

2 台車検測車の偏心矢データを用いた継目落ち・角折れの管理法

軌道技術研究部 軌道管理
 研究員 南木聡明

1. はじめに

高低変位、通り変位は、一般的に 10m 弦正矢法で管理されている。しかし 10m 弦正矢法は、図 1 のとおり、5m の整数分の 1 の波長で検測倍率が 0 となるため、この波長近傍の軌道変位は正確に測定できない。そのため、レール継目部の継目落ちや角折れのような、局所的に変化する軌道の形状は適切に把握できない。

一方、最近では偏心矢法を用いた 2 台車検測車が普及しつつある¹⁾。偏心矢法は、図 1 のとおり、検測倍率が小さい波長があるものの 0 になる波長はない。そのため、短い波長成分も検出でき、前述のような局所的に変化する軌道の形状を適切に把握できると考えられる。本稿では、2 台車検測車の偏心矢データを活用した、継目落ちや角折れのような波長の短い軌道変位の管理法を検討した。なお、今回は軸距 2.1m、台車間中心距離 14.4m の在来線用 2 台車検測車を対象としている。以下、その結果を報告する。

2. 継目落ち・角折れの評価指標の検討

前述のとおり、偏心矢データによれば波長の短い軌道変位を把握できるが、偏心矢のままでは進行方向により位相特性が異なるという問題が生じる。そこで、波長の短い軌道変位は 10m より短い弦長の正矢法(以下「短弦正矢」という。)で評価することとし、偏心矢からの変換精度が高い最短の弦長を検討する。

はじめに一般的な静的軌道検測装置(以下「検測装置」という。)の測定弦長である 2m 弦正矢への変換精度を検討したところ、偏心矢を 2m 弦正矢に変換した波形は、検測装置の波形と一致しなかった。これは、図 2 (a)に示すように、2m 弦正矢への変換倍率は波長 2m 付近で大きくその帯域の検測誤差も拡大したためである。

そこで、次に 4m 弦正矢への変換精度を検討する。この場合、図 2 (b)に示すように、4m 弦

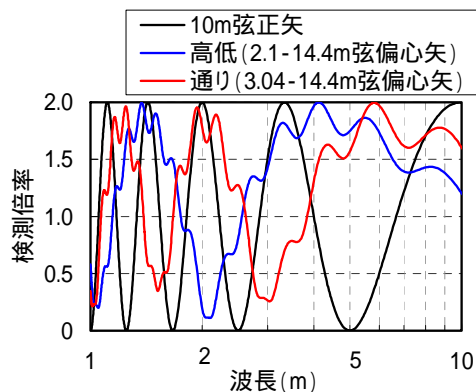


図 1 10m 弦正矢法および偏心矢法の検測倍率

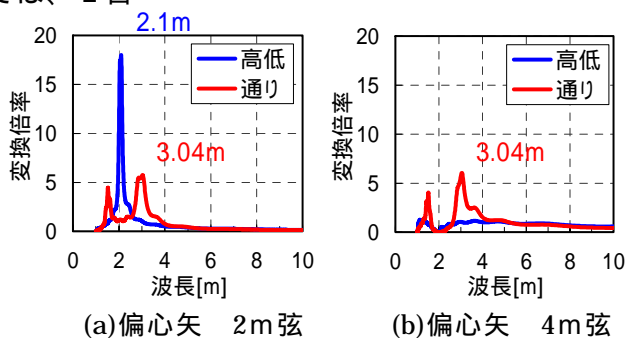
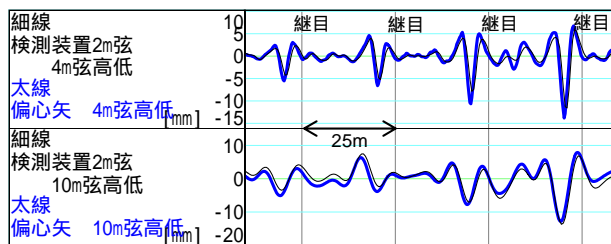
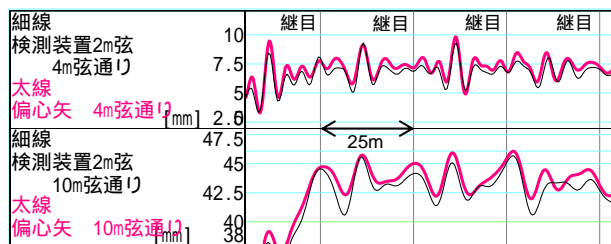


