

# 重力式コンクリートダム取水塔施工での 4D モデル・3D 模型の活用

深田 裕司・徳永 裕樹・松木 優佳

技能労働者の減少・高齢化を背景に、建設分野の生産性向上は喫緊の課題である。生産性向上に対する取り組みの1つとして、各種 ICT 技術の活用が挙げられる。本稿では、重力式コンクリートダムの取水塔施設の施工において、ICT 技術に基づくツールの1つである 3D-CAD を用いて 3 次元モデルを構築することで、複雑な作業を可視化し、設計者・現場管理者・作業者の各者の技術を計画段階から取り込むことを試みた事例について述べる。3D モデル・3D 模型及び 4D モデルは、建設生産システムの向上に資する技術として期待される。

キーワード：重力式コンクリートダム、取水塔施工、3D モデル、3D 模型、4D モデル、ICT、i-Construction

## 1. はじめに

「i-Construction」の取り組みは、ICT 技術の全面的な活用等により、建設事業の生産性向上を行うとともに魅力ある建設現場の創出を目指している。こうした生産性向上に資する技術として、近年「CIM (Construction Information Modeling/Management)」が注目されている。この CIM の取り組みは、社会インフラの計画・設計・施工・維持管理・更新等の構造物のライフサイクルにわたり、関係者間で情報を共有し、効率的な社会資本整備とインフラのストックマネジメントに貢献する新たな仕事のフレームとして着目されている。しかしながら、矢吹<sup>1)</sup>が指摘するように、現状の CIM はこのレベルには到達しておらず、建設産業に携わる技術者・研究者の手により、いずれ実現する将来像とされているのが現状である。

CIM において 3 次元モデリング技術は大きな位置を占め、このモデリングには 3D-CAD が用いられるが、従来の土木工事においては積極的な 3 次元の活用はあまりなされてこなかった。一部大規模工事・特殊工事の計画・設計部材の収まりや景観の検討等に 3D-CAD が用いられてきたにとどまってきた。

土木構造物等を 3 次元化することで、従来の 2 次元図面では確認しにくい、構造物相互の位置関係や細部の情報を視覚的に捉えることができる。3 次元化に関する技術は、近年の熟練工の減少・高齢化の中で、複雑な構造物の施工を行う際に直面する課題を補い、施工現場の生産性向上に資するシステムを提供するもの

であると考えられる。

本稿では、こうした背景のもと、重力式コンクリートダムの取水塔施設において、本設構造物及び仮設構造物の 3 次元モデルを作成し、工事の生産性向上に努めた事例について述べる。

## 2. 取水塔の概要と 3 次元化

本工事における取水塔の形状写真を写真—1に示す。2 次元図面に基づいて設計された当該設備は、複雑な鉄筋コンクリート構造（以下、RC 構造物と呼ぶ）であり、計画・設計段階では想定することが非常に難しい施工上の課題を伴うことが予め予想されていた。また、当該設備は、ダム工事としては前例の少ない張り出し長さを持つスラブ状構造物である。こうした構



写真—1 取水塔の形状写真

造の複雑性・特殊性から、実際に施工を行う際、作業者に作業の方法及び手順がうまく伝わらないことに起因する、作業遅延や手戻り等が相当量発生することが危惧されていた。さらに、取水塔の機械設備製作・据付けメーカーも加わり、こうした手戻りが発生すれば、経済性だけでなく、安全性をも損なう可能性があった。このため、取水塔の施工計画にあたり、3D-CADを用いて3次元モデル（以下、3Dモデルと呼ぶ）を作成し、再度本体構造と仮設計画の詳細について検討することとした。

当該取水施設は、コンクリートボリュームこそ比較的少ないものの、堤体から張り出した片持ちスラブのような構造形式となっており、堤体から吊支保工を設置する必要が生じる大掛かりな仮設計画になる。

