

繰り返し载荷を受ける高力ボルト摩擦接合部の すべり挙動の速度依存性

梶 貴紀¹・橋本 国太郎²

¹学生会員 神戸大学 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: 219t116t@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院准教授 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: hashimoto@person.kobe-u.ac.jp (Corresponding Author)

既往の研究では、地震などによって繰り返し载荷を受ける高力ボルト摩擦接合継手に関して、载荷変位の違いや表面処理の違いによる挙動の影響は示されているが、载荷速度の違いによる影響はよく分かっていない。そこで本研究では、その影響を解明することを目的として実験供試体や表面処理（無機ジンクリッチ塗装）は同一条件の下、1Hz、0.05Hz、0.001Hzを1周期とした3ケースの载荷速度を設定して繰り返し载荷実験を行った。実験の結果、すべり荷重やすべり係数にある程度の速度依存性が見られ、载荷速度が大きいと、すべり荷重もすべりや摩擦係数も大きくなる傾向となった。また、10サイクル以上の载荷を与え続けると、どのケースにおいても減少率は小さくなり、すべり荷重が収束することが分かった。

Key Words: High strength bolted connection, Slip strength, Connection factor, Repeated loading, Loading speed

1. はじめに

高力ボルト摩擦接合継手は、施工性や継手の信頼性の観点から、土木分野や建築分野の鋼構造物の現場での鋼部材同士の接合で、主に使用されている。

1995年の阪神淡路大震災では道路橋の鋼製橋脚が倒壊する等大きな被害が生じた。それに伴い、耐震設計法が改訂され、鋼製橋脚を用いた耐震性能等多くの研究がなされている。また、その地震被害の一つとして、鋼製橋脚や鋼橋などの高力ボルト摩擦接合継手部においてすべり現象やボルト軸力の低下が見られた。そこで、石原¹⁾は、被災した実際の鋼製橋脚の高力ボルト摩擦接合部のボルト軸力の調査や、地震時に発生したと考えられる接合部のすべりを再現した繰り返し実験を行っている。この石原らの実験¹⁾では、同一の载荷条件（载荷速度0.5Hzや変位は一定）でショットブラストや無機ジンクリッチペイント、溶融亜鉛メッキの3種類の表面処理方法を変化させ、それらの表面処理の影響ですべり挙動が変化することを見出している。この実験では、接合面の状態によって、すべり荷重やすべり係数が上昇する場合（ショットブラストや亜鉛メッキ）や、減少する場合（無機ジンクリッチペイント）があることが分かっている。

また、建築分野においても接合部の繰り返し挙動を検討した研究はいくつかあり^{2,3)}、例えば、久米²⁾は建築分野でよく用いられる接合面処理である赤さびやショットブラストで繰り返し実験を実施している。この実験では载荷速度を変化させているものの、文献1)に比べ、遅い速度（最大でも0.1Hz）で行っているため、そのすべり挙動の差異はほとんど出ていない。また、文献1)で石原らの行ったショットブラスト面の実験結果とは異なり、文献3)ではすべり荷重やすべり係数は減少する結果となり、表面処理をショットブラスト面とするとすべり挙動に対して速度依存性があることが示唆される。なお、最近の鋼橋での高力ボルト摩擦接合部では、基本的に接合面内に無機ジンクリッチペイントを施す仕様となっているため、この表面処理でのすべり挙動に対する载荷速度の影響を検討することは有意義であると考えられる。

そこで本研究では、接合面処理に無機ジンクリッチペイントを用いた高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動に対して、速度依存性がどの程度生じるのかを検討した。ここでは、3種類の速度を設定して単純引張試験、繰り返し载荷試験を行い、すべり耐力やすべり係数等のすべり挙動に関する実験的な検討を行った。

