

3次元地盤モデルの作成

～基礎から事例まで～ 分かる! 3次元地盤モデル

特集



3次元地盤モデル作成の基礎知識と作成例

3次元
地盤モデル
の作成

五大開発株式会社 システム技術部 開発課 課長代理 崔 伶準(チェヨンジュン)

1. はじめに

国土交通省では、2023年度(令和5年度)より、直轄の全土木業務・工事においてBIM/CIMを原則適用となりました。小規模な工事や維持管理、災害復旧など一部の例外を除き、3次元モデルの活用が標準化されています¹⁾。しかしながら、地盤分野においては依然として3次元モデルの普及が十分とは言えません。

その主因として、3次元地盤モデルの具体的な構築手法や活用メリットに関する技術情報の不足が挙げられます。モデル作成のハードルを下げ、実践的な活用イメージを共有することができれば、地盤分野におけるBIM/CIMの浸透はさらに加速するものと考えられます。本稿では、効率的に3次元地盤モデルを構築可能な「MakeJiban」を用いた作成手法について解説します。

2. 3次元地盤モデルのメリット

2.1 地質リスクの回避

地下構造を立体的に再現することで、従来の2次元断面図では見落とされがちだった断層、破碎帯、軟弱地盤の局所的な分布を空間的に把握できます。設計段階でこれらを可視化・評価することで、施工中の不測の事態に伴う設計変更や工期遅延を未然に防止する「地質リスクマネジメント」が可能となります。

2.2 構造物との干渉チェック

3次元空間上で設計構造物と地盤モデルを統合することで、地層境界から構造物までの離隔距離や、基礎杭と支持層の着底状況などを動的に確認できます。これにより、設計品質の飛躍的な向上が期待できます。

2.3 数量算出

地質体をソリッドモデル化することで、任意範囲における土質区分ごとの体積を直接抽出できます。従来の平均断面法では困難であった不整形な地層境界を考慮した数量算出が可能となり、精度の高い積算や合理的な土配計画の立案に寄与します。

2.4 情報共有

3次元モデルの最大の利点は、高度な専門知識を介さずとも地下状況を直感的に理解できる点にあります。発注者、設計者、施工者間での意思決定を迅速化するだけ

でなく、住民説明会等においても客観的かつ分かりやすい視覚資料として合意形成を支えます。

2.5 データ統合管理

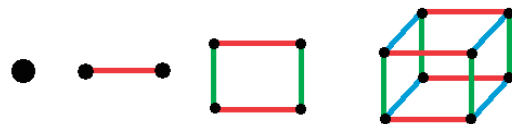
3次元地盤モデルは、ボーリングデータ、物理探査結果、現況点群、および構造物モデルを一元的に管理するプラットフォームとなります。調査・設計から施工、維持管理に至る各フェーズでデータを断絶させることなく継承し、インフラのライフサイクル全体で「情報の資産」として活用し続けるBIM/CIMの本質的なサイクルを実現します。

3. 3次元モデルの基礎知識(構成要素)

3次元空間は我々が日常的に認識している環境ですが、モデリングの基礎となる重要なキーワードについて改めて整理します。

3.1 次元

モデリングにおける「次元」とは、空間の広がり方を定義する指標です。3次元は3つの独立した方向によって空間を表現し、実世界の状態を忠実に再現します。



0次元:点, 1次元:線, 2次元:面, 3次元:立体

図-3.1 次元の概念図

- ・0次元(点):位置のみを持つ要素。
- ・1次元(線):2点を結んだ長さの概念。
- ・2次元(面):複数の線で囲まれた面積の概念。
- ・3次元(立体):複数の面で構成される体積の概念。

3.2 座標系

3次元空間内の位置を厳密に定義するためには「座標系」を用います。目的や定義によって様々な座標系が存在しますが、代表的なものとして、直交座標系の中に「数学座標」と「測量座標」があります。

土木分野では、XY軸の向きが数学座標とは異なる測量座標系を正しく理解し、適用する必要があります。

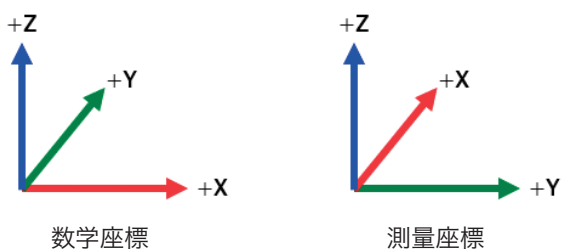


図-3.2 座標系

3.3 構成要素

モデルをパソコンなどの仮想空間で表現するための要素は、大きく「点」「線」「面」および「ソリッド」に区分されます。

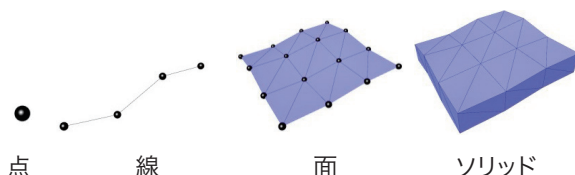


図-3.3 構成要素

- ・点(Point): 最小の構成要素であり、空間座標を保持します。代表例として3次元計測による「点群データ」が挙げられます。
- ・線(Line): 点間を繋ぐ要素です。地盤モデルにおいては、中心線、縦横断線、あるいは地形を表す等高線として用いられます。
- ・面(Surface/Mesh): 3点以上の点を結び、面を形成したものです。作成手法には、点を直接結んで三角形網を構築する「ドローネー分割法」や、点情報を補完して一定間隔の格子状にする「スプライン法」などがあります。
- ・ソリッド(Solid): 閉合した面によって囲まれ、内部に「中身(体積)」の情報を持つ状態を指します。地盤モデルでは、地質体やボクセルモデル、体積算出の対象として表現されます。
- ・属性情報: これら4つの幾何形状に対し、色彩や地質種別などの属性を付与することで、モデルの視認性や情報密度を高めることが可能です。

4. 地盤モデルの種類²⁾

地盤モデルは、その目的や表現手法に応じていくつかの形式に分類されます。土木分野においては、地形の形状や地層の連続性を可視化することが主眼となります。

これらは、調査結果(生データ)をそのまま配置するものから、地質技術者の解析・解釈を経て地層構造を推定・モデル化したものまで多岐にわたります。表現範囲は、支持層や基盤岩から地表地形までを対象とするのが一般的です。

4.1 ボーリングモデル

地質・土質調査で得られたボーリング柱状図を、3次元空間上の各地点に再現したモデルです。調査地点にお

ける地層構成やN値などの土質情報を、実位置(座標・標高)に基づいて忠実に可視化します。

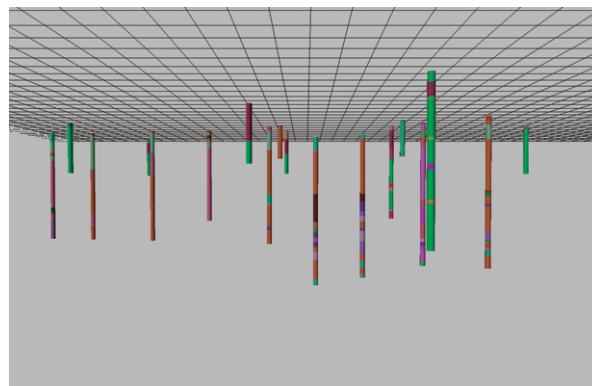


図-4.1 ボーリングモデル

4.2 準3次元モデル

2次元で作成された地質断面図を、3次元空間内の該当する断面位置に配置したモデルです。主に平面図と断面図、あるいは交差する断面相互の整合性を視覚的に確認するために用いられます。

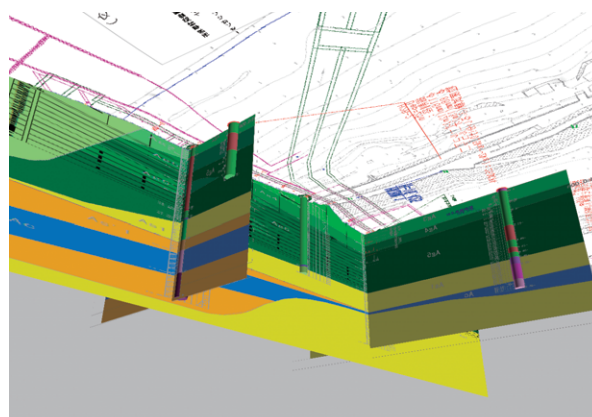


図-4.2 準3次元モデル

4.3 テクスチャモデル

3次元地形モデルの表面に、航空写真やオルソ画像などのテクスチャ(画像データ)をマッピングしたモデルです。現地の現況を直感的に把握することが可能になります。



図-4.3 テクスチャモデル

4.4 サーフェスモデル

地形面や地下水位面、あるいは各層の境界(地層境界面)を3次元の「面」として表現したモデルです。地層の空間的な広がりや勾配を把握するのに適しています。

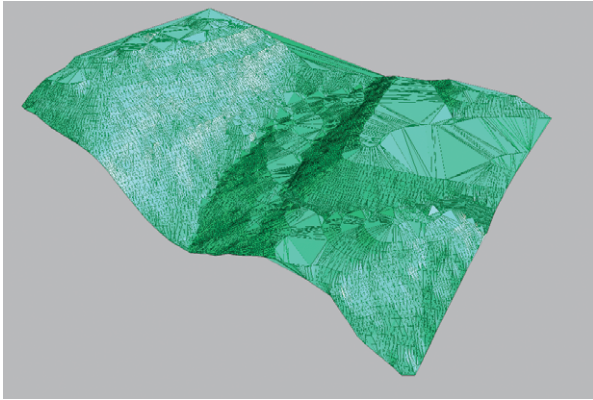


図-4.4 サーフェスモデル

4.5 ボクセルとソリッドモデル

ボクセルモデルは、空間を微細な立方体(ボクセル)の集合体として表現するソリッドモデルの一種です。各ボクセルが物性値を持つため、複雑な地層形状の再現や、ボクセル数のカウントによる精密な体積算出に主眼を置く場合に有効です。

