

次世代型 ICT 土工現場締固め品質管理システム「AtlasX」の開発

石 黒 健^{*1} 平 田 昌 史^{*1}
津 田 啓 史^{*2} 岩 谷 隆 文^{*2}

要 旨

次世代型の ICT 土工現場締固め品質管理システム「AtlasX」の開発経緯と現場実証事例を報告する。本システムは、当社開発技術である α システム（振動ローラ加速度応答法）を中心に据え、その周辺に転圧地盤の各種物性値を面的・多点的、リアルタイムに取得するための最新の IoT 機器をサブシステムとして配置したものである。取得したデータはクラウド型データ蓄積・処理システムで一元管理と分析、可視化が行われ、結果、現場土工品質管理の高度化と精緻化、土構造物の要求性能に対する複眼的な確認が可能となる。IoT 機器やロボット、クラウドシステム等の利活用により、現場管理業務の本格的な DX 化（生産性向上、業務改革、他部門・他部署とのデータ連携）の実現を目指す。以下では、AtlasX の開発概要、各 IoT 機器の開発結果、国土交通省と共同で行った幾つかの現場実証実験の事例を報告する。

キーワード 現場締固め品質管理／ICT土工／振動ローラ加速度応答法／自走式散乱型RIロボット／高精度レーザースキャナ／ブル撒き出し画像／クラウド型データ蓄積・処理システム

目 次

- | | |
|----------------|---------------------|
| 1. はじめに | 4. 現場実証事例 |
| 2. AtlasXの開発経緯 | 5. 現場管理業務の生産性向上とDX化 |
| 3. AtlasXの技術概要 | |

DEVELOPMENT OF THE NEXT-GENERATION TYPE ICT FIELD COMPACTION QUALITY CONTROL SYSTEM "AtlasX"

Takeshi ISHIGURO Masafumi HIRATA
Hiroshi TSUDA Takafumi IWATANI

Synopsis:

Results on the development and example of the field verification of "AtlasX", next-generation type ICT field compaction quality control system are reported. "AtlasX" consists of α -system (vibration roller acceleration response method) as main technology, and three kinds of IoT measuring devices as its sub-system to obtain the several physical and mechanical properties of compacted ground. With use of the cloud-based data storage, visualizing, processing system, "AtlasX" can improve and refine the current field compaction quality control method and check the required performance of earth structures from multiple angles. Furthermore, it can realize the authentic DX, digital transformation (improving productivity, Business Process Reengineering of field management operations and utilization of obtained data between several different departments). In this paper, results of the development of IoT measuring devices and example results of several field verification on "AtlasX", mainly with the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism are reported.

* 1 本店 ICI テクノロジーセンター 地盤グループ

* 2 本店 土木技術部

1. はじめに

道路・鉄道・フィルダム・河川堤防・宅地造成等の大型土工現場においては、各土構造物に要求される性能（締固め状態や強度・剛性・遮水性等の工学的性質）を現地確認するための現場品質管理が必ず行われる。現場品質管理手法は、近年各種計測装置の簡便化や省力化が進んでいるとはいえ、未だ相応の労力とコストを必要とする。このため、広大なエリアを対象とする大型土工現場の現場締固め品質管理は離散的な「点」の管理とならざるを得ず、またそのデータ処理は「事後」となるため施工中のリアルタイム管理を行えない。さらに、取得された品質管理データは竣工後、現場毎に発注者へ報告・提出されるものの、取得データの DB 蓄積や一元管理、維持管理など他部署を含む多様な利用者によるデータ共有・連携等の「データ活用」も実務レベルでは実現できておらず、本格的な現場管理業務の DX 化への大きな障壁（隘路）となっている。

本論文で紹介する「AtlasX」は、このような現状の打破を目途する次世代型の ICT 土工現場締固め品質管理システムである。本システムは、振動ローラ加速度応答法¹⁾を中心に据え、その周辺に転圧地盤の物性値を取得するための最新の IoT 機器をサブシステムとして配置し、土構造物の要求性能を複眼的にチェックする事で要求性能の確認及び現場土工品質管理の高度化と精緻化を目指す。さらに前述の DX 化を実現するためのクラウド型データ蓄積・処理システムを構築している。以下では、本システムの開発経緯、技術概要、各 IoT 機器の詳細を示した後、国土交通省と共同で実施した幾つかの現場実証事例を報告する。

なお、AtlasX は株式会社大林組との共同開発技術である。

2. AtlasX の開発経緯

AtlasX が目指している現場土工品質管理の高度化と精緻化の方向性を図-1 に示す。紙面の関係から詳細は文献²⁾に譲るが、目指す方向性は以下 3 点に集約される。なお、この方向性は高速道路総合技術研究所（以降、ネクスコ総研と略称）との共同研究の成果²⁾として整理したものである。

- A. 確実な現場転圧の担保：ICT 土工導入後も現場締固め品質管理のハードルを決して下げないこと
- B. 現場土工品質管理の高度化と効率化：現場管理業務

の飛躍的な生産性向上を達成すること

C. 現場品質管理データの有効利用（性能設計や維持管理への貢献）：本格的な業務の DX 化を実現すること
上記 A、すなわち盛土の要求品質を確実に担保する、という観点からは、

- A-1. 転圧エネルギー（FCEL）が一定となるように現場施工を管理
- A-2. 土工材料の種類や含水比変動など現場性状の把握・区分とその記録
- A-3. 締固めの最適状態（現場で用いている重機が最大限の締固め能力を発揮している事）の担保

が必要となる。これを達成するために、AtlasX では従来の振動ローラ加速度応答法（ α システム）¹⁾に新たに 2 つの IoT 機器、高精度 3D レーザスキャナ（以降、3DLS と略称）と自走式散乱型 RI ロボット（以降、RI ロボットと略称）を追加、組み合わせた。さらに、プロトレベルではあるが、撒き出し用ブルに設置した固定カメラにより、盛土材料の撒き出し面画像を位置情報と共に取得、保存し、材料トレーサビリティを確保するシステムも試作、検証済である。

A-1 は撒き出し厚と転圧回数を一定に管理する事で達成される。現行の ICT 土工指針は既にこれを基準化しているが、締固め品質管理の観点から見れば必要条件であって十分条件ではない。AtlasX では、3DLS の導入により撒き出し厚や締固め層厚をより高精度・面的・統計的に把握し、A-1 をさらに精緻化することが可能となる。

A-2 は従来の透過型 RI 法による乾燥密度・含水比計測（15 点法）や材料情報の目視記録に相当し、AtlasX では RI ロボットとブル撒き出し画像取得システムが、これを面的・統計的管理に発展させる。RI ロボットには中性子（含水比計測）またはガンマ線（湿潤密度計測）の線源を搭載しており、2 台の RI ロボットが転圧面を自動走行することで、従来の乾燥密度と含水比（あるいは飽和度と空気間隙率）の点管理が面管理へと変わる。従来の α システムでは地盤剛性 E_{roller} の変化を用いて材料変動を判定しようと試みていた²⁾が、含水比が変動するだけでも E_{roller} が変わってしまうため、変動要因を特定する事ができなかった。AtlasX は、RI ロボットにより取得される含水比等原因系の転圧面情報が新たに加わることで、現場転圧状態をより

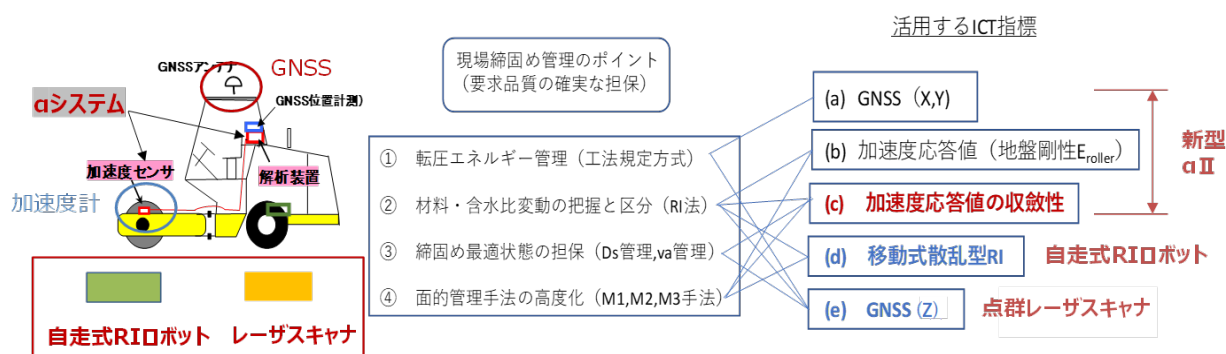


図-1 AtlasX が目指す現場土工品質管理の方向性（ネクスコ総研共同研究²⁾）

表-1 AtlasX の3つのIoTコンポーネントとその役割及び相互補完

	ICT情報取得の目的	新型αシステム	3Dレーザースキャナ*	自走式散乱型RIロボット（中性子型・γ線型）*	従来手法（レベル測量・透過型RI）
試験施工	撒き出し厚の決定	○乱れ率による定量的判断	○点群データによる転圧収れん・圧縮率の高精度・統計的判断	○面的データによる面的・統計的判断	△（離散的点情報）
	転圧回数の決定				
本施工（転圧中リアルタイム監視）	転圧回数の監視	○転圧回数管理システムによるオペ側リアルタイム確認			○転圧回数管理システムによるオペ確認
	転圧収れんの監視	○乱れ率による定量的確認			
	過転圧の監視	○乱れ率の低下をリアルタイム監視			
	材料変動の監視	○乱れ率変動により定量的かつ場所特定確認			
	転圧の均一性監視	○E _{roller} による相対的弱部抽出			
施工（品質）管理（転圧後）	撒き出し・締固め層厚の現地確認		○点群データによる高精度・統計的把握		
	転圧均一性の面的確認	○E _{roller} 分布による判定	○圧縮率による判定（弱部の原因）	○密度・含水比分布（弱部の原因）	
	密度・含水比分布の確認	△乱れ率による間接推定	△圧縮率による間接的推定	○密度・含水比分布の直接把握	△（離散的点情報）
	地盤剛性情報の取得	○E _{roller} 分布による判定			

リアルに把握できるようになる。3DLSでは撒き出し厚と転圧時沈下量から締固めによる圧縮率(3.3の式(2)参照)を面的に算出する事が可能となる。圧縮率は転圧による密度増加率に対応する指標となるため、RIロボットによる乾燥密度の値と併せ、締固めによる転圧面の密度増加やその面的分布（転圧不均一性）を精緻に捉えることも可能となる。

A-3では、現場締固めに用いている転圧機械と材料、撒き出し厚の組合せにおいて達成しうる最適状態（現場締固め機械により空気間隙を極力減らした状態）に到達している事を現地確認する。従来管理では試験施工時のレベル沈下量の収れんやD_c管理、透過型RI法による空気間隙率（v_a）管理等がこれに相当する。AtlasXでは、振動ローラ加速度応答値（地盤剛性E_{roller}）の収れん³⁾に加え、3DLSによる転圧収れん確認（試験盛土時に確認）やRIロボットによる転圧面v_a（あるいは飽和度S_r）の面的計測などが、より緻密かつ面的な転圧収れん管理を可能とする。

以上、AtlasXでは、αシステム（地盤剛性E_{roller}）、3DLS（撒き出し厚・締固め層厚と転圧時沈下・圧縮率）、RIロボット（乾燥密度と含水比）の3種類のIoT機器が転圧地盤の品質を高精度・面的に取得するだけでなく、これら情報間の相互補完によって現場品質管理を結果系から原因系に発展させることが可能となる。これにより、αシステム

が志向してきた面的管理手法（図-1中のM3法⁴⁾）すなわち加速度応答値の最弱部（低剛性部）の抽出に関しても、高含水比・低乾燥密度・低圧縮率といった多面的な転圧情報が紐づけられ、現場の転圧状況の把握や施工法の最適化が可能となる。表-1に、AtlasXの上記3つのIoTコンポーネントがもたらす転圧面情報や3者が織りなす相乗効果を整理した。なお、3DLSとRIロボットは振動ローラ以外の無振動転圧機械や狭隙部用の小型転圧機械等により転圧された地盤にも適用可能であり、AtlasXは、もはや振動ローラの使用を前提とはしていない。

B.の生産性向上に関しては、説明は不要であろう。IoT機器の導入は、従来の離散的な点管理、事後確認、相応の労力とコストといった幾つかの現場課題を解決する。後述する国土交通省PRISM実証工事では、これらIoT機器の導入により、従来手法よりも低コストで100倍～1000倍の多点的・統計的データの取得が可能となる事を確認済である（5章参照）。C.のデータの保管と有効活用に関しては、クラウド型データ処理システムの導入が、現場品質管理業務の本格的なDX化（業務改革とデータの利活用）を可能とする。

3. AtlasXの技術概要

AtlasXの3つの構成要素（IoT機器）と、取得データを統



図-2 AtlasX の3つのIoT機器とクラウドデータ処理システムの概要

合するクラウドシステムの全体概要を図-2 に示す。以下では、各 IoT 機器の開発概要、特に計測精度や現場適用性の確認を目的とした技術的検証の結果を中心に報告する。

3.1 新型 α システム（振動ローラ加速度応答法）

α システム（振動ローラ加速度応答法）¹⁾は、転圧地盤の剛性 E_{roller} を位置情報、転圧回数判定情報と共に自動取得する手法として数多くの適用実績を有する。AtlasX では、データ処理システムの OS 更新と解析精度（倍精度）の向上、GNSS 内蔵によるコストダウン、耐久性向上とコンパクト化を加えた新型 α システムを開発、導入した（以降、これを α システムと称する）。以下では、各計測パラメータの影響、計測限界、計測精度等に関する 2 つの検証事例を報告する。前者は、4t 振動ローラの推奨検査加振条件や地盤剛性の計測限界に関するものであり、後者は、同一転圧地盤において既存の地盤剛性評価指標（小型 FWD など）との比較を試みた事例である。

