

各種直結系軌道におけるレール波状摩耗の成長度合いの検証

鉄道総合技術研究所 正会員 ○田中博文

鉄道総合技術研究所 正会員 瀧上翔太

1. はじめに

鉄道では列車走行時の沿線の騒音や振動を低減するために、様々な防振軌道が開発・実用化されている。ここで、鉄道の軌道では、列車走行に伴って、一部の区間においてレールに規則的な凹凸（波状摩耗）が発生し、騒音や振動の原因となっている。波状摩耗は様々な軌道構造や線路線形において発生することが確認されているが、曲線の内軌に発生する事例が多い。一方で、一部の防振軌道では、急曲線に敷設した際に曲線の内軌だけでなく外軌にも波状摩耗が発生する事例が報告されており、沿線の騒音や振動の発生に加え、車内騒音の増加、レール削正などの軌道保守量が増加することが懸念されている²⁾。さらに、急曲線の外軌におけるレール削正は、乗り上がり脱線防止の観点から削正範囲が制限されており、保守上の課題もある。

本研究では、各種の直結系軌道を対象に、軌道・車両の動的相互作用を考慮した理論解析モデル³⁾を用いて、レール・車輪間の接触力変動を解析し、各種軌道構造における波状摩耗の成長度合いを検証した。

2. 軌道・車両の動的相互作用を考慮した理論解析

(1) 解析モデル

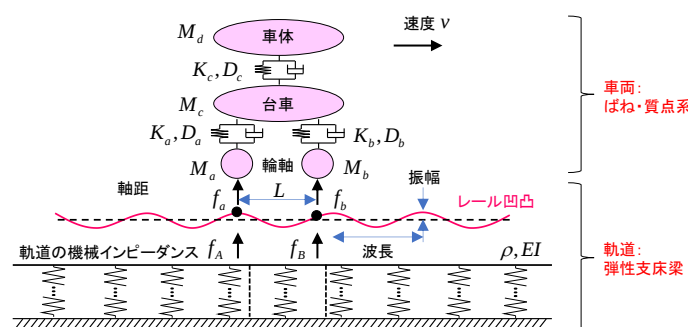
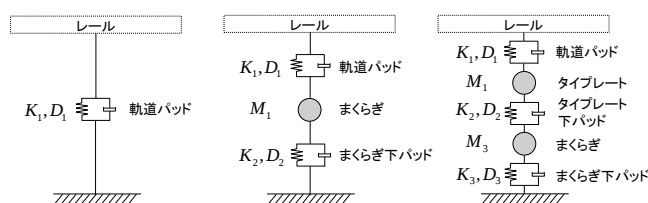
図-1 に、軌道・車両の動的相互作用を考慮した理論解析モデル³⁾を示す。本モデルは、凹凸のある弾性支床梁（軌道）上を、ばね・質点系（車両）が速度 v で走行するものである。軌道は片側（レール 1 本）を、車両は 1/4 車体（1 台車の片側）をモデル化している。また、軌道は、その支持構造によって、図-2 に示すように、直結系軌道においても一段、二段、三段の弾性支床などがあるが、解析モデル内では、図-1 に示すように機械インピーダンスで一般化して表現している。

(2) 波状摩耗の成長度合い評価

このモデルを用いることで、レール・車輪間の接触力（輪重）変動を算出できる。ここで、レールが輪重に比例して摩耗すると仮定すれば、凹凸のあるレール上を車両が走行した際に、1 輪軸に換算して、走行後のレール凹凸の振幅は、走行前に比べて、式(1)に示す倍率となる。

$$\kappa = |1 + C_w H| \quad (1)$$

ここで、 C_w は単位輪重あたりのレール摩耗量、 H は理論解析モデルから得られるレール凹凸の振幅に対する接触力（輪重）変動の伝達関数である。また、 κ をここでは「凹凸振幅増幅係数」と称することとする。 κ は、ある波長の凹凸があるレール上を車両が走行した際に、 $\kappa > 1$ ならばその凹凸の振幅が増加し、 $\kappa < 1$ ならば振幅が減少することを示す関数である。この κ が 1 以上で極大となる波長においてレールが規則的に摩耗し、波状摩耗が成長すると考えられる。

図-1 軌道・車両の動的相互作用を考慮した理論解析モデル³⁾

(a) 一段弾性支床 (b) 二段弾性支床 (c) 三段弾性支床

図-2 直結系軌道の代表的な弾性支床モデルの例

次に、ある凹凸振幅増幅係数の条件において、輪軸が N 回走行したとすると、レール凹凸振幅は式(1)より、式(2)で表すことができる。

$$\kappa^N = (1 + C_w H)^N = (1 + \varepsilon)^N \approx 1 + N\varepsilon \quad (2)$$

