

C/C 複合材製パンタグラフすり板の 新幹線車両への適用に関する基礎検討

久保田 喜雄* 早坂 高雅**

Basic Study on Application of C/C Composite Pantograph Contact Strip to Shinkansen Vehicle

Yoshitaka KUBOTA Takamasa HAYASAKA

Carbon-based materials have been globally used for the pantograph contact strips of high-speed trains. Meanwhile, in Japan, sintered iron materials have been used for the contact strips of Shinkansen vehicles since the start of its service. Carbon-based contact strips are suitable for high-speed trains because of their light weight and high heat resistance. However, since they are low in mechanical strength, fracture toughness and electric conductivity, further investigation is required before applying the carbon strips to Shinkansen vehicles. In this paper, we report the results of the wear tests at a maximum speed of 400 km/h with several different types of carbon strips, and the results of the fracture toughness test. We also discuss some other issues for applying the carbon strip to Shinkansen vehicles.

キーワード：パンタグラフすり板，カーボン，新幹線，C/C 複合材

1. はじめに

海外では欧州をはじめ中国や韓国でも、高速鉄道車両のパンタグラフすり板に炭素系材料を使用している。これに対して、日本では新幹線開業当初から鉄系の焼結合金すり板が用いられている。カーボンすり板の利点は軽量で耐熱性が高いことで、これらの点で高速走行に適した材料と考えられる。一方で、カーボンすり板は機械的強度が低く、高い信頼性が要求される新幹線へ適用するには破壊に対する耐性の評価が必要となる。カーボンすり板は、金属系のすり板と比べてトロッポ線の摩耗が少ないことも特徴である。日本でも在来線ではカーボン系すり板（炭素と銅を複合させたすり板）が普及している。これは、カーボン系すり板を使用することでトロッポ線の摩耗が減り¹⁾、集電系のメンテナンスコストを低減できるためである。新幹線へカーボン系すり板を適用した場合にも同様の効果が期待できる。

カーボン系すり板が持つ長所に着目し、新幹線に適用しようとする試みはこれまでもあった。最近の例では1990年から1996年にかけて、在来線で使用するカーボン系すり板を高強度化した新幹線用カーボン系すり板が開発され、評価試験が行われた²⁾。このとき開発されたカーボン系すり板は、1993～1994年に上越・東北・山陽新幹線で最高速度300km/hを超える現車試験に供試され、問題なく使用できることが確認された。しかし、使用中の割損や欠損に対する懸念が払拭されず、実用化

には至っていない。

最近では上記新幹線用カーボン系すり板よりもさらに高強度なC/C（炭素繊維強化炭素）複合材製すり板（図1）が開発・実用化されており³⁾、鉄道総研では新幹線への適用可能性を検討している。新幹線用すり板に求められる特性として、軽量性、耐摩耗性、導電性、耐熱性、強度などが挙げられるが、本研究ではC/C複合材製すり板について上記項目のうち、これまでに把握されていないの高速での耐摩耗性と破壊じん性について調べた。本報では最高速度400km/hでの摩耗試験の結果と、割損や欠損への耐性の指標となる破壊じん性の測定結果について述べるとともに、新幹線へのC/C複合材製すり板適用に関する諸課題を概説する。

2. 供試材

供試材には現用の新幹線用すり板である鉄系焼結合金すり板（帝国カーボン製，T3-2）と、銅含浸型カーボン系すり板（東洋炭素製，PC78A）、純カーボンすり板（東洋炭素製，K2）、C/C複合材製すり板（ファインシンター製，M40A）を選定した。M40Aは、図1に示すように炭素繊維を一方向に並べてシート化したものを繊維が互いに直行するように積層した長繊維織物型のC/C複合材に銅合金を含浸したものである。

