

定置試験でブレーキの性能を調べる

西森 久宜

車両制御技術研究部(ブレーキ制御 研究員)



にしもり ひさのり

はじめに

たくさんの人を乗せて走行する鉄道車両には高い安全性が求められます。ブレーキ装置は車両を減速させ安全に停止させる装置であるため、いかなる状況においてもブレーキが確実に動作することが求められます。特に機械ブレーキ装置は、回生ブレーキなどの電気ブレーキが使用できない場合の最後の砦となることから、高い安全性・信頼性が求められます。そのため、新たな制輪子を開発した場合には、その制輪子のブレーキ性能を把握することが必要不可欠となります。このような場合、実物大ベンチ試験機による定置ブレーキ試験を行うことで制輪子の性能確認を行います。本稿では、ベンチ試験機を用いた定置ブレーキ試験に関して、通常ブレーキ性能を評価するのに必要となる各項目の測定方法を紹介します。また、通常のブレーキ性能試験とは異なる、特殊な試験条件におけるブレーキ試験の方法についても例を挙げて紹介します。

摩擦係数の測定

機械ブレーキは、車輪やブレーキディスクなどの回転体に制輪子を押しつけ、摩擦力を発生させることで減速させるものです。図1は車両で用いられている踏面ブレーキ装

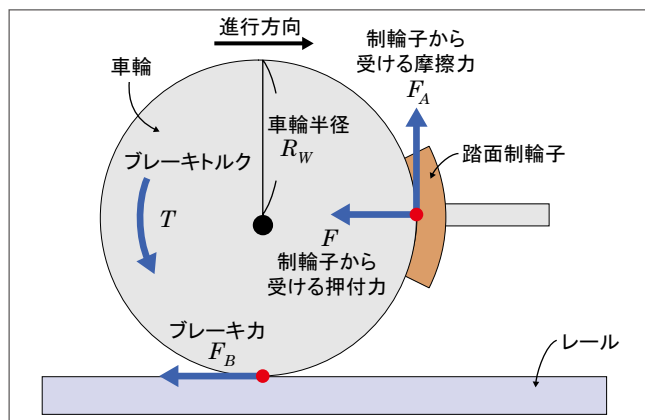


図1 踏面ブレーキ装置のブレーキ力発生模式図

置におけるブレーキ力発生の様式図を表しています。

このように、摩擦力 F_A によってブレーキ力 F_B が得られることから、必要なブレーキ力が得られているかどうかの評価には、押付力 F との比で表される摩擦係数が用いられます。機械ブレーキ装置で使用する制輪子には各々の種類によって摩擦係数の想定値が決められています。この摩擦係数の想定値や車両の設定減速度などから、摩擦力を得るための制輪子を押し付ける力(押付力)が決定されます。そのため、摩擦係数が想定値から大きく乖離すると摩擦力の低下につながることから、摩擦係数の把握はブレーキ性能試験を行う上で非常に重要となります。ベンチ試験の場合、押付力はブレーキ装置に供給される圧力(空気圧あるいは油圧)を測定し、そこからシリンダ径などのブレーキ装置の諸元を用いて算出します。一方、摩擦力については、

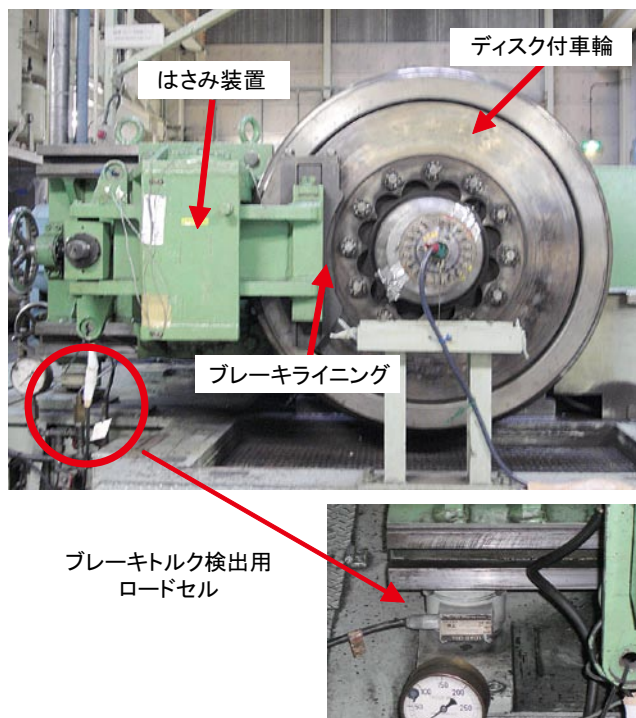


図2 ディスクブレーキ試験装置外観

ベンチ試験機に取り付けてあるロードセルによって、ブレーキ時に発生するブレーキトルク T (踏面ブレーキ：摩擦力 F_A と車輪半径 R_w の積、ディスクブレーキ：摩擦力とディスク有効半径の積) を測定することにより、摩擦力を算出しています。

