

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

C/C複合材を用いたパンタグラフすり板のコストを低減する

炭素基材を炭素繊維で補強したC/C複合材に銅合金を含浸して作るC/C複合材製パンタグラフすり板は強度やじん性に優れ、カーボン系すり板でありながら、金属系すり板と同様にボルトで直接舟体に取り付けることができます。一方、C/C複合材製すり板は金属系すり板や従来のカーボン系すり板よりも高価なことが難点でした。今回、C/C複合材製の使用コストを低減するため、炭素繊維含有量などの見直しによるすり板製造コストの削減と、すり板の使用限度厚さの目安に関する検討を行いましたので、これらの取り組みについて紹介します。



久保田 喜雄
Yoshitaka Kubota
材料技術研究部
摩擦材料研究室
主任研究員
【専門分野】トライボロジー、電気接点

はじめに

パンタグラフすり板（以下、すり板）には大きく分けて金属系とカーボン系があります。カーボンと銅を複合させたカーボン系すり板は、金属系すり板よりも潤滑性が高く、トロリー線の摩耗を低減できるため、広く使用されています。一方、従来のカーボン系すり板はもろく、金属系すり板のよう

にボルトで舟体に直接取り付けるのではなく、さやを介して締結していました（図1）。カーボン系でも金属系と同じようにめねじ加工ができれば、さやが要らなくなりますし、金属系すり板からの置き換えも簡単にできます。そこで、カーボン系でありながら、炭素繊維で補強することでめねじ加工が可能なC/C複合材製（※参照）のすり板（図1）が開発されました^{1)~3)}。

C/C複合材製すり板は従来のカーボン系すり板と比べて強度やじん性に優れますが、高価なことが難点でした。

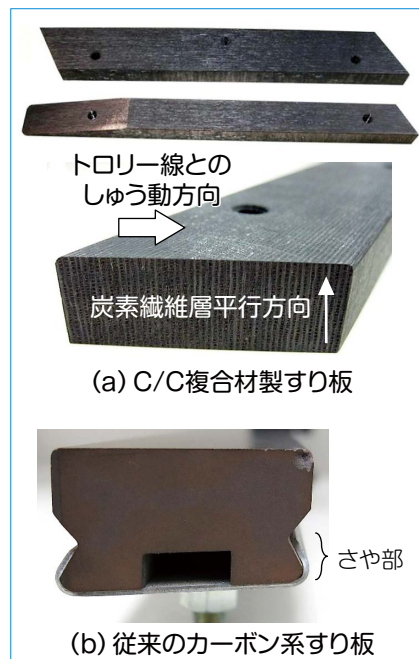


図1 C/C複合材製すり板と従来のカーボン系すり板

※ C/C複合材

2種類以上の材料を組み合わせることで元の単一材料にない特性を引き出した材料を複合材料といい、母材を繊維で強化したものが一般的です。C/C複合材は炭素（Carbon）の母材を炭素繊維（Carbon Fiber）で補強した材料です。C/C複合材は軽くて耐熱性に優れ、なおかつ通常の炭素材料よりも強度が高いことが特徴で、航空機やレーシングカーのブレーキディスクなどに使われています。すり板として使用する場合、通常のC/C複合材では導電性が十分でないため、C/C複合材に銅合金を含浸して必要な導電性を確保しています。

