

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

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]	平均荷重 [kN]	周波数 [Hz]
LC-E-1	正弦波	10	5.44	0.70	3.51
LC-E-2			6.21	0.80	4.01
LC-E-3			6.99	0.90	4.51
LC-F-1	正弦波	20	8.33	0.70	5.37
LC-F-2			9.52	0.80	6.14
LC-F-3			10.71	0.90	6.91
LC-G-1	正弦波	30	10.26	0.70	6.62
LC-G-2			11.72	0.80	7.56
LC-G-3			13.19	0.90	8.51

(b) ゴム総厚 12 mm

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

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

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-Kutta 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))。

$$\mu_{d40}(\sigma_S) = 0.094(-0.4388\ln(\sigma_S) + 2.3094) \quad (2)$$

$$F_{F0} = 0.33N_{ES}\mu_{d40}(\sigma_S) \quad (3)$$

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。

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

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

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

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。

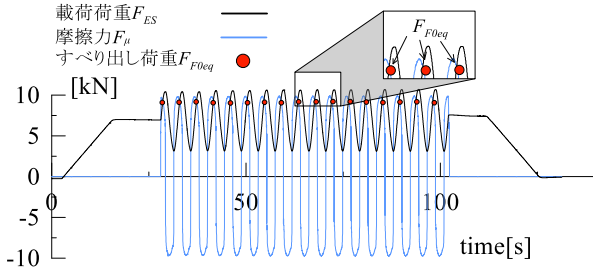


図1 すべり出し荷重の決定方法

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。

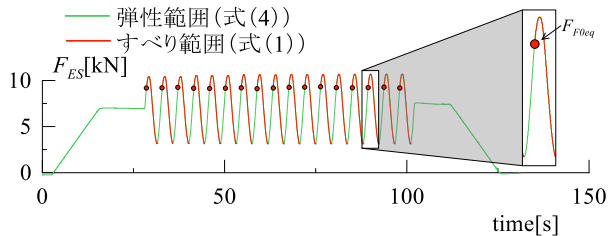
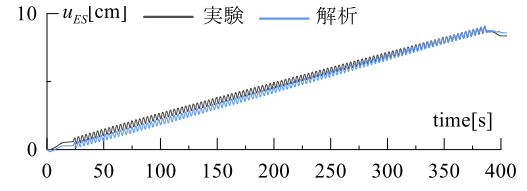


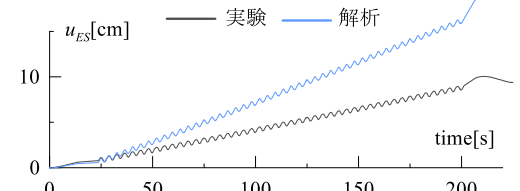
図2 荷重制御解析の分岐方法

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-1²⁾



(b) LC-C-2²⁾

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めた傾向は見られ、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。

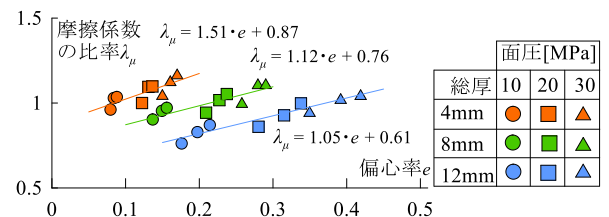


図4 摩擦係数の比率 λ_μ と偏心率 e の関係

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、 $\alpha = e \cdot K_E^{*1.2}$)

