

研究開発部門 最優秀賞

働き方を変革するブルーフローリング試験のデジタルイゼーション

(株) NIPPO 技術企画室 ICT 推進グループ 立花 洋平
 // 駒坂 翼
 // 門田 誠也
 (株) NIPPO 総合技術部 生産機械室 相田 尚

1 はじめに

現在、様々な分野でICTやIoTを活用し、省力化を図る取り組みが行われている。これは道路舗装分野においても同様であるが、舗装に関わる品質管理試験には、数十年の間、ほとんど変わることなく、未だにアナログで実施されているものがある。

舗装体下層部において実施されるブルーフローリング試験は、上層に敷設するアスファルト舗装の長期供用性能を確保する観点から、国土交通省やNEXCOなどのあらゆる舗装工事の品質管理基準において、施工範囲全域での実施が規定されている重要な試験である。

しかし、当該試験の良否判定は目視によるものであり、判定者に依存する見逃しが発生しないよう、複数人が長時間で行う試験である。また、見逃し防止に注力するあまり、走行中の荷重車と人が近接しやすい試験方法であり、安全上にも課題があった。

本論文では、当該試験のデジタル化により、省人化・省力化および安全性の向上に関する変革を検討したデジタルイゼーションへの取り組み内容について述べる。

2 ブルーフローリング試験の試験方法と課題

2-1 ブルーフローリング試験方法

ブルーフローリング試験は、試験地盤上に荷重車となるローラやダンプトラックを走行させ、走行荷重により地盤が変形しないか目視で観察する試験(写真-1)であり、不良と思われる箇所については、必要に応じてベンゲルマンビームによるたわみ(変形)量測定を実施する。



写真-1 ブルーフローリング試験状況

以下に、ブルーフローリング試験の具体的な実施内容を示す。

- ・荷重車のオペレータを含め4～6名程度で実施
- ・判定員は、荷重車の後方を歩きながら追従
- ・判定員は、地盤の良否を目視にて判定
- ・不良箇所を発見した際は、スプレーなどで明示

- ・明示した不良箇所的位置を、野帳などへ記録
- ・この一連の作業を、施工範囲の全面で実施
- ・事務所にて、現場の記録を基に試験結果調査を作成

2-2 プルーフローリング試験の課題

プルーフローリング試験は不良箇所の見逃しを防止するため、多くの人と時間をかけて行う傾向がある。このため、実際の道路舗装工事現場で当該試験の実施状況を調査し、判明した当該試験の課題を以下に列挙する。

- ① 荷重車全幅の目視判定のため、多数の試験人員が必要
- ② 見逃し防止のための低速試験で、多大な時間が必要
- ③ 現場移動や試験実施時の歩行に、時間と労力がかかる
- ④ 試験集中による注意欠如で、人と荷重車が近接し危険

ここで、前述した①～④の各課題の要因は、いずれもアナログで実施されていることに起因していることが分かった。そこで、地盤の変形に伴う不良箇所の判定に、距離や高さを計測するセンシング技術を活用し、さらにICTやIoTを組み合わせることで当該試験をデジタル化することで、課題の解決が可能と判断した。

3 ブルーフローリング試験のデジタル化への取り組み

3-1 プルーフローリング試験デジタル化の要点

プルーフローリング試験のデジタル化に向け、多数の試験人員と多大な時間を要する理由を、デジタル化の要点として整理することとした。これにより、特に人の目視判定の基準がどの程度かを明確にする必要があることが分かったため、目視判定の基準について検証を実施した。

(1) 実現場における目視判定基準の定量性調査

実現場において、発注者側の検査官立ち会いで行った当該試験の目視判定結果と、その範囲内の

任意箇所でベンゲルマンビームを用いて測定した実際の変形量を比較することで、目視判定の定量性調査を実施した。この調査結果は表-1に示すとおりであり、B工事において、目視では変形なしと判定されていたが、実際には4mm程度の変形が確認された。これより、4mm程度の不良箇所は目視判定では判別できない可能性があることを確認した。

表-1 目視での判定と変形量の調査結果

工事	目視での判定	実際の変形量
A	全区域で変形なし	全区域で1mm以下
B	全区域で変形なし	4mm程度の変形を確認
C	一部に変形あり	6mm程度の変形を確認
D	全区域で変形なし	全区域で1mm以下
E	一部に変形あり	7mm程度の変形を確認
F	全区域で変形なし	2mm程度の変形を確認

