

クリープテストを用いた車輪／コンクリート間の 摩擦係数測定

土井 久代* 宮本 岳史* 西尾 壮平**
後安 慧*** 上田 洋**

Experimental Investigation of Friction Coefficient between Steel Wheel and Concrete Slab

Hisayo DOI Takefumi MIYAMOTO Sohei NISHIO
Satoshi GOAN Hiroshi UEDA

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 ran 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 so as 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 make clear creep force characteristics and friction coefficients between wheels and concrete slabs, which are essential elements in determining vehicle dynamics. However, 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.

キーワード：車両運動，脱線後，コンクリート，車輪，摩擦係数，模型実験

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。2004年10月の新潟県中越地震では、開業以来初めて新幹線電車が営業走行中に脱線した。このとき新幹線車両は停止するまでの間に車輪がコンクリートスラブ上を転がり、滑ったり、車体が擦りつけるなどした痕跡を残した。このように、列車が脱線した場合にも、安全性を確保して乗客への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^{1), 2), 3)}。

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も重要である。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（コンクリート

スラブ）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、これまで鉄車輪とコンクリートスラブ間の摩擦現象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. 実験の概要

2.1 実験装置

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⁴⁾」(図1)を用いた。クリープテストはその測定車輪（鉄鋼製）と測定車輪が転がり接触する供試体（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⁵⁾や μ テスト⁶⁾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、

* 鉄道力学研究部（車両力学）

** 材料技術研究部（コンクリート材料）

*** 株式会社テス（技術部）

特集：鉄道力学

それらの測定装置は車輪の転がり接触状態を模擬していないため、すべり率とクリープ力の関係が得られない。

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と推察される。

図1に示すように、クリープテストは主として測定車輪、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測定車輪に縦接線力負荷機構で徐々に荷荷を与えながら、台車と測定車輪の走行速度および作用力（縦クリープ力 F_y 、横クリープ力 F_x 、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測定車輪を転がすために、図2に示すように1mの長さに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コンクリート平板を模擬した供試体を埋め込んだ試験用レールを製作した。

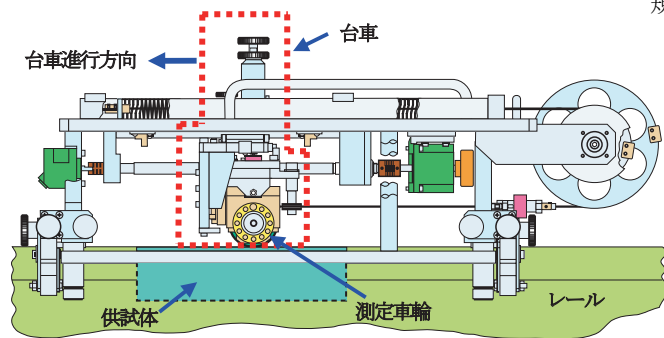


図1 クリープテストによる試験の模式図（側面）

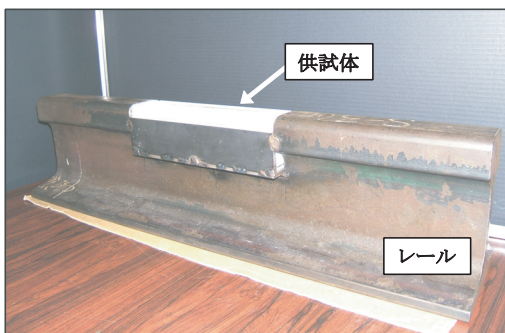


図2 レールに供試体（モルタル）を埋め込んだ様子

表1 試験条件

供試体	材料：モルタル 大きさ：180mm × 50mm × 60mm 表面形状：平面 算術平均表面粗さ (Ra)：2.5 μ m
測定車輪	材料：鋼 (C105U), 焼き入れあり 車輪直径：60 mm 表面形状：半径 30 mm の球面 算術平均表面粗さ (Ra)：0.3 μ m
法線力	300 N
台車設定速度	20 mm/s
測定車輪ヨー角設定	0, 0.6 deg.

2.2 供試体

本試験では、コンクリート平板を模擬する供試体としてモルタルを使用した（表1）。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、車輪との接触面はモルタルが主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、供試体をモルタルとした。

本試験は、クリープテストをモルタルというセメント硬化体の一種に対して試験的に適用するものである。そこで、使用材料および配合は、日本工業規格 (JIS) ⁷⁾ 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期に作製した直径 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7) 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は58.2MPaおよび割線静弾性係数は32.4GPaであった。通常、コンクリートは20～30GPa程度の静弾性係数をもつ。モルタル材である本供試体はコンクリートとほぼ同等の静弾性係数であるといえる。また、鉄鋼材の静弾性係数は206GPaであり、この値に比する本供試体の静弾性係数は1桁小さいことがわ