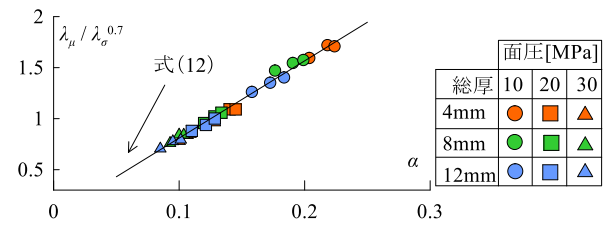


図5 摩擦係数の比率 λ_μ と α の関係

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

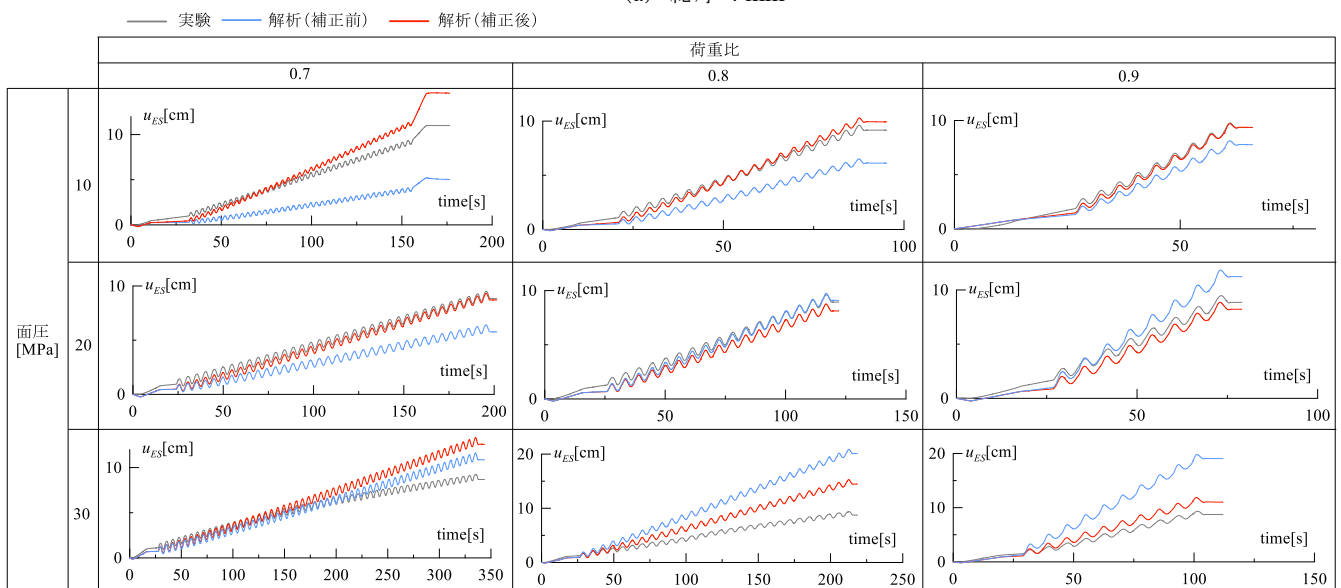
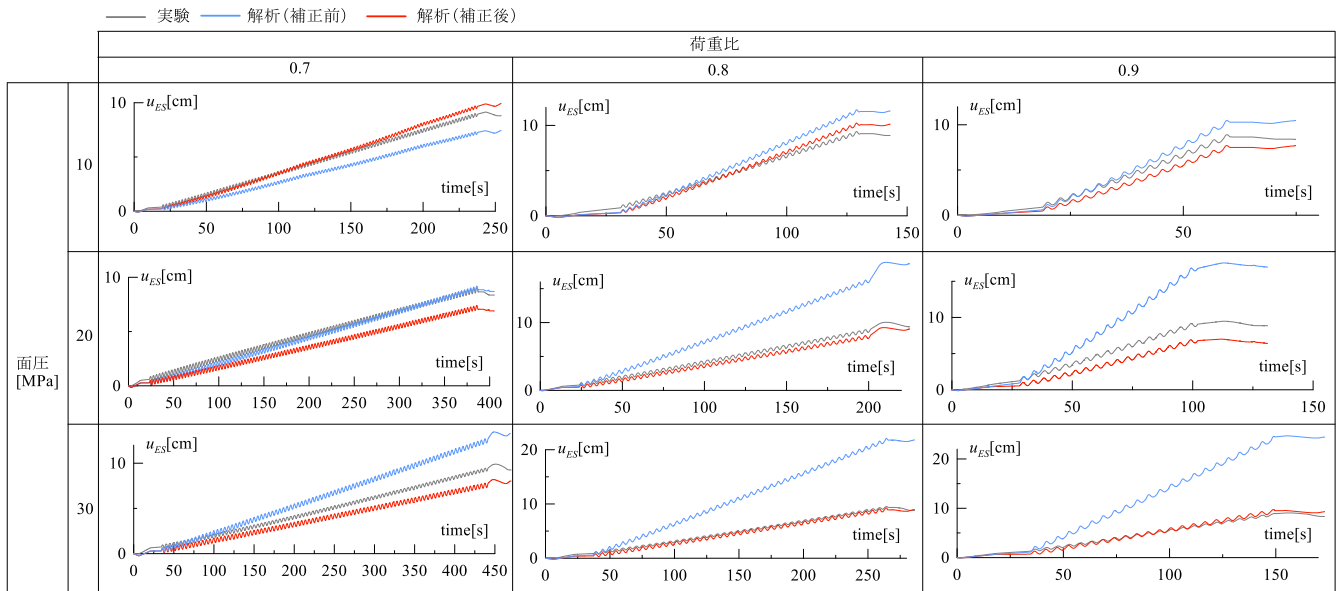


