

# 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

中谷 匡志<sup>1</sup>・宇津木 慎司<sup>1</sup>

<sup>1</sup>安藤ハザマ 土木事業本部土木設計部 地質技術チーム(〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)

ダムやトンネルなど岩盤構造物の建設に際しては、計画地点における地質状況を詳細に把握し、その状況に応じて最適な設計および施工を実施することが重要となる。これに対して、近年、CIM(Construction Information Modeling /Management)と呼ばれる手法を用いた種々の検討が実施されており、想定された地質状況や実際に現地で得られた地質観察結果などを3次元モデル化し、活用することが実用化されている。本論文においては、独自に開発したトンネルやダム・明かり掘削現場を対象とした地質情報CIM管理システムについて、具体的なシステムの開発内容と施工現場における適用事例について述べる。

キーワード CIM, 3D-model, geological figure, tunnel, dam, data base

## 1. まえがき

ダムやトンネルなど岩盤構造物の建設に際しては、計画地点における地質状況を詳細に把握し、その状況に応じて最適な設計および施工を実施することが重要となる。

これに対して、調査・設計段階において、地質調査や物理探査などを実施することにより、計画地点を構成する地質の分布状況や工学的特性などを評価し、その結果をもとにダム基礎やトンネル支保などの設計が行われる。ただし、この調査・設計段階において、種々の検討にかかる費用に限度があるとともに、上述した地質調査や物理探査の精度自体に限界があるため、この段階で広範囲にわたり詳細な地質状況を把握することは困難となる。

このため、施工段階においては、実際の掘削のり面やトンネル切羽において地質状況を直接、詳細に確認し、事前に想定されていた状況と実際の状況との差異を評価する。そして、その状況によっては、逐次、追加対策工の検討など、施工計画や設計を見直すことが重要となる。

このような状況の中、近年、図-1, 2に示すようなCIM(Construction Information Modeling)と呼ばれる手法を用いた種々の検討が実施されている<sup>1), 2)</sup>。具体的には、調査・設計段階において、事前調査で想定された地質状況を3次元モデル上に表現し、地山不良部などの分布状況を詳細に確認した上で施工計画に反映するとともに、その状況に応じた具体的な対策工が設計されている。また、施工段階においては、トンネル切羽や掘削のり面における地質観察結果などを3次元モデル内に取り込むことに

より、施工実績整理の高度化や効率化を図るとともに、事前調査と実際の状況との差異の確認、その状況に応じた施工計画や設計の変更などの検討に用いられている。

本論文においては、上述した現状を踏まえ独自に開発を進めた、山岳土木現場における地質に関わる施工情報をCIMにより管理するシステムについて、具体的な内容と施工現場での適用事例について述べる。

