

盛土工事における多点計測のロボット化とクラウドを用いた締固め統合管理手法の開発

松崎 晃 稲川 雄宣
古屋 弘

Robotization of Multi-point Measurement in Embankment Construction and Development of Integrated Compaction Management Method using the Cloud

Ko Matsuzaki Yusen Inagawa
Hiroshi Furuya

Abstract

An advanced compaction quality control system was developed to improve productivity and achieve breakthroughs in the compaction quality control of on-site earthworks. The new self-propelled nuclear density gauges robot, which measures a wet density of the ground, was developed. Furthermore, the data integration analysis system, which manages data from multiple components, was developed. It was verified that the self-propelled nuclear density gauge robot and the data integration analysis system were applicable through on-site demonstration experiments. It confirmed that it is possible to acquire data 100 to 1,000 times more than the conventional method at low cost, and that it can greatly contribute to productivity improvement.

概要

盛土工事の効率的かつ面的な締固め品質管理を目的として新しい締固め品質管理手法を開発している。これまでに、含水比を計測する自走式散乱型 RI 水分計を開発した。次のステップとして、湿潤密度を計測する自走式散乱型 RI 密度計および各計器のデータを統合するデータ統合解析システムを開発し、実証実験により、適用性を検証した。自走式散乱型 RI 水分計は従来型の透過型 RI に対し、概ね誤差±3%、自走式散乱型 RI 密度計は誤差±0.15g/cm³以内であった。また、データ統合解析システムにより品質情報の可視化を行うことで、局所的な不良部の検出が可能であることを確認した。併せて、本手法の生産性向上効果を検討した結果、従来手法に対して、4割程度の人員で、100倍以上のデータ取得とリアルタイム処理が可能で、生産性及び品質向上に大きく貢献できる可能性を見出した。今後、面的な締固め管理基準の検討を実施する予定である。

1. はじめに

盛土工事の締固め管理では、砂置換法や RI(Radio Isotope)法などの現場密度試験りによって品質の確認を行っている。砂置換法は、地盤を削孔し、密度既知の砂と置き換えることで含水比と湿潤密度を計測する手法である。この手法では砂を充填する穴の削孔などに労力を要していた。一方、放射線により地盤の含水比と湿潤密度を計測できる RI 法では、線源棒を挿入する小径の穴を削孔するだけで良く、計測の手間は大幅に軽減されたが、礫材系の地盤では未だに多大な労力がかかっている。また、その頻度は1000~2000m²に15点²など離散的な管理にならざるを得ないことに加え、そのデータは事後処理が必要であり、リアルタイムに品質を管理できないという課題があった。

品質管理データは竣工後、現場ごとに発注者へ納品されるが、データの蓄積や一元管理、様々な利用者による共有・連携等のデータ活用も実務レベルでは進んでおらず未だ DX(Digital Transformation)の障壁となっている。

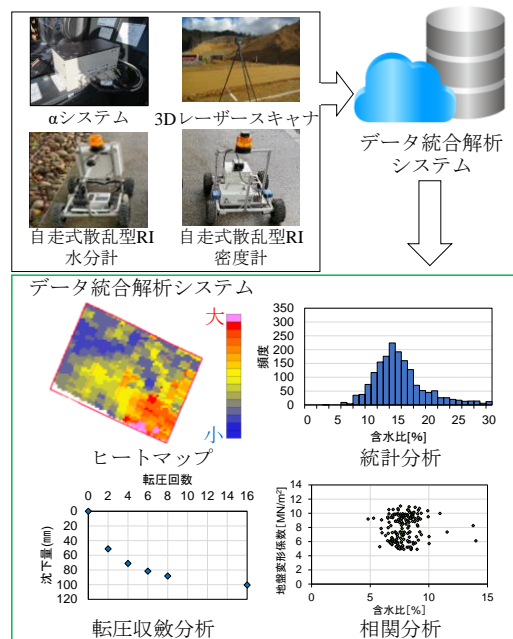


Fig. 1 本システムの構成
Components of the System

以上を背景に、筆者らは締固め品質管理の更なる高度化を目的として α システム³⁾⁴⁾に複数の計器のデータを加え、複合的に品質管理を行う新しい締固め品質管理システム（以下、本手法と称す）を開発している⁵⁾。

