

# 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

久保田 喜雄\* 森 久史\*\* 土屋 広志\*

## Evaluation of Fatigue Strength and Wear Property of Bolts for Fixing Contact Strips Made of Carbon-fiber Reinforced Carbon Composite

Yoshitaka KUBOTA Hisashi MORI Hiroshi TSUCHIYA

The metal-impregnated carbon/carbon composite contact strips (hereinafter referred to as the 'C/C composite strips') featuring self-lubricating property and high fracture toughness have been developed and put to practical use. Given the expansion of use of C/C composite strips, it is necessary to conduct a further study about a bolt joint of the C/C composite strip. The purpose of our work was to investigate the load acting on fixing bolts and to select adequate materials of bolts for fixing the C/C composite strips. For this purpose, we measured bolt axial load in tightening process and examined the tensile strength, fatigue strength and wear property of six different bolts. Based on the test results, we proposed suitable materials of bolts for fixing the C/C composite strips.

キーワード：パンタグラフすり板，C/C 複合材，締結ボルト，軸力，疲労強度，摩耗

### 1. はじめに

炭素を母材として銅または銅合金を加えたカーボン系すり板は、焼結合金製すり板と比べてトロリ線を摩耗させず、電車線設備のメンテナンスコストが削減できることから、多くの鉄道事業者において導入されている。

従来のカーボン系すり板は破壊じん性が低く、焼結合金製すり板のように直接パンタグラフ舟体にボルトで締結することはできなかった。この破壊じん性の低さを炭素繊維によって補い、舟体に直接ボルトで締結できるC/C（炭素繊維強化炭素）複合材製のすり板（以降、C/Cすり板）がこれまでに開発され<sup>1)</sup>、実用化されている。

C/Cすり板は焼結合金製すり板と締結方法が同一であるため、材質変更が容易であり、使用が拡大している。今後、使用線区および適用車種の拡大に伴って負荷環境の多様化が見込まれることから、C/Cすり板のボルト締結部について、さらなる検討を行う必要がある。

これまでC/Cすり板の開発において、①すり板の強度、②すり板の耐摩耗性、③すり板雌ねじ部の耐久性については検討を行い、現車試験によって使用に問題ないことを確認してきた。しかしながら、ボルト締結部に対しては、さらに④締結ボルトの強度、⑤締結ボルトの摩耗特性について検討を行う必要がある。特に、締結ボルトの強度について、現在使われているC/Cすり板締結ボルトは快削黄銅製であるが、この材質は銅合金の中でも比較

的低強度な材質であり、高負荷環境下では耐久性に懸念が持たれる。このため、快削黄銅に代わる、より高強度な材質のボルト使用が望まれる。

本研究では、はじめに、すり板締結ボルトの現在の締付条件における負荷の実態把握を目的として、すり板締結時にボルトに加わる軸力を測定し、トルク係数を求めた。次に、現用材を含む6種類の銅合金材料をボルトに加工し、それらに対して強度試験および通電摩耗試験を行い、C/Cすり板締結ボルトの材質として適切な材質を選定した。また、選定した材質のボルトに対する目標締付トルクを算出した。

### 2. ボルトに加わる初期軸力の測定

疲労試験の中心荷重を決定するには、締結によりボルトに加わる初期軸力を知る必要がある。そこで、ワッシャ型のロードセルとひずみゲージを埋め込んだボルトを用いて、初期軸力を測定した。

#### 2.1 締結時軸力の測定

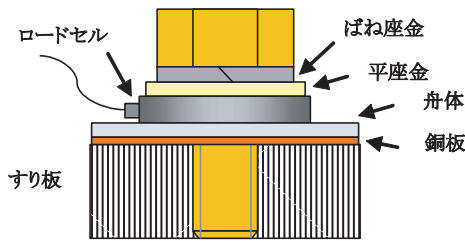
##### (1) 試験方法

測定にはワッシャ型圧電式ロードセル（KISTLER製、9134B21）と、トルクレンチ（東日製作所製、DB12N4）を用いた。緩み防止剤を塗布した現用ボルト（M8×21、並目ねじ）に、ばね座金、平座金、ロードセルを組込み（図1）、締付トルク9.8Nmですり板に締付け、軸力を計測した（試験回数は6回）。試験条件を表1に示す。なお、

\* 材料技術研究部（摩擦材料）

\*\* 材料技術研究部

特集：材料技術



(※通常の使用時には上図の天地を逆にした状態で装着される)

