

CIMの活用によるフロントローディングと品質・出来形の確保

鹿島建設(株) 正会員 ○関 健吾 正会員 工藤匡貴
正会員 川畑 勝 正会員 内藤 歩
(株)バックグランドプラス 古川 弦暉

岩手県沿岸広域振興局 土木部宮古土木センター 正会員 阿曾沼崇 畠山俊彦

1. はじめに

岩手県宮古市を流れる二級河川閉伊川（へいがわ）の河口は、東日本大震災の津波により大きな被害を受けた。そこで、周辺港湾の新設防潮堤と一体となる TP+10.4mの防御高さを持つ津波防潮水門の新設が計画された。新設する水門は堰柱5基とカーテンウォール3基などを有し、グラウンドアンカーおよび地盤改良による土留め支保工や基礎鋼管杭を有する。しかしながら、当該地域は三陸特有のリアス式地形であり岩盤線の起伏が激しい。さらに、施工箇所は河口部でもあるため地盤構成が複雑なものとなっている。このように、地盤に関するリスクが非常に高いことから、施工時に手戻りの発生や品質・出来形に影響を及ぼすことが懸念された。そこで、設計段階でCIMを取り入れて地盤情報の精密化・可視化を行い、発注者と施工者双方で地盤リスクの認識共有とその低減方法について検討した。ここでは、これらの取り組みによって、設計段階で施工時に予想される課題の解決（フロントローディング）を試みた事例について、その概要と評価を報告する。

2. 工事概要と地盤条件

本工事は、水門本体として基礎鋼管杭 1,322 本、鉄筋コンクリート 65,057m³ からなる堰柱5基およびカーテンウォール3基を構築する。その他付帯工事として、特殊防潮堤 225.6m、管理橋 157.4mなどが含まれる（図-1）。工事期間中も河口を往来する船舶の航路を確保するため、仮締切を設けて半川締切での施工となる。

地盤条件として、現場周辺の基盤は約1億4,500万年前から6,600万年前の中生代白亜紀前期の宮古花崗岩に該当し、表層部は沖積堆積物が覆っている。また、施工地点である河口部は、図-2に示すように、過去の洪水や津波の影響により砂質土および粘性土が互層状に複雑に堆積している。さらに、地盤物性のばらつきが大きいので、土留めや地盤改良においては施工時の品質・出来形への影響が懸念される。

3. CIMの活用によるフロントローディング

(1) フロントローディング実現への課題

施工上のリスクが多数予想されたため、フロントローディングを行い詳細設計の段階で可能な限りのリスク低減を試みた。その際、筆者らも施工者として設計検討へ積極的に関わり（コンカレントエンジニアリング）、検討作業および施工時の手戻りを極力低減する

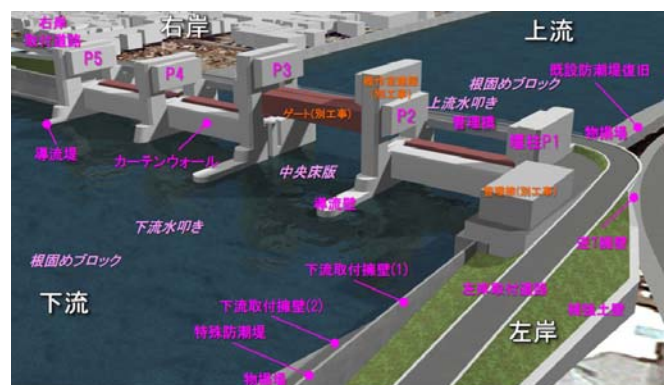


図-1 完成予想イメージ

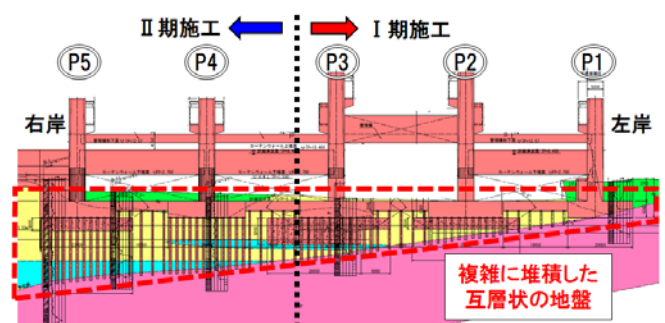


図-2 水門断面図と地盤条件

こととした。こうした取り組みをスムーズに実現するには、発注者と施工者の間で、現場条件や施工時の品質・出来形に及ぼすリスクとその低減策を、高いレベルで共有するプラットフォームが必要と考えた。