図 2 偏心矢から各弦長への変換倍率



(a)高低変位



(b)通り変位

図 3 4m 弦正矢と 10m 弦正矢との比較

正矢への変換倍率は、通り変位は波長 3.04m 付近で倍率が大きくなるものの、高低変位は倍率が大きくなる波長域が無くなる。よって、3.04m より長い最小の整数値である 4m を選定した。図 3 は、検測装置と偏心矢をそれぞれ 4m 弦正矢と 10m 弦正矢に変換した波形を示したものである。なお、偏心矢から変換した 4m 弦通り変位については、変換倍率が大きい波長 3.3m 以下をローパスフィルタでカットオフしている。同図から、高低変位、通り変位ともに、偏心矢から 4m 弦正矢へ変換した波形と検測装置から 4m 弦正矢へ変換した波形とは類似していることがわかる。また、4m 弦正矢は 10m 弦正矢よりも継目落ちや角折れを強調して表現できている。以上より、2 台車検測車の偏心矢からの変換精度が高い最短の弦長は 4m であり、継目落ちや角折れのような波長の短い軌道変位の評価指標には、4m 弦正矢を用いるのが適当であると考えられる。

3. 継目部の軌道形状に関する検討

前章で導出した 4m 弦正矢の具体的な整備目標値を定めるためには、レール継目部で生じる車両応答（輪重・横圧）を把握する必要がある。その方法は、実車での測定によるほか時刻歴シミュレーションによる算定が考えられる。後者による場合、軌道変位の形状として一般的に正弦波が用いられることが多い。しかし、継目落ちや角折れは短い区間で大きく変化するため、正弦波で表現することが必ずしも適切とはいえない。そこで本章では、レール継目部における車両応答の評価に適した軌道形状を検討する。具体的には、継目部の形状を表現しうる関数形を選定し、実際の軌道変位との適合度が最も高い関数形を定量的に評価した。

(1) 対象とする軌道変位および関数

軌道変位は、在来線 2 路線の高低変位波形から、定尺区間の合計 58 箇所の継目を選定した。また、継目部の形状を表現しうる関数には、式(1)～(5)の 5 つの関数を選定した。これらの関数は、 α 、 β の 2 つの変数から構成される。このうち α は振幅に、 β は波長（波形の広がり）に相当する。また、各関数の x は距離、 m は継目の中心位置を示す。なお、これらの関数形と高低変位の実形状とを直接比較することはできないため、ここでは両者を 4m 弦正矢に変換した波形を比較して適合度を評価する。

(2) 関数と軌道変位との適合度の評価

レール継目部の高低変位形状に最も適合する関数を以下の 2 つの観点により評価する。

(a) レール継目部の波形形状の適合度

波形形状の適合度を以下の手順により求める。

継目ごとに関数と高低変位との差の二乗を

継目中心の前後 2.5m 間について合計し、その値が最小となる α 、 β を求める（式(6)）

式(6)を全継目分合計したものを適合度 T とし、これが最小となる関数を高低変位に最も適合するものとする（式(7)）

$$S_{\min} = \min \left\{ \sum_{i=j-n/2}^{j+n/2} (f_4(x_j) - g(x_j))^2 \right\} \cdots (6) \quad , \quad T = \sum_{k=1}^N S_{\min} \cdots (7)$$

ここに、 $f_4(x)$ ：関数 $f(x)$ を 4m 弦正矢に変換した波形、 $g(x)$ ：高低変位の 4m 弦正矢波形、 n ：評価範囲（継目中心前後 2.5m）のデータ数、 N ：全継目数