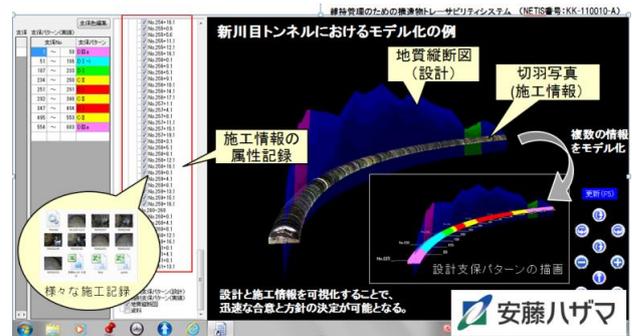


図-1 トンネル現場におけるCIM管理システムの例

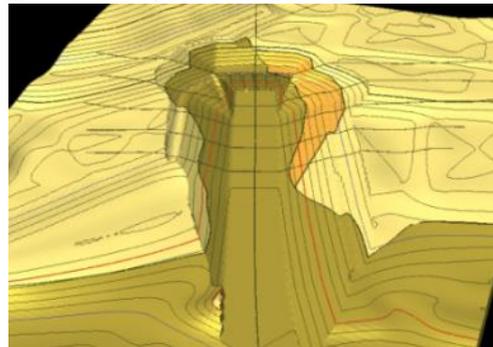


図-2 明かり掘削のり面におけるCIMの例

## 2. 施工現場における地質評価に関する課題

本章においては、既往の施工現場における地質状況の評価に関する課題について、(1)トンネル現場と(2)ダム・明かり掘削現場に分けて詳述する。

### (1) トンネル現場における地質評価に関する課題

トンネルや大規模地下空洞の地質調査は、当該地域における既往地質調査に関する文献調査に始まり、その状況や構造物の規模に応じて地表面踏査、ボーリング調査などの地質調査および地山の弾性波速度や比抵抗値測定などの物理探査が実施される。しかしながら、施工事例の多い道路や鉄道トンネルなどは、線状の構造物が広範にわたり設定されるとともに、最大数百m程度以深の地山深部に計画される場合もあるため、掘削箇所全線の地質状況を事前に詳細に把握することは、調査費用の観点、そして調査精度の観点から、非常に困難である<sup>3)</sup>。

このため、トンネル全線の設計については、図-3に示すような、比較的容易に広範の地質状況を推定できる地表面からの弾性波探査や比抵抗探査の結果をもとに、地下深部のトンネル掘削箇所における岩盤の工学的特性を推定し、支保パターンの設計および低速度帯や断層破砕帯の評価など、詳細な検討が実施される。ただし、上述したような種々の制約により、設計時に設定された支保パターンと実績との差異がある事例も多くあり、設計変更に伴う工費の増大などが課題として指摘されている。

また、近年、計画が進められている、高レベル放射性廃棄物地層処分空洞やリニア中央新幹線トンネルなどにおいては、深度300m以深の広範に計画されていることもあり、高地圧に起因する空洞の不安定化や突発湧水の発生などが想定されている。これに対しては、施工時の

安全確保とともに、恒久的な地下空洞の安定性を保持するために、空洞設置箇所の地質状況を詳細に把握した上で、その状況に応じた最適な対策を講じるなど、通常の地下構造物建設よりも高い品質が要求される。さらに、近年、公共工事における調査・設計段階から建設段階そして維持管理段階まで見越した全体工費の抑制が重要課題として指摘されており、Q(品質)、C(工費)、D(工期)、S(安全)、E(慣用)、あらゆる側面に寄与するためのより効率的かつ効果的な施工が求められている。

上述した課題に対処するためには、施工開始前において事前調査段階で推定された地質状況を把握し、その状況に応じた最適な施工計画を策定するとともに、掘削時に地質状況をより詳細に観察することにより、事前想定との差異を確実に評価し、状況に応じて最適な追加対策を講じる必要がある。これに対して、既往の地質調査結果については、図-3に示すような2次元図に整理される場合が一般的である。ただし、実際には、図-1に示すようにトンネル線形が曲線となる場合もあり、詳細な検討を実施する際には、例えば図-3中央付近に分布する断層破砕帯などについて、3次元的な分布状況を考慮した上で対策工の検討を実施する必要があると考えられる。

また、掘削時の地質状況観察の実績については、通常、一日一回、数m間隔で実施される切羽観察結果として整理される。そして、支保パターンの検討などを企業者と現地で実施する岩判定時においては、既掘削箇所は吹付工が施されているため、この切羽観察記録を参照して状況を確認するとともに、唯一、直接、地質状況を確認できる切羽のみで評価が行われる。これについては、観察記録で当該箇所における地質状況は的確に整理されているものの、掘削の進捗に伴う地質状況の変化および地質境界や断層破砕帯などの3次元的な分布を詳細に評価することは難しい。

