

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	Prediction of High Friction Elastic Bearing Behavior in Load Control Experiments Assuming Mean Component of Wind Load for Loading History in 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. 561-564
Citation(English)	, , , pp. 561-564
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スリップ現象による変位増大の予測

構造—振動

高層免震建物 高摩擦弾性すべり支承

荷重制御加振実験 低速度領域

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

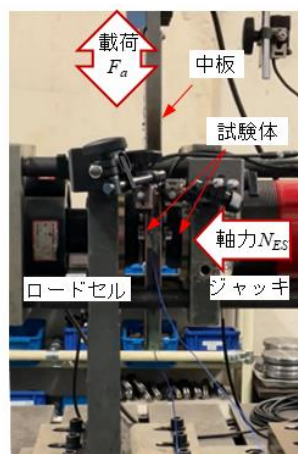
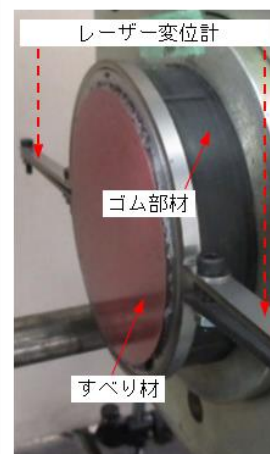
近年、高層建物に免震構造を採用する事例が増えている。高層免震建物では作用する風力が増大し、かつ同一規模の基礎を固定とした建物に比べ固有周期が長くなる傾向にあるため、免震建物の耐風設計需要が増加している<sup>1,2)</sup>。

主要な免震部材である弾性すべり支承の摩擦係数は風応答のような低速度領域において低下することが知られている<sup>3)</sup>。摩擦係数は弾性すべり支承の滑動に関わるため、風力を受けた際に耐震設計では滑動しないという判定がなされたケースにおいても、実際は滑動が発生し、結果的に変位が想定以上に増大する現象（以下、スリップ現象）の発生が予想される<sup>4)</sup>。筆者らは文献<sup>6)</sup>にて荷重制御実験より、スリップ現象による変位増大を確認している。しかし、文献<sup>6)</sup>は変位増大を定量的に評価できていない。そこで、本報では弾性すべり支承に対して、文献<sup>6)</sup>で実施された実験パラメータに加え、追加の平均成分を有する長時間の正弦波荷重制御実験を実施し、その結果よりスリップ現象による変位増大の予測手法について提案する。

## 2 荷重制御実験

## 2.1 試験体セットアップ、計測項目

図1に弾性すべり支承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。試験体のすべり材には直径90mmの充填剤入りPTFEを、試験体のゴム部材には層厚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つ用いてそれぞれを中板で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荷重 $F_a$ を制御して加振を行った。計測項目は、アクチュエータ変位 $u_a$ 、ゴム変形 $u_E$ 、荷重 $F_a$ 、軸力 $N_{ES}$ 、およびすべり材の温度 $\theta_S$ である。ゴム変形 $u_E$ についてはジャッ

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

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。

本実験では弾性すべり支承の荷重 $F_{ES}$ 、および弾性すべり支承の速度 $v_{ES}$ をそれぞれ以下の式によって算出した。ここで、 $t$ は実験における任意の時刻(s)を表す。

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

$$v_{ES}(t) = \frac{d}{dt} u_{ES}(t) \quad (2)$$

## 2.2 载荷条件

本実験では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持つ正弦波によって加振を行った。また、風応答と同程度となるように最大速度は $0.5 \text{ cm/s}$ 、ガストファクター $G_f$ は2.1となるように载荷を行った。

