研究論文

溶融亜鉛めっきボルトのゆるめトルクに及ぼす 環境の影響*

石川 憲一** 堀 隆一** 小川 俊夫***

Environmental Effect on Loosening Torque of Hot-dip Galvanized Bolts

Ken-ichi ISHIKAWA, Ryuichi HORI and Toshio OGAWA

In this study, the loosening torque of hot-dip galvanized bolts is investigated through the exposure tests and simulation tests. The following points were clarified: (1) The loosening torque was inclined to increase with the length of the exposure time and to become greater than the tightening torque. Such tendency was more remarkable under supply of lubricating oil. (2) It was found that the increase of the loosening torque was caused by the solidification of the surface due to the cohesive nature of zinc oxide. (3) The cause of such a phenomenon was clarified from the surface analysis of the used screw thread.

Key words: bolted joint, tightening torque, loosening torque, axial tension, exposure test, hot-dip galvanized bolt, solidification of zinc oxide

1. 緒 言

送電用鉄塔や鉄柱部の締付けに用いられている溶融亜鉛めっきボルトに関し、日本鉄塔協会技術委員会のボルト部会において適正締付けトルクの検討¹⁾²⁾が行われているが、ゆるめトルクについての検討は見受けられない。実際に、溶融亜鉛めっきボルトを鉄塔用部材に締め付けた後、大気中に放置するとゆるめトルクが締付けトルクよりも増大するという現象がみられる。

本研究では、このような現象について材料表面および潤滑油の性状変化の面から検討することを目的として、溶融亜鉛めっきボルト締結体の大気中の暴露試験や温度変化によるシミュレーション試験を行い、ゆるめトルクの値を測定するとともにねじ面の表面分析を行うことによって環境の変化によるゆるめトルクの挙動について考察³⁾を加えた。

2. 実験装置および方法

図1に、実験に使用した実験装置の主要部を示す。試験用ねじは溶融亜鉛めっき六角ボルト (M 16×60, 材質: SS 41, 強度区分: 4 T) および溶融亜鉛め

き六角ナット (M 16, 材質: SS 41, 強度区分: 4 T) を使用し、座金として丸形フィラー (材質: SS 41, 形状: 内径 20.5 mm, 外径 40 mm, 厚さ: 6 mm) を用いた。これらの試験用ボルトおよびナットはいずれも日本電機工業会将来規格 JEM-F: 3002, 3003 に適合するものであり、その溶融亜鉛めっき処理における亜鉛付着量は約 400 g/m² である。潤滑油としては、在来、送電線鉄塔部材の締結に用いられてきている植物油であるサラダ油を使用した。

実験方法は、ボルト、ナットおよびフィラーを図1に示すようにセットし、プレート型トルクレンチを用いて送電用鉄塔部材の施工時の締付けトルク 49 N・m に締め付け、締付けトルクおよび軸力をペン書きレコーダに記録した。このボルト締結体を大気中に放置

Fig. 1 Experimental apparatus

* 原稿受付 昭和63年7月7日。昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和62年10月12日)にて発表

** 正会員 金沢工業大学(石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

*** 金沢工業大学

Table 1 Experimental conditions

Tightening torque	49 N·m
Hexagon bolt	M 16×60 (SS 41)
Surface treatment	Zinc hot-dip galvanizings
Lubricant	Salad oil
Temperature	In the atmosphere : 273-303 K In the electric furnace : 289-323 K
Humidity	In the atmosphere : 45-90% In the electric furnace : 22-90%

したときの軸力の変動及びゆるめトルクの値を測定した。これらの実験は長期間にわたって行うことから、電気炉を用いた温度変化によるシミュレーション実験をもあわせて行った。

電気炉を用いたシミュレーション試験を行うにあたって、秋期に軸力計の表面温度を半導体センサを用いた温度計のプローブを軸力計の表面に接触させて1 hごとに測定した結果より、ボルト締結体の表面温度が最高323 K程度にまで達していることが明らかとなったことから電気炉内の設定温度を323 Kとした。

シミュレーション試験では、図1に示すボルト締結体を初期ゆるみを除去するために12 h保持した後、設定温度に保持された電気炉内にセットし、昼夜の温度変化に対応して12 hごとに電気炉内のON・OFFの切替えを行った。そして、1日、3日、5日、7日経過後のゆるめトルクの値をそれぞれ4回ずつ測定した。

実験にあたって、白さびの発生しているものは洗浄しないで使用し、白さびの影響を除去する場合は試験用ボルト、ナット及び座金を超音波洗浄器で洗浄した後デシケータ内で十分乾燥させたものを「無潤滑」とした。

また、この「無潤滑」のボルトのねじ面に潤滑油としてサラダ油を塗布したものを「潤滑」として一連の実験を行った。本研究での主な実験条件を表1に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 ゆるめトルクの挙動