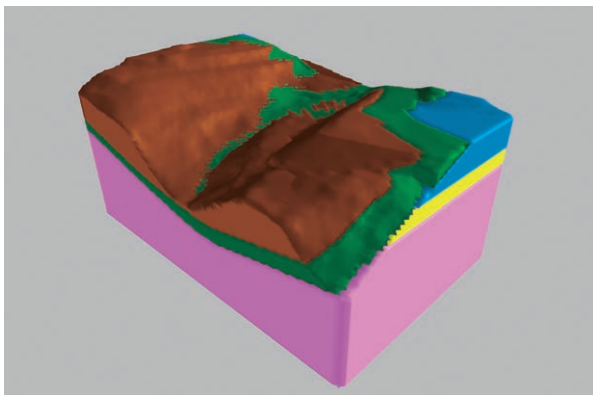
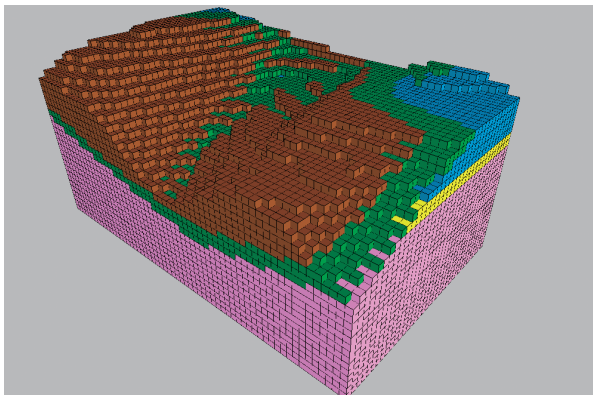


図-4.5 ボクセルとソリッドモデル

4.6 パネルダイアグラム

構築された3次元地盤モデルから、任意の切断面や経路に沿った地質状況を抽出・表現したものです。特定の施工箇所における地質変化を把握する際に活用されます。

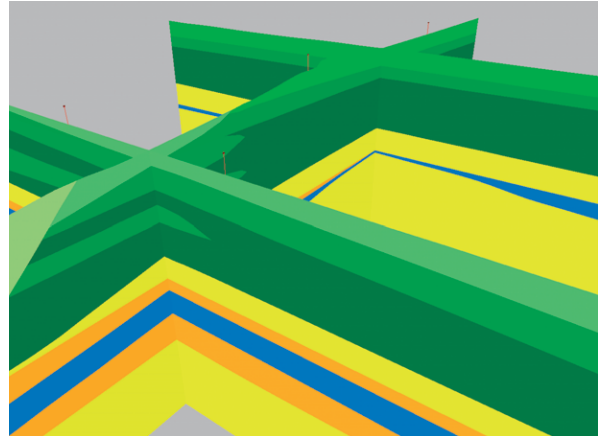


図-4.6 パネルダイアグラム

5. MakeJibanによる3次元地盤モデル作成手順

3次元地盤モデルとは、ボーリング調査結果や地質断面図などの情報を統合し、地下の地層構造や岩盤の空間的広がりを3次元空間で立体的に可視化したものです。

以下では、MakeJibanを用いたモデル空間の定義から、最終成果物であるソリッド地盤モデルの構築に至るまでの各工程と、作成時に考慮すべき要素について解説します。

5.1 MakeJibanの構成

3次元地盤モデル作成支援ソフト「MakeJiban」の基本構成と、各操作エリアの機能について解説します。

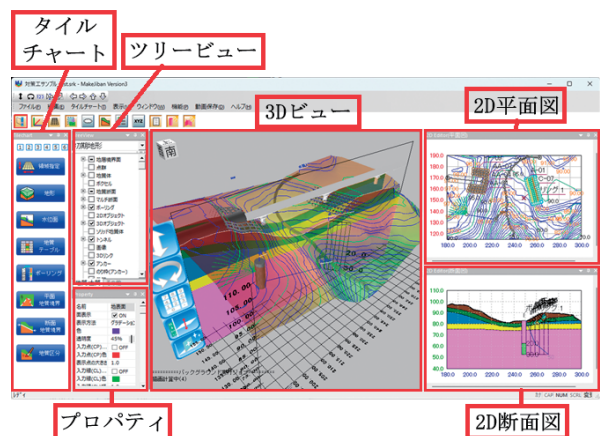


図-5.1 MakeJiban全体画面

・タイルチャート:地盤モデル作成,オブジェクト操作,対策工設計といった作業フェーズに応じて,必要なコマン

ドが動的に切り替わります。これにより、複雑な工程においても直感的な操作体系を実現しています。

- ・ツリービュー: 地形・地層境界面データ、ボーリング柱状図、ソリッドモデルなど、モデルを構成する各要素を階層構造で管理します。CADのレイヤー概念と同様に、要素ごとの表示・非表示の切り替えや編集対象の指定を迅速に行うことが可能です。
- ・プロパティ: ツリービューで選択された各要素の属性や表示形式(カラー設定、透明度、描画スタイル等)の詳細設定・変更を行います。
- ・3Dビュー: 構築中のモデルを3次元空間でリアルタイムに表示するメイン作業領域です。地形、ボーリング、地層、構造物の空間的な位置関係を自由なアングルから俯瞰・検証し、モデルの妥当性を直感的に把握するために活用します。
- ・2D平面図: 地形の等高線や平面的な位置関係、および断面線の配置を確認するための領域です。モデル全体の平面的な整合性を管理します。
- ・2D断面図: 任意の切断面におけるボーリング情報や地層境界を2次元で詳細に表示し、編集を行います。3Dビューと双方向に連動しており、断面形状を精査しながら効率的にモデリングを進めることができます。

5.2 空間定義(モデル領域の設定)

はじめに、モデルを構築する座標系および対象領域(座標範囲)を定義します。あるいは、プロジェクトで規定されている空間情報を正確に把握し、設定に反映させます。

	X座標	Y座標	Z座標
最大値	1000.0	1000.0	500.0
最小値	0.0	0.0	-500.0
幅	1000.0	1000.0	1000.0

図-5.2 モデル領域設定

なお、MakeJibanでは「数学座標系」を採用しているため、適用する元データが測量座標系(公共座標等)の場合は、座標軸の反転(XとYの入れ替え)を伴う座標変換処理が必要となります。

5.3 地形(地表面)モデルの作成

地形は、地盤モデルの最上面を規定する3次元サーフェスモデルとして作成します。

主なデータソースとしては、国土地理院 基盤地図情報(数値標高モデル:DEM)³⁾のほか、CAD平面図から抽出した等高線データ、あるいはUAVを用いた写真測量(SfM解析)や地上レーザースキャナー(LiDAR)による点群データが用いられます。また、作成したサーフェスに地質平面図や航空写真などのテクスチャをマッピングすることで、より情報量の多いモデルへと拡張可能です。

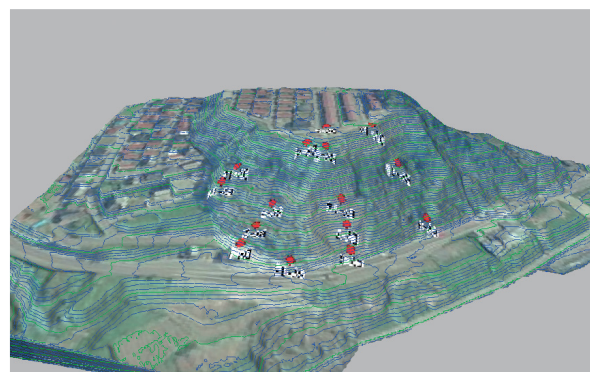


図-5.3 地形サーフェスへのテクスチャマッピング

5.4 ボーリングデータの入力

近年の土木業務では、電子納品成果としてのボーリング柱状図データ(XML形式)⁴⁾が整備されているケースが多く、これらを直接読み込んで可視化します。

MakeJibanでは、ボーリングの平面位置(X, Y)および孔口標高に加え、土質区分ごとの層厚・深度データを利用し、3次元空間内の正確な位置に柱状図を配置します。

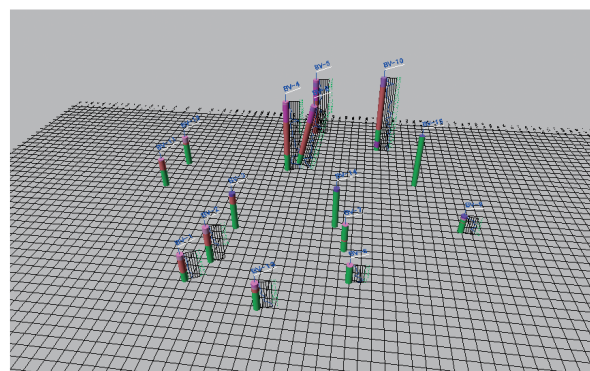


図-5.4 3次元空間におけるボーリング柱状図の表現

5.5 断面作成(断面位置)

地層境界面を推定・入力するための基準となる断面を設定します。

平面図上の中心線、またはボーリング地点間を結ぶラインの平面座標(起点・終点)を指定することで定義します。この断面位置が、次工程における地層境界線の入力ベースとなります。

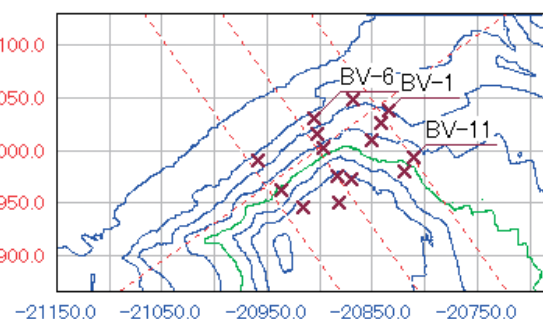


図-5.5 平面図における断面位置の表示

5.6 地層境界面の作成

設定した断面に基づき、複数の断面間で対応する地層線を結び、モデル領域全体に広がる「地層境界面(サーフェス)」を構築します。褶曲や貫入などの複雑な地質構造を表現する場合には、複数の境界面を組み合わせる構築することもあります。この手法は地層面のみならず、地形面や地下水位面の作成においても共通です。

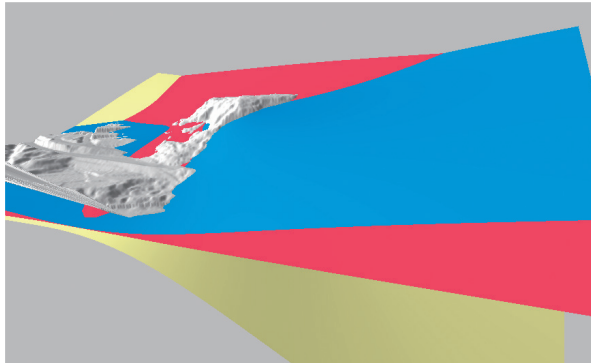


図-5.6.1 地層境界面の表示

MakeJibanでは、地層境界面を作成する手法として主に以下の3種類を備えています。

5.6.1 ボーリング柱状図による区分入力

断面図上に配置されたボーリング柱状図に対し、地質技術者の判断に基づき層区分を行います。同一地層とみなされる箇所をシステム上で直接指定することで、層間を補間する地層境界面を生成します。

