

C/C 複合材製すり板の低廉化および使用限度厚の評価

久保田 喜雄* 長谷川 浩司** 亀崎 昭雄***

Cost Reduction of C/C Composite Pantograph Contact Strips and Evaluation of its Wear Limit

Yoshitaka KUBOTA Kouji HASEGAWA Akio KAMEZAKI

C/C (carbon fiber reinforced carbon) composite pantograph contact strips have self-lubricating properties and are excellent in resistance to heat, strength and toughness. Meanwhile, as they contain a large percentage of costly carbon fiber, they are more expensive than conventional carbon contact strips. To meet the cost-cut demands, the authors developed a C/C contact strip with its cost reduced by 20%, by halving the content of the carbon fiber and simplifying the manufacturing process with the “Preformed Yarn” technique for forming a C/C substrate. The wear limit (minimum allowable thickness for use) of the C/C contact strips is also an important factor affecting the maintenance cost, therefore, the authors investigated the bolt-fastening force and the strength of worn contact strips to clarify the wear limit. The results revealed that the wear limit for the C/C contact strips should be more than 6mm at the bolt-fastening position, and 4 mm elsewhere on the strip for the particular pantograph (PS33B).

キーワード：C/C 複合材，低コスト化，摩耗，ボルト軸力

1. はじめに

パンタグラフすり板（以下、すり板）の材料は金属系とカーボン系に大別される。カーボンと銅を複合させたカーボン系すり板は潤滑性が高く、トロリ線の摩耗を減らすことができるため、広く使用されている。近年では、金属系すり板と同様に舟体に直接ボルトで締結できるように、カーボン基材のじん性の低さを炭素繊維によって補い、めねじ加工が可能な C/C (Carbon fiber reinforced Carbon) 複合材製すり板（図 1）が開発され^{1) 2)}、実用化されている。C/C 複合材製すり板は従来のカーボン系すり板より強度やじん性に優れるが、炭素繊維を多く使用しているため高価なことが難点であり、鉄道事業者からは使用コスト（使用可能な厚さ当たりのすり板価格）の低減が望まれている。使用コストを下げるには、すり

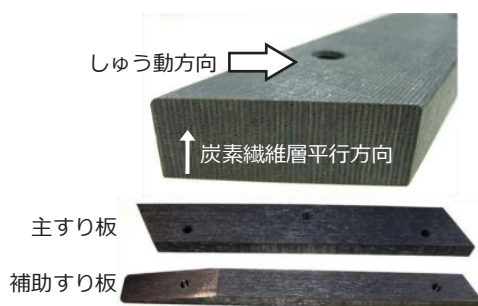


図 1 C/C 複合材製すり板

板自体の低廉化に加え、すり板をできるだけ長く使うことが重要で、すり板の摩耗がどの程度まで進めば交換すべきかの基準、すなわち使用限度厚（いわゆる摩耗限度）も使用コストに大きく影響する。本稿では、炭素繊維含有量を低減した低廉化 C/C 複合材製すり板の開発と使用限度厚目安値の設定手法について述べる。

2. 低廉化 C/C 複合材製すり板の開発

C/C 複合材製すり板の製造方法を図 2 に示す。初めに、炭素繊維と樹脂等をシート状に成形し、それを積層・焼成して C/C 基材とする。C/C 基材だけでは十分な導電性が確保できないため、さらに銅合金を溶浸し、C/C 複合材製すり板としている。銅合金の溶浸工程は大幅な変更が難しいことから、すり板を低廉化するには C/C 基材の製造コストを下げる必要がある。そこで C/C 基材の製造工程簡略化と、炭素繊維量の減量に取り組むこととした。

2.1 炭素繊維シートの製造コスト削減

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³⁾（以下、PY 法）と呼ばれる炭素繊維シート製造法を採用していた。PY 法は炭素繊維と樹脂等を束状にしたもの（PY）を用いて炭素繊維シートを作る方法（図 2 中①の工程）であり、炭素繊維織布に樹脂を塗布する従来の方法よりも工程を簡略化できることから低廉化に有効であった。ただし、近年開発された高強度型 C/C 複合材製すり板 M40A では初期と異なる炭素繊維を適用したため PY 法が適用できていなかった。今回

