

小型試験機による車輪／レール間のクリープ力測定技術

鉄道力学研究部 車両力学
副主任研究員 土井 久代

1. はじめに

鉄道車両の走行には、車両を前進させるための駆動力や走行を停止するための制動力が必要であり、これらを車輪とレールの間で伝達する役割を担っているのがクリープ力と呼ばれる接線力である。車輪がレール上を転がる際のわずかなすべりによって発生するクリープ力はまた、車両の不安定な振動である蛇行動や、振動乗り心地、曲線通過性能、車輪フランジの乗り上がり脱線などに大きな影響をおよぼす。したがって、車両の運動を把握する上で、クリープ力の特性を調べることは重要であり、これまでもクリープ力の理論的ならびに実験的研究が多くなされてきている。

実験的研究については、クリープ力は即ち転がり摩擦の問題であるため、簡単には、車輪とレールを円筒で模した2円筒の転がり接触試験、大がかりなものでは、実物の車輪（または輪軸）とレールの頭頂面形状を有した軌条輪を用いた回転試験であることがほとんどである。しかしながら、これらの回転試験機を用いた実験では、車輪と軌条輪は1回転毎に同一箇所で接触するため、摩擦・摩耗によって時々刻々と接触状態が変化してしまう。また、室内での実験に限られる。実際の車輪とレールを用いる場合もあるが、接触面の状態、介在物、実験環境などの状態を制御することが難しく、クリープ力を特徴づける車輪とレールの間に生じるすべりを微小なものから大きな領域まで実験することが困難であるなどの問題がある。

そこで、測定車輪を実物のレール上で転がしながら接触面に作用するクリープ力を変化させ、クリープ力の飽和特性を調べることができる試験装置「クリープテスタ」を開発した。この装置を用いると、車輪／レール間のすべりが小さな領域から大きな領域まで1回の動作で変化させることができ、クリープ力の特性に関わってくるさまざまな条件下における試験を簡便に行える。そして、これまで実レール上で把握することのできなかつた現象を実験により検証することが可能となる。

本報告では、この装置の仕組み、実験方法、データ処理や現時点で得られた知見の一部を紹介する。

2. クリープ力試験装置「クリープテスタ」

開発したクリープ力試験装置（以下、クリープテスタ）は、レール上で転がる測定車輪と測定センサを有する本体、それを制御し測定データの集録と各種の演算を行う装置、パソコン上の専用ソフトウェアプログラムで構成されたシステムである（図1）。以下に、この装置の特徴や測定原理、ならびに制御計測ソフトウェアなどについて述べる。