各すり板材の物理特性を表1に示す。M40Aの物理特性はいずれも新幹線用カーボン系すり板の目標値²⁾を満たしている。

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

** 電力技術研究部 電車線構造研究室

特集：材料技術

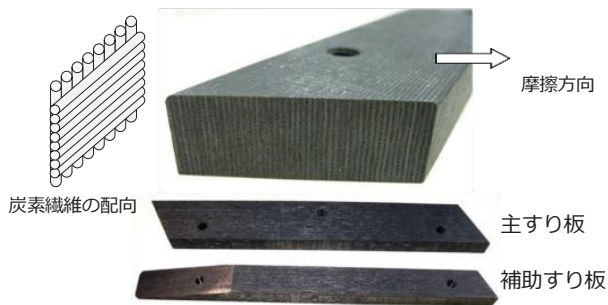


図1 C/C 複合材製すり板

表1 供試材の物理特性

すり板	密度	曲げ強さ	沖撃 [*] 衝撃値	電気抵抗率
	(g/cm ³)	(MPa)	(kJ/m ²)	(μΩ m)
T3-2(鉄系焼結)	7.0	255	110	0.6
PC78A(銅含浸カーボン)	2.9	110	4.0	1.8
K2(純カーボン)	1.7	60	2.0	30
M40A(C/C複合材)	2.8	215	8.2	1.2
新幹線用カーボン系すり板の目標値 ²⁾	-	150以上	5以上	10以下

3. 摩耗試験

3.1 試験方法と試験条件

鉄道総研の高速用集電材摩耗試験機(図2)を用いて摩耗試験を行った。試験条件を表2, 表3に示す。条件1の試験は各供試材の高速域での摩耗特性を把握するために行った。条件2では, C/C複合材製すり板の中速から高速における摩耗特性を調べ, 純カーボンすり板と比較した。トロリ線の左右偏位を模擬するため, 試験中はすり板を左右に2.5mm/sで揺動した。

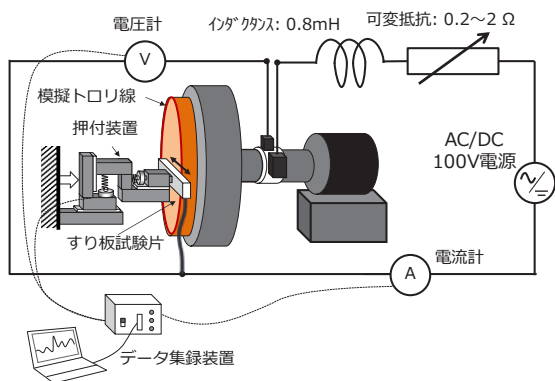


図2 高速用集電材摩耗試験機の模式図

すり板の摩耗は式(1)の比摩耗量(しゅう動距離あたりの摩耗体積) SW で評価した。

$$SW = \frac{\Delta W / \rho}{LF} \quad (1)$$

ΔW はすり板の摩耗質量(g), ρ は試験片の密度(g/mm³), L はしゅう動距離(m), F は試験中の平均押付力(N)である。

すり板の摩耗はアーク電気量の距離密度 Q_D (C/m) の影響を受けるため, 摩耗を評価するには Q_D を考慮する必要がある。 Q_D は次式により算出した。

$$Q_D = \frac{\sum_i (I_i \times \Delta t_i)}{L} \quad (2)$$

トロリ線とすり板間の電位差が10Vを超えた場合にアーク放電発生と判定し, そのときの電流(A)が I_i , アーク放電時間(s)が Δt_i である。

模擬トロリ線の摩耗寸法は, 試験前後のトロリ線しゅう動面の高さの差をレーザ変位計で測定することにより算出した。摩耗評価にはトロリ線摩耗率(摩擦回数1万回あたりのトロリ線摩耗寸法)を用いた。

表2 摩耗試験条件1(300km/hでの比較)

すり板	速度(km/h)	電流 [*] (A)	押付力(N)	距離(km)
T3-2	300	100,300	60	75
PC78A				
K2				
M40A				

※ ACおよびDC(トロリ線が正極)

表3 摩耗試験条件2(純カーボンすり板K2とC/C複合材製すり板M40Aの比較)

すり板	速度(km/h)	電流(A)	押付力(N)	距離(km)
M40A, K2	100, 300, 400	0, 100, 300	60	100, 300, 400

3.2 試験結果と考察

(1) 条件1: 300km/hでの摩耗比較

図3にアーク電気量の距離密度に対するすり板比摩耗量を示す。純カーボン, 銅含浸カーボン, C/C複合材製すり板はいずれも鉄系焼結合金すり板と比較してアーク電気量密度あたりのすり板比摩耗量が小さかった。このことから, これらのすり板は現用すり板よりも高速走行時のアーク発生に対する耐性に優れると考えられる。