かった。

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、クリープテストの測定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少な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2.5 μ mである(表1)。

2.3 試験条件

本試験の主な試験条件を表1に示す。本試験は気温23.7~25.1 $^{\circ}$ C、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。クリープテストの測定車輪は、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ており、接触面の形状は円形となる。測定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。実測した供試体の静弾性係数32.4GPaを用い、測定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と見積もられる。

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、測定車輪に旋回角(ヨー角)を付与した条件も設定した。測定車輪ヨー角が0.6 $^{\circ}$ の場合、横すべり率はおよそ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、試験の再現性等に鑑み、測定車輪ヨー角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測定車輪は1つであり、測定車輪ヨー角1条件につき、同一の供試体上の異なる測定車輪走行面を設定した。

3. 試験結果

クリープテストを用いた試験では、測定中、測定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、測定車輪ヨー角が0 $^{\circ}$ 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。

図3に本試験で得られたクリープ力特性を示す。縦すべり率がおよそ20%を超過すると、合クリープ力と法線力の比F/Nは測定車輪ヨー角が異なってもほぼ等しくなり、かつ、縦すべり率に関わらず一定値に漸近すること

がわかる。このときのF/Nはいわゆる摩擦係数を示し、図3より摩擦係数は0.18~0.22と見積もることができる。また本図より、測定車輪ヨー角0.6 $^{\circ}$ の場合、縦すべり率が大きくなると横クリープ力・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、図3で示したデータの内、測定車輪ヨー角0.6degの結果について、縦すべり率が10%までの縦クリープ力と横クリープ力の関係を図4に示す。図4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FASTSIM⁸⁾による理論計算値をプロットした。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、測定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、図4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を用いても大差ない結果が得られることを確認することができた。

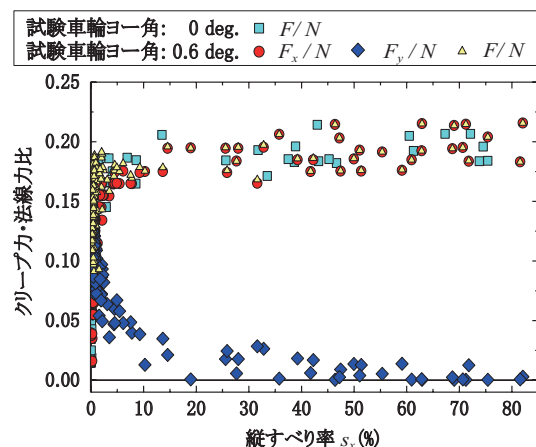


図3 クリープ力特性試験結果

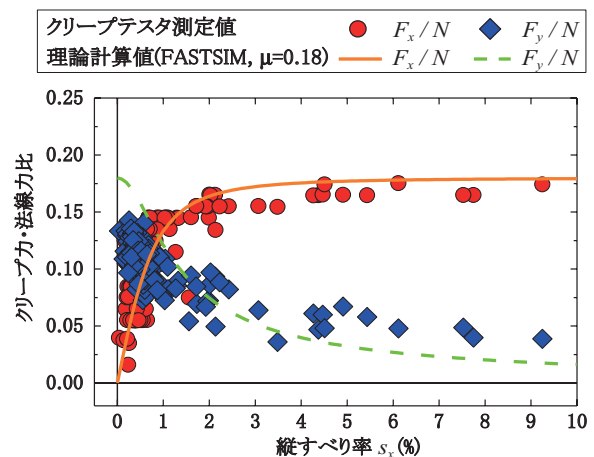


図4 縦・横クリープ力特性測定値と理論計算値の比較 (測定車輪ヨー角: 0.6deg.)

特集：鉄道力学

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0.20程度であることがわかった。文献4)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4)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、クリープテストの測定車輪とはスケールの異なる2円筒筒がり接触試験装置やレールトリボメータなどで得られる鉄同士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、また実物の車輪フランジ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かった点に注意を払う必要がある。

2.3節の試験条件で示したとおり、法線力300Nの負荷において測定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。その接触幅は、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。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時のフランジ先端部とコンクリート間の最大接触圧をHertz理論で概算すると1000～1500MPaとなる。この値は試験条件の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⁹⁾。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の把握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フランジ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。

文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：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) 土井久代、宮本岳史、西山幸夫、大江晋太郎、蒲地秀夫：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
- 5) 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
- 6) 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 テストの開発、鉄道総研報告、Vol.20, No.11, pp.23-28、2006
- 7) JIS R 5201：セメントの物理試験方法、1997
- 8) Kalker, J.J.: A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact, Vehicle System Dynamics, Vol. 11, pp.1-13, 1982.
- 9) Ohyama, T.: Some Problems of the Fundamental Adhesion at Higher Speeds, Quarterly Reports of RTRI, Vol.14, No.4, pp.181-187, 1973.