

# 軌道検測車の偏心矢を用いた継目落ち・角折れ等の評価

古川 敦\*      南木 聡明\*  
 泉 英治\*\*    米澤 秀剛\*\*\*

## Estimation Method of Short Wave Length Track Irregularity with Short Length Chord Versine

Atsushi FURUKAWA    Toshiaki NANMOKU  
 Eiji IZUMI            Shugo YONEZAWA

For evaluation of local track irregularities such as dipped or kinked rail joints, a versine of which chord length is shorter than 10m, that is the normal length in Japan, is suitable. From the view point of the evaluation accuracy, we have shown that 4m chord is the optimum length of versine which is converted from asymmetric chord versine measured by a track inspection car. In addition, we have shown that the geometry of dipped or kinked rail joints is more fitted to the form of the probability density function of the logistic distribution compared with forms of other functions. Finally we have estimated threshold of track irregularities measured by 4m chord versine. As a result, we have obtained as the control values, for maintenance, 14mm for longitudinal level and 8mm for alignment.

キーワード：継目落ち，角折れ，偏心矢，4m 弦正矢，整備目標値

### 1. はじめに

レール継目部の継目落ち，角折れは軌道の弱点箇所であるが，従来の10m弦正矢法ではこのような波長の短い軌道の形状は適切に評価できない。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<sup>1)</sup>。偏心矢法では，その検測特性から波長5m以下の成分も検知できるため，継目落ちのような局所的な軌道変位の把握が可能と考えられる。本研究では，2台車検測車の偏心矢法を利用した波長の短い軌道変位の管理方法を検討した。

るという問題もある。よってここでは，継目部の軌道形状は10mよりも短い弦長の正矢法（以下，「短弦正矢」という。）で評価することとし，偏心矢から変換する場合の精度が高い，最短の弦長を検討した。

### 2. 継目落ち・角折れ評価指標の検討

#### 2.1 本章の目的

我が国で高低・通り変位の管理に従来から用いられている10m弦正矢法の検測特性を図1に示す。10m弦正矢法は5mの整数分の1の波長で検測特性が0となるため，この近傍の波長の軌道変位は正確に測定できない。

一方，近年各社で導入されている2台車検測車は偏心矢法を用いているため，弦長の組み合わせによっては，ナイキスト周波数よりも低い帯域で検測倍率が0となる周波数が無くなるという特長がある（図2）。一方，偏心矢のままでは検測車の進行方向によって位相特性が異なる

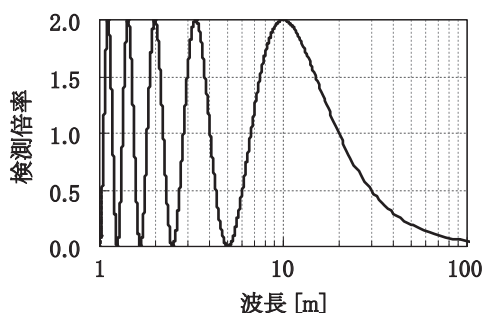


図1 10m弦正矢の検測倍率

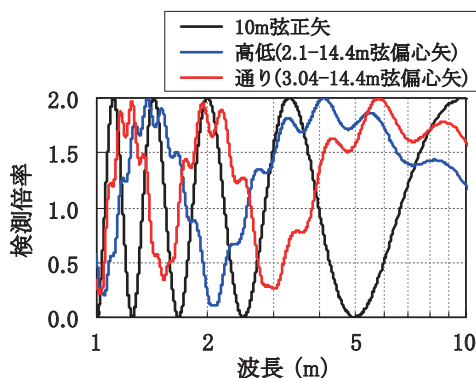


図2 偏心矢の検測倍率の例  
 (在来線2台車検測車)