2.1 クリープテスタの機構と測定原理

図2に、長さ1m程度に切断した実物の50Nレール上にクリープテスタ本体を取り付けた様子を示す。

クリープ力特性とは、一般に、車輪とレール

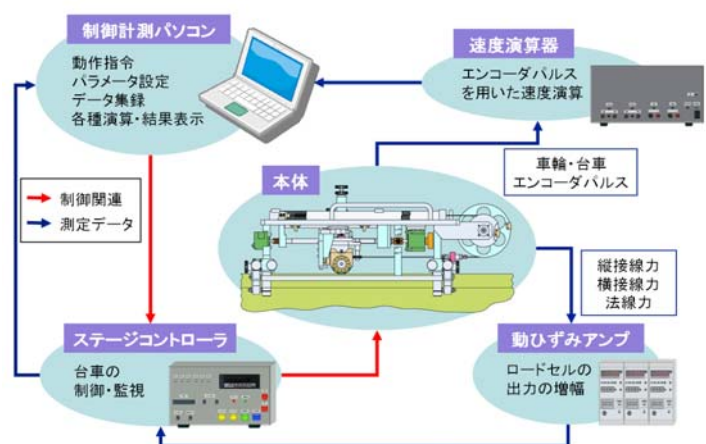


図1 クリープテスタのシステム構成

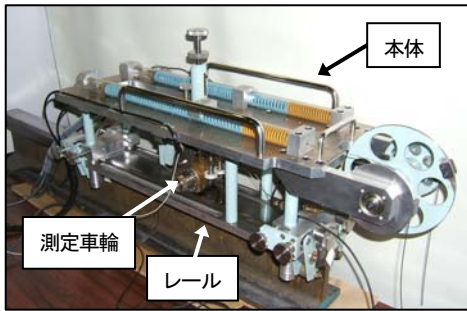


図 2 レールに設置したクリープテスト本体

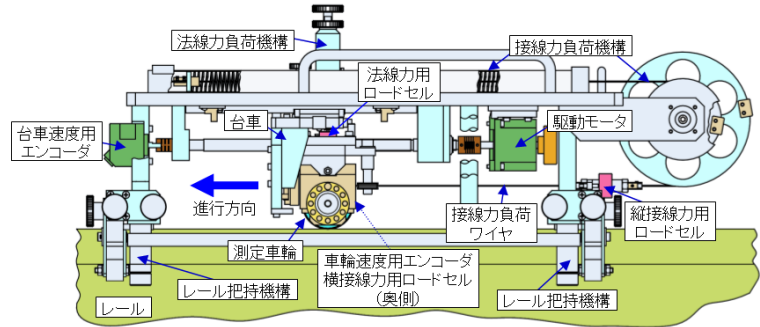


図 3 クリープテスト本体の模式図

ル間に生じる相対的なすべりの度合いを表すすべり率 s と接線力 T の関係のことである（ここで接線力とは車輪とレールの接触面上に作用する力で、すべり率が小さい場合、特にクリープ力という）。すべりが十分に大きくなると接線力はある値に飽和し、それを接触面に垂直方向に作用する法線力 N で除したものが、いわゆる動摩擦係数 μ である（動摩擦係数 μ に飽和するまでの接線力と法線力の比を等価摩擦係数 μ_e と称することがある）。

したがって、クリープテストによる実験で設定・測定する重要なパラメータは、上記の接線力 T と法線力 N 、および、すべり率を算出するために必要な車輪のレール長手方向の移動速度 V_t （これを台車速度と呼ぶ）と接触面における車輪の周速度 V_w （これを車輪速度と呼ぶ）である。

クリープテストの本体の機構を図 3 に、主な仕様を表 1 に示す。測定原理は次のとおりである。まず、車輪を支持している台車がボールねじを介して駆動モータにより図 3 の右から左へ向かって走行する。それに追従して測定車輪も転がる。測定車輪と一体のプリーには、接線力負荷用のワイヤが取り付けられ、測定車輪が進むにしたがってワイヤがプリーに巻き込まれていく。ワイヤは縦接線力測定用の引張り型ひずみ式ロードセルを介して接線力負荷機構に接続している。図 3 にあるように、接線力負荷機構はプリーとそれにつながった接線力負荷用のばねからなる。そのばね力により、接線力負荷ワイヤが車輪のプリーに巻き込まれていく長さ（車輪の転がり距離）に比例して接線力がはたらき、測定車輪とレールの間にはすべりが生じる。この仕組みがクリープテストの最大の特徴であり、これによってクリープテストでは 1 回の測定動作で、すべりがほとんどない状態から大きくすべる状態までの幅広いすべり率に対するクリープ力の飽和特性を調べることができる。1 回の測定時間は 1 分程度であり、測定を簡便にくり返し行える。

クリープテストはまた、一定の車輪アタック角 ϕ_w （レールに対する測定車輪の旋回角）を設定することが可能である。この機能により一定の横すべり率を与えられるため、縦接線力 T_x （接線力 T のレール長手方向の成分）と横接線力 T_y （レール枕木方向の成分）の関係を調べることができる。これもクリープテストの特徴の一つである。法線力 N は実験中に一定の値を設定するが、その値は測定車輪とその支持装置の自重に加え、測定車輪軸にばね力による押し付け荷重を設定することで、法線力の条件を変更することができる。接線力や法線力はそれぞれロードセルにより検出する。

