

新幹線高速化に向けたブレーキの開発



新井 浩*



菅野 悟*



藤野 謙司*



加藤 博之*



浅野 浩二*

営業速度360km/hをめざした新幹線高速化のブレーキに関する指標として、速度向上に伴う地震時リスク増大を抑制することとし、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とした。そのために高速高減速度対応の基礎ブレーキ装置（中央締結ブレーキディスク・分割式ブレーキライニング・空圧式キャリパ）を開発した。また、車輪-レール間の粘着に限界があるのでそれを補助する手段として、空気抵抗増加装置を開発した。新幹線高速試験電車（FASTECH360）にてそれらの性能を確認し、良好な結果を得た。

●キーワード：新幹線高速化、ブレーキ、減速度、空気抵抗増加装置、粘着

1. はじめに

高速化には、安全に車両を停止させる技術が伴わなければならない。この停止技術の指標を、地震時のリスク増大の抑制とした。現在の新幹線（E2系 275km/h）における非常停止距離は4000m弱だが、このブレーキ性能のままでは速度を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。高速化に伴う地震時のリスク増大を抑制するためには、非常停止距離7000mを現状の4000mに抑える必要がある。本開発では、この非常停止距離目標を4000mとし、車輪-レール間の粘着力の検討による最適減速度の設定、その設定減速度に対応する基礎ブレーキの開発、ブレーキ力不足分を補う空気抵抗増加装置の開発を行い、それらを台上試験や高速試験車走行試験により営業運転できるレベルに改良し、完成させた。以下にそれら開発の経緯と結果について述べる。

2. 減速度の設定

(1) 減速度と粘着係数

鉄道車両の加減速は、車輪とレールの摩擦力に頼っている。鉄道ではその摩擦力を粘着力といい、摩擦係数を粘着係数という。粘着係数は幾度も実車にて測定されており、その結果により導き出された粘着計画式がある。粘着計画式に基づいて設定した減速度線を図1に示す。指標とする非常停止距離を実現するために、セラミック粒子を車輪-レール間に散布して粘着係数を改善することにより非常ブレーキ減速度を向上した線図を併記した。

必要とする減速度は粘着計画式と比較してはるかに高い粘着力を必要としていることがわかる。セラミック粒子の散布

を条件に、FASTECH360の減速度設定を行った。しかし、図1でもわかるようにセラミック粒子による粘着改善においても必要とする減速度を確保できるものではないので、ブレーキ時の補助として走行抵抗を増大させる空気抵抗増加装置を搭載することを検討した。

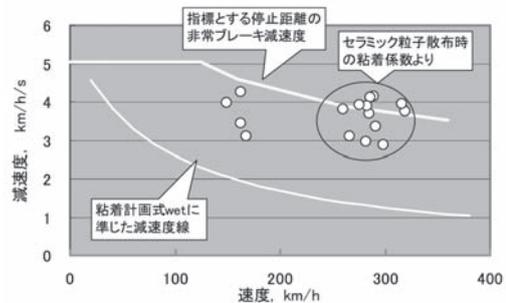


図1 粘着と必要減速度

(2) 減速度設定

前節の必要減速度と粘着係数測定結果を考慮して、試験用ブレーキとして、図2に示す試験非常の減速度を設定した。それは、図に示した通常の非常ブレーキの減速度と比較して、360km/h点でおおよそ2倍となっている。

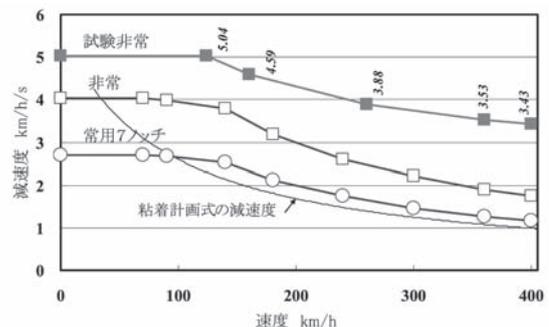


図2 減速度の設定

3. 空気抵抗増加装置の開発

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。その外観を図3に示す。



図3 空気抵抗増加装置外観 (E954)

この屋根上の抵抗板の制動力（抵抗力）は、以下の式で計算できる。

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2 \dots (式1)$$

$\left\{ \begin{array}{l} F: \text{抵抗力 (N)} \\ C_d: \text{空気抵抗係数 (Cd値)} \\ \rho: \text{空気密度 (kg/m}^3\text{)} \\ A: \text{抵抗板の風圧獲得面積 (m}^2\text{)} \\ V: \text{列車速度 (m/s)} \end{array} \right\}$

