

3711 鉄車輪とコンクリート間に作用するクリープ力と摩擦係数

正 [機] ○土井 久代 (鉄道総研) 西尾 壮平 (鉄道総研) 後安 慧 ((株) テス)

正 [機] 宮本 岳史 (鉄道総研) 正 [土] 上田 洋 (鉄道総研)

Characteristics of Creep Forces and Friction Coefficients between Steel Wheels and Concrete Slabs

Hisayo DOI, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji, Tokyo

Sohei NISHIO, Railway Technical Research Institute

Satoshi GOAN, TESS Co., Ltd.

Takefumi MIYAMOTO, Railway Technical Research Institute

Hiroshi UEDA, Railway Technical Research Institute

It is very important to secure running safety of railway vehicles even when vehicles get derailed. In 2004, a Shinkansen train was derailed by a huge earthquake and its derailed wheels run on concrete slabs. Taking account of this kind of accidents, a number of vehicle-guide devices have been developed. Some of these devices are designed to lead derailed wheels onto a runway made of concrete slabs. In order to simulate the derailed cars' running behavior on a runway of concrete slabs, it is necessary to have creep force characteristics and friction coefficients between wheels and concrete slabs, which are essential elements in determining vehicle dynamics. There is scarcely a study of rolling contact between steel wheels and concrete slabs, therefore the authors have executed an experimental investigation to evaluate creep force characteristics and friction coefficients between a steel testing wheel and a concrete slab.

Keywords: rolling contact, creep force, friction coefficient, steel wheel, concrete slab, derailment, vehicle dynamics

1. はじめに

鉄道車両の走行安全性を確保するためには、まず、車両を脱線・転覆させないための対策が重要である。しかしながら、大規模な地震動や想定外の事態により、脱線等が起こる可能性を否定することはできない。実際に、1995年1月の兵庫県南部地震や2004年10月の新潟県中越地震では、列車が脱線するという事象が発生した。特に新潟県中越地震による脱線は、開業以来初めて新幹線電車が営業走行中に脱線するというものであり、社会的にも大きな衝撃を与えた。脱線した新幹線車両の車輪はコンクリートスラブ上を転がったり、滑ったりした痕跡を残したが、幸いにも車体の転覆は免れた。このような背景から、たとえ列車が脱線したとしても、その後の安全性を確保して被害を最小限に抑えるための方策・施策の重要性がますます高まってきている。

大規模地震動による鉄道車両の脱線を想定した対策は、車両面においては軸箱等の下部に設置するストッパガイドを用いて脱線した車両の逸脱を防止する転倒防止装置¹⁾、施設面においては逸脱防止ガードや、車両側のストッパガイドをより有効に機能させるためのレール転倒防止装置などが提案され、それらの性能評価についての検討がされている^{2), 3)}。また、コンクリートスラブ軌道上で脱線が発生した場合に、コンクリートで構成された車輪走行案内路に作用する車輪の衝撃力や接触力に関する研究も進められている⁴⁾。

以上のように、鉄道車両の脱線後の走行安全に対して

取り得る対策について検討がなされる一方、実際に脱線後の車両がどのように走行するかについて知ること重要である。それには車両運動解析が有効であると考えられる。脱線後の車両の挙動をよりよく模擬するためには、車両の運動に大きな影響をおよぼす車輪と車輪走行路間に作用する摩擦係数やクリープ力(または接線力と呼ぶ)の特性を知る必要がある。従来の車両運動解析は鉄車輪・鉄レール間を対象としており、それらの間に働くクリープ力や摩擦係数についての研究は幅広く行われてきているが、例えば、鉄車輪とコンクリートスラブ間の摩擦現象に限っても、それに関する研究はほとんどない。そこで、鉄車輪とコンクリート平板の間にどのようなクリープ力や摩擦係数を生じる可能性があるかについて、基礎的な試験を実施したので報告する。