図1 締付時軸力の測定方法

表1 軸力測定試験条件

部品	材質・加工方法	表面処理	潤滑状態
ボルト	快削黄銅 (C3604), 切削	切削はだ	緩み防止剤塗布
平座金	黄銅 (C2801)	無処理	-
ばね座金	ばね鋼 (SWRH)	黒染	-
すり板	AN3M (C/C 複合材)	無処理	-

表2 締結時軸力測定結果

試番	1	2	3	4	5	6
軸力 [kN]	4.96	5.13	4.99	5.41	4.62	5.30

緩み防止剤は座面にも付着しており、座面も潤滑状態にあった。

(2) 試験結果

測定結果を表2に示す。締付トルク9.8 kNにおける軸力は、平均5.07 kN、標準偏差0.28 kNであった。

(3) トルク係数の算出

締付トルク  $T$  と軸力  $F$  との間には、次式の関係が成り立つ<sup>2)</sup>。

$$T = \frac{F}{2} \left( \frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha + \mu_w D_w \right) \quad (1)$$

ただし、 $P$ 、 $d_2$ 、 $\alpha$ 、はボルトの形状により決まる定数で、それぞれボルトのピッチ、有効径、ねじ山半角である。 $D_w$  は座面における摩擦トルクの等価直径で、座面の外径を  $R$ 、内径を  $r$  とすると次式で表される。

$$D_w = \frac{2(R^3 - r^3)}{3(R^2 - r^2)} \quad (2)$$

締付の際に座面となったのはロードセルであったので、 $R$ 、 $r$  はそれぞれロードセルの外径20.00 mm、内径8.08 mmである。 $\mu_s$ 、 $\mu_w$  はそれぞれ、ねじ面の摩擦係数と、座面の摩擦係数である。

一般に(1)式はトルク係数  $K$  と、ボルトの呼び径  $d$  とを用いて、次式のように表される場合が多い。

$$T = KFd \quad (3)$$

$$K = \frac{1}{2d} \left( \frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha + \mu_w D_w \right) \quad (4)$$

締結時軸力の測定結果からトルク係数  $K$  を算出すると、 $K = 0.24 \pm 0.3$  であった。なお、計算には表3の値を用い、締付トルクのばらつきは $\pm 5\%$ と仮定した。さらに、

表3 ボルトの諸元

ピッチ $P$ [mm]	1.25
有効径 $d_2$ [mm]	7.188
ねじ山半角 $\alpha$ [degree]	30
等価摩擦直径 $D_w$ [mm]	14.88
呼び径 $d$ [mm]	8

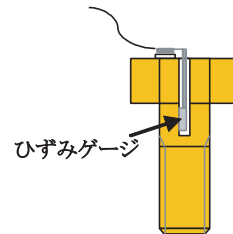


図2 軸力測定用ボルト

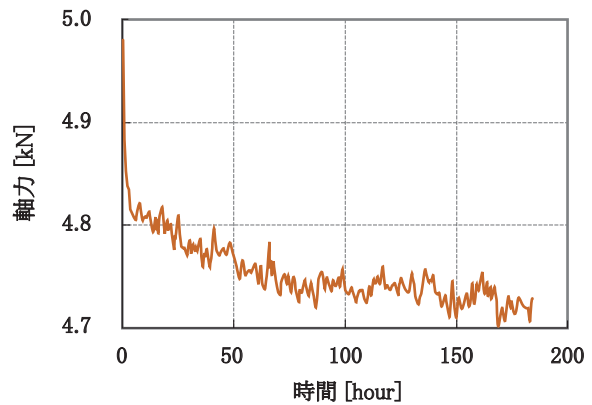


図3 締結後の軸力変化

(1)式で  $\mu_s = \mu_w$  として、摩擦係数を求めると  $0.19 \pm 0.02$  であった。

2.2 軸力の経時低下の測定

通常、すり板はパンタグラフ舟体に締結された後、使用されるまで数日から1ヶ月程度静置される。

ボルト軸力は締結後、応力緩和や戻り回転によって低下することが知られており<sup>3), 4)</sup>、すり板締結ボルトでも使用までの静置期間中に軸力低下が生じていることが考えられる。そこで、圧電式ロードセルと異なり長時間の測定が可能なひずみゲージを埋め込んだ軸力測定用ボルト(図2)を用いて、締結後の軸力変化を測定した。

