



Title	センシングデータを用いた4D施工管理システムの高度化に関する研究
Author(s)	高尾, 篤志
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/103089
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

センシングデータを用いた
4D 施工管理システムの高度化に関する研究

高 尾 篤 志

2025年2月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第 1 章	序論.....	1
1.1	研究の背景.....	1
1.1.1	建設業をとりまく現状と課題.....	1
1.1.2	建設現場における既存構造物の計測の現状.....	1
1.1.3	鉄道近接工事における計測に関する課題.....	2
1.1.4	盛土工事におけるトレーサビリティに関する課題.....	4
1.1.5	ICT 土工における施工履歴データの現状.....	5
1.2	研究の目的.....	7
1.3	論文の構成.....	8
第 2 章	既往の研究.....	11
2.1	センシングデータと BIM/CIM の統合に関する研究.....	11
2.2	建設分野のトレーサビリティに関する研究.....	12
2.3	土工事の管理に関する研究.....	14
2.4	本研究の新規性.....	15
2.4.1	4D BIM/CIM モデルとセンシングデータの統合に関する研究.....	15
2.4.2	盛土工事におけるトレーサビリティに関する研究.....	15
第 3 章	4DSCM システム.....	17
3.1	本章の概要.....	17
3.2	4DSCM システムの概要.....	17
3.2.1	4D BIM/CIM モデル.....	18
3.2.2	センシングデータベース管理システム.....	20
3.2.3	4DSCM システム.....	21
3.3	4SCM システムの実装.....	22
3.3.1	4D BIM/CIM モデルの構築.....	22
3.3.2	センシングデータの連携方法.....	23

3.3.3	施工状況とセンシングデータの関連付け	26
3.4	現場適用	28
3.4.1	現場概要	28
3.4.2	適用現場の4次元モデル	32
3.4.3	センシングデータの連携	32
3.4.4	4DSCM システムによる管理	33
3.5	考察	36
3.6	まとめ	37
第4章	センシングデータの可視化と分析	39
4.1	センシングデータの可視化と分析手法	39
4.1.1	センシングデータの可視化	39
4.1.2	センシングデータの分析	41
4.2	分析結果	42
4.2.1	適用現場概要	42
4.2.2	距離グループの分類	44
4.2.3	センサグループの分類	45
4.2.4	タスクグループの分類	46
4.2.5	統計分析結果	46
4.3	考察	50
4.4	まとめ	50
第5章	土砂トレーサビリティ管理システム	53
5.1	本章の概要	53
5.2	土砂トレーサビリティ管理システム	53
5.2.1	システム概要	53
5.2.2	ダンプアップ検知センサ	54
5.2.3	センサデータプラットフォーム	56
5.2.4	管理アプリケーション	57

5.2.5	3次元土工管理図	59
5.3	現場適用	62
5.4	考察	66
5.5	まとめ	67
第6章	結論	69
6.1	結論	69
6.2	今後の課題	70
参考文献		71
謝辞		75

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 建設業をとりまく現状と課題

建設分野は、製造業と比べて生産性が約半分である上に、全産業平均と比べ建設業における高齢就業者の占める割合が高いことに加え、若年層の就業者の割合が低くなっていることから、人手不足は深刻であり、ICT（Information and Communication Technology）を活用した生産性向上が喫緊の課題となっている [1]。建設現場における ICT の活用として、測量、施工、施工管理などにおいて UAV（Unmanned Aerial Vehicle）や ICT 建設機械、IoT（Internet of Things）センサ等の導入が行われている。ICT 施工として土工事をはじめ様々な工種にそれらの ICT が導入され、UAV を使用した起工測量や出来形測量、マシンコントロール機能を持つ建設機械や GNSS（Global Navigation Satellite System）締固め管理システムを使用した施工により、日当たり施工量の増加や検査作業の省力化などの効果が得られている [2]。

一方で、UAV や ICT 建設機械等の導入により、建設現場において、従来の施工管理情報に加えて、ICT 建設機械の 3 次元設計データ等の導入時に必要なデータや ICT 活用後に取得される多種多様なデータを扱うことが必要となった。それらのデータ処理には専門的な知識が必要であり、場合によっては膨大なデータが取得されるため、データの処理等に多くの時間がかかり負担となっている。そのため、UAV や ICT 建設機械等の様々な ICT を活用する近年の建設工事において、導入した ICT 機器により取得されるデータを十二分に活用できていない。また、工事における管理項目である工事進捗管理、品質管理（転圧管理、材料管理）、出来形管理についてのデータが個別に管理されており、効率的にデータを活用することが難しい。そのため、データを集約し、一元的に管理するプラットフォームの構築と、プラットフォームを利用したデータ連携および利活用による更なる効率化が求められている。

1.1.2 建設現場における既存構造物の計測の現状

インフラ構造物にセンサを設置して計測を行うことで、リアルタイムな監視が可能となり、異常の早期発見につながり、インフラ構造物を共用する際の安全性の向上に寄与する。また、データに基づき、定量的に構造物の状態を評価することが、インフラ構造物の維持管理業務の効率化やコスト削減につながる。さらに、センシングデータを分析することでインフラ構造物の寿命を正確に予測できる可能性が高まり、補修・改修計画や将来的な更新工事の設計に役立つ情報を取得することができる。

一方、建設現場においては、工事の影響を可視化するために様々なセンサを用いたモニタリ

ングや計測作業が実施されている。例えば、重機作業等によって発生する騒音や振動の計測、地盤改良や掘削工事などによる周辺地盤の隆起や沈下などの変動の計測、施工場所に近接する既存構造物の変形や傾斜の計測などがある。図 1 は建設現場における計測作業の状況であり、図 1 a)は薬液注入による地盤改良時における周辺道路の変位計測のためにノンプリズム自動追尾型トータルステーションを設置し、定期的な計測を行っている状況である。また、図 1 b)は高架下道路において掘削工事を行う際の既存高架の変形・傾斜を確認するための計測の状況である。このように建設現場においては、様々な計測が行われており、その結果を施工管理において活用している。



(a) 道路地盤の変位計測（自動）



(b) 既存高架の変位計測（手動）

図 1 施工現場における計測状況

1.1.3 鉄道近接工事における計測に関する課題

鉄道近接工事は、列車運行に影響を及ぼす可能性のある範囲において行われる工事である。例えば、線路沿線で行われる掘削作業の影響範囲が既存の鉄道構造物と重なる掘削工事や工事で使用する重機や足場が転倒した場合に鉄道構造物の存在する範囲に侵入するような工事である。鉄道近接工事に該当する場合、工事による既設の構造物および設備への影響や異常の有無を検知し、報告することが土木工事安全施工技術指針 [3]に定められている。特に供用中の鉄道に近接する場合は、工事の影響を最小限にすることが求められ、施工中の鉄道構造物や周辺地形の計測、鉄道構造物と施工機械等の離隔確認などを行わなければならない。鉄道近接工事の中で、土地の改変にともなう掘削作業を行う場合は、軌道周辺地盤の変形の影響によって軌道の沈下や隆起が発生することになれば、列車の脱線等の重大な事故につながりかねない。事故を未然に防止するために、例えば、鉄道の近傍で立坑を構築するような作業を行う場合は、軌道を支持する基礎地盤である施工基面の沈下計測を行い、軌道の沈下や隆起の状態を早期に把

握し、沈下等が発生した場合は、迅速に軌道の沈下等への対応を実施することで列車運行への影響を低減することが必要である。そのため、施工基面の沈下計測が重要であり、鉄道側の用地境界等に測定点を設置し、日常的に計測を行う。計測にあたっては、高い頻度が求められ、専任の人員が配置されることもあり、沈下計測を行う施工延長が長い場合は、測定点数が大量になり、時間と労力を要することになる。

高頻度の計測や専任の人員配置は、人手不足の建設現場では、大きな負担となるため、IoT センサを設置することによる計測の自動化が進められている。筆者ら [4]は計測業務の労力削減を目的として、IoT センサの設置により自動的に情報を収集し、沈下計測のみならず周辺構造物等の管理・監視を行っている。IoT センサを用いる場合、現場の各所に設置したセンサの管理は、Web ブラウザ上の管理システムにより行っている。建設現場において、センサを用いた計測では、施工の進捗によって変わる施工箇所に応じて、センサの移設が発生し、センサの設置位置や方向、設置する部材、作業内容に対する管理値等が変更される。それらの変更の管理システムへの登録作業は、日々の施工進捗を確認しながら、担当者が手動で設定を行い、変更の経緯を含め工事関係者に情報共有する必要がある。しかし、情報共有が十分でない場合は、変更の経緯を知らない別の担当者はセンサの計測値を誤認する可能性がある。例えば、管理値が変更されたことの情報の伝達ができている場合、変更されたことを知らない担当者は、センサの計測値を見た際に、変更前の管理値を用いて計測値を評価してしまうことで問題のない計測値に対して対策が必要だと誤認してしまう事象が起こり得る。施工段階において取得されたセンサの計測値は、センサの計測対象物の近傍で行われている複数種類の施工の影響や作業時の気象条件など、様々な影響を含んでおり、計測値のデータだけでは、計測値の変動の要因を特定することは困難である。そこで、作業日報や設計図書などのセンサの計測値以外のデータを活用して、施工段階で発生した事象とその影響を評価するが、それらの情報は関連付けて管理していないため、データを活用する際の情報整理に労力がかかるという課題がある。

また、センサの計測値が管理システム上で設定された管理値を超過した際に、管理システムから担当技術者へ警告が発せられる。警告を受け取った技術者は、センサの計測値と警告発出時の施工場所の状況を調査し、原因の究明と対策の実施を行わなければならない。そのため、現地確認の他、センサの計測値の分析、工程表や作業計画書による作業内容の確認等を行うが、工程表や作業計画書などの施工管理に関わる資料とセンサの管理システムのデータは一元管理されておらず、個別の資料を整理し原因との関連について分析を行うため、原因の究明のための資料の整理に労力を要する。

その他鉄道近接工事における課題として、共用している列車の運行の影響により、十分な作業時間や作業ヤードが確保できにくい、新設構造物と既設構造物の取り合いは2次元図面だけでは把握しにくいといった課題がある。そのため、点群データやBIM/CIM (Building/ Construction Information Modeling, Management) を活用することによって、鉄道構造物と作業で使用する重機等の機材の離隔の確認など、作業内容と鉄道構造物との位置関係を3次元的に可視化でき、安全管理、工程管理が効果的に実施されている [5]。さらに、BIM/CIM には3次元モデルに対し

て工程情報を付与した 4 次元モデルがあり、施工計画などに活用されている [6]。

1.1.4 盛土工事におけるトレーサビリティに関する課題

近年の土工事、特に盛土工事においては大規模化とともに、建設発生土等のリサイクルや残土の利用が推進され、複数の種類の土砂を扱う工事が増えている。建設発生土は様々な場所において発生したものであるため、品質にばらつきがあり、盛土工事の品質確保のためには工事進捗管理および材料管理が重要になっている。さらに、2021 年 7 月に発生した熱海の土石流災害以降、盛土規制法 [7]が施行されるなど、盛土工事における適正なトレーサビリティ管理の必要性が高まっている。

一般にトレーサビリティとは、「考慮の対象となっているものの履歴または所在を追跡できること」と定義されており、農産物・食品・医薬品・工業製品などの商品やその原材料・部品などを個別に識別し、生産から加工・流通・販売・廃棄までの過程を明確に記録することによって、商品からさかのぼって履歴情報を確認できることとしている [8]。本研究では、盛土工事におけるトレーサビリティについて、履歴情報を確認できることという点は、盛土の材料となる土砂の履歴情報を確認できることと定義する。ここで、土砂の履歴情報とは、どこの土取場で積み込んだ土をいつ盛土工事現場のどこに盛土したかを示すものとする。

盛土工事において適正な材料の使用および施工が行われないと盛土の崩壊など重大な災害につながる可能性があり、適正な施工が行われたことの証明として盛土工事の品質管理ではトレーサビリティ管理が必要である。従来、盛土工事のトレーサビリティ管理として、土工管理図（図 2）が用いられている。土工管理図とは、どこから運搬した土砂をどこに盛土したかを土砂ごとに色分けし、プロットした図である。図 2 は道路土工における土工管理図を示したものであり、行は、路体や路盤などの施工層を示しており、列は道路縦断方向における施工位置を示している。例えば、147m 地点の路体に土取場 D より搬入した土砂 Soil 5 を盛土した場合、図中の該当箇所に Soil 5 を示す色をつける。あらかじめ施工する箇所の施工層や測点ごとにマス目を作成しておき、施工日に実際に盛土した箇所および該当箇所に荷下ろした車両を記録し、記録した車両の搬出元のデータより土質を判定し着色を行う。このような土工管理図の作成には、施工箇所において人員を配置し、土砂運搬の車両がどこから土を搬入し、どの測点や施工層に運搬したかを記録し、データの整理を行う必要があるため労力を要する。

適正なトレーサビリティデータの作成には、記録員による盛土状況の記録もしくは映像機器を使用したデータの取得が必要となるが、トレーサビリティデータの記録を目的とした記録員の配置や取得した映像データの分析が必要となり、労力を要する。また、広大な盛土工事現場全ての作業状況を映像機器により取得することは、必要な映像機器の数が膨大となり現実的ではない。

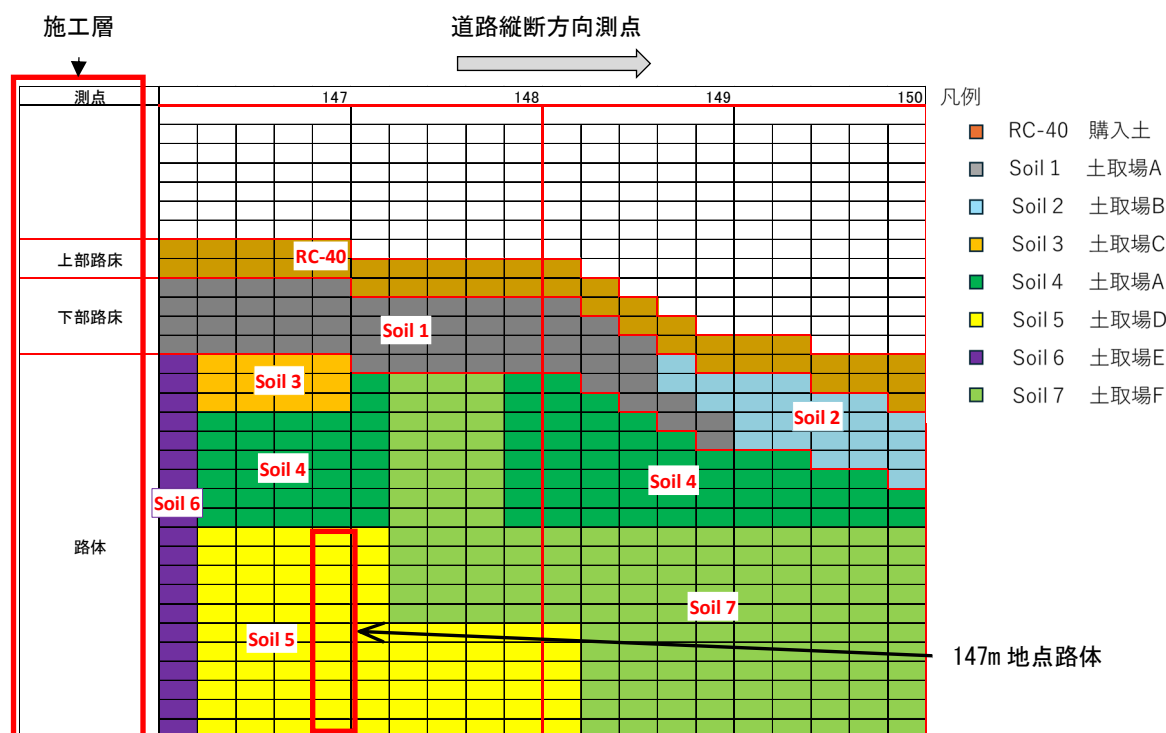


図 2 土工管理図

1.1.5 ICT 土工における施工履歴データの現状

近年の土工事において、測量、施工、出来形管理などの施工プロセスにおいて ICT を全面的に活用する工事である ICT 活用工事、また ICT 活用工事における土工である ICT 土工の普及により施工中の建設機械の 3 次元座標を取得することができる ICT 建設機械が施工現場に導入され、ICT 建設機械による施工履歴データの取得が行われている [9] [10]。施工履歴データとは、ICT 建設機械により施工しながら計測される ICT 建設機械の作業装置の 3 次元座標、取得時刻、その時の建設機械の状態等の記録である [11]。締固め機械の施工履歴データの例を表 1 に示す。表 1 に示す施工履歴データの例では、X、Y、H は締固め機械の軌跡を示す GNSS 位置座標であり、施工日は転圧を行った日付を「YYYYMMDD」の形式で表し、時刻は転圧の軌跡データを取得した時刻を「hhmmss」の形式で表している。また、層 No は転圧を行った層の番号であり、層厚は該当の層の厚みを m 単位で示したものであり、サイズは転圧箇所を管理するメッシュの幅と長さの寸法を m 単位で示したものである。規程回数は施工した層 No の設計上必要な転圧回数であり、転圧回数は実際に該当する位置のメッシュを締固め機械が通過した回数を示している。締固め機械の施工履歴データを利用し、盛土工事における品質管理の帳票として図 3 に示す走行軌跡図や図 4 に示す転圧回数分布図の作成を行っている。走行軌跡図は、施工履歴データの GNSS 位置座標を時系列につなぎ合わせたデータであり、転圧回数分布図はメッシュごとの転圧回数に応じて着色を行ったものである。

表 1 締固め管理システムの施工履歴データの例

X	Y	H	施工日	時刻	層厚	層No	サイズ	規定回数	転圧回数
-156943	-22248.3	40.7955	20220304	114942	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22247.8	40.7955	20220304	114942	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22247.3	40.7955	20220304	114942	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22246.8	40.7955	20220304	114942	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22246.3	40.7955	20220304	114942	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22245.8	40.7955	20220304	114942	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22245.3	40.8072	20220304	114718	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22244.8	40.8072	20220304	114718	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22244.3	40.8072	20220304	114718	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22243.8	40.8136	20220304	114503	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22243.3	40.8292	20220304	114243	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22242.8	40.8292	20220304	114243	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22242.3	40.8292	20220304	114243	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22241.8	40.8292	20220304	114243	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22241.3	40.8547	20220304	113811	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22240.8	40.8547	20220304	113811	0.3	5	0.5	4	4
-156943	-22240.3	40.8547	20220304	113811	0.3	5	0.5	4	4



図 3 走行軌跡図

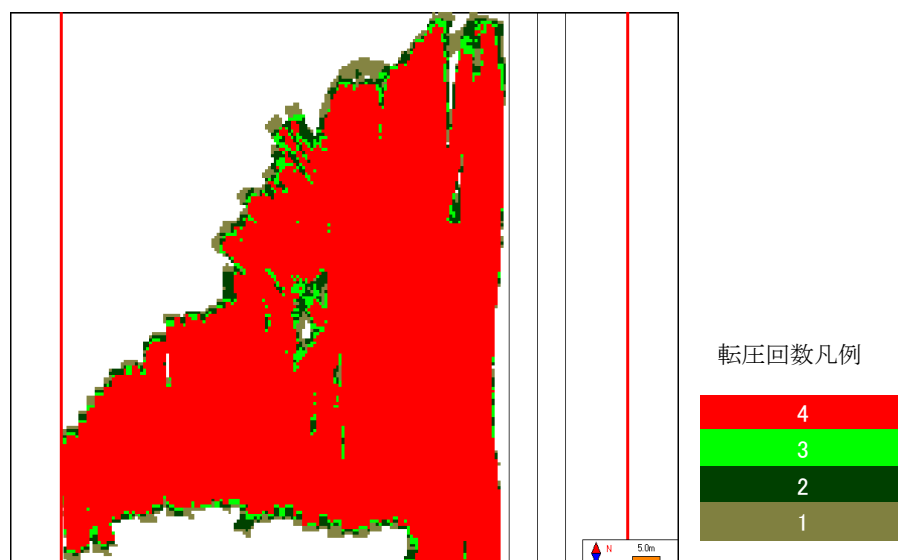


図 4 転圧回数分布図

1.2 研究の目的

本研究では、建設現場における IoT センサや ICT 機器の導入により取得される多種多様なセンシングデータと、工程情報を有する 4D BIM/CIM モデル [12] を統合的に活用することにより、建設現場における進捗管理、品質管理および安全監視の精度向上と効率化を実現する 4D 施工管理システムを開発する。鉄道近接工事において、工事区間全線にわたって隣接する軌道のセンシングデータと 4D BIM/CIM モデルの統合による施工現場の高度なモニタリングおよびデータ解析手法を提案し、その実用性について現場実証を通して検証する。また、土工事におけるセンシングデータの活用として、盛土工事の土砂運搬車両のセンシングデータと ICT 土工の施工管理システムの統合による盛土材料のトレーサビリティ管理手法を提案し、その効果について現場実証を通して検証する。

はじめに、既往の研究を通じて、現状の課題を整理する。次に、BIM/CIM の活用により視覚的な情報共有が可能となる点に着目し、移設時期や移設先の場所などのセンサに関する 4 次元の情報を、4D BIM/CIM モデルと関連付けることにより、施工進捗に伴うセンサの計測値の変動を誤認せずに可視化できる 4D モデル・センサ施工管理 (4DSCM : 4D model Sensor Construction Management) システムを構築する。構築した 4DSCM システムを、鉄道近接工事の函体構築工事において適用し、センシングデータと施工進捗を一元的に可視化し、計測の管理業務や安全管理における実用性を検証する。さらに、4DSCM システムのデータベースに蓄積されたセンシングデータを統計的に分析し、潜在的な相関関係を評価する。センサ間の相関関係において、施工作業の影響を考慮することで、類似工事または同一工事内の後工程において発生する可能性のあるセンシングデータの変動の予測について検討を行う。次に、土工事において、ダンプトラックの土砂運搬を検知するセンサを開発し、ICT 土工において取得される施工履歴データ

を組み合わせ自動的に盛土のトレーサビリティデータを作成する手法を提案する。本手法を工業団地の造成工事において適用し、盛土工事のトレーサビリティ管理の効率化効果について検証する。これらの結果を通じて、建設現場における IoT センサや ICT 機器から取得されるデータを 4D BIM/CIM モデルと統合して活用することで、施工管理業務や情報共有を効率化し、建設現場の生産性向上に寄与することを示すことが本研究の目的である。

1.3 論文の構成

本論文は、全 6 章で構成する。本論文の構成図を図 5 に示す。

第 1 章では、研究の背景として建設現場に ICT 施工の普及により IoT センサや BIM/CIM が導入される現状とそれらを利用した施工管理の課題を整理し、研究の目的を述べる。

第 2 章では、既往の研究および本研究の新規性について述べる。IoT センサや BIM/CIM を建設現場における利用方法をもとに整理した。それらを踏まえて、既往の研究に対する本研究の新規性を述べる。

第 3 章では、センサに関する 4 次元の情報を、4D BIM/CIM モデルと関連付けることにより開発した 4DSCM システムについて述べる。また、4DSCM システムを鉄道近接工事に函体構築工事に適用した結果を示し、その実用性を述べる。

第 4 章では、4DSCM システムにおけるセンシングデータの可視化手法について述べ、データベースに蓄積したセンシングデータと施工状況との関係性は把握することを目的とした分析について述べる。

第 5 章では、IoT センサによる土砂運搬のダンプトラックのセンシングと ICT 施工により取得される施工管理に関するデータを組み合わせた盛土工事におけるトレーサビリティデータを自動作成する手法を提案する。その手法を用いて、工業団地の造成工事においてトレーサビリティデータを作成した結果について述べる。