2. 試験の概要

2.1 試験装置

本試験では、鉄車輪とコンクリート平板の間に作用するクリープ力特性や摩擦係数を得るためにクリープ力試験装置「クリープテスト⁵⁾」(Fig.1)を用いた。クリープテストはその試験車輪(鉄鋼製)と供試体(主としてレールを想定している)との間のクリープ力特性や摩擦係数を調べることのできる小型の試験装置である。鉄とコンクリート平板間の摩擦係数を知るには、レールトリボメータ⁶⁾や μ テスト⁷⁾といった摩擦係数測定装置を用いることも考えられる。しかしながら、それらの測定装置

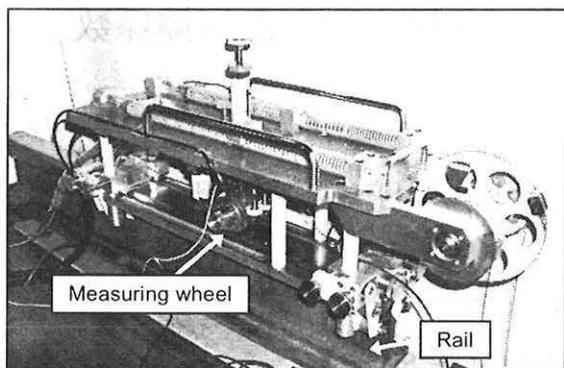


Fig.1 Overall view of the Creep Tester set on a rail of 1m-length

は車輪の転がり接触状態を模擬していないためクリープ力特性が得られない。そこで本試験ではクリープテストを試験装置として選択した。また、コンクリートはそれを作製する際、気泡等による細かい欠損部ができる可能性がある。クリープテストは、レールトリボメータや μ テストで使用される鋼球や車輪よりも大きな車輪半径をもち、同等の接触圧においてより大きな接触面積を実現することができるため、接触面内での欠損部の割合を減らすことができる。即ち、真に接触している部分の割合を増やすことができる。したがって、摩擦係数の測定にあたって、今回の目的に対してはレールトリボメータや μ テストよりも有利な条件で試験を実施することができるかと推察される。

試験全体の構成概念図を Fig.2 に示す。クリープテストは主として試験車輪、台車、縦接線力負荷機構で構成された試験装置である。クリープ力特性、即ち、車輪・レール間のすべり率とクリープ力の関係は、台車の走行に追従して転がる試験車輪に縦接線力負荷機構で徐々に荷重を与えながら、台車と試験車輪の走行速度および作用力（縦クリープ力 F_x 、横クリープ力 F_y 、法線力 N ）を測定することで調べることができる。この装置は本来、レール上に設置して使用する試験装置であり、コンクリート片等にそのまま取り付けることができない。そこで本試験では、コンクリート上でクリープテストの試験車輪を転がすために、1m の長さで切断した実物レールの中央付近を切り欠き、その中に次節に示す供試体を埋め込んだ試験用レールを製作した (Fig.3)。

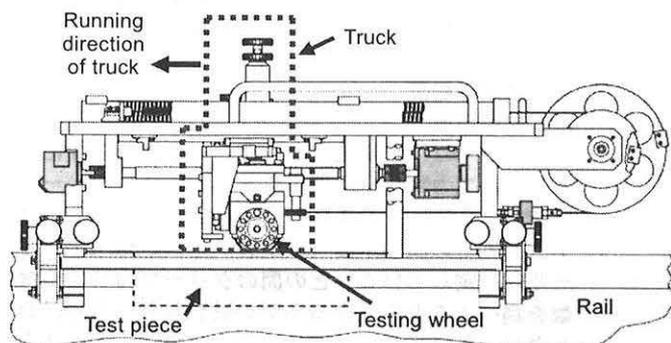


Fig.2 Schematic diagram of the experiment (side view)