関数 A	$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \times \frac{\exp\{-(x-m)/\beta\}}{[1 + \exp\{-(x-m)/\beta\}]^2}$	(1)
(ロジスティック分布の確率密度関数)		
関数 B	$f(x) = \frac{\alpha}{\beta\sqrt{2\pi}} \times \exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2\beta^2}\right\}$	(2)
(標準正規分布の確率密度関数)		
三角関数	$f(x) = \frac{\alpha}{2} \times \left\{1 + \cos \frac{\pi(x-m)}{\beta}\right\}$	(3)
6 次関数	$f(x) = \alpha \times (x-m-\beta)^3 \times (x-m+\beta)^3$	(4)
4 次関数	$f(x) = \alpha \times (x-m-\beta)^2 \times (x-m+\beta)^2$	(5)

図4は、各関数について式(7)の適合度を示したものである。この図から、在来線Aでは関数B、在来線Bでは関数Aの適合度が最も高いこと、一方6次関数と4次関数は、いずれの路線でも適合度が低く、レール継目部の波形形状を表現する関数としては適さないことがわかる。

(b) レール継目部の最大落ち込み量の適合度

次に、レール継目部中心位置付近における最大落ち込み量の適合度を評価する。具体的には、図5に示す「高低変位のみなしの頂点座標(X_i, Y_i)」と同x座標での関数の頂点「関数の頂点座標(X_i, y_i)」のy座標が近いほど適合度が高いと評価した。これは、軌道検測データは0.25mごとの離散データであり、継目部の最大振幅が必ずしも連続関数の極値と一致しないことを考慮したためである。図6は、関数の頂点 y_i と高低変位のみなしの頂点 Y_i を関数ごとにプロットし、それらの回帰直線を示した結果である。図より、関数Aの回帰直線の傾きが最も1.0に近い。このことは、関数Aの頂点が高低変位のみなしの頂点に最も近く、最大落ち込み量の適合度が高いことを示している。

以上より、高低変位(継目落ち)の形状は関数Aが最も適合度が高いといえる。なお、通り変位(角折れ)についても同様の結果を得ている。

4. 継目落ち・角折れの整備目標値

4. 継目落ち・角折れの整備目標値

本章では、軌道変位として関数Aを入力した時刻歴シミュレーション²⁾を行い、4m弦正矢の整備目標値を試算する。なお、式(1)の変数は0.3と0.45とする。これは、関数値が極大値の0.5%となる2点間の距離を波長と定義すると、波長4mと6mに相当する。

図7は、4m弦高低変位の振幅と車両応答との関係を示したものである。なお、速度は機関車では本則、特急電車では本則+10km/hとした。図7(a)より、6号PCまくらぎの設計輪重(190kN)を目安値とした場合、4m弦高低変位の目標値は15mmとなる。一方、特急列車は車両重量が小さく機関車と比べ著大輪重は問題とならない。そこで、上下動により評価する。図7(b)より、上下動全振幅2.5m/s²を目安値とした場合、4m弦高低変位の目標値は14mmとなる。以上より、4m弦高低変位の目標値は14mmが適当であると考えられる。なお、同様に4m弦通り変位と最大横圧との関係を試算した結果、4m弦通り変位の目標値は8mmを得た。

図7は、4m弦高低変位の振幅と車両応答との関係を示したものである。なお、速度は機関車では本則、特急電車では本則+10km/hとした。図7(a)より、6号PCまくらぎの設計輪重(190kN)を目安値とした場合、4m弦高低変位の目標値は15mmとなる。一方、特急列車は車両重量が小さく機関車と比べ著大輪重は問題とならない。そこで、上下動により評価する。図7(b)より、上下動全振幅2.5m/s²を目安値とした場合、4m弦高低変位の目標値は14mmとなる。以上より、4m弦高低変位の目標値は14mmが適当であると考えられる。なお、同様に4m弦通り変位と最大横圧との関係を試算した結果、4m弦通り変位の目標値は8mmを得た。

