

—国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所—

DX・i-Construction
建設技術展示館

[シリーズ No.3]

ICT 土工の品質管理を高度化する
「次世代 α システム」

前田建設工業株式会社 土木事業本部 土木技術部

いわた たかふみ
岩谷 隆文

1. はじめに

道路・鉄道・河川堤防・宅地造成等の大型土工現場では、各土構造物に要求される性能を現地確認するために現場品質管理が行われている。この管理手法については近年、各種計測装置の簡便化や省力化が進んでいるが、他工種に比べ機械化、デジタル化が進んでいない。また、広大なエリアを対象とする大型土工現場の締固めの品質管理は「点」かつ「事後的」となるため、施工中のリアルタイム管理を行うことができない。

さらに、取得された品質管理データは竣工後、現場ごとに発注者へ報告・提出されるものの、データのデータベース（DB）への蓄積やさまざまな利用者によるデータ共有・連携等についてもDX化（業務改革）が進んでいないことも課題である。

当社、前田建設工業株式会社では、これらの課題を解決し、現場土工品質管理の高度化・精緻化と現場管理業務の生産性向上、そして本格的なDX化（業務改革）を目指し、現場土工品質管理システムである「次世代 α システム」を株式会社大林組と共同で開発した。

本稿では、この「次世代 α システム」の概要と現場実証試験の一例を紹介する。

2. 次世代 α システムとは

「次世代 α システム」は、表-1に示すように当社保有の既往開発技術である振動ローラ加速度応答法「 α システム」に対して、自走式散乱型RIロボットや3Dレーザスキャナといった最新のIoT計器を追加導入することで、現場品質管理の計測をより高度化、精緻化した。

さらに、取得データをクラウド上にリアルタイムで送信、蓄積・処理できるシステムを構築することで、現場管理業務の本格的なDX化（業務改革）も可能とした（図-1）。次に、構成技術の詳細を述べる。

表-1 次世代 α システムの構成

項目	概要
α システム（改良型）	地盤剛性の計測
自走式散乱型RIロボット	中性子線型 ガンマ線型 地盤の含水比計測 地盤の湿潤密度計測
データ統合解析システム	計測データの統合管理・蓄積・分析

図-1 次世代 α システムの概念図

3. 次世代 α システムの特徴

(1) α システム (改良型)

α システムは、振動ローラ振動輪の加速度応答が地盤の締固めに応じて変化する現象を利用して転圧中の地盤剛性を求め、締固めの進行を自動判定するシステム「振動ローラ加速度応答法」の一つである。表-2、図-2に α システムの構成機器および概要を示す。

表-2 α システムの諸元

項目	概要
加速度計	W 45 × L 50 × H 30 mm
締固め判定装置	W 218 × L 115 × H 113 mm 解析間隔：0.5 秒
GNSS	X, Y 座標の精度 ± 20 mm

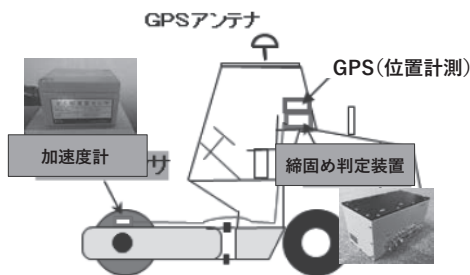


図-2 α システムの概要

図に示すように振動輪に加速度計を取り付け、締固め判定装置内でデータをFFT解析することで、転圧に伴う加速度波形の変化を定量化した独自指標「乱れ率」をリアルタイムに算出する。 α システムでは、藤山・建山による理論式¹⁾を採用し、乱れ率から力学指標である地盤変形係数 E_{roller} に換算しており、盛土の性能に直結する物理的指標を提示することが可能となる。

さらに、もう一つの特徴として、締固め判定装置に内蔵されたGNSSモジュールを併用することで、国土交通省やNEXCOで採用されている0.5mメッシュごとに、転圧回数に加えて転圧面の面的な剛性分布を施工しながらの自動取得が可能となっている(写真-1)。なお、内蔵したGNSSは2周波のモジュールであり、測位に