(1) 4t 振動ローラの推奨検査加振条件と適用限界

道路の路床・路盤の施工後には、定格重量の重機を全面で走行させ、たわみを目視により観察し、施工の良否

表-2 現地検証実験における計測条件

項目	水準数	条件
起振力	2	起振力 Hi, 起振力 Lo
走行方法	2	前進, 後進
走行速度	2	時速 5km, 3km

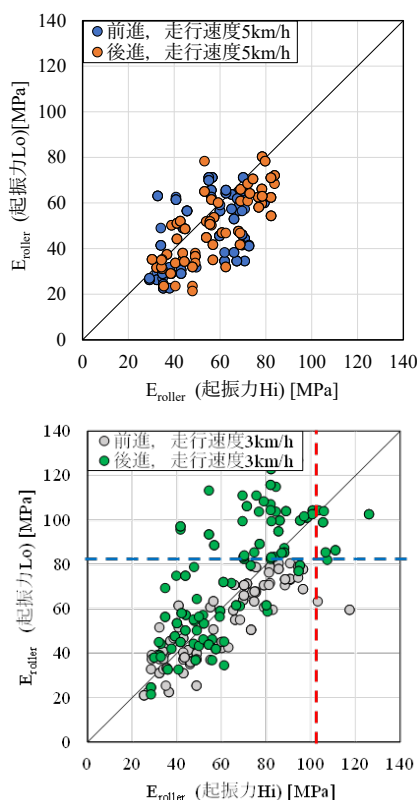


図-3 地盤変形係数 E_{roller} に及ぼす各加振条件の影響

を判断するブルーフローリングが行われる。ブルーフローリングは、検査員の目視により品質を判断するため、その基準が検査員の経験に依ること、主観的かつ定性的な評価となることに加え、全面に渡っての検査には多大な労力と時間を要するなどの課題がある。これらの課題に対し、AtlasX では、舗装工事において路床や路盤の施工完了時に α システムを検査加振として適用し、舗装基盤の健全性やその後の耐用年数を推定する取り組みを、国土交通省の新技术公募²⁾の中で試行した³⁾。本節では、4t 級小型振動ローラを用いた検査加振の推奨条件と検査走行による路盤の路面性状への影響、計測可能な剛性の限界値に関する検討結果を報告する。まず、4t 級小型振動ローラによる検査加振の適用において、最適な計測条件を検討した。4t 級小型振動ローラの作業条件のうち、振動ローラ加速度応答法に影響を及ぼす要因は、起振力、振動ローラの走行方法（前進または後進）、走行速度の 3 つと想定された。4t 級小型振動ローラには、通常、起振力が大きい Hi（以下、起振力 Hi）と小さい Lo のモード（以下、起振力 Lo）が選択できるため、起振力に関しては、起振力 Hi、起振力 Lo の 2 条件を検討した。さらに走行方法を前後進の 2 条件、走行速度は、5km/h 程度と 3km/h 程度の 2 条件の計 8 条件（表-2）として、路盤（材料は RC40）を対象に振動ローラ加速度応答法の計測を実施した。振動ローラ加速度応答法により求まる地盤剛性 E_{roller} に及ぼす各種条件の影響を図-3 に示す。なお、各種計測では同一個所を走行した。図より、走行速度 5km/h（図-3(a)）では、起振力、走行方法に関わらず、概ね 30~80MPa に分布しており、走行速度 3km/h（図-3(b)）では、前進かつ起振力 Hi で 20~100MPa、前進かつ起振力 Lo で 20~80MPa、後進は起振力に関わらず 20~120MPa に分布している。一方、走行速度に着目すると、本検討の範囲内では走行速度 5km/h の検出可能範囲の上限は 80MPa で、走行速度 3km/h の検出可能範囲の上限は前進で 100MPa、後進で 120MPa と考えられる。従って、走行速度 3km/h の方が広い範囲の剛性を評価でき、検出能力が高い。また、安全面からも走行速度は遅い方が良く、走行速度の推奨は 3km/h とした。走行方法に着目すると、推奨の走行速度 3km/h（図-3(b)）では、後進の方が分布範囲は大きいものの、ばらつきが大きい。一方で、前進では起振力 Hi と起振力 Lo で 1:1 近くに対応している。また、安全面からも視界良好な前進の方が良く、走行方法の推奨を前進とした。起振力に着目すると、推奨の走行速度 3km/h かつ前進（図-3(b)）に絞ってデータを見ると、検出可能範囲の上限が起振力 Lo で 80MPa（図中青破線）、起振力 Hi で 100MPa（図中赤破線）となっており、検査能力の観点からも起振力 Hi の方が良いと考えられる。下部路盤面全域で別途計測した結果が同様の傾向であったことも鑑み、起振力モードの推奨は起振力 Hi とした。

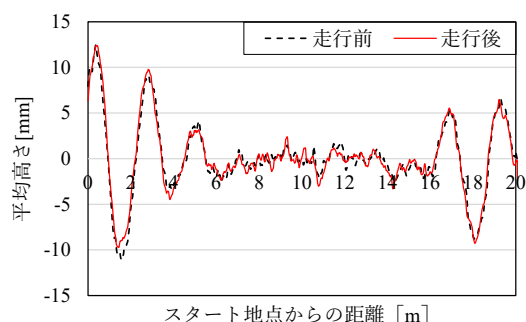


図-4 検査走行前後でのプロファイル試験結果の比較

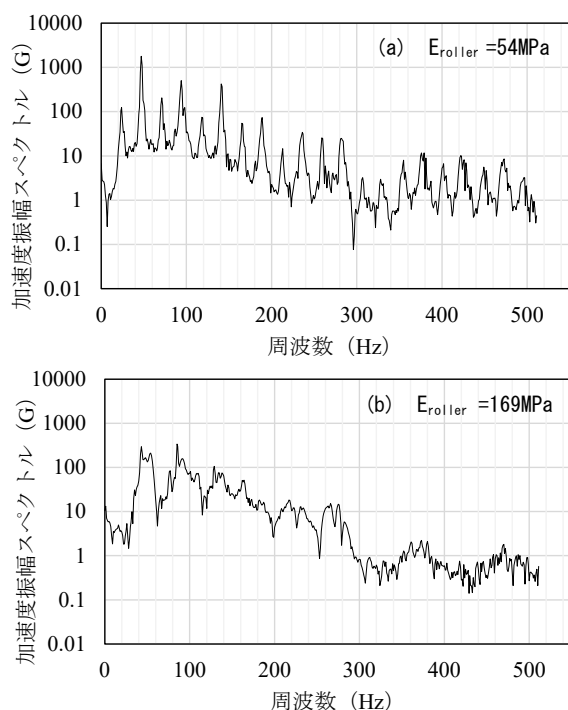


図-5 加速度波形の周波数分析結果の一例（セメント改良土）

路盤の施工では、マカダムローラやタイヤローラなどの静的な締め固め機械を使う。4t 級小型振動ローラによる検査加振を想定した場合には、振動により施工済みの路盤の表面を荒らしてしまい、平坦性に悪影響を及ぼす懸念がある。これに関して、静的な締め固めを施工したあとに、4t 級小型振動ローラによる検査加振を行い、施工前と施工後で小型プロファイル測定装置（舗装工事で用いられる路面平坦性の計測装置）により、平均高さを計測し、表面形状が変化しているかを検証した。検証結果を図-4 に示す。計測結果より、走行前と走行後では 1mm 程度の差しかなく表面形状に大きな影響はないと考えられる。同時に計測したキャスボル剛性や SRID 密度についても同様であった⁷⁾。最後に、 E_{roller} の計測限界（高剛性側）に関する検討事例を示す。振動ローラ加速度応答法は、振動ローラの振動輪に設置した加速度計のデータを入力として地盤剛性を推定しているため、機械の老朽化や機械的ノイズの影響を受ける。これまでの実験で、一般的な地盤の変形係数である 100MPa までであれば既往の剛性評価試験と相関があることがわかっている。これ

以上の高剛性の場合には、機械的な負荷が大きくノイズの影響が大きくなる可能性がある。そこで振動ローラ加速度応答法の適用限界に関して、既往文献および現場実験結果に基づき検討を試みた。藤山ら^{1),10)}は、理論検討を行い、地盤剛性が 530 MPa となると、振動ローラ加速度応答法の特徴である高調波および 1/2 分数調波以外の周波数成分が卓越してくる（カオス現象）ことを報告している。これに加え、著者らの既往実験で得た加速度応答波形を分析した結果（セメント改良土上で 4t 級小型振動ローラにより加振した実験の加速度波形の周波数分析結果の一例）を図-5 に示す。地盤剛性 $E_{roller}=54$ MPa では、使用した 4t 級小型振動ローラの公称振動数 55Hz に対して、高調波および 1/2 分数調波が卓越している一方で、地盤剛性 $E_{roller}=169$ MPa では、それ以外の周波数成分の波が連続的に出現（カオス化）するため、藤山・建山の手法¹⁾による波形乱れの定量化（乱れ率の算出）が困難となっている。この実験において、170 MPa 以上では波形が不安定かつ基本振動数が 50Hz 程度となっていた。基本振動数が公称値よりも低下する原因は機械の老朽化によるものと考えられる。また、基本振動数が公称値に近い 4t 級小型振動ローラを使用したセメント改良土の別実験では 300 MPa 程度までは波形が不安定化しなかった。以上のことを勘案すれば、振動ローラの老朽化の程度を基本振動数により判断し、ほぼ公称値通りの基本振動数であれば 300 MPa 程度、老朽化していれば 170 MPa 程度が、検出可能な剛性の限界であると考えられる。

(2) 地盤剛性 E_{roller} と既存評価指標との相関性

著者らは、振動ローラ振動輪の加速度（FFT）応答の変化を利用して地盤剛性 E_{roller} を評価する手法について、様々な地盤材料を用いた複数現場でのデータ取得を行ってきた。以下では、これにより得られた広範囲な E_{roller} と既存の地盤剛性評価手法である小型 FWD 他による地盤剛性との相関性、および 4t 小型ローラと 10t 大型ローラで得られる地盤剛性 E_{roller} の違いと、そのメカニズムに関する考察を試みた結果を報告する⁸⁾。振動ローラの規模（荷重）の違いが E_{roller} に及ぼす影響については、締め固め層内の密度（剛性）勾配や表層乱れの影響など複数の要因が想定されるが、以

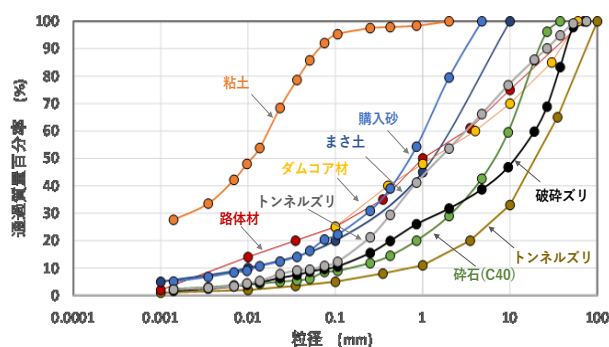


図-6 地盤剛性 E_{roller} を取得した現場材料の粒度範囲

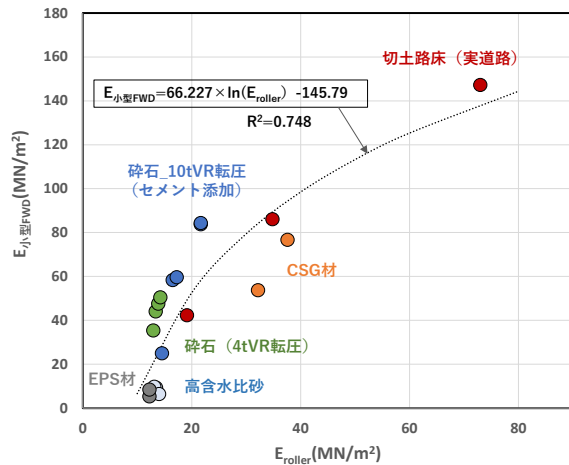


図-7 地盤剛性 E_{roller} と $E_{\text{小型FWD}}$ の関係 (4t 小型ローラ)

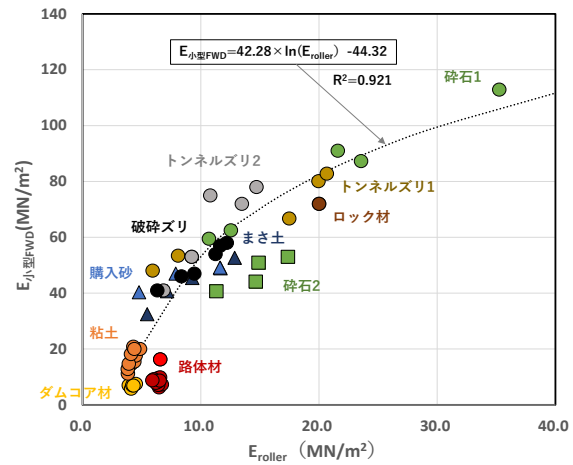


図-8 地盤剛性 E_{roller} と $E_{\text{小型FWD}}$ の関係 (10t 大型ローラ)

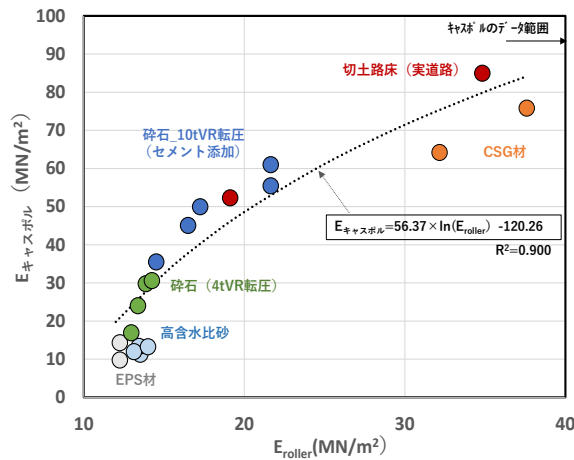


図-9 地盤剛性 E_{roller} と $E_{\text{キャスボール}}$ の関係 (4t 小型ローラ)