カーボンすり板同士を比較すると, アーク電気量密度あたりのすり板比摩耗量は純カーボンすり板がやや小さく, 銅含浸カーボン系すり板とC/C複合材製すり板は同程度であった。

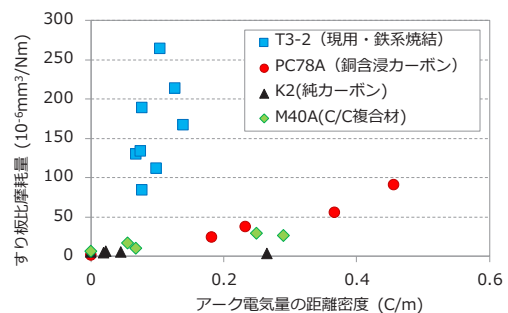


図3 300km/hにおけるすり板比摩耗量とアーク電気量密度の関係

トリ線線の摩耗に及ぼす影響は、いずれのすり板でも模擬トリ線線の摩耗率が $0.02\text{mm}/10^4\text{pass}$ 以下で測定の不確かさと同程度であったため、評価できなかった。

(2) 条件2：純カーボンと C/C 複合材製すり板の比較

図4に速度とすり板比摩耗量の関係を示す。100km/hでは通電・無通電にかかわらず、純カーボンすり板 K2 の比摩耗量は C/C 複合材製すり板 M40A よりも大きかった。300km/h 以上では両すり板の比摩耗量は比較的小さく、最大でも $26 \times 10^{-6}\text{mm}^3/\text{Nm}$ であった。K2 は 300km/h 以上で顕著に比摩耗量が減少したが、図5に示すとおり速度増加に伴う摩擦係数減は認められず、比摩耗量の減少理由は摩擦係数減以外、例えばトリ線線しゅう動面における被膜形成等にあると考えられる。

図6にアーク電気量密度とすり板比摩耗量の関係を示す。図6(a)より、100km/hではすり板比摩耗量とアーク電気量密度の間に明確な関係は認められなかった。これはアーク電気量密度が低かったためと考えられる。

図6(b),(c)より速度 300,400km/h ではすり板比摩耗量はアーク電気量密度に比例して増加することがわかる。アーク電気量密度が同程度の場合、K2 と M40A の比摩耗量の差は $5 \times 10^{-6}\text{mm}^3/\text{Nm}$ 以下と小さかった。