正弦波の振幅 $A_r$ は、風力の変動成分の最大荷重 $Q'_{max}$ を用いて式(3)より算出される。さらに、 $Q'_{max}$ は風力の最

大荷重 $Q_{max}$ から平均成分 $\bar{Q}$ を引いた式 (4) より算出される。

$$A_r = 0.5Q'_{max} \quad (3)$$

$$Q'_{max} = Q_{max} - \bar{Q} \quad (4)$$

ここで、 $Q_{max}$ はガストファクター $G_f$ を用いて式 (5) で算出される。

$$Q_{max} = G_f \bar{Q} \quad (5)$$

本実験ではガストファクター $G_f$ は2.1 としているため、以上の式より以下の式 (6) が算出される。

$$A_r = 0.55\bar{Q} \quad (6)$$

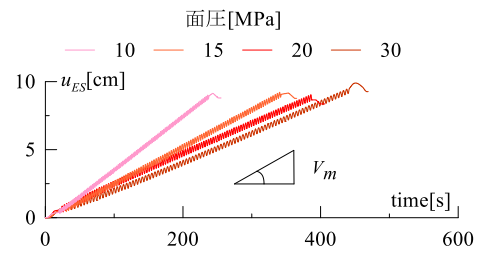
### 3 実験の傾向と分析

#### 3.1 面圧が異なる実験

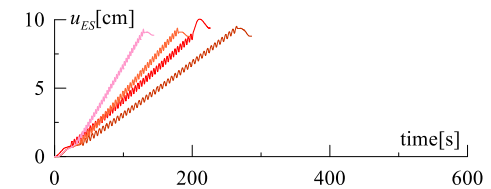
表 1 に加振条件と実験結果一覧，図 3~5 に実験の荷重 $F_{ES}$ —変形 $u_{ES}$ 関係，図 6 に実験の変位時刻歴波形を示す。ここで、荷重比 $\lambda_F$ とは、載荷荷重 $F_{ES}$ の最大値を耐震設計で用いられる、 $v_{ES} = 40\text{cm/s}$ における水平荷重の基準値 $F_{d40}$ で除したものである<sup>4)</sup>。また、変位時刻歴波形の傾きを平均変位移動速度 $V_m$ と定義する (図 6 参照)。図 3~5 より、荷重比 $\lambda_F$ が同じであっても、面圧 $\sigma$ が変化することで1 サイクルごとの変位増大の傾向がやや変化しており、面圧が小さくなると1 サイクル間での変位の増加量が大きくなっている。そのため、図 6 より同荷重比における変位時刻歴波形を見ると、面圧が小さい実験ケースほど平均変

表 1 加振条件と実験結果一覧

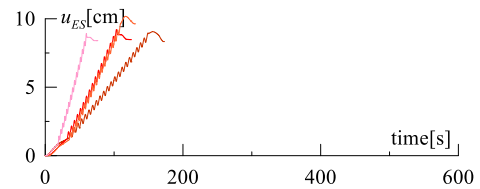
実験名	波形	面圧 [MPa]	最大荷重		平均荷重 [kN]	$V_m$ [cm/s]	文献
			[kN]	(荷重比)			
LC-A-1	正弦波	10	5.44	0.70	3.51	0.0396	-
LC-A-2			6.21	0.80	4.01	0.0839	-
LC-A-3			6.99	0.90	4.51	0.1934	-
LC-B-1	正弦波	15	7.04	0.70	4.54	0.0272	-
LC-B-2			8.05	0.80	5.19	0.0582	-
LC-B-3			9.05	0.90	5.84	0.1099	-
LC-C-1	正弦波	20	8.33	0.70	5.37	0.0229	(6)
LC-C-2			9.52	0.80	6.14	0.0458	(6)
LC-C-3			10.71	0.90	6.91	0.1036	(6)
LC-D-1	正弦波	30	10.26	0.70	6.62	0.0208	-
LC-D-2			11.72	0.80	7.56	0.0375	-
LC-D-3			13.19	0.90	8.51	0.0647	-



(a) 荷重比  $\lambda_F = 0.7$



(b) 荷重比  $\lambda_F = 0.8$



(c) 荷重比  $\lambda_F = 0.9$

図 6 変位時刻歴波形

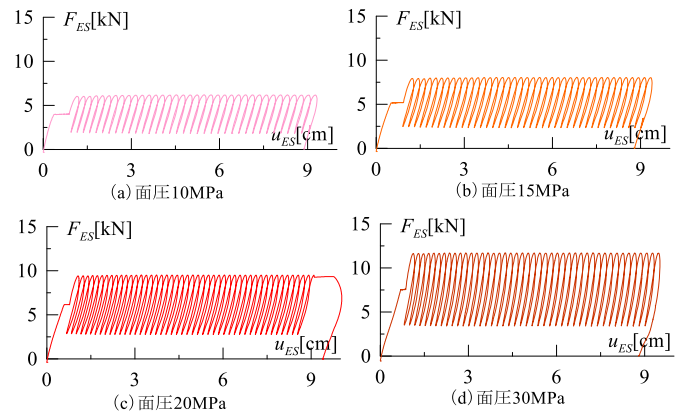


図 4 荷重変形関係 (荷重比 0.8)