Fig. 1 に示す本手法の構成要素の一つである自走式散乱型 RI のうち、含水比を計測する自走式散乱型 RI 水分計を既に開発し、面的な含水比の取得が可能となった⁶⁾。今回、新たに面的に湿潤密度を計測する散乱型 RI 密度計を搭載した自動走行ロボット（以下、自走式散乱型 RI 密度計と称す）を開発した。併せて、クラウドを用いて締固め統合管理を行う、データ統合解析システムを開発した。

本稿では、自走式散乱型 RI 水分計、密度計およびデータ統合解析システムの適用性検証、および本手法による品質および生産性向上効果の検証結果に関して述べる。

2. 自走式散乱型 RI 密度計の開発

2.1 自走式散乱型 RI 密度計の構成

自走式散乱型 RI 密度計の構成を Fig. 2 に示す。Fig. 2 の自走式散乱型 RI 密度計は、専用自走ロボットと散乱型 RI 密度計から構成される。

開発済みの自走式散乱型 RI 水分計は、走行しつつ連続計測を行う形式で、計測地盤と RI 計測器との離隔（以下、クリアランスと称す）が一定とならないため計測精度が低下する。そこで、レーザセンサによりクリアランスを計測し、補正式を用いて含水比の計測精度を確保した⁶⁾。一方で、湿潤密度を計測する自走式散乱型 RI 密度計の開発に当たっては、散乱型 RI 密度計がクリアランスによる影響をより大きく受け、上述の対策では十分な計測精度を確保できないことがわかった。そこで自走式散乱型 RI 密度計は計測箇所へ自動走行し、停止後、散乱型 RI 密度計搭載部が自動で降下し、計測地盤に接地する機構とした。計測終了後は散乱型 RI 密度計搭載部が上昇し、移動の妨げとならないようにした。

現場運用等を鑑み、寸法及び重量は可能な限り小さく、軽量にする必要があった。検討の結果、車体寸法 L600×W500×H250mm（L：長さ、W：幅、H：高さ）、車体重量 15kg とした。ホイールは 4 輪別駆動とし、その場で 360° 回転することができる機構とした。操縦は GNSS と汎用自動操縦用アプリケーションの ArduPilot を利用した。計測領域、計測ピッチを事前に設定しておくことで、走行経路と計測地点を自動生成し、自走しながら計測することが可能となっている。

