

バラスト軌道の沈下量精密測定法の開発

相川 明* 緒方 政照**

Development of Low-Cost and Precise Measurement Techniques for Distribution of Absolute Settlement of Ballasted Tracks

Akira AIKAWA Masateru OGATA

The ballast layer is subject to both deformation and degradation because of frequent traffic running loads. It is therefore important to understand the mechanism of ballasted track deterioration and to predict track settlement for reducing track maintenance costs and designing new track structures. The author developed low-cost, high precision and non-contacting monitoring techniques to comprehend periodically, the multipoint distribution of the absolute settlement of the ballasted track over the long term. Using an electronic digital level with a bar code staff, artificial reading errors of measurement were abolished. A corrective calculation using three-dimensional least squares approximation was introduced based on four or more fixed stakes for reference, as arranged around the measuring points. The installation errors of the equipment, which was set on the tripod at an arbitrary point in the measurement zone, were backward calculated and removed. The proposed technique was applicable to a revenue-service railway line to grasp the settlement distribution of 100 continuous sleepers along the direction of the railway track, including welding joint positions. Results confirmed that the standard deviation of the error of measurement was highly precise: 0.2 mm or less. The measuring time was approximately 1 min per measuring point.

キーワード：バラスト軌道、沈下量測定、軌道破壊、電子レベル、最小自乗法補正計算

1. はじめに

我が国の鉄道軌道の大部分は、その道床部に碎石バラスト層を有するバラスト軌道である。バラスト軌道は、列車走行によって発生するまくらぎ下面の荷重を、道床碎石層にて効率よく分散して、路盤に伝達するとともに、振動、騒音、衝撃荷重を吸収・緩和する役割を担う。また、排水性も良好であり、施工費も安価である。

これらの優れた特徴は、道床を構成するバラスト碎石集合体の、粗粒材としての力学特性、いわゆる粒状性によりもたらされる。しかし、バラスト碎石集合体の骨格構造は、列車走行による繰返し荷重を受けて容易に変形し、道床内部に塑性ひずみが不均一に累積する。その結果として、軌道面において軌道変位が進行する、いわゆる「軌道破壊現象」が避けられず、このことが保守管理上の大きな技術課題となっている。したがって、軌道の保守管理を効率よく実施するには、列車の走行状況に応じて、道床内部の不均一な沈下現象を適切に予測し、どのような対策が沈下抑制に有効かを定量的に評価できるモデルの開発が望まれている。

* 鉄道力学研究部（軌道力学）

** 東日本旅客鉄道㈱ 高崎新幹線保線技術センター

本報告では、著者らが開発を行っている粒状性に着目したバラスト軌道劣化モデルの開発の経緯についてまとめるとともに、本モデルの検証に必要な軌道沈下の精密測定法について述べる。本測定法は、レール長手方向に関する軌道の沈下量分布を把握するためのものであり、電子レベルを用いた汎用の水準測量技術に、測点間の位置関係を考慮した最小自乗法による補正計算法を導入したものである。本稿では、その理論と応用例について紹介する。

2. 軌道沈下の精密測定法の開発経緯

道床バラストは任意形状を有する碎石粒子の集合体である。その安定性や動的挙動特性は、不連続な碎石粒子で構成される骨格構造の力学的特性に支配される。したがって、軌道破壊現象の本質を把握するには、碎石粒状集合体というマイクロ構造に関する接触機構を制約条件とし、碎石形状、材料物性、表面摩擦、粒子間粘性等の材料特性を考慮し、列車走行による動的荷重を外力として、軌道構造部材と個々の碎石粒子連成系での運動方程式を解く必要がある。

本問題に関して不連続体解析手法を用いると、粒子回

特集：鉄道力学

転や摩擦すべりなどの粒状体特有の複雑な挙動の本質を捉えることができ、また、実験や観測では測定不可能な、個々の粒子間の接触力、粒子内部の応力、粒子運動の履歴も把握できる。このことは、道床バラストの運動性能と変形性能、動的な破壊挙動特性の予測や評価に関して有用な知見を与えるものと考えられる。

