

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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 -
Title(English)	Experimental Study on Horizontal Creep Phenomenon in High Friction Elastic Sliding Bearings - Overview of the force-controlled loading experiment on scaled down specimen -
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 Makihira, Daiki Sato, Alex Shegay, Motoki Misu, Shinsuke Inai, Motohiko Kuwa, Tetsuya Kawamata, Takushi Ishida, Masaki Tokunou, Junya Maruo
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集, , , pp. 485-488
Citation(English)	, , , pp. 485-488
発行日 / Pub. date	2023, 2
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 —

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 水平クリープ現象 風応答

正会員 ○ 牧平康也*1

" Alex Shegay*3

" 稲井慎介*5

" 川又哲也*5

" 得能将紀*5

正会員 佐藤大樹*2

" 三須基規*4

" 桑素彦*5

" 石田琢志*5

" 丸尾純也*5

1 はじめに

主要な免震部材の1つである弾性すべり支承は、風応答せん断力が耐震設計で設定したすべり出し荷重を下回っても、変位量が想定よりも増大する、水平クリープ現象(以下、クリープ現象)が発生することが知られている¹⁾。

弾性すべり支承の風応答に関する先行研究として、二村ら²⁾はクリープ現象を考慮して耐風設計を行うことのできる手法を提案している。また、筆者ら³⁾はクリープ現象の原因を低速時の摩擦係数の変化によるものと仮定し、変位制御加振実験の結果を元に時刻歴解析用のモデルを提案している。しかし、どちらの先行研究も実際の風荷重と異なり、すべり材とすべり板間に強制変位を与える変位制御加振実験の結果からクリープ現象を摩擦係数の変化によるものと仮定している。

そこで、風荷重における挙動を精査するため、本報では風荷重を模擬した荷重制御加振実験を行い、その結果からクリープ現象がなぜ生じるか、またどのパラメータに依存するのかを検討する。

2 実験概要

実験に用いた試験体の概要を図1に、実験のセットアップを図2にそれぞれ示す。弾性すべり支承のすべり材には直径90mmの充填剤入りPTFEを、すべり板にはステンレス鋼を用いた。ゴム部材には天然ゴム系積層ゴムを用いており、その水平剛性は1.1kN/mmである。図2に示すように、実験ではジャッキを用いて軸力をかけ、試験体をすべり板に固定した。すべり板はボルトによって鋼材に固定されており、この鋼材に対して載荷荷重を与えることで、弾性すべり支承に風応答せん断力が生じるといった状況を再現した。なお、実験では同じ試験体およびすべり板をそれぞれ2つ用いた。

実験では試験機変位 δ_a 、ゴム変形 δ_E 、載荷荷重 Q_a 、軸力 N_{ES} 、すべり材の温度 θ_s を測定した。 Q_a は測定値を2で

除し、弾性すべり支承1つ分の値とした。 δ_E については治具剛性が高いロードセル側の試験体の両側をレーザー変位計によって測定したデータの平均値を全体のゴム変形とした。次章ではこれらの測定結果に加え、弾性すべり支承のせん断力 Q_{ES} 、弾性すべり支承の変位 δ_{ES} 、すべり材のすべり板に対する相対変位 δ_s (以下、すべり材の相対変位)、弾性すべり支承の速度 v_{ES} をそれぞれ算出し、整理することによってクリープ現象の原因を分析する。なお本報では $\delta_a(t) = \delta_{ES}(t)$ 、 $Q_a(t) = Q_{ES}(t)$ とみなしている。また、 δ_s 、 v_{ES} についてはそれぞれ以下の式によって算出した。

