

S2-5-3. 腐食劣化によるアルミニウム電車線材料の特性評価

Characteristic evaluation of corroded aluminum overhead contact line

正 [電] ○西 健太郎 正 [電] 佐藤 勇輔 (鉄道総合技術研究所)

Kentaro NISHI, Yuusuke SATO Railway Technical Research Institute

Abstract

Aluminum are widely used in overhead contact line as feeder because of its low cost and light weight. However, corrosion degradation of aluminum tends to be caused by the leakage of water in a tunnel or different species metal contact part. Therefore, we studied various electric and mechanical characteristics of aluminum in a tunnel. The test results are described in this paper.

キーワード：アルミニウム剛体電車線、硬アルミニウムより線、トンネル、腐食

Keywords: Aluminum rigid conductor lines, stranded conductors, tunnel, corrosion

1. はじめに

アルミニウムは軽量、安価で導電性が高いため、電線材料として広く用いられている。一方アルミニウムは、環境条件により腐食劣化しやすい性質を有している。トンネル内は一部でアルカリ性の漏水などにより、硬アルミニウムより線の断線事故が発生してきたため^[1]、トンネル内での使用が極力避けられてきた。

一方、剛体電車線は断面が小さいため、トンネル断面を小さくすることが可能であり、コスト低減等を観点に、地下鉄や狭小トンネルにおいて設備されている。剛体電車線の重量を軽くすると、径間内でのたわみが小さくなり、集電性能が向上するため、アルミニウムが用いられている。また、アルミニウム剛体電車線はイヤー部において、異種金属接触腐食が生じるが、すずめっきトロリ線の使用による防食効果が確認されている^[2]。

このように現状では、トンネル内での適用に差異が見られる硬アルミニウムより線とアルミニウム剛体架台に対し、アルカリ性水溶液による腐食を行い、電氣的、機械的特性評価を行った。アルミニウム剛体架台の異種金属接触腐食について、定量的に評価を行った。さらに、すずめっきトロリ線の防食効果について、推定経年の評価を行ったので、結果を報告する。

2. アルミニウムの腐食形態

アルミニウムとその合金は表面が保護作用のある酸化皮膜で覆われているため、耐食性を有する。この酸化皮膜が損傷するとアルミニウムに腐食が発生する。金属の腐食の形態を分類すると、全面腐食、異種金属接触腐食および局部腐食に分類される。

全面腐食は表面の酸化皮膜が溶解された場合に生じる腐食である。酸化皮膜は $\text{PH} < 4$ の酸もしくは $\text{PH} > 8.5$ の塩基において破壊され、アルミニウム全体が腐食される。

接触腐食は、電位が異なる金属と接触し、接触箇所が電解質水溶液中にあり、局部電池を構成する際に生じ、

酸化電位が高い金属が、イオンとなり溶解するため腐食する。アルミニウムは金属中でも酸化電位が高い金属であり、銅などとの接触箇所、イオン濃度が高い水溶液中にある場合に、腐食しやすい性質を有する。

また、局部腐食は、表面の酸化皮膜に付着した塩化物イオンや硫酸イオンなどにより酸化皮膜が損傷し、部分的に孔状あるいは溝状の腐食による窪みが生じる。

3. 実験概要

3. 1 アルカリ性水溶液による腐食試験

トンネル内では、コンクリート成分によるアルカリ性の漏水が一部で確認されている^[3]。またアルミニウムは、アルカリ性水溶液により全面腐食するため、トンネル内では漏水による腐食が腐食進行の主要因と考えられる。そこで、図1に示すトロリ線、ステンレスボルトを取付けていない長さ 100mm のアルミニウム架台と HA1200mm^2 を PH13 の NaOH 水溶液に浸漬させ、うず電流を利用した劣化判定装置により、 HA1200mm^2 の劣化度を測定した。なお、アルミニウム架台の劣化度はアルミニウム架台と同時に浸漬した HA1200mm^2 の劣化度の測定値として用いた。 NaOH 水溶液により腐食した HA1200mm^2 とアルミニウム剛体架台の質量、電気抵抗、引張強度を測定した。