道床バラストの粒子構造に着目した動力学的なアプローチとしては、たとえば、仏国鉄¹⁾、石川ら²⁾、阿部ら³⁾、相川ら⁴⁾、浦川ら⁵⁾をはじめ、各種の粒状体解析手法の応用が試みられている。また、粒状体の新しい構成式のモデルとして、橋口らの下負荷面モデル⁶⁾を、鉄道バラストに応用した紅露らの研究⁷⁾が、軌道の長期沈下を含む三次元的な挙動の表現モデルとして注目される。下負荷面モデルはさまざまな破壊状況の再現性に優れたモデルであるが、軌道破壊に関する実現象との整合性の確保、パラメータ同定法の開発などが今後必要とされる。

軌道沈下を精度良く予測するモデルの構築およびその検証のためには、道床バラストの粒子構造に着目した解析や実験に基づく動力学的なアプローチとともに、様々な軌道条件下における、時間的・空間的な沈下挙動の実態を把握することが重要である。ことに、バラスト軌道劣化モデルの検証のためには、軌道の横断面および縦断面に関する絶対沈下量の分布特性に関する現場測定データの蓄積が不可欠である。軌道沈下については、検測車のデータの応用も考えられるが、現状では正矢による相対的な概略情報に限られており、砕石層内部における塑性変形量の分布等までを明らかにするには至っていない。

軌道の長期にわたる沈下測定に関しては、例えば、石田ら⁸⁾は軌道近傍に堅固な基準杭を不動点として建植し、変位計による直接測定を行っている。この方法は対象点数が少ない場合には有効であるが、軌道延長方向に関する空間的な分布特性を把握するには、線路から離れた地点からの非接触の効率的な測定方法が必要となる。また、線路から離れた地点からの非接触の測定例としては、仏国鉄をはじめとする欧州の共同研究チームは、軌道から離れた地点に測量機材を固定して、1/10 mm単位の非接触の沈下挙動の測定を実施している⁹⁾。

3. 電子レベルを用いた軌道沈下測定法の定式化

3.1 要求精度の設定

本報告にて、沈下量測定の対象となる点(測点)は、連続した100本のまくらぎの左右、全部で200点の測点である。それらの延長は60 m近くになる。また、当該現場は、線路側方の余裕が無く、用地内に十分な作業スペースを確保できないことから、軌道中心から5~10 mほど離れた線路外の位置に機材を設置することにした。この場合、機材の設置点から最遠方の測点までの距離は

約40 mとなる。ここで、沈下量として1年間に1 mm程度を見込むと、数ヶ月に1回の頻度で測定する場合、1回の測定につき0.3 mm程度の測定量となる。したがって、本測定における要求精度として、基線長40 m先にて測線と直角(上下)方向に0.2 mmと仮定する。この要求精度は、測角精度に換算すると、鉛直方向の約1秒(基線と直角方向に5 ppm)の測角精度に相当する。

3.2 電子レベルの測定精度に関する実験

本測定においても、トータルステーションの応用も考えられる。しかし、初期コストが大きいこと、および、維持管理作業や巡回の障害とならないように、ターゲットを長期にわたり、高精度に固定する適切な方法が見つからず、また、現場に設置された鉄柵の影響で、全測点の見通しを確保できないことにより、トータルステーションの採用を見送った。

本報告では、機材購入などの初期コスト、および、簡便に使えることを考えて、電子レベルを用いることにした。電子レベルは、機材の中心軸に直交する水平面(視準面)を用いて、スタッフの高さを「直接」読むものであり、バーコードスタッフ(パターンスタッフ)により人為的な読み取り時の過誤も除去できる。しかし、通常のレベル測量¹⁰⁾では、測線に沿って機材の据え換えを行うため、数mm単位の誤差を払拭できない。この誤差は、機材設置時の傾きに起因する誤差であり、機材の設置角度が特定できればその影響を除去できる可能性がある。

