

地盤改良時影響可視化 X R システムの開発

— 施工進捗と変位状況をリアルタイムに現地に 3 D で可視化 —

XR-based Visualization and Monitoring System

for Soil Stabilization Work

- Real-time On-Site 3D Visualization of Construction Progress and Soil Displacement -

吉村藤子* 宮田岩往* 城井光雄** 今泉和俊***

要 旨

地盤改良の施工において、周囲に影響が及んでいないか施工中に監視することは公衆災害を防ぐうえで重要である。そこで、施工深度や周辺地盤の変位などをセンシングし、その情報を可視化することで監視業務を高度化させるシステムを開発した。センシングデータがクラウドを経由して監視員の端末上にリアルタイムで XR 表示される。施工位置や変位の異常が一目でわかり、監視業務が円滑に行えるようになる。さらに、本システムを、実際の施工にあわせて試行した。この試行により、従来の監視業務の課題が解決され、施工品質の向上および公衆災害の防止につながれることを確認した。

キーワード：地盤改良、動態観測、IoT センサ、XR、可視化

1. まえがき

近年、国土交通省が ICT 活用工事の基準類に関する整備を進めている。平成 28 (2016) 年度に土工の基準が整備されたことを皮切りに、令和 4 (2022) 年時点で対象が 12 工種にまで拡大している。その中で地盤改良工は比較的早く、令和元 (2019) 年度に 5 番目の工種として ICT 活用工事の基準類が整備された¹⁾。

そのため、早い段階から地盤改良の施工に関する ICT ツールが開発されてきた。その多くは、施工機械の位置誘導や出来形・品質管理の効率化を主目的としている²⁾。

その一方で、地盤改良の施工は周辺地盤の土圧に影響を及ぼすため、地盤の隆起などの公衆災害のリスクを伴う³⁾。このような災害の防止のために、施工中は近接地盤の隆起を測定し、周辺に危害を及ぼすような地盤の変状が起きた場合は作業を中止するよう求められている⁴⁾。

そこで、ICT 活用の一環として、公衆災害を防止するための安全管理に効果的な ICT ツールが必要になると考え、XR (クロスリアリティ) 技術を用いて地盤改良施工時の監視業務を高度化するシステムを開発することとした。XR とは、VR (Virtual Reality、仮想現実)、AR (Augmented Reality、拡張現実)、MR (Mixed Reality、複合現実) の総称であり、その中で今回は AR と MR を対象とした。

2. 地盤改良施工時の監視業務の課題

一般的に、地盤改良の施工の際には、監視員を配置して、周辺に影響が出ていないかを監視し、万が一異常があった場合には即座に施工を止められる体制を整えている。監視員は、施工機械の制御担当者と連絡を取り合っ て施工進捗状況に合わせて監視すべき場所の目星をつけ、同時に、周辺地盤の隆起等の動態観測結果を随時確認して監視を行う。

図-1 は、地下構造物に隣接した場所で施工を行う際に、地下構造物内に配置された監視員の行う業務をフロー図にしたものである。ここで、赤枠とした箇所が、後述する開発システムにより置き換わる業務である。

地下構造物内からは、施工位置が当然目視できないため、監視員は、施工機械が設置されている地上と自身のいる位置との位置関係を図面から考えて、自身から見て施工位置がどこなのか見当を付ける必要がある。動態観測の計測位置についても同様である。すなわち、三人称視点で描かれている図面から、目の前に広がる視界という一人称視点に、視点を変換することが必要となる。

