

既設耐候性鋼橋のさびを活用した 高力ボルト摩擦接合方法

小林 裕介* 金島 篤希* 網谷 岳夫**
平野 雄大** 秋山 慎一郎***

High-strength Bolted Friction Joint with Protective Rust for Existing Weathering Steel Bridges

Yusuke KOBAYASHI Atsuki KANESHIMA Takeo AMITANI
Takahiro HIRANO Shinichiro AKIYAMA

Weathering steel bridges prevent corrosion by the protective rust on the steel surface instead of painting. However, when high-strength bolted friction joint for connecting the repair and/or reinforcement members to the bridges are applied, the protective rust has to be removed to ensure the joint surface friction, and the rust removal takes much time and cost. In this study, we develop a method to apply the high-strength bolted friction joint without removing the protective rust. The performance of the method is evaluated by the slip coefficient of the joint and the durability.

キーワード：既設耐候性鋼橋，高力ボルト摩擦接合，すべり係数，保護性さび

1. はじめに

耐候性鋼橋は無塗装で供用される橋りょうであり、鋼材表面に環境遮断機能を有する緻密なさび層を形成することで、鋼材の腐食の進行が抑制されている。耐候性鋼橋が鉄道において供用されはじめてから約40年が経過し、近年、一部の橋りょうにおいて経年による疲労き裂等の変状が生じ始めている。また、緻密なさび層が形成されない場合には腐食が著しく進行するが、耐候性鋼橋が架設され始めた頃はこのような認識が低かった実情もあり、既に腐食が進行している橋りょうもある。このような状況を鑑みると、既設の耐候性鋼橋においては、疲労き裂の発生や、腐食による耐荷力不足などに対して、補修・補強の機会が増えてくるものと考えられる。

鋼橋りょうにおいて補修・補強を実施する場合、新たな部材を接合したり、部材を交換したりするが、その際の部材同士の接合には、一般に高力ボルト摩擦接合継手を用いられる。高力ボルト摩擦接合継手は、ボルトに軸力を導入することで得られる部材接合面の摩擦力を利用して、継手部の耐力（以下、すべり耐力）を確保する接合方法であり、高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力は式(1)によって算定される¹⁾。

$$P = \mu \cdot N \cdot m \cdot n \quad (1)$$

* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室
** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室（現 東日本旅客鉄道株式会社）
*** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室（現 株式会社復建エンジニアリング）

ここで、 P はすべり耐力、 μ はすべり係数、 N はボルト軸力、 m は接合面数、 n はボルト本数を表す。式(1)におけるすべり係数は接合面の状態により異なるため、補修・補強部材を接合する際のすべり耐力を算出するうえでは、接合面の処理方法に応じたすべり係数を用いることとしている。

既設耐候性鋼橋において、補修・補強のために高力ボルト摩擦接合継手を用いる場合、接合面にさびがある状態のすべり係数が未知であるため、さび層を完全に除去して鋼素地を露出させるか、そのうえでジンクリッチペイントを塗布することとし、それぞれに応じたすべり係数を用いている。しかしながら、さび層を完全に除去するのは一般的な手工具では難しく、ブラスト工法を用いる必要がある²⁾、大きな労力と費用を要する。これは、ブラスト機材が大掛かりであること、ブラストのための飛散養生の準備に手間を要すること、さらにさび層自体が硬く除去に時間を要すること等が要因である。

このような背景を踏まえ、本研究では、既設耐候性鋼橋に対し、大きな労力や費用をかけずに補修・補強部材を接合できるようにすることを目的として、さび層を完全に除去することなく高力ボルト摩擦接合継手を適用する方法を検討した。