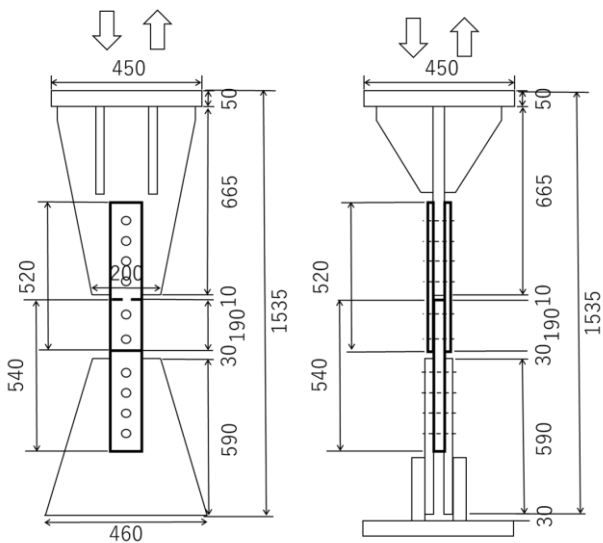
2. 高力ボルト摩擦接合継手の繰り返し載荷実験

(1) 実験供試体

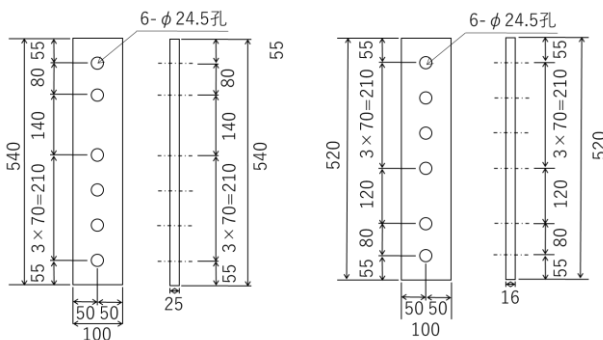
本研究で使用した実験供試体と載荷治具の概要を図-1に、その設置状況を図-2に示す。図-1の太線部が実験供試体で、細線部が載荷治具を示している。中央の試験区間にはF10TM22高力ボルトを2本使用し、上下方向に設置して1000kNアクチュエータ試験機を用いて載荷実験を行った。なお、実験供試体はアクチュエータや載荷梁に直接設置できないため、載荷治具に設置した。載荷治具と実験供試体での接合部ですべりが起こらないように同強度同サイズの高力ボルトを上下に4本ずつ締め付けた。

ボルトの締め付けは事前にキャリブレーション試験を行い、ボルト頭部に貼付した2軸ひずみゲージの値をもとにF10TM22高力ボルトの標準ボルト軸力226kNを導入している。実験供試体への載荷は、ボルト軸力のリラクゼーションを考慮してボルトの締め付けを行ってから1時間経過したのちに行った。

測定は、試験機の荷重およびストローク、ボルト頭部のひずみ、連結板と被連結板間の相対変位とした。



(a) 全体図



(b) 被締結板

(c) 連結板

図-1 試験供試体概要図

(2) 実験方法

単調引張載荷は、図-1に示すように10mm程度の強制変位を上方向に与えることで引張荷重を加えた。なおこの単調載荷の結果を基に、次に行う繰り返し載荷の変位量を決定している。

繰り返し載荷は変位制御によって、上下方向に一定振幅載荷を実施し、被締結版と連結板との相対変位が±3mm程度となるように繰り返し変位を与えた。基本は10サイクルの繰り返しを与えることとしているが、繰り返し回数によるすべり挙動の様子も見られるため、各速度で、繰り返し回数は20~30サイクルの場合も1ケースずつ行った。

載荷速度は、表-1に示すように単調引張載荷も繰り返し載荷も同様に0.001Hz、0.05Hz、1Hzとした。(以降それぞれを低速、中速、高速とする) これらの速度は中速や高速は、構造物が長周期や短周期で揺れる速度を想定している。なお、低速は比較のため実施した。