特に仮設計画は、構造物出来形だけでなく、施工時の安全性や工期・コスト等に大きな影響を与えるため、策定にあたっては予め入念な準備を行った。当初設計の場所打ちコンクリート案に対し、設計変更を提案し、修正設計の一部と構造物の3次元化及び測量に携わる機会を得たので、以下記述する。

ここで作成された取水塔の3Dモデルは、後に述べるように、発注者・受注者間の円滑な合意形成を促しただけでなく、現場作業への施工内容の把握に加え、施工順序の適正化と問題点抽出や、測量管理までデータが活用される等、様々な場面で利用された。

### 3. 取水塔 3次元モデル化の手順

今回の3次元モデルの作成フローを図-1に示す。

RC構造物である取水塔は、現場打ちで計画されていたが、工程の短縮と施工性の向上を目的に、主としてプレキャスト型枠を用いることにした。プレキャスト型枠については、予め寸法や細部収まりの確認を行い、形状を決定したが、この時点から3Dモデルによる検討を行い、形状のシミュレーションを行った。取水塔付近のプレキャスト型枠の配置状況は図-2に示す通りだが、本構造物を場所打ちで実施施工することの困難さと、プレキャスト型枠を適用することの優位性を確認できたのは、3Dモデルを構築したことの効果に拠るところが大きい。プレキャスト型枠の一般図及び詳細図を作成した後は、プレキャスト部材製作メーカーと協議しながら詳細を詰めた。

その後、受注時に提供された2次元図面の配筋図・鉄筋加工図を基に配筋の3Dモデルを作成した。この3D配筋モデルについては、専用の3D配筋CADが一部で実用化されているが、本工事においては3D-CAD

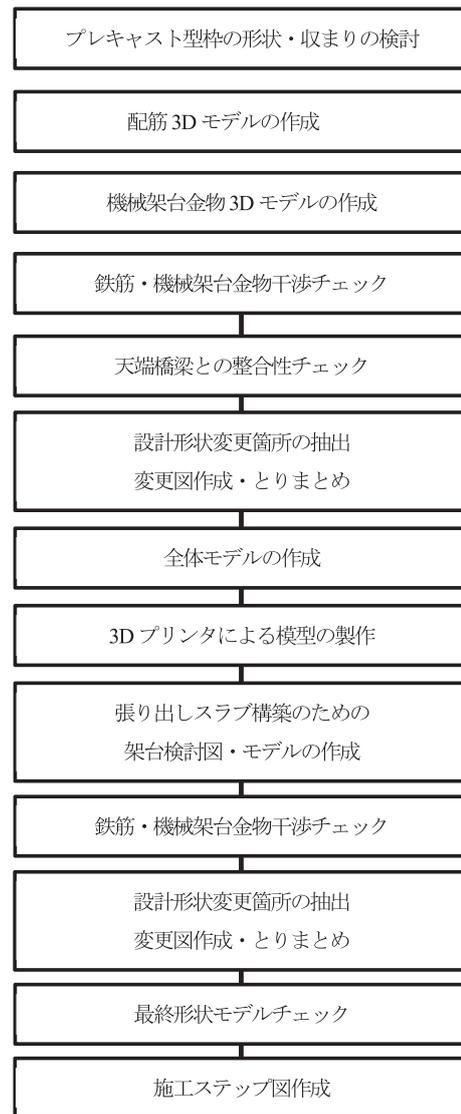


図-1 取水塔 3次元モデル作成のフロー

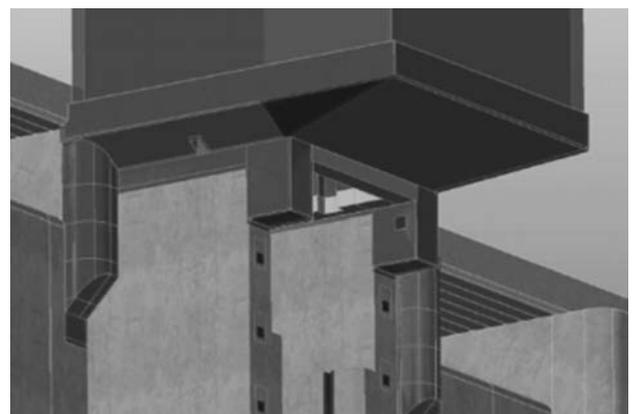


図-2 プレキャスト型枠の3D配置モデル

を用いて、鉄筋の「太さ」を持たせたモデルを作成した。

3D配筋モデル作成の過程では、2次元図面では検証が難しい配筋図の不整合を確認することができた。これにより、鉄筋加工組立時の作業の手戻りを防止することが可能になったことに加え、設計図では明確に

