

新幹線高速化の ブレーキシステムについて



新井 浩*



菅野 悟*



柳瀬 直仁**

新幹線のブレーキは速度に応じた粘着特性に従ってブレーキ力を制御し、滑走を防止しながら減速度を確保している。しかし、速度をさらに向上すると、速度向上そのものによるブレーキ距離の延伸と高速域での粘着係数低下による伝達ブレーキ力の低下が重なって、停止距離が大幅に伸びることになる。そこで、速度360km/hからの非常停止距離を現行E2系の275km/hからと同等とすることを目標として、基礎ブレーキ装置の性能向上や最適な滑走再粘着制御の最適化を行うとともに、補助的な手段としての空気抵抗増加装置の開発を行った。

●キーワード：新幹線、Fastech、粘着係数、非常ブレーキ、空気抵抗

1. はじめに

現在の新幹線(E2系275km/h)における非常ブレーキの停止距離は4000m弱だが、このブレーキ性能のままでブレーキ初速度を360km/hまで向上すると、非常停止距離は約7000mにまで伸びてしまう。一方、新幹線高速化による地震時のリスク上昇について分析した結果、リスク上昇を抑制するための最も効果的な方法は、非常停止距離をできるだけ延伸しないことである。そこで、Fastechでは、360km/hからの非常停止距離を4000m程度とすることを目標として、高速対応用ブレーキシステムを開発することにした。そのためには、これまでの新幹線にはない高い減速度が必要となるため、これに必要なブレーキ力を実現する基礎ブレーキ装置や、車輪・レール間の粘着力を最大限活用するためのブレーキ制御方法等を開発した。また、ブレーキ装置ではないが、車輪・レールの粘着力によらずに減速を補助する装置として空気抵抗増加装置の開発も行い、効果や使用時の安全性について検証した。

2. 現有営業車両による高速域の粘着測定試験

上述のように、鉄道車両のブレーキはブレーキ力を伝達する車輪とレール間の粘着力(最大摩擦力)に依存しているため、高速対応用ブレーキ装置を開発するためには、その速度域における粘着係数を把握することが必要である。現在新幹線に用いられている湿潤時の粘着基準値は、新幹線開業時からの粘着計画式、すなわち、

$$\text{粘着係数} = 13.6 / (V + 85) \quad V: \text{速度km/h}$$

から得られる値であり、200系新幹線やSTAR21による高速走行試験でも粘着データの検証を行って275km/h運転を実現してきた。しかしながら、300km/hを超える速度域については十分なデータの蓄積がなく、今後の高速新幹線についてこの計画式を適用することの妥当性について検証することが必要であった。

そこで今回は、Fastechの開発に先立って現有の営業車両を使用して360km/hまでの高速域の粘着データ測定試験を実施した。その結果、図1に示すように、先頭車(散水車両)の粘着係数はほぼこれまでの測定値の延長上にプロットされ、300km/h超の速度域においてもこれまでの粘着計画式を適用できることがわかった。また、レール湿潤時でも編成後位のほうが粘着係数が高くなる傾向も確認できた。さらに、鉄道総研が開発したセラミック粒子噴射による増粘着効果も確認することができた。

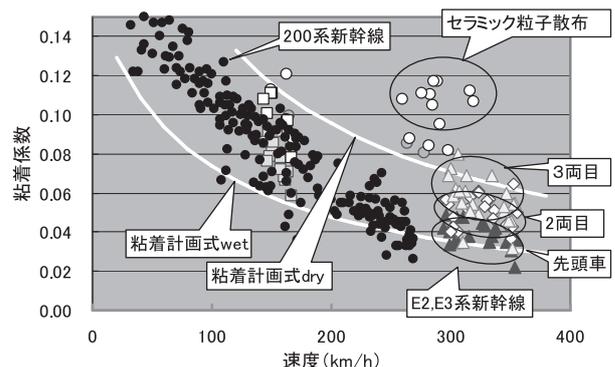


図1 現有車両による粘着測定試験結果

* JR東日本研究開発センター 先端鉄道システム開発センター
** 国際部 (元 先端鉄道システム開発センター)

3. Fastechにおけるブレーキ減速度設定

上述のように、300km/h超の速度域においても、レール・車輪間の粘着係数はこれまでの計画式に沿ったものとして期待できることが確認できたため、Fastechの常用ブレーキ減速度はこれを前提に計画した。

しかしながら、冒頭に記した「360km/hから4000mで止まる」ためには、これをはるかに超える減速度が必要となる。そこで、これについては粘着限界を無視した「高減速非常ブレーキ」を設定した。この減速度では車輪を滑走させずにブレーキをかけることは不可能なので、はじめから車輪を滑らせることを前提としたブレーキ制御方法を開発するとともに、補助手段として空気抵抗増加装置やセラミック粒子噴射の併用も考慮した。