ここで、 $C_w H$ は十分に小さい値として、Taylor 展開の 1 次の項までで表現している。すなわち、同じ条件で同じ N 回走行後で比較するならば、波状摩耗の成長度合いは ε で近似的に評価できると考えられる。 ε をここでは「波状摩耗成長度合い係数」と称する。

3. 各種軌道構造の波状摩耗の成長度合いの試算

(1) 解析対象とした軌道構造および車両

ここでは、図-3 に示す、(a) PC まくらぎ直結軌道（一段弾性支床）、(b) 弾性まくらぎ直結軌道（二段弾性支床）、(c) コイルばね防振軌道（二段弾性支床）、(d) フローティング弾直軌道⁴⁾（三段弾性支床）の 4 種類の直結系軌道を対象に理論解析を実施した。なお、弾性まくらぎ直結軌道とコイルばね防振軌道の弾性支床モデルは同じ二段弾性支床であるが、前者はレール直下にはまくらぎ質量のみが弾性材（まくらぎ下パッド）で支持されるのに対し、後者はレール直下にはまくらぎとスラブ版が剛結された大質量が弾性材（コイルばね）で支持される点異なる。また、フローティング弾直軌道は、まくらぎとスラブ版がそれぞれ弾性材（まくらぎ下パッド、およびスラブ版下パッド）で支持される構造である。

キーワード：波状摩耗，直結系軌道，動的相互作用，弾性支床，凹凸振幅増幅係数，成長度合い係数

連絡先：〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 （公財）鉄道総合技術研究所 軌道管理 TEL042-573-7277

表-1 に、実際の軌道構造を参考に設定した各軌道構造の代表的なパラメータを示す。また、車両は在来線の一般的な通勤形車両をモデル化した³⁾。車両の走行速度は、40km/h とした。

(2) 軌道構造の違いによる影響

図-4 に、各軌道構造における凹凸振幅増幅係数の計算結果を示す。同図より、PC まくらぎ直結軌道とコイルばね防振軌道の凹凸振幅増幅係数は、弾直まくらぎ直結軌道とフローティング弾直軌道と比較して大きいことがわかる。また、その空間周波数は 6[1/m]程度（波長 0.17m 程度）であり、コイルばね防振軌道の外軌に発生している波状摩耗の波長と概ね一致している²⁾。なお、空間周波数 50[1/m]近傍のピークは、レール・車輪間の接触楕円（コンタクトパッチ）の影響により波状摩耗としての成長は抑制されるものと考えられる⁵⁾。

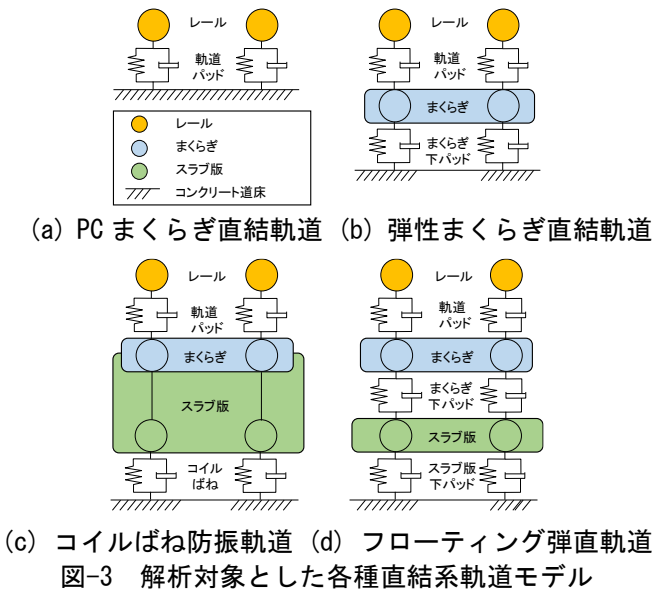


表-1 各軌道構造の代表的なパラメータ

軌道構造	PCまくらぎ直結軌道	弾性まくらぎ直結軌道	コイルばね防振軌道	フローティング弾直軌道
弾性支床モデル	一段弾性支床	二段弾性支床	二段弾性支床	三段弾性支床
レール質量 (/m)	50.8kg	50.8kg	50.8kg	50.8kg
レール締結装置間隔	0.625m	0.625m	0.7m	0.625m
軌道パッドばね定数	60MN/m	60MN/m	50MN/m	60MN/m
まくらぎ質量 (/m)	—	120kg	—	120kg
まくらぎ下パッドばね定数	—	30MN/m	—	30MN/m
スラブ版質量 (/m)	—	—	920kg	830kg
コイルばねorスラブ版下パッドばね定数	—	—	6.58MN/m	6.58MN/m

