

狭隘な都市部での鉄道高架橋工事における BIM/CIM の活用

京都線・千里線淡路駅周辺連続立体交差工事（第4工区）に伴う土木工事

森口 智 聡

本工事は、大阪市の阪急電鉄京都線及び千里線が交差する淡路駅付近の連続立体交差工事である。工事範囲の周辺は住宅、商業施設が密集する市街地で、鉄道施設、周辺の建物、道路施設等の現場状況を十分に考慮した設計、施工が求められる。本稿ではBIM/CIMをフロントローディングによる施工検討から施工管理まで包括的に活用した事例を紹介する。

キーワード：3D, BIM, CIM, ICT, スキャナ計測, 鉄道, 高架橋, ウェアラブル, 生産性向上

1. はじめに

阪急京都線・千里線淡路駅周辺連続立体交差事業は、阪急電鉄京都線・千里線の淡路駅を中心に3つの駅（下新庄駅、崇禅寺駅、柴島駅）を含む約7.1kmの範囲を高架化し、17ヵ所の踏切を除却することで、都市内交通の円滑化を図るとともに、分断された市街地の一体化による都市の活性化を目的としている（図-1, 写真-1）。図-2に本事業全体の計画図を示す。

連立事業のうち、当工区（第4工区）は、京都線区間は淡路駅から河原町方へJRおおさか東線（元JR城東貨物線）交差区間までの320m、千里線区間は同じく淡路駅から北千里方へ下新庄駅の手前まで680m区間の鉄道高架橋構築を担当している（図-3）。

千里線区間は住宅が密集しており、事業用地の確保が困難であるため、現在線上に高架橋を構築する直上方式が採用されている。一方、京都線は、現在線の横に新たに用地を確保し、高架橋を構築する別線方式となっている。

本稿では、当工区におけるICTを活用した取組みを紹介する。

2. 工事概要

工 事 名：京都線・千里線淡路駅周辺連続立体交差
工事に伴う（第4工区）土木工事

発 注 者：阪急電鉄(株)

施工監理：阪急設計コンサルタント(株)