(1) 試験方法

軸力測定用ボルトに緩み防止剤を塗布し、ばね座金、平座金を組込んだのち、実物の舟体にすり板を締結して室温(19~25℃)で184時間(約1週間)静置した。締付軸力は、5 kNになるよう調整した。また、温度による軸力変化の補償を目的として、1本のボルトを締結せずに舟体上に静置した。

(2) 試験結果

締結後のボルト軸力変化測定結果を図3に示す。軸力

は締結直後に0.2 kN程度低下し、その後は大きく変化することはなかった。締結184時間経過後の軸力低下は0.28 kNであった。したがって、2.1節の結果と合わせて考えると、すり板が実際に使用に供される時にすり板締結ボルトに加わる軸力は  $4.8 \pm 0.3$  kN であると考えられる。

### 3. 現用ボルト材質に代わる材質の検討

C/Cすり板締結ボルトに求められる特性は次の通りである。

- (1) 現在の基準締付トルク (9.8～12.7 Nm) で締付けても降伏しないよう、現用ボルトよりも高い強度 (0.2%耐力) を持つこと。
  - (2) 高負荷環境での繰り返し応力によって、疲労破断しないように、現用ボルトと比べて高い疲労強度を持つこと。
  - (3) C/Cすり板と共に一様に摩耗すること。
  - (4) 人体に有害な金属元素(例えば鉛やベリリウムなど)を可能な限り含有しないこと。
- これらをふまえ、JIS規格 (JIS H3250, H3260, H3270)

および伸銅協会規格 (JCBA T204) を参考に銅合金の規格品から候補材質を選んだ。現用材を含めた候補材の化学成分を表4に、候補材の機械的特性 (規格値) を表5に示す。候補材は、いずれも現用材と比較して高い引張強度を持つものを選んだ。これら候補材をボルトに加工し、各試験に供試した。ボルト加工は各材質に適した方法を用いた。各ボルトの加工法などの諸元を表6に示す。

### 4. 代替候補材ボルトの引張試験

代替材ボルトは現在の基準締付トルクで締付けても降伏しないだけの強度を有している必要がある。このため、引張試験を行って候補ボルトの強度を調べた。

#### (1) 試験方法

油圧サーボ式疲労試験機 (島津製作所製、サーボパルサー EHF-UG100KN-70L) に、M8 ボルト用に製作した治具を用いてボルトを固定し、ひずみ速度  $10^{-3}$  /s で引張試験を行った。

#### (2) 試験結果

試験結果 (3回の試験の平均値) を図4に示す。候補

表4 候補材の化学成分の規格

番号	合金番号	名称	化学成分 [mass%]												
			Cu	Pb	Fe	Sn	Zn	Al	Mn	Ni	P	Si	Cu+Al+Fe+Mn+Ni	Cu+Sn+P	
1	C3604	快削黄銅	57.0～61.0	1.8～3.7	0.50以下	Fe+Sn 1.2以下	残	-	-	-	-	-	-	-	-
2	C2700	黄銅	63.0～67.0	0.05以下	0.05以下	-	残	-	-	-	-	-	-	-	-
3	C6932	快削黄銅	69.0～80.0	0.01～0.1	0.3以下	-	残	-	-	-	0.02～0.15	2.0～4.0	-	-	
4	C6191	アルミニウム青銅	81.0～88.0	-	3.0～5.0	-	-	8.5～11.0	0.50～2.0	0.50～2.0	-	-	99.5以上	-	
5	C6782	高力黄銅	56.0～60.5	0.50以下	0.10～1.0	-	残	0.20～2.0	0.50～2.5	-	-	-	-	-	
6	C5191	りん青銅	-	-	-	5.5～7.0	-	-	-	-	0.03～0.35	-	-	99.5以上	

表5 候補材の機械的性質の規格

番号	記号	引張試験		硬さ試験	
		引張強度 MPa	伸び %	ビッカース硬さ HV	ブリネル硬さ HBS10/3000
1	C3604BE	335以上	-	80以上	-
2	C2700W-1/8H	345～440	10以上	-	-
3	C6932BE	450以上	-	110以上	-
4	C6191BE	685以上	15以上	-	170以上
5	C6782BE	460以上	20以上	-	-
6	C5191B-1/2H	460以上	13以上	135以上	-

