

土工品質管理システム「AtlasX」の現場適用事例

前田建設工業（株） 正会員 ○津田 啓史
正会員 平田 昌史
正会員 岩谷 隆文
フェロー会員 石黒 健

1. はじめに

道路・河川堤防をはじめとする大型土工現場では、各構造物に要求される品質を、様々な手法により現地計測・品質管理を行っている。各社により簡便な計測手法が開発されているが、他工種と比較すると土工においては計測の機械化・デジタル化が進んでいない。また、土工の現地品質確認は点かつ事後的な管理となっている。近年の豪雨・地震などに伴う盛土災害へ対応するため、品質管理の高度化が求められている。そのなかで、この計測したデータが盛土全体の性状を正確に反映したものとは言い難く、また、施工中のリアルタイム管理ができない状態にある。さらに、計測した品質管理データを都度人力により整理・分析・帳票化する労力も課題となっている。

筆者らは振動ローラ加速度応答法を利用した締固め管理システム「 α システム¹⁾」の技術を保有しているが、上記の課題を解決すべく、 α システムを改良し、3つのIoT機器と、クラウド環境でのデータ統合・分析を組み合わせた現場土工品質管理システム「AtlasX」(図-1)を開発、現場試行を行っている。AtlasXのIoT機器およびクラウドは、それぞれ以下の特徴を有する。

- ① α システムは、振動ローラに取り付けることにより地盤剛性を計測する機器で、振動ローラにGNSSモジュールと、振動輪に加速度計を設置し、取得した波形データを締固め判定装置内でFFT解析することにより、施工時にリアルタイムかつ面的に、加速度応答値「乱れ率」を算出、さらに加速度応答値から地盤変形係数「 E_{roller} 」を算出することが可能である。
- ② 自走式散乱型RIロボットは、散乱型RI計器を搭載した自動走行ロボットで、事前に指定した範囲を、走行→静止→RI接地→計測の動作を繰り返すことで、転圧地盤の湿潤密度と含水比の面的情報を完全非破壊で取得することが可能である。
- ③ 3Dレーザースキャナは、転圧面標高（点群データ）を自動取得する計器で、撒き出し前後と転圧後に転圧面の標高を計測し、撒き出し厚や沈下量などを精度よく求め、面的な締固め状態を精緻に確認することができる。
- ④ データ統合解析システムは、①～③のIoT機器で取得した計測結果を統合するクラウドシステムで、施工関係者や発注者を含む様々なユーザーは、WEB環境上（遠隔）でデータの可視化（ヒートマップやヒストグラムなどの出力）や分析、帳票の出力が可能である。

本技術は対象土質や利用目的に応じて①～④を組み合わせ使用。本技術により転圧地盤における品質の面的な計測を行うことで、土工品質管理の高度化・精緻化が可能となる。また、計測データをクラウド上で一元管理し、他部署や他部門とのデータ連携、データ分析や帳票化業務のDX化が可能となる。

AtlasXの開発を進めるうえで、技術の確立を目的として現場実証を複数実施した。このうち、 α システムを活用した盛土施工の効率化事例、CSG材へのAtlasXの適用事例の2事例を紹介する。

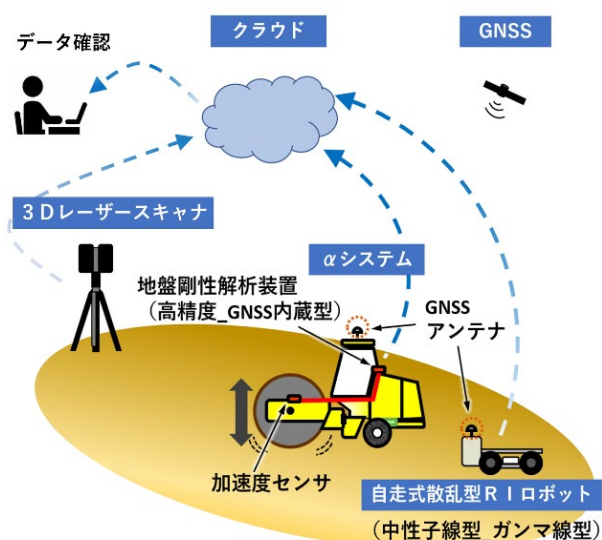


図-1 AtlasXの概念図

キーワード 加速度応答法, 散乱型RI, 3Dレーザースキャナ, クラウドシステム, DX化, 面的管理

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-2 前田建設工業（株）土木技術部 津田啓史 TEL: 070-4015-1849

2. α システムによる全数品質管理を利用した埋立地土堰堤の施工効率化事例

(1)現場概要

石炭火力である原町火力発電所の発電に伴い発生した石炭灰は、発電所より西側約5kmの割田地区にある石炭灰埋立地（図-2）へ処分している。埋立地は土堰堤の築造により、石炭灰受入の容量を確保しており、迅速かつ着実な施工が求められている。既報²⁾で、厚層施工による施工効率化として、通常の施工より4割の工期短縮が可能なが確認されている。厚層施工では、層の下部まで所定の品質が担保される適切な管理が求められるが、さらなる施工の効率化のためには、厚層施工かつ転圧回数を極力少なくする必要がある。そこで、試験施工で層厚50cmに対する品質を確認するとともに、 α システムを活用した管理を行い、施工の効率化を図った。

(2)試験施工概要

本工事の土堰堤は現地発生土である盛土材（表-1参照）を使用し、ブルドーザ、10tおよび4t振動ローラにより造成するもので、要求品質は締固め度 $D_c=85\%$ である。施工転圧回数、 α システムを活用した管理方法の決定を目的として試験施工を実施した。本稿では10t振動ローラの試験結果を示す。試験盛土の形状は、図-3に示すとおりで、入念に転圧した基盤層（1層目）の上に50cmの試験層（2層目）を設け、ヤードを区分し転圧回数 $N=4, 6, 10$ として試験層を転圧した。