まず、電子レベルの本来の性能を確認し、軌道沈下測定に応用できるか否かを確認する必要がある。ここでは、電子レベル(TOPCON製2級電子レベル、DL-103A)を堅固な台の上に固定した。さらに、機材設置位置から30 mおよび60 m離れた測点上にバーコードスタッフを立て、スタッフ下面に0.1~0.5 mmの隙間ゲージを順に挟み、高さの微小な変動を正確に読みとれるかどうかを確認した。その結果、レベルの読みの変化量は、隙間ゲージの厚さに一致しており、このことから、電子レベルを堅固な台の上に固定して用いれば、視準距離60 mの範囲で、対象物の沈下量を0.1 mm程度の精度で測定できることが確認できた。

しかし、線路脇の狭隘なスペースに堅固な台を設けて、長期にわたり機材を設置することは実用的ではない。そこで、測定の都度、レベルを据え換えても、周辺の基準点の高さの読みから、機材設置の誤差を逆算し補正することにより、固定点に長期に設置する場合と同等の精度を確保することを考えた。

3.3 準備作業(周辺基準点および測点の測設)

レベルを三脚上に設置する場合、測定の都度、機材設置の「高さ」と「傾き」が異なることになる。そこで、機

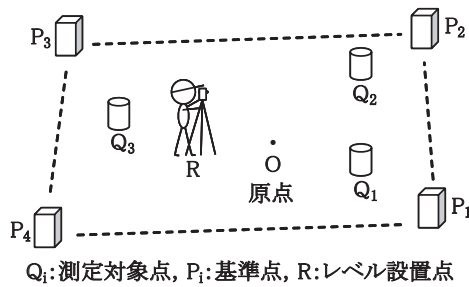


図1 初回の測定における座標設定および高さ測定

材設置による「高さ」と「傾き」の誤差を補正するための最小自乗法の定式化を行う。

まず、図1に示すように、測定対象領域の周囲に、高低差参照用の基準点を4点以上設置する。なお、以下の説明では、基準点をそれぞれ P_1, P_2, \dots, P_n 、まくらぎ上の測点をそれぞれ Q_1, Q_2, \dots, Q_m 、レベル設置点を R とする。レベル設置点 R は任意点でよい。ここで、任意点 O を原点とする水平面に、方向任意の x, y 軸を設定する。このとき、基準点 P_1, P_2, \dots, P_n の x, y 座標をそれぞれ $(x_{P_1}, y_{P_1}), (x_{P_2}, y_{P_2}), \dots, (x_{P_n}, y_{P_n})$ 、測点 Q_1, Q_2, \dots, Q_m の x, y 座標をそれぞれ $(x_{Q_1}, y_{Q_1}), (x_{Q_2}, y_{Q_2}), \dots, (x_{Q_m}, y_{Q_m})$ 、レベル設置点の座標を (x_R, y_R) とする。

準備作業として、図2に示すように、基準点の上面、および、測定対象のまくらぎ上面に測量用の基準マークを貼付けた。また、基準点、測点、および、電子レベルの設置点については、その x, y 座標をあらかじめ求めておく。測点の座標については10cm単位で十分であり、これは、電子レベルの測距機能で対応できる。

ここで、電子レベルと各基準点との距離を l_1, l_2, \dots, l_n とすると、それぞれの距離は次式となる。

$$l_i = \sqrt{(x_{P_i} - x_R)^2 + (y_{P_i} - y_R)^2} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$



図2 まくらぎ表面の基準マーク

3.4 測定作業

基準点および測点については、初回の測定時に、高さ(電子レベルの読み) $H_{P_1}, H_{P_2}, \dots, H_{P_n}$ および $H_{Q_1}, H_{Q_2}, \dots, H_{Q_m}$ を測定する。また、2回目以降の測定においてもレベルを初回測定時に設置した点 R とほぼ同一地点 R' に設置し、基準点 P_1, P_2, \dots, P_n および測点 Q_1, Q_2, \dots, Q_m の高さ $h_{P_1}, h_{P_2}, \dots, h_{P_n}$ および $h_{Q_1}, h_{Q_2}, \dots, h_{Q_m}$ を測定する。