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室

** 株式会社ファインシンター

*** 株式会社 CFC デザイン

特集：材料技術

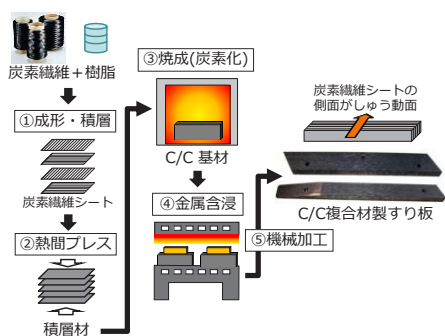


図2 C/C複合材製すり板の製造工程

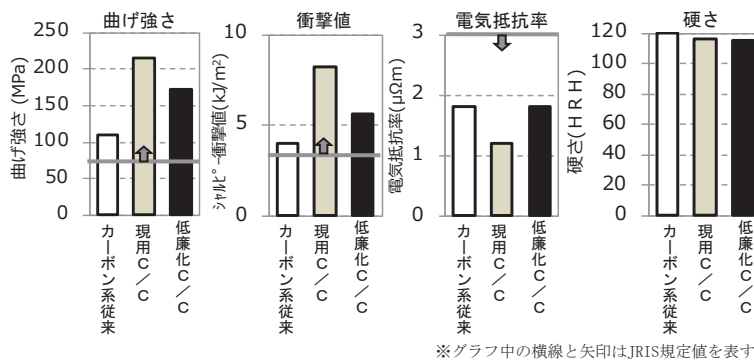


図3 低廉化C/C材と従来材、現用C/C材の物理特性比

※グラフ中の横線と矢印はJRIS規定値を表す。

はさらなる低コスト化のため、PY法を再適用し、製造工程の一部見直しを含めた検討の結果、高強度炭素繊維に適した製造条件を明らかにすることができた。

2.2 炭素繊維の減量

現用のC/C複合材製すり板M40Aには体積比で40% (40vol%)の炭素繊維が含まれている。炭素繊維は原料の中で最も高価なため、これを可能な限り減らすことを開発目標とした。試作と検討を繰り返した結果、最終的に炭素繊維量を半減(20vol%)することとし、上記PY法の再適用と炭素繊維量半減によってすり板の製造コストを約20%削減することができた。

2.3 低廉化C/C複合材すり板の物理特性

開発した低廉化C/C複合材製すり板(名称PYM1、以下低廉化材)と従来のカーボン系すり板(東洋炭素製、PC78A)、現用C/C複合材製すり板(M40A)3種の物理特性を日本鉄道車輛工業規格(JRIS E6301)に則って測定した結果を図3に示す。現用材M40Aと比較すると低廉化材の曲げ強さやシャルピー衝撃値は低いものの、JRIS E6301の規定値は全て満足しており、低廉化材が従来のカーボン系すり板と同等以上の物理特性を有することを確認した。

2.4 低廉化C/C複合材すり板の摩耗特性

2.4.1 試験方法と条件

低廉化材の摩耗特性評価のため、鉄道総研所有の高速用集電材摩耗試験機にて摩耗試験を行った。試験条件を表1に示す。定電流試験では模擬トロリ線表面は平滑(表面粗さRaで1μm以下)とした。定速度試験ではトロリ線の表面が荒れている状態を模擬するため、試験前に#60のエメリー紙で模擬トロリ線表面に粗さ(Raで1~3μm)を付与した。すり板の摩耗は式(1)に示す比摩耗量(押付力、しゅう動距離あたりの摩耗体積)で評価した。

$$\text{比摩耗量} = \frac{\Delta W / \rho}{LF} \quad (1)$$

ここで、 ΔW はすり板の摩耗質量(g)、 ρ は試験片の密

表1 摩耗試験条件

定電流試験		
速度 (km/h)	電流 (A)	距離 (km)
25	DC100	16.7
50		50
100		50
150		75
定速度試験		
速度 (km/h)	電流 (A)	距離 (km)
100	DC0, 100, 200, 300, 400, 500	25

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 QD (C/m)に影響を受けることから、式(2)により QD を算出した。

