

18. 振動ローラとタイヤローラによる締固め後の 平坦性の点群による評価

国土交通省国土技術政策総合研究所
 国土交通省国土技術政策総合研究所
 国立研究開発法人土木研究所

○古明地 隆浩
 大槻 崇
 橋本 毅

1. 背景と目的

1.1 ICT 活用工事の実現に向けた近年の取り組み

国土交通省では、平成 28 年度より、i-Construction のトップランナー施策の 1 つとして「ICT の全面的な活用」を打ち出し、ICT 土工を皮切りに ICT 舗装工等へと年々その適用工種を広げている。

この取り組みは、建設現場の生産性向上に向けて、建設生産プロセスの各段階において 3 次元データや ICT 等を活用する施策であり、国内に広く ICT を普及させることで災害等の非常時における迅速な復旧復興作業での活用も期待されている。

図-1 は ICT 活用工事件数¹⁾を示している。ICT 活用工事は直轄、都道府県政令市のいずれにおいても実施件数に大きな伸びが見られ、全体として ICT 活用工事が普及拡大している様子が伺える。

< ICT 施工の実施状況 >

| 工種 | 2016年度 [平成28年度] | | 2017年度 [平成29年度] | | 2018年度 [平成30年度] | | 2019年度 [令和元年度] | | 2020年度 [令和2年度] | |
|---------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | 公告 件数 | うちICT 実施 | 公告 件数 | うちICT 実施 | 公告 件数 | うちICT 実施 | 公告 件数 | うちICT 実施 | 公告 件数 | うちICT 実施 |
| 土工 | 1,625 | 584 | 1,952 | 815 | 1,675 | 960 | 2,246 | 1,799 | 2,420 | 1,994 |
| 舗装工 | - | - | 201 | 79 | 203 | 80 | 340 | 233 | 543 | 342 |
| 浚渫工(港湾) | - | - | 28 | 24 | 62 | 57 | 63 | 57 | 64 | 63 |
| 浚渫工(河川) | - | - | - | - | 8 | 8 | 39 | 34 | 28 | 28 |
| 地盤改良工 | - | - | - | - | - | - | 22 | 9 | 151 | 123 |
| 合計 | 1,625 | 584 | 2,175 | 912 | 1,947 | 1,104 | 2,397 | 1,890 | 2,942 | 2,396 |
| 実施率 | 36% | | 42% | | 57% | | 79% | | 81% | |

< 都道府県・政令市の実施状況 >

| 工種 | 2016年度 [平成28年度] | | 2017年度 [平成29年度] | | 2018年度 [平成30年度] | | 2019年度 [令和元年度] | | 2020年度 [令和2年度] | |
|-----|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | 公告 件数 | うちICT 実施 | 公告 件数 | うちICT 実施 | 公告 件数 | うちICT 実施 | 公告 件数 | うちICT 実施 | 公告 件数 | うちICT 実施 |
| 土工 | 84 | 870 | 291 | 2,428 | 523 | 3,970 | 1,136 | 7,811 | 1,624 | |
| 実施率 | 33% | | 22% | | 29% | | 21% | | | |

図-1 ICT 活用工事実施状況

1.2 3次元点群データの普及

近年の技術革新により、レーザースキャナや UAV(Unmanned Aerial Vehicle)で撮影した画像データから 3 次元点群データを容易に取得できるようになってきた。日本国内においては i-Construction が普及したこともあり、建設現場の現状把握や設計、検査において 3 次元点群データの活用が進んでいる。その他にも、土砂災害等の状況把握におい

ても利用が急速に進んでいる。また、2023 年までに BIM/CIM(Building/ Construction Information Modeling, Management)の原則適用という方針が示されており、今後更に 3 次元点群データの活用が期待される。

ICT 活用工事における 3 次元点群データの活用事例の 1 つとして、ICT 舗装工では「表層の厚さ」の出来形管理のために取得する 3 次元点群データに着目し、平成 31 年度からこのデータを「表層の平坦性」という品質評価への活用が認められ、従前のプロフィールメータによる現地計測作業の省力化が実現可能となり、現在の出来形管理要領(案)²⁾に記載されている。なお、著者が所属する社会資本施工高度化研究室では、点群から平坦性を算出するプログラムを開発している。