また、データ送信機能を備えており、後述するデータ統合解析システムに計測データを送信することで、リアルタイムに品質情報を可視化することができる。

2.2 散乱型 RI 密度計の開発

自走式散乱型 RI 密度計に搭載する散乱型 RI 密度計は、既製品にはないことから、専用の散乱型 RI 密度計を

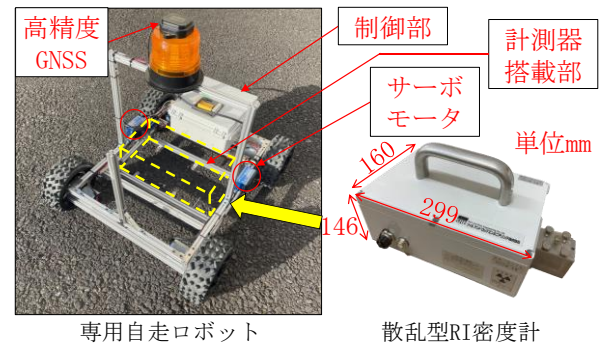


Fig. 2 自走式散乱型 RI 密度計の構成
Configuration of Self-propelled Nuclear Density Gauge

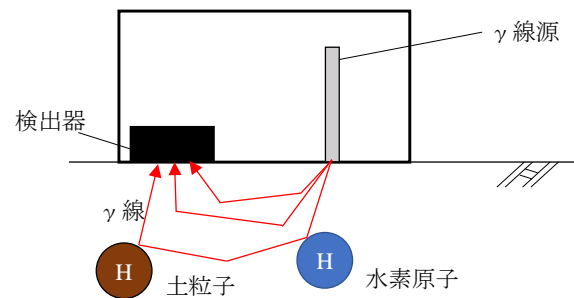


Fig. 3 散乱型 RI 密度計の計測原理
Measurement Principle of Nuclear Density Gauge

新たに開発した。

地盤の湿潤密度を計測する散乱型 RI 密度計の計測原理を Fig. 3 に示す。線源から出る γ 線は、地中の原子と衝突するとエネルギーを失う。したがって、地盤の湿潤密度が大きい場合には、検出器に到達する γ 線のカウンタ数は少なくなる。一方、湿潤密度が小さい場合には、検出器に到達する γ 線のカウンタ数は多くなる。このような関係をもとに、事前に湿潤密度と γ 線のカウンタ数の関係を評価し、式(1)、(2)に示す校正式の諸定数を設定しておくことで湿潤密度の算出が可能となる。

$$R_d = (N_d - BG) / STD \quad (1)$$

$$\rho_t = \ln(R_d / A) / B \quad (2)$$

ここに、 ρ_t ：湿潤密度[g/cm³]

R_d ：計数率比

N_d ：計数率[cpm]

BG ：BG 値[cpm]（線源なしの場合での計数率）

STD ：標準計数率[cpm]

A, B ：校正定数（事前試験により決定）

また、RI 計器の計測精度は、線源から放出される放射線量の揺らぎ（以下、壊変揺動）に起因する誤差を有する。すなわち、まったく同じ計測地点を計測したとしても計測結果にばらつきを生じる。壊変揺動に起因する誤差は、計測時間を長くすることで低減できる。一方、現場運用の観点から、長時間の計測は工程に影響を与え

るため、計測時間は短い方が望ましい。そこで、計測精度確保と現場運用の両方の観点から最適な計測時間に関して検討を行った。湿潤密度の標準偏差 σ は式(3)で表される。壊変揺動による誤差を 2σ として評価した。Fig. 4に基準湿潤密度と理論上の壊変揺動誤差の関係を示す。この結果より、計測時間が1分30秒以上であれば、湿潤密度が $1.000\sim 2.400\text{g/cm}^3$ の計測対象に関して理論上の計測誤差が 0.010g/cm^3 以下になることが分かった。以上より、自動走行式散乱型RI密度計の計測時間は2分に設定した。

$$\sigma = \frac{1}{|B| \cdot A \cdot e^{B\rho_t} \cdot N_d} \sqrt{\frac{A \cdot e^{B\rho_t} \cdot N_d \cdot T_{BG} + (T_d + T_{BG}) \cdot BG}{T_d \cdot T_{BG}}} \quad (3)$$

- ここに、 ρ_t : 湿潤密度
- σ : 湿潤密度の標準偏差
- N_d : 計数率 [cpm]
- BG : BG値 [cpm]
- A, B : 定数
- T_d : 密度計測時間 [min]
- T_{BG} : BG計測時間 [min]

2.3 校正式の定数の設定

定数の設定に当たっては、密度が既知の亚克力、ガラス、真砂土地盤、ローム地盤で計測を行い、仮校正式を作成した。その後、砂質土地盤、粘性土地盤、アスファルト地盤でも計測を行い、校正式の高精度化を図った。Fig. 5に計数率比と基準湿潤密度の関係を示す。計数率比は、基準湿潤密度の増加に伴い、指数的に減少する。この関係を基に式(2)の定数をそれぞれ、 $A=2.56$ 、 $B=-0.43$ とした。

3. データ統合解析システムの開発

3.1 システム概要

データ統合解析システムは、 α システム、自走式散乱型RI、3Dレーザースキャナのデータを集約し、品質情報を可視化するアプリケーションである。各機器から送信されてきたデータは外部クラウドサービスのデータベースにストレージされ、その後各種計算処理、可視化が行われる。