このようにして行われる位置関係の把握は、まだ現場に慣れていない人や、空間把握が得意でない人にとっては大きな負担となり、監視業務ができる人材が空間把握

* ICT 統括センターイノベーション部 ** 西日本支社機電部 *** 技術本部技術戦略部

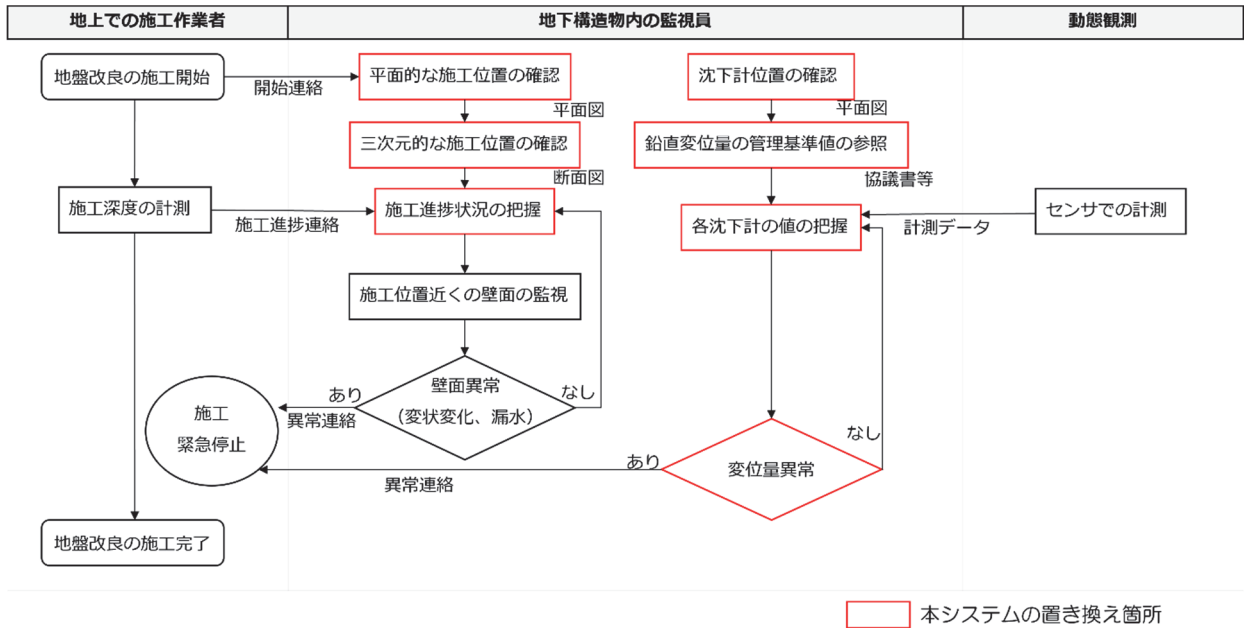


図-1 監視業務のワークフロー図と本システムによる置き換え箇所

能力の有無によって限られるため、急な配置転換に対応できない一因となっている。また、空間位置の誤認のために正しく監視業務が実施されないリスクもある。

監視員は、自己位置から見た施工位置・沈下計位置を正しく把握した後、実際に施工が始まると（図-1左上）、施工機械側の担当者と連絡を取り合い、施工進捗状況に応じて監視場所を変更していく必要がある。これは上述の通り、個人の空間把握能力に大きく依存している。

次に、施工進捗状況を把握しつつ、地下構造物に変状変化や漏水が起きていないかを監視し、同時に、周辺地盤や地下構造物が隆起・沈下していないかを監視する。異常に気付いた場合は（図-1中央下部）、即座に施工機械側に連絡し施工を止め、公衆災害を防ぐ必要がある。

このように、地盤改良施工時の監視業務は、公衆災害

防止のために重要な役割を担っている中で、個人の空間把握能力に依存するところが大きい。不足している労働力を補うためにも、空間把握が苦手な人でも監視業務を遂行できる体制を構築する必要がある。

3. 開発システムおよび機能の概要

3.1 システム概要

施工位置や動態観測計測位置がどこであるのかを現地にリアルタイムに表示するシステムを開発した。現地位置に合わせて、現地の光景に重ね合わせて可視化表示する特性上、タブレット端末（iPad）を用いた AR 技術と MR ゴーグル（HoloLens2）を用いた MR 技術を利用した。