施 工 者：鹿島・戸田特定建設工事共同企業体

工事場所：大阪府大阪市東淀川区

工 期：2010（H.22）. 3.2～2026（R.8）3.31

構造形式：RC構造, SRC構造, PC桁, 鋼トラス
桁2橋

・京都線：橋長L = 60.24 m, 主構高7.6 m, 鋼重
448 t

・千里線：橋長L = 76.31 m, 主構高7.6 m, 鋼重



図-1 現場位置図

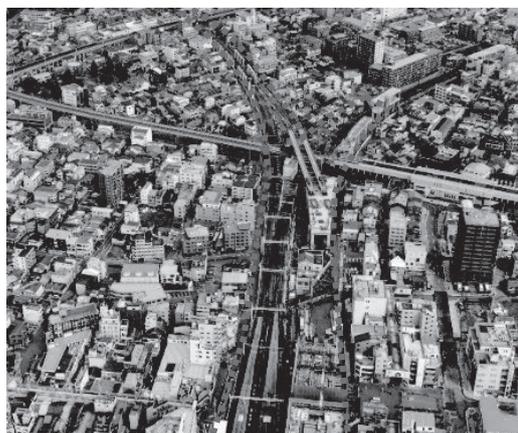


写真-1 現場全景写真

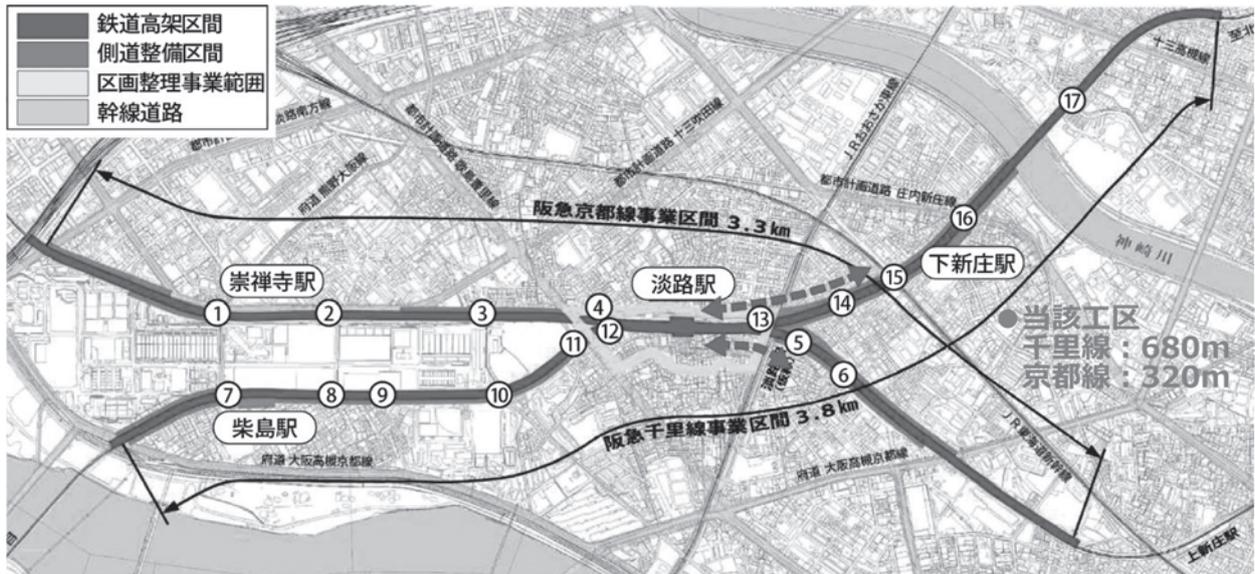


図-2 事業計画図

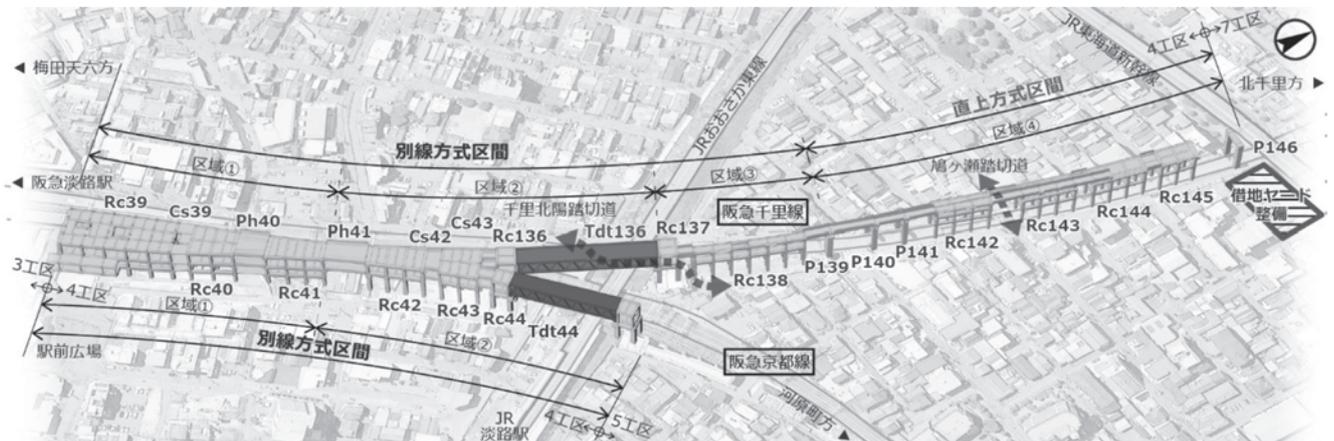


図-3 工事範囲図

812 t

施工方式：別線方式，直上方式

3. ICT を活用した取組み

(1) 工事の特徴と課題

工事範囲の周辺は住宅，商業施設が密集する市街地で，工事ヤードは限られており，営業中の鉄道線路に近接した狭隘なスペースの中で，すべての作業を行う必要がある。そのため，鉄道施設，周辺の建物，道路施設，電柱，架線，埋設物等の現場状況を十分に考慮した設計，施工が求められる。しかし，施工に影響する既存の構造物は多岐にわたるうえ，正確な図面が存在しない場合もあるため，測量等により現況を把握し図面に反映するプロセスは煩雑で，精度を担保するのは困難を極める。一方，この段階で見落としがあった場合には，施工中に重大な不具合が生じ，工程やコスト

