

3次元地質解析システムの構築と現場適用

Construction and Field Application of 3D Geological Analysis System

高馬 崇*¹ 山田 浩幸*² 福井 正規*³
Takashi Koma Hiroyuki Yamada Masaki Fukui

要旨

CIMにおける3次元地質モデルを基本とした、3次元地質解析システムの構築を行った。

本システムでは、まず施工前に事前地質調査結果などの地質情報を解析・整理して3次元地質モデルを作成する。次に、施工中に現場にて取得するトンネル切羽や切土のり面の地質観察・追加地質調査などで得た地質情報を追加して3次元地質モデルを修正するものである。これにより、地質構造を可視化して地山の地質分布を正確に把握することができる。また、わかりやすい地質情報の提供、施工関係者間の情報共有、未掘削部分の地質予測などもシステム構築の主な目的としている。

本稿では、3次元地質解析システムの概要と現場への適用事例について報告する。

キーワード：3次元地質モデル 地質構造の可視化 CIM

1. はじめに

山岳トンネルや切土のり面をはじめとする岩盤構造物の施工段階において、事前地質調査に基づいて想定された地質構造と大きく異なる地質が分布する状況に遭遇し、崩落や崩壊、岩盤構造物の変状等の事象が発生する場合がある。この場合、事象発生後に応急対策工や補助工法の検討・施工することになり、結果として工程・工費に多大な影響をおよぼすとともに、施工上の安全性や品質の低下の原因につながる可能性がある。ゆえに、地山の地質構造をより正確に事前に把握し、地山状況に適合した岩盤構造物を構築することが重要となる。

しかし、地質縦断面図や地質平面図など2次元の地質情報

から、3次元的広がりを持つ地質構造を把握し、未掘削部分の地質状況を的確に推定することは非常に困難である。そこで、地質工学の分野では、2次元の地質情報を解析・整理し、地盤やトンネル内部の地質構造を3次元的に鳥瞰して表示する図1のような手法を従来から利用している。この手法では3次元の地形・地質構造やトンネルなどの構造物との位置関係を視覚的にわかりやすく表現している反面、地質技術者の解析作業の他に図面作成に対して多くの時間と労力が必要であること、一方向からの鳥瞰表示のみであることなどの欠点がある。

一方、国土交通省が推進しているCIM (Construction Information Modeling/Management) は、ICT (情報通信技術) ツールと3次元モデルを導入・活用し、建設事業全体にわたる関係者間で情報を共有することにより、一連の建設生産システムの効率化・高度化と、事業全体の生産性向上を図ろうとする取組みである。具体的には、調査/設計・施工・維持管理の各段階で取得された地質情報や設計・施工情報などの各種情報を、3D-CADなどを利用して作成した3次元モデルに付加・連携させるものである。

CIMにおける3次元モデルのうち、地質構造を可視化して、地山の地質分布を把握しやすい3次元地質モデルを作成・活用し、次に示す目的で3次元地質解析システムを構築した。

- ① 安全かつ効率的な施工を実現するためのわかりやすい地質情報の提供
- ② 発注者・施工者・地質技術者などの施工関係者間における3次元モデルを介した情報共有

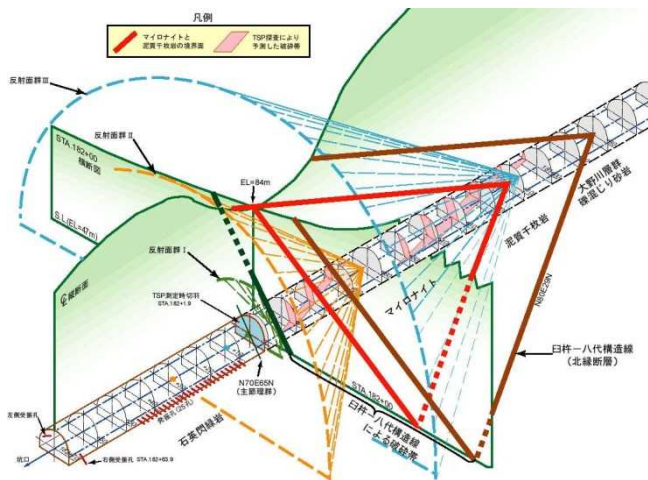


図1 地質構造の3次元表示例

*1 技術研究所 *2 大阪本店 土木部 *3 技術統括本部 土木技術部

③ 施工時に追加取得する地質情報に基づく3次元モデルの修正による、未掘削部分の地質構造の事前予測
 本稿では3次元地質解析システムの概要と、本システムを実際のトンネル現場に適用してトンネル切羽前方の地質予測を実施した事例について報告する。