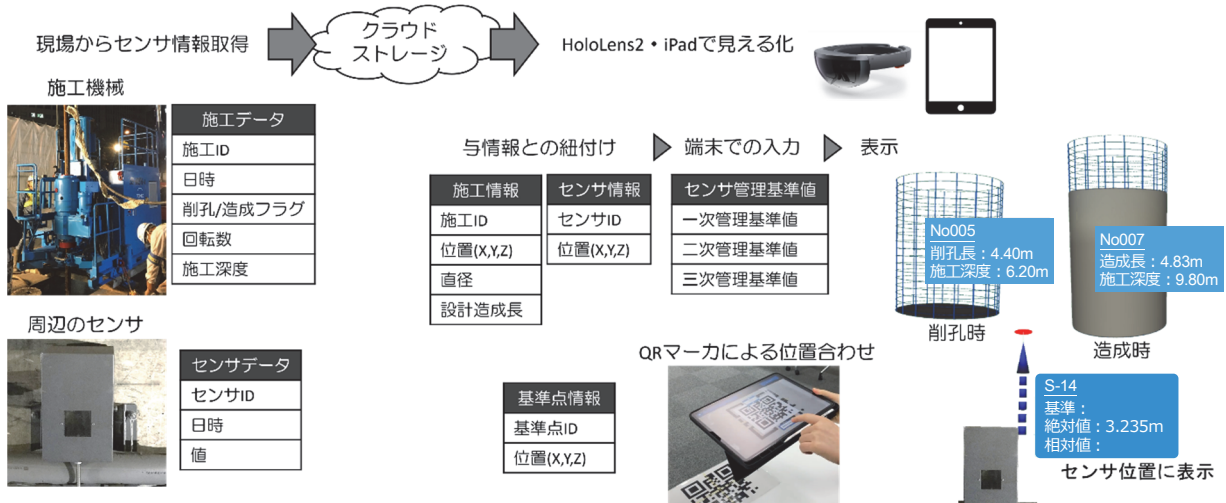


図-2 システム構成およびデータ構成概要

システム構成およびデータ構成概要を図-2に示す。施工機械や現地に設置したセンサ（図中のセンサの写真は沈下計）からデータをクラウドストレージサービスにアップロードする。データを集約する場所としてクラウドストレージサービスを利用した理由は、汎用性を高め、API 等が公開されていないセンサとも接続できるようにするためである。CSV ファイルとしてセンサ情報が書き込まれさえすれば、表示端末側からデータを参照しに行けるようになっている。

各改良体の施工機械の設置位置と直径、動態観測センサの設置位置、表示位置の位置合わせに使う監視場所付近の基準点の位置情報については、事前に端末側に入力しておく。

使用する際は、QR マーカを読み込んで位置合わせを行い、クラウドストレージサービス上にある CSV ファイルを読み込み、事前に与えられている位置情報を参照して、正しい位置にデータを可視化表示する。

3.2 施工データの可視化機能

施工機械に施工深度やロッドの回転数を取得するセンサを取り付けることにより、施工データがクラウドストレージサービスを経由して端末の画面上に表示される。画面上では、現地の光景の中に施工進捗状況を示す三次元モデルが重ね合わせて表示されるため、図面から現在位置と施工位置を考える必要がなくなる。また、自動で深度情報が取得されるため、従来は施工機械側の担当者と連絡を取り合う必要があったが、本システムにより連絡が不要となり、より精度よく高頻度に進捗を把握できるようになる。

施工機械に取り付けたセンサから、改良体番号を示す ID、日時、今行っていることが削孔なのか造成なのかを示すフラグ、ロッドの回転数、施工深度の情報を取得する。改良体番号を示す ID により、事前に与えられて

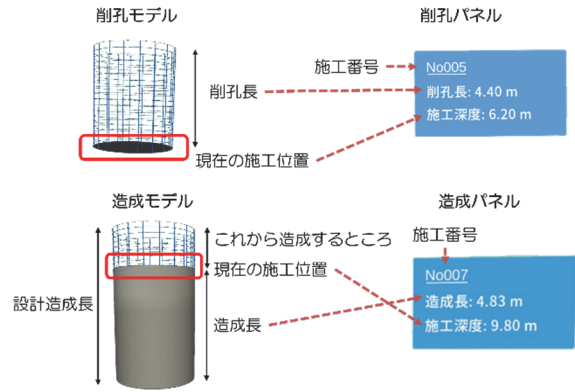


図-4 削孔モデルと造成モデルの見方

いた施工機械の設置位置の情報との紐付けが行われる。図-3に示す通り、ロッドの回転数の情報により、回転が始まった施工深度を施工開始位置とし、そこを基準として三次元モデルが表示される。

