

(40) 点群による表面形状を考慮した 出来形管理基準に関する一考察

関塚 貴一¹・竹之下 智行²・高見澤 拓哉³・佐々木 裕介⁴・井口 重信⁵

¹正会員 東日本旅客鉄道(株) (〒151-8578 東京都渋谷区代々木二丁目2番2号)

E-mail: k-sekizuka@jreast.co.jp

²正会員 東日本旅客鉄道(株) (〒151-8578 東京都渋谷区代々木二丁目2番2号)

E-mail: t-takenoshita@jreast.co.jp

³正会員 東日本旅客鉄道(株) (〒151-8578 東京都渋谷区代々木二丁目2番2号)

E-mail: ta-takamizawa@jreast.co.jp

⁴正会員 東日本旅客鉄道(株) (〒151-8578 東京都渋谷区代々木二丁目2番2号)

E-mail: sasaki-yuu@jreast.co.jp

⁵正会員 東日本旅客鉄道(株) (〒151-8578 東京都渋谷区代々木二丁目2番2号)

E-mail: s-iguchi@jreast.co.jp

本研究は、点群データを活用した出来形管理基準について、検測対象物の表面形状（凹凸）の影響を考慮した設定方法について検討する。鉄道特有であるバラスト形状等の寸法を検測する場合、従来のメジャー等による検測方法との整合を図るため、表面形状（凹凸）を考慮し、出来形管理基準に反映することは重要である。本稿では、点群データのバラツキは、レーザ測量による誤差と対象物の表面形状による影響を重ね合わせた状態で観測されるという仮定を設けることで、それぞれの特性を分離して解析した。実測データを用いて表面形状のバラツキを算出したところ、検測対象物ごとに異なる表面形状の特性を抽出することができ、その影響を考慮した出来形管理基準値の具体的な設定方法に関する方向性を示した。

Key Words: point cloud, measurement rules, probability distribution, surface shape

1. はじめに

当社の i-Construction の取組として、測量作業をはじめとした様々な場面で点群データを活用しており、とりわけ従来メジャー等で検測していた構造物の出来形管理・検査業務の効率化を推進している。出来形管理の対象には、路盤やプラットホーム、橋梁やトンネルなどが挙げられるが、鉄道特有なものにバラスト（レール脇に散布される碎石）が挙げられる。バラストは標準形状を定めた土工定規に基づいて施工されるが、個々のバラスト形状に沿った凹凸が生じるため、表面が平滑に仕上がることはない。国土交通省では、土工に関する出来形管理要領¹⁾を制定しているが、対象とする構造物の表面形状や凹凸まで考慮されているかを読み取ることはできず、基準値に反映されていないと考えられる。そこで、点群データを活用した出来形管理において、表面状態を考慮した汎用性のある出来形管理基準値を設定すべく、バラスト、プラットホーム床版を対象に検討を行った。

2. 対象構造物と表面形状（凹凸）考慮の必要性

(1) CASE1: バラスト

バラストは、粒径 19～63mm 程度の碎石であり、列車荷重の伝達やレール変形に対する抗力から標準的な断面形状が定められている。検測箇所の一例として図-1(左図)に示す軌道の中心線からバラストの法肩までの距離が挙げられる。当該寸法は所定の軌道条件下で基準値 1,400mm であり、現状の合否判定基準は、基準値以上として管理している。