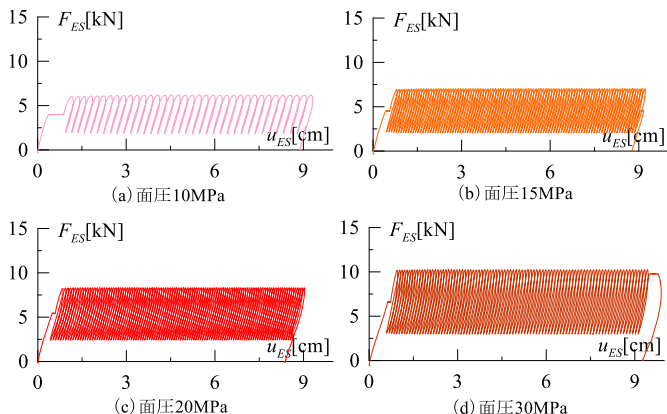


図 3 荷重変形関係 (荷重比 0.7)

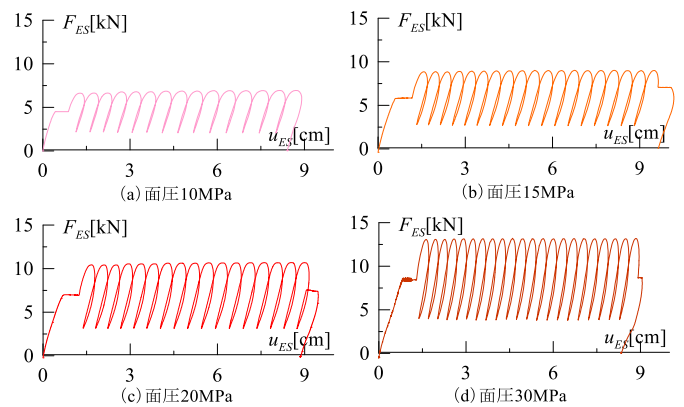


図 5 荷重変形関係 (荷重比 0.9)

位移動速度  $V_m$  は大きくなる傾向にある。

### 3.2 荷重比が 0.33 を下回る実験

表 2 に加振条件と実験結果一覧、図 7 に荷重変形関係、図 8 に変位時刻歴波形を示す。既往研究 6) より、荷重比  $\lambda_F$  が 0.33 を下回る場合はスリップ現象が生じないことが確認されている。本節では、荷重比  $\lambda_F$  を 0.30 とし、ガストファクター  $G_f$  や面圧  $\sigma$  を変化させた場合にスリップ現象が生じないことの検証を行う。図 7, 8 より、ガストファクター  $G_f$  や面圧  $\sigma$  に関わらずいずれのケースも変位がほぼ増大していないことが読み取れる。以上より、既往研究 6) 同様、本実験においても荷重比  $\lambda_F$  が 0.33 を下回るとスリップ現象が生じないことが確認できる。

## 4. 平均変位移動速度の予測手法

### 4.1 荷重比依存式の構築

平均変位移動速度  $V_m$  に外力の継続時間をかけることで変位の増大量を推定できると考えられる。そのため、以上の実験結果を用いて、平均変位移動速度  $V_m$  の荷重比依存式を作成する。図 9 に実験結果の平均変位移動速度  $V_m$ -荷重比  $\lambda_F$  関係を示す。図 9 より、荷重比  $\lambda_F$  と平均変位移動速度  $V_m$  は正の対応関係にあり、面圧が小さいほど平均変位移動速度が大きくなっていることが読み取れる。また、3.2 節より、荷重比  $\lambda_F$  が 0.33 を下回る場合はいずれのケースもスリップ現象が発生していない。そのため、近似方法は累乗近似とし、荷重比  $\lambda_F$  の下限値を 0.33 とした (式 (7) 参照)。また、各面圧において最小二乗法により近似式を作成した。ここで、 $a$ 、 $b$  は近似式の係数であり、近似式の適用範囲は  $0.33 \leq \lambda_F \leq 0.9$  および  $10 \leq \sigma \leq 30$  とする。

$$V_m = a \cdot (\lambda_F - 0.33)^b \quad (7)$$

### 4.2 係数 $a$ 、 $b$ の決定

続いて 4.1 節における各近似式より、係数  $a$ 、 $b$  を算出する関数の同定を行う。係数  $a$ 、 $b$  はそれぞれ面圧  $\sigma$  の関数で表すことができ、関数の同定は 4.1 節同様、最小二乗法により決定した。式 (8) に係数  $a$  の近似式を、式 (9) に係数  $b$  の近似式をそれぞれ示す。

$$a = 34.738 \cdot \sigma^{-1.392} \quad (8)$$

$$b = -0.0468 \cdot \sigma + 4.1188 \quad (9)$$

図 10 に係数  $a$ 、 $b$  と面圧の関係を示す。面圧 15MPa および 20MPa 時に近似式と実験値でやや差異が見られる結果となった。以上の式 (7)、(8)、(9) より算出した近似式を図 9 に示す。いずれの近似式も実験結果を概ね捉えられている。