図示されていない複雑な加工形状も明確化でき、配筋業者への説明・指示も的確に行う事ができた。配筋図を3D化することで、配筋図に含まれている不整合箇所を検出できるメリットは、文献2)等に示されるように、土木工事においてもその有用性が認められつつある。

取水塔には、土木工事完了後に機械設備を据え付けるための架台（以下、機械架台と呼ぶ）が計画されていた。機械架台の金物は一部がコンクリート中に埋め込まれる計画となっていたため、埋め込み金物と鉄筋との取り合いが重要となった。本工事の3Dモデルにおいては、埋め込み金物のフランジ・ウェブ・ステイフナー等に及ぶまで詳細にモデル化し、鉄筋との干渉チェックを行った。

図-3は、鉄筋と機械架台の埋め込み金物間の干渉部である。主筋と配力筋の一部が埋め込み金物を立体的に貫通してしまっている。こうした干渉を2次元図面で確認することは難しく、3Dモデルを作成することで、はじめて検証が可能となる。また、この後、干渉回避シミュレーションを実施することで、配筋や機械架台の見直しだけにとどまらず、発注者や複数の施工業者間で相互に連携し、構造上・設備上の問題にまで踏み込んだ問題解決の模索を行うことが可能となった。なお、使用した3D-CADでは、離隔距離を入力することで、干渉及び離隔狭小箇所の抽出が可能であり、互いに干渉するオブジェクトどうしは半自動的に判定される。さらに、設計形状の変更箇所の抽出を行い、整理して変更図を作成した。

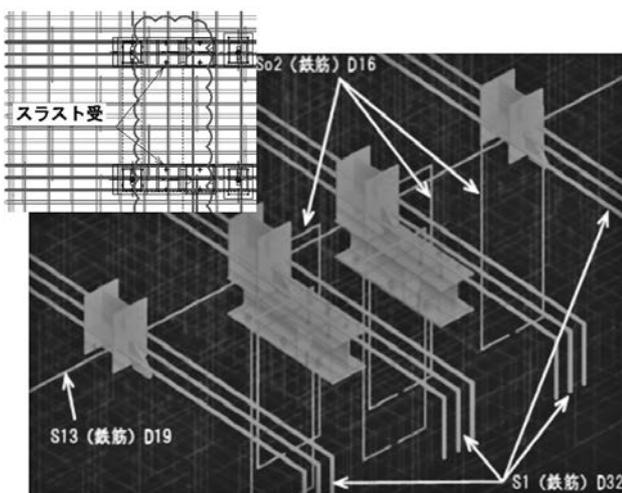


図-3 鉄筋と埋め込み金物の干渉部

加えて、3Dモデルの作成によって、プレキャスト型枠・吊ボルト・水平材・主桁が縦横に配置された形状の吊支保工が、設置方法や地組みの方法によっては

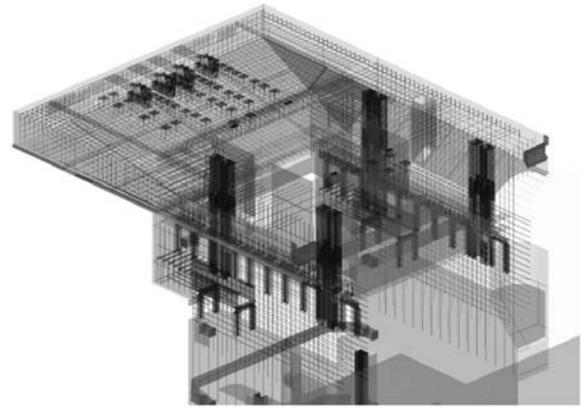


図-4 取水塔の3Dモデル

部材同士が干渉することが明らかとなった。こうしたことから、施工の際は必要に応じて、構造計算上不要な鋼材も吊用鋼材として使用した。以上のようにして作成した取水塔本体の3Dモデルが図-4である。