\* 軌道技術研究部（軌道管理）  
 \*\* 前 軌道技術研究部（四国旅客鉄道株式会社）  
 \*\*\* 前 軌道技術研究部（東日本旅客鉄道株式会社）

特集：軌道技術

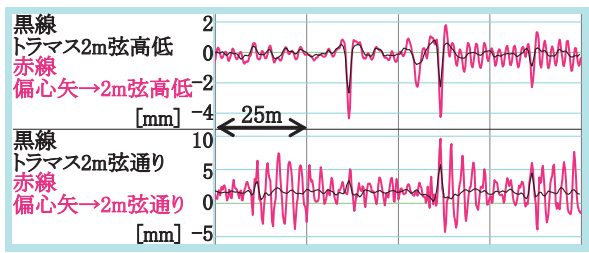
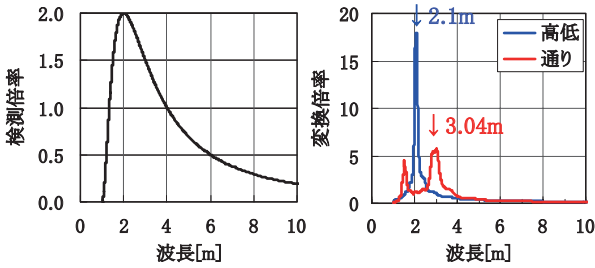
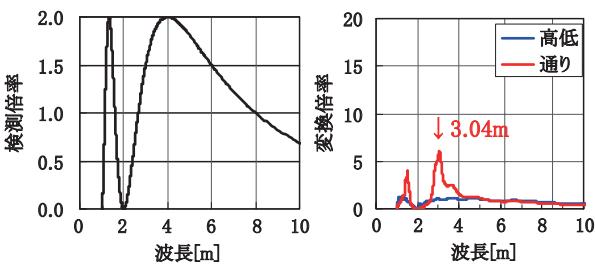


図3 2m弦正矢波形の比較



(a)検出特性 (b)偏心矢→2m弦変換倍率

図4 2m弦正矢の検出倍率と変換倍率



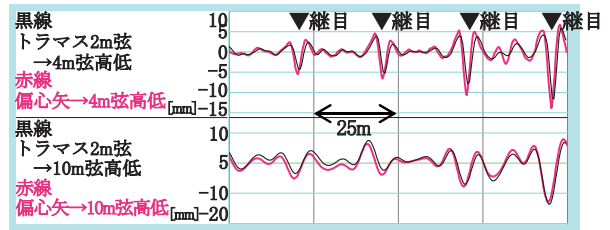
(a)検出特性 (b)偏心矢→4m弦変換倍率

図5 4m弦正矢の検出倍率と変換倍率

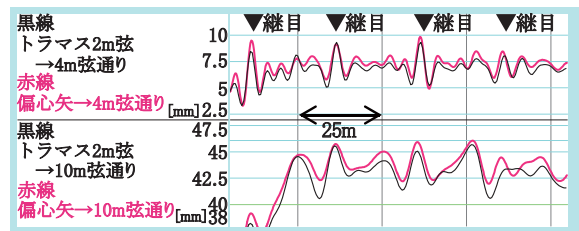
2.2 偏心矢から短弦正矢の変換法<sup>2)</sup>

偏心矢から短弦正矢への変換精度を評価するため、まず2m弦正矢による静的な軌道検測装置(商品名:トラスマスタ、以下「トラス」)という。)で測定した波形と、図2の特性を持つ偏心矢を2m弦正矢に変換した波形を比較した。図3に波形例を示す。同図より、偏心矢を2m弦正矢に変換した波形は変動が激しいことがわかる。この理由は、偏心矢から図4(a)の特性をもつ2m弦正矢への変換倍率は、図4(b)に示すとおり高低は波長2.1m付近、通りは波長3.04m付近で大きく、この帯域の検測誤差をも拡大したためである。

この影響を無くすためには、図4(b)で変換倍率が高い波長を除去するローパスフィルタ処理を行えば良い。しかしこの場合、図4(a)で示した2m弦正矢の検出倍率が1より大きい帯域の大部分をフィルタで除去してしまうことになり、残った成分は軌道変位の評価には適さない。しかし一方で、局所的な軌道変位の評価のためには弦長は短いほど良い。したがって、偏心矢から短弦正矢へ変換する際の短弦正矢の弦長は、3.04mより長い最小の整数値である4mとする。図5(a)に4m弦正矢の検出倍率を、図5(b)に偏心矢から4m弦正矢への変換

