

# 高力ボルト摩擦接合の繰り返し大変位下における 鋼材表面の状態変化と滑り係数に関する研究

中村 亮太\*・山西 央朗\*\*・小松 真吾\*\*\*・松田 頼征\*\*\*\*

(令和3年11月5日受付)

A study on surface-condition changed and slip-coefficient subjected to cyclic loading of large displacement for High-strength-bolt friction joint.

Ryota NAKAMURA, Teruaki YAMANISHI, Shingo KOMATSU, Yoriyuki MATSUDA

(Received Nov. 5, 2021)

## Abstract

Contact points between two solids are very small we can't make a sight in Figure 1. We focus on property of High-strength-bolt friction joint, and we propose Beam-Joint-Plastic-Hinge. We examine whether it correspond to Generalized Plastic Hinge. Beam-Joint-Plastic-Hinge is rolling mechanism utilizing slip behavior of High-strength-bolt friction joint, and its forming condition is slipping largely without transitioning bearing-type connection. When cycle large displacement occurs acting large tightening force by High-strength-bolt, surface asperity of friction surface will be broken. This is why state of steel material surface and slip-coefficient will be changed by repeated slip behavior. Plastic-Hinge-Moment which is defined as the moment at the joint when Beam-Joint-Plastic-Hinge is formed, is affected by slip-coefficient. We investigated relationship between state change of steel material surface and slip-coefficient through slip experiment. And disclosed the frictional surface which contribute to improve the evaluation precision of Plastic-Hinge-Moment.

**Key Words:** slip-coefficient, High-strength-bolt friction joint, changing of surface-condition

## 1. はじめに

### 1-1. 摩擦力について

図1に示すように2つの固体同士は我々が視覚することができない大きさの表面突起同士が接触(真実接触)している<sup>1)</sup>。真実接触部の面積は非常に小さいため、接触点における圧力はかなり大きい。さらに、真実接触部では、表面の原子同士で結合力(凝着力)が発生し凝着結合している。

摩擦の起因については、近世以降から様々な研究が進め

られてきた。代表的なものとして、摩擦力は固体表面突起の噛み合いによる抵抗力であると主張する「凹凸説」や、

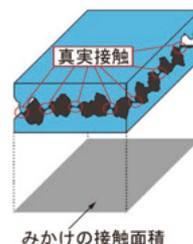


図1 固体表面の真実接触

真実接触部において生じる凝着結合をせん断するために必要な力であると主張する「凝着説」などがある<sup>1)</sup>。また、近年は計測機器の発達から、原子・分子スケールからの摩擦現象の研究

\* 広島工業大学大学院 建設工学専攻

\*\* 広島工業大学 建築工学科 准教授

\*\*\* 島根大学 建築デザイン学科 助教

\*\*\*\* 工学院大学 建築学科 助教

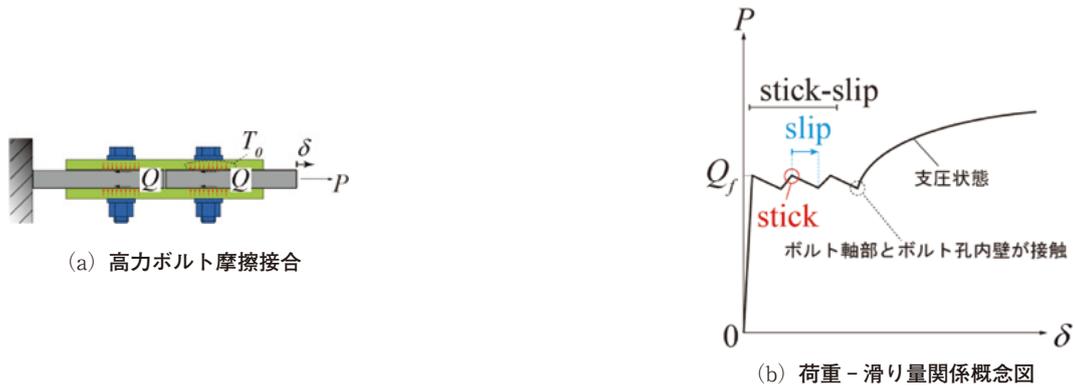


図2 高力ボルト摩擦接合と stick-slip 現象

が可能となった。実際に真実接触点の形成、および、接触荷重が大きくなるほど真実接触面積も大きくなることはいくつかの方法で確認されている。さらに、接触する2つの物体の間で、実際に凝着が起こっていることも実験的に確かめられている。以上のことから、今日では、凝着説が摩擦の主な原因であると考えられている<sup>2)</sup>。