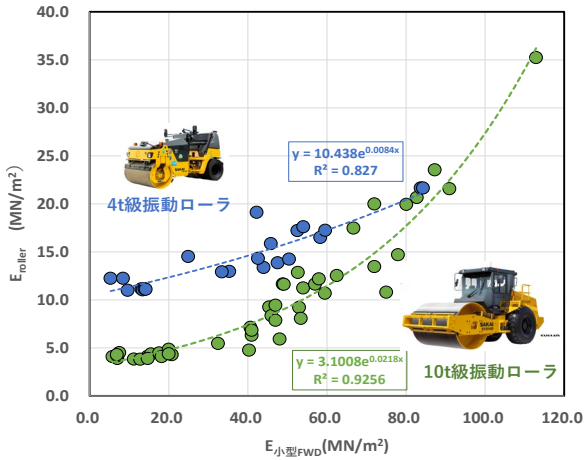


図-10 4t/10t 級振動ローラの $E_{\text{小型FWD}}$ ～ E_{roller} 関係の比較

下では振動ローラ荷重の違いが地盤剛性のひずみ依存性に及ぼす影響に着目した検討を試みる。図-6 に、地盤剛性 E_{roller} を取得した現場の代表的な材料粒度の範囲を示す。粘性土やフィルダムコア材、道路路体材などが高含水比の細粒側、トンネルズリや購入砕石などが粗粒側、購入砂やまさ土などの砂質材料がその中間に位置する。現場計測では 4t 級の小型および 10t 級の大型振動ローラを用い、試験盛土の場合、盛土層厚 30 cm 前後のデータに限定し、転圧回数を 0～8 回程度まで変えた。振動ローラ加速度応答法は、転圧面から 50 cm～60 cm 深度までの地盤剛性の影響を受けることから²⁾、試験盛土では下層を 60 cm 以上設けて計測した結果を基本的に採用した。セメント改良土では、転圧終了後に放置期間を設け、時系列で計測を行い、 E_{roller} と既存手法との相関性を追跡した。道路切土路床⁹⁾における計測では、先に E_{roller} の面的計測を実施し、剛性値の大小が異なる地点を選定して既存手法の計測を行った。図-7、図-8 には、4t および 10t ローラにおける E_{roller} と小型 FWD による $E_{\text{小型FWD}}$ の関係を示す。両者には一定の相関が認められ、高含水比細粒土→砂質材料→粗粒材料→セメント改良土や実切土路床の順に両地盤剛性値が共に増大する傾向を確認できる。図-8 中に示すように、同じ砕石やトンネルズリであってもデータの位置は異なり、仔細に見ると材料粒度、含水比、転圧機種、転

圧回数、養生期間の違い等の各種影響要因が交絡しながら両地盤剛性値に等しく影響を及ぼしている。図-9 はキャスボールとの比較例 (4t ローラ) であるが、計測手法の違いに関わらず、地盤剛性 E_{roller} との間にはやはり良好な相関性を確認することができる。地盤剛性 E_{roller} は、加振力や機械諸元、振動数などの振動ローラの機種の違いを正規化した手法である¹⁾にも関わらず、同一剛性の地盤であっても 4t 級と 10t 級ローラで得られる値が異なる。図-7、図-8 を統合し、縦軸と横軸を逆にして図-10 を作成した。同じ剛性の地盤であっても、4t ローラによる評価値は 10t ローラよりも大きく、FWD 剛性 80 MN/m² 付近で両者が摺りつく傾向を示す。この理由を、図-11 に示す振動ローラ走行時の地盤のひずみ量、土の剛性のひずみ依存性で説明できないかと考えた。図中に示す Boussinesq 解 (FWD 試験の計算式) を用いて、小型 FWD 載荷 (円形)、4t および 10t ローラ載荷時 (長方形) 時の地盤の沈下量 δ を計算¹⁰⁾し、その影響深度を載荷面積の等価半径×2 と仮定して地盤のひずみ量 ε を求めた結果が図-12 である。載荷を受ける地盤の剛性と FWD の重錘荷重、振動ローラの起振力の違いに応じて、地盤のひずみ量は広範囲に変化し、地盤剛性 > 80 MN/m² では近い値に摺りついていく。図-13 は、10 MN/m²～80 MN/m² の 4 種類の地盤を現場実験の中から選定し、4t 及び 10t ローラで実測され

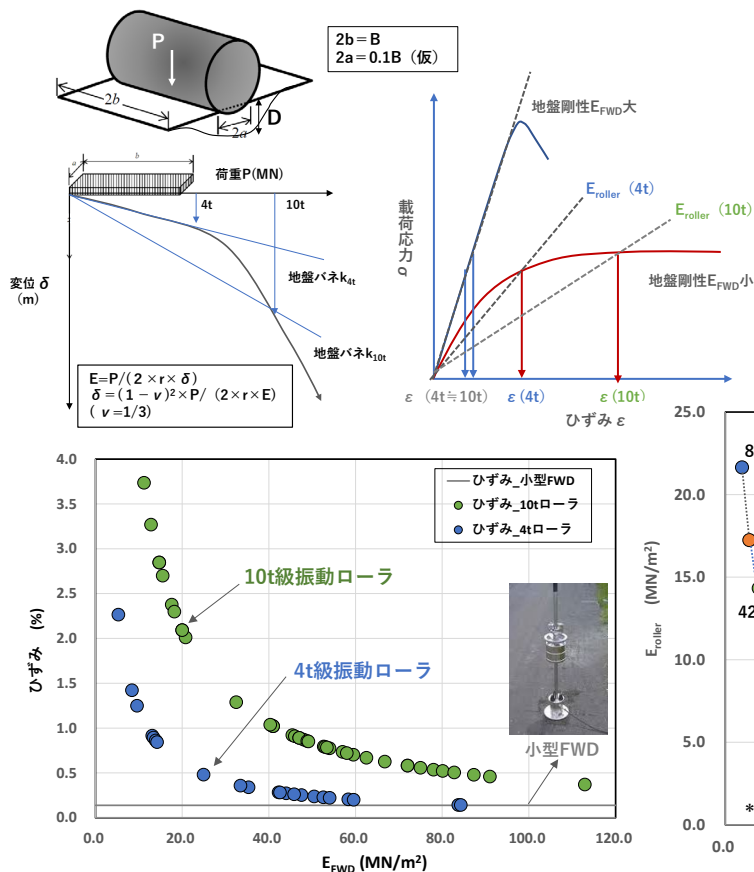


図-12 4t/10t 級ローラと小型 FWD 載荷時の地盤のひずみ

た E_{roller} と図-12 で計算した、その条件での地盤のひずみ量との関係をプロットした結果を示す。このような整理を行うとローラ規模の違いの影響は小さくなり、地盤が柔らかいほどローラ機種の違いの影響が大となることや、地盤のひずみ量に依存する形で E_{roller} が発現する様子などを確認できる。図-12 中には小型 FWD の重錘載荷時のひずみ量 ($\delta=0.425$ mm で一定) を併記したが、図-7、図-8 において $E_{小型FWD}$ の剛性値が E_{roller} の数倍程度の値を取る理由も、同じひずみ依存性により説明可能と思われる。

3.2 自走式散乱型 RI ロボット

盛土の締固め品質管理では、現場密度試験によって品質の確認を行っている。現場密度試験は、RI 法などの普及により、砂置換法などと比較して計測の手間は大幅に軽減されたが、人力計測のため未だに多大な労力がかか

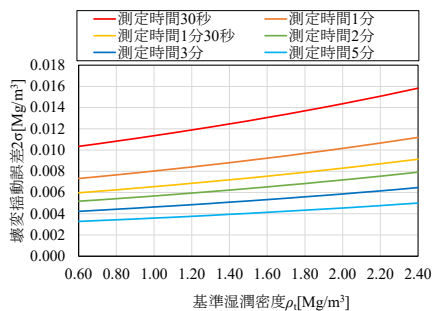


図-14 基準湿潤密度と理論上の壊変揺動誤差の関係

図-11 振動ローラ載荷時の地盤変形モデルと転圧地盤のひずみ依存性

	起振力P(kN)	ローラ幅 B=2b(m)	接地幅 2a(m)	等価半径 r(m)	ひずみ 深度(m)
小型FWD	0.1~0.15 (重錘重量)	—	—	0.150	0.300
4t (TW354)	20.6	1.20	0.10	0.195	0.390
10t (SV514T)	255.0	2.13	0.20	0.368	0.736

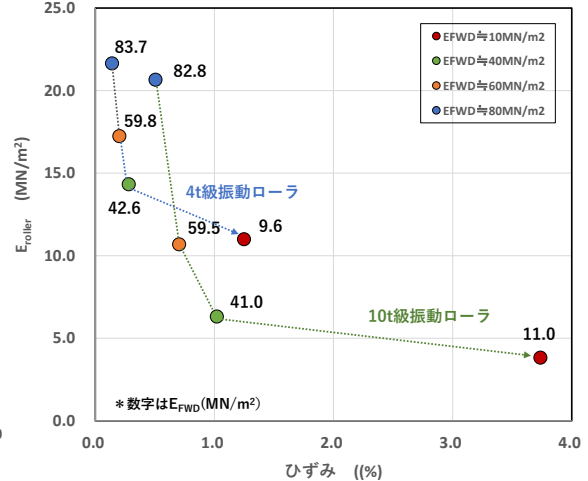


図-13 地盤のひずみ量と4t/10t ローラの E_{roller} との関係

っている。また、その計測頻度は $1000\sim 2000m^2$ に 15 点などのサンプル試験となっており、離散的な管理にならざるを得ない。さらに、その計測データは事後処理が必要であり、リアルタイムに品質を確認できないという課題があった。これらの課題に対し、著者らは、人力計測不要かつリアルタイムにデータ処理を行う RI ロボットを開発した (写真-1)。開発の詳細については、既往の文献を参照されたい^{11),12)}。以下では、RI ロボットの所要計測時間の検討および既往手法による取得値との比較結果について報告する。RI ロボットは、事前に計測領域、計測ピッチを設定しておくことで、自動で湿潤密度および含水比の計測を行う計測器であり、専用の自走式ロボットと称す) と散乱型 RI 計測器で構成される。散乱型 RI 計測器は含水比を計測する水分計と湿潤密度を計測する密度計に分かれており、それぞれ個別に自走式ロボットに搭載

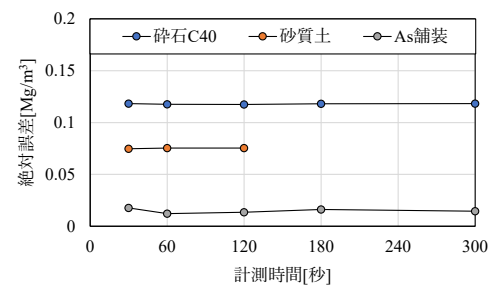


図-15 基準湿潤密度の誤差と計測時間の関係

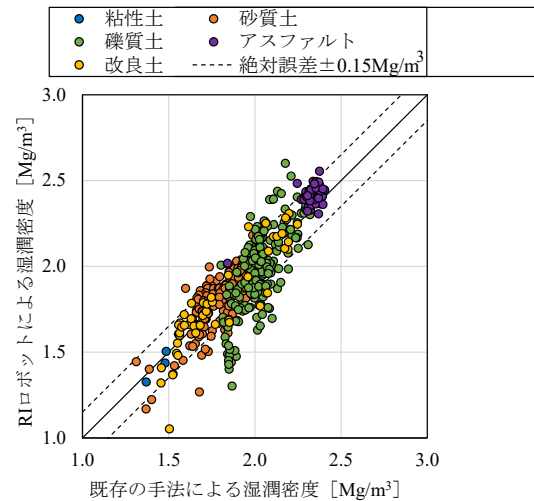
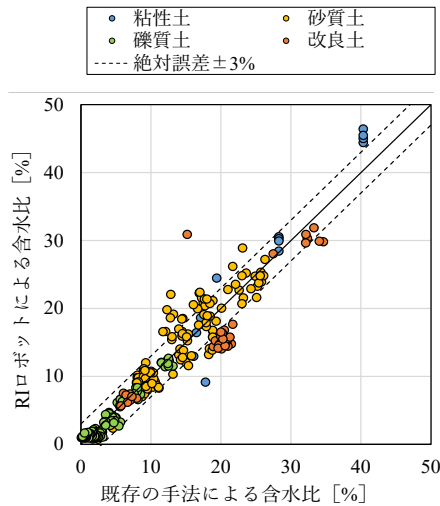


図-16 RI ロボットおよび既存手法（透過型 RI）による計測結果

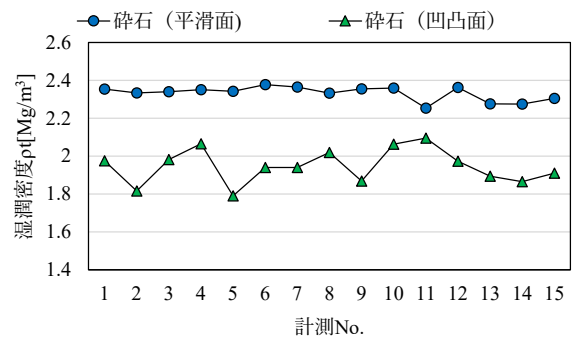


写真-2 砕石転圧面の状況¹⁴⁾

図-17 砕石の表面状態を変えた湿潤密度計測結果

する。自走式ロボットは車体寸法 L600×W500×H250mm（L：長さ，W：幅，H：高さ），車体重量 15kg 程度であるほか，GNSS を搭載しており，計測データと座標をクラウドに送信することで，ヒートマップとして計測値の表示が可能である。なお，RI ロボットの開発にあたり，散乱型 RI 密度計については，小型の RI 密度計がなかったため，新規に開発した¹²⁾。散乱型 RI 水分計はソイルアンドロック社の Warp-Mini を用いた。RI 水分計の計測時間は，既往文献¹³⁾を参考に 1 分とした。散乱型 RI 密度計は新たに開発したため，所要計測時間に関して，理論的な観点および実計測結果から検討を行った。RI 計測器の計測精度は，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理論的検討を行った。湿潤密度の標準偏差 σ は式(1)で表される。

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

ここで， ρ_t ：湿潤密度[Mg/m³]， 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]

壊変揺動による誤差を 2σ として評価した。図-14 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 1.00～2.40Mg/m³ の計測対象に関して理論上の計測誤差が 0.01Mg/m³ 以下になることが分かった。さらに，砕石 C40，砂質土，As 舗装上で湿潤密度の計測を行い，実計測におけるばらつきを同様に絶対誤差 2σ として評価した。検証結果を図-15 に示す。実計測の誤差は，計測時間 1 分以上では，ほとんど変化がないことがわかる。さらに，実計測の誤差は理論的な誤差を大きく上回っており，砕石が最も誤差が大きく，約 0.20Mg/m³ である。これは特に湿潤密度計測においては計器下の地表面の凹凸性状等の影響が壊変揺動誤差よりも支配的であることが原因と考えられ，凹凸の少ない As 舗装ではその値が小さい。以上を総合的に勘案し，RI ロボットの計測時間を 1 分とした。

これまで，複数の試験盛土（図-6 参照）および現場にて RI ロボットによる計測を行ってきた。RI ロボットおよび既存手法による計測結果を図-16 に示す。なお，両手法の評価深度の違いの影響を補正するために，事前に計測対象地盤の数箇所 RI ロボットおよび透過型 RI などの既往手法の計測結果の平均値を比較し，補正を加えた。図より RI ロボットによる含水比は既往手法（透過型 RI）と良く対応しており，絶対誤差 3% 以内に概ね収まっている。改良土などは，一部で含水比が既往の手法と 5% 程度差が