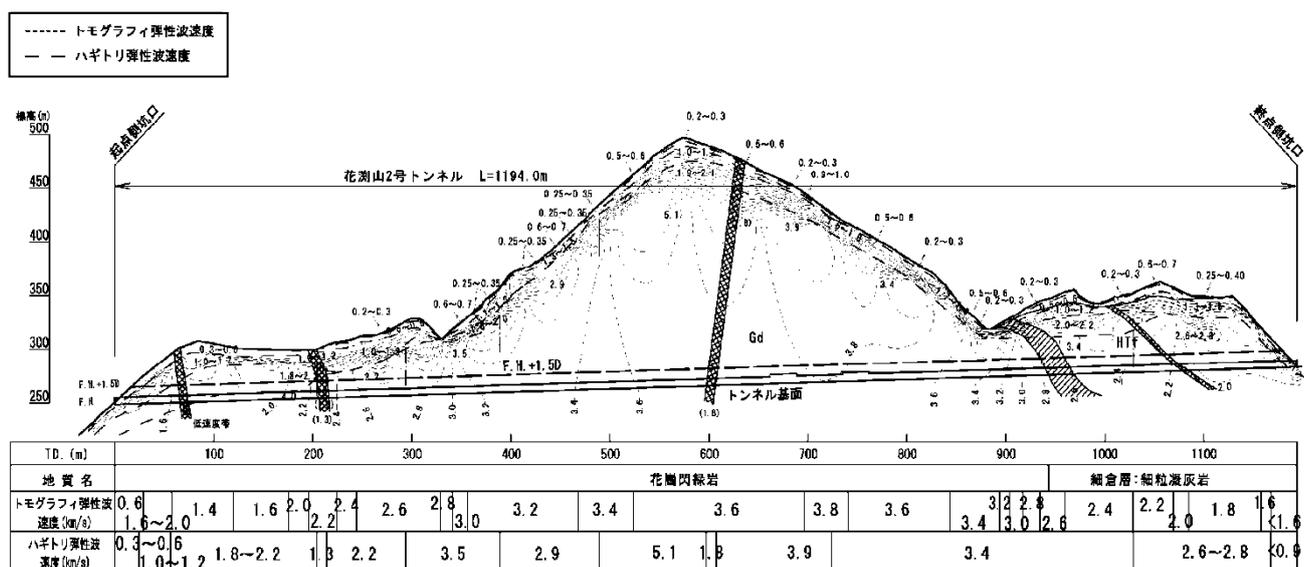


図-3 トンネル地質縦断面図の例

(2) ダム・明かり掘削現場における地質評価に関する課題

ダム建設や明かり掘削工事に際しても、トンネルと同様に、事前段階において、地質に関わる文献調査に始まり、地表面踏査やボーリング調査などの地質調査、弾性波速度測定などの物理探査および調査横坑内における原位置岩盤せん断試験などの力学的試験が実施され、ダム設置位置の検討、ダム基礎としての適性評価、掘削法面の安定性評価などが実施される<sup>4)</sup>。また、ダム建設に際しては、大量のコンクリート骨材などの堤体材料が必要となるため、堤体に近接する箇所において、所要の品質と賦存量を有する原石山の検討も並行して実施される。

特に、ダムの堤高が100mを超える場合などにおいては、調査は広範かつ詳細に実施されるが、全体のバランスを考慮する目的で、図-4に示すような15~30m程度で等間隔に設定されたグリッドの交点にボーリング孔や調査横坑などを配置する手法が用いられている<sup>4)</sup>。また、ダム基礎の設計や施工数量の算出などに用いられる図面類は、上述したボーリングなどによる地質情報が存在するグリッド沿いの数十m間隔で、上下流方向および左右岸方向の断面図が作成される。これらの図については、熟練した地質技術者が当該地点の地質構造などを考慮し、断面ごとボーリング孔間の地質状況が評価されるとともに、隣接する断面図との整合性を確認しながら大量の図面類が作成される。また、グリッド上にない任意の箇所における地質状況の評価については、地質状況を確認する手段がなく、熟練した地質技術者が隣接するグリッド上の断面図を参照しながら推定するしかなかった。

このように、ダムの調査・設計時においては、図-4に示すような地質に関わる情報を大量の2次元の平面図および縦断面図、横断面図によって整理する必要があることから、熟練した地質技術者による膨大な作業量が発生していた。また、ダム基礎評価で問題となる断層や高透水帯などの3次元的な分布が、作業を実施した地質技術者には理解されるものの、ダム基礎の設計を実施する土木技術者には分かりにくいなど、課題が多くあった。さらに、調査段階が進み新たな地質的な課題が指摘された場合などにおいては、地質技術者が新たな断面図を作成する必要があるなど、その精度とともに手間が掛かることが懸念されていた。