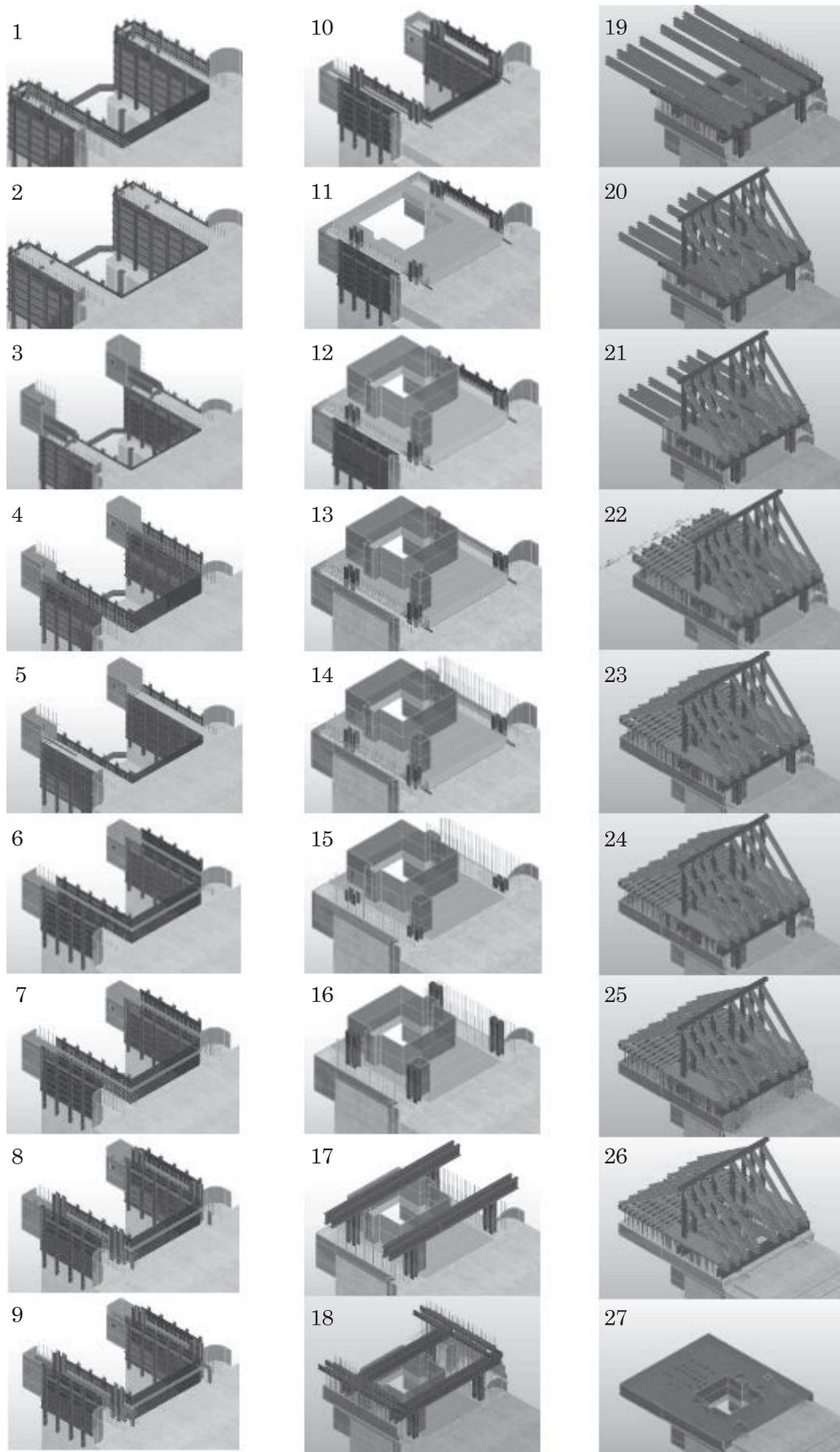
#### 4. 施工計画の策定

本工事は、高所及び狭隘な作業空間となる上、鉄筋の加工組立、型枠の設置・撤去、コンクリートの打設・養生、仮設鋼材の設置・撤去等、異なる作業を担当する協力会社がたびたび入れ替わる煩雑な現場である。そのため、3Dモデルの作成においては、上記の理由による作業の遅延及び手戻りを防止する目的で、3次元形状の表現にとどまらず、時間軸を考慮したステップ図を準備した（図-5）。

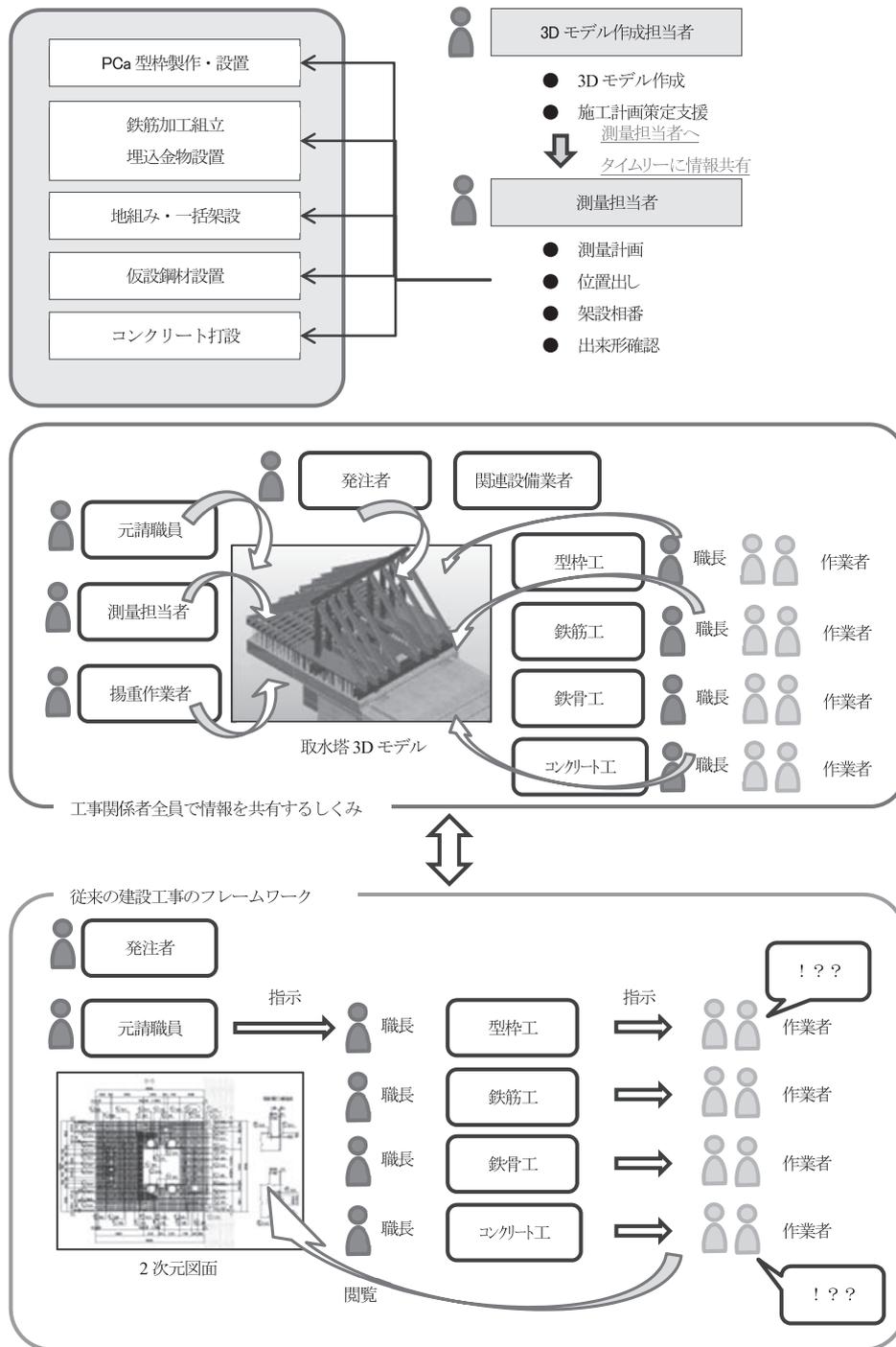
このように、時間の経過に伴って、構造物の3次元モデルがどのように変化するかを示したものは、4Dモデル<sup>1)</sup>と呼ばれている。今回、この4Dモデルを予め作成し、担当する協力業者と行う事前の周知会において活用をしながら施工上の問題点を抽出し、必要に応じて修正を加えて施工に反映させた。その結果、周知会等において、工事関係者間で情報が共有され、工事の進捗具合と次工程の把握のしやすさに寄与したほか、関係者間の施工計画への理解が深まり、現場の一体感が醸成された。また、施工計画を3次元的に視覚化したことで、結果として、施工時の安全性の確保にも繋がったと考えられる。