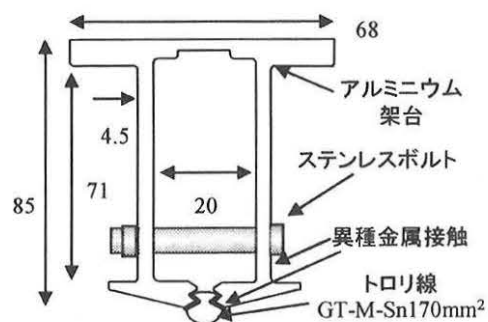


図1 アルミニウム剛体架台試料

3. 2 アルミニウム剛体架台の異種金属接触腐食

3. 2. 1 塩水噴霧試験

トンネル内の長期間の設置時の異種金属接触腐食によるイヤー部の劣化を推定評価するためには、短期間で試料を加速劣化させることが必要である。そのため、図 1 に示す長さ 100mm のアルミニウム剛体架台試料に対し、濃度 5.0% 温度 50℃ の NaCl 水溶液を噴霧し、アルミニウム剛体架台試料の質量減少量を測定した。なお、トロリ線の条件による腐食劣化を評価するために、トロリ線を図 2 に示す 4 つの条件に設定して塩水噴霧試験を行った。

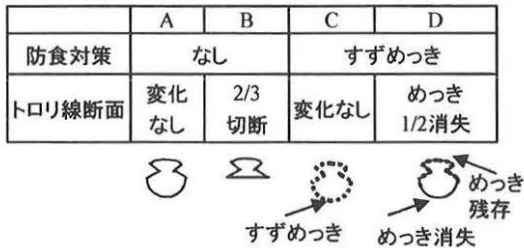


図2 トロリ線試料条件

3. 2. 2 塩水滴下試験

塩水噴霧による加速劣化試験と実際のトンネル内の漏水環境による腐食速度の対応関係の策定が必要である。トンネル内の漏水成分分析結果¹³⁾より、NaCl 水溶液の濃度を海岸トンネルでは 0.30%、山岳トンネルでは $2.5 \times 10^{-3}\%$ と定義した。これらの濃度の塩水を表 2 の条件で長さ 100mm の図 1 のアルミニウム剛体架台試料に滴下し、アルミニウム剛体架台試料の質量減少量を測定した。

表 2 塩水滴下条件

漏水条件	海岸トンネル		山岳トンネル	
	漏水大	漏水小	漏水大	漏水小
濃度	0.30%NaCl		0.0025%NaCl	
滴下条件	60秒/0.1ml	10秒/0.1ml	60秒/0.1ml	10秒/0.1ml

3. 2. 3 塩水噴霧試料のトロリ線引張試験

アルミニウム剛体架台のイヤー部が異種金属接触箇所となるため、腐食劣化によるイヤー部の把持力低下が問題となる。そのため、イヤー部の異種金属接触の腐食劣化によるトロリ線の把持力を評価するために、長さ 100mm の図 1 のアルミニウム剛体架台試料の塩水噴霧試験を 15 日、56 日、100 日行い、トロリ線の引張試験を行った。

4. 測定結果

4. 1 NaOH 水溶液による腐食特性

PH13 の NaOH 水溶液に浸漬させた HA1200mm² の劣化度をうず電流を用いた劣化判定装置により測定した。この劣化度は新線の出力値が 90 であるため、新線の出力値を 100 に換算した値を用い、「出力換算比」と定義する。また、

PH13 の NaOH 水溶液に浸漬させたアルミニウム架台の劣化度を測定することができないため、アルミニウム架台と同期間に、PH13 の NaOH 水溶液に浸漬させた HA1200mm² の劣化度を換算した値をアルミニウム架台の出力換算比として用いた。このときの出力換算比に対するアルミニウム架台と HA1200mm² の質量減少率を図 3 に、電気抵抗増加率を図 4 に、引張強度減少率を図 5 に示す。

図 3~5 より、同一の出力換算比、つまり同一の劣化度では、アルミニウム剛体架台の方が硬アルミニウムより線よりも質量減少率と引張強度の減少率が小さく、電気抵抗増加率が大きいことがわかった。特に図 5 の結果より、出力換算比の減少に対する硬アルミニウムより線の引張強度の減少率が大きいことがわかった。これは、腐食劣化進行に対する、硬アルミニウムより線の機械強度の低下が大きいことを意味する。実際に、硬アルミニウムより線の素線の腐食は一樣には進行しない。そのため、局部的に腐食した素線が引張強度に耐えられず素線切れをして、全体の強度低下へと到るものと考えられる。