一般に、ゆるめトルク値はねじ面および座面の摩擦係数を0.15とすると、締付けトルクの約80%程度⁴⁾であり、潤滑条件下(潤滑油: サラダ油)での締付けトルク49 N·mに対するゆるめトルク値の測定結果は、約36 N·m程度となった。

図2(a)に大気暴露試験における暴露期間に対するゆるめトルクの挙動を示す。図2(a)に示すようにボルト締結体を大気中に放置した後ゆるめトルクを測定すると、ゆるめトルクは潤滑、無潤滑ともに暴露期

(a) Outdoor exposure test

(b) Exposure test in a furnace

(c) Desiccator test

Fig. 2 Behavior of the loosening torque as a function of exposure time (Bolt surface; white rust)

間が増加するにつれて漸増する傾向を示している。このようなゆるめトルクが増大する傾向は、特に、潤滑下において顕著である。

図2(b)に、シミュレーション試験における電気炉内の暴露期間に対するゆるめトルクの挙動を示す。図2(b)においても図2(a)の場合と同様に、暴露期間に対するゆるめトルクの増大傾向が得られ、このような傾向は同様に潤滑下において顕著であった。また、デシケータ内での恒温・恒湿条件下におけるゆるめト

Fig. 3 Possible chemical reaction on surface

トルクの挙動を図2(c)に示す。図2(c)からわかるように、恒温・恒湿条件下ではゆるめトルクは図2(a)および同図(b)に示されるような増加傾向を示していないことから、温度および湿度等の環境条件の変化の影響が大きいことがわかった。さらに、電気炉内でのデンシメータ試験からも同図(c)と同様な傾向が得られたことから、外部温度の影響は少ないものと考えられる。

また、大気暴露試験後のねじ面の摩擦係数を測定した結果、ねじ面の摩擦係数はゆるめトルクの挙動と同様に、暴露期間の増大とともに増加する傾向を示した³⁾。

3.2 潤滑油の物性的変化の検討

溶融亜鉛めっきボルトの締付けには、従来、トルク係数のばらつきの安定化、潤滑油の境界潤滑性および施工上の容易さ等から脂肪油が使用されてきているが、本報では、潤滑油として使用されているサラダ油の環境の変化による変質について検討した。

サラダ油のような油脂は、高温下では長時間大気中に放置されると、図3に示す化学反応(I)のように水によって加水分解をうけ、油脂はグリセリンとカルボン酸に分解される。さらに、このカルボン酸は亜鉛めっき層表面において、次の化学反応(II)に示すように亜鉛と反応してカルボン酸塩を生成し、このようにして生成されたカルボン酸が亜鉛めっき層の表面に付着することが考えられるため、試験後のサラダ油の定性分析を行った。

潤滑油の定性分析には、赤外線吸収スペクトル分析法⁵⁾を応用した。有機化合物は分子の振動に基づく官能基に特有の赤外線を吸収する。赤外線スペクトルは化合物の状態に関係なく同一の官能基であればほとんど同じスペクトルを与えることから、その赤外線波長を測定することにより化合物の定性分析ができる。

潤滑油の分析は回折格子赤外分光光度計(日本分光製IRA-2形)を用いて、赤外線吸収スペクトル法による潤滑油の吸収スペクトル解析を行った。

(a) Infrared absorption spectrum of salad oil

(b) Infrared absorption spectrum of salad oil after exposure test in a furnace

Fig. 4 Infrared absorption spectrum of lubricated oil

図4(a)および(b)に、赤外線吸収スペクトル法によるサラダ油の吸収スペクトルの比較を示す。図4(a)はサラダ油の試験前の赤外線吸収スペクトルであり、同図(b)はシミュレーション試験後のサラダ油の赤外線吸収スペクトルの一例である。図4(a)に示されている試験前の赤外線吸収スペクトルには、波数が4000~400 cm⁻¹の領域において波数の大きい官能基領域(1300 cm⁻¹以上)では、サラダ油に含まれるメチル基(-CH₃)、メチレン基(-CH₂)およびカルボニル基(>C=O)等の表面官能基の存在を示す特性伸縮振動(結合軸に沿っての原子間距離の変化)や変角振動(結合角の変化)に基づく特有の領域で強い吸収を示す特性吸収帯がみられる。図4(b)からは、波数が1620~1500 cm⁻¹付近にカルボン酸塩(-COOMe)の存在を示すC=O間の伸縮振動に基づく微小な特徴的な吸収がみられ、上述の化学反応(II)に示すように、若干のカルボン酸塩が発生していることが認められるが、両赤外線吸収スペクトルを比較してみると、特に、このような特性吸収帯には決定的に大きな変動がみられないことから、潤滑油には