実際の施工時においては、堤体掘削の進捗に伴い、図-5に示す堤体基礎における実績の地質平面図が現地確認により作成され、事前に検討されたダム基礎の安定性評価に関する妥当性が検証される。上述した検討については、2次元図を用いて検討を実施できるが、堤体の安定性に大きな影響を及ぼす断層破碎帯などが分布する場合、上述した調査段階における課題と同様に、3次元的な分布状況の把握が困難となることが指摘されていた。

また、2.(1)項において指摘した事前調査の量と精度に関する限界を勘案すると、原石山の賦存量管理の高精

度化が重要となる。実際の検討に際しては、調査・設計段階において、計画された堤体体積より骨材として必要な原石量が想定され、それをもとに原石山の掘削形状が決定される。そして、実際の原石採取時には、掘削箇所における地質状況を確認し、逐次、実績に合わせ原石の賦存量を更新していくが、地質状況の想定が大きく異なる場合など、当初計画した掘削により所要の原石量が採取できない事例が報告されている。

これに対して、実際の現場管理においては、図-4に示すような複数の2次元図をもとに算出する平均断面法や、図-5に示すような3次元GISを用いた検討などが実施されている<sup>9)</sup>。ただし、これらの手法については、図-4に示すような複雑な地質状況を3次元的に表現することが困難であることから、賦存量の算定精度に5%程度誤差が生じることが確認されている。

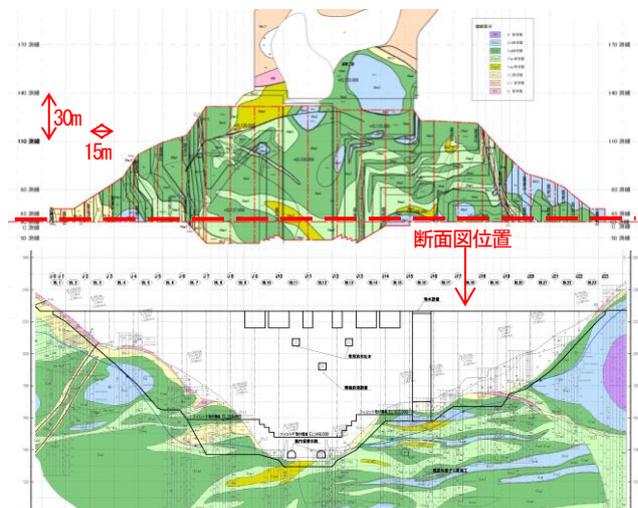


図-4 ダム基礎における地質平面図、縦断面図の例

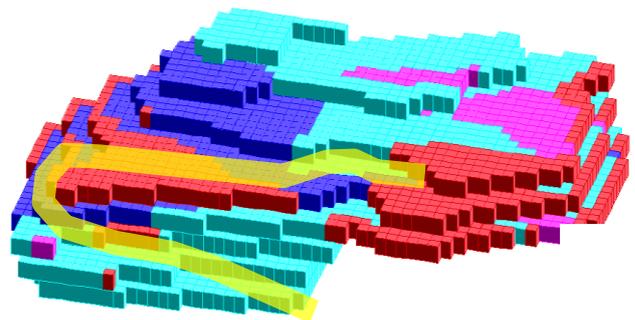


図-5 3次元GISを用いた賦存量管理モデルの例

3. 地質情報CIM管理システム開発および現場への適用

本章においては、2章で述べた既往の施工現場における課題を踏まえ、種々の検討を実施した地質情報CIM管理システムについて、(1)トンネル現場のシステムと(2)ダム・明かり掘削現場のシステムに分けて詳述する。

