

高速対応用 基礎ブレーキ装置の 開発



新井 浩*



加藤 博之*



浅野 浩二*

新幹線の速度向上に対応する基礎ブレーキ装置の要件として、速度向上に伴って増大する負荷に確実に耐えることが必要であるが、今回の新幹線高速化では、速度向上に伴う地震リスク増大を抑制するために速度向上後も最高速度からの非常ブレーキ停止距離を現行の営業車両並みに抑えることを目標としたため、高減速度に必要な摩擦係数を確保することも併せて必要であった。そのため、中央締結方式ブレーキディスク、等圧式ブレーキライニング、空圧式キャリパを組み合わせた新しい基礎ブレーキ装置を開発した。そして開発した基礎ブレーキ装置について定置試験・現車試験で性能の確認を行った結果、必要な性能を満たしていることを確認した。一方、新たに採用した中央締結方式のブレーキディスクでは、ディスク冷却用フィンの風切り音が全体騒音に対して無視できないレベルの騒音源になっていることが判明したため、そのための改良も行った。本論文ではこれらの開発経緯と結果について概説する。

●キーワード：新幹線、高速化、ブレーキ、騒音

1. はじめに

新幹線の速度向上を図るためには、高速から確実に止まることができるブレーキ装置の開発が必要となることは言うまでもない。特に、安全確保のための最後の要となる基礎ブレーキ装置については、回生ブレーキがフェイルした状態においても列車を確実に停止させるための性能と信頼性を有することが必須である。そのためには、走行速度の向上に伴って増大する負荷に確実に耐えることが一つの要件となる。

また今回の新幹線高速化では、速度向上に伴う地震リスク増大を抑制するために速度向上後も最高速度からの非常ブレーキ停止距離を現行の営業車両並みに抑えることを目標とした。そのため、ブレーキ初速度を向上しつつ非常ブレーキ減速度を大幅に向上するという困難な課題に挑戦することとなった。

こうした課題に対応するため、ディスクでは車輪との締結方式をこれまでの内周締結方式から中央締結方式に変更し、ライニングはこれまでにない等圧式ライニングを開発、またキャリパ装置はこれまでの油圧式から空圧式に変更した。

これらの開発品について定置試験及び現車試験で性能の確認を行った結果、必要な性能を満たしていることを確認した。一方、新たに採用した中央締結方式のブレーキディスクでは、ディスク冷却用フィンの風切り音が全体騒音に対して無視できないレベルの騒音源になっていることが判明し、そのための改良も行った。

2. 開発した基礎ブレーキ装置の構造

2.1 中央締結方式ブレーキディスク

これまでの新幹線の側ブレーキディスクは全て図2に示す内周締結方式となっているが、内周締結方式のディスクは繰り返しブレーキの熱影響により、図1のように変形が進む。

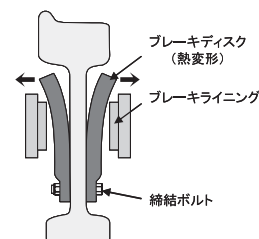
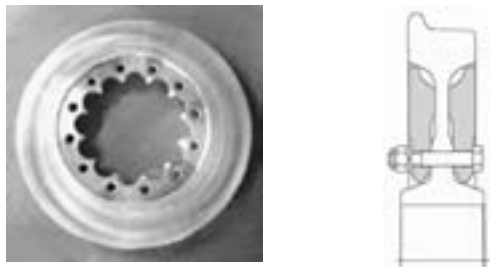


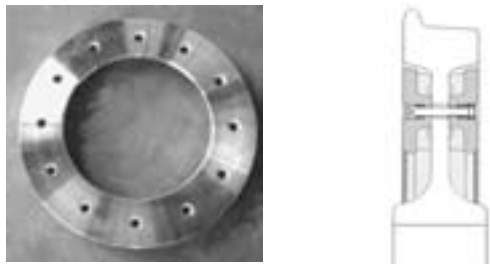
図1 内周締結方式ブレーキディスクの熱変形
(わかりやすくするため、図は変形を強調している)

ディスクが熱変形するとディスク面とブレーキライニングの当たり面が均一でなくなり、当たりの強い部分だけで摩擦を負担するようになる。これは、ディスクの偏摩耗を招来して摩耗寿命を短くするだけでなく、局所的なディスク温度上昇が発生してフェード現象やディスク亀裂発生の原因となる。