3.2 分析機能

データ統合解析システムは、Fig. 1に示すように、ヒートマップ、統計分析、転圧収斂分析、相関分析という4つの出力機能をもつ。各機能では α システムのデータによる転圧回数、乱れ率³⁾、地盤変形係数、自走式散乱型RIのデータによる含水比、湿潤密度、乾燥密度、締固め度、飽和度、3Dレーザースキャナのデータによる沈下量、圧縮率の施工情報を、各層、各転圧回数で参照することができる。

ヒートマップは従来の工法規定の転圧回数に加え、各種物性値の面的な分布状況を可視化し、局所的な変化を

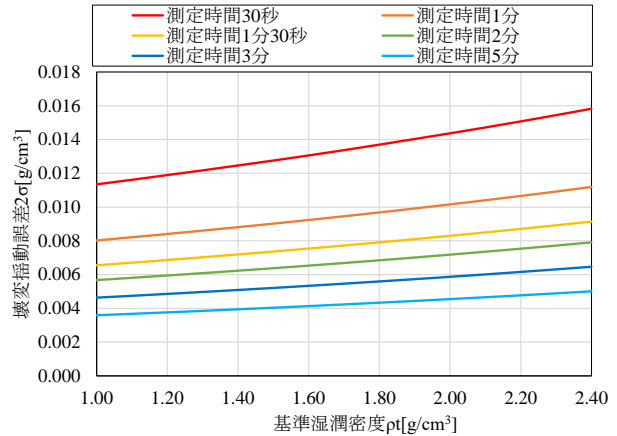


Fig. 4 基準湿潤密度と理論上の壊変揺動誤差の関係
Relationship between Standard Wet Density and Theoretical Error

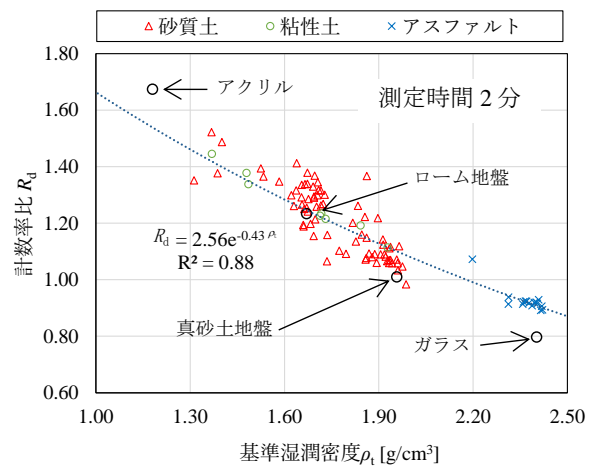


Fig. 5 計数率比と基準湿潤密度の関係
Relationship between a Count Rate Ratio and Standard Wet Density

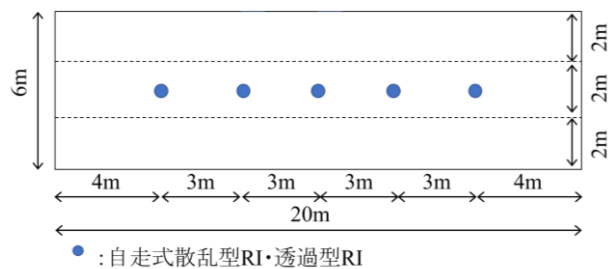


Fig. 6 試験位置
Field Test Location

視覚的に表現できる。統計分析は各種物性のヒストグラムと平均値や標準偏差などの統計値を出力し、材料の変化の把握に活用する。転圧収斂分析は、乱れ率、地盤変形係数、乾燥密度、沈下量の転圧回数ごとの全平均値を出力し、転圧の進行に伴う収斂の判断に活用する。相関分析は、含水比、地盤変形係数、圧縮率などの相関関係から盛土材料の変化や転圧の不良原因を特定する際の補助資料として活用する。

