

舗装工事におけるブルーフローリング試験のデジタル化とその効果

立 花 洋 平

舗装工事における品質管理試験の一つに、舗装構造の下層部である路床や路盤で行うブルーフローリング試験がある。この試験にはアナログな方法で行われることに起因した作業効率の悪さや定性的判定など、課題がいくつかあった。この課題解決のため、当該試験を 3D カメラや GNSS、クラウドなどを活用しデジタル化を図ったところ、省人・省力化や数値による定量的判定および遠隔臨場と同等の運用が可能となった。本稿ではそのデジタル化の詳細について報告する。

キーワード：舗装工事，品質管理，ブルーフローリング，ICT，デジタル化，遠隔臨場

1. はじめに

いくつかの層から形成される舗装体は、各層にそれぞれ役割があり、その役割が十分に機能するか確認するため、各層毎に定められた品質管理試験を行う必要がある。舗装構造下層部の路床や路盤は、土や碎石などを敷き均し、締め固めた層で、表層で受けた交通荷重を分散する役割を持ち、道路のライフサイクルに関わる支持基盤として、その品質は重要である。

路床・路盤の品質管理試験には、仕上がった路床・路盤上にローラなどを走行させ、その走行荷重により路床・路盤に変形が発生しないことを目視で確認するブルーフローリング試験がある。この試験には、人が目視で行うがゆえの課題がいくつかあり、それら課題の解決に向けデジタル化を図った。本稿はその詳細¹⁾について報告する。

2. ブルーフローリング試験

(1) 試験方法

ブルーフローリング試験は、仕上がった路床・路盤上に荷重車となるダンプトラックやローラを走行させ、その走行荷重により路床・路盤（以下、地盤）に変形が発生しないかを試験員が目視で観察し良否を判定する（写真—1）。低速で走行する荷重車を試験員が歩いて追尾し、変形が発生した箇所（以下、不良箇所）には、即座にスプレーなどで場所と変形した範囲を明示する。不良箇所の測点や位置は野帳などに記録し、その記録を基に事務所にて試験状況の写真を添付



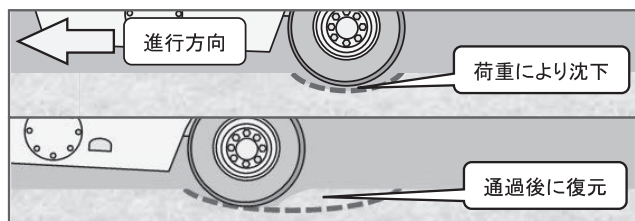
写真—1 ブルーフローリング試験状況（従来方法）

し、試験結果報告書をまとめる。これがブルーフローリング試験の流れである。不良箇所は、必要に応じペンケルマンビームによるたわみ測定を実施した後、固化材による地盤改良や材料を入れ替えるなどの処理を施し、最終的に施工範囲全域で変形が発生しないことを当該試験の実施により確認しなければならない。

(2) 地盤の変形と目視観察

ブルーフローリング試験で発生する地盤の変形は、大きく二種類に分けられる。一つは、荷重車のタイヤが不良箇所付近にあるときのみ地盤が変形し、荷重車が通過した後は、元に近い状態まで戻る弾性変形（図—1）で、もう一つは、荷重車の通過に伴い地盤が沈下し、タイヤの通過跡が凹凸として残る塑性変形（写真—2）である。

弾性変形は、荷重車が不良箇所を通過するわずかな時間にのみ変形する地盤を、荷重車の車体幅において観察しなければならず、変形量が小さい場合は、塑性変形と比較すると発見が難しく、試験員の技量によっ



図一 弾性変形のイメージ図



写真一 塑性変形の例

ては変形の見逃しや判定に個人差が生じる可能性がある。こういった見逃しや個人差を防止するため、当該試験は施主側の検査官を含めた複数人で行う場合が多い。施主側の検査官は、現地での立会検査を同時に行うが、遠隔臨場による立会検査の省力化が推進される現代において、当該試験は除外される場合が多い。webカメラ等を活用し映像で変形を確認しようとした例はあるが、映像で変形を確認することは難しく、『建設現場における遠隔臨場に関する実施要領(案)』において当該試験は、特殊な機器等又は現場臨場が必要な分類に属している。