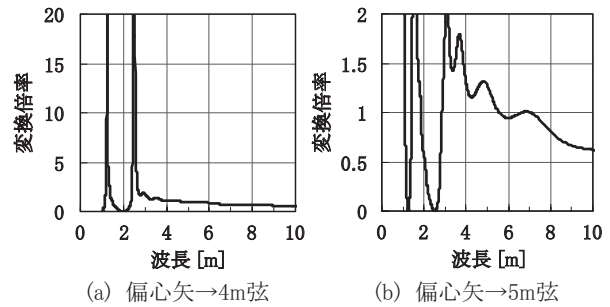


(a) 高低変位



(b) 通り変位

図6 10m弦正矢と4m弦正矢の比較



(a) 偏心矢→4m弦 (b) 偏心矢→5m弦

図7 2.5m-17.5mの偏心矢から短弦正矢への変換倍率

フィルタの特性を示す。通りは2m弦正矢と同様に波長3.04m付近で倍率が大きくなるものの、高低では倍率が大きくなる帯域が無くなる。

以上のことから、継目落ち・角折れの評価法には、偏心矢を4m弦正矢に変換した上で、通りの場合のみ変換倍率が大きい波長3.3m以下の波長をローパスフィルタで除去するのが良いと考えられる。図6に、偏心矢から得られた4m弦正矢の動的値に上記のローパスフィルタ処理をした波形とトラスマスタによる2m弦正矢を4m弦正矢に変換した波形を示す。同図には合わせて、両者を10m弦正矢に変換した波形も示す。同図から、高低、通りとも偏心矢から4m弦正矢へ変換した波形とトラスマスタ2m弦正矢から4m弦正矢波形へ変換した波形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・角折れを強調して表現できている。

なお、一部の新幹線用検測車で用いられている2.5m-17.5m弦偏心矢では、波長2.5m、1.25mの検出倍率が0となる。この場合図7(a)に示すように、これらの帯域で、偏心矢から4m弦正矢への変換倍率は無限大となり、変換ができない。したがって、波長2.5mでの検出倍率が2.5m-17.5m弦偏心矢と同様に0となる5m弦正矢が適切である。偏心矢から5m弦正矢への変換倍率を図7(b)に示す。

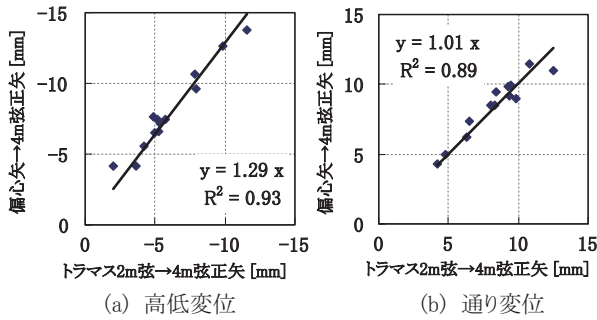


図8 動的値と静的値の振幅比較

図8に、偏心矢から4m弦正矢へ変換した波形とトラックマスタ2m弦正矢から4m弦正矢波形へ変換した波形の継目部におけるピーク値を比較したものを示す。高低、通りとも相関係数は0.9以上と高く、弦長変換に伴う誤差は小さいといえる。回帰直線の傾きは高低で1.29、通りで1.01であるが、これはトラックマスタによる静的検測と軌道検測車による動的検測の違いによるものである。高低については、動的検測時には軸重によって継目が沈下するが、通りについては、中間の測定軸が台車後軸となるため横圧が小さく、動的値と静的値の差が小さくなると考えられる。

以上のことから、継目落ち・角折れの評価方法として、在来線では2台車検測車の偏心矢から得られる4m弦正矢を、2.5m-17.5m弦偏心矢による新幹線用検測車の場合には5m弦正矢を用いるのが適当と考えられる。