## 5. 作成した近似式による変位増大の予測精度の検証

前章で作成した平均変位移動速度  $V_m$  の予測式より変位の増大量の予測精度検証を行う。10 分間における変位を

表 2 加振条件と実験結果一覧

実験名	波形	面圧 [MPa]	最大荷重 [kN]	平均荷重 [kN]	$V_m$ [cm/s]	文献
LC-E-1	正弦波	10	2.33	1.50	0.0002	-
LC-E-2		20	3.57		0.0001	
LC-E-3		30	4.40		0.0003	
SLC-A-1	-	10	2.33	2.33	0.0009	-
SLC-A-2		20	3.57		0.0006	
SLC-A-3		30	4.40		0.0007	

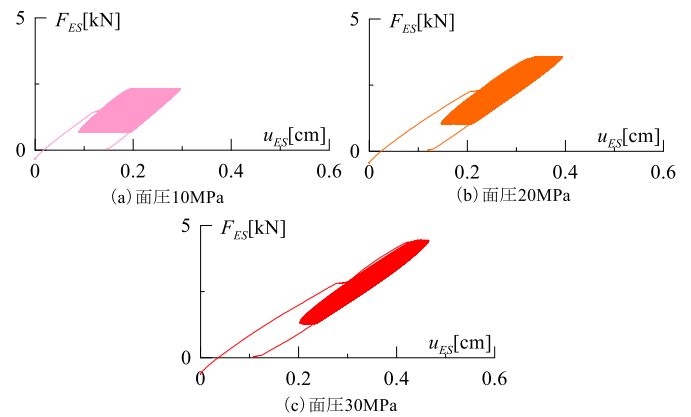


図 7 荷重変形関係 (荷重比 0.3)

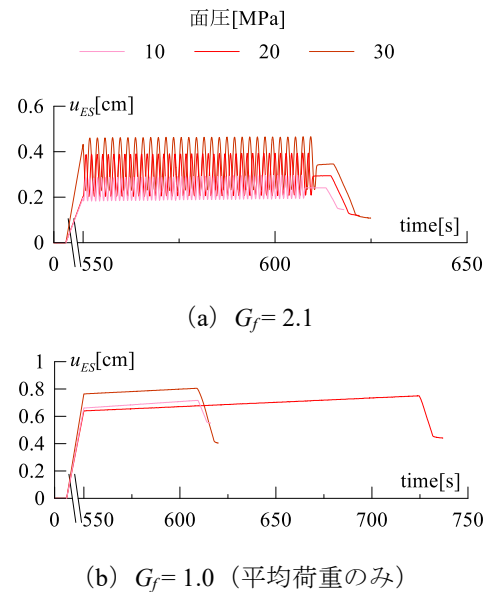


図 8 変位時刻歴波形 (荷重比 0.33)

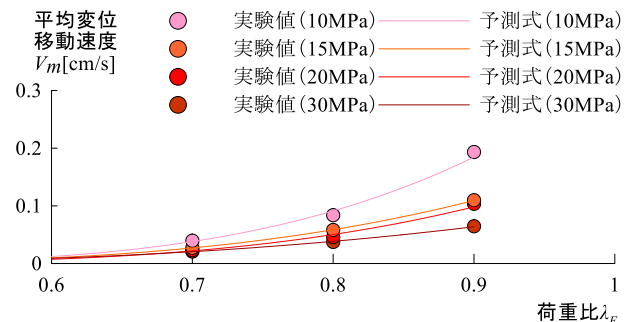


図 9 平均変位移動速度  $V_m$ -荷重比関係

平均移動変位  $X_m$  と定義し、図 11 に平均移動変位  $X_m$ -荷重比  $\lambda_F$  関係を示す。図 11 より本報での予測手法は実験結果を概ね捉えられていることが分かる。また、図 11 に平均移動変位  $X_m$  の予測精度を示す。いずれのケースも概ね誤差 10%以内に収まっていた。以上より 4 章で作成した予測式は、本報での実験結果を概ね捉えられている。

## 6. まとめ

本報では、長時間加振実験の概要を示した後、実験ケースの分析を行うことで、変位増大に関するパラメータを決定した。また、実験結果より平均変位移動速度を定義し、その値を予測する近似式を実験結果より導出した。その結果より、平均移動変位  $X_m$  を算出し、変位増大を定量的に予測できた。