試験施工では、乾燥密度、含水比、沈下量および「乱れ率（ α システムから計測される加速度応答値）」の計測を行った。なお、乾燥密度および含水比はRI密度・水分計で計測した。 $N=4, 6, 10$ エリアでは下部の密度および含水比を、盛土表面を20cm掘下げた面で計測した。

(3)試験施工の結果と考察

a)締固め度 D_c

転圧回数と締固め度の関係を図-4に示す。 $N=0$ 時点で、ブルドーザの転圧効果により $D_c=85\%$ 以上を達成しており、 $N=2$ で D_c が増加したのち、以降は D_c が漸増している。また、 $N=4, 6, 10$ のいずれにおいても、上下層で $D_c=85\%$ 以上を満足していたが、 $N=6$ 以降は盛土表面に過転圧によるひび割れが顕著にみられた。 $N=2$ で $D_c=85\%$ 以上を達成していたが、これはローラの1往復分であり、最低転圧回数であることから、既往工事の実績では $N=4$ で施工されていたことも鑑みて、施工初期においては、転圧回数を保守的に $N=4$ とし、乱れ率（ α システムで取得される加速度応答値）および D_c の推移を確認しながら施工を進めていくこととした。

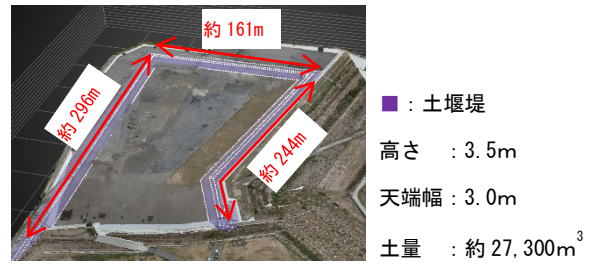


図-2 石炭灰埋立地
表-1 使用材料の物性値

試験項目	使用材料
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.475
自然含水比 w_n (%)	55.1
最大粒径 D_{max} (mm)	19
細粒分含有率 F_c (%)	76.5
平均粒径 (mm)	0.047
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm^3)	1.035
最適含水比 w_{opt} (%)	44.5
自然含水比 w_n (%)	55.1
地盤材料の分類	礫まじり砂質細粒土

※突き固め試験はB法による

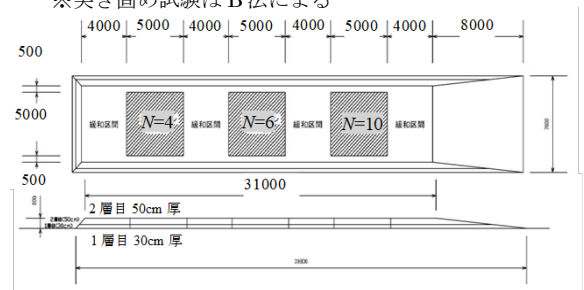


図-3 試験盛土の平面図・断面図

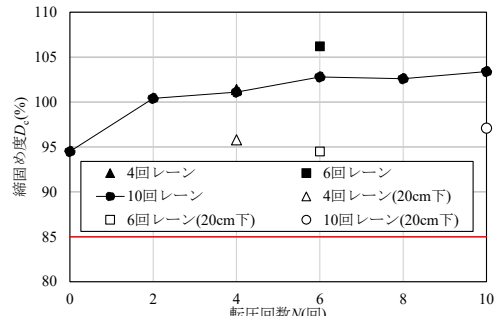


図-4 転圧回数—締固め度

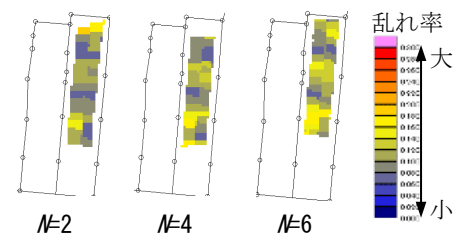


図-5 乱れ率ヒートマップ

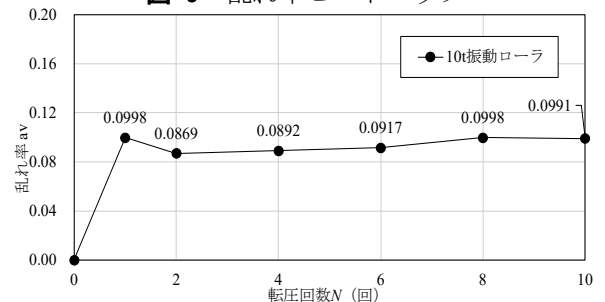


図-6 転圧回数—乱れ率

b)乱れ率

乱れ率のヒートマップを図-5に示す。青色に近い箇所ほど乱れ率が小さく、地盤剛性が小さいことを意味する。ヒートマップには、相対的な弱部（周囲に比べて色が青色に近い＝乱れ率が相対的に低い部分）が分布している。転圧回数と乱れ率の平均値の関係を図-6に示す。乱れ率は0.0869～0.0998と、 $N=2$ で収れんしており、以降は0.086程度の値で推移している。