第 6 章では結論を述べる。

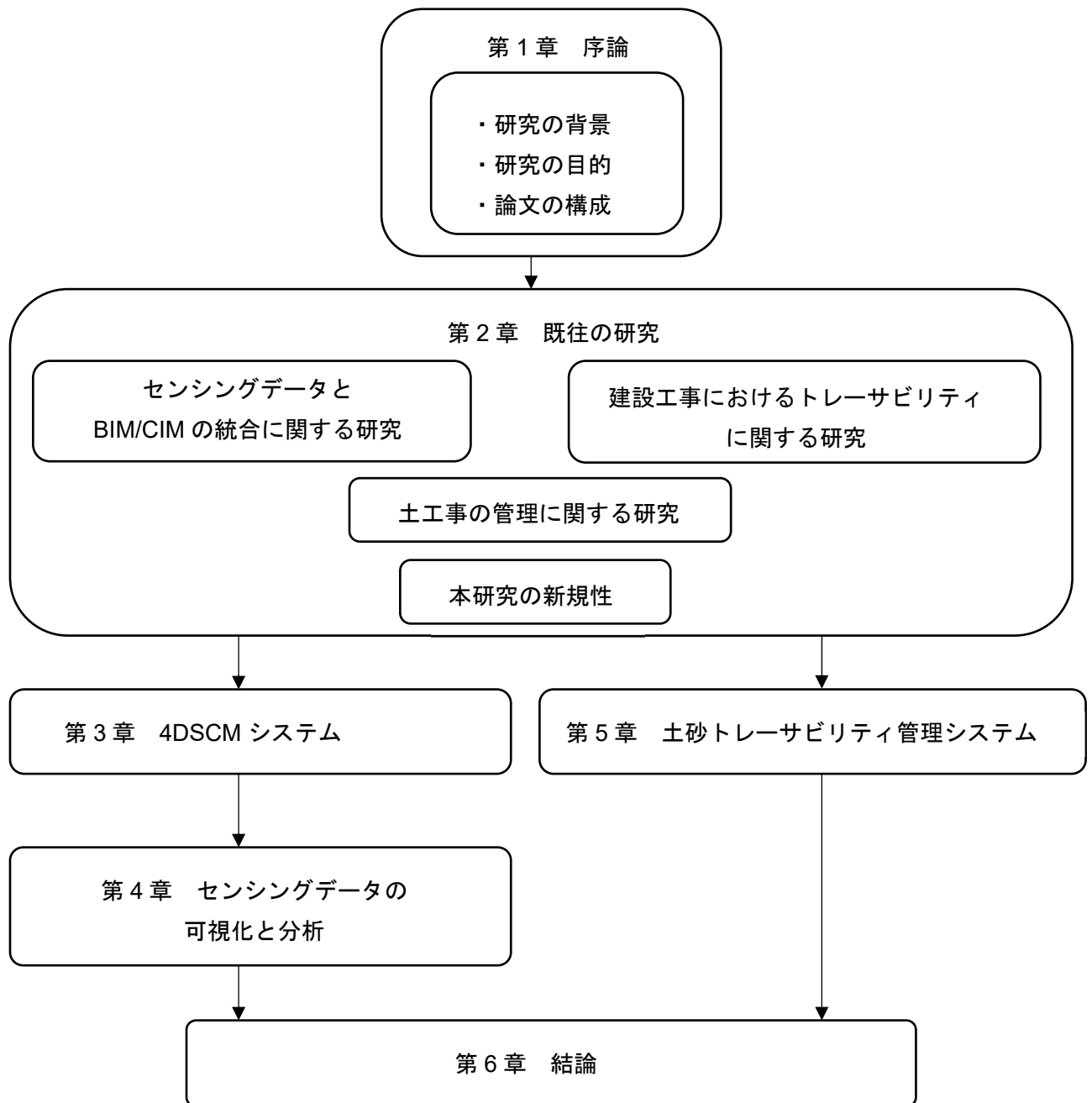


図 5 本論文の構成

第2章 既往の研究

2.1 センシングデータと BIM/CIM の統合に関する研究

BIM モデルとセンサデータについて Alves ら [13]はリアルタイムに統合するためのドメイン特化言語の研究を行った。有賀ら [14]は構造物の変状について情報管理することを目的として、点検データとプロダクトモデルを関連付けた新しいモデルの提案を行った。Sol-Sánchez ら [15]は鉄道構造物にセンサを設置し、鉄道構造物をリアルタイムに監視し、予防保守に必要な情報の収集を行うためのセンサの研究を行っている。Park ら [16]は複数のセンサによる構造物内部の追跡に関する研究を行っている。以上の研究は維持管理におけるセンシングデータの活用であり、日々状況が変化する施工段階におけるセンシングデータの活用については触れていない。Rio ら [17]は IFC (Industry Foundation Classes) のセンサクラスを拡張することにより、BIM モデル上において、センサの 3 次元モデルを表現したが、センシングデータを BIM モデル上で統合して表現するまでは行われていない。3 次元モデルとセンサデータの関連付けに関して、小山ら [18]によって、IFC を拡張した橋梁データモデルの開発およびセンサデータモデルとそれを連携するデータモデルの開発が行われている。開発されたデータモデルを利用することで、3 次元モデル上において、センサデータを構造物のモデルと関連付けて管理することが可能となる。しかし、このデータモデルは既設構造物の維持管理におけるモニタリングのためのものであることから、施工途中の構造物のようなセンサの計測時に頻繁に状況が変化するような場合への対応は不明である。また、作業工程などの施工時の情報とセンサを合わせた管理までは述べられていない。

BIM/CIM モデルを用いた可視化の研究として、Ghen ら [19]は火災のシミュレーション結果や火災現場におけるセンシングデータの可視化を行っている。火災のシミュレーション結果をサーフェスモデルの表面に反映させるために、Autodesk Revit の API (Application Programming Interface) を利用して、BIM/CIM モデル上における可視化を行っている。また、センサのデータをデータベースに保存し、データベース上の ID を使用して 3 次元モデルと関連付けを行っている。しかし、火災のシミュレーションやセンサによるモニタリングは既設構造物を対象としているため、施工中の時間とともに BIM/CIM モデルが変化する状況には対応していない。Wang, J ら [20]は土木遺産のヘルスモニタリングにおいて、BIM を用いたデータの可視化に関する研究を行っている。しかし、BIM モデル上においては、センサの 3 次元モデルを表示するのみに留まっており、BIM モデルを用いた構造物の状況とセンサの情報を一元的に管理するには至っていない。Xie ら [21]は、施設管理における建物データをリアルタイムにデジタルツインプラットフォームへ反映するための手法の研究を行っているが、プラットフォームを用いたセンサデータの可視化については触れていない。Wang, T ら [22]は、建物内における環境センサの情報を BIM モデル上において可視化する研究を行っている。センサの情報に基づき、BIM

モデルにグラデーションによる着色を行うことで、センシングデータの可視化を実施している。しかし、建設現場のようにセンサが設置されている構造物のモデルが変化するような場合への適用については不明である。

Cheng ら [23]は RFID (Radio Frequency Identifier) により取得した作業員の位置情報を VR (Virtual Reality) 上に表示することで、作業員の位置を可視化する研究を行っている。VR 上に建設機械の作業範囲やクレーン作業を行っている箇所等を危険エリアとして設定することで、RFID において取得した作業員の位置情報が危険エリアに立ち入った際に警告は発し、安全管理に活用する手法を提案した。しかし、あらかじめ作成された VR 空間に対して、RFID により取得したデータを反映するものであり、施工状況により変化する施工における VR 空間の更新については述べられていない。Zhong ら [24]はプレハブ建設について IoT を使用し工場で製作されたプレハブ部材のトレーサビリティデータを取得し、3 次元モデルを利用した可視化と合わせてプレハブ建設のトレーサビリティツールを構築している。プレハブ部材の追跡には、RFID を利用しており、土工事のような工場以外で調達する資材のトレーサビリティについては述べられていない。

Vincke ら [25]は、建設現場において、画像より生成した点群データを用いて建設現場の進捗および出来形品質管理への適用の研究を行っている。画像データを基に建設現場の変化を BIM モデル上において表現しているが、センシングデータなどの BIM モデルに形状以外の変化を反映させる手法については触れられていない。このため、工事段階ではセンサが設置されている構造物の状態が日々変化し、設置されたセンサ自体が移動・交換されるケースもあるという課題が存在する。したがって、BIM/CIM モデルとセンシングデータを連携させる際には、経時変化に応じて BIM/CIM モデルとセンシングデータを連携・管理する必要があるが、既存のシステムでは工事段階のセンシングデータの経時変化を BIM/CIM モデル上で可視化することが課題となっている。

2.2 建設分野のトレーサビリティに関する研究

建設現場において、資材や産業廃棄物、建設機械や労働者の動きなど様々な追跡が行われている。それらのシステムには、IoT センサや映像分析、GNSS、RFID などが利用されている [26]。

大塚 [27]は、東日本大震災において発生した災害廃棄物の処理業務において、GPS (Global Positioning System)、GIS (Geographic Information Systems)、RFID、運行管理システム等の ICT を活用し、管理業務の効率化を行っている。しかし、廃棄物処理事業であるため、搬出箇所から処分箇所等のトレーサビリティ管理であり、建設現場内におけるトレーサビリティについては、述べられていない。山名ら [28]は、産業廃棄物であるシールドトンネル工事において発生した建設汚泥のリサイクル事業において、ETC (Electronic Toll Collection System)、GPS、JWNET (Japan Waste Network) 等を使用した電子マニフェストを用いた建設汚泥のトレーサビリティ管理手法を提案している。しかし、マニフェストを用いたトレーサビリティ管理であるため排

出場所や処分場所の施設単位での管理であり、建設現場の施設内におけるトレーサビリティについては述べられていない。井関ら [29]は、UAV 写真の AI による画像解析により、河川の不法投棄物の自動検出に関する研究を行っている。維持管理段階において、不法投棄された廃棄物の早期発見、巡視の効率化を目的としたものであり、施工段階における履歴情報の確認については述べられていない。

Razavi ら [30]は、アクティブタブ型 RFID を使用し建設現場における資材の自動追跡に関する研究を行っている。Yang ら [31]は、プレハブ工事において RFID を用いて建設材料の追跡を行いプラットフォーム上における可視化をトレーサビリティの確保を行っている。Demiralp ら [32]は、RFID を使用し、外壁コンクリートパネルのプレキャスト製品について製造元の工場から使用する建設現場までの追跡を行った。RFID を使用した建設資材の追跡では、積み込み場所および荷下ろし場所における RFID の読み取り設備の設置もしくは読み取り作業が発生する。そのため、土砂運搬のような複数の積み込み場所や日々の荷降ろし場所が施工進捗により変化する場合は設備や人員の配置に課題がある。Montaser ら [33]は、RFID を用いて建設資材を高い精度での位置特定と追跡を行っている。しかし、屋内環境を前提としており、土工事のような屋外での建設現場での建設資材の追跡への適用については述べられていない。

Park ら [34]は、建設現場に設置したカメラを用いたビジョントラッキングにより、建設現場の資材管理を行う手法の研究を行っている。しかし、施工進捗により移動する盛土箇所についての追跡までは述べられていない。Roberts ら [35]は建設現場の映像から CNN (Convolutional Neural Networks) を用いて油圧ショベルやダンプトラックの作業の判別と追跡を行っている。Kim ら [36]は、画像データより油圧ショベルやダンプトラックの作業の判別を行っている。Fu ら [37]は、建設車両の GPS 位置情報を用いて作業場所の推測し、作業の判別を行う手法を述べている。Pradhananga ら [38]は、GPS データロガーを使用した建設機械の追跡を行い、GPS の位置情報が指定された特定のエリアへの進入や滞在時間を記録し、そのデータをもとにした作業サイクルの判定を行った。これらの手法では、施工の履歴を確認することはできるが、建設資材の材料管理については述べられていない。Song ら [39]は、道路舗装において、GPS を使用しアスファルト運搬の追跡を行い、リアルタイムの追跡データを用いて道路舗装の施工のシミュレーションを実施するシステムを提案した。アスファルト運搬のダンプトラックの追跡については述べられているが、施工完了時のトレーサビリティ管理については述べられていない。

建設現場では多様な人員が従事しており、人的資源の管理、安全管理等の目的から建設現場内で作業に従事する人員に対する追跡が行われている [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48]。例えば、Cheng ら [40]は、ワイヤレスリモートセンシング技術を用いて、建設現場の人的資源の位置追跡に関する研究を行っている。Son ら [41]は、安全な建設機械の作業場所の確保を目的に、イメージセンサにより作業者の追跡を行っている。これらの研究では作業者の追跡については、述べられているが土砂運搬に使用する運搬機械やその他作業機械に関する追跡までは述べられていない。

2.3 土工事の管理に関する研究

Seo ら [49]は、掘削工事における自動掘削システムにおける掘削計画を作成するシステムの提案を行っている。掘削工事において自動建設機械による作業効率化や品質向上の効果が得られているが、盛土工事におけるトレーサビリティ管理については述べられていない。You ら [50]はカメラや LiDAR, 5G 通信を使用した監視システムにより土工事における無人ブルドーザの動きの監視を行っている。しかし、土工事における材料管理までは述べられていない。Han ら [51]は、UAV 画像と機械学習による土地開発の進捗管理を行う手法について述べている。マンホールや側溝などの構造物などの設置を判別することで、土地開発の進捗状況を把握しているが、土工における地形の変化およびその進捗までは述べられていない。Shashi ら [52]は UWB (Ultra Wide Band) を使用し、建設工事の進捗状況を追跡する手法を提案している。しかし、建物の建設に関する事例は示されているが、土工事への適用については述べられていない。Vahdatikhaki ら [53]はセンシングデータと位置情報を用いて、ダンプトラックや掘削機械の動きを追跡するフレームワークの提案を行った。実験室における検証結果について述べられているが、実際の建設現場における適用までは至っていない。田中ら [54]は UAV 搭載型レーザスキャナを使用した土工の施工管理における点群データの取得について述べている。複数条件による UAV 搭載型レーザスキャナにより取得した点群データの評価を行っているが、実施工現場における活用までは述べられていない。

岩谷ら [55]は、情報化施工における盛土の転圧管理システムのデータを利用して、3 次元モデルを作成し、盛土の施工管理情報を可視化し、一元管理する手法を提案している。しかし、盛土の材料のデータについては、転圧管理システムの情報を利用するにとどまっており、土砂運搬のダンプトラックの情報との連携までは行われていない。宮武ら [56]は築堤事業の施工段階における 3 次元モデルの作成について使用材料の属性情報の付与を述べているが、実施工現場における適用までは至っていない。宇津木ら [57]は明り掘削現場における地質情報の 3 次元モデルを自動的に作成し、施工管理に活用するシステムを提案した。しかし、掘削工事を対象としており、盛土工事への適用および搬入される盛土材料の土質情報の 3 次元モデルへの反映については述べられていない。

小林ら [58]は ICT 施工における締固め管理システムのログデータから施工途中の盛土の 3 次元モデルを自動作成する開発を行った。締固め管理システムのログデータを使用することで、施工途中の盛土形状を表現することができ、ログデータ内に含まれる転圧回数等の施工管理および品質管理に関する情報を属性情報として、3 次元モデルに付与できる。しかし、3 次元モデルに付与できる情報は、ログデータに含まれる情報に限られているため、盛土工事のトレーサビリティ管理において必要な土取場な情報を 3 次元モデルに含めることができない。白又ら [59]は ICT 建設機械、スマートフォン等を利用し、土砂運搬管理、盛土の進捗管理を行っている。スマートフォンにインストールした運行管理システムにより運搬回数やサイクルタイムの記録を行い、ICT 建設機械の履歴データを用いた進捗管理システムを用いることで、日々の土

工事の進捗状況の可視化を行った。しかし、運行管理システムではスマートフォンの操作が必要なため、運転手の操作ミスによるデータの異常の発生や日々の ICT 建設機械の履歴データの進捗管理システムへ反映に関する労力の発生などの課題がある。

2.4 本研究の新規性

2.4.1 4D BIM/CIM モデルとセンシングデータの統合に関する研究

本研究では、4D BIM/CIM モデルに対してセンシングデータを付与する手法を示し、施工の時系列変化に伴うセンシングデータを可視化する 4DSCM システムを構築する。構築したシステムを用いて、建設現場における施工の進捗とセンシングデータの変動の関連性を迅速に把握することを可能とし、変動原因に対する技術者の対応計画の作成に関する資料収集や判断に要する時間の効率化を行う。

また、本システムを用いて、建設現場に設置されている複数のセンサを一元的かつ時系列と合わせて管理し、施工段階において施工場所の変化や施工進捗に伴って発生するセンサの移設に対して、センサの位置情報の変化を記録し、システム上で共有することで関係者間の情報共有を確実化する。これにより、本システム上でセンシングデータの変動が発生した際に、センサの移設によるセンシングデータの変化と施工に起因するセンシングデータの変動を区別することができ、工事関係者間の情報共有の不足によるセンサの状態の誤認識を防ぐことができ、センシングデータの管理業務における労力を削減する。

2.4.2 盛土工事におけるトレーサビリティに関する研究

盛土工事において、盛土材料のトレーサビリティを示すためには、盛土箇所における施工状況の記録と盛土の材料となる土砂を運搬するダンプトラックの運搬記録を関連付けて整理する必要がある。そこで本研究では、ICT 土工において取得される施工履歴のデータに着目し、施工履歴のデータと IoT センサを用いたダンプトラックのセンシングを組み合わせることで自動的に盛土のトレーサビリティデータを作成する手法を提案する。近年、特に土工事において普及している ICT 土工では、ICT 建設機械に設置されている各種センサのデータより、建設機械の軌跡データや作業場所の位置情報など施工状況の記録を施工履歴データとして出力できる。加えて、土取場から盛土箇所までのダンプトラックの運行状況と盛土箇所における土砂の荷下ろしについて IoT センサを用いて検知することで、盛土材料である土砂の運搬記録のデータの作成を可能とする。施工履歴データと土砂の運搬記録のデータをシステム内において、結合することで盛土材料のトレーサビリティデータを作成する。

この手法により、建設現場においてはセンサの設置作業のみで盛土材料のトレーサビリティデータが作成でき、施工進捗や施工箇所の土質情報の確認、トレーサビリティデータをクラウド

ドへアップロードすることによる情報共有，長期的な盛土の管理等に活用できる。長期的な盛土の管理とは，盛土工事の終了後，盛土の変状などが発生した際に，変状発生箇所と類似する土質や施工高さなどの条件の箇所を抽出することで，同様の変状が発生する可能性を予測・検討するなどである。

第3章 4DSCM システム

3.1 本章の概要

本章では、BIM/CIM の活用により視覚的な情報共有が可能となる点に着目して、移設時期や移設先の場所などのセンサに関する 4 次元の情報を、工程に関する情報を持った BIM/CIM モデルである 4D BIM/CIM モデルと関連付けることにより、施工進捗に伴うセンサの計測値の変動を誤認することなく可視化できる 4D モデル・センサ施工管理（4DSCM : 4D model Sensor Construction Management）システムを提案し、システムの実装を行う。実装した 4DSCM システムを、鉄道近接工事において適用し、工事対象構造物および周辺構造物、設置した各種センサをモデル化し、センサに関する情報を一元的に管理し、施工状況と連動して可視化できることを示す。本システムの活用により、センサの計測値の変動の際の変動原因の特定に必要なとなる工程表等の資料の確認などの計測の管理業務の労力削減について、実用性を検証する。

なお、本論文ではセンサに関するデータについて、製造会社や規格等のセンサに関する情報をセンサデータとし、センサによって計測されたデータをセンシングデータと呼ぶこととする。

3.2 4DSCM システムの概要

本研究で提案する 4DSCM システムは 4D BIM/CIM モデルに複数種類かつ複数位置のセンサに関する情報を付与することで、3 次元形状に加え時間軸とそれと連動したセンサの計測値情報を持ち、モデル上でセンサの設置位置や方向、計測管理情報等を可視化する。システム上において、建設現場に設置されている複数のセンサを一元的かつ時系列と合わせて管理することで、センサの移設等の施工進捗に伴うセンサに関する情報の変更についても、工事関係者間で情報を共有できる。本システム上にセンサの移設や計測値の大幅な変化が発生した際の施工状況などの情報を付加されたセンサのデータを蓄積することで、施工段階において取得したセンサのデータの活用へつなげる。

4DSCM の構成図を図 6 に示す。施工対象物、周辺構造物およびセンサの 3 次元モデルと工程データが関連付けられた 4D BIM/CIM モデルと複数種類のセンサのセンシングデータとセンサの管理値等のセンサデータを格納するセンシングデータベースおよびそれらを管理するセンシングデータベース管理システム、施工管理における工程の管理を行う工程管理システムにより構成される。システムを構成する各項目については以降の項で詳細を述べる。

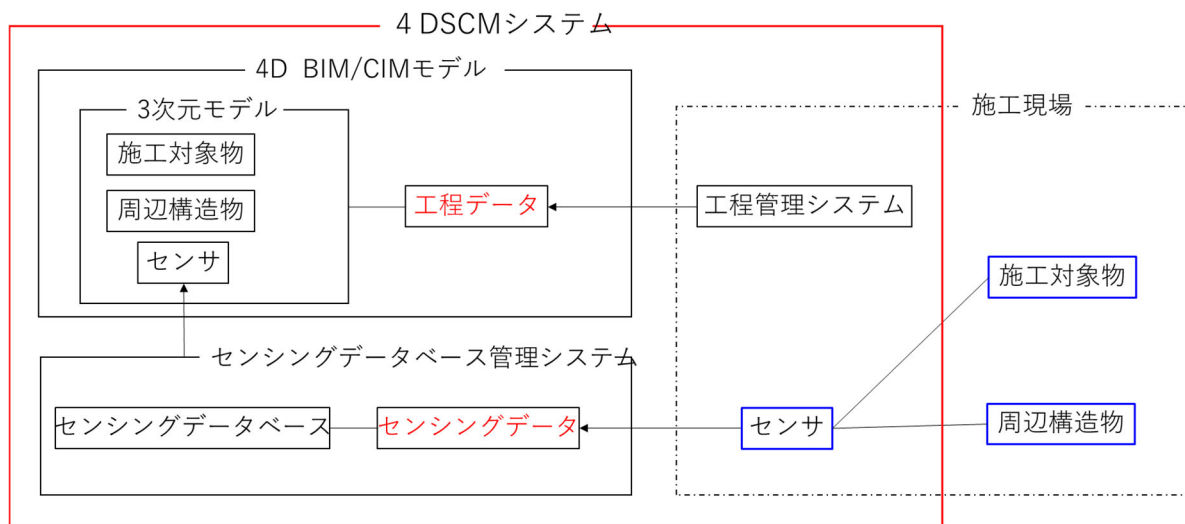


図 6 4DSCM システム構成図

3.2.1 4D BIM/CIM モデル

4D BIM/CIM モデルは 3 次元モデルに工程データを関連付けたものであり、本研究では、施工対象物、周辺構造物およびセンサの 3 次元モデルに工程データを関連付ける。周辺構造物とは、施工場所近傍にある既存の道路や建物などであり、施工により改変が加えられる場合は施工対象物に含める。図 7 に工事対象物と周辺構造物の 3 次元モデルの例を示す。コンクリート躯体や土留壁は施工中に新たに構築されるため工事対象物であるが、高架橋は工事着手前から存在し、施工において改変を加えることがないため、周辺構造物に分類される。センサの 3 次元モデルとは、建設現場における計測を目的に施工対象物もしくは周辺構造物に設置されたセンサの 3 次元形状や設置位置を示すものである。

まず、4D BIM/CIM モデルの構築にあたり、3 次元 CAD ソフトウェアを用いて 3 次元モデルを作成する。施工対象物の 3 次元モデルを作成する際は、施工手順等によりモデルの表現を変える必要があるため、部材ごとに分割した 3 次元モデルを作成する必要がある。例えば、コンクリート構造物の場合、一度のコンクリート打設により構造物全てを建設することはできないため、柱部材や梁部材のように建設するまでのコンクリート打設の回数等に応じて分割を行う。部材の分割の例を図 8 に示す。図 8 は高架の 3 次元モデルであるが、場所打ち杭、地中梁、柱、梁・スラブによって構成されている。しかし、柱部分については地中梁施工時の掘削した状態で施工する箇所と埋め戻し後に梁・スラブの足場や型枠支保工の設置後に構築する箇所に工程上分割する必要があるため、3 次元モデルの作成段階において柱を 1 回目の施工箇所と 2 回目の施工箇所に分割を行う。一方で、周辺構造物およびセンサの 3 次元モデルは、施工による形状の変化がないため、部材ごとの分割は行わない。