これらの問題を解決するため、今回の開発ではブレーキディスクの締結方式を内周締結方式から中央締結方式に変更することにした(図2)。中央締結方式とすることにより、前述の熱変形量は格段に小さくなり、ブレーキライニングの片当たりも少なくなる。このため、ブレーキ時のディスク温度上昇が均一となって、ディスク全体で効率よくエネルギーを吸収できるようになり、フェード現象も発生しにくくなる。



内周締結方式ブレーキディスク（従来方式）



中央締結方式ブレーキディスク（開発品）

図2 内周締結方式と中央締結方式

一方、中央締結方式のディスクブレーキには、内周締結方式にはないリスクも存在する。その一つは締結ボルトが摩擦摺動面に近く熱の影響を受けやすいという点である。締結ボルトが熱による膨張・収縮を繰り返すと、ボルトにて挟んだ部材との熱膨張の違いにより、ボルトの軸力が過大に増加したり低下したりする危険がある。

そこで、今回開発した中央締結方式ブレーキディスクでは、ボルトの締結部分に特定の熱膨張率を有するスリーブやばね座金を挿入するなどの工夫をして、熱によりボルトの軸力が大きく変化しないようにしている。なお、中央締結方式ブレーキディスクの高負荷ブレーキ時の締結ボルト温度上昇は200℃程度である。

中央締結方式ディスクブレーキのもう一つのリスクは、締結ボルトがディスク摺動面のまん中にあるため、万一締結ボルトが折損したり緩んだりして脱出するとブレーキライニングに激突してしまうことである。そこで、今回の開発品では締結ボルトの脱出止めを設置して、どのような場合でもボルトがディスク摺動面に出てこないようにした。

2.2 等圧式ブレーキライニング

これまで述べてきたように、ブレーキ時にブレーキライニングがブレーキディスクに均一に押し付けられないと、ブレーキ性能に悪影響を及ぼす。このため、高速新幹線用ブレーキディスクは上述の中央締結方式で開発を進めることにしたが、ブレーキライニングについても現行品とは異なる等

圧式ライニングを開発した。等圧式の厳密な定義はないが、ここでは、ライニングをディスクに押し付ける際にライニングの当たり面ができるだけ均一な力でディスクの摺動面に押し付けられるような工夫を施したライニングのこと。

開発した等圧式ライニングは、図3に示すようなイコライザ機構を有するものである。これにより、小さく分割された摩擦材の各ブロックには確実に均一な押し付け力が発生する。Fastechでは、図4に示すように二種類の等圧式ライニングを開発した。

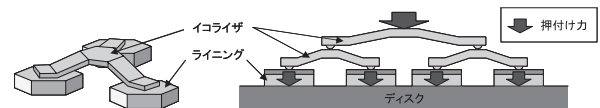


図3 イコライザ機構の模式図

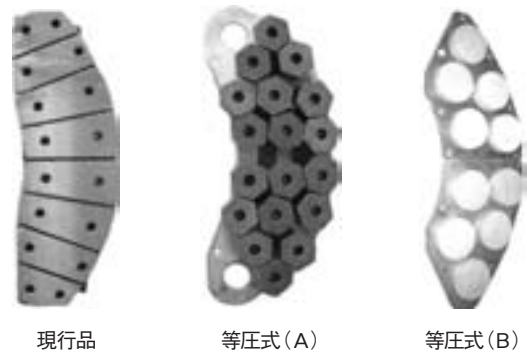


図4 等圧式ブレーキライニング

2.3 空圧式ブレーキキャリパ

現行の新幹線では、ライニング背面に油圧ピストンを配置する油圧式キャリパを使用している。今回の開発では、ブレーキキャリパを在来線のように空圧化して空油圧変換を廃止した。これは、構造の単純化による部品点数の削減、システム全体の軽量化を目的としたものであり、従来必要だった増圧シリンダが不要となっている。質量は、油圧キャリパ方式380kg（キャリパ：約70kg×4、増圧シリンダ：約50kg×2）が空圧キャリパ方式340kg（約85kg×4）となり、1台車当たり約40kgの軽量化を達成した。

Fastechに搭載した二種類の空圧式ブレーキキャリパを図5に示す。

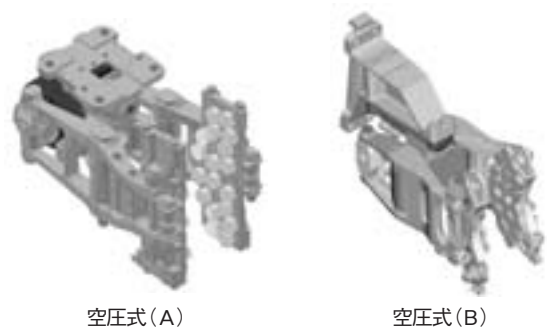


図5 空圧式ブレーキキャリパ

また、これまでのキャリパでは、油圧シリンダがライニングの背後にあってブレーキ摩擦熱の影響を受け易かったが、空圧キャリパではエアシリンダがテコの反対側に配置されて摩擦面から離れたため、熱影響を受けることがなくなったのも利点の一つである。