抵抗力は抵抗板の面積と速度の2乗に比例する。この式より抵抗板の面積を大きくすればより大きな抵抗力が期待できるが、車両限界の制約があり、走行方向後位側の抵抗板は前位の抵抗板により発生する乱流の影響で効果が低減するので有効な枚数が必要となる。高速試験車であるFASTECH360S (E954) には、シミュレーションで効果的な空気抵抗増加装置配列を検討し、7台の装置を取付けた。計算では360km/hからの非常ブレーキで、停止距離をおよそ500m短縮することが期待された。

FASTECH360にて、空気抵抗増加装置を動作させて減速度測定を実施した結果を図4に示す。なお、空気抵抗増加装置の動作時に、車体にはピッチング運動が発生するが輪重変動値はトンネル内すれ違い時に最大で軸重±3%程度の僅かな変動で収まった。また、装置片側動作時には僅かにヨーイング運動が発生するものの、横力は微小であった。空気抵抗増加装置の効果は、FASTECH360の走行抵抗との差であるが、360km/hでおおよそ2倍であった。

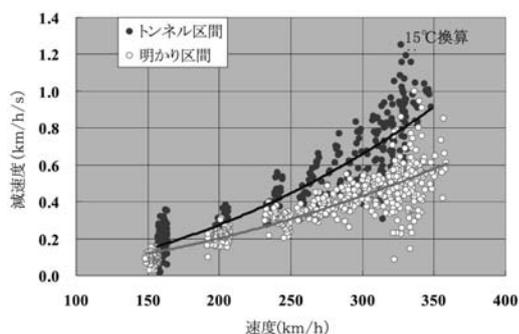


図4 空気抵抗増加装置による試験車の減速度効果

4. 基礎ブレーキ装置の開発

通常のブレーキでは、モーターによる回生ブレーキが主体となるが、地震時は停電となるために摩擦ブレーキのみで制動する。本開発では、この摩擦ブレーキを構成するブレーキディスク（以下、「ディスク」という。）、ブレーキライニング（以下、「ライニング」という。）およびブレーキキャリア（以下、「キャリア」という。）について検討した。現行のものは、360km/hの速度から4000mで停止するという高負荷ブレーキに対応できないという結論に至った。例えば、現行のディスクは、すでにディスク締結ボルトの折損、ディスクの熱変形および熱亀裂の発生という問題を抱えていた。ライニングは、高速からの試験非常ブレーキ1回で損耗してしまうことや摩擦係数が低い問題があった。キャリアは、ライニング背面に油圧ピストンを配置する油圧式で、ライニングの熱により油圧ピストンが固着する問題があった。これら諸問題を抱えての高速化は困難であったため、構造やシステムを変更すると共に、摩擦部材の素材変更も行った。



図5 現行新幹線の基礎ブレーキ装置

4.1 中央締結ディスク

現行のディスクは、ドーナツ状の円盤で、ディスク内周側に車輪にボルト締結する構造である。その構造を図6に示す。



図6 現行ディスクの構造 (内周締結)

この構造では、ブレーキ時に摩擦面が熱膨張してディスク外周部は車輪側に倒れ込む力が発生し、摩擦面は外側に膨らもうとする。しかし、拘束されているので塑性変形してその形状を保つが、冷却すると摩擦面は塑性変形した分量が縮みに反転するので、ディスクは外側に反った形状となる。繰り返しのブレーキ試験において、外周部の外側への反り変形量(図9)は2mmであった。このディスクが変形した状態で、ブレーキをかけるとテコ作用でボルトに曲げを含んだ引張力が作用する。また、ディスクは車輪との摩擦でその位置に止まっているが、ブレーキ時のディスクが熱膨張するときに膨張力がその摩擦力を上回れば、ディスクの位置ズレが生じる。この状態が繰り返されれば、車輪のボルト穴とディスクのボルト穴の位置ズレにより、その穴に挿入されている締結ボルトにせん断力が作用することになる。これらの作用はブレーキ負荷が大きくなるほど発生する可能性が大きくなると考えられる。このように現行の機構では、高負荷ブレーキに対応できないと判断した。

高速対応のディスク構造は「締結ボルトにはせん断力が作用しないこと」および「ディスクの熱膨張(熱変形)を許容すること」とした。加えて、車輪の転動騒音軽減の観点から軽量化が重要で、無駄な箇所のそぎ落としも考慮した。本開発で採用したディスクの構造を図7に示す。