(2) 試験ヤードにおける目視判定基準の定量化検討

判定員による目視判定における基準の定量化を目的とし、試験ヤードで複数の異なる変形量を発生させ、実現場と同様の調査による目視判定の定量化検討を実施した。

具体的には、碎石路盤内に、異なるサイズのウレタンマットの埋設深さと荷重車クラスをそれぞれ3水準とすることで、9水準の変形量が発生する条件を設定した。

- ・ウレタンマットの広さ 2.7、1.8、0.9 m²
- ・ウレタンマットの埋設深さ 15、20、30 cm
- ・載荷する荷重車クラス 9、12、25 t級
- ・発生する変形量 5、7、8、9、11、14、15、16、20 mm

この試験ヤードにおいて、経験10年程度の試験員3名を含めた20名で判定を実施した結果、変形を確認できた人数の割合は、以下に示すとおりであった。

- ・変形量 16～20mm 100%
- ・変形量 14～15mm 93%程度
- ・変形量 11mm 60%程度
- ・変形量 5～9mm 13%程度

これより、変形量15mm以下では、経験5～10年程度以下の試験員において、判定に個人差が生じることを確認し、目視判定の基準となる計測の

基準が明確となった。

このため、改めてプルーフローリング試験のデジタル化の要点を整理し、不良箇所の見逃しが発生せず、省人化・省力化が可能で、エビデンスの確保が可能なシステムの開発要件は、以下に示すとおりとした。

- ① 5 mm 程度の変形量が判定可能な計測技術の確立（経験10年程度の試験員と同程度）
- ② 変形量測定を荷重車全幅内の複数箇所で行う
- ③ 変形量測定結果と位置情報をデジタルデータで記録

3-2 システムの開発検討

システムを開発する上で、はじめに地盤の変形を検出する4種類の計測機器について、地盤を対象とした計測の「実現性」、誤差や機器の分解能による「計測性能」、解析手間やリアルタイム性などの「解析時間」、開発や運用にかかる「コスト」、実運用作業における「普及性」の観点から10点満点で総合的に評価検討した。結果は表-2に示すとおりであり、総合評価の一番高い3次元カメラによる地盤変形の計測を軸に開発することとした。

表-2 計測機器の検討結果（○：2点、△：1点、×：0点）

計測機器	実現性	計測性能	解析時間	コスト	普及性	総合評価
自動追尾 TS	○	○	×	△	△	6
スキャナ	○	○	×	×	△	5
AI カメラ	○	△	△	×	△	5
3次元カメラ	△	△	○	○	○	8

3-3 地盤の変形を計測可能な3次元カメラの選定

3次元カメラは、カメラからの奥行き（深度）情報を得ることができ、色分けされた深度画像で撮影した対象物までの距離を可視化できる。

なお、3次元カメラには、その構造や距離計測方法でタイプ分けされ、主に以下に示す3種類の方式がある。

- ・複眼の視差（ズレ）から距離を算出するステレオ方式
- ・対象に投影した光が反射して戻ってくる時間から距離を算出する ToF（Time of Flight）方式

- ・対象に投影した光をカメラで検出し、投影された箇所までの距離を算出するアクティブステレオ方式

そこで、地盤の変形を高精度で検出可能とするため、以下の要件を選定基準として要素試験を行った。

- ・土や碎石を対象として深度情報が取得可能
- ・屋外の環境条件に影響されにくい
- ・一定の深度分解能および領域分解能がある
- ・比較的安価なもの

この結果、対象物の素材や外乱光の影響を受け難く、碎石など均一性のないものも一定の計測精度が期待できるアクティブステレオ方式が最適であると判断した。アクティブステレオ方式で得られる画像を写真-2に示す。