※解析モデルに入力するパラメータは、軌道片側かつ軌道1mあたりの値である。
※コイルばね防振軌道では、スラブ版質量にまくらぎ質量を加算している。

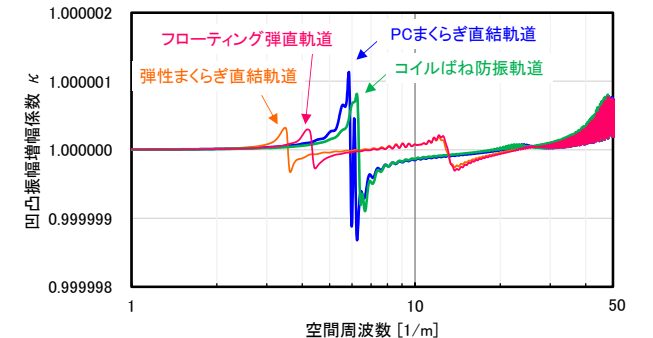


図-4 各軌道構造における凹凸振幅増幅係数の計算結果 (V=40km/h)

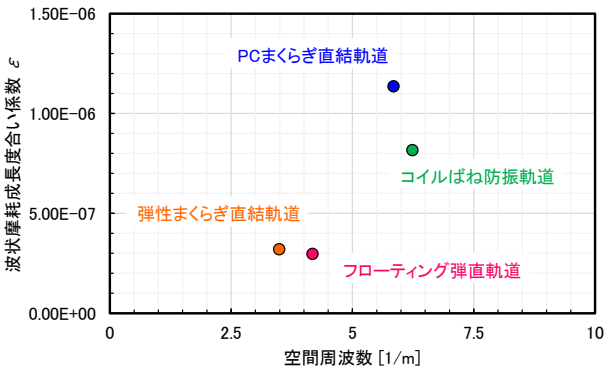


図-5 各軌道構造における波状摩耗成長度合い係数の比較 (V=40km/h)

図-5 に、各軌道構造における凹凸振幅増幅係数のうち、図-4 の矢印に対応するピークから算出した波状摩耗成長度合い係数と着目したピークの空間周波数の関係をプロットした結果を示す。同図より、まくらぎ直下に弾性材を配置していない PC まくらぎ直結軌道とコイルばね防振軌道の波状摩耗成長度合い係数が大きいことがわかる。すなわち、まくらぎ直下に弾性材を配置した弾性まくらぎ直結軌道やフローティング弾直軌道と比較して、同じ運転条件であれば、波状摩耗の成長速度が速く、顕在化しやすいと言える。この結果は、過去に実施した営業線における曲線外軌における波状摩耗の発生状況の調査結果²⁾と整合しており、曲線外軌に発生する波状摩耗の抑制には、まくらぎ直下に弾性材を配置した軌道構造の採用が有効であることが解析的に示された。

4. まとめ

本研究では、各種直結系軌道を対象に軌道・車両の動的相互作用を考慮した理論解析を実施し、波状摩耗の成長度合いを評価した。その結果、まくらぎ直下に弾性材を配置した軌道構造は、まくらぎ直下に弾性材が配置していない軌道構造と比較して、波状摩耗が顕在化しやすいことを示した。この結果は、過去に営業線で実施した曲線外軌の波状摩耗の発生状況調査の結果と整合していた。今後は、パラメータスタディを実施し、寄与度の高いパラメータを同定する予定である。

参考文献

- 1) Grassie S. L. and Kalousek J.: Rail corrugation: characteristics, causes and treatments, Proceedings of IMechE, Part F, 207, pp.57-68, 1993.
- 2) 田中博文, 清水惇, 古川敦, 菊地圭介, 地子給和行: 振動特性に着目した直結系軌道における急曲線外軌波状摩耗の発生要因の推定, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.15, pp.140-147, 2011.
- 3) 網干光雄, 田中博文: レール波状摩耗の成長機構に関する理論解析, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.875, DOI: 10.1299/transjsme.18-00426, 2019.
- 4) 湊上翔太, 渡辺勉, 高橋貴蔵: フローティング弾性まくらぎ直結軌道の開発, 土木学会第 78 回年次学術講演会, 2023 (投稿中).
- 5) 網干光雄, 田中博文: レール波状摩耗の進展過程に関するシミュレーション解析, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.878, DOI: 10.1299/transjsme.19-00051, 2019.