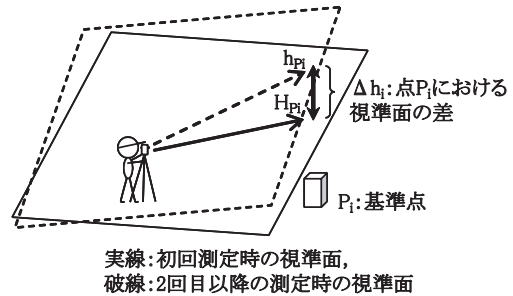


図3 誤差補正の方法

3.5 基準点における補正量の平面近似

電子レベルによる各基準点でのスタッフの読みについて、初回の測定値と、2回目以降の測定値の差を $\Delta h_1, \Delta h_2, \dots, \Delta h_n$ とする。

$$\Delta h_i = h_{P_i} - H_{P_i} \quad (i=1, \dots, n) \quad (2)$$

測定期間を通じて基準点 P_1, P_2, \dots, P_n が不動と仮定すると、 Δh_i は各回の測定における、機材設置により発生する視準面の誤差(ずれ量)を表す(図3)。ここで、初回の測定値を基準とすると、2回目以降の測定においては、基準点でのスタッフの読み h_{P_i} から、初回からの高さの変動量 Δh_i を減ずることにより、2回目以降の測定でも同じ基準で高さを比較できることになる。すなわち、2回目以降の測定での、各基準点の補正量は $-\Delta h_i$ となる。

ここであらためて、基準面の誤差(ずれ量)を

$$\Delta h_i = h_{P_i} - H_{P_i} \equiv z_i \quad (3)$$

と記号表示し、2回目以降の測定において、基準点 $P_i(x_{P_i}, y_{P_i})$ における誤差 z_i を正の向きとする x, y, z 座標からなる三次元の誤差空間を考える。上述の視準面の差は、この誤差空間において $(x_{P_1}, y_{P_1}, z_1), (x_{P_2}, y_{P_2}, z_2), \dots, (x_{P_n}, y_{P_n}, z_n)$ を通る平面として定義できる。この平面の式に測点 Q_1, Q_2, \dots, Q_m の平面座標 $(x_{Q_1}, y_{Q_1}), (x_{Q_2}, y_{Q_2}), \dots, (x_{Q_m}, y_{Q_m})$ を代入して得られる z 座標値に負号をつけたもの $-z$ が、各測点での沈下量の補正量となる。

まず、基準点に対応する三次元座標 $(x_{P_1}, y_{P_1}, z_1), (x_{P_2}, y_{P_2}, z_2), \dots, (x_{P_n}, y_{P_n}, z_n)$ を通る平面を最小自乗法で求める。ここで、 x, y 座標を説明変数、高さに関する差 z を目的関数とする多項式回帰モデル¹¹⁾、いわゆる、重回帰モデル¹²⁾にて、誤差空間の平面を表現する。

$$z = \alpha x + \beta y + \gamma \quad (4)$$

また、基準点の x, y 座標 (x_{P_i}, y_{P_i}) を代入したときの平面との乖離量(誤差)をそれぞれ e_i と定義する。

$$e_i = z_i - z = z_i - (\alpha x_{P_i} + \beta y_{P_i} + \gamma) \quad (5)$$

3.6 視準距離による信頼性の影響

一般の水準測量における高さの誤差は、機材の傾きに起因し、これはレベルからスタッフまでの距離(視準距離) l_i に比例する。したがって、一般の水準測量の最小自乗法計算では、測定値の信頼性が、視準距離 l_i に反比

特集：鉄道力学

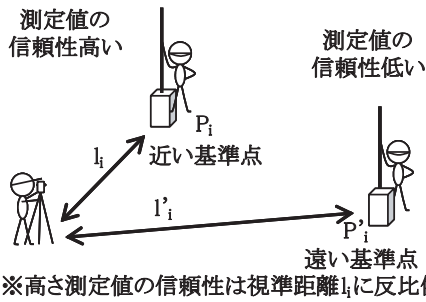


図4 一般の水準測量における視準距離と信頼性

例することを考慮した重み付けを行う (図4)。

一方、本測量法では、一度機材を据え付けたら、測定の間は機材の据え換えを行わない。また、機材の傾きは、測量範囲の周囲に設置した基準点の読みにより確定するため、視準距離に関する信頼性の考え方が、一般の水準測量とは異なってくる。