(3) プルーフローリング試験の課題

前述した内容から、当該試験における課題を整理すると以下のとおりとなる。

- ①複数人かつ低速で行われるため作業効率が悪く、また検査官が現場まで移動する時間と労力が掛かっている
- ②施工範囲全域を歩行し目視観察するため、身体的な負担を伴う
- ③不良箇所の見逃しや判定に個人差が生ずる可能性がある
- ④遠隔臨場の適用が難しく、時代背景に即していない試験方法である

これらの課題は、目視や手書き記録など、アナログな方法で実施しているためと考え、それらを現代のセンシング技術やICTを活用し代替することで課題を解決できると判断し、デジタル化を図った。

3. プルーフローリング試験のデジタル化

(1) 仕様検討

当該試験をデジタル化し、システムとして運用するための仕様を検討し、下記のとおりとした。

- ①計測デバイスを活用し、人の目に替わり地盤の変形を計測する
- ②不良箇所は、取得データの後処理を必要とせず、リアルタイムに地盤の良否を自動で判定する
- ③荷重車の移動情報（走行軌跡）を地盤の良否判定とリンクさせて記録し、クラウドを介しリアルタイムに共有する
- ④専用の荷重車を必要とせず、汎用車両に後付けする
- ⑤低コストで運用できる

検討事項の第一は、省人・省力化を図れるシステムであることとし、目視の削減や試験員の負担を軽減するため、距離センサー等の計測デバイスを利用し、荷重車の車体幅で変形を計測でき、自動で地盤の良否判定ができることとした。計測デバイスを利用することで判定の個人差も解消され、変形の程度を数値化し定量的に計測することも可能になる。また、従来方法の利点でもあるリアルタイム判定は当システムでもできるものとし、後処理の手間が増えることを避けた。

第二は記録方法で、従来方法の手書き記録や写真撮影をなくし、クラウドを活用し面的にデータを保存することで、トレーサビリティやエビデンスを容易に確保できることとした。信頼性の高いデータが取得可能でかつ、インターネット上で試験結果の情報共有が可能であれば、遠隔臨場と同等の運用ができると考えた。

第三は普及性を考え、汎用車両への後付けや低コストで運用ができるシステムとした。このため計測デバイスを含めた各機材は、可能な限り安価なものを使用するが、高い精度で計測できるものを探求した。

これらの仕様を基に、必要となるデバイスを選定し、要素確認試験を実施した。

(2) 人の目に替わる計測デバイス

システムの要となる変形を計測するデバイスは、LiDARやAIカメラなど、いくつかの候補を選定し検討したが、撮影した対象物までの距離を計測することができる3Dカメラを活用することとした。3Dカメラには、その構造や計測方法でいくつかのタイプに分けられるが、太陽光の影響を受け難く屋外作業が可能で、比較的安価だが高い計測性能を持つアクティブステレオ方式の3Dカメラ（写真一3）を選定した。

アクティブステレオ方式とは、複眼かつ対象物へ照



写真-3 選定した3Dカメラ

射したパターン光の歪み等で距離を計測する方式のカメラである。この3Dカメラを、当該試験で荷重車として主に使用される12t級タイヤローラの車幅で変形の計測ができるように、取り付け位置や治具を検討し、車体両側面と中央部の三箇所に、地盤から45cmの高さに設置することとした。

(3) その他のデバイス

荷重車の位置情報は、cm級の精度を持つGNSSモジュールで取得し、荷重車のキャノピ上部にアンテナを設置する。インターネット通信は、SIMカードを装着できるドングルを用い、クラウドへのデータアップロードの他に、RTK-GNSSで使用する電子基準点情報の取得にも使用する。3Dカメラを含めたこれらのデバイスは、制御ボックス内の小型PCに接続され、この小型PCにて情報の集約、解析、保存、通信が制御される。システム設定はモニタで確認でき、コントローラにて任意に設定を調整することができるシステムとした。専用車両を必要としないよう、各機材の取付けはマグネットを使用した。機材設置状況を写真-4に示す。