(1) トンネル現場CIM管理システムの開発および現場への適用

本システムは、実際のトンネル現場を題材として、現場職員のニーズを確認しながら当社独自のシステム開発を行った(図-1)。その後、13箇所のトンネル現場において適用され、それぞれの現場の状況に応じた新たな機能の追加開発を実施するとともに、NETIS(KK-110010-A)登録した。以下に、本システムの概要と現場活用事例について述べる。

a) システムの概要

システム開発は、地質関連ソフトウェア開発を専業とするジーエスアイ社に委託した。既往の3次元地質描画ソフトをベースに改良を加え、以下に示す手法でトンネル3次元モデルを構築した上で、施工時に切羽観察記録や覆工打設記録などを一元管理できるように開発した。

①施工前における地形とトンネル線形の3次元モデル構築

3次元モデルの構築に際しては、施工前、既往の2次元Cad図面からトンネル線形の座標を拾って、図-1のような3次元モデルとして表現するとともに、既往の2次元地質縦断面図と地形を所定の位置に3次元表示する。図-1に示したトンネルなど、線形が曲線を呈している場合においては、3次元図化することにより、断層などの地山不良部や小土被り部の地形とトンネル掘削部などとの関係を、より詳細に把握することができる。

②施工時における切羽観察記録および覆工打設記録の保存

施工時においては、通常、一日一回実施される切羽観察記録をExcelなど既往のファイル形式で作成し、所要のフォルダに保存することで、本システムから閲覧することができる。また、切羽写真については、今回開発した切羽形状に合わせて写真を切り抜く機能を用いて、その写真を図-6~8に示すように3次元モデル上に並べて閲覧できるようにした。

また、覆工打設結果も同様に、打設ブロックごとにモデルを区間割し、モデルの3次元的位置をクリックすると当該箇所のコンクリート打設時の記録を閲覧できる仕組みになっている。

b) 施工現場における活用事例

①地質状況前方予測

図-6に示すように、空洞の安定性に影響を及ぼす断層や地層境界などが分布するトンネルにおいて、事前調査で得られた情報と、既掘削部の観察により得られた情報を併せて3次元的に図示することにより、今後掘削する箇所における状況を推定することが、2次元図よりも詳細に実施できた。

②岩判定時における地質状況評価

トンネル掘削時には、設計において支保パターンが変更になる位置まで掘削が完了した時点や、事前に想定された地質状況と実際の状況との差異が大きい場合などに

おいて、岩判定と呼ばれる企業者の立会いがある。その際、現場では、切羽以外の既掘削部には吹付が施されているため、地質状況を直接確認できるのは切羽のみとなる。これに対して、既往の現場においては、既掘削部の状況を大量の切羽観察記録などによって確認していたが、図-7に示すように、切羽写真を3次元的に配置することにより、既掘削部の地質状況を俯瞰できるため、トンネル掘削の進捗に伴う地質状況の変化を確実に把握し、最適な支保パターンを選定できる。

③竣工後の支保パターン妥当性検討

1章で詳述したように、トンネルにおいては事前の調査で得られる地質情報の量や精度に限界があるため、設計時に設定された支保パターンと実績とが異なる事例が多い。これに対して、竣工検査時などにおいて、図-8に示すような、切羽写真3次元モデル上に支保パターンの設計と実績を同時に示すことにより、設計と実績が異なる箇所において、当該箇所の地質状況を3次元的に俯瞰して確認し、その妥当性を検証できる。