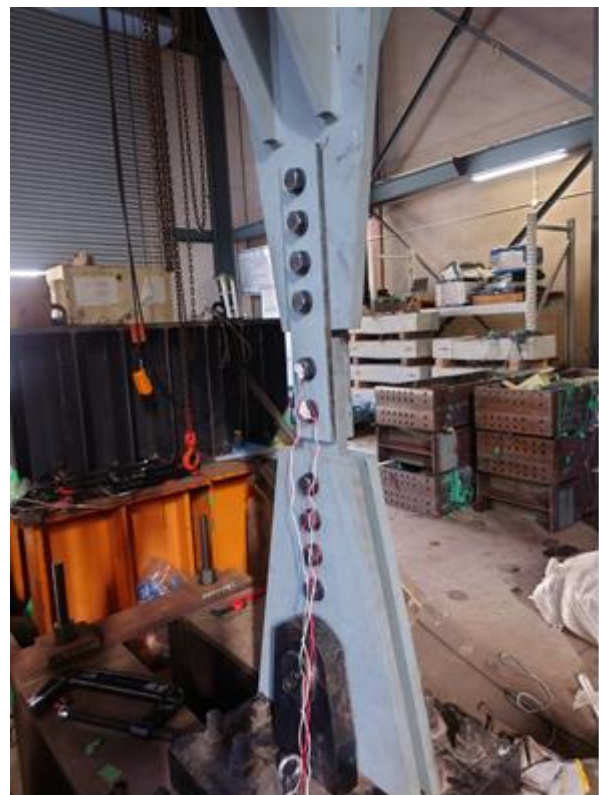


図-2 試験供試体の設置状況

表-1 载荷速度の周期と時間

	低速	中速	高速
载荷周期 (Hz)	0.001	0.05	1
1サイクルの時間 (s)	1000	20	1
载荷速度 (cm/s)	0.04	2.0	40

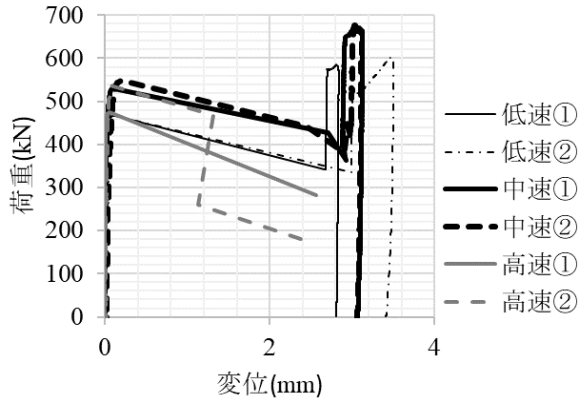


図-3 単調引張試験の荷重-変位関係

表-2 各速度におけるすべり荷重とすべり係数

载荷ケース	すべり荷重 (kN)	すべり係数
低速①	466.6	0.55
低速②	466.4	0.55
中速①	529.6	0.62
中速②	548.6	0.64
高速①	474.4	0.53
高速②	534.9	0.62

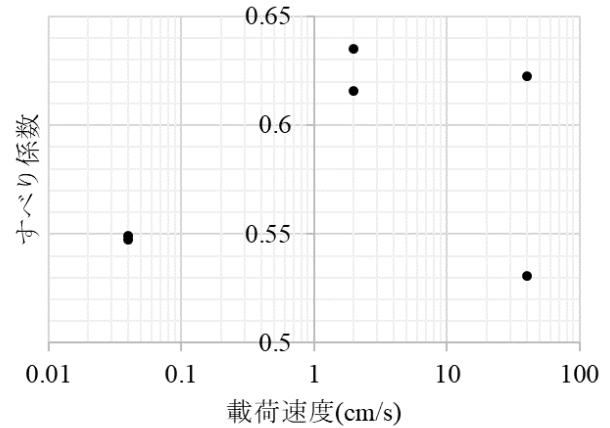


図-4 各速度におけるすべり係数

3. 実験結果

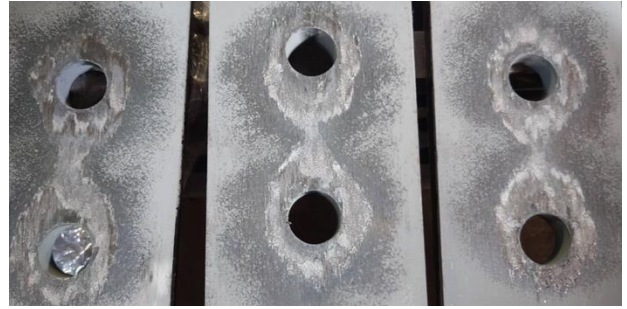
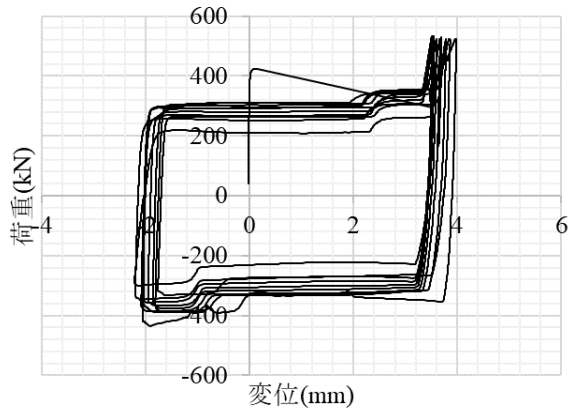
(1) 単調载荷