1.3 締固め施工における振動ローラの活用に関する既往研究及び議論

盛土の品質に関しては、近年の大規模災害(豪雨・地震)により、道路盛土等の崩壊が発生しており、盛土施工時の締固めの重要性が再認識されている。既往の研究では、締固め機械と盛土材料との締固めの関係が調査されている。その中で、振動ローラは礫質土の締固めに適していると示されている。³⁾舗装工における路盤への適用が想起されるが、国土交通省土木工事積算基準 令和 3 年度版⁴⁾に基づくと、下層路盤(車道・路肩部)の締固め作業に使用する代表施工機械としてはロードローラ、タイヤローラが挙げられている。その背景には、振動ローラは進行方向にうねりが発生するという懸念が存在するとされている。

振動ローラの活用に関する動向としては、路盤工の品質管理において、振動ローラの振動鉄輪に加速度計を設置して振動波形を解析する加速度応答法を用いた面的管理による品質向上と作業効率化に向けた取り組み⁵⁾が推進している。

1.4 研究目的

本稿では、普及の広まる 3 次元点群データの活

用法の一つとして、締固め機械の種類による路盤材の転圧後の平坦性の比較を3次元点群データを使用することで面的に評価する手法の有効性を検証した。具体的には上記の通り、舗装工におけるアスファルトの表層の出来形を評価する平坦性という指標値の路盤材への適用を試みた。

2. 検証方法

2.1 計測条件

検証実験は、土木研究所構内の実験ピット（図-2）にて、基礎地盤を造成後に路盤材(C-40)を敷均し後、締固め機械を用いて締固めを実施した。検証施工に用いた締固め機械は、振動ローラとタイヤローラである。実験ピット内を2種類の締固め機械を並走させた。締固め回数(0,2,4,6回)に伴う密度・地盤反力係数変化を計測するとともに、地上型レーザースキャナを使用して地形データを計測して、その点群データから平坦性等の変化を検証した。なお、検証における初期状態(締固め回数0回)は、人力敷均し後に、0.1 m³級の油圧ショベルのクローラにて締め固めた状態とした。



図-2 実験ピットと締固め機械

密度と含水比の計測は、RI計器を使用して0,2,4,6回の締固め完了時に10ヶ所で計測した。

地盤反力係数の計測は、小型FWD(Falling Weight Deflectometer)を使用して、3ヶ所で計測した。重錘を試験地盤に自由落下させた時の生じた荷重と変位を測定して、地盤反力係数相当値を算出した。

平坦性については、レーザースキャナで取得した点群データから当室で開発のプログラムを用いて算出し、2.2で示す方法で評価する。3次元点群データは、実験ピット内の3ヶ所からレーザースキャナを用いて計測し、レジストレーションによって合成した後に各種処理に利用した。

2.2 計測結果の評価方法について

計測した3次元点群データからは、下記の項目について検証できるようにデータ処理を行う。

- ① ヒートマップの作成
- ② 縦断方向のプロファイル取得
- ③ 平坦性の算出

これらの項目の考察する上で、既存ベンダーが供給するソフトウェアだけでは様々な条件で得られる結果を同時に確認することは困難である。色々な条件の数値データを試行錯誤して比較する手間

を減らすために、簡易的な解析処理と表示機能を搭載した図-3に示す評価用ツールを開発した。3次元点群データの読み込み後、画面左側にヒートマップ、画面右側にプロファイルの選択機能とグラフ化機能が搭載されており、平坦性を表す数値の出力が可能となっている。平坦性を算出するアルゴリズムは、現在の3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)²⁾における平坦性の算出アルゴリズムを踏襲している。後述する試験結果は、この評価用ツールから得られた結果を使用する。ただし、3次元的に地形形状等を確認するために点群ビューワも併用した。