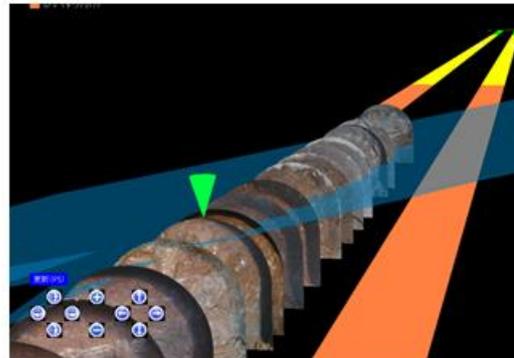


図-6 岩判定時における地質評価

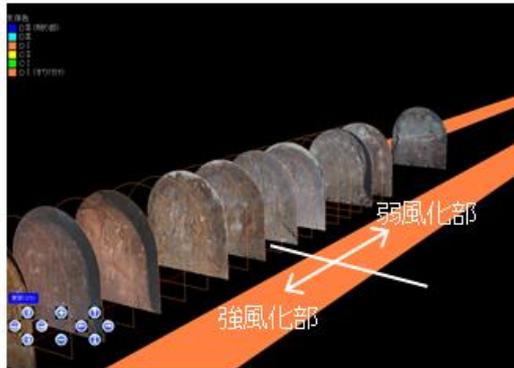


図-7 支保パターン妥当性検討

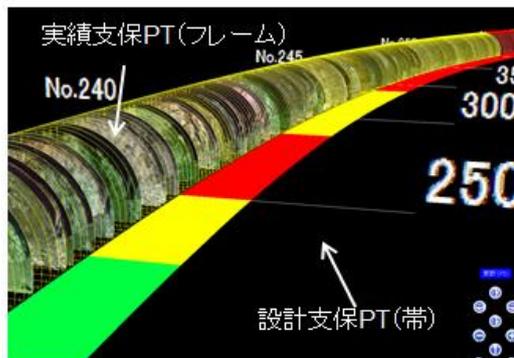


図-8 支保パターン妥当性検討

(2) ダム・明かり掘削現場CIM管理システムの開発および現場への適用

ダム現場および明かり掘削現場におけるシステムの開発については、掘削法面における地質状況3次元モデルの構築を実施できるものにするとともに、そのモデルを活用して地質区分ごとの掘削体積を精度よく算出できるようにした<sup>9)</sup>。以下に、本システムの特徴を列挙する。

a) システムの概要

システムの構築に際しては、地質関連のソフト会社であるジーエスアイ社製の「Geomap3D」という、従来は地質の事象を3次元図化する目的で開発されたソフトを活用した。当該システムにおいては、検討地点の既往設計書に掲載されている、図-9に示すような、複数のボーリング孔を包括した位置における推定地質断面図や、任意の位置におけるボーリング孔の地質状況を基本情報とし、地層の走向・傾斜などの情報などを考慮しながら、断面図間の地質分布状況をより精度よく評価した図-10のような3次元モデルを自動的に構築できる。そして施工時において、掘削の進捗に伴い直接、掘削盤やのり面で得られる地質情報をもとに、モデルを逐次更新することにより、その精度をより高めることが可能となる。また、このように構築された3次元モデルにおいて、地質区分ごとの体積が容易に精度よく算出することができるとともに、任意の位置における地質縦断面図、横断面図、スライス図などを作成することが可能となった。

b) 施工現場における活用事例

①掘削のり面の地質状況事前評価および安定性検討

図-10に示すような、地すべりの分布するトンネル坑口部の掘削のり面において、事前調査段階で掘削のり面に分布する地質状況を3次元モデルにおいて推定し、それをもとに安定計算を実施した事例について詳述する。