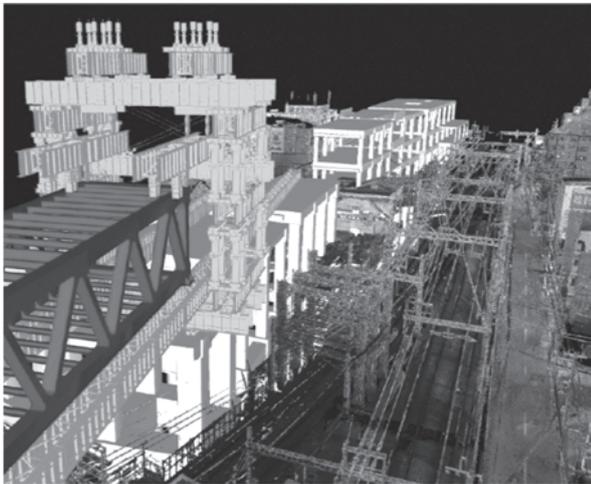
を大きくロスするとともに，作業に危険が伴うリスクがある。

(2) 3D データの活用

(a) 点群データの活用

上述のような問題点，課題に関する対策として，事前に3D スキャナ計測を実施し，現場周辺の状況を一括して3D データ化して，施工検討に活用することに取り組んだ(図-4)。現況を3D化したデータ(点群データ)に，新設構造物の3Dモデルを重ねて，設計及び施工上の問題点を抽出することを試みた結果，構造物の一部と既存鉄道施設の干渉が明らかになり，計画の見直し，変更を行った。このように，3Dモデル上の検討により，事前に問題点を解決したことで，フロントローディングによる円滑な施工が可能になった。さらに，高密度配筋，クレーンの配置計画，コンクリート打込み計画，施工シミュレーション等，多様なアプ

ローチで3Dデータを活用し、施工計画、施工管理の効率、質の向上を図った。また、複雑な施工プロセスを3次元で可視化することが、工事関係者間の情報共有促進、施工に対する理解度の向上にもつながり、工事の安全、品質の確保に大きく寄与している。以下に、3Dデータを活用した各手法について詳述する。



図一4 現場周辺状況と構造物の統合モデル

(b) 3D スキャナによる計測

現場周辺の3D化にあたり、詳細な施工検討に活用するためにはmm単位の精度が必要と判断し、表一1に示す据付型スキャナによる計測を行った。

表一1 3D スキャナ仕様

機種名	Faro Focus3D X330
測定範囲	0.6 m ~ 330 m
精度	± 2 mm
レーザー	レーザークラス1
その他	GPS 受信機

線路を中心に、正確に位置関係を把握するため、線路両側の側道と跨線橋上の数十ヵ所で据え付けた三脚上に3Dスキャナを設置して昼間に計測を行った(写真一2)。

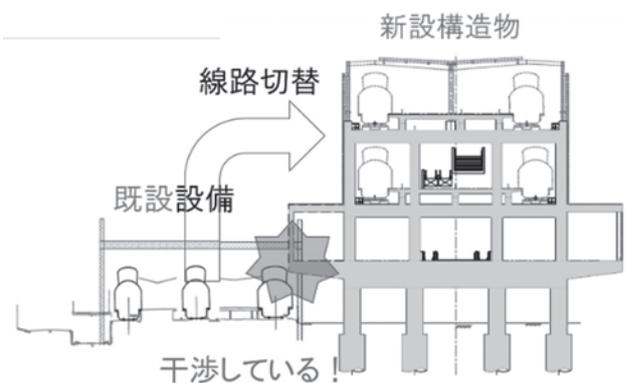
(c) 3D データを使った詳細検討

計測したデータは、統合ソフト(Autodesk Navisworks)に読み込み、新設する構造物の3Dモデルを重ねて、既存の構造物や、鉄道施設との干渉を確認した。さらに、点群処理ソフト(Trimble Realworks)を用いて3Dモデル上での距離計測を行い、離隔寸法などを計測した。

その結果、図一5に示すように、既設軌道の架線柱と新設構造物の一部が干渉していることが明らかになった。



写真一2 3D スキャナによる現況計測状況



図一5 干渉箇所抽出

当該箇所は、別線方式による施工箇所であり、当初の施工手順は以下のとおりだった。

- ①既設線路に隣接する敷地に新設構造物を構築
- ②軌道を敷設して新しい線路が完成
- ③既設線路から新設線路への切替を行う
- ④不要になった既設施設を撤去する