表6 供試ボルトの諸元

番号	合金番号	加工法	名称	備考
1	C3604	切削	現用ボルト	現用ボルト。
2	C2700	転造	黄銅ボルト	パンタグラフ出荷時のすり板締結ボルト。
3	C6932	切削	Si添加快削黄銅ボルト	現用材のPbの代わりにSiを添加した快削黄銅。
4	C6191	転造	アルミニウム青銅ボルト	現用材より高い引張強度、伸びを持っていること、疲労強さの向上に効果的と思われる転造ボルトに向けた材質。
5	C6782	転造	高力黄銅ボルト	
6	C5191	転造	りん青銅ボルト	りん青銅のなかでも、比較的硬さの低い材質。

特集：材料技術

品のうち、C6191（アルミニウム青銅）製ボルトが最も高い引張強度を有していた。一方、伸びでは、C2700（黄銅）製ボルトとC5191（りん青銅）製ボルトが他の候補品よりも高い値を示した。

試験結果から、候補ボルトはいずれも引張強度、0.2%耐力、伸びともに現用ボルトより高く、3章で述べた(1)の要求を満たしていることが確認できた。

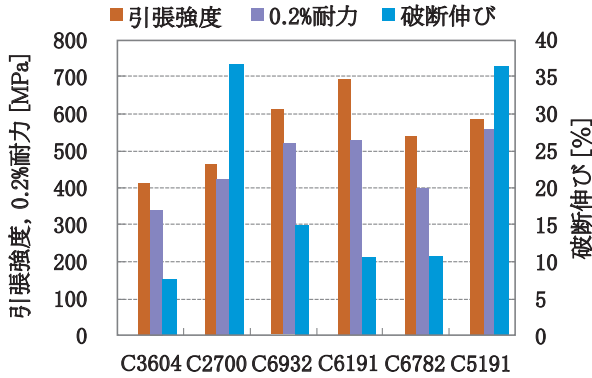


図4 引張試験結果

5. 代替候補材ボルトの疲労試験

(1) 試験方法

引張試験と同じ油圧サーボ式疲労試験機を用いた。ねじ部品の疲労試験方法はJIS B 1081に規定されているが、今回は候補ボルト同士の比較を目的とし、簡略化した方法で行った。繰り返し負荷の打ち切り回数は $5 \times 10^6$ 回、中心荷重は5 kN（ボルトの有効断面積を36.6 mm<sup>2</sup>として応力換算すると137 MPa）とし、片側荷重振幅は1.2～4.7 kN（応力換算すると33～128 MPa）とした。試験条件を表7に示す。

(2) 試験結果および考察

試験結果を図5に示す。本研究においては、疲労強度 $\sigma_{AN}$ は次式により求めた。

$$\sigma_{AN} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \sigma_a(j) \quad (5)$$

ただし、 $j$ は試番番号、 $\sigma_a(1)$ は初めに $N = 5 \times 10^6$ において非破壊となった応力振幅、 $\sigma_a(j+1)$ は $\sigma_a(j) \pm \Delta\sigma$ （±の符号は $N = 5 \times 10^6$ までに破壊した場合は負、破壊しなかった場合は正）、 $\Delta\sigma$ は試験前の検討により定める応力振幅階差であり、本試験では中心荷重を7段階に区切り $\Delta\sigma = 19$  MPa（荷重換算すると0.7 kN）とした。

なお、JIS規定の14S-N試験法では疲労限度を求めるのに合計6個の試験片についてステアケース法による疲労試験を行うことになっているが、試験片の数を減らした方法でも14S-N試験法と結果に有意な差が見られないとの報告もあり<sup>5)</sup>、今回は候補ボルト同士の相対的な比較を目的として、3試験片の結果から疲労強度を推定した。

試験結果から、(5)式により求めた各ボルトの疲労強度

を図6に示す。疲労強度はC6932（Si添加快削黄銅）製ボルトがもっとも高く、以下C6191（アルミニウム青銅）≒ C5191（りん青銅）、C6782（高力黄銅）、C3604（現用快削黄銅）≒ C2700（黄銅）製ボルトの順に高かった。C6932、C6191、C5191製ボルトの疲労強度は現用ボルト