(4)施工効率化の検討

本施工での転圧回数を4回に決定し、施工初期の品質を確認しながら施工を進め、転圧回数を減じた施工の検討（図-7）を行った。施工効率化の手順として、最初の段階（Step 0）は、 α システムから得られた施工面の乱れ率平均値が0.086以上かつ $D_c=85\%$ 以上であることを確認し、転圧回数を $N=4$ から $N=2$ へ減じた施工（Step1）へ移行する。Step 1の施工管理に移行後、Step 0でのRI計測結果および乱れ率平均値との差異を確認し、転圧回数を低減した施工でも品質上の問題がないことを、施工と並行して確認する。図-8に、Step0における転圧回数と乱れ率の関係（試験施工の結果を併記）を示す。本施工においても、乱れ率は $N=2$ で収れんする結果となり、 D_c も管理値を大きく上回った（詳細は後述）。この結果をうけて、本工事では、厚層施工での転圧回数を2回に減ずることに加え、RI計測回数を減じることでさらなる施工効率化を検討した。検討では、乱れ率とRIの複合的な管理により、初期の転圧回数 $N=4$ 、RI計測回数 $n=15$ /層の施工（Step 0）からの段階的な回数低減を目指す。

次段階として、RIによる D_c の管理を、 α システムから得られる乱れ率のヒートマップから選定した相対的弱部において実施する。相対的弱部が $D_c=85\%$ 以上かつ乱れ率の日平均が0.086以上であることを確認できた場合、RIの1層あたりの計測回数を15点から3点に減じた施工（Step 2）へ移行する。Step 2への移行後、Step 1でのRI計測結果および乱れ率平均値との差異を確認し、RI計測回数を減じて品質上問題がないか、施工と並行して確認する。施工面弱部をもとにした品質管理は国外での実績³⁾もあり、本工事ではこの考え方を施工効率化へ反映させる。品質管理がStep 2に移行した後も、相対的弱部が $D_c=85\%$ 以上かつ乱れ率の日平均が0.086以上であることを確認を継続して行う。

また、試験施工において、降雨の影響により部分的に含水比の高い箇所での転圧効果の低下が観察されたことから、各段階での D_c および乱れ率に対する品質管理フローも作成した（図-9）。相対的弱部における D_c が管理値を

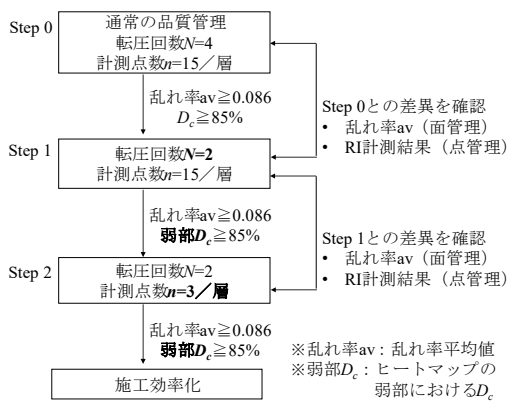


図-7 転圧回数と RI 計測回数の検討図

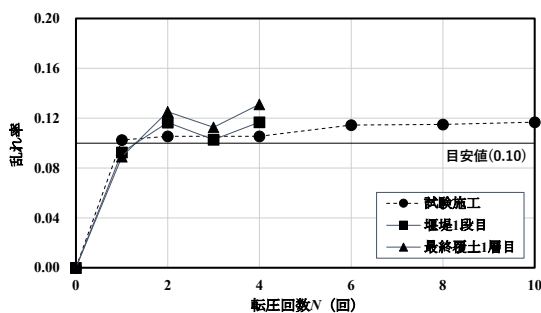


図-8 転圧回数—乱れ率（施工初期）

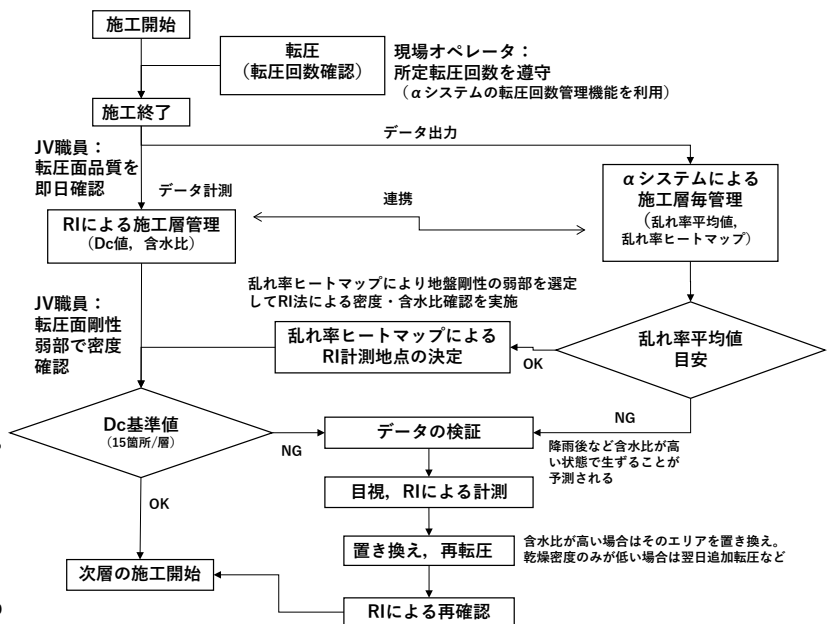


図-9 α システムを利用した盛土全数品質管理フロー

下回った場合や、乱れ率の層平均が目安値を下回った場合は、置き換えや再転圧などの処置を行うように定めた。

以上のように、乱れ率および D_c の確認を都度行うことで、面（乱れ率の日平均が 0.086 以上）および点（相対的弱部での D_c が 85%以上）の管理が可能であるため、段階的に転圧回数と RI 計測回数を低減し施工の効率化を目指した。次節で各段階における本施工での品質管理結果を示す。