ところが、線路切替後に撤去する予定の既設架線柱が新設構造物と干渉していることから、このような施工手順が成立しないことが明らかになった(図一6)。そこで、計画の変更を検討し、新設構造物のうち、既



図一6 当初施工手順図

設架線柱と干渉している箇所を除いた部分を先行して構築，供用した後に干渉部を施工する計画とした。

躯体構築の詳細計画についても，3D データを活用して検討した。例えば，作業ヤードが狭隘なため，躯体構築の揚重作業は，躯体の開口を利用して設置したタワークレーンによる計画としたが，開口部の位置確認，クレーン部材の収まり，タワークレーンの組立解体手順などをあらかじめ3D モデルでシミュレーションすることで，計画の最適化を図った（図-7）。

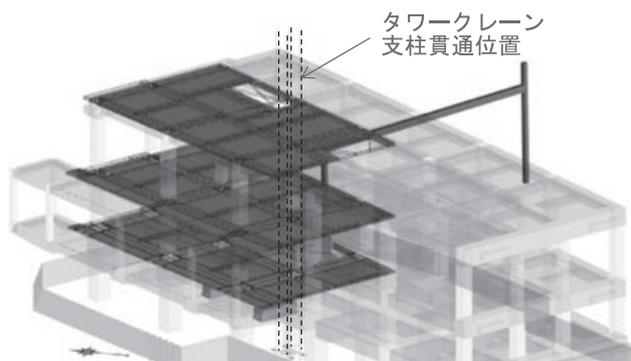


図-7 タワークレーン支柱の配置検討図

(3) 3D を活用したクレーン作業計画

施工スペースが限られる鉄道工事では，クレーン配置や車両動線を随時確認，調整することは，施工管理の中で，最も重要なタスクの一つとして位置づけられる。クレーンの配置，旋回方向などを周辺の状況に応じて最適化するためには，3次元的な取り合いの検討が不可欠だが，2次元図面で検討する場合には，平面図と複数の断面図との組み合わせを施工ステップに応じていくつも作成する必要がある。したがって，考慮する対象が多くなるほど検討業務にかかる負担も重くなる。そのため，作業調整による細かい施工方法の変更などがあると，時間的な制約により精度の高い検討が難しくなる。さらに，検討した内容，注意すべきポイント等を関係者に伝達する場面では，検討の精度，仕上がりのばらつきによって伝わり方が異なるため，正確に伝えるためには，多大な労力を要することが少なくない。

今回は，現況と計画を統合した3Dモデル上で，事前に施工手順に応じた仮設計画，クレーンの配置を検討しておくことにより，日々の細かい工程変更や作業調整に応じた検討作業及び関係者との情報共有を効率よく行うことができた。例えば，クレーンの配置を変更する場合でも，モデル上の配置を調整するだけで問題点の確認，安全性のチェックを素早く行うことができる。また，その内容を関係者に伝える際も，3Dデー

タを見せることで，2次元図面を使う場合に比べて格段にわかりやすくなり，効率，精度が大幅に向上した（図-8）。



図-8 クレーン配置計画例

(4) 高密度配筋部の検討

本事業区間で築造する構造物は，複数の構造形式が混在した設計となっており，構造の複雑さに起因する問題が生じる箇所がある。そのようなケースでも，3D データを活用した課題解決が有効であった。例えば，RC 構造の躯体と鋼製トラス桁の接続部分では，RC の柱梁接合部の上部にトラス桁の支承金物が位置している。このような箇所では，支承金物を固定するアンカーを，高密度な配筋部分に設置する必要があり，多くの部材干渉が生じるうえに，組立作業も困難になる。そこで，鉄筋，アンカー金物を3D データ化し，モデル上で配筋シミュレーションを実施して，フック形状や組立順序を事前に検討し，干渉を回避して，問題なく施工ができた（図-9）。

(5) コンクリート打込み計画

コンクリート打込みに際して，コールドジョイントの発生防止等を考慮した詳細な計画を作成するためには，打込み予定ブロックの数量を部材ごと，打込み箇所ごとに把握し，数量に応じた打込み所要時間を算定する必要がある。3D データを使ってこれらの作業を行うと，複雑な形状の箇所でも簡単に数量を算出することができるうえ，計画の妥当性を3次元空間で視覚

