

# パンタグラフすり板の摩耗限度に関する基礎的検討—ボルト締結部の残厚とボルト軸力の関係

○ [機] 久保田 喜雄 (鉄道総合技術研究所)

## Basic study on wear limit of pantograph contact strip —Relationship between residual thickness of worn strip and bolt axial force

○Yoshitaka Kubota, (Railway Technical Research Institute)

From a cost perspective, the wear limit of a pantograph contact strip is an important value since it is directly linked to the running cost of an electric car. Despite its importance, there are few scientific bases to decide the wear limit and it has been specified based on the experience of railway operators. To calculate the wear limit not empirically but logically, it is necessary to understand the change in contact strip strength and bolt axial force during operation. The present study puts its focus on the change in bolt axial force. In this paper, the relationship between residual thickness of contact strips and the bolt axial force will be discussed on the basis of some experimental results.

**キーワード** : パンタグラフすり板, 摩耗限度, ボルト締結, 軸力

**Key Words** : pantograph contact strip, wear limit, bolt fastening, bolt axial force

### 1. はじめに

パンタグラフすり板 (以下, すり板) はパンタグラフの最上部に取り付けられたしゅう動接点部材で, トロリ線と摩擦することで摩耗する (図 1)。すり板の摩耗限度 (使用限度厚) はすり板交換に伴うコストに直接関係する基準であるが, 異なる使用環境での基準を一律に決められないこともあり, 各事業者が経験的に決めているのが現状である。そこで鉄道総研では摩耗限度算出に必要なデータ採取を進めることとした。本論文では, 初めにすり板の使用限度厚を決める因子について考察するとともに, それら因子のうち摩耗に伴うすり板締結力の変化を実験により測定した結果を報告する。

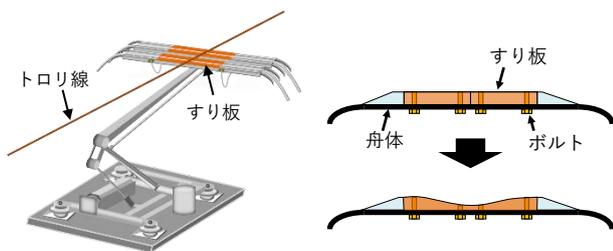


図 1 パンタグラフすり板

### 2. すり板の摩耗限度に関する考察

過去の不具合事例より考察した結果, すり板の摩耗限度は①強度, ②締結力, ③定期検査周期に伴う余裕分, の 3 因子によって決まると考えられる。以下, それぞれの因子について述べる。

#### 2.1 強度の観点からの摩耗限度

強度の観点からの摩耗限度 (以下, 強度的限度) は定性的には「それ以上すり板が摩耗すると使用中に破壊してしまう厚さ」と言える。通常, すり板が単体で使用されることはなく, 取付板に締結され舟体として使用に供される。したがって強度的限度を明らかにするためには締結体としての強度を明らかにする必要があるが, これは個別の条件によって異なる一種の強度設計であるため本論文では扱わないこととした。

#### 2.2 締結力の観点からの摩耗限度

すり板材料は焼結合金などの金属系と, 純カーボンやメタライズドカーボンなどのカーボン系に大別され, このうち金属系すり板やカーボン系すり板のうち炭素繊維で補強した C/C 複合材製すり板はすり板にめねじ加工がなされ, パンタグラフ上部に直接ボルトで締結される。このため, ボルト締結体として他に類を見ないことであるが, 使用に伴ってボルト締結部も摩耗する (図 1 右)。3 章で述べる

が、ボルト締結部が摩耗すると締結力（ボルトに働く軸方向の締結力，以下ボルト軸力）が低下する．そこで，締結力の観点からの摩耗限度（締結力の限度）は「締結部の摩耗に伴うボルト軸力の低下によりボルトのゆるみや疲労破壊などの不具合が生じる厚さ」と定義できる．ボルトのゆるみなどの現象にはボルト軸力が大きく影響することは広く指摘されており<sup>1)</sup>，締結力の限度を定めるには「摩耗に伴うボルト軸力の減少特性」と「すり板締結部に加わる負荷」の双方を明らかにする必要がある．後者の負荷は使用環境によって千差万別であるため，ここではまず「摩耗に伴うボルト軸力の減少特性」を明らかにすることにした．