2. 3次元地質解析システム

2.1 使用ソフトウェア

3次元地質解析システムにおいて、3次元モデルの作成や修正は、土木系3D-CADソフトであるAutodesk社製「AutoCAD Civil 3D」(以下、Civil 3D)と、Civil 3DのアドオンソフトであるCTC社製「GEORAMA for Civil 3D」(以下、GEORAMA)を使用した。

2.2 3次元地質解析システムの運用手順

図2に、3次元地質解析システムの運用フローを示す。3次元地質解析システムでは、大きく分けて掘削開始前と掘削施工中の2つの作業段階がある。

掘削開始前の段階では、発注時の設計図書である図面や報告書の中から地質・地形・構造物の各情報を収集・解析し、地形モデル・構造物モデル・地質モデルを作成する。これらの各モデルを統合して地質解析のベースとなる3次

元モデル(以下、3次元初期モデル)を作成する。

掘削施工中の段階では、地質観察結果、画像情報あるいは追加の地質調査などの現場で取得した地質情報を地質技術者による解析を行い、3次元初期モデルに反映して地質モデルを修正し、未掘削部分の地質予測結果を現場にフィードバックする。

以下にそれぞれの段階における地質モデル作成・修正の詳細や地質解析の内容について詳述する。

2.2.1 地形モデル・構造物モデルの作成

掘削開始前の段階における、地形モデルや構造物モデルの作成は、設計図書の平面図や標準断面図などの情報に基づいてデータの入力や編集を行い、Civil 3Dの機能を用いてモデルの作成を実施する。図3にトンネル工事における地形モデルと構造物モデルの作成手順の例を示す。

地形モデルの作成では、2次元の情報である平面図などの等高線に高さの情報を与えて3次元化し、モデリングしている。このほかに、等高線の情報に代えて、国土院発行の数値地図5mメッシュ(標高)や測量業界標準フォーマットであるSIMAファイル形式などの点データを用いても、地形モデルが作成可能である。

構造物モデルの作成では、標準断面図から構造物断面の外形線を抜き出して断面部品(以下、アセンブリ)を作成する。次に、平面図上の平面線形と縦断面図上の縦断線形の線形情報に基づいて3次元の線形を作成する。この3次元の線形上にアセンブリを統合し、構造物断面の外形線が連続的に描画されたモデル(以下、コリドーモデル)を作成する。このコリドーモデルが簡易版の構造物モデルとなる。