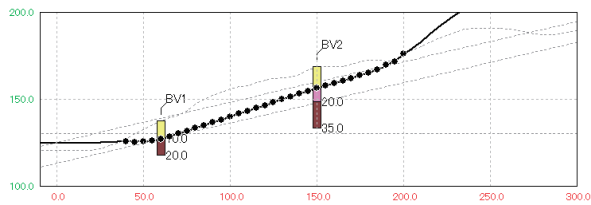


図-5.6.2 ボーリング間の地層境界面のデータ入力

5.6.2 既存の断面図画像からのトレース入力

2D CADで作成された地質断面図や、PDF等の画像資料をMakeJiban内に背景として読み込みます。画像上の地層境界線を直接トレースすることで、既存資料の解釈を忠実に反映した境界面データを作成します。

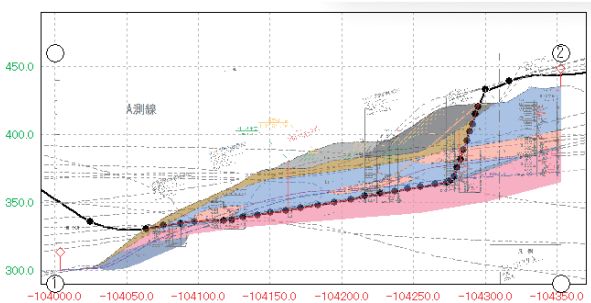


図-5.6.3 地質断面画像をトレースしてデータ入力

5.6.3 外部データのインポート

既に他システムで構築された地層境界面を外部から取り込む手法です。これにより、専用の設計ソフトで作成した道路計画画面や切盛土形状などを地層境界面として反映させることが可能です。

なお、近年のBIM/CIM運用に鑑み、地層境界面の受け渡しにはJ-LandXML⁵⁾形式の活用を推奨しています。

5.7 地質区分(層割の設定)

複数の地層境界面が構築された後、境界面に挟まれた特定の領域を「一つの地層ユニット」として定義する作業を行います。

MakeJibanでは、モデル領域内の上下の境界面で囲まれた範囲を指定し、地質名称を割り当てます。この工程を全領域にわたって繰り返すことで、モデル全体の地質構造を定義します。なお、割り当てる地質種別は、あらかじめ「地質テーブル」機能にて登録しておく必要があります。

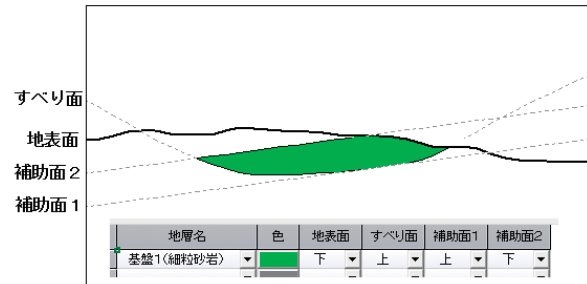


図-5.7 断面での地質指定

5.8 3次元地質体作成(ソリッドモデル)

全ての領域で地質区分が完了した後、モデル領域全体の自動計算を実行します。各区分を3次元的な実体を持つ「塊(地質体)」として統合し、最終的なソリッドモデルを生成します。

この地質体(ソリッド)の構築をもって、3次元地盤モデルの作成工程は完了となります。

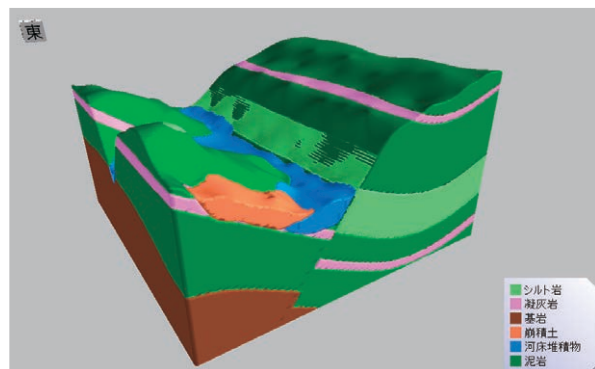


図-5.8 地盤のソリッドモデル

6. 3次元地盤モデル作成時の注意点

3次元地盤モデルは、作成者の技術的判断、採用データの品質、構築プロセス、および要求される精度レベルによって、その成果が大きく異なります。したがって、モデル構築にあたっては「最終的な利活用目的」を明確に定義し、目的に合致した適切な手法とデータを選定する必要があります。

6.1 入力データの品質と位置精度

モデルの信頼性を担保する上で、基盤となるボーリングデータの測量精度は極めて重要です。3次元空間における正確な位置情報(座標および標高)が欠如している場合、隣接するデータとの整合性が失われ、地層境界の逆転や不自然な不連続面が生じる要因となります。

また、モデルの再現性はボーリングのデータ量に依存しますが、単に密度を高めるだけでなく、地層の変化点や重要な構造を網羅する適切な配置が求められます。一方で、過剰なデータ密度はPCの処理負荷を増大させ、操作性を損なう懸念があるため、表現精度と処理効率のバランスを考慮した最適なサンプリングが必要です。

6.2 地質学的・地形学的考察の反映

数値データのみに基づく自動補間では、複雑な地質構造を完全に再現することは困難です。特にデータが希薄な領域においては、地質技術者による地質学的・地形学的考察に基づく推定が、モデルの妥当性を左右する決定的な要素となります。堆積環境や構造運動の履歴を考慮した専門的な知見をモデリングに反映させることで、初めて工学的に信頼しうる地盤モデルが構築可能となります。

6.3 基準となる地層面の選定

地層が複雑に入り組む構造において、各層の境界(上面・下面)のどちらをモデル構築の「基準面」とするかは、非常に重要な判断要素となります。

例えば、支持層の形状把握が目的であれば「支持層上面」を、地すべり解析が目的であれば「すべり面」や「不動層上面」を基準に構築することで、その後の設計・解析へのデータ連携がスムーズになります。利用目的に応じ、どの境界面を優先的に定義すべきかを事前に整理しておくことが重要です。

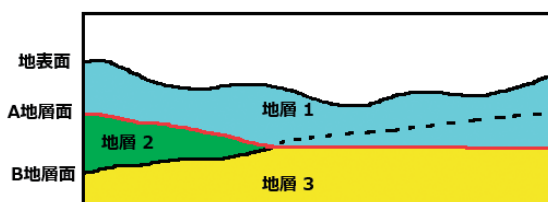


図-6.1 地層1の下面を利用したい場合

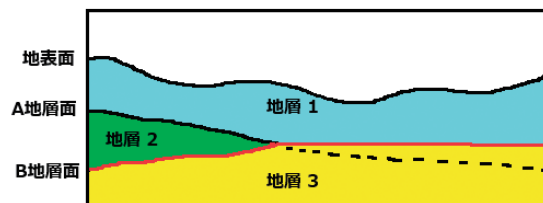


図-6.2 地層3の上面を利用したい場合

6.4 断面間の整合性

各断面図は、断面ライン上のボーリング情報や近接地点からの投影情報に基づき作成されますが、断面が交差する箇所では地層位置が不一致となるケースが散見されます。これは、投影されたボーリングデータの比高補正不足や、2次元的な解釈の限界に起因します。

こうした不整合は、前述の「準3次元モデル」を用いて空間的に俯瞰することで、ズレの原因を客観的に特定できます。これにより、3次元として妥当な地層面の決定が可能となります。

7. オープンデータの利活用

3次元地盤モデルの構築には、広範囲かつ多様なデータソースが必要となりますが、近年は複数の公的機関から高品質なデータがオープンデータとして提供されています。以下に示すプラットフォームを通じて提供されるデータは、事前の登録のみで無償利用が可能であり、モデル構築の効率化に大きく寄与します。

7.1 国土地理院:数値標高モデル(DEM)³⁾

国土地理院の基盤地図情報ダウンロードサービスからは、日本全国の数値標高モデル(DEM)が無償で入手可能です。これらを活用することで、現況地形のベースとなる高精度な地形サーフェスを迅速に構築できます。特に、近年の1mメッシュDEMの公開拡大は、詳細な微地形表現を可能にし、モデルの精度向上に貢献しています。



図-7.1 国土地理院 基盤地図情報

7.2 KuniJiban:ボーリング柱状図データ⁶⁾

国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」では、国土交通省や関係機関が実施した過去の膨大なボーリング調査結果が公開されています。

これらのデータは、サイト上での情報閲覧だけでなく、XML形式(ボーリング交換用データ)でのダウンロードも可能です。データ連携を標準化するこの形式を利用することで、異なる調査主体によるデータをシームレスに統合

できます。



図-7.2 KuniJiban

MakeJibanに同梱されている「基本データ作成ツール」を活用すれば、これら外部データを効率的に一括取得・インポートできるため、手元に詳細な調査データがない初期検討段階等においても、速やかに地盤モデルの構築に着手することが可能です。

また、国土地盤情報センターの「国土地盤情報データベース」からダウンロードしたXMLデータもMakeJibanで活用することができます。

8. 3次元地盤モデルの利活用

構築された3次元地盤モデル(ソリッドモデル)は、単なる可視化ツールに留まらず、解析や設計の基盤データとして活用することでその真価を発揮します。モデルを構成するサーフェス、オブジェクト、ソリッド等の幾何形状データを出力し、他システムと連携させることで、以下のような高度な検討が可能となります。

8.1 斜面安定計算への連携

モデルを構成する地形面、地層境界、すべり面、地下水位面の各形状データは、3次元斜面安定計算に直接利用可能です。これにより、2次元断面では評価が困難な複雑な地形・地質条件における安全率を、より高精度に算出・検討できます。

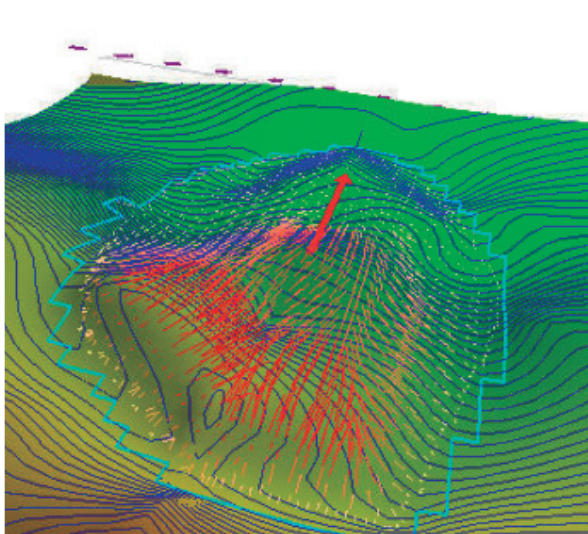


図-8.1 3次元斜面安定解析ソフトSSA_3Dとの連携⁷⁾

8.2 対策工・構造物の設計検討

地形や地層構造(支持層, 定着層, 岩盤線等)を考慮した、最適かつ合理的な対策工の配置検討が行えます。以下に、地盤モデルを基盤とした各種対策工および構造物との相関・活用例を示します。