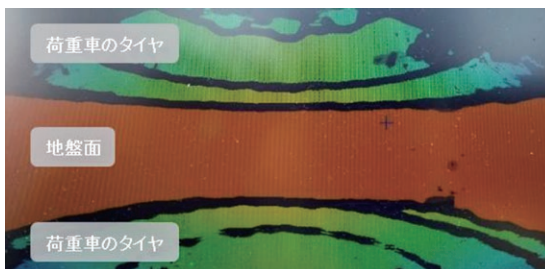


写真-2 アクティブステレオ方式の3次元カメラで得られる画像の例

さらに、アクティブステレオ方式の3次元カメラの中で検討を実施した結果、最終的に荷重車の姿勢変化に伴う傾きなどを補正することが可能な慣性センサを搭載している3次元カメラ（写真-3）を選定した。



写真-3 選定した3次元カメラの外観

3-4 3次元カメラによる地盤計測方法の検討

選定した3次元カメラにおける地盤の計測方法を検討するため、プルーフローリング試験で主に荷重車として使用される12t級のタイヤローラにおいて、3次元カメラの設置が可能な箇所や設置

個数、設置高さと同角の関係、および解析方法などを確認した。

この結果、3次元カメラは、通過前の基準計測と通過後の変形を計測するため2個1組とし、荷重車の後輪側面に地盤から約45 cmの高さに設置した。また、荷重車全幅で計測するため、左右両側面と中央部の3カ所へ計6個取り付けした(写真-4)。



写真-4 3次元カメラの取り付け状況

4 地盤の変形を検出する演算方法

ハードウェアの検討に続き、ソフトウェアの検討を行った。地盤の変形は、3次元カメラから得られる画像内で距離を抽出する範囲(図-1)を設定し、荷重車の通過前後で比較し検出する。距離比較の方法は、当該試験で発生する2種類の地盤変形に大きく関係するため、詳細については次節に示す。

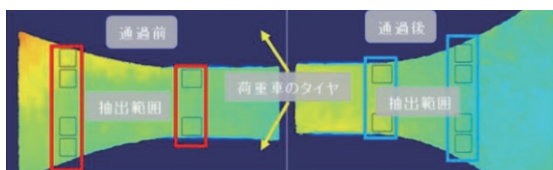


図-1 距離抽出設定画像

4-1 タイヤの通過跡が残らない場合の検出方法

地盤の変形の一つは、地盤に荷重がかかっているときのみ変形し、通過後は元の状態に近い状態まで戻る弾性変形である。図-2に弾性変形のイメージ図を示す。

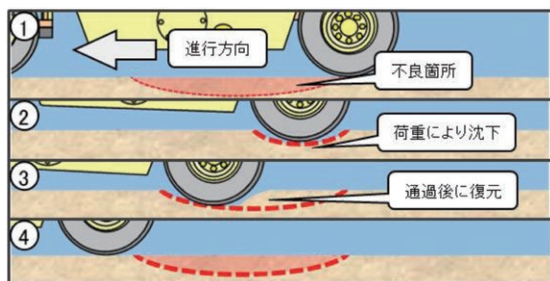


図-2 弾性変形のイメージ図

この変形は、荷重車の通過に伴う地盤沈下によって生じる距離変化を分析し検出する。これは、沈下により、荷重の影響範囲外とタイヤ隣接部に距離差分(図-3)が生じるためであり、これをセンター検出と呼ぶこととした。

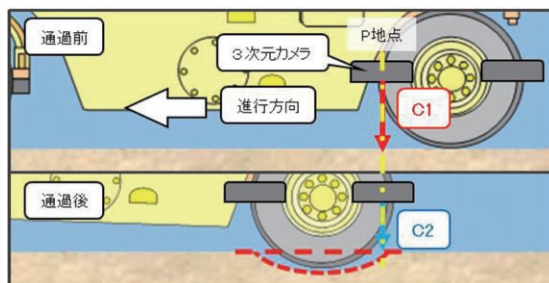


図-3 弾性変形での距離変化イメージ図

変形の検出方法について、図-4を基に説明する。なお、荷重車の通過前後の位置合わせは、荷重車に取り付けた仮想基準点方式のGNSSから取得した位置情報を基に行う。

- ① 荷重車通過前のP地点で、地盤までの距離C1を計測
- ② 荷重車が移動
- ③ 荷重車通過後のP地点で、地盤までの距離C2を計測
- ④ C1とC2を比較⇒ $C1 - C2$ で差分を算出
- ⑤ 差分がなければ変形のない良質地盤、差分が生じた際は、その変形量に応じて不良地盤と判定