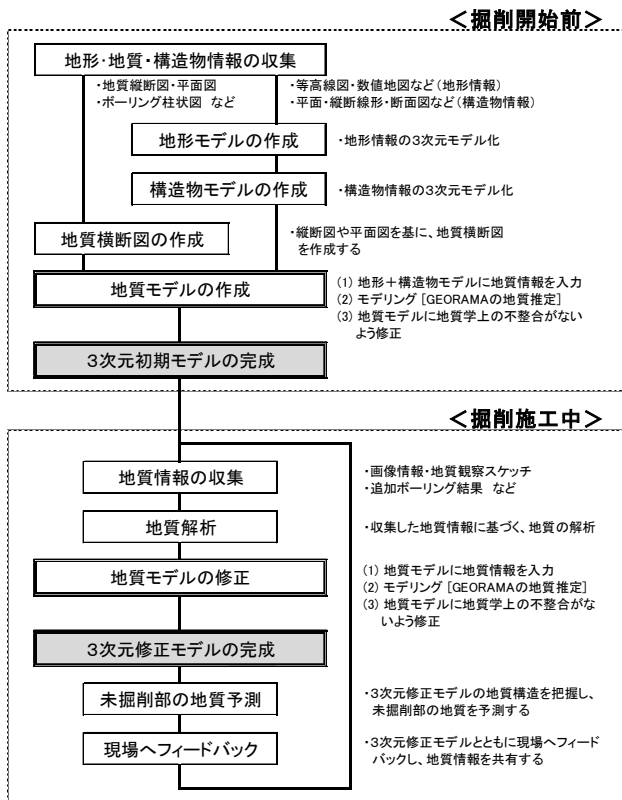


図2 3次元地質解析システムのフロー

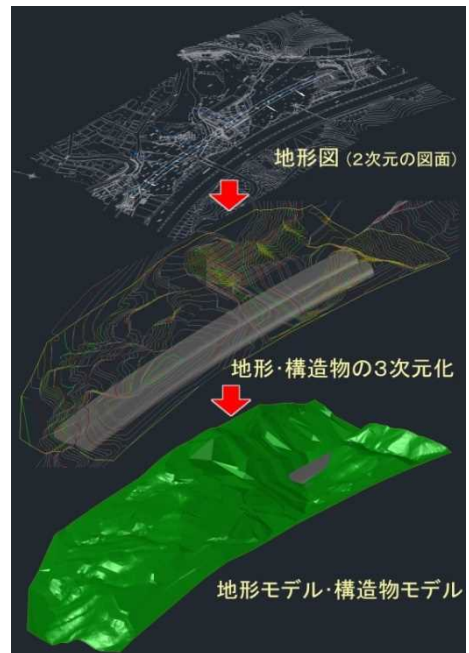


図3 地形モデル・構造物モデル(トンネル)の作成手順

2.2.2 地質モデルの作成

掘削開始前の段階においては、設計図書のうち図面類や各種報告書の中から地質情報を抽出・整理した後、データの入力や編集を行い、地質モデルの作成を行う。

地質モデルの作成に必要な主な地質情報は、ボーリングデータ（柱状図）、地質縦断面図、地質平面図などである。これらの地質情報は、構造物の設計に供するデータであるため、構造物の線形に沿って存在することが多く、線形と直行する横断方向の地質分布が記載された地質情報は不足しがちである。そこで、3次元的な広がりを持つ地質構造をより正確に可視化するため、地質縦断面図や地質平面図から地質図学的手法を用いて数か所の地質横断面を作成し、追加の地質情報として入力を行うことが必要になる。図4に入力した地質情報を3次元的に表示した例を示す。

作成した地質モデルにおいて、可視化された地質構造の確認を行う。想定した地質構造と地質モデルとの間に地質学上の不整合がある場合には、地質横断面などの地質情報



図4 入力データの3次元表示例（八幡トンネル）

を追加して地質モデルの修正を行い、地形モデル、構造物モデルと統合して3次元初期モデルを完成させる。図5に3次元初期モデルの例を示す。

2.2.3 地質解析

山岳トンネルや切土のり面などの掘削施工中においては、トンネル切羽や切土掘削面の地質観察が実施され、掘削面の画像や地質観察スケッチなどによる地質情報の記録が行われる。これらの現場で取得される地質情報を用いて、以下のような地質解析を行う。

- ・ 掘削面の岩種や地質分布の特定
- ・ 断層などの不連続面の抽出、方向性（走向・傾斜）の特定
- ・ 既掘削部の地質の連続性の把握（地質展開図等の作成）
- ・ 採取試料の分析・試験に基づく岩石種・物性値の把握

2.2.4 地質モデルの修正

図6および図7に、山岳トンネルを対象として以下の地質解析手順に基づいて3次元初期モデルを修正した例と、その結果得られた3次元修正モデルを示す。

- ① 地質解析（トンネル切羽画像から不連続面を抽出）
- ② 地質解析を実施した断面の地質横断面図を作成
- ③ 地質横断面図の地質と地質モデル内の地質構造と相違がないか比較し、地質モデルの地質境界線を修正する
- ④ 地質境界線を修正した結果を地質モデルに入力
- ⑤ 地質モデルの再推定を実施（3次元修正モデルの完成）

