

## 1 次差分法と2次差分法の組み合わせによる超長波長帯域を含む復元波形の算出法

鉄道総合技術研究所 非会員 ○鈴木 惇平  
 鉄道総合技術研究所 正会員 三和 雅史  
 鉄道総合技術研究所 正会員 田中 博文

## 1. はじめに

新幹線の高速化に伴い、車両上下振動を推定するシミュレーションにおいて、これまでより長い波長帯域を含んだ軌道形状を表現可能な精度の高い復元波形が必要となりつつある。復元波形の算出においては、偏心矢や正矢データ等の2次差分法による検測データを用いることが一般的である。しかしながら、2次差分法の検測特性は、長波長になるに従って検測倍率が低下するため、波長100mを超える帯域（超長波長帯域）の復元は不向きである<sup>1)</sup>。一方で、長波長高低の検測に用いられる1次差分法の検測特性は、2次差分法よりも長波長帯域の検測倍率が高い<sup>2)</sup>。

そこで、本研究では短波長帯域から超長波長帯域を含む、広い波長帯域を有する復元波形を精度よく算出することを目的として、1次差分法と2次差分法を組み合わせた復元波形の算出法を考案した。

## 2. 検測機構と検測特性

## (1) 1次差分法と2次差分法による検測機構

図1に、1次差分法による検測機構の例として長波長高低の検測機構を示す。同図のように1次差分法では2箇所の測点間の相対的な変位を測定するとともに、測定基準線の傾斜を求めるため、高精度のジャイロ装置が必要となる。そのため1次差分法による測定は、主に新幹線の軌道検測車への適用に限られている<sup>2)</sup>。

図2に、2次差分法による検測機構の例として偏心矢高低の検測機構を示す。同図のように2次差分法では、3箇所の測点間の相対的な変位を同時に測定する。復元波形の算出においては、偏心矢や正矢データ、あるいは偏心矢から正矢に演算されたデータから算出する方法が一般的である。

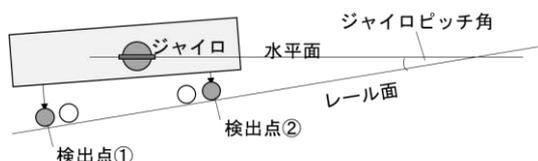


図1 1次差分法による検測機構（長波長高低）

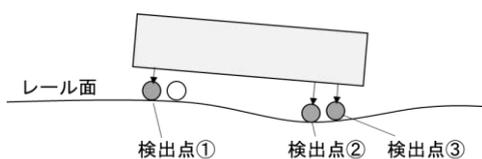


図2 2次差分法による検測機構（偏心矢高低）

## (2) 1次差分法と2次差分法の検測特性

図3に、新幹線の2台車軌道検測車の1次差分法および2次差分法での検測倍率の例を示す。本研究では、1次差分法の例として16.4m-1次差分法、2次差分法の例として2.25m-14.15m 偏心矢を用いる。2次差分法においては、3~20m程度の短い波長帯域で検測倍率が高くなるが、波長が長くなるに従って検測倍率が低下する。例えば、波長200mでの検測倍率は0.016倍と低いいため、復元波形の算出時には測定値を62.5倍することになる。よって、仮にこの波長成分に0.1mmの誤差が含まれていた場合、6.25mmもの誤差が復元波形に表れることとなる。一方で、1次差分法では、検測倍率は波長16.4mで0となるものの、波長32.8mで2となり、長波長側での検測倍率は2次差分法よりも大きいことがわかる。例えば、波長200mの検測倍率は0.51倍であり、この波長成分に0.1mmの誤差が含まれていても、復元波形に表れる誤差は0.2mm程度に留まる。したがって超長波長帯域を含む復元波形を算出する場合は、1次差分法を活用することが適していることがわかる。

図4に、実際に検測された2次差分法(2.25m-14.15m 偏心矢)および1次差分法(16.4m-1次差分法)の各高低変位波形に、波長300mの正弦波の半波を誤差として重畳させ、誤差を含む/含まない両データから算出された復元波形を比較した。ここで、誤差として与える正弦波の振幅は、誤差を与える区間における各高低変位の $3\sigma$ に相当する値を設定した。また、復元フィルタの設計値は次数16385、復元帯域30~200mとした。1次差分法では、検測データの誤差による影響は比較的に低く、最大で3.6mm程度であった一方、2次差分法

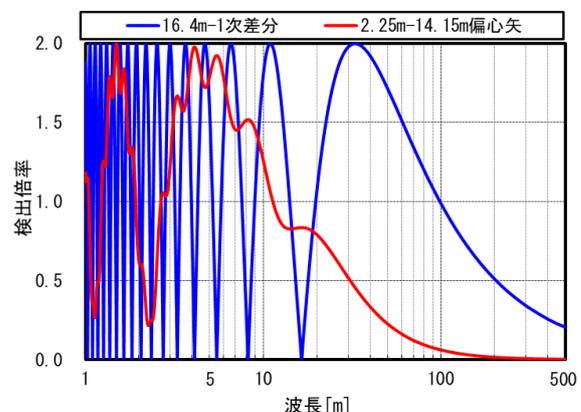


図3 検測特性（1次差分法と2次差分法）

キーワード 新幹線高速化, 超長波長, 復元波形, 検測特性, 1次差分法, 2次差分法

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 TEL042-573-7277

では、検測データの誤差による影響は大きく、最大で18.8mmであった。また、2次差分は、誤差を重畳させた範囲を超えて、前後450m程度に渡って誤差の影響が広く波及していた。