次に、3 次元モデルに関連付ける工程データを工程管理ソフトウェアを用いて作成する。工

工程データは、施工対象物の建設において行われる各作業について開始／終了日を設定したデータである。本研究で使用する工程データは、施工対象物の部材ごとに実施される工種に対して、作業名称・作業開始日／終了日を設定し、作業ごとに一意の ID を割り当てる。工程データの作業ごとの一意の ID を 3 次元モデルのオブジェクトの ID と関連付けを行うことで、3 次元モデルと工程データを連携させる。オブジェクトを関連付けられた工程データを基に表示非表示を切り替えることにより、4D BIM/CIM モデル上において、時間変化に伴う施工対象物の変化を確認できる。

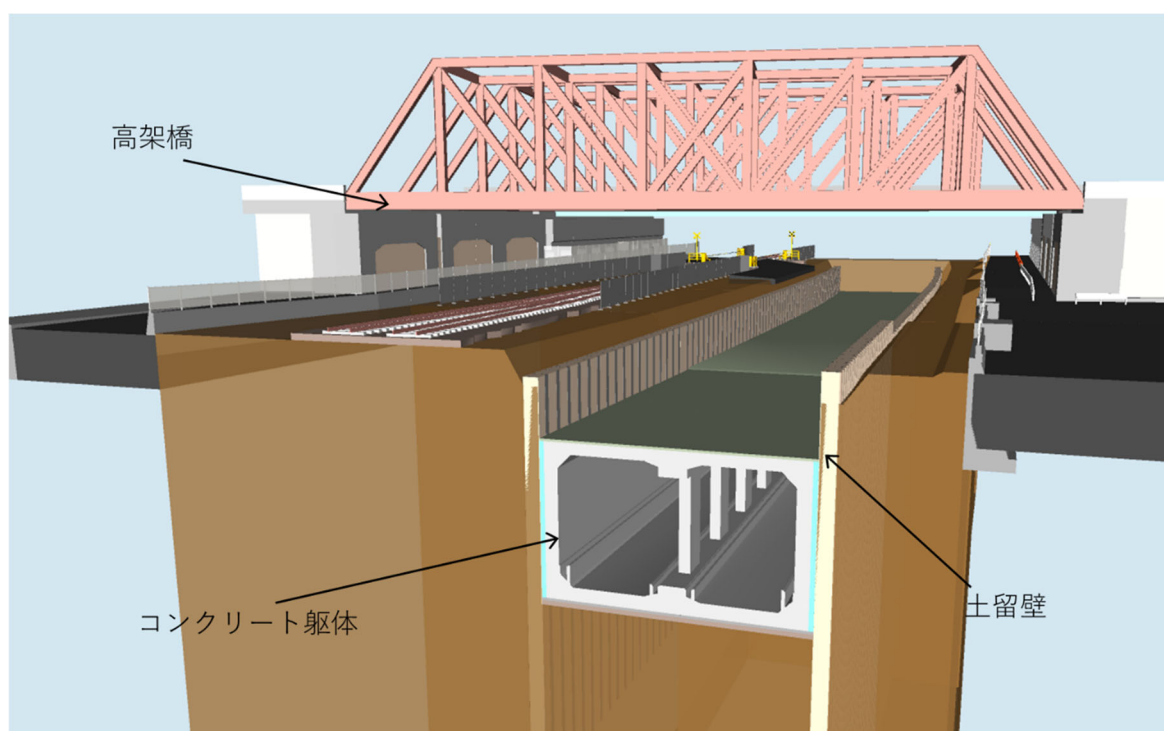


図 7 3 次元モデルの例（工事対象物・周辺構造物）

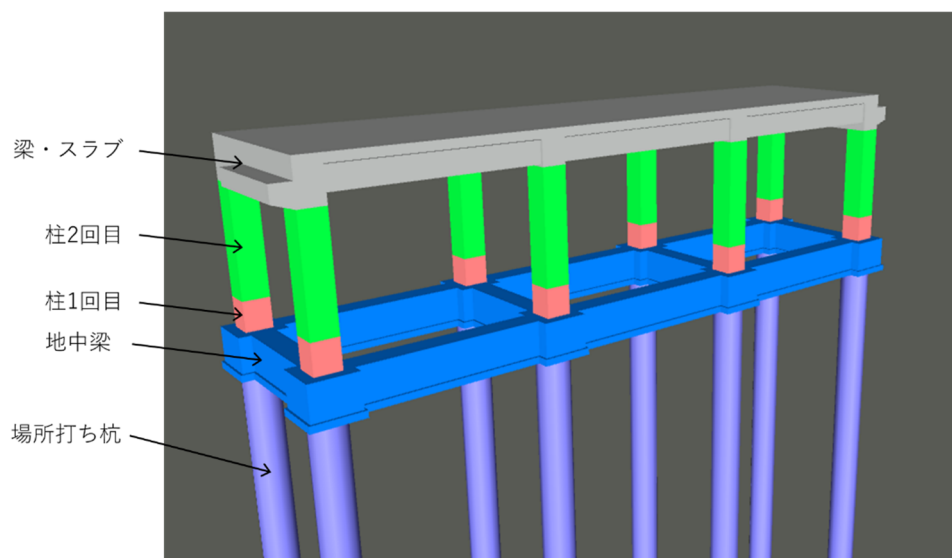


図 8 モデル分割の例

3.2.2 センシングデータベース管理システム

4DSCM システムにおいて、建設現場に設置されるセンサより出力されるセンシングデータを格納し、4D BIM/CIM モデルと関連付けるセンシングデータベース管理システムを構築する。センシングデータベース管理システムは、建設現場に設置されたセンサより出力されるセンシングデータをセンシングデータベースへ格納する役割とセンサの管理値などを管理する役割を持つ。

センシングデータをセンシングデータベースに取り込み、設置箇所もしくは設置予定箇所に配置されたセンサの 3 次元モデルとセンシングデータを関連付けることで、4D BIM/CIM モデルとセンシングデータの連携を行う。

建設現場においては施工の進捗に伴って設置されたセンサの移設が発生するため、センシングデータの管理ではセンサの移設に対応してセンサを設置した場所を示す 3 次元座標 (x, y, z) や建設現場が属する平面直角座標系の系番号といったセンサの設置位置情報を保持する必要がある。地下構造物構築において掘削完了後に切梁にひずみ計を設置して切梁の軸力を計測する場合のセンサの移設例を図 9 に示す。切梁のひずみ計は、土留内の掘削の進捗により変位の設計値が変更となるため、時系列と合わせて管理する必要がある。平面では同一箇所に複数個設置されることから、4D BIM/CIM モデルとして管理することで時系列および 3 次元位置情報を管理することができる。地下構造物の構築を開削工法にて行う場合、立坑築造後、構造物を構築し埋め戻すという手順で実施する。図 9 に示す例では、2 段階の切梁の立坑を築造した後、土留壁の変位を監視するために 2 段目の切梁である切梁 2 にひずみ計を設置して計測を行っている。地下構造物を構築し埋め戻しを実施する際に、切梁 2 の設置位置が埋め戻し部分に含まれるため、埋め戻し前に切梁 2 の撤去が必要となる。切梁 2 の撤去にともない設置されている

ひずみ計によって計測を行うことができなくなるため、ひずみ計の移設を行う。このように施工段階においては施工の進捗により、センサの設置位置によっては施工の支障となるやそのままの設置位置では必要な計測を実施することができなくなる等の理由によりセンサの移設が発生する。

センサを移設が発生した場合は、同一のセンサであってもセンサの設置位置情報が異なっているため、センシングデータ管理システムにおいて、センシングデータに加えてセンサの位置情報を登録することでセンサの移設に対応した管理を行う。

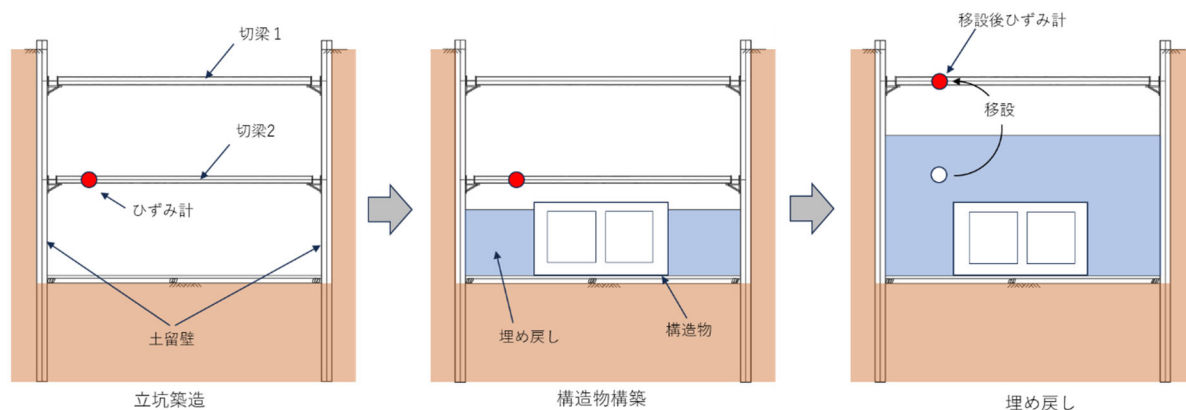


図 9 地下構造物構築時におけるセンサの移設断面図

3.2.3 4DSCM システム

4DSCM システムでは、工程管理システムより出力した工程データを反映した建設現場の 4D BIM/CIM モデルにセンシングデータを関連付けることで、施工進捗に伴ってセンシングデータを可視化しながら、施工管理およびセンサの管理を実施する。センシングデータを関連付けられたセンサの 3 次元モデルは、4D BIM/CIM モデルの時間変化に対応して、連携したセンシングデータの値により、センサの 3 次元モデルの色が変化することで、センシングデータの変化を表現する。例えば、センシングデータが管理値を超過した際に 3 次元モデルの色を赤色に変更して表示するなどを行う。

4DSCM システムにおいて日々の施工実績を入力することで、計画時の工程だけでなく、日々の施工状況をシステム上で再現可能である。時間変化に伴う施工対象物の変化と同時に、センシングデータの変化をセンサの 3 次元オブジェクト上に可視化することで、作業の進捗とセンシングデータの変化を同時にシステム上で確認することができる。

3.3 4SCM システムの実装

3.3.1 4D BIM/CIM モデルの構築

センシングデータをシステム上において表現するための基礎として、センシングデータと連携可能な形式の 4D BIM/CIM モデルを構築する。工程データは工種ごとに、ID・名称・計画開始日/終了日・実績開始日/終了日を割り当てる。

3 次元モデルと工程情報を連携させる際に、工種ごとの ID を 3 次元モデル上のオブジェクトの ID と関連付けを行う。3 次元モデルのオブジェクトに対して各箇所で開催される工種ごとに工程の ID が関連付けられるため、施工対象物の 3 次元モデルは工種に対応する様に分割する。例えば、躯体構築であれば、底版構築・壁構築・頂版構築と複数の工種が存在し、それぞれに工程データを関連付けるため、3 次元モデルのオブジェクトも底版・壁・頂版に分割する必要がある。

工程データとオブジェクトの関連付けにおいて、同一の施工箇所において複数の工種が行われる場合があり、1 つのオブジェクト上において複数工種の作業を表現するため、工程の ID の割り当ては 1 つのオブジェクトに対して複数の工程の ID を割り当てることを可能とした。例えば、現場打ちのコンクリート構造物であれば、完成までに鉄筋組立・型枠組立・コンクリート打設・養生等の複数の工種があり、構造物のオブジェクトに対して、複数工種が割り当てられるため、工程の ID も複数付与される。

なお、3 次元モデルと工程の ID の関連付けは、一度関連付けを行うと、工程データの名称や施工開始時期/終了時期などを変更しても ID の変更を行わない限り関係性が保持される。工程データについて、施工開始前のモデルを構築する際は計画開始日/終了日のみ入力し、施工の進捗とともに実績開始日/終了日を入力し、工程データの更新を行う。実績の工程データの入力により、通常施工ステップ単位に分割されている 4D BIM/CIM モデルの工程情報を日ごとの時間経過に合わせることで 4D BIM/CIM モデル上に日々の施工状況が反映され、センサの日々の計測値との連携が可能となる。

指定された日付において、施工中の工種のオブジェクトを表示し、施工が完了した工種のオブジェクトについては、構築する躯体のような施工完了後現場に残る物については表示を維持し、支保工などの仮設構造物や掘削する地形形状などの施工完了後は撤去され、建設現場に残らないものは、施工完了後にオブジェクトを非表示にするように設定を行う。センサの 3 次元モデルについては、設置予定の位置にオブジェクトを配置し、設置日までは非表示とし、設置後にオブジェクトの表示を行う。

3.3.2 センシングデータの連携方法

センサから取得されるデータをセンシングデータベースに取り込み、センサの3次元モデルを介して、BIM/CIMモデルと連携を行う。センサから出力されるデータについて計測値データと管理値データの2種類に分け、個別にデータベースへ取り込みを行う。

計測値データは各センサが特定の時間間隔で取得している情報である。また、管理値データは計測値の閾値を示すものであり、計測値が管理値を超過した際に警告を発するなどの管理を行うために用いられる。計測値データと管理値データをBIM/CIMモデルと連動したデータベースに取り込むことで、モデル上において計測情報管理を可能とする。

計測値データの出力形式にはCSV形式を使用する。計測値データは、「計測機器ID」、「センサの計測項目」、「センサの設置位置情報」、「計測日」と「計測値」によって構成されている。計測値データは、センサにより計測頻度が異なるためモデルと連携する際に、代表値を決定する必要がある。システム上において、計測値データを表現する際は、最新の施工進捗に合わせた状態が望ましいため、計測値データの代表値はセンサの最新の値を採用する。

管理値データは、「計測機器ID」、「センサの計測項目」、「センサの設置位置情報」、「適用日」、「管理値」から構成されている。管理値については、施工の進捗に伴い変更および追加があるため参照する日時により適用する管理値の値を定めている。

データベースに取り込んだセンシングデータについては、センサ情報を基にした属性情報とともに格納される。センサ情報は表2に示すように「計測機器ID」、「名前」、「距離程、深度（センサ設置位置）」、「単位」、「モデルレイヤのファイルパス」、「ノードパス」により構成されている。「計測機器ID」は計測機器情報および管理値情報と紐づいており、計測機器IDを通じて、指定された日時の計測値および管理値を参照する。センサの設置位置について、鉄道近接工事を対象としたため、建設現場に近接する鉄道の起点から距離を示す距離程および標高0mを基準とした高さ情報である深度をデータベースに取り込むセンサの設置位置情報とし、センサの設置位置の3次元座標や座標系の情報はセンサの3次元モデル側において保持する。

管理値の種類については、「+1次管理値」「+2次管理値」「+3次管理値」「-1次管理値」「-2次管理値」「-3次管理値」の6種類を使用する。管理値の設計値に対して、設計値×0.8を1次管理値、設計値を2次管理値、設計値×1.2を3次管理値（限界管理値）とする。

システム上において、工程の進捗に合わせて、センシングデータを表示することで、施工進捗とセンシングデータの関連性を可視化する。センサの3次元モデルを表示している時間軸から、関連付けられているセンシングデータの値を参照して、モデル空間における表現を変化させる。4DSCMシステムにおけるセンシングデータの表示方法を図10に示す。本システムは(a)4D BIM/CIMモデル表示部、(b)センシングデータ一覧表示部、(c)工程表示部に分割されている。4D BIM/CIMモデル表示部においてセンシングデータを視覚的に確認するために、計測値が管理値を超過した場合に、センサの3次元モデルの色を変更するモデル表現を行い、変更された色の種類により視覚的に警告を発する。また、一覧表示は、計測項目ごとに時間軸にそつ

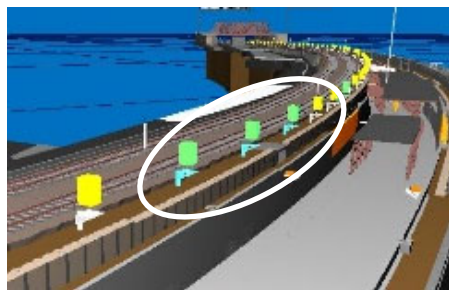
て、計測値を表示し、計測値が管理値を超過する場合は、段階的に一覧のセルの色を変更する。さらに、計測値一覧のデータを選択することでセンサの3次元モデルへ遷移することができる。センシングデータについて経時図表示として、時間軸に沿った対象となるセンサ単体の計測値および管理値を折れ線グラフ形式で出力できる。

センサの設置位置や設置部材が更新された場合、更新が行われた日時以降では、4D BIM/CIMモデル表示部において元々設置されていたセンサの3次元モデルが非表示となり、更新後の位置において再度表示を行う。センサの管理値が変更となった場合、変更後の管理値が適用される日時以降においては、変更後の管理値を参照しセンサの3次元モデルの色を設定する。また、過去の日時を参照した際に、管理値の変更前だった場合は、変更前の管理値を参照し、センサの3次元モデルの色の設定を行う。

表 2 センシングデータベースの属性データ

カラム名(論理名)	カラム名(論理名)	型
計測機器ID	Id	integer
名前	Name	text
距離程	Kilopost	text
深度	Depth	text
単位	Unit	text
モデルレイヤの ファイルパス	LayerFilePath	text
ノードパス	NodePath	char

センシングデータの管理値超過
によるモデルの着色



(a) 4D BIM/CIM モデル表示部

管理値

計測値

4DCIM - 計測値表示

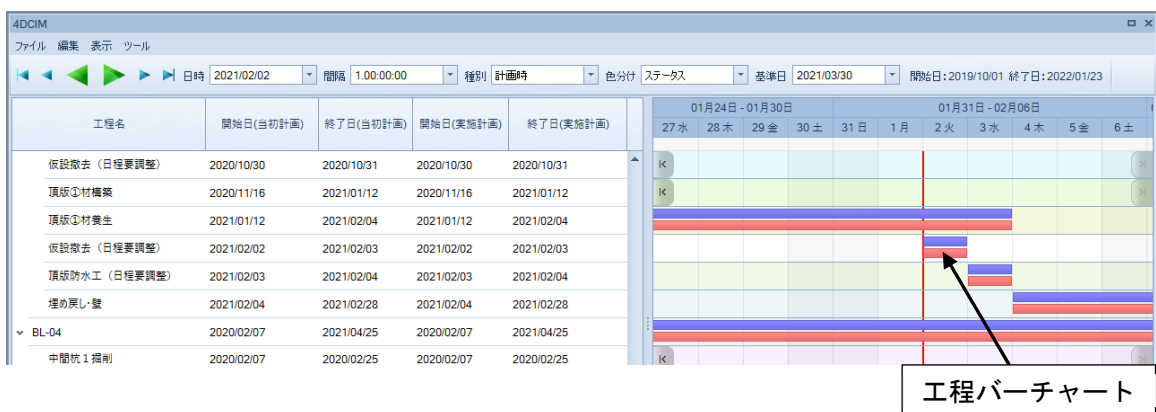
○ すべての計測項目 ○ グループ 200...

管理値		555k340m 1段目	555k300m 2段目
計測項目	単位		
切梁軸力	kN	+1次 477.28	511.04
		+2次 596.6	638.8
		+3次 715.92	766.56
土留壁内空変位	mm	+1次	
		+2次	
		+3次	
施工基面沈下		-1次	
		-2次	
		-3次	
架線柱傾斜	度	+1次	
		+2次	
		+3次	
		-1次	
		-2次	

管理値(%)		555k340m 1段目	555k300m 2段目
計測項目	単位		
切梁温度	%		
切梁軸力	%	90%	
土留壁内空変位	%		
施工基面沈下	%		
架線柱傾斜	%		
土留壁水平変位	%		
リバウンド	%		
中間杭変位	%		
橋内地下水位	%		
橋外地下水位	%		

計測値		555k340m 1段目	555k300m 2段目
計測項目	単位		
切梁温度	°C	9.805	
切梁軸力	kN	644.1201838	
土留壁内空変位	mm		
施工基面沈下	mm		
架線柱傾斜	度		
土留壁水平変位	mm		
リバウンド	mm		
中間杭変位	mm		
橋内地下水位	Tp-m		
橋外地下水位	Tp-m		

(b) センシングデータ一覧表示部



(c) 工程表示部

図 10 4DSCM システム画面構成

3.3.3 施工状況とセンシングデータの関連付け

本システムにおいて、工程情報は計画と実績を切り替えて表示することが可能である。計画表示の場合は、BIM/CIM モデルを構築した際に入力した計画工程に従って、モデルが変化する。実績表示に切り替えることで、実際の施工状況を BIM/CIM モデル上に表示できるため、実績の工程表示とセンシングデータの表示を組み合わせることで、計測値の変動があった際の作業状態を再現して可視化できる。

施工中のセンサ移設が発生したセンシングデータの例としてひずみ計の計測データを図 11 に示す。ひずみ計のセンシングデータには変動箇所 1 から 4 の 4 つの変動箇所がある。この中で、変動箇所 1 および 4 は施工の影響により変動が発生したものであるが、変動箇所 2 および 3 はセンサの移設により変動が発生したものである。図 11 の上のグラフはひずみ計の位置情報を考慮せずにデータを取得した場合を示しており、ひずみ計 1 およびひずみ計 2 それぞれに 2 箇所ずつの変動箇所が見受けられる。しかし、位置情報を考慮していないため、変動の要因が施工の影響かセンサの移設なのかが判別できない。そのため、センサの移設箇所においても連続的に計測されており、センシングデータだけを見た場合にあたかも施工上の事象によって、計測値に大きな変動があったように誤認する可能性がある。そこで、センシングデータベースにおいてセンサの位置情報を登録し、センサの移設の際には設置位置の変更を反映することで、図 11 の下のグラフのように、移設されたセンサのセンシングデータを区別することができ、変動箇所 2 および 3 のセンサの移設による変動を判別できる。

施工進捗によって決定される管理値については、計画段階の工程に進捗に合わせてあらかじめ設定を行い、計画の変更が生じた際に、管理値の修正を行う。これらの可視化データにより、技術者はシステム上に表現されている建設現場の状況とセンサの計測値やデータの傾向からセンシングデータが示す現場状態を容易に把握し、技術的な判断を実施することができる。

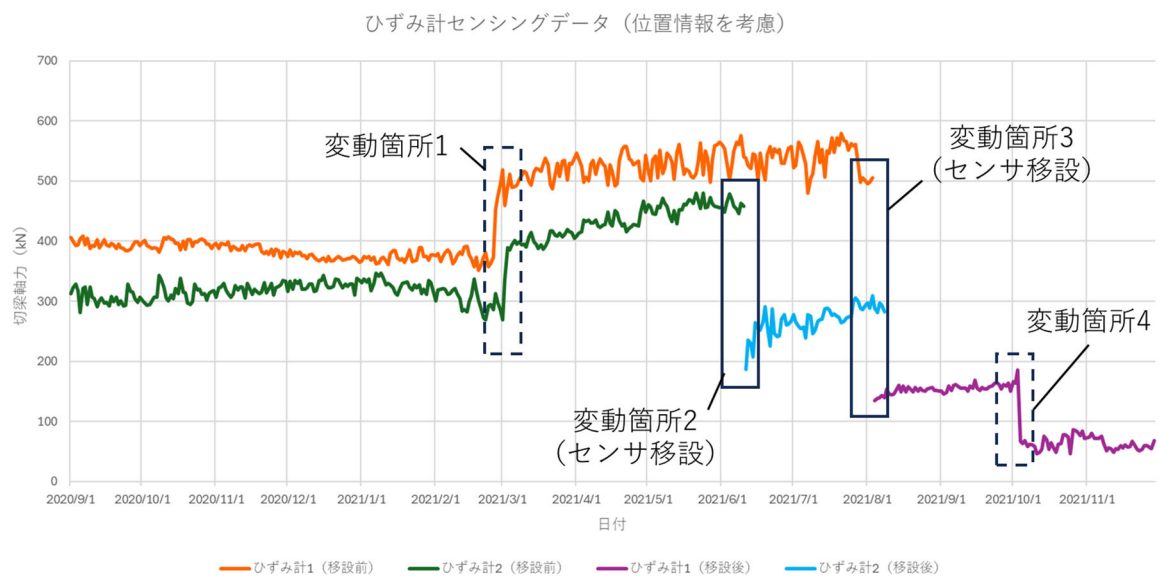
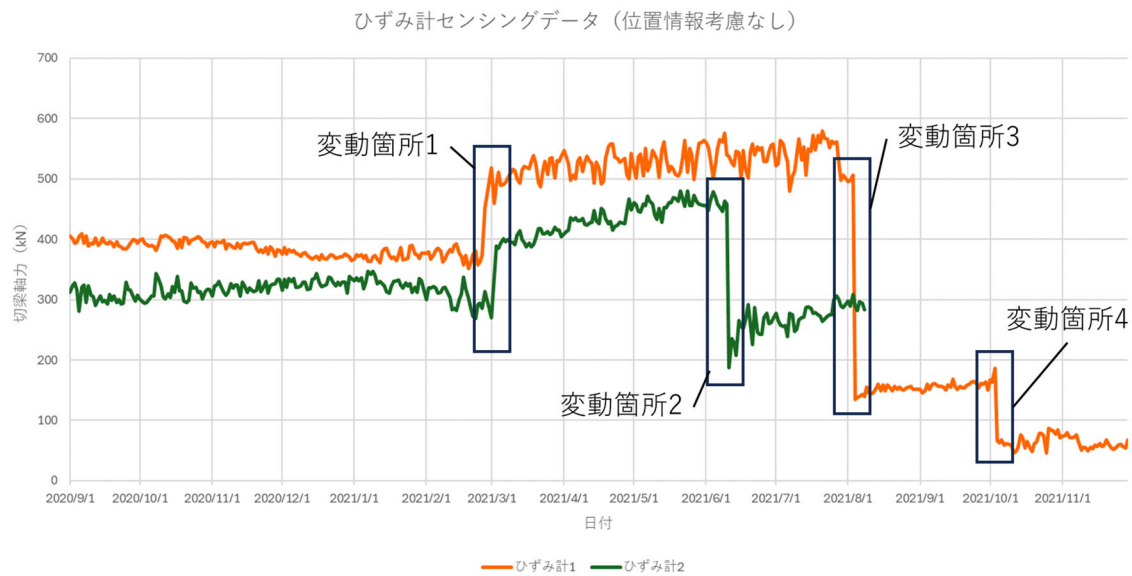