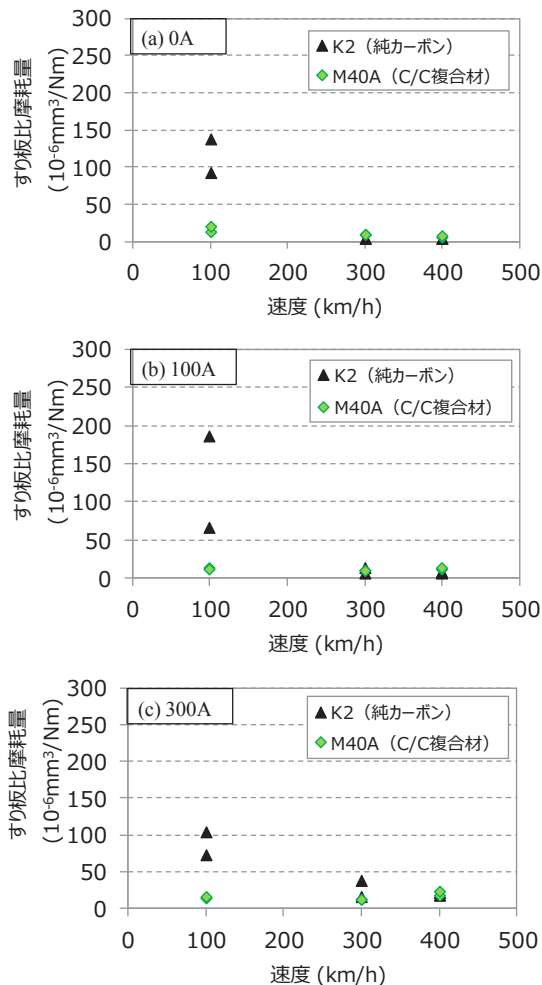


図4 しゅう動速度とすり板比摩耗量との関係

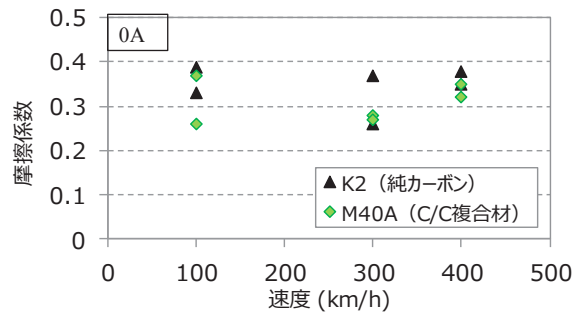


図5 無通電時のしゅう動速度と摩擦係数の関係

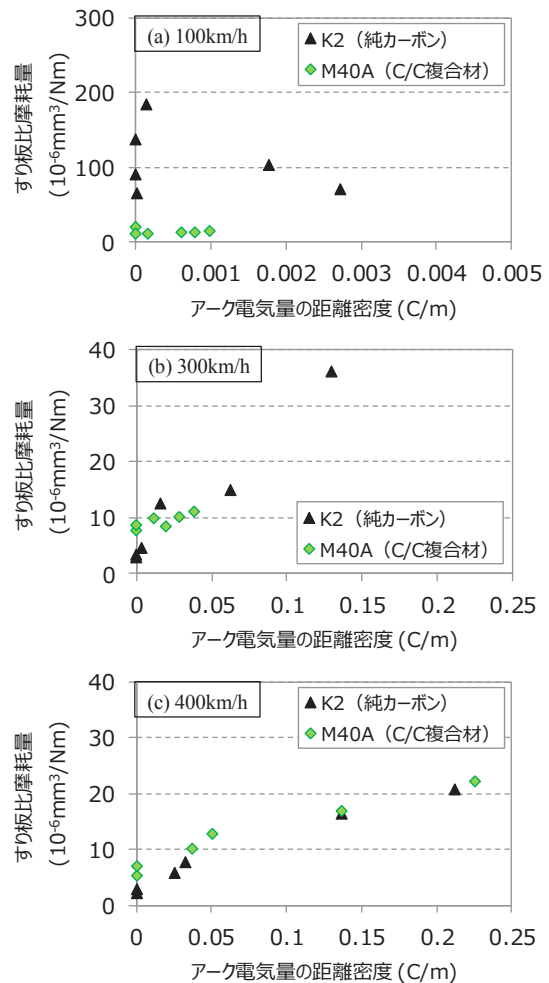


図6 アーク電気量密度とすり板比摩耗量の関係

図7に速度と模擬トリ線線摩耗率の関係を示す。図7(a)より、無通電の場合、C/C 複合材製すり板 M40A よりも純カーボンすり板 K2 のほうがトリ線線摩耗率が低かった。また、いずれのすり板でも無通電では模擬トリ線線の摩耗率は 100km/h で最も高く、300km/h で減少したのち 400km/h でやや増加した。

図7(b), (c)より通電条件・100km/h では電流が増加するにつれトリ線線摩耗率は減少した。通電条件で速度 300km/h 以上では、いずれのすり板でもトリ線線摩耗率は比較的小さく、 $0.01\text{mm}/10^4\text{pass}$ 以下であった。

