T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風荷重を受ける高摩擦弾性すべり支承のスリップ現象に関する実験的検討 その2 荷重制御実験と再現解析手法の検討
Title(English)	Experimental Study on Slip Phenomena in High-Friction Elastic Sliding Bearings Subjected to Wind Loads Part 2: Study of Load Control Experiments and Reproducibility Analysis Methods
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 Tokuno, Junya Maruo
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集， I， ，pp. 561-564
Citation(English)	， I， ，pp. 561-564
発行日 / Pub. date	2026，3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

2025年度日本建築学会
関東支部研究報告集Ⅰ
2026年3月

風荷重を受ける高摩擦弾性すべり支承のスリップ現象に関する実験的検討
その2　荷重制御実験と再現解析手法の検討

構造－振動

正会員 ○ 崎谷俊太[*1]　正会員　佐藤大樹[*2]
〃　陳引力[*3]　〃　三須基規[*4]
〃　稲井慎介[*5]　〃　桑素彦[*6]
〃　川又哲也[*6]　〃　得能将紀[*6]
〃　丸尾純也[*5]

高層免震建物　高摩擦弾性すべり支承
荷重制御実験　低速度領域

1. はじめに

本報その1では，積層ゴム部のゴム総厚が異なる弾性すべり支承縮小試験体を対象に変位制御実験を実施し，非線形3要素モデルの適用性を検証した。しかし，当モデルの検討は変位制御解析における挙動に限られており，荷重制御時に生じるスリップ現象を表現できているかは不明である。そこで本報その2では，その1と同様の試験体を対象に荷重制御実験を実施し，非線形3要素モデル[1)]を用いた荷重制御解析の検討を行う。

2. 荷重制御実験概要

弾性すべり支承実験のセットアップ，試験体詳細および計測項目は本報その1と同様である。また，試験体についてはゴム部の総厚がそれぞれ 4 mm，8 mm，12 mm のものを用いた。実験での荷重制御載荷条件一覧を表1に示す。なお，ゴム総厚4 mmの試験体を用いた実験の載荷条件は文献 2）に記し，実験名は通し番号とした。本実験ではその1で示したスリップ現象による変位増大を確認するため，風方向風力を模擬した，平均成分と変動成分を組み合わせた荷重を設定した。また，加振速度が風応答と同程度の0.5～1.0 cm/sとなるように周波数を設定した。荷重比λ_Fとは，載荷荷重F_{ES}の最大値を耐震設計で用いられる，$v_{ES}=40$ cm/sでの摩擦係数の基準値μ_{d40}における水平荷重F_{d40}で除したものである[2)]。表1に示すとおり，面圧と荷重比をパラメータとしている。なお，ゴム総厚が変化しても荷重比，面圧は変化しないため，実験時は最大速度に応じて周波数のみを変化させている。

3. 非線形3要素モデルによる荷重制御解析概要

3.1 非線形3要素モデルでの計算手法

本報その1で示した非線形3要素モデルを式（1）に示す[1)]。なお，以下で用いる記号は本報その1と同様とする。

表1　荷重制御実験載荷条件

（a）ゴム総厚 8 mm

実験名	波形	面圧 [MPa]	最大荷重 [kN]	最大荷重（荷重比）	平均荷重 [kN]	周波数 [Hz]
LC-E-1	正弦波	10	5.44	0.70	3.51	0.316
LC-E-2			6.21	0.80	4.01	0.276
LC-E-3			6.99	0.90	4.51	0.246
LC-F-1	正弦波	20	8.33	0.70	5.37	0.206
LC-F-2			9.52	0.80	6.14	0.180
LC-F-3			10.71	0.90	6.91	0.160
LC-G-1	正弦波	30	10.26	0.70	6.62	0.167
LC-G-2			11.72	0.80	7.56	0.147
LC-G-3			13.19	0.90	8.51	0.130