上述の「電子レベルの測定精度に関する実験」より、機材が不動の状態であれば、本電子レベルの場合、視準距離 60 m の範囲内で、0.1 mm 程度の精度で測定できることを確認した。したがって、以下の最小自乗法の計算では、高さの測定精度は、視準距離の長短に関わらず一定値と仮定する。ここで、高さの測定により生じる誤差の大きさを一定値 c 、基準点までの視準距離を l として、視準面の角度 θ に及ぼす影響について考えてみる。

$$\tan\theta = c/l$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{c}{l} = \frac{c}{l} + \frac{1}{3}\left(\frac{c}{l}\right)^3 + \frac{2}{15}\left(\frac{c}{l}\right)^5 + \dots \frac{c}{l} \quad (6)$$

対象領域内で高さの測定精度が一定であることを仮定すると、視準距離 l が遠いほど面の傾きの確定精度は高くなる。すなわち、視準面を確定するための基準点の読みの信頼性は、レベル設置点から基準点までの視準距離 l_i に比例する。換言するならば、視準面の傾きに関する誤差は、基準点までの視準距離の逆数 $1/l_i$ に比例し、したがって、視準面の傾きに関する分散は $1/l_i^2$ に比例することになる。

3.7 視準面の確定精度を考慮した最小自乗法の適用

誤差伝播の法則¹³⁾により、最小自乗法では、分散に逆比例する重みを考慮する¹⁴⁾。したがって、本法の場合、視準面の確定精度に関して、距離の2乗に比例する重み λ_i を導入する。ここで、式(5)で定義した乖離量 (誤差) e_i について、重み λ_i を導入し、全基準点に関する誤差の2乗和関数 Ω を最小化するように α, β, γ を決める。

$$\Omega = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \cdot e_i^2) \rightarrow \min. \quad (7)$$

ここに、

$$\lambda_i = l_i^2 = (x_{P_i} - x_R)^2 + (y_{P_i} - y_R)^2 \quad (i=1, \dots, n). \quad (8)$$

式(5)を式(7)に代入する。なお、以下の式では、 x_{P_i}, y_{P_i}

を x_i, y_i と省略して表示する。

$$\Omega = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot e_i^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \{z_i - (\alpha x_i + \beta y_i + \gamma)\}^2 \quad (9)$$

$$= \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot (\alpha x_i + \beta y_i + \gamma - z_i)^2 \rightarrow \min.$$

この関数は α, β, γ に関して下に凸なので、未知数 α, β, γ について微分して 0 とおく。

$$\begin{cases} \frac{\partial \Omega}{\partial \alpha} = \sum_{i=1}^n 2\lambda_i \cdot x_i (\alpha x_i + \beta y_i + \gamma - z_i) = 0 \\ \frac{\partial \Omega}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^n 2\lambda_i \cdot y_i (\alpha x_i + \beta y_i + \gamma - z_i) = 0 \\ \frac{\partial \Omega}{\partial \gamma} = \sum_{i=1}^n 2\lambda_i \cdot (\alpha x_i + \beta y_i + \gamma - z_i) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

上式を α, β, γ で整理すると、ガウスの正規方程式¹⁵⁾が次式のように導出される。

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i^2 & \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i y_i & \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i y_i & \sum_{i=1}^n \lambda_i y_i^2 & \sum_{i=1}^n \lambda_i y_i \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i & \sum_{i=1}^n \lambda_i y_i & \sum_{i=1}^n \lambda_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.8 最確値の導出と誤差関数について