特集：材料技術

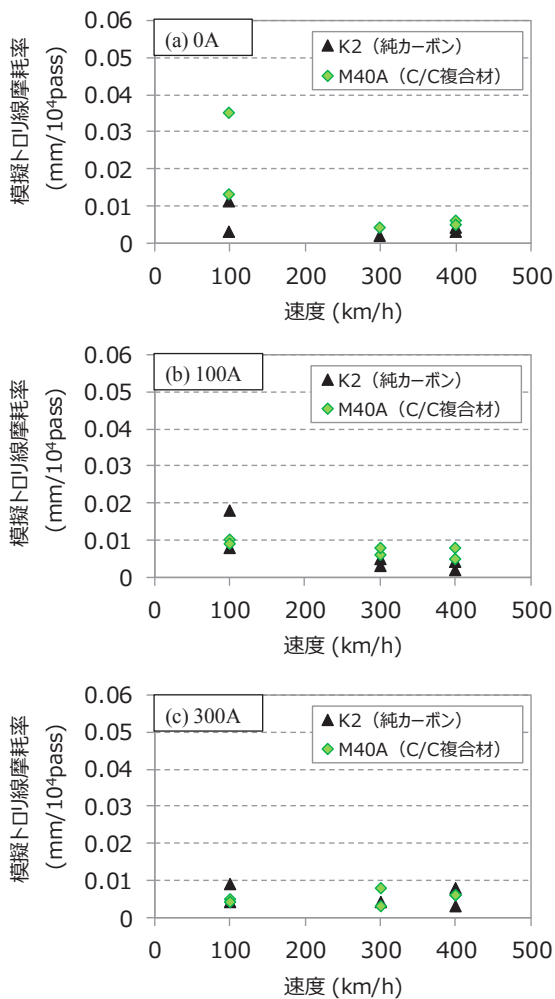


図7 しゅう動速度と模擬トロリ線摩耗率の関係

4. 破壊じん性測定試験

表1に示したように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曲げ強度が高く、現用の鉄系焼結合金すり板に近い曲げ強度を有する。ただし、曲げ強度は欠陥がない状態での破壊に対する抵抗の大きさを表す値であり、き裂状の欠陥を有する場合の破壊に対する抵抗の指標である破壊じん性については調べられた例がない。実際のすり板表面にはトロリ線との接触で発生する熱や離線時のアーク放電により微細なき裂が発生するため、破壊じん性も把握する必要があると考えられる。そこで本研究ではASTM E399⁴⁾を参考に、予き裂として幅0.05mmの切り欠きを施した3点曲げ試験片を用い、C/C複合材製すり板の破壊じん性を評価した。

4.1 試験片

C/C複合材製すり板は長繊維強化材のため強い異方性を有することがわかっている⁵⁾。そこで本試験ではM40Aから積層方向が異なる3種類の試験片(図8、試験片1~3)を切り出し、ワイヤー放電加工にて切り書

きを加工したものを供試した。各試験片の炭素繊維の配向とき裂の進展方向を図9に示す。比較のためT3-2(図8の試験片2と同形状)についても同様の試験片を作成し供試した。いずれも試験は3回ずつ行った。

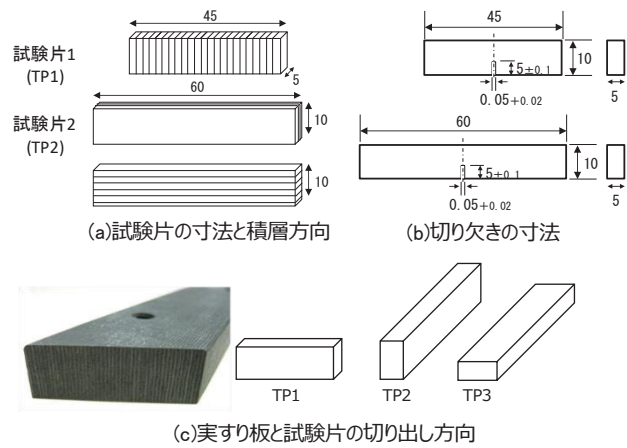


図8 破壊じん性測定用試験片の寸法

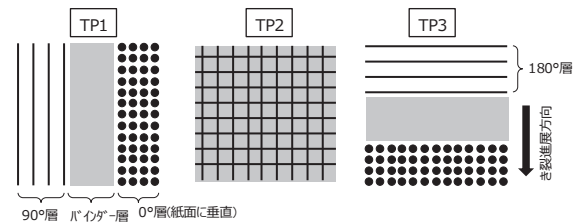


図9 炭素繊維の配向とき裂進展方向

4.2 破壊じん性値の計算

ASTM E399を参考に、仮の破壊じん性値 K_Q を式(3)、式(4)に従って算出した。なお、ASTM E399では式(3)において測定された最大荷重 P_{max} ではなく、荷重-開口変位曲線の直線領域の傾きに対して95%分に相当する傾きを持つ直線と荷重-開口変位曲線の交点を最大荷重 P_Q としているが、ここでは P_{max} による簡易な式を採用した。

$$K_Q = \left(\frac{P_{max} S}{BW^{3/2}} \right) f(a/W) \quad (3)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[1.99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2.15 - 3.93 \frac{a}{W} + 2.7 \frac{a^2}{W^2} \right) \right]}{2\left(1 + 2\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)} \quad (4)$$