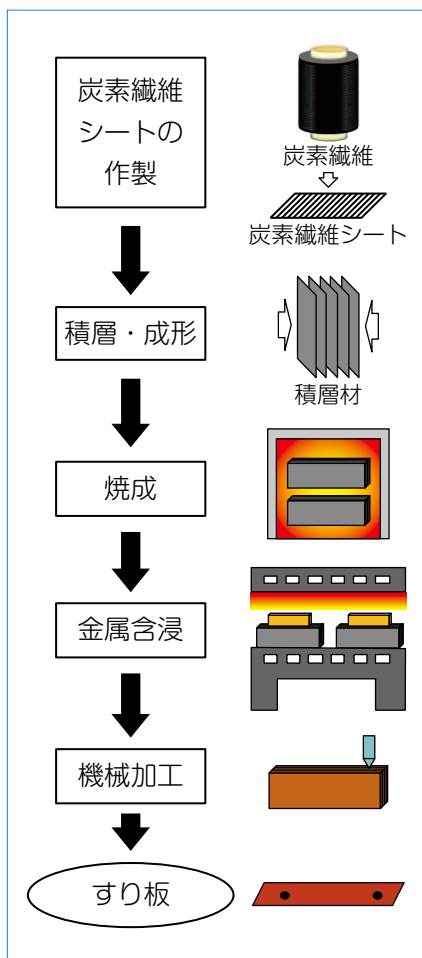


図2 C/C複合材製すり板の製造法

すり板の使用コストを低減するためには、①すり板自体を安くする、②すり板をできる限り薄くまで使うことが重要です。ここでは、これら2つの課題に対する取り組みを紹介します。

C/C複合材製すり板の低コスト化

まず、C/C複合材製すり板の作り方を(図2)を説明します。初めに炭素繊維を樹脂で固めて炭素繊維シートを作ります。次に、炭素繊維シートにバインダーとよばれる接着剤を塗り、積層したのち、熱をかけながら圧縮して炭素繊維シートの積層体を作ります。それを炉で焼くと樹脂やバインダーが炭化し、C/C基材ができます。C/C基材だけではすり板に必要な導電性が確保できないため、さらに銅合金を溶かしてC/C基材に含浸し、すり板としています。低コスト化にあたっては、炭素繊維の量と、積層・成形工程に着目しました。

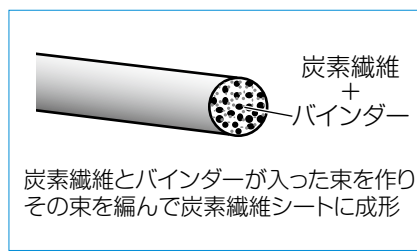
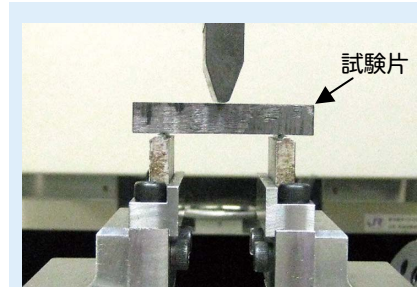


図3 プリフォームドヤーン模式図



(a) 3点曲げ試験

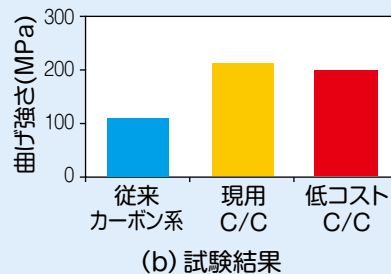


図5 曲げ試験とその結果

(1) 炭素繊維の減量

現用のC/C複合材製すり板には40vol% (体積比で40%)の炭素繊維が含まれています。炭素繊維は原料の中で最も高価なので、これをできる限り減らすことを目標としました。事前検討の結果、炭素繊維を減らしても物理特性や摩耗特性を確保できる見通しが立ったことから⁴⁾、最終的には現用の半分(20vol%)にまで減らすことにしました。

(2) 積層・成形工程の簡略化

初期に開発されたC/C複合材製すり板では、プリフォームドヤーン法(以下、PY法)とよばれる低コストな炭素繊維シート製造法を採用していました。PY法は炭素繊維とバインダーを束状にしたもの(プリフォームドヤーン、図3)を用いて炭素繊維シートを作る方法で、炭素繊維シートを作った後でバインダーを塗布し、積層する従来の方法

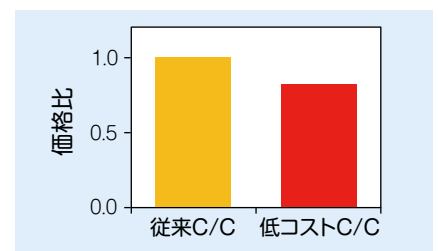
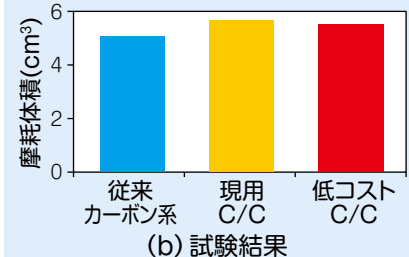


