

【CO05】

人工改変地形のトンネルにおける施工上の問題を把握するための BIM/CIM モデルの活用事例

中央開発株式会社 ○川野 菜々美, 小川 雄大

1. はじめに

本事例で対象とする開削トンネルの周辺は、丘陵地が大規模な谷埋め盛土や切土により造成された人工改変地形であり、現在の地表面からはその改変状況を把握することが困難であった。当該地には、造成年代が古く、締固めが不十分な盛土層と、その直下に未固結な旧表土層が分布している。設計前に行われた地質調査では、通常行われるボーリング調査に加えて物理探査も実施されており、軟弱層（盛土層+旧表土層）の分布範囲の把握が行われていた。しかし、トンネル工事の際には、想定外の軟弱層が分布していたことから、施工上の問題となり、工事費や工期の増加が生じた。また、トンネル函渠等により主要な帯水層のほとんどが塞がれることから、地下水の流動阻害が懸念された。本論文では、旧地形を踏まえた三次元地盤モデルを作成し、施工上の問題となった軟弱層や帯水層の三次元的な把握を行った事例を示す。

2. 対象地の地盤状況

対象とする開削トンネルは、丘陵地から山地に至るトンネルであり、複数の谷埋め盛土を横断する。地質は、丘陵地を構成する砂礫主体の更新統と、山地を構成する砂岩頁岩互層からなる整然相の白亜系付加体堆積物が下

位に分布している。いずれも上部は風化しており、亀裂の多い層相を呈すため、主要な帯水層となっている。下部の新鮮部は軟岩に該当し、十分な強度を有しており、風化部も施工においては、荷重履歴よりも小さくなるため、施工上大きな問題とはならないと考えられる。しかし、前述のように谷埋め盛土は、N 値が 10 以下で締固めが不十分であることや、その下位の旧表土層は、有機物を多く含む軟弱な土層であり、施工時の乱れによって強度が低下する可能性があった。また、ボーリングにより、これら軟弱層の分布及び層厚は大きな不陸が存在し、旧地形に影響を受けていると考えられた。

3. 三次元地盤モデルの作成

既往ボーリングは、用地上の制約からトンネル計画範囲外で実施されたものが多いため、既往業務では調査結果をトンネル計画ルート上の測線に投影して推定地質縦断面図が作成されており、地層の傾斜が十分反映されていない可能性があった。そのため、本事例では、実際のボーリング調査地点の地層構造を正として、推定・解釈モデルからソリッドモデルを作成し、地質構造の三次元的な整合を図った。具体的な手順は以下に示す。

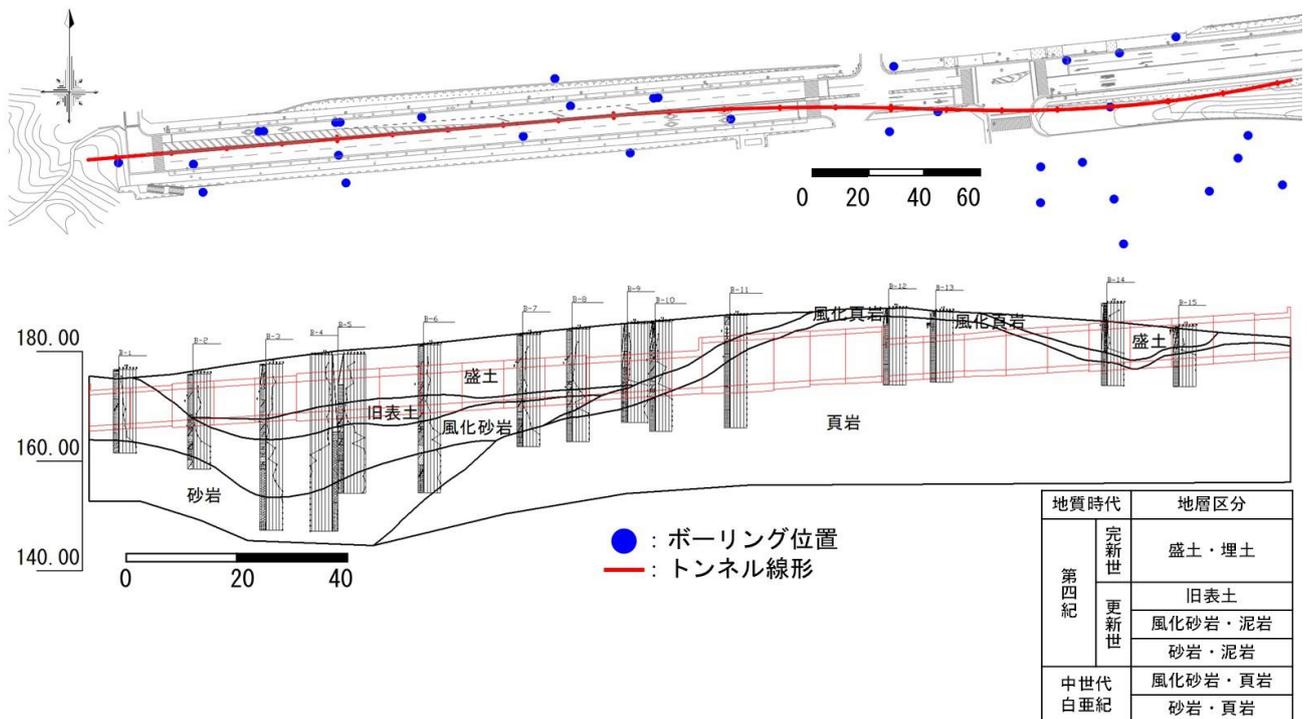


図-1 対象地の地盤状況(上段:平面図, 下段:断面図)

(1) 地層対比

対象地は、道路事業や関連する周辺の造成工事も含め、複数の地質調査業務が行われていた。そのため、計74本の既往ボーリングについて、同じ条件（同一時代、同じ地質種・地質体、類似物性値等）の境界を判別し、地層解釈の統一を行った。統一的な解釈を行ったボーリングは、三次元空間上に配置し、推定・解釈モデルを作成した。