2.2 供試体

本試験では、供試体としてモルタル材 (Fig.3) を使用した。モルタルの構成体はセメント、水、細骨材であり、コンクリートはそれらに加えて粗骨材が含まれる。モルタルとコンクリートでは粗骨材の有無の違いがあるものの、コンクリート構造物におけるその表面は、コンクリートが損傷や劣化などにより変状を生じていない場合、コンクリートとモルタルで大差はなく、車輪との接触面は事実上モルタルであると考えられること、また、作製や供試体の切断といった加工がより簡便であることから、供試体はモルタル製とした。

本試験はクリープテストをセメント硬化体に対して試験的に適用するものである。したがって、供試体は代表的なセメント硬化体とする必要がある。そこで、使用材料および配合は、日本工業規格 (JIS) ⁸⁾ に規定されるセメントの強さ試験用の供試体の使用材料および配合に準じた。

供試体の材料特性を把握するため、供試体の打設と同時に作製した直径 50 mm、高さ 100mm の円柱供試体による圧縮試験を実施し、圧縮強度および静弾性係数の測定を行った。一般に、セメント硬化体の圧縮強度および静弾性係数の試験方法に関する規格は、コンクリートの場合は JIS に規定されているが、規格名に「モルタル」と冠したものはない。文献⁸⁾にモルタル供試体による曲げ強度試験と圧縮強度試験が示されているが、同試験方法において使用される供試体では静弾性係数を測定することが困難である。そこで今回は、コンクリートで規定される同様の試験方法を小型の円柱供試体に対して準用し、モルタルの圧縮強度および静弾性係数を評価することとした。本円柱供試体の圧縮強度および割線静弾性係数を Table 1 に示す。ここで圧縮強度とは、供試体の圧縮載荷時の最大荷重を供試体断面積で除した値である。また割線静弾性係数とは、供試体の応力-ひずみ曲線において最大荷重の 1/3 に相当する応力と供試体の縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力とを結ぶ線分の勾配として与えられる数値であり、コンクリートは通常この割線静弾性係数で評価する。本供試体の静弾性係数は約 32GPa であり、鉄鋼材の静弾性係数の 206GPa に比べて 1 桁小さい。

試験用レールに埋め込んだモルタル供試体は、走行面の長さ 180mm、幅 50mm、高さ 60mm の直方体で、試験用レールに収まるようにカットした。なお、クリープテストの試験車輪と接する測定面は、モルタル表面に形成される気泡の影響を避けるため気泡の比較的小さいモルタル打設時の底面とした。脱型後に特別な表面処理等は

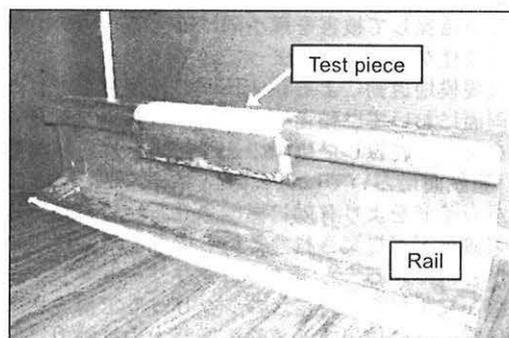


Fig.3 Test piece embedded in a rail

Compressive strength	58.2 MPa
Secant modulus of elasticity	32.4 GPa

Test piece	Material: cement mortar Size: 180mm×50mm×60mm Surface: flat Surface roughness Ra: 2.5μm
Testing wheel	Material: Steel (C105U) with quench hardening Diameter: 60 mm Profile: 30 mm-radius arc Surface: spherical Surface roughness Ra: 0.3μm
Normal force N	300 N
Truck velocity V_t	20 mm/s
Settings of yaw angle	0, 0.6 deg.