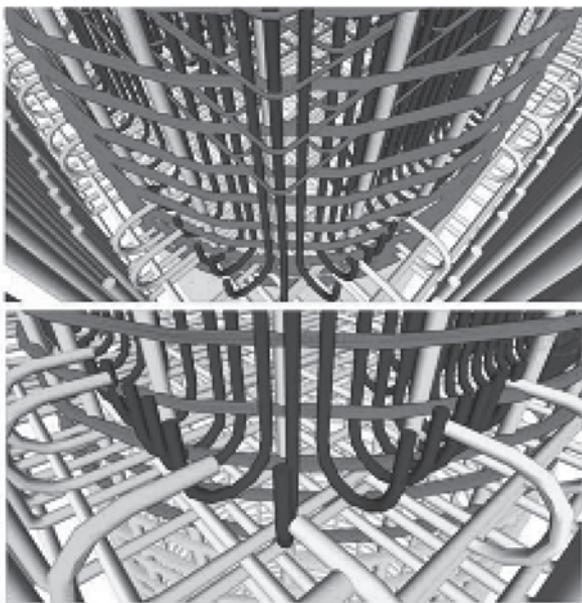


図-9 配筋検討例

的に確認できる。さらに、実際の施工では、打込み順序や打重ね時間を管理するために、打込み方法を関係者に確実に周知して、管理ポイントや品質リスクに対する認識を共有することが課題となる。そこで、施工検討に使用した3Dデータを時間軸に沿って動画化したものを作成して、作業前の周知に活用した(図-10)。これにより、関係者全員の打込み計画に対する理解度が高まり、計画に沿って円滑に作業を進めることができた。

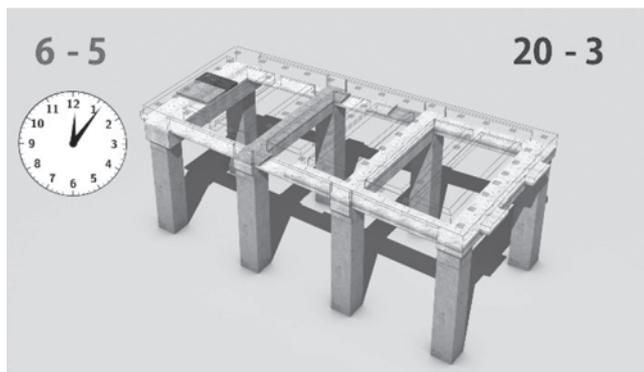


図-10 コンクリート打設手順表示例

(6) 点群からモデルデータへの変換

点群データは座標を設定できるという長所がある一方で、大容量の点群データはPCへの負荷が大きく、操作性が悪くなるために、取得した点群データが十分に活用されないケースもあり、効率的なデータ処理方法の確立も課題の一つである。レーザースキャナの性能は年々向上しており、取得されるデータは大容量化の傾向にある。使用するソフトウェアにもよるが、最

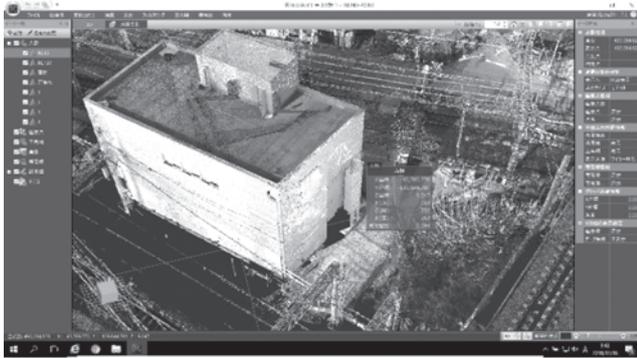
大でもファイル容量を5GB程度に抑えないと操作性が悪く、一般的な性能のPCで扱う場合は実用的でなくなる。そのため、取得したデータを適度に間引きするなど、調整が必要となるが、処理にかかる手間やコストが障壁となって、データの活用が滞る場合もある。点群データを扱いやすくする有効な方法として、3Dモデルデータへの変換がある。自動、半自動で変換できるソフトウェアが市販されているが、都市部の現況データは複雑性、多様性が大きく、既存のソフトウェアの自動変換機能で実用的なモデルデータを得ることは、現状では難しい。そこで、(株)アルモ設計の協力を得て、図-11に示す体系的なフローに従って点群データを処理して、モデルデータへの変換作業を効率化することを試みた。