表示される三次元モデルは、削孔した後に改良体を造成していく高圧噴射攪拌工法などを想定しているため、削孔はワイヤフレームで、造成は円柱形として表現した。さらに造成時は、設計造成長を事前に入力しておくことで、あとどれくらいで造成が完了するのかわかるように、これから造成するところをワイヤフレームで表示する（図-4）。

3.3 動態観測データの可視化機能

動態観測の情報についても、センサからリアルタイムでクラウドストレージサービスにデータをアップロードできるようにし、端末画面上で計測位置に表示させる。その際に数値データだけではなく、三次元モデルとして可視化する。例えば、鉛直変位量を可視化する場合は、変位方向を矢印の向きで、変位量を矢印の長さで表現し、管理基準値を閾値として、変位量に応じて矢印を4段階

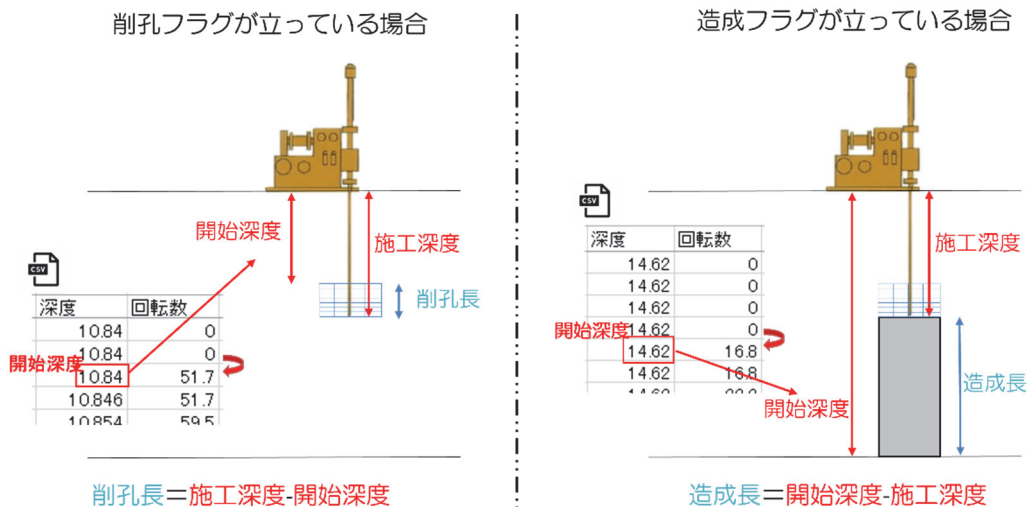


図-3 削孔/造成モデルの生成方法

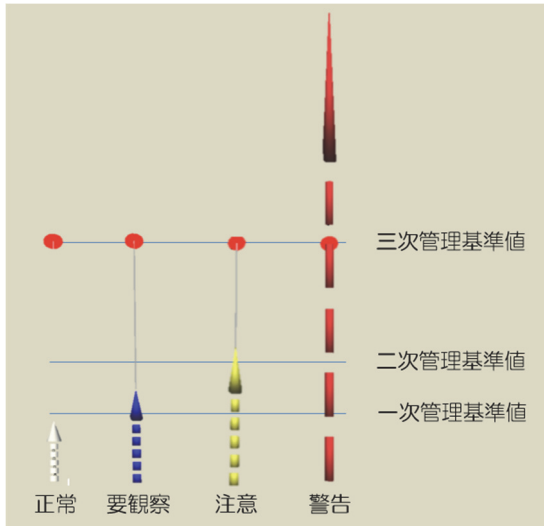


図-5 管理基準値と表示の例

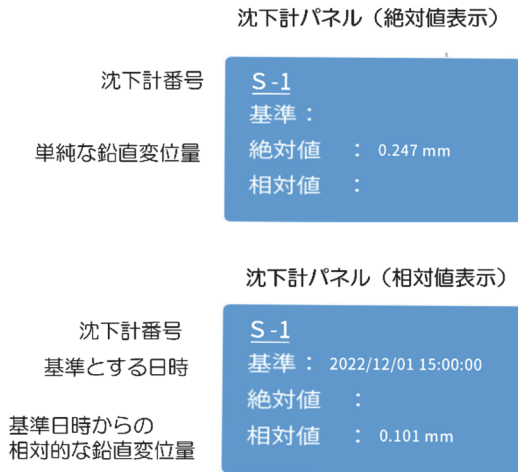


図-6 絶対値表示と相対値表示の例

に着色する(図-5)。三次管理基準値に相当する値を矢印の延長線上に赤丸で表示し、超えた場合は警報を鳴らすなど異常に気づきやすいように工夫した。

また、単純な計測データだけではなく、過去のある任意の時点からの変化量も表示できるようにした。そうすることで、地盤改良の施工に起因する計測値の変化量がわかりやすくなる。