(5)本施工での品質管理結果と乱れ率の関係性

a)Step1（転圧回数を 2 回に減じた場合）の計測結果とその考察

本施工において、RI 法で計測された含水比と乾燥密度の散布図を図-10 に示す。盛土材 A および盛土材 B を使用した本施工の計測結果は、室内試験で得られた締固め曲線の近傍に分布していることから、本施工で使用した盛土材はばらつきが少なく、想定していとおりの転圧が行われたことがわかる。

b)Step2（転圧回数を 2 回、RI 計測を相対的弱部で 3 点/日実施の場合）の計測結果とその考察

相対的弱部での RI 計測結果を図-10 中の着色した点で示す。相対的弱部での計測結果は、締固め曲線の右下側、すなわち含水比が高く乾燥密度が低い場所に多く散布していたことから、効率的に相対的弱部で RI の計測ができていたとわかる。さらに、図-11 に乱れ率と含水比の関係を示す。相対的弱部は、全体的に高含水比の傾向があるが、黒丸で示した通常部（相対的弱部でない部分）の一部のデータも同含水比範囲にあることから、含水比に加え締固め密度の違いもまた乱れ率に影響を及ぼしていると考えられる。また、龍岡⁴⁾は、締固め土の剛性や強度が、乾燥密度と飽和度の両者の影響を受けて変化することを明らかにしている。そこで、図-12 と図-13 に全 RI データの締固め度 D_c と飽和度をヒストグラムで表し ($N=220$)、相対的弱部での計測データをオレンジ色で併記した。龍岡の指摘の通り、相対的弱部での計測データは、 D_c が低く、かつ飽和度が高い領域に分布しており、乾燥密度と飽和度の両者が影響した結果、図-14 に示すヒストグラム ($N=20$ 万) 中の低乱れ率部（相対的弱部）が形成されたものと考えられる。また、設定した目安値が相対的弱部の値付近であることから、試験盛土は相対的弱部に近い品質であったとみられる。

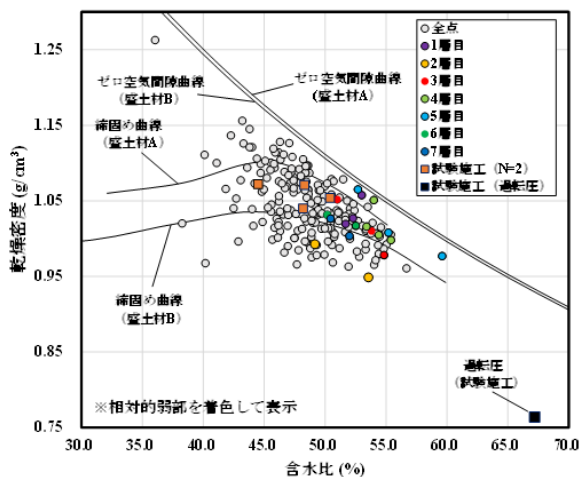


図-10 現場締固めデータ（相対的弱部を着色）

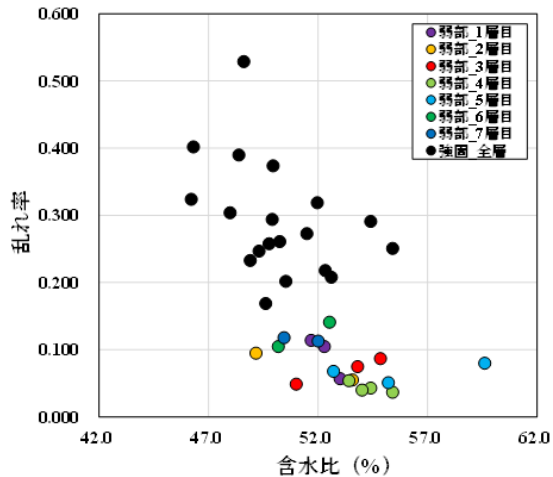


図-11 含水比-乱れ率

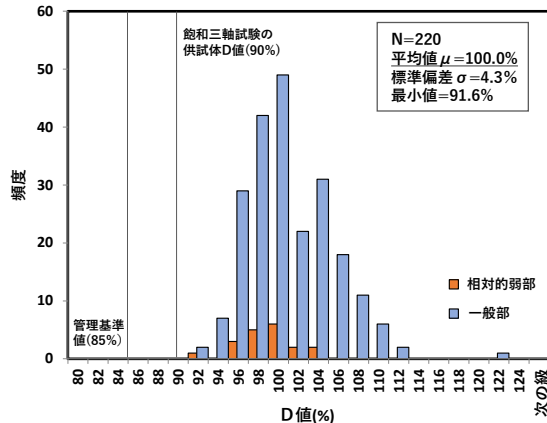


図-12 D_c のヒストグラム（相対的弱部を併記）

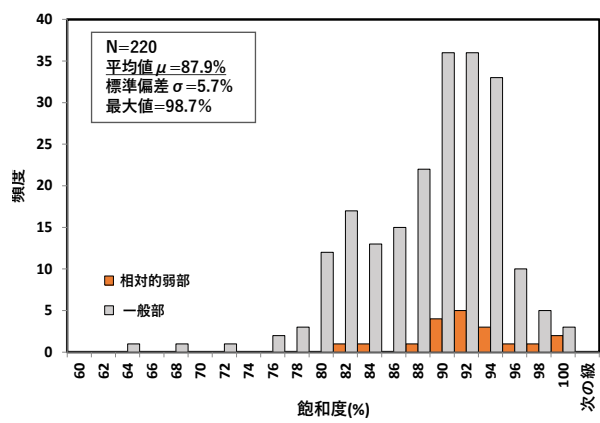


図-13 飽和度のヒストグラム（相対的弱部を併記）

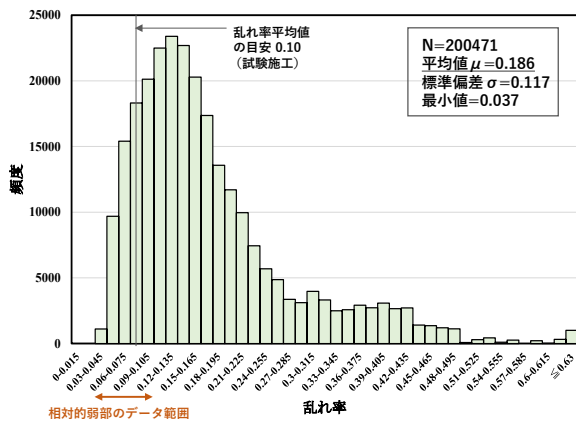


図-14 乱れ率のヒストグラム (20 万点)