キーワード CIM, フロントローディング, 鋼管杭, 地盤改良, 水門

連絡先 〒980-0802 仙台市青葉区二日町 1-27 鹿島建設(株)東北支店 TEL. 022-261-7111

(2) CIM による地盤情報の可視化・共有

前述のとおり、地盤の不確かさに起因するリスクは品質に大きく影響する。そこで、目に見えない地盤情報を短時間で分かりやすく可視化し、認識を共有するプラットフォームとして、CIM を用いた地盤情報の 3 次元モデルを活用することとした。

(3) 計画・設計の精密化

後述するように、リスク低減のためには、計画・詳細設計段階で基礎杭や地盤改良の深度設定の精度を高め、1 本 1 本を「オーダーメイド」するような、緻密な検討が不可欠である。これには莫大な手間を要することが見込まれたため、CIM の 3 次元モデルを用いて、可能な限り省力化することとした。また、これらの課題を解決する際は、設計変更を伴うものも多数存在する。その場合は、当初設計における施工条件と課題、および変更案の内容について、発注者と施工者で深く共有することが、スムーズに事業を進める上で必要となる。この解決策としても、CIM データの活用を試みることとした。

さらに、本工事は他社 JV によって鋼製ゲート関連の金物を順次埋設しながら堰柱を構築する必要がある。その際は、取合い確認や引渡し工程の調整など、詳細な計画を事前に詰めておくことが重要であるため、ここでも CIM モデルを活用することとした。

本工事における課題と CIM の活用による解決方針について表-1 に示す。各項目の詳細は 5 章にて述べる。

4. CIM の概要

(1) 方針

本工事での CIM の要件として以下を設定した。

① 可視化・共有のプラットフォームとなること

当初設計条件や対応策を可視化し、発注者・設計者および施工者で認識を共有する作業を円滑化する。

② 地盤情報の可視化・共有の効率化

後述する多数の地盤調査（106 カ所）で取得した地盤情報の可視化・共有の作業を効率化する。

③ 緻密な設計・計画の効率化

基礎鋼管杭や改良体 1 本ごとに深度設定を変更するような、緻密な設計と検証の作業を効率良く行う。また、鉄筋の干渉確認、ゲート部等の機械設備との取合い確認を効率良く行う。

上記の要件を踏まえて、モデルの構成および必要なソフトウェア環境を整えた。

(2) 使用ソフトとモデル構成

CIM は地盤モデルと構造物モデルに大別した。地盤モデルは、多数の地盤調査結果を反映させるため、柱状図を結んだ 3 次元断面モデルと 3 次元サーフェスを作成できるソフトおよびアドオン（Civil 3D、GEORAMA）を使用し、岩盤モデルおよび土層モデルを作成した。前者は風化によりマサ化した D 級の推定天端、および支持層となる CL 級以上の推定天端をモデル化した。後者は、地盤改良の品質・出来形に及ぼす影響の大きい粘性土と砂質土の出現深度と厚さをモデル化した。

構造物モデルは、水門堰柱（鉄筋、コンクリート、機械設備）、基礎鋼管杭、土留・仮締切、地盤改良の改良体などを Revit で作成した。作成した構造物モデルは、従来の 3 次元 CAD とは異なり、線分ではなく部品単位での作図が基本となっている。そのため、作成した部品に対して各種の属性情報（材料仕様、施工予定日、施工実績など）付与や、部品同士の干渉チェックなどを行うことができる。

これら複数ソフトで作成したモデルの統合・レビュー、干渉確認には、Navisworks を用いた。なお、実際の属性情報付与は Navis+ で操作した。

表-1 本工事における課題と CIM による解決方針

分類	工種	課題	CIM による解決方針	主な効果
計画・設計	基礎鋼管杭	確実な根入れ長の確保（杭長設定）	追加地盤調査と 3 次元岩盤モデルを用いた杭長の変更	・手戻り防止 ・品質確保
	地盤改良	粘性土層への確実な着底、土層毎の噴射仕様設定	3 次元土層モデルを用いた改良長変更、噴射仕様の切替深度の設定	・品質確保、向上
施工計画・施工管理	グラウンドアンカー	アンカー同士の干渉回避	3 次元モデルによる既設埋設物の回避、アンカー同士の離隔確認、削孔角度の確認	・出来形確保 ・高度な施工管理 ・第三者影響の回避
	鉄筋	干渉の回避、かぶりの確保	3 次元モデルによる配筋図・加工図の修正、かぶり厚の確認	・手戻り防止 ・品質確保
		機械工事 JV との取合い確認、引渡しステップの調整	3 次元モデルによる取合い確認、引渡し工程の調整	・手戻り防止 ・施工性確保