（b）ゴム総厚 12 mm

実験名	波形	面圧 [MPa]	最大荷重 [kN]	最大荷重（荷重比）	平均荷重 [kN]	周波数 [Hz]
LC-H-1	正弦波	10	5.44	0.70	3.51	0.412
LC-H-2			6.21	0.80	4.01	0.361
LC-H-3			6.99	0.90	4.51	0.321
LC-I-1	正弦波	20	8.33	0.70	5.37	0.269
LC-I-2			9.52	0.80	6.14	0.236
LC-I-3			10.71	0.90	6.91	0.209
LC-J-1	正弦波	30	10.26	0.70	6.62	0.219
LC-J-2			11.72	0.80	7.56	0.191
LC-J-3			13.19	0.90	8.51	0.170

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

式（1）より非線形3要素モデル全体の荷重F_{ES}が決まればそのステップでのモデル全体の速度v_{ES}を算出することができる。その後算出したv_{ES}を Runge-Kuttta 法により数値積分を行うことでモデル全体の変位u_{ES}を算出する。非線形 3 要素モデルにおけるすべり出し荷重F_{F0}は耐震設計における摩擦係数μ_{d40}の面圧依存式および文献 3）でのすべり荷重の下限値より決定した（式（2），（3））。

$$\mu_{d40}(\sigma_S) = 0.094(-0.4388\ln(\sigma_S) + 2.3094) \quad (2)$$
$$F_{F0} = 0.33 N_{ES}\mu_{d40}(\sigma_S) \quad (3)$$

Experimental Study on Slip Phenomena in High-Friction Elastic Sliding Bearings Subjected to Wind Loads
Part 2: Study of Load Control Experiments and Reproducibility Analysis Methods

Shunta SAKIYA, Daiki SATO, Chen YINLI, Motoki MISU, Shinsuke INAI, Motohiko KUWA, Tetsuya KAWAMATA, Masaki TOKUNO, Junya MARUO

3.2 すべり出し荷重の決定

荷重制御実験でのすべり出し荷重F_{F0eq}を決定する。すべり出す前の弾性範囲での全体速度$v_{ES}(t)$は荷重の変化量ΔF_{ES}を用いて式（4）のように表される。すべり材の摩擦係数μ_sには速度依存性があり，その値はμ_{d40}を用いて式（5）のように表される。式（4）より算出した速度$v_{ES}(t)$を式（5）に代入することで摩擦係数$\mu_s(t)$を算出し，その値を用いて式（6）より摩擦力$F_\mu(t)$を算出する。載荷荷重F_{ES}が摩擦力$F_\mu(t)$を上回った点を実験におけるすべり出し荷重F_{F0eq}とする。

$$v_{ES}(t) = \Delta F_{ES}/(K_E \cdot \Delta t) \quad (4)$$

$$\mu_s(t) = (0.33 + 0.58 v_{ES}(t)^{0.26}) \cdot \mu_{d40}(\sigma_S) \quad (5)$$

$$F_\mu(t) = N_{ES} \cdot \mu_s(t) \quad (6)$$

図 1 に荷重制御実験でのすべり出し荷重F_{F0eq}の決定方法の例を示す。図 1 より，載荷荷重F_{ES}が増加していく途中で摩擦力$F_\mu(t)$を上回っていることが確認でき，交点をすべり出し荷重F_{F0eq}とする。

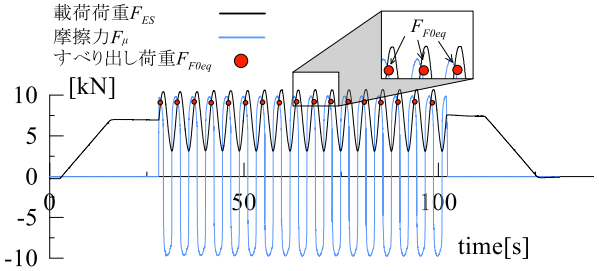


図 1　すべり出し荷重の決定方法

3.3 解析の分岐方法

非線形 3 要素モデルで計算を行うにあたり，すべり出す前はゴム部のみが変形する弾性範囲での挙動となり，すべり出した後は非線形 3 要素モデル全体での挙動となる[1)]。そのため，荷重制御実験でのすべり出し荷重F_{F0eq}の前後で解析手法を分岐させる。図 2 に載荷荷重の波形と解析手法の分岐方法を示す。分岐させる範囲については文献 4）でのスティックスリップ現象を参考にし，荷重の変化量が正かつすべり出し荷重を下回っている範囲を弾性範囲とし，その他の範囲をすべり範囲として非線形 3 要素モデルを用いる。なお弾性範囲の速度は式（4）より算出する。