室内三軸試験結果と安息角

試験項目	盛土材 A	盛土材 B	最少安全率 (常時): 1.629
粘聚力 (有効応力) c' (kN/m ²)	1	3	2.862, 2.772, 0.11, 89.1, 72.1, 65
せん断摩擦角 (有効応力) ϕ' (°)	22.9	29.2	2.752, 78.1, 95.1, 87.1, 69.1, 64
供試体の乾燥密度 $\rho_{d(air)}$ (kg/m ³)	0.992	0.932	3.092, 68.2, 65.1, 65.1, 77.1, 69.1, 65
締固めの度 D_r (%)	98.8	98.8	2.982, 68.2, 63.1, 65.1, 77.1, 69.1, 62
勾配 1: 2.0 時の安息角 (°)		26.5	2.692, 40.1, 69.1, 78.1, 65
勾配 1: 3.0 時の安息角 (°)		18.7	2.552, 68.1, 63.1, 74.1, 63
※実地図による締固めの試験: 既述法による結果			

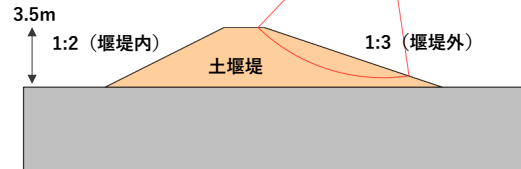


図-15 飽和三軸試験結果を用いた円弧すべり計算例

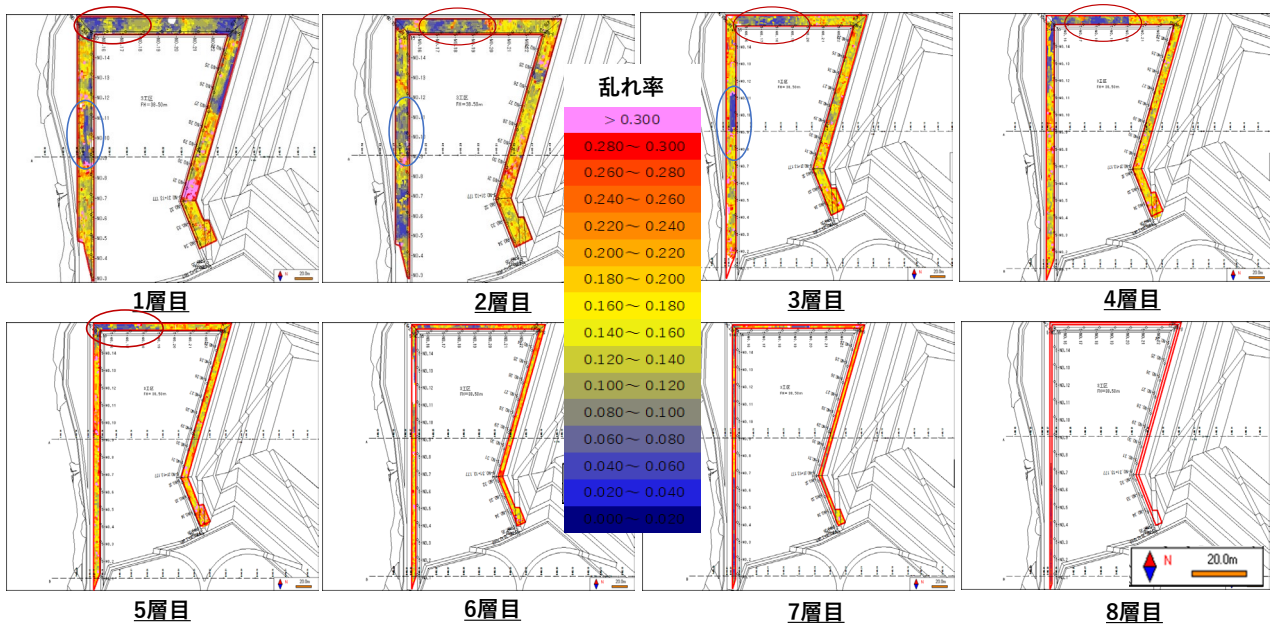


図-16 盛土 1 層目～8 層目の乱れ率ヒートマップ

(6) α システムを用いた全数品質管理情報の利活用

α システムを使用し全数品質管理を行うことで、図-14 に示した統計の情報に加え、面的な品質情報、積層方向も含めた 3 次元的な品質情報を取得できる。この全数品質管理情報の活用法を以下に述べる。