### 3. 継目部の軌道形状に関する検討

#### 3.1 本章の目的

本章では、継目部の軌道形状について検討を行う。

前章で導出した4m弦正矢の具体的な管理基準値を定めるためには、レール継目部で生じる車両の応答(輪重・横圧)を知る必要がある。具体的な方法には、実車での測定のほか、シミュレーションによる方法が考えられる。時刻歴シミュレーションによって軌道変位による車両の応答を求める場合、一般に軌道変位波形として正弦波が用いられる。しかし継目落ちや角折れのような局所的な軌道変位では、短い区間で形状が大きく変化しており、正弦波による近似が適切とはいえない可能性がある。

そこで本章では、継目部における輪重・横圧変動の表現に適した軌道変位の形状を検討する。具体的には、継目部の形状を表現するいくつかの関数形と実際の軌道変位の適合度が最も高い関数形を導出する。

#### 3.2 レール継目形状の評価に適した関数形の検討<sup>3)</sup>

前節の目的のために、ここでは継目形状を近似できる数種類の関数を選定し、どの関数がレール継目部の高低変位波形に最も適合するかを定量的に評価した。

#### (1) 対象とする軌道変位および関数

##### 1) 高低変位

在来線定尺区間の代表的な高低変位波形として在来線の2路線、合計58箇所の継目を選定した。

##### 2) 関数

継目形状を表現する関数として、ここでは式(1)~(5)の5つの関数を選定した。

これらの関数はいずれも $\alpha$ 、 $\beta$ の2つのパラメータからなる。このうち $\alpha$ は振幅を、 $\beta$ は波長(波形の広がり)に相当するものである。実波形に対する適合度の評価では、継目ごとに高低変位と関数との差の二乗和(式(6))が最小となるように $\alpha$ 、 $\beta$ を求めた。なお、①~⑤の $x$ は距離、 $m$ は継目中心のキロ程である。

$$\text{①関数 A } f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \times \frac{\exp\{-(x-m)/\beta\}}{[1 + \exp\{-(x-m)/\beta\}]^2} \quad (1)$$

(ロジスティック分布の確率密度関数)

$$\text{②関数 B } f(x) = \frac{\alpha}{\beta\sqrt{2\pi}} \times \exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2\beta^2}\right\} \quad (2)$$

(標準正規分布の確率密度関数)

$$\text{③正弦波 } f(x) = \frac{\alpha}{2} \times \left[1 + \cos\frac{\pi(x-m)}{\beta}\right] \quad (3)$$

$$\text{④6次関数 } f(x) = \alpha \times (x-m-\beta)^3 \times (x-m+\beta)^3 \quad (4)$$

$$\text{⑤4次関数 } f(x) = \alpha \times (x-m-\beta)^2 \times (x-m+\beta)^2 \quad (5)$$

なお、これらの関数形と継目の実形状を直接比較することはできないため、ここでは検測車から得られる軌道変位の4m弦正矢波形と、関数①~⑤を4m弦正矢で検測した波形を比較して、適合度を評価する。最大振幅を合