なお、新幹線用空圧キャリパは2000年度から2001年度にかけて要素技術開発を行ったものであり、滑走再粘着制御の応答性を含めた基本的な機能・性能については確認済である。

3. ベンチ試験結果

3.1 試験条件

開発した基礎ブレーキ装置の性能を確認するため、Fastechへの搭載に先立ってブレーキ試験台試験を実施した。試験条件は、Fastechで目標としている高速からの高減速ブレーキ時の性能確認を主眼として、次のように設定した。

- ・相当軸重14t
- ・ブレーキ初速度最高速度400km/h
- ・最大減速度5.04km/h/s
- ・繰り返し回数80回以上

3.2 試験結果

(1) 摩擦係数

図6にベンチ試験における摩擦係数の測定結果を示す。この結果、現行品の摩擦係数が高速域でフェードして0.2近くまで低下しているのに対して、開発品は350km/h域まで安定した摩擦係数を維持していることが確認できた。

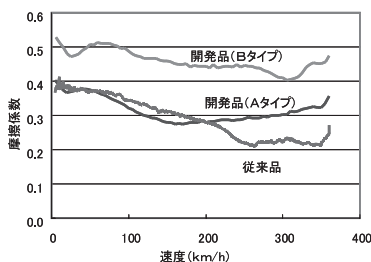


図6 現行品と開発品の摩擦係数比較(ベンチ試験結果)

(2) 停止距離

図7にブレーキ初速度400km/hからの連続非常ブレーキ試験(ベンチ試験)を実施した際のブレーキ距離を示す。この結果から、現行ディスク/ライニングでは、初回のブレーキ距離が5000mに近い上に2回目以降にブレーキ距離が大きく延伸してしまうのに対して、中央締結式ディスク/等圧式ライニングの組合せでは、初回ブレーキ距離が4000m強であり、その後のブレーキ距離延伸度合いも緩やかであることがわかる。

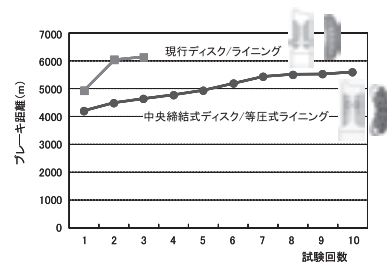
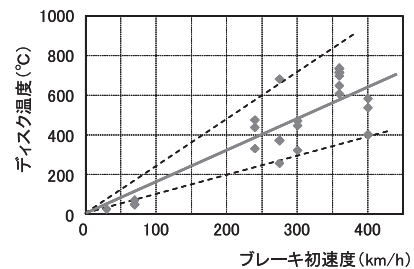


図7 現行品と開発品のブレーキ距離比較(ベンチ試験結果)

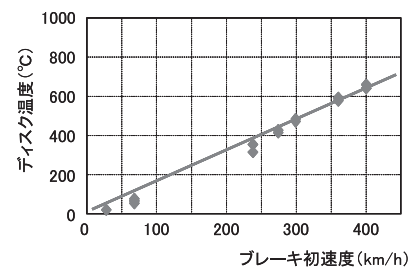
なお、現行ディスク/ライニングでは3回の繰り返し試験でライニングが使用限度に達したが、中央締結式ディスク/等圧式ライニングでは、10回の繰り返し試験後もなお使用可能な状態であった。

(3) ディスク温度上昇

ブレーキ試験台において、高速から非常ブレーキをかけた際のディスク摩擦面中央部の温度測定結果を図8に示す。



a) 現行ディスク/ライニングの場合



b) 開発ディスク/ライニングの場合

図8 現行品と開発品のディスク温度比較(ベンチ試験結果)

この試験結果から、ディスクの平均的な温度上昇は現行品も開発品も大差ないが、開発品は現行品に比べて温度上昇のばらつきが非常に小さいことが確認できた。これは、中央締結式ディスクと等圧式ライニングを組み合わせることでディスクとライニングの接触が均一になった効果であるといえる。図に示すディスクの温度上昇許容値は800°Cであるが、試験の結果から、開発品は360km/hからの非常ブレーキ時でも許容温度に対して十分余裕がある値で安定しているといえる。