これらのことより、同一条件での腐食劣化に対し、硬アルミニウムより線の機械強度の低下が、アルミニウム剛体架台よりも大きくなりやすいこと、また機械強度の低下率が質量減少率と電気抵抗増加率より大きくなりやすい傾向にあることがわかった。

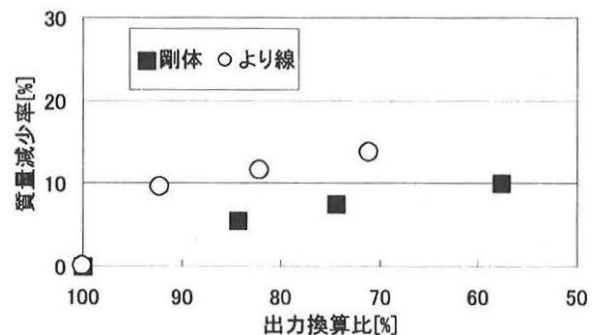


図3 出力換算比に対する質量減少率

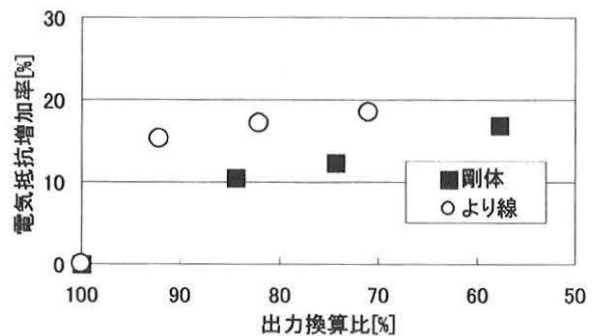


図4 出力換算比に対する電気抵抗増加率

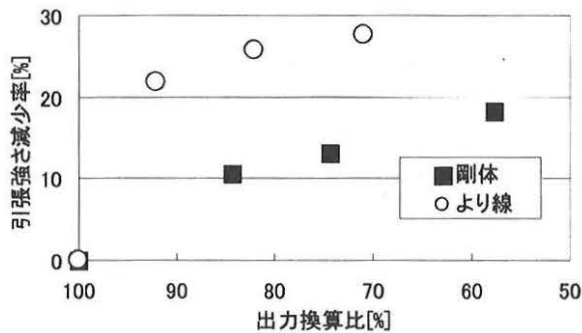


図5 出力換算比に対する引張強度減少率

4. 2 異種金属接触腐食による結果

4. 2. 1 塩水噴霧による質量減少速度

図2の試料A,C,Dを濃度5%、温度50℃のNaCl水溶液により塩水噴霧試験を100日間行い、10日間毎にアルミニウム剛体架台の平均質量減少速度[g/日]を算出した結果を図6に示す。なお、1日あたりのアルミニウムの質量減少量[g/日]を質量減少速度[g/日]と定義する。

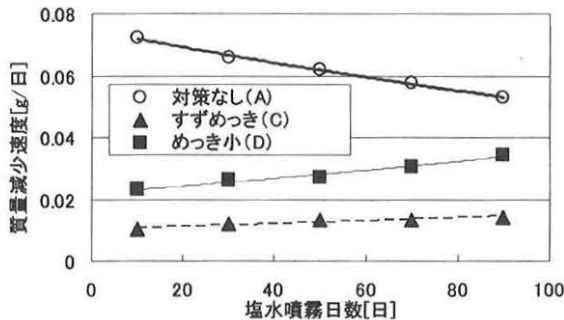


図6 質量減少速度算出結果

図6の結果の試料A,C,Dの質量減少速度を一次関数と指数関数と近似し、最小二乗法により式を求めた。その結果、指数関数による近似が図6の結果との誤差が小さいことが確認された。また試料A,Bの塩水噴霧による質量減少結果より、試料Bの質量減少速度は試料Aの56.8%であることがわかった。以上より、塩水噴霧日数を t [日]、質量減少速度を y [g/日] とすると試料A,B,C,Dの質量減少速度をそれぞれ(1),(2),(3),(4)式で表現できる。