PRT方式を採用しているため、非常に高精度なものとなっている。



写真-1 振動ローラ加速度応答の計測状況

これにより、従来施工後の地盤剛性を測定する平板載荷試験やFWD試験のように計測のための設備や計測者を用意することなく、施工時に施工面の地盤剛性を面的に取得することが可能となり、計測管理の高度化・緻密化と省人化・省力化を可能にしている。

(2) 自走式散乱型RIロボット

土工現場の品質管理の重要項目として地盤の乾燥密度(締固め度)と含水比が上げられる。 α システムは地盤剛性を測定する手法のため、直接密度を計測することは難しい。現在、地盤の乾燥密度を求める手法として透過型RI法が一般的となっているが、透過型RIは線源孔の削孔が必要なため計測に時間と労力がかかるといった課題が生じていた。

そこで、次世代 α システムでは、RI法の中でも線源孔を必要としない完全非破壊で迅速に測定が可能な散乱型RIを地盤の密度と含水比の計測に利用することとした。散乱型RIとしては、湿潤密度を計測できるガンマ線源を使用したRIと含水比を測定できる中性子線源を使用したRIの2種類を用いた。2種類の散乱型RIにより含水比と湿潤密度を計測することで、従来指標である乾燥密度の算出も可能である。

さらに、散乱型RIの特徴を生かし、無人自動走行が可能なロボットにこれらを搭載した自走式散乱型RIロボットの開発を行った(表-3、写

真一2)。自走式散乱型 RI ロボットは α システムと同様の GNSS を搭載しており、汎用自動操縦用アプリケーションを利用することで前後進や反転など、事前に指示した条件でエリア内を走行できるようにしている。

散乱型 RI は、計器と地表面との不陸（凸凹）の影響を受け測定誤差を生じやすいことから、「計測点で停止⇒自動で散乱型 RI 計器を地表面に接地⇒ロボット自重により RI 計器を地表面に押し付けて一定時間計測⇒次の計測点に移動」という走行パターンを採用した。これにより、自走式散乱型 RI ロボットは乾燥密度（湿潤密度と含水比から換算）と含水比の面的な分布を把握することができる。

表一 3 自走式散乱型 RI ロボットの諸元

項目	概要
寸法	W 515 × L 550 × H 540 mm
重量	14 ~ 19 kg
電源	バッテリー駆動
操作方法	自動走行・自動計測
計測時間	1 分 / 点
測定深度	測定面 10 cm 程度



写真一 2 自走式散乱型 RI ロボット (ガンマ線型)

(3) 3D レーザスキャナ

3D レーザスキャナは、市販品を用いて計測を行う。計測ではスキャナ本体が回転しながら全周にわたってレーザを照射することで周囲の地表面形状を捉え、点群と呼ばれるデータを取得する。次世代 α システムの計測では、敷き均し前、敷き均し後、転圧回数ごと（試験施工時のみ）に施工面の標高を連続計測し、施工面の標高変化を抽出することで、撒き出し厚、沈下量などの面的な傾

向のほか、沈下の収斂傾向や統計量も把握することができる。また、計測データをもとに、締め密度を間接的に評価することも試行している。

計測精度は、転圧に伴う施工面の沈下量を計測できる精度とするため、表一 4 に示すように計測距離 10 m 以内で ± 1 mm 以内としている。計測した点群データは、後述のデータ統合解析システムにデータを送信することで、自動処理が可能である（図一 3）。

表一 4 3D レーザスキャナの諸元

項目	概要
計測時間	7 ~ 10 分程度
精度	± 1 mm 以内（計測距離 10 m 以内）



図一 3 3D レーザスキャナ

(4) データ統合解析システム

次世代 α システムは、土工事における新しい現場品質管理を目指したものである。その特徴の一つとして、計測機器に新たな IoT 機器を導入することで計測の高度化、効率化を可能にした。もう一つの特徴として、従来のデータ管理（紙をベースとしたデータ管理、人によるデータ入力管理）を一新し、データ共有・連携等についても DX 化（業務改革）を図ることを目指した。

データ統合解析システムは α システム、自走式散乱型 RI ロボット、3D レーザスキャナのデータを集約し、可視化を行うことができるアプリケーションとして開発を行った。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（AWS）の DB 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（図一 4）。