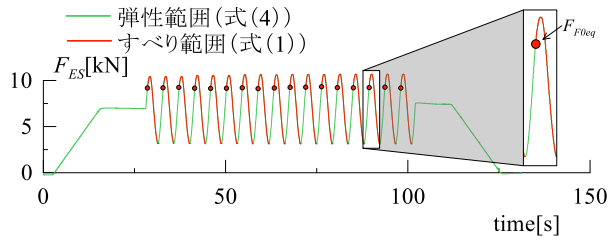
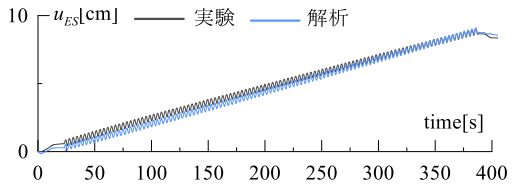


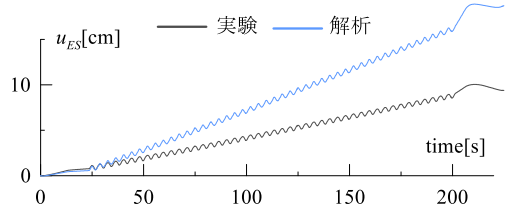
図 2　荷重制御解析の分岐方法

3.4 変位時刻歴波形の分析

以上に示した手法により行った解析の時刻歴波形の例を図 3（a），（b）に示す。図 3 には，解析が実験を再現できているケース（図 3（a））とできていないケース（図 3（b））を 1 ケースずつ示している。



（a）LC-C-1[2)]



（b）LC-C-2[2)]

図 3　時刻歴波形比較（抜粋）

摩擦係数μ_sには面圧，速度依存性がある。そのため，本実験の現象を数値解析で再現するためには，積層ゴム部の変形による面圧の変化に応じて，摩擦係数μ_sも変化させる必要があると考えられる。そこで，次章ではすべり時の積層ゴム部の変形を考慮した係数を用いて摩擦係数μ_sを補正し，本実験でのスリップ現象の再現を試みる。

4. 摩擦係数の補正と補正後の解析結果

4.1 摩擦係数補正の定式化

はじめに，試行錯誤的に摩擦係数を補正し，実験を再現できる補正後の摩擦係数μ_{d40}'を決定した。補正前の摩擦係数μ_{d40}との比率λ_μを式（7）の様に定める。

$$\lambda_\mu = \mu_{d40}'/\mu_{d40} \quad (7)$$

摩擦係数μ_{d40}には式（2）で示すように面圧依存性があり，積層ゴム部の変形が面圧に影響を与えていると考えられる。そこで，比率λ_μを算出するにあたり，面圧とすべり出す直前のゴム部の変形による中心のずれを偏心率 e を用いて検討する。式（8）によりゴム部の中心のずれδを算出し，式（9）により偏心率 e を算出する。なお，r はすべり材の半径を表す。

$$\delta = F_{F0eq}/K_E \quad (8)$$

$$e = \delta/r \quad (9)$$

図 4 に摩擦係数の比率λ_μと偏心率 e の関係を示す。図 4 より，ゴム総厚ごとにまとまった傾向は見られ，偏心率 e が大きくなるにつれ摩擦係数の比率λ_μも大きくなっていることが確認できる。