出ているが、これは、当該現場が石灰改良であり RI 法の適用性自体に問題があるものと考えられる。また、湿潤密度に関しては、概ね絶対誤差 $\pm 0.15\text{Mg/m}^3$ となった。碎石に関しては、一部大きく外れている領域が存在する。そこで表面の形状が散乱型 RI 密度計の計測に及ぼす影響に関して、追加検討を実施した。実験で碎石を転圧した後の状況¹⁴⁾を写真-2 に示す。この中で図のように平滑面、凹凸面を選定し、各 15 点ずつ散乱型 RI 密度計の計測を実施した。計測結果を図-17 に示す。真値がわかっているわけでは無いが、平滑面は各点で密度が概ね等しいのに対し、凹凸面は $\pm 0.15\text{Mg/m}^3$ 程度ばらついていることがわかる。散乱型 RI の計測深度は、概ね最大 20 cm 程度であり、表層 5 cm 範囲内の値の影響が大きいことがわかっている。したがって、散乱型 RI 密度計と地表面の間に空隙が多いと、計測の影響が大きい範囲（散乱型 RI 密度計表層から 5 cm）内の密度が、相対的に低くなり、計測される密度が低くなる。逆に、表面の凹凸が非常に小さなアスファルト舗装面などでは、RI ロボットの計測結果とコア抜きによる値の整合性は非常に高い¹⁵⁾。RI ロボットは、アスファルト舗装面の面的密度計測手法として国土交通省新技術公募の試行技術に選定されており⁵⁾、その報告は続報に譲る。

3.3 高精度 3D レーザースキャナ (3DLS)

高精度 3D レーザースキャナ(以降、3DLS と略称)は、ミリメートル単位の精度で三次元座標値を取得できるため、盛土の面的な標高分布を精緻かつ多点的に取得できる。また、広範囲なエリアを短時間でスキャンできるため、従来のレベル測量等に比べて現場での測定時間が大幅に削減され、作業効率と精度向上を図ることが可能となる。著者らは、3DLS を活用して盛土の締固め効果を面的・多点的に評価する手法を開発しており、以下、その結果を報告する。

3DLS の所要計測仕様について、碎石転圧地盤¹⁴⁾をモデルに検討を行った。検討方法は $\square 0.5\text{m}$ エリアでの計測点数が 3500 点以上かつ 3 回計測結果の平均値の値を真値として、エリア内の計測点数と計測回数の違いが測定精度に及ぼす影響を検証した。図-18 に検証結果を示す。図より、エリア内の計測点数 50 個以上かつ計測回数 3 回以上であ

れば、計測誤差は $\pm 3\text{mm}$ 以内に抑えられ、レベルと遜色ない精度が確保可能であることが確認された。また、レベルは沈下板 1 箇所のみ計測結果でありスタッフの置き方によるばらつきも含まれるが、3DLS は計測エリア全体の平均値であることから、より精度の高い現場管理が可能になるものと考えられる。

国土交通省山陰自動車道で実施した現場転圧試験⁷⁾の中で、3DLS を用いた盛土管理手法の検証を試みた。路盤材料（碎石 M40）を大型の静的締固め機械（マカダムローラ 5 回とタイヤローラ 5 回の計 10 回）で転圧し、転圧中の盛土標高の変化を 3DLS により連続計測した。比較対象として、レベル計測および SRID（透過型 RI 法）による乾燥密度の計測を併せ実施した。撒き出し後と転圧後の計測結果から、転圧による盛土の圧縮率を下式(2) で算出した。

$$3\text{DLS 圧縮率} = \frac{\text{転圧時沈下量}}{\text{敷き均し厚}} \quad (2)$$

図-19 は、3DLS とレベル計測による沈下量の比較結果である。レベル計測は沈下板の天端高さ、3DLS は沈下版周辺の 30cm 正方形エリアの点群データの平均値であるが、両者には概ね良好な相関性を確認できる。図-20 は転圧回数と沈下量の関係について、3DLS とレベル測量を比較した結果である。転圧回数 5 回目以降の収束傾向など、両者の相関性は高い。3DLS では施工エリア全面を計測しており、離散的なレベル計測に比べ、より正確に転圧に伴う盛土沈下の収れん傾向を把握できるものと推察される。

図-21 は、SRID による実測乾燥密度と 3DLS により算出した圧縮率を転圧回数に対する変化としてプロットした。図-20 の沈下量と同様に、乾燥密度も転圧回数 5 回目以降（タイヤローラ転圧）で次第に収束するなど、両者は良く似た傾向を示す。図-22 は乾燥密度と 3DLS 圧縮率の関係を示すが、両者の相関性は高く、3DLS 圧縮率から乾燥密度の推定を行うことが可能と考えられる。図-23 は、図-22 中の回帰式を用いて乾燥密度を推定した結果であるが、図-22 の相関性が前提であるため両者の整合性は非常に高い。3DLS は施工エリア全体を面的に計測できるため、図-22 のような相関関係を用いて、3DLS 圧縮率の面的分布を乾燥密度に置き換え、そのヒートマップを描くことが可能となる。図-24 は、3DLS によって得られた圧縮率をメッシュごとに平均化し、図-22 中の相関式を用いて、施工エ

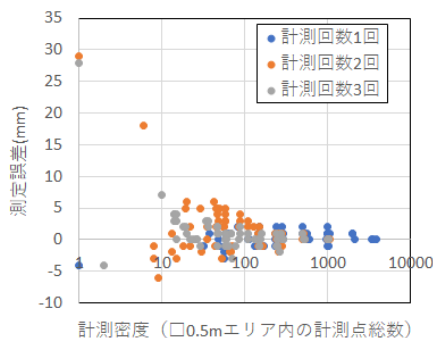


図-18 計測密度と計測精度の関係

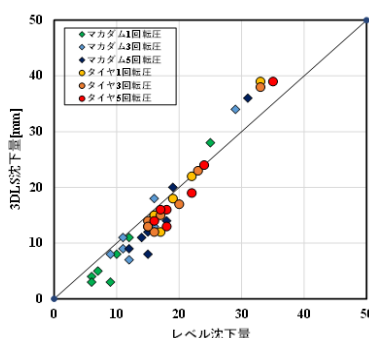


図-19 レベル沈下量との比較例

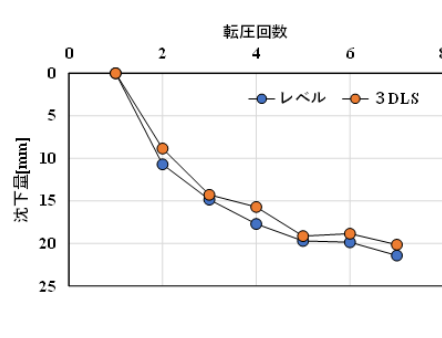


図-20 転圧回数～沈下量関係の比較例

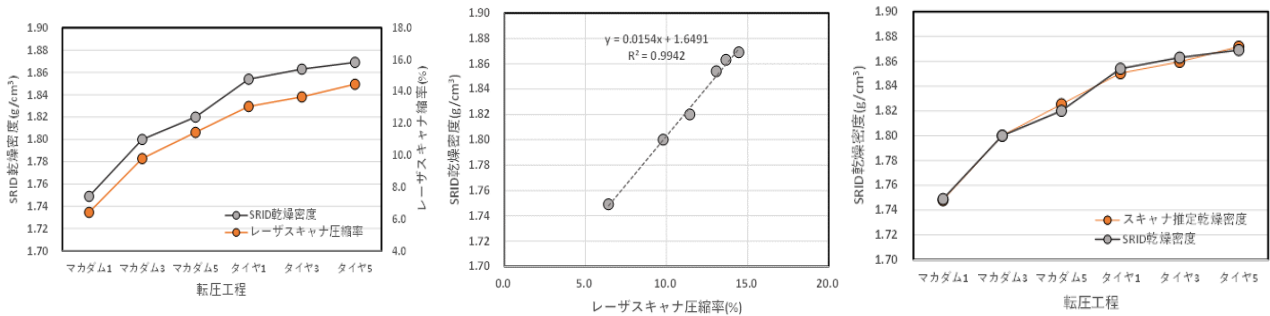


図-21 SRID 密度/3DLS 圧縮率の転圧時変化 図-22 乾燥密度増加率と 3DLS 圧縮率の関係 図-23 3DLS 推定/実測乾燥密度の比較

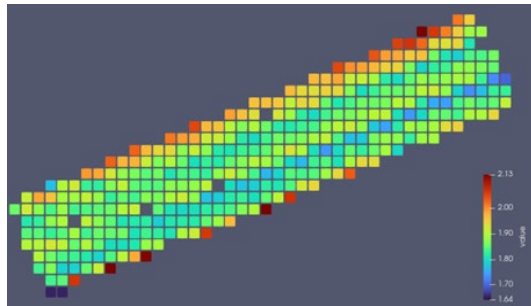


図-24 3DLS 圧縮率を利用した盛土乾燥密度のヒートマップ

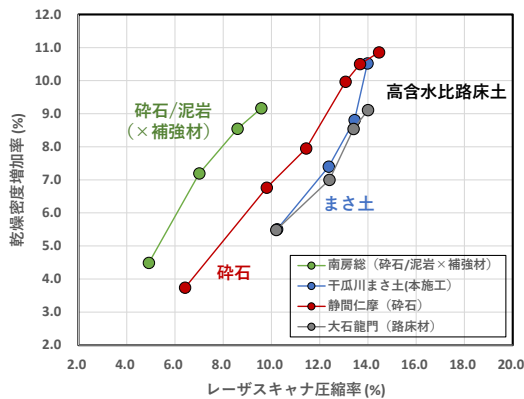


図-26 3DLS 圧縮率と実測乾燥密度の関係

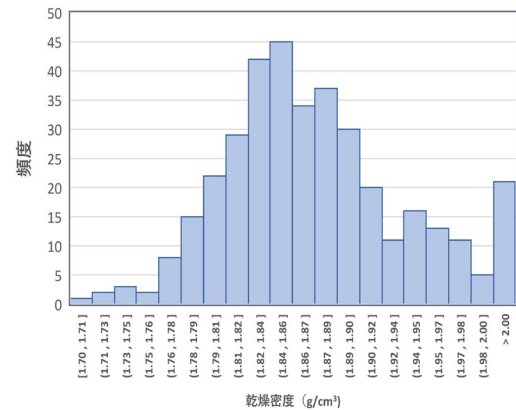


図-25 3DLS 圧縮率による推定乾燥密度のヒストグラム

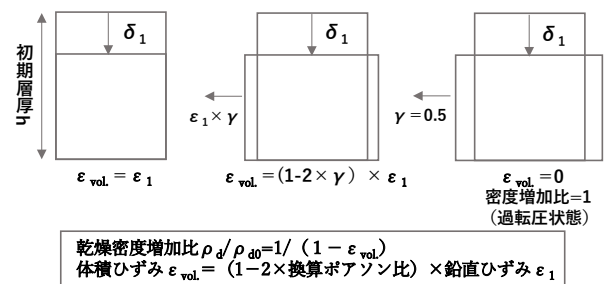


図-27 換算ポアソン比による盛土締固めのモデル化

リアの推定乾燥密度分布を求めた結果を示す。この分布図を用い、例えば施工エリア内で乾燥密度が相対的に低い箇所を抽出し、従来の RI 等で確認すること（ドイツの M3 法⁴⁾）なども可能となる。また、並行して加速度応答法による締固め管理を行った場合には地盤剛性 E_{roller} の分布図を併せダブルチェックを行い、相対的な弱部検出の確度向上を図ることも可能と考えられる。ただし、図-24 で確認できるように、エリア端部やレーン境界部などではローラー転圧による段差や側方変形の影響で値がばらつく可能性があり、異常値の削除といった対処も別途検討が必要である。また、本手法は転圧層の下に基盤層の沈下量が、転圧層のそれに比べて無視できるほど小さいことを前提とすること、及び 3DLS 圧縮率は撒き出し後の初期密度に依存するため、ICT 土工等によりある程度均一な撒き出しが行われていることを前提とする。図-25 は 3DLS 圧縮率により求めた推定乾燥密度のヒストグラムであり、従来の離散的な密度管理に対して、多点的、統計的な現場品質管理が可能となるものと考えられる。この

際、全数管理を前提とした管理規格値の検討が、今後の課題となる。図-26 には、複数の現場（盛土材料：図-6 参照）における乾燥密度増加率と 3DLS 圧縮率の関係例を示す。現場ごと、材料ごとに両者の関係は異なるが、その傾きはほぼ一定である。図中の緑はテールアルメ補強地盤のデータ¹⁶⁾であり、補強材の効果により、このデータのみ左側にプロットされている。図-27 には、3DLS 圧縮率と密度増加率の関係を示す。乾燥密度比は体積ひずみと対応し、体積ひずみはポアソン比を用いて 3DLS 圧縮率から算定される。このポアソン比は、盛土転圧の場合、盛土材料の粒度や含水比、転圧時のウェービングの有無、盛土端部での側方変形等の影響を含む指標と考えられ、便宜的に換算ポアソン比と呼ぶ。この換算ポアソン比の現場実態はどのようなになっているのか。図-26 他の実測データからこの値を逆算し、転圧回数に対して整理した結果が図-28 である。換算ポアソン比は転圧回数と共に減少（密実化）し、さらに、これが高含水比材料→まさ土→砕石→補強土の順に下方に移動する（材料的に高剛性）。同

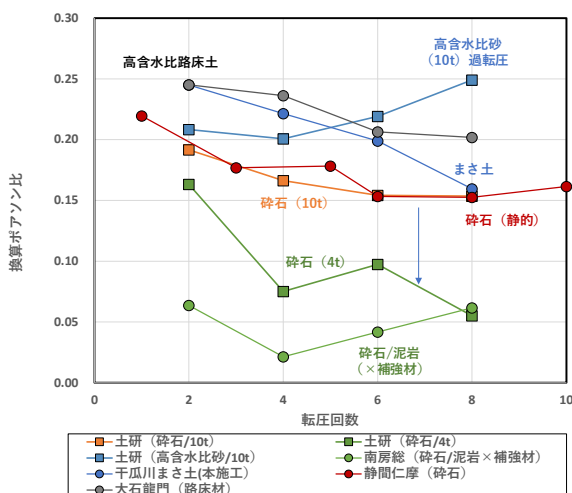


図-28 盛土材料毎の換算ポアソン比と転圧回数の関係

じ砕石でも 4t ローラ転圧¹⁴⁾では 10t の場合よりも値が小さく、転圧時のウェービングや側方変形の違いの影響が現れた結果と考えられる。

3.4 盛土材料のブル撒き出し時画像取得システム

盛土等の土構造物の品質管理においては、どのような盛土材料を現場のどの位置に配置しているのかは重要な管理項目の1つである。そこで、敷き均し作業を行うブルドーザにカメラを取り付け、位置情報と敷き均し面の画像を取得することで、盛土材料のトレーサビリティを可能とするシステムを検討した。以下、その結果を報告する。