式(11)を解いて、 α, β, γ の最確値 (最小自乗解) $\alpha^*, \beta^*, \gamma^*$ が求められ、誤差平面 z が確定する。

$$z = \alpha^* x + \beta^* y + \gamma^* \quad (12)$$

この平面は、基準点を含む任意点 (x, y) での、機材の設置に起因する定誤差の大きさを表すものである。すなわち、測点の座標 x, y を本式に代入することにより、任意点での定誤差を求めることができる。ここで、式(3)より、任意点 (x, y) でのスタッフの読みを h 、その点での誤差量を $z(x, y)$ とすると、次式が成り立つ。

$$z(x, y) = h - H \therefore H = h - z(x, y) \quad (13)$$

上式は、初回とは異なる観測条件で行った2回目以降の測定結果 h を、初回の測定値 H に摺り合わせるための写像である。式(12)より求められた誤差量 $z(x, y)$ に負号をつけた値が、その測点での測定値に関する補正量となる。ここで、あらためて、補正後のスタッフの読みの最確値を h^* と記号表示すると、最確値は次式となる。

$$h^* = h - z(x, y) \quad (14)$$

ここに、誤差関数 $z = \alpha^* x + \beta^* y + \gamma^*$ について、 x, y の含まれる $\alpha^* x + \beta^* y$ の項と、定数項 γ^* に分けて考えてみる。定数項 γ^* は、2回目以降の測定の結果を、初回の結果に摺りあわせるための、全測定点について一様な「高低差の補正量」である。この値は、測点の x, y 座標に依存しない。一方、 x, y の含まれる項は「傾きに関する補正量」であり、 x, y 座標に依存して決まる。 $\alpha^* x + \beta^* y = 0$ を満たす、原点を通る直線上では、「傾きに関する補正

量]は0であり、直線からの距離に比例して補正量が増減する。

この誤差関数 $z = \alpha^*x + \beta^*y + \gamma^*$ は、測定時のレベルの据付位置と、据付時の水準面の傾きに依存して決まるものであり、測定の都度、基準点の測定値をもとに決定される。そのため、現場での作業としては、レベルを据え付けたら、まず、全基準点のスタッフの値を読み、誤差平面の関数を決定する。その後、各測点の測定を実施し、最後に再度、基準点の値を読んで、測定の際にレベルの据え付け状態に変動がないこと、すなわち、誤差平面の関数に変動がないことを確認する必要がある。

4. 実軌道における軌道沈下測量への応用事例

4.1 測定現場の概要

鉄道営業線にて、まくらぎの沈下測定に本法を応用した。現場の概要を図5に示す。測点は、連続したまくらぎ100本の左右であり、左レールの測点を S_1, \dots, S_{100} 、右レールの測点を T_1, \dots, T_{100} とする。基準点は、列車振動による移動や沈下を避けるため施工基面外に A～H の計8点を選定した。測定作業は、電子レベルを点 R_1 上に設置して、初回を2007年3月に2晩で実施し、2回目および3回目を6月および9月に、それぞれ2晩ずつで実施した。

