

IV-253 軌道走行路の劣化特性モデルについて

J R西日本 正会員 山口義信
 東京大学 正会員 家田 仁

1. はじめに

有道床軌道における劣化特性の中で、軌道破壊と言われている軌道狂い管理上の問題を含んだ軌道走行路の幾何学的不整の進展過程（軌道狂いの成長）について、その事象を力学的分野から説明するため、新たなモデルの提唱を試み、これにもとづくシミュレーション結果について概要を述べる。

2. 劣化特性モデルの提案

軌道劣化を最も端的に表している軌道沈下の進み量は、力学的には実験値として（式-1）の関係が得られている。この場合、軌道走行路の地点による凹凸（軌道狂い）の進展については軌道強度のランダムネスや輪重変動の確率的分布としてあつかっており、又同式のデモンションは力学的現象を説明したものとはなっていない。このことから、軌道走行路の地点に依存した沈下特性、即ち軌道狂い波形としての成長過程が十分解明されずに現在に至っていると考えられる。

$$\beta \propto \text{道床圧力} \times \text{道床振動加速度} \quad (\beta: \text{沈下進みの特性を表す定数}) \quad (\text{式-1})$$

定性的に言って、軌道狂いの大きい箇所では車両が加振され、他の箇所に比べて大きな輪重が軌道に働くことになることから、軌道狂い進みの大小がその軌道状態の良否に影響を受けているものと考えることが出来る。このことは、加振源として軌道狂いによって加振された系としての車両が軌道に与える影響、即ち車両と軌道の相互作用によって軌道狂いが成長していくものと考えることができる。

3. 軌道狂い成長モデルの定式化

1) 沈下則

道床バラストの動的特性は、既往の研究成果等から推察すると振動を受けている状態では、それに応じて変化する動的摩擦力を上回った圧力（せん断力）によって移動沈下すると考えることができ、これは即ち、軌道走行路の沈下が、加速度の値に依存する沈下に対して有効に作用する道床圧力（実効道床圧力と称する）によって生じるとすることができる。このことは、道床圧力が沈下に対して有効に働く下限値（限界摩擦力）を持つことになり、この限度は一般的に閾値と解されるものである。（この閾値が加速度に依存して変化し加速度の関数として扱われることから、これを道床圧力閾値関数と称する。）

このように扱うことは、（式-1）から得られる結果を既往の実験等がなされている周波数領域で否定するものではなく、今回のように考えることによって、現象の機構が従来に比べより力学的に説明されることになる。

2) 沈下に対する高低狂い特性

軌道走行路における高低狂いの形状は、理論的には無限に種々考えられるが、現実的な高低狂いはレールの剛性によって相当滑らかなものとなる。この効果は、レールに任意の波長で変動する輪重を加え、軌道が連続弾性床上の梁と考えると、輪重変動の振幅特性は軌道狂いが波長無限大の場合では、これがレールに高低狂いとして、そのまま表れるが、波長3～4 m程度以下では軌道構造に係わらず殆ど表れないことになる。

3) 輪重変動モデル

車両走行によって軌道が受ける輪重変動の要因としては、車輪／レール間の凹凸による高周波振動と軌道狂いによるものが考えられるが、ここでは地点に依存しその振幅特性がある程度保存され軌道に伝達される軌道狂いを対象とする。（注：地点に依存しない高周波振動による輪重変動はその振幅特性が保存されない。）軌道狂いによる輪重変動特性は、軌道狂いを入力、車両の輪重変動特性を出力とみなすダイナミックス

