

レール凹凸連続測定装置の検出波長帯域の拡張に関する検討

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 梶原和博

1. はじめに

鉄道車両の繰り返し走行に伴い形成されるレール波状摩耗の効率的な維持管理のため、またレール波状摩耗の成長機構や進展過程を解明するため、著者らはレール波状摩耗の凹凸を連続的に測定可能な「レール凹凸連続測定装置」を開発してきた¹⁾。本研究では、既存のレール凹凸連続測定装置の性能向上の一環として、検出波長帯域の拡張方法について検討した。

2. レール凹凸連続測定装置の検出原理と検出特性¹⁾

レール凹凸連続測定装置は、偏心矢法の測定原理を用いて検出速度に依存しないレール凹凸の連続測定を実現している。ここで偏心矢法は、図-1に示すように、剛な測定基準とそれに固定された3つの変位センサによって短弦と長弦を構成し、式(1)によって、レール長手方向の偏心矢測定量（基準線からの離れ） $z_{asym}(x)$ を得る手法である。

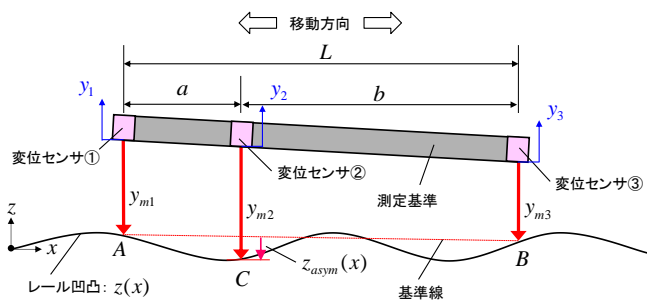


図-1 偏心矢法の測定原理

$$z_{asym}(x) = -\frac{b}{a+b}y_{m1} + y_{m2} - \frac{a}{a+b}y_{m3} \quad (1)$$

図-2に、既存のレール凹凸連続測定装置の検出特性（伝達関数） $H(\omega)$ を示す。検出特性は、式(2)に示すように、真のレール凹凸 $z(x)$ に対する偏心矢測定量 $z_{asym}(x)$ の振幅比として表される。すなわち、レール凹凸を得るには、偏心矢測定量に検出特性の逆特性を有するデジタルフィルタを作用させる復元波形処理を行う必要がある。ここで偏心矢法では、短弦長 a と長弦長 b の比率によって検出特性が定まるが、一般に短弦長に相当する波長で検出倍率が低下するため、短弦長よりも短い波長の復元波形処理は行わない。

$$H(\omega) = \frac{z_{asym}(x)}{z(x)} = -\frac{b}{a+b}e^{-i\omega a} + 1 - \frac{a}{a+b}e^{i\omega b}, \quad \omega = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

本装置では、日本国内の在来線で発生するレール波状摩耗の標準的な波長帯域を網羅すること、および使用するレーザー変位センサの外寸寸法などの制約を考慮し、短弦長 $a=25\text{mm}$ 、長弦長 $b=230\text{mm}$ 、弦長 $L=255\text{mm}$ の偏心矢を採用している。同図より、このセンサ配置では、波長 $27\sim 705\text{mm}$ の範囲で検出倍率が0.2以上と

なる。一方で、短弦長に相当する波長 25mm における検出倍率が0.12と低く、通常は波長 25mm まで含めて復元波形処理を行うと誤差が大きくなるため、この帯域を外した波長 30mm よりも長い帯域のレール凹凸を評価対象としている。

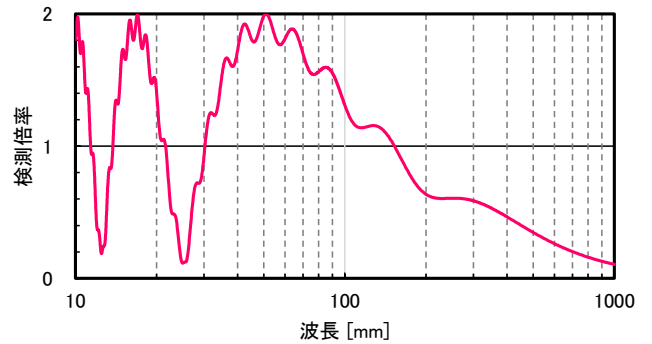


図-2 既存のレール凹凸連続測定装置の検出特性図 (25mm-230mm 偏心矢)