4. 自走式散乱型RIの適用性検証

4.1 実験概要

自走式散乱型RI水分計および密度計の適用性検証を目的として、実証実験を行った。W6.0×L20×H0.3mの試験盛土を作製し、各種計測を実施した。盛土材料は細粒分質砂質礫とした。転圧回数0, 2, 4, 6, 8回で、Fig 6に示す位置において自走式散乱型RI水分計および密度計それぞれの計測を行った。また従来の品質管理手法として、同位置において自動走査式RI密度・水分計（以下、透過型RIと称す）の計測を実施した。自走式散乱型RI水分計および密度計は、計測時にデータ送信を行いデータ統合解析システムによる可視化を行った。

4.2 自走式散乱型RIの計測結果

Fig. 7, Fig. 8に自走式散乱型RI水分計、密度計と透過型RIによる含水比および湿潤密度の関係をそれぞれ示す。図中には、既往の実証実験において得られた両者の関係も併記している。自走式散乱型RI水分計による含水比は、透過型RIによる含水比に対して、概ね誤差±3%以下になった。自走式散乱型RI密度計による湿潤密度は透過型RIによる湿潤密度に対して概ね誤差±0.15g/cm³以下になった。一部、自走式散乱型RI密度計による湿潤密度の方が小さくなっている外れ値があるものの、これは碎石系材料を使用した盛土の計測結果であり、計測時に散乱型RI密度計が地盤と密着しなかった可能性が考えられる。今後、計測機器の地盤への密着に関する評価方法について検討する必要がある。

Fig. 9に自走式散乱型RI密度計と透過型RIによる湿潤密度の転圧収斂傾向を示す。自走式散乱型RI密度計の計測結果はヤード平均とした。本実験において転圧回数8回を除き両者の対応はよく、収斂傾向を評価することができる可能性がある。なお、転圧回数8回の湿潤密度に関しては、原因は不明であるが、転圧表面が粒子破砕により、密度が高くなり、その影響を受けた可能性が考えられる。

5. データ統合解析システムの適用性検証

Fig. 10(a)にデータ統合解析システムによるヒートマップおよびヒストグラム出力の一例を示す。ヒートマップにより面的な湿潤密度の分布を確認することができる。これにより湿潤密度が低い箇所（1.6g/cm³以下）、すなわち局所的な不良部を確認することができる。また、併せてヒストグラムにより統計分布を確認することで、不良部の割合を確認することができる。例えば、湿潤密度のヒートマップ中の湿潤密度が局所的に低い箇所があることが分かり、その割合はヒストグラムから弱部件数/全件数=15件/133件≒11%であることが分かる。

Fig. 10(b)にαシステムによる地盤変形係数の転圧収斂図を示す。転圧回数を重ねるごとに地盤変形係数が増加

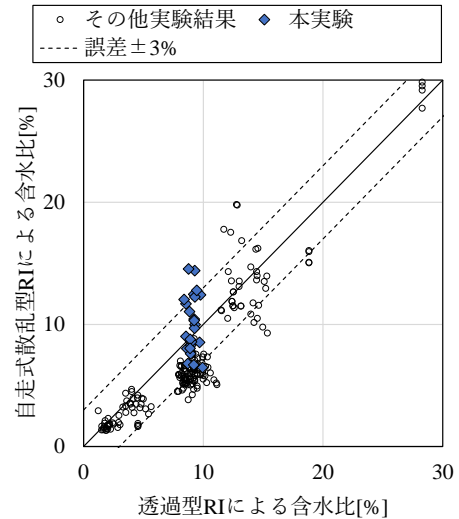


Fig. 7 自走式散乱型 RI と透過型 RI による含水比の関係

Relationship of Water Content between Self-propelled Nuclear Gauge and Standard Nuclear Gauge

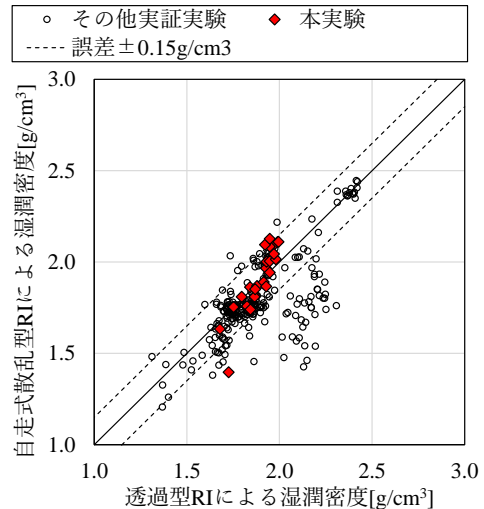


Fig. 8 自走式散乱型 RI と透過型 RI による湿潤密度の関係

Relationship of Density between Self-propelled Nuclear Gauge and Standard Nuclear Gauge