2.3 定期検査周期に伴う余裕分

すり板は定期検査時に交換されるため，ある時点で摩耗限度に達していなくても，次の検査までに摩耗限度に達すると予想された場合には交換される．すなわち，すり板の実質的な使用限度厚  $w$  は，強度的限度  $w_s$  または締結力的限度  $w_t$  のうち大きい方  $\max(w_s, w_t)$  に，定期検査周期に伴う余裕分  $w_m$  を加えることで決められる．

$$w = \max(w_s, w_t) + w_m \quad (1)$$

余裕分は定期検査の周期や，すり板の摩耗率等によって決まるものであり，事業者や線区によっても異なるため，ここでは扱わない．

3. ボルト締結部の摩耗に伴うボルト軸力の変化

すり板はボルトで舟体に締結されており，締結部は使用中にボルトとともに摩耗していく．締結によりボルト首下には引張荷重が，すり板にはねじ部をせん断する荷重が生じ，それぞれが釣り合っている．すり板の締結部が摩耗すると，ねじ部が弾性変形することによって負担していた荷重が消失し，結果としてボルト軸力は低下すると考えられる．これを検証するため，フライスを用いてボルト締結部を段階的に切削し，そのときの軸力変化を測定した．

3.1 実験方法

図 2 に示すようにワッシャー型の圧電式ロードセル（KISTLER 製，薄型力センサ 9134B）を介してボルトをすり板試験片に所定の軸力で締結し，その後フライス盤で締結部を切削し，厚さ減少時の軸力変化を測定した．初期軸力は 5kN（標準締付トルク 9.8Nm における平均的な軸力<sup>2)</sup>）および 10kN とした．切削による温度変化の影響を除去するため，軸力の測定は毎回の切削後 120 秒経過したのちに実施した．

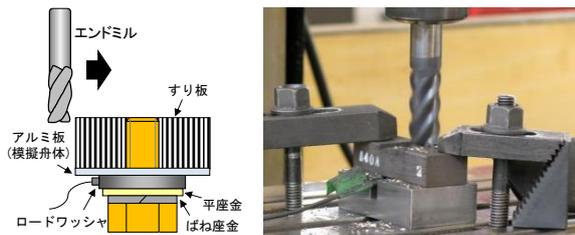


図 2 軸力測定実験の模式図と測定の様子

実験に用いたすり板とボルトの諸元を表 1 に示す．すり板は鉄系焼結合金（N5C-5），銅系焼結合金 2 種類（CR1 および BE11），C/C 複合材製すり板（M40A）を供試した．試験片の寸法は 25mm×66mm で，厚さは焼結合金すり板では 10mm，C/C 複合材製すり板では 10mm と 16mm とした．

表 1 供試体の諸元

供試すり板	鉄系焼結合金すり板 N5C-5 銅系焼結合金すり板 CR1, BE11 C/C 複合材製すり板 M40A
すり板厚	10mm（金属，C/C），16mm（C/C）
ボルト材質	C5191（鉄系焼結），C3604（銅系焼結），C6932（C/C）
ワッシャ材質	平座金：C2801P，ばね座金：SWRH

3.2 実験結果

実験結果を図 3 に示す．締結部の残厚が減少するとボルト軸力は減少し，残厚が少ないほど減少割合が大きくなること，すり板材料によって残厚に対する軸力の減少傾向は異なることがわかった．