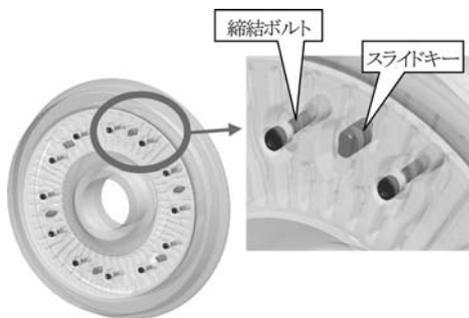


図7 中央締結ディスクの構造

車輪の6ヶ所に装着したスライドキーによってディスクは、中心(芯)を維持して熱膨張を許容するものとし、ディスクの熱膨張を補助するために、ディスクが接する車輪側には潤滑材がコーティングしてある。締結ボルトは摩擦面中央に配置して内周部の取付け部を省略している。締結ボルトが勘合する車輪部の穴を大きくして、ディスクが膨張しても締結ボルトは車輪に接しない構造としている。ディスク背面には冷却フィンを立て、現行のディスクより冷却性能を高めている。ディスク背面構造を図8に示す。

なお、この冷却性能が高い構造では、シロッコファンと同様なベンチレータ機能により内周側から外周側に強烈な空気の流れを発生させるため、風きり騒音が顕著に出現した。そこで、ディスク背面冷却フィンの内周側にベンチレータ風量をコントロールするためのリップを設けてある。また、ほぼ同様な

構造の中央締結ディスクをもう1種類(種別B)を開発しており、冷却フィンの中央に堰を設けてベンチレータ風量をコントロールする構造となっている。

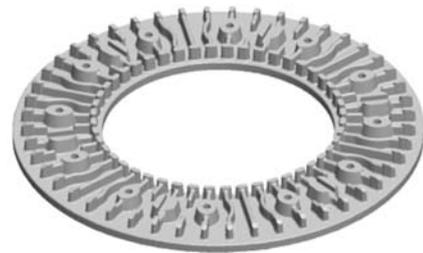


図8 中央締結ディスク(A)の背面構造外観

中央締結ディスクの質量については、現行内周締結ディスクの質量が75kgであるのに対し、内周側の取付け部が省略できることにより50kgと軽量化した。

材質については、本開発ディスクは両者とも焼き入れ硬化が少ない材質とし、軽微なヒートスポットが発生しても熱亀裂が生じないものとしている。

図9に、ブレーキ試験におけるディスクのそり変形比較を示す。試験条件は400km/hからの非常ブレーキを繰り返したものである。現行ディスクはそり変形量が2mmに至ったが、中央締結ディスクは0.5mm程度であり、変形が少ないことを示している。

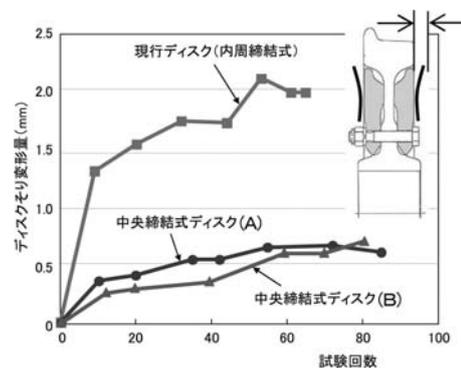


図9 ディスク変形の比較

4.2 分割式ライニング

現行のライニングは摩擦係数が0.25と低い。新幹線開発当時の技術力では、ライニングの摩擦係数を高くすることができなかったことが原因であった。その摩擦係数が現在に至るまで維持されていた。しかし、今回必要とする大きなブレーキ力に対し、摩擦係数が小さい分大きな押付け力を必要とするため、キャリアを堅固なものにする必要があり、得策ではなかった。また、現行のライニングは、熔融摩耗を引き起こすので高速域で摩擦係数が低下する不利な特質があった。高速化対応のライニング性能は、高速域から停止までほぼ安定して高い摩擦係数を有することが望まれた。

現行のライニング形状(図10)は、1枚板であることが要因で、ブレーキ摩擦で摩擦面が膨張して反り変形し、摩擦接触点が小さくなって局所的な摩擦となる。この局所摩擦点は、異常な高温により素材が溶融する。当然摩擦力は低下し、摩擦は著しく増大する。したがって、この現象を回避するために、ライニングを分割して摩擦点を多くし、一つの摩擦点の負荷分担を小さくする方法を採用することとした。採用したライニングの分割方法を図11に示す。