図 11 センサ移設時のセンシングデータの変化

3.4 現場適用

3.4.1 現場概要

日本の鉄道工事である仮称 A 工事において、開発した 4DSCM システムを適用した。A 工事は鉄道地下化事業の一環として行われたもので、2016 年から 2024 年に施工される地上線路から地下線路へ至るアプローチ部において、地下化される部分の擁壁や地下躯体を築造する工事である。そのため、供用中の軌道の近傍において掘削を行い、地下化する鉄道の躯体を構築している。地下化部分における躯体構築の施工手順を図 12 に示す。土留工事後、線路近傍を掘削し、支保工を組み立てる。その後、躯体を構築し、構築完了後に、支保工の撤去および埋戻しを実施する。

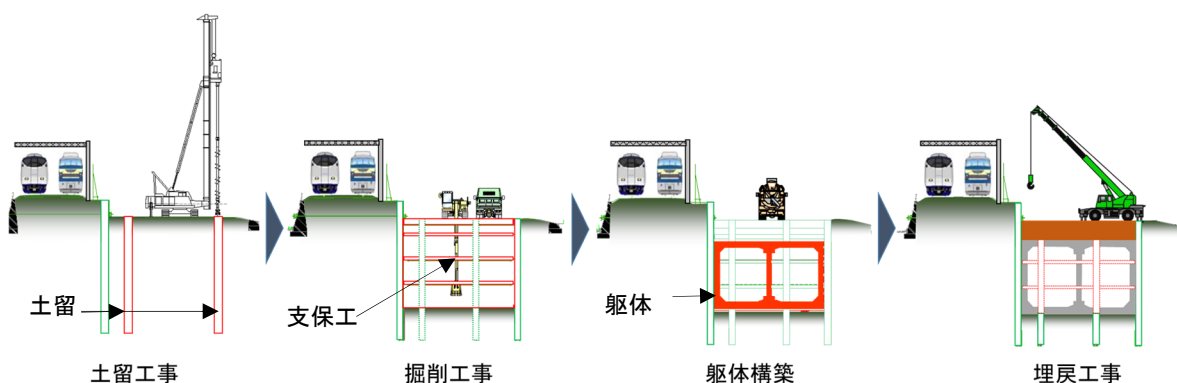


図 12 施工手順

施工範囲を図 13 の平面図に示す。平面図に示されるように工事始点の 0m 地点から工事終点の 646m 地点までの工事延長 646m において、施工範囲が軌道と隣接しており、工事全線において、軌道への影響の監視が求められている。掘削深さが深い位置に地下躯体を構築する箇所においては、躯体構築に支障する支保工の取り外しや再設置が行われる。移設される支保工について計測を実施している場合、支保工の移設と同時にセンサの移設を行う必要がある。

また、工事延長が長いため、施工ブロック長が最短で 10m、最長で 20m となる合計 35 の施工ブロックに分割し、複数の施工ブロックを同時に施工している。掘削作業や躯体構築の作業を行う際は、施工箇所の覆工板を取り外し、地下で作業を実施する。覆工板を撤去すると上部の通行ができなくなるため、同時に複数ブロックを施工する際は、搬入通路の確保など作業ブロック間の調整を行う必要がある。

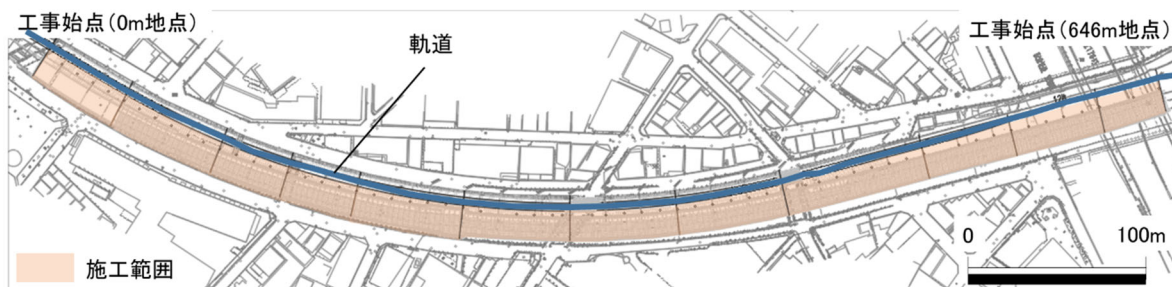


図 13 施工範囲平面図

工事による軌道への影響をいち早く確認するために、表 3 の計測項目について、図 14 に示すセンサを設置し計測を行っている。設置したセンサの平面位置を図 15 に断面位置を図 16 に示す。センサは施工延長全線に設置しているが図 15 では、センサの設置の代表位置として、始点側の 50m 地点から 190m 地点の 140m 区間と終点側の 510m 地点から 646m 地点の 136m 区間を示す。施工基面の沈下を計測する水盛沈下計（図 14 (a)）は軌道側の土留め壁と軌道の間に線路方向に軌道に沿って 10m 間隔で設置している。小型傾斜計（図 14 (b)）は既設の電車線の架線柱に 40m 間隔で設置しており、架線柱の傾きの計測を実施している。施工箇所については、図 14 (c)に示す支保工の切梁に設置したひずみ計および温度計により切梁軸力を計測し、多段式傾斜計（図 14 (d)）およびレーザ距離センサ（図 14 (e)）により土留壁の水平変位および内空の変位を計測している。ひずみ計は、掘削深さにより設置する支保工の段数が異なるため、各支保工が設置されるたびに設置を行い、掘削完了後躯体の構築によって、支保工の付け替えが発生した際にはひずみ計の移設を行う。多段式傾斜計および、レーザ距離センサについては、ともに土留壁の変位を計測しているものであるが、設置するコストの観点から計測する掘削の深さによって使い分けを行っている。軌道の地上との接続部に近い、掘削深さが浅い施工ブロックについてはレーザ距離センサを、その他の場所については多段式傾斜計を用いて、計測を実施している。立坑底盤の地盤変位については、リバウンド計（図 14 (f)）により計測を実施している。構内および構外の地下水については間隙水圧計および水位計により計測を行う（図 14 (g) (h)）。施工基面沈下およびリバウンドについては、地盤の隆起および沈下を示し、センサの値は隆起した場合は＋、沈下した場合は－を示す。架線柱の傾斜については、架線柱が施工箇所側に傾くと＋、軌道側に傾くと－の値を示す。土留壁水平変位および土留壁の内空変位は施工箇所側に変位があった場合（土留間の内空が狭くなった場合）に＋を示し、軌道側に変位があった場合（土留間の内空が広がった場合）に－を示す。土留壁の内空変位は施工箇所側に変位があった場合（土留間の内空が狭くなった場合）に＋を示し、軌道側に変位があった場合（土留間の内空が広がった場合）に－を示す。

表 3 計測項目一覧

	記号	計測項目	計測機器名称	計測単位	計測頻度
a	●	施工基面沈下	水盛式沈下計	mm	1回/5分
b	◇	架線柱傾斜	小型傾斜計	°	3回/日
c	▼	切梁軸力	ひずみ計	ひずみ	1回/30分
	▲	切梁温度	温度計	°C	1回/30分
d	●	土留壁水平変位	多段式傾斜計	°	1回/30分
e	■	土留壁内空変位	レーザー距離センサ	mm	1回/30分
f	◆	リバウンド	リバウンド計	mm	1回/30分
g	■	構内地下水位	間隙水圧計	kPa	1回/30分
h	■	構外地下水位	水位計	kPa	1回/日



(a)水盛式沈下計



(b)小型傾斜計



(c)ひずみ計・温度計



(d)多段式傾斜計



(e)レーザー距離センサ



(f)リバウンド計



(g)間隙水圧計



(h)水位計

図 14 設置センサ写真

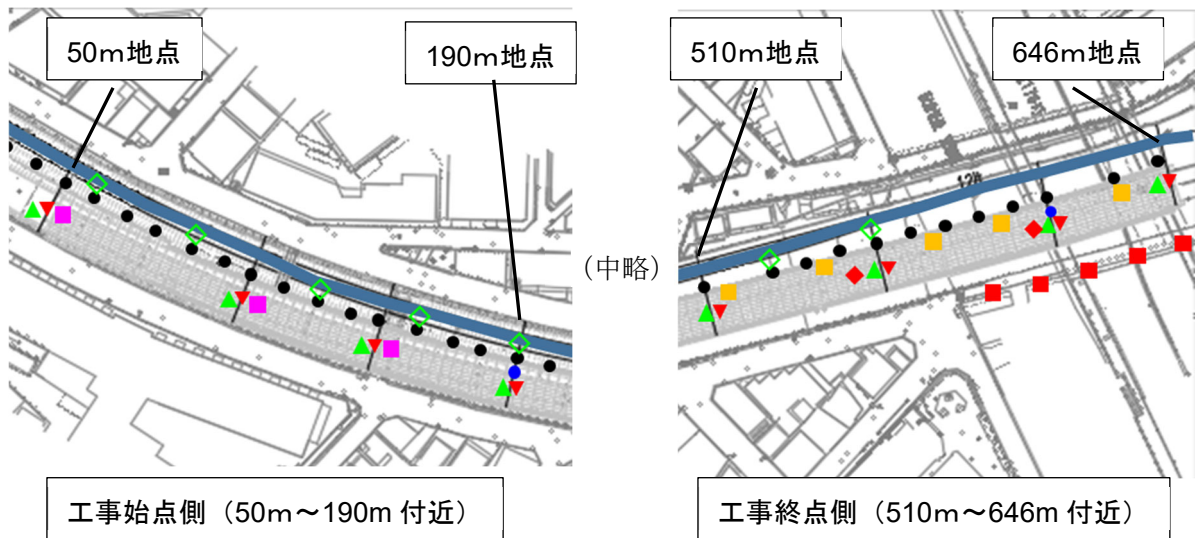


図 15 センサ配置平面図 (一部)

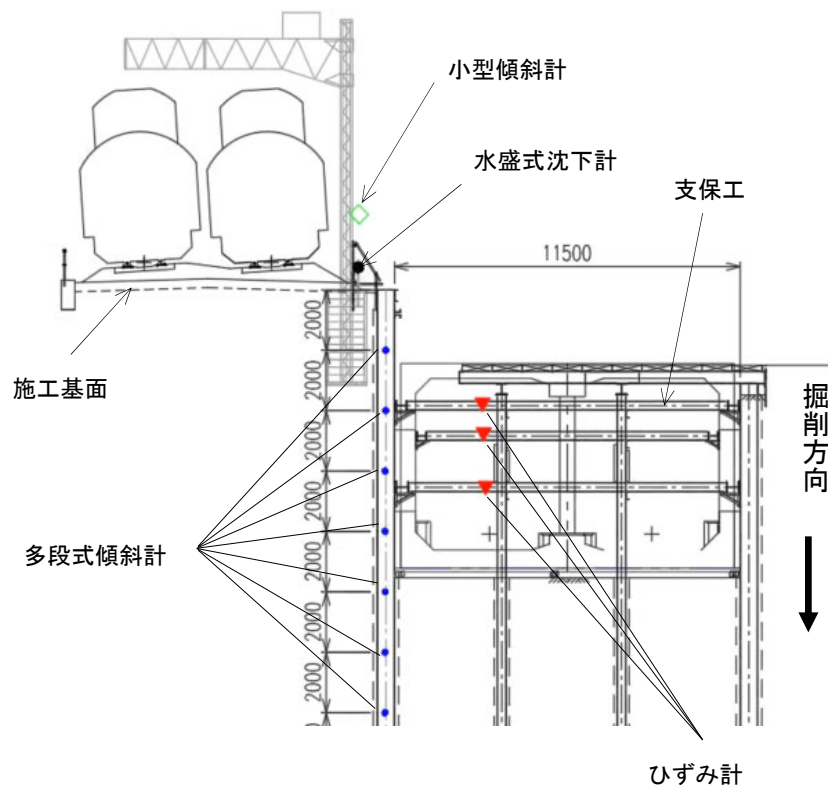


図 16 センサ配置断面図

3.4.2 適用現場の4次元モデル

A 工事における施工対象物として、土留め支保工、擁壁およびボックスカルバート等の躯体、掘削・埋戻し作業箇所の地盤形状をモデル化した。周辺構造物については、隣接する軌道および建設現場周辺の道路や近隣の建物の3次元モデルを作成した。センサの3次元モデルについては、図14に示した9種類のセンサについてモデリングを実施したが、小型のセンサについては、原寸のままモデル化した場合、俯瞰した際にセンサの変化が不明瞭となるため、視認性の向上を目的に拡大している。作成したこれらの3次元モデルに現場の工程管理システムより出力した工程データを基に時間情報を設定し、4D BIM/CIM モデルを作成した。

工程データは、工種に対する日単位での施工開始時期および施工終了時期が設定されている。工種は施工の35ブロックごとに設定されており、各ブロックは土留工事、掘削工事、躯体構築、埋戻し工事の手順で施工が行われる。掘削工事については、掘削する深さにより、1次掘削から4次掘削までの工種があり、1次掘削から3次掘削は掘削とともに施工される1段目支保工・2段目支保工・3段目支保工組立の工種がある。躯体構築は、底盤構築・底盤養生・壁構築・壁養生・支保工移設・頂版構築・頂版養生の工種がある。埋戻し工事は、支保工撤去および埋戻しの工種により構成されている。各ブロックの土留工事、掘削工事、躯体構築、埋戻し工事の作業手順に紐づく工種ごとに工程のIDを割り当て、計画開始日／終了日を設定した。実績開始日／終了日は4D BIM/CIM モデル構築時は、入力が必要はなく施工の進捗とともに建設現場で入力を行う。

3.4.3 センシングデータの連携

建設現場に設置したセンサの計測データを管理している計測管理システムより CSV 形式で出力した計測値データおよび管理値データにより計測値、管理値それぞれのデータベースを構築した。計測値のデータベースには、表-2に示した計測項目のセンシングデータが格納されている。設置済みのセンサの数は、水盛式沈下計が61個、小型傾斜計が17個、ひずみ計が33個、多段式傾斜計が68個、レーザ距離センサが3個、リバウンド計が9個、間隙水圧計が5個、水位計が5個である。それぞれのセンサについて、計測機器ID、計測項目、設置位置情報、計測日時、計測値の情報がデータベースに格納されている。センシングデータは計測頻度がセンサにより異なるため、4DSCM システムに計測値データを出力する際に代表値を決定する必要がある。工程データが日単位のデータであるため、日ごと現場状況を反映するように建設現場の計測管理システムより現場作業が終了する17時時点のデータを計測値データとして出力を行った。

管理値は、支保工の構造計算の結果より予測される土留・支保工の変位量の設計値を基に設定を行った。管理値の設計値に対して、設計値×0.8を1次管理値、設計値を2次管理値、設計値×1.2を3次管理値（限界管理値）とした。土留・支保工の変位量の設計値は掘削の進捗によ

り変わるため、1 次掘削時から 4 次掘削時などの施工段階に応じて管理値の再設定を行う必要がある。そのため、管理値データは、管理値とその管理値が適用される施工期間を示す適用日によって構成される。4DSCM システム運用時は、表示している施工日に応じて、対応する適用日の期間の管理値を使用する。

センシングデータベースの計測機器 ID に対して、3 次元モデルのオブジェクトを関連付け、センシングデータを属性情報として 4D BIM/CIM モデルに付与する。センシングデータに関連付ける 3 次元モデルの指定にはセンシングデータベースからの 3 次元モデルファイルの相対パスと 3 次元モデルファイル内のオブジェクトを示すノードパスにより判別する。計測値データおよび管理値データは、4D BIM/CIM モデルにおいて指定された日時に対して、モデルに関連付けられている計測機器 ID をもとに計測値データおよび管理値データのテーブルを参照し、計測値および管理値をモデルに反映する。

3.4.4 4DSCM システムによる管理

本システムを用いて、施工進捗およびセンサ管理やセンシングデータの管理を一元的に行った。4D BIM/CIM モデル内のセンサのオブジェクトに計測機器 ID を関連付け、センシングデータとモデルを関連付けた。施工の進捗とともに実績開始日/終了日を入力し、工程データの更新を行った。実績の工程データの入力により、工種ごとに分割されている 4D BIM/CIM モデル上に日々の施工状況が反映され、センサの日々の計測値と施工状況を連動して可視化した。

4DSCM システムにおいて、登録された工程情報を基に施工シミュレーションを実施し、施工状況の再現とともにセンシングデータの表示を行った(図 17)。2020 年 12 月 1 日の掘削・支保工組立の段階や 2021 年 12 月 3 日の埋め戻し段階において、施工中の支保工や埋め戻し作業中の箇所と既に施工が完了している支保工や埋め戻し箇所とを工程データを参照し、異なる色で着色することで区別し、作業の有無を可視化した。また、2021 年 3 月 1 日の躯体構築や 2021 年 8 月 6 日の支保工撤去の段階において、施工基面沈下の 1 次管理値を超える変動が発生しており、その状況を水盛沈下計のセンサのモデルを着色することで表現した。工程の進捗にともない、1 次管理値を超過した部分について、計測機器の 3 次元モデルの強調表示・一覧表示における該当箇所の確認ができた。また、取り込んだ計測機器データを、経時図に表現し、時間経過に伴う変動の傾向を把握することができた。

システムの工程情報を実績データに切り替えることで、施工時点の現場状況をモデル上に再現した。600m 地点において、掘削が行われている作業日に沈下計の変動が見られ、センシングデータが 1 次管理値を超過している様子が確認できた。BIM/CIM モデル上で水盛沈下計によって計測される施工基面沈下において、仮土留めの二次掘削の開始時点において、発生した沈下が 1 次管理値を超えてセンサ管理システムが警告を発出する以前に、施工による影響発生を確認できた。これにより、施工進捗にともなう周辺への影響をセンサの値を基に視覚的に確認できた。施工状況とセンシングデータの関係から、施工状況における変動要因を抽出した。

A 工事において発生したセンサの移設状況を図 18 に示す。図 18 に示す事例では幅約 11.5m, 掘削深さ約 6.3m の立坑内において、2 段の切梁を設置し、切梁それぞれにひずみ計の設置を行っていた。立坑底部において躯体底盤の構築後、壁の構築において 2 段目切梁が支障となった。そのため、壁の施工前に 2 段目切梁を撤去し、壁の構築完了後に切梁の移設を行った。その際、移設前の切梁に設置されていたひずみ計を撤去し、移設後の切梁に設置した。適用現場では、250m 地点、310m 地点、430m 地点、610m 地点において、躯体構築の支障となるため、ひずみ計が設置された切梁の移設作業が発生した。切梁の移設と合わせて移設されたひずみ計について、4DSCM システムを用いて、センサの移設が表現できたことを確認した。