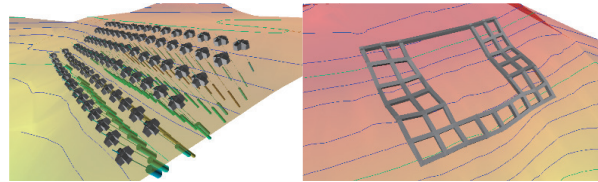


図-8.2.1 グラウンドアンカー工とのり杭工

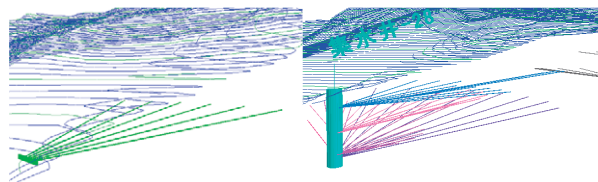


図-8.2.2 横ボーリング工と集水井工

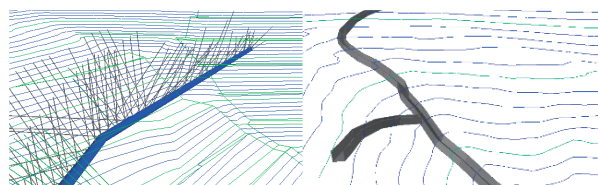


図-8.2.3 水抜きトンネル工と水路工

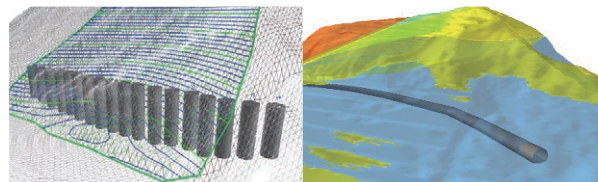


図-8.2.4 抑止杭工とトンネル工

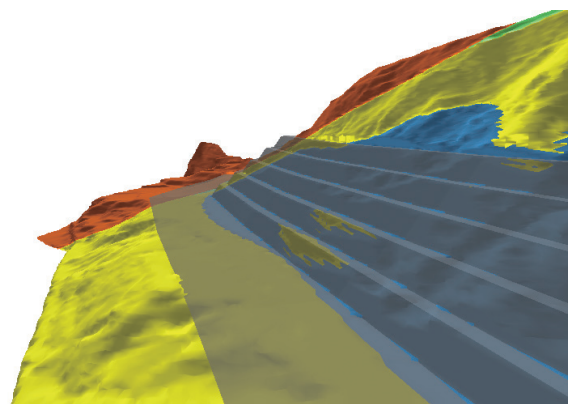


図-8.2.5 道路工と切盛土工

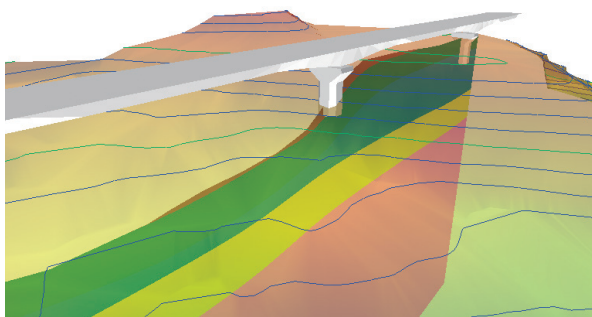


図-8.2.6 橋梁基礎工

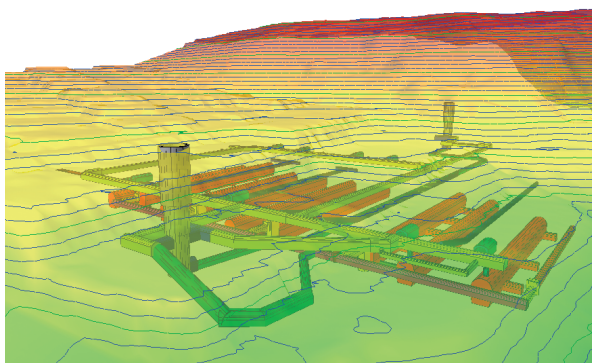


図-8.2.7 地下構造物

8.3 数値解析(構造・変形解析)への展開

モデルから抽出した地質体の幾何形状を、有限要素法(FEM)等の解析ソフトウェアへ引き継ぐことで、地盤の変形や崩壊挙動のシミュレーション、あるいは構造物との相互作用を考慮した詳細な構造解析へのシミュレーションへと展開できます。

9. 3次元地盤モデル化ソフトの紹介

BIM/CIMを推進する全過程において、単一のソフトウェアですべてを完結させることは困難です。そのため、各フェーズで最適な機能を持つソフトウェアを選定し、スムーズなデータ連携を行うことが重要となります。

データ交換の確実性を担保する指標として、一般社団法人OCFによる検定合格ソフトの利用が推奨されます。MakeJiban以外の主な地盤モデリングソフトとしては、OCF認定を受けている「GEORAMA for Civil 3D」や「OCTAS Modeler」が挙げられます⁸⁾。また、汎用モデリングソフトの「SketchUp」や、高度な解析機能を備えた「PLAXIS 3D」「Soil Plus」など、目的に応じて多様なツールが選択肢となります。

10. おわりに

本稿では、MakeJibanを用いた3次元地盤モデルの構築手法から、その具体的な活用メリット、外部データの利活用に至るまでを解説しました。

これまで地盤分野における3次元化は、操作の複雑さやデータ構築の負荷が課題とされてきました。しか

し、BIM/CIMの原則適用という大きな転換期を迎え、MakeJibanのような直感的なモデリングツールの普及や、国土地理院・KuniJibanといったオープンデータの充実、これらのハードルを大きく下げつつあります。

3次元地盤モデルは、単なる可視化のためのツールではありません。設計・施工・維持管理の各フェーズをつなぐ「情報の基盤」であり、地質リスクの低減や意思決定の迅速化を実現する不可欠な資産です。

特に、濃尾平野の厚い軟弱地盤、丘陵地の複雑な埋没谷、中央構造線が走る山間部といった中部地域特有の多様な地質環境においては、この3次元モデルが提供する空間的な知見こそが、合理的で安全なインフラ整備を実現するための鍵となります。

本稿が、読者諸兄の業務における3次元地盤モデル活用の第一歩となり、ひいては建設業界全体のDX(デジタルトランスフォーメーション)推進に寄与できれば幸いです。

参考文献

- 1)国土交通省:BIM/CIMガイドライン(案)第1編 共通編(令和5年3月)
- 2)全国地質調査業協会連合会:3次元地質・土質モデル ガイドブック, pp.30, 2022.
- 3)国土地理院:基盤地図情報ダウンロードサービス(数値標高モデル)
- 4)JACIC:ボーリング交換用データ
- 5)一般社団法人OCF:認定一覧
- 6)国土地盤情報検索サイト
- 7)五大開発株式会社:3次元斜面安定計算システム
- 8)OCF検定認証ソフトウェア一覧, https://ocf.or.jp/kentei/land_soft/

道路事業における 3次元地盤モデル作成

東邦地水株式会社 技術本部 三重技術部 寺地啓人



1. はじめに

国土交通省では、平成24年度から建設関連業における生産性向上の実現を目指し、3次元モデルの導入・活用(BIM/CIM)を推進しています。そして、令和5年度からは、原則としてすべての公共事業でBIM/CIMを適用する方針が示されています。

本稿では、道路事業に係る地質調査業務で作成したBIM/CIMモデル(地質・土質モデル)の事例を紹介いたします。

2. 業務の概要

本稿で取り上げる業務は、国土交通省中部地方整備局北勢国道事務所が発注した「令和4年度1号北勢バイパス地質調査業務」(以下「本業務」)です。北勢バイパスは、三重県北勢地域を南北に結ぶ国道1号のバイパスとして、三重郡川越町南福崎(国道23号)から四日市市采女町(国道1号)に至る延長21.0kmの幹線道路として計画されています。

本業務の目的は、未開通区間における橋梁設計および道路設計に必要な地質構成や地質性状等を把握することです。本業務は橋梁詳細設計、橋梁予備修正設計、道路予備修正設計の3つの設計業務と関連しており、各設計担当者と協議の上、対象区間において調査ボーリング、原位置試験、サンプリング、室内土質試験を計画・実施しました。

3. BIM/CIMモデル作成

3.1 モデル作成の経緯と目的

本業務は、「BIM/CIM活用業務(発注者指定型)」として発注されました。そこで、調査以降の建設生産プロセス(設計・施工・維持管理)においてBIM/CIMモデルの活用(視覚化による効果)による課題解決および効率化を図ることを目的とし、発注者との協議を経て、3次元の位置情報を持つBIM/CIMモデル(地質・土質モデル)を作成しました。

3.2 モデルの構築

(1)モデル作成範囲

BIM/CIMモデル(地質・土質モデル)は、本業務で調査ボーリングを実施した区間で、3つの設計業務の範囲に

対応したモデルを作成しました。

- 1.橋梁詳細設計範囲 区間長280m
- 2.橋梁予備修正設計範囲 区間長880m
- 3.道路予備修正設計範囲 区間長2,500m

なお、道路線形の横断方向は道路用地幅、深度方向は調査ボーリングの最深データをそれぞれ目安としました。

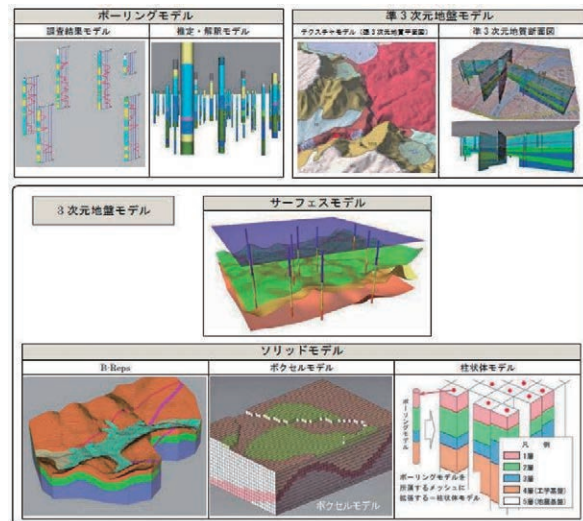
(2)使用したソフトウェア

BIM/CIMモデル作成は応用地質株式会社製の「GEO-CRE」を使用し、モデル確認用ビューアーとして応用地質株式会社製の「OCTAS」を使用しました。

(3)作成した地質・土質モデル

地質・土質分野のBIM/CIMモデル(地質・土質モデル)は表-3.1に示すものがあります。

表-3.1 地質・土質分野のBIM/CIMモデル
(地質・土質モデル)の例¹⁾



本業務では、計画道路の横断方向にボーリングデータが少ないことや、設計業務において2次元の地質断面図を用いた検討が進められている実情を踏まえ、発注者と協議の上、「ボーリングモデル」および「準3次元地質断面図」を作成することとしました。また、橋梁設計に係る2区間のモデルでは、試作として支持層面に関するサーフェスモデルも作成しました。

