

軌道狂いによる曲線通過時の横圧変動分の推定方法

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 古川 敦

1. はじめに

近年の車体傾斜車両を用いた在来線の曲線通過速度向上に伴い、急曲線部における通り狂い管理の必要性が高まっている。本報告では、急曲線部における軌道狂いと横圧変動分の関係について解析し、両者の関係を定式化した。

2. 軌道狂いと横圧の相関

直線および緩曲線では、レールと車輪フランジ間に横動遊間があるので、通り狂いと横圧の相関は小さい。一方、急曲線区間では、台車前軸は外軌側レールに案内されながら走行するので、外軌側横圧変動成分と外軌側通り狂いには高い線形性がみられる。R=400m、C=105mmの曲線で速度102km/hの場合、波長6m～25mの外軌側横圧変動分と復元通り狂い波形の比較を図1に、1mサンプリング値の比較を図2に示す。両図に示すように、両者には高い線形性がある。

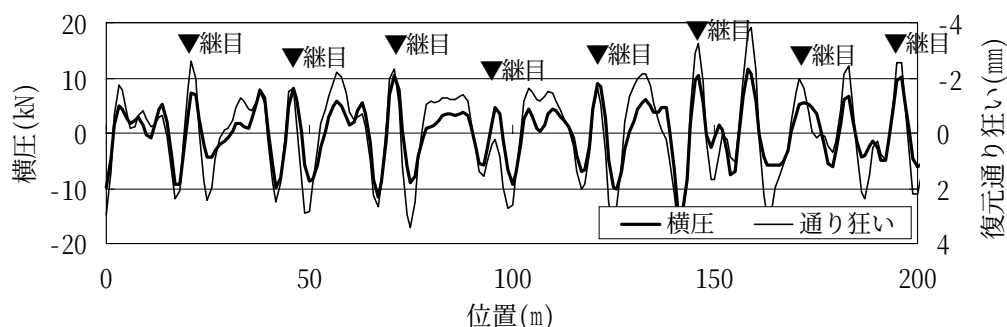


図1 外軌側通り狂いと外軌側横圧の波形例（波長6～25m）
(R=400mm, C=105mm, v=102km/h)

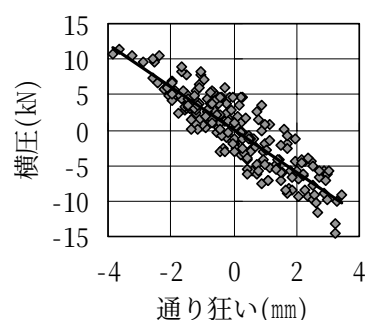


図2 横圧と通り狂いの
1mサンプリング値

このような線形性を持つ入出力モデルの同定には、インパルス応答や周波数応答関数のようなノンパラメトリックな方法を用いることが多い¹⁾。しかし在来線の急曲線区間は個々の区間長が短いため、インパルス応答を十分な精度で推定するために必要なデータ延長が確保できない場合が多い。また一方で、横圧には当該地点の通り狂い以外の軌道狂いも影響をおよぼす可能性が考えられる。例えば、ボギー台車後軸位置の軌間狂いはアタック角の変化をもたらし、これが横圧に影響を与えることが考えられる。

よってここでは横圧を、軌道狂いを説明変数とする式(1)のような重回帰モデルで表し、最も適合度の高い軌道狂いの組み合わせを探索した。なお、説明変数の組み合わせの選択規準にはAIC(Akaike's Information Criterion: 赤池情報量規準)¹⁾を用いた。

$$Q = a_0 + \sum a_i x_i \quad (1)$$

ここで、 Q ：外軌側横圧（波長6m～25m）、 a_i ：回帰係数、

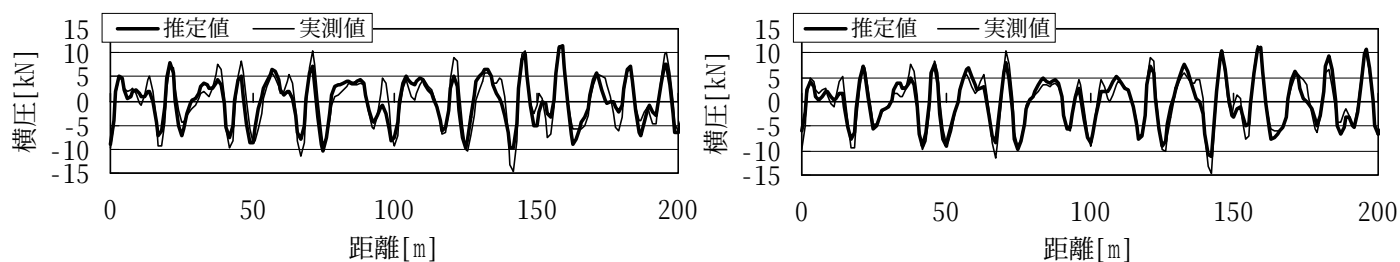
x_i ：軌道狂い（波長6～25mの通り狂い、水準狂い、平面性狂い、軌間狂い、 k m手前の各軌道狂い）