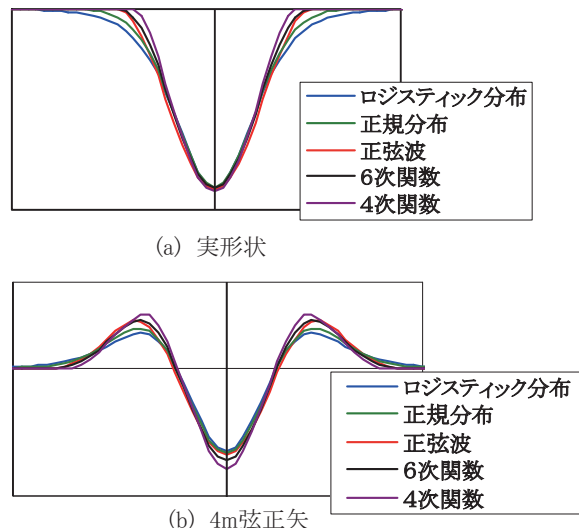


図9 関数①~⑤の形状

特集：軌道技術

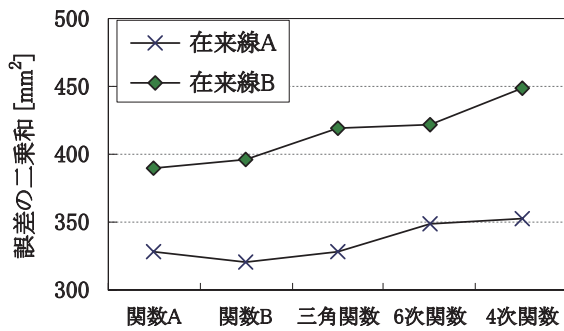


図10 関数ごとの適合度の比較

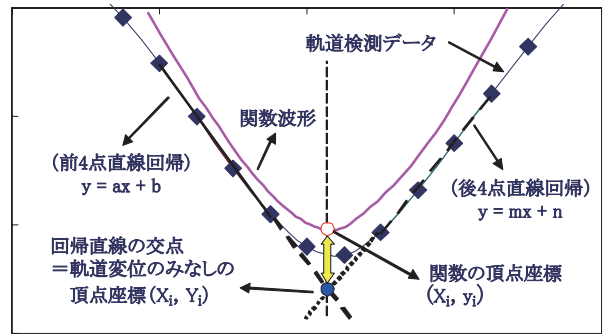


図11 継目中心付近の落ち込み量の適合度

わせた場合の、関数①～⑤の実波形を図9 (a) に、これらを4m弦正矢で検出した波形を図9 (b) に示す。実形状での振幅が等しくても、4m弦正矢で測定した振幅は20%程度差があることがわかる。

(2) 関数と軌道変位との適合度の評価

レール継目部の軌道変位形状に最も近似する関数を、

a) レール継目部の波形形状との適合度, b) レール継目部の最大落ち込み量との適合度の2つの観点により評価した。

a) レール継目部の波形形状の適合度

① 評価方法

レール継目部の高低変位の実測形状と関数との適合度を以下の手順により評価した。

i) 継目ごとに関数値と高低変位値との差の二乗を評価範囲（継目中心前後2.5m間）のデータ数について合計し、その値が最小となる  $\alpha$ 、 $\beta$  を求める (式(6))。

$$S_{\min} = \min \left\{ \sum_{i=j-n/2}^{j+n/2} (f_4(x_j) - g(x_j))^2 \right\} \quad (6)$$

ここに、 $f_4(x)$ : 関数 $f(x)$ を4m弦正矢で検出した波形、 $g(x)$ : 実軌道変位の4m弦正矢波形、 $n$ : 評価範囲（継目中心前後2.5m）のデータ数

ii) 継目毎の式(6)の最小値 $S_{\min}$ を全継目分合計したものを適合度と定義する (式(7))。これが最小となる関数形状を、最も実軌道変位に適合したものとする。

$$T = \sum_{k=1}^N S_{\min} \quad (7)$$

ここに、 $N$ : 全継目数

なお、本報告では適合性の評価範囲を継目中心の前後2.5m間とした。これは、在来線Aの4m弦正矢高低の波形について、全継目の継目落ちの頂点から両側の擬似波形の頂点までの距離の平均値が2.5mであったため、その距離を評価範囲として採用したものである。

② 評価結果

前述の評価手法により、各関数の波形形状の適合度を比較した。図10は各関数について式(7)の値を示したものである。この図から、在来線Aでは関数Bの、在来線Bでは関数Aの適合度が最も高い。6次関数、4次関数はいずれの線区でも適合度が低く、レール継目部の波形形

状を近似する関数としては適さない。三角関数は、在来線Aでは関数A、関数Bと同程度の適合度を示している。

(3) レール継目部の最大落ち込み量の評価

① 評価方法

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（振幅の極小値）と各関数との適合度を評価する (図11)。これは、軌道検測データが0.25m毎の離散データであるため、継目部における最大振幅が連続関数の極値と必ずしも一致しないことを考慮して行うものである。具体的な手順は以下のとおりである。

- i) 前後の高低変位データから、頂点座標になるであろう位置を抽出する。
- ii) その座標に隣接するデータを除いた4点のデータによる直線回帰を行う。
- iii) 2つの回帰直線の交点座標を求め、これを継目の「みなしの頂点座標 ( $X_i, Y_i$ )」とする。
- iv) みなしの頂点  $X_i$  での関数の  $y$  座標を求め、これを「関数の頂点座標 ( $X_i, y_i$ )」とする。
- v) 2つの  $y$  座標  $Y_i, y_i$  を各々の継目部最大落ち込み量とし、両者の値が近いほど適合度が高い関数とする。