$$\delta_s(t) = \delta_{ES}(t) - \delta_E(t) \quad (1)$$

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

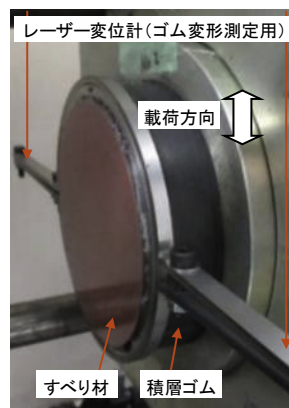


図1 試験体の概要

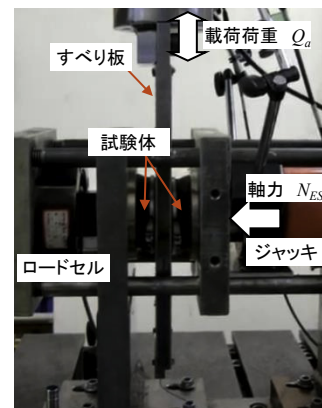


図2 実験のセットアップ

実験での加振条件の一覧を表1に示す。表中の Q_{a40} は耐震設計で用いられる、基準速度(400mm/s)での弾性すべり支承に生じる面圧 σ_{ES} (MPa)におけるすべり出し荷重(N)を表し、以下の式によって算出される⁴⁾。

$$Q_{a40} = 0.094 \times (-0.4388 \ln(\sigma_{ES}) + 2.309) \times \sigma_{ES} \times A_s \quad (3)$$

ここで、 A_s はすべり材の受圧面積(mm²)を表す。

動的載荷実験の目的として、DLC-①~DLC-⑦では一定の平均荷重下で最大速度と最大荷重を変動させた動的載

荷実験を行い、クリープ現象と速度依存性の間の関連性を検討した。DLC-⑧, ⑨では面圧の値を変化させてクリープ現象に寄与するかを確認した。なお、これらの動的载荷実験は全て三角波で加振させた。加振については風荷重を模擬するために、最初に平均荷重を作用させ、その後その状態のまま同時に変動荷重を作用させた。変動荷重を作用させ終わったら再び平均成分のみを作用させた状態を維持し、最後に除荷する、という流れで実験を行った。

静的载荷実験の目的として、SLC-①では最大速度がほぼ 0 cm/s のときのクリープ発生荷重を調査した。なお、表中のクリープ判定については○がクリープしない加振条件、×がクリープする加振条件を表し、その判定方法に関しては次章で述べる。

3 実験結果

3.1 最大せん断力とクリープ現象の関係性

本節では弾性すべり支承の最大せん断力のみ異なり、他のパラメータは全て同じ加振条件の場合を比較して考察する。例として DLC-①-2 ($0.5Q_{d40}$) および DLC-①-6 ($0.9Q_{d40}$) を比較したグラフを図 3(a), (b) に示す。変動荷重は 4 サイクル加振しており、そのうち最後の 1 サイクルのみ青色の線で示している。ここで、 Q_{ES} が最大値を取るときの時刻を t_m とする。 Q_{ES} の時刻歴波形から、荷重制御加振実験は概ね想定通りに行えたことが確認できる。

δ_{ES} の時刻歴波形から、(a)DLC-①-2 では残留変位がほぼ 0 となっているのに対して、(b)DLC-①-6 では残留変位が存在しており、(b)DLC-①-6 はクリープしていると考えられる。また、加振サイクルごとの変形増加を見ると、 δ_E は (a)DLC-①-2, (b)DLC-①-6 どちらも各サイクルでほとんど変わらない挙動を示すのに対して、 δ_S は (b)DLC-①-6 のみ 1 サイクルごとに増加していることがわかる。残留変位についても同様に比較すると、 δ_E は (a)DLC-①-2, (b)DLC-①-6 はどちらもほぼ 0 となっている一方、 δ_S は (b)DLC-①-6 のみ残っていることが確認できる。よって、クリープ現象はゴム変形が増大することではなく、すべり材がすべることによって発生すると考えられる。

v_{ES} の時刻歴波形から、 $v_{ES}(t_m)$ を比較する。(a)DLC-①-2 では 0.12 cm/s, (b)DLC-①-6 では 0.15 cm/s であり、どちらもほぼ同じ値となっていることから、図 3 の比較においては速度を考慮する必要はないと考えられる。

