

4. 3Dカメラ活用によるプルーフローリング試験のデジタル化について

株式会社 NIPPO
株式会社 NIPPO
株式会社ザクティ

○ 立花 洋平
駒坂 翼
鈴木 章仁

1. はじめに

舗装構造の下層部には、主に地山や盛土材からなる路床と、その上に砕石を敷き均し整正した路盤と呼ばれる層がある。この路床や路盤は、それらの上層に敷設されたアスファルト舗装に掛かる走行荷重を適切に支える役割があり、支持力がなければアスファルト舗装が破損するリスクが高まる。アスファルト路面に破損が生じた場合、車両の快適な走行に影響が出るため、確かなものづくりやインフラマネジメントの観点から路床、路盤の品質は重要である。

路床や路盤の支持力を確認する品質管理試験の一つにプルーフローリング試験がある。この試験は、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）面が変形しないかを試験員が目視で観察し良否を判定するもので、施工範囲の全幅、全域を試験員が歩いて荷重車を追尾し目視観察を行う（写真-1）。不良と判定された箇所にはマーキングを施し、測点や場所を野帳などへ記録した後、固化材による地盤改良や材料を入れ替えるなどの処置を検討し、野帳へ記録した試験結果は、事務所にて試験結果報告書にまとめる。これが当該試験の一連の流れである。



写真-1 プルーフローリング試験（従来方法）

当該試験は、荷重車と試験員がいれば実施可能で、リアルタイムに判定できる簡便さがゆえ、長い間、試験方法を変えずに実施され続けて

いるが、働き方改革や担い手不足に対し労働環境を変革する取り組みが推進されている現代においては、作業効率や安全性の観点からいくつかの課題を確認した。

この課題解決に向け、当該試験に先端技術を取り入れ、デジタル化を実施した詳細を報告する。

2. プルーフローリング試験

2.1 不良箇所が発生する変形と目視観察

プルーフローリング試験により不良と判定された箇所に発生する地盤の変形は、塑性変形と弾性変形の2種類がある。

塑性変形（写真-2）は、不良箇所において荷重車の通過に伴い地盤が沈下し、荷重車の通過後に通過跡が地盤上に残る変形で、目視観察での発見は難しくない。



写真-2 塑性変形の例

一方、弾性変形（図-1）は、荷重車が不良箇所付近を通過中に地盤は沈むが、通過後は元に近い状態まで戻るたわみ変形で、荷重車が不良箇所を通過するわずかな時間に起こる変形を荷重車の車両幅において観察する必要があり、変形量が少ない場合は発見が難しく、試験員の技量によっては変形を見逃す可能性がある。

こうした見逃しを防止する目的で、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く、荷重車の走行速度は人が通常歩く速度よりも低速で実施している。また、試験員はわずかな変形を見逃さないよう試験中は常時地盤を注視し、荷重

車へ近接した状態で歩行している。

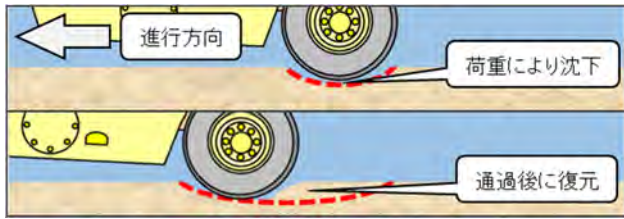


図-1 弾性変形のイメージ図

2.2 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 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
- ② 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
- ③ 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
- ④ 荷重車への近接状態と地面を注視しながら歩行するため危険性を伴う

これらの課題は、目視や手書き記録など、当該試験が採用された当初から変わらずアナログな方法で実施しているためであり、それらを現代のセンシング技術やICTを取り入れることで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

3.1 人の目に替わる計測デバイス

当該試験のデジタル化にあたり、まずは人の目に替わり地盤の変形を計測するデバイスを、次に示す条件を基に検討した。

- ① 荷重車へ取り付け可能かつ外乱光の影響を受けず屋外で使用可能
- ② 土や碎石に対して計測可能で、前述した2種類の变形に対応できる
- ③ mm単位での計測が可能
- ④ 不陸等による車両の傾きに影響されない
- ⑤ 解析手間が不要で、リアルタイムに判定
- ⑥ 低コストで開発や運用ができる

この条件を基にデバイスを選定する過程において、LiDARやAIカメラなどによる変形の計測が選択肢として挙がったが、最終的に3Dカメラを選定した。3Dカメラとは、撮影した対象物までの距離が計測できるカメラで、計測された距離に応じ色分けされたデプスマップ(写真-3)をビューアソフトで可視化できるデバイスである。