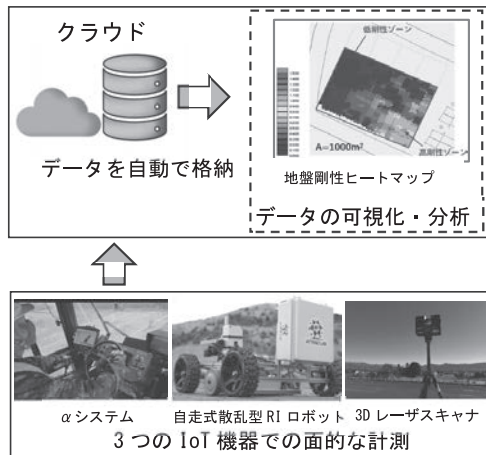


図-4 データ統合解析システムの概要

さらに、データ統合解析システムは「ヒートマップ」、「統計分析」、「転圧収斂分析」、「相関分析」という4つの分析・出力機能を持ち、各機能では転圧回数、乱れ率、地盤変形係数、含水比、乾燥密度、圧縮率の施工情報を、各層、各転圧回数ごとに可視化することができる（表-5）。

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、局所的な変動を視覚的に確認できる。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、材料の変動の把握に活用する。

表-5 データ統合解析システムの機能概要

機能	概要
ヒートマップ	<p>ヒートマップ出力・表示による施工データの可視化</p>
統計分析	<p>施工データの“確からしさ”を把握</p>
転圧収斂分析	<p>施工完了についての判断が可能</p>
相関分析	<p>2つの指標を組み合わせ施工現象の推定が可能</p>

転圧収斂分析は、乱れ率、地盤変形係数、乾燥密度について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、圧縮率等の相関関係から盛土材料の変動や転圧の不良原因を特定する際に用いる。

以上のように、計測データの一元管理をクラウド上で行うことでデータ連携・共有化を図り、自動分析機能を利用することで従前、人が行っていたデータ移動から整理までの管理業務のDX化が可能となる。さらに、蓄積された施工時品質情報を維持管理部門に継承し、維持管理の効率化と高度化を図ることもできる。

4. 現場実証試験結果の紹介

次世代αシステムの開発では、技術の確立を目指していくつかの現場実証試験を実施してきた。

例えば、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」(PRISM)では、2021年度に大阪府、2022年度に国土交通省、2023年度にはNEXCO西日本の発注工事現場で実証試験を行った。また、国土交通省の「舗装工事の品質管理の高度化に資する技術」に関する技術公募に参画し、実証試験を行っている。さらに、国立研究開発法人土木研究所とも共同研究を行うなど、公的機関との連携も進めている。本稿では、その一例を紹介する。

実証試験の詳細は割愛するが、基本的に写真-3のように盛土材料を敷き均し、次世代αシステム計測のための計測レーンを設け、振動ローラによる転圧を行う。転圧（転圧回数=0, 2, 4, 6, 8回）ごとに計測を行い、転圧に伴う物性値の変化や従来手法との比較などから次世代αシステムの精度や性能を確認している（写真-4）。



写真-3 実証試験ヤードの状況



写真-4 次世代 α システムの計測状況

左： α システム，中央：3D レーザスキャナ，右：自走式散乱型 RI ロボット

(1) α システム

α システムで得られた加速度応答値「ピーク乱れ率」の転圧回数ごとの変化をヒートマップ（図-5）で示す。転圧とともにピーク乱れ率（地盤剛性）が増大していく様子が確認できる。また、転圧回数が増えると初期不均一性は次第に解消され、均一な剛性地盤が形成されていく様子も分かる。 α システムでは、このような施工時の地盤剛性の変化を施工中にリアルタイムに取得することが可能であり、施工時に追加手間なく品質管理を精緻化・高度化することができる。

(2) 自走式散乱型 RI ロボット

自走式散乱型 RI ロボットと従来法の透過型 RI の計測データの相関性（湿潤密度 / 含水比）を図-6（転圧回数ごとのヤード平均値）に示す。図では散乱型 RI と透過型 RI の湿潤密度の相関性は高い結果となっているが、散乱型 RI は主に表層 10 cm 以浅の密度を反映し、透過型 RI は 30 cm 程度の深部を含んだ平均密度で評価するため、密度勾配の影響を受けている可能性がある。使用時は試験盛土で透過型 RI との調整を行うことが望ましい。