1) 橋梁詳細設計範囲のモデル

- ・区間長: 280m
- ・使用したボーリング本数: 17本

本区間は二級水系である海蔵川を横断する高架橋区間で、河川低地から段丘にわたる地形です。地質は新第三紀鮮新世の東海層群を基盤とし、その上位に第四紀の更新統、完新統が分布します。本業務および過年度業

務において、本線の高架橋やランプ橋の橋脚・橋台位置、ボックスカルバート位置等で調査ボーリングを実施しており、計画道路の起点側から河川区域の範囲では計画道路の縦断方向、横断方向のデータが比較的多いですが、終点側では横断方向のデータが少ない状況で、モデルを作成しました(図-3.1参照)。

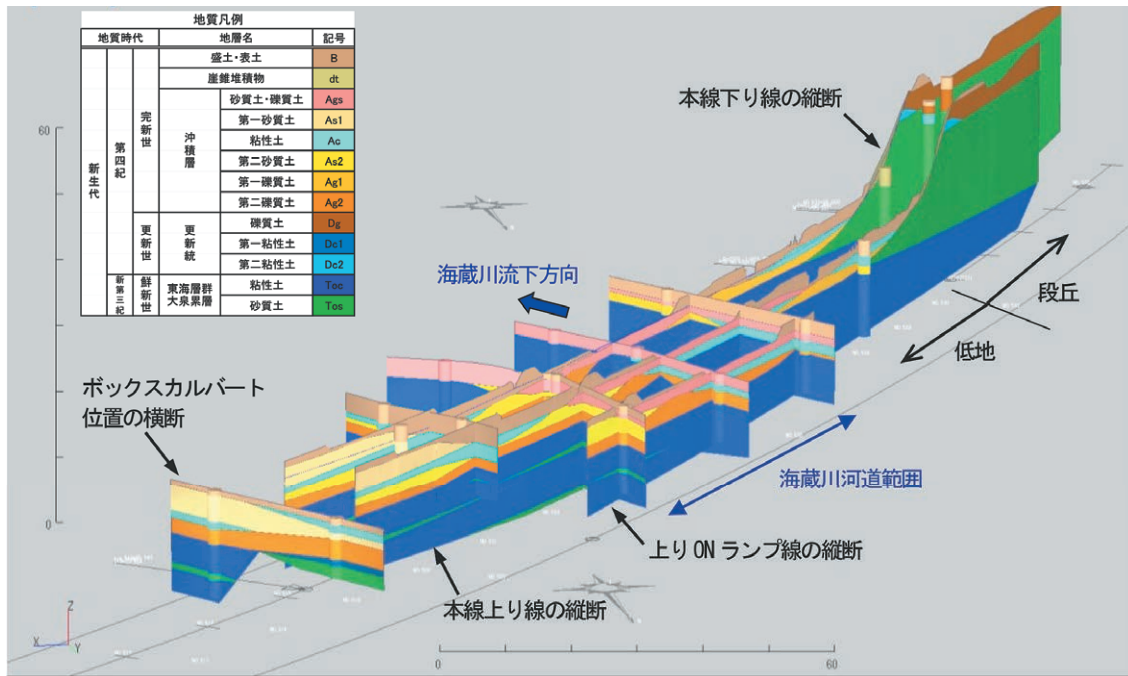


図-3.1 BIM/CIMモデル(橋梁詳細設計範囲のモデル)

2) 橋梁予備修正設計範囲のモデル

- ・区間長: 880m
- ・使用したボーリング本数: 30本

本区間は二級水系である三滝川を横断する高架橋区間で、段丘から河川低地にわたる地形です。地質は新第三紀鮮新世の東海層群を基盤とし、その上位に第四紀の更新統、完新統が分布します。計画道路の起点側にあたる三滝川左岸側では、本線の高架橋やランプ橋の橋脚・橋台位置等で調査ボーリングを実施しておりデータが比較的多いですが、終点側にあたる三滝川の右岸側や河川区域では、調査が左岸側ほど進んでおらず、データが少ない状況でモデルを作成しました(図-3.2参照)。

更新統、完新統が分布します。計画道路の起点側にあたる三滝川左岸側では、本線の高架橋やランプ橋の橋脚・橋台位置等で調査ボーリングを実施しておりデータが比較的多いですが、終点側にあたる三滝川の右岸側や河川区域では、調査が左岸側ほど進んでおらず、データが少ない状況でモデルを作成しました(図-3.2参照)。

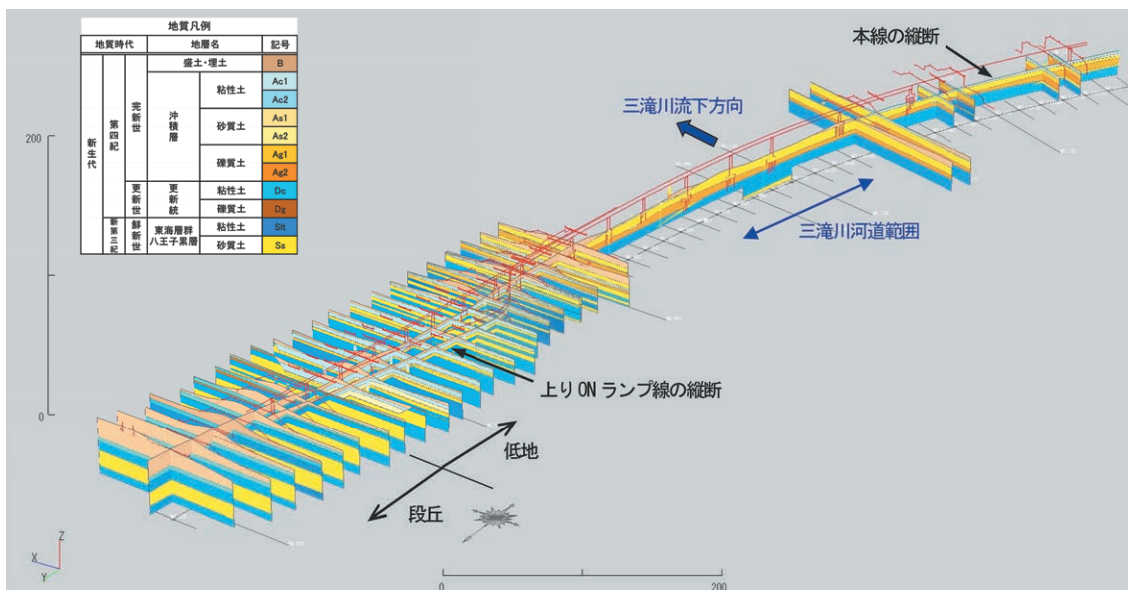


図-3.2 BIM/CIMモデル(橋梁予備修正設計範囲のモデル)

3) 道路予備修正設計範囲のモデル

- ・区間長: 2,500m
- ・使用したボーリング本数: 21本

本区間は丘陵地に計画された土工区間であり、その大半は掘割による切土が計画されています。また、中小河川を横断する区間では橋梁や盛土が計画されています。本区間の設計は道路予備修正設計段階であるため、

調査地の地形地質、計画構造物、既往ボーリングデータの有無などを考慮して調査地点の優先度を設定し、調査ボーリングを実施しました。他の2区間に比べて区間長が長い一方で、縦断方向のボーリング配置は100~200mに1箇所程度、横断方向のボーリング配置は一部の切土・盛土区間で限られており、全体的にデータが少ない状況でモデルを作成しました(図-3.3参照)。

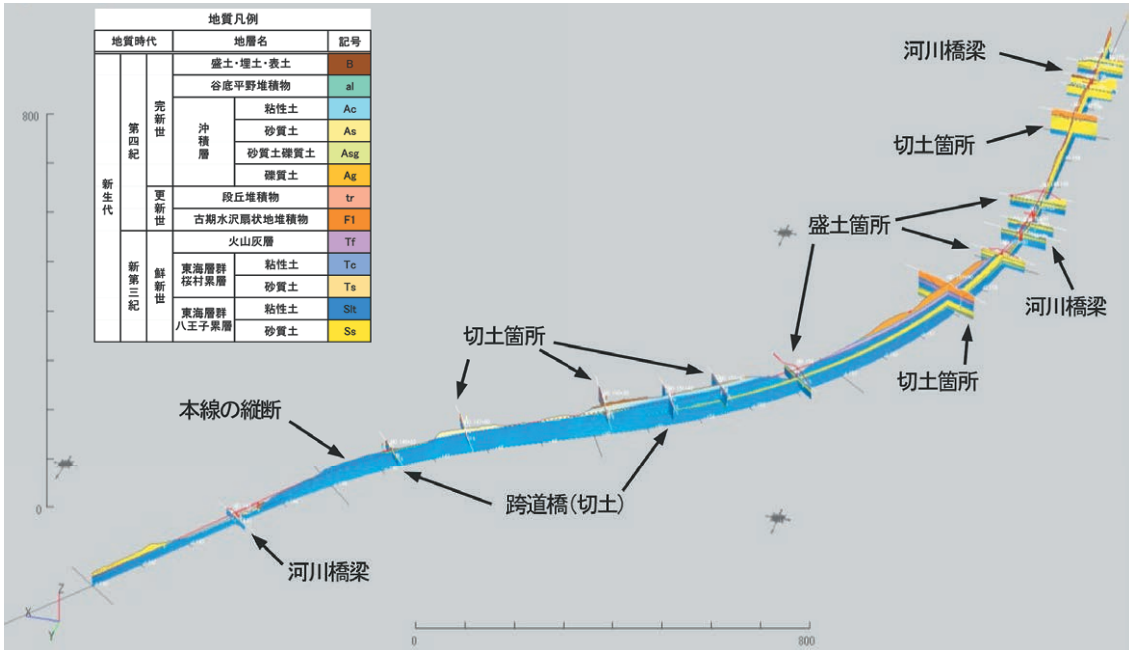


図-3.3 BIM/CIMモデル(道路予備修正設計範囲のモデル)