道路盛土工事の実現場において、ブルドーザによる敷き均し時の施工面画像取得の検証実験を実施した¹⁷⁾。写真-3 に画像取得するための車載装置、写真-4 に使用したブルドーザ (KOMATSU 製 D37pxi23, 全長 4.7m, ブレード幅 3.2m)、写真-5 にカメラ (GoPro) の設置状況を

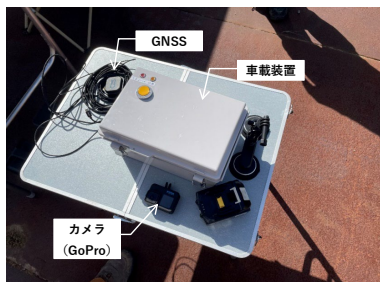


写真-3 車載装置 (プロト) の外観



写真-4 使用した撒き出し用ブルドーザ



写真-5 カメラの設置状況



写真-6 敷き均し作業状況

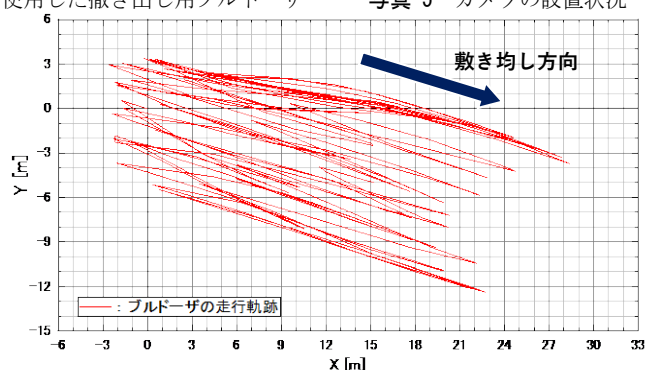


図-29 GNSS で取得した敷き均し時のブルドーザ走行軌跡

これらの写真に示したように、ブルドーザ背面に取り付けたカメラで敷き均し面の画像を取得し、GNSS による位置情報と共に車載装置を介してサーバーへと転送される。

図-29 は、今回の検証実験で取得した敷き均し作業時のブルドーザの走行軌跡の一例であり、敷き均し作業は図の左上から右下方向に実施している。なお、写真-6 にはこの時の敷き均し作業状況を示した。検証実験では、3 秒毎に後方直下の施工面画像を取得しており、取得した画像を図-29 に示した GNSS 位置情報に合わせて出力することで施工範囲における材料分布の把握を試みた。図-30 はその出力結果であり、本事例で取得した計 265 枚の画像を位置情報に合わせてピン止めする形で整理した。この図に示したように、このような整理方法でも施工範囲の材料分布を目視で十分把握できることが確認できる。

一方、材料分布を目視だけではなく定量的に把握する試みとして、画像解析による検討も実施した。取得した敷き均し施工面の画像には左右のクローラ跡が写りこむため、画像中心付近を 1m×1m の範囲で切り出し、画像解析により HSV 値 (Hue : 色相, Saturation : 彩度, Value : 明度) を図-31 のように求めた。H (色相) や S (彩度) は土材料の材質や特性の違いを表し、V (明度) は含水状態等の違いを表すと考えられることから、HSV の平均値を画像の代表値として整理を行った。なお、HSV の平均値は RGB の平均値から算出している。図-32 は、この HSV 平均値を 1m×1m メッシュの面的なヒートマップで表したものである。なお、同じ位置のデータについては、画像取得順に上書きすることで処理している。これらの図に示すヒートマップを描くことで、将来的には、材料や含水比等の違いを定量的且つ面的に把握することが可能

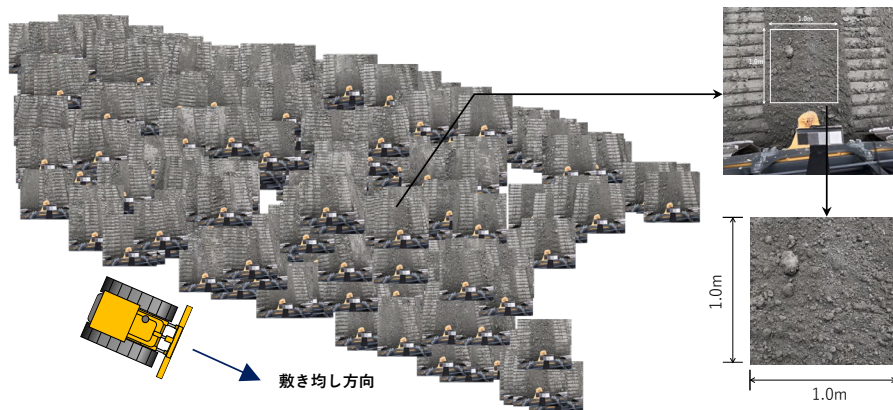


図-30 敷き均し施工面における画像取得結果

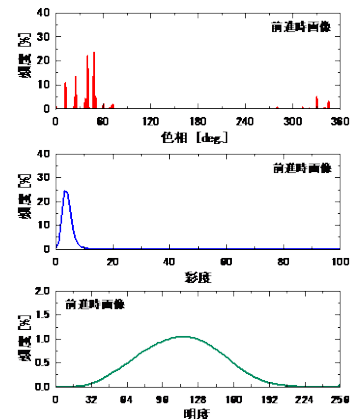


図-31 取得画像の画像解析例

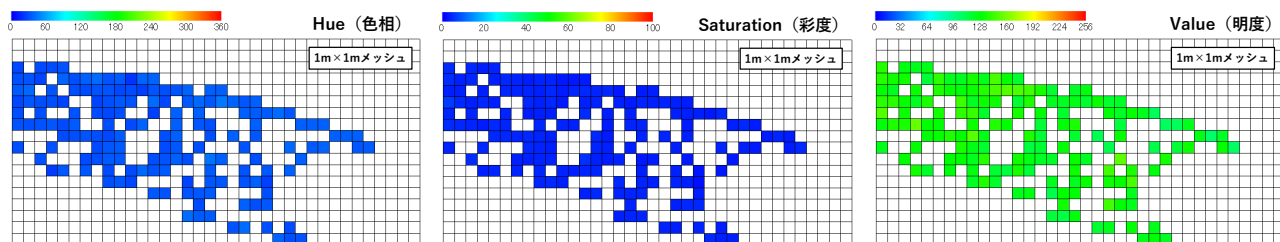


図-32 HSV (色相・彩度・明度) のヒートマップ出力結果 (1m×1m メッシュ)

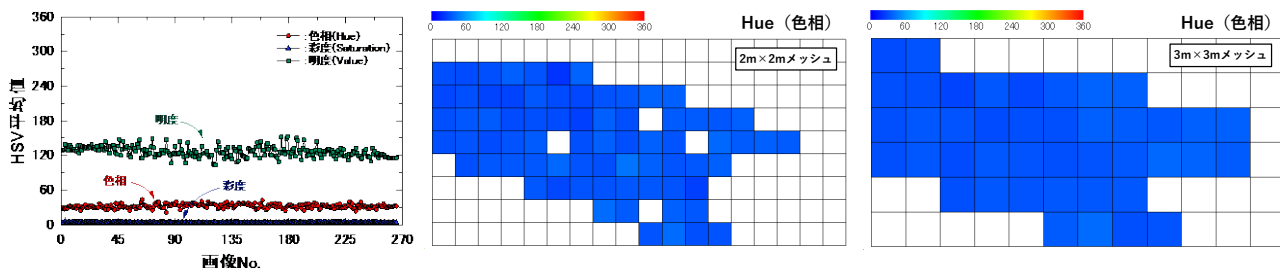


図-33 HSV 平均値の変化

図-34 メッシュサイズを変えた色相のヒートマップ出力結果

となろう。図-33 は、取得した画像 265 枚の HSV 平均値であるが、今回の事例は同一材料であるため、この結果を見ると材料や含水状態に大きな差がなく、均一な材料が搬入・施工されていると言える。ちなみに、図-32 のヒートマップは切り出した画像のサイズに合わせて、1m×1m メッシュで整理しているが、画像データが存在しない色が塗られていない部分（画像データの欠損）が多く見られる。これは、ブルドーザのブレード幅が 3.2m であり、敷き均し作業時の 1 レーン当たりの幅が 2.0～2.5m 程度であることに起因している（1 レーン当たりの幅は、図-29 に示した走行軌跡から判断している）。図-34 は、メッシュサイズを 2m と 3m に変更したヒートマップである。同図から、施工機械や施工条件等を考慮して適切なメッシュサイズを設定することによって、施工面全体を漏れなく評価できることが分かる。

3.5 クラウド型データ蓄積処理システム

図-35 に、AtlasX のクラウド型データ蓄積・分析・可視化システムの概要を示す。3つの IoT 機器で取得したデータはクラウドに送信され、DB (Postgres) に格納される。収集したデータに対しては、ヒートマップ出力、統計分析、相関

性分析、転圧収れん分析等の各種分析を、WEB 環境で実施可能である。本環境はユーザーID とパスワードを付与されたユーザーであれば、誰でも遠隔から操作可能である。図中に示したように、操作はプルダウン機能によって所定の分析機能、対象転圧データ、転圧回数等を選択、画面出力し、ユーザーライクかつ編集可能な結果ファイルとしてダウンロード可能となっている。本システムにより、現場転圧管理の精緻化と高度化、生産性向上に加え、本格的な DX 化、すなわち他部門他部署連携が実現できるのではないかと考えている。

4. AtlasX の現場実証事例

図-36 に、AtlasX の現場適用性の検証を試みた現場および共同研究機関を示す。国土交通省 PRISM 実証工事 3 件（安威川ダム①、ネクスコ大石龍門②、国土交通省干瓜川⑨）、施工総研八戸道路実証⑦、国土交通省舗装工現場実証（山陰自動車道出雲⑩）、ネクスコ管轄現場（甲府トンネル③、新東名用沢⑫）の他、当社 5 現場（内浦トンネル¹⁸⁾ JR 試験盛土⑤、南房総 PDC 補強土壁¹⁶⁾ ⑧、富津ベントナイト混合土^{19),20)} ⑩、内ヶ谷ダム^{21),22)} ⑭及び水海川²³⁾ ⑮セメント改良土）

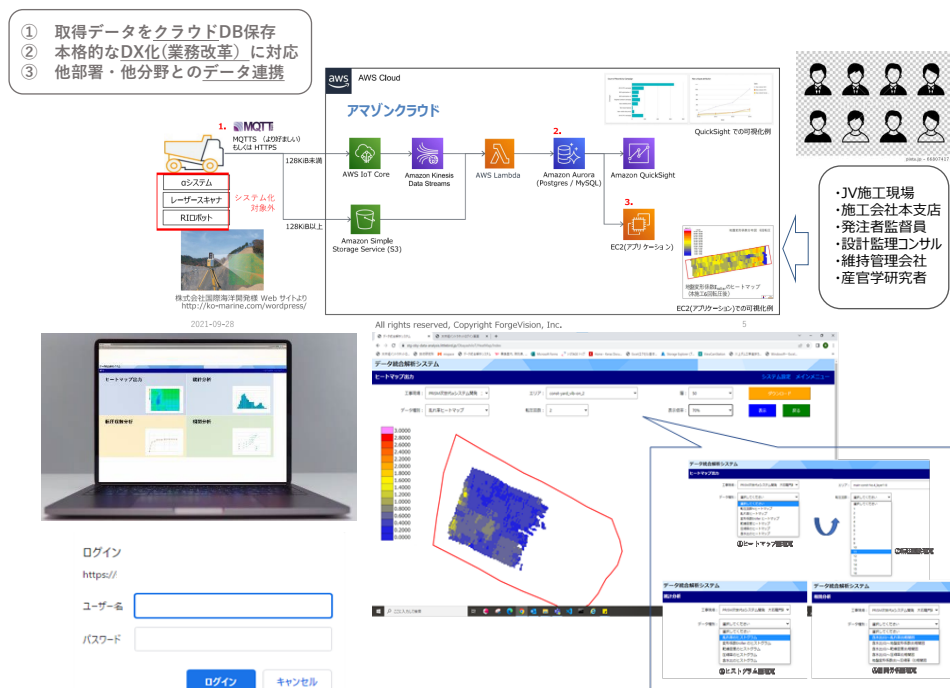


図-35 クラウド型データ蓄積・分析・可視化システムの概要

で実証を行った。外部研究機関の実験施設としては、国土交通省土木研究所¹⁴⁾、²⁴⁾⑮、施工総研⑰、前田道路技研²⁵⁾ ⑬がある。紙面の関係から、以下では国土交通省の舗装工新技術公募現場実証工事⁵⁾ (山陰自動車道⑪)⁹⁾、²⁶⁾、²⁷⁾及びPRISM大石龍門²⁸⁾での実証結果例を中心に報告し、詳細は参考文献に譲る。ネクスコ総研とのAtlasX共同研究の成果²⁹⁾、³⁰⁾については、現在、ネクスコ西日本新名神新免作業所(大林組施工)で施工中の実証データ収集を進めており、過去の共同研究成果と共に次年度に別途報告する。

4.1 国土交通省山陰自動車道実証実験

AtlasXは、大林組、前田道路と共同で国土交通省舗装工新技術公募⁵⁾に応募し、現場実証実験を行った。以下、その結果について、道路舗装基盤(路床/路盤)における地盤剛性E_{roller}の現地計測結果⁹⁾、²⁶⁾、²⁷⁾を中心に報告する。

(1) 現地計測の概要と路床剛性分布の計測結果

図-37に、現地計測の概要と現地計測状況を示す。現地計測は、(a)に示す山陰自動車道令和4年度静間仁摩・大田静間道路の舗装工事区間(前田道路施工)で実施した。(b)は静間仁摩道路における路床および上下路盤上からの計測範囲と現地計測状況を、(c)には舗装構成と現地計測のフローを示す。静間仁摩道路(アスファルト舗装)は、路床上に上下2層の路盤層が構築されており、4t振動ローラによる検査加振(走行)は図中①、③、⑤で示される各々路床上、下層路盤上、上層路盤上の3回に渡って実施された。また、現地で地盤剛性(E_{roller})の値が大中小異なる箇所を数点抽出、マーキングし、小型FWDによる剛性計測を実施した。近接する大田静間道路(コンクリート舗装)は、路床上に