摩擦面の状態は、物体の表面で起こる現象に支配され、外界からの影響を受ける非常に複雑なものである。それ故、摩擦面の状態解明に関して未解決な点が多く、現在も研究が進められている。

1-2. 研究目的

高力ボルト摩擦接合における荷重-滑り量関係は、滑り耐力に達するまでの滑り量が非常に小さい。また、滑り耐力到達後には、荷重がほぼ増大することなく stick-slip を生じながら滑り量が増大する (図2参照)。この摩擦接合がもつ剛塑的挙動に着目し、著者等は、梁継手塑性ヒンジを提案しており、一般化塑性ヒンジとの対応を吟味している<sup>3)</sup>。梁継手塑性ヒンジは高力ボルト摩擦接合の滑り挙動を利用した回転機構であり、支圧接合に移行することなく大きな滑り量を実現することが条件となる。そこで、高力ボルトの締め付け力が作用した条件下で繰り返し大変位が生じる際、摩擦面では表面突起が破壊されながら変位すると考えられる。したがって、繰り返し滑り挙動によって

鋼材表面の状態が変化し、滑り係数に影響を与えられられる。梁継手塑性ヒンジ形成時の継手耐力 (塑性ヒンジモーメント) は、滑り係数が直接影響するため、塑性ヒンジモーメントの評価精度向上には、滑り係数が評価でき、変動が大きくないことが条件となる<sup>3)</sup>。

本研究の目的は、滑り実験により鋼材表面の状態変化と滑り係数の関係を追跡し、塑性ヒンジモーメントの評価精度向上に寄与する摩擦面処理を明らかにすることである。

2. 実験方法

図3に示すセットアップで滑り実験を行う。載荷制御は手動の油圧ポンプにより行い、速度は弾性域では100kN/min、滑り挙動時には1mm/min程度である。母材にPL-19、添え板にPL-12を用い、2面摩擦とした。図3(b)に示すように上側の配置ボルトを少なくすることで、滑り挙動を繰り返し発生させる。ボルト軸部とボルト孔内壁が接触することを防ぐため、母材の上側のみ長孔加工した (図3(a)参照)。また、①表面状態 (N: 無処理、S: 発錆処理、

表2 素材特性

	主要寸法	材質	E (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )
母材	PL-19	SN400	205000	333	455
添え板	PL-12	SN400	205000	308	480

E: ヤング係数  $\sigma_y$ : 降伏応力度  $\sigma_b$ : 引張り強さ

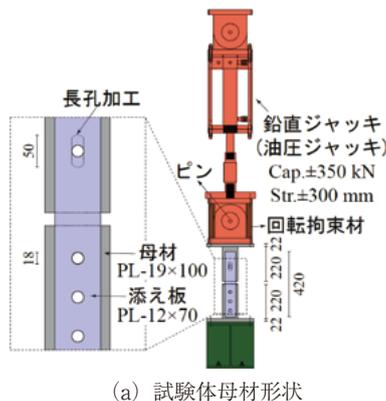
表1 試験体変数および滑り係数の実験結果

	①	②	$\mu_p$	$\mu_s$	$\mu_p/\mu_s$
No.1		$0.9T_0$	0.25	0.80	3.20
No.2	N	$0.5T_0$	0.30	0.80	2.67
No.3		$0.2T_0$	0.36	0.80	2.22
No.4		$0.9T_0$	0.63	0.55	0.87
No.5	S	$0.5T_0$	0.62	0.54	0.87
No.6		$0.2T_0$	0.62	0.56	0.90
No.7		$0.9T_0$	0.39	0.75	1.92
No.8	G	$0.5T_0$	0.39	0.80	2.05
No.9		$0.2T_0$	0.33	0.80	2.42
No.10		$0.9T_0$	0.48	0.54	1.13
No.11	B	$0.5T_0$	0.48	0.53	1.10
No.12		$0.2T_0$	0.48	0.52	1.08