② 評価の結果

図12は、在来線Aにおける関数の頂点  $y_i$  と実測波形のみなしの頂点  $Y_i$  を関数①～⑤についてプロットしたものである。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、継目落ち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。なお、在来線Bでも同様の結果を得ている。

(4) 結論

以上のことから、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、角折れ（通り変位）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

本章では、関数Aを入力波形とした時刻歴シミュレーション<sup>4)</sup>を行い、短弦正矢の整備目標値を算定する。

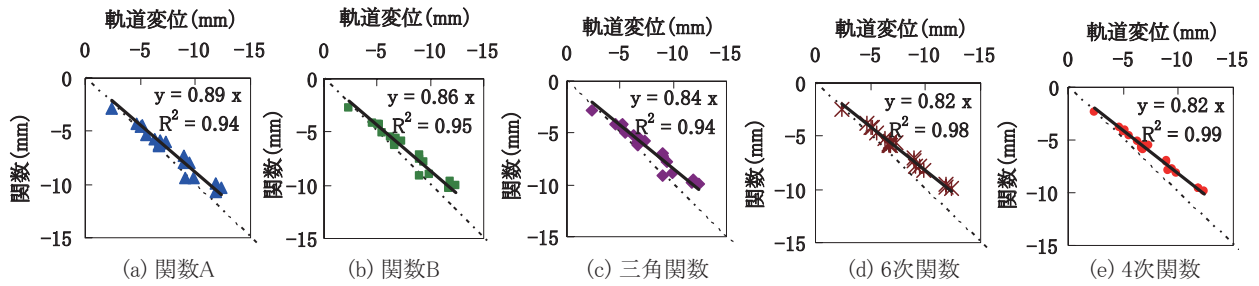


図12 実測波形と各関数の4m弦正矢における最大落ち込み量の比較（在来線A）

4.1 シミュレーション条件

シミュレーション条件は以下のとおりである。

- (1) 線形…直線, 半径600m・C105mm, 400m・C105mm, 250m・C80mm, 160m・C40mm
- (2) 車両の種類…在来線特急電車, 通勤電車空車, 電気機関車, コンテナ貨車積車
- (3) 軌道変位…(波形)関数A, (波数)3波(25m間隔で継目落ち3箇所), 波長4mまたは6m。なお, ここでは図9(a)で関数の値が極大値の0.5%となる2点間の距離を軌道変位の波長と定義する。また, シミュレーションでは軌道変位として図9(a)に示す実形状を入力するが, 以下の評価では, これを4m弦正矢で測定した振幅を用いる。

4.2 シミュレーション結果および考察

(1) 4m弦正矢高低

図13に電気機関車, 特急電車における高低変位の振幅と車両の応答との関係を示す。速度は, 各曲線に対し機関車は本則, 特急電車は本則+10km/hである。また車両の応答は3つの継目のうち最大値を示す。なお, 25m間隔の3波連続の継目落ちでは, 軌道変位の連続による車両の共振は見られなかった。

電気機関車の最大輪重では波長が短い方が, また曲線半径が大きい方が最大輪重は大きい。前者は, 波長4m~6mの範囲では, 振幅が等しい場合は波長が短い方がより衝撃的な輪重が発生するためであり, 後者は, 曲線半径が大きいと走行速度が高くなるためと考えられる。6号PCまくらぎの設計輪重である190kNに対応する4m弦正矢高低は15mmとなった。