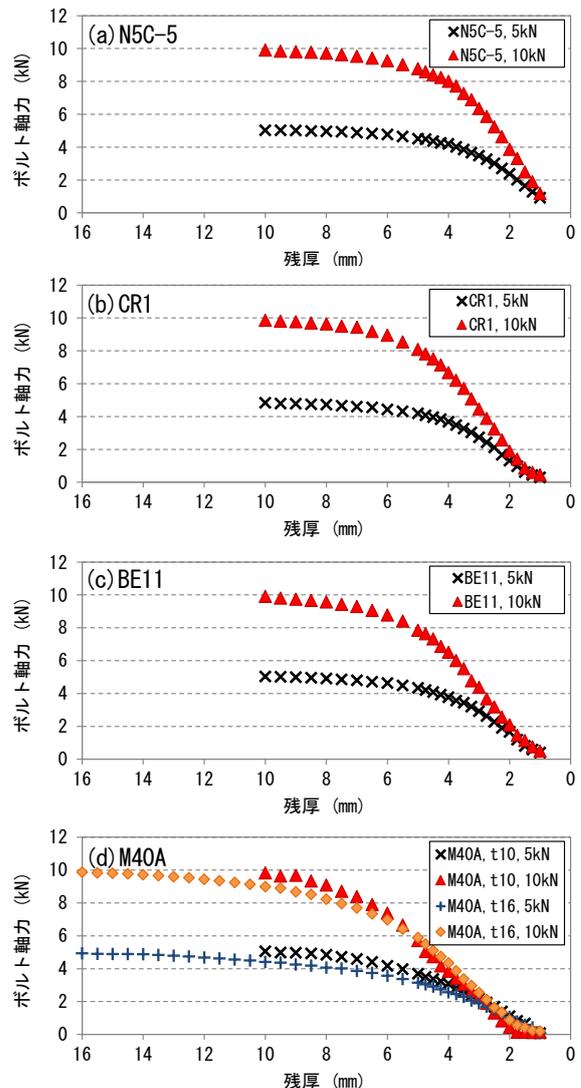


図 3 締結部の残厚とボルト軸力の関係

### 3.3 考察

ボルト軸力は一様ではなく軸方向に分布を持つとされている<sup>3)</sup>。今回測定されたボルト軸力の減少曲線はこの締結時の軸力分布に相当すると考えられる。締結時の軸力分布は次の(2)式で表される。(2)式は、ボルト軸力の負担割合がすり板の上面近傍では少なく、下面(勘合端)に近づくほど増加することを意味する。

$$\frac{F(x)}{F_b} = \frac{\sinh \lambda x}{\sinh \lambda L} \quad (2)$$

ここで、 $\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$ 、 $F(x)$ はすり板上面(しゅう動面)

から距離  $x$  の位置にある軸直角断面に作用している軸力、 $F_b$ は締結時の総軸力、 $\lambda$ は(3)式で表されるすり板とボルトのねじ部の剛性を表すパラメーター、 $L$ はすり板の初期厚さである。

$$\lambda = \sqrt{\frac{\frac{1}{A_b} + \frac{E_b}{E_s} \cdot \frac{1}{A_s}}{\left(k_b + \frac{E_b}{E_s} k_s\right) \tan \beta}} \quad (3)$$

$A_b$ 、 $A_s$ はボルトとすり板の軸直角断面積(すり板の場合は締結時に弾性変形が生じる範囲の断面積)、 $E_b$ 、 $E_s$ はボルトとすり板の軸方向のヤング率、 $k_b$ 、 $k_s$ はボルトとすり板のねじ部の弾性変位係数の合計(ボルトとすり板のポワソン比で決まる)、 $\beta$ はボルトのリード角である。

図3の結果を初期軸力に対する残存軸力の比でプロットしたグラフを図4に示す。N5C-5では(2)式から推定されるとおり初期軸力が異なっても軸力比の減少曲線はよく一致することがわかった。銅系焼結合金すり板やC/C複合材製すり板では初期軸力10kNの場合、初期軸力5kNの結果と比較して軸力比の低下がより厚い箇所から生じている。この理由として、初期軸力により勘合端近傍のねじ山が塑性変形した、または破壊されたことが考えられる。このことから、すり板の再使用等のために弾性域内での締結を前提とするなら初期軸力10kNは銅系焼結合金すり板やC/C複合材製すり板には過大であったと推定される。