$$y = 0.0746e^{-0.0038t} \quad (1)$$

$$y = 0.0424e^{-0.0038t} \quad (2)$$

$$y = 0.0103e^{0.0039t} \quad (3)$$

$$y = 0.0221e^{0.0047t} \quad (4)$$

4. 2. 2 塩水滴下による質量減少速度

アルミニウム剛体架台に表2に示す条件の塩水を滴下したときのアルミニウム剛体架台の質量減少量を測定し、質

量減少速度[g/日]を求めた。塩水噴霧の質量減少速度に対する塩水滴下の質量減少速度比を計算し、結果を図7に示す。その結果、海岸トンネルの漏水での質量減少速度は、塩水噴霧時の4~5%であり、山岳トンネルの漏水での質量減少速度は0.7~1.5%である。この結果と(1)式より、海岸トンネルで漏水間隔が10秒の条件のトンネルにおけるアルミニウム剛体架台の質量減少速度は、次の(5)式で表現できる。

$$y = 0.0037e^{-0.0002t} \quad (5)$$

同様に表2に示す他の塩水滴下条件におけるアルミニウム剛体架台の質量減少速度を定式化した。

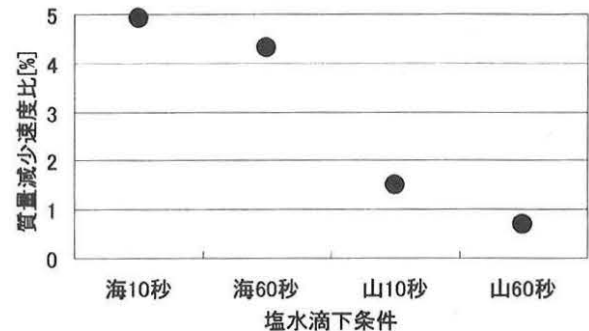


図7 塩水噴霧に対する質量減少速度比

4. 2. 3 塩水噴霧試料トリ線引張試験結果

アルミニウム剛体架台に15日,56日,100日間の塩水噴霧を行い、トリ線の引張試験を行った結果を図8に示す。図8より、塩水噴霧日数100日まではイヤー部のトリ線の把持力が低下しないことが確かめられた。塩水噴霧日数100日では、アルミニウム剛体架台の質量減少量が5.2gであるため、質量減少量が5.2g以下では、トリ線の把持力には問題がないものと考えられる。

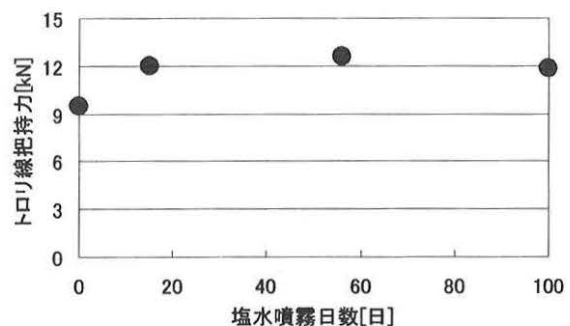


図8 トリ線引張試験測定結果

4. 3 推定経年の算出

漏水間隔が10秒の海岸トンネルにおけるアルミニウム剛体架台の質量減少速度は(5)式で表現できる。実設備では、トリ線がパンタグラフとの摺動により、摩耗が進行するため、アルミニウムに接触するトリ線の質量が徐々に減

少する。試料 A に比べ、銅の体積が小さい試料 B の質量減少速度が小さいことから、トロリ線の摩耗進行により、アルミニウム架台の質量減少速度が低下すると考えられる。ここで、トロリ線の摩耗を $0.1\text{mm}/10^4$ パンタ、1 年間のパンタグラフ通過数を 5×10^4 パンタと仮定すると、トロリ線が新線の試料 A から試料 B のアルミニウム剛体電車線の摩耗限度の残存径 5.3mm の状態に達するまでに 20 年を要する。アルミニウム架台の質量減少速度は、トロリ線の残存径に比例するものとし、(5) 式を用いてトロリ線の摩耗進行を考慮すると、漏水間隔が 10 秒の海岸トンネルにおけるアルミニウム架台の質量減少速度は(6)式で表現できる。また同様に、漏水が 60 秒間隔の海岸トンネルと漏水が 10 秒もしくは 60 秒間隔の山岳トンネルにおけるアルミニウム架台の質量減少速度を定式化できる。

$$y = 0.0037e^{-0.0002t} \left\{ \frac{(d-5.3) + (15.34-d) \times 0.568}{10.04} \right\} \quad (6)$$

y: 質量減少速度[g/日], t: 設置日数[日], d: トロリ線残存直径[mm]