このようにして得られた押付力と摩擦力から摩擦係数を求めます。図3は新幹線用ディスクブレーキ装置を用いて初速度300km/hから非常ブレーキ相当のブレーキ試験を行った時の摩擦係数の測定結果です。横軸は車輪の速度を表しており、摩擦係数は常に一定の値ではなく、減速とともに変化していることがわかります。この得られた摩擦係数について試験で用いた制輪子の想定摩擦係数値と比較することにより評価を行うこととなります。

温度の測定

先に述べたように、機械ブレーキは摩擦によってブレーキ力を得ています。そのため、ブレーキ時には摩擦による熱が発生します。この摩擦熱によって車輪やブレーキディスク、制輪子の温度が上昇することになりますが、温度が高くなるにつれて車輪や制輪子などに損傷が発生する可能性が懸念されます。また、制輪子の摩擦係数は温度の影響を受けることから、温度測定はブレーキ性能を把握する上で重要な項目となります。

温度測定の方法としては、接触式と非接触式があります。前者は熱電対やサーモラベル、後者は放射温度計が挙げられますが、ここでは熱電対を用いた温度測定方法について紹介します。熱電対は2種類の異なる金属導線から成り立っており、熱によって生じる両金属の起電力の差を利用(ゼーベック効果と呼ばれます)して温度測定を行うも

のです。熱電対はJIS 1602にあるように様々な種類があるため、測定温度の範囲に応じて適切な熱電対を選択する必要があります。

温度測定的位置についてですが、通常のブレーキ性能試験では、車輪踏面や踏面制輪子では摩擦摺動面から深さ10mmの位置、ブレーキディスクやブレーキライニングでは摩擦摺動面から深さ6mmの位置での温度測定が多く行われます(ただし、試験目的によって温度の測定位置は異なるため、この限りではありません)。次に熱電対の取り回しですが、車輪やブレーキディスクは回転体であるため、そのまま測定器に接続することはできません。そこで、スリップリングと呼ばれる回転体・固定体間の電気信号を伝える装置に熱電対を接続して計測を行います(制輪子については非回転体ですのでスリップリングに接続する必要はありません)。図4は先程の摩擦係数の測定と同様に、初速度300km/hから非常ブレーキ相当のブレーキ試験における温度測定結果を示しています。縦軸は車輪の速度およびブレーキディスク、ライニングの測定温度、横軸はブレーキ時間を表しており、この結果では、ブレーキが動作するとブレーキディスク、ライニングともに上昇し、ライニングでは800℃を越える温度にまで達していることがわかります。このようにして測定された温度に対して、それぞれの使用目安値と比べることで実用上問題がないかの評価を行うこととなります。

ブレーキ距離・減速度

在来線を走る車両では、最高速度から非常ブレーキによる制動距離は600m以下を標準とすることが省令の解釈基準に示されており、また、新幹線についても非常ブレーキ

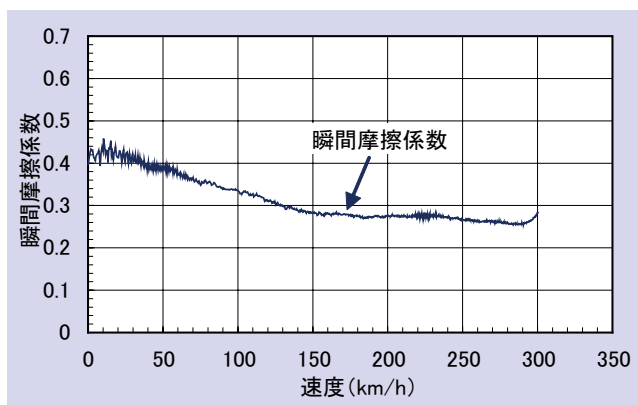


図3 ブレーキ時における摩擦係数の測定結果
(ブレーキ初速度300km/h 非常ブレーキ相当)

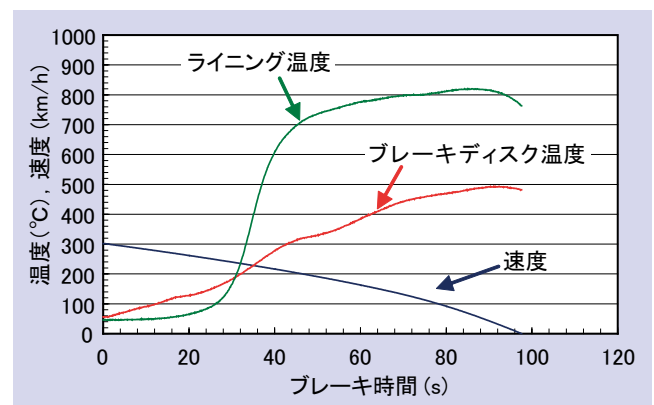


図4 ブレーキ時における温度の測定結果
(ブレーキ初速度300km/h 非常ブレーキ相当)