3. レール波状摩耗の凹凸特性²⁾

著者らの最近の調査²⁾により、鉄道の営業線におけるレール波状摩耗の凹凸特性としては、その成長要因と進展過程によって広範な波長のレール凹凸が存在していることがわかってきた。具体的には、レール波状摩耗の成長要因には、①軸距間でのレール波動の干渉、②軌道弾性支床の反共振現象、③軌道・車両全体系の反共振現象などがあり、その基本波長は③よりも①の方が短く、波長 30mm 程度のもも確認されている。さらに、波状摩耗の進展過程には、形成期、成長期、飽和期の3段階があり、進展過程が成長期から飽和期に移行すると、凹凸波形に基本波長の整数分の1の高調波成分が出現することがわかってきた。

ここで、成長要因の②、③については、既存のレール凹凸連続測定装置を用いて、営業線において基本波長の高調波成分を観測できていたが、成長要因の①については、前述のレール凹凸連続測定装置の検出特性から、営業線での高調波成分の観測はできていない。

4. 偏心矢法の配置変更と検出特性の確認

偏心矢法は、短弦と長弦の比率によって検出特性が大きく変化するが、偏心矢法を使用している代表例である2台車の軌道検測車では、ベースとする車両の台車中心間隔と軸距によって偏心矢配置が限定される。しかしながら、レール凹凸連続測定装置では、測定基準にレーザー変位センサを取り付けて偏心矢を構成していることから、偏心矢配置を比較的容易に設定可能であるという特徴を有している。

この観点により、図-3に、偏心矢を構成する弦長比を変化させた場合の検出特性を2次元で示す。横軸の正規化波長は偏心矢の弦長 L で波長 λ を正規化した指

キーワード：レール波状摩耗，レール凹凸，連続測定，偏心矢，検出特性

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

標、縦軸の弦長比は偏心矢を構成する片方の弦長 a を全体の弦長 L で正規化した指標である。同図より、偏心矢法の検測倍率は0~2の間で変化するが、弦長比を変化させることで短波長側の検測倍率が規則的かつ大きく変化することがわかる。特に、センサ間隔およびその整数倍の逆数に相当する波長において、検測倍率が0になることがわかる。

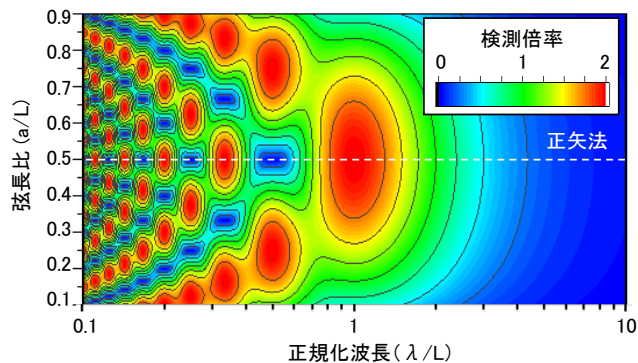


図-3 弦長比を変化させた場合の検測特性図

ここで、実際のレール凹凸連続測定装置（既存装置）においては、使用するレーザー変位センサの外寸寸法（幅22.6mm）から、隣接する2つのセンサの光軸間の距離に相当する短弦長はそれ以上であることが制約となっていた。そのため、以降の検討では、センサの固定方法なども考慮し既存装置でも採用した寸法として、短弦長は25mmに固定した上で、長弦長を変化させることとした。

図-4に、短弦長を25mmに固定したうえで長弦長を変化させた場合における、波長25mm（短弦長に相当）および波長12.5mm（短弦長の1/2に相当）での検測倍率を示す。同図より、波長25mmと波長12.5mmの検測倍率は周期的に変化するが、長弦長が33mm、42mmなどの条件では、何れの波長の検測倍率も0.6を上回る条件があることがわかった。なお、検測倍率が0になる長弦長は、短弦長と長弦長が整数の比率となる条件である。