5. 計画・設計における CIM の活用

(1) 基礎鋼管杭の設計変更

a) 当初設計と課題

基礎鋼管杭（φ1,000mm）は支持層（CL 級の花崗岩）に 1D 以上根入れする設計である。仮に、当初設計における CL 級岩盤線に対して実際の岩盤線が深いと、岩盤への根入れ長が不足し設計を満足しない。その場合、事後対策として不足分の鋼管杭を追加調達し、杭を継ぎ足す必要が生じる。鋼管杭の調達は 2～3 ヶ月を要するため、その分の遅延が懸念された。また、当初設計の杭長は堰柱 1 基（幅 20.5～23.0m、長さ 40.5m）につき 1 カ所のボーリング結果から設定されていたが、当該地域における岩盤線は前述のとおり起伏が激しい。そのため、当初設計における地盤リスクは非常に高いことが予想された。

b) 追加地盤調査と CIM を用いた対策

このような地盤リスクの低減には、地盤調査を追加し、支持層（CL 級岩盤線）の出現深度を精度良く予測することが有効である。そこで、表-2 に示すとおり地盤調査を追加し、結果を 3 次元 CIM モデルに取り込むこととした。追加調査はコアボーリングを 36 カ所、ロータリーパーカッションドリル（RPD）による調査を 54 カ所実施した。

c) 杭長の変更

追加調査により得られた支持層の標高データをもとに、支持層天端の 3 次元サーフェスモデルを作成し、当初設計の基礎杭と重ね合わせた（図-3）ところ、基礎杭の一部で根入れが不足する結果となった。一方で、支持層への根入れが 1D 以上で過大となる箇所も見受けられた。そこで、発注者と協議の上、適切な根入れ長（1D 以上）となるよう、全ての基礎杭について 1 本ごとに杭長設定を見直した。変更後の杭長を図-4 に示す。当初設計と比較して、最大で 5.5m 杭長が長くなった。すなわち、支持層への未達を回避したと

いえる。一方、最も杭長が短くなったものは 2.0m 変更となった。全体では 70% の杭で杭長が延び、総計で 205m（重量で 50 t）増加した。

実施時（ダウンザホールハンマ工法）には、削孔スライムを 1m 毎に採取し、岩盤の出現深度と根入れ長を判断した。その結果、全ての杭で岩盤への設計長以上の根入れを確認した。また、基礎杭の施工終了後に実施した急速載荷試験でも、所定の品質（支持力）を満足していることを確認した。このように、膨大なボーリングデータと CIM を組み合わせてモデル作成することで、約 700 本の鋼管杭 1 本ごとに、容易に杭長を「オーダーメイド」することができ、基礎杭の品質確保に繋がったと考える。

(2) 地盤改良の設計変更と施工仕様変更

a) 当初設計と設計変更

半川締切の鋼管矢板区間は、掘削に伴う安定性確保のため、地盤改良による先行地中梁を構築する必要があった。ここで、地中梁の反力は改良体底面と粘性土との摩擦に期待している。仮に、改良体が粘性土に着底せず、適切な反力を得られなかった場合、鋼管矢板に想定外の変状が生じて工事全体に著しく大きな影響を及ぼす。一方で、図-2 で述べたように、施工箇所は河口部であるため砂質土層と粘性土層が複雑な互層状に堆積している。以上より、品質確保のためには粘性土層の出現深度を精度良く予測して設計に反映し、改良体を粘性土層に確実に着底させる必要があった。

そこで GEORAMA を用いて表-2 の地盤調査結果から 3 次元の土層モデルを作成し、設計を見直した。結

表-2 CIM に用いた地盤調査数（カ所）

分類	岩盤モデル	土層モデル
当初設計	11	(6)
追加調査	コアボーリング	36
	RPD	54
先行工事、周辺工事	5	0
計	106	(21)

