦係数比に関する以下の式(5)が得られる。

$$\mu_s / \mu_{d40}(\sigma_s) = 0.33 + 0.58 v_s^{0.26} \quad (5)$$

式(5)を μ_s について解くと、摩擦係数に関する式(6)が得られる。また、2.1節の式(2)から、 μ_s は $F_a (= F_s)$ および $N_s (= A_s \sigma_s)$ 、 A_s はすべり材の面積)によって表されるため、この関係を用いて式(6)を F_s に関して変形し直すと、式(7)のようになる。

$$\mu_s = 0.33 \mu_{d40}(\sigma_s) + 0.58 v_s^{0.26} \mu_{d40}(\sigma_s) \quad (6)$$

$$F_s = 0.33 A_s \sigma_s \mu_{d40}(\sigma_s) + 0.58 A_s \sigma_s \mu_{d40}(\sigma_s) v_s^{0.26} \quad (7)$$

3 非線形2要素モデルの構築

3.1 モデル概要

前節で構築した速度および面圧依存性を、解析モデルに導入する。式(7)より、速度に依存しない一定値を示す剛塑

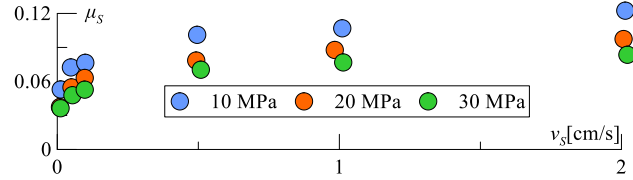


図6 すべり材実験全加振条件の $\mu_s - v_s$ の関係

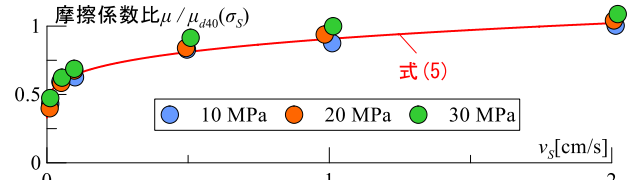


図7 すべり材変位制御加振実験結果の基準化

性ばねと速度依存の非線形ダッシュポットを並列結合した解析モデルで再現できることがわかる。

図8に、上述の剛塑性ばねと非線形ダッシュポットを並列結合した解析モデル(以下、非線形2要素モデル)の模式図を、図9に各種部材の復元力特性を示す。なお、 F_F は剛塑性ばねの荷重、 F_D は非線形ダッシュポットの荷重である。非線形2要素モデルの荷重 F_s は以下の式(8)によって表される。

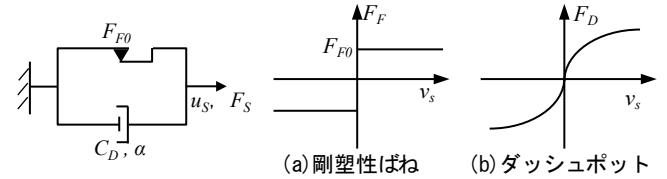


図8 非線形2要素モデルの模式図

(a) 剛塑性ばね (b) ダッシュポット

図9 非線形2要素モデルの各部材の荷重 - 速度関係

$$F_s(t) = F_F(t) + F_D(t) \quad (8)$$

ここで、 F_F および F_D は、剛塑性ばねの折れ点荷重 F_{F0} 、非線形ダッシュポットの減衰係数 C_D および非線形ダッシュポットのべき乗の係数 α を用いて、それぞれ式(9)~(10)のように表される。

$$F_F(t) = \text{sgn}(v_s(t)) F_{F0}(t) \quad (9)$$

$$F_D(t) = \text{sgn}(v_s(t)) C_D v_s(t)^\alpha \quad (10)$$

F_{F0} および C_D は、式(7)と対応させるとそれぞれ式(11)~(12)として表される。

$$F_{F0} = 0.33 A_s \sigma_s \mu_{d40}(\sigma_s) \quad (11)$$

$$C_D = 0.58 A_s \sigma_s \mu_{d40}(\sigma_s) \quad (12)$$

α も同様に対応させると、 $\alpha = 0.26$ となる。これらの値を式(7)に代入することで、非線形2要素モデルによって算出された荷重は速度・面圧依存性を持つようになる。