路盤層1層の舗装構成であるが、やはり路床と路盤上で広範囲な剛性分布を取得でき、2工区のデータ比較も可能となったことから、本工区の計測結果も併せ報告する。図-38は、静間仁摩道路の路床上で計測されたE_{roller}分布および散乱型RIとキャスボルで取得した現地の地盤剛性/含水比のヒストグラムを示す。路床計測は切土と盛土が混在する切盛境界を選定して実施した。(a)は盛土施工中の写真であるが、図中に「盛土想定ライン」と記した付近に盛土が分布している。(b)は4tローラの車載PC上でリアルタイム確認した地盤剛性のヒートマップを示す。(a)の施工時写真から想定される切盛境界を図中に白線で示したが、この境界ラインに沿う形でE_{roller}の大きさ(色)が変化している様子を確認できる。50m程度の区間ではあったが、(c)に示すようにこのエリア内で含水比と地盤剛性(キャスボル)の面的計測を実施した。図(d)(e)はこれらのヒストグラ

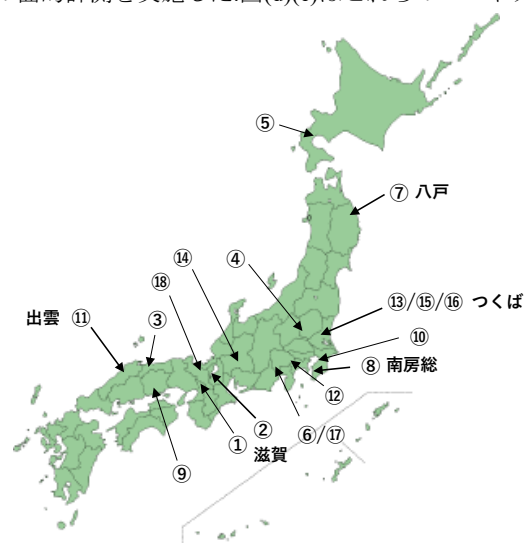


図-36 Atlasx 現場適用性の検証現場

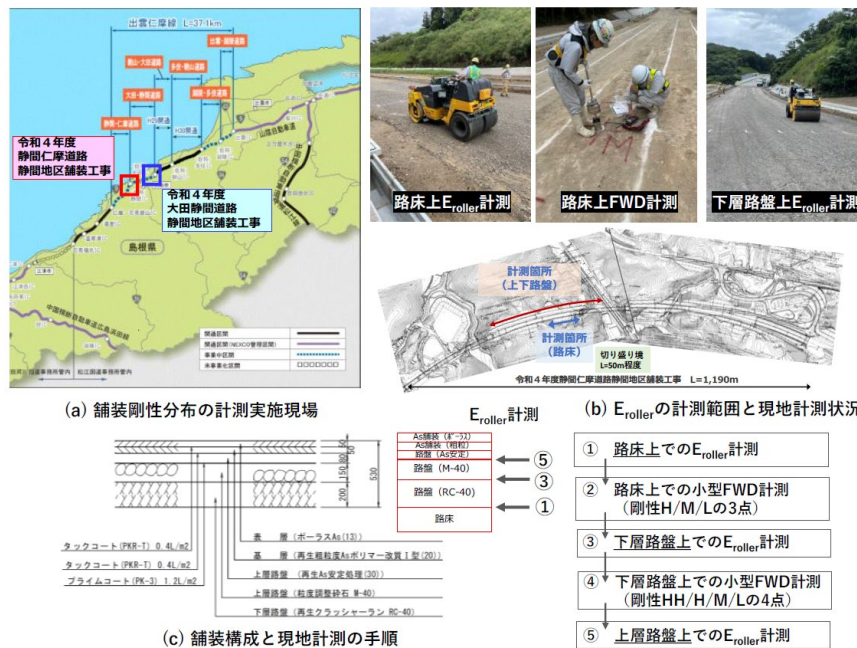


図-37 現地計測の概要と現地計測状況

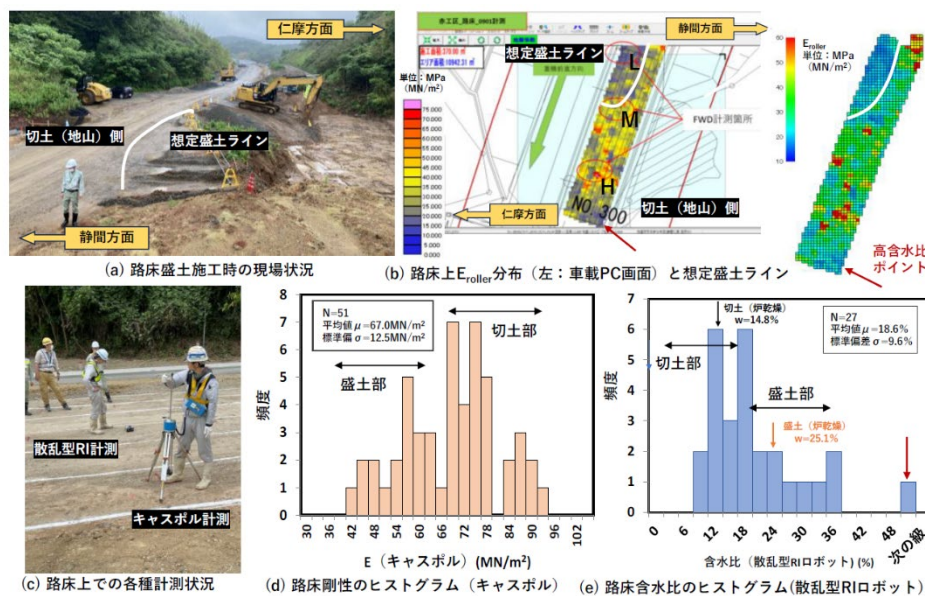


図-38 路床剛性 E_{roller} 分布および諸物性の現地計測結果 (静岡仁摩工区)

ムを示すが、剛性、含水比共に切土部と盛土部の2つの部位が混在していることを伺わせる (現地採取土の炉乾燥含水比も両方で明瞭に異なっていた)。図-39には、近接する太田静岡道路の路床剛性分布を示す。静岡仁摩工区よりも地山切土部の剛性が高く、青色系の改良盛土部 (キャスポルによる推定 CBR は30 近くを記録) との剛性差を、より鮮明に確認できる。リアルタイム表示画面からは、改良盛土部の中にラクダのコブのような形状を確認できるが、(c)は、このライン沿いに地山露頭部を観察した結果を示す。地山は砂礫⇒固結層⇒土砂化層のように性状や強度が頻繁に変化しており、これが(b)に示した横長の E_{roller} ヒストグラムをもたらしたものと考えられる。図-40は、静岡仁摩工区の路床上 (剛性の異なる L/M/H3 点)、下層路盤上 (前記3点と同じ座標点+HH 追加の4点) で実施した小型

FWD の試験結果と、同一地点の E_{roller} との相関性を示す。図の右側に示すように、 E_{roller} と小型 FWD の計測深度が各々異なる事、下層路盤上からの剛性は直下の路盤材剛性の影響を受ける事 (2)で詳述) から、図では2本のラインに分かれているが、同じ下層条件別に見ると、小型 FWD と振動ローラ加速度応答法による地盤剛性値の間には高い相関性を認める事ができる。以上の結果より、振動ローラ加速度応答を用いた地盤剛性 E_{roller} の面的剛性分布が、切盛境界や地山強度の変化などに起因する路床の剛性分布 (不均一性) を正確に反映しものである事が伺われる。

(2) 路盤の積層に伴う剛性分布の変化

図-41に、静岡仁摩道路における(a)路床上(b)下層路盤上(c)上層路盤上からの地盤剛性 E_{roller} 分布の変化を示す。(1)で詳述した(a)に対し、(b)(c)の順に計測領域が広がって

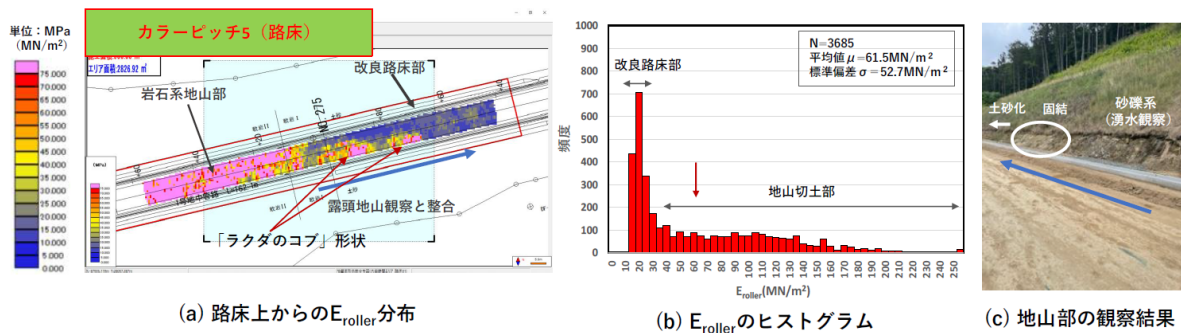


図-39 路床剛性 E_{roller} 分布の現地計測結果と隣接地山の観察結果（大田静間工区）

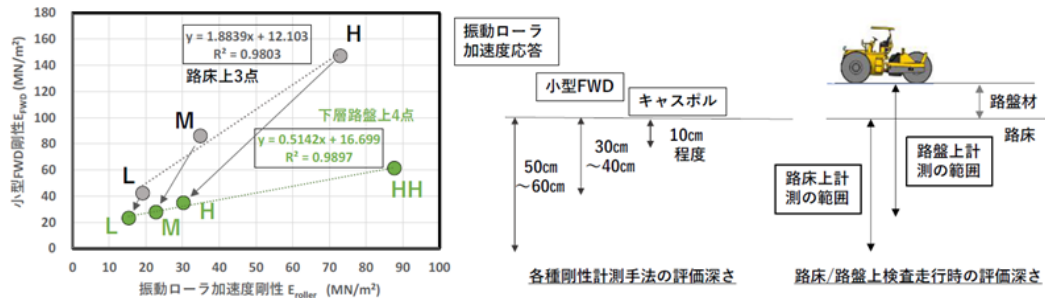


図-40 振動ローラ加速度応答法と小型 FWD 試験による地盤剛性の相関性

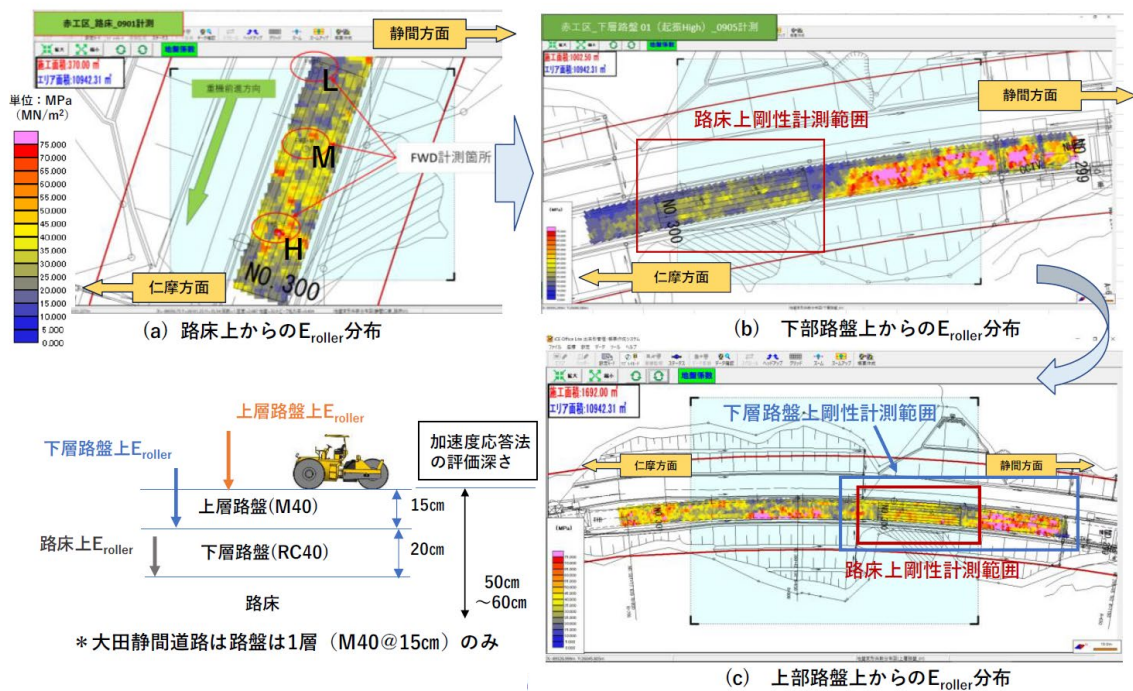


図-41 路盤層積層に伴う剛性分布の変化（静間仁摩道路）

いる。左下には路盤積層方向の断面図を模式的に示したが、下層路盤上では 20 cm の RC40 材の上から、上層路盤上では合計 35 cm の路盤材の上から地盤剛性を計測している。 E_{roller} の評価深度は 4t 級振動ローラでは 50 cm ～ 60 cm 程度との既往実測例²⁾がある。 E_{roller} は直下の路盤層剛性の影響を最も強く受けながらも、その評価深度は、上層路盤上からの計測であってなお、路床面に深にまで及ぶ事になる。これを念頭に図-41 を見ると、(b) で赤く囲った路床計測エリア内にも(a)の路床切盛境の影響がなお残存している

事、ただし(a)の地山強度が高い箇所での路盤上剛性は(b)では全体的に低下している事が分かる。路床剛性の影響を多分に残しつつも、4t 振動ローラ直下の下層路盤層の剛性（地山切土部よりは相対的に低い）の影響で、いわば「路盤クッション効果」のような現象が生じていると思われる。(c)はさらに 15 cm の上層路盤材を施工後のデータを示しているが、今度は上層路盤の高い剛性の影響で同じ路床上計測エリアの地盤剛性が増加している。(b)と(c)の違いは、上下層路盤の仕様（材料×仕上がり厚）の違いに対応し