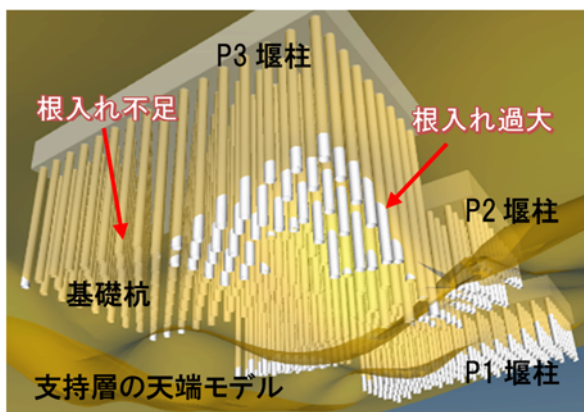


図-3 設計変更前の杭長

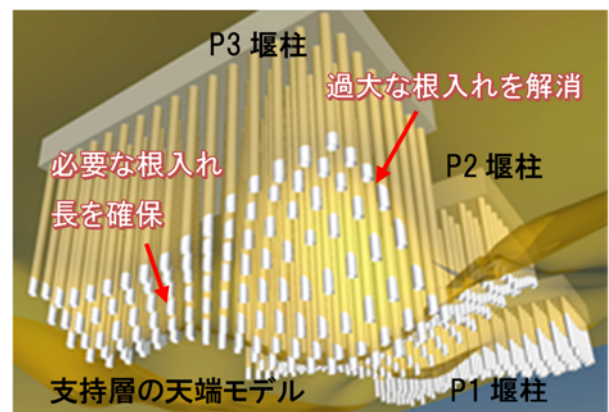


図-4 設計変更後の杭長

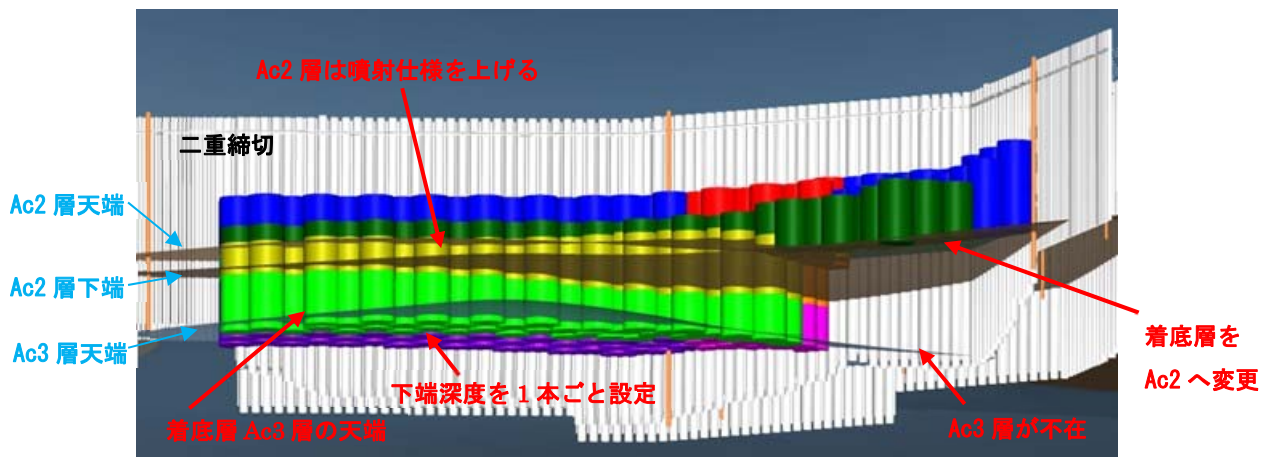


図-5 3次元データによる地盤改良の設計検討

果を図-5に示す。当初、改良体は粘性土のうちAc3層に着底する計画であったが、作成した3次元土層モデルにて照査した結果、Ac3層の分布していない範囲の存在が明らかとなった。そこで、その範囲については着底層を上層のAc2層に変更し、受働抵抗の不足は改良面積を増加するよう設計を見直すこととなった。さらに、粘性土層への着底をより確実なものとするため、3次元モデルから全ての改良体について、下端深度を1本ごと設定した。