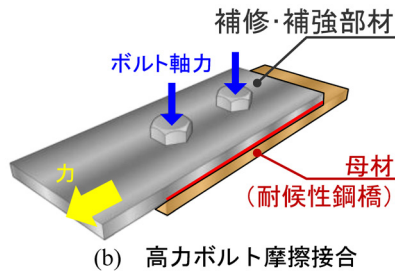
2. さびを活用した高力ボルト摩擦接合

2.1 検討課題

耐候性鋼橋の部材表面のさび層の模式図を図1(a)に示す。表層に脆い浮きさびを有し、それ以外は鋼素地



(a) さび層と浮きさびの除去



(b) 高力ボルト摩擦接合

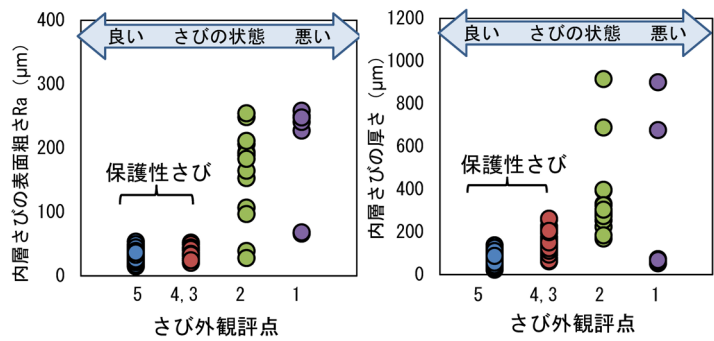
図1 さびを活用した高力ボルト摩擦接合

に固着した硬い内層さびとなっている。本研究で目指す高力ボルト摩擦接合継手は、表層の浮きさびのみを除去したうえで（図1(a)）、硬い内層さびをそのまま残して補修・補強部材等を高力ボルトで接合するものである（図1(b)）。表層の浮きさびについては、カップブラシ等の動力工具により容易に除去できるため、前述のプラスト工法と比べ施工の労力と費用を大幅に削減することができる。

一方で、耐候性鋼橋の部材表面のさび層は、架設環境や部材位置によってその状態が様々である。すなわち、補修・補強部材を接合する場合に必要な継手のすべり耐力 P を算出・評価するためには、内層さびの状態および接合する補修・補強部材の表面処理に応じたすべり係数を明らかにしておく必要がある。また、本研究で目指す高力ボルト摩擦接合継手は、さび層を接合面に介在させた継手となるため、経時的にさびの状態が変化することもあり、その耐久性についても明らかにしておく必要がある。本稿では、既設耐候性鋼橋の内層さびの実態を次節に示すとともに、その内層さびの状態と補修・補強部材の表面処理に応じたすべり係数を3章に、内層さびを活用した摩擦接合継手の耐久性を4章で示す。

2.2 内層さびの状態

本研究では、すべり係数や耐久性の検討の前に、既設耐候性鋼橋におけるさびの状態について、その実態を調査した。調査は全国の既設耐候性鋼橋の10橋と、耐候性鋼橋が架設された際に併設した暴露試験桁8体に対して実施した。調査対象の橋りょうと暴露試験桁は、経年が約30年程度である。調査項目は、摩擦に影響を及ぼすと考えられる内層さびの表面粗さ（JIS B 0601）およ



(a) 内層さびの表面粗さ Ra (b) 内層さびの厚さ

図2 内層さびの状態とさび外観評点の関係

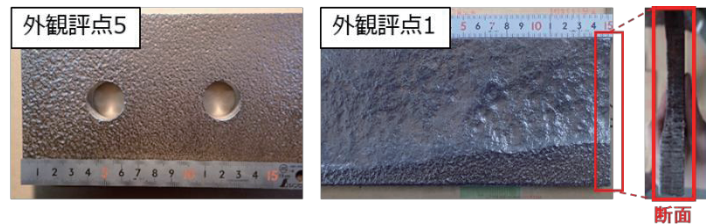


図3 内層さびの表面の状態

び厚さとした。

調査結果については、「さび外観評点^{3) 4)}」という指標で整理することとした。さび外観評点とは、耐候性鋼橋のさび層に対する防食の観点での指標であり、状態を5ランクに分類したもので、評点が高いほど良い状態をあらわし、評点5～3が耐候性鋼橋に期待する防食機能を有しているさび（以降、保護性さび）を示す。通常の維持管理で用いられる指標であるため、このさび外観評点と内層さびの状態を関連付けておくことにより、浮きさびを除去しなくても、検査記録におけるさび外観評点から内層さびの状態を把握することが可能となる。