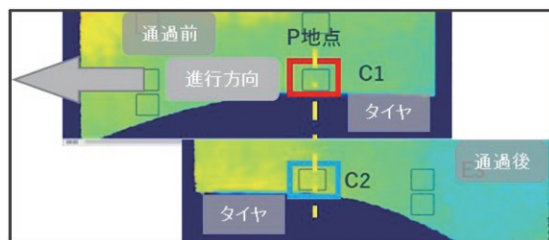


図-4 センター検出の距離抽出範囲設定

4-2 タイヤの通過跡が残る場合の検出方法

もう一つの変形は、荷重車の通過後に地盤が沈下し、タイヤの通過跡が残る塑性変形である(写真-5)。

この変形は、荷重車の通過に伴う地盤変形において、タイヤの通過領域(写真-5、青枠部)と非通過領域(写真-5、赤枠部)に生じた距離差分により検出し、エッジ検出と呼ぶこととした。

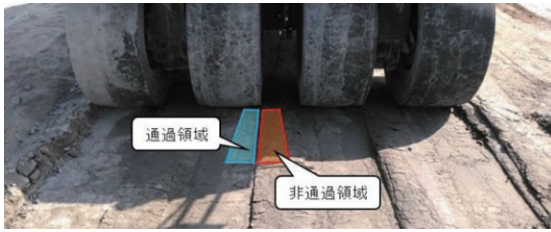


写真-5 塑性変形の例

変形の検出方法について、図-5を基に説明する。

- ① 荷重車通過前のP地点で、非通過領域E1と通過領域E2の地盤までの距離を計測し、E1 - E2でEAを算出
- ② 荷重車が移動
- ③ 荷重車通過後のP地点で、非通過領域E3と通過領域E4の地盤までの距離を計測し、E3 - E4でEBを算出
- ④ EAとEBを比較⇒EA - EBで差分を算出
- ⑤ 差分がなければ変形のない良質地盤、差分が生じた際は、その変形量に応じて不良地盤と判定

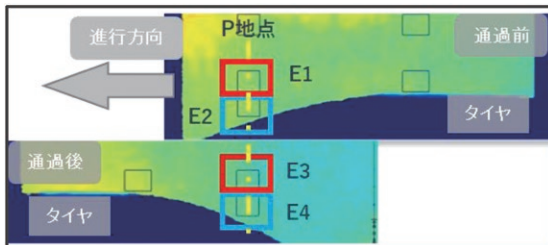


図-5 エッジ検出の距離抽出範囲設定

4-3 不良箇所の検出性能検証

変形の検出方法が確立し、検出性能の検証を行った。まず、良質地盤と不良地盤を前述した検出方法で区別可能か確認するため、初期段階での検出の基準は、経験の浅い試験員の判定で個人差が生じる10mmとした。

検証試験は、変形が発生するヤードを設営し行った。検証ヤードの配置図を図-6に、検出結果のグラフを図-7に示す。

図-7より、センター検出、エッジ検出ともに不良箇所を検出できており、良好な結果と言える。しかし、センター検出では良質地盤においても、不良と誤検出するケースを確認した(図-7、赤

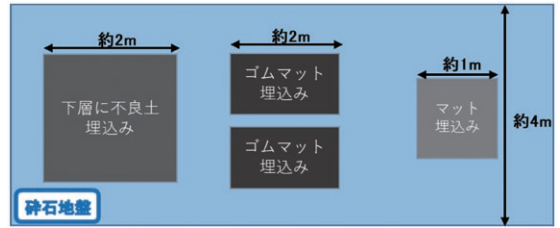


図-6 検証ヤード配置図

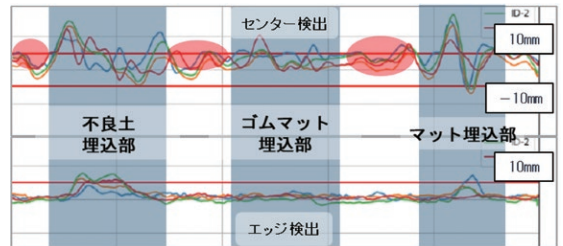


図-7 検証ヤードでの検出結果グラフ

囲い部)。これは、地盤に元からある不陸により、3次元カメラが傾くことで地盤までの距離が変わり、補正しきれていないためと考えた。

4-4 検出性能の向上検証

検出性能の向上を目的として、距離を抽出する方法を見直すことのほか、以下に示す改良を加えるなどにより、最適な設定を追求した。

(1) 3次元カメラの設置方法の変更

通過前の基準計測と通過後の変形を計測するため2個1組としていた3次元カメラを、各箇所1個で通過前後を計測(写真-6)とし、位置合わせの精度向上と個体誤差を排除した。