4) ディスク変形量

ベンチ試験によりディスクそり変形を比較した結果を図9に示す。図のように、現行ブレーキディスク(内周締結式)では外周部変形量が2mm程度であるのに対し、中央締結式ディスクの変形量は0.5~0.7mm程度であった。このことから、中央締結式ブレーキディスク熱変形量は内周締結式ブレーキディスクの数分の一程度であり、締結方法変更の効果が出ていることがわかる。

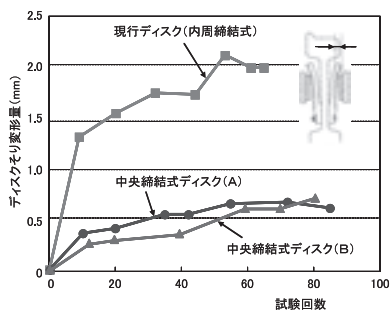


図9 現行品と開発品のディスク変形比較(ベンチ試験結果)

4. 現車試験結果

4.1 長期使用中の状態

開発した基礎ブレーキ装置はFastechに搭載して、長期使用を含めた現車での性能試験を行っている。走行試験開始してから約2年半が経過する間に一部メーカーのライニングで摩擦材欠損等のトラブルが発生したが、対策を講じることで解決している。試験電車という事情から、回生ブレーキカット状態での非常ブレーキ試験を行う回数も多いが、ディスク表面等は良好な状態を維持している。

4.2 高減速度非常ブレーキ試験

同誌別掲載しているが、今回の開発の主眼の一つである高速からの高減速度非常ブレーキについて、現車での停止距離を測定した。その結果、図10に示すように、概ね340km/hからであれば目標の4000mで停止できることを確認した。なお、これ以上の速度の場合には、空気抵抗増加装置の併用が必要である。

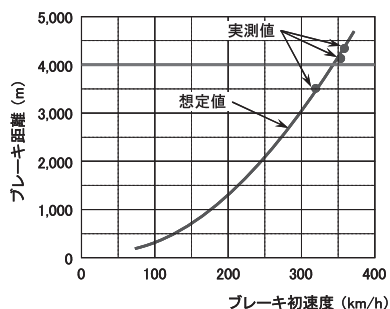


図10 高減速度非常ブレーキによる停止距離(レール湿潤状態、回生ブレーキ「切」)

4.3 ブレーキディスク冷却フィンの騒音対策

ブレーキ性能とは直接関係ないが、E954形式初期段階の環境性能試験において、高速走行中にブレーキディスクから音源として無視できない程度の騒音が発生していることが判明した。調査したところ、この騒音は車輪が高速で回転する際にディスク裏面の冷却フィンから発生する空力音であることが判明したため、フィンの形状を変更して流入空気量を抑制した(図11)。



図11 ブレーキディスク冷却フィンの騒音対策

この改良により、ディスク冷却フィンからの空力音を360km/hで9dB程度低減することができた(図12)。なお、これによるブレーキディスク冷却性能への影響はほとんどないことも確認済である。

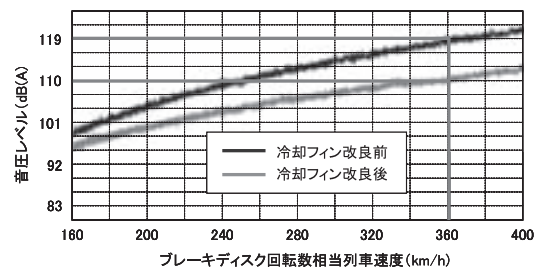


図12 ブレーキディスク冷却フィン改良前後の低騒音比較

5. まとめ

- (1) 新幹線高速化に対応するために、中央締結方式ディスク・等圧式ライニング・空圧式キャリパを特徴とする新しい基礎ブレーキ装置を開発した。
- (2) 開発した基礎ブレーキ装置は、温度上昇、ディスク変形量ともに現行品よりも優れていることを確認した。また、この結果として、高速からの高負荷ブレーキにおいてもフェード現象が発生せず、安定した摩擦係数が得られることも確認した。
- (3) 開発した基礎ブレーキ装置による現車試験の結果、ブレーキ初速度340km/hから4000mで停止できることを確認した。
- (4) 当初開発したブレーキディスクは、高速走行中に冷却フィンから無視できない程度の空力騒音が発生していたが、冷却フィン形状を改良することにより騒音を大幅に低減することができた。