調査結果を図2に示す。さび外観評点が小さく、さびの状態が悪いほど内層さびの表面粗さ Ra と厚さの分布範囲が広がっている。さび外観評点が2もしくは1である場合には特に大きい値が見られる。ここで、浮きさびを除去した内層さびの表面の状態について、さび外観評点が5のものと、1のものを図3に示す。なお、図3は暴露試験桁から採取した鋼材である。さび外観評点が5のものは表面が平滑であり、高力ボルト摩擦接合継手を適用した場合に接合面の摩擦が確保できる可能性がある。一方で、さび外観評点が1のものは表面の凹凸が著しく、また板厚も減耗している部分があることから、接合面の摩擦が確保できる可能性は小さい。なお、この傾向はさび外観評点が3と2を境にして顕著であった。

以上のことから、本研究ではさび外観評点が5～3である保護性さびに対しては、内層さびを活用した高力ボルト摩擦接合継手の適用を目指すこととした。また、内層さびを活用した高力ボルト摩擦接合継手については、図3で得られた範囲の内層さびの表面粗さ Ra と厚さに

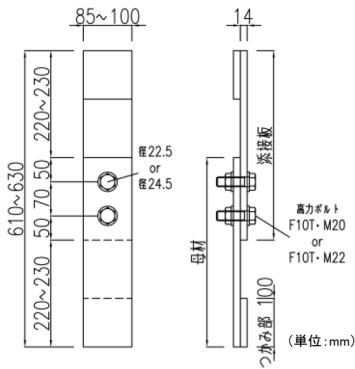


図4 継手試験体の形状寸法



図5 試験状況

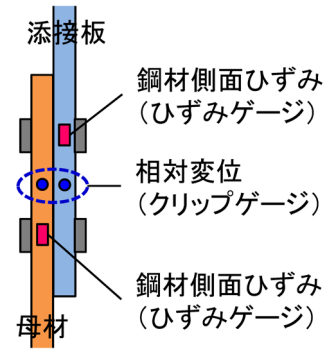


図6 測定位置

対してすべり係数を評価することとした。なお、さび外観評点が2または1である場合は、凹凸が大きく接合面の摩擦が期待できないこと、およびさび自体が非常に脆いことから、さび層を完全に除去し、かつ凹凸部に接着材を充填したうえで高力ボルト接合する必要があると考えられる。

3. 内層さびの状態と補修・補強部材の表面処理に応じたすべり係数

既設耐候性鋼橋に補修・補強部材を高力ボルト摩擦接合した場合を模擬した継手試験体を用いてすべり試験を実施し、内層さびの状態と補修・補強部材の表面性状に応じたすべり係数を評価した。本章では試験概要とその結果について示す。

3.1 すべり試験の概要

継手試験体は、耐候性鋼橋と同じ程度に内層さびを有する母材に、補修・補強部材を模擬した添接板を高力ボルトで接合することで製作した(図4)。継手試験体の母材は、暴露試験桁から採取した試験片を使用し、既設耐候性鋼橋の部材を模擬した。採取した試験片の接合面は、カップブラシによって浮きさびを除去し内層さびのみを残した状態とした。継手試験体の添接板は新規に製作し、接合面に処理を施した。接合面の処理方法は、一般に用いられる無機ジンクリッチペイント(以下、無機ジンク)塗布、ブラスト処理とした。