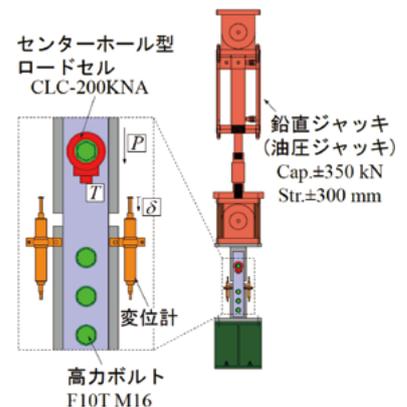
$0.9T_0 = 106 \text{ kN}$ ,  $0.5T_0 = 59 \text{ kN}$ ,  $0.2T_0 = 24 \text{ kN}$

$\mu_p$ : 初めて滑り挙動が発現した際の滑り係数

$\mu_s$ : 繰り返し滑り挙動により変化した後の滑り係数



(a) 試験体母材形状



(b) 試験体セットアップ

図3 試験体セットアップ

G: ディスクグラインダー処理、B: ショットブラスト処理)

②初期ボルト軸力  $T_0$  ( $0.9T_y$ ,  $0.5T_y$ ,  $0.2T_y$ ) を変数として実験を行う。試験体番号と変数を表1に示す。また、素材特性を表2に示す。計測する物理量は、荷重  $P$ 、滑り量  $\delta$ 、およびボルト軸力  $T$  とした。また、滑り耐力比 (滑り荷重/フランジの降伏軸力) は、実験結果より0.03~0.28で実施した。

### 3. 滑り係数

実験結果から得る滑り係数  $\mu$  は次の式で求める。

$$\mu = \frac{Q_f}{2T_0} \quad (1)$$

ここに、 $Q_f$ : 滑り耐力 (図2 (b)中の stick に対応)、 $T$ : ボルト軸力である。



写真1 実験後の添え板の様子

## 4. 実験結果および考察

### 4-1. 実験後の試験体の様子

写真1に実験後の添え板の様子を示す。無処理、ディスクグラインダー処理とした試験体は、初期ボルト軸力  $T_0$  の大きさに依らず鋼材の表面が激しく損耗した。一方で、発錆処理とした場合は錆が削られていたのみであり、 $T_0$  が大きいほど錆が削られた範囲が大きい傾向がある。ショットブラスト処理とした場合は、ブラストの凹凸が削られていたのみであり、発錆処理と同様に  $T_0$  が大きいほどブラストの凹凸が削られた範囲が大きい傾向がある。これは、ボルト軸力が大きいほど、真実接触面積が大きくなったことが起因していると考えられる。実験後の試験体は、無処理とディスクグラインダー処理、発錆処理とショットブラスト処理それぞれが類似した状態に変化した。

### 4-2. 荷重 - 滑り量関係

図4に荷重 - 滑り量関係を示す。無処理とディスクグラインダー処理とした試験体では、初期段階では、stick-slip が生じ、大きな音が発生していたが耐力の上昇に伴い、stick-slip は生じず静かに滑る状態に変化した。耐力の上昇は、鋼材表面にみられた激しい損耗が起因していると考えられる。発錆処理とした場合も同様に、初期段階では stick-slip が生じ、最終的には stick-slip は生じず静かに滑ったが、最終的な耐力は、初期の耐力を下回る結果となった。これは、繰り返し滑り挙動によって、削り取られた鋼材表面に存在していた錆の欠片が分布し、ベアリング作用を引き起こして滑りを促進させたからだと考えられている。また、No. 4 の試験体のみ、一度 stick-slip が生じなくなり静かに滑った後、しばらくして再度 stick-slip が生じて音をたてながら滑った。ショットブラスト処理とした場合、実験終了まで stick-slip が生じ、音をたてながら滑った。