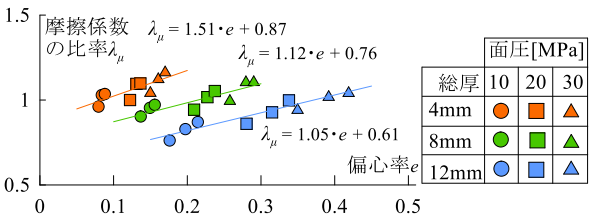


図 4　摩擦係数の比率λ_μと偏心率 e の関係

続いて，図 4 に示すプロットを 1 つの近似式で表す。プロットをまとめる係数として無次元化剛性K_E^*と基準化面圧λ_σを用いる。無次元化剛性K_E^*は式（10）に示すように水平剛性K_Eを軸力N_{ES}，積層ゴム部の直径 L により無次元化した値とする。また，基準化面圧λ_σは式（11）に示すように基準面圧 20 MPa で除した値とする。以上のパラメータを使用し，各プロットを 1 つの式で表現できるようにまとめた結果を図 5 に示す。図 5 より各プロットは 1 つの式で表されることが分かり，その式を式（12）に示す。本報では，式（12）に示すように各パラメータの指数部分を調整し，補正式と各プロットの誤差が小さくなるように式を決定した。

$$K_E^* = K_E \cdot L / N_{ES} \quad (10)$$

$$\lambda_\sigma = \sigma / 20 \quad (11)$$

$$\lambda_\mu / {\lambda_\sigma}^{0.7} = 7.57 \cdot \alpha + 0.05 \quad (12)$$

（ただし，$\alpha = e \cdot K_E^{*1.2}$）

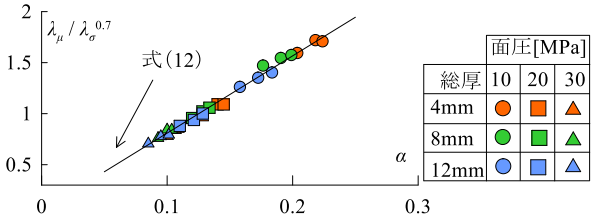
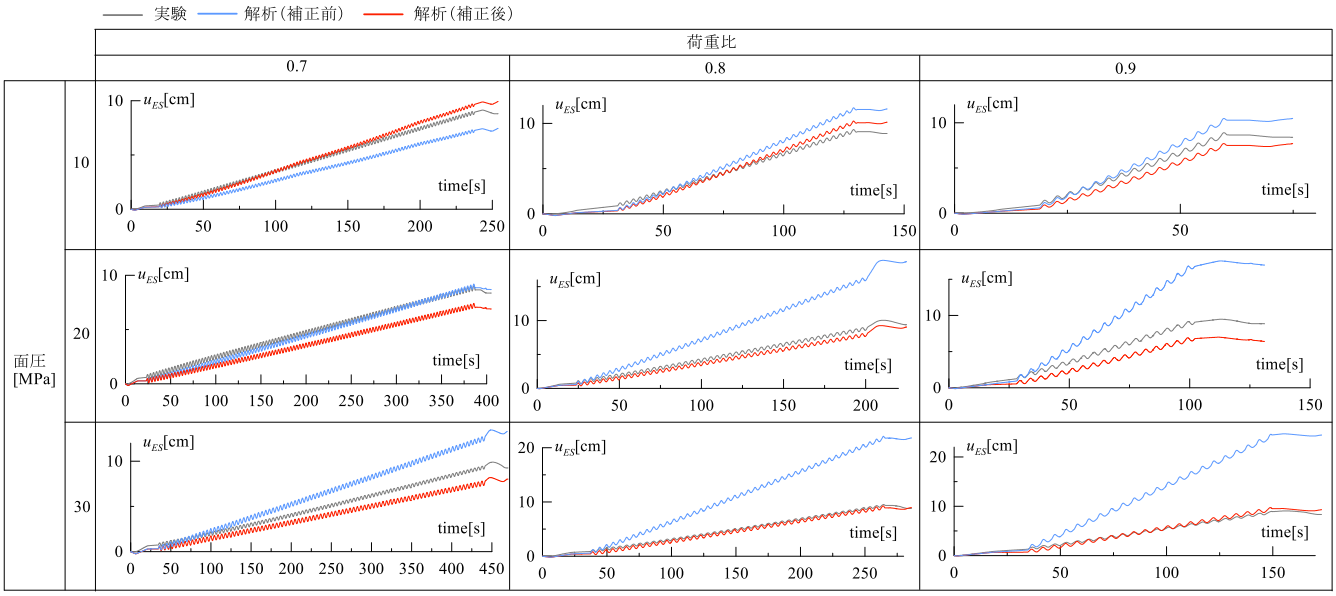