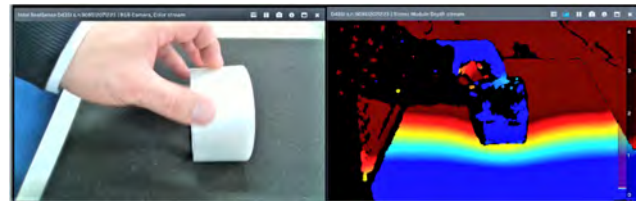


写真-3 ビューアソフトによる通常画像(左)とデプスマップ(右)

3Dカメラには、複眼の視差を利用したステレオ方式や、レーザ光の往復時間から距離を算出するToF(Time of Flight)方式など、その距離計測方法でいくつかのタイプに分けられる。今回は前述した条件を基に要素試験を行い、外乱光の影響を受け難く、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カメラを選定した(写真-4)。アクティブステレオ方式とは、複眼かつ対象物へ照射したパターン光の歪みから距離を計測する方法である。



写真-4 選定した3Dカメラ

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3箇所に設置することとした。これにより、目視観察に掛かる試験員が削減され、省人化が図れると判断した。

3.2 3Dカメラによる地盤の変形の検出

3Dカメラでの撮影により生成されたデプスマップは、マップ画像の至る箇所においても距離の抽出が可能である。この機能を活用し、不良箇所が発生する2種類の变形に対応するよう、3Dカメラで撮影した画像内に地盤までの距離を抽出する範囲を設定し、得られた距離情報を解析することで変形を検出する。

塑性変形は、荷重車の通過後に残る通過跡の段差を計測し、弾性変形に関しては、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する。それぞれ、荷重車が通過する前の無負荷状態における地盤までの距離を基準とし、それを通過中および通過後の距離と比較する。通過前後の計測距離に差分がなければ変形のない良判定、差分が生じた場合は、その量に応じ不良と判定される仕組

みである (図-2)。

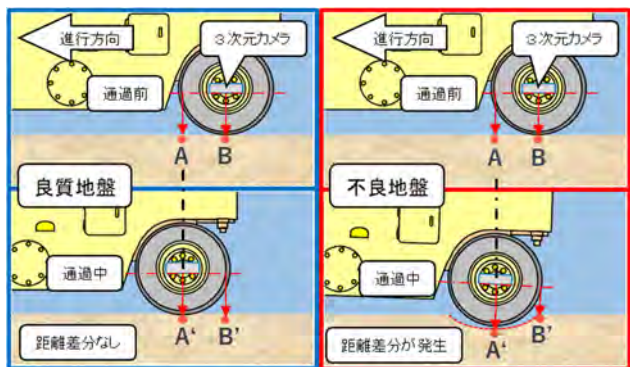


図-2 地盤の変形検出のメカニズム

この良否判定は、3D カメラが接続された小型 PC にプログラムした演算式によりリアルタイムに行われる。良否判定に付随し、荷重車の走行距離を横軸、演算式で算出された距離差分を縦軸としたグラフ (図-3) が生成され、付属するモニターにて確認することができる。写真-5 に本システムの配置状況を示す。

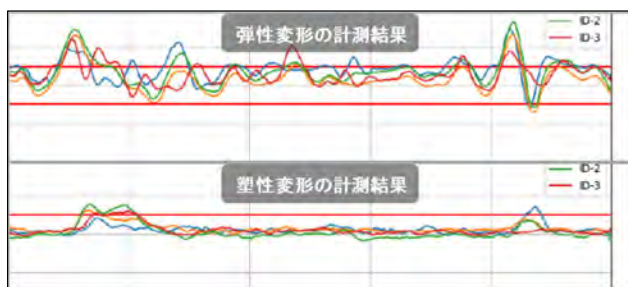


図-3 演算式により算出された距離差分のグラフの例



写真-5 システム機材配置状況

3.3 荷重車の走行軌跡と試験結果のリンク

前述した判定結果は、荷重車の走行軌跡とリンクし記録することで、不良箇所場所と変形の程度を確認できるものとした。

荷重車の走行軌跡は VRS 方式の GNSS で取得し、その記録に良否判定の結果を反映させ、LTE 通信を介しリアルタイムでクラウドへアップロー

ドされる。アップロードされた走行軌跡と良否判定の結果は、クラウドに構築した専用の地図アプリに、変形の度合いに合わせて色分けされたヒートマップ (図-4) が生成され、web 上で確認できる。この地図アプリは、PC などへインストールする必要がなく、インターネットへ接続できる環境があればどこでも確認することが可能である。