継手試験体の添接板の板厚と材料強度は、母材に使用した暴露試験桁と同程度とし、母材と添接板の板幅は、母材あるいは添接板の降伏よりも先に継手のすべりが生じるよう、文献5を参考に、すべり/降伏耐力比が0.6以下となるように調整した。継手試験体の母材と添接板は、高力ボルトにより接合した。導入したボルト軸力は、設計ボルト軸力の10%増しとし¹⁾、ボルトに貼付したひずみゲージで測定したひずみ値と校正係数から得られた軸力により管理した。

すべり試験は、ボルト軸力のリラクゼーションを考慮して、母材と添接板の接合完了から24時間経過以降に実施した。試験は、継手試験体の両端部を試験機に固定して変位制御(荷重速度0.3mm/min)により漸増引張荷重し(図5)、すべりを確認できるまで実施した。すべり係数算出のためのすべり荷重は、すべりが生じ荷重～相対変位関係において荷重低下し始めた時点の荷重としたが、明確に荷重の低下が見られない場合は、0.2mmの相対変位が生じた時点の荷重とした⁶⁾。荷重は試験機のロードセルによって測定し、相対変位はクリップゲージにより測定した(図6)。なお、母材と添接板が降伏してないことを確認するため、ひずみゲージにより両者の試験体方向のひずみも測定した。

すべり係数は、すべり試験でのすべり荷重とボルト軸力を用いて式(1)によって算出した。なお、ここではボルト軸力として、前述の設計ボルト軸力を用いることとした。

3.2 無機ジンク添接板を接合した継手のすべり係数

ここでは、添接板として無機ジンクを塗布したものをを用いた場合について、母材のさび層の状態(粗さ、厚さ)および無機ジンクの厚みをパラメータとしたすべり係数の結果について示す。なお、無機ジンクは、一般に表面の防錆、すべり係数確保の目的で塗布され、補修・補強部材を工場等で製作し、現場への搬入にある程度の時間を要する場合を想定したものである。

すべり係数と内層さびの状態の関係について、すべり試験の結果を図7に示す。本研究で試験対象とした保護性さびについては、内層さびの表面粗さRaと内層さびの厚さによるすべり係数の違いに有意な傾向はなく、すべり係数は0.3以上となることを確認した。

なお、さび外観評点が4または3の保護性さびのうち内層さびの表面粗さRaが40~50 μm (図7(a))、もしくは厚さが100~260 μm (図7(b))の状態についてはすべり試験の結果がない。これについては別途検討が必要であるものの、表面粗さRaと厚さがさらに大きいさび外観評点2のさびに対するすべり係数が0.25以上となっ