B は試験片厚さ(5mm)、 S は支点間距離(40mm)、 W は試験片高さ(10mm)、 a は切り欠き長さ(5mm)である。

4.3 試験結果と考察

(1) き裂の進展状況

C/C複合材製すり板M40Aの試験後のき裂進展状況の例を図10に示す。試験片1ではき裂が90°層内を直

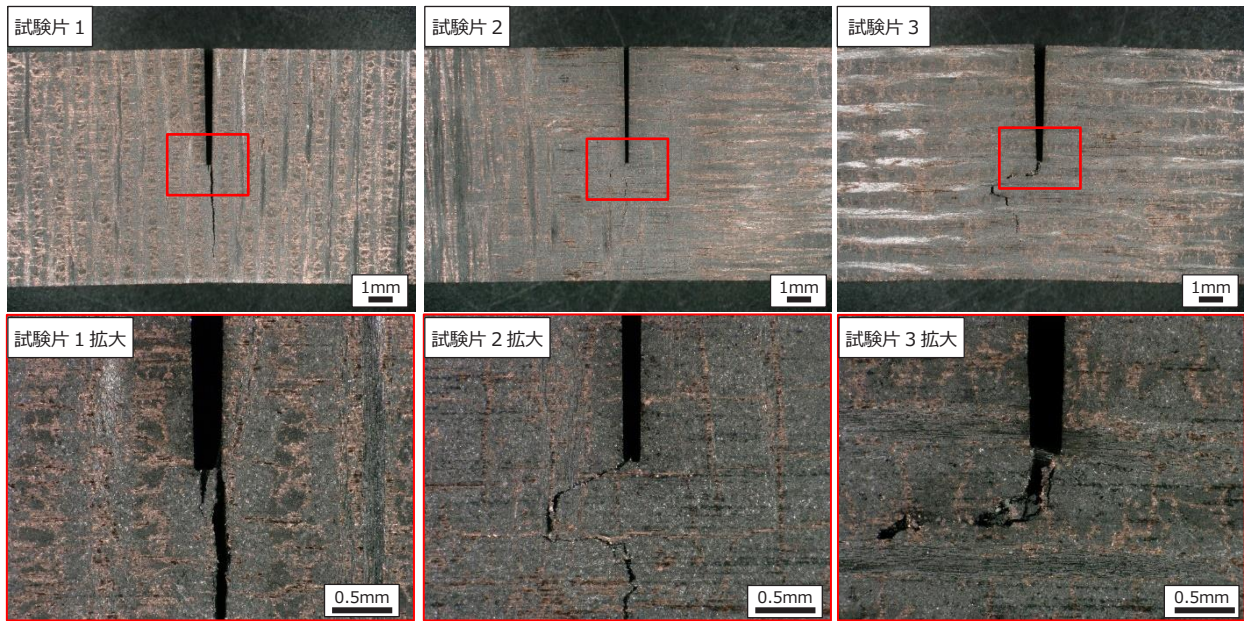


図 10 き裂の進展状況

線的に進展していた。試験片 2 ではき裂は初め向かって左側（180° 層の炭素繊維配向方向）に進んだのち、下方（90° 層繊維配向方向）へ向かい、右側に戻ったのち、再度下方へ進展した。試験片 3 ではき裂が 0° 層内を進んだのち、180° 層と交わったところでほぼ直角に曲折していた。このように、C/C 複合材製すり板ではき裂の進展方向が炭素繊維の配向に垂直な方向であっても、繊維配向に平行な方向への屈曲を繰り返しながらき裂が進展することが明らかとなった。これは、炭素繊維束間のき裂進展抵抗が低いため、繊維束に平行な方向へのせん断型の破壊が生じやすいことに起因すると考えられる。