(2) 地層境界面の作成

推定・解釈モデルから、同一の地層境界点を抽出し、空間補間計算を行って地層境界面を作成した。空間補間計算には、地層面の推定に一般的に用いられる野々垣ほか(2008)¹⁾の最適化原理(BS-Horizon)を用いた。また、盛土層のモデル化では、既往調査で行われていた物理探査結果に加え、造成以前の、縮尺1/3,000地形図も用いてモデリングを行い、現況の数値標高モデル (DEM) と標高を比較することで、モデル化範囲の盛土層の全体の形状を作成した。図-2に作成した盛土層と旧版地形図の等高線を示す。

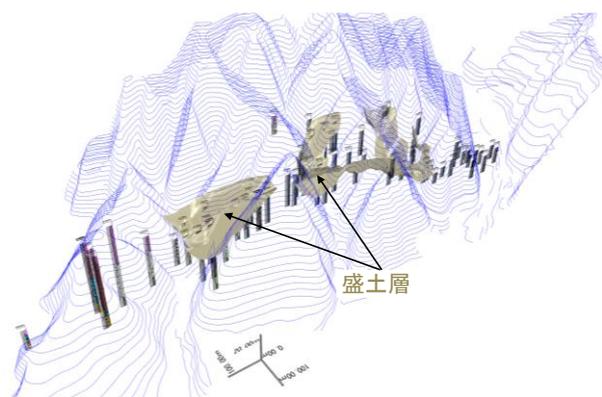


図-2 盛土層と旧版地形図の等高線の三次元表示

(3) ソリッドモデルの作成及び検証

作成した各層の地質境界面を用いてソリッドを切断し、三次元地盤モデルを作成した。妥当性の検証として、ボーリング間を結んだ断面図を切り出し、解釈に矛盾が無いかの確認を行った。

4. モデルの活用効果

本事例において、作成した BIM/CIM モデルより以下に示す活用効果が認められた。

(1) 軟弱層の分布の把握

既往縦断面図に三次元地盤モデルから切り出した地層境界線を重ねることで、軟弱層の範囲を確認した(図-3)。その結果、施工上の問題となっていた軟弱層の分布範囲を明らかにすることができ、既往調査で想定されていたよりも、軟弱層の層厚が厚いことが分かった。これは、旧谷筋が当該箇所を横断しており、軟弱層が厚いことが既往調査でも想定されていたが、用地上の制約から道路センターで調査できなかったことが原因であると考えられる。今回、軟弱層の分布範囲が明らかとなったことか

ら、今後、地質に応じた合理的な施工が期待できる。

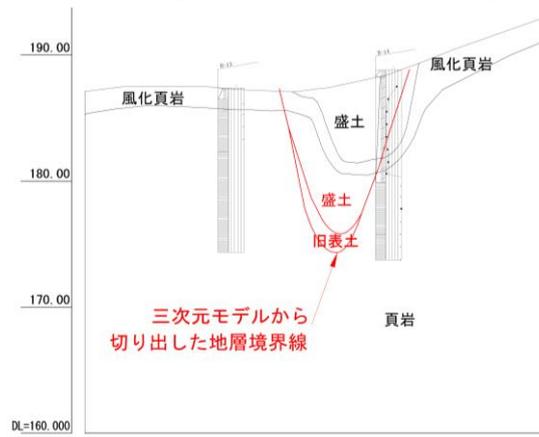


図-3 既往地質断面図と三次元地盤モデルの地層境界線の対比

(2) 流動障害リスクの可視化

三次元地盤モデルに設計業務で別途作成されたトンネルの BIM/CIM モデルを統合することで、土留壁及びトンネル函渠が主要帯水層をどの程度閉塞するかを確認することができた。その結果、谷筋では帯水層を遮断することが分かった。ただし、谷筋以外では帯水層の遮断は小さいことや、周辺に井戸利用が無いことから、積極的な対策は行わないこととした。

(3) 任意箇所での切り出し

三次元地盤モデルを作成したことにより、任意の位置で二次元断面図への切り出しが可能となった。対象地周辺では、道路事業に関連した埋設管移設・敷設の工事も行われており、発注者の指定した位置で切り出しを行い、迅速に二次元的地質断面図を提供できるようになった。

5. おわりに

本事例では、既往調査結果だけでなく、旧地形も踏まえた三次元地盤モデルを作成することで、切土や未固結な盛土層、旧表土層の軟弱層の分布範囲を三次元的に明らかにすることができた。また、三次元地盤モデルを作成したことにより、帯水層の分布範囲やトンネル函渠による流動障害リスクを可視化することができた。造成盛土等の人工地盤をモデル化する際には、旧地形図等から盛土分布を三次元地盤モデルに反映することで、モデルの精度向上が期待される。また、地質調査前の資料収集整理の段階から、旧地形(旧表土層)の情報を反映することができれば、軟弱層の範囲を十分に予測することができたと考えられるため、地質調査においても、調査前の地形の概査をはじめ、資料収集整理が重要であると考ええる。

《引用・参考文献》

- 野々垣 進・升本 眞二・塩野清治：3次B-スプラインを用いた地層境界面の推定. 情報地質. 2008, 第19巻, 第3号, pp. 61-77.

3次元地盤モデル（サーフェスモデル）の作成事例

株式会社キタック ○菅原渉平, 池田真彦, 吉田怜央, 金岡民善

1. はじめに

現在, 国土交通省では建設現場の生産性向上に向けて, CIM (Construction Information Modeling) や i-Construction の活用に関する事業や利活用の試みを実施されており, 地質調査全般においては, 地盤情報の3次元化に取り組んでいる. 本論では, 計画されている高速自動車道のジャンクションにおいて, 広域な氾濫平野における既存ボーリングデータを用いて, 3次元地質解析システムにより作成した3次元地盤モデル(サーフェスモデル)について(図-1, 図-2), モデル作成方法や今後の利活用方法等の事例を報告する.