### 4-3. 滑り係数 - 滑り量関係

図5に滑り係数 - 滑り量関係を示す。また、実験開始から初めて滑り挙動が発生したときの滑り係数  $\mu_p$ <sup>4)</sup> および、繰り返し生じる滑り挙動により変化した後の滑り係数  $\mu_u$  を表1に示す。表面状態を発錆処理とした試験体以外  $\mu_p < \mu_u$  となった。無処理、ディスクグラインダー処理とした試験体では、 $\mu_u$  が0.8程度まで上昇し、安定した。この原因については、滑り面の損耗状態からみて焼付けなどが生じている可能性がある。静的载荷を行い、また実験直後に試験体を解体して表面状態を確認したが熱が蓄積されている状態等は確認できなかった。本実験では、追跡することができなかったので、継続して本現象の解明を行っていく。無処理、ディスクグラインダー処理の場合では滑

り係数は初期よりも2倍以上大きな値で安定したのに対して、ショットブラスト処理をした場合では、滑り係数の変化量は小さいという結果となった。また、全ての試験体に共通して、変化後の滑り係数は初期ボルト軸力の大きさに依らないという結果となった。

以上、表面処理により繰り返し滑り時の滑り係数変遷等が確認できた。滑り係数の変動が比較的小さいショットブラスト処理が梁継手塑性ヒンジには適当であると考えている。

### 4-4. 軸力残存率 - 滑り量関係

初期ボルト軸力  $T_0$  に対する計測したボルト軸力  $T$  (以下、軸力) の比を軸力残存率とし、図6に軸力残存 - 滑り量関係を示す。図中に、実験開始直後を赤色のシンボル、実験終了時を青色のシンボルで示す。

無処理、ディスクグラインダー処理の場合は、繰り返し滑り挙動による状態変化とともに軸力が上昇した。また、実験終了時の軸力は初期軸力に近い傾向にあることがわかった。

これに対して、発錆処理、ショットブラスト処理とした場合の軸力は、圧縮方向載荷時に上昇し、引張方向載荷時に減少する傾向がみられ、無処理やディスクグラインダー処理の場合と異なる挙動を示した。また、実験終了時軸力残存率は、 $T_0=59\text{kN}$ ,  $24\text{kN}$  とした場合で特に小さくなり、発錆処理で  $T_0=24\text{kN}$  とした No. 6 は7割を下回る結果となった。

履歴形状は、無処理とディスクグラインダー処理、発錆処理とショットブラスト処理それぞれが類似している。

これ等の結果は、無処理かディスクグラインダー処理においては、元々表面の凹凸が小さく、実験前後での変化が少なかったため、軸力の変動が小さかったと考えている。一方で、発錆処理では錆の膜が、ショットブラスト処理では人工的に設けた凹凸が削られて母材と添え板間の距離が縮まったことに起因して軸力が減少したと考えている。

## 5. まとめ

高力ボルト摩擦接合滑り挙動を利用した梁継手塑性ヒンジの耐力評価精度向上に寄与する摩擦面処理を明らかにするため、摩擦面処理および初期ボルト軸力を変数とした滑り実験を行い、以下の知見を得た。

1. 表面処理をショットブラストとした場合、滑り耐力、滑り係数の変化が小さい結果となった。したがって、ショットブラスト処理が梁継手塑性ヒンジに適していると判断した。
2. 表面処理を無処理 (黒皮)、ディスクグラインダーによる黒皮除去状態とした場合、試験体表面が激しく損耗し、最終的な滑り係数が0.8にまで上昇した。これ