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

ここで、 I_i はアーク放電が発生した際の電流(A)、 Δt_i は個々のアーク放電時間(s)である。

2.4.2 試験結果と考察

摩耗試験結果を図4、図5に示す。定電流試験では、100km/hの試番では現用材の摩耗が多かったが、これは図4(b)に示すようにアーク電気量密度が高かったためと考えられ、同程度のアーク電気量密度(10³C/mオーダー、図4(b)左下の領域)で比較すると現用材と低廉化材で摩耗量は同程度であった。定速度試験の結果(図5)についても同様であり、アーク電気量密度0.01C/mオーダーで比較すると現用材、低廉化材とも同程度の摩耗量であった(図5(b))。これまでの研究から、実環境(JR在来線)におけるアーク電気量密度は10³C/mオーダーであることがわかっており⁴⁾、図4(b)、図5(b)の左下の領域が実環境での摩耗に対応すると考えられる。したがって、低廉化材は実車で使用した場合に現用材と同程度の摩耗であると推定される。

3. すり板の使用限度厚に関する考察

すり板の使用限度厚は交換に伴うコストに直接関係す

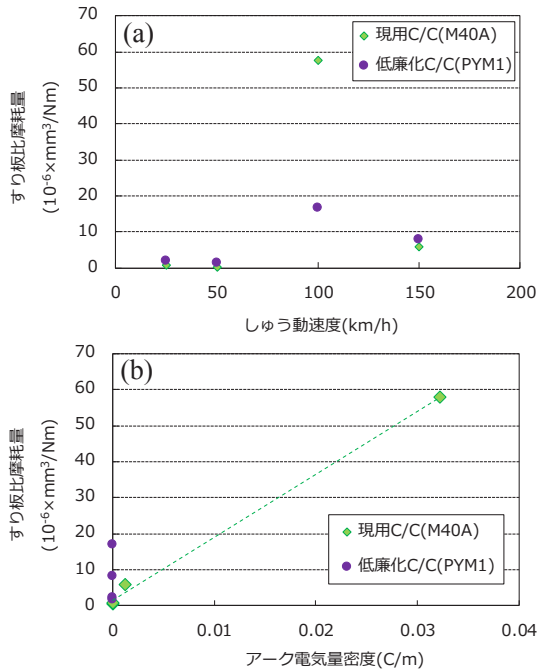


図4 摩耗試験結果（定電流試験）

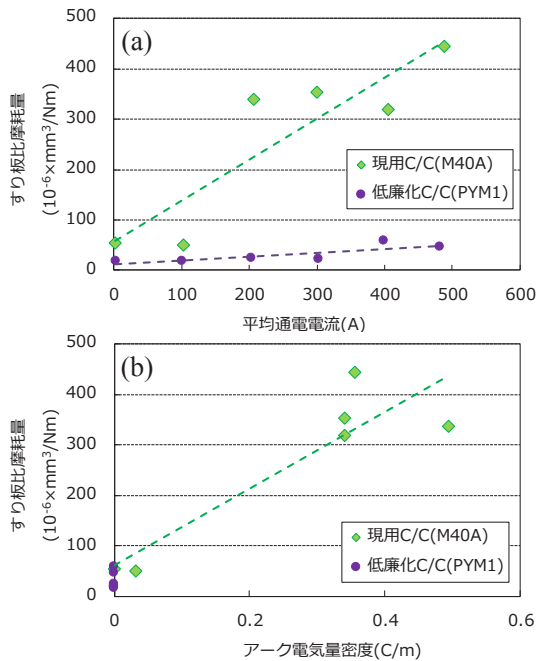


図5 摩耗試験結果（定速度試験）

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。C/C 複合材製すり板でも当初はめねじ破断荷重を基に使用限度厚の目安を9mmとしたが、現在では当時よりもすり板が高強度化しており、実態に即した使用限度厚の目安を明らかにする必要がある。そこで、すり板の使用限度厚を決める因子について考察し、それらについて実験的な検討を行うこととした。

過去の不具合事例等より考察した結果、すり板の使用限度厚は①強度限度厚、②締結力限度厚、③定期検査周

期に伴う余裕分の3つの因子によって決まると考えられた。以下、それぞれの因子について述べる。

3.1 強度限度厚

強度限度厚は定性的には「それ以上、すり板が摩耗すると破壊してしまう厚さ」と言える。すり板の強度やすり板に加わる負荷は確率分布をとるため、厳密には「ある使用環境の下、○○%の確率ですり板が破壊する厚さ」のように定義される。強度限度厚を明らかにするためには「すり板の強度」と「すり板に加わる負荷」を明らかにする必要があるが、いずれも十分に明らかにされず、上で述べた本来の強度限界を定めることは難しい。ここでは使用限度厚の目安値を得るため、C/C 複合材製すり板の強度について基礎的検討を行い、その結果に基づいて「ある負荷条件の下、すり板が破壊しない（破壊確率が極めて低い）厚さ」を調べることにした。