図4 従来材と低コスト材の価格比



(a) 摩耗試験状況

(試験条件:速度100km/h、距離200km、電流DC400A、押上力59N、加振有)



(b) 試験結果

図6 実パンタグラフを用いた摩耗試験とその結果

よりも工程を簡略化できます。ただし、PY法は炭素繊維種別ごとに適した製造条件を見いだす必要があり、近年開発された高強度型C/C複合材製すり板では初期開発品とは異なる高強度炭素繊維を適用したためPY法が適用できていませんでした。今回は低コスト化のため、PY法を再適用することとし、試行錯誤の結果、高強度炭素繊維に適した製造条件を明らかにしました。

以上の炭素繊維量半減とPY法再適用によりすり板の製造コストを約20%削減できました(図4)。

(3) 低コストC/C複合材製すり板の物理特性と摩耗特性評価

開発した低コストC/C複合材製すり板と従来のカーボン系すり板(PC78A)、現用C/C複合材製すり板(M40A)の物理特性と耐摩耗性を評価しました。結果の一例を図5、図6に示します。低コスト材は物理特性・耐

摩耗性ともに現用C/C複合材製すり板と同程度であることが確認できました。

C/C複合材製すり板の使用限度厚さ

上述の取り組みによって製造コストを20%削減できましたが、それでもC/C複合材製すり板の価格を従来のカーボン系すり板と同じにはできません。ただし、C/C複合材はさやが必要ない分、摩耗しろを大きくとれるので、使用コスト(※参照)は同程度にできる可能性があります(図1)。

摩耗しろは新品時の厚さから使用限度厚さを引いた値です。使用限度厚さは、使用コストに直結した基準値ですが、各事業者が経験的に決めているのが現状です。C/C複合材製すり板でも同様で、当初は銅系焼結合金の経験的な使用限度厚さ3mmにおけるめねじ破断荷重を基に、使用限度厚さの目安を9mmとしましたが、その後は各事業者が状況を確認しつつ決めています。現在では、開発初期よりも高強度化したC/C複合材製すり板が普及しており、実態に即した使用限度厚さの目安を明らかにしてほしいとの要望もあります。

そこで実験的な検討を行い、使用限度厚さの目安値を提案することにしました。過去の不具合事例から、使用限度厚さを決める主な因子(図7)は摩耗

※ すり板の使用コスト

すり板の使用コストを「すり板の価格を使用可能な距離数で割った値」と定義します。たとえば1万円のすり板を10万km使うことができれば使用コストは1000円/万kmです。使用コストはすり板の価格だけでは決まらず、摩耗しろや摩耗率によって変わります。

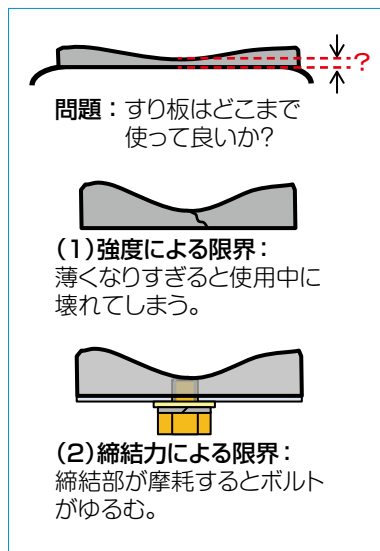


図7 すり板の使用限度厚さを決める因子

にともなうすり板の強度変化とすり板締結ボルトの締結力変化と考えられましたので、これらに関して検討しました。

(1) 強度の観点からの使用限度厚さ

強度の観点からの使用限度厚さは、すり板が壊れない限界の厚さといえます。さらに厳密に定義すると、ある使用環境のもと、許容できる確率ですり板が破壊する厚さといえるでしょう。これを決めるためには、すり板の強度や使用中にすり板に加わる負荷を、ばらつきを含めて正確に把握する必要があります。しかし、それらは十分に明らかにされておらず、上記の厳密な限度厚さを決めることはできません。そこで、まずは目安値を得るため、C/C複合材製すり板(現用材M40A)の強度を実験により把握し、その結果に基づいて、ある負荷条件のもと、すり板が破壊しない厚さを明らかにすることにしました。