従来の土木工事の枠組みと比較した、本工事における3Dモデル共有の概念図を図-6に示す。作成された3Dモデルは、元請会社の職員・モデル作成担当者・測量担当者だけでなく、作業員間でも共有され、工事を円滑に進めることに寄与した。

さらに、施工計画策定支援の詳細について述べる。写真-1、図-4及び図-5に示すように、本工事に



図一5 取水塔の施工ステップ図 (4D モデル)



図一六 本工事における 3D モデル共有の概念図

おける取水塔は、堤体から張り出したスラブ状になっており、吊支保工を設ける計画となった。本工事の 3D モデル活用の特徴は、取水塔本体の形状だけでなく、仮設計画についても 3D モデルを作成し、工事関係者間で共有し、工事進捗の円滑化を図ったことにある。仮設工事部分についても 3 次元モデルを作成した事例として、文献 2) に示される取り組みがあるが、本工事では、取水塔という複雑な構造物に対し、吊支保工を用いた仮設計画にも 3D モデルを適用した点は特筆すべき事項である。

仮設構造物である吊支保工の構造及び使用部材は、予め構造解析を実施して決定された。当初計画から仮設構造を見直すこととなったため、幾度かのモデルの修正を伴うことになった。本工事における取水塔の仮設計画の 3D モデルと施工状況を図一七に示す。吊支保工（架台）は仮設鋼材で構成される傘のような形状となっている。

吊支保工は、架台の基礎となる支持杭、受桁（H-900 × 300）2 本、8 列の主桁（H-400 × 400）・垂直材・斜材、水平継材等からなる。吊支保工の垂直材及び下流



図一七 仮設工事の3Dモデルと施工状況

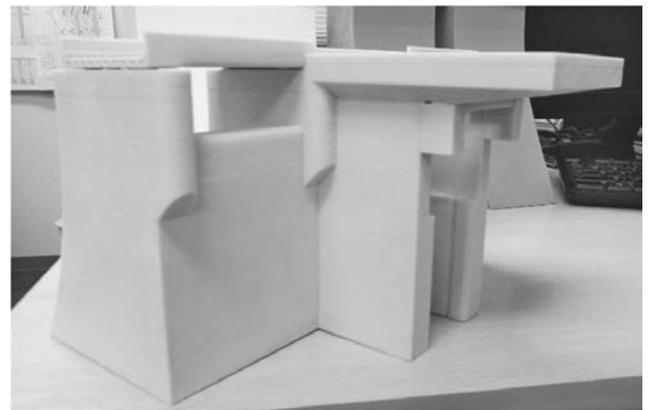
の斜材を設置した後、主桁間に短い水平材を掛け渡し、この水平材から吊ボルトにより張り出し部を支えるものである。取水塔上流側の張り出し部は、プレキャスト型枠を底型枠・側面型枠とし、鉄筋及び機械架台を併せてブロックごとに地組みを行い、クローラークレーン 350 t 吊にて、一括架設することとした。