b) 施工仕様の変更

施工仕様の検討においても3次元CIMモデルを活用した。改良体は高圧噴射攪拌であるJETCRETE工法により築造する計画であった。本工事のように、砂質土と粘性土が互層状に存在する場合、高圧噴射攪拌の噴射仕様を単一としてしまうと、砂質土と比較して粘性土の方が改良径および改良強度ともに小さくなる傾向がある。一方で、粘性土で所定の品質・出来形を満たすよう噴射仕様を設定すると、砂質土における改良径が設計径以上となってしまう、隣接する改良体まで切削してしまう恐れがある（コラムインコラム）。そこで、品質・出来形確保のため、砂礫層（上層・下層に存在）と粘性土層（中層に存在）の各層ごとに噴射仕様を切替えることとした。噴射仕様の設定にあたっては、図-5に示すように地盤モデルと改良体モデルを重ね合わせ、改良体1本ごとに土層変化深度および着底深度を確認した。

出来形（改良径、設計:φ3.6m）は試験施工時に熱電対を埋設して確認した。その結果、粘性土層（Ac2）およびその上方に位置する砂質土層（As1）のいずれにおいても改良径はφ3.6～3.8m程度と判断され、所定の出来形を満足していることを確認した。

また、品質確認として改良体のコア（掘削径：φ116mm）を採取し、一軸圧縮強度試験（材齢28日）

を実施した。その結果、粘性土層および砂質土層ともに設計基準強度（1,000kN/m²）を満足していることを確認した。このような綿密にオーダーメイド化された設計を実現するには、基礎杭での事例と同様に、検討と検証作業の効率化が不可欠であり、CIMモデルの活用は有効であったと考える。

6. 施工計画・施工管理への活用事例

(1) 近接するグラウンドアンカーの施工管理

グラウンドアンカーは既設構造物の回避、アンカー同士士の干渉回避、定着体の最低離隔の確保など全ての条件を満たすようCIMを用いて設計された。検討に用いた3次元モデルを図-6に示す。

この際、アンカー同士が近接する箇所が複数あり、最小で23mmまで接近するものもあった。そこで、施工時にはアンカー同士の離隔をNavisworksの干渉チェック機能で事前に確認し、離隔距離が短いアンカーについては、削孔角度をより慎重に管理することとした。このようにCIMデータを施工に反映することで、メリハリのある施工管理が可能となっただけでなく、既設水路や埋設管等も損傷することなく施工を終えることができ、第三者影響も回避できた。なお、施工時

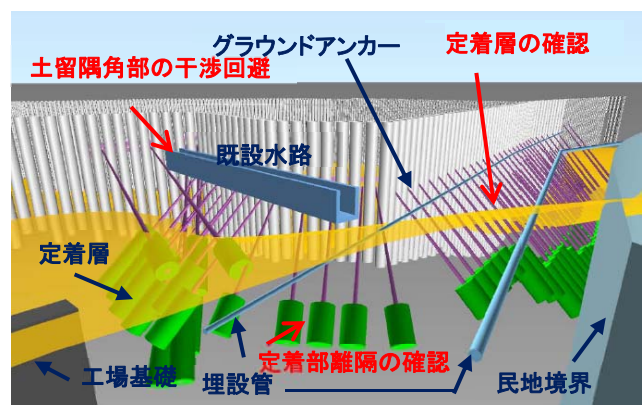
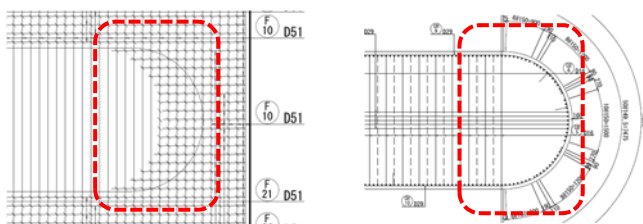


図-6 グラウンドアンカーの検討



底版（主鉄筋，せん断補強筋） 堰柱（主鉄筋，帯鉄筋）

図-7 底版および堰柱の配筋図の例

に削孔スライムを逐次確認したところ，定着層となる岩盤の出現深度は CIM モデルと概ね同等であった．

(2) 鉄筋の干渉回避とかぶりの確保

堰柱に採用されている SD490 は他の鉄筋と比較して発注から納入までに時間を要する．そのため，鉄筋同士の干渉をその場で修正すると，ラップ長の不足や鉄筋数量の不足に伴う追加発注と工程遅延が懸念された．また，鉄筋は底版部と堰柱部に大別されるが，堰柱部の主鉄筋は底版への飲み込みがある．両者は共に D51 であり，施工しながらの位置修正は労力を要する．さらに，両者は別図面であるため，2次元での干渉確認は困難であった（図-7）．これらの懸念を解消するため，3次元モデルで鉄筋の干渉確認を行った（図-8）．図より，底版の主鉄筋およびせん断補強筋の干渉，底版の主鉄筋と堰柱の主鉄筋および帯鉄筋との干渉が確認された．そこで，あらかじめ鉄筋加工図も含めた変更案を作成して発注者と協議して施工を迎えた．これにより手戻りなく，精度良く鉄筋の加工と組み立てを行うことができた．