4. 地盤の変形を検出する方法

(1) 基本原理

3Dカメラは撮影した対象物までの距離を計測できるデバイスであるが、モニタには計測された距離に応じ



写真-4 機材設置状況

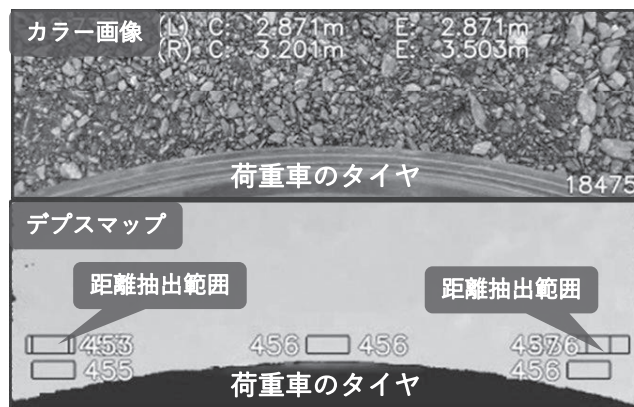


図-2 カラー画像とデプスマップ

色分けされたデプスマップ(図-2)が表示される。

地盤の変形は、デプスマップ内に設定した特定の領域で計測した距離を抽出し、荷重車の通過に伴う距離の変化を解析することで検出する。

距離を抽出する領域は、荷重車のタイヤの前後に設け、前側(以下、Pre)は無負荷状態、後側(以下、Post)は負荷状態での3Dカメラから地盤までの距離を計測する。荷重車の進行に伴い、Pre領域とPost領域が同位置となった際に計測距離を比較(Pre-Post)し、差分がなければ良判定、差分が生じた場合は、その変形量に応じて不良と判定される。詳細を次節に示す。

(2) 弾性変形の検出方法

弾性変形は、荷重車の通過中に発生するたわみに伴う地盤の傾きを計測し、変形を検出する。

図-3と図-4を用いて、変形を検出する演算方法を説明する。

- ①地点PにおいてPre領域の距離差分(A-B)を算出する ⇒ L1とする
- ②荷重車が移動し、Post領域が地点Pに来たときの距離差分(C-D)を算出する ⇒ L2とする
- ③L1とL2を比較する ⇒ L1-L2

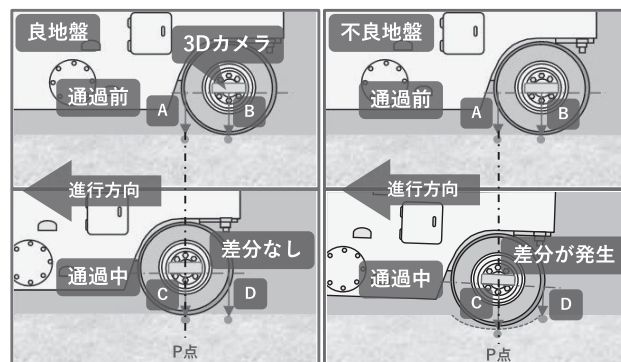
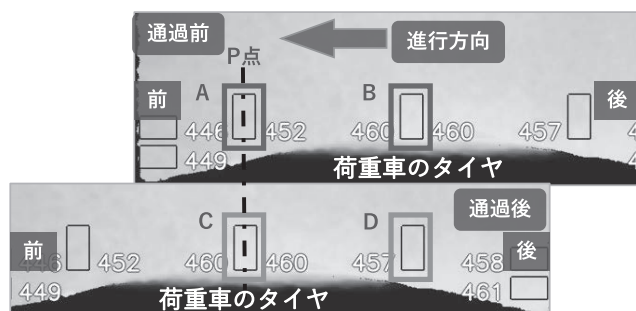