Fig. 5 Composition of elements on surface of hot-dip galvanized bolt by XPS

ゆるめトルクに影響を及ぼすほどの本質的な構造変化や劣化は生じていないものと考えられる。

3.3 ねじ面の表面分析

ねじ表面の表面分析はX線光電子分析装置(島津製作所製: ESCA-850)を用いて、表面の光電子放射を利用して亜鉛めっき層表面の化学組成や表面原子の化学結合状態を決定するX線光電子分光分析(XPS)⁶⁾を行った。

図5に、熔融亜鉛めっき処理されたボルトのねじ表面の元素分析結果を示す。熔融亜鉛めっき処理されたボルトの表面付近の化学組成は、亜鉛(Zn)、鉄(Fe)、炭素(C)および酸素(O)が主成分であることがワイドスキャンスペクトルからわかった。それらの元素について深さ方向の分布について調べた結果、図5に示すように、その極表面付近では亜鉛の組成割合が多いことがわかった。そこで、亜鉛めっき層の深さ方向の亜鉛化合物の結合状態を調べた。

図6に、暴露試験後の亜鉛めっき表層における亜鉛の深さ方向の分布の測定結果の一例を示す。この結果XPS(光電子分析法)スペクトルの結合エネルギー変化(化学シフト)は、亜鉛金属で1021.8 eV、酸化亜鉛では1022.5 eV、炭酸亜鉛では1025.2 eVにそれぞれピークを示すことから、暴露試験後のねじ表面にはねじ表面から1 μm 程度の極表面層付近において、若干の酸化亜鉛(ZnO)や炭酸亜鉛(ZnCO_3)が生じていることが認められた。このようなねじ表面の表面分析の結果、ねじ表面には酸化亜鉛の粉体層が形成されていることがわかった。そこで、以下に亜鉛めっき層界面における粉体系について考察する。

3.4 ねじ面の状態

熔融亜鉛めっき処理されたボルトの表面では、環境温度の変化に伴い相対湿度70%以上の結露状態では、

Fig. 6 XPS spectrum of Zn

Fig. 7 Bolt surface after the growth of zinc oxide

大気腐食によって多孔質の点状白さびの発生が認められている⁷⁾。また、熔融亜鉛めっき皮膜の大気腐食は、気象環境因子の影響が大きく、比較的相対湿度の高い暴露時期に多く発生している傾向が認められている⁸⁾。

本研究では、走査形電子顕微鏡を用いて、白さびの発生したボルトのねじ面の表面観察を行った結果、図7に示すように粒径数 μm の粉体粒子から形成されていることがわかった。さらに、この亜鉛めっき表層部の点状白さびの主成分は、X線光電子分析装置を用いた表面分析の結果、酸化亜鉛であることが明らかとなった。

そこで、このような酸化亜鉛を主成分とする点状白さびの発生した亜鉛めっき層界面に注目し、図8に示すように亜鉛めっき層表面間に酸化亜鉛の微細な粉体が介在している粉体系モデルを考え、検討を加えた。

図8(a)は、亜鉛めっき層表面に酸化亜鉛が分布している状態であり、同図(b)は、潤滑油中に粉体粒子が分布している状態を示している。潤滑下のねじ締結では、締結時のねじ面は境界潤滑状態になるものと

Fig. 8 Surface model of hot-dip galvanized layer

考えられ、潤滑油に酸化亜鉛が混在して大気中に長時間放置され、図8(b)に示すように亜鉛めっき層表面において酸化亜鉛が潤滑油(油脂)中に存在すると、潤滑油が微細な酸化亜鉛粉体の粒子間のポテンシャルエネルギーを低下する方向に作用することになり、その結果、酸化亜鉛の粉体粒子は凝集する⁹⁾ことになるものと考えられる。

このような界面科学的反応が暴露期間の増加に伴いその表面の固化を進行させる。そして、この亜鉛めっき層界面における反応は、相対湿度が高い程表面の固化が進行するものと考えられる。

そこで、このようなねじ表面の界面科学的考察を検証するために暴露試験のねじ面の表面観察を行った。

図9に、大気暴露試験後のねじ表面の状態およびシミュレーション試験後のねじ表面の状態を示す。両図から、潤滑下の亜鉛めっき表層面には、図7に示したような酸化亜鉛を主成分とする白さびの粉体粒子は明らかに凝集状態を呈していることがわかる。また、デシケータ内における恒温・恒湿条件下での試験後のねじ表面の表面観察を行ったが、図9に示されるような点状白さびの明確な凝集状態は観察されなかった。

3.5 ゆるめトルクに及ぼす白さびの影響

図10に、大気暴露試験によるゆるめトルクに及ぼす白さびの影響に関する試験結果を示す。図10は、ボルトの表面に白さびが発生した熔融亜鉛めっきボルトと、熔融亜鉛めっき処理された新品のボルトを用いた場合の比較実験結果である。ボルトの表面に白さびがある場合、ゆるめトルクは軸力が一定であっても、白さびの存在によって暴露期間が増加するにつれて漸増する傾向を示している。特に、この傾向は潤滑下