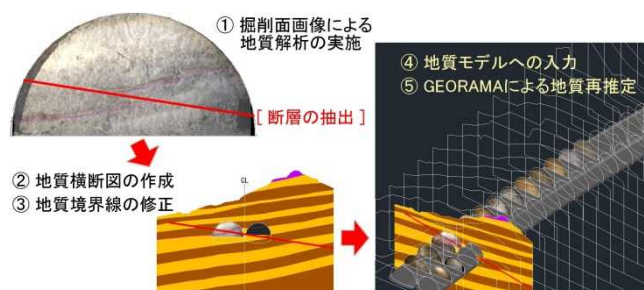


図6 地質解析に基づく地質モデルの修正

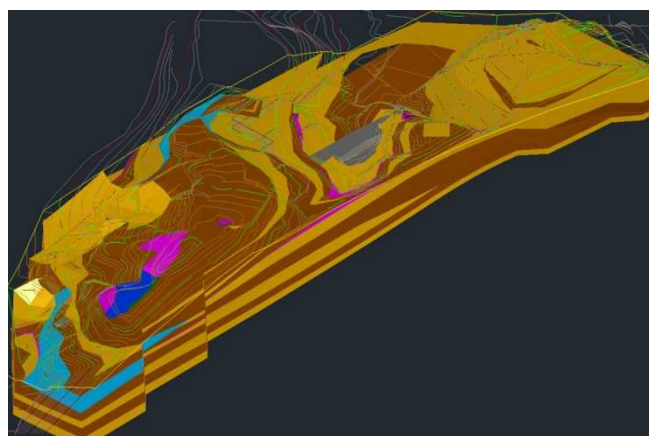


図5 3次元初期モデル（八幡トンネル）

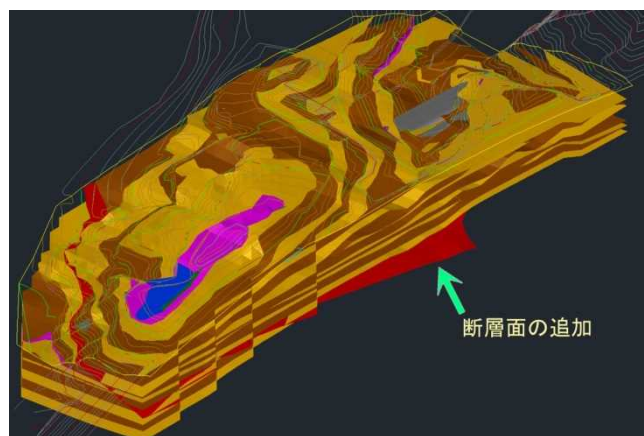


図7 3次元修正モデル（八幡トンネル）

3. 現場への適用事例

3次元地質解析システムに、現場の地質・地形・構造物のデータを適用して、3次元地質モデルの作成と地質解析、未掘削部の地質予測を実施し、現場における情報化施工に活用した。八幡トンネルと椿根第3トンネルへ3次元地質解析システムを適用した事例について、以下に紹介する。

3.1 八幡トンネル¹⁾

3.1.1 工事概要

八幡トンネルは一般国道176号名塩道路事業のうち、先行して整備を進めた第一工区に位置する上下線2本(4車線)の道路トンネルである。当トンネルは、住宅密集地が近接し、超近接メガネトンネル(上下線の離隔が約1m)、全区間小土被り(最大土被り22m)という数々の制約された条件下での工事であった。トンネルの掘削では近接した上下線のトンネルを構築するため、断面の大きな下り線を先進し、切羽の離隔を100m確保して断面の小さな上り線を併進して施工した。表1に工事概要を示す。