表1 新幹線車両のブレーキ減速度に関する規則値

| 列車速度 (km/h) | 減速度 (km/h/s) |
|-------------------|--------------|
| 230 を超える場合 | 1.5 |
| 160 を超え 230 以下の場合 | 1.9 |
| 110 を超え 160 以下の場合 | 2.5 |
| 70 を超え 110 以下の場合 | 3.1 |
| 70 以下の場合 | 3.4 |

使用時において、各速度域で満たさなければならない減速度が決められています(表1)。そこで、車両がこれらの条件を満たしているかを確認することが必要になります。

ベンチ試験の場合には、ブレーキ距離は試験機に取り付けられているエンコーダのパルス出力から得られる車輪の回転数を用いて求めています。また、減速度については、ブレーキ時間 t を基準とした時間平均減速度 β_t とブレーキ距離 S を基準とした距離平均減速度 β_s の2種類があり、各々式(1)および式(2)によって算出されますが、通常は距離平均減速度 β_s を用いて評価が行われます。ここで、 V_0 はブレーキ初速度、 V_e はブレーキ終速度を表しています。

$$\beta_t = \frac{V_0 - V_e}{t} \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta_s = \frac{V_0^2 - V_e^2}{7.2S} \dots\dots\dots (2)$$

制輪子の摩耗量

機械ブレーキを動作させると、摩擦によって摺動材は摩耗します。車輪やブレーキディスクは制輪子に比べて硬い材質であることから、制輪子側が摩耗していくことになります。制輪子が摩耗限界に達すると新たな制輪子に交換しなければなりません。つまり、同じブレーキ性能を示す制輪子であれば、摩耗量が少ない方がメンテナンス面でより有利となります。そこで、ブレーキ試験の前後における制輪子の重量を測定し、重量差とブレーキ試験回数からブレーキ1回当たりの摩耗量を算出します。また、制輪子の材料密度、摺動面積が既知の場合には、以下の式(3)を用いて制輪子の摩耗厚さを算出して評価を行います。

$$t = \frac{W}{\rho A} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 t はブレーキ1回当たりの摩耗厚さ、 W はブレーキ1回あたりの摩耗量、 ρ は材料密度、 A は制輪子の摺動面積を表しています。なお、摩耗厚さについては摺動面全体が均一に摩耗していると仮定した値なので、制輪子に偏摩耗が生じていないか、実際に確認を行うことが必要となります。



図5 冷却後の状態(氷点下10℃以下)

各々の目的に応じたブレーキ試験

前節までは通常のブレーキ試験にて行われる測定項目について紹介しました。ベンチ試験はこのようなブレーキ装置の純粋な性能の把握に使用されるのは勿論ですが、他にも色々な目的で行われます。例えば、ブレーキ時において確認される諸事象の再現、あるいはより走行環境に近い条件におけるブレーキ性能の把握などが挙げられます。これらの試験は、通常のブレーキ試験の方法だけでは目的を達成することは難しいため、何らかの工夫が必要となります。そこで、次は各々の目的に応じたブレーキ試験の実施について、具体例を挙げて紹介したいと思います。

低温環境試験

気象条件は車両のブレーキ性能に大きく影響を及ぼす要因です。そのため、ベンチ試験では乾燥条件のブレーキ試験だけではなく、湿潤条件、さらには降雪条件における試験を行って性能を把握します。これらの湿潤・降雪試験はブレーキ時に摩擦面の上部から散水・降雪を行うものであり、温度条件としては常温、あるいは約0℃の低温条件で行われています。しかしながら、実際の車両は0℃以下の

条件でも走行しています。そこで、より低温環境を模擬した条件でのブレーキ性能試験を行うために、車輪踏面、ブレーキディスクおよび制輪子を氷点下まで冷却し、着氷させることを試みました^{1),2)}。図5は冷却し着氷状態にしたブレーキディスク、車輪踏面、制輪子の様子です。冷却については、各々に対して冷却用の治具を製作し、冷却剤を治具に投入することによって氷点下までの冷却を実現しました。また、従来は液体窒素を冷却剤として用いていましたが、今回はドライアイスを用いています。これにより、今までに比べて安全で安価に効率よく冷却することが可能となりました。