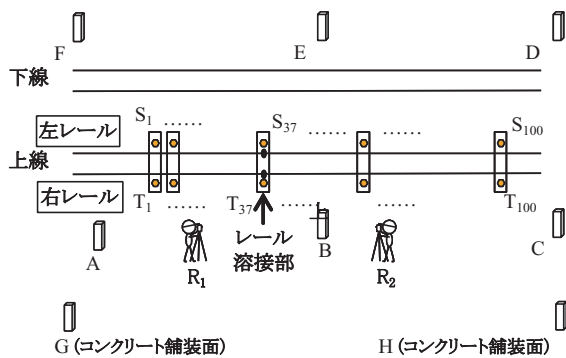


図5 軌道沈下量測定現場の概要

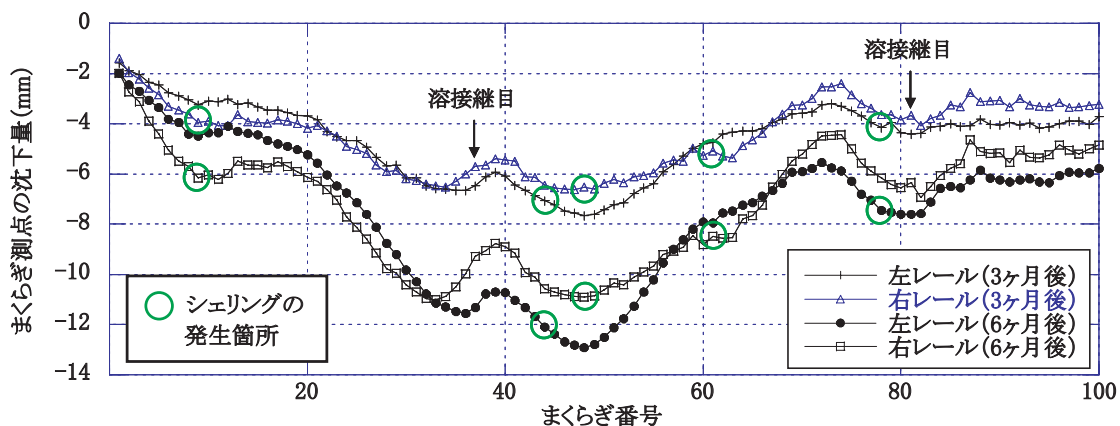


図6 実軌道におけるまくらぎ沈下量の測定結果

4.2 測定結果

まくらぎ左右の測点の沈下量(補正計算後の高さの変化量)を図6に示す。図は、初回の2007年3月を基準として、それから3ヶ月後および6ヶ月後の沈下量分布である。図中、正の値は隆起を、負の値は沈下を意味する。

当該区間は、軌道の沈下がかねてより問題となっていた区間であり、全体的に数mm単位の沈下が生じている。また、沈下挙動は線路の延長方向に一律ではなく、局所的に大きな沈下となり、線路の左右についても不均一な沈下となったことがわかる。また、図中、 S_{37} 、 T_{37} および S_{81} 、 T_{81} は溶接継目箇所であり、また、 T_9 、 S_{44} 、 T_{48} 、 T_{61} 、 S_{78} 近傍には比較的大きなシユリングがある。図より、わずか3ヶ月間で6～8mm、6ヶ月間では11～13mmもの沈下が発生したことがわかる。また、沈下量のピーク値の発生箇所は、レール溶接箇所、および、シユリングによるレール損傷箇所とほぼ一致しており、このことから、車輪・レールの接触機構における衝撃荷重が軌道沈下現象に大きく関与することが推察できる。

4.3 測定精度の評価

当該現場では、まくらぎ80番近くに架線用の支柱があり、レベル設置点 R_1 からでは、 $T_{87} \sim T_{90}$ の見通しが確保できない。そこで、図5の R_2 点にレベルを据え換えて、再度、基準点の高さを測定し、それに引き続き、支柱で見えない区間を含む測点 $T_{80} \sim T_{100}$ の測定を行った。

レベルを R_1 点から R_2 点に据え換えると、レベル設置の高さも傾きも異なるので、基準点や測点に関するスタッフの読みも、 R_1 点から測定した場合は異なるものとなる。しかし、機材を据え換える間に、基準点も測点も動いていないので、本補正法が有効に機能しているならば、補正計算後の両者の測定結果は一致する必要がある。

ここで、 R_1 および R_2 の両レベル設置点からの測定結果に共通する、 $T_{80} \sim T_{86}$ 、 $T_{91} \sim T_{100}$ の17個の測点について、補正計算後の値を比べた。2006年度に試験的に実施した17測点の3回分の測定結果、計51データについて

特集：鉄道力学

て、レベル設置点の違いによる差を求めた。その結果、レベル設置点の違いによるずれは、標準偏差で 0.152 mm と非常に高精度な結果となった。このことから、本法は軌道の絶対沈下量を 0.2 mm の精度で測定することを目標に開発したものであるが、汎用の安価な測量機材でありながらも、目標値を十分に満足する高精度を実現できたといえる。