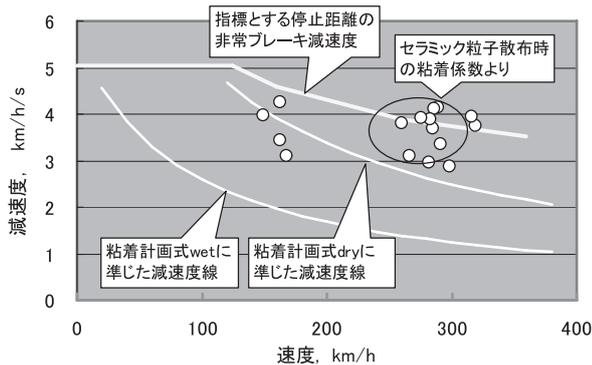


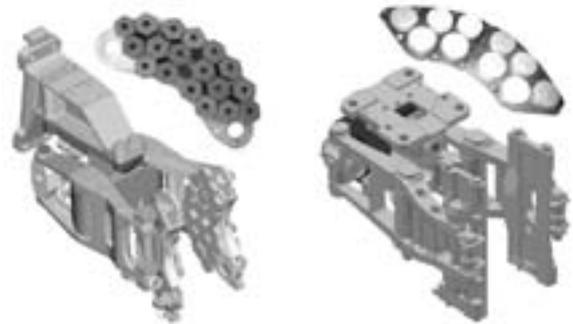
図2 Fastechの高減速度非常ブレーキ

4. 基礎ブレーキ装置の開発

最高速度が向上するとブレーキ時にブレーキ装置が吸収すべき運動エネルギーが増大する。例えば、360km/hからの非常ブレーキ時の発熱量は、275km/hからの場合の70～80%増しとなり、基礎ブレーキ装置の熱負担は極めて高くなる。また、前項に示した高い減速度を実現するためには、ブレーキ中に摩擦係数が低下してはならないため、基礎ブレーキ装置に対する要求性能はますます高くなる。一方、地盤振動対策等のために車両質量は極力軽くする必要があり、ばね下荷重となる基礎ブレーキ装置を重くすることはできない。

そこで、Fastechでは、ブレーキキャリパの空圧化、ブレーキライニングの等圧化、ブレーキディスクの中央締結化等の構造変更を行って、この要求に対応した。この考え方に沿って2種類の基礎ブレーキ装置を開発した結果、基礎ブレーキの質量を増加することなく、計画したブレーキ力(高

減速非常ブレーキ)を安定して出すことのできる基礎ブレーキ装置を作ることができた(図3、図4)。



(Aタイプ組合せ)

(Bタイプ組合せ)

図3 開発した基礎ブレーキの外観

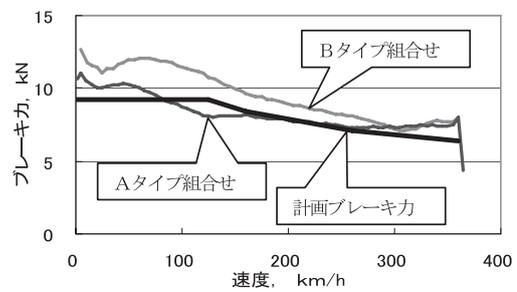


図4 開発した基礎ブレーキ装置のブレーキ力

5. 最適な滑走再粘着制御方法の開発

車輪・レール間の粘着係数がそれほど高くない鉄道車両のブレーキでは、ブレーキ制御を誤ると車輪が固着滑走(ロック)して停止距離延伸になるばかりか車輪踏面の損傷にもつながる。そこで、車輪が滑走固着しそうになった場合にその軸のブレーキを緩めて再粘着させるのが滑走再粘着制御である。

これまで述べてきたように、「高減速非常ブレーキ」では、車輪・レール間の粘着限界を超えた減速度を設定しているため、ブレーキ時に車輪が滑走することが前提となっている。その中でもどうやって滑走しにくくするか、滑走しても必要以上にブレーキを緩めない(再粘着のためにブレーキを緩めると、その間はブレーキ力の損失になる)か、なおかつ速やかに再粘着させるか、言い換えればどうやって上手に車輪を滑らせるか、が開発のポイントになる。

現行E2系、E3系新幹線の滑走再粘着制御は、減速度検知と速度差検知を併用しており、滑走が発生した場合は滑走軸のブレーキを速やかに緩めて再粘着を促す。考え方としては、車輪の滑走をいかに早期に検知してブレーキを緩めるかに重点を置いた方式である。一方、Fastechの高減