荷重-変位関係から、クリープが発生する (b)DLC-①-6 のみ 1 サイクルごとに変位の履歴がずれることが確認できる。以上より、クリープ現象はすべり材がすべる現象であることが確認でき、かつクリープ現象は弾性すべり支承の最大せん断力の大きさに依存することがわかる。また、この結果から他の加振条件についても、(b)DLC-①-6 と同様に残留変形があるかどうかをクリープ現象の判断基準として判定を行った。

表 1 加振条件一覧

実験名	面圧 [MPa]	最大速度 [cm/s]	平均荷重 [kN]	最大荷重 [kN]	クリープ 判定
DLC-①-1	20	0.5	2.0 ($0.16Q_{d40}$)	4.80 ($0.40Q_{d40}$)	○
DLC-①-2				5.95 ($0.50Q_{d40}$)	○
DLC-①-3				7.15 ($0.60Q_{d40}$)	×
DLC-①-4				8.35 ($0.70Q_{d40}$)	×
DLC-①-5				9.55 ($0.80Q_{d40}$)	×
DLC-①-6				10.75 ($0.90Q_{d40}$)	×
DLC-②-1	20	1	2.0 ($0.16Q_{d40}$)	4.80 ($0.40Q_{d40}$)	○
DLC-②-2				5.95 ($0.50Q_{d40}$)	○
DLC-②-3				7.15 ($0.60Q_{d40}$)	○
DLC-②-4				8.35 ($0.70Q_{d40}$)	×
DLC-②-5				9.55 ($0.80Q_{d40}$)	×
DLC-②-6				10.75 ($0.90Q_{d40}$)	×
DLC-③-1	20	2	2.0 ($0.16Q_{d40}$)	5.95 ($0.50Q_{d40}$)	○
DLC-③-2				7.15 ($0.60Q_{d40}$)	○
DLC-③-3				8.35 ($0.70Q_{d40}$)	○
DLC-③-4				9.55 ($0.80Q_{d40}$)	×
DLC-③-5				10.75 ($0.90Q_{d40}$)	×
DLC-④-1	20	3	2.0 ($0.16Q_{d40}$)	5.95 ($0.50Q_{d40}$)	○
DLC-④-2				7.15 ($0.60Q_{d40}$)	○
DLC-④-3				8.35 ($0.70Q_{d40}$)	○
DLC-④-4				9.55 ($0.80Q_{d40}$)	×
DLC-④-5				10.75 ($0.90Q_{d40}$)	×
DLC-⑤-1	20	4	2.0 ($0.16Q_{d40}$)	7.15 ($0.60Q_{d40}$)	○
DLC-⑤-2				8.35 ($0.70Q_{d40}$)	○
DLC-⑤-3				9.55 ($0.80Q_{d40}$)	×
DLC-⑤-4				10.75 ($0.90Q_{d40}$)	×
DLC-⑥-1	20	5	2.0 ($0.16Q_{d40}$)	8.35 ($0.70Q_{d40}$)	○
DLC-⑥-2				9.55 ($0.80Q_{d40}$)	○
DLC-⑥-3				10.75 ($0.90Q_{d40}$)	×
DLC-⑦-1	20	6	2.0 ($0.16Q_{d40}$)	8.35 ($0.70Q_{d40}$)	○
DLC-⑦-2				9.55 ($0.80Q_{d40}$)	○
DLC-⑦-3				10.75 ($0.90Q_{d40}$)	×
DLC-⑧-1	10	1	1.3 ($0.16Q_{d40}$)	5.43 ($0.70Q_{d40}$)	○
DLC-⑧-2				6.21 ($0.80Q_{d40}$)	×
DLC-⑧-3	10	2	1.3 ($0.16Q_{d40}$)	5.43 ($0.70Q_{d40}$)	○
DLC-⑧-4				6.21 ($0.80Q_{d40}$)	×
DLC-⑧-5	10	3	1.3 ($0.16Q_{d40}$)	5.43 ($0.70Q_{d40}$)	○
DLC-⑧-6				6.21 ($0.80Q_{d40}$)	×
DLC-⑨-1	30	1	2.4 ($0.16Q_{d40}$)	9.98 ($0.70Q_{d40}$)	×
DLC-⑨-2				11.41 ($0.80Q_{d40}$)	×
DLC-⑨-3	30	2	2.4 ($0.16Q_{d40}$)	3.58 ($0.30Q_{d40}$)	○
DLC-⑨-4				8.55 ($0.60Q_{d40}$)	○
SLC-①-1	20	-		2.0 ($0.16Q_{d40}$)	○
SLC-①-2				3.4 ($0.28Q_{d40}$)	○
SLC-①-3				3.6 ($0.30Q_{d40}$)	○
SLC-①-4				4.0 ($0.33Q_{d40}$)	○
SLC-①-5				4.9 ($0.40Q_{d40}$)	×