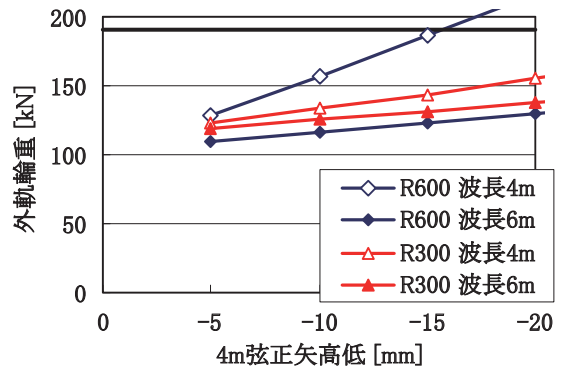
特急電車の場合, 車両重量が小さいため継目部における著大輪重は問題とならないことから, 上下加速度で評価することとする。乗り心地から定まる全振幅の目安値を2.5m/s<sup>2</sup>(≒0.25g)とした場合, 図13(b)から4m弦正矢高低変位の目標値は14mmとなる。

図13に示した結果は全体の一例であるが, 機関車の著大輪重, 特急電車の上下加速度に対応する4m弦正矢高低変位の値に大きな違いは無かったことから, 実務的には14mmを目標値として差し支えないと考える。

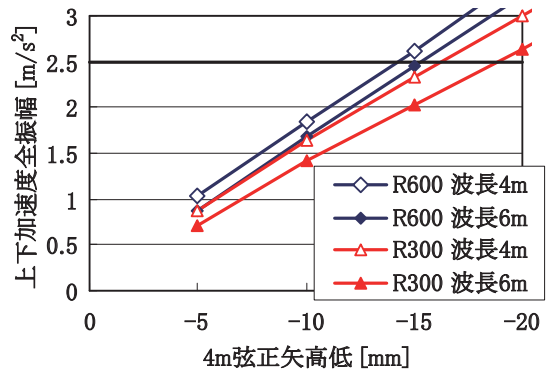
(2) 4m弦正矢通り

通り変位については, 継目部における著大横圧で評価する。図14に, 特急電車における4m弦正矢通り変位の振幅と外軌横圧との関係を示す。なお, 速度は各曲線半径に対し, 本則+10km/hの場合のものである。同図より, 全体として波長4mと6mでは, 後者の方が横圧はやや小さい。また, 速度を本則+10km/hとした場合, 曲線半径の影響は大きくない。なお継目落ち, 角折れとも, 継目を挟んで前後まくらぎ3本程度(2m弱)までの範囲で発生していることが多いことから, ここでは波長4mの場合の結果を用いることとする。この場合, 在来線急曲線用の9型締結装置の横圧限度60kNに相当する4m弦正矢通り変位の振幅は8mmとなる。

図15にコンテナ貨車積車における4m弦正矢通り変位の振幅と外軌横圧との関係を示す。速度は各曲線半径の本則である。横圧60kNに相当する4m弦正矢通り変位の



(a) 機関車における最大輪重



(b) 特急電車における上下加速度

図13 4m弦正矢高低変位の振幅と車両の応答との関係

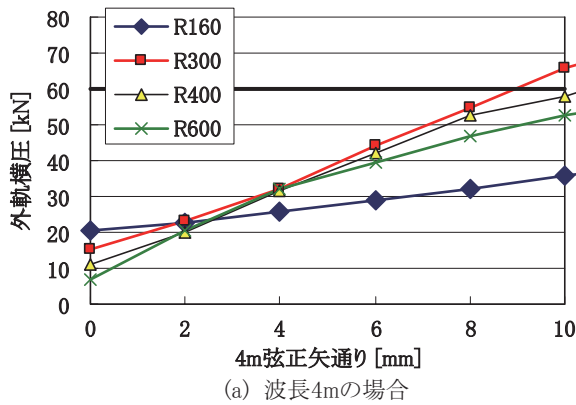
特集：軌道技術

振幅は20mm以上となり、特急電車よりも大きい。

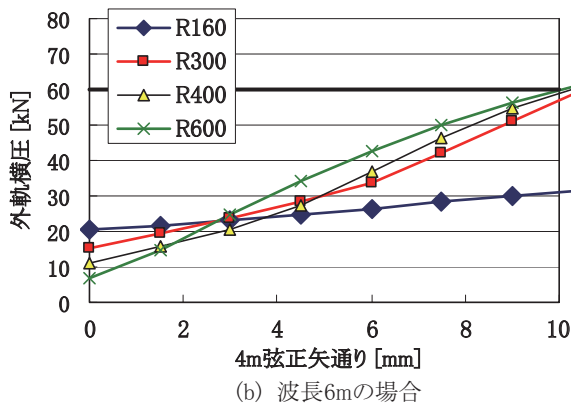
以上のことから、継目部における著大横圧に対する通り変位の管理目標値は、4m弦正矢で8mmとなる。