(a) Bolt surface after the exposure test

(b) Bolt surface after the simulation test

Fig. 9 Bolt surface conditions after the exposure test and the simulation test as observed by SEM

-△-: Lubricated Temp. 292-303K }
 -▲-: Non-lubricated Hmd 19-90% }
 -○-: Lubricated Temp. 291K }
 -■-: Non-lubricated Hmd 18% }
 (Bolt surface: White rust)
 -○-: Lubricated Temp. 286-297K } New bolt
 -●-: Non-lubricated Hmd 36-90% }

Fig. 10 Behavior of loosening torque as a function of exposure time

において顕著である。また、白さびが発生していない新品ボルトの場合、ゆるめトルクは大気中の水分の影響をうけ、暴露期間の増加とともに多少増加する傾向がみられる。一方、恒温・恒湿条件下では、ゆるめトル

クは潤滑，無潤滑ともに環境の変化にはあまり影響をうけず，ほぼ一定の値を示していることがわかる。

以上のことより，ゆるめトルクの増大はねじ面に発生した点状白さびの粉体粒子の大気中の水分による凝集に起因した表面の固化であると考えられる。

4. 結 言

溶融亜鉛めっきボルトに関し，ゆるめトルクに及ぼす環境変化の影響について検討した結果，以下の事項が明らかとなった。

- (1) ゆるめトルクは，暴露期間が長い程漸増する傾向があり，特に，潤滑下において顕著である。
- (2) ゆるめトルクの増大は，ねじ表面の表面分析の結果，点状白さびの凝集による表面の固化に起因することがわかった。
- (3) 一連の実験によって，溶融亜鉛めっきボルトの環境の変化によるゆるめトルクの増大の原因を明らかにすることができた。

終わりに，試験用ボルトを多数ご提供頂いた上村電建(株)並びに御意見を賜りました北陸電力(株)の関係者各位に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本鉄塔協会技術委員会：鉄塔用ボルトの適正締付トルクの研究，鉄塔，9 (1962) 15.
- 2) 江藤元大：溶融亜鉛めっきボルトの適正締付け実験報告，鉄塔，12 (1966) 29.
- 3) 石川憲一，堀 隆一，小川俊夫：溶融亜鉛めっきボルトの環境変化の影響，日本設計製図学会北陸支部昭和62年度研究発表論文集 (1987) 19.
- 4) 山本 晃：ねじ締結の理論と計算，養賢堂 (1977) 89.
- 5) 堀口 博：赤外吸光図説総覧——有機構造化学の基礎と実際，三共出版 (1973) 195.
- 6) 日本表面科学会：表面分析の基礎と応用，第6回表面科学基礎講座 (1987) 61.
- 7) 日本ねじ研究協会：ねじの低公害めっきに関する調査研究報告書 (1979).
- 8) 外川靖人はか：めっき皮膜の大気暴露試験——亜鉛めっきの大気腐食，金属表面技術，32，7 (1981) 336.
- 9) 川北公夫：粉体工学，槇書店 (1977) 163.

書 評

表面改質技術——ドライプロセスとその応用

編者/精密工学会表面改質に関する調査研究分科会
発行/日刊工業新聞社

精密機器の高度化に対する要望はますます強くなってきていて，それへの対処策のひとつとして素材表面のみに新しい特性を付加できる表面改質技術が大きく期待されている。本書は，特に最近の新しい表面改質技術に焦点を絞り，精密工学会表面改質に関する調査研究分科会がその2年間にわたる活動の成果をまとめたもので，総論，プロセス編及び応用編より成っている。

「総論」では，表面改質技術の全体像が紹介され，従来の技術と新しい技術の関連が把握できる。又，「プロセス編」では，CVD (化学蒸着)，PVD (物理蒸着)，構造制御 (例えば表層面結晶粒の微細化)，プラズマ溶射を対象として，それらの原理，使用される加工装置，処理方法等が詳述されている。最後に「応用編」では，

トライボロジー及び微小硬度の観点からの表面改質層の評価も含めて，ピストンリング溝のレーザ焼入れ，金型のTiCコーティング，PVD法によりAg薄膜形成した転がり軸受等数多くの新しい表面改質技術の応用事例を紹介している。

このように，最近の表面改質技術が幅広く，要領良くまとめられているほかに，参考文献も数多く示されているので，便覧的に利用すれば非常に役立つ書である。又，技術の性格上多数の方々執筆しているため，多少の重複や記事構成の不統一さも認められるが，記述が平易であるので大学の専門課程における教科書として採用しても良いであろう。(東京工業大学・伊東 諒) (1988年刊，A5判，374ページ，定価4500円)