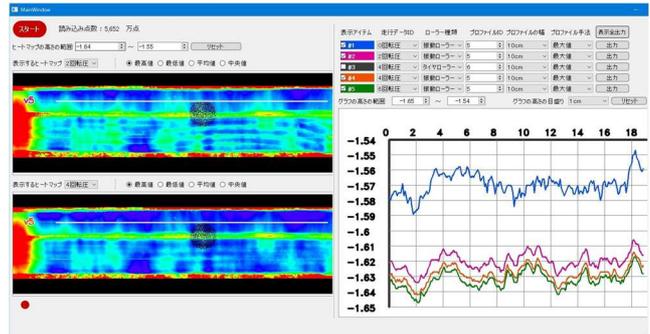


図-3 データ評価用アプリケーション

3. 試験結果と考察

3.1 ヒートマップによる比較

図-4~7は、0,2,4,6回の締固め完了後の3次元点群データから作成したヒートマップである。各画像の上段が振動ローラで転圧した領域、下段がタイヤローラで転圧した領域を示している。図-4~7におけるヒートマップの色の範囲を定義している高さ情報の上限値と下限値は固定値とした。

図-4と図-5から2回締固めた後の試験地盤を比較すると、全体的に振動ローラで締固めた領域の方が高さ方向で大きな沈下量を確認することができる。

また、タイヤローラは前輪が3輪、後輪が4輪で構成されているが、図-5,6,7を見ると轍のような車輪の跡が残り、高さ方向にばらつきが発生しているという傾向が見受けられる。

その他にも、図-5のタイヤローラで締固めた領域を見ると、高さ情報が高い領域と低い領域が存在した。この領域において高低差を3次元点群ビューワ上で確認すると、41mmであった。それに対して、振動ローラで締固めた領域における高低差が大きい部分は15mmであった。このタイヤローラによる進行方向における高さの大きなばらつきは、締固め回数を重ねるごとに小さくなるが、6回締固めた後も若干その差が残っており、締固め機械による傾向の違いと見受けられた。

今回の土質に対しては、振動ローラを用いた手法は沈下量が大きく、うねりが小さいという傾向を確認することができた。

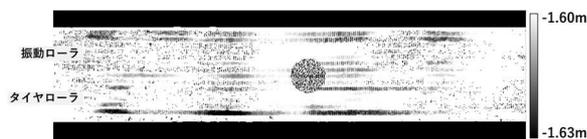


図-4 締固め前(0回)のヒートマップ

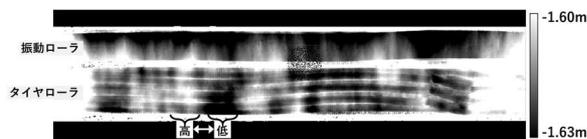


図-5 2回締固めた後のヒートマップ



図-6 4回締固めた後のヒートマップ



図-7 6回締固めた後のヒートマップ

3.2 縦断方向のプロファイルによる比較

締固め機械の進行方向の縦断プロファイルを計測する計測線は、図-8の左側のように10cm間隔で選択可能とした。また、プロファイルデータはプロファイル計測線を中心に2cm×10cmのグリッドに含まれる点群データから代表点(高さ情報の最低値・最高値・平均値・中央値)を抽出するものとした。

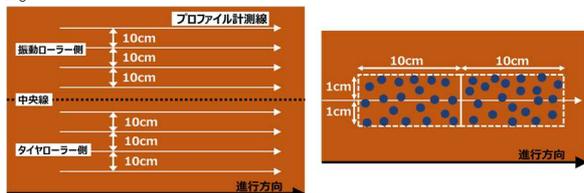


図-8 縦断方向のプロファイル選択機能

各締固め機械により0,2,4,6回締固めた後のプロファイルを図-9に示す。この結果から得られる平均値と標準偏差を表-1にまとめた。2,4,6回締固めた後の標準偏差に注目すると、振動ローラーの標準偏差の方が小さいという結果となり、締固め後の進行方向に対する高さ情報のばらつきが小さいことが確認できる。つまり、進行方向に対して滑らかな仕上がりが期待できると言うことができる。