漏水が 10 秒間隔の海岸トンネルにおけるアルミニウム架台の設置期間に対する質量減少量を(6)式により求めた結果を図 9 に示す。同様に漏水が 60 秒間隔の海岸トンネル、漏水が 10 秒もしくは 60 秒間隔の山岳トンネルにおけるアルミニウム架台の質量減少量を算出し、結果を図 9 に示す。

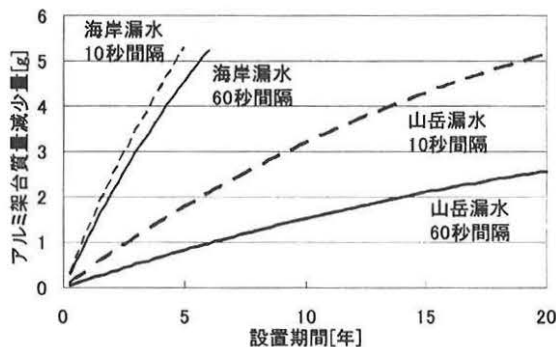


図 9 トロリ線防食対策無時のアルミ架台質量減少

イヤー部のトロリ線の把持力に問題がないと考えられるアルミニウム架台の質量減少量は 5.2g であり、図 9 よりアルミニウム架台の総質量減少量が 5.2g に達するのが海岸トンネルでは 5~6 年、山岳トンネルでは 20~40 年であると考えられる。

次に、すずめっきトロリ線の防食効果について検討を行う。すずめっきの防食効果は時間の経過とともに低減し、図 6 よりすずめっきトロリ線のアルミニウム架台の質量減少速度と、防食対策が無いトロリ線の場合アルミニウム剛体架台の質量減少速度と等しくなる期間が存在することが推測さ

れる。実設備ではパンタグラフとの摺動により、摺動面では、めっきが消失するため、すずめっきの防食効果を評価するには試料 A と C の対比が望ましいと考えられる。ここで、トロリ線の摩耗進行による体積変化は考慮せず、試料 A と C により、すずめっきの防食効果が低減し、質量減少速度が等しくなる塩水噴霧日数を(1)式=(4)式により求めた。その結果、塩水噴霧におけるすずめっきの防食効果が消失する日数は 143 日の 0.4 年であった。同様に、漏水間隔が 10 秒および 60 秒の海岸、山岳トンネルにおいて、すずめっきトロリ線の防食効果が消失する年数を算出し、結果を表 3 に示す。これより、山岳トンネルではトロリ線の張替周期と仮定した 20 年では、すずめっきの防食効果が継続するものの、海岸トンネルでは張替周期以前に防食効果が消失し、トロリ線の張替あるいは、めっき以外の防食対策を施す必要があるものと考えられる。

表 3 すずめっき防食効果消失年数

漏水条件	塩水噴霧 5%, 50℃	海岸トンネル		山岳トンネル	
		10秒間隔	60秒間隔	10秒間隔	60秒間隔
年数[年]	0.4	8.3	8.7	27.4	41.9

5. まとめ

NaOH 水溶液に浸漬したアルミニウム架台と硬アルミニウムより線の電氣的、機械的特性を評価した。またアルミニウム剛体架台の異種金属接触腐食現象およびすずめっきトロリ線の防食効果について定量的に評価を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- ・アルカリ性の漏水による全面腐食では、硬アルミニウムより線がアルミニウム架台よりも、電氣的、機械的特性の低下が大きく、特に機械的強度の低下が大きい。
- ・塩水噴霧によるアルミニウム剛体架台の質量減少速度と塩水滴下による質量減少速度より、塩水噴霧日数に対する推定経年を算出した。
- ・トロリ線に防食対策がない場合、海岸トンネルでは、5~6 年、山岳トンネルでは 20~40 年間はトロリ線の把持力に問題ないと考えられる。
- ・アルミニウム剛体架台にすずめっきトロリ線を設置したときの防食効果は海岸トンネルでは 8 年程度、山岳トンネルでは 27~40 年程度持続すると推定される。

参考文献

- [1] 島田 健文三他：硬アルミより線の劣化状況と判定法，鉄道総研報告，Vol. 3, No. 9, 1989
- [2] 西 健太郎他：アルミ剛体電車線の異種金属接触腐食，平成 15 年電気学会産業応用部門大会，No. 3-75, 2003
- [3] 濱田 貴弘他：剛体電車線用アルミ架台のトンネル適用時の腐食劣化予測，平成 15 年電気学会全国大会，No. 5-244, 2003