3.2 モデルの妥当性確認

非線形2要素モデルがすべり材実験を再現できることを確認するために、実験から得られた u_s を用いて変位制御解析を行った。図10に実験結果と変位制御解析結果を比較した履歴曲線を示す。図10より、非線形2要素モデルを用いた変位制御解析は高面圧時を除き、実現象を概ね

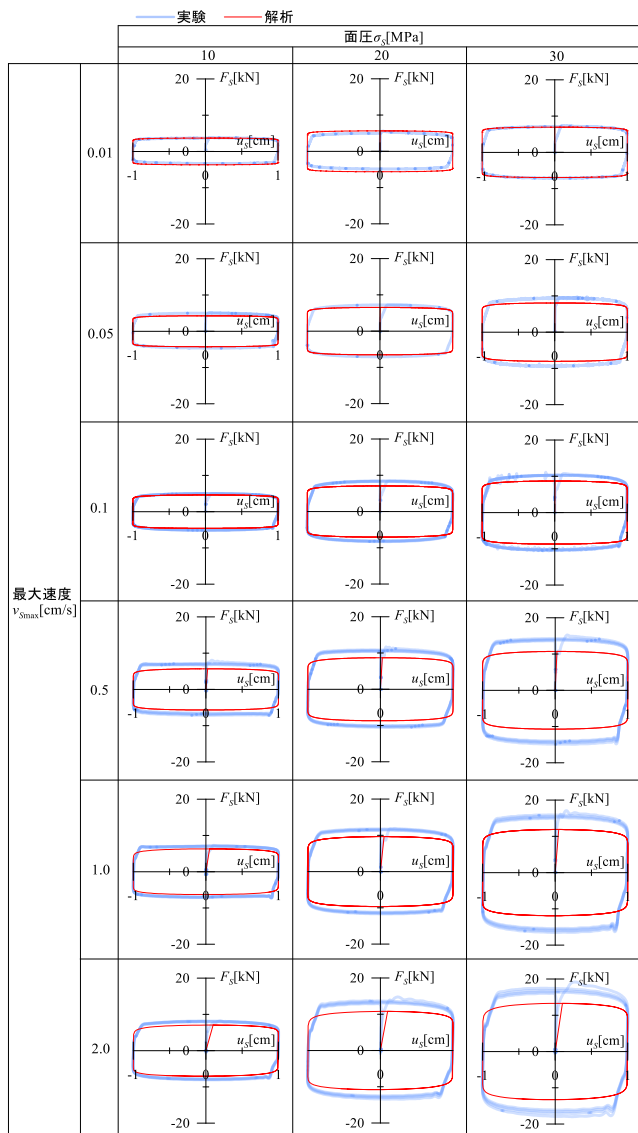


図 10 すべり材実験と非線形 2 要素モデル解析の $F_s - u_s$ 関係比較

再現できることが確認された。なお、高面圧の実験では治具が加振で動いてしまう。これによる実験誤差が原因で、正確に模擬できていないと考えられる。

4 まとめ

本報その 1 では、加振条件を統一したすべり材実験から文献 7) と同様に摩擦係数の速度・面圧依存性を構築することで式の改良を行い、その結果を用いてすべり材の解析モデルを構築した。また、そのモデルに対して変位制御解析を行い、すべり材実験結果と比較することで、構築したモデルがすべり材を精度良く再現出来ていることを示した。

*1 東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生

*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 准教授・博士 (工学)

*3 オークランド大学 講師・Ph.D.