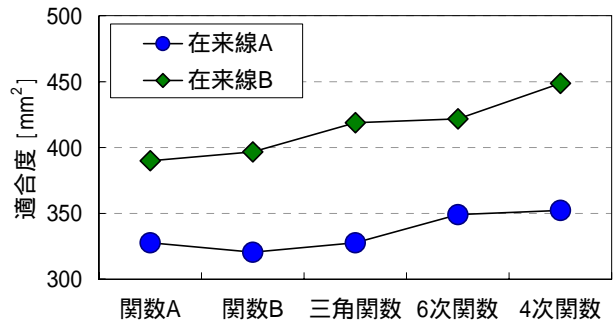


図4 波形形状の適合度の比較

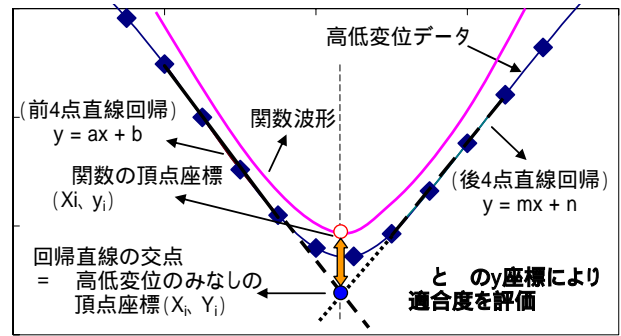


図5 最大落ち込み量の適合度の評価手法

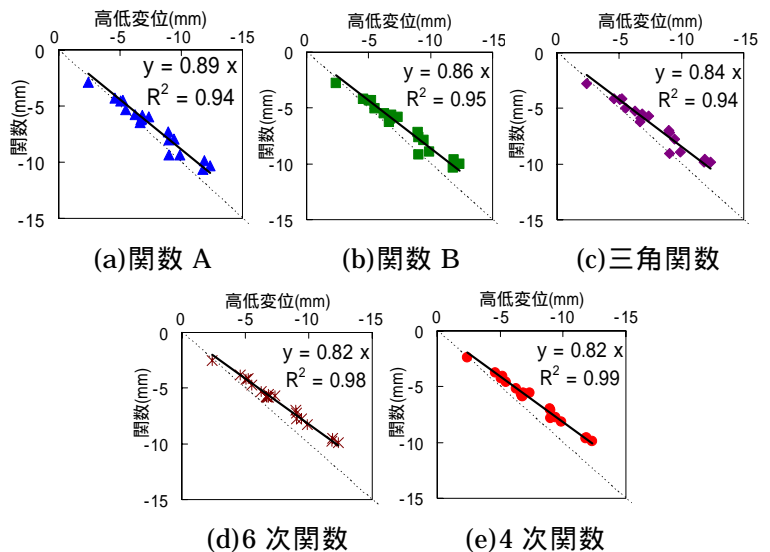


図6 高低変位と関数の最大落ち込み量の比較 (在来線A)

5. 短弦正矢を活用した道床劣化箇所の検出

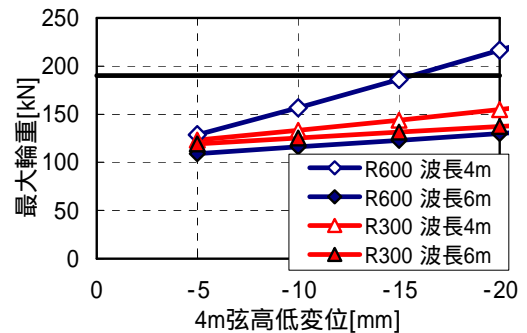
本章では、4m 弦正矢の活用例として道床劣化箇所の検出について紹介する。2 台車検測車は 4 組の測定ユニットを持つため、同一地点で動的な载荷状態が異なる 2 種類の偏心矢データが得られる³⁾。図 8 は、噴泥が発生し道床交換を行った箇所の道床交換前の高低変位波形である。1-2-4 軸による偏心矢と 1-3-4 軸による偏心矢から変換した 4m 弦正矢の波形は、一見ほとんど差がみられない。しかし、2 つの差（図 8 の、以下「高低検測差」という。）の波形は、最大で片振幅 1mm 以上の差がある。図 9 は、図 8 の箇所を含む道床交換を行った箇所の道床交換前の高低検測差と線区全体の高低検測差の頻度分布を示したものである。図より、道床交換を行った箇所の頻度分布は線区全体と異なる傾向を示している。また、この線区では高低検測差全振幅 1.0mm ~ 1.5mm を目安値とすれば、道床劣化箇所を検出できると考えられる。