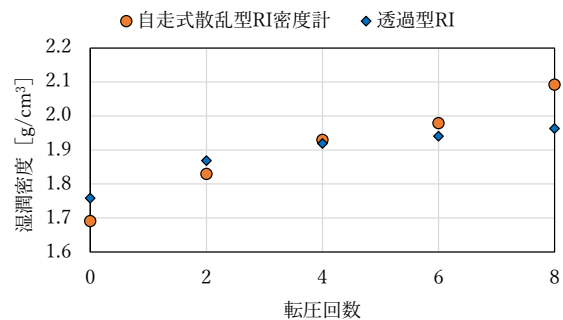


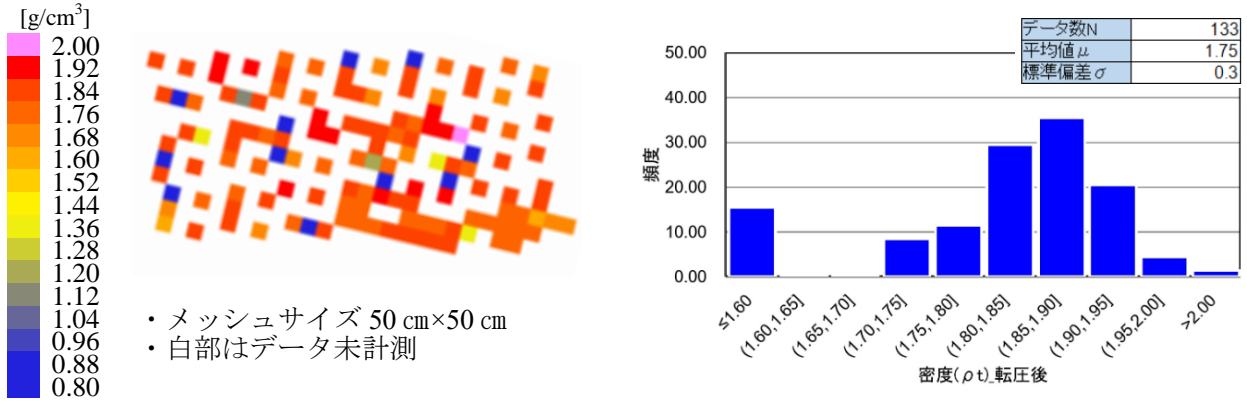
Fig. 9 自走式散乱型 RI 密度計と透過型 RI による湿潤密度の転圧収斂傾向
Convergence Trend of Wet Density

し、図中では転圧回数5回で収斂していることが分かる。Fig. 10(c)に α システムによる地盤変形係数と自走式散乱型RIによる含水比の散布図を示す。このように各物性値の関係を可視化することで局所的な不良部の原因追及に利用する。また、Fig. 11に α システムによる地盤変形係数のヒートマップとヒストグラムの出力例を示す。

Fig. 11(a)のヒートマップは、地盤変形係数が局所的に高い場所がある地盤の計測例である。ヒートマップでは、

視覚的に変化があることがわかる。Fig. 11(b)に示す同じヤードにおける地盤変形係数のヒストグラムにおいてもピークが2か所あることから、これを裏付けるデータが得られていることが分かる。

上記のデータ統合管理は、従来の離散的かつ少量の計測では、成しえなかったことであり、本技術によって品質管理の高度化を実現している。また、リアルタイムに確認できるため、手戻りを最小限に抑えることができ、