4. BIM/CIMモデルを作成した所感

4.1 作成したモデルに対する評価

本業務では3つの設計業務の範囲を対象として、「ボーリングモデル」および「準3次元地質断面図」によるBIM/CIMモデル(地質・土質モデル)を作成しました。発注者からは、準3次元地質断面図でも地層の分布状況が視覚的にわかりやすいと高い評価をいただきました。個々の地質縦断面図や横断面図を確認するよりも、同一空間に配置された複数の断面図を同時に確認するほうが、地層の3次元的な広がりを把握しやすくなります。特にランプ部のように路線形状が曲線となる区間では、線形に沿って屈曲させた断面図を用いることで、地質分布のイメージがより捉えやすくなります(図-4.1参照)。

また、試作として橋梁設計区間のモデルで作成した支持層面のサーフェスモデルは、支持層の傾斜方向や勾配を視覚的に確認する上で有効です(図-4.2参照)。ボーリングモデルについても、調査ボーリングの位置と、そこで確認された土質・地質の概略を同時に把握できるため、調査の過不足の確認や後続調査計画の検討等に活用できると考えられます。

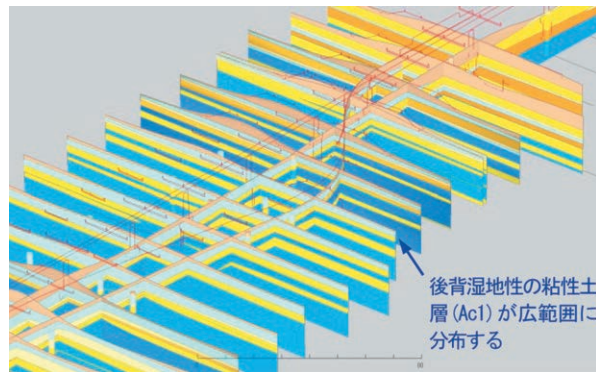


図-4.1 地質分布状況の確認

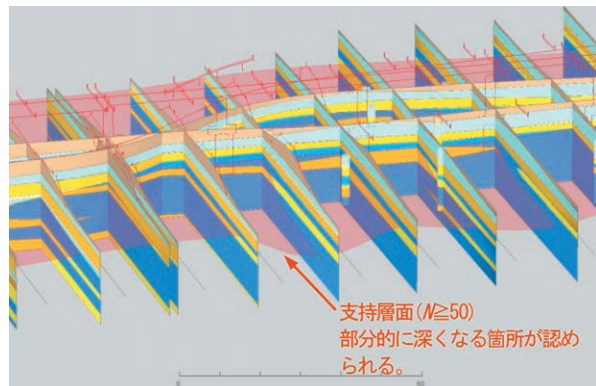


図-4.2 支持層面のサーフェスモデル

一方で、発注者からは「調査データが少ない段階での3次元モデル作成は、後続調査によるデータ追加に伴う修正が避けられないため、モデル作成の労力に対して活用が限定的となり、費用対効果が見込みにくいのではないか」との意見もいただきました。作成したモデルは、あくまで作成時点のボーリングデータに基づく推定モデルです。特に予備設計や予備修正設計段階では、その後の調査で得られるデータによって、推定される地質分布状況が変化する可能性があります。このため、BIM/CIMモデル(地質・土質モデル)を作成する際は、どのような形式のモデルを作成し、それをどのように活用するのかについて、事前に受発注者間で十分に協議し、合意形成を図ることが極めて重要であると再認識しました。

4.2 3次元地盤モデル作成の課題

本業務ではBIM/CIMモデル(地質・土質モデル)として、「ボーリングモデル」および「準3次元地質断面図」を作成しましたが、より高度な「サーフェスモデル」や「ソリッドモデル」を用いた3次元地盤モデルの作成には、以下の課題があると考えられます。

(1) モデルの容量

3次元地盤モデルでは、地表面や地質境界面を「面(サーフェス)」として作成します。地表面は国土地理院の基盤地図情報(数値標高モデル)やレーザー測量による点群データ等を用いて作成します。地質境界面についても同様ですが、広範囲を詳細に表現しようとするとデータ容量が著しく増大し、解析・表示ソフト上での取り扱いが困難になる場合があります。そのため、後述するモデルの品質にも関連しますが、作成目的に応じてモデルの適用範囲や表現の粗密を適切に設定する必要があります。

(2) 3次元地盤モデルの作成プロセスと表現方法

従来、地質調査の成果はボーリングデータから作成した2次元の地質断面図が主体でした。しかし、3次元地盤モデルを作成し、後工程で修正を加えながら活用していくことを考えた場合、2次元の地質断面図を基に3次元化するのではなく、基となるボーリングデータ等から直接3次元地盤モデルを構築し、必要に応じて断面図を切り出すといった作成プロセスの標準化が求められます。また、2次元の地質断面図では、表現可能な薄いレンズ層や指交関係にある複雑な地質境界を、3次元地盤モデルでどのように表現するのかについても、あらかじめ対応方針を協議しておく必要があります。

(3) モデルの品質

道路事業では、計画ルートが低地、段丘、丘陵など、複数の地形にまたがることや、計画構造物が橋梁、トンネル、土工など多岐にわたることが少なくありません。このため、事業の進捗状況や調査目的の違いにより、得られる地盤情報の質と量に偏りが生じやすくなります。例えば、計画

道路の縦断方向にはボーリングデータが複数存在するものの、横断方向にはボーリングデータが乏しい場合や、地形・地盤条件等に応じて計画構造物位置での調査深度(標高)が一定でないなどが挙げられ、これらが作成する地質・土質モデルの品質に直接影響します。地質・土質モデルでは、構造物モデル等で適用される「詳細度」の概念は適用されませんが²⁾、利用可能なデータの質・量と、ソフトウェアで扱えるデータ容量を考慮した上で、目的に応じたモデルの範囲や地質・土質区分の粗密について設定する必要があります。

5. おわりに

設計・施工分野ではBIM/CIMモデルの活用が進んでおり、それに伴い3次元地盤モデルのニーズは今後益々高まることが予想されます。また、地盤は本質的に3次元的な広がりを持つものであり、2次元の断面図で表現するよりも、3次元モデルで表現する方が、その状態を直感的かつ正確に理解する上で優れています。しかし、作成されたモデルは、その時点で得られているデータに基づいて推定されたものであり、調査データの量・質、あるいは地盤そのものが有する不均質性といった要因による「不確実性」を内包していることを認識する必要があります。また、この不確実性の存在を、モデルの利用者に対して的確に伝達・継承していくことが不可欠です。

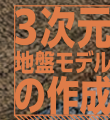
建設関連業における生産性向上の実現を目指し、3次元モデルの導入・活用(BIM/CIM)が推進されていますが、調査で作成したBIM/CIMモデル(地質・土質モデル)はその後の設計・施工・維持管理の各段階で十分に活用されていないのが現状です。今後は、利活用価値の高い3次元地盤モデルの作成を目指し、モデル作成のプロセスを通じて課題を抽出し、モデル作成についてのスキル向上に努めるとともに、先進事例を参考にモデルの利活用に関する知見を深めていくことが重要であると考えます。

参考文献

- 1) (一財) 国土地盤情報センター: 3次元地質・土質モデルガイドブック, p.30, 2022.
- 2) 国土交通省: BIM/CIM活用ガイドライン(案) 第1編共通編, p.76, 2022.

橋梁調査における 3次元地盤モデル作成方法

株式会社東建ジオテック 本店 技術部 主任 林 悠紀



1. はじめに

昨今では建設業界の働き方改革や生産性向上を目的として、DX化が推進されており、設計・施工の分野ではBIM/CIMモデル、いわゆる3次元モデルに情報を付加したデータの利活用が始まっている。しかしながら、地質調査段階での3次元地盤モデルの作成・利活用はまだ主流となっておらず、業務として3次元地盤モデルを作成する事例はまだ少ないと思われる。

今回は、2024年末頃に実際に作成を行った業務事例をもとに3次元地盤モデルの作成方法を紹介する。

2. 業務概要・調査結果

3次元地盤モデル作成の方法を紹介するにあたって、紹介する事例の概要を簡潔に示す。

本事例は河川中流部の2エリア①、②において土木構造物の設計に必要な資料を得るための地質調査を実施したものである。調査地付近の土地条件図を図-2.1に示し、地質推定断面図の一例として①エリア付近の地質推定断面図を図-2.2に示す。

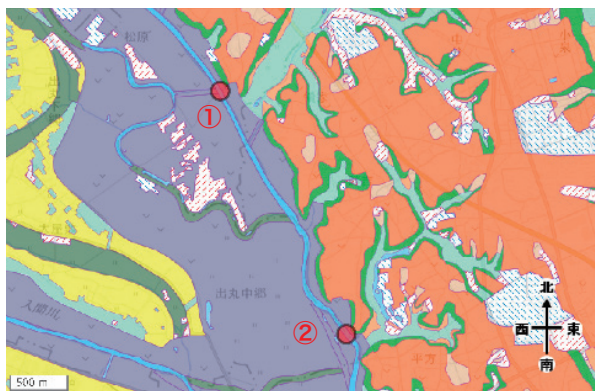


図-2.1 調査地周辺の土地条件図
(「地理院地図 電子国土Web」より一部加筆)

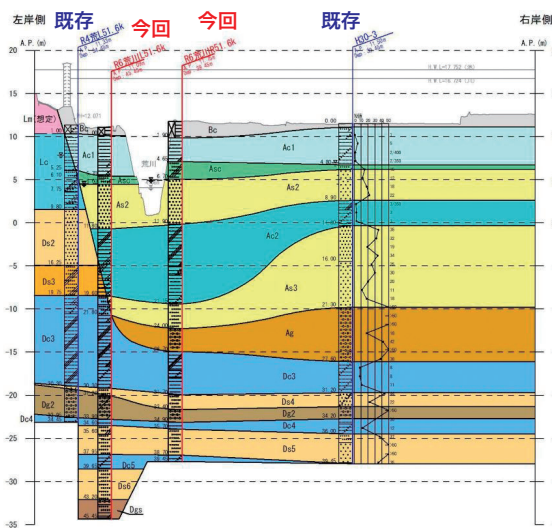


図-2.2 ①エリア付近の地質推定断面図

調査地は河川沿岸にあり、低地に位置しているが、土地条件図を見てわかるように、東側至近に台地が迫っている。この断面図には既存調査によるデータも含まれているが、今回の左岸側の調査地点より40m程度離れた台地に近い既存データでは地表部から沖積層が5m程度と薄いものに対して、今回調査地点は左岸側で20m程度、右岸側で27m程度と厚く堆積しており、層相の変化が激しいことがわかる。また、全体の地層も20層弱あり地層数が多く複雑な分布である。支持層分布の確認において、2次元では表現が難しい支持層の傾きなどの地質構造を3次元モデルで可視化することで、関係者の理解促進や2次元図面の精度向上を図ることを目的として、調査結果をもとに①エリア周辺と②エリア周辺の3次元モデルを作成した。