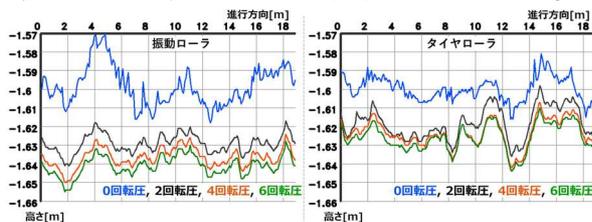


図-9 各締固め機械によるプロファイル

表-1 締固め回数と高さ情報の関係

| | 振動ローラー | | | | タイヤローラー | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| | 0回転 | 2回転 | 4回転 | 6回転 | 0回転 | 2回転 | 4回転 | 6回転 |
| 平均値 | -1.598 | -1.629 | -1.637 | -1.641 | -1.600 | -1.618 | -1.624 | -1.626 |
| 標準偏差 | 0.0105 | 0.0049 | 0.0052 | 0.0052 | 0.0064 | 0.0085 | 0.0074 | 0.0072 |

次に各締固め機械による路盤材の沈下量を比較するために、0回と2回,2回と4回,4回と6回の締固め後のプロファイルの高さ情報の差分値から得られる情報を表-2にまとめた。

表-2 締固め回数間の高さ情報の差分

| 厚み | 振動ローラー | | | タイヤローラー | | |
|------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | 0-2回 | 2-4回 | 4-6回 | 0-2回 | 2-4回 | 4-6回 |
| 平均値 | 0.0307 | 0.0075 | 0.0044 | 0.0184 | 0.0053 | 0.0023 |
| 標準偏差 | 0.0086 | 0.0012 | 0.0006 | 0.0061 | 0.0028 | 0.0013 |

表-2を見ると、振動ローラーの方が差分値の平均値が大きいことから、各転圧時に大きな沈下量が見込めることが分かる。次に、標準偏差については、表-1における0回転(締固め前の初期状態)の標準偏差が振動ローラーの領域が大きかったことが影響するため、0-2回の標準偏差が比較的大きいが、その後の標準偏差は振動ローラーの方が小さいことが分かる。3.1と同様に振動ローラーがより締固めの収束が早いことが分かった。

3.3 平坦性の考察

一般的に平坦性の評価は、道路の縦断方向に発生する凹凸の度合を評価するために舗装の表層で実施されている。ICT舗装工においては、計測ライン上にて延長1.5m毎に直径200mmの円形範囲内に含まれる点群データを抽出し、点群データの平均標高値をもとに数式(1)から平坦性を算出する。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x^2 - (\sum x)^2/n}{n-1}} \quad (1)$$

- σ : 平坦性
- x : 変位置(k番目の標高値に対するk-1番目とk+1番目の標高値の平均値との差分)
- n : 変位置データ数

本稿では、路盤への適用を検討すべく、舗装と同様な手法を踏襲して点群データから平坦性を算出する。ちなみに、平坦性の数値は、0に近い程より平坦な仕上がりであることを意味する。

プロファイル計測線によって結果にばらつきが出てしまうことを防ぐために、各締固め機械の締固め領域の中央付近の複数のプロファイル計測線について平坦性を算出し平均値を求めた結果を表-3及び図-10に示す。

表-3 平坦性の平均値の比較

| プロファイル名 | 0回転 | 2回転 | 4回転 | 6回転 |
|---------|------|------|------|------|
| 振動ローラー | 6.47 | 4.25 | 4.49 | 4.42 |
| タイヤローラー | 9.09 | 7.89 | 7.52 | 7.55 |

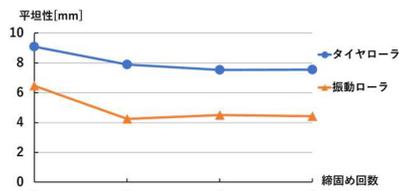


図-10 各締固め機械による平坦性

6回の締固めた後と転圧前の状態の平坦性を比較すると両者に平坦性の向上が見られる。その比率は、タイヤローラが約83%、振動ローラは約68%と平坦性が減少(向上)している。この比較結果から、今回使用した路盤材に対しては、振動ローラが良い平坦性、つまり縦断方向に凹凸が発生しにくい締固め手法であることが分かった。