(a) ヒートマップとヒストグラム

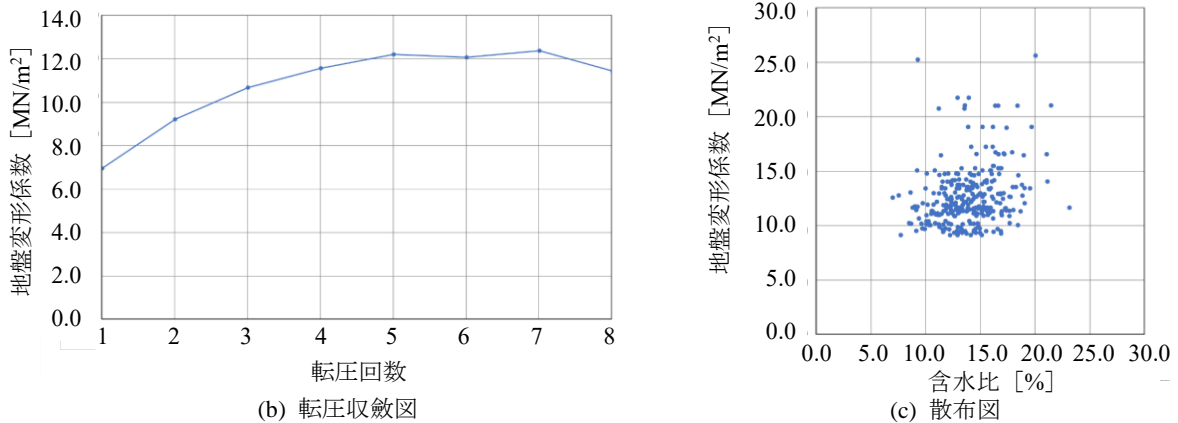


Fig. 10 データ統合解析システムによるヒートマップおよびヒストグラムの出力の一例
Heatmap and Histogram Output Example of Data Integration Analysis System

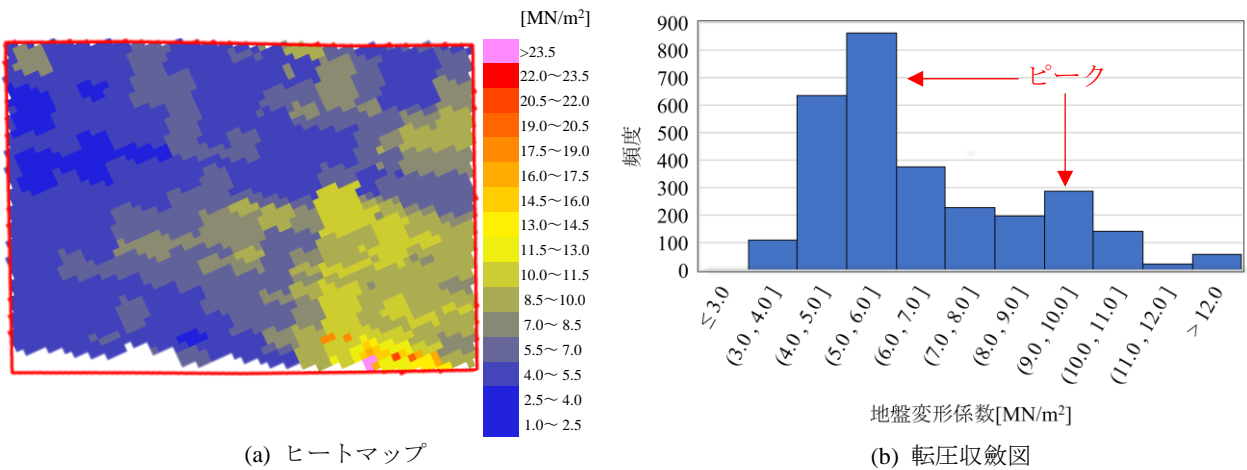


Fig. 11 α システムによる地盤変形係数のヒートマップとヒストグラムの出力例
Example of Output of Heat Map and Histogram of Ground Deformation Coefficient by α System