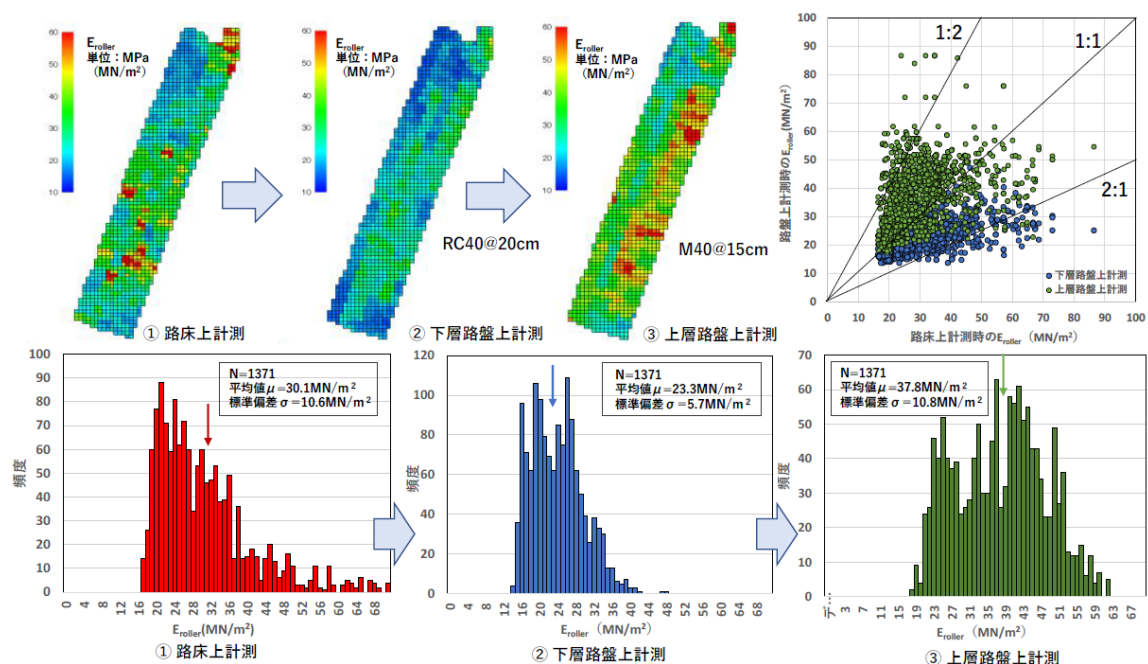


図-42 地盤剛性 E_{roller} 分布およびヒストグラムの変化 (静間仁摩道路)

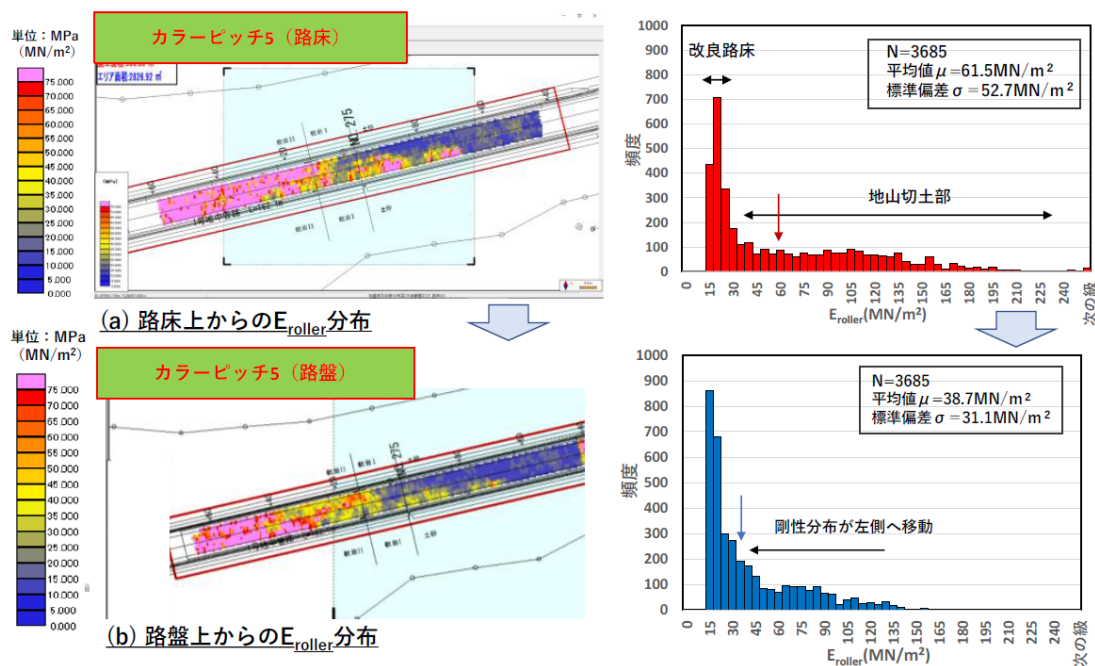


図-43 地盤剛性 E_{roller} 分布およびヒストグラムの変化 (大田静間工区)

ているものと考えられ、舗装の剛性分布が、路床の剛性分布のみならず、その上の路盤材の仕様の影響を受けて順次変化して行く様子を示している。図-42 では、データを路床上計測エリア内に限定し、同一メッシュでの剛性分布の変化を、ヒストグラムを含めて再整理した。上層路盤上で計測した地盤剛性 E_{roller} のヒートマップでは 35 cm 下にある路床剛性の影響 (切盛境) がなお残存しており、盛土側よりも地山切土側で剛性が相対的に大となっている。ヒストグラムは下層路盤のクッション効果でいったん左側へ移動した後、上層路盤の剛性 (おそらく下層路盤より大) の影響で右側への移動が生じている。図-43 は、大田静間道路に

おける路盤積層前後での剛性分布の変化を示す。静間仁摩道路と同様、路盤のクッション効果により同一エリアの剛性が低下するものの、路床剛性境界の影響はそのまま残存している事が見て取れる。ヒストグラムもまた、静間仁摩と同様に左側へ移動し、2 工区共に路床剛性の高いゾーン程、路盤敷設による剛性低下が著しい。図-44 は、路盤クッション効果を定量化するために、路床剛性を横軸に、縦軸に路盤上剛性の低下量 ΔE_{roller} をとって整理した結果である。図より、2 工区のデータは共に右下がりの類似した傾向を示し、路床剛性が大きい地点程、路盤敷設による剛性低下量が大い事を物語っている。本結果については、多層弾性理論を

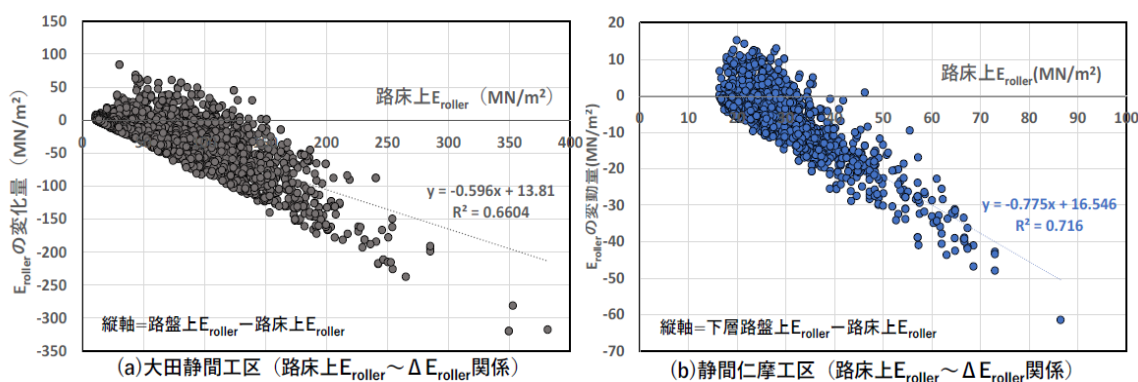


図-44 路床上 E_{roller} と ΔE_{roller} （路盤上 E_{roller} －路床上 E_{roller} ）の関係

用いた定量的評価を別途試みている²⁷⁾が、紙面の関係から、その詳細は参考文献に譲る。

4.2 国土交通省 PRISM 大石龍門実証実験

AtlasX の 2022 年度国土交通省 PRISM 大石龍門実証工事²⁸⁾は、図-45 に示す新名神高速道路大石龍門建設工事（大津サービスエリア予定地）において実施された。施工面積は約 1000m²、材料は細粒分混り土の路体材料で転圧機種は 10t 級振動ローラが用いられた（撒き出し厚 30cm）。図-46 は AtlasX により取得した転圧面物性値の面的分布（ヒートマップ）の例を示す。(a)は α システムによる乱れ率（加速度応答の定量化指標¹⁾、地盤剛性 E_{roller} に対応）の取得結果である。図-45 に示したように、本施工エリアは 2 つの尾根を切土し、その上に路体材料が盛立てられた。このため、切土部の上に盛土が薄層で盛り立てられている領域では、 α システムの地盤剛性は基盤の影響を受けて高く（黄色）、影響の少ない盛土層厚が厚いエリアは低く（青色）検出されている。土の締固め効果は基盤剛性の影響を



図-45 国土交通省 PRISM 大石龍門実証実験ヤード全景

受けるため、(d)の 3DLS による圧縮率もまた、その近傍で大となっている事は興味深い。基盤層の影響を受けないエリアでは転圧回数の増加と共に乱れ率が一旦増加し、6 回以降は減少する過転圧現象を捉えており、 α システムが最適転圧状態のリアルタイム監視に利用可能であることも確認されている。(b)は RI ロボットにより計測された含水比分布である。本施工は 4 日間に渡って行われ、この間、土取場

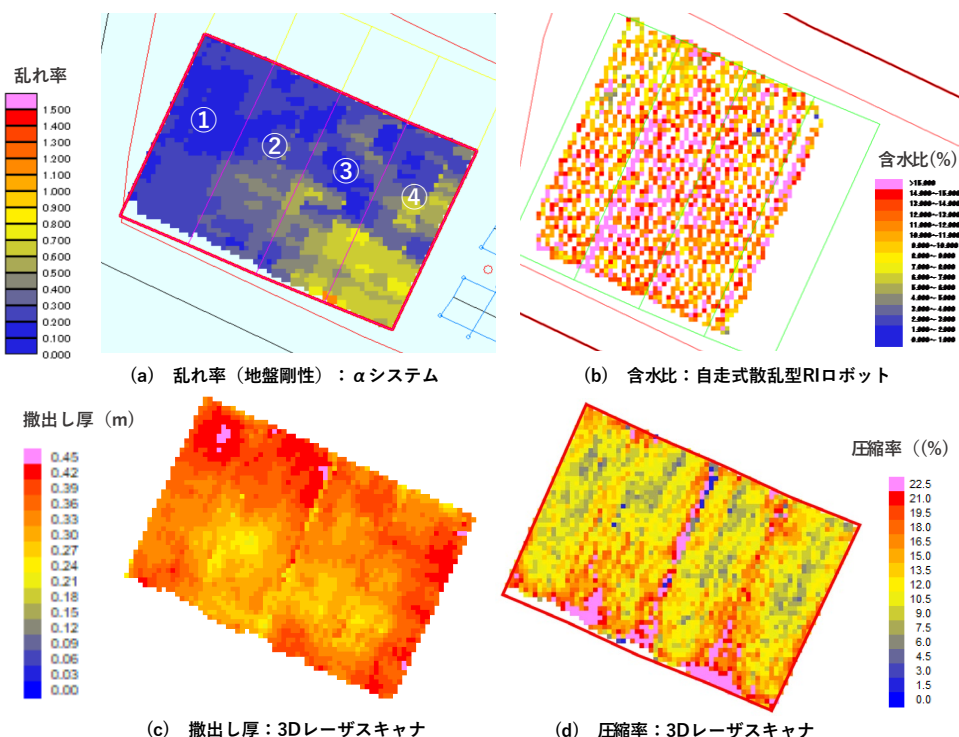


図-46 AtlasX により取得された本施工転圧面の各種物性値のヒートマップ

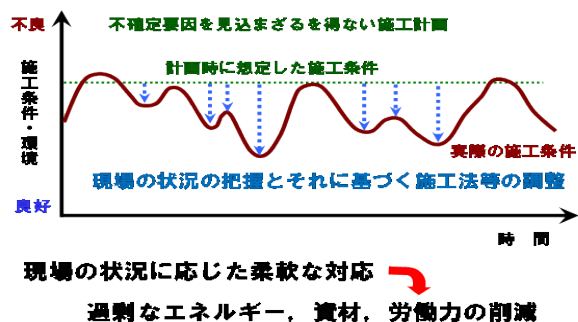


図-47 精緻な現場マネジメントによる現場の生産性向上³¹⁾

が微妙に変化した。その影響もあり本施工ヤードの中心部には相対的に含水比の高い領域が混在している事が分かる。RI ロボットの面的計測は実はもう1回行われたが、その時の含水比は図よりも約4%低かった。気象庁のデータによると2回目の計測を行った週、本地点は1回目比べて日照時間が長く、また風速も大であった。これによる転圧面の乾燥履歴の影響を、RI ロボットは正確にキャッチしていた。(c)は3DLSによる撒出し厚の分布、(d)は同じく圧縮率のヒートマップである。人力による簡易トンボを用いて撒き出した事もあり、撒き出し厚は必ずしも均一ではなく、3DLSはこれをmm単位の精度で炙り出している。(d)の圧縮率のヒートマップからは、前述した切土基盤付近で値が大となる他、施工レーン境界((a)中の①→④の順番に施工が行われた)でのラップ施工による高圧縮率部も確認でき、現場施工状況をこれら物性値によって定量的かつ面的に可視化する事が可能となっていることが分かる。このような現場の材料変動、施工条件、施工結果の可視化がもたらすものは何か。図-47は建山³¹⁾による提案例である。工事計画時に想定した施工条件は実際の現場のそれとは必ずしも一致しない。図-46に示すような現場状況の把握がほぼリアルタイムに可能となれば、実情に基づく施工法の調整を行い、過剰なエネルギー、資材、労働力を削減する事で現場の生産性向上を図る事が可能となる。もちろん、このような可視化が、同時に現場リスクの合理化や締固め品質の担保を担うであろう事は言を俟たない。

5. 現場管理業務の生産性向上とDX化

図-48に、AtlasX導入による現場品質管理業務の生産性向上の試算結果を示す。αシステムと小型FWD(地盤剛性：上)では日辺り計測点数が200倍、要員は2人→0人/日(自動)、コストは83%減、RIロボットと砂置換(密度・含水比計測：中)では計測点数が17倍、要員は2人→0.2人/日(自動)、コストは27%減、クラウド環境を利用した事務所でのデータ整理業務は18人→4人/月、コストは25%減と試算され、従来手法に対して低コスト、少ない要員数で多点計測が可能となる。3DLSについては従来のレベル測量で圧縮率の計測等を行っていないため試算していないが、計測点数の増加度合は地盤剛性のそれを上回るものとなる。図-