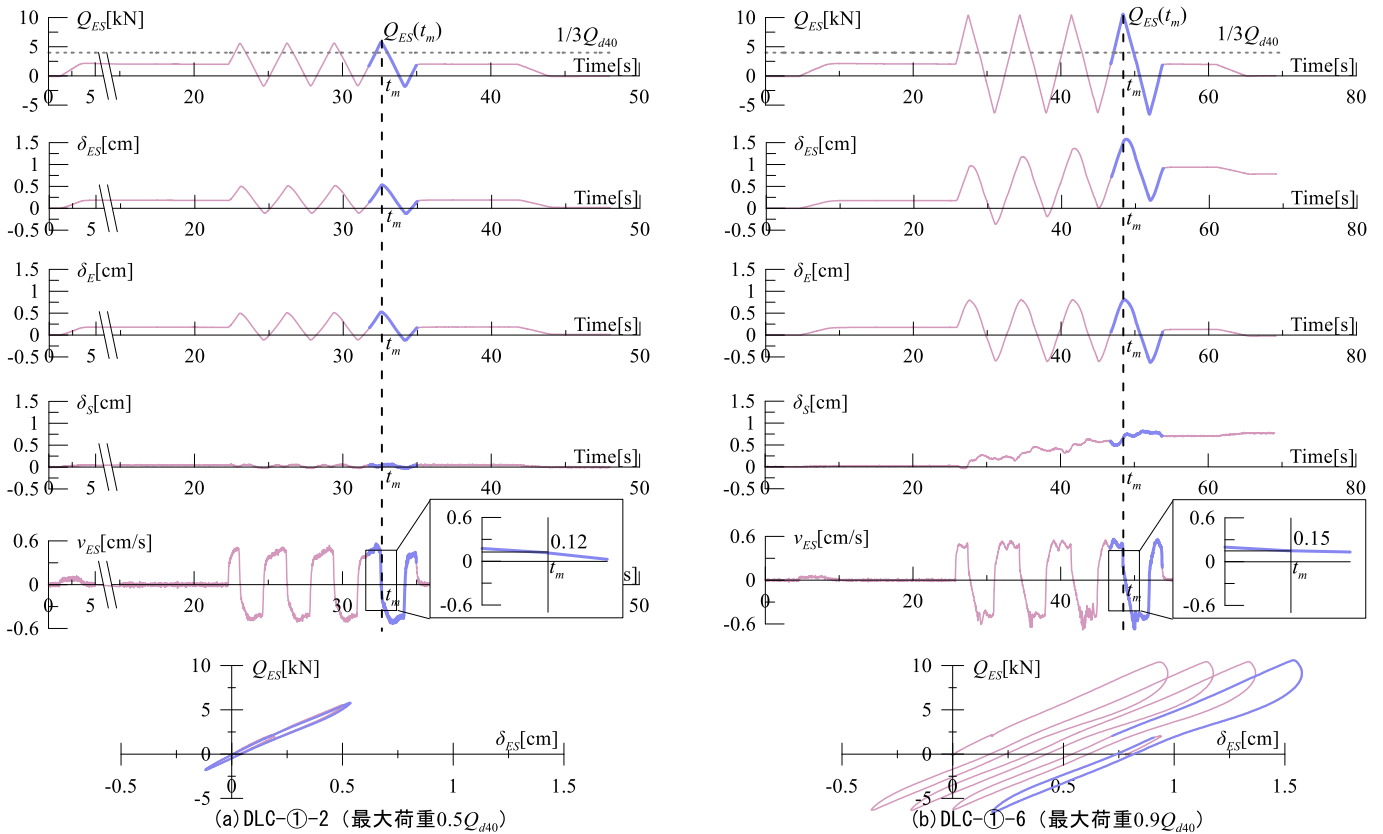


図3 実験結果の最大荷重の違いによるクリープ比較

3.2 最大速度とクリープ現象の関係性

本節では弾性すべり支承の加振条件上の最大速度のみ異なり、他のパラメータは全て同じ加振条件の場合を比較して考察する。例として DLC-③-3 (2.0 cm/s) および DLC-①-4 (0.5 cm/s) を比較したグラフを図 4(a), (b) に示す。

δ_{ES} の時刻歴波形から、(b)DLC-①-4 のみ残留変位が生じており、クリープしている。しかし、 Q_{ES} の波形を見ると、それぞれの加振条件でどちらも最大値は同じであるため、弾性すべり支承の最大せん断力以外にクリープ現象に影響を及ぼすパラメータが存在すると考えられる。

v_{ES} の時刻歴波形から、 $v_{ES}(t_m)$ を比較する。(a)DLC-③-3 では 0.32 cm/s、(b)DLC-①-4 では 0.18 cm/s であり、それぞれで異なっていることがわかる。よって、 $v_{ES}(t_m)$ が高くなればなるほどクリープが発生しにくくなると考えられる。

前節および本節の結果から、クリープ現象は第 1 章で記した先行研究 3) の通り速度によるすべり材とすべり板間の摩擦係数の低下が原因であると考えられる。

3.3 その他のパラメータとクリープ現象の関係性

SLC-①の結果、せん断力が $0.33Q_{d40}$ を上回った場合にクリープすることが確認された。SLC-①は荷重制御で低荷重を保持しているため、弾性すべり支承への入力速度はほぼ 0 cm/s である。前節の速度依存性の考察と合わせると、速度によらず $Q_{ES}(t_m)$ が $0.33Q_{d40}$ を下回っていればクリープしないと考えられる。

DLC-⑧, ⑨では面圧の値を変えて動的载荷実験を行った。その結果、クリープするときの弾性すべり支承のせん断力の値は 20 MPa の時と比べて変化した。これは(3)式の通り Q_{d40} が面圧によって変化することが原因であると考えられる。そこで、 $Q_{ES}(t_m)$ を Q_{d40} で除した値 (以下、最大せん断力比) によって比較すると、どの面圧でもクリープするときのせん断力の境界値はほぼ同じとなった。なお、この結果に関しては次節の図 5 に示している。