図4には最小二乗法により次の(4)式の関数を初期軸力5kNの実験結果に対してフィッティングした結果の曲線も理論式として併せて示した。

$$\frac{F(x)}{F_b} = \frac{\sinh \lambda x}{\sinh \lambda (L - l_0)} \quad (4)$$

これは、実際のすり板めねじ部には口面取りがなされており、実質的なすり板厚さは口面取りの寸法 $l_0$ を引いた値としたものである。 $l_0$ は1mmとした。フィッティングした結果から、すり板とボルトのねじ部の剛性を表すパラメーターである $\lambda$ の値を求めた。 $\lambda$ は鉄系焼結合金すり板N5C-5で0.61、銅系焼結合金すり板CR1とBE11でそれぞれ0.44、C/C複合材製すり板では0.31(厚さ10mm)、0.25(厚さ16mm)であった。文献3)では $\lambda$ はナット(すり板に相当)とボルトの弾性率、ポワソン比、断面積およびねじ山の形状によって決まるとされているが、実際には $\lambda$ は

すり板の厚さにも依存することがわかった。これはすり板の厚さによって締結時に弾性変形が生じる範囲が異なるためと考えられる。

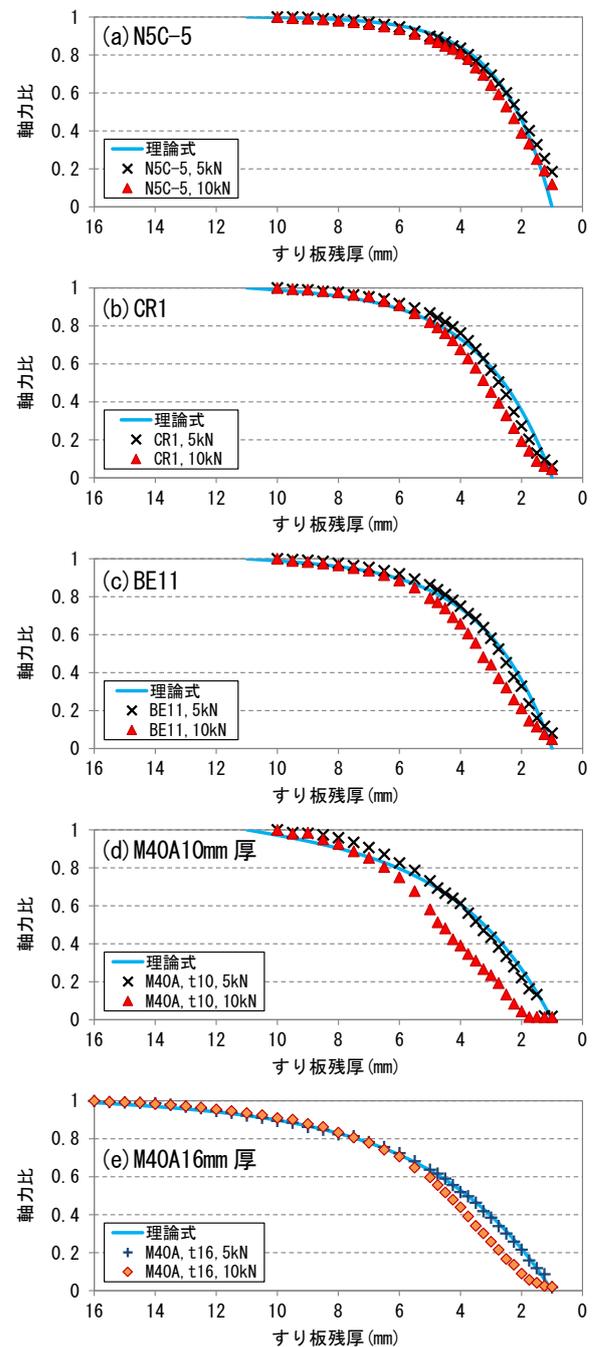


図4 締結部の残厚とボルト軸力比の関係

### 4. すり板締結ボルトの急激なゆるみ再現実験

「ボルトのゆるみ」とは「初期軸力に対して残存軸力が低下すること」と定義され<sup>1)</sup>、前章に記したとおり摩擦に伴いボルト軸力は低下するため、すり板の締結ボルトは必ずゆるむことになる。ただし、実際に問題となるのはすり板締結部に働く外力によりボルトが自ら戻り回転することで起きる急激なゆるみである。急激なゆるみが生じる軸力

限度を明らかにできればすり板残厚-残存軸力線図からそのときのすり板残厚がわかり、それを締結力の限度とできる。ここでは実物のパンタグラフを用いて実際の使用環境を模擬し、軸力が低い場合にゆるみが発生するかを実験的に確かめることとした。