### 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/k-eizoku2.pdf](https://www.jssi.or.jp/wordpress/wpcontent/uploads/society_economy/k-eizoku2.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) 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，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.433-434，2023.7
- 4) 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：高摩擦弾性すべり支承における水平クリープ現象に関する実験的検討-縮小試験体を用いた荷重制御加振実験-，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.484-488，2023.2
- 5) 免震建築物の耐風設計指針（2023），日本免震構造協会，2023.2
- 6) 崎谷俊太，佐藤大樹，牧平康也，三須基規，Alex Shegay，稲井慎介，桑素彦，川又哲也，得能将紀，丸尾純也：平均成分を有する正弦荷重を受ける高摩擦弾性すべり支承の変位増大に関する実験的検討，風工学シンポジウム講演梗概集第 28 巻，pp.167-174，2024.12

### 附録 A 最大速度の平均変位移動速度への影響

実験時のパラメータとして最大速度も挙げられる。最大速度の違いによる平均変位移動速度への影響は文献 6) で検証されており、図 A に実験の時刻歴波形を示す。図 A より、最大速度が変化しても平均変位移動速度への影響は小さいことが読み取れる。

### 附録 B ガストファクターの平均変位移動速度への影響

ガストファクターを変化させた実験について、図 B に平均変位移動速度-荷重比関係を示す。図 B より、ガストファクターが小さくなることで平均変位移動速度がやや増大しているが、荷重比や面圧の違いによるほど平均変位移動速度が増大する傾向は見られない。そのため、本報の検討ではガストファクターをパラメータとしていない。

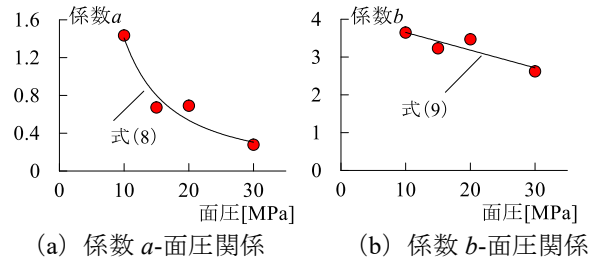


図 10 係数-面圧関係

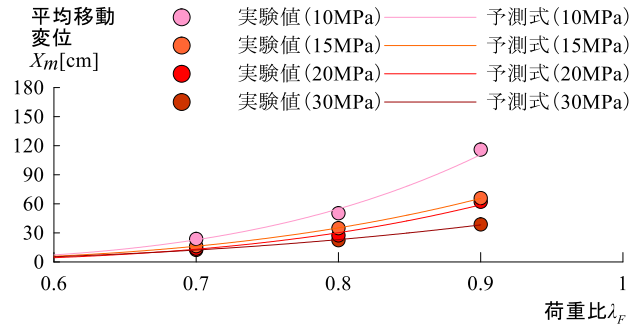


図 11 平均移動変位  $X_m$ -荷重比関係

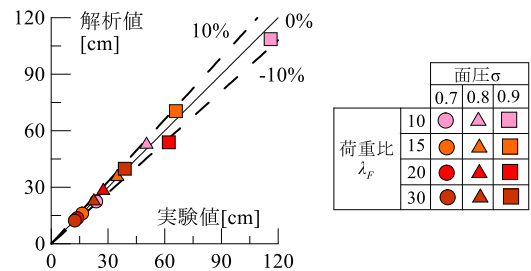


図 12 平均移動変位  $X_m$  の予測精度

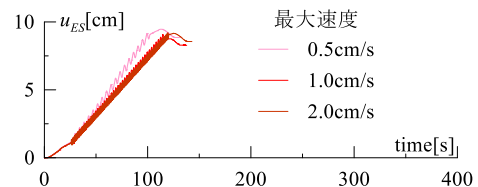


図 A 変位時刻歴波形 ( $G=2.1$ )

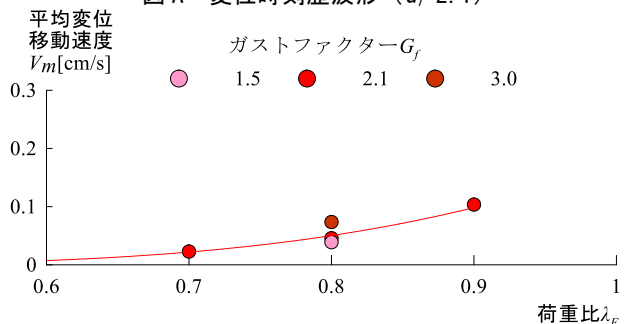


図 B 平均変位移動速度-荷重比関係（面圧  $\sigma=20\text{MPa}$ ）

\*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