先ほどすり板の強度と負荷を把握する必要がありますと書きましたが、そもそも、すり板の強度は一定といってよいのでしょうか。摩耗にともなってすり板自体の強度が変化することも考えられます。そこで、厚さを変えたすり板

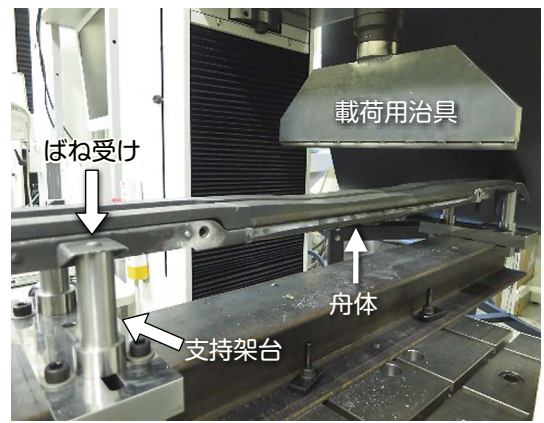


図8 舟体の3点曲げ試験

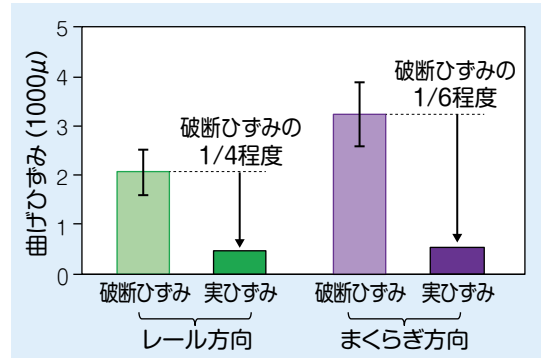


図9 舟体の3点曲げ試験結果

や、摩耗させたすり板を使って曲げ試験を行いました。その結果、厚さ変化や、摩耗によって、すり板の強度は数%程度変わるものの、大幅に低下することはないことがわかりました。

次に、重要となるのは、舟体にすり板を装着した状態ですり板にどの程度の負荷がかかるかを把握することです。そこで実際の舟体を使って3点曲げ試験を行いました(図8)。すり板が摩耗したときに、どの程度負荷(ひずみ)が増えるかを調べるため、新品の厚さ(16mm)から徐々に厚さを減らし、実験が可能な4mmまですり板を薄くして試験を行いました。その結果、一般的な静押上力(約60N)の約17倍に相当する1kNを加えた場合でも、4mm厚のすり板に生じるひずみは破断ひずみの1/6~1/4程度であることがわかりました(図9)。これは、4mmまで摩耗したとしても静的な外力によってすり板が破断する確率はきわめて小さいことを意味します。以上の結果から、

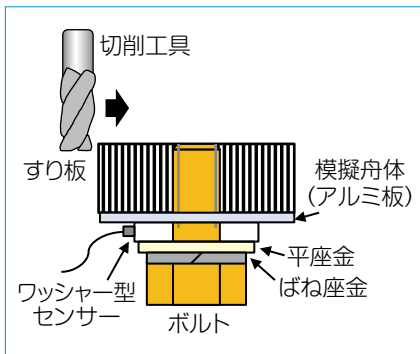


図10 軸力変化測定の様式図

強度の観点からの使用限度厚さの目安値を4mmとしました。なお、実際のすり板には静的な外力だけでなく、たとえば電車線のセクションなどで衝撃的な荷重がかかることがあります。こうした動的荷重に対する強度把握に関しては今後の課題と考えています。

(2) 締結力の観点からの使用限度厚さ

はじめに述べたように、C/C複合材製すり板は舟体にボルトで留めています。そのため、ボルトで留めたところも摩耗させながら使うことになります。ボルト締結部が摩耗すると、どうなると思いますか。答えは「ボルトを留めるのに必要な軸方向の力(ボルト軸力)が減って、ボルトがゆるみやすくなる」です。したがって、すり板締結力の観点からの使用限度厚さは、それ以上すり板の締結部が摩耗するとボルトのゆるみなどの不具合が生じる厚さといえます。