行っていない。供試体測定面の算術平均表面粗さ Ra はおよそ 2.5μm である (Table 2)。

2.3 試験条件

本試験の主な試験条件を Table2 に示す。本試験は気温 23.7~25.1℃、湿度 53.4~61.4%の室内で実施した。

供試体は前節で述べたとおりであり、その測定面上は水等の付着がない乾燥状態とした。クリープテストの試験車輪は、供試体と接する部分が半径 30mm の球面となっているものを用いた。故に接触面の形状は円形となる。試験車輪に負荷する法線力 N は、クリープテストで設定できる最も大きな値である 300N とした。Table 1 に示した供試体の静弾性係数を用い、試験車輪と供試体が共に弾性変形すると仮定したときの最大接触面圧および平均面圧を Hertz の接触理論により求めると、それぞれおよそ 380MPa および 250MPa となる。また、接触円の直径は約 1.2mm と見積もれる。

本試験では、車輪が横すべりを伴いながら転がる場合も考慮し、試験車輪に旋回角 (ヨー角) を付与した条件も設定した。試験車輪ヨー角が 0.6° の場合、横すべり率はおおよそ 1% である。

なお、クリープテストでは 1 回の測定で幅広いすべり率のデータを得ることができるが、試験の再現性等を鑑み、試験車輪ヨー角 1 条件につき測定をそれぞれ 20 回試行した。また、全ての測定で用いた試験車輪は 1 つであり、試験車輪ヨー角 1 条件につき、同一の供試体上の異なる試験車輪走行面を設定した。

3. 試験結果

試験により得られたクリープ力特性を Fig.4~Fig.6 に示す。クリープテストを用いた試験では、測定中、試験車輪ヨー角は一定であるため、横すべり率も一定となる。そこで本稿では、クリープ力特性を縦すべり率 s_x に対するクリープ力・法線力比として示す。図中、 F_x は縦クリープ力、 F_y は横クリープ力、 N は法線力、 F は合クリープ力 ($F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$) である。なお、試験車輪ヨー角が 0° のときは横すべりが発生しないため横クリープ力も発生せず、縦クリープ力が即ち合クリープ力に等しくなる。

Fig.4 は、縦すべり率が 80% 程度までの範囲を測定して得られたクリープ力特性を示す。縦すべり率がおおよそ

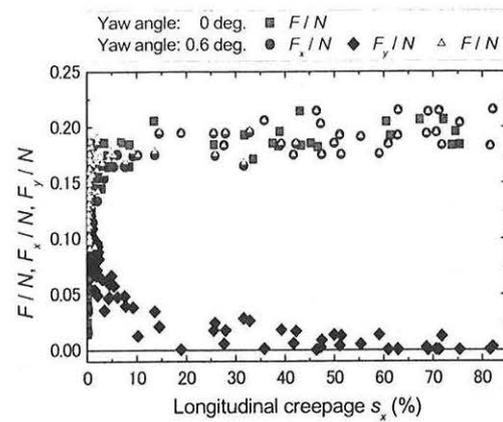


Fig.4 Creep force characteristics for a wide range of longitudinal creepage

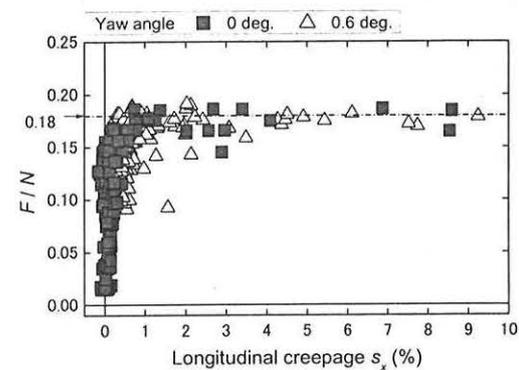


Fig.5 Comparison with absolute creep forces about small longitudinal creepage under different settings of yaw angle