施工の省力化にも大きく貢献する。本稿では、湿潤密度、含水比、地盤変形係数の出力例のみを示しているが、3Dレーザースキャナのデータも含め、圧縮率やその他の物性値の出力も本手法では可能である。その結果、出力されたデータを用いて複合的に地盤の締固め品質を評価することが可能となっている。

6. 本手法による生産性向上

従来手法による現場密度試験、地盤剛性計測、沈下量計測、含水比計測等のデータの取得可能点数と必要人員を、本手法の場合と比較し、生産性向上の観点から効果を評価した。Table 1に各種試験による1日当たりの取得可能点数、必要人員を比較して示す。表中の値は、これまでの実証実験の実績をもとに算出した。

α システム、自走式散乱型RIは作業開始・終了時以外は無人で計測を実施することができるため、必要人員は従来の4割程度となる。また、一日当たりの取得可能点数は、100倍～1000倍以上となっていることがわかる。

併せて、データ統合解析システムでヒートマップからグラフまで自動で作成されるため、事務所内での作業工数の削減が可能となる。以上のように、本手法は品質および生産性向上に大きく貢献できる可能性を見出した。

本手法により得られる品質情報のデータ量は、従来法により得られるデータ量を大きく上回る。今後、多点かつ面的な計測データを活用した品質管理基準に関して検討を進める予定である。

7. まとめ

本稿では、自走式散乱型RI水分計および密度計、データ統合解析システムの適用性検証および本手法による生産性向上の検証結果に関して述べた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 自走式散乱型RI水分計の計測精度は、概ね既存の透過型RIに対し、誤差 $\pm 3\%$ 以下であった。
- 2) 自走式散乱型RI密度計の計測精度は、概ね既存の透過型RIに対し、誤差 $\pm 0.15\text{g/cm}^3$ 以下であった。
- 3) データ統合解析システムにより、面的な品質情報を確認することで局所的な不良部検出を行うことができた。また、ヒートマップとヒストグラムを組み合わせることで、材料の面的な変化を検出することができた。
- 4) 本手法は従来手法に対して、4割程度の人員で100倍～1000倍以上のデータ取得が可能であり、品質および生産性向上に大きく貢献できる可能性がある。

Table 1 各種試験による1日当たりの取得可能点数と必要人員
Effectiveness Comparison between The Method and Conventional Method

各計測器の必要人員	従来手法	⇒	本手法※1
地盤剛性測定	小型FWD 24点/日 キヤスボル 240点/日	⇒	α システム 1000点以上/日
含水比測定	RI法 150点/日	⇒	自走式散乱型RI 水分計※2 300点/日
現場密度試験	砂置換法 40点/日 RI法 150点/日	⇒	自走式散乱型RI 密度計※2 300点/日
沈下測量	レベル 300点/日	⇒	3Dレーザースキャナ 10000点以上/日
必要人員	5人工	⇒	2人工

※1 導入費用は別途 ※2 試験施工にて代替が可能と判断された場合

※3 作業を兼用

謝辞

本実験は、国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」にて実施している。また、共同研究者である前田建設工業株式会社、ご協力頂いたソイルアンドロックエンジニアリング株式会社の関係者に感謝する。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，訂正第4刷，2020.3
- 2) 国土交通省：土木工事施工管理基準及び規格値（案），p.II-36，2023.5
- 3) 古屋弘，藤原宗一，三好哲也：加速度計とGPSを利用した締固めの管理方法の高度化，建設の機械化，pp.20-25，2003
- 4) 中村洋丈，藤岡一頼，古屋弘，内山恵一，松本江基，浅田浩司：振動ローラ加速度応答法による盛土締固めの品質管理への適用～粗粒材料を対象とした大型土槽実験～，建設施工と建設機械シンポジウム，pp.111-116，2013
- 5) 松崎晃，稲川雄宣，古屋弘：新しい締固め品質管理システムの開発，大林組技術研究所報，No.86，2022.12
- 6) 松崎晃，古屋弘，稲川雄宣，石黒健，平田昌史，谷口龍：自走式散乱型RIロボットの開発，第20回建設ロボットシンポジウム，2022.8