図-4 地図アプリと試験結果のヒートマップ

これにより、遠隔地においてもリモートで試験状況および試験結果を確認することが可能となる。現在、舗装工事においても、ICT を活用した遠隔臨場による立会い検査の簡素化が取り組まれているが、当該試験は除外される場合が多い。これは、実際の地盤を撮影し配信された映像により地盤の変形を確認することは、解像度やフレームレートの関係上難しいということが要因の一つと考える。しかし、本システムの活用により、映像を使わない方法で当該試験の遠隔臨場と同等の運用が可能となる。

3.4 試験結果報告書の帳票出力機能

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は前述したヒートマップである。これは GNSS から得られる荷重車の走行軌跡から生成されたものであり、デジタルデータでのエビデンスであることから、局所で撮影した状況写真と比較すると信頼性が高い。また、このヒートマップは、国土地理院の地図上に表示され、地図アプリの帳票出力機能により試験結果報告書の様式に自動で添付される (図-5)。現場担当者は、その様式に工事名や試験実施記録を入力するだけで、試験結果報告書を作成することができ、事務作業の軽減が図れる。

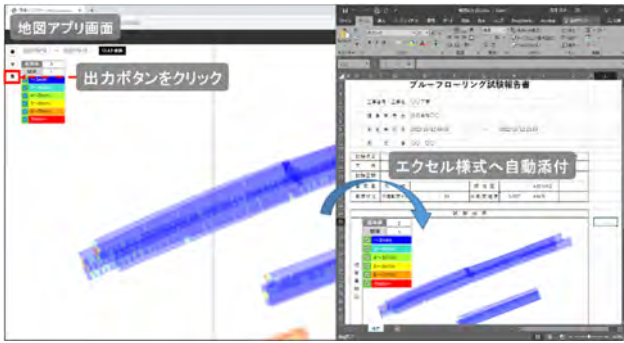


図- 5 試験結果報告書の帳票出力機能

4. デジタル化システムの精度検証

本システムの試作機を製作し、実現場にて精度検証を実施した。検証方法は、まず、対象範囲において縦断 5m ピッチ、横断は荷重車に取り付けた 3つの 3D カメラの位置に合わせた幅分で計測ポイントを出す。次に、そのポイントにおいて無負荷の状態と荷重が掛かった状態でレベル測量（写真-6）を実施し、変形量を算出する。この算出された変形量と、3D カメラで計測した変形量とを比較した。

両者を比較した差異は図-6 に示すとおりで、おおよそ 8 割の頻度で差異±1mm 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。



写真- 6 レベル測量による変形量の計測

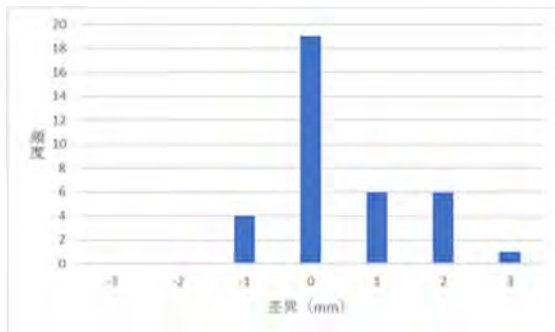


図- 6 レベル測量とデジタル化システムで計測した変形量の差異

この時の変形量は 0~3mm 程度の小さな弾性変形が多く、目視観察では確認し難い変形もあった

が、本システムではそれらの変形を、多少の誤差はあるものの捉えることができている、目視観察と同等かそれ以上の計測性能であると言える。

また、この検証における人員は、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。

5. 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 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
 - ② 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
 - ③ 3D 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
 - ④ 従来方法と比較し、約 7 割程度の試験員が削減可能
 - 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 目視観察が不要となり、荷重車への近接状態や地盤を注視する歩行がなくなり、安全性が向上
 - ⑦ 地図アプリの帳票出力機能で事務作業を軽減
- 以上より、本システムを活用することで、従来方法にあった課題が解決される。

6. おわりに

冒頭で述べたとおり、路床、路盤にはそれらの上層に敷設されたアスファルト舗装に掛かる走行荷重を適切に支持する役割がある。昨今の道路舗装業界では、舗装の長寿命化に資する技術開発が行われ、路盤材に樹脂を添加し、強固な層とすることで長寿命化を図る例もあることから、路床や路盤は舗装体の寿命に関わる層であり、その品質は重要と言える。その品質管理試験をデジタル化することで、確かなものづくりに貢献でき、省人・省力化や安全性が向上することが分かった。

舗装の品質管理試験には、ブルーフローリング試験の他にも、アナログな方法で行うものが多く存在し、それらの試験もデジタル化を図り、舗装現場における労働環境の変革に少しでも貢献できればと考える。

参考文献

- 1) 立花洋平, 駒坂翼, 門田誠也, 相田尚: 働き方を革新するブルーフローリング試験のデジタルライゼーション, 第 23 回 舗装技術に関する懸賞論文, 2023 年