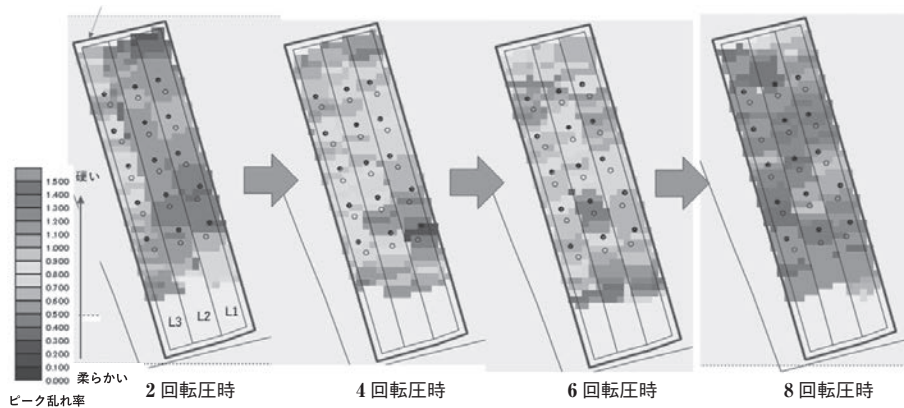


図-5 各転圧回数の乱れ率分布（ヒートマップ）

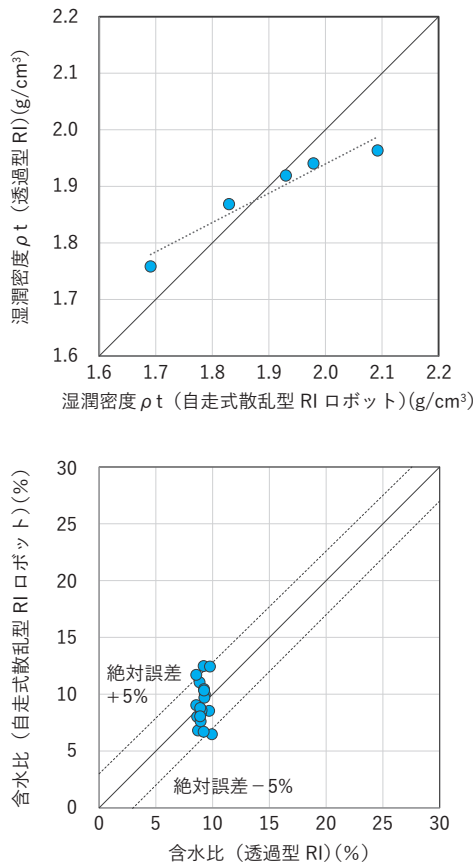


図-6 自走式散乱型 RI ロボットと従来法の透過型 RI の比較

含水比については転圧に伴う変化はなく、1:1 ライン近傍に集中する結果となった。自走式散乱型 RI ロボットはその特性を生かし、多点計測が可能である。図-7には計測結果をヒートマップとして示す。湿潤密度には施工面の多少のばらつきが確認できるが、含水比は湿潤密度ほど生じていないなど、施工品質のばらつきの実態を把握・確認し、適切な対処を施すことが可能となる。

(3) 3D レーザスキャナ

3D レーザスキャナにより取得した点群データの例をオルソ画像とともに図-8に示す。実証試験では敷き均し前、敷き均し後、各転圧後の点群データを転圧エリア範囲内のみ抽出し、撒き出し厚、転圧沈下量などを算出した。図-9は、3D レーザスキャナで計測した8回転圧後の沈下量のヒートマップと各転圧後の沈下量のレベル測量との比較結果を示す。

ヒートマップでは、転圧レーン中央の圧縮率が高く、ラップ施工による影響を確認できる。盛土端部は振動ローラが反転する際に、短時間停止したまま振動が加わり、その場で沈下が進展する現