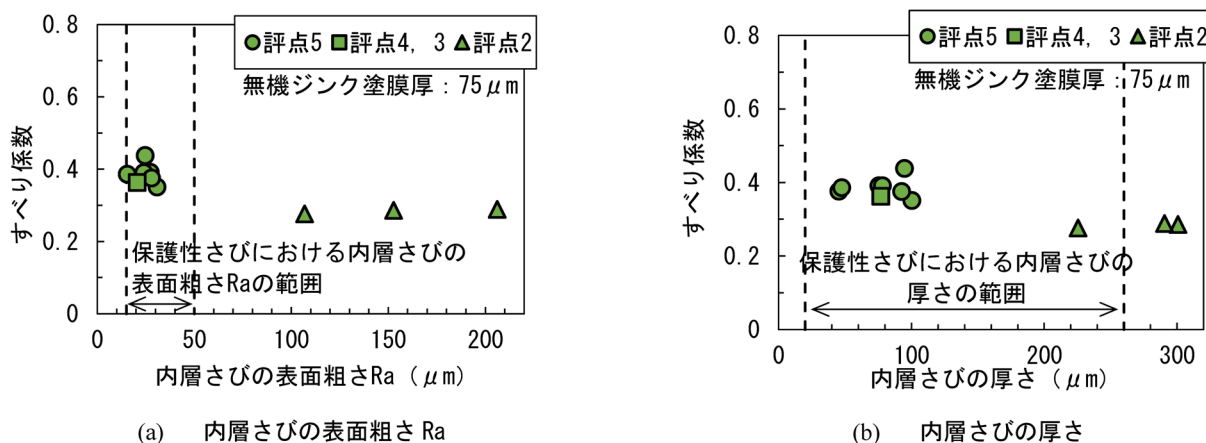


図7 すべり係数と内層さびの状態の関係（無機ジンク添接板）

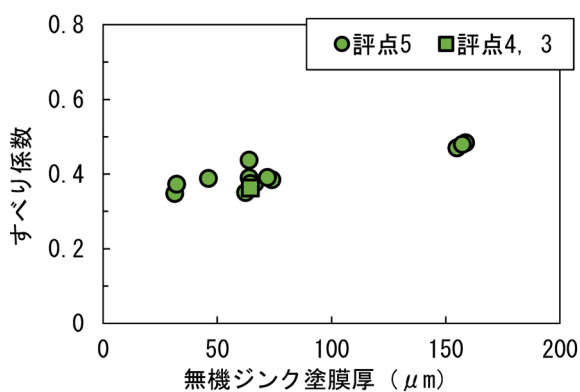


図8 すべり係数と無機ジンクの塗膜厚の関係

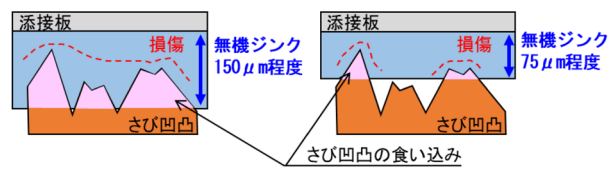


図9 さび凹凸の食い込み状況

ており（図7）、さび外観評点が4または3である場合は少なくともこれと同等以上のすべり係数を有しているものと考えられる。

すべり係数と無機ジンク塗膜厚の関係について、すべり試験結果を図8に示す。鉄道橋において標準とされている塗膜厚は75μmであるが¹⁾、塗膜厚を150μm程度まで厚くすることで、さび外観評点5の保護性さびに対しては0.4以上のすべり係数が得られ、すべり係数は向上することが分かった。これは、図9に示すように内層さび表面の凹凸がより無機ジンク塗膜に食い込み、すべり時の抵抗を増していることが一つの要因と推察される。

以上より、保護性さびに無機ジンク処理を施した補修・補強部材をボルト接合する場合には、保護性さびの粗さや厚さによらず、すべり係数を0.25とすればすべり耐力を評価できること、また、無機ジンクの塗膜厚を増すことによってすべり係数は向上できることが分かった。

3.3 プラスト添接板を接合した継手のすべり係数

ここでは、添接板として表面をブラスト処理したものをを用いた場合について、母材のさび層の状態（粗さ、厚さ）および添接板表面の粗さをパラメータとしたすべり係数の結果について示す。なお、ブラスト処理の適用は

現場で当板等の簡易な補修・補強部材が加工されることを想定したものである。ただし、プラスト処理した添接板は鋼素地が露出しており防錆できていないため、現場で補修・補強部材が放置された場合は、添接面に発錆する可能性がある。本研究ではこの発錆がすべり係数に及ぼす影響についても評価した。

すべり係数と内層さびの状態の関係について、すべり試験の結果を図10に示す。本研究で試験対象とした保護性さびについては、内層さびの表面粗さRaと内層さびの厚さによるすべり係数の違いに有意な傾向は無く、すべり係数は概ね0.5程度以上確保できるものと考えられる。また、図10のプロットには母材の材料強度、およびさびの経年の違いも含まれているが、同様にすべり係数に有意な違いは見られなかった。