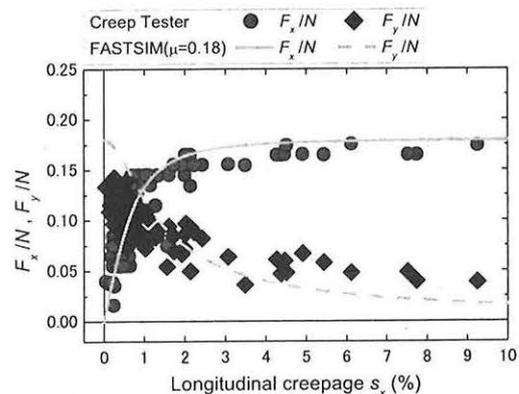


Fig.6 Relationship of the longitudinal and lateral creep force about small longitudinal creepage under yaw angle of 0.6 degrees with theoretical values calculated by FASTSIM

20%を超過すると、合クリープ力・法線力比は試験車輪ヨー角が異なってもほぼ等しくなり、かつ、ある値に飽和することがわかる。このときの合クリープ力・法線力比はいわゆる摩擦係数を示し、Fig.4 より摩擦係数は 0.2 程度と見積もることができる。また本図より、試験車輪ヨー角 0.6° の場合、縦すべり率が大きくなると横クリー

ブ力・法線力比はほぼ0となり、合クリープ力は縦クリープ力に一致してくる。

車輪が軌道上を転がりながら走行する際には、すべり率が小さな領域でのクリープ力特性が重要となってくる。そこで Fig.4 に示したデータの内、縦すべり率が 10%までのクリープ力特性を Fig.5, Fig.6 に示す。Fig.5 は試験車輪ヨー角 $0, 0.6^\circ$ の場合の合クリープ力・法線力比について示したものである。このすべり率の領域においても、試験車輪ヨー角によらず合クリープ力・法線力比はほぼ同様の特性を示し、約 0.18 に飽和した。Fig.6 は試験車輪ヨー角 0.6° の縦クリープ力と横クリープ力の関係を示している。またここでは実験値とあわせて、摩擦係数を 0.18 と仮定した場合の Kalker の FASTSIM⁹⁾ による理論値をプロットした。FASTSIM は車両運動解析にしばしば用いられている単純化クリープ力理論によるクリープ力計算アルゴリズムである。クリープテストを用いた測定では、試験車輪は定常転がり状態ではない点等が FASTSIM の前提と異なるが、Fig.6 に示す結果から、本供試体と鉄車輪に作用するクリープ力の模擬に、FASTSIM を用いることが妥当である可能性を確認することができた。

4. 考察

本試験結果より、コンクリートを模したモルタル供試体と鉄車輪の間の摩擦係数は 0.18~0.20 程度であることがわかった。文献5)に示したクリープテストによる基礎試験の結果と比べると、この試験の摩擦係数は、乾燥状態における鉄車輪・鉄レール間の摩擦係数 0.4~0.5 程度に比べて小さく、また、鉄車輪・鉄レール間を油で潤滑した場合の 0.10~0.13 程度に比して大きな値である。

文献5)で得られた値は、実物の輪重に相当する最大接触面圧を負荷した条件下での結果である。また、クリープテストの試験車輪とはスケールの異なる 2 円筒転がり試験装置やレールトリボなどで得られる鉄同士との間の摩擦係数と同程度であることを確認している。しかしながら本稿の結果は、比較対象となる他の参考試験データがなく、また実物の車輪とコンクリートスラブ間に相当する接触圧をクリープテストで実現できない点において、実物車輪・コンクリートスラブ間の摩擦係数として本試験結果をそのまま適用するには注意を払う必要がある。