図-3 弾性変形の検出イメージ図



図—4 3D カメラの画像と距離抽出領域①

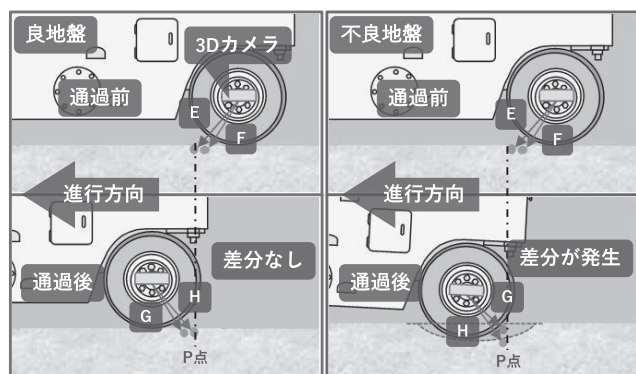
- ④差分がなければ良判定，差分が生じた場合は，その差分を変形量とし，量に応じて不良と判定

(3) 塑性変形の検出方法

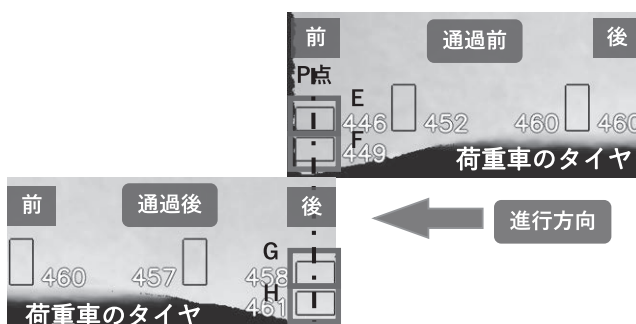
塑性変形は，荷重車の通過後に発生するタイヤの通過領域と非通過領域に生じた段差を計測し，変形を検出する。

図—5 と図—6 を用いて，変形を検出する演算方法を説明する。領域の並び方は違うが基本的な考え方，演算方法は弾性変形と同じある。

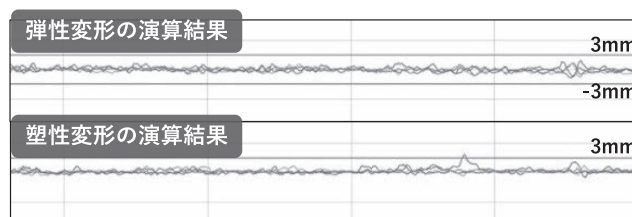
- ①地点 P において Pre 領域の距離差分 (E-F) を算出する ⇒ R1 とする
- ②荷重車が移動し，Post 領域が地点 P に来たときの距離差分 (G-H) を算出する ⇒ R2 とする
- ③ R1 と R2 を比較する ⇒ R1 - R2



図—5 塑性変形の検出イメージ図



図—6 3D カメラの画像と距離抽出範囲②



図—7 距離差分のグラフ例

- ④差分がなければ良判定，差分が生じた場合は，その差分を変形量とし，量に応じて不良と判定

これらの演算方法を用い，不良箇所を自動かつリアルタイムに判定するプログラムを小型PCに設定した。

Pre 領域と Post 領域の位置合わせは，GNSS から得られる荷重車の移動情報を基に行われる。さらに，その移動情報を利用して，横軸を荷重車の移動距離，縦軸を変化量としたグラフ（図—7）が生成され，システムに付属するモニタにてリアルタイムで確認することができる。

5. 試験結果確認用の地図アプリ

(1) リモート確認

前述した演算方法による地盤の変形量は，荷重車の位置情報とリンクし，リアルタイムでクラウドへアップロードされる。このデータを基に，変形量に合わせて色分けされたヒートマップ（図—8）が生成され，試験結果確認用に構築した地図アプリ上で確認することができる。

この地図アプリは，個別にインストールする必要がなく，インターネットに接続されたPCやタブレットがあればアクセスできるため，閲覧者を制限することなく遠隔地においても試験結果のヒートマップをリモートで確認することができる。これにより，映像を使わない方法で，当該試験を遠隔臨場と同等の運用が可能となる。試験結果のヒートマップは，実際に荷重