3.1.2 地質概要

当該地域の分布地質は、新生代古第三紀(始新世～漸新

世)神戸層群の砂岩、礫岩、泥岩、凝灰岩であり、これら岩層が互層状を呈している。図8に地質平面図と地質縦断面図を示す。トンネル内に出現した主な地質は細礫岩を含む砂岩と礫岩で、人頭大から直径2m程度の硬質な玉石(巨礫)を含む岩層が多く存在した。層理面はENE-WSWの走向と8~10°NNWの傾斜を示し、切羽においては流れ盤を呈していた。写真1に上り線の切羽状況を示す。

3.1.3 3次元初期モデルの作成

図8に示した地質平面図、地質縦断面図と事前地質調査のボーリングデータ、これらの地質情報をもとに新たに作成した地質横断面などのデータを入力して、3次元初期モデルを作成した。入力した地質情報の3次元表示例を2章の図4に、3次元初期モデルを2章の図5にそれぞれ示した。

3.1.4 地質解析に基づくモデルの修正

切羽画像と切羽観察記録に加えて、地質技術者による定期的な切羽地質調査を実施し、取得した地質情報を用いて地質解析を行った。

下り線掘削時の切羽において、3次元初期モデルには存在しない断層が連続的に出現した。そのため、地質解析に基づいて地質構造の見直しを行い、地質モデルの修正を実施した(図6~7)。

表1 工事概要(八幡トンネル)

工事名称	名塩道路 八幡トンネル工事
発注者	国土交通省 近畿地方整備局
施工者	株式会社鴻池組
工事場所	兵庫県西宮市塩瀬町名塩
工期	平成25年2月~平成27年6月
工事内容	<ul style="list-style-type: none"> ・工事延長:288m ・トンネル延長:242m ・道路トンネル(機械掘削) ・NATM、上半先進ベンチカット工法 掘削断面積:上り線:87㎡・下り線:117㎡ ・超近接無導坑メガネトンネル

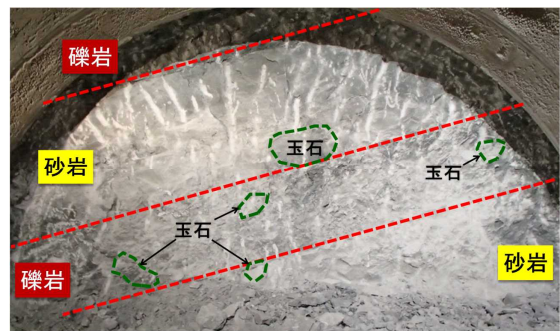


写真1 切羽状況(八幡トンネル上り線)

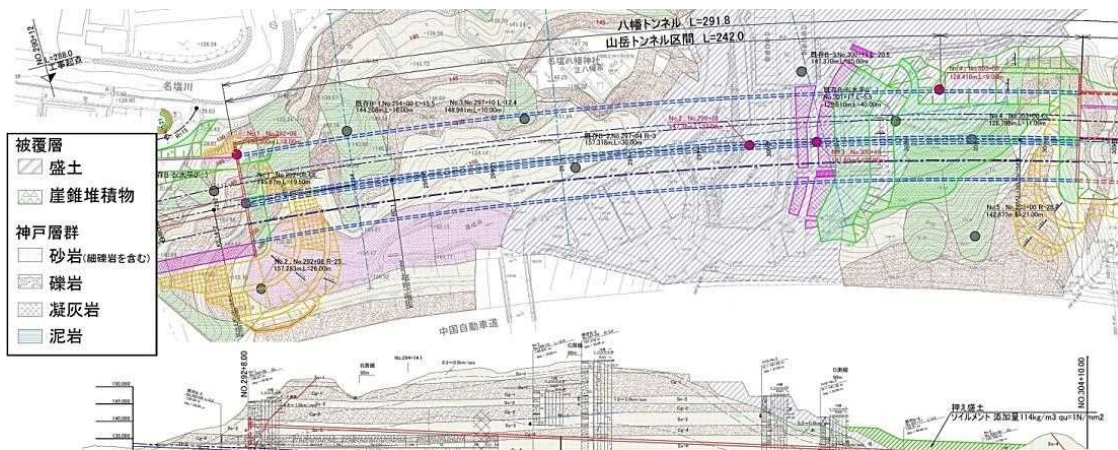


図8 八幡トンネルの地質平面図・地質縦断面図

3.1.5 3次元モデルの活用

先進する下り線の地質解析に基づいて地質モデルを修正し、下り線の切羽前方の地質予測だけでなく、上り線の未掘削部の地質予測に活用した。実際の施工では、天端に礫岩層が分布する場合に、肌落ちや小崩落が発生しやすい状況となった。そのため、天端安定対策として補助工法を採用するにあたり、その適用範囲の判断材料として、3次元修正モデルによる地質予測を活用した。