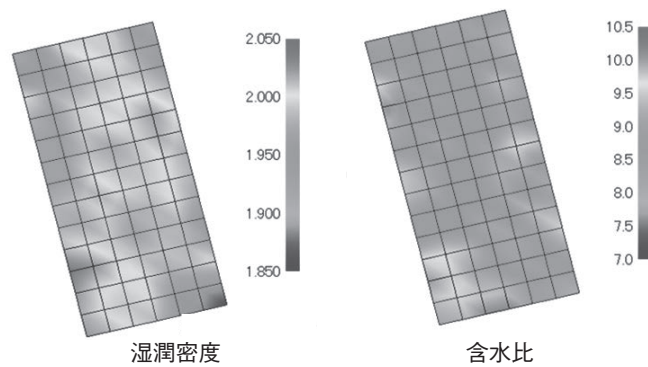


図-7 自走式散乱型 RI ロボットの計測結果 (ヒートマップ)

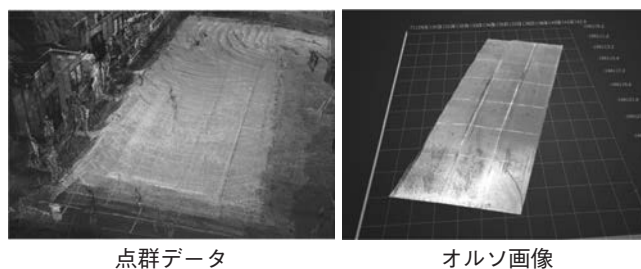


図-8 3D レーザスキャナで得られた点群データ

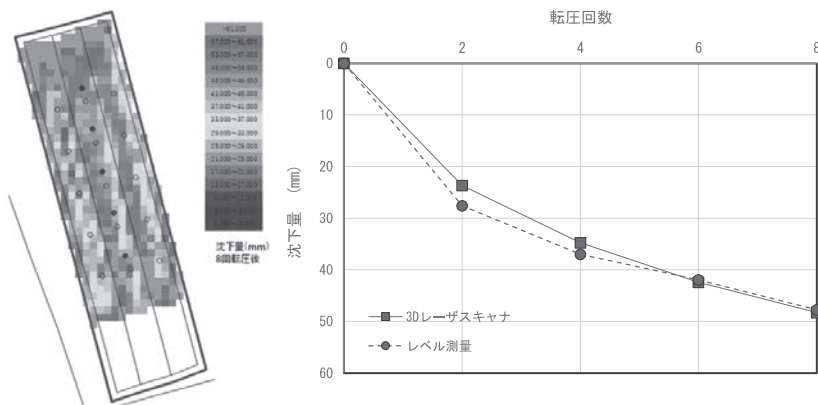


図-9 沈下量ヒートマップと転圧収斂

象に起因しているなど沈下量分布からも盛土全体の施工状況が推定できる。沈下量と転圧回数については3Dレーザスキャナの計測値と従来のレベル測量の整合性の高さや沈下の収斂状況も確認でき、適切な転圧回数の決定に参照することが可能である。

以上、一例ではあるが次世代αシステムの現場計測事例を紹介した。計測データは、データ統合解析システムの機能である「ヒートマップ」や「転圧収斂分析」を用いれば容易に可視化できる。また、ヒートマップ等で確認した品質データのばらつきなどの原因についても、複数計測データ間における「相関性分析」の結果から推察可能である。

5. おわりに

本稿では、最新のIoT・DX技術を活用した現場土工品質管理システムである「次世代αシステム」について簡単に紹介した。

本稿で述べたように土工事は、他工事、工種に比べ新しい技術の導入やDX化（業務改革）が進

んでいない現状にある。本技術は、従来のαシステムではできなかったタイヤローラなどの静的締固め機械や、狭隘部で用いられる小型締固め機械などを用いる土工現場への適用も可能となる構成とすることで、より広範囲な土工管理への展開も目指している。

今後も、公的機関を交えた実証試験や当社の現場での試験導入を行い、技術をブラッシュアップすることで、技術課題を解決し現場の生産性向上、DX化（業務改革）および省力化、省人化を目指していくことが重要と考えている。一方、技術の確立だけでなく、現場導入には従来管理との融合（二重管理の回避）が重要な課題となっており、この課題についても発注者側と対話しながら検討を進めていく所存である。

【参考文献】

- 1) 藤山哲雄, 建山和由: 振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土木学会論文集 No.652 III-51, p.115-123, 2000.