3.4 クリープ現象発生検討のグラフ

クリープ現象の詳細な依存性を確認するために、全加振条件 (表 1) に対してクリープ有無の判定を行った結果を図 5 に示す。前節の結果から、最大せん断力比 $Q_{ES}(t_m)/Q_{d40}$ を用いることによって、異なる面圧でのクリープ現象を統一的に判定できる。よって、各加振条件の $Q_{ES}(t_m)/Q_{d40}$ と $v_{ES}(t_m)$ をプロットしている。また、図 3, 4 における実験結果がどのプロットかわかるように示している。この図から、 $v_{ES}(t_m)$ が高くなるにつれて $Q_{ES}(t_m)/Q_{d40}$ の○と×のプロットの境界が上昇していることがわかる。この境界値を λ_Q とすると、実験結果より(4)に示す回帰式が得られる。

$$\lambda_Q = 0.33 + 0.40 \{v_{ES}(t_m)\}^{0.2} \quad (4)$$

ここで、 $v_{ES}(t_m)$ の単位は cm/s である。また、y 切片の値は 3.3 節の結果から 0.33 とした。図 5 から、(4)式はクリープ発生の下限側を適切に表しており、(4)式を下回ればクリープしないと考えられる。

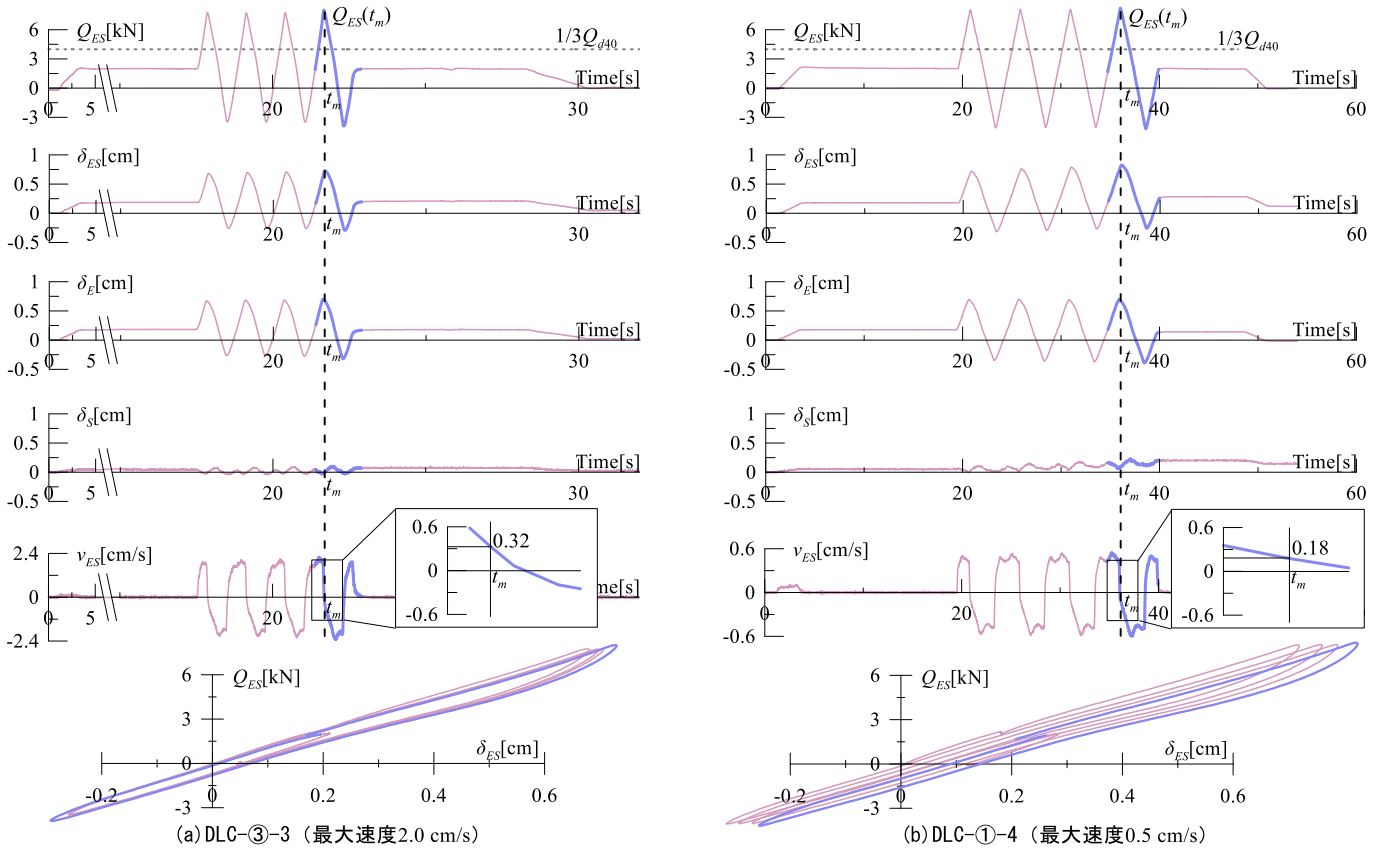


図4 実験結果の最大速度の違いによるクリープ比較

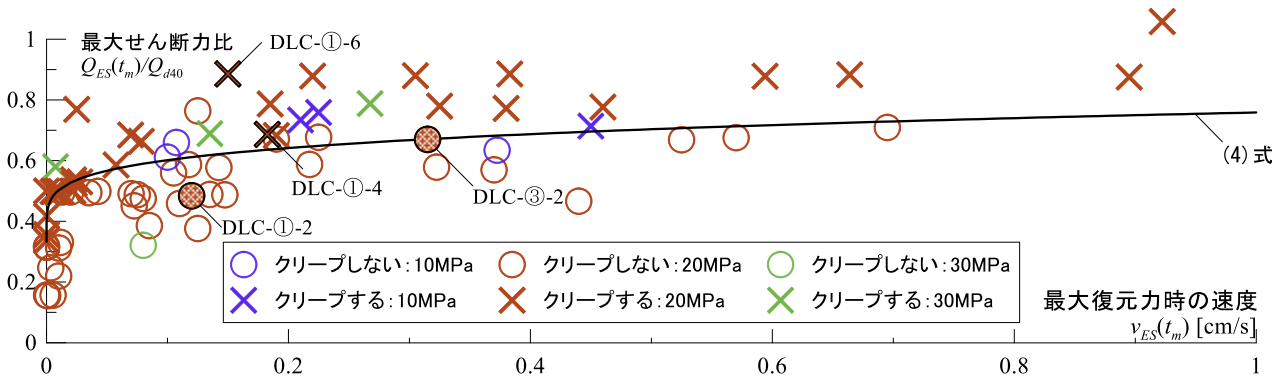


図5 最大せん断力比 $Q_{ES}(t_m)/Q_{d40}$ と最大せん断力時の弾性すべり支承速度 $v_{ES}(t_m)$ の関係

4 まとめ

弾性すべり支承の縮小試験体に対する荷重制御加振実験から、クリープ現象はすべり材とすべり板間の摩擦係数が与えられる速度や荷重によって低下することによって発生することを確認した。

また、クリープ現象の発生下限側は(4)式で判定できること、最大せん断力が耐震設計のすべり出し荷重 Q_{d40} の0.33倍以下であれば応答速度によらずクリープしないこ

と、最大せん断力比 $Q_{ES}(t_m)/Q_{d40}$ を用いることで異なる面圧でのクリープの有無を統一的に判定できることを示した。

参考文献

- 1) 免震建築物の耐風設計指針, 日本免震構造協会, 2012.9
- 2) 二村夏樹, 佐藤大樹, 稲井慎介, 平井宏幸, 石田琢志, 桑素彦, 得能将紀, 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に対する時刻歴風応答解析を用いたクリープ性を考慮した簡易風応答評価, 日本建築学会技術報告集, 第28巻, 第68号, pp.85-90, 2022.2
- 3) 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, 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, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.301-304, 2022.3
- 4) 昭和電線ケーブルシステム株式会社技術資料, 昭和電線ケーブルシステム株式会社

*1 東京工業大学環境・社会理工学院 大学院生

Grad.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

TODA Corporation