3.2 締結力限度厚

締結力限度厚は「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」のことで、厳密には3.1節で述べたような確率的表現で定義される。ボルトのゆるみなどの現象にはボルトに働く軸方向の締結力（以下、ボルト軸力）が大きく影響し⁵⁾、締結力限度厚を定めるには「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。しかし、強度限度厚と同様、いずれも明らかにされておらず、負荷の測定が困難なことも同様である。ここでは、まず「摩耗に伴うボルト軸力の減少特性」を明らかにし、それと過去の実績値と比較することで、締結力限度厚の目安値を算出することにした。

3.3 定期検査周期に伴う余裕分

すり板はある時点で使用限度厚に達していなくても、次の定期検査までに使用限度厚に達すると予想された場合には交換される。すなわち、式(3)に示したとおり、すり板の実質的な使用限度厚 w は、強度限度厚 w_s または締結力限度厚 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。

$$w = \max(w_t, w_s) + w_m \tag{3}$$

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異なるため、ここでは扱わない。

4. 強度限度厚に関する検討

C/C 複合材製すり板の強度の異方性や舟体に取り付けられた状態ですり板に生じる負荷は明らかにされていない

特集：材料技術

い。そこで、現用材 M40A を例に取り、これらに関して実験により検討した。なお、以下の検討はすべて M40A について行ったものであるが、2 章で述べた低廉化材についても同様の手法により強度限度厚が評価可能である。

4.1 曲げ強度の異方性

曲げ強度の異方性を把握するため、図 6 に示した 2 方向に対する曲げ試験を行った。

4.1.1 試験方法と供試体

M40A すり板を用い、JNIS E6301 に規定された方法で曲げ試験を行った。支点間距離は 40mm、試験片の幅は 10mm、厚さは 4、10mm とした。試験は各条件につ

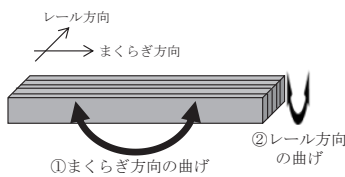


図 6 曲げ方向の定義

いて試験片を変えて 5 回ずつ行った。

4.1.2 試験結果と考察

曲げ試験の結果を図 7 に示す。最大曲げ応力（引張方向）はレール方向の曲げでは平均で 46 ~ 48MPa、まくらぎ方向の曲げの場合、平均で 238MPa であり、曲げ方

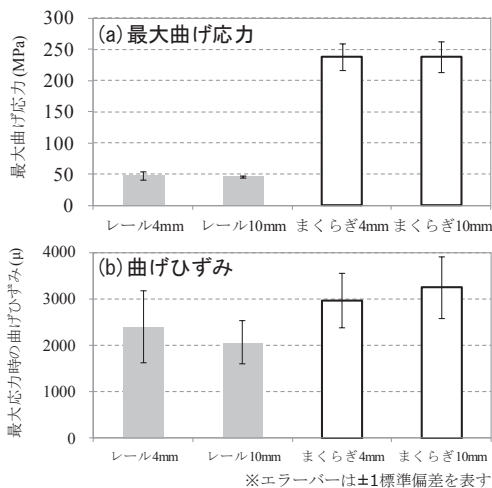


図 7 曲げ強度の異方性

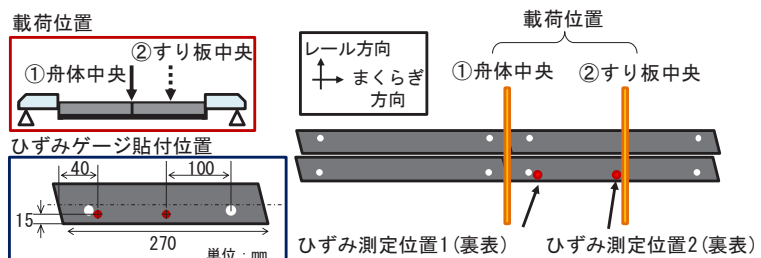
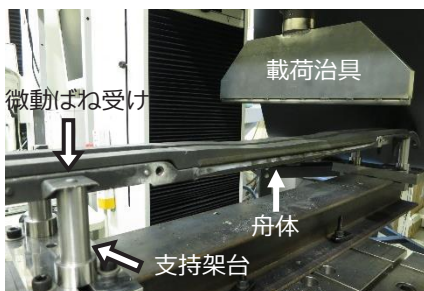