分割ライニングの構造は、3個の摩擦ブロックを1組として、3個の支えるアームによって締結されている構造を基本としている。アームの中央に力を加えると、3個のブロックにはその加えた力の1/3が等分にかかる。これを「イコライザ」という。図11に示したイコライザ3個を一組としてさらにイコライザに組み込むと9個の摩擦ブロックに均等な力が加わる構造となる。この9個のブロック群を2組連ねてライニングは構成されている。こうした構造は、摩擦点が分散して局所加熱がないため、高速域で摩擦係数の低下が少ない特徴がある。現行のライニングとこの分割式ライニングの摩擦係数の比較を図13に示す。また、分割ライニングについても、もう1種類のライニング(B)を開発しており、その外観を図12に示す。



図10 現行ライニングの外観

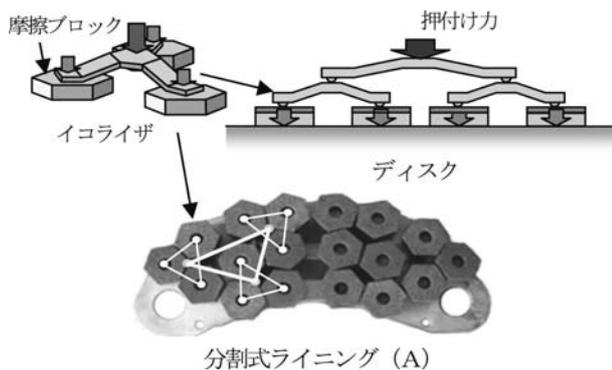


図11 ライニングの分割手法

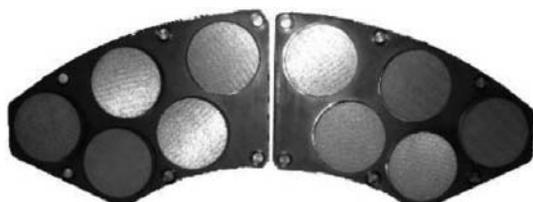


図12 分割式ライニング (B) の外観

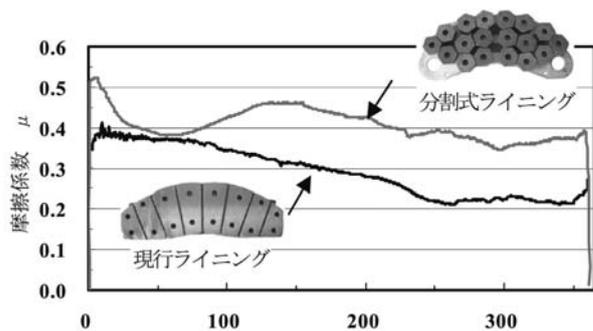


図13 摩擦係数の比較 (EB試験結果)

ライニング材質は、現行と同じ銅粉を焼き固めた銅焼結材である。ただし、現行ライニングは融点の低い金属をある割合で含有しており、そのために高速域で高温となる摩擦時に溶出して摩擦係数が高くないことがわかった。高速化対応のライニング素材はこの低融点金属を無添加とする、あるいは極力少なくしている。

4.3 空圧式キャリパ

現行の油圧式キャリパ(図14)は、ライニング背面に油圧シリンダを配している、高負荷ブレーキでライニングが加熱する場合には向かない。高速化用として、テコ式の空圧式キャリパを選択した。それぞれの空圧式キャリパの外観を図15に示す。