写真-6 3次元カメラ個数の変更

(2) センター検出の検出方法の変更

センター検出の距離抽出範囲を追加(図-8)し、エッジ検出と同様に2つの領域の距離差分を通過前後で比較する方法に変更した。これにより、3次元カメラの高さや傾きが変化しても、変形が生じなければ、距離差分は変化せず、不陸と変形を区別することができる(図-9)。なお、検出方法はエッジ検出同様に、(C1 - C2) - (C3 - C4)とした。

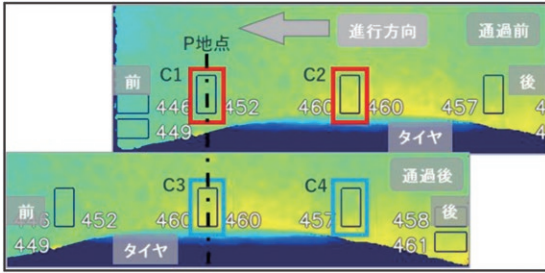


図-8 改良したセンター検出の設定

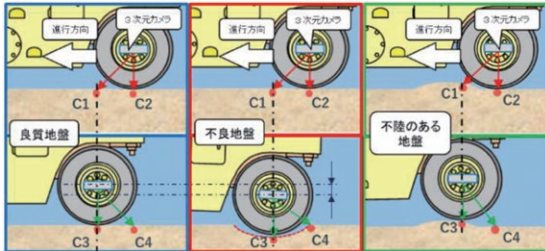


図-9 沈下に伴う傾きの検出方法

(3) カメラ設置のガイド線を追加

カメラ設置のガイド線を付加(図-10)し、常に最適画角で撮影できる状態に設置できるようにした。

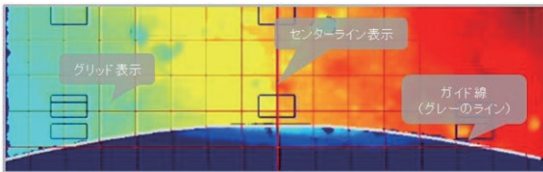


図-10 3次元カメラ設置ガイド

4-5 実現場における開発技術の検証

改良を施した効果を確認するため、実現場の路床面と路盤面で開発技術の検証を実施した。なお、ここでも、目視判定とベンゲルマンビームによる実際の変形量測定を実施し、開発技術の検出結果と比較した。

路床面においては、目視判定では一部で塑性変形を確認したが、弾性変形は確認されなかった。また、ベンゲルマンビームでの測定では、最大3mm程度の変形量を確認した。これに対し、開発技術の検出結果(図-11)においても、3mm程度の変形が確認できた。



図-11 路床でのセンター検出結果グラフ

路盤面においては、目視判定では、全面で変形は確認されず、ベンゲルマンビームでの変形量測定も1mm以下であった。これに対し、開発技術での検出結果(図-12)においては、1mm程度の変形を確認した。



図-12 路盤でのセンター検出結果グラフ

以上より、開発技術は、目視判定と同等の検出性能であることを実現場での検証で確認した。写真-7に最終的な機材取り付け状況を示す。



写真-7 機材取り付け状況

5 デジタル化した開発技術の活用と効果について

5-1 デジタル化した開発技術による省人化・省力化効果

表-3にプルーフローリング試験の実施状況について、従来方法と開発技術とで比較した表を示す。

表-3より、従来方法では1人工、1,000㎡当たり約3.9時間かかっていたが、開発技術を活用することで、1.4時間に短縮され、計算上では作業効率が約3倍に向上した。これには、試験人員の削減が大きく寄与している。従来は、荷重車のオペレータ、発注者側の検査官、現場代理人や品質証明員など