最もAICが小さい（適合度の高い）軌道狂いの組み合わせは、推定した区間の軌道状態によって異なる。例として、図1の区間に対し、通り狂いのみで単回帰を行った場合の推定波形と、最もAICが小さい説明変数の組み合わせ（通り狂い、4m手前の通り狂い、水準狂い、軸距平面性狂い）による推定波形の比較を図3に示す。前者の標準残差は2.4kN、後者の標準残差は1.8kNと約3/4になった。

ここで、4m手前の通り狂いが説明変数として選択された理由について考察する。図3の区間の通り狂いの自己相関係数を図4に示す。この区間の通り狂いの場合、3m以上離れた地点間については、ほぼ無相関と言ってよい。重回帰分析の場合、説明変数間に相関が高いと多重共線性を持ち、回帰係数が不安定になる。図4に示すように、4m離れた

キーワード：軌道狂い、横圧、重回帰分析

連絡先：〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 TEL042-573-7278 e-mail furukawa@rtri.or.jp



(1) 通り狂いによる単回帰

(2) 通り狂い, 4m 手前の通り狂い, 水準狂い, 平面性狂い

図3 説明変数の組み合わせの違いによる, 推定波形の違い

2点間の通り狂いは相関が小さいので, この2つを説明変数として選択すると AIC が小さくなったものと判断できる. また, 自己相関係数のフーリエ変換はパワースペクトル密度であることから, 複数地点の通り狂いを説明変数として選択するのは, 軌道狂いの周波数特性をモデルの中に取り込むことを意味している. この場合, 各通り狂いに対する回帰係数は, システムの周波数特性を表すことになる.

一方でこのことは, 軌道狂いの周波数特性が異なる区間で回帰係数を推定した場合, 異なる説明変数の組み合わせが選択されることを示唆している. 実際に図3とは別の曲線で重回帰分析を行った場合, AIC が最小となる説明変数の組み合わせは異なったものとなった.

以上の考察から, いくつかの曲線で回帰係数を推定し, その値が区間によって大きく変化しないこと, および回帰式の多重共線性を避けることを考慮し, 通り狂いと水準狂いを用いることが最も好ましいと判断した.

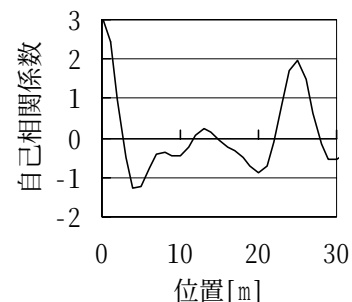


図4 通り狂いの自己相関係数

3. 回帰係数の速度依存性

前章で推定した回帰係数は, 速度依存性があると考えられる. JRの特急型電車(軸箱支持方式: コイルばね+円筒ゴム)と一般型気動車(軸箱支持方式: 緩衝ゴム)について, 横圧一軌道狂い間の回帰係数と速度の関係求めたものを図5に示す. 解析に用いた区間は, 全てR=400以下の曲線, かつ定尺レール区間である. ばらつきはあるものの, 回帰係数には速度依存性が見られる. また図中には合わせて, 回帰係数を, 速度を説明変数として単回帰したものを示す. 通り狂いについては, 速度に対する回帰係数の変化率が特急型電車と一般型気動車で異なるが, これは軸箱の前後支持剛性の違いによると考えられる.

これらの回帰式を用いると, 横圧を速度の関数として表すことができる. 特急型電車の場合は次のようになる.

$$Q_i = (0.023v + 0.46)t_i + (0.0062v + 0.064)s_i \quad (2)$$

ただし, t_i : 地点*i*の通り狂い[mm], s_i : 地点*i*の水準狂い[mm] (波長25m以下), v : 速度[km/h]

図1の曲線について, 式(2)で横圧を推定した場合の標準残差は2.4kNとなる. このとき, 最大横圧(超過確率2.5%)を予測したい場合には, 式(2)による推定値に標準残差の1.96倍を足せばよい.

4. おわりに

本報告で紹介した手法は, ペDESTAL方式のように軸箱と軸箱もりに隙間がある支持構造や, 操舵機構付き台車の場合には, 必ずしも適用できない. 今後は, これらの台車形式に対する横圧推定方法の検討が必要であると考えている.

- [参考文献] 1) 西本他: 急曲線通過時の振子車両の走行特性と軌道形状, J-Rail97, pp.267-270, 1997.7
2) 坂元, 石黒, 北川: 情報量統計学, pp.138-141, 共立出版, 1983.

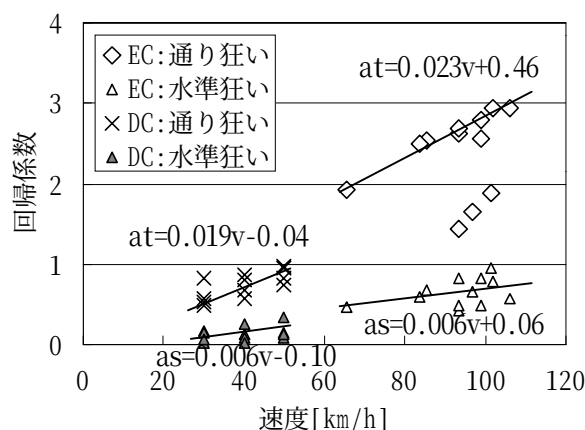


図5 速度と横圧一軌道狂い間の回帰係数の関係