テムの解析を行うことによって求められる。図-1に用いた車両モデルを示す。

4) 軌道の沈下

輪重変動によって生じる軌道の変位は、軌道を弾性床上の梁と考え輪重によって作用するレール圧力から求められる。 x_s 地点におけるレール圧力 $P_{xs}(X)$ は道床圧力 $p_{xs}(X)$ により、 $(c_1: \text{マタリ間隔/下面積})$

$$p_{xs}(X) = c_1 \cdot P_{xs}(X) \quad (\text{式-2})$$

と表され、同地点における軌道の沈下 Δz_{xs} は、前述から実効道床圧力 $P^*_{xs}(X)$ 、道床圧力閾値関数 $T(A)$ と関係付けられている。 $T(A)$ は沈下の実態から考え、道床振動加速度の減少関数となり、時間軸で変換し $(c_2: \text{道床種別、厚等により定まる定数})$

$$\Delta z_{xs} = a \int_{-\infty}^{\infty} c_2 P^*_{xs}(t) dt \quad (a: \text{道床振動加速度が一定の場合における速度、車両特性、車輪/レール間の凹凸で定まる定数}) \quad (\text{式-3})$$

と表される。 $p_{xs}(t)$ が作用する加速度による $T(A)$ 以下の場合には0、それを越える場合には $p_{xs}(t) - T(A)/c_1$ の値をとることになる。

5) 軌道走行路の沈下

軌道走行路に生じる微少な沈下は、(式-4)によって表され、この値は軌道狂いの形状に依存して変動する。 n 回目の列車通過による x 点の軌道沈下 $\Delta z_n(x)$ 、その時の軌道走行路の形状を $y_n(x)$ 、変動効果 $\varepsilon_n(x)$ とすると、列車通過によって $y_{n-1}(x)$ から、変動する過程を次式によって与えることができる。

$$y_n(x) = y_{n-1}(x) + \Delta z_n(x) + \varepsilon_n(x) \quad (\text{式-4})$$

これを初期沈下形状 $y_0(x)$ との関係で表すと

$$y_n(x) = y_0(x) + \sum_{i=1}^n \Delta z_i(x) + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i(x) \quad (\text{式-5})$$

となり、列車の繰返し荷重による軌道狂い波形の成長過程を示すことになる。

4. 軌道の劣化特性

前節で述べたモデルを用い、正弦波の軌道形状が与えられる場合に得られるレール圧力あるいは軌道沈下の基本特性（シュミレーション結果）は、次のとおりである。

- ① 軌道沈下に影響を及ぼす総レール圧力は、車両の振動特性から加振する軌道形状に依存した特性を示す。
- ② 総レール圧力は軌道狂い振幅に依存し、その特性は線形である。
- ③ 軌道狂いの周波数によって、総レール圧力の作用する位置（位相）が異なる。
- ④ 軌道狂いの成長は、軌道狂い形状とレール圧力の位相に大きく影響する。

このことから、軌道狂いはその振幅と周波数特性に大きく依存して進展する。特に軌道狂いは時間（繰返し回数）に対して非線形（指数関数的）に増加することになる。このことは軌道狂い状態の良否に軌道狂い進みが影響されることを示している。（図-2に累積荷重載荷時の軌道狂い振幅特性の推移を示す。）

5. まとめ

軌道狂いの成長モデル及びそのシュミレーション内容の詳細な記載は省略しているが、このモデルの妥当性を検討するには、従来余り定説化されていなかった軌道状態に着目した軌道劣化特性を明らかにする必要がある。この件については筆者は一部検証を試みており今後更に深度化していきたい。

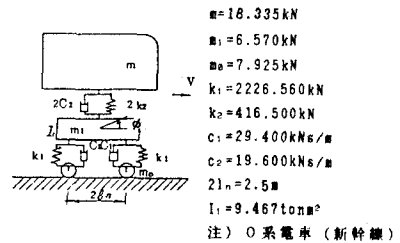


図-1 車両振動モデル

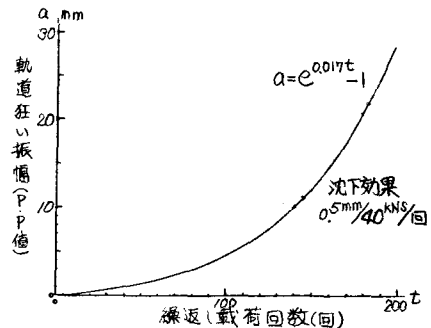


図-2 軌道狂いの推移特性