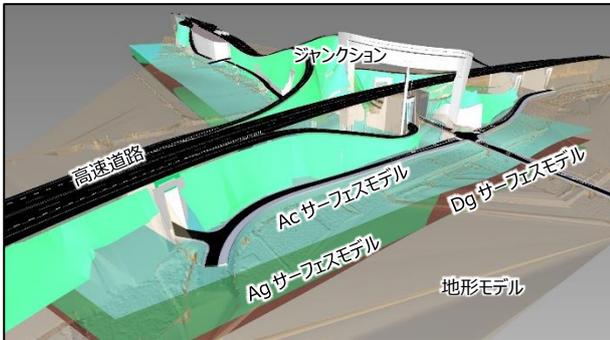


図-1 3次元地盤モデル(統合モデル)

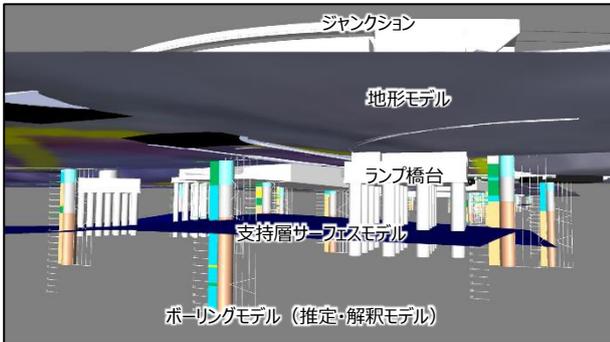


図-2 作成した各モデル

2. 3次元地盤モデルの概要

(1) 目的

3次元地盤モデルの作成は, 原地盤の地質・地層を可視化し, その特徴を的確にとらえることで後工程である設計, 施工における施工計画立案や橋脚の支持層確認, 軟弱地盤の確認, 維持管理段階での点検, 補修等を効率的に行うことを目的とした.

(2) 作成範囲

モデル範囲の道路総延長は1.7kmである.

(3) 作成したモデル

サーフェスモデルは①沖積粘性土層 (Ac1) 下端面, ②洪積砂礫層 (Dg1) 上端面, ③支持層面 (橋梁と函渠類の2種類) の3つ, ボーリングモデル (推定・解釈モデル) は品質チェック (信頼度評価) を行った29本を作成した.

3. 当該地の地形・地質概要

当該地は, 第四紀の氾濫原堆積物や扇状地堆積物から構成され, これらの堆積物はいずれも未固結の砂礫層を主体としている. 3次元データ化するにあたっては, 面的な土質分布の把握が重要であることから, 空中写真「1948年11月22日/米軍撮影」¹⁾を用いた立体視による地形判読を行った(図-3). 調査地は規模の大小異なる自然堤防や微高地, 旧河道が多くみられ, 計画道路に対して一部旧河道が横断する箇所が確認された.



図-3 空中写真判読結果

当該地の地層区分は, 表層の盛土 (B), 完新世の氾濫原堆積物 (Ac, Ag), 更新世の段丘堆積物 (Dg) に分類される(図-4). Ac と Ag 層は粘性土と砂礫の互層状を成し, Dg1はN値50以上の砂礫を主体とする.

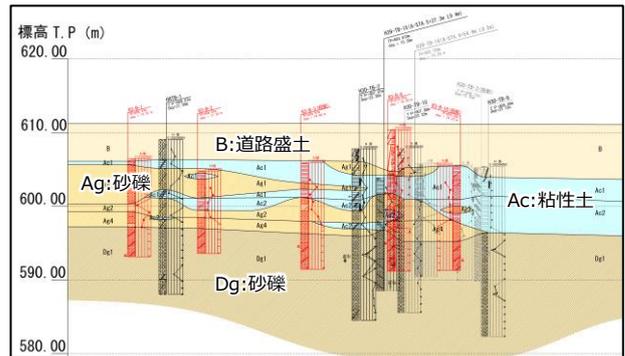


図-4 既往の想定地質断面図

4. 3次元地盤モデルの作成方法

モデル作成の手順としては, 地質断面図と各種ボーリングデータを用いて地層面を可視化する「3次元データ化」と, 3次元地盤モデル(サーフェスモデル)を作成する「3次元地質解析」のフェーズに大別される.

モデル作成のフローチャートを次頁の図-5に示す. 本節では, 3次元地質解析におけるモデルの品質確保のための「データクロスチェック」と, モデル作成のための「地質対比」について記述する.

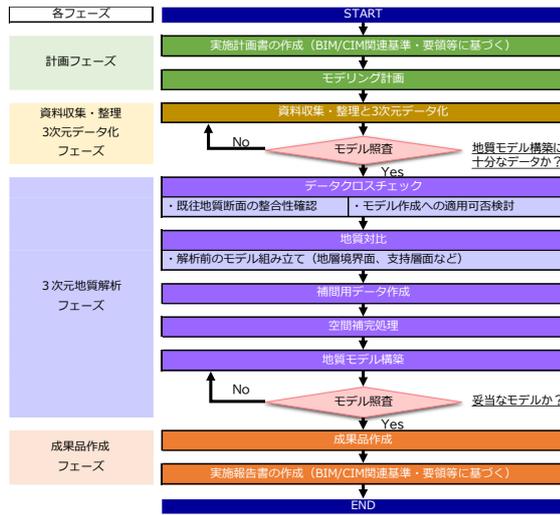


図-5 3次元モデル作成フローチャート

(1) データクロスチェック

既往成果の整合性はモデルの品質に直結する。地質縦断面図を作成する場合、必ずしも断面線上でボーリングが実施されていないため、近傍のボーリング結果を法線方向に投影して作図している場合がある。3次元地質解析では最も信頼できるボーリング位置の標高を制御点として面を作成し、間の空間は補間アルゴリズムにより補間した。この違いから、サーフェスの標高と地質縦断面図に投影された標高を比較すると齟齬が生じる(図-6)。以上の検討により、各地質断面図を構成する地層境界面はいずれも3次元地質解析を行うための直接的な材料としては不適合と判断し、サーフェスモデル作成はボーリングデータを基準とした。このようなクロスチェックによって、モデルの品質確保を図った。