なお、本検討では、さび外観評点が4または3の保護性さびのうち内層さびの表面粗さRaが40～50μm、もしくは厚さが160～260μmの状態について未検討であり、これらにおいてすべり係数は低下する可能性があるため、すべり係数を0.40とするなど安全側に設定しておく必要がある。

次に、すべり係数と添接板ブラスト処理面の表面粗さRaの関係について、すべり試験結果を図11に示す。ブラスト処理面の表面粗さRaとすべり係数には明確な関係が見てとれ、表面粗さRaが小さくなるとすべり係数は低下する傾向にある。このため、すべり係数を0.5以上確保するためには、添接板の表面粗さRaを10μm以上に管理する必要がある。

すべり係数とブラスト添接板の暴露期間の関係について

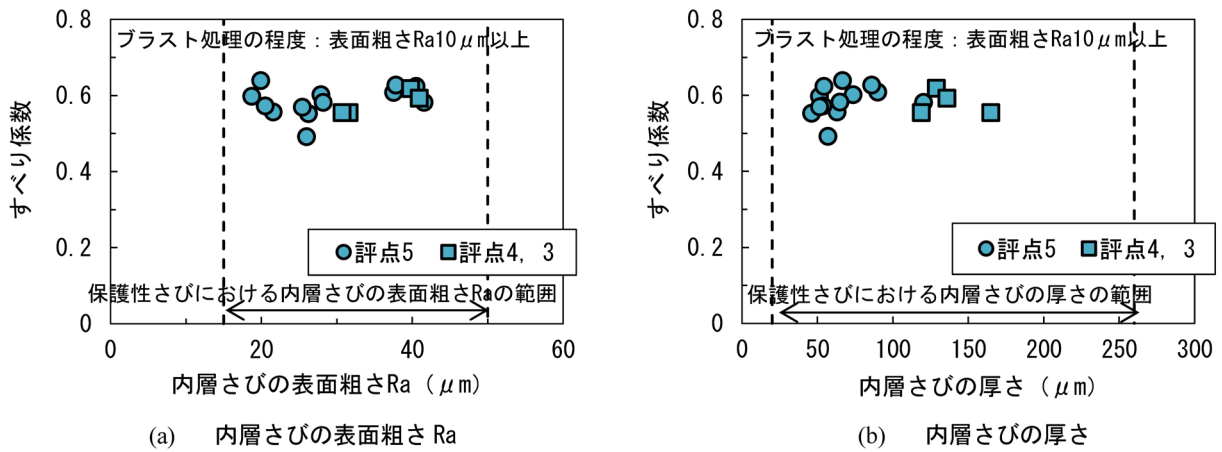


図 10 すべり係数と内層さびの状態の関係（ブラスト添接板）

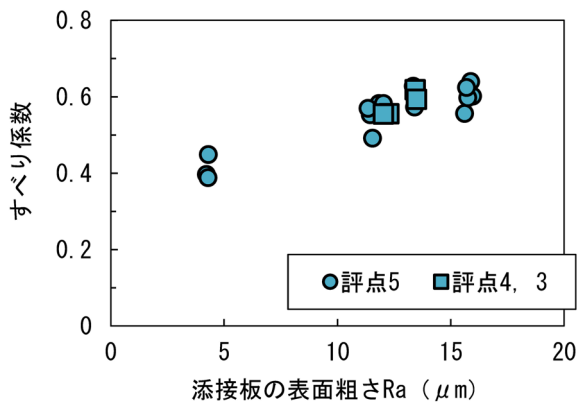


図 11 すべり係数と添接板表面粗さ Ra の関係

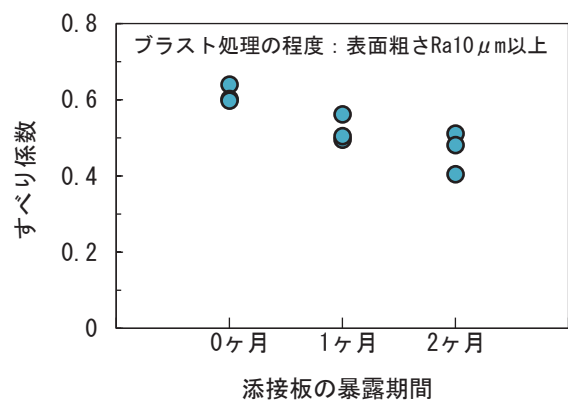


図 12 すべり係数と添接板の暴露期間の関係

て、すべり試験結果を図 12 に示す。なお、暴露した添接板は暴露後にさびを生じていたが、カップブラシで裏層のさびを除去した後に試験に供している。図 12 より、添接板の暴露期間とすべり係数には明確な関係が見てとれ、暴露期間が長くなるほどすべり係数は低下する傾向にあることが分かった。添接板のさびは暴露期間に応じてその厚みが増しており、このことがすべり係数を低下させた要因のひとつと考えられる。

以上より、保護性さびにブラスト処理を施した補修・補強部材をボルト接合する場合には、保護性さびの粗さや厚さによらず、すべり係数を 0.4 とすればすべり耐力を評価できる。ただし、補修・補強部材添接面のブラスト処理による表面粗さ Ra を 10μm 以上とし、かつブラスト処理後において添接面にさびを生じさせないように管理する必要があることが分かった。

4. 内層さびを活用した摩擦接合継手の耐久性