すべり率の算出には、台車速度 V_t と車輪速度 V_w の値が必要である。これらの速度を求めるために必要な情報は、台車・測定車輪それぞれに接続されたロータリエンコーダの出力を専用の速度演算器（鉄道総研開発品 VD-101）に入力することで得る。速度演算器で得られた結果は、パソコン上のソフトウェアに送られ、測定車輪の半径などの情報とあわせて V_t と V_w を演算する。例えば車輪アタック角が 0 の場合、すべり率 s は、 $s = 2(V_t - V_w)/(V_t + V_w)$ で与えられる。

表 1 クリープテストの主な仕様

測定対象物	レールなど (60kgレール, 50Nレールともに取り付け可能)	
本体	測定車輪	直径: 60mm, 断面形状: 半径 30mm, 材料: SK 材
	台車設定速度 V_t	10~40mm/s
	法線力 N	[設定可能値] 約 30~300N
	縦接線力 T_x	[負荷可能値] 0~300N
	車輪アタック角 ϕ_w	0, 0.3, 0.6, 1.0 °
制御・計測部	速度演算	速度演算器 VD-101 (パルス幅測定法による速度演算)
	台車制御	クリープテスト用ステージコントローラ
	データ計測・集録	PC 上の専用ソフトウェアプログラムによる制御・計測・演算 (A/D 変換(PCカード): 12bit)

2.2 ステージコントローラと速度演算器

図1に示すように、ステージコントローラはパソコンからの指令に基づき、本体の駆動モータを制御する。また、パソコンと通信しながら、駆動中のモータや台車の位置の状態監視も担う。駆動モータの緊急停止や測定位置の復帰はステージコントローラから直接行う。

速度演算器は、第2.1節でも述べたように、クリープテスタ本体に設置したロータリエンコーダの出力から台車速度 V_t と車輪速度 V_w に必要な情報を得るための装置である。駆動モータにより台車が移動すると、台車に接続されているボールねじ（ピッチ 2mm）の軸に取り付けたロータリエンコーダ（400pulse/rot）と測定車輪軸に取り付けたロータリエンコーダ（3600pulse/rot）がそれぞれパルスを発する。これらのパルスは速度演算器内の 20MHz の基準クロックによって 1 パルス分の時間幅を計測（基準クロックのパルス数をカウント）し、その情報をパソコンに送る。そして測定車輪の半径やロータリエンコーダの性能値などを用いて、 V_t と V_w およびすべり率を算出する。この仕組みにより、クリープ力の発生に関わる微小なすべりを精度よく計測することができる（台車速度 10mm/s 設定時の計測精度は 0.002%）。

2.3 制御計測ソフトウェア

クリープテスタの制御やデータの取得・集録ならびに速度やすべり率の算出といった各種演算には、Windows パソコン上で動作する専用ソフトウェアプログラムを用いる。その表示画面を図4に示す。この画面は主に、接続力・法線力を電圧データから換算するための各種パラメータ等を入力する部分、現在の作用力の値や装置の状態を表示する部分、そして、測定結果をグラフで表示する部分に分かれている。

すべり率を精度よく算出するためには、高精度で得られる速度の他に、入力パラメータとして測定車輪の直径をできるだけ正確に与える必要がある。このソフトウェアには測定車輪の直径を入力する項を用意しており、実験毎に正確な値を使用することができる。そこでクリープテスタでは、法線力が負荷された状態で正確な車輪直径を実験で使用するために、本体の接続力機構をはずし、すべりのない状態で測定車輪を転がしてその直径を調べる、という事前準備を行う。そして、その結果を演算に用いる。