表7 疲労試験条件

加振周波数	30 Hz
荷重測定	ロードセル
変位測定	クロスヘッド移動量
制御	荷重PID制御
試験数	各荷重条件につき2個

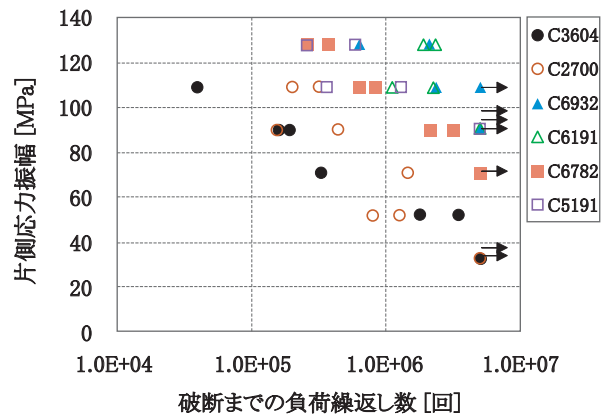


図5 疲労試験結果

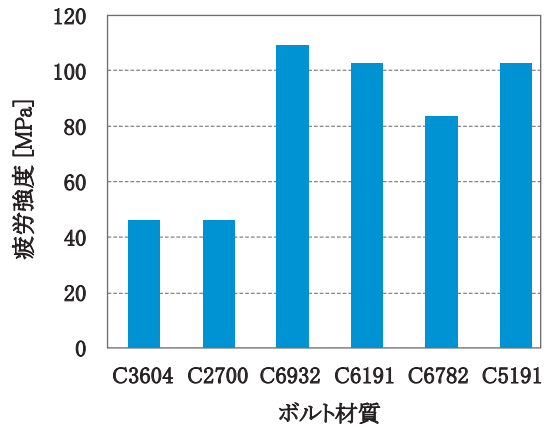


図6 候補ボルトの疲労強度

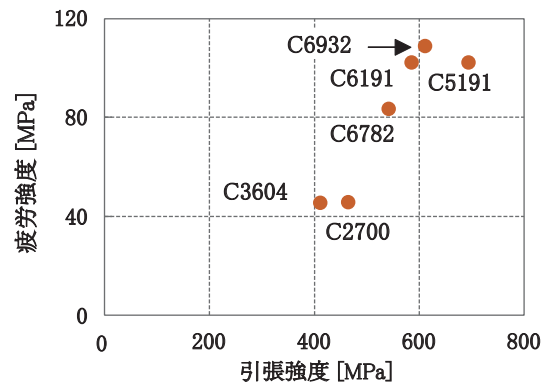


図7 引張強度と疲労強度の関係

トの疲労強度の2倍以上であった。

図7に候補ボルトの引張強度と疲労強度の関係を示す。引張強度と疲労強度との間には、ほぼ比例関係が認められた。

## 6. 候補材の摩耗特性

すり板締結ボルトは、すり板と共に一様に摩耗する必要がある。そこで、候補材のボルトをC/Cすり板(AN3M)試験片に取り付けて通電摩耗試験を行い、試験後の試験片の摩擦面形状を測定した。

### (1) 試験方法

試験は表6の6材質のボルトを用いて行った。摩耗試験片は、すり板の中央にねじ穴を切り、緩み防止剤を塗布したボルトを装着して作製した。

候補材の摩耗特性は、集電材摩耗試験機を用い、間欠混用摩耗試験により評価した。間欠混用摩耗試験とは、銅系焼結合金すり板(BC)と供試材のAN3Mすり板を交互にしゅう動させる試験で、離線アークが頻発する条件下でのすり板摩耗を再現できると考えられている。

試験条件は、次のように設定した。しゅう動速度はAN3Mでは100 km/h、BCでは25 km/h、通電電流はAN3M、BCともに100A、試験時間はAN3MとBCでそれぞれ30分ずつとした。