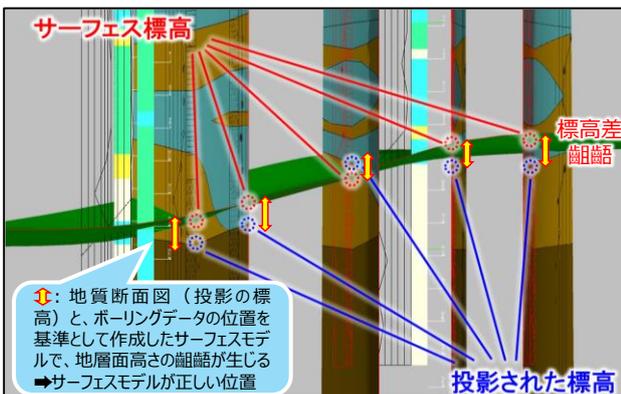


図-6 投影された標高とサーフェスモデルの齟齬

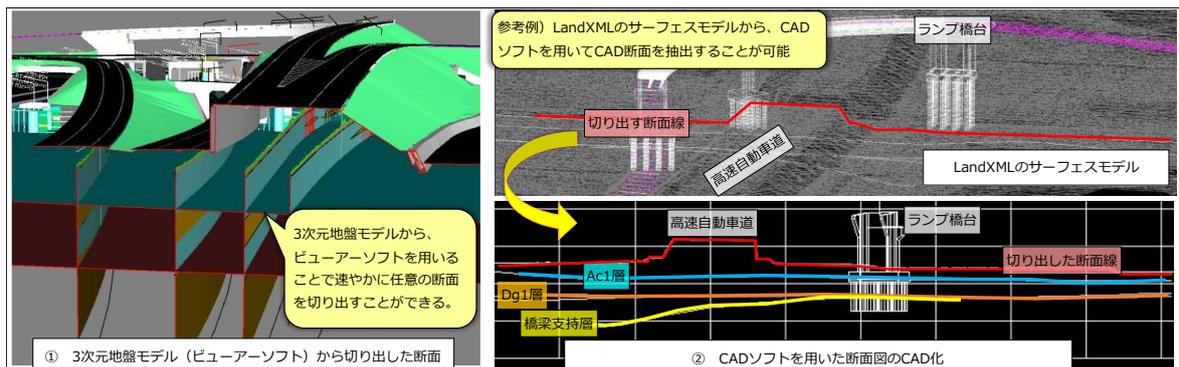


図-8 維持管理フェーズ「災害時の復旧対応や原因究明に資する資料の提供」の断面抽出

(2) 地質対比

地質対比は、モデル作成のために地質調査データの同じ条件(同一時代、同じ地質体、類似物性値等)の境界を判別し、境界データとしてグルーピングする作業である(図-7)。地質境界線を網目状に定義していくが、モデルの精度向上のため、現地踏査及び空中写真判読によって整理した地形分類をもとに、面的な地層の広がりを確認した上で、関連性の高いボーリング点間を連結した。

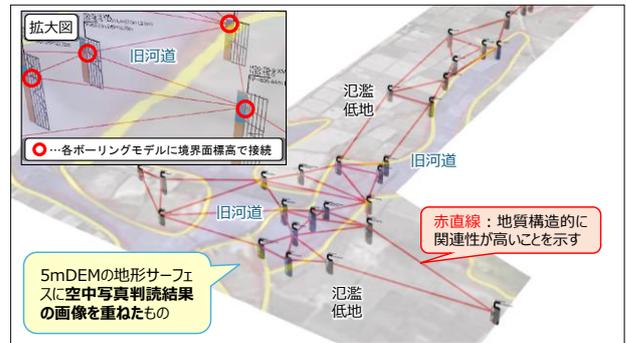


図-7 地質対比による各ボーリング間の連結状況

5. 今後の利活用方法の提案

あらゆるフェーズ(調査、設計、施工、維持管理)における3次元地盤モデルの今後の利活用方法について提案した。本節では、維持管理フェーズについて記載する。例えば道路盛土の崩壊が生じた際には、崩壊箇所をビューアソフトにより速やかに任意の断面で切り出すことができるため、視覚的に地層構成等を確認することができる(図-8-①)。またCADソフトを用いることで断面図のCAD化が可能であり(図-8-②)、災害復旧時に活用できる資料を迅速に提供可能と考える。

6. まとめ

既往成果品の整合性、ボーリングデータの信頼性等がモデルの品質に影響することを理解して、3次元地盤モデルを作成することが重要である。面的な広がりや複雑な地下構造を3次元的に表現することによって、適切な調査計画や追加調査の検討、基礎の根入れ確認、将来的な施工計画やICT施工に寄与するものとする。

《引用・参考文献》

- 1) 地図・空中写真閲覧サービス：1948/11/2、米軍撮影写真(に加筆)、<https://mapps.gsi.go.jp/>。(最終閲覧日：2023.10.5.)