さらに、先進する下り線の掘削切羽において、設計図書では存在しなかった存置された既設排水管が出現した。上下線間のゆるみ防止対策工策定のため、図9に示すように3次元モデル上に既設排水管のモデルを追加し、上り線における出現位置の特定を行った。

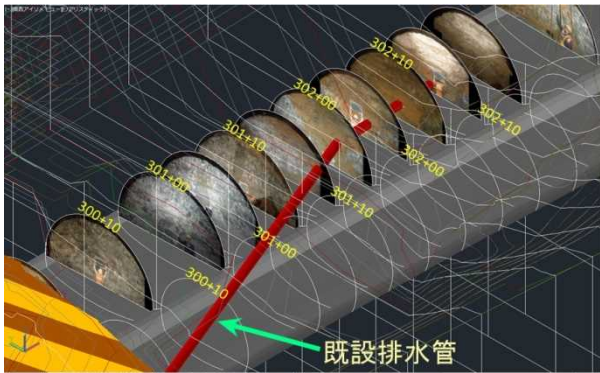


図9 排水管の出現位置予測

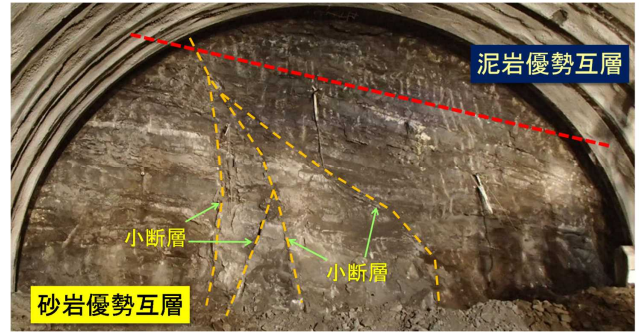


写真2 切羽状況 (楕根第3トンネル)

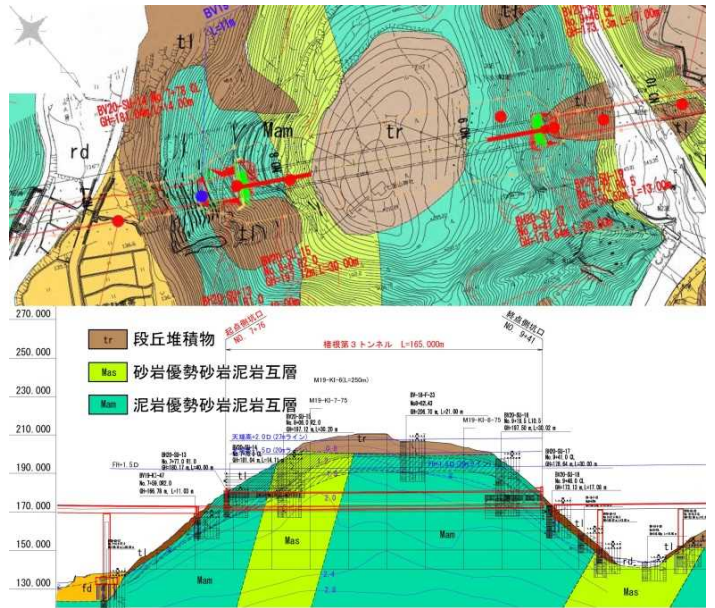


図10 楕根第3トンネルの地質平面図・地質縦断図

3.2 楕根第3トンネル²⁾

3.2.1 工事概要

楕根第3トンネルは、静岡県静岡市から長野県佐久市に至る中部横断自動車道を構成する道路トンネルである。トンネル直上には高压鉄塔や神社などの既設構造物があり、特に高压鉄塔については、工事に伴う基礎の変位に対して厳しい管理を求められた。表2に工事概要を示す。