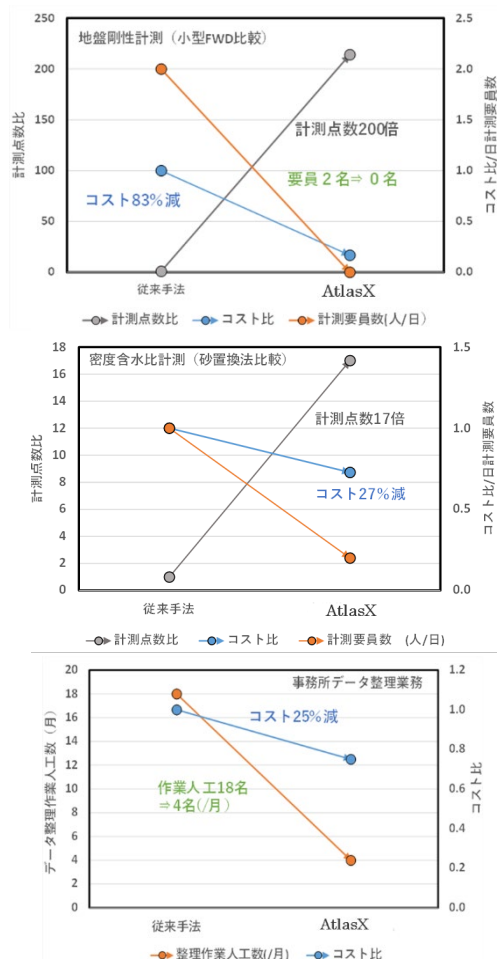
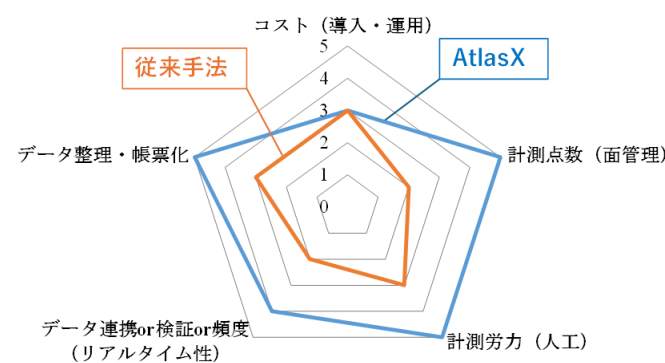


図-48 AtlasXによる現場品質管理業務の生産性向上

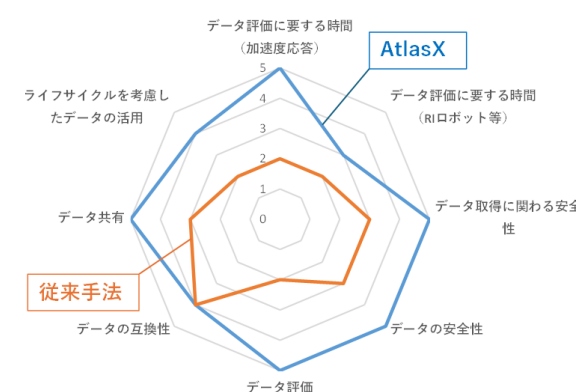
49に、AtlasX導入の効果を、従来手法と比較してレーダーチャートに整理した(0～5のスコアで表示)。(a)は現場作業性やデータ量・人的作業量の変化を、(b)はデジタルライゼーション(DX化)の効果を従来手法と比較して示した。図中に示した各種項目で、AtlasXの現場生産性向上やDX化の効果を確認できる。コストとデータ互換性の2つの項目は図で同等となっている。前者については、RIロボットなどが試作機の費用を計上しており、3DLSのレンタル費用を含めた合計値としてこのような結果となっており、今後生産ロット数の増加に伴い改善の余地がある。データの互換性については、クラウドに蓄積した品質データをGeoJson形式で吐出す機能の開発まで完了しているが、現時点で受け手側のデータ形式が不確定であることから、試算から除外した。

謝辞：

AtlasXは、株式会社大林組と共同で開発した技術である。大林組技術研究所(東京都清瀬市)の古屋弘氏、稲川雄宣氏、松崎晃氏、寺本昌太氏の各位には、多大なるご協力とご支援を頂いた。図-36中に示した現場検証実験では、フジミコンサルタント株式会社の佐藤寛氏、株式会社テー・シー・アイの小瀬滝男氏、株式会社アクティブ・ソリューション



(a) 現場作業性やデータ量・人的作業量の変化



(b) デジタイゼーション (DX 化) の効果

図-49 AtlasX による現場品質管理業務の生産性向上と DX 化の効果

ヨンの鈴木瑞徳氏、ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社谷口龍氏の各位の助力を得た。4 章で示した現場検証事例は、令和 4 年度国土交通省「舗装工事の品質管理の高度化に資する技術」公募の現場実証の一環として実施したものである。本計測を実施するに際し、現場をご提供頂いた国土交通省中国地方整備局松江国道事務所の各位、および前田道路株式会社の加藤康弘氏に謝意を表す。AtlasX の基本構想は、ネクスコ総研との共同研究における議論をベースとする^{2),29),30)}、中村洋丈氏を始めとするネクスコ総研土工研究室の各位に謝意を表する次第である。また、国立研究開発法人土木研究所とも共同研究を行っており、その成果も今回の報告に含まれる。詳細は文献^{14),24)}に譲るが、先端技術チーム橋本毅氏他土木研究所の各位に謝意を表す。

面的・多点的な新しい現場土工品質管理手法については、土木学会建設用ロボット小委員会「土工・舗装工における高度品質管理とその活用法に関する検討ワーキンググループ」にて AtlasX を含めた最新の現場品質管理技術とその現場適用法について現在も活発な議論が続けられている。ワーキングの委員長である建山和由立命館大学教授には、αシステム開発当初より継続的なご指導を頂いている。末筆ながら、記して謝意を表する次第である。

ネクスコ総研、土木研究所、前田道路株式会社とは、道路舗装上からの E_{roller} 計測による路盤、路床の弱部抽出の可能性を現在も検討中である。その成果は次年度に報告する。

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.652III-51, pp.115-123, 2000.
- 2) 石黒健、平田昌史、古屋弘、内山恵一、池永太一、安部哲生、日下寛彦、中島康介、中村洋丈：振動ローラ加速度応答法を用いた新しい ICT 土工品質管理手法の提案、土木建設技術発表会、2020.
- 3) 中村洋丈：盛土地盤転圧試験における計測値収束の判定方法、22-3-5-02, 第 60 回地盤工学研究発表会、2025.
- 4) 古屋弘：振動ローラ加速度応答法による盛土締固め

の施工事例、基礎工 Vol.48.No.11, pp.84-87, 2020.9.

- 5) 国土交通省関東地方整備局：舗装工事の品質確保の高度化に資する技術公募、令和 4 年度～令和 6 年度。
(<https://www.ktr.mlit.go.jp/gijyutu/gijyutu00000253.html>)
- 6) 古屋弘、松崎晃、稲川雄宣、石黒健、平田昌史、津田啓史：4t 級小型振動ローラによる検査加振の推奨条件と路面性状への影響、第 60 回地盤工学研究発表会、2025.
- 7) 稲川雄宣、松崎晃、古屋弘、石黒健、平田昌史、津田啓史：大型静的締固め機械を用いた路盤材料の現場転圧試験事例、第 80 回土木学会年次学術講演会、2025.
- 8) 石黒健、平田昌史、津田啓史、岩谷隆文、古屋弘、稲川雄宣、松崎晃、建山和由：振動ローラ加速度応答法により求める地盤剛性 E_{roller} に関する一考察、第 60 回地盤工学研究発表会、2025.
- 9) 津田啓史、石黒健、平田昌史、岩谷隆文、古屋弘、稲川雄宣、松崎晃：振動ローラ加速度応答法による道路舗装剛性分布の現地計測事例（その 1）現地計測の概要と路床剛性分布の計測結果、24-11-3-02, 第 59 回地盤工学研究発表会、2024.
- 10) 土木学会建設用ロボット委員会振動締固めに関する研究 WG 活動報告書、2.2.1 及び 4.2.2, 2022.
- 11) 稲川雄宣、古屋弘、松崎晃、石黒健、平田昌史：AtlasX の開発（その 1）-新しい盛土品質管理築手法の構築一、2022 年度 i-construction シンポジウム.
- 12) 松崎晃、古屋弘、稲川雄宣、石黒健・平田昌史：AtlasX の開発（その 2）-自走式散乱型 RI ロボットの開発一、2022 年度 i-construction シンポジウム.
- 13) 谷口龍ほか：散乱型 RI 水分計の導入による含水比測定効率化、Kansai Geo-Symposium 2020—地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム—, No.4-4, 2020.1
- 14) 荒井滉矢、橋本毅、石黒健、平田昌史、津田啓史、岩谷隆文、古屋弘、稲川雄宣、松崎晃：振動ローラ加速度応答法を用いた多層地盤の剛性計測実験（その 1）室内大型土槽実験の概要と地盤剛性計測結果、23-11-4-06, 第 59 回地盤工学研究発表

会,2024.

- 15) 古屋弘,松崎晃,石黒健,津田啓史,加藤康弘,伊藤勇貴,谷口龍:自走式散乱型 RI ロボットを用いたアスファルト舗装密度の現地計測事例,V-828,第 79 回土木学会年次学術講演会,2024.
- 16) 小嶋一聡,斎藤郁真,石黒健,平田昌史,古屋弘,稲川雄宣,松崎晃,佐藤寛:大規模補強土工法における次世代 α システムの適用事例,第 59 回地盤工学研究発表会,2024.
- 17) 津田啓史,平田昌史,石黒健,松崎晃,古屋弘,稲川雄宣:ブルドーザの施工面画像を用いた盛土材料特性の面的管理手法の検討,第 60 回地盤工学研究発表会,2025.
- 18) 中島進,笠原康平,中村貴之,景山隆弘,川中島寛幸,阪田暁,千代啓三,石黒健,平田昌史:トンネル発生土の新幹線盛土への適用性及び施工管理法に関する研究,地盤工学ジャーナル,Vol.20,No.1,pp.153-172,2025.
- 19) 久慈雅栄,石黒健,福田和人,平田昌史,岩谷隆文,仁平義祐:ベントナイト混合土に対する次世代 α システムの適用性実験(その 1~転圧試験の概要と加速度応答法による計測結果~),CS12-27,第 79 回土木学会全国大会,令和 6 年 9 月.
- 20) 福田和人,石黒健,平田昌史,久慈雅栄,岩谷隆文,仁平義祐:ベントナイト混合土に対する次世代 α システムの適用性実験(その 2~レーザースキャナと自走式散乱型 RI による計測結果,CS12-28,第 79 回土木学会全国大会,令和 6 年 9 月.
- 21) 西條佳祐,津田啓史,岩谷隆文,石黒健,平田昌史,上馬場靖,桑野陵一,滑川和臣:CSG 工法に対する次世代 α システムの適用性実験(その 1)~現場転圧試験の概要と各種計測結果~,VI-516,第 79 回土木学会全国大会,令和 6 年 9 月.
- 22) 津田啓史,岩谷隆文,石黒健,平田昌史,大塚悠大,上馬場靖,桑野陵一,滑川和臣:CSG 工法に対する次世代 α システムの適用性実験(その 2)~現場転圧試験の概要と各種計測結果~,VI-517,第 79 回土木学会全国大会,令和 6 年 9 月.
- 23) 津田啓史,松尾翔太,筒崎卓,石黒健,岩谷隆文,平田昌史:土工品質管理システム「AtlasX」の INSEM 材への現場適用について,III-323,第 80 回土木学会全国大会,令和 7 年 9 月.
- 24) 橋本毅,荒井滉矢,石黒健,平田昌史,津田啓史,岩谷隆文,古屋弘,稲川雄宣,松崎晃:振動ローラ加速度応答法を用いた多層地盤の剛性計測実験(その 2)地盤剛性 E_{roller} と他手法剛性との比較および路盤積層効果の考察,23-11-4-07,第 59 回地盤工学研究発表会,2024.
- 25) 松崎晃,古屋弘,稲川雄宣,石黒健,平田昌史,津田啓史:振動ローラ加速度応答法の舗装上検査走行への適用の取り組み,第 80 回土木学会年次学術講演会,2025.
- 26) 石黒健,平田昌史,津田啓史,岩谷隆文,古屋弘,稲川雄宣,松崎晃:振動ローラ加速度応答法による道路舗装剛性分布の現地計測事例(その 2)路盤の積層に伴う剛性分布の変化,24-11-3-03,第 59 回地盤工学研究発表会,2024.
- 27) 松崎晃,稲川雄宣,古屋弘,寺本昌太,石黒健,平田昌史,津田啓史,岩谷隆文,建山和由:振動ローラ加速度応答法による道路舗装剛性分布の現地計測事例(その 3)多層地盤を対象とする剛性評価式の適用性検証,24-11-3-04,第 59 回地盤工学研究発表会,2024.
- 28) 石黒健,平田昌史,古屋弘,稲川雄宣,松崎晃,佐藤寛:ICT 土工締固め品質管理「AtlasXの開発」-国土交通省 PRISM 大石龍門実証工事における試行事例-,土の締固め合理化シンポジウム,2020.
- 29) 中村洋丈,藤岡一頼,古屋弘,松崎晃,石黒健,津田啓史:振動ローラ加速度応答法による締固め品質管理と道路保全への活用,III-174,第 79 回土木学会年次学術講演会,2024.
- 30) 中村洋丈,藤岡一頼,古屋弘,松崎晃,石黒健,平田昌史:振動ローラ加速度応答法を用いた路床品質管理の実証実験,23-11-4-08,第 59 回地盤工学研究発表会,2024.
- 31) 建山和由:土木学会建設用ロボット委員会 振動ローラの振動計測による締固め施工管理手法の確立に向けた研究ワーキンググループ振動締固めに関する研究 WG—WG 活動報告書,第 7 章まとめと今後の展望,令和 4 年 1 月.
- 32) 松崎晃,稲川雄宣,古屋弘,石黒健,平田昌史,津田啓史,谷口龍:自走式散乱型 RI ロボットによる取得データの精度に関する考察,第 60 回地盤工学研究発表会,2025.
- 33) 稲川雄宣,古屋弘,松崎晃,石黒健,平田昌史,津田啓史,岩谷隆文:高精度レーザースキャナーを活用した盛土転圧効果の面的評価の試み,第 60 回地盤工学研究発表会,2025.