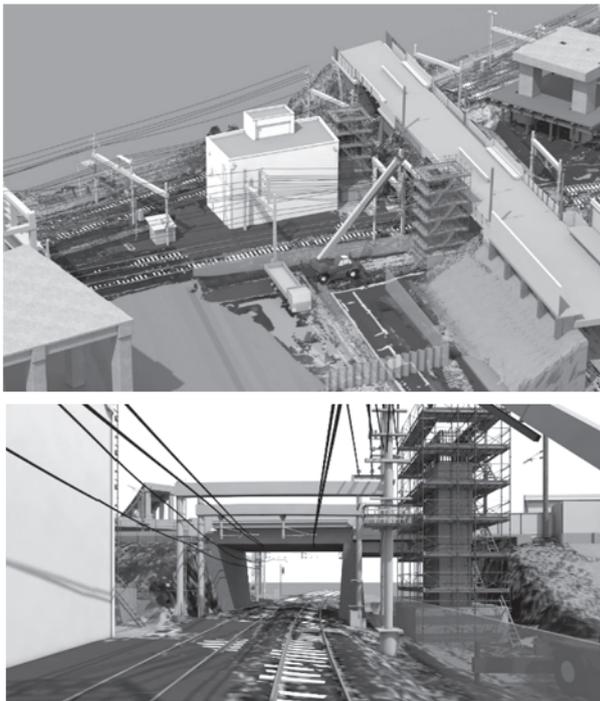
図-11 点群データ変換フロー図

図-13は、上記のフローに従って、図-12の点群データの一部をモデルデータに変換した結果である。データサイズが1/100以下に縮小するとともに、視認性が向上し、詳細な干渉チェックや、離隔確認が可能となった。変換精度は、分類、断面抽出の細かさに依存するが、現場の状況や目的に応じて適宜変更することが可能である。データ変換のプロセスは、一部を単純なアルゴリズムにより自動化することができたが、分類、トレース等、ほとんどは手作業で処理しており、依然として、相当な手間とコストを要する。た

だし、複雑な点群データの処理を比較的単純なステップに分解し、体系的なフローとして確立できたため、今後、各ステップの効率化、自動化に取り組むことにより、高効率なデータ変換プロセスの開発を実現できる可能性が開けた。



図一 12 点群データからの座標表示例



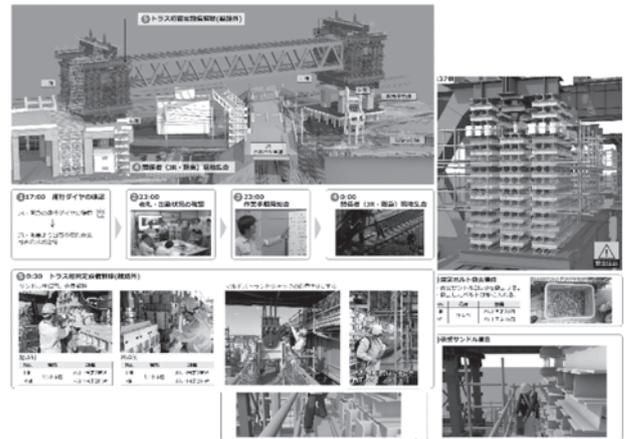
図一 13 変換後モデル図

(7) デジタル作業手順書の導入

JR 線交差部では、トラス桁の送出し架設を実施する。当該部分についても、仮設配置や施工手順のシミュレーションを行う等、施工検討において、3D データを活用しているが、さらに、検討に用いたデータを使って、デジタル手順書を作成した（図一 14）。

PC やタブレット端末の画面で、作業手順と、品質、安全上の留意点の記述に合わせて 3D データが表示される仕組みとなっている。難易度の高い作業を実施するうえで、複雑な手順や多岐にわたる注意事項、留意

点を網羅して、それぞれの意味、関連性を直感的に理解させるツールとして作成した。作業実施に先立って、関係者に対する作業手順書の周知徹底が必要となるが、デジタル作業手順書の導入により、作業員の理解度向上等の効果を発揮することが期待される。