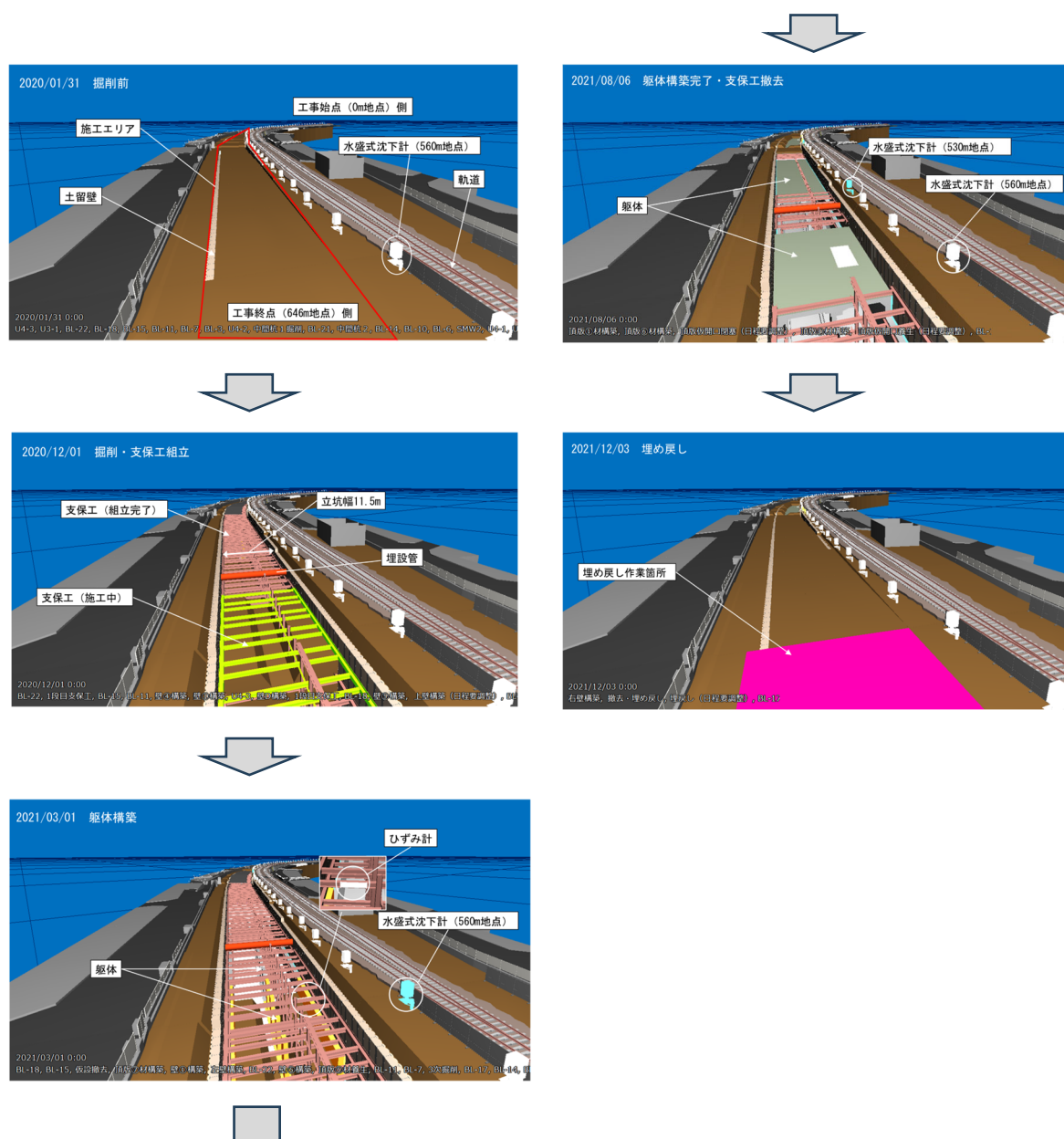


図 17 4D BIM/CIM モデル

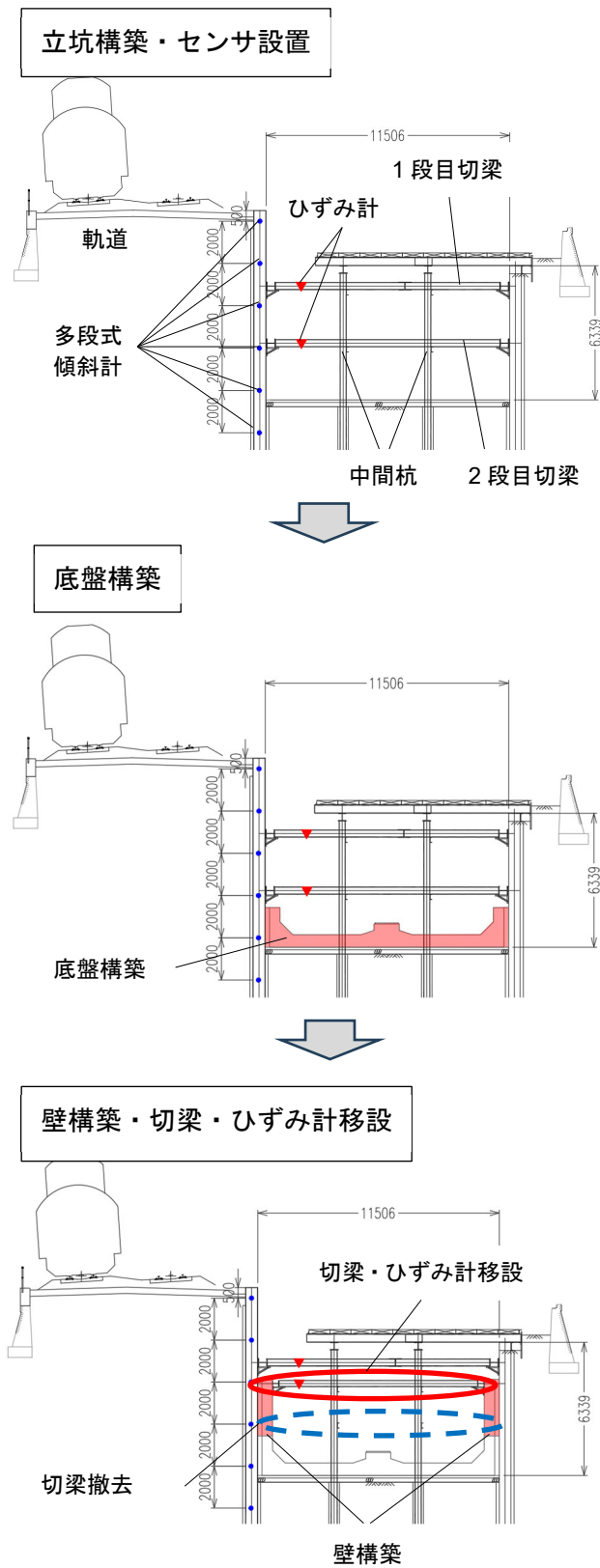


図 18 切梁およびひずみ計の移設状況

3.5 考察

通常、センサを用いた施工管理の場合、センサの管理システムよりデータを出力し、確認を行う。帳票の作成が必要な場合は、出力したセンサのデータを用いて帳票作成の作業を行っている。帳票を作成する場合は、1 回に 30 分程度の時間を要するため、日常的にセンシングデータを用いた管理を行う場合、年間で 122 時間程度の作業となる。4DSCM システムを用いることで、センシングデータは自動的にシステムに集約され、一覧表示とグラフが作成される。システムからデータを出力すれば帳票が作成されるため、1 回の帳票作成を 10 分程度で行うことができる。1 回の作業において、20 分の作業時間が短縮となるため、年間で 80 時間の時間短縮となる。さらに、管理値を超過したセンサがあった場合は、工程表や作業報告書等から作業状況を確認する作業が追加されるため、通常の管理ではより多くの作業時間を要する。しかし、本システムを使用した場合は、変動の原因となった作業状況が BIM/CIM モデル上に再現されており、工程表や作業報告書等から作業状況を確認する労力が削減される。

センサの管理業務において、4DSCM システムを用いることで施工に関する様々なデータを一元的に管理できることで作業の効率化が図れる。また、本システムの運用において、モデルとセンシングデータやセンサデータの関連付けはシステム化されており、変更または更新があったセンシングデータ、センサデータのデータベースを修正によりシステムに変更を反映できるため、変更箇所の多寡による労力は大きく変わらない。しかしながら、移設などによりモデルが変更される場合には、モデルの位置を調整する必要があるため、モデル操作に一定の労力を要する。計測計画において、事前に設置位置の追加や変更が把握できている場合は、センサの 4 次元モデルをあらかじめ配置することで、対応可能であるが、突発的なモデルの修正や変更が発生した場合の対応については課題が残る。

BIM/CIM モデルにセンシングデータを関連付け、施工状況を再現することでセンサの変動を可視化した。システム上で視覚的に状況を確認できるため、原因究明のために、工程表などの資料をそろえる労力が削減できた。本研究では、施工データの更新を 1 日に 1 回としたため、作業状況の再現が工程データを更新した前日の作業終了時点のものとなっている。当日の作業により、急激な変動が発生し、センサの警告が発せられた場合は、本システムだけでは変動の原因を確認することができない。本システムにおいて、施工状況を再現する頻度について、計測頻度の異なる各種のセンシングデータを取り込む方法やセンシングデータを施工状況と合わせて可視化する最適な頻度について、検討が必要だと考える。

本研究では、地下構造物の構築について、システムを適用し検証を行ったが、センシングを行う工種は多くある。例えば、造成工事などの土工事や山岳トンネル工事などでもセンシングは行っているが、本システムを適用する際に、4D BIM/CIM モデルでの施工進捗の表現に課題がある。そのため、その他工種に適用する際には、4D BIM/CIM モデルにおける工事進捗の表現やセンシングデータの連携についてさらなる検討が必要である。

3.6 まとめ

本章では、施工段階における計測工の効率化を目的に、4D BIM/CIM モデルに対して、センサ情報と関連付けた 4DSCM システムの構築を行った。工程情報と連動してセンシングデータを可視化することで、施工の進捗に伴うセンサ情報の変動傾向を明確にでき、モデル上でセンサを管理することで、センサの位置・計測管理情報を視覚的に共有することが可能となった。4D BIM/CIM モデルに関連付けるセンサの位置情報について、施工段階において発生するセンサの移設に伴う位置情報の変化を記録することで、センサが移設した事象を 4DSCM システム上で表現し、関係者間の情報共有を確実化することができる。これにより、本システム上でセンシングデータの変動が発生した際に、センサの移設によるセンシングデータの変化と施工に起因するセンシングデータの変動を区別することができ、工事関係者間の情報共有の不足によるセンサの状態の誤認識を防ぐことができ、センシングデータの管理業務における無駄な労力の削減となる。

また、施工段階において取得されるセンシングデータは、様々な施工の影響を受けたものであるが、4DSCM システムを適用することで施工の進捗とセンシングデータを合わせデータベース上に保管でき、別施工箇所における同一作業時の変動の傾向の把握や別工事において類似の工種の作業があった際に計測工におけるセンサ管理業務の効率化への展開が期待できる。

第4章 センシングデータの可視化と分析

4.1 センシングデータの可視化と分析手法

本章では、3章で述べた4DSCMシステムに格納されたセンシングデータの可視化と分析手法について述べる。センシングデータの可視化については、4DSCMシステムのデータベースに蓄積したセンシングデータの経時図表示と分布図表示について述べる。経時図表示では、指定した期間について選択した単一のセンサの計測値と管理値を同時に描画し、分布図表示では、指定した複数の日付のある計測項目について、折れ線グラフを描画する。また、センサの計測値と施工状況の関連を示すためにデータベースに蓄積された複数種類、複数箇所のセンサのセンシングデータを統計的に分析し、各センサの種類ごとのセンシングデータが距離ごとの相関関係を求める。

4.1.1 センシングデータの可視化

データベースに蓄積したセンシングデータの可視化について、経時図表示と分布図表示の2種類の表示方法を提案する。まず、経時図表示では、指定した期間について選択したセンサの計測値と管理値を同時に描画する。表示するグラフは縦軸が選択したセンサの計測値であり、横軸が日付となる。分布図表示では、指定した複数の日付の計測値について、折れ線グラフを描画する。同一断面におけるセンサの比較を想定しており、グラフの縦軸は、センサの設置高さ、横軸が計測値となっている。

4DSCMシステムにおいて、センシングデータベース管理システムに蓄積されたセンシングデータの経時変化を折れ線グラフの形式で表示する。本システムにおいて表示される経時図のグラフについて施工基面沈下を例として図19に示す。図19に示すグラフは縦軸が沈下量、横軸が計測日時を示している。また、施工基面沈下について設定された管理値について線が引かれている。管理値については、第1管理値と第2管理値があり、それぞれに線が引かれているが、管理値は施工の進捗に応じて変更されるため、センサデータに登録された管理値変更日である2021年2月18日以降で管理値の線の位置が変更されている。これにより2月15日から2月17日において発生していた施工基面沈下の第2管理値の超過が施工の進捗によるものと把握でき、2月17日の施工進捗をうけて変更した2月18日以降の管理値では第1管理値の範囲に収まっており、問題がないことを把握できる。

分布図グラフの例として、多段式傾斜計によって計測した土留壁水平変位のデータを図20に示す。分布図を表示する日付として、2020年8月2日、8月9日、8月16日、8月23日、8月30日の5日間を選択している。多段式傾斜計は同一断面に複数のセンサが設置されており、設置高さが2m間隔で設置されていることが分かる。また、グラフから地上の0mを境に変位の

方向が逆転していること、最下端は変位の基準となる箇所であるため、変位量が 0mm であり、同一断面においては、変位量は異なるが傾向が一致することなどが読み取れる。

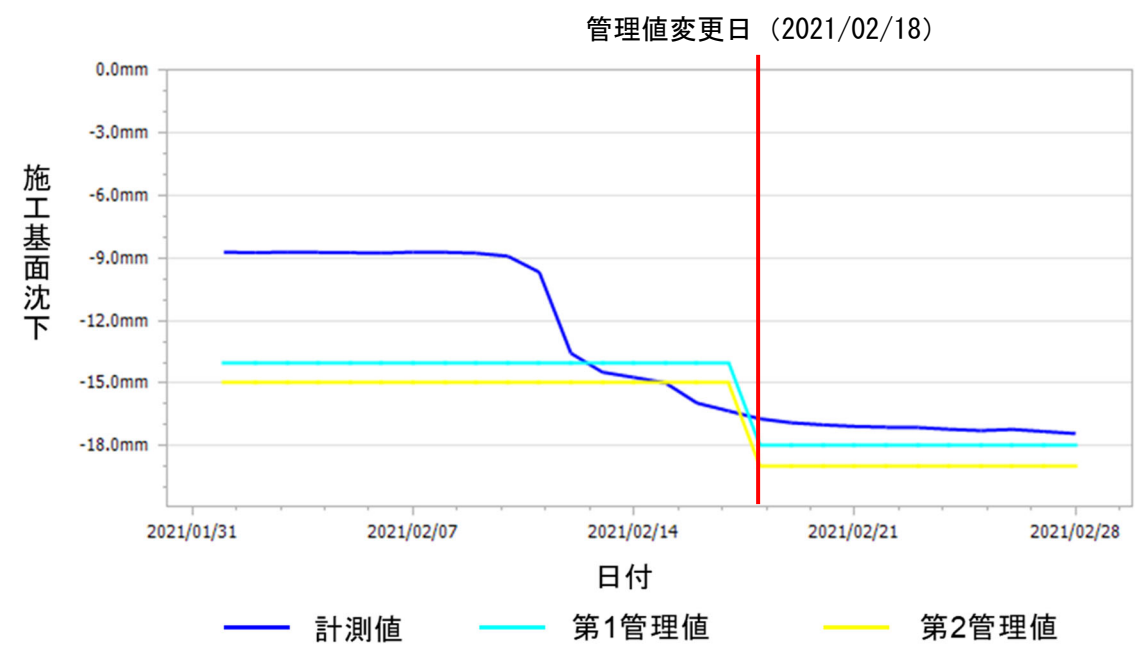


図 19 計測値と管理値の例

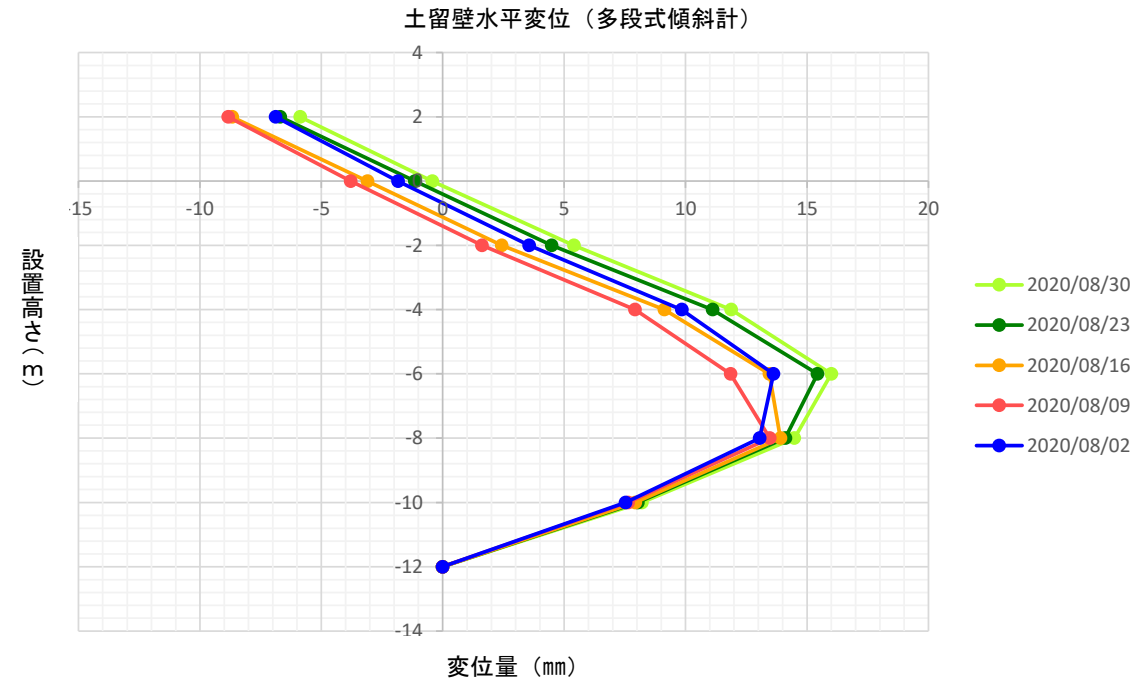


図 20 分布図表示の例

4.1.2 センシングデータの分析

センシングデータの統計分析の方法を以下に述べる。まず、センシングデータをセンサの計測項目の種類と設置位置で分類する。本論文において、センサの計測項目による分類をセンサグループ、設置位置による分類を距離グループと呼ぶ。さらに、センシングデータに影響を与える可能性がある施工において実施される作業内容についても分類を行い、作業内容の分類はタスクグループと呼ぶ。

次に、データセットについて探索的データ解析を実行し、統計分析に使用するために十分な有効な観測値を持つセンサグループ、距離グループ、およびタスクグループを特定する。探索的データ解析後、センサグループと距離グループについて分析変数のコード化を実施する。各距離グループ内において、同一の計測項目を計測する複数のセンサが異なる場所に設置されている。同一距離グループ内の同一計測項目のセンシングデータは、中央値を計算して集計を行い、この中央値を距離グループにおけるセンシングデータの値として使用する [60]。

十分な観測値を持つグループのデータを使用して、すべてのセンサグループと距離グループ間の相関係数を計算する。相関分析は、2 変数の関係を決定するために用いる統計的手法であり、どのセンサグループや距離グループについて相関関係があるかを特定するのに役立つ。この分析では、主に 2 変数間の線形相関を測定するピアソンの相関係数を使用する。2 つのデータセット間のピアソンの相関係数は、次の式 (1) で表される。

$$\gamma = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

ここで、 x および y はそれぞれのデータセットを示し、 S_x および S_y は各データセットの標準偏差、 S_{xy} は共分散、 x_i および y_i は各データセットの測定値、 \bar{x} および \bar{y} は各データセットの平均、 n は測定値の数を示す。相関係数はすべてのセンサグループ間で計算され、相関行列が作成される。ここで、各行と列は 1 つのセンサグループと 1 つの距離グループを表し、各セルの値は対応するセンサグループ間の相関係数を表す。行列をより視覚的に表現するために、各セルの色が相関係数の強さを示すヒートマップを作成する。

4.2 分析結果

4.2.1 適用現場概要

日本の鉄道工事である仮称 A 工事において適用した 4DSCM システムにおいて蓄積したセンシングデータを用いて分析を行った。A 工事は工事区間の全長 646m が既存線路に隣接しており、工事区間の全線にわたって既存線路への工事影響を監視する必要があった。また、工事区間は、施工管理と複数ブロックの同時施工を容易にするために、35 の工事ブロックに分割されている。施工ブロックの分割について、図 21 に平面図を、表 4 に各施工ブロックのブロック名、開始地点、終了地点、施工ブロック長、床付けの高さを示す。施工ブロックは、開始地点から終了地点に向かって、縦断勾配がついており、それに伴って床付け高さが下がっている。このため、施工ブロックによって、設置する土留支保工が異なり、それに伴って設置するセンサの種類や個数および計測時に採用する管理値が異なっている。

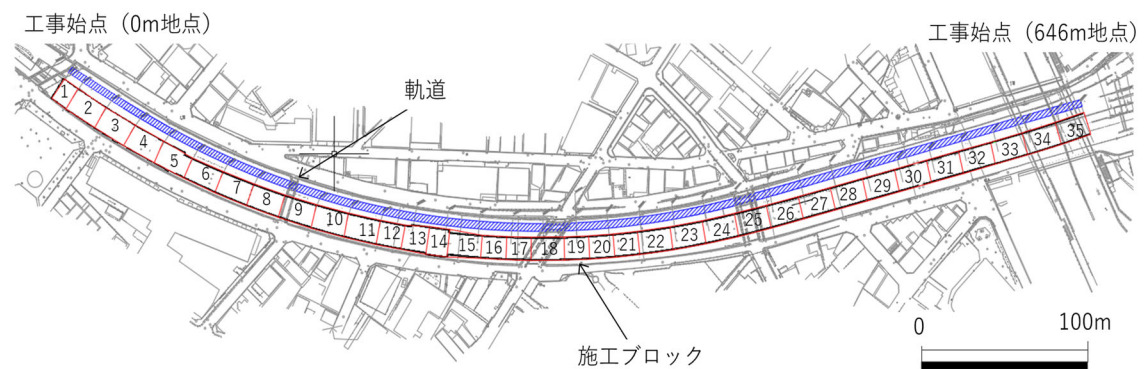


図 21 施工ブロック分割（平面図）

表 4 施工ブロック分割一覧

No	ブロック名	開始地点	終了地点	施工ブロック長(m)	床付け高さ(OP)
1	BL-1	0	10	10	-0.857
2	BL-2	10	30	20	-1.327
3	BL-3	30	50	20	-1.797
4	BL-4	50	70	20	-3.567
5	BL-5	70	90	20	-4.037
6	BL-6	90	110	20	-5.707
7	BL-7	110	130	20	-6.177
8	BL-8	130	150	20	-6.39
9	BL-9	150	170	20	-6.39
10	BL-10	170	190	20	-6.39
11	BL-11	190	210	20	-6.39
12	BL-12	210	225	15	-6.34
13	BL-13	225	240	15	-6.127
14	BL-14	240	252.5	12.5	-6.127
15	BL-15	252.5	272.5	20	-6.567
16	BL-16	272.5	287.5	15	-7.037
17	BL-17	287.5	302.5	15	-7.507
18	BL-18	302.5	322.5	20	-7.971
19	BL-19	322.5	337.5	15	-7.971
20	BL-20	337.5	352.5	15	-8.356
21	BL-21	352.5	367.5	15	-8.641
22	BL-22	367.5	387.5	20	-8.847
23	BL-23	387.5	407.5	20	-9.047
24	BL-24	407.5	427.5	20	-9.191
25	BL-25	427.5	447.5	20	-9.447
26	BL-26	447.5	467.5	20	-9.68
27	BL-27	467.5	487.5	20	-9.847
28	BL-28	487.5	507.5	20	-10.047
29	BL-29	507.5	527.5	20	-10.247
30	BL-30	527.5	547.5	20	-10.447
31	BL-31	547.5	567.5	20	-10.74
32	BL-32	567.5	587.5	20	-10.906
33	BL-33	587.5	607.5	20	-11.069
34	BL-34	607.5	627.5	20	-11.233
35	BL-35	627.5	646	18.5	-11.356

4.2.2 距離グループの分類

これらの施工ブロックについて 5 つの距離グループに分類を実施した。距離グループの分類について表 5 に示す。距離グループ 1 は BL1 から BL6 の 6 ブロック，距離グループ 2 は BL7 から BL13 の 7 ブロック，距離グループ 3 は BL14 から BL23 の 10 ブロック，距離グループ 4 は BL24 から BL28 の 5 ブロック，距離グループ 5 は BL29 から BL35 の 7 ブロックが含まれている。各距離グループの長さは距離グループ 1 が 110m，距離グループ 2 が 130m，距離グループ 3 が 170m，距離グループ 4 が 100m，距離グループ 5 が 140m となっている。

表 5 距離グループ

グループ No	施工ブロック名	開始位置 (m)	終了位置 (m)	距離グループ長 (m)
1	BL1 →BL6	0	110	110
2	BL7 →BL13	110	240	130
3	BL14→BL23	240	410	170
4	BL24→BL28	410	510	100
5	BL29→BL35	510	646	136

A 工事では軌道の施工基面の沈下を測定する沈下計を，土留め壁と線路の間の既存線路側に工事区間に沿って 10m 間隔で設置した。既存線路の架空電車柱には 40m 間隔で小型傾斜計を設置し，電柱の傾斜を測定した。支保工の支柱にはひずみゲージと温度計を設置し，支柱の軸力を測定した。掘削深度によって設置する支保工が異なるため，ひずみゲージは一定間隔ではなく，支保工を設置するたびに設置された。擁壁の水平変位と内部空間の変化を計測するために，多段傾斜計とレーザ距離センサを使用した。

A 工事の施工ブロックは，図 22 に示す 2 つ形状があり，掘削深さが浅い，BL1 から BL13 の区間において U 字型の形状のコンクリート躯体が構築され，BL14 から BL35 の区間においてボックス型形状のコンクリート躯体が構築されている。構築する躯体形状によって設置されるセンサ類が異なっており，例えば，U 字型の掘削深度が浅い施工ブロックにはレーザ距離センサを使用し，ボックス型の掘削深度が深いブロックには多段傾斜計を使用している。これは，多段傾斜計とレーザ距離センサはどちらも擁壁の変位を計測するが，設置コストの観点から，計測する掘削深度に応じて使い分けているためである。設置したセンサの総数は，沈下計 61 台，小型傾斜計 17 台，ひずみゲージ 33 台，多段傾斜計 68 台，レーザ距離センサ 3 台であった。