(3) 新幹線に対する検討

図16に、新幹線の車両諸元を用いてシミュレーションを行った結果の例を示す。図13 (b)と同様に上下加速度 $2.5m/s^2$ に対応する値を求めると、270km/h走行に対し5m弦正矢高低14mmとなる。また横圧68kNに対応する値は同じく5m弦正矢通りで10mmとなる。いずれも在来線の場合とほぼ同程度の値となった。



(a) 波長4mの場合



(b) 波長6mの場合

図14 4m弦正矢通り変位の振幅と外軌横圧との関係 (特急電車)

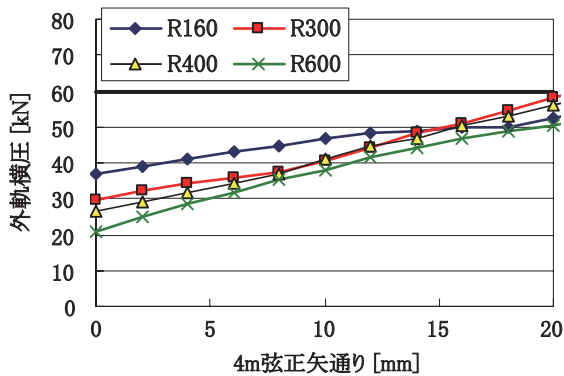
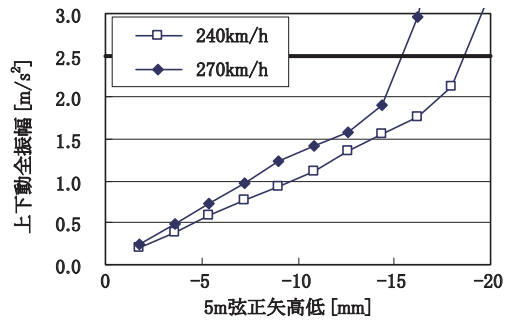
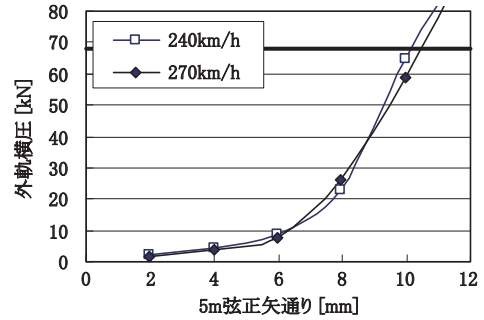


図15 4m弦正矢通り変位の振幅と外軌横圧との関係 (コンテナ貨車積車)



(a) 5m弦正矢高低と上下動 (直線)



(b) 5m弦正矢通りと横圧 (R8000, C100)

図16 5m弦正矢の振幅と車両の走行性との関係 (新幹線)

5. まとめ

本報告の内容をまとめると以下のとおりとなる。

- (1) 軌道検測車による偏心矢波形を短い弦長の正矢に変換する場合の弦の長さは、変換精度の観点から在来線用検測車では4mが、弦長2.5m-17.5mの新幹線用検測車では5mが良い。
- (2) 継目落ちのような局所的な軌道変位波形に最も適合する関数形は、ロジスティック分布の確率密度関数であった。
- (3) 時刻歴シミュレーションによって車両走行性の目安値に対応する短弦正矢の整備目標値を求めた結果、在来線は4m弦正矢高低14mm、通りは同じく8mmとなった。新幹線の場合は、5m弦正矢で高低14mm、通り10mmであった。

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) 泉英治，米澤秀剛：偏心矢データを用いた短い波長の軌道変位管理手法，新線路，2008.4
- 3) 南木聡明，古川敦：レール継目部における輪重変動評価のための軌道変位波形の検討，第15回軌道技術・政策連合シンポジウム，2008.12
- 4) 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, pp.236-243, 1998