第 2.3 節の試験条件で示したとおり、法線力 300N の負荷において試験車輪と供試体が共に弾性変形すると考えた場合の最大接触圧および平均接触圧は 200~400MPa 程度であり、接触円の直径は約 1.2mm である。試験後、供試体の走行面を観察したところ、特に大きな縦すべりが発生した箇所において、走行の痕跡が供試体上に残っていた。その接触幅を測定したところ、0.9~1.3mm 程度であり、弾性変形として考えた場合の接触幅と大差なかった。また本試験条件下では、供試体上にき裂等が生じた痕跡を確認することはできなかった。一方、脱線後の実物の車輪がコンクリートスラブ上を走行する場合、車輪はフランジ先端部で走行する。そのため、車輪踏面がレール上を走行する場合と比べて接触圧が非常に大きくなると考えられる。フランジ先端部とコンクリート間の接触圧を、弾性域範囲、新幹線円弧踏面のフランジ先端部の形状を先端部の直線範囲を見込んで半径 14mm の円弧、コンクリートの縦弾性係数を 20~30GPa であると仮定して、輪重 60kN 時の最大接触圧を Hertz 理論で概算すると 1000~1500MPa となる。これは試験条件の 3.4 倍大きく、この接触圧による摩擦係数への影響を考慮するこ

とが課題の 1 つである。

また、摩擦係数は走行速度に依存する場合がある。鉄車輪・鉄レール間の接触で、接触域の振動等がない場合、乾燥状態では摩擦係数は速度に依存しないが、他の物質（例えば水）を介した接触の場合、高速になると摩擦係数が小さくなると考えられている¹⁰⁾。したがって、鉄車輪のコンクリートスラブとの接触における摩擦係数の速度依存性について知ることも課題であると考えられる。

5. まとめ

鉄車輪とコンクリートスラブ間のクリープ力特性および摩擦係数について、小型クリープ力試験装置「クリープテスト」およびコンクリートスラブを模したモルタル供試体を用いて基礎的な試験を試みた。その結果、本試験条件下の鉄車輪・コンクリートスラブ間の摩擦係数は 0.2 程度であった。これにより、コンクリートスラブ接触時の摩擦係数は、乾燥状態の鉄レールとの接触時よりも小さいことが推察される。また、そのクリープ力特性は Kalker の FASTSIM で模擬できる可能性のあることも示した。

ただし、用いた試験装置では実車輪とコンクリートスラブ間の最大接触圧を模擬できない点に課題が残る。その他、摩擦係数の速度依存性等についても今後の課題である。

参考文献

- 1) 石田弘明, 前橋栄一: 車両脱線時の転倒防止装置, 特許番号第 3393032 号, 2003.
- 2) 柳川秀明: 軌道における地震時の新幹線脱線対策, 第 210 回鉄道総研月例発表会講演要旨, 2008.
- 3) 曾我部正道, 浅沼潔, 涌井一: 地震時列車逸脱防止ガードの性能評価法の開発, 鉄道力学論文集 (第 11 回鉄道力学シンポジウム講演論文), pp.69-74, 2007.
- 4) 後藤恵一, 曾我部正道, 渡辺勉, 浅沼潔, 小尾博俊: 鉄道車輪と走行案内路の接触力に関する研究, 鉄道力学論文集 (第 13 回鉄道力学シンポジウム講演論文), pp.62-69, 2009.
- 5) 土井久代, 宮本岳史, 西山幸夫, 大江晋太郎, 蒲地秀矢: 車輪/レール間クリープ力試験装置「クリープテスト」の開発, 鉄道総研報告, Vol.23, No.2, pp.45-50, 2009.
- 6) 大野薫, 伴巧: レールトリボメータの改良と車輪・レール間の粘着状態の評価, 鉄道技術研究所速報, No.A-87-118, 1987.
- 7) 前橋栄一, 飯田浩平, 西山幸夫: 車輪およびレールの摩擦係数測定装置 μ テスタの開発, 鉄道総研報告, Vol.20, No.11, pp.23-28, 2006.
- 8) JIS R 5201: セメントの物理試験方法, 1997.
- 9) Kalker, J.J.: A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact, Vehicle System Dynamics, Vol. 11, pp. 1-13, 1982.
- 10) Ohya, T.: Some Problems of the Fundamental Adhesion at Higher Speeds, Quarterly Reports of RTRI, Vol.14, No.4, pp.181-187.