【CO07】

ボーリング調査結果を基とした支持層分布深度の3次元モデル化

株式会社新協地質 ○田巻 終野, 大澤 一夫

1. はじめに

平坦な水田が広がる越後平野において、重要建築物が計画されている。建築予定地で実施した調査ボーリングでは、支持層の分布深度にバラツキがあることが判明した。調査時点における問題点として「推定地質断面図を2次元で表現すると、断面線上から離れた位置では、支持層の分布深度が変化してしまう」ことが挙げられた。そこで、支持層の分布深度を分かり易く表現するため、3次元ソフトを用いて視覚化を行った。

2. 地形・地質概要

図-1、図-2に越後平野周辺の地形図及び地質断面図を示す。本調査地は、越後平野を南東から北西方向に流下する加治川の下流域、新発田（しばた）市の市街地と水田地帯との境界付近に位置する。この地域は、加治川扇状地と新潟砂丘との間に位置し、自然堤防が点在する氾濫原性低地となっている。既往の文献等では「深度30m付近に深に更新統と推定される礫層（Pg1）が広く分布し、地下で扇状地性の平坦面を形成する」との記述がある。

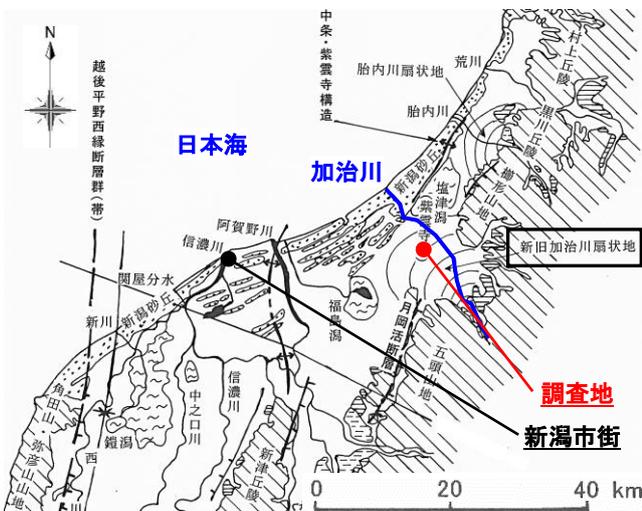


図-1 越後平野周辺の地形と地質 ¹⁾

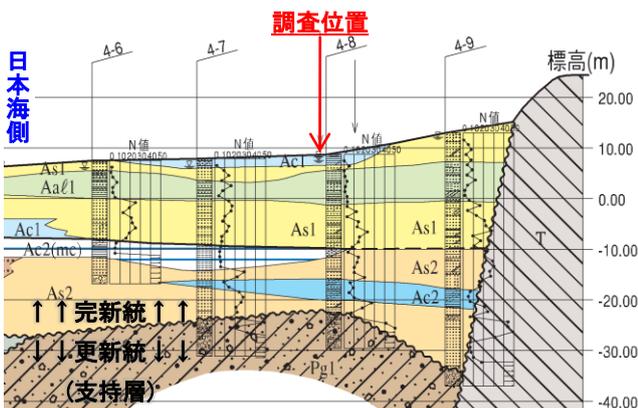


図-2 新潟県地盤図(加治川沿い断面) ¹⁾

3. 調査結果

図-3に示す建築予定地内で BV-1~BV-4のボーリングを実施した。その結果、支持層（更新統）の分布深度にバラツキが確認された。図-4に既存ボーリングを含めた各柱状図を並べて示す。

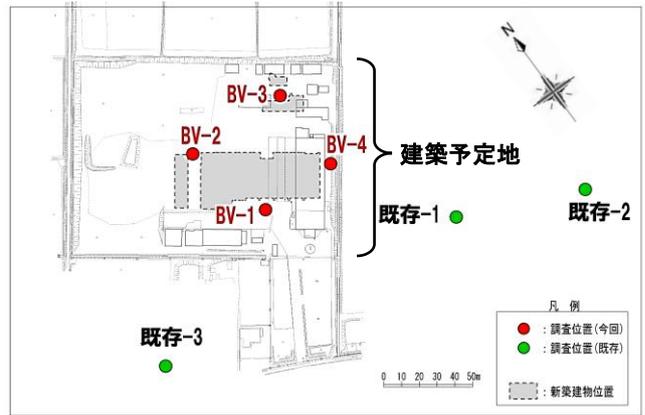


図-3 調査位置平面図

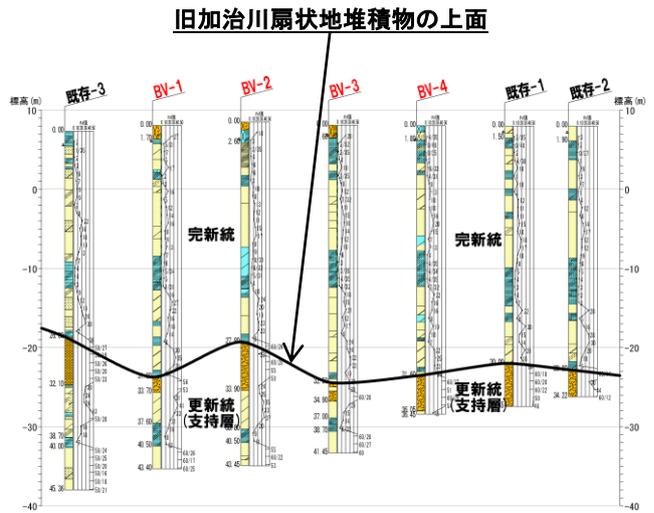


図-4 ボーリング柱状図の比較 ²⁾

調査結果から建築物の基礎形式は、杭基礎が妥当と判定された。ただし、支持層の分布深度にバラツキがあるため、杭基礎における杭長にもバラツキがでる事が予想される。そこで、支持層の分布深度を発注者へ分かり易く説明するため、支持地盤の3次元モデル化を提案した。

4. 3次元モデル

既存ボーリング及び今回実施したボーリングを基に作成した支持層の出現標高図を図-5に示す。

地上部では、平坦な水田が広がる地形だが、地下では扇状地堆積物の上面が「北西方向（日本海側、下流側）に向かって標高が増す」ことや「浅い谷地形を呈する」ことが出現標高図から想定された。