沈下計を可視化した際に三次元モデルの横に表示されるパネルの例を図-6に示す。単純な鉛直変位量そのまま示した「絶対値表示」と、基準とする日時からの相対的な鉛直変位量を示した「相対値表示」の2つのモードを切り替えることができる。

3.4 記録振り返り機能

各種データの表示機能に加え、MRゴーグルを使用した場合には、仮想空間上に手書きでメモを書き込める機能も実装した。変状位置や漏水位置を書き込み、施工進捗状況を表す三次元モデルや動態観測を表す三次元モデルと併せてスクリーンショットを撮影することで、どのような状況下でどこに異常が起きたのかを正確に記録す



図-7 メモの記入例
(HoloLens2画面内のキャプチャ画像)



図-8 空間に配置されたメモ画像
(HoloLens2画面内のキャプチャ画像)

ることが可能となる(図-7)。これにより、リアルタイムにデータを可視化するだけではなく、過去の施工履歴も振り返ることができる。どこが施工済みであるのか、以前の施工時にどれほどの変位があったのか、などを確認することができ、また、メモを三次元空間のみならず時間に紐づけて配置することができるため、メモを記載したときの状況をXR空間内で再現することができる(図-8)。

4. 現場での試行によるシステム有効性確認

4.1 試行現場概要

実際に施工が行われるタイミングで、システムが有効に稼働するか確かめるために試行した。試行した建設現場は、大阪駅前地下道の撤去・新設工事を行っている土木工事現場である。当該現場は、地上部分が交通量の多い交差点であり、地下一階部分に梅田駅改札に繋がる地下歩道があり、地下二階に地下鉄の軌道が走るトンネル躯体が存在する構造になっている(図-9、10)。このような現場は立体構造の把握が難しいうえに、施工の影響で隆起沈下や漏水・変状変化が起きると甚大な社会的影響を及ぼすため、特に公衆災害を防止することが重要である。

この現場では、地下一階部分の地下道を撤去・新設するにあたり、地下鉄躯体に対するアンバランスな荷重負担を回避するため、地下道の直下にあたる地下二階相当

の空間のうち、地下鉄の躯体が存在しない土壌箇所に高圧噴射攪拌工法（SUPERJET35、有効直径φ3.5m）での地盤改良を行っている。営業線の地下鉄躯体に近接して施工するため、地下鉄躯体に影響が出るリスクが高く、少しでも異常が起きたら即座に施工を止められるよう、監視員の果たす役割が重要である。