図6 ゴム総厚4 mmと8 mmの変位時刻歴波形比較

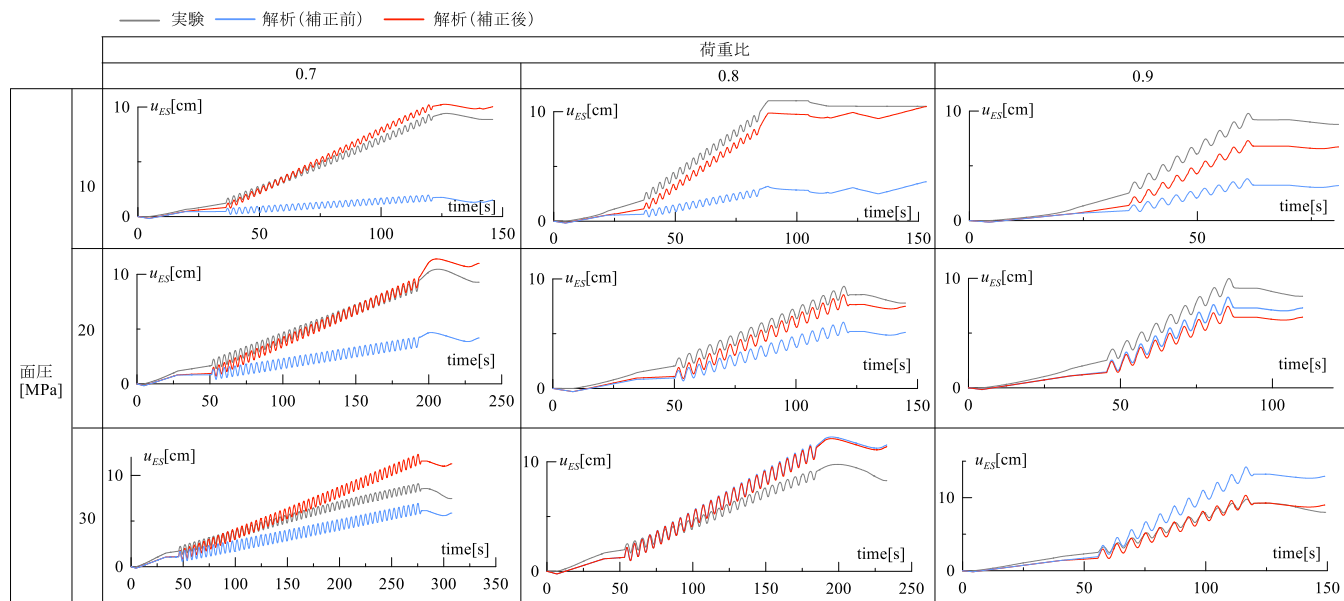


図7 ゴム総厚 12 mm の変位時刻歴波形比較

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。

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

*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