単調引張载荷試験の荷重-相対変位関係の結果を図-3に示す。図-3より、どの速度も同様に明確なすべりが発生し、すべりの発生とともに、荷重が低下し、ボルトと鋼板が支圧状態となり荷重の増加が見られた。各载荷速度におけるすべり荷重とすべり係数を図-4に、そのまとめを表-2に示す。これより、すべり荷重、すべり係数（载荷直前のボルト軸力ですべり荷重を割った値）どちらも低速より中速、高速の方が大きく、中速と高速の間にはあまり大きな差は見られなかったものの、高速ではばらつきが大きい。この結果より、すべり荷重、すべり係数ともに载荷速度にある程度の依存性があり、载荷速度が大きくなるとすべり荷重やすべり係数が大きくなる傾向にあると考えられる。低速、中速は2体の計測結果が近い値である一方で高速は差が大きく、特に高速①の測定値が小さいが、2体みの結果であるため、本論文の最後に、繰り返し载荷の1サイクル目の初期すべり荷重は、この単調载荷と同じ条件であるため、この結果も含めた考察を行う。

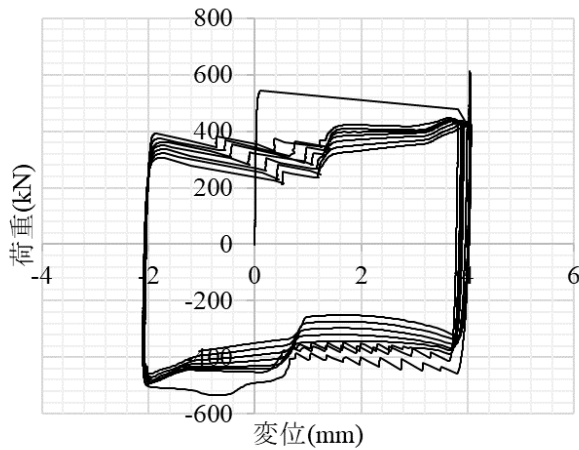
(2) 繰り返し载荷

繰り返し载荷試験で得られた荷重-相対変位関係の結果と実験供試体の载荷終了後の接合面の様子を図-5に、すべり荷重、すべり係数（実験開始直前のボルト軸力ですべり荷重を割った値）、および摩擦係数（すべり時のボルト軸力ですべり荷重を割った値）の推移を表したグラフをそれぞれ図-6～図-8に示す。なお、グラフ中には一つのケースにつき二つのグラフを示しているが、それぞれ引張時と圧縮時の結果を示している。

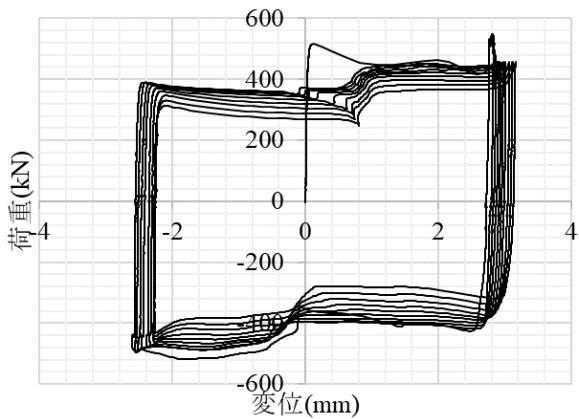
図-5より、どのケースでも3mmほどのすべりが生じた後に荷重が増加していることが分かる。これは被締結板のボルト孔とボルトが支圧状態になったためと考えられる。また、すべり荷重は2サイクル目以降初期すべり荷重に比べて大きく低下し続けており、どのケースも10サイクル目には約半分となっていることが分かる。すべり荷重の大きさを単調引張载荷試験の結果と比較すると、高速、中速は同程度であるが、低速は小さい値となった。载荷後の接合部の様子は、どのケースも塗装部分が剥がれている状態であったが、载荷速度による明確な違いは見られなかった。