一括架設完了後に上流側の斜材 (H-400 × 400) を取り付け、コンクリート打設に備えた。吊支保工の部材は、鋼材自重、プレキャスト型枠や鉄筋の重量、コンクリート打設時の重量により変形する。プレキャスト型枠内へのコンクリート打設は衝撃的な荷重が作用しないように細心の注意を払って行われた。吊支保工主桁の先端にシート型プリズムを貼り付け、随時高精度トータルステーションを用いて先端の変位をモニタリングした。変位計測結果は、主任技術者及び現場作業者に逐次報告し、情報共有を行い、作業時の安全性と出来形の確保に努めた。

作成した 3D モデルは、2次元の紙媒体の印刷物でも、3D PDF のような電子フォーマットでも扱えるため、専用の 3D-CAD がインストールされていないパソコンでも閲覧が可能である。本工事では、より一層合意形成への効果を高めるため、最近個人用途にも使用され始めた 3D プリンタにて、3D モデルを試行的に製作することにした。

具体的には、3D-CAD で作成した、取水塔本体の 3D モデルの CAD データを STL 形式に変換し、CJP 方式 3D プリンタにて、積層ピッチ 0.1 mm にて製作した。製作した 3D モデルを写真一 2 に示す。STL 形式のデータは、米国にて開発された 3D-CAD のフォーマットの一形式で、現在では 3D プリンタ用のデータとして広く普及している。STL データでは物体は三角形の面で構成され、三角形の頂点の座標と法線ベクトルの情報がファイルに記述されている。

3D プリンタで製作した 3D モデルは、現場事務所に



写真一 2 取水塔近傍の 3D モデル

置くことで、関係者間の合意形成に寄与した。3D モデルを囲んで入念に打合せを行い、作業者と構造物の出来上がりと施工手順のイメージを共有しながら作業を進めたことは、本工事の特色の 1 つである。当初、作業者の中には 2次元図面に不慣れなことから、作業の方法や手順をイメージすることができず、その都度、熟練労働者の指示を仰ぐ必要があると思われる者も多数いた。しかし、従来の 2次元図面に基づくのではなく、3D モデルを活用し、工事関係者全員に施工方法と施工手順の理解を促したことは、画期的なことであったと考える。

## 5. おわりに

本稿では、重力式コンクリートダムの取水塔施設について、時間軸を考慮した 4D モデルを作成するとともに 3D モデルの製作を行い、施工の円滑化に貢献した事例について述べた。本工事では、構造物本体の形状だけでなく、複雑な施工手順を可視化することで、作業者を含み、工事に携わる者全員が情報を共有することが可能となり、手戻りの防止や安全性の向上に寄与することができた。今後は、4D モデルに実施工程を

反映させ5D化を行うとともに、工程の各段階での3Dモデルの製作と活用を実施し、さらなる情報共有の実現を目指す。このような取り組みが今後の類似工事への参考となり、「i-Construction」のより一層の推進につながれば幸いである。

JCMA

《参考文献》

- 1) 矢吹信喜：CIM入門 ―建設生産システムの変革―，理工図書，2016.01.
- 2) CIM技術検討会：2015 施工CIM事例集（CIM技術検討会 平成26年度報告 巻末資料）

【筆者紹介】

深田 裕司（ふかた ゆうじ）  
 ㈱コイシ  
 工事測量部



徳永 裕樹（とくなが ゆうき）  
 ㈱コイシ  
 工事測量部



松木 優佳（まつき ゆか）  
 ㈱コイシ  
 工事測量部