6. まとめ

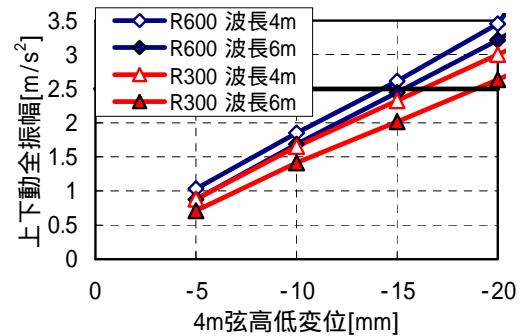
- (1) 在来線用 2 台車検測車を対象に、偏心矢からの変換精度が高い最短の弦長を検討した。その結果、4m 弦正矢を用いるのが適当であると考えられる。
- (2) 波長の短い軌道変位の形状には、関数 A（ロジスティック分布の確率密度関数）が最も適合する。
- (3) 時刻歴シミュレーションにより 4m 弦正矢の整備目標値を試算した結果、高低変位は 14mm、通り変位は 8mm を得た。
- (4) 軸位の異なる 2 種類の偏心矢による 4m 弦正矢高低検測差から、道床劣化箇所を検出できる見通しを得た。

参考文献

- 1) 竹下邦夫：偏心矢法による軌道狂い検出法、鉄道総研報告 vol.4、No.10、1990.10
- 2) 宮本岳史、石田弘明、松尾雅樹：地震時の鉄道車両の挙動解析（上下、左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション）、日本機械学会論文集（C 編）、vol.64、No.626、1998
- 3) 森本勝：偏心矢測定による軌道状態の把握手法、第 9 回鉄道技術連合シンポジウム、2002.12



(a) 機関車における最大輪重



(b) 特急電車における上下動

図 7 4m 弦正矢と車両応答との関係

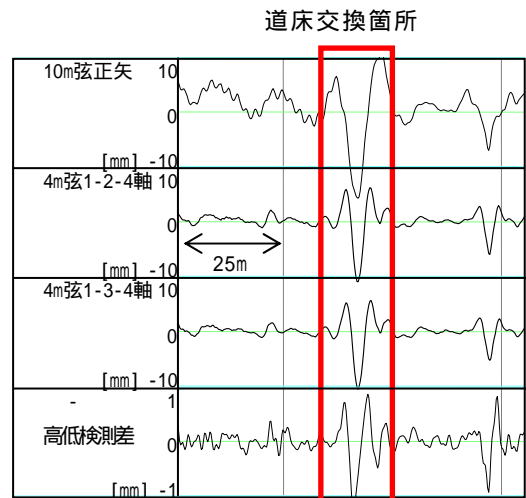


図 8 4m 弦正矢高低検測差の一例

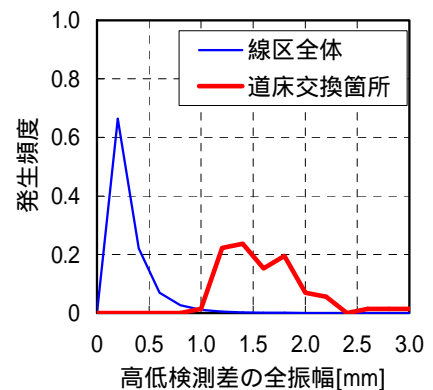


図 9 高低検測差の頻度分布