速非常ブレーキは車輪が滑走することが前提であるから、車輪が滑走し始めた途端にブレーキを緩めては全体としてブレーキ力が確保できない。また、頻繁なブレーキ緩解→再ブレーキの繰り返しは台車のピッチング運動を発生させ、隣接軸の滑走を誘発する恐れもある。そこでFastechでは、潤滑状態での巨視すべり領域において粘着力が上昇する¹⁾ことに着目し、新たにすべり率制御を採用することにした。

すべり率制御では、車輪が滑走し始めても一定のすべり率(1-軸速度/列車速度)になるまではブレーキを緩解せずに、その軸が自己再粘着するのを待つ。もちろん、自己再粘着せずにすべり率がさらに増加する場合には固着滑走の危険があるので、その軸のブレーキを緩めて再粘着制御を行う。このため、すべり率をどの程度に設定するかが制御の良否を決める鍵となる。今回は、最適すべり率を見出すために、台車試験装置を用いてすべり率をさまざまに変えた状態(10~25%)での滑走制御試験を実施した。15%すべり率制御と従来の速度差3km/h制御との比較データを図5に示す。15%すべり率制御では全くブレーキを緩めることなく、すべり軸が自己再粘着している様子が認められる。その結果、すべり率は15%程度が最適であること、この程度のすべりが発生しても車輪踏面に異常は見られないこと、従来の滑走制御方式と比較して台車のピッチング発生が少ないこと等がわかった。

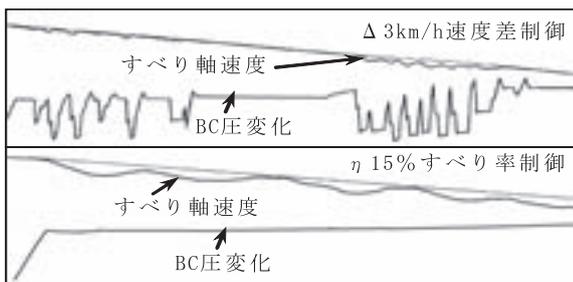


図5 従来制御と15%すべり率制御の比較

6. 空気抵抗増加装置

これまで述べてきたように、Fastechでは車輪によるブレーキ(粘着ブレーキ)も大幅に性能を向上したが、「高減速非常ブレーキ」の設定減速度は粘着限界を大幅に超えていることには変わりないため、非常停止距離短縮のための補助的な装置として空気抵抗を利用する空気抵抗増加装置の開発を行った。この装置は新幹線車両での実績がないため、車両構造、車両走行安全性、走行安定性、架線等地上設備への影響を考慮し開発を進めた。

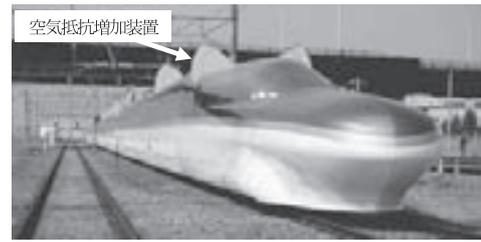


図6 空気抵抗増加装置の外観

6.1 空気抵抗の計算

空気抵抗増加装置は屋根上に抵抗板を展開し、空気抵抗を増加する装置である。これによる制動力(抵抗力)は

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2$$

F: 抵抗力(N) (空気抵抗係数(C_d)
× 空気密度(ρ) × 抵抗板の面積(A) × 列車速度(V)²)
ρ: 空気密度(kg/m³)
A: 抵抗板の面積(m²)
V: 列車速度(m/s)

で計算できる。抵抗力は速度の2乗に比例し、高速で走行するほど制動効果が高くなる。

6.2 基本構成

今回開発した空気抵抗増加装置は、回転上昇式(扇型の平板の抵抗板を回転軸の中心で回転しながら上昇させる方式)とし、格納スペース、調整の容易化、構造の単純化、走行方向による制動力の差をなくす等の課題を解決した。装置構造を図7に示す。

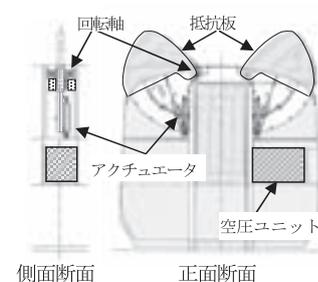


図7 空気抵抗増加装置(断面図)

空気抵抗増加装置は、車体強度確保および室内空間構成を考慮し、各車の車端部に取り付けた。編成内での配置は、1箇所あたりの制動効果を高めつつ、最大限の搭載数を確保するため、各車間部に1箇所(ただし、集電装置搭載部は除く)、両先頭に1箇所搭載することとし、E954形式は7箇所、E955形式は5箇所搭載した。