図 8 舟体にすり板を装着した状態での 3 点曲げ試験

向による強い異方性が認められた。すり板厚減少による最大曲げ応力の有意差（有意水準 5%）は認められなかった。最大曲げ応力時のひずみ（引張方向）はレール方向では平均で 2000 ~ 2400μ、まくらぎ方向では平均で 2900 ~ 3300μ であった。

4.2 実舟体を用いた曲げ試験

4.2.1 試験方法と供試体

実舟体に厚さを変えた M40A すり板（幅 40mm、厚さ 16mm ~ 4mm）を取付けた後、3 点曲げ試験を行い（図 8）、図 6 の 2 方向のひずみを測定した。舟体は在来線用パンタグラフで用いられる工進精工所製の薄型舟体を用いた。最大荷重は舟体の弾性変形範囲内の 1kN とした。

4.2.2 試験結果

試験結果を図 9 に示す。すり板に生じる最大引張ひずみはまくらぎ方向で 525μ、レール方向で 454μ であった。強度が低いレール方向に関して破壊確率を求めると、前節の結果より破断ひずみの平均値が 2065μ、標準偏差が 461μ であるので、454μ ひずみは「平均 - 3.5 標準偏差」に相当し、破断ひずみが正規分布に従うと仮定すれば 0.02% の破壊確率となる。以上より、一般的な静押上力（約 60N）の約 17 倍に相当する 1kN を载荷した場合でも、4mm まで摩耗したすり板に生じるひずみは破断ひずみの 1/5 程度であり、すり板が破断する確率は極めて小さいことがわかった。

5. 締結力限度厚に関する検討

C/C 複合材製すり板は金属すり板と同様、ボルトで締結できることが特徴である。締結ボルトはすり板と共に摩耗するため、締結部の摩耗に伴い、ボルト軸力も減少すると考えられる。しかし、これまでにこれらの関係を求めた例はない。そこで、ボルト締結部を模擬した試験片を用いてすり板残厚が減少した際のボルト軸力変化を測定した。