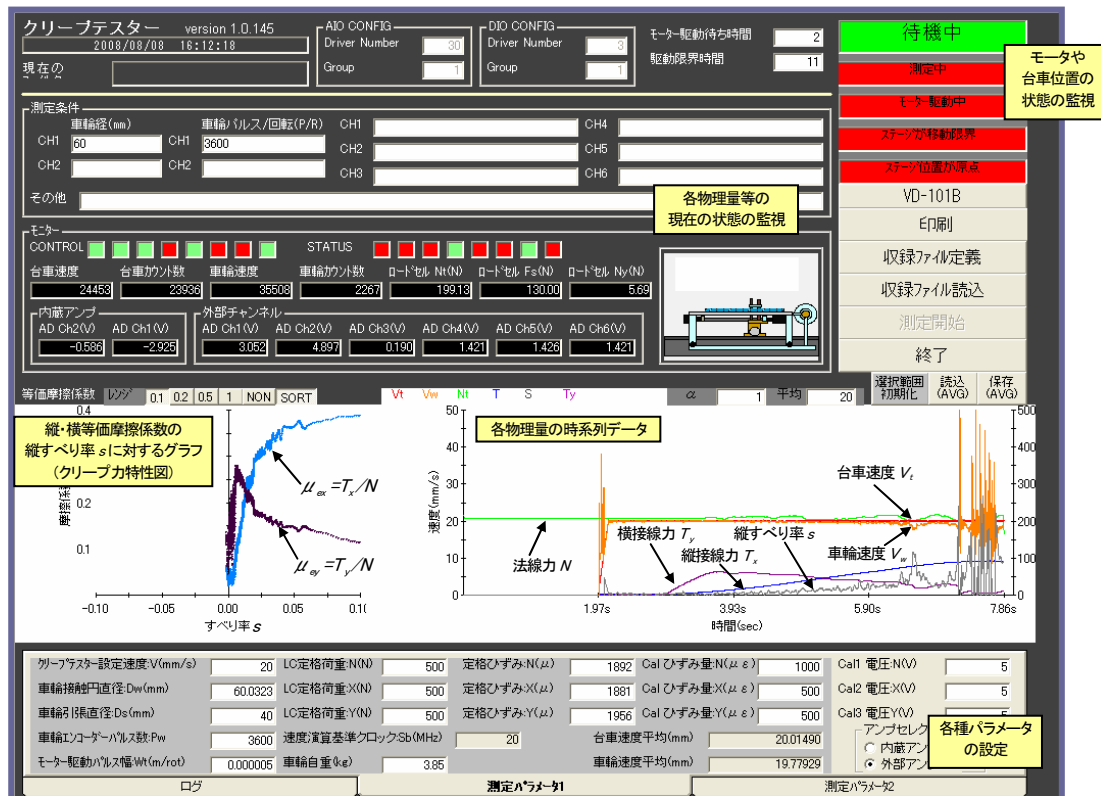


図4 パソコン上のクリープテスタ制御・計測画面
(図中のグラフは、車輪アタック角 0.6° 、レール表面状態が乾燥している場合の測定結果)

このソフトウェアでは、測定で得られたデータをその場ですぐに確認することができる。図4中の各物理量の時系列測定結果を示すグラフでは、クリープテストの動作にともなう作用力とすべり率(より正確には、これは縦すべり率である)ならびに台車・車輪速度の様子を知ることができる。図の例は、レールの表面が乾燥した状態で、車輪アタック角を 0.6° に設定した条件における結果である。台車速度 V_t に比べ、転がりをともなう車輪速度 V_w は若干振動していることがわかる。また、縦接線力 T_x は時間とともに増加し、台車速度 V_t と車輪速度 V_w の差も大きくなり、それに応じてすべり率 s が変化することがわかる。このグラフ上では、マウスによる操作で、測定初期の不安定な振動等を取り除いたクリープ力特性を知るのに有効な範囲を選択することができる。そして、その選択範囲のデータに対応するクリープ力特性図がその左側に描かれる。この図からは、縦接線力 T_x と横接線力 T_y をそれぞれ法線力 N で除した等価摩擦係数 μ_{ex} 、 μ_{ey} とすべり率 s の関係や、ある動摩擦係数への飽和の様子を確認することができる。