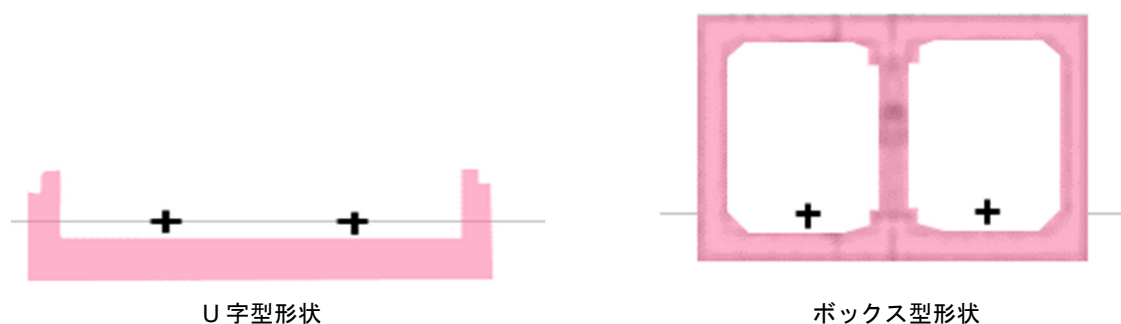


図 22 施工ブロック形状

4.2.3 センサグループの分類

設置されたセンサから，土留壁変位，施工基面沈下，架線柱傾斜の 3 つの計測項目についてセンサグループを設定し，その分類を表 6 に示す。センサグループの 3 つのグループについて，土留壁変位のグループはグループ名を「dis」とし，土留壁の変位を計測している多段式傾斜計およびレーザ距離センサが含まれている。施工基面沈下のグループは，グループ名を「sub」とし，水盛式沈下計が含まれており，最後に架線柱傾斜のグループはグループ名を「inc」とし，小型傾斜計が含まれている。

表 6 センサグループ

グループ名	計測項目	センサの種類
dis	土留壁変位	多段式傾斜計/レーザ距離センサ
sub	施工基面沈下	水盛式沈下計
inc	架線柱傾斜	小型傾斜計

各センサグループの名称と距離グループの番号を組み合わせたコードのラベルを表 7 に示す。例えば，距離グループ 1 の土留壁変位であれば，センサグループの名称「dis」と距離グループの番号「1」を組み合わせ「dis-1」とした。距離グループ 1 の設置センサ数と収集された測定値は，統計分析を行うには不十分であったため，分析から除外した。さらに，センサが一定の間隔で設置されておらず，支保工の設計が建設の長さに沿って変化するため，支柱のひずみと温度のデータを距離グループごとに集計しても意味のある情報は得られなかった。そのため，支柱のひずみと温度のデータは，現在の統計分析から除外した。

表 7 距離グループとセンサグループのラベル

		Distance groups				
		1	2	3	4	5
Sensor groups	dis	dis-1	dis-2	dis-3	dis-4	dis-5
	sub	sub-1	sub-2	sub-3	sub-4	sub-5
	inc	inc-1	inc-2	inc-3	inc-4	inc-5

4.2.4 タスクグループの分類

BIM 4D モデルに関連付けられた工程データを基に施工現場に実施されている作業について分析対象とした作業をタスクグループに分類し、その結果を表 8 に示す。A 工事において行われている工程について、10 個の作業を抽出し、タスクグループとした。

表 8 タスクグループ

タスクグループ名	作業名
task1	掘削
task2	埋め戻し
task3	鋼矢板打設
task4	土留支保工
task5	土留支保工解体
task6	躯体構築
task7	足場・型枠解体
task8	軽作業（測量・清掃等）
task9	排水工
task10	鉄筋型枠

4.2.5 統計分析結果

2020 年 5 月から 2022 年 2 月までに取得したセンシングデータを分析した。潜在的な相関関係を視覚的に調査するために、すべての距離グループのセンシングデータの時系列プロットを作成した（図 23）。その結果、距離グループ 5 の土留壁変位と施工基面沈下のデータ間の逆相関など、いくつかの相関関係が明確に確認できた。各距離グループのセンシングデータについて、その距離グループにおいて実施されたタスクグループの作業を抽出し、その結果を箱ひげ図として図 24 に示す。

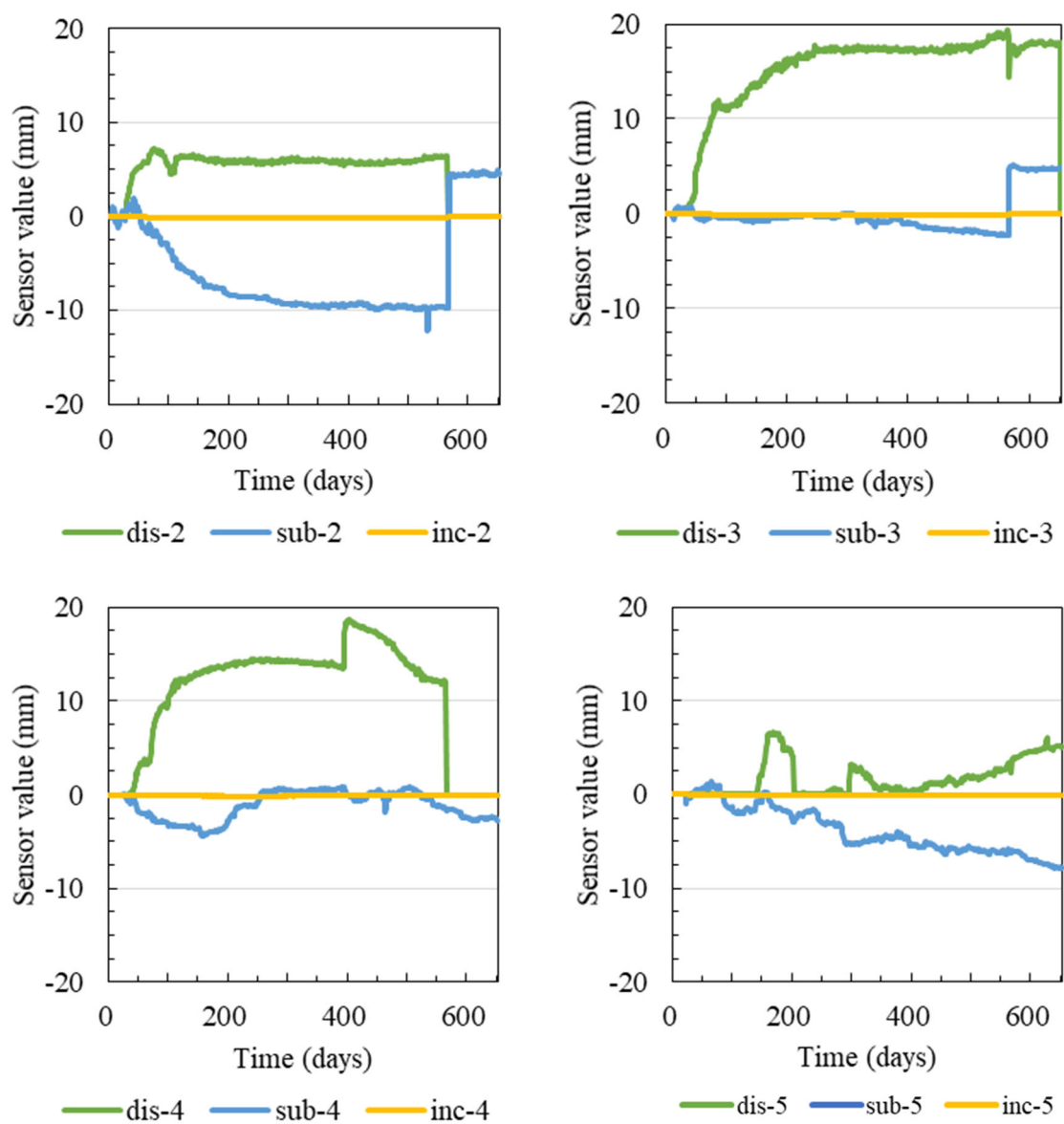


図 23 センシングデータの経時図



図 24 箱ひげ図

すべてのセンサグループと距離グループ 2, 3, 4, 5 の間のピアソン相関を求め、図 25 に示すヒートマップが生成した。図 25 では、正の相関は赤で、負の相関は青で示されている。色が濃いほど、相関が高くなることを示している。

有意な相関の閾値として 0.75 を使用した場合、相関関係のヒートマップから、同一距離グループでは、dis-3 と inc-3 の相関係数が-0.89 であり、dis-4 と inc-4 の相関係数が-0.79 となっており、距離グループ 3 と 4 において、土留壁水平変位の計測値と架線柱傾斜の計測値に負の相関関係が見られる。また、隣接する距離グループでは、距離グループ 2 と 3 において、sub-2 と dis-3 の相関係数が-0.97, sub-2 と inc-3 の相関係数が 0.85, inc-2 と dis-3 の相関係数が-0.78 であり相関関係が見られる。距離グループ 3 と 4 において、dis-3 と inc-4 の相関係数が-0.78, と inc-3 と dis-4 の相関係数が-0.9 となっており、土留壁水平変位の計測値と架線柱傾斜の計測値に負の相関関係が見られる。dis-3 と dis-4 の相関係数は 0.9 であり、隣接する距離グループにおいて、同一の計測項目のセンサに高い相関がある箇所があった。隣接していない距離グループ間では、sub-2 と dis-3 の相関係数が-0.97, sub-2 と dis-4 の相関係数が-0.9, sub-2 と inc-4 の相関係数が 0.75, inc-2 と inc-4 の相関係数が 0.79, dis-3 と sub-5 の相関係数が-0.77, sub-2 と sub-5 の相関係数が 0.83 となっており相関関係が見られた。

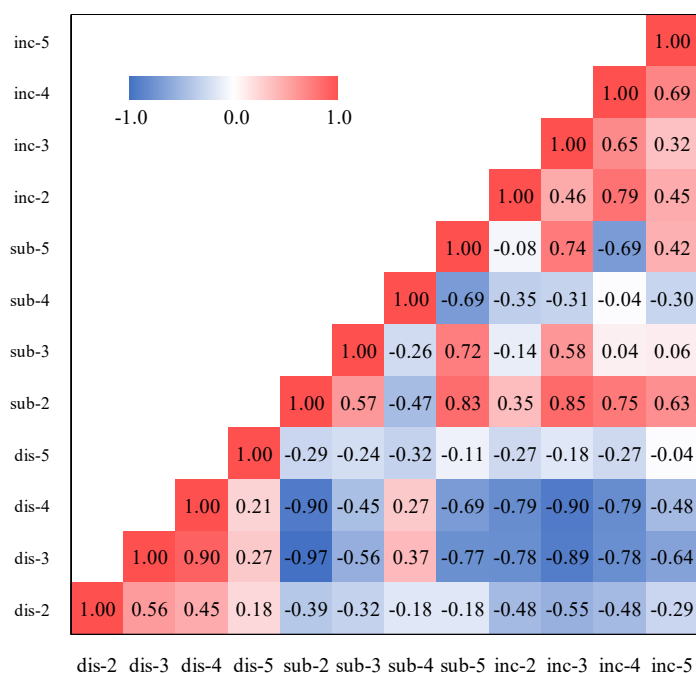


図 25 センサグループのピアソン相関係数行列

4.3 考察

データベースに蓄積されたセンシングデータを、管理値と同時に経時図の形式で出力した。センシングデータの経時図では、施工進捗にともなう管理値の変化を表現することで、超過が発生したセンシングデータと管理値の関係を把握することができた。また、4DSCM 上に再現された施工状況と合わせて確認することで、センシングデータと変動と現場状況を関連付けて、例えば、施工基面沈下は掘削・支保工設置・底板の施工時に値が変動していることなど、施工進捗によってセンシングデータが大きく変動する箇所を確認することができた。しかし、工程の実績データは1日1回の更新であったため、作業状況の再現は工程データが更新された前日の作業終了時のものである。日々の作業により急な変化が発生し、センサの警報が発令された場合、このシステムだけでは変化の原因を確認することができない。本システムにおける施工状況の再現頻度については、計測頻度の異なる様々なセンシングデータの取り込み方法や、センシングデータを可視化する最適な頻度を施工状況とともに検討する必要があると考えられる。

センシングデータの分析では、センシングデータ間の相関関係を調べ、いくつかの相関関係があることを示した。ピアソンの相関係数のヒートマップでは、センサグループ間において相関関係があることを示しめしたが、同一の距離グループ内だけでなく、異なる距離グループ間でも相関関係があった。他のセンサとの相関係数が高いセンサは、同じ変動原因を測定している可能性があり、計測時の状況によっては、冗長と判断できる可能性がある。その場合、そのセンサを取り外しても、モニタリングの効果にほとんど影響を与えることなく、設置するセンサを削減することが可能となると考える。

タスクグループを含めた分析では、距離グループ2では、task7（足場・型枠解体）がセンサグループ全体で最も多く、距離グループ3では、task9（排水工）がセンサグループ全体で多く見られた。距離グループ4では、task1（掘削）と4（土留支保工）が多く、距離グループ5では、task1（掘削）とtask3（鋼矢板打設）が多く見られた。工事所においては、複数の作業が並行して実施されており、単一の作業のみを対象にデータの抽出を行うと、分析に必要な観測値が減少するという課題もあった。

4.4 まとめ

本章では、4DSCM システムにおいて、データベースに蓄積されているセンシングデータを管理値や他のセンサと合わせてグラフ化し、センシングデータの変化を可視化する方法を述べた。また、4DSCM システム上で再現されている施工状況と合わせて表示するグラフを確認することで、センシングデータの変動があった箇所における施工状況の確認を容易に行うことができ、現場状況の確認の労力が軽減されることができる。

また、4DSCM 上におけるセンシングデータの可視化に加えて、システム上に蓄積された2年間分のセンシングデータを今後のセンシングデータの変動の予測やセンサ管理業務の効率化に

活用することを目的にセンシングデータの分析を実施した。センサを設置位置，計測項目に応じて分類し，グループ化を行い，適用現場において行われた作業を分類したタスクグループを作成し，タスクグループの各作業が行われている際のセンシングデータを抽出し分析を行った。抽出したデータにより，グループ間の相関関係を分析することで，センシングデータ間の関係を示した。さらなるセンシングデータ間の関係を分析するためには，特にセンサに影響を与える作業内容や位置関係について，観測データセットに入力する必要がある。これにより，タスクグループを含めた分析の品質が向上する。

第5章 土砂トレーサビリティ管理システム

5.1 本章の概要

本章では、ICT 土工において取得される施工履歴のデータに着目し、施工履歴のデータと IoT センサを用いたダンプトラックのセンシングを組み合わせることで自動的に盛土のトレーサビリティデータを作成する土砂トレーサビリティ管理システムを提案する。土砂トレーサビリティ管理システムを造成工事の実現場に適用し、トレーサビリティデータの自動作成およびその効果について、検証した。

5.2 土砂トレーサビリティ管理システム

5.2.1 システム概要

土砂トレーサビリティ管理システムは、「どの土」を「どの場所」に盛土したかを自動で記録可能なシステムである（図 26）。図 26 上部のダンプトラックセンシングは土取場から盛土箇所までの土砂の動きを示しており、盛土箇所においてダンプアップされた土砂の情報は転圧管理システムにより、転圧データとして取得される。土砂運搬のダンプトラックに設置したセンサにより、運搬中に取得したセンシングデータは図中央に示すセンサデータプラットフォームに蓄積され、どの土取場から施工箇所の盛土場に運搬したかを記録する。センサのデータを、ICT 土工の盛土工事において導入される締固め管理システムから出力される転圧施工履歴データと関連付けることで、盛土材のトレーサビリティデータとなる 3 次元土工管理図を自動作成する。3 次元土工管理図では、物体の形状を立方体のような空間格子の集合によって表現するボクセルモデルを使用し盛土形状を表す。モデルを構成する各ボクセルは土質情報によって色分けされており、属性情報として施工日や転圧回数や施工層番号など転圧の施工管理データ等を保持している。

本システムは、ダンプトラックのセンシングを行うダンプアップ検知センサ、土砂運搬のダンプの記録を保管および情報共有するセンサデータプラットフォーム、センサデータプラットフォームに保管されているダンプアップのセンシングデータと締固め管理システムより出力される転圧施工履歴データの関連付けを実施する土砂トレーサビリティ管理アプリケーションによって構成されている。システムを構成する各項目について以降の項で詳細を述べる。

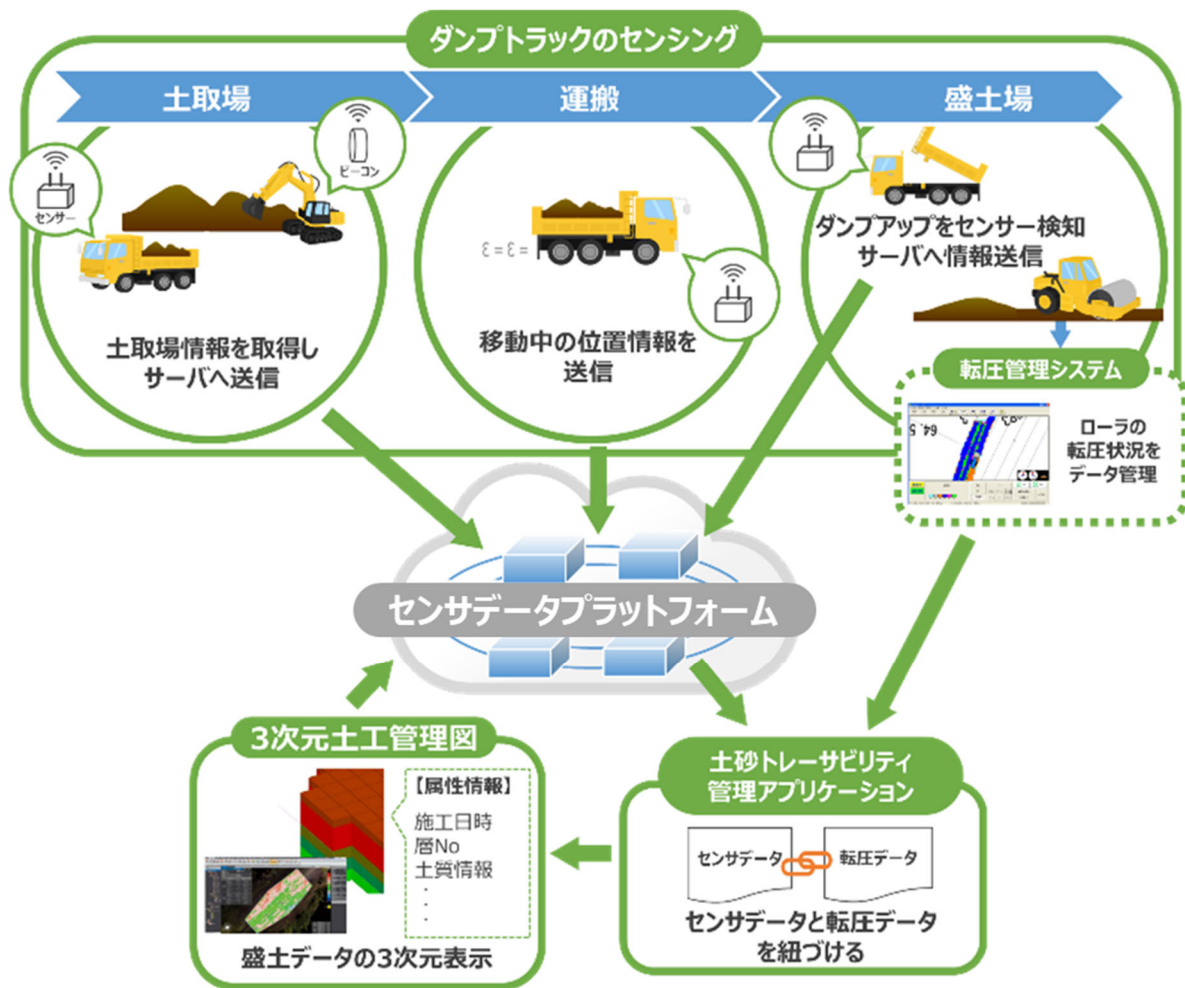


図 26 土砂トレーサビリティ管理システム全体図

5.2.2 ダンプアップ検知センサ

土砂運搬ダンプトラックの土砂の積み込みおよび荷下ろしを検出するためにダンプアップ検知センサの開発を行った [61]。ダンプアップ検知センサは、センサ本体、ダンプアップ検知部、電源コネクタにより構成されている（図 27）。

センサ本体には、GNSS 受信機、LTE (Long Term Evolution) 通信機、BLE (Bluetooth Low Energy) 受信機を内蔵している。また、ダンプアップ検知部は加速度センサと触圧センサにより構成されており、図 28 に示すようにダンプトラックのキャビン内のダンプアップレバーに取り付ける。電源は電源コネクタを通じダンプトラックのシガーソケットより給電を行う。

盛土場において、荷台の土砂荷下ろし時に運転手が行うダンプアップレバーの操作を検知する。ダンプアップ時にボタンを押下しダンプアップを記録する方式の場合、スイッチの押し忘れにより、記録漏れが発生する。そこで、ダンプアップの際に必ず発生するレバーの操作を触圧センサおよび加速度センサにより検出する方式を採用する。ダンプアップの操作を検知した

際は、センサの ID・ダンプアップ有の識別子・荷下ろし位置情報・時刻（以下、荷下ろしデータ）をサーバに送信する。

土取場の識別にはビーコンを土砂の積込バックホウに設置する（図 29）ことで対応する。土取場の判別を位置情報のみで行うと、土取場とする箇所の座標の範囲を別途設定する必要があるため、ビーコンを使用し、土取場所の判別を行っている。センサを搭載したダンプトラックがビーコンを設置した積込みバックホウに接近するとビーコンの電波を受信し、受信したビーコンの識別信号とその時の時刻・位置情報・センサの ID（以下、積込みデータ）を LTE 通信によりサーバに送信する。積込みデータに含まれるビーコンの識別子より、どの土取場において積み込んだかの判定を実施する。運搬時も GNSS により位置情報を取得し、30 秒に 1 回サーバにデータを送信する。通信が行えない場所を走行する場合は、データを内部のメモリに記憶し、通信が回復したタイミングでサーバに送信し、データの損失を防ぐ。

センサ本体
（GNSS 受信機，LTE 通信機，BLE 受信機）



ダンプアップ検知部（触圧センサ，加速度センサ）



LED ランプ（FIX 時）



LED ランプ（Float 時）

図 27 ダンプアップ検知センサ



図 28 ダンプアップ検知センサ取り付け状況

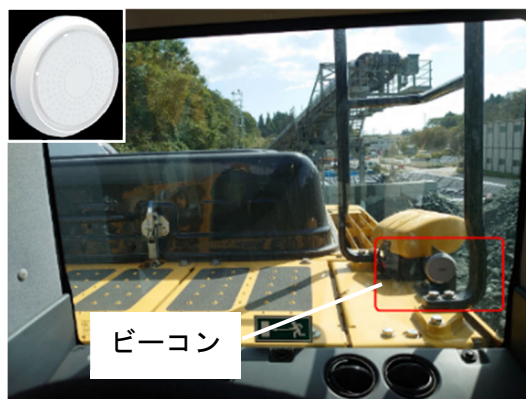


図 29 積込みバックホウビーコン設置状況

5.2.3 センサデータプラットフォーム

センサデータプラットフォームでは、ダンプアップ検知センサよりサーバに送信された積込データおよび荷下ろしデータの整形および可視化を行う。

荷下ろしデータがセンサプラットフォームに送信されると、荷下ろしデータに含まれるセンサの ID をもとに時系列にデータを遡り、センサの ID が同一である直近の積込みデータを参照する。参照した積込みデータと荷下ろしデータを結合し、積込みから荷下ろしまでの一連のダンプアップデータを生成する。

センサデータプラットフォーム上においては、指定した任意の日付または期間における土砂運搬のダンプトラックの走行経路の確認、積込位置および荷下ろし位置の地図上へのプロットデータを確認できる。図 30 にセンサデータプラットフォームに運行経路をプロットした画面を示す。センサデータプラットフォームはクラウド上で稼働しているため、スマートデバイスを使用することでどこからでもデータを確認することができる。



図 30 センサデータプラットフォーム

5.2.4 管理アプリケーション

土砂トレーサビリティ管理アプリケーションの（以下、管理アプリケーション）の操作画面を図 31 に示す。管理アプリケーションの操作画面はテナント ID, サイト ID, 処理対象の選択, データ取得年月, 土質判定数が入力できる。

The screenshot shows a web application window titled '土砂トレーサビリティ' (Soil Traceability). It contains the following input fields and controls:

- テナントID** (Tenant ID): Text input field containing 'oku_21afa1e394273c6bbe7b'.
- サイトID** (Site ID): Text input field containing 'shitara'.
- 処理対象の選択** (Selection of processing target):
 - ☐ プロジェクト (Project): Dropdown menu showing 'Project1'.
 - ☒ ファイル (File): Text input field containing 'C:\Users\ATS\OneDrive - Hexagon\Desktop\受入'. To its right is a button labeled '参照' (Reference).
- データ取得年月** (Data acquisition year/month): Year input field '2023', a dropdown for '年' (Year), month input field '01', and a dropdown for '月' (Month).
- 土質判定数** (Soil quality judgment count): Text input field containing '10'.
- Buttons**: '開じる' (Close) at the bottom left and '処理開始' (Start processing) at the bottom right.