(a) 低速



(b) 中速



(c) 高速

図-5 繰り返し試験の供試体の様子と荷重-変位関係

図-6~図-8 より、どのケースに関しても、1 サイクル目から2サイクル目に大きな荷重低下が見られ、その後10 サイクル目までは、ほぼ直線的に減少していることが分かる。10 サイクルを超すと、この減少が直線的なものから曲線的な減少となり、荷重が100kNあたりではほぼ収束していることが分かる。

すべり荷重の大きさは、低速、中速、高速の順で大きくなっているが、中速③のみ高速よりもさらに大きい値

となっている。これより中速③を異常値とするとすべり荷重の大きさは低速、中速、高速の順となり、すべり係数、摩擦係数も同様であるため、速度依存性があるといえる。

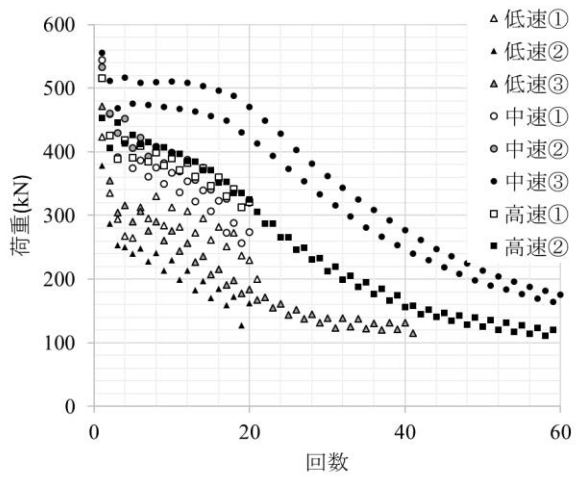


図-6 すべり荷重の推移

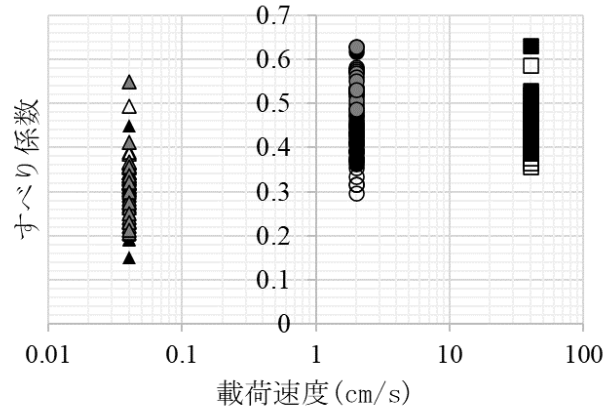


図-9 すべり係数と载荷速度の関係

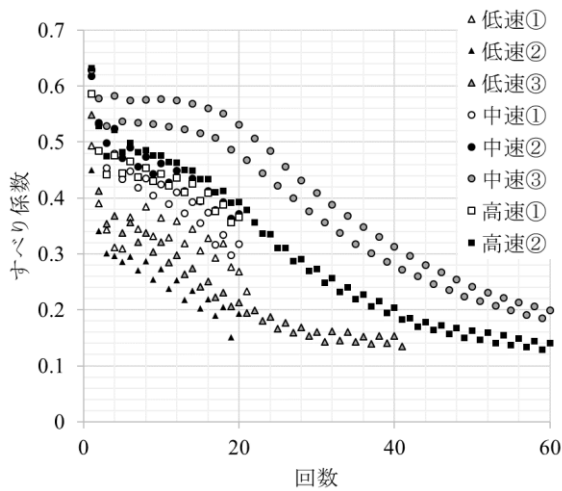


図-7 すべり係数の推移

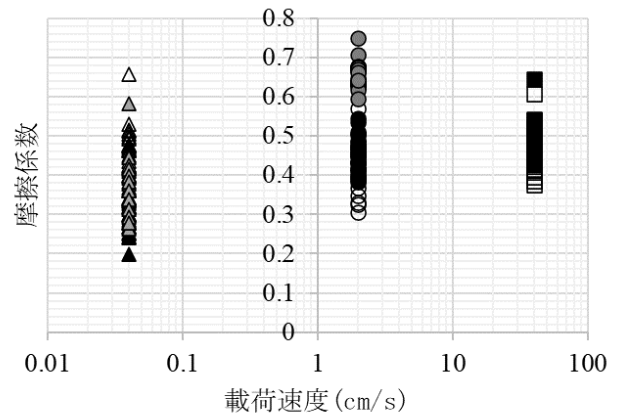


図-10 摩擦係数と载荷速度の関係

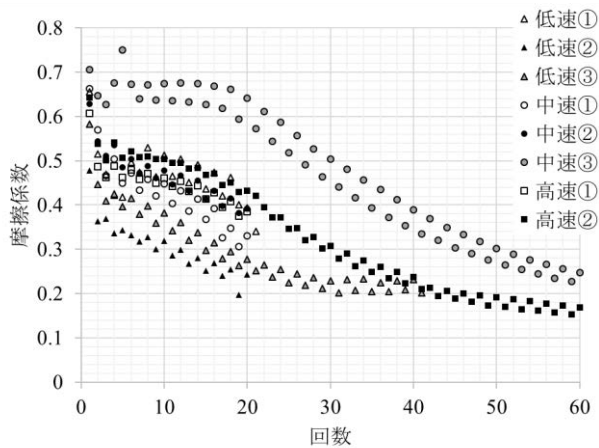


図-8 摩擦係数の推移

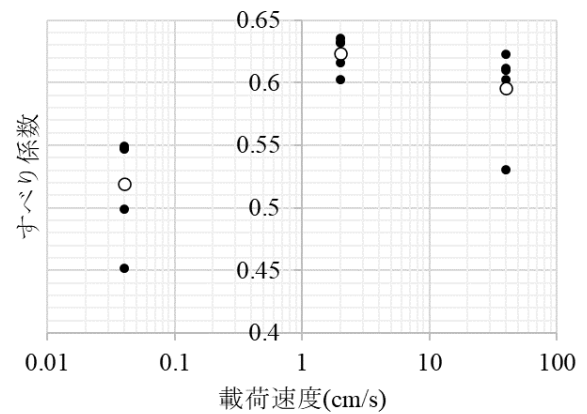


図-11 すべり係数と载荷速度の関係

図-9, 図-10 にすべり係数, 摩擦係数と载荷速度の関係を, 表-3 にそのまとめを示す。ここで, 中速③のみボルト軸力に異常値が見られたため, すべり係数と摩擦係数は参考値としており, 表-3 の () 内の数字は, 中速③

を異常値とした場合の中速①, ②のみで見た数字である。

すべり係数に関して, 各速度の値を比較すると, 最小値, 最大値は载荷速度によって大きさはばらばらだが, 平均値をとると低速, 中速, 高速の順で大きくなり, 速

表-3 すべり係数, 摩擦係数と载荷速度のまとめ