#### 4.1 実験方法

実環境に近い条件でのゆるみ再現を目的に、パンタグラフがトロリ線としゅう動しながら走行する状態を模擬できる試験装置（鉄道総研所有、パンタグラフ総合試験装置、図5）を用いて実験を行った。実験条件を表2に示す。パンタグラフはPS33B、舟体は工進精工所製の薄型舟体、すり板はC/C複合材製すり板M40Aを供試した。すり板の総数は8枚で、そのうち2枚を3章と同じ圧電式ロードセルを介して締結した。すり板厚は摩耗を模擬し6mmとした。ボルトは3Nmのトルクで締め付けた（初期軸力は0.4～1.1kN）。しゅう動速度は100km/h、加振周波数は100km/hでのハンガ間隔（5m）周波数に相当する5.6Hzとし、振幅は当該周波数における追従振幅を超える4.0mmとした。これはゆるみを促進させるためであり、加振毎に離線が生じ、再着線に伴う衝撃的な力が舟体に負荷される条件での実験となる。ゆるみの進行に時間がかかることが想定されたことから、実験時間は720分とした。締め付け直後のボルト軸力と、実験後の残存軸力（ボルトをゆるめたときの軸力変化分）を測定し、実験前後のボルト軸力差を算出した。



図5 パンタグラフ総合試験装置

表2 しゅう動加振実験の条件

速度 (km/h)	初期軸力 (kN)	押上力 (N)	時間 (min)	加振条件
100	0.4~1.1	59	720	周波数 5.6Hz 片振幅 4.0mm

#### 4.2 実験結果と考察

実験後の軸力変化を図6に示す。図には初期軸力の値も併せて示した。いずれのボルトでも軸力の低下が認められたが、衝撃的な力を720分間加え続けた結果の軸力低下が100N程度であり、目的とした自発的戻り回転による急激な軸力低下は生じなかったと判断した。

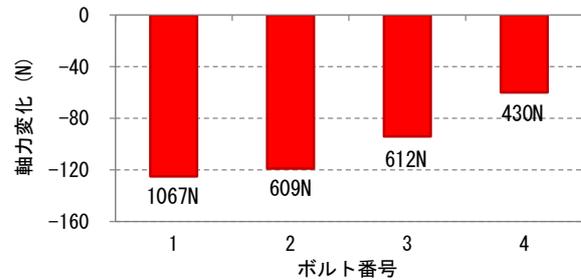


図6 実験後の軸力変化

ボルト軸力が低下した状態で実際よりも頻繁に衝撃的な加振力が生じる条件で実験を行ったが、ボルトの脱落につながるような急激な軸力低下は生じなかった。そのため、現状では締結力限度を算出するための最低軸力はこれまでの実績値から定めるほかないと考える。たとえば銅系焼結合金すり板CR1やBE11は初期軸力約5kNで締結されおり、残厚3mm程度までゆるみ等の問題がなく使用できることがわかっている。図3より、残厚3mmのときの残存軸力は約2.5～3kNと推定され、すり板材質を変更した場合にはこの値を基準として新たに摩耗限度を設定することができると考えられる。

#### 5. おわりに

すり板の摩耗限度を設定する際の基礎データとするため、すり板が摩耗したときの締結部の残厚と残存ボルト軸力の関係を実験により求めた。その結果、次のことがわかった。

- 1) すり板残厚の減少とともにボルト軸力は減少する。
- 2) 初期軸力においてねじ山の変形が弾性域にあれば、軸力の減少割合（軸力分布）は理論式でよく近似できる。ただし、理論式内のパラメータは実験的に決定する必要がある。
- 3) 初期締結時にねじ山が塑性変形もしくは破壊された場合、その箇所における軸力の負担割合は低下すると考えられる。

#### 参 考 文 献

- 1) 酒井智次：ねじ締結概論，養賢堂，2000
- 2) 久保田喜雄，森久史，土屋広志：C/C複合材製すり板締結ボルトの疲労強度および摩耗特性評価，Vol.23，No.6，2009
- 3) 山本晃：ねじ締結の理論と計算，養賢堂，1970