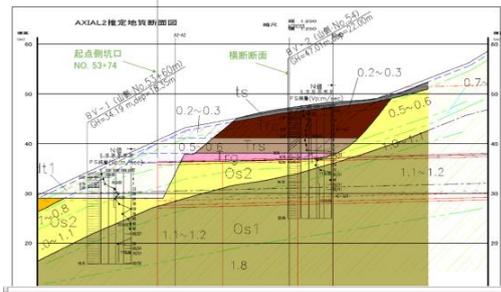


図-9 既往の地質縦断面図例

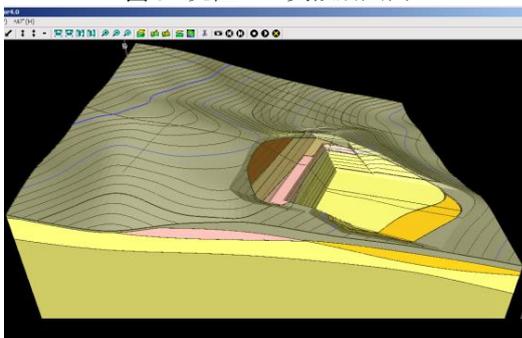


図-10 掘削のり面CIM表示例

当該地点においては、図-10に示すように、1期線海側トンネルに鉛直ボーリングが2本、今回検討した2期線山側トンネルに鉛直ボーリングが2本設定されており、トンネル軸方向における縦断面図がそれぞれのトンネルで作成されていた。そして、新たに掘削する山側トンネルの坑口掘削のり面における安定性の検討は、図-9に示すトンネル軸における断面図を基に作成された2次元モデルを用いて、種々の安定計算などが実施されていた。

既往の掘削のり面における安定性評価および具体的な対策工の設計については、このように、ボーリングを実施するトンネル軸上の断面図、もしくは最もりの高くなる断面において実施される事例が多い。これは、既往の2次元図を用いた検討では、任意の箇所における断面図を多数作成することが困難なため、上述した施工上の条件、制約をもとに代表断面が決定され、その断面の地質図を作成し安定検討が実施される。この場合、例えば、当該地点のように地すべりが分布するのり面で検討を実施する際などでは、最も不安定になる地すべりの層厚が最も厚い断面はトンネル軸上であるとは限らないため、検討を実施する際には十分、留意する必要がある。

これに対して、本システムにおいては、複数の鉛直ボーリング孔の地質情報と、2つのトンネル軸上の断面図の地質情報を勘案し、その図面間やボーリング間の地質状況を推定した3次元地質モデルを構築できる。この地質モデルに掘削形状を反映させた図面を図-11に示す。

これをみると、赤色と黄色で示した基盤岩と上部不安定土塊とである段丘層との境界が海側から山側へ左上りの傾斜を呈していることがわかる。そして、追加横ボーリング孔を実施した際、現地確認された実際の地質状況についても、写真-1, 2に示すように、モデルと同様の位置と傾斜角で地質境界が認められた。

これにより、事前検討時において、最もりの面が不安定となるすべり土塊の層厚が最も大きくなる断面を特定するとともに、その位置で自動的に検討断面図を作成することが可能となる。また、掘削時においては、実際に確認された地質状況をもとに3次元モデルを修正することで、施工実績をまとめる地質図として適用できるとともに、地質区分ごとの掘削体積の算出など、施工数量を精度よく把握することができる。

②堤体材料の賦存量管理

既往のダムにおける検討の際には、図-4に示したような25~50m間隔で作成される地質縦断面図をもとに、平均断面法を用いて堤体材料となる所要の品質<sup>9)</sup>を有する母岩の賦存量が算出される。また、弊社施工のダム現場や大規模造成現場などにおいては、図-5に示すような3次元GISモデルを用いた管理が実施されており、図-4に示したような地質断面図などをもとに数m大の直方体で3次元モデルを構築し、賦存量を算定していた。