		低速	中速	高速
すべり係数	最小値	0.15	0.29 (0.29)	0.48
	最大値	0.54	0.62 (0.62)	0.58
	平均値	0.30	0.47 (0.43)	0.44
摩擦係数	最小値	0.20	0.30 (0.30)	0.37
	最大値	0.65	0.75 (0.66)	0.64
	平均値	0.38	0.52 (0.45)	0.47

表-4 初期すべり荷重とすべり係数のまとめ

		低速	中速	高速
すべり荷重	単調	466.6	529.6	474.4
	単調	466.4	548.6	534.9
	繰返し	423.3	544.0	522.8
	繰返し	378.6	533.0	515.6
	繰返し	471.4	556.0	540.9
	平均	441.3	542.2	517.7
すべり係数	単調	0.55	0.62	0.53
	単調	0.55	0.64	0.62
	繰返し	0.50	0.63	0.61
	繰返し	0.45	0.60	0.60
	繰返し	0.55	0.63	0.61
	平均	0.52	0.62	0.60

度依存性が見られた。特に、中高速ではほぼ同じ値であるが、低速ではすべり係数が小さい。また、高速载荷では、すべり係数の低下が他のケースより小さいことが分かる。

摩擦係数も同様に、最小値と最大値には一貫性が見られなかったが、平均値には速度依存性が見られた。

各速度の最大値と最小値の差を見ると、すべり係数は低速が0.39、中速は0.33、高速は0.1となり、载荷速度が大きくなるほど小さくなっていることが分かる。これは摩擦係数も同様であり、これらから载荷速度が大きくなるにつれて値の変化が小さくなることが分かる。

最後に、これまでの単調载荷、繰返し载荷試験の初期すべり荷重、初期すべり係数をまとめたものを図-11、表4に示す。図-11内の○はその平均値である。表4より、すべり荷重、すべり係数どちらも平均値は低速、高速、中速の順に大きくなっていることが分かる。この結果から、接合部のすべり耐力やすべり係数はある程度の速度依存性があり、速度が大きい方がすべり耐力やすべり係数は上がるといえる。ただ、中速より高速の値の差