現場では施工中、地下鉄躯体壁面に5mおきに水盛式沈下計を設置し（図-11）、1分おきに鉛直変位量を観測しており、ウェブブラウザで各沈下計の数値データを

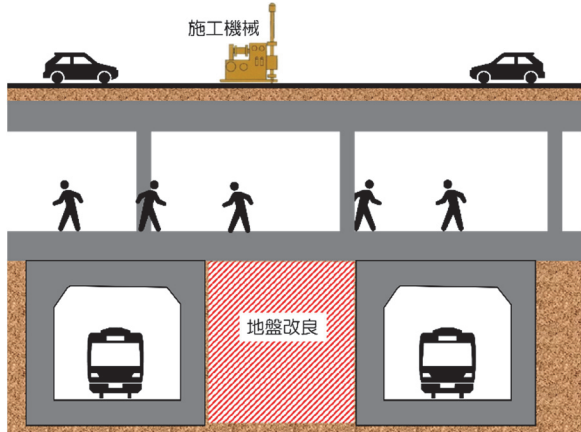


図-9 試行現場の模式的な断面図



図-10 交差点を占有しての地盤改良施工状況

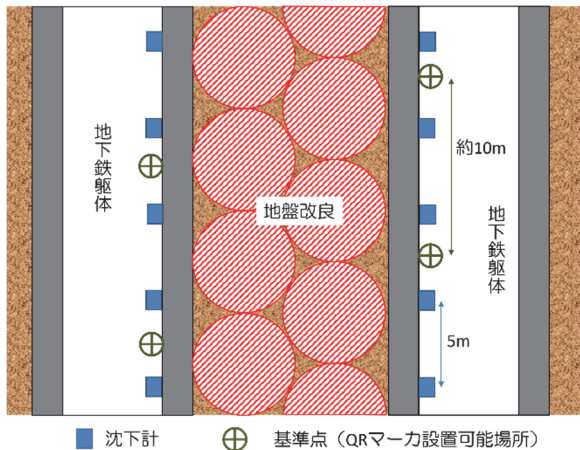


図-11 地下鉄躯体レベルでの模式的な平面図

確認できるシステムを導入している。管理基準値を3段

階設けて管理しており、三次管理基準値を超えた場合は施工を止める必要がある。

施工の進捗状況は、施工機械に設置するロッドの残尺を計測して施工深度を算出し、1m進むごとに施工機械側の連絡担当者がチャットで監視員に連絡していた。

施工は夜間の終電から始発の間に行われ、これまで監視員は地下鉄躯体内で、沈下計のデータと施工進捗状況の連絡をタブレット端末で確認しつつ、施工位置を頭の中で推定しながら、躯体壁面に異常が起きていないか監視を行っていた。

4.2 試行内容

従来の手動による検尺に替わり、施工機械にセンサを取り付け、1秒ごとに施工データを取得し、施工進捗状況を把握した。データは現場に設置したパソコンに送り、そこからクラウドストレージサービスにCSVファイルとして常時同期更新されるように設定した。また、地下鉄躯体に取り付けられている沈下計のデータも、同様にクラウドストレージサービスにCSVファイルとして書き込まれていくように設定した。これらのデータが安定してアップロードされるよう、携帯回線ではなく有線LANケーブルを接続した。沈下計位置と施工機械の位置は事前に設定ファイルに記入し、端末側に入力しておく。

表示位置の位置合わせは、端末でQRマークを読み込んで行う。日によって異なる施工位置に対応できるように、位置合わせ用の基準点をおおよそ10mに一箇所程度用意しておく（図-11）、最寄りの基準点にQRマークを置いて読み込めるようにした。QRマークは、床に置くことも壁に貼り付けて設置することもできるようにした（図-12）。読み込むiPadの姿勢により水平設置なのか鉛直設置なのかを判別し、QRマークの中心を原点としてQRマークの向きに合わせて仮想空間の座標が配置される。また、QRマークを指定した基準点の真上に設置できない状況（例えば、設置している沈下計の箱の角を基準点としていた場合、QRマークの中心をその角に置くことは不可能である）にも対処できるように、基準点位置をオフセットすることができるようにした。

端末は、AR端末としてiPad（第6世代）およびiPad Pro（第5世代）、MRゴーグルとしてHoloLens2を使用した。図-13は、HoloLens2を用いて試行している状況である。通信回線については、現場内は携帯回線が接続可能な場所であったため、iPadとiPad Proは携帯回線を

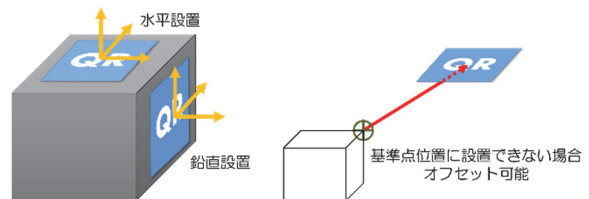


図-12 QRマークの設置方法

利用し、HoloLens2 は iPad Pro からのテザリングで回線を利用した。いずれの回線も下りで 40Mbps 以上出ており、支障なく使用できた。

4.3 試行結果

本システムの試行により、これまで頭の中で考えていた、おおよその施工位置が視覚的にはっきりとわかるようになったため、監視すべき位置が明確化され適切な位置に注意力を払って監視業務を行えるようになった（図-14）。また、今まで 1m おきにしかわからなかった施工進捗がリアルタイムにわかるため、ロッドの段取り替えなどで一旦止まっているなどの地上の施工機械側の様子が推察できるようになり、より緊密な連携を取って監視業務が行えるようになった。