a) 盛土のすべり安定性の確認

図-15 中に、盛土材料の室内三軸試験結果を示す。本試験は D_r 値 90% に締固め、かつ完全飽和した供試体 ($S=100%$) を使用している。図-12 および図-13 をみると、本施工における締固め度は、相対的弱部においても、この室内飽和供試体よりも大きく、飽和度は 100% より小さい。現場の盛土は不飽和状態であり、サクシヨンの影響で室内飽和供試体よりも強度が大きくなることを考えると、相対的弱部と言いつつも、その強度は室内供試体より大きい。図-15 中には 1:3 勾配の盛土斜面 (処分場の内側は 1:2 勾配斜面だが、石炭灰が押え盛土として作用するため検討から除外) に対し、飽和供試体の強度定数を用いてすべり安全率を求めた結果であり、相対的弱部が斜面全体を占めたと仮定しても、十分なすべり安定性が確保されていることがわかる。さらに、実施工での盛土の相対的弱部は、図-16 に示すように面的に限定されており、全面を占めることはない。

b) 3 次元相対的弱部の確認

図-16 中の赤丸を付した箇所 (平面図の左上周辺) は、前項で述べたように斜面の安定性では問題ないが、積層方向に相対的弱部が連続している。3 次元相対的弱部の情報は、施工管理と維持管理の両面から活用が見込め、施工者が乱れ率ヒートマップを随時確認すれば、相対的弱部が面的かつ積層方向に連続しないよう、例えば施工含水比を調整するなどの工夫を行うことで、弱部が 3 次元的に連続しない施工管理を行うことも可能となる。また、

赤丸のエリアは、今回の施工範囲のなかで安定性が相対的に最も低い部位のため、今回のような空間的な全数品質管理情報を維持管理部門に継承・利活用することにより、維持管理業務の効率化にもつながる。

3. CSG 工法に対する AtlasX の適用性実験

(1) 適用性実験に至る経緯

CSG (Cemented Sand and Gravel) 工法は、砂礫に水とセメントを混合した材料をブルドーザで敷き均し、振動ローラで転圧・締め固める工法である。本工法は、使用材料の適用範囲が広く、従来は主にダム現場で使用されてきたが、コストの縮減や環境負荷低減にも寄与することから、最近では地すべり対策工や防潮堤などにも活用されている。CSG 工法において、十分な品質を確保するためには転圧施工時の締め固め管理が重要となる。そこで、道路盛土現場などで適用を進めている AtlasX による締め固め管理を、CSG 材の管理にも適用することを目的として現場転圧試験を実施した。

(2) 現場転圧試験の概要

図-17 に CSG 材を用いた試験盛土の平面図と断面図を示す。試験盛土は、幅約 8m、奥行き約 21m (測定範囲は幅 6.8m、奥行き 10.0m)、層厚は 750mm である。なお、施工時の撒き出し厚は 1 層 280mm (仕上がり厚 250mm) で計 3 層とし、1~2 層目は敷き均しで使用したブルドーザによる転圧、3 層目は振動ローラによる転圧を行う。試験盛土に使用した CSG 材は、図-18 に示す原位置掘削材を母材に、セメントを表-2 に示した配合にて混合した。なお、CSG 材は時間経過とともにセメントによる硬化が進行するため、転圧回数毎に施工を止めて計測を実施すると硬化の影響を受けてしまう。そこで、図-17 に示すように転圧面を 3 レーンとし転圧条件の異なる 6 つのゾーンを設定することで、転圧施工直後の地盤剛性を速やかに計測した。加振転圧中は、振動ローラの起振部に設置した α システムによる計測を実施し、転圧後にはキャスポルと小型 FWD による地盤剛性の計測、レベル測量とレーザーキャナによる沈下計測、透過型 RI と散乱型 RI による密度計測を実施した。なお、透過型 RI については層厚が 75cm であることから、土工で用いる一般的な計測深度 (線源長) 30cm の SRID の他に、計測深度 50cm の深い位置まで計測可能な ROCKY (いずれもソイルアンドロックエンジニアリング社製 RI) を用いて計測を実施した。

(3) α システムおよび各種計測結果

図-19 は、この地盤剛性 E_{roller} 平均値の転圧回数による変化を示したグラフである。このグラフを見ると、加振転圧 6 回以降で地盤剛性が低下しておりオーバーコンパクションであると判断できる。図-20 は、小型 FWD とキャスポルの測定結果から求めた地盤剛性 E_{FWD} 、 E_{caspol} の変化である。キャスポルと小型 FWD を比較すると、両者の傾向はかなり異なっていることがわかる、これは、粗粒材特有のばらつきやオーバーコンパクションによる水の浮き等の影響と考えられ、今回計測した転圧中のキャスポルと小型 FWD のデータの解釈は難しい結果となった (但し、後述のセメント硬化による剛性変化は明瞭に捉えている)。

図-21 は、転圧後に計測した各種 RI による乾燥密度の結果であり、転圧回数による変化を示している。地盤剛性と同様に乾燥密度も加振転圧 6 回目以降で若干低下傾向であり、この結果からもオーバーコンパクションであると言

