

脱線時の鉄道車輪とPCまくらぎの衝突荷重に関する基礎的研究

九州大学大学院 学生会員 ○和田 直樹
 九州大学大学院 正会員 園田 佳巨
 (公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 後藤 恵一

1. 目的

2004年の新潟県中越沖地震において、走行中の新幹線が脱線する事故が発生した。それ以降、鉄道システム全体として減災に努めるために、地震時列車走行性に関する様々な研究が進められている。その中の一つとして、鉄道車両の逸脱防止装置の開発が進められているが、その性能を数値解析的に評価する場合には脱線後の車両挙動を表現する必要があり、特に車輪と軌道部材の衝突現象のモデル化が不可欠である。そこで本研究では、脱線した車輪とまくらぎが衝突した時の接触力に関して、ヘルツの接触理論に基づいた理論的考察を既往の実験結果を参考として行った。その上で、衝突現象を簡易に評価するためのレオロジーモデルの利用を検討し、接触理論に基づく計算結果と実験結果を考慮して、衝突部における接触モデルを提示した。

2. 解析手法の概要

2.1 ヘルツの接触理論に基づいた接触力評価

ヘルツの接触理論は、2つの固体が接触した際に接触領域に生じる圧力分布を弾性理論に基づいて算定する手法で、基本的には弾性体間の接触が想定されている。一般に材料が降伏した後は、さらに荷重を加えても降伏域での圧力は殆ど増加せず、塑性変形の進展とともに接触領域の増大が顕著にみられる。そこで、接触面に生じる圧力分布に簡易な完全弾塑性の仮定を設けると、降伏応力を上限とした塑性領域と接触理論で得られた値を示す弾性領域に分けて近似できると考えられる。本研究では、PCまくらぎに衝突する物体として、球体と一定幅を有する円盤状の2種類のモデルを仮定した。解析に用いた形状寸法および材料定数を表-1に示す。球体モデルを例として、接触理論を用いた衝撃荷重の計算過程を図-1に、塑性領域が生じた後の荷重算出の方法を図-2に示すが、この方法を利用すれば簡易な表計算ソフトを用いて衝撃力-時間関係を求めることができる。図-3、図-4は、実車輪の先端部(接触子)を用いた重錘落下試験の中で重錘落下高さが50mm、750mmと大きく異なる場合の結果に対して、球体モデルと円盤モデルで求めた衝撃力-時間関係を比較したものである。最大衝撃力に着目すると、両ケースともに球体モデルの計算値が実験結果に近いことが認められる。

表-1 形状および材料定数

	半径 (mm)	幅 (mm)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	圧縮強度 (N/mm ²)
球	460	—	210000	0.3	—
円盤	460	70	210000	0.3	—
PCまくらぎ	∞	—	38400	0.17	65.9

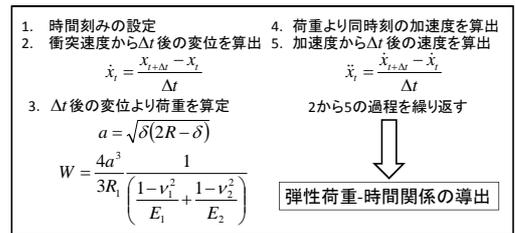


図-1 弾性時接触理論の計算過程(球体)

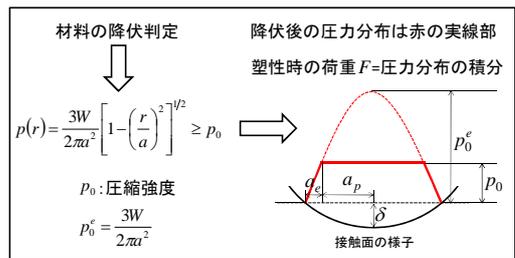


図-2 塑性時接触理論の計算過程(球体)

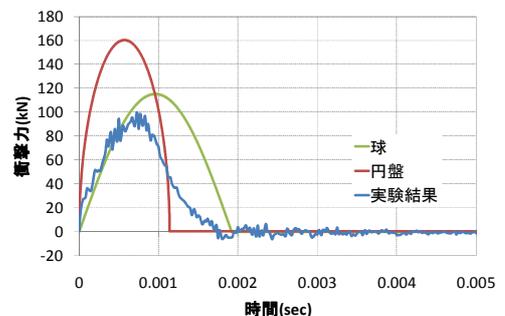


図-3 落下高さ 50mm 時の衝撃力-時間関係

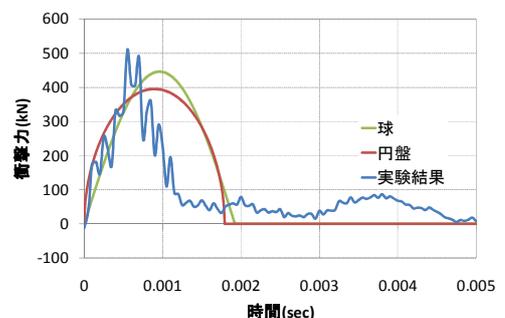


図-4 落下高さ 750mm 時の衝撃力-時間関係

キーワード：接触力，ヘルツの接触理論，圧力分布，レオロジーモデル，レオロジー定数

連絡先：〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番 TEL/FAX: 092-802-3370

このことから、2方向に異なる曲率を有する実車輪の先端部(接触子)の接触面積の変化を簡易に再現するには、球体モデルの方が適切であると考えられる。なお、衝撃荷重の継続時間については、実験結果とかなりの相違があることから、衝突物の貫入変位に対する抵抗だけでなく、载荷速度の影響を考慮した復元力特性も導入する必要があると考えられる。