図14 現行の油圧式キャリパ

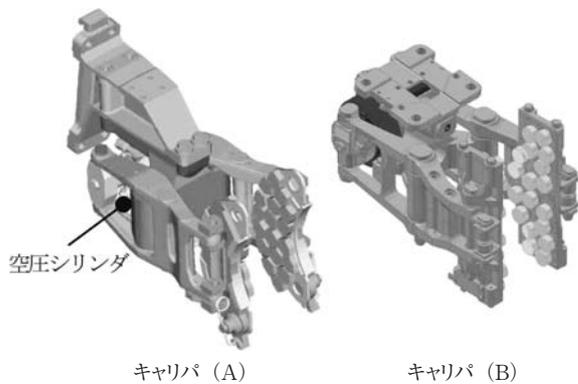


図15 テコ式の空圧式キャリパ

現行の台車にはこの油圧式キャリパのために空気圧を油圧にする油圧変換弁を取付けている。空圧式キャリパを用いることでそれを省略できて軽量化ができると共に台車内ス

ベースができて新たな動揺防止装置やアンチローリング装置の設置が容易になった。



図16 試験車に設置した基礎ブレーキ

5. 試験車によるブレーキ試験

5.1 非常ブレーキ停止距離

東北新幹線区間で、試験車によるブレーキ試験を実施した。高減速ブレーキ試験のブレーキ停止距離測定結果を図17に示す。

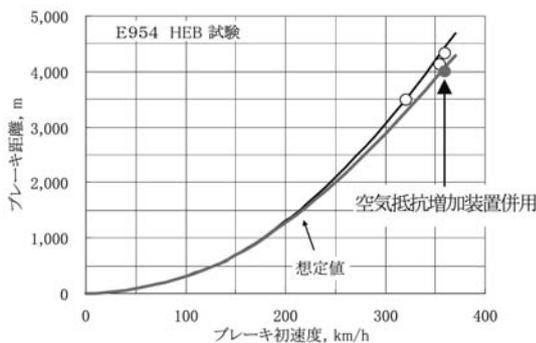


図17 高減速非常ブレーキ試験の停止距離

ブレーキ試験では、雨天にもかかわらず、想定した距離で停止した。空気抵抗増加装置を併用して、360km/hの速度から4,000mで停止する目標を達成した。

空気抵抗増加装置のブレーキ距離短縮効果はおおよそ300mであった。空気抵抗増加装置は先頭部で空気抵抗が大きく、後位のそれは乱流の影響と思われるが空気抵抗が小さくなるのが分かり、当初の想定より停止距離短縮効果は小さかった。

試験後のディスク、ライニング状態は継続して使用できる状態で、問題ないことを確認した。図18に試験後のライニング状態を示す。

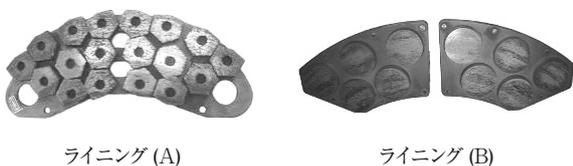


図18 ブレーキ試験後のライニング状態

5.2 滑走制御の改良

冬季の散水環境での非常ブレーキ試験で、車輪固着という現象があった。固着により車輪踏面にフラットを引き起こしてしまった。原因は、列車全体の速度に対し、固着を引き起こした1両が自分自身の速度を見失ったためである。そのときの車輪速度を図19に示す。4輪軸とも滑走制御を行っている。

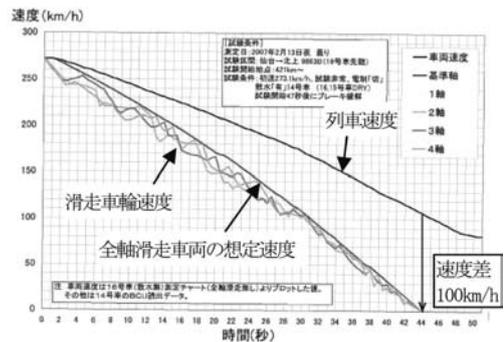


図19 車輪固着時の車輪速度

滑走制御は、滑走した車輪のブレーキを緩めて、車輪を再粘着させる。再粘着は、1両中の4輪軸のうちもっとも速度の高い輪軸速度を基準としている。また、4輪軸すべてが滑走した場合は、ブレーキの想定減速度から割り出した速度を基準としている。今回の場合、4輪軸とも高速から滑走しており、徐々に基準速度が実際の列車速度より低くなり、結果的に4輪軸とも固着した。

車輪固着対策として、滑走車輪が滑走から回復したことを認知する条件を変更した。その結果、冬季の散水条件でこのような固着問題が再発することはなかった。なお、この高減速非常ブレーキにおいて、異常な場合を除き想定した停止距離を確保できることを確認した。

6. おわりに

360km/hの新幹線高速化のために、ブレーキ制御方法および基礎ブレーキの開発を行った結果を以下に記す。

- (1) 360km/hからの目標とするブレーキ停止距離4,000mを確保した。
- (2) 基礎ブレーキ装置は、中央締結ディスク、分割式ライニング、空圧式キャリパとし、現行のものと比較すると大幅な変更を行うことで、高速ブレーキ性能向上、軽量化を実現した。
- (3) 滑走制御の改良により、車輪固着という走行を害する問題を解決した。

今回の高速化対応のブレーキは、完成度の高いものと考えている。しかし、営業車に搭載しての長期にわたる使用では、想定しない不具合の発生や多くの改善要求が浮上することは通例である。当センターでは、こうした問題にも応えて、さらに高性能のブレーキを構築していく所存である。