内層さびを接合面に用いた場合、さび表面の凹凸から雨水等が浸入することで内層さびの状態が変化する可能性がある。ここでは、耐久性試験により経年を模擬した高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力の変化傾向を評価した。

4.1 耐久性試験の概要

耐久性試験では、3章で示した継手試験体を腐食促進することで経年を模擬し、そのうえで3章と同様のすべり試験を実施し、経年によるすべり耐力の変化傾向を評価した。腐食促進は、塗装鋼板の暴露試験との相関性が高い⁷⁾とされている S6 サイクル (JIS K 5621) (図 13) により実施し、促進期間は 45~60 日程度 (図 13 の工程の 180~240 サイクル分) とした。なお、この促進期間は、耐候性鋼橋の適用基準¹⁾ の目安である飛来塩分量 0.05mdd の環境の 7~9 年程度に相当する⁸⁾。

4.2 すべり耐力の経年による変化

経年によるすべり耐力の変化を図 14 に示す。なお、添接板の無機ジंक塗膜については 75μm であり、ブラスト処理については表面粗さ Ra を 10μm 以上としている。経年を模擬した継手試験体のすべり耐力を模擬していないものと比べると、無機ジंक添接板を接合した継手およびブラスト添接板を接合した継手の両方とも経年によりすべり耐力が高まる傾向にあることが分かった。

ここで、保護性さびにブラスト添接板を接合した試験体 (経年模擬) について、すべり試験後の接合面の状態を図 15 に示す。接合面の保護性さびの状態は、カップ

ブラシで浮きさびを除去したときよりも幾分かさびが進行しているような状態であり、接合面がさびで固着した、もしくはさびの凹凸によりすべりにくくなったことがすべり耐力を向上させた要因の一つであると考えられる。

以上の検討から、内層さびを活用した高力ボルト摩擦接合継手は、経年とともに接合面の状態が変化し、結果としてすべり耐力が高まる傾向にあるため、耐久性を有していると言える。ただし、本検討で模擬した腐食環境下よりも悪い環境条件や、50年や100年と言った長期間の経年後の状態については別途検討を要する。

5. まとめ

既設耐候性鋼橋に対し、大きな労力や費用をかけずに補修・補強部材を接合できるようにすることを目的として、内層さびを活用した高力ボルト摩擦接合継手を適用する方法を検討した。以下に本研究で得られた成果を示す。