図一 14 デジタル作業手順書表示例

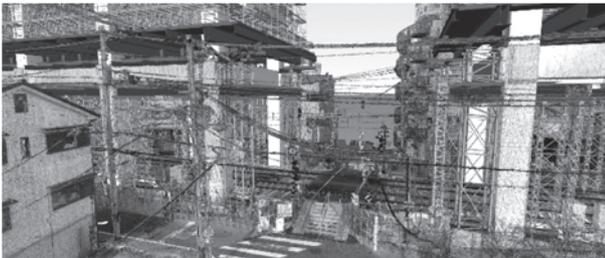
(8) VR・AR 空間での点群データの活用

SymmetryDimensionsInc. が開発したシステムでは、点群データとモデルデータを重ね合わせて VR（仮想現実）空間に表示し、HMD を装着した複数のユーザーがオンラインで空間を共有しながら、寸法測定、マークの記入、音声入力による注釈付けを行うことができる（図一 15）。

マーカー機能により記入した線や注釈の情報は、CAD データとしてダウンロードすることができるため、それらを参照しながらモデルデータを修正、更新することができる。注釈及びデータ更新の履歴は、レビューリストとして管理される。

このシステムを利用すると、供用中の鉄道線路内など、通常は立ち入ることができない場所の点群データを取り込むことによって、VR 空間で現場状況を正確に再現することができる。VR の効果によって、その場所に入り込んだようなリアルな感覚で、施工状況や完成イメージを体感することができるため、詳細な施工検討、情報共有のツールとして活用できる。今後、施工計画の課題抽出や、関係者への説明、協議に活用していく予定である。

また、360 度カメラで撮影した現況写真に、トラス桁等の完成構造物を重ね合わせ、AR（拡張現実）を用いることにより、実際に現地にできあがる様子を臨場感をもって伝えることが可能となった（図一 16）。

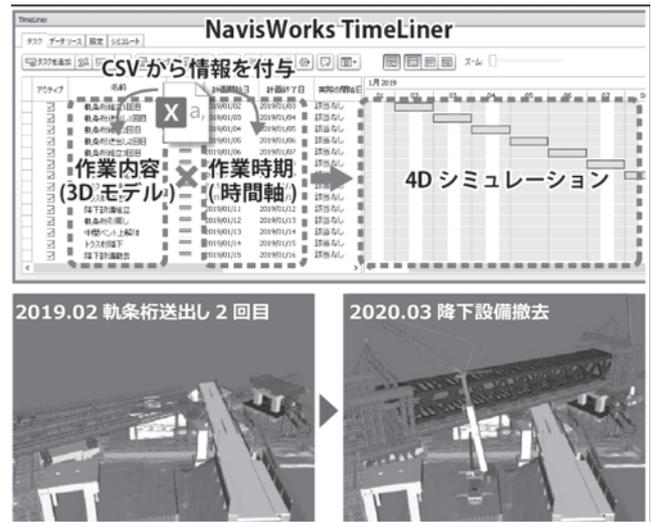


図一15 VR空間画像表示例



図一16 360度カメラ画像表示例

(9) タイムライナーによる4Dシミュレーション
 工程表作成ツール「工程's」で作成した工程表から、各工種の開始日時や継続時間等の情報をCSV形式で出力し、Navisworksにデータをインポートすることで、工程とCIMモデルを随時連動させることができた。Navisworksのタイムライナー機能を用いて、3Dモデルに時間軸を追加することにより、4Dシミュレ-



図一17 タイムライナーによる4Dシミュレーション

ーションを可能にした(図一17)。

これにより、複雑な施工ステップをモデル上でシミュレーションすることができ、プロセスの妥当性や重機配置の最適化を確認することができる。また、不具合があった場合にも、工事を着工する前に事前に解決できるというメリットがあり、工程短縮や施工の最適化に大きく寄与した。

(10) ネットワークカメラの導入

ネットワークカメラの特徴として、クラウドサーバを利用することで遠隔地からの操作が可能となり、現場へ行かずに映像を通じて現状を確認できることや、録画機能を用いて過去に遡ること、録画データを共有できるという利点がある。当現場では、定点カメラを用いた工事記録の撮影や、重機に設置した後方カメラやドライブレコーダーを安全管理に活用し、さらに、ヘルメットに装着したウェアラブルカメラにより、作業員目線による現場の見える化を図った。夜間の低照度でも鮮明に撮影が可能であることから、JR線と阪急線直上を一晩で架設するトラス桁の送出し工事にも採用した。本部で待機する発注者や社内関係部署へパソコンやiPadのモニターを通じて映像を送り、タイムスケジュールと実際の進捗状況を音声と映像で相互確認することにより、限られた線閉・停電時間の中で行う鉄道工事において、効率よく安全に施工ができるよう改善できた。特にトラス桁降下作業時には、80m以上離れた起点側と終点側、さらに本部パソコンの複数地点をスマートデバイス(RealWear)で中継し、互いのカメラの画像と音声を手ずフリーで確認することができた(写真一3)。