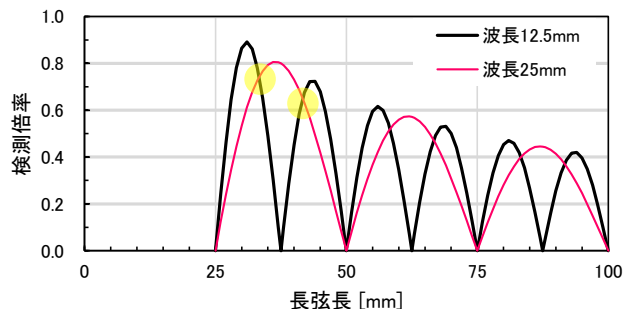


図-4 短弦長を25mmに固定した場合の長弦長と波長25mmおよび波長12.5mmでの検測倍率

図-5に、例として、図-4において波長25mmと波長12.5mmにおける検測倍率が交差する長弦長の一番短い条件として、長弦長を33mmとした場合の検測特性図を示す。図中には、比較のために既存装置で採用している25mm-230mm偏心矢の検測特性も示している。同図より、この偏心矢配置とした場合には、従来装置の偏心矢配置と比較して、短波長側での検測倍率の極小

が大きくなっている。一方で、長波長側では、従来の配置よりも全体の弦長が短くなったことに起因し、検測倍率が低下している。この偏心矢配置においては、波長8.3mm（短弦長の1/3に相当）で検測倍率が0.11と極小となるが、波長8.5~280mmにおいて検測倍率が0.2以上となり、既存装置よりも大幅に短波長側の検測倍率が向上する。

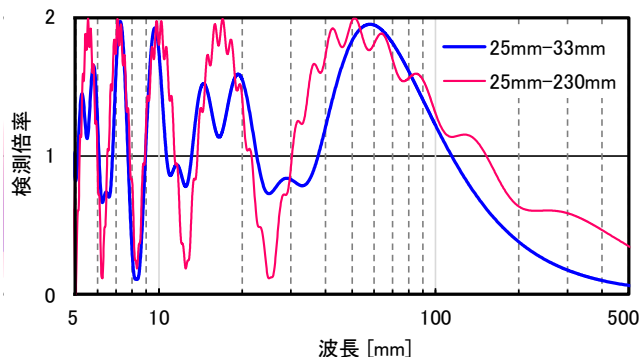


図-5 偏心矢配置を変更した場合の検測特性図の例 (25mm-33mm 偏心矢)

5. センサ配置の検討

図-6に、短波長領域から長波長領域までのレール凹凸を測定可能とするセンサ配置の例を示す。既存装置では測定系の冗長性を考慮し、4つの変位センサを左右対称に配置し2組の25mm-230mm偏心矢を構成していたが、改良後は同図に示すように4つの変位センサを左右非対称に配置することで、従来の25mm-230mm偏心矢に加え、短波長領域のレール凹凸の測定用に例えば25mm-33mm偏心矢を新たに構成することが考えられる。

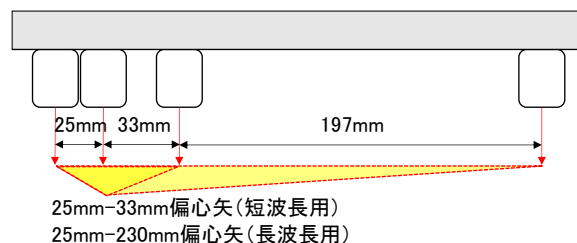


図-6 検討したセンサ配置の例

6. まとめ

本研究では、既存のレール凹凸連続測定装置における検出波長帯域の拡張方法について検討した。その結果、弦長の異なる偏心矢配置を採用することによって、既存装置よりも短波長側の検測倍率の向上が可能であることを示した。今後は、実際に既存装置を改良し、今回提案した偏心矢配置による短波長領域のレール凹凸の検測精度の検証を進める予定である。

参考文献

- 1) 田中博文, 梶原和博, 清水惇, 網干光雄: 偏心矢法を用いたレール凹凸連続測定装置の開発とレール波状摩耗測定への適用, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.880, DOI:10.1299/transjsme.19-00235, 2019.
- 2) 田中博文, 梶原和博, 網干光雄: 営業線におけるレール波状摩耗の成長機構と進展過程の検証, 鉄道総研報告, Vol.34, No.4, pp.17-22, 2020.