- (1) 表面が比較的平滑で添接面において摩擦を確保することが期待できる保護性さびを有する母材に対して、添接面に無機ジンクを塗布した補修・補強部材を接合する場合は、すべり係数を0.25としてすべり耐力を評価できる。また、無機ジンクの塗膜厚を増すことで、すべり係数を向上できる。
- (2) 保護性さびを有する母材に対して、添接面をブラスト処理した補修・補強部材を接合する場合は、すべり係数を0.4としてすべり耐力を評価できる。ただし、ブラスト処理面の表面粗さRaは10 μ m以上とし、かつブラスト処理後において添接面にさびを生じさせないよう管理する必要がある。
- (3) 耐候性鋼橋の適用可能な環境下では、内層さびを添接面に介在させた高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力は経年により増加する傾向にあり耐久性を有している。

謝 辞

本研究は、法政大学森教授との共同研究の成果を含んでいる。また、本研究における継手試験体に供した暴露試験桁は、東日本旅客鉄道株式会社および西日本旅客鉄道株式会社より提供頂いた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），丸善，2009

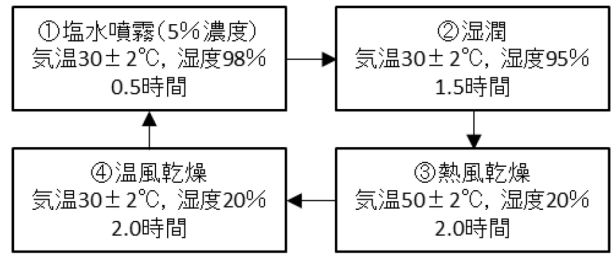


図 13 1 サイクルの工程

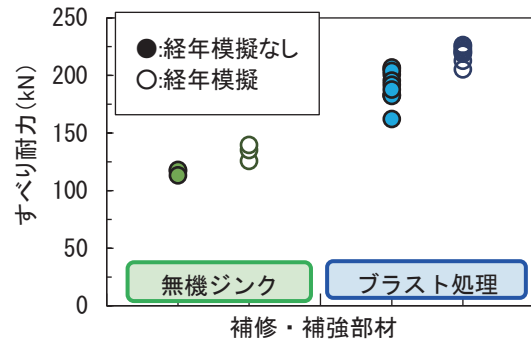


図 14 経年によるすべり耐力の変化

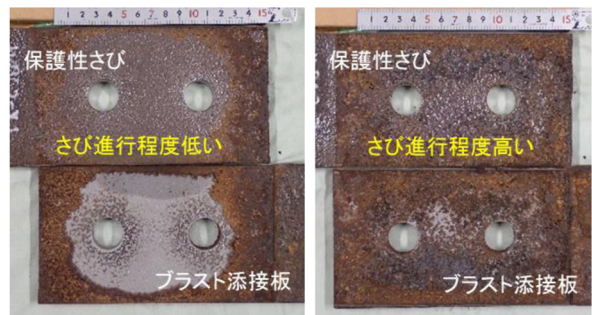


図 15 すべり試験後の接合面の状態

- 2) 田中誠，江成孝文，町田洋人：溶融亜鉛めっき鋼および耐候性鋼の腐食と延命化，鉄道総研報告，Vol.15，No.7，pp.35-40，2001
- 3) 三木千壽，市川篤司：現代の橋梁工学・塗装しない鋼と橋の技術最前線，数理工学社，2004
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（鋼・合成構造物 構造物編），丸善，2007
- 5) 網谷岳夫，森猛，小林裕介：摩擦接合重ね継手のすべり耐力と降伏耐力に関する解析的検討，鋼構造論文集，No.96，pp.45-54，2017
- 6) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2012
- 7) 藤原博，田原芳雄：鋼橋塗装の長期防食性能の評価に関する研究，土木学会論文集，No.570/I-40，pp.129-140，1997
- 8) 伊藤義人，岩田厚司，貝沼重信：鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験とその促進倍率に関する基礎的研究，構造工学論文集 A，Vol.48，pp.1021-1029，2002