3. 広い波長帯域を有する復元波形の算出法

2章で示したように、超長波長帯域を含む復元波形を算出する場合は1次差分法を用いることが好ましい。しかしながら、1次差分法では変位の検出点間隔の波長において検測倍率が0となるため、これよりも短い波長帯域を適切に復元できない。そこで、本研究では1次差分法による超長波長復元波形と2次差分法による短波長復元波形を重ね合わせることで、広い波長帯域を有する復元波形の算出法を提案する。

具体的には、図3より本研究で用いた1次差分法と2次差分法の検測特性が波長20m付近で交わることから、およそ20mよりも短い波長帯域の算出には2次差分法の復元波形を用い、これよりも長い波長帯域の算出には1次差分法の復元波形を用い、2つの復元波形を組み合わせる。このとき、図5に示すように、実際はデジタルフィルタの特性として、カットオフ周波数に遷移帯域を設ける必要がある<sup>3)</sup>。本手法では同図に示すように、波長20~25m(空間周波数0.04~0.05[1/m])をそれぞれの遷移帯域として、2つの復元波形を重ね合わせた後の波形の振幅利得が1となるようにする。

4. 実データを用いた手法の妥当性の検証

4章では、3章で考案した短波長帯域から超長波長帯域を含む、広い波長帯域を有する復元波形の算出法について、実データを用いた検証結果を記す。

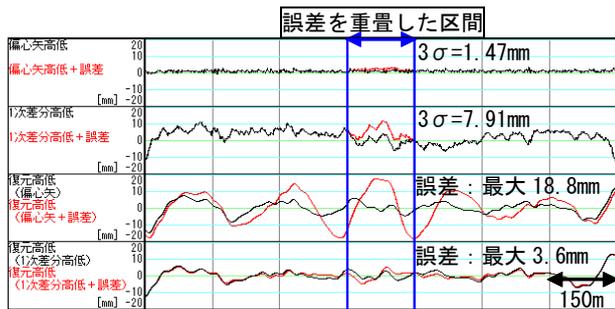


図4 検測誤差による復元波形算出への影響

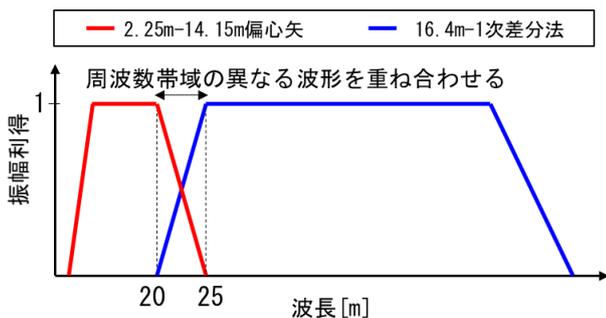


図5 超長波長復元波形の算出方法

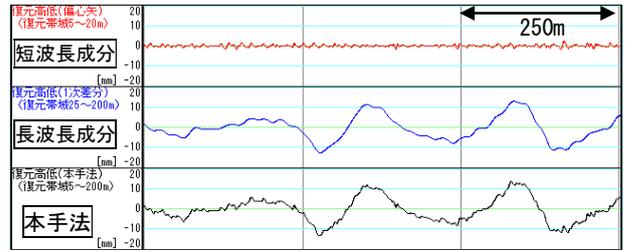


図6 本手法による超長波長帯域の復元波形

表1 復元波形作成フィルタのパラメータ

種別	帯域①	帯域②	帯域③	帯域④	次数
2次差分	4m	5m	20m	25m	8193
1次差分	20m	25m	200m	250m	16385



図7 復元波形作成のフィルタ

図6に実際に検測された1次差分法と2次差分法に対して本手法を適用して算出した復元波形を示す。ここで、設計した復元フィルタは表1と図7の通りであり、インパルス応答および周波数応答特性の安定性を考慮して作成した。図6より、本手法では、1次差分法と2次差分法のデータを組み合わせることで、超長波長帯域と短波長帯域の両成分が正確に反映された復元波形を算出できたことがわかる。

5. まとめ

本研究では、短波長帯域から超長波長帯域を含む、広い波長帯域を有する復元波形を算出するために、1次差分法と2次差分法のデータを組み合わせる手法を考案した。本手法では、復元フィルタの遷移帯域を振幅利得が1となるように重ね合わせることで、1次差分法と2次差分法で取得可能な波長帯域を有する復元波形を算出することができる。本手法は、今後の新幹線高速化のための各種シミュレーション等における活用が期待される。

参考文献

- 山本修平, 坪川洋友, 小木曾清高: 長波長帯域における復元波形の精度検証, 土木学会第71回年次学術講演会, VI-265, 2016.
- 保線工学編集委員会編: 保線工学<下>, 鉄道現業社, pp.79-80, 2018.
- 田中博文, 古川敦: 軸箱加速度と軌道検測波形を用いた著大輪重・横圧の管理手法, 鉄道総研報告, Vol.22, No.8, pp.35-40, 2008.