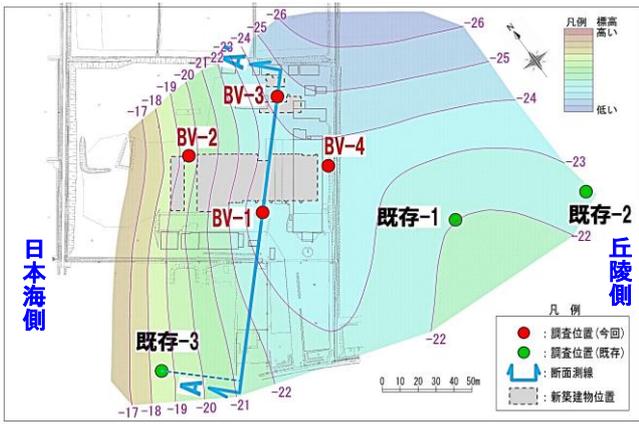


図-5 支持層(更新統)の出現標高図

図-6は、完新統と更新統の区分を3次元モデル化したものである。このモデル図を参考とし、設計者は計画建築物直下の基礎杭先端が支持層に到達しているか否かの判断材料として活用できる。

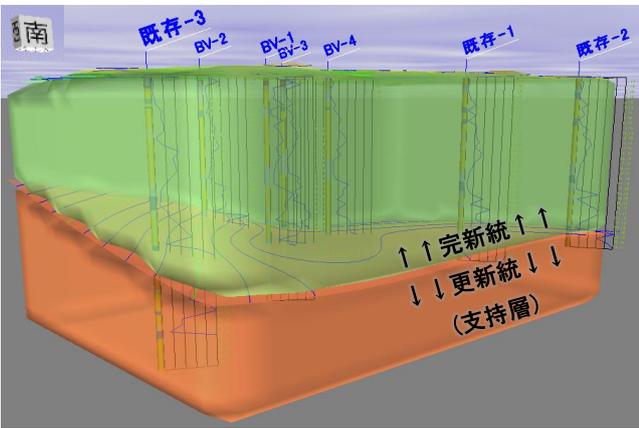


図-6 完新統と更新統の分布モデル図

従来の2次元モデルで地質断面図を作成する場合、断面測線上にボーリングデータがなければ、近接するボーリングデータを「投影」させる手法が多く用いられてきた。しかし、単純にボーリングデータを投影させると、投影位置においては、各区分層の出現深度が「投影元の柱状図」と同じになるとは限らず、地質断面図としての信頼性にやや欠けることがあった。図-7に示す A-A' 測線において、①単純投影で引いた地層線と②3次元モデルを参考にした地層線を比較した結果を図-8に示す。

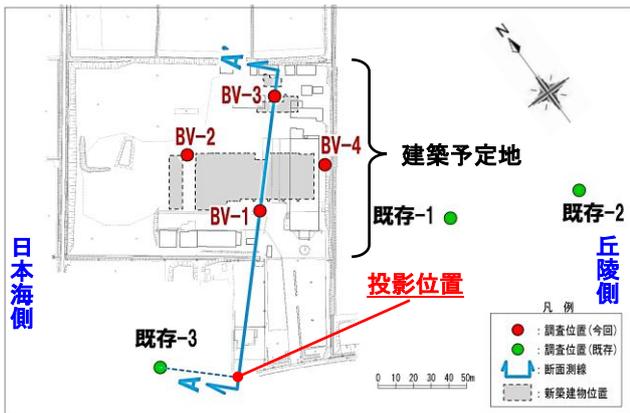


図-7 A-A' 測線位置

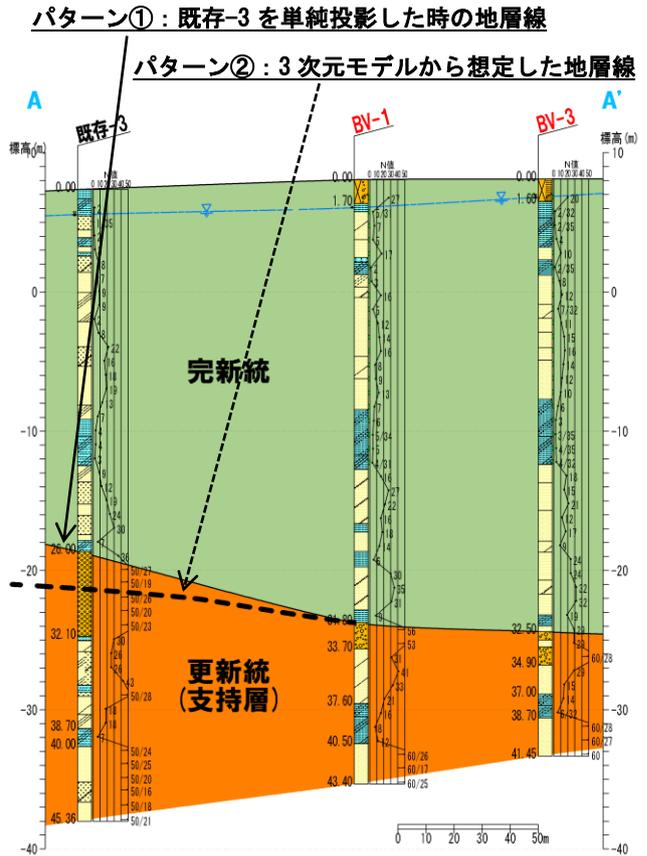


図-8 パターン①と②の比較図

当初、既存-3の柱状図を単純投影して2次元モデルを作成すると、更新統の上面がA方向に急に浅くなる形状であった(パターン①)。次に、3次元モデルをもとに地層線を引き直すと、更新統上面の傾斜はパターン①に比べ緩くなった(パターン②)。

このことから、3次元モデルで得た結果を2次元モデルにフィードバックさせることで、2次元モデルの精度向上にも役立つと考えられる。

5. おわりに

3次元モデルを作成することで、2次元の断面図では説明が難しかった「断面測線から外れた位置の支持層分布」を比較的簡単に発注者へ説明することが出来た。支持層の分布深度に起伏がある場合には、有効な手段であると判断できる。