3.4 乾燥密度・地盤反力係数との関係

RI計器による乾燥密度及び小型FWDによる地盤反力係数相当値の計測結果を図-11、12及び表-4,5に示す。

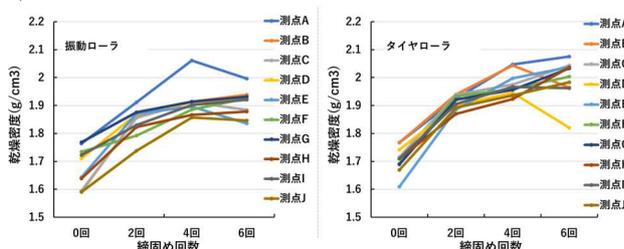


図-11 締固め回数と乾燥密度の関係

表-4 締固め回数と乾燥密度の平均値

| プロファイル名 | 単位[g/cm³] | | | |
|---------|-----------|------|------|------|
| | 0回転圧 | 2回転圧 | 4回転圧 | 6回転圧 |
| 振動ローラ | 1.71 | 1.91 | 1.98 | 2.00 |
| タイヤローラ | 1.68 | 1.84 | 1.91 | 1.91 |

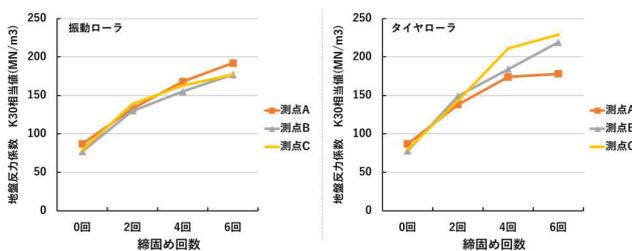


図-12 締固め回数と地盤反力係数の関係

表-5 締固め回数と地盤反力係数の平均値

| プロファイル名 | 単位[MN/m³] | | | |
|---------|-----------|--------|--------|--------|
| | 0回転圧 | 2回転圧 | 4回転圧 | 6回転圧 |
| 振動ローラ | 81.00 | 134.00 | 162.00 | 182.00 |
| タイヤローラ | 81.67 | 143.33 | 189.67 | 208.67 |

どちらの締固め機械も締固め回数の増加に伴い、乾燥密度及び地盤反力係数相当値が増加する傾向を確認することができた。このことは、点群データから考察した路盤材の沈下量増加、平坦性向上の傾向と相関が得られることから、点群データから締固めの傾向を把握する手法の有効性は示せた。

一方で、地盤反力係数相当値に着目するとタイヤローラがより高い数値を示す傾向が見られた。点群データの解析から得られた、沈下量や平坦性との関係性については、今後も検証を継続する必要がある。

4. 結論

本稿では、3次元点群データを用いた締固め機械の締固め特性を評価することで、以下のことを明らかにした。

- (1) 面的に3次元点群データを取得することで、締固め後であっても当時の状況を確認することができるため、品質管理手法等の向上に期待できる技術であることを再認識することができた。
- (2) レーザースキャナで計測した3次元点群データからヒートマップやプロファイル等の視覚化により、締固め特性の傾向を掴むことが可能であることが確認できた。
- (3) プロファイルデータを検証することで、振動ローラを使用した締固めによる効果は、タイヤローラと比較して、大きな沈下量とうねりが小さい出来形が期待できることが確認できた。うねりについては、ICT舗装工で用いられている道路の縦断方向に発生する凹凸の度合を評価する指標である平坦性からも同様の結果を確認することができた。
- (4) 地盤反力係数との関係については、十分な検証結果を得ることはできず、今後の課題として、点群データの解析から得られる結果との違いの考察や確認検証試験の実施が必要である。その上で、異なる土質やロードローラ等の使用など条件を多様化させた評価試験に取り組み、ICT活用を含めた施工手法・品質管理手法を改善する提案を図りたい。

参考文献

- 1) 国土交通省：第13回ICT導入協議会資料【資料-1】ICT施工の普及拡大に向けた取組, 2021.7
- 2) 国土交通省：3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案), 2021.3
- 3) 山田充, 西本聡, 佐藤厚子：締固め施工における転圧機械の選定方法の検討,地盤工学会北海道支部技術報告集第53号, 2013.1
- 4) 建設物価調査会：国土交通省土木工事積算基準令和3年度版, 2021.6
- 5) 国土交通省：第12回ICT導入協議会資料【資料-2】ICT施工の基準類の策定・改訂の取組, 2021.2