また、測定時間については、1点あたり複数回の測定を行っても、1点あたり30秒～1分程度であり、十分な作業効率が達成できた。

5. まとめ

本論文で得られた知見を以下にまとめて結論とする。

- (1) 粒状性に着目したバラスト軌道劣化モデル開発の経緯、および、軌道沈下量の精密測定法の開発との関連性についてまとめた。
- (2) 測定箇所周辺の4箇所以上の基準点を設け、最小自乗法を用いた三次元的な補正法を導入することにより、汎用の電子レベルを用いた水準測量により簡便に実施可能な、バラスト軌道沈下量の高精度測量方法を考案し、理論式の誘導と具体的な測量手順を開発した。
- (3) 考案した方法を用いて、鉄道営業線における沈下量測定を実施し、提案手法を用いて誤差を補正した。その結果より、本法を用いると、簡便な測量手法ながらも、従来は把握できなかった軌道沈下の空間的な挙動を精度よく測定できることがわかった。
- (4) 軌道沈下が大きい箇所は、レールの溶接継目部、および、シェリングなどのレールの傷の発生箇所に一致しており、車輪・レール間での衝撃荷重の発生が軌道沈下に大きく影響することが確認できた。
- (5) 本軌道沈下の測定法は、実軌道の測定結果より、標準偏差で0.2mmの精度を満たしており、また、作業時間についても1測点あたり30秒～1分程度であり、高い作業効率が達成できた。

謝辞

現場測定実施にご協力いただいた九州旅客鉄道株式会社の関係各位に感謝の意を表する。

文献

- 1) G.Saussine, C.Cholet, P.E.Gautier, et.al: Modelling ballast under cyclic loading using Discrete Element Method, Cyclic behaviour of soils and liquefaction phenomena, Triantafyllidis (ed), Taylor & Francis Group, London, pp.649-658, 2004.
- 2) 石川達也, 大西有三, 堀池高広: 不連続変形法 (DDA) による道床バラスト部繰返し塑性変形機構の検討, 土木学会論文集, No.645, III -50, pp.15-28, 2000.
- 3) 阿部和久, M.Syakir, 紅露一寛: 二次元粒状体モデルによるバラスト道床の沈下解析, 鉄道力学論文集, 10, pp.49-54, 2006.
- 4) 相川明, 名村明, 石田誠, 鷹尾良行: レール溶接部を通過する列車荷重に対するバラストの挙動測定と不連続変形法解析, 鉄道力学論文集, 11, pp.27-32, 2007.
- 5) 浦川文寛, 相川明, 名村明, 河野昭子: バラスト碎石の三次元形状測定システムの構築とその応用, 鉄道力学論文集, 11, pp.21-26, 2007.
- 6) 橋口公一, 上野正実, 陳忠平: 下負荷面および回転硬化の概念に基づく土の弾塑性構成式, 土木学会論文集, No.547, III -36, pp.127-144, 1996.
- 7) 紅露一寛, 梶原宗光, 阿部和久: 下負荷面モデルを用いた鉄道用バラスト材の繰返し変形特性, 鉄道力学論文集, 11, pp.7-13, 2007.
- 8) 石田誠, 名村明, 瀧川光伸, 小野重亮: 軌道沈下の実測とシミュレーションによる予測, 鉄道総研報告, Vol. 16, No. 4, pp.41-46, 2002.
- 9) Société Nationale des Chemins de Fer (SNCF): SNCF Final Report 1 - Track Measurements in Beugnâtre, Sustained Performance of Railway Tracks, SUPERTRACK, pp.88-89, 2005.
- 10) 石井一郎編著: 最新測量学 (第2版), 森北出版, pp.63-70, 2007.
- 11) 坂元慶行, 石黒木夫, 北川源四郎: 情報量統計学, 情報科学講座 A-5-4, 共立出版, pp.127-154, 1983.
- 12) 奥野忠一, 片山善三郎, 上郡長昭, 伊東哲二, 入倉則夫, 藤原信夫: 工業における多変量データの解析, 日科技連出版社, pp.25-30, 1986.
- 13) 村井俊治: 土木測量, 土木学会編新体系土木工学51, 技報堂出版, pp.29-58, 1980.
- 14) A. H-S. Ang & W.H. Tang: Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume I Basic Principles, 邦訳 伊藤學, 亀田弘行: 土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, pp.290-292, 1977.
- 15) 篠崎壽夫: 工科のための応用数値計算法入門 (上), コロナ社, pp.171-175, 1977.