7. Fastechにおける現車試験

7.1 粘着測定試験

前述のように、高速走行時の粘着係数については現有の

営業車両を使用した走行試験でも測定したが、測定した軸位が先頭車から3両目までであること、および気温の影響を考慮されていなかったことからデータ数としては不十分であると考え、Fastechの高速走行試験の中でも粘着測定試験を実施した。測定対象軸は、編成各号車の各1軸とし、測定軸のみブレーキを動作させ、粘着係数データの蓄積を行った。粘着測定試験の結果を図8に示す。試験時期は2月である。

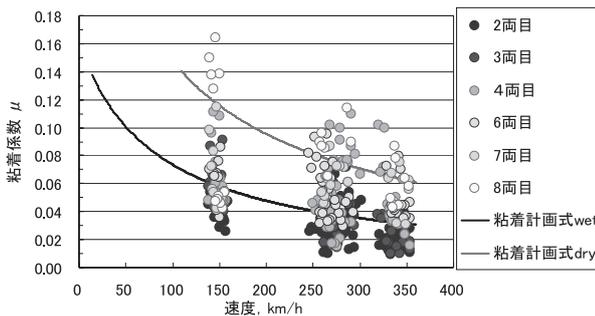


図8 Fastech粘着測定結果(散水)

測定の結果、進行方向に対し先頭側の粘着係数は粘着計画式を下回り、後位側は粘着計画式を上回る結果となった。

今回の編成先頭側の測定結果は、過去の粘着係数の測定結果と比較するとかなり低い値となったが、これには気温や降雪等の気象条件が影響していることが考えられる。このため、継続したデータ収集による積み重ねが必要と判断し、引き続きFastechを使用した粘着測定を行っている。

7.2 高減速度非常ブレーキ試験結果

高減速度非常ブレーキ試験は、回生ブレーキ故障を想定して空制ブレーキのみで行った。

その結果、図9に示すように360km/hからの非常停止距離は概ね4,300mで、空気抵抗増加装置を併用すると4000mとなった。また、空気抵抗増加装置を併用しない場合でも、ブレーキ初速340km/h程度であれば4000mで停止可能なことを確認した。なお、ブレーキ試験の天候はいずれも雨天であった。

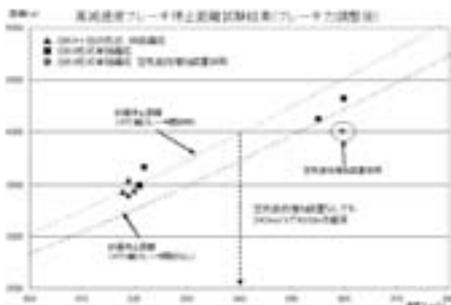


図9 高減速度非常ブレーキ試験時の停止距離

7.3 空気抵抗増加装置試験結果

空気抵抗の測定は、列車を惰行状態とし、空気抵抗板を展開して編成の減速度を測定することで求める。

結果は、図10に示すようにトンネル区間の方が明かり区間より減速効果が大きくなり、明かり区間であっても当初の設計段階の計画値より減速効果がやや大きいものとなった。その結果、360km/hから高減速度非常ブレーキを動作させた場合の空気抵抗増加装置によるブレーキ短縮距離効果は約300mであった。

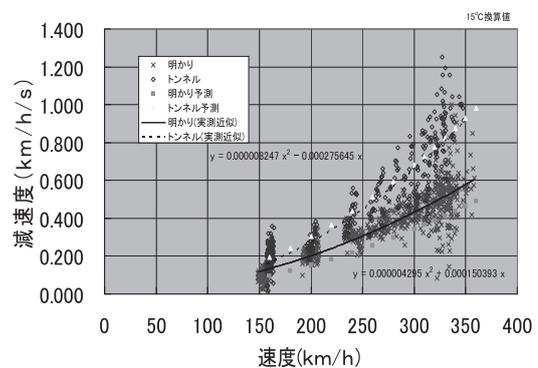


図10 空気抵抗増加装置効果

8. まとめ

速度向上に伴う地震発生時のリスク上昇を抑制するために、基礎ブレーキ装置の性能向上や滑走時のブレーキ制御方法の最適化および空気抵抗増加装置の開発を行った。その結果、最高速度360km/hからの非常停止距離は、空気抵抗増加装置併用の場合で4000m程度となり、目標を達成した。また、空気抵抗増加装置を併用しない場合でも、ブレーキ初速340km/h程度であれば4000mで停止可能なことを確認した。

また、車輪・レール間の粘着係数は、300km/h超の速度域でも従来の計画式が適用できることを確認した。

今後はさらにデータを重ねて、冬季低温や降雪を含むさまざまな気象条件の影響を明らかにしていく所存である。

参考文献

- 1) 内田清五；新幹線のブレーキシステム,2001