3.2.2 地質概要

当該地域の分布地質は、新生代新第三紀(中新世)富士川層群見延累層の砂岩泥岩互層である。図10に地質平面図と地質縦断図を、写真2に切羽状況をそれぞれ示す。

表2 工事概要 (楕根第3トンネル)

工事名称	中部横断 楕根第3トンネル工事
発注者	国土交通省 関東地方整備局
施工者	株式会社鴻池組
工事場所	山梨県南巨摩郡南部町楕根
工期	平成26年1月～平成29年3月
工事内容	・工事延長:166m ・トンネル延長:160m ・道路トンネル(機械掘削) NATM、上半先進ベンチカット工法 掘削断面積: 101㎡

当該地域に分布する砂岩泥岩互層中の泥岩およびシルト岩について、トンネルへの偏圧発生原因となる膨潤性粘土鉱物のスメクタイトを含有するとともに、スレーキング性を有していることが地質調査結果から明らかとなっていた。

そのため、掘削開始当初から掘削に伴う地山のゆるみを防止し、既設構造物の沈下やトンネルの変位・変状を最小限にとどめるあらゆる対策を講じながらの施工となった。

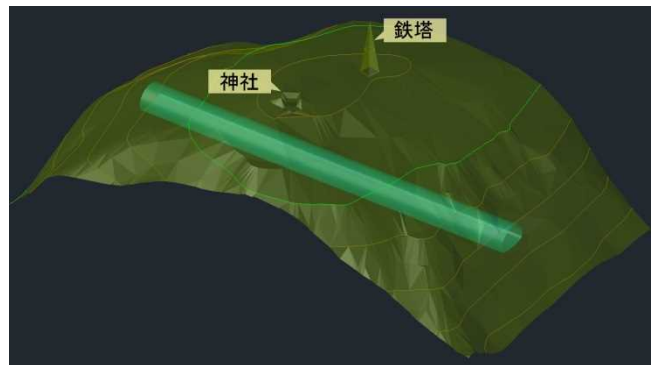


図11 地形・構造物モデル (楕根第3トンネル)

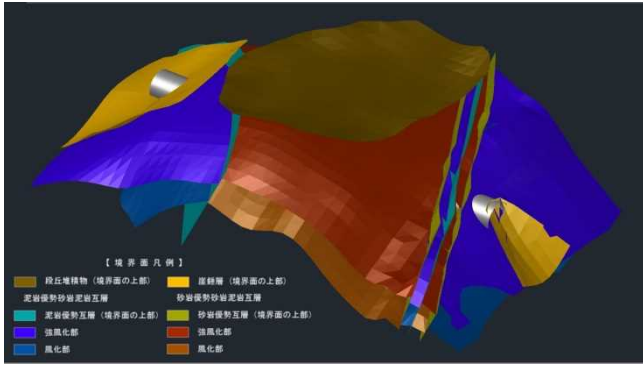


図 12 3次元初期モデル（楕根第3トンネル）

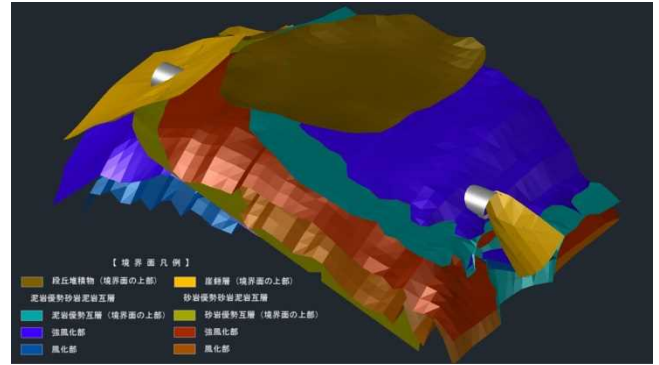


図 14 3次元修正モデル（楕根第3トンネル）

3.2.3 3次元初期モデルの作成

設計図書から地形情報と構造物情報を抽出し、既設構造物を追加して地形・構造物モデル（図 11）を作成した。

この地形・構造物モデルに対して、図 10 に示した地質平面図・地質縦断図と事前地質調査のボーリングデータ、これらの地質情報を基に作成した地質横断図などのデータを入力して、図 12 に示すような3次元初期モデルを作成した。