図 31 土砂トレーサビリティ管理アプリケーション操作画面

テナント ID はシステムを利用する会社を識別する ID であり、サイト ID は同一会社内で現場を識別する ID であり、設定ファイルにて定義された値が自動的に入力される。処理対象の選択は、転圧施工履歴データを指定する箇所であり、締固め管理システムのプロジェクトを直接指定する方法と締固め管理システムから出力された転圧施工履歴データが保存されているディレクトリよりファイルを選択する方法の 2 種類の指定方法がある。これは、締固め管理システムを提供しているメーカーにより、転圧管理システムの出力方法が異なっており、施工現場において使用される締固め管理システムは現場ごとに選択され、全現場で利用するメーカーで統一されていないことから、複数社の締固め管理システムに対応するための 2 種類の取り込み方法を用意する。データ取得年月日は、トレーサビリティデータを作成したい年月の選択であり、月ごとにトレーサビリティデータを作成する仕様である。前月以前の月を指定した場合は、前月の初日から末日までのデータが出力され、当月を指定した場合は、管理アプリケーションの操作を行った日が属する月の初日から、操作日の前日までのデータを出力する。当日のデータは施工が完了していない状態である可能性があり、正確なトレーサビリティデータを出力することができないため、1 日あたりの作業が終了している前日までのデータをトレーサビリティデータとして出力する。土質判定数は、空白ボクセルに対して、土質情報を決定する際に利用する判定数である。土質判定数については次項において述べる。

管理アプリケーションを利用する際は、まず土質情報のマスタとなる土取場データを設定する。土取場データとは、盛土工の施工に伴って実施する盛土の土質試験等の情報を基に、土取場においてどの時期はどのような土質の土砂の積込みを行っていたかを登録したデータである。土取場データの例を表 9 に示す。土取場データは、`terminal_tag`, `start_date`, `end_date`, `soil_type` から構成される。`terminal_tag` は土取場の積込バックホウに取り付けられたビーコンの ID, `start_date` は土取場の積込開始日, `end_date` は積込終了日, `soil_type` は土取場で積み込んでいる土の種類である。`start_date` と `end_date` の値は、「YYYYMMDD」形式の日付を表す。たとえば、20220101 の場合、「2022」は年、「01」は 1 月、「01」は 1 日である。土取場データは土取場の積込バックホウに設置したビーコンの ID (`terminal_tag`) に対して、`start_date` 欄および `end_date` 欄に指定された期間において、対応する `soil_type` 欄に設定された土質を反映する。同一の積込バックホウにおいて、施工時期によって積み込む土砂の土質情報が変化する場合がありますため、ビーコンの ID に対して、期間を設定し土質情報の管理を行う。管理アプリケーション上で指定した日時のダンプアップデータをクラウドからダウンロードし、土取場データおよび転圧施工履歴データと結合することで、荷下ろし位置における積込み時の土質情報（以下、荷下ろし情報）を判別する。

表 9 土取場データ例

terminal_tag	Strat_date	End_date	soil_type
BLE1	20220101	20220131	砂質土 1
BLE1	20220201	20220331	粘性土
BLE2	20220101	20220331	砂質土 2

次に、設定ファイルの設定を行う。設定ファイルはテナント ID、サイト ID、センサデータプラットフォームの接続 URL およびログイン ID、パスワード、締固め管理システムのプロジェクトのフォルダへの相対パス、ダウンロードしたセンシングデータの保存先が定義されているテキストファイルである。土取場データおよび設定ファイルを定められたフォルダに保存することで、管理アプリケーションを動作させることが可能となる。

5.2.5 3次元土工管理図

管理アプリケーションを操作することでトレーサビリティデータとして、土質情報を結合した転圧施工履歴データを出力できる。出力されたデータを 3 次元 CAD ソフトウェアに取込むことで、土質ごとに色分けされた 3 次元土質管理図を確認できる。今回、3 次元土工管理図を構築するボクセルモデルはダンプ一台当たりの運搬土量および転圧の層厚から、 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 0.3\text{m}$ のサイズとした。盛土は 1 層当り 0.3m ごとに施工するためボクセルの高さを 1 層の厚さを表現できる 0.3m とし、ダンプ 1 台の土砂の運搬量が $5\text{m}^3 \sim 5.5\text{m}^3$ であることから、1 台分の土砂を包含できる大きさとして長さ 5m 、幅 5m のボクセルの大きさを設定した。

管理アプリケーションから出力するデータを表 10 に示す。出力されるデータのうち、No.1 から No.13 のデータは締固め管理システムに依存するものであり、使用した締固め管理システムのメーカーにより出力される項目や順番が異なる。例えば、No.5、No.6 の表示形式が異なる、No.7 から No.11 の順番が異なる、No.13 の CCV 値が出力されないなどである。一方で、No.14 以降の項目は管理アプリケーションを通じて転圧施工履歴データに追加されるデータである。No.14 および No.15 は土質情報を付与するボクセルを生成する際の順番を示し、モデルの原点 (0, 0) を基準とした通し番号を示す。No.16 の土質情報は土質マスタより取得したボクセルに付与される土質の名称であり、No.17 の土の混合率はボクセルの土質を決定する際に、該当ボクセルに振り分けられた土質情報の投入割合を示す。

表 10 管理アプリケーション出力データ

No	項目	説明
1	X	メッシュの中心X座標 (m)
2	Y	メッシュの中心Y座標 (m)
3	H	標高 (m)
4	計画高	計画高 (m)
5	施工日	施工日 (YYYYMMDD形式)
6	時刻	施工時刻 (HHMMSS形式)
7	層厚	規定層厚 (m)
8	層No	層番号
9	サイズ	メッシュサイズ (m)
10	規定回数	規定回数
11	転圧回数	転圧回数
12	温度	表面温度
13	CCV値	CCV値
14	5mメッシュ縦位置	ボクセル (メッシュを縦5m、横5mに分割) 生成時の縦位置インデックス
15	5mメッシュ横位置	ボクセル (メッシュを縦5m、横5mに分割) 生成時の横位置インデックス
16	土質情報	土質マスタから取得した土質名称
17	土の混合率	「土質情報：投入割合」形式。 複数の土質が混在している場合、土質マスタに定義した土質の順番で全角カンマ「、」で区切り出力する。

盛土施工の場合、荷下ろし場所から周辺に敷均して施工する場合があります、土砂は荷下ろし場所から周辺に分散して盛土されることが起こり得る。そのため、荷下ろし位置が含まれるボクセルと最大 8 つの隣接するボクセルに式(2)により土質情報を振り分ける (図 32)。

$$S_i = V \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^9 \omega_i} \quad (2)$$

ここで、 S はボクセルに振り分けられる土量、 V は荷下ろし土量、 ω は隣接ボクセルごとの重み、 i は振分けを実施するボクセルの数である。

隣接ボクセルごとの重みについては式(3)により、荷下ろし位置から隣接ボクセルの重心までの距離に応じて距離の逆数により重みづけを行う。

$$\omega_i = \frac{\sum_{i=1}^9 L_i}{L_i} \quad (3)$$

ここで、 L は荷下ろし位置から荷下ろし位置が属するボクセルおよび隣接するボクセルの重心までの距離である。図 32 に示すように荷下ろし位置を含んだボクセルを中心に、荷下ろし位

置から重心までの距離に応じて隣接するボクセルに振り分ける。例えば、図中に示す 1 回目の荷下ろしでは、荷下ろし位置のボクセルとその周囲の 8 つのボクセルに割り当てを実施し、2 回目の荷下ろしは、荷下ろし位置が 1 回目と異なるため、2 回目の荷下ろし位置が含まれるボクセルを中心に隣接する 8 つのボクセルに割り当てを実施する。1 回目と 2 回目の荷下ろし位置が近い場合、同一ボクセルに複数回の割り当てが行われる。

重み付けの振り分け計算後、ボクセル内で土質毎の投入割合を計算し、最大となる土質をそのボクセルの代表土質として属性情報の付与および 3 次元モデル上のボクセルの色情報を決定する（図 33）。例えば、図 33 のボクセル B は割り当てられた土質情報が 1 つのため、その土質がボクセルの代表土質となる。一方、ボクセル A は、2 種類の土質が割り当てられているため、割り当てられた数量が多い土質の色情報である黄色がボクセル A の表示される色となる。

荷下ろし位置から敷均しにより盛土を行う場合に、ボクセル内に荷下ろし情報がない場合も考えられる。締固め管理システムに、転圧施工管理データが存在しかつ荷下ろし情報がないボクセルが存在する場合は、隣接ボクセルの土質情報を参照し、ボクセルの着色を行う。隣接ボクセルの土質情報を参照する場合は、空白ボクセルの中心から距離が近い 10 点を参照した上で、土質割合を計算しボクセルの色を決定する。空白ボクセルから参照する点数については可変値であり、操作画面の土質判定数において指定された数値が参照される。

ボクセルの色情報については、各ボクセルの代表土質に対応した色となるが、ボクセルに割り当てられた土質の割合である土の混合率を属性情報として格納しているため、3 次元土工管理図のボクセルを選択することで、土の混合率を確認できる（図 34）。

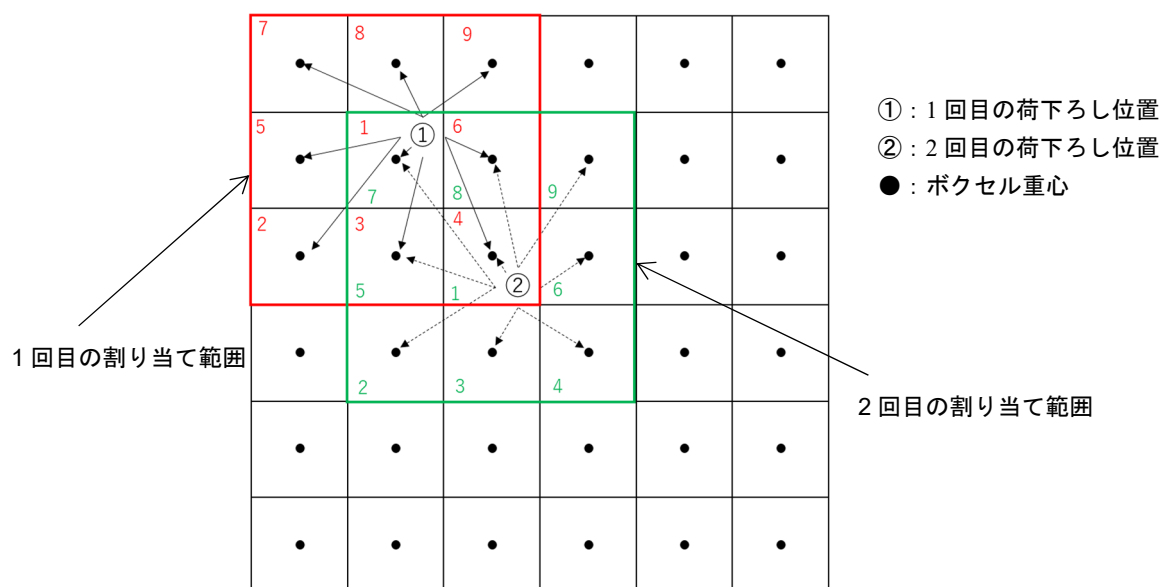


図 32 荷下ろし土砂の振り分けイメージ

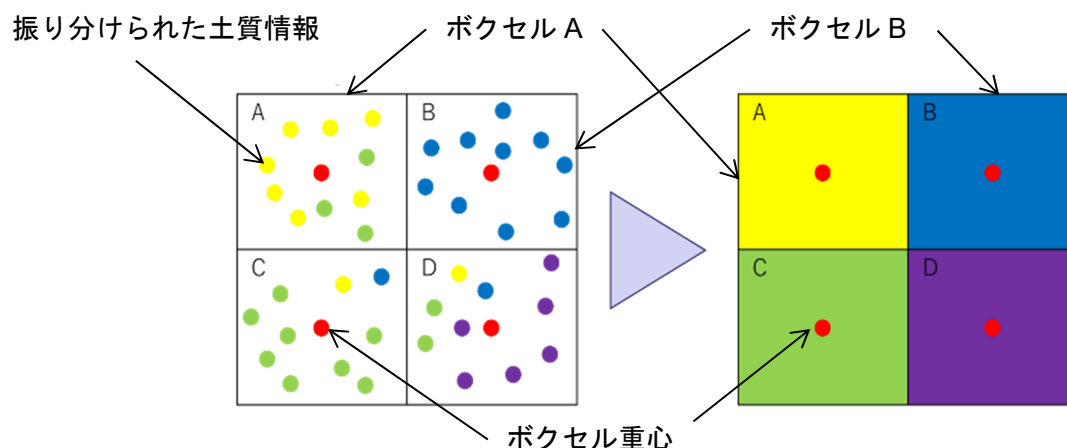


図 33 ボクセルへの土質情報の割り当て

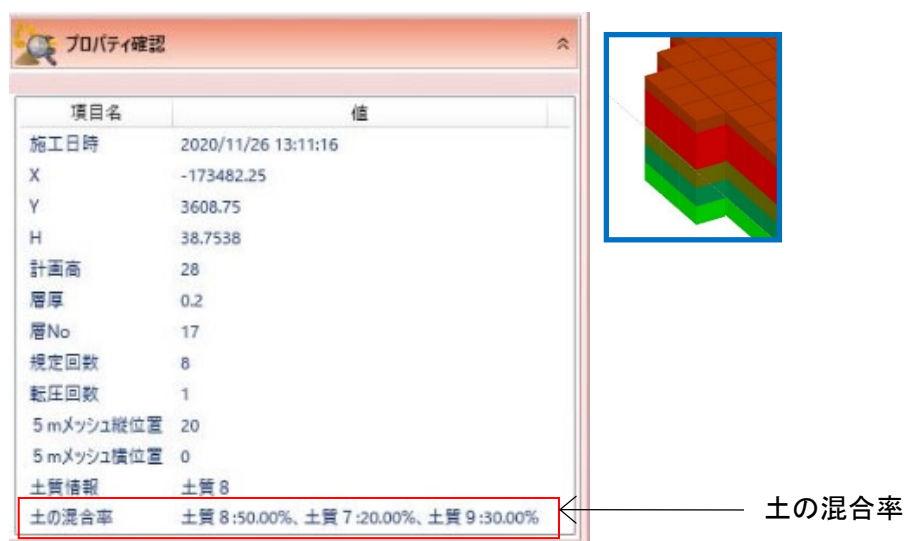


図 34 属性情報の確認

5.3 現場適用

施工面積約 14ha の工業団地建設工事に土砂トレーサビリティ管理システムを適用し、検証を実施した。図 35 に施工現場の全景を示す。施工区域内の L=200m、W=300m の範囲の施工に対し、締固め管理システムを搭載したローラーを用いて検証を行った。締固め管理システムから出力される転圧施工履歴データとダンプトラック 10 台に設置したダンプアップ検知センサのデータを組み合わせて 3 次元土工管理図を作成した。



図 35 施工場所全景

図 36 に土砂の敷均し時の施工状況を示す。ダンプトラックによって運搬された土砂は施工場所でブルドーザを用いて敷均しを行い、敷均し後、ローラーを用いて転圧する。この工程を繰り返し、工業団地の造成を行った。



図 36 施工状況（敷均し）

施工時に使用した締固め管理システムを搭載した 10t 級振動ローラーを図 37 に示す。GNSS 受信機およびアンテナをローラー本体に設置し、ローラーの位置情報の追跡を行う。ローラーの位置情報と設計データを重ねることで、施工箇所における転圧回数をキャビン内のモニタにリアルタイムに表示する。締固め管理システムにおいて取得した位置情報や転圧回数などのデータは転圧施工履歴データとして出力できる。



図 37 締固め管理システム搭載振動ローラー

今回の施工では、場内で改良した土砂の場内運搬と場外から搬入しそのまま盛土する 2 つのパターンがあり、場内と場外の各 1 箇所に土取場を設定した。土取場の判別を行うため、改良土の積込に使用するバックホウにビーコンを設置し、場内運搬の判別を行った。場外の積込場所および荷下ろし場所を図 38 に示す。場外土取場から荷下ろし場までの距離や約 3.5km であり、現場入口より入場し、荷下ろし後、現場出口より退場する。

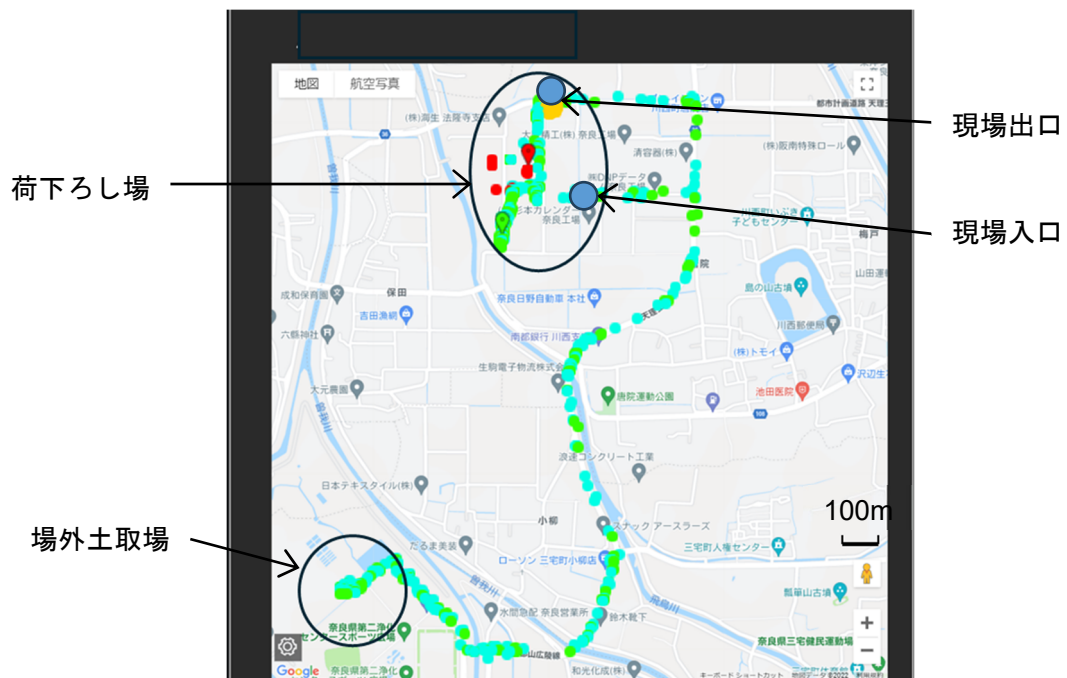


図 38 場外積込み場所および荷下ろし場所

場外から搬入する土砂については、土取場の管理が適用現場の管轄ではなく、また、1 箇所の土取場から 1 箇所の現場入口を通っての搬入であったため、搬入車両が入場する現場ゲートに

ビーコンの設置を行った。ビーコンの設置状況を図 39 に示す。

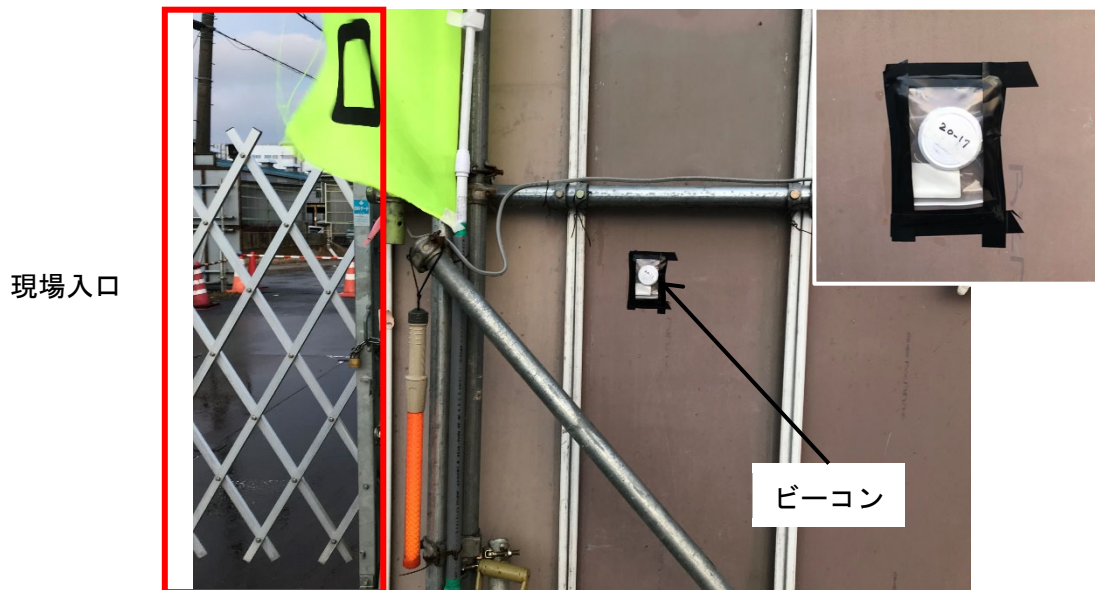


図 39 現場入口ビーコン設置状況

設置したセンサにより荷下ろし位置を特定し、管理アプリケーションを使用して荷下ろし情報と結合しトレーサビリティデータを自動的に作成した。出力したトレーサビリティデータの一部を抜粋したものを表 11 に示す。

表 11 トレーサビリティデータ（一部抜粋）

X	Y	H	計画高	施工日	時刻	層厚	層No	サイズ	規定回数	転圧回数	5mメッシュ 縦位置	5mメッシュ 横位置	土質情報	土の混合率
-156857.8	-22241	40.386	40.9	20220305	114221	0.3	4	0.5	4	4	17	13	土質 2	土質 2:63.52%、 土質 3:36.48%
-156857.8	-22240	40.386	40.9	20220305	114221	0.3	4	0.5	4	4	17	13	土質 2	土質 2:63.52%、 土質 3:36.48%
-156857.8	-22240	40.386	40.9	20220305	114221	0.3	4	0.5	4	4	17	13	土質 2	土質 2:63.52%、 土質 3:36.48%
-156857.8	-22239	40.386	40.9	20220305	114221	0.3	4	0.5	4	4	17	13	土質 2	土質 2:63.52%、 土質 3:36.48%
-156857.8	-22239	40.422	40.9	20220305	114048	0.3	4	0.5	4	4	17	14	土質 3	土質 2:41.07%、 土質 3:58.93%
-156857.8	-22238	40.422	40.9	20220305	114048	0.3	4	0.5	4	4	17	14	土質 3	土質 2:41.07%、 土質 3:58.93%
-156857.8	-22238	40.422	40.9	20220305	114048	0.3	4	0.5	4	4	17	14	土質 3	土質 2:41.07%、 土質 3:58.93%
-156857.8	-22237	40.473	40.9	20220305	113907	0.3	4	0.5	4	4	17	14	土質 3	土質 2:41.07%、 土質 3:58.93%
-156857.8	-22237	40.473	40.9	20220305	113907	0.3	4	0.5	4	4	17	14	土質 3	土質 2:41.07%、 土質 3:58.93%
-156857.8	-22236	40.473	40.9	20220305	113907	0.3	4	0.5	4	4	17	14	土質 3	土質 2:41.07%、 土質 3:58.93%
-156857.8	-22236	40.552	40.9	20220302	153803	0.3	4	0.5	4	4	17	14	土質 3	土質 2:41.07%、 土質 3:58.93%

作成したトレーサビリティデータを 3 次元 CAD ソフトウェアに取り込み、土質情報ごとに着色されたボクセルモデルの形式でデータを出力し、土質情報の可視化ができていることを確認した（図 40）。図 40 の 3 次元土工管理図では、現場で使用した 2 種類の土質情報に色分けされたボクセルモデルの形状が確認できた。また、各ボクセルの属性情報を表示すると、転圧回数などの締固め管理システムの施工管理情報と可視化した 3 次元モデル上において属性情報として土砂トレーサビリティ管理システムより割り当てられた土質情報を確認することができた。