### (2) 試験結果および考察

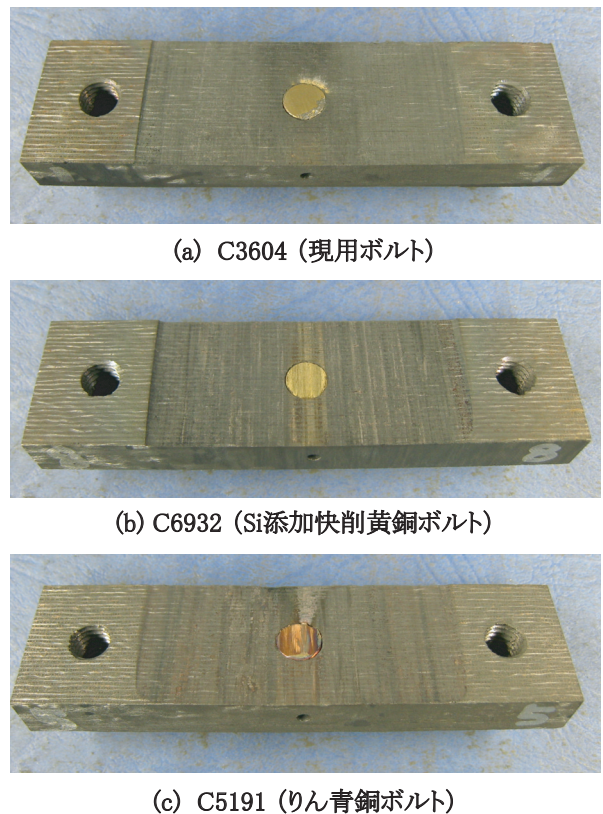
図8に試験後の摩耗試験片の一例を、図9に試験後の摩擦面形状の測定結果の一例を示す。C5191(りん青銅)材以外の材質は、すり板と共に一様に摩耗した。図9からわかるように、C5191材ではボルトが摩耗せずに残り、ボルト部で離線しやすい傾向にあった。

通電摩耗試験の結果、C2700、C6932、C6191、C6782材はすり板と共に一様に摩耗したため、使用に問題はないと考える。しかし、C5191材ではボルト部が一様に摩耗せず、ボルト部で離線しやすかったことから実用は難しいと考える。

## 7. 代替材ボルトでの目標締付トルク

ねじ締結体において、最も基本的かつ効果的な緩み防止法は、予張力を高くすることである<sup>6)</sup>。引張・疲労強度、摩耗特性の点からC/Cすり板締結ボルトに適した材質と考えられるC6932およびC6191製ボルトは、現用ボルトよりも0.2%耐力が高いため、予張力を大きくとれる。そこで、ボルトが降伏しない最大の締付トルクを目標締付トルクとし、C6932およびC6191製ボルトに対する目標締付トルクを以下の手順で求めた。

① 辻ら<sup>7)</sup>が提案した次式により、ねじ部の全断面が降伏する軸力 $F_y$ を、ボルト材の0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ から求

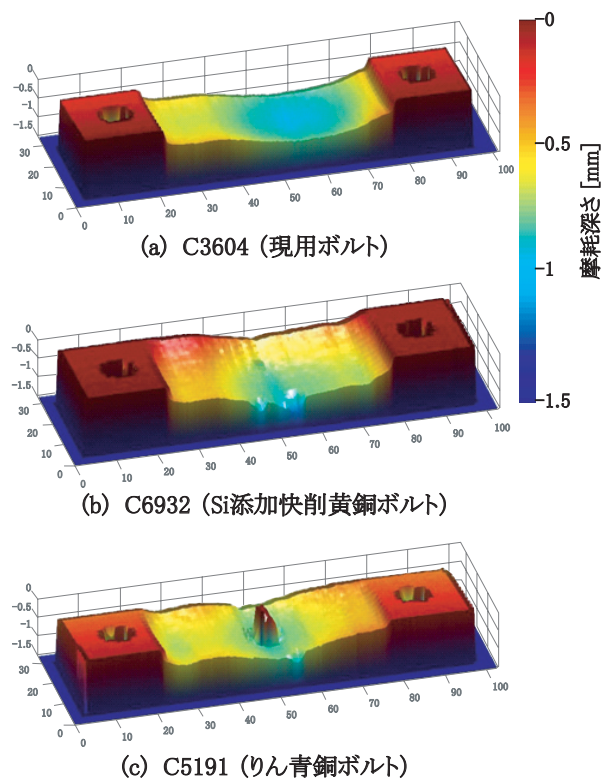


(a) C3604 (現用ボルト)

(b) C6932 (Si添加快削黄銅ボルト)

(c) C5191 (りん青銅ボルト)

図8 試験後の摩耗試験片



(a) C3604 (現用ボルト)

(b) C6932 (Si添加快削黄銅ボルト)

(c) C5191 (りん青銅ボルト)

図9 試験後の摩擦面形状

特集：材料技術

めた。

$$F_y = \frac{\sigma_{0.2} A}{\sqrt{1 + 3 \left\{ \frac{3}{2d_A} \left( \frac{P}{\pi} + \mu_{\min} d_2 \sec \alpha \right) \right\}^2}} \quad (6)$$