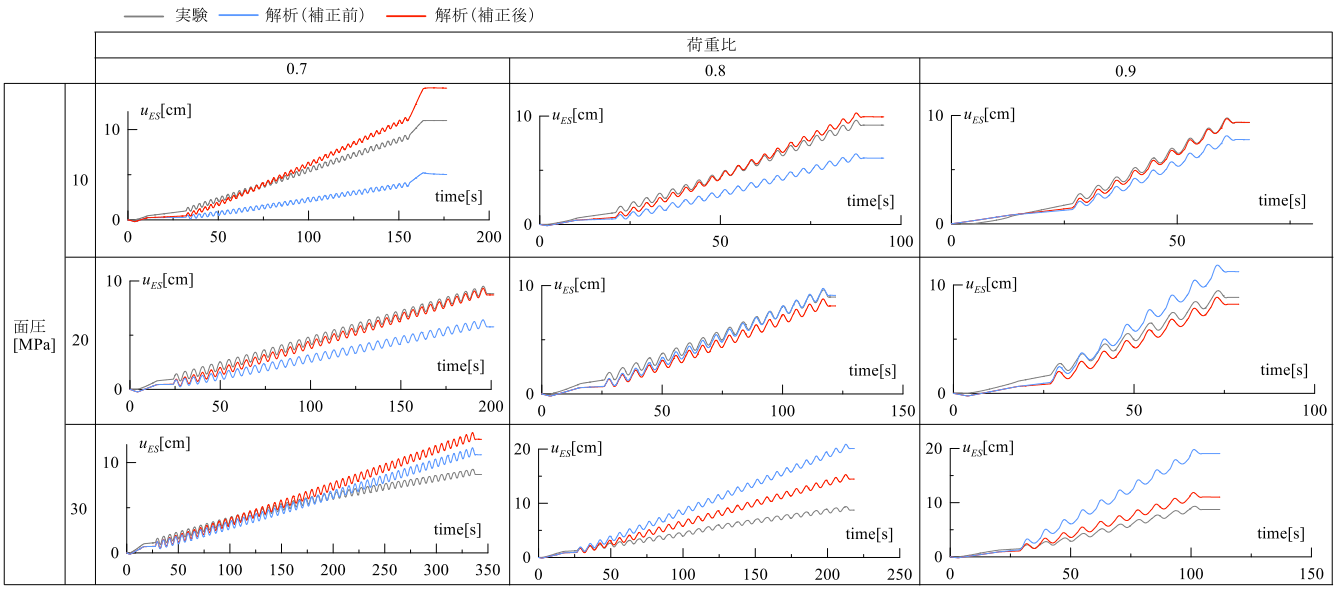
図 5　摩擦係数の比率λ_μと αの関係

4.2 変位時刻歴波形の比較

4.1 節で示した摩擦係数の補正式を用いて荷重制御解析を行い，実験の時刻歴波形との比較を行う。図 6，7 に時刻歴波形の比較を示す。なお，図 6，7 には摩擦係数補正前の解析結果も併せて示す。図 6，7 より，摩擦係数を補正することで概ねのケースで解析結果が改善