さらに、沈下計が示す鉛直変位量が、管理基準値に対してどれほど許容量があるのか、管理基準値を超えそうな危険な場所はどこなのか、などが画面を見ただけでわかるようになった。それまで上限下限それぞれ 3 段階ずつあった管理基準値の 6 つの数字を覚えておく必要がなくなった。

端末による見え方の違いを検証したところ、iPad（第 6 世代）は、地下鉄躯体内の照明だけではカメラによる位置認識精度が落ちて表示が数 m 単位でずれることがわかった。一方、LiDar 機能を搭載している iPad Pro（第



図-13 HoloLens2 を用いた試行状況

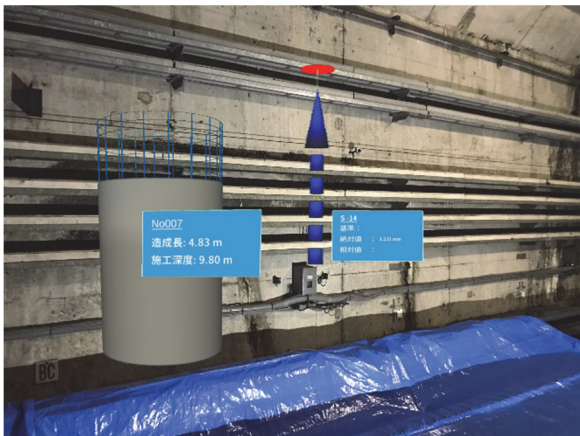


図-14 造成モデルと沈下計モデルの表示

5 世代) と HoloLens2 では表示位置が iPad ほどずれることはなく、監視業務を行うことが可能である。

iPad および iPad Pro は、没入感に乏しいため、奥行き感が掴みにくく、表示されている三次元モデルが躯体壁面の奥にあるのか手前にあるのか、認識しづらかった。一方で、iPad や iPad Pro はその場にいる複数人で一つの画面を覗き込むことができ、共通認識を持ちながら会話できるため、監視員が複数人いる場合のコミュニケーションツールとしても有効であることがわかった。

また、施工中に表示されているモデルを含めた躯体壁面の様子を画面のスクリーンショットとして保存しておけば、施工が完了した後に、どのような施工状況で、どの場所（施工箇所との位置関係も踏まえた場所）の壁面の様子なのかを他の人に正確に伝えることができるため、情報共有ツールとしても有効であることがわかった。

5. まとめ

地盤改良の施工データと動態観測の計測データを、リアルタイムに AR や MR で可視化するシステムを開発した。現場で試行を行い、現地位置に合わせて可視化することで、空間把握能力の個人差を補完するだけでなく、情報伝達が円滑化することもわかった。また、監視業務がより確実に行えるため、公衆災害の防止に役立つ。

現段階では可視化できる計測データは沈下計だけであるが、データをクラウドストレージサービス経由にすることで汎用性を持たせているため、様々な IoT センサのデータを可視化していくことが可能である。今後は、傾斜、地下水位、施工位置近くの井戸水の pH など、地盤改良の多様な影響を可視化し、適用現場を増やしていきたい。

【参考文献】

- 1) 国土交通省、「ICT 施工の対象工種の拡大に向けた取組」、2023、<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/content/001595484.pdf> (参照 2023-02-28)
- 2) 土木学会建設技術研究委員会建設技術体系化小委員会、「CIM, ICT 関連技術の体系化に関する調査報告書」、2020、<https://committees.jsce.or.jp/sekou05/node/42> (参照 2023-02-28)
- 3) 平出 亜、柿原芳彦、「深層混合処理の施工に伴う周辺地盤変位のメカニズムと変位予測についての考察」、応用地質技術年報、1997
- 4) 国土交通省、「建設工事公衆災害防止対策要綱 土工事編」、国土交通省告示第 496 号第 8 章第 54、2020、<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001305480.pdf> (参照 2023-02-28)