ただし、 $A$ はボルトの有効断面積 (36.6 mm<sup>2</sup>)、 $d_A$ は面積が  $A$  に等しい円の直径であり、 $\mu_{\min}$  は3章で得た摩擦係数の最小値である。

- ② トルクレンチの精度や読取誤差、締付停止誤差などによる締付トルクのばらつきを5%見込んで、目標締付トルク  $T_A$  を次式で求めた。

$$T_A = \frac{K_{\min} F_y d}{1.05} \quad (7)$$

ただし、 $K_{\min}$  は(4)式において、摩擦係数を最小に見積もって求めたトルク係数の最小値である。なお、この場合は軸力測定試験と異なり、平座金(外径17.65 mm、内径8.60 mm)が座面となるため、等価摩擦直径  $D_w$  は14.88 mmとして計算した。

以上に従って表8の結果が得られた。

代替材ボルトの目標締付トルクはC6932製ボルトでは、33.9 Nm、C6191製ボルトでは34.6 Nmである。これは現在の基準締付トルク9.8 Nmのおよそ3倍に相当する。ただし、このようにボルトが上限の締付力のもとに締付けられた状態では、軸方向に外力が働いた場合にボルトが降伏するおそれがある。したがって、実際の基準締付トルクは、外力の作用も考慮に入れた上で決定する必要がある。

表8 代替材ボルトの目標締付トルク計算結果

ボルト材質	C6932	C6191
0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ [MPa]	520	530
摩擦係数の最小値 $\mu_{\min}$	0.17	0.17
降伏軸力 $F_y$ [kN]	16.4	16.7
トルク係数の最小値 $K_{\min}$	0.27	0.27
目標締付トルク $T_A$ [Nm]	33.9	34.6

8. まとめ

C/Cすり板の使用拡大に伴って負荷環境の多様化が見込まれ、C/Cすり板のボルト締結部について、さらなる検討を行う必要があると考えられた。

本研究では、現在の締付条件での締付け時のボルト軸力を測定し、トルク係数を算出した。次に、現用品より強度が高く、かつ摩耗特性が同等なボルト材質を選定す

るために、現用材を含む6種類の銅系材料をボルトに加工し、それらに対して引張試験、疲労試験および通電摩耗試験を行った。結果をまとめると次の通りである。

- (1) 軸力測定の結果、ボルトには締結によって5.1 ± 0.3 kNの軸力が加わり、締結後184時間経過後の軸力低下は0.3 kNであった。また、トルク係数は0.24 ± 0.3であった。
- (2) 代替候補材ボルトの引張強度はC6191 (アルミニウム青銅)、C6932 (Si添加快削黄銅) 製ボルトが600MPa以上と優れ、伸びはC2700 (黄銅ボルト)、C5191 (りん青銅ボルト) 製ボルトが30%以上と優れていた。
- (3) 代替候補材ボルトでは、C6932、C6191、C5191製ボルトの疲労強度が候補品の中では高く、現用ボルトの2倍以上の疲労強度を有することがわかった。
- (4) 通電摩耗試験により、C5191材以外の候補材はすり板と共に一緒に摩耗することを確認した。

以上の結果から、現用材に代わるC/Cすり板締結ボルトの候補材としては、C6932 (Si添加快削黄銅) およびC6191 (アルミニウム青銅) の2種類が適切であると考えられる。

今後、現車試験などを通じて、これらの材質のボルトの使用可能性を検証していきたい。

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) 酒井智次: ねじ締結概論, 養賢堂, 2000
- 3) 中村眞行, 長島英明, 大野政智, 榎田義勝: リラクゼーションによるボルト締結体の軸力低下予測手法の検討, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.65, No.640, pp.238-243, 1999
- 4) 福岡俊道, 高木知弘: トルク法によるボルト締付け過程の力学的特性について, 日本機械学会論文集 (A編), Vol.63, No.609, pp.205-210, 1997
- 5) 大橋宣俊, 笠野英秋, 吉本勇: 品質保証を目的としたボルトの疲労試験方法に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.60, No.576, pp.389-394, 1994
- 6) 日本規格協会: ねじ締結体設計のポイント 改訂版, 2002
- 7) 辻裕一, 丸山一男: 塑性域締結におけるねじ締結体の挙動—剛塑性体モデルによる解析—, 精密工学会誌, Vol.59, No.4, pp.589-594, 2002