(2) 破壊じん性の計算結果と評価

M40A と T3-2 の仮の破壊じん性値 K_Q の計算結果を図 11 に示す。C/C 複合材製すり板の K_Q は繊維配向に対するき裂の方向によって大きく異なり、試験片 1 では平均 $1.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、試験片 2 と 3 ではそれぞれ平均 9.9、 $10.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ で、試験片 1 のようにき裂が炭素繊維束間を進展する場合の抵抗が低いことがわかった。C/C 複合材すり板の破壊じん性には強い異方性があり、新幹線へ適用する場合は想定される応力負荷の方向に対して適切な配置をする必要があると考えられる。

試験片 1 の K_Q は、黒鉛材の破壊じん性値 K_{IC} （約 $1.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ）⁶⁾ に近く、試験片 2、3 の K_Q は一般的な C/C 複合材の K_{IC} （ $5 \sim 6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ）⁷⁾ の 2 倍程度であった。C/C 複合材製すり板は C/C 基材に銅を含浸している分、一般的な C/C 材よりも破壊じん性値が向上したと考えられる。

現用焼結合金すり板 T3-2 の K_Q は平均で $22.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であり、炭素繊維配向方向に引張応力が働く場合であっ

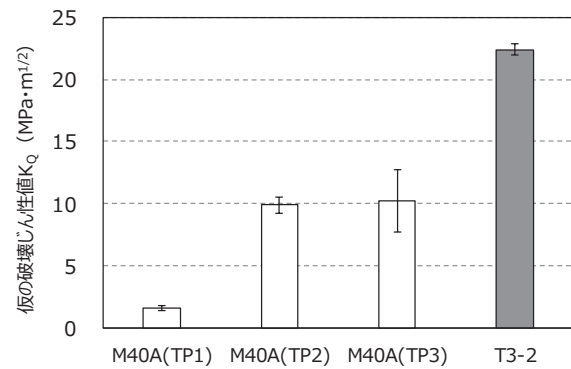
ても M40A の破壊じん性は現用材の半分程度であることがわかった。

例として、表面に 1mm のき裂を有する C/C 複合材製すり板の破壊応力を計算する。このき裂長さは、含浸された銅合金が表面から 1mm 程度溶出することがあること⁸⁾ から設定した。破壊力学より、表面に長さ a のき裂を有する板材（厚さ W 、破壊じん性 K_{IC} ）の破壊応力 σ_c は式 (5)、式 (6) で表される⁹⁾。

$$\sigma_c = \frac{K_{IC}}{F(a/W)\sqrt{\pi a}} \quad (5)$$

$$F(a/W) = 1.12 - 0.23(a/W) + 10.6(a/W)^2 - 21.7(a/W)^3 + 30.4(a/W)^4 \quad (6)$$

$K_{IC} = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、 $a = 1(\text{mm})$ 、 $W = 10(\text{mm})$ とすると、 $\sigma_c = 150 \text{ MPa}$ と求まる。たとえば新幹線に M40A を適用する場合には、最大主応力がこの値より小さくなるよう設計すればよい。



※エラーバーは±1 標準偏差を表す。

図 11 仮の破壊じん性値の計算結果

特集：材料技術

5. 新幹線に C/C 複合材製すり板を適用した場合の利点と課題

前述のように現用の鉄系焼結合金すり板に対する C/C 複合材製すり板の長所は軽量性と耐熱性である。表 1 より、M40A の密度は T3-2 の 40% なので、舟体の軽量化が図れる。たとえば一般的な新幹線用すり板（長さ 540mm × 幅 74mm × 厚さ 10mm）¹⁰⁾ の材質を T3-2 から M40A に置き換えることで、主すり板の質量は約 2.5kg から約 1.0kg となり、舟体質量を 15% ほど低減できる。また、3 章の結果から C/C 複合材製すり板はアーク発生条件下で摩耗が現用すり板より少なく、冬期のトロリ線着霜時に発生するすり板のアーク溶損を減らすことができると期待される。

C/C 複合材製すり板を新幹線に適用する場合の課題として、①高速走行中に衝撃を受けた場合の破損の可能性評価と破損した場合の対応策、②停車時のトロリ線温度上昇、③摩耗限度の設定、④すり板締結ボルトの材質変更の 4 点が挙げられる。