3.2.4 地質解析に基づくモデルの修正

事前地質調査結果から、砂岩泥岩互層の走向・傾斜は N-S, 70~80E を示す高角度傾斜の受け盤構造と考えられていた（図 13(1)）。しかし、地質解析の結果、分布する岩層の走向・傾斜は N-S, 20~30W の低角度傾斜の流れ盤が卓越していた（図 13(2)）。そこで地質構造を見直して地質モデルを修正し、図 14 に示す 3次元修正モデルを作成した。

3.2.5 3次元モデルの活用

砂岩泥岩互層中の泥岩層は破砕作用を受け非常に脆弱な状態であり、崩落や崩壊の危険性があった。そのため、本 3次元修正モデルによる地質予測を活用して脆弱な泥岩層の分布範囲を把握し、天端や切羽の安定と地山改良を目的とした補助工法の設計検討を実施した。

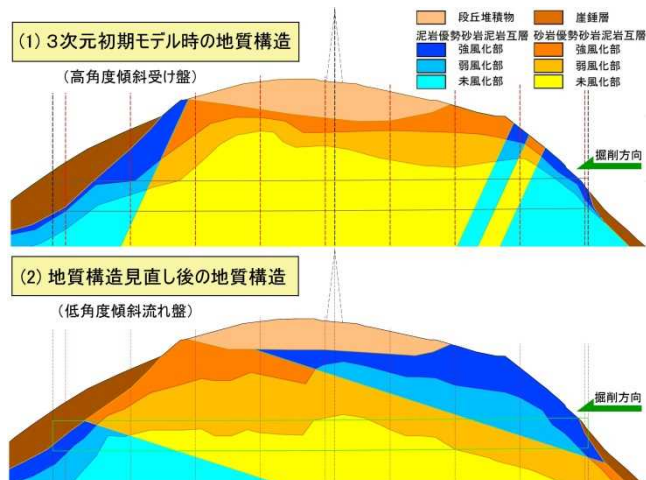


図 13 地質構造の見直し（地質縦断図）

4. まとめ

3次元地質解析システムの構築を行い、現場の実データを適用して、未掘削部の地質予測を実施した。

3次元地質解析システム適用効果と、システムを運用する上での今後の検討課題について、以下にまとめる。

4.1 3次元地質解析システム適用効果

- ① 任意の方向で 3 次元的に地質構造を確認できるため、地質構造を容易に把握することが可能
- ② 未掘削部分の地質予測について、地質不良部の把握や未知の構造物への対策の事前検討が可能
- ③ 地質情報を一括して管理することが可能
- ④ 構造物の詳細なモデルや品質管理・施工管理などの施工情報を 3次元地質モデルに追加することで、スムーズな CIM3 次元モデルへの移行が可能

4.2 システム運用における今後の検討課題

- ① 現時点では 3次元モデルの作成に相応の時間と労力を要しているため、システム効率化が必要である
- ② より高精度な地質解析には、弾性波速度や削孔検層などの多面的な地質情報を付加することが必要であり、それらの情報をシステムに組み込む方法を検討する
- ③ 本システムの現場への適用を堆積岩などの層状岩盤以外の塊状岩盤の地山へ拡大させ、あらゆる地質の地山にも対応できるシステムの構築を目指す

参考文献

- 1) 山田浩之、大槻文彦、木村圭吾：都市部における超近接無導坑メガネトンネルの建設と新技術の導入、鴻池組技術研究報告 2016、pp.1-8、2016.7
- 2) 安田裕輔、村島雅征、山田浩之、山本崇之：神社・铁塔近接時の脆弱な地山における補助工法の設計と施工、トンネルと地下、Vol.48、no.4、pp.17-28、2017.4