表-3 実施状況比較表

工事 A~F は従来方法	実施 面積 (㎡)	実施 時間 (h)	人員 (人)	1,000㎡当たりの 実施時間 (h・人/1,000㎡)
A	5,200	2.5	5	2.4
B	1,800	1.5	5	4.2
C	1,100	1.0	6	5.5
D	1,000	0.7	5	3.5
デジタル①	1,000	0.6	2	1.2
デジタル②	1,400	1.1	2	1.6

平均 3.9

平均 1.4

4～6名程度で行っていた試験が、荷重車のオペレータとシステム管理者の2名で試験実施が可能となった。これは、開発技術の判定結果が、試験を実施した範囲の位置情報とともに、リアルタイムでクラウドへアップロードされ、可視化アプリで確認(図-13)できるためである。遠隔地においても、インターネット環境があれば、結果のリモート確認ができる。

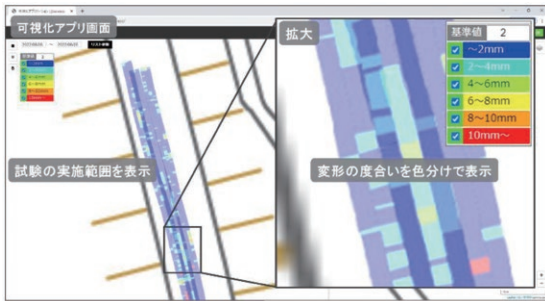


図-13 可視化アプリの試験結果表示

これにより、遠隔臨場と同様の運用ができ、現場立ち合いに要する検査官の移動時間が削減され、さらにデジタルデータでのエビデンスが残せるため、発注者と受注者双方の業務効率化に寄与できる。

5-2 デジタル化した開発技術による安全性の向上効果

従来方法では、判定員が荷重車に近接した位置で地盤を注視し、下を向いた状態で歩行するため、荷重車と接触する危険性や、周囲の状況変化に意識を割くことが困難であった。さらに、広い面積での試験実施による身体的負担で、夏季には熱中症になる可能性もあった。

これに対し、開発技術では判定員が不要であるため、常時、下を向いて歩行する必要はなく、周囲に意識を向けることが可能であり、荷重車に近接して歩行する必要はない。また、システムの作動を管理するために、最低限の歩行は必要になるものの常に追従する必要もなく、安全性の向上と身体的負担の軽減を図ることができた。

6 まとめ

開発技術の活用により、得られた効果を整理する。

- ① 従来の目視判定と同等の変形量5mmでの判定が可能
- ② 最大で約70%の試験人員を削減
- ③ 作業効率が従来比で約3倍向上
- ④ 可視化アプリによるリモート確認(遠隔臨場)が可能
- ⑤ 平面的なエビデンスが、デジタルデータで取得可能
- ⑥ 歩行や現場移動の労力を削減
- ⑦ 荷重車に近接する必要がなく安全性が向上

以上より、プルーフローリング試験をデジタル化することで、省人化・省力化と安全性向上効果が得られ、従来方法にあった課題が解決できた。今後、更なる使い勝手の向上などのブラッシュアップを図り、建設現場の生産性向上や品質向上につなげていきたい。

7 おわりに

プルーフローリング試験は、今から60年以上前に名神高速道路の試験舗装工事で初めて採用されて以来、その方法を変えることなく実施されている試験である。今回の当該試験のデジタル化は、人の目を3次元カメラに変更したもので、試験方法を大きく変えるものではない。

このため、プルーフローリング試験以外の舗装に関わる品質管理試験においても、先人達が築き上げた技術を確実に継承しながら、人の作業に意図せず発生するヒューマンエラーや身体的負担をデジタル技術で削減し、経験に左右されることなく簡便で、確かな品質の確保に資する技術を、今後とも開発可能と考える。

現代は、ICTが進化し、施工段階で埋まってしまうものや人の目では見えにくかったものも見える化でき、デジタルデータとして詳細に記録が残せる時代である。今後も新しい技術の利活用や技術開発によるデジタルライゼーションで、確かなものづくりに貢献するとともに、建設現場の働き方改革や生産性向上に挑戦していきたい。