が小さく、速度とすべり耐力・すべり係数は比例の関係ではなく、0.04cm/sと2.0cm/sの間にある値を境に速度の増加によるすべり耐力への影響は小さくなると考えられる。

4. まとめ

本論文では、接合面内の表面処理を無機ジンクリッチペイントした高力ボルト摩擦接合継手のすべり挙動としてすべり耐力やすべり係数などの速度依存性を明らかにすることを目的として、実験的検討を行った。得られた知見を以下に記す。

- 1) 単調引張载荷試験では、すべり荷重を比較すると低速より中高速の方が大きい傾向となることが分かった。
- 2) 繰返し载荷試験では、すべり荷重を比較すると単調引張载荷試験と同様低速より中速の方が大きく、高速は中速より大きい結果となった。
- 3) すべり荷重、すべり係数、および摩擦係数いずれも速度依存性があり、载荷速度が大きい方が大きくなった。
- 4) すべり荷重やすべり係数の推移より、どれも10サイクルあたりまでは直線的な減少が続くが、それを超えると曲線的になり、収束する。
- 5) すべり係数や摩擦係数は载荷速度が大きくなるほど最大値と最小値の差が小さくなり、ばらつきが小さくなることが分かった。
- 6) 繰返し载荷の初期すべりも含めた単調载荷試験の平均値では、低速、高速、中速の順、繰返し载荷試験では低速、中速、高速の順ですべり耐力やすべり係数が大きくなったことから、速度依存性があること、そしてそれは比例関係ではなく、ある速度を超えるとすべり耐力やすべり係数に与える影響は小さくなることが分かった。

謝辞：本研究の実験では、大阪公立大学大学院の1000kNアクチュエータ载荷装置を使用した。载荷装置の使用や測定に際し、大阪公立大学大学院の山口隆司教授および林巖助教に多くのご助言およびご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

REFERENCES

- 1) 石原靖弘, 小林剛, 皆田理, 西村宣男: 地震被害を受けた高力ボルト摩擦接合継手の特性調査と繰返しすべり実験, 土木学会論文集, 745巻 65号, pp. 53-64, 2003. [ISHIHARA, Y. and KOBAYASHI, T. and MINATA, O. and NISHIMURA, N, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 745, Issue 65, pp. 53-

- 64, 2003.]
- 2) 久米健一, 吹田啓一郎: 高力ボルト摩擦接合部の繰り返し載荷実験を反映した履歴モデルによる検討, 日本建築学会構造系論文集, 76 巻 667 号, pp1713-1720, 2011.[KUME, K. AND SUITA, K.: SEISMIC RESPONSE ANALYSIS CONSIDERING HYSTERESIS CHARACTERISTIC OF HIGH STRENGTH BOLT CONNECTION OBTAINED FROM LOADING TEST, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 76, Issue 667, pp. 1713-1720, 2011.]
- 3) 沼田明樹: すべり荷重を上回る動的繰り返し荷重を受ける高力ボルト摩擦接合部のボルト軸力低下特性, 日本建築学会論文報告集, 第 324 号, 1983.

(Received September 9, 2022)

VELOCITY DEPENDENCE OF SLIP BEHAVIOR OF HIGH STRENGTH BOLT FRICTIONAL JOINTS UNDER REPEATED LOADING

Takanori KAJI, Kunitaro HASHIMOTO

Though in the past research, the effect of the behavior by the difference in the loading displacement and the difference in the surface treatment is shown on the high strength bolt friction joint which is repeatedly loaded by earthquakes, etc., the effect by the difference in the loading speed is not well understood. Then, in this study, for the purpose of clarifying the effect, the repeated loading experiment was carried out under the same condition for test specimens and surface treatment (inorganic zinc-rich coating) by setting loading speed of 3 cases of 1 Hz, 0.05 Hz, 0.001 Hz as 1 cycle. As a result of the experiment, there was some degree of speed dependence on slip load and slip coefficient, and when loading speed was large, both slip load and slip and friction coefficient tended to increase. And, it was proven that the rate of decrease became small and the slip load converged in any case, when the loading over 10 cycles was continuously applied.