3. 3次元地盤モデル作成

3次元地盤モデルの作成手順とその留意点を紹介する。3次元地盤モデルを作成するためのソフトウェアは、作成者によって違う可能性があるため、出来るだけソフトウェアに依る作業については記載を避け、一般的な要素について述べる。主なソフトウェアについては、三次元地質解析技術コンソーシアム「3次元地質解析マニュアル Ver3.0.1」¹⁾を参考にされたい。

3.1 3次元地盤モデル作成の環境

本事例で3次元地盤モデルを作成した際の作業環境は以下の通りになる。

OS: Windows 11

CPU: intel i9-10900X

GPU: NVIDIA Geforce RTX3060

メモリ: 64GB

使用ソフトウェア: 五大開発 Makejiban Version2

3.2 3次元地盤モデル作成範囲の設定

3次元地盤モデル作成にあたって、モデルを作成する範囲を設定する必要がある。これは、単純に業務目的に応じて必要な範囲を選定すればよい。ただし、後述する使用ボーリングデータの選定・収集を行った上で、改めて範囲の検討を行うことが推奨される。これは、調査範囲内で十分な量・間隔でボーリング調査を行っている場合は問題ないが、ボーリングデータが少ない場合や、既存データ等を利用する場合は、調査範囲内で地盤データの粗密が発生し、情報精度の不確かな範囲が出来てしまう場合があるからだ。

本事例では調査地付近の地層の変化を表現することが目的であるため、やや広範囲であるが、調査地を中心付近に据えたおよそ700~800m程度四方の範囲のモデルを作成することとした。

3.3 3次元モデル作成に使用するデータの選定・収集

a. 地形データ

地形データは3次元モデルを作成するにあたって重要な基図になるものである。レーザ測量等で得られた点群データや、格子状に標高データが配列されたDEMデータ、等高線データ等がある。

測量で得られた点群データの方が詳細度も高く現場に即した状態でのデータであるため、測量で得られたデータを使用することが望ましいが、データがない場合は、国土地理院のWEBサイトで「基盤地図情報数値標高モデル(5mメッシュ、10mメッシュ)」²⁾が無償提供されているため、そちらを使用することも可能である。本事例では国土地理院が提供する基盤地図情報5mメッシュデータを使用した。

b. ボーリングデータ

ボーリングデータは3次元地盤モデルを作成するための基盤となる重要なものである。調査で得られたボーリングデータを使用することが基本であるが、既往調査データや国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」³⁾を始めとする国や各自治体がWeb上のデータベースで公開されているものを追加し使用することも考えられる。なお、公開データを使用する場合は公開している各データベースの利用規約等をよく確認し、それに準拠することが必要

である。

既往データや公開データを使用する場合の注意点として、標高や緯度経度について確認が不可欠である。

標高について、「Kunijiban」で公開されているデータは国交省に電子納品されたデータであるので、平成20年12月以降の「地質・土質調査成果電子納品要領(案)」が適用されている。そのため、「Kunijiban」で公開されているデータは基本的にはT.P.表記であるはずだが、平成20年以前の古いデータでは、T.P.として登録されているものの実際には違う可能性がある。また、既往データや地方自治体の古いデータ等はA.P.やO.P.、その他のローカルな標高基準を使っている可能性が考えられる。実際に使っている標高の種類は確認できないことが多く、実際の地表高と合わせて乖離したものは修正、ないしは修正しても大きく乖離する場合は除外せざるを得ない等の措置が必要である。

緯度経度について、調査位置を調査位置図からCAD等の平面図にプロットして位置座標を直接取得する場合にはあまり確認する必要はないが、緯度経度から位置座標に変換する場合は、古いデータのものは注意が必要である。2001年の測量法改正以前には日本測地系が使用されていたため、日本測地系で得られた緯度経度をそのまま使用してしまうと現在の世界測地系の座標とはズレが発生してしまうからである。

本事例では今回調査結果に加え、調査範囲内に存在する「KuniJiban」で公開されている柱状図を使用した。実際に入手した既往データや「Kunijiban」データのうち、ローカル標高表記と思われるデータがあったため修正を行って使用した。

ここまでで設定した3次元地盤モデル作成範囲と収集したボーリングデータの位置図を図-3.3.1に示す。

c. 収集データの配置準備

モデルの作成範囲を定義するために、作成範囲の端部の座標を取得する必要がある。また、収集・採用したボーリングデータを3次元地盤モデル内に配置するために、各データの位置座標を取得する必要がある。座標の取得方法は、平面CAD上で調査位置図から直接各地点の座標を読み取る方法のほか、緯度・経度を平面直角座標に換算する方法がある。一般的なソフトウェアであれば、数学座標であるのでX座標が経度、Y座標が緯度、Z座標が標高に相当する。測量座標と数学座標ではXY座標が逆になっており、座標の読み取りや、入力の際に緯度と経度を取り違えやすいのでよく注意する。

d. 地層区分(断面図作成)

収集・採用したボーリングデータを使用するにあたって、地層区分を行う必要がある。既往調査や公開データと新規の調査でのデータを一つのモデルの中で同時に存

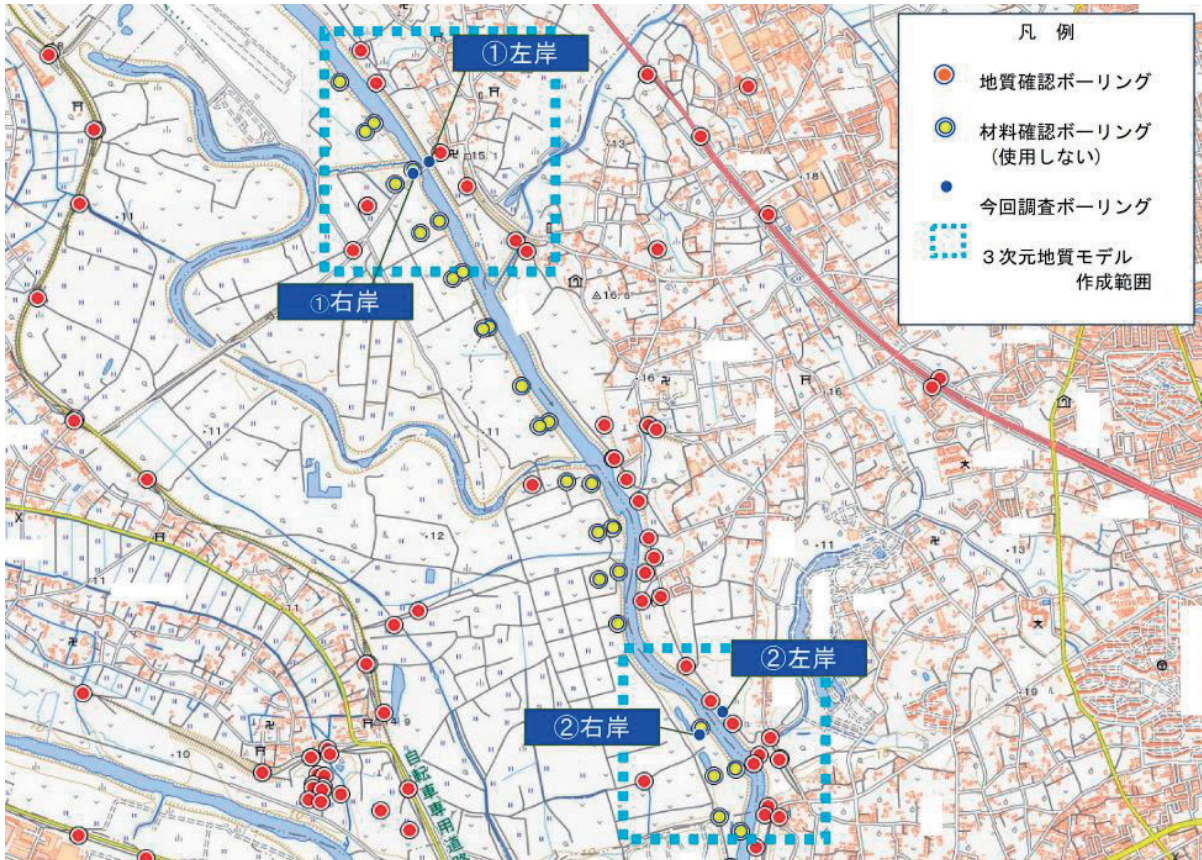


図-3.3.1 3次元モデル作成範囲と使用データの位置図(「国土情報検索サイト Kunijiban」より一部加筆)

在することになるため、それぞれの層序を統合して整合性を持たせる必要がある。

ソフトウェアによってはCAD上で作成した断面図データを読み込むことが出来るものもあるが、そういった機能がない、あるいは利用しないのであれば断面図作成までは必要ないと思われる。

3.4 地質モデルの作成

実際にソフトウェア上で行う3次元地盤モデルの作成は以下の手順で実施する。

ア) 事前に取得したデータの配置

前述の「3次元地盤モデル作成に使用するデータの選定・収集」に取得した地形データの点群ファイルやボーリングデータのXMLファイルをソフトウェアに読み込ませ、その座標を入力することで3次元地盤モデル内に配置する。ボーリングデータの配置座標を指定している状況を図-3.4.1に示し、①エリアの地形データとボーリングデータを読み込んだ状態を図-3.4.2に示す。

XY座標の入力替え		X	Y	Z	方向X1	方向Z1	編集	有効
1	No.1	-25894.42683	-5200.87889	18.76	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
2	No.2	-25924.2086	-5128.60616	18.87	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
3	No.3	-25924.2086	-5128.60616	12.36	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
4	No.4	-26110.24832	-5000.2454	10.91	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
5	No.5	-26106.85431	-5000.82932	9.24	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
6	No.6	-25983.85932	-5216.55635	2.44	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
7	No.7	-25989.82338	-5194.9519	15.97	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
8	No.8	-26366.16476	-5278.66756	6.76	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
9	No.9	-26217.11528	-4869.15074	10.47	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
10	No.10	-25962.46419	-5185.49226	10.41	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
11	No.11	-25944.89263	-5396.25419	11.54	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
12	No.12	-25894.16995	-5403.37271	14.58	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
13	No.13	-25933.57718	-5365.83777	18.61	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
14	No.14	-26056.89477	-5071.72201	10.89	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
15	No.15	-26133.86436	-4992.15049	11.37	0.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>
16								<input type="checkbox"/>
17								<input type="checkbox"/>
18								<input type="checkbox"/>
19								<input type="checkbox"/>
20								<input type="checkbox"/>