3次元モデルは，かぶりの確保にも活用できた．機械式継手が重なる箇所が見受けられたためカプラー（D51 用，外径 83mm）をモデル化して3次元で照査したところ，最低かぶり未満となることが分かった．そこで，発注者と協議し，配筋を事前に修正することでかぶりを確保することができた．

(3) 機械設備工事との調整

堰柱間は可動式鋼製ゲートを設置する計画であり，堰柱構築時に機械設備 JV による埋設金物の設置作業が伴う．配筋を全て終えた状態で引き渡すと，機械設備と鉄筋が干渉した際に双方に大きな手戻りが生じる．そこで，鉄筋と機械設備を含めた3次元モデルを作成し，取合いと引渡し工程を事前に確認・調整した（図-9）．具体的には，柱部の主鉄筋・帯鉄筋・中間帯鉄筋・せん断補強筋を全て配筋してしまうと，機械設備の設置が困難となるため，主鉄筋および帯鉄筋まで配筋を完了した時点で機械設備 JV に引渡すことと

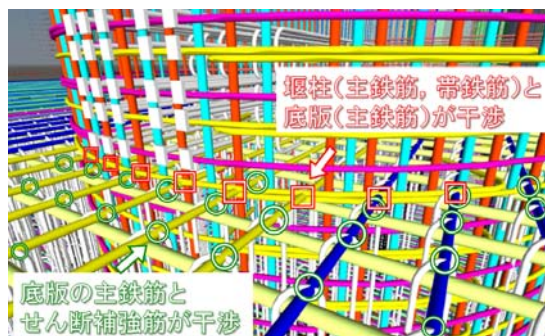


図-8 当初図面における鉄筋の干渉状況

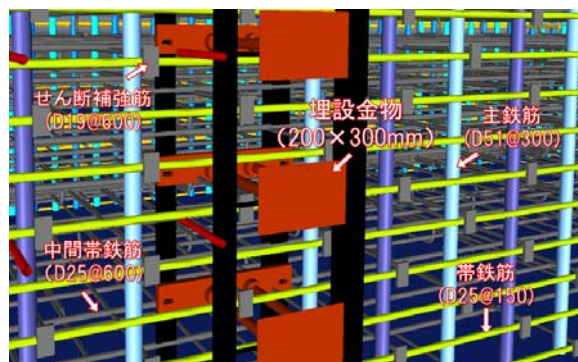


図-9 機械設備と重ね合わせた配筋モデル

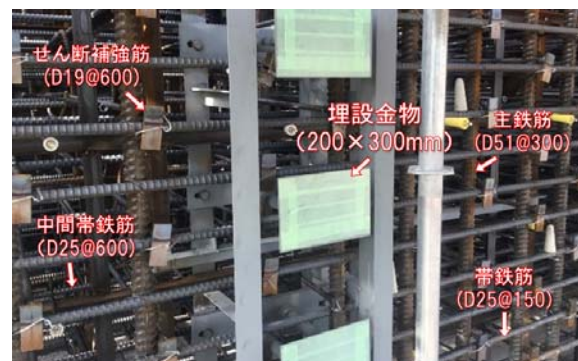


写真-1 機械設備および配筋完了状況

した．これにより，引渡しまでの工程だけでなく，後工程も踏まえて施工計画の詳細を詰めることができ，スムーズに施工を進めることができた（写真-1）．

7. おわりに

本工事では，地盤条件の相違に起因する設計変更について，CIM モデルを活用して発注者・施工者双方の認識共有を図った．結果として，目に見えない地下の状況を可視化することで，施工時に大きな手戻りが生じることなく設計段階でスムーズに協議を進めることができただけでなく，構造物の品質・出来形を確実に確保することもできたと考える．

また，別工事である機械設備 JV との取合いについて，CIM を用いて事前にシュミレーションすることで，円滑かつ安全に施工を進めることができた．