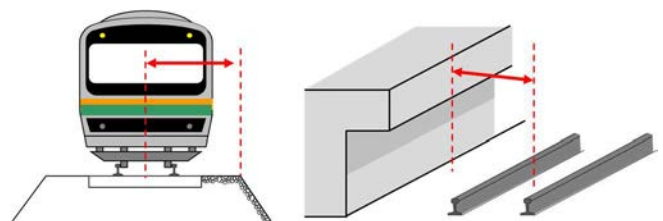


図-1 鉄道構造物における出来形管理箇所の一例

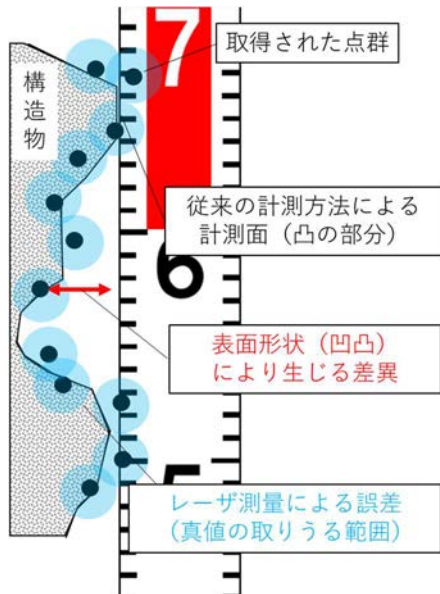


図-2 検測箇所の拡大図

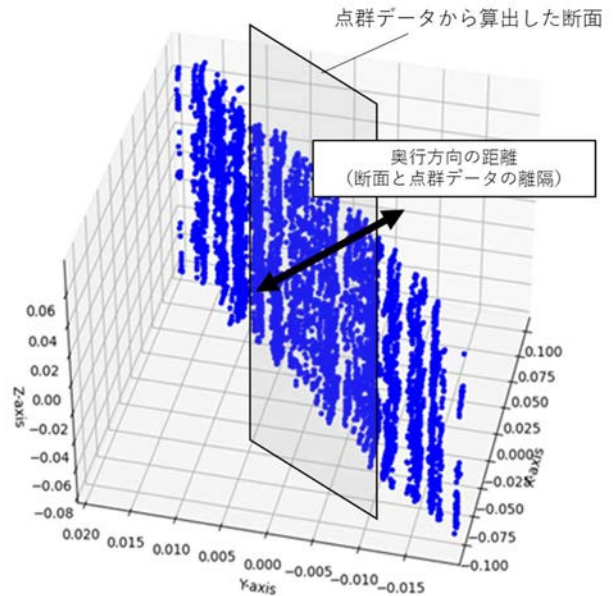


図-4 基準試験の点群データ取得状況

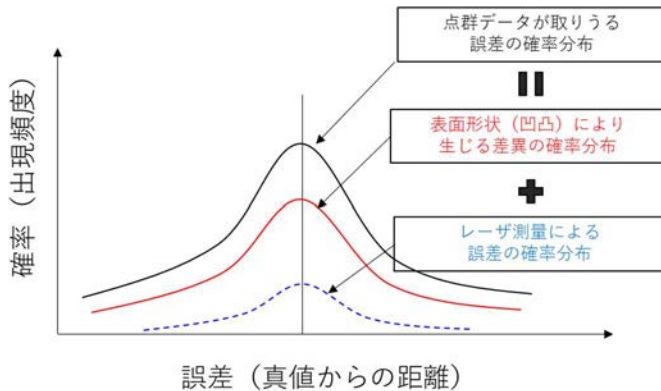


図-3 点群データにおけるバラツキの考え方

(2) CASE2: プラットホーム

プラットホームには円滑化基準等を含めて様々な検測箇所があるが、一例として軌道からの離れを図-1 (右図) に示す。車両とホームが接触せず、旅客の乗降がしやすいように、一般的なホームでは基準値 1485mm で管理している。許容値は線路方向に対して 0~+20mm であり、mm 単位での精度が要求される。

(3) 表面形状 (凹凸) の考え方

前述した寸法を検測する際の検測箇所の拡大図を図-2 に示す。レーザ測量においては面的に点群データが取得されるが、従来計測手法では、表面形状の凸の部分にメジャー等を当ててを検測している。そのため、これらを比較すると、レーザ測量によるスキャナや計測角度等による誤差に加え、表面形状 (凹凸) による新たな差異が発生する。ところが、レーザ測量を実施した検査者にとっては、観測結果は点群データのみであり、レーザ測量による誤差と表面形状による差異を観測値から明確に区

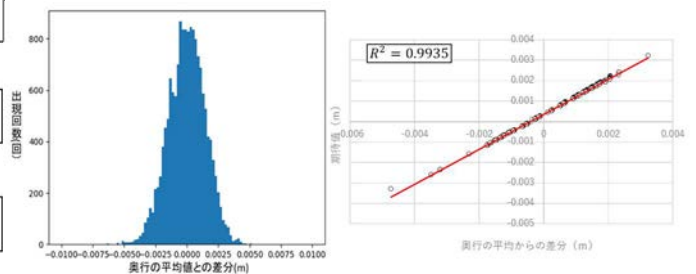


図-5 基準試験の点群データ特性

別することはできない。そこで、これらを切り分けて検討するために図-3 のような仮説を設定する。点群データの有する誤差 (真値からの距離) は、これらの重ね合わせ (合成) の結果として得られたと考える。換言すれば、レーザ測量による誤差と表面形状による差異の影響は独立であり、一方の影響を除去することができれば、残る一方の特性のみを抽出して把握できるとして以下の検討を行った。

3. 基準試験

(1) 使用したレーザスキャナ

以降の検証で使用したレーザスキャナは BLK360(Leica 製)であり、メーカー保証精度は 5mm@10m である。

(2) 基準試験

表面形状による差異の影響把握に先立ち、まずはレーザ測量による誤差の影響のみを抽出する。表面形状による差異の影響は、平滑な白色鉄板を対象物にすることで最小化できる 2)ことから 1.0m 離れた状態で対象物と正対した環境下で検測を行った。また、計測された点群デ