今後の課題としては、3次元モデルの妥当性確認のため、追加ボーリングや物理探査など、補足調査の提案を行うことが望ましい。本業務では、建築物完成までの工期がタイトであり、建築設計との同時進行の業務であったため、追加調査は実施できなかった。

《引用・参考文献》

- 1) 新潟県地盤図説明書(2002):公益社団法人 新潟県地質調査業協会, P7
- 2) ほくりく地盤情報システム:北陸地盤情報活用協議会, 既存-3柱状図(最終閲覧日2024.5.30)

トンネル施工データを用いた三次元地盤モデルの作成

～Ⅱ期線トンネル設計への活用～

株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング ○白井杏実, 小瀬川奉久
株式会社オリエンタルコンサルタンツ 濱田拳太郎, 片山武, 本多玲奈
国土交通省九州地方整備局北九州国道事務所 松坂千寛, 上田倫大, 長野大史

1. はじめに

近年、交通量の増加によりトンネル内の安全性が懸念されるようになり、供用を停止した既設の廃線トンネルの再活用が、全国で計画されている。本論文の対象トンネルについても、交通混雑の緩和、安全性の向上を図る目的で、現在は使用されていない隣接する既設トンネルを改修し、4車線化することが計画されている。しかし、このような古いトンネルの利活用において、改築設計のために必要なデータが古い、あるいは存在しないと云った問題も発生している。

本論文では、現在供用されているトンネル（Ⅰ期線）施工時の切羽観察記録を用いて三次元地盤モデルを作成し、隣接した老朽化により現在は廃線となっている旧トンネルをⅡ期線として利活用する改築設計に用いた事例について述べる。具体的には、Ⅰ期線の既往地質調査やⅠ期線施工時の切羽観察記録からトンネル部の地質、地山分類を整理し、作成された三次元地盤モデルから、改築設計のためにⅡ期線位置の地質縦断面図を作成、新たに支保パターンを設定した。

三次元地盤モデルの作成には Autodesk 社の Civil 3D 及び GEORAMA for Civil3D を使用した。

2. 地形地質概要

対象となるトンネルの周辺の地形は北北西～南南東方向に延びる細尾根を成し、トンネルはこの尾根筋を西南西～東北東方向に貫通している。尾根筋は標高300～400mで、尾根の両斜面は平均傾斜35～45°と比較的急峻であり、山麓へ下るほど緩やかになる。

基盤岩は古生代石炭紀～中生代三畳紀に変成作用を受けて生成したとされる三郡変成岩類と、中生代白亜紀に三郡変成岩中に貫入したとされる花崗岩類から構成される。三郡変成岩類は花崗岩類の貫入接触により一部接触変成作用を受けホルンフェルス化している。尾根の西側に三郡変成岩類が分布し、東側に花崗岩類が分布しており、その境界は複雑に入り組んでいる。

3. 三次元地盤モデルの活用

(1) 三次元地盤モデル活用フロー

図-1 に三次元地盤モデル活用フローを示す。

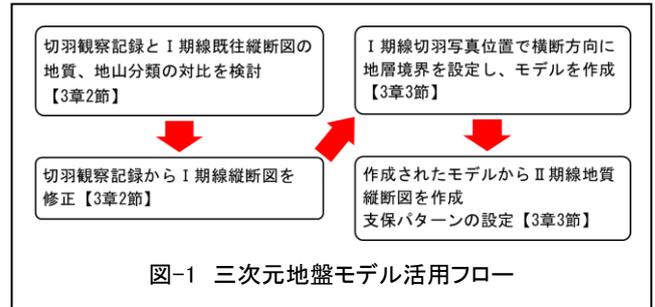


図-1 三次元地盤モデル活用フロー

(2) 切羽観察記録によるⅠ期線縦断面図の修正

既往Ⅰ期線地質縦断面図は、ボーリング等の地質調査結果からⅠ期線施工前に作成された想定地層断面図であり、施工時に確認された地質と異なる部分が存在する。この既往Ⅰ期線地質縦断面図を、Ⅰ期線トンネル部の施工時に確認された地質情報である切羽観察記録をもとに修正した。施工前に作成された既往地質縦断面図とトンネル施工時の切羽観察記録は、地質・地山分類の評価区分が一致していなかったため、まず既往Ⅰ期線地質縦断面図とⅠ期線施工時の切羽観察記録の地質・地山分類の対比について検討した。表1に、地質と地山分類の対比表を示す。表1をもとにⅠ期線縦断面図の地層分布と支保パターンを修正するとともに、後に作成するⅡ期線縦断面図の支保パターンを設定した。

表-1 凡例対比表

既往地質調査		地山分類	切羽観察	
地質区分	地質記号		地質記号	地質区分
崖錐堆積物	Dt	—	—	—
強風化花崗岩	Grw1	D II	Grm1	強風化花崗岩
		D I	Grm2	
風化花崗岩	Grw2	C II	Grw1	風化花崗岩
花崗岩	Gr	C I	Grw2	弱風化花崗岩
		B	Gr	花崗岩
強風化片岩	BSchw1	D II	BSchw1	強風化片岩
		D I	BSchw2	
風化片岩	BSchw2	C II	BSchw3	風化片岩
片岩	Bsch	C I	BSchw4	弱風化片岩
		B	BSch	片岩
アブライト	Ap	D I	Apw2	強風化アブライト
		C II	Apw3	風化アブライト
		C I	Apw4	弱風化アブライト

(3) 地層境界の設定

本検討は、Ⅱ期線となる廃線トンネルを利活用するための改築設計が目的であるため、特にトンネル部の地質分布を精度よく表現することが重要であった。そのた

め、I期線トンネル部に切羽写真を三次元的に配置し、切羽写真上の地層境界を利用して地層境界線を設定した。トンネル範囲外は、既往地質平面図や地形を参考に地層境界線を設定した。図-2に切羽写真上に設定した地層境界線の例を示す。