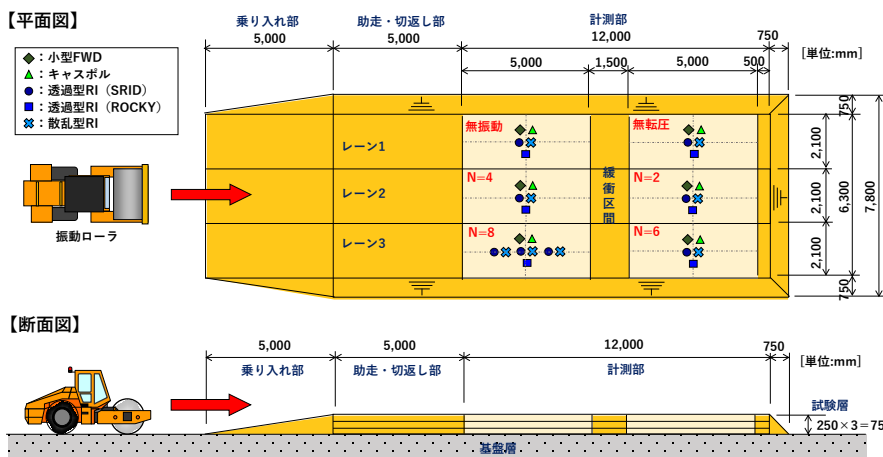


図-17 CSG 材を用いた試験盛土の概略図

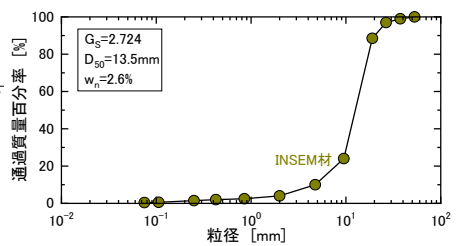


図-18 母材の粒度分布

表-2 CSG 材の配合

CSG材 [kg]	セメント [kg]	含水比 [%]
2056	100	9.5

える。また、透過型 RI (SRID と ROCKY) の計測結果を比較すると、両者に大きな差はなく深度方向の密度勾配は小さいと判断できる。計測深度が 10cm 程度である散乱型 RI は、転圧面の凹凸の影響を受けやすく低めの値となっているため、透過型 RI との補正を施すことで精度向上を図る必要がある。

ちなみに、初期配合の含水比が 9.5% に対して実際に計測された含水比は 6.0~7.0% 程度であった。この含水比は、事前の締固め試験による最適含水比 6.5% とほぼ同じである。CSG 材ではセメントを硬化させるために、通常の盛土材よりも水分量を多く配合する。このため、締固め時の飽和度が高くオーバーコンパクションになりやすい材料であると言える。αシステムは、リアルタイムでの計測が可能であるため、オーバーコンパクションになりやすい CSG 材の締固め管理には非常に有効であると言える。

(4) 加速度応答法を用いた地盤剛性による一軸圧縮強度の推定

CSG 材の場合、混合したセメントの影響により、材令によって地盤剛性も変化してくる。前節では、転圧時の αシステムと転圧直後の小型 FWD およびキャスポルの地盤剛性を比較しており、材令による影響は考慮していない。そこで、転圧した翌日 (転圧 19 時間後) に、再び αシステムと小型 FWD、キャスポルによる計測を実施することで材令による影響を調べた。図-22 は、材令による地盤剛性の関係を示したグラフである。これらのグラフを見ると、計測方法に依らず材令に伴って地盤剛性が増加する傾向が見られる。この地盤剛性の増加量を調べるため、室内試験にて現場と同じ配合で CSG 材を混合し、転圧時に実際に計測された乾燥密度で締め固めて作成した供試体に対して一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮強度の材令変化と先ほどの地盤剛性 E_{roller} の材令変化関係を用いることで、転圧時に加速度応答法で計測した地盤剛性から一軸圧縮強度を推定することができる。図-23 は、αシステムによる地盤剛性 E_{roller} から推定した一軸圧縮強度 q_u の分布図である。このような推定手法を用いることで、転圧施工時に材令 7 日強度および 28 日強度の分布をリアルタイムに推定することが可能となる。

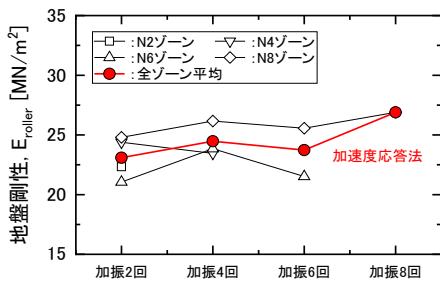


図-19 転圧回数- E_{roller}

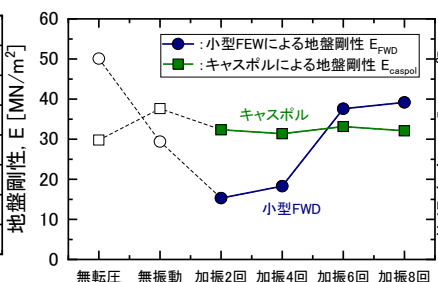


図-20 転圧回数- $E_{FWD} \cdot E_{caspore}$

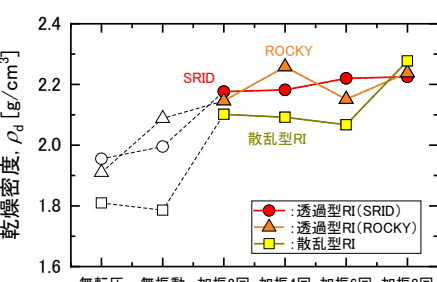


図-21 転圧回数- ρ_d

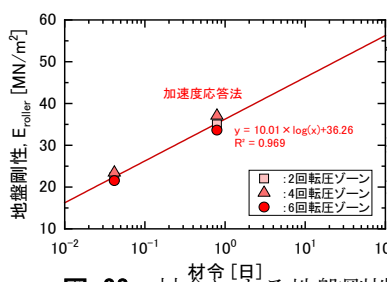


図-22 材令による地盤剛性の変化 ($E_{roller} \cdot E_{FWD} \cdot E_{caspore}$)

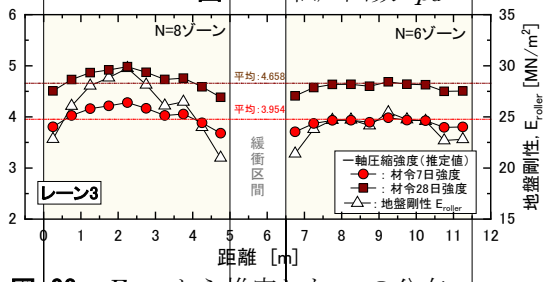
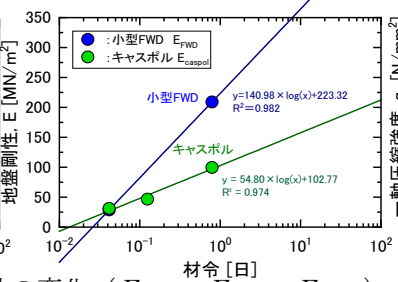