ータについては、鉄板の端部の影響を除去するため、中心部の(100mm×100mm)のみを使用した。観測された点群データを図4に示す。取得した全点群データを対象に、特異値分離により、実測データの奥行方向の平均値となるような推定断面を算出し、それぞれの点群データとの法線方向の距離を計算する。これにより奥行方向の点群データのバラツキを算出できる。なお、面的な広がりやを意味する間口方向のバラツキについては、表面の凹凸には影響を与えないとして今回は検討対象外とした。図-5(左図)にヒストグラムとして表現した実測データの奥行方向の平均値との差分の分布を示す。横軸は推定断面からの離隔であり、縦軸は出現頻度を表している。図-5(右図)に示す Q-Q プロットの近似曲線の傾きがほぼ1であることから判断できるように、この分布には正規性が確認できる。標準偏差は 2.45mm 程度であり、これは今回使用したレーザスキャナにおける対象物に正対した状況下での測量誤差の特性そのものと解釈できる。

4. 対象構造物の実測データに対する検証結果

実測データによる検証を行うため、CASE1：バラスト法面、CASE2：RC 板ホーム床面に地上レーザスキャナで計測してデータを分析することとした。著者らの研究2)により、地上レーザスキャナを用いて構造物の出来形計測を行うような場合に生じるレーザ測量による誤差は、レーザ照射角度と反射面のなす角 θ が支配的であることが明らかとなっている。そのため、分析に用いる点群データは、 θ がほぼ 0° と思われる箇所から選定している。

なお、明らかに外れ値と認められる点群データについては、目視判断、手作業によりあらかじめ除去している。

(1) CASE1:バラスト

得られた点群データを図-6に示す。基準試験と同様に算出した実測データの奥行方向の平均値との差分の分布を図-7に示す。分析に用いた点群のデータ数は1911点であった。この分布においても正規性を確認することができ、バラスト法面の標準偏差は22.8mmであった。

(2) CASE2:RC 板ホーム床版

得られた点群データを図-6に、実測データの奥行方向の平均値との差分の分布を図-7に示す。分析に用いたデータ数は1683点であった。この分布においても正規性を確認することができ、RC 板ホーム床版の標準偏差は1.2mmであった。CASE1とCASE2を比較すれば、表面の粗度が荒いCASE1の方が標準偏差が約19倍大きいことから、バラツキの大きいデータであることが分かり、実態を再現できていると考えられる。

5. 考察

図-3に示すように、従来検測方法との差異である表面形状による影響は、実測データの分布からレーザ測量による誤差の影響を取り除くことで得られる。今回、いずれの分布も正規分布に従うと考えられることから、正規分布の差分の分布を考える。平均を μ 、標準偏差を σ とすれば、下式に従い、実測データとレーザ測量による誤差の両分布の差分の分布を算出し、従来計測方法による

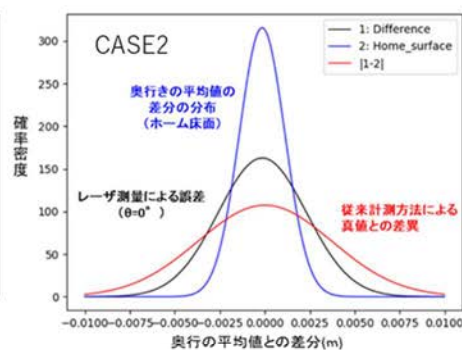
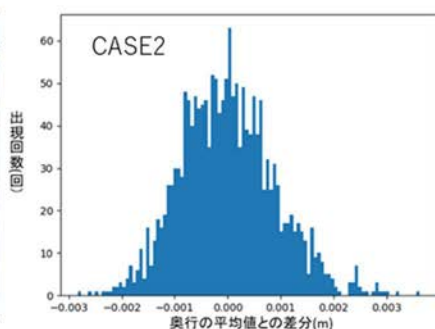
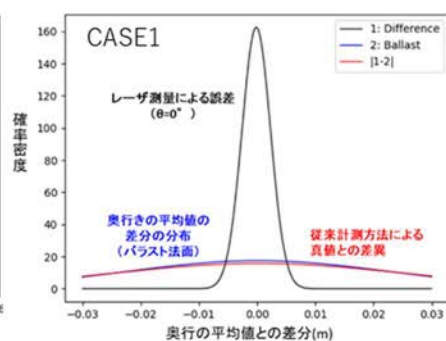
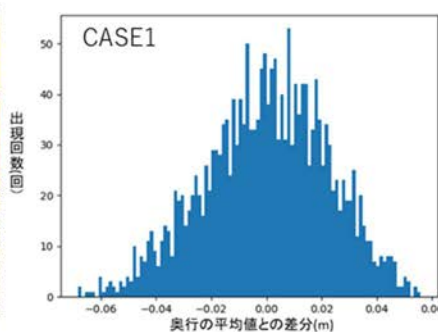
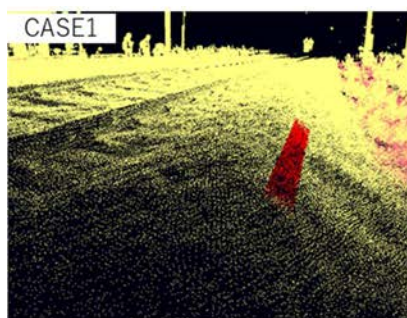