写真-3 ウェアラブルカメラ装着状況

(11) iPad用ARアプリ GENAR (ゲナー) の導入

建設現場では、顧客要求の認識違いや施工ミスによる手戻り工事や品質事故等の問題が発生することがある。これらの問題を解決する新たな手法として、iPad (iPhone) ですぐに使えるARアプリ「GENAR」が開発され、BIM/CIMモデルをARで表示することで「現地完成形の見える化」が可能になった。当現場では、トラス桁送出し後のBIMモデルを、現地の軌条桁上に投影し、送出し中における既存設備との干渉がないかをチェックした(写真-4)。



写真-4 ARアプリ GENAR 使用状況

(12) 360度写真管理プラットフォームの導入

汎用的な360度カメラを使用して現場内を撮影し、図面上に撮影場所を関連付けることのできる写真管理プラットフォーム(HoloBuilder)を定点カメラとして導入した。データ閲覧はWebブラウザ上のためiPhone等ですぐにアクセスすることができ、同位置での撮影写真を別の日時で比較したり(写真-5)、BIMモデルと写真を並べて計画と実物を比較したりすることができる。また、360度写真の一部のデータのみ閲覧できるようフィルタをかけて切出しができるため、リンクデータを発注者や施工協力業者へ送付すれば、実際に現場に立ち会ったような臨場感のもと、打合せにも有効活用することができた。

4. 実績の評価

3Dデータを活用することで、施工計画の最適化を行い、フロントローディングによる可視化を行うことはBIM/CIMの価値を実感させる結果となった。また、作業間連絡調整や工程管理を電子化することにより、作業の効率化や安全意識の統一化にも活用できた。さらに、現場にICT機器を導入することにより、見える化や聞こえる化を行いヒューマンエラーによる事故を未然に防ぐことができた。

このようなICTを活用した多様なアプローチで、施工計画、施工管理の効率、安全の向上が図られた。また、複雑な施工プロセスを3次元で可視化することが、工事関係者間の情報共有促進、施工に対する理解度の向上にもつながり、工事の安全、品質の確保に大きく寄与している。

5. おわりに

鉄道高架橋工事では、ほとんどの現場で非常に狭隘で営業線に近接した場所での施工が多い。ICTを組



写真-5 HoloBuilder 使用状況

み合わせて施工検討や施工管理に活用する手法は、このような環境の鉄道工事や、都市土木全般において有効であることが、本工事における取組みを通じて明らかになった。特に、プロジェクトの初期段階において、現場周辺の状況と、築造する構造物を全て3Dデータ化し、フロントローディングによる計画の最適化を行ったことが、それに続く施工の詳細検討、施工管理における、さまざまな場面で、3Dデータを積極的に活用する発想を生み出し、効果をあげる結果につながったといえる。

本事業は、工事の最盛期を迎えているが、今後も新しい技術を積極的に導入し、合理的な施工による高品質なインフラ構築に取り組みたい。本稿が、同種工事の参考になれば幸いである。

J C M A

《参考文献》

- 1) 金川真二, 佐野敏之: 鉄道高架化工事における3Dデータの活用, 土木施工 2019, Jan, VOL60, No. 1, pp. 79-82
- 2) 竹本久高, 森口智聡: 点群データの高度利用, 土木情報学シンポジウム, 2019, 6
- 3) 伊瀬知悟, 佐野敏之, 森口智聡: 鉄道高架化工事におけるBIM/CIMの活用, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会, VI-942, 2019, 9, 3
- 4) 伊瀬知悟, 佐野敏之, 森口智聡: 狭隘な都市部における鉄道高架橋工事のICTを活用した安全管理への取組み, 第56回建設業労働災害防止協会, 2019, 9

【筆者紹介】

森口 智聡 (もりぐち ともあき)
鹿島建設(株)
関西支店
阪急淡路JV工事(事)
工事課長