①は表 1 からわかるように C/C 複合材製すり板は現用すり板と比ベシアルピー衝撃値が低いため、衝撃力が加わった際の応答をよく調べる必要がある。また、走行時にすり板に加わる応力負荷の測定や、走行状態を模擬した定置試験法の確立も求められる。破損時の対策としては、すでに欧州で普及しているすり板損傷時にパンタグラフを降下させる機構が挙げられる。こうした機構についてはこれまでに鉄道総研においても検討が進められ、実機も試作された¹¹⁾ が実用化には至っていない。

②について、表 1 より C/C 複合材製すり板の電気抵抗率は現用すり板の 2 倍程度であり、停車時の許容電流値は 1/4 程度に制限されると考えられる。この点については今後、検討を進める。

③は異なるすり板に対して、従来の摩耗限度基準を適用できないことが問題であるが、これまでに C/C 複合材すり板の摩耗限度明確化の検討がなされており⁵⁾、実負荷が把握できれば同様の手法で C/C 複合材製すり板に適した摩耗限度が設定できるものとする。

④は C/C 複合材すり板の締結ボルトとして新幹線で現在用いられているりん青銅ボルトを使用すると、すり板と一緒に摩耗しないことが問題となるが、これまでの研究からボルトの材質をケイ素添加快削黄銅に変更することでこの問題は解決される¹²⁾ ことがわかっている。

6. 結論

新幹線車両への C/C 複合材製すり板適用に関する基

礎的検討として、速度 300km/h 超域での通電摩耗試験と破壊じん性測定を行った。その結果、次のことがわかった。

- (1) 速度 300km/h の摩耗試験の結果、C/C 複合材製すり板は鉄系焼結合金すり板と比較して、アーク電気量密度に対するすり板比摩耗量が少なかった。
- (2) C/C 複合材製すり板は速度 400km/h でも摩耗率が急増することなく、安定した摩耗特性を示した。
- (3) 炭素繊維配向方向に引張応力が働く場合の C/C 複合材製すり板の仮の破壊じん性は一般的な黒鉛材の 5 倍程度、新幹線用焼結合金すり板の約 1/2 であった。
- (4) C/C 複合材すり板の仮の破壊じん性には強い異方性があり、新幹線へ適用する場合には実負荷を把握し、想定される応力負荷の方向に対して適切な配置をする必要がある。

文 献

- 1) 山形毅章ほか：カーボン系すり板の「整面効果」について、鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail) 講演論文集, 1994
- 2) 久保俊一, 土屋広志, 池内実治：新幹線用カーボン系すり板の開発, 鉄道総研報告, Vol.11, No.9, pp.19-24, 1997
- 3) 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
- 4) ASTM インターナショナル：E399-12, ASTM, 2012
- 5) 久保田喜雄, 長谷川浩司, 亀崎昭雄：C/C 複合材すり板の低廉化および使用限度厚の評価, 鉄道総研報告 Vol.32, No.10, pp.29-34, 2018
- 6) 逆井基次, 後藤泰男, 稲垣道夫：黒鉛材料の破壊じん性値, 窯業協会誌, Vol.94, No.1, 1986
- 7) 八田博志ほか：炭素繊維強化炭素複合材料における破壊じん性評価の有効性, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.64, No.620, 1998
- 8) 久保田喜雄, 宮内瞳, 古賀進一郎, 長谷川浩司：C/C 複合材製パンタグラフすり板の摩耗特性, 電気学会論文誌 D, Vol.137, No.12, 2017
- 9) 鯉淵興二, 小久保邦雄：製品開発のための材料力学と強度設計ノウハウ, 日刊工業新聞社, 2002
- 10) 日本鉄道車両機械技術協会編：鉄道電気車両主回路シリーズ 4 「集電装置」, 日本鉄道車両機械技術協会, 2015
- 11) 久保俊一ほか：カーボン系すり板用新幹線パンタグラフの開発, 鉄道総研報告, Vol.14, No.3, pp.31-36, 2000
- 12) 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, 鉄道総研報告, Vol.23, No.6, pp.41-46, 2009