*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

*7 元戸田建設株式会社 技術研究所

参考文献

- 1) 日本免震構造協会. "免震建物の最近の動向". 入手先 (https://www.jssi.or.jp/wp/wp-content/uploads/society_economy/keizoku2.pdf), (参照 2023-12-13)
- 2) 日本免震構造協会: 免震建築物の耐震設計指針(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, 2022.2
- 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, 2010.3
- 7) 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, 二村夏樹: 高摩擦弾性すべり支承の耐風領域における摩擦特性の検討 その 2 すべり材実験結果を用いた摩擦係数の速度および面圧依存式の構築, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造・II, pp.435-436, 2023.7
- 8) 日本免震構造協会: 免震部材標準品リスト 2023, 2023.5

附録 A 実験におけるすべり材温度

摩擦係数の値は速度、面圧だけでなく、温度にも依存することが知られている⁴⁾。本報では低速度領域を対象としており、低速度での摺動では温度の影響が小さいと考えられるため、温度依存性は考慮していない。そのため、実験結果の摩擦係数が温度により変化していないことを確認する必要がある。

図 A に、すべり材実験におけるすべり材温度 θ_s の時刻歴波形の例を示す。図より、加振時の最大速度、面圧が高いほど θ_s の上昇が大きくなることが確認されたが、本報図 3 に示すように、サイクルが進み温度が上昇しても、本実験の温度変化の範囲では摩擦係数はほとんど影響を受けないことがわかる。以上より、本報では温度の影響を考慮しなくてよいと考えられる。

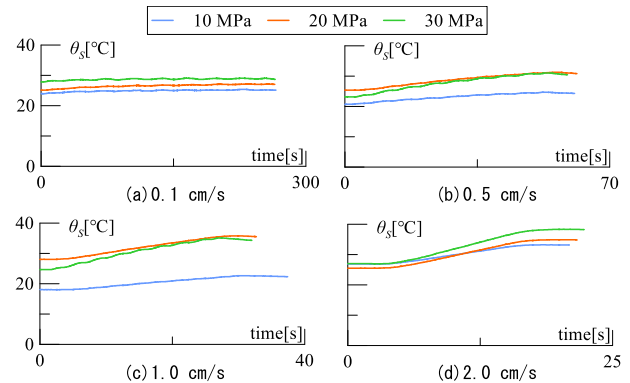


図 A すべり材実験のすべり材温度

附録 B 弾性すべり支承実験の静的荷重試験結果

静的荷重試験では、面圧 20 MPa の条件下で、弾性すべり支承に $\mu_s / \mu_{d40}(\sigma_s) = 0.40$ となるように静的荷重を与える条件および $\mu_s / \mu_{d40}(\sigma_s) = 0.33$ となるように静的荷重を与えた条件の 2 ケースを行った。図 B に静的荷重試験における変位の時刻歴波形を示す。図より、 $\mu_s / \mu_{d40}(\sigma_s) = 0.40$ の実験では静的荷重に対して変位が増大しているのに対し、 $\mu_s / \mu_{d40}(\sigma_s) = 0.33$ の実験では静的荷重に対して変位は一定である。よって、前者はすべり材が摺動しているが、後者は静止していると考えられる。ここで、静的荷重試験では、荷重制御で一定時間荷重を保持しているため、静的荷重中の弾性すべり支承、およびすべり材の加振速度はほぼ 0 cm/s と考えられる。以上より、 v_s がほぼ 0 のときの摩擦係数比は 0.33 程度と考えられることから、摩擦係数比の下限値を 0.33 とした。

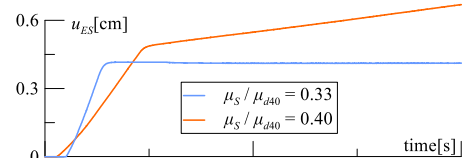


図 B 静的荷重試験における変位の時刻歴波形

Grad.Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology

Associate Professor, IIR, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Lecturer, University of Auckland, Ph.D.

SWCC Corporation

Technology Research Institute, TODA Corporation

Structural Design Department, TODA Corporation

Technology Research Institute, Formerly of TODA Corporation