2.2 レオロジーモデルによる衝突現象の評価および考察

衝突現象を簡易に評価するため、レオロジーモデルの導入を試みた。検討モデルは、図-5 に示すばねとダッシュポットを並列に配置した2要素 Kelvin-Voigt モデルにばねを直列に繋げた3要素モデルである。力学特性を表す k_1, k_2, c_1 の3つの定数は、図-6 に示す手順で決定した。具体的には、ヘルツの接触理論より得られた荷重-変位関係からばね定数 k_2 を決定した後、ヘルツの接触理論より得られた変位データを入力値として適当なレオロジー定数 k_1, c_1 を設定した式(1)に与え、得られた荷重-時間波形が重錘落下試験結果と一致するようなパラメータを探索した。

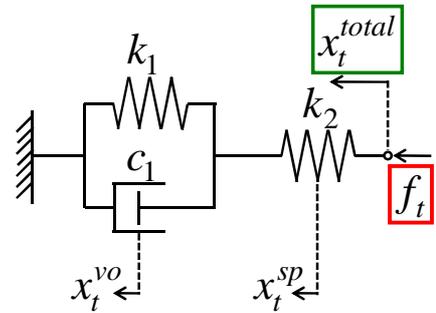


図-5 3要素のレオロジーモデル

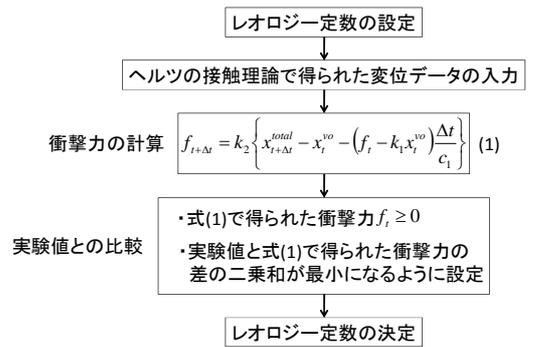


図-6 レオロジー定数算定までの流れ

$$f_{t+\Delta t} = k_2 \left\{ x_{t+\Delta t}^{total} - x_t^{vo} - \left(f_t - k_1 x_t^{vo} \right) \frac{\Delta t}{c_1} \right\} \quad (1)$$

$$x_t^{vo} = \frac{(c_1 - k_1 \Delta t) x_{t-\Delta t}^{vo} + f_{t-\Delta t} \Delta t}{c_1} \quad x_t^{sp} = \frac{f_t}{k_2} \quad (2)$$

ここに、 $x_{t+\Delta t}^{total}$ は時刻 $t + \Delta t$ におけるヘルツの接触理論によって得られた変位データ、 x_t^{vo} は時刻 t における Kelvin-Voigt モデルの変位、 x_t^{sp} は時刻 t におけるばねの変位、 Δt は時間刻み、 f_t は時刻 t における出力衝撃力である。

図-7 に求められた落下高さ 250mm 時の衝撃力応答の比較図を、表-2 に落下高さが異なる5種類の実験に対して算定されたレオロジー定数を示す。図-7 より、レオロジーモデルを用いることで車輪先端部(接触子)衝突による衝撃力波形を概ね再現可能であることが認められる。また、落下高さ別に算定されたレオロジー定数に着目すると、落下高さ 50mm のケースを除くと概ね同じパラメータ値で対象とする衝撃荷重を再現できることが確認できる。

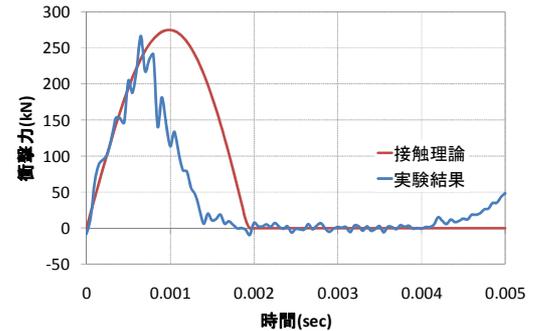


図-7 衝撃力応答の比較図(落下高さ 250mm)

表-2 算定されたレオロジー定数

落下高さ(mm)	50	100	250	500	750
k_1 (kN/mm)	1400	7535	7541	7548	7572
c_1 (kN・s/mm)	0.02	0.2	0.2	0.2	0.2
k_2 (kN/mm)	190	190	190	190	190

また、落下高さ別に算定されたレオロジー定数に着目すると、落下高さ 50mm のケースを除くと概ね同じパラメータ値で対象とする衝撃荷重を再現できることが確認できる。したがって、同一形状の重錘を同一角度から衝突させる場合には、衝突速度が異なっても一定のパラメータ値を有する3要素モデルで衝突荷重の推定が可能であると考えられる。なお、本モデルでは衝突荷重の継続時間および力積については、常に実験結果より大きな値を示す傾向がみられたことから、今後の改善が必要であると思われる。

3. 結論

ヘルツの接触理論を用いて車輪とまくらぎの接触力を評価した結果、2方向に異なる曲率を有する実車輪の先端部の場合、球体モデルの接触による圧力分布で近似できることが認められた。また、衝突現象を簡易に評価するために、本研究では接触理論から得られた計算結果を準用したレオロジーモデルを提案し、衝撃力波形を概ね再現することができた。今後の課題として、力積に対する精度の向上と種々の衝突条件に対する汎用性の高いレオロジーモデルの提案が挙げられる。