5.1 試験方法

図 10 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

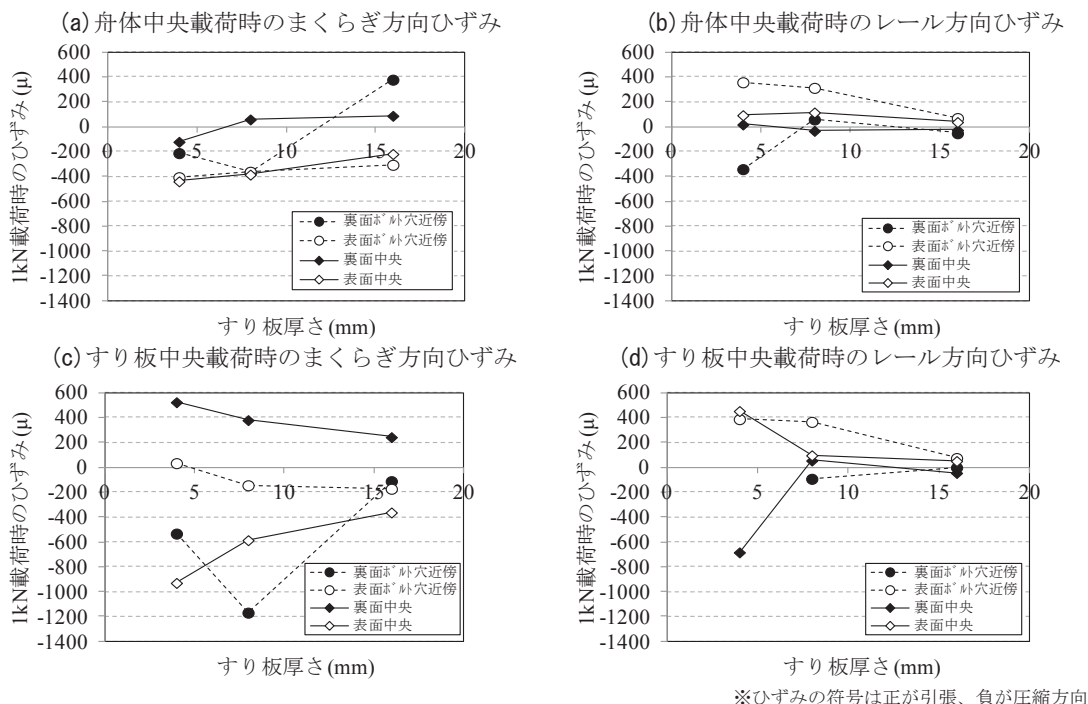


図9 舟体の3点曲げ試験結果

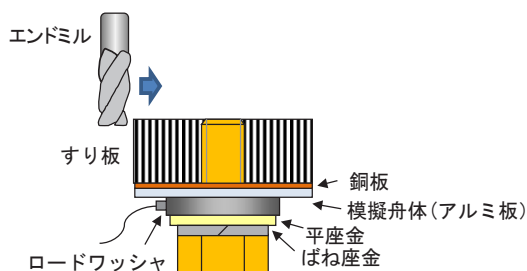


図10 軸力変化測定の様式図

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（標準締付トルクにおける平均軸力⁶⁾）および8kNとした。すり板は現用材M40Aと低廉化材PYM1を用い、比較のため銅系焼結合金すり板BE11についても測定した。すり板初期厚さはM40AとPYM1では16mm、BE11では10mmである。

5.2 試験結果と考察

5.2.1 すり板残厚とボルト軸力の関係

測定結果を図11に示す。すり板残厚の減少に伴い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のがわかった。この軸力減少曲線は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式で表される⁷⁾。

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

ここで、 $\sinh x = (e^x - e^{-x})/2$ 、 $F(x)$ はすり板上面（しゅう動面）から距離 x の位置での軸力、 F_b は締結時の総軸力、 λ はボルトとすり板の弾性率やねじ山の形状などによ

て決まる剛性パラメーター、 L はすり板の厚さである。この式は、すり板の上面近傍ではボルト軸力の負担割合が少なく、下面（勘合端）に近づくほど軸力の負担割合が増加することを意味する。

式(4)と同様、初期軸力に対する残存軸力の比をプロットしたグラフを図12に示す。異なる初期軸力であ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。グラフには最小二乗法により式(4)で表される曲線を初期軸力5kNの実験結果に対してフィッティングした（ λ を求めた）結果も併せて示した。なお、実際のすり板めねじ部には口面取りがなされているため、実質的なすり板厚さは口面取りの寸法 l_0 を引いた値となることから、フィッティングは次式(5)の曲線について行った。 l_0 は1mmとした。

$$\frac{F(x)}{F_b} = \frac{\sinh \lambda x}{\sinh \lambda (L - L_0)} \quad (5)$$

すり板とボルトのねじ部の剛性を表す λ は、C/C複合材製すり板では0.25、0.27であり、銅系焼結合金すり板では0.44であった。 λ が大きいかほど勘合端近傍の軸力負担割合が大きく、摩耗初期の軸力減少は少ない。したがって、異なる材質のすり板を比較する際には λ の違いを考慮し、式(5)からすり板残厚と残存軸力の関係を求める必要がある。

5.2.2 実績に基づく締結力限度厚の算出

これまでの実績より、銅系焼結合金すり板BE11の使用限度厚は3mmであり、そのときの残存軸力は図11(c)から、約3kNであることがわかる。これをM40Aの結果（図11(b)、初期軸力5kN）と比較すると、残厚が約5mmあれば軸力3kNが確保できる。低廉化材