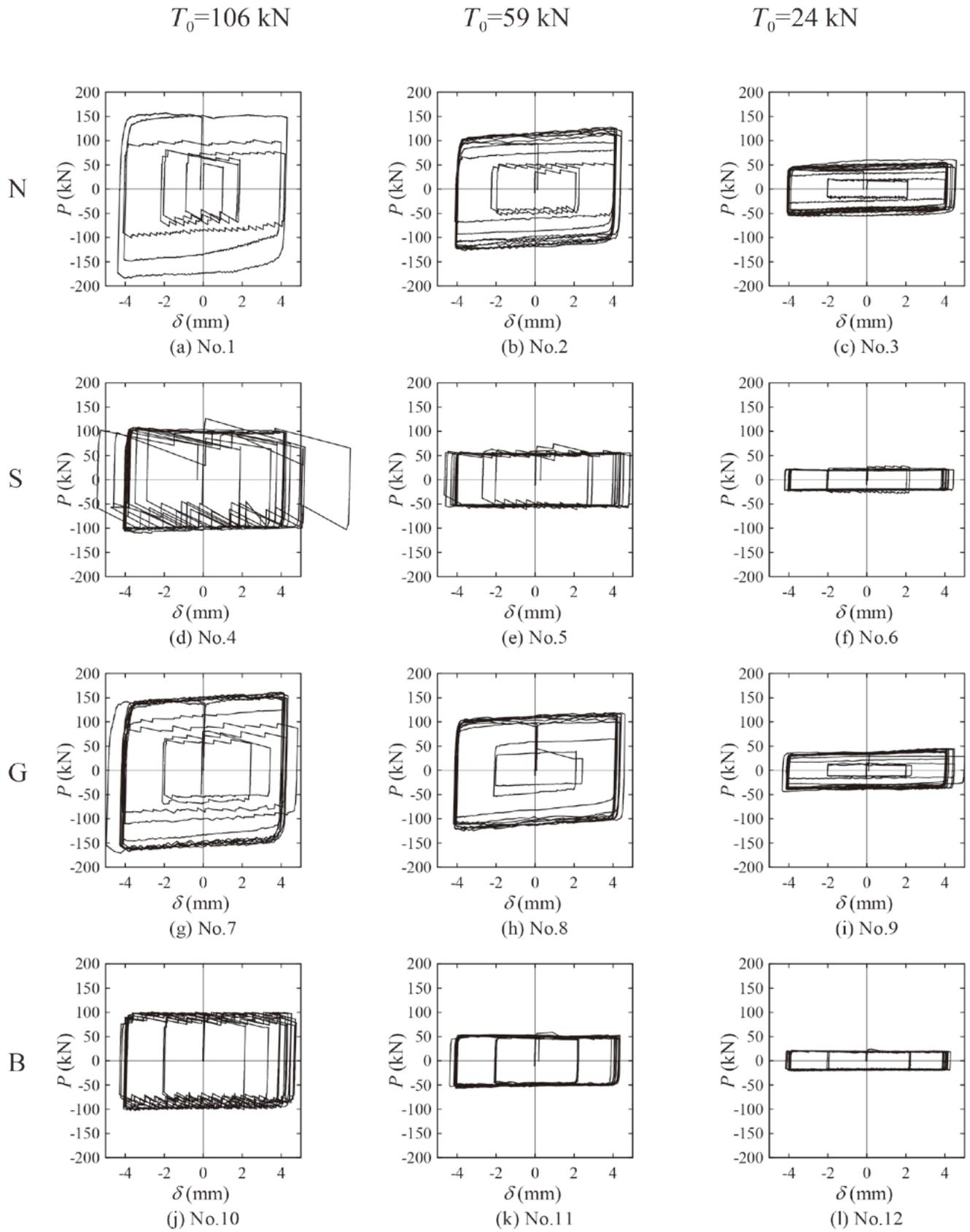


図4 荷重-滑り量関係

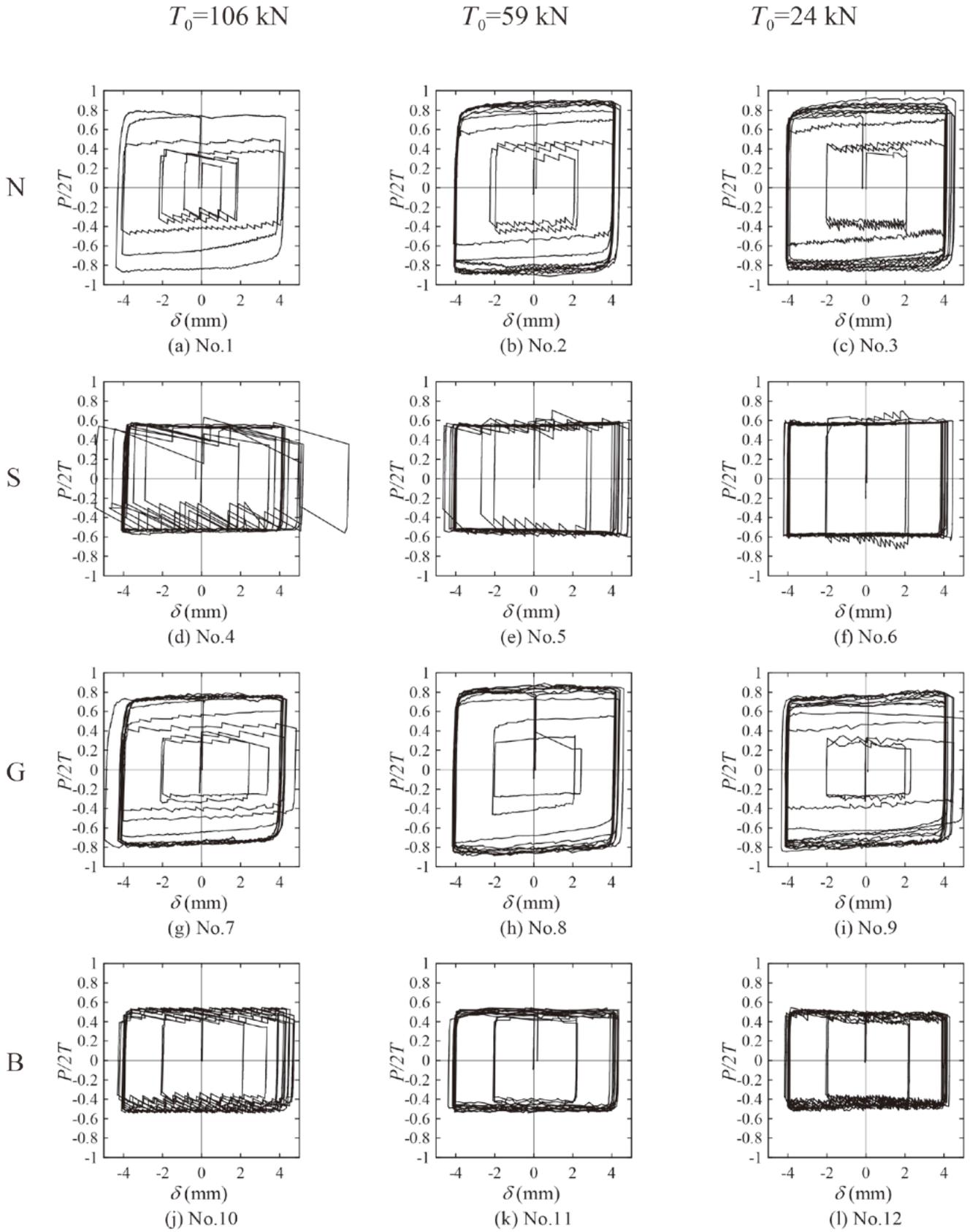


図5 滑り係数 - 滑り量関係

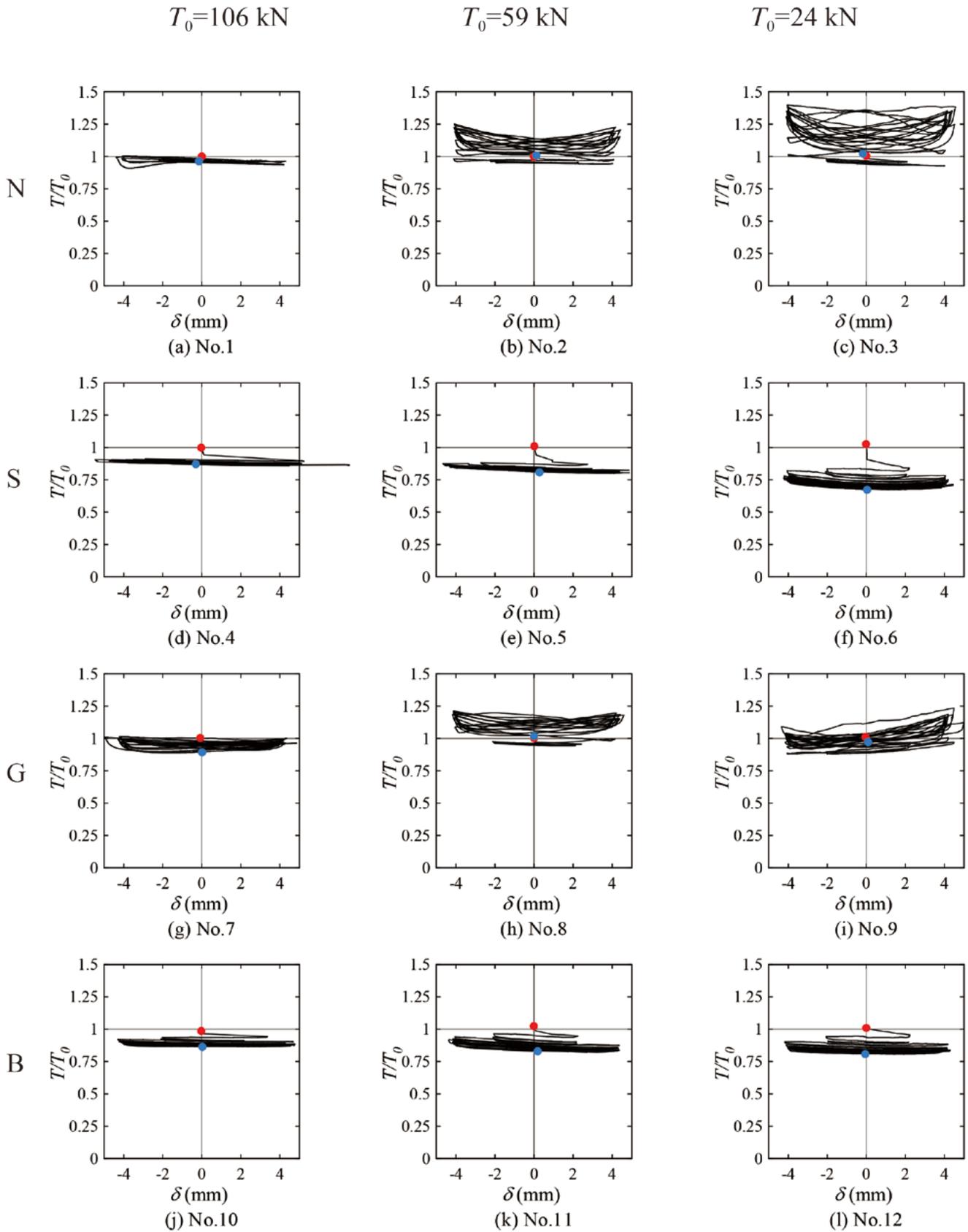


図6 軸力残存率 - 滑り量関係

に対し、表面処理を発錆処理とした場合では、最終的な滑り係数は初期の滑り係数を下回る結果となった。

3. 本研究の要素実験の範囲では、初期ボルト軸力の大きさによる滑り係数および状態変化に顕著な差異は見られなかった。

大変位下で繰返し滑り挙動を与えて滑り係数が0.8まで上昇したが、これがどのようなメカニズムで発現したのかについて、焼付け等の可能性を含めて検討していく。また、長尺ボルトを滑り挙動位置に配置し、滑り耐力比を極端に小さく設定する等、実際とは異なるディテールを採用した。

今後は実際のディテールを用いて、実験精度を高めることにも留意する。

## 文献

- [1] 曾田範宗・固体の摩擦と潤滑・1982
- [2] 松川宏・摩擦の物理・2012
- [3] 中村亮太・高力ボルト摩擦接合の滑り挙動を利用した塑性ヒンジ形成工法の抵抗機構について・日本建築学会中国支部研究報告集 第44巻・2021
- [4] 日本鋼構造協会・高力ボルト接合技術の現状と課題・2013