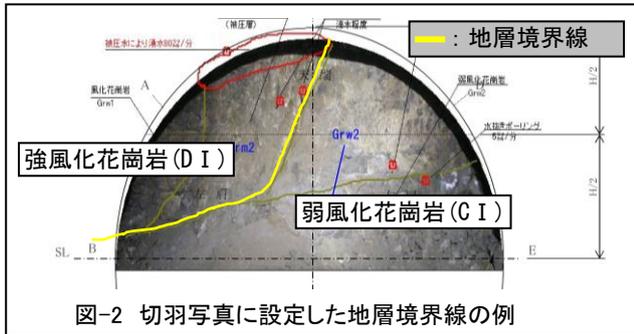


図-2 切羽写真に設定した地層境界線の例

風化区分は地形を参考にし、アプライト(細粒花崗岩の一種)や熱水変質脈といった脈状の構造は切羽で確認された走向傾斜を参考にモデル化した。図-3に作成したモデル(ソリッドモデル)を示す。

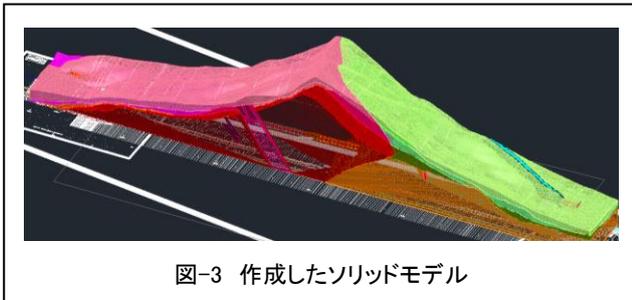


図-3 作成したソリッドモデル

図-4に、II期線縦断位置で切り取った地層境界サーフェスと、その地層境界を用いて作成したII期線縦断図を示す。作成されたII期縦断図を用い、II期線の支保パターンを設定した。

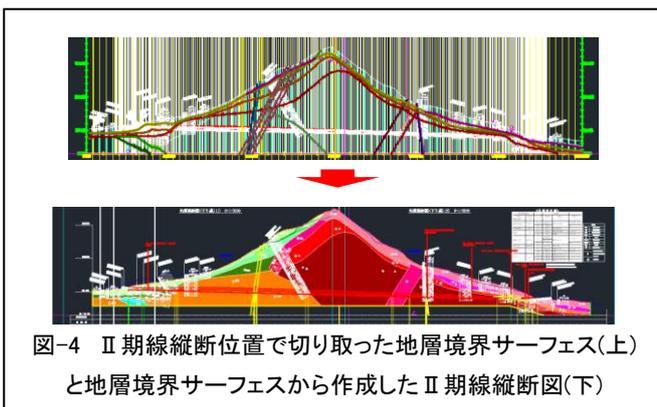


図-4 II期線縦断位置で切り取った地層境界サーフェス(上)と地層境界サーフェスから作成したII期線縦断図(下)

4. 本検討の成果

現在供用されているトンネル(I期線)施工時の切羽観察記録を地質的に解釈し、それを用いて三次元地盤モデルを作成することにより、追加調査を行うことなく、隣接した廃線トンネルをII期線として利活用するための改築設計、支保パターンの検討を行うことができた。これまで、I期線の施工データとして、崩壊や湧水など情

報が申し送られることはあっても、整理されたII期線施工に生かされた事例は少ないと考えられる。その要因として、切羽のデータを地質的に解釈し、II期線に展開する手段・手法が確立していなかったことが挙げられる。

大規模な岩盤地下掘削などでは、亀裂の三次元的な分布を推定しグラウトを行う等の取り組みも行われているが、DX技術の発展と共に、トンネルといった線状構造物でも少ない労力で的確にモデル構築を行っていくことが可能となると考えられる。地質のみでなく、湧水の情報をモデルに組み込むこともできる。

また、ダム等においても三次元モデルを活用することで地質・亀裂分布の連続性の評価の誤り等を防止することができると考える。

5. 今後の課題と展望

今後の課題としては、切羽観察記録上の地質評価の正確さやバラつきが挙げられる。切羽観察を行う技術者が地質の専門技術者であるとは限らないため、地質や岩級区分の評価をそのまま利用できるとは限らない。岩級区分等の評価が不十分な場合は、切羽写真を見直し、地質情報を評価し直す必要がある。

また、切羽観察記録は1回の掘削深度の違いにより間隔が定まっておらず、今回の場合、切羽観察の間隔が1~20mと一様ではなかった。幅が広すぎると地質情報が粗になる一方、幅が狭すぎても地層境界の急な変化をモデルとして再現できない。マイクロとマクロの視点を持って地層をモデル化し、三次元的に表現する能力が必要である。

一般にトンネル計画に伴う地盤調査では、ボーリング調査や弾性波探査等の物理探査が行われるが、ボーリングは線(一次元)の情報であり、物理探査は間接的な調査である。一方、今回使用した切羽情報は、大断面で地質状況を直接確認できるものであるため、ボーリング等と比較し得られる情報量が格段に多い。今回対象としているI期線とII期線トンネルの外周間の離隔は約30mと近接している。II期線の地層を推定する上でI期線の施工データは活用すべきであり、施工データを用いて作成された三次元地盤モデルは有効であると考えられる。

今回紹介した事例は設計時に三次元地盤モデルを活用した例であったが、その他トンネル供用後の維持管理に活用できる可能性もあると考える。例えば、破碎帯や湧水の情報を三次元モデルに残しておくことで、供用後に変状が発生した位置の地質等情報を即時に引き出すことが可能となる。今後、設計や施工・維持管理の各ステップで三次元モデルの活用方法を開発していくためには、作成されたモデルがどのような推定を含むのかを記録し、後工程に伝達する手法を確立することが重要である。