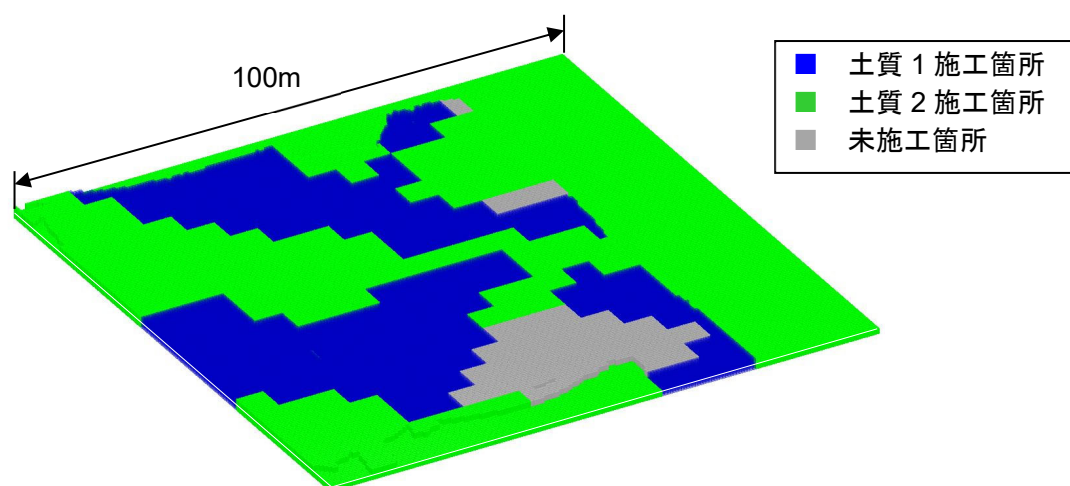


図 40 3 次元土工管理図

5.4 考察

ダンプアップの検出において、運転手のレバーの操作方法にはレバーの持ち方の違いなど、個々人の癖があり、それにより 1 回のダンプアップにおいて複数回のダンプアップをしたと誤検知する事象が発生した。実際のダンプアップの回数との整合性を確保するために、1 回のダンプアップに要する時間内であれば複数回のダンプアップを検出しても、1 回のダンプアップとみなす処理を追加するなどが必要となる。また、ダンプの荷台の清掃時など土砂の荷下ろし以外でダンプトラックの荷台の昇降を実施するケースが現場試行中に発生し、誤検知の要因の一つとなっている。GNSS 位置情報により範囲を設定し所定の範囲内以外でのダンプアップを除外する、もしくは積込バックホウの BLE 信号の受信がなく対応する積込データがないダンプアップを除外するなどのスクリーニング処理を実施する必要がある。

また、土取場の識別について、積込バックホウにビーコンを設置することでセンシングデータから識別が可能となったが、積込時にダンプトラックは後進して積込バックホウに接近するため、積込バックホウのビーコンとダンプトラックの運転席内に設置したセンサの間にダンプトラックの荷台や車体といった障害物が存在する。そのため、確実に積込バックホウの BLE 信号を受信するため、ビーコン側の電波強度を強くする必要が生じた。電波強度を強く設定した

ことで、信号が届く範囲が拡大し、土取場が隣接している、土取場から一般道路に向かう際に積込バックホウの近傍を通過するなどの状況となった際に、積込バックホウの BLE 信号を再受信してしまい、積込みデータを重複して取得してしまう懸念が生じた。対策として、積込みデータを作成する際に、例えば、30 秒間の 40 回以上 BLE 信号を受信したなど設定した時間内に所定の回数以上の信号の受信があった時のみ積込データを生成するなどの処理を加える必要がある。

土砂トレーサビリティ管理アプリケーションを使用し、ダンプアップのセンシングデータと転圧施工履歴データと結合した 3 次元土工管理図により盛土の土質情報を確認できた。システムにより土工管理図の作成に必要な土質情報および盛土位置の情報を自動的に記録し、データ整理や入力等の手間を増やすことなく、将来の施工履歴の確認等に利用することが可能なトレーサビリティデータを作成できることが確認できた。これにより従来、盛土材のトレーサビリティ確認用の土工管理図の作成のために、施工箇所に常駐し、帳票に記録する記録員の配置が必要なくなる。そのため、盛土工において、記録員分の 1 人／日程度の人員削減の効果が期待できる。

5.5 まとめ

本章では、ICT 土工において取得されるデータの利活用により施工管理の効率化を行うため、ICT 土工において取得される施工履歴のデータと IoT センサを用いたダンプトラックのセンシングを組み合わせることで自動的に盛土のトレーサビリティデータを作成する土砂トレーサビリティ管理システムの開発を行った。

本システムは、土砂運搬のダンプトラックにセンサを設置し、ダンプアップのセンシングにより盛土材をどの土取場から工事現場のどの施工箇所に運搬したかを記録する。センシングデータを、ICT 土工の盛土工事において導入される締固め管理システムから出力される転圧施工履歴データと関連付けることで、盛土材のトレーサビリティデータとなる 3 次元土工管理図を自動作成する。3 次元土工管理図では、盛土形状をボクセルモデルにより表現し、土質情報により色分けする。また、ボクセルは属性情報として土質情報に加えて施工日や転圧回数や施工層番号など転圧の施工管理データ等を保持している。

土砂トレーサビリティ管理システムについて、工業団地の造成工事において適用し検証を実施した。締固め管理システムのデータと土砂運搬のダンプトラック 10 台に設置したセンサのデータを結合し、トレーサビリティデータである 3 次元土工管理図を作成した。作成した 3 次元土工管理図において、造成工事の盛土の土質情報が可視化できていることおよび土工の施工管理の情報が保管されていることを確認した。

作成されるトレーサビリティデータには、施工日や土質情報等の属性情報が自動的に付与されるため、将来の施工履歴の確認等に利用することできる。盛土工事の終了後、盛土の変状などが発生した際に、変状発生箇所と土質や施工高さなどの条件が類似する箇所を抽出すること

で、同様の変状が発生する可能性を予測・検討ができる。

課題として、運転手のレバーの操作方法の癖やダンプの荷台の清掃時など土砂の荷下ろし以外でダンプトラックの荷台の昇降によりダンプアップの誤検知が発生した。誤検知を防止するためにデータのスクリーニング処理が必要な点がある。

また、土砂トレーサビリティ管理システムについて、運行管理システムとの連携による運行管理業務の効率化やトラックスケール等の土砂積載量の管理システムとの連携による土砂運搬の安全管理への展開、盛土以外の搬出土砂の管理業務への適用など盛土材料のトレーサビリティ管理以外の施工管理業務への応用について検討を行っていく。

第6章 結論

6.1 結論

本論文では、まずセンシングデータと 4D BIM/CIM モデルを関連付け、施工工程とセンシングデータを一元管理し、4D BIM/CIM モデルの経時変化と連動して、センシングデータを可視化することができる 4DSCM システムを提案した。建設現場において取得されるセンシングデータをデータベースに格納し、4D BIM/CIM モデルと関連付けを実施することで、センシングデータとその管理値を比較して、例えば、管理値を超過した場合は赤色など、設定した色情報をセンサの 3 次元モデルに反映する。これにより、センシングデータの変動と施工進捗の一元的な管理を可能とした。また、センサの 3 次元モデルも工程と連動させることで、施工段階の建設現場において発生するセンサの移設の事象についても、センシングデータを反映させることを可能とした。提案した 4DSCM システムを鉄道近接工事の地下躯体構築工事に適用し、工事現場に隣接する供用中の軌道の変位に関するセンシングデータ・土留支保工に関するセンシングデータ等を工事工程データと合わせて可視化した。工程データについて、計画と実績データを入力することで、センシングデータの変動と工事進捗にともなう施工現場の変化を対比しての検討が可能になったことが確認できた。施工進捗にともなう変化する管理値に対して、4DSCM システム上で、センシングデータに対応する管理値が変わることで、センサのモデルの色が適切に変更されることが確認でき、4D BIM/CIM モデルの経時変化に対応して、管理可能であることが確認できた。

次に、4DSCM システムに蓄積したセンシングデータについて、経時図と分布図を用いてセンシングデータの可視化を行った。任意の期間または任意の日付において、センサの計測値をグラフに描画することで、計測値の変動の確認を容易にした。また、グラフの変動箇所と日付を合わせた施工状況を 4DSCM 上で再現し、並べて確認することで、変動発生時の状況の確認が容易になると考えられる。さらに、データベースに蓄積したセンシングデータについて、センサ間の関連性を把握し、将来の予測やセンサ管理の効率化に活用するために分析を実施した。設置したセンサを設置位置、計測項目により距離グループとセンサグループに分類し、適用現場において実施した作業ごとにセンシングデータの抽出を行った。その後、距離グループとセンサグループにより相関関係の分析を実施した。分析の結果、いくつかの距離グループとセンサグループにおいて、相関関係があることが明らかになった。

本論文では、次に、土砂運搬のダンプトラックのセンシングと ICT 土工において使用される締固め管理システムから出力される転圧施工履歴データを組み合わせることで、盛土工事のトレサビリティデータを作成する手法を提案した。提案した土砂トレサビリティ管理システムは「どの土」を「どの場所」に盛土したかを自動で記録可能なシステムであり、ダンプトラックに設置したダンプアップ検知センサのセンシングデータを、管理アプリケーションを用い

て転圧施工履歴データと結合し、土質情報を属性として持つボクセルモデルである 3 次元土工管理図を作成する。土砂トレーサビリティ管理システムを工業団地の造成現場に適用し、ダンプトラック 10 台に設置したダンプアップ検知センサと造成工事において使用した転圧管理システムのデータから、トレーサビリティデータである 3 次元土工管理図が自動的に作成できることを確認した。3 次元土工管理図では、属性情報として、施工日や土質情報等が付与されていることが確認でき、将来の施工履歴の確認等に利用することできると思う。また、センサの設置のみでトレーサビリティデータが自動的に作成できることにより、盛土工事においてトレーサビリティの管理を求められた際に必要となる記録員の配置が不要となり、1 人／日程度の人員削減の効果が期待できる。

6.2 今後の課題

本論文では、鉄道近接工事における躯体構築に 4DSCM システムの適用を行ったが、センシングが関係するその他の工種についてもシステムを適用可能となるよう、幅広い工種に対して BUM/CIM 4D モデル上における工事進捗の表現方法およびセンシングデータの連携方法についての検討を行う。センシングの種類によっては、よりリアルタイムに状況を反映させることが求められるため、4D BIM/CIM モデルの更新を含めたよりリアルタイムでの反映が求められる。

土砂トレーサビリティ管理システムの課題として、運転手のレバーの操作方法の癖やダンプの荷台の清掃時など土砂の荷下ろし以外でダンプトラックの荷台の昇降によりダンプアップの誤検知が発生した。ダンプアップ時間や位置などを用いたデータのスクリーニング処理を加えることで検知精度を向上させ、より精度の高い盛土のトレーサビリティの確保が可能になると考える。また、システムにより作成したトレーサビリティデータを効果的に活用するために、施工履歴の詳細な確認や将来的な変状予測など収集したデータの分析方法を検討する。

参考文献

- [1] 国土交通省：国土交通白書，2024.
- [2] 国土交通省：「ICT 施工の普及拡大に向けた取組」，第 13 回 ICT 導入協議会，2021.
- [3] 国土交通省：土木工事安全技術指針 令和 4 年 2 月，2022, p. 75.
- [4] 高尾篤志，矢吹信喜，宮田岩往，大塚義一，平井崇：センシングデータと BIM/CIM モデルを関連付けた施工システムの開発，*土木情報学シンポジウム講演集*，Vol.46，pp. 149-152，2021.
- [5] 三瓶晃弘，竹市八重子：鉄道工事での BIM/CIM 活用，*建設機械施工*，Vol.74，No.7，pp. 50-55，2022.
- [6] 宮田岩往，藤原慎吾，浦田啓行：4 次元シミュレーションシステムの開発と現場適用-鉄道営業線近接工事における生産性向上-，*奥村組技術研究年報*，Vol.46，pp.41-46，2020.
- [7] 国土交通省：「宅地造成及び特定盛土等規制法」（通称「盛土規制法」）について，<https://www.mlit.go.jp/toshi/web/morido.html>，参照 2024.6.8.
- [8] International Organization for Standardization：ISO 9000:2015 - Quality Management Systems - Fundamentals and Vocabulary，2015.
- [9] 国土交通省：ICT の全面的な活用の推進に関する実施方針，2024.
- [10] 国土交通省：ICT 活用工事（土工）実施要領，2024.
- [11] 国土交通省：施工履歴データを用いた出来形管理の監督・検査要領（土工編）（案），2023.
- [12] K. McKinney, J. Kim, M. Fischer, C. Howard：Interactive 4D-CAD, *Computing in Civil Engineering*, pp.383-389, 1996.
- [13] M. Alves, P. Carreira, A. A. Costa：BIMSL: A generic approach to the integration of building information models with real-time sensor data, *Automation in Construction*, Vol.84, pp.304-314, 2017.
- [14] 有賀貴志，矢吹信喜：コンクリート構造物の変状管理におけるプロダクトモデルの適用，*土木学会論文集 F3(土木情報学)*，Vol.69，No.2，pp.I_71-I_81，2013.
- [15] M. Sol-Sánchez, J. M. Castillo-Mingorance, F. Moreno-Navarro, M. C. Rubio-Gómez：Smart rail pads for the continuous monitoring of sensed railway tracks: Sensors analysis, *Automation in Construction*, Vol.132, Article 103950, 2021.
- [16] J. W. Park , Y. K. Chen：Self-corrective knowledge-based hybrid tracking system using BIM and multimodal sensors, *Advanced Engineering Informatics*, Vol.32, pp. 126-138, 2017.
- [17] J. Rio, B. Ferreira , J. P. Martins：Expansion of IFC model with structural sensors, *Informes de la construcción*, Vol.65, 503, pp.219-228, 2013.
- [18] 小山誠稀，矢吹信喜，福田知弘：橋梁とセンサの連携データモデルに基づくデータベースの構築と検証，*土木学会論文集 F3(土木情報学)*，Vol.77，No.2，pp.I_97-I_113，2021.

- [19] X. S. Ghen, C. C. Liu, I. G. Wu : A BIM-based visualization and warning system for fire rescue, *Advanced Engineering Informatics*, Vol.37, pp.42-53, 2018.
- [20] J. Wang, H. You, X. Qi, N. Yang : BIM-based structural health monitoring and early warning for heritage timber structures, *Automation in Construction*, Vol.144, Article 104618, 2022.
- [21] X. Xie, J. Merino, N. Moretti, P. Pauwels, J. Y. Chang, A. Parlikad : Digital twin enabled fault detection and diagnosis process for building HVAC systems, *Automation in Construction*, Vol.146, Article 104695, 2023.
- [22] T. Wang, V. J. Gan, D. Hu, H. Liu : Digital twin-enabled built environment sensing and monitoring through semantic enrichment of BIM with SensorML, *Automation in Construction*, Vol.,144, Article 104625, 2022.
- [23] T. Cheng, J. Teizer : Real-time resource location data collection and visualization technology for construction safety and activity monitoring applications, *Automation in Construction*, Vol.34, pp.3-15, 2013.
- [24] R. Y. Zhong, Y. Peng, F. Xue, J. Fang, W. Zou, H. Luo, S. Thomas Ng, W. Lu, G. Q. Shen, G. Q. Huang : Prefabricated construction enabled by the Internet-of-Things, *Automation in Construction*, Vol.76, pp.59-70, 2017.
- [25] S. Vinck, M. Vergauwen : Vision based metric for quality control by comparing built reality to BIM, *Automation in Construction*, Vol.144, Article 104581, 2022.
- [26] T. Omar, M. Nehdi : Data acquisition technologies for construction progress tracking, *Automation in Construction*, Vol.70, pp. 43-155, 2016.
- [27] 大塚義一：クラウドを活用した災害廃棄物処理—— 東日本大震災の復旧・復興支援における ICT の活用事例——, *廃棄物資源循環学会誌*, Vol.29, No.3, pp.237-245, 2018.
- [28] 山名宗之, 富澤康雄, 水野克己, 藤原照幸, 稲垣学武, 水田和真, 勝見 武 , 嘉門雅史 : 建設汚泥の適正活用を支援するトレーサビリティ管理システムの開発及び運用, *土木学会論文誌 F4 (建設マネジメント)*, Vol.76, No.1, pp.29-41, 2020.
- [29] 井関禎之, 船田 征 , 西山 哲 : UAV 写真を用いた不法投棄物の把握, *土木学会論文誌*, No.79, No.22, 22-22014, 2023.
- [30] S. N. Razavi, C. T. Haas : Using reference RFID tags for calibrating the estimated locations of construction materials, *Automation in Construction*, Vol.20, pp. 677-685, 2011.
- [31] Y. Yang, M. Li, C. Yu, R. Y. Zhong : Digital twin-enabled visibility and traceability for building materials in on-site fit-out construction, *Automation in Construction*, Vol.166, 105640, 2024.
- [32] G. Demiralp, G. Guven, E. Ergen : Analyzing the benefits of RFID technology for cost sharing in construction supply chains: A case study on prefabricated precast components, *Automation in Construction*, Vol.24, pp.120-129, 2012.
- [33] A. Montaser, O. Moselhi : RFID indoor location identification for construction projects, *Automation in Construction*, Vol.39, pp.167-179, 2014.

- [34] M. W. Park, A. Makhmalbaf, I. Brilakis : Comparative study of vision tracking methods for tracking of construction site resources, *Automation in Construction*, Vol.20, pp. 905-915, 2011.
- [35] D. Roberts, M. Golparvar-Fard : End-to-end vision-based detection, tracking and activity analysis of earthmoving equipment filmed at ground level, *Automation in Construction*, Vol.105, 102811, 2019.
- [36] J. Kim, S. Chi, J. Seo : Interaction analysis for vision-based activity identification of earthmoving excavators and dump trucks, *Automation in Construction*, Vol.87, pp. 297-308, 2018.
- [37] J. Fu, E. Jenelius, H. N. Koutsopoulos : Identification of workstations in earthwork operations from vehicle GPS data, *Automation in Construction*, Vol.83, pp.237-246, 2017.
- [38] N. Pradhananga, J. Teizer : Automatic spatiotemporal analysis of construction site equipment operations using GPS data, *Automation in Construction*, Vol.29, pp.107-122, 2013.
- [39] L. Song, N. N. Eldin : Automation of thermographic 3D modelling through image fusion and image matching techniques, *Automation in Construction*, Vol.27, pp.32-39, 2012.
- [40] T. Cheng, M. Venugopal, J. Teizer, P. A. Vela : Performance evaluation of ultra wideband technology for construction resource location tracking in harsh environments, *Automation in Construction*, Vol.20, pp. 173-1184, 2011.
- [41] H. Son, C. Kim : Integrated worker detection and tracking for the safe operation of construction machinery, *Automation in Construction*, Vol.126, 103670, 2021.
- [42] A. Costin, N. Pradhananga, J. Teizer : Leveraging passive RFID technology for construction resource field mobility and status monitoring in a high-rise renovation project, *Automation in Construction*, Vol.24, pp.1-15, 2012.
- [43] H. Jiang, P. Lina, M. Qiang, Q. Fan : A labor consumption measurement system based on real-time tracking technology for dam construction site, *Automation in Construction*, Vol.52, pp.1-15, 2015.
- [44] H. Khoury, D. Chdid, R. Oueis, I. Elhajj, D. Asmar : Infrastructureless approach for ubiquitous user location tracking in construction environments, *Automation in Construction*, Vol.56, pp.47-66, 2015.
- [45] S. Zhang, J. Teizer, N. Pradhananga, C. M. Eastman : Workforce location tracking to model, visualize and analyze workspace requirements in building information models for construction safety planning, *Automation in Construction*, Vol.60, pp.74-86, 2015.
- [46] M. W. Park, I. Brilakis : Continuous localization of construction workers via integration of detection and tracking, *Automation in Construction*, Vol.72, pp.129-142, 2016.
- [47] K. Yanga, C. R. Ahnc, M. C. Vuranb, H. Kima : Collective sensing of workers' gait patterns to identify fall hazards in construction, *Automation in Construction*, Vol.82, pp.166-178, 2017.
- [48] M. Khazen, M. Nik-Bakht , O. Moselhi : Monitoring workers on indoor construction sites using data fusion of real-time worker's location, body orientation, and productivity state, *Automation in Construction*, Vol.160, 105327, 2024.
- [49] J. Seo, S. Lee, J. Kim, S. K. Kim : Task planner design for an automated excavation system, *Automation in Construction*, Vol.20, pp.954-966, 2011.

- [50] K. You, L. Ding, C. Zhou, Q. Dou, X. Wang, B. Hu : 5G-based earthwork monitoring system for an unmanned bulldozer, *Automation in Construction*, Vol.131, 103891, 2021.
- [51] J. Y. Han, C. R. Hsu, C. J. Huang : Automated progress monitoring of land development projects using unmanned aerial vehicles and machine learning, *Automation in Construction*, Vol.168, 105827, 2024.
- [52] A. Shahi, J. S. West, C. T. Haas : Onsite 3D marking for construction activity tracking, *Automation in Construction*, Vol.30, pp.136-143, 2013.
- [53] F. Vahdatikhaki, A. Hammad : Framework for near real-time simulation of earthmoving projects using location tracking technologies, *Automation in Construction*, Vol.42, pp.50-67, 2014.
- [54] 田中成典, 窪田 論, 今井龍一, 中村健二, 山本雄平, 塚田義典, 谷口寿俊, 中原匡哉 : 土工の施工管理における UAV 搭載型レーザスキャナによる計測方法と計測誤差に関する研究, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, Vol.74, No.2, pp.II_125-II_135, 2018.
- [55] 岩谷隆文, 佐藤靖彦, 田中 勉 : 情報化施工を活用した 3D 盛土情報管理システム, *建設機械施工*, Vol.66, No.4, pp.34-38, 2014.
- [56] 宮武一郎, 田村利晶, 盛 伸行, 岡井春樹, 高岸智紘 : CIM を適用した築堤事業の施工段階における 3 次元モデルの作成・修正の支援に関する一考察, *土木学会論文集 F4 (建設マネジメント)*, Vol.72, No4, pp.I_145-I_154, 2016.
- [57] 宇津木慎司, 中谷匡志, 佐々木照夫 : 地質情報 CIM 管理システムの構築および施工現場への適用, *土木学会論文集 F3 (土木情報学)*, Vol.72, No.1, pp.24-31, 2016.
- [58] 小林 純, 内池聖享, 阿部喜生 : ICT 締固め管理と BIM/CIM に対応した盛土モデルに関する検討, *i-Construction の推進に関するシンポジウム講演概要集*, Vol.6, pp.81-84, 2024.
- [59] 白又靖久, 白鳥 廉 : 路体盛土工における ICT を用いた施工進捗管理, *i-Construction の推進に関するシンポジウム講演概要集*, Vol.6, pp.45-48, 2024.
- [60] N. Shrivastava, C. Buragohain, D. Agrawal, S. Suri : Medians and beyond: new aggregation techniques for sensor networks, *In Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 239-249, 2004.
- [61] 高尾篤志, 宮田岩往, 藤本情志, 本木章平, 田口 毅 : 「データ利活用型 ICT 土工管理システムの開発 (その 3) -土砂トレーサビリティ管理システム-」, *土木学会年次学術講演会講演概要集*, Vol.76, VI-197, 2021.

謝辞

本論文をまとめるにあたり，直接の御指導，御鞭撻を頂き，お世話になりました主査の大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻矢吹信喜教授に謹んで感謝の意を表します。

また，本研究の遂行に際し，多大な御協力と有益な御意見および御討論を頂き，研究以外に会社業務についても多くの支援および激励を頂いた(株)奥村組 大塚義一氏，宮田岩往氏，平井崇氏の各位に，心より御礼申し上げます。また，私生活において家事育児を担い研究生生活を応援してくれた，妻に感謝致します。

本研究は，以上の方々を始め，多数の方々の御指導，御協力のもとに達成できたものであり，ここで関係各位の皆様に感謝致します。