（a）総厚 4 mm



（b）総厚 8 mm

図 6　ゴム総厚 4 ㎜ と 8 ㎜ の変位時刻歴波形比較

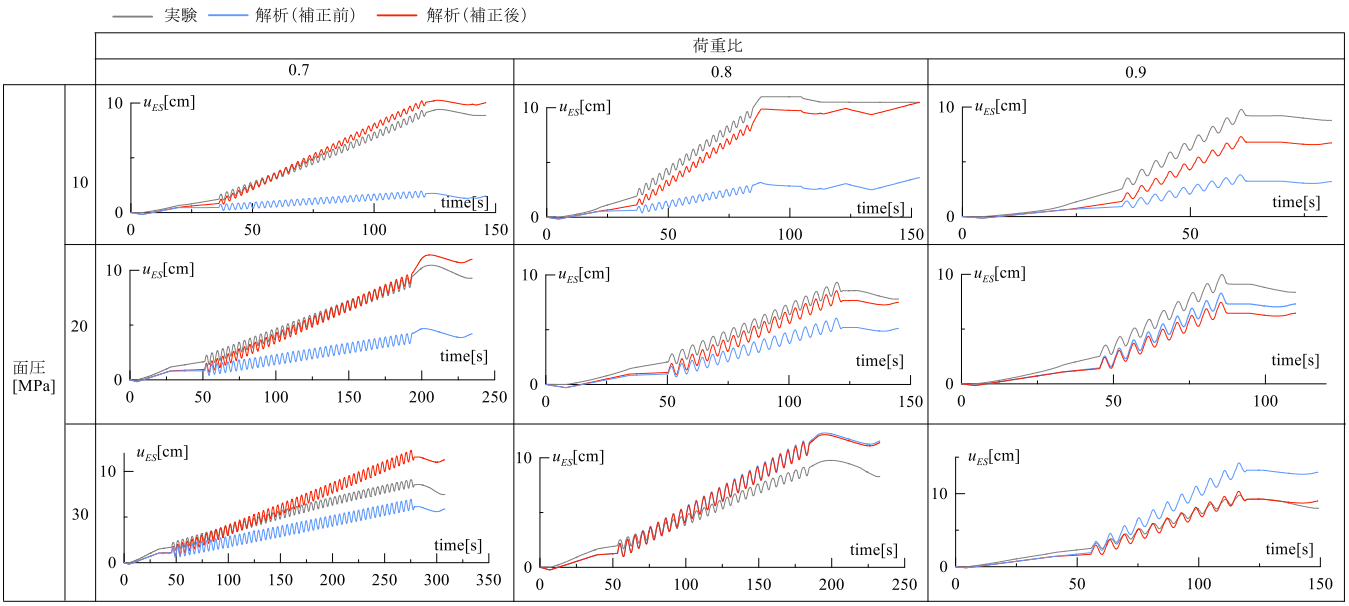


図 7　ゴム総厚 12 ㎜の変位時刻歴波形比較

している ことが分かる。一方で，図 6（b）の 30 MPa のケースのように補正後の摩擦係数を用いても実験の波形とやや一致しないケースも見られた。理由として，摩擦係数は本解析モデルの速度を決定するために用いられる値（式（5））であり，僅かな変化であっても解析結果に影響を与えるためと考えられる。

5. まとめ

本報その 2 ではゴム部の総厚が異なる弾性すべり支承縮小試験体を対象に荷重制御実験を実施し，非線形 3 要素モデルによるスリップ現象の再現解析を行った。摩擦係数の補正を行わない場合には，全ての実験結果を再現できていなかったため，偏心率 e，無次元化剛性K_E^*，基準化面圧λ_σを用いて摩擦係数の補正式を作成した。その結果，補正式を用いて摩擦係数を補正し荷重制御解析を行うことで，変位時刻歴波形が改善され，実験結果を概ね再現できていることを確認した。

参考文献

1) 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：風応答を対象とした弾性すべり支承解析モデルにおける弾性領域の精度向上のための数値計算アルゴリズムの修正，日本建築学会技術報告集，第 32 巻，第 80 号，pp.116-120，2026.2
2) 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：高摩擦弾性すべり支承のスリップ現象による変位増大の予測精度の検証，日本建築学会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp.837-838，2025.7
3) 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
4) 接触と摩擦の物理学，丸善出版，2023.12

謝辞

本報告は，戸田建設株式会社，SWCC 株式会社および東京科学大学佐藤大樹研究室の共同研究の成果の一部をまとめたものです。実験において，SWCC 株式会社の土屋諒恭氏には御協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

付録 A. 無次元化剛性について

本報では，式（10）に示すように無次元化剛性K_E^*を定めている。水平剛性は，材料定数G_E，断面積A_S，総厚 d を用いて表される。そのため，式（10）を変形すると式（A1）の様になり，無次元化剛性K_E^*は材料定数G_E，面圧σ，積層ゴム部の形状によって定義される。

$$K_E^* = G_E \cdot \frac{A_S}{d} \cdot \frac{L}{N_{ES}} = \frac{G_E}{\sigma} \cdot \frac{L}{d} \qquad \text{(A1)}$$

*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 Division, TODA Corporation