使用限度厚さを決めるには、摩耗するとボルト軸力がどのくらい減るのかを明らかにする必要があります。そこで、すり板の残厚と残存軸力の関係を実験で求めることにしました。すり板を実際に摩擦して摩耗させるのは時間がかかりすぎるので、フライス盤でボルト締結部を少しずつ切削し、そのときの軸力変化をワッシャー型の荷重計で測定しました(図10)。

軸力変化測定結果の一例を図11に示します。ボルト軸力は初め緩やかに

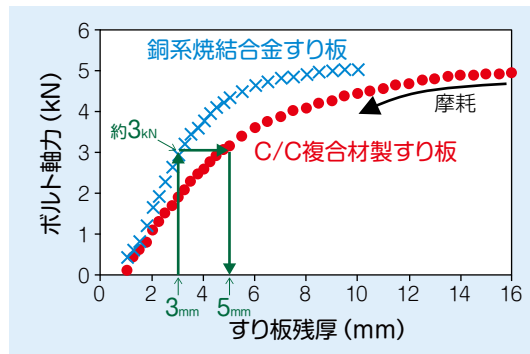


図11 ボルト軸力変化の測定結果

減少しますが、摩耗が進むと急激に低下することがわかりました。これは、ボルト軸力がすり板の下面側に集中しているからです。軸力に分布があるのはすり板に限らずどの締結体でも同じで、ボルトを強く締めた場合には問題となりますが、すり板の場合には摩耗しても軸力が減りにくいことを意味し、良いことだといえます。

以上のことから、摩耗するとボルト軸力がどのくらい減るのかがわかりました。残る問題は、ボルト軸力がどこまで減ると、ゆるみなどの不具合が起きるのかです。これに答えるためには、すり板の締結部に作用する負荷を把握する必要がありますが、測定自体が難しいこともあり、ほとんど明らかになっていません。そこで、すでに使われているすり板の経験的な使用限度厚さ(多くの事業者で3mmとされています)における残存軸力を基準にすることにしました。図11から、銅系焼結合金すり板の残厚3mmでの残存軸力は約3kNとわかります。C/C複合材製すり板の結果から、残存軸力3kNに必要な残厚は約5mmと読み取れます。初期軸力のばらつきなども考慮して、締結力の観点からの使用限度厚さの目安値を6mmとしました。

C/C複合材製すり板の使用コスト低減効果

使用限度厚さの目安値として4mm

と6mmを提案しましたが、どちらを採用するかは締結箇所的位置によります。通常、舟体の中央部が最も摩耗することから、ボルト締結箇所が舟体中央に位置する場合には6mmを採用し、そうでない場合は4mmを採用することになります。

今回開発した低コストC/C

複合材製すり板を残厚4mmまで使用した場合、現用C/C複合材製すり板を残厚9mmで交換していたときと比べて使用コストを約50%低減できることになります(新品時の厚さ16mm、摩耗率は同じと仮定)。

おわりに

C/C複合材製すり板の使用コスト低減を目標として、現用品よりも製造コストを削減したすり板の開発と、すり板の使用限度厚さに関する実験的な検討を行いました。使用限度厚さについてはすり板に加わる負荷が明らかにできれば、より正確な値が算出できると考えます。今後は、すり板に加わる負荷の測定方法や、試験装置による負荷の再現にも取り組む予定です。RRR

文献

- 1) 久保俊一, 土屋広志, 池内実治, 半田和行, 藤井保和: カーボン系すり板の装着方法の開発, 鉄道総研報告, Vol.17, No.10, pp.35-40, 2003
- 2) 土屋広志, 久保俊一: C/C複合材のパンタグラフすり板への適用, RRR, Vol.66, No.4, pp.10-13, 2009
- 3) 久保田喜雄, 久保俊一: 摩耗を減らす-C/C複合材製すり板・焼結合金すり板の開発-, RRR, Vol.73, No.6, pp.24-27, 2016
- 4) 久保田喜雄, 長谷川浩司: C/C複合材製パンタグラフすり板の炭素繊維量と各種強度の関係, J-RAIL 2017 予稿集, 2017