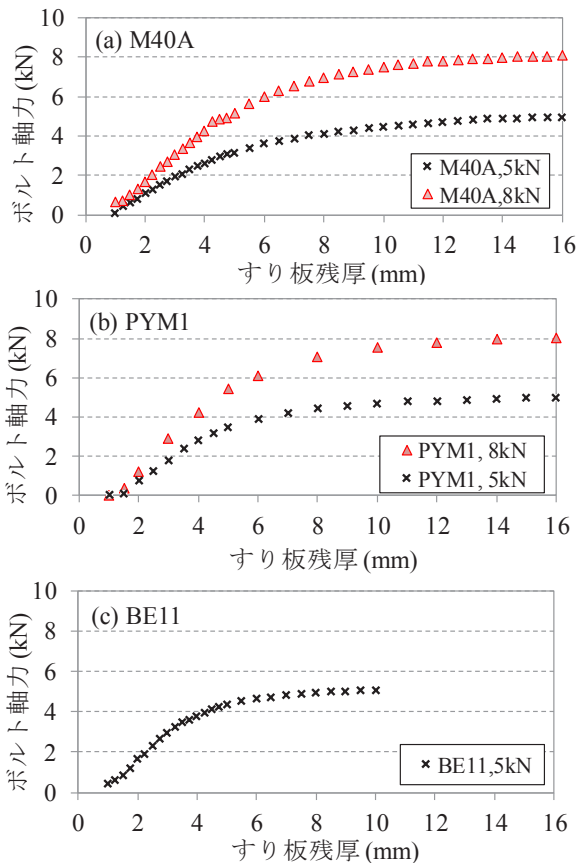


図 11 すり板残厚とボルト軸力の関係

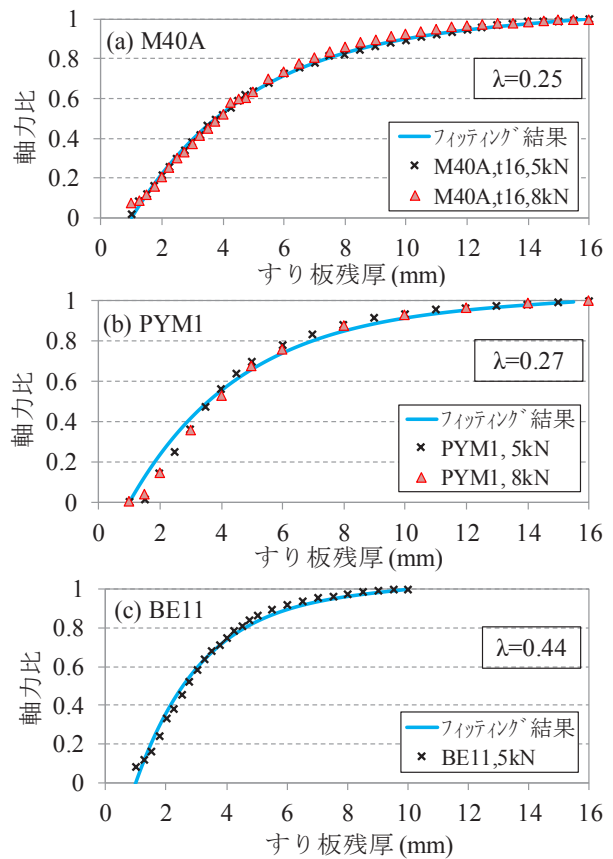


図 12 すり板残厚とボルト軸力比の関係

PYM1についても同様である。このようにしてこれまでの実績値より、締結力の観点から問題なく使用できる厚み（締結力限度）が推定可能となった。

6. 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、低廉なすり板の開発と、すり板の使用限度厚さに関する実験的な検討を行った。結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 炭素繊維量を半減し、C/C 基材の製造法を簡易化した結果、現用材と比べて製造コストを 20% 削減した C/C 複合材製すり板を開発した。
- (2) 過去の不具合事例等より考察した結果、すり板の使用限度厚は強度限度厚、締結力限度厚、定期検査周期に伴う余裕分の 3 つの因子によって決まると考えられた。
- (3) 強度限度厚に関して、現用の C/C 複合材製すり板 M40A を例にすり板材の曲げ試験および実舟体を用いた曲げ試験を行った。その結果、曲げ強度には強い異方性があるものの、1kN を載荷した場合でも 4mm 厚のすり板に生じるひずみは破断ひずみの 1/5 程度であり、強度限度厚を 4mm として差し支えな

いと考えられる。

- (4) 締結力限度厚に関して、すり板締結部の残厚とボルト軸力の関係を測定した結果、それらの関係は締結時の軸力分布の式で表せることがわかった。この式を用いて従来の限度厚の実績から、C/C 複合材製すり板を導入した際の適切な締結力限度厚が算出可能となった。

文 献

- 1) 久保俊一ほか：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, pp.10-13, 2009
- 3) 中川隆夫ほか：炭素繊維強化炭素 (C/C) 複合材料用のプリフォームヤーンの製造とこれを用いて作製した C/C 複合材料の性質，鉄と鋼，Vo.73, No.13, p.352, 1987
- 4) 久保田喜雄ほか：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, pp.866-875, 2017
- 5) 酒井智次：ねじ締結概論，養賢堂，2000
- 6) 久保田喜雄ほか：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, 2009
- 7) 山本晃：ねじ締結の理論と計算，養賢堂，1970