図—8 試験結果のヒートマップ



図—9 エクセル様式への試験結果自動添付機能

車を走行させた軌跡から生成されたものであり、エビデンスとしての信頼性が高く、遠隔臨場が可能となる要因とも言える。

(2) 試験結果帳票の補助機能

前述した地図アプリには、表示している試験結果のヒートマップを、エクセルの試験結果報告書様式に自動添付する機能がある（図—9）。

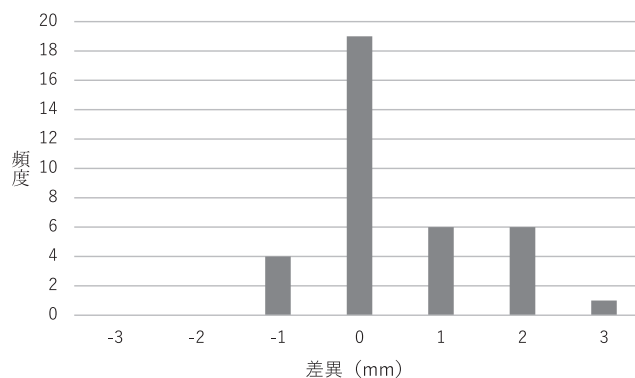
当該試験の従来方法における試験実施記録は、状況写真と立会い検査官の確認サインが入った検査記録および、現場の簡易平面図等に不良箇所の位置もしくは不良箇所がない旨を記載し、試験実施日などの状況をまとめた試験結果報告書を作成している。

本システムにおける試験実施記録であるヒートマップは、GNSS から得られる荷重車の移動情報を基に、国土地理院の地図上に表示され、従来方法である局所で撮影した状況写真と比較するとトレーサビリティを確実に確保できる。このヒートマップは地図アプリの機能により試験結果報告書に自動添付され、現場担当者は、その様式に工事情報を入力すれば、試験結果報告書を作成することができ、事務作業の軽減を図ることが可能である。

6. 計測精度

当システムの計測精度について、レベル測量による変形量計測値と比較した。レベル測量の方法と比較方法については以下のとおりである。

- ①任意に設定したポイントで無負荷状態での地盤高をレベルにて計測
- ②同じポイントに荷重車を移動させ、負荷状態でタイヤ真横の地盤高をレベルにて計測する
- ③『①』と『②』を比較し、差分を算出し変形量とする
- ④システムによる計測を実施し、レベル測量で計測し



図—10 レベル測量と3Dカメラ計測による変形量比較図

た変形量と比較する

両者を比較した差異は図—10に示すとおりで、およそ8割の頻度で差異 ± 1 mmの範囲に分布しており、レベル測量とほぼ同等程度の精度であることを確認した。

また、システムによる計測人員は、荷重車のオペレータ1名とシステム管理者1名の計2名で実施しており、従来4～6名で実施していた当該試験が、本システムを使用することで7割程度の省人化が図れることを確認した。

7. デジタル化システムの活用による効果

本システムの活用により得られる効果をまとめ、以下に示す。

- ①従来方法と比較し、約7割程度の試験員が削減可能
- ②目視観察の必要がなくなり、歩行による身体的負担を軽減
- ③荷重車の車体幅分で地盤の変形を計測しており、変形を見逃す可能性を軽減
- ④3Dカメラと演算式により、地盤の変形を定量的に計測でき、判定の個人差を解消
- ⑤リモートで試験状況の確認が可能で、立会い検査官が現場まで移動する時間と労力を削減
- ⑥地図アプリの帳票出力機能で事務作業を軽減

以上より、当該試験をデジタル化することで、従来方法にあった課題が解決できることがわかった。

8. おわりに

ブルーフローリング試験をデジタル化することで、従来方法にあった作業効率の悪さや作業に掛かる労力を改善できるとともに、数値的判定により定量化できることがわかった。また、遠隔臨場と同等の運用が可能となることで、昨今のi-Constructionなどにおける

魅力ある現場作りにも貢献できると考える。

舗装工事における品質管理試験の中には、数十年前から変わらず同じ手法で行われているものが依然として存在する。これを課題と捉え、積極的に課題解決を実践し、働き方改革や担い手不足へ向けた取組みに、今後も貢献していきたいと考える。

J C M A

《参考文献》

- 1) 「3Dカメラ活用によるブルーフローリング試験のデジタル化について」, 令和5年度 建設施工と建設機械シンポジウム, 2023年11月

【筆者紹介】

立花 洋平（たちばな ようへい）
㈱NIPPO
工事部 ICT推進グループ
機械技術担当課長