なお、集録したデータはASCII形式のファイルとして出力することが可能である。

3. 測定結果例－車輪アタック角による違い－

クリープテストによって得られたクリープ力特性の例を図5に示す。ここでは基礎的なデータを得るため、レールの表面を予め一定の粗さの紙やすりで磨いて平らに整え、レール油を塗布した状態で実験を行った。法線力は200Nとした。これは実物の車輪とレールの接触で、輪重が30kNの場合の最大ヘルツ圧とほぼ同等になる値である。また、図5は、車輪アタック角が 0.3° (上図)および 0.6° (下図)の条件で、それぞれ20回試行した結果を平均化処理したものである。

図5より、縦すべり率が十分に大きくなると、車輪アタック角の大きさによらず、縦等価摩擦係数 μ_{ex} はほぼ0.12に飽和することがわかる。また、 μ_{ex} が増加するにつれて横等価摩擦係数 μ_{ey} が減少することがわかる。しかしながら、 μ_{ex} が飽和値にいたるまでの縦すべり率に対する増加の割合は、車輪アタック角 0.6° に比べて 0.3° の方が大きく、 0.3° の方が小さい縦すべり率で飽和値に達することがわかった。

以上より、クリープテストを用いると、 μ_{ex} と μ_{ey} の関係や車輪アタック角の条件によるクリープ力特性の違いが得られることがわかった。また、図4のレール表面が乾燥した場合の結果と比べると、 μ_{ex} の飽和値は塗油の場合と乾燥の場合(飽和値約0.4)で明らかに異なり、塗油といったレールの表面状態の違いもクリープテストにより検出できることを確認した。

4. まとめ

車輪とレール間のクリープ力特性を、実物のレール上で測定車輪を転がして調べることができる試験装置「クリープテスト」を開発し、その測定原理やシステムおよび測定結果例を示した。今後は、この試験装置を用い、レールの表面状態(潤滑油の種類、表面粗さなど)や車輪アタック角、法線力、走行速度などの条件に応じたクリープ力の基礎的なデータを収集し、様々な条件下におけるクリープ力特性の把握を行う。

参考文献

1)例えば、Kalker, J.J., A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact, *Vehicle System Dynamics*, 11(1),1982
 や、土井ほか,実物輪軸によるクリープ力特性試験(第一報),第11回交通・物流部門大会講演論文集,pp.447-450,2002 など

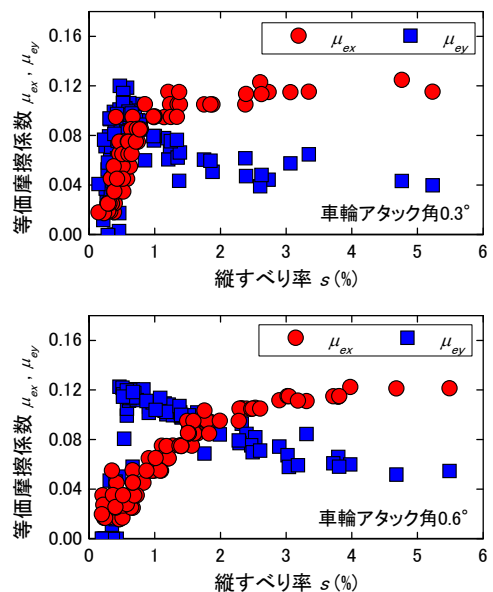


図5 測定結果例

(上:車輪アタック角 0.3° , 下:車輪アタック角 0.6°)
 (レール表面状態:塗油, 法線力200N, 20回試行)