図-23 E_{roller} から推定した q_u の分布

(5) レーザースキャナを用いた密度分布の推定

セメントを混合する CSG 工法では、材令によって変化する地盤剛性 E_{roller} から密度を推定することは難しく、また急速施工を実施するため自走式散乱型 RI による計測時間を確保するのも困難である。そこで、レーザースキャナによる計測結果から密度分布の推定を試みた。レーザースキャナは、計測範囲内の標高を面的に計測するため、レベル測量に比べて圧倒的な測定数 (点群データ) となる。図-24 は、レベル測量とレーザースキャナによる沈下量 (各ゾーンの平均値) を比較したグラフである。両者とも加振 6 回で沈下が急増する沈下傾向は同じであるが、沈下量自体には差が生じていることがわかる。図-25 は、レーザースキャナで計測した盛土の圧縮率 (=沈下量/撒き出し厚) と、透過型 RI (SRID と ROCKY) による乾燥密度の関係を示したグラフである。この圧縮率と乾燥

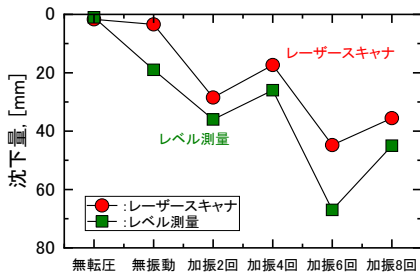


図-24 転圧回数－沈下量

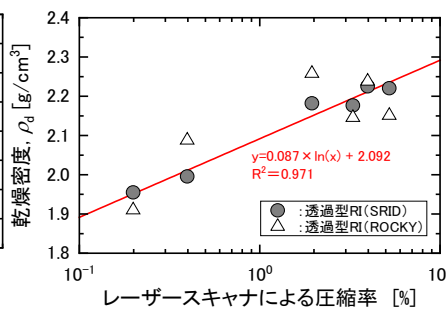


図-25 圧縮率－乾燥密度

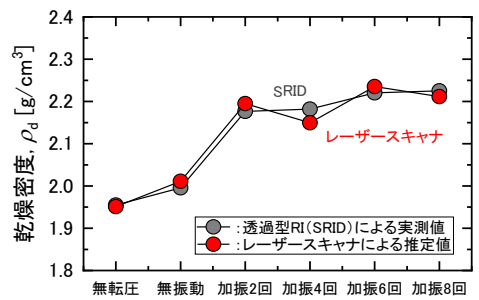


図-26 スキャナによる推定乾燥密度

密度には非常に良い相関性が見られるとともに、図-26 に示した圧縮率との相関式から推定した乾燥密度は、透過型 RI (SRID) の値とほぼ一致している。これは、レーザースキャナから求めた圧縮率の計測精度がレベル測量に比べて非常に高いことを意味している。図-27 は、レーザースキャナの計測結果から求めた圧縮率、乾燥密度の分布図であり、他の計測結果と合わせるため 0.5m × 0.5m メッシュでデータを出力している。このように、レーザースキャナを用いれば施工面の密度分布等を精度よく推定することが可能である。

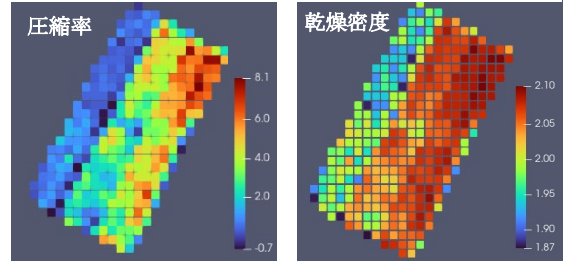


図-27 スキャナから求めた圧縮率・ ρ_d

以上のように、CSG 材の締固め管理における適用範囲を拡大する目的で現場転圧試験を実施した結果、AtlasX は CSG 材の締固め施工管理にも適用可能であると判断できる。

4. おわりに

本稿では、 α システムを活用した施工効率化事例および AtlasX の CSG 材への適用事例を紹介した。AtlasX では、従来の α システムを改良し、3 種類の IoT 機器とクラウドシステムを組み合わせることにより、面的な品質情報（地盤剛性、含水比、密度）が取得でき、高度な品質管理を実現した。現場適用事例で述べたように、面的な品質情報は盛土を維持管理していくうえで、管理の集中と選択の判断材料になりうるものであるため、施工管理だけでなく維持管理の面からも今後の需要が見込まれる。技術を確立しつつある一方で、とくに施工者側においては現行の管理基準との調整（二重管理の回避）が重要な課題であるため、発注者らとの対話を進めながら検討を進めていく所存である。

事例の紹介にあたり、データをご提供いただいた東北電力（株）様、ほか関係者各位に謝意を表す。

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.652III-51,115-123, 2000.
- 2) 佐近翔, 米谷明紀, 木村浩二, 永井志功: 原町火力発電所割田石炭灰埋立地における ICT 土工管理システムを用いた工事工程短縮計画について, 土木学会東北支部技術発表会, 2022.
- 3) 橋本毅: ドイツにおける ICT を利用した締固め管理技術, 建設の施工企画'10.3, 29-33, 2010
- 4) 龍岡文夫: 土の締固め管理・現状・新たな展望・展開-1 章 土の締固めの目的・意義・方法, 総合土木研究所 2022.2.