これらの既往の手法については、比較的簡便に賦存量管理を実施できる利点を有しているものの、2.(2)項で

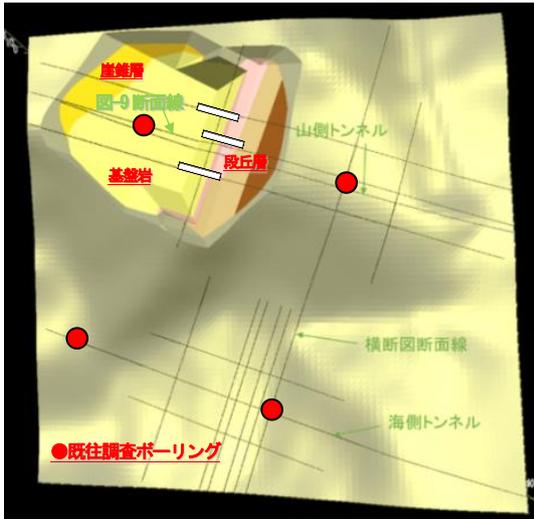


図-10 検討を実施した掘削のり面調査位置平面図

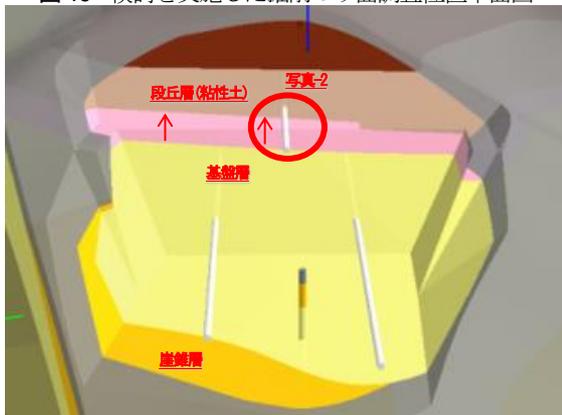


図-11 坑口掘削のり面CIMの例



写真-1 坑口掘削のり面全景



写真-2 坑口掘削のり面近景

示したように、実際の現場における採取実績と机上の検討数量の差異がやや大きい事例などが報告されていた。これに対して、当該システムにおいては、3. (2)a)項で

上述したように、複数の断面図やボーリングなどから得られる地質の分布状況と地層の走向・傾斜などの情報などを考慮し、図-12に示すような、複雑な分布状況を呈する地質状況をより精度よく表現した3次元モデルを構築できる。そして施工時において、掘削に伴い掘削盤や法面で直接得られる地質情報をもとにモデルを逐次更新することにより、その精度をより高めることが可能となる。また、このように構築された3次元モデルにおいて、材質区分ごとの体積を容易に精度よく算出することができる。また、任意の地質縦断面図、横断面図、スライス図などを作成することができる。

図-12に示すダム現場の堤体材料採取掘削のり面においては、複数の事前調査2次元地質図をもとに3次元モデルを構築し、堤体材料の賦存量を推定した。そして、堤体施工時においては、現地で実際の掘削箇所における地質状況を確認し3次元モデルを逐次更新することにより、賦存量算出精度を、図-5の3次元GISと比較して5%、平均断面法と比較して1.5%、高めることができた<sup>9)</sup>。

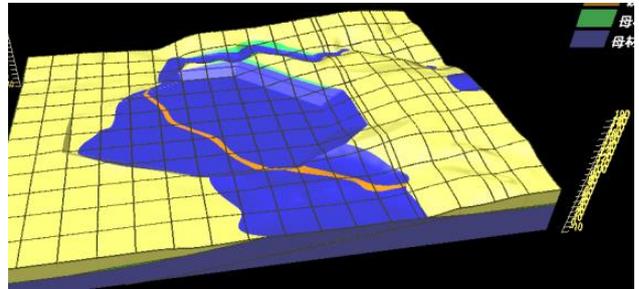


図-12 ダム母材賦存量管理システム

#### 4. あとがき

本論文においては、トンネルとダム・明かり掘削現場における地質情報CIM管理システムに関わる開発内容および現場における適用事例について詳述した。今後、本システムの適用事例を増やしていくとともに、新たな現場の要望に即した改良を進めていく所存である。これにより、調査時に得られる情報の量や精度に限界がある施工箇所の地質状況について、施工計画策定時における地質状況評価、施工時における実際の地質状況整理などの高度化を図ることができるとともに、竣工から維持更新時における地質情報のデータベースとしても適用できる有用なシステムとして、広く施工現場に展開していきたいと考えている。

##### 参考文献

- 1) 土木学会：CIM講演会 2014(東京)講演集, 2014
- 2) 家入龍太：CIMが2時間でわかる本, 日経BP社, 2014
- 3) 土木学会：トンネルの地質調査と岩盤計測, pp. 1, 1983
- 4) 土木学会：ダムの地質調査, pp. 2, 1986
- 5) 宇津木慎司, 中谷匡志, 藤井環希：ダム堤体材料の原石採取における賦存量 CIM 管理システムの構築, 土木情報学年次講演会, 2014
- 6) 日本規格協会：コンクリート用砕石及び細砂, JIS-A5005, 2009