車輪踏面熱亀裂の再現

踏面ブレーキが用いられている車両の車輪では、踏面部分に小さな亀裂が発生することが知られています。これは、車輪踏面熱亀裂と呼ばれており、ブレーキ時に生じる摩擦熱が原因と考えられていました。この熱亀裂は、実車では確認されるにもかかわらず、ベンチ試験においては実車と同様な亀裂が発生しませんでした(図6)。そこで、より実車の状況に近づけるため、これまでは車輪単体で回転させていましたが、車輪とレールとの接触を考慮したブレーキ試験を行いました。

図7は再現試験に用いたブレーキ試験装置の外観です。図の右端にある軌条輪がレールに相当し、車輪を軌条輪に押し当てて軌条輪を回転させることで、車輪が回転する仕組みとなっています。このように車輪と軌条輪を接触させながら回転した状態(これを転動と呼びます)でブレーキ試験を行った結果、図8に示すように実車と同様の踏面熱亀裂を再現することができました³⁾。これにより、車両踏面に発生する熱亀裂は、従来考えられていた摩擦熱の影響に加えて、車輪とレールの転動も影響していることがわかりました。

おわりに

ベンチ試験機はブレーキの基本性能を把握するだけでなく、ブレーキ特有の様々な現象を考察するのに非常に有用な装置です。限られた条件で様々な目的の試験に対応することは簡単なことではありませんが、これからもブレーキ装置の安全性・信頼性を高めることに貢献できるよう研究・開発を行っていきます。**RRR**

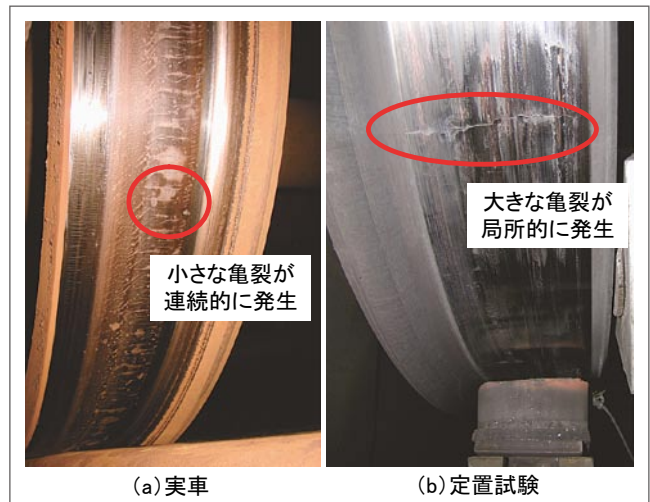


図6 車輪踏面に発生した熱亀裂の様子

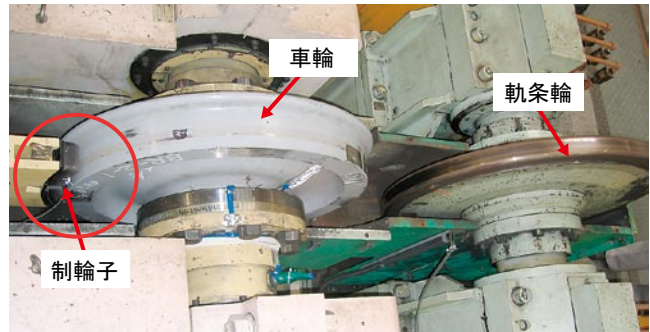


図7 熱亀裂の再現試験に用いた試験装置の外観

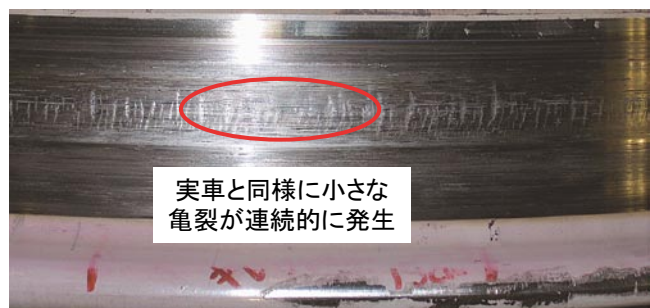


図8 再現試験により発生した熱亀裂の様子

文献

- 1) 嵯峨信一：氷結条件におけるディスクブレーキの摩擦特性，第14回鉄道技術・政策連合シンポジウム J-Rail 2007, pp335-336, 2007
- 2) 嵯峨信一：冰雪条件を模擬した台上ブレーキ試験の試行，第15回鉄道技術・政策連合シンポジウム J-Rail 2008, pp109-110, 2008
- 3) 半田和行，小原孝則，宮内瞳道，西村浩一：車輪踏面熱亀裂の生成に影響する因子の検討 第14回鉄道技術連合シンポジウム J-Rail 2004, pp347-350, 2005