図-6 計測箇所

図-7 奥行の平均値との差分

図-8 表面形状による差異の分布

差異の分布として抽出することができる。

$$N(\mu_1, \sigma_1), \quad N(\mu_2, \sigma_2) \text{ であるとき}$$
$$\text{差分の分布: } N(|\mu_1 - \mu_2|, \sigma_1 + \sigma_2)$$

(1) CASE1: バラスト

図8に表面形状による差異の分布を示す。バラスト法面では、レーザ測量による誤差に対し、実測データの標準偏差が非常に大きい。差分の分布は、実測データの分布とほぼ同形状となったことから、レーザ測量の誤差が表面形状による差異に与える影響は少ないことが明らかとなった。

(2) CASE2: RC 板ホーム床版

RC 板ホーム床面では、レーザ測量による誤差よりも実測データの分布の標準偏差が小さく、結果として、表面形状との差異の分布の標準偏差は実測値よりも大きい結果となった。これは、実測された点群データには、レーザ測量による誤差と表面形状による差異の両者が含まれており、中心付近の出現確率が増幅されたことにより標準偏差が小さくなったものと解釈できる。

6. 出来形管理基準値の設定

レーザ測量による誤差と各構造物の表面形状による差異を抽出できたことから、表面形状を考慮した出来形管理基準値を設定する。対象構造物の有する表面形状（凹凸）の大きさは確率分布で得られたことから、仮に 1σ だけ許容した場合を考える。これは着目する検断断面において、その対象構造物が持ちうる全ての大きさの凹凸の約 68% を包含した表面形状であることを仮定することに他ならない。メジャー等では、その中で最大値（凸）となる箇所にあてることから、図9のように基準値に対して CASE1 バラストでは 22.8mm、CASE2:RC 板ホーム床版では 1.2mm を加算した値を新たな基準値として設定すればよい。なお、対象構造物ごとに考慮する表面形状の差異の大きさや基準値への具体的な反映方法については、今後適用事例を増やしながら妥当性を検討していく。

7. まとめ

点群による出来形管理基準について、実測データを用いた検証により以下を明らかにした。

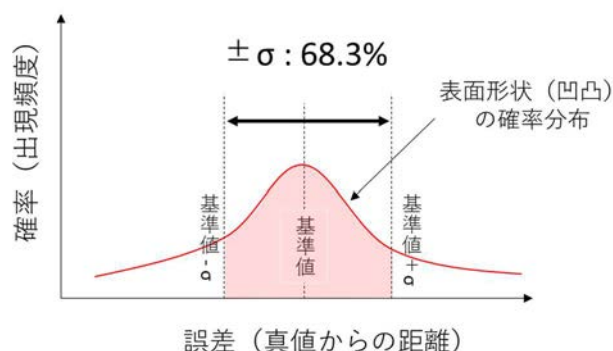


図9 表面形状を考慮した出来形基準設定の考え方

- ・メジャー等で計測した従来計測値と地上レーザスキャナなどで計測した値には、レーザ測量由来の誤差と、表面形状（凹凸）により生じる差異を含む。
- ・表面形状（凹凸）に生じる差異（標準偏差）は、今回検証を行った道床バラスト、ホーム床面ではそれぞれ 22.8mm、1.2mm であった。
- ・前項で得られた表面形状（凹凸）により生じる差異（標準偏差）を加味することで従来計測方法と同等の出来形管理基準を提案できる。

8. 今後の課題

本稿では、対象物に正対する状態のレーザ測量において取得した点群データのみを使用していることから、点群データを効率的に活用できていない。今後実務で出来形管理を行う上では、あらゆるレーザ照射角で得られた点群データも活用できる仕組みを整える必要がある。また、表面形状は、レーザが照射される角度によらず、同じ構造物であれば同様の傾向を示すことが想定される。そのため、異なる角度から照射されたデータについても同様の検討を行い、本議論の妥当性を検証していきたい。

参考文献

- 1) 近藤弘嗣, 森川博邦, 藤島 崇, 椎葉祐士: i-Construction における UAV を用いた土工出来形管理の基準類の策定及びカイゼン, 土木学会論文集 F3 (土木情報学), Vol.73, No.2, pp.74-82, 2017
- 2) 井口重信, 高見澤拓哉: 地上レーザスキャナの測定精度に与える照射角度の影響に関する実験的考察, 土木学会第 74 回年次学術講演会, 6-403, 2019