図-3.4.1 ボーリング調査位置配置状況

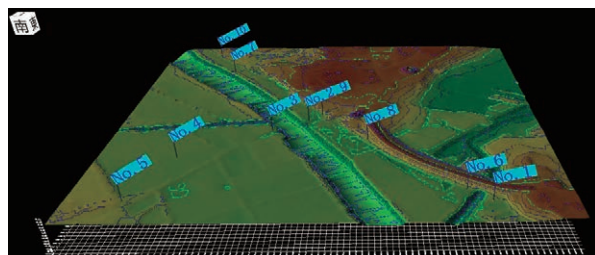


図-3.4.2 ①エリアのモデルで地形データとボーリングデータを読み込んだ状態

イ)地層境界面の設定

地層境界面は3次元地盤モデルというサーフェスモデルにあたる。まず、使用する全ての地層の情報をソフトウェアに入力する。その後、3次元モデル内で断面の辿る座標を入力して断面線を作成する。基本的には、配置した柱状図の位置を通る断面線を複数設定する。

作成した断面上で配置したボーリングデータに合わせて地層境界が通る点のデータを設定する。この点データをもとに地層境界面が作成される。

点データ間は直線で結ばれるわけではなく、計算方法はいくつかあるがソフトウェア内での推定計算によって補完された線及び面が出力される。この時、地点間に距離があると想定とは大きくかけ離れた曲線が作成されることがあるため、地点間の辿ってほしい点にポイントを多数配置するように工夫した。また、ボーリングデータが少ない範囲等、地層境界面がコントロールしづらい範囲がある場合は、その範囲を通る任意の断面線を設定し、地層境界を推定した点データを作成することで地層境界面のコントロールがしやすくなる。本事例では、ボーリングポイントを通った断面線のほか、地層境界面を調整するための対象範囲を横断、縦断する断面線を複数設定した。設定した断面線の一例を図-3.4.3に示す。

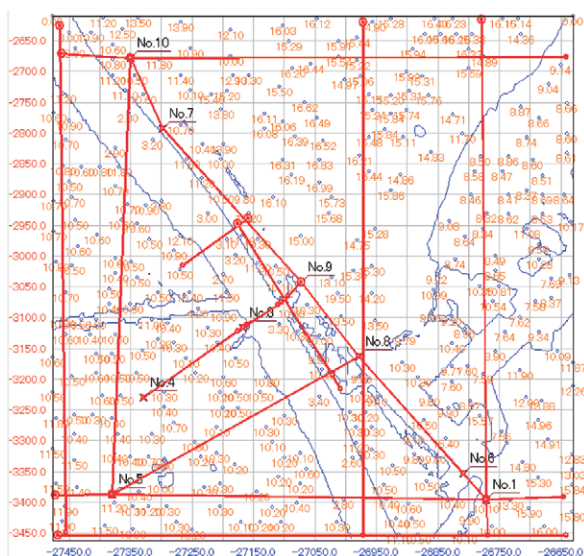


図-3.4.3 断面線を配置した状態

断層や挟み層、オーバーハング等は、地層表現用の地層境界面を作成する等により複数の面を用いて表現するとよい。

本事例では、3次元地盤モデル作成の目的として沖積層と洪積層の境界が重要であるが、機械的に各地層を設定した場合、沖積層の地層群と洪積層の地層群の境界部がガタガタとしたずれた形になってしまっていた。本来の地層境界は洪積層の地層群が侵食等によって削り取られて形成された連続した滑らかな境界面になっているはずであるため、それを表現するために、本来の各地層の境界面とは別に沖積層と洪積層の境界面を作成した。また、地層の変化が激しい箇所を細かくコントロール用の点データを作成した上で、想定する境界線が引けるまで、いくつかある地点間の推定計算方法を変更して試行錯誤を繰り返して作成した。地層境界面コントロール用の点データを作成する前と作成した後の断面モデルの比較を図-3.4.4に示す。

地層境界面を不備無く作成するためには、作図範囲の地質的形成過程を的確に考察することが求められる。それらの考察を行うためには、十分なデータと対象地域に精通した地質技術者が作成にかかわることが重要である。

ウ)地質体の作成

地質体はいわゆる地層の3Dオブジェクトである。3次元地盤モデルというソリッドモデルやボクセルモデルにあたる。各地層についてそれぞれこれまで設定した各地層境界面を基に上や下等の条件を指定することで、その条件を満たした範囲でボクセルやソリッドなどを用いた3Dオブジェクトが生成される。

作成した3次元地盤モデルで沖積層の地質体を除いたものを次頁の図-3.4.5、図-3.4.6に示し、地層の変化を表現した図を次頁の図-3.4.7、図-3.4.8に示す。

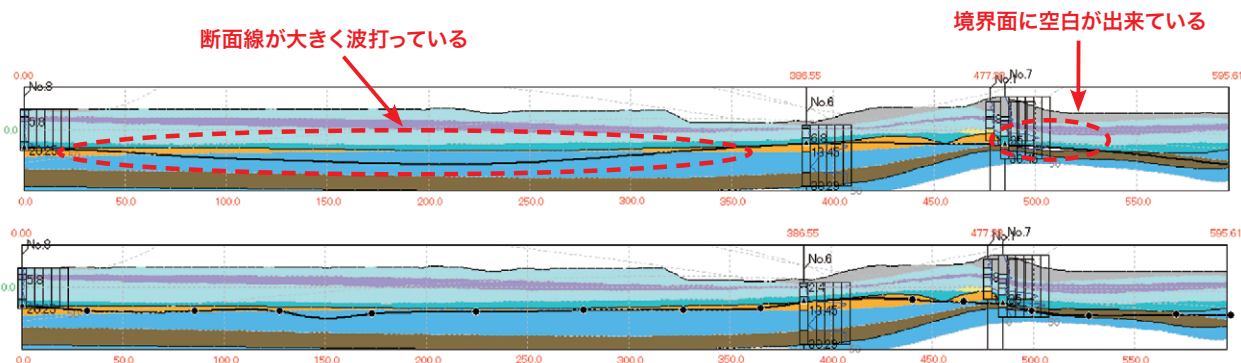


図-3.4.4 ボーリングデータがある地点のみ点データを配置した場合(上)と点データを追加で配置した場合(下)

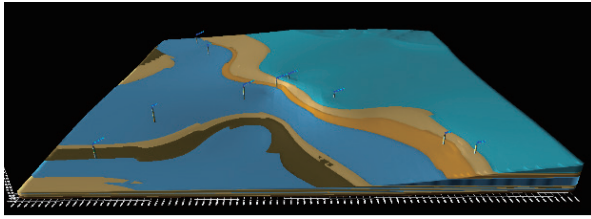


図-3.4.5 ①エリアの沖積層を除いた3次元地盤モデル

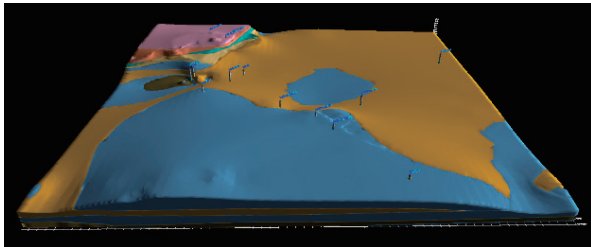


図-3.4.6 ②エリアの沖積層を除いた3次元地盤モデル

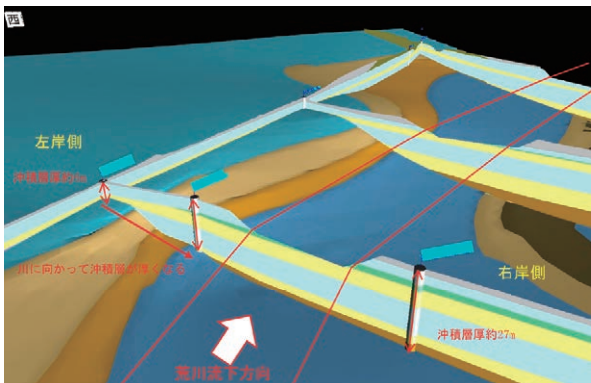


図-3.4.7 ①エリアの地層の変化を表現した図面

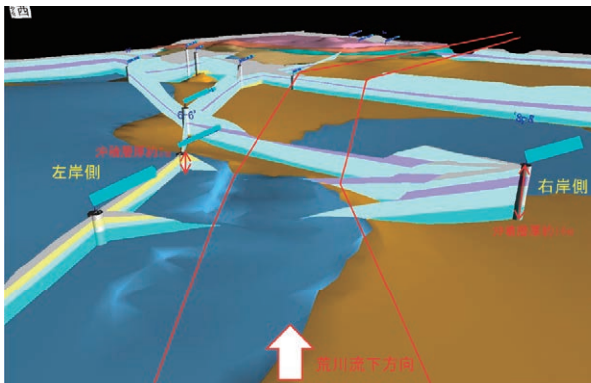


図-3.4.8 地層の変化を表現した図面

エ)その他、計画構造物の挿入

必要に応じて、3次元地盤モデル内に計画構造物等のオブジェクトを挿入・配置する。計画構造物等の3Dオブジェクトが提供されている場合は、それらを使用ソフトウェアで読み込んで、作成した地質モデル内に縮尺等を合わせて配置する。計画構造物等の3Dオブジェクトが無ければ使用しているソフトウェアの機能、もしくはその他3DCAD機能のある別ソフトウェアで配置したい3Dオブジェクトを作成し、使用している3Dモデルを作成して

いるソフトウェアに読み込んで、モデル内に配置する。本事例では、事前に提供された計画構造物の3Dモデルはなかったため、直接基礎を想定した場合と、杭基礎を想定した場合の2パターンの支持層を表現するために、直方体状のオブジェクトと円柱状のオブジェクトを別途3D機能のあるCADソフトを使用して作成し、作成した3次元地盤モデル内に配置した。作成した3次元地盤モデル中の断面モデルと仮構造物を表示した状態を図-3.4.9に示す。

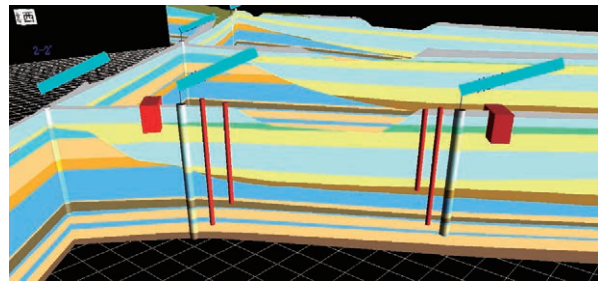


図-3.4.9 モデル中に仮構造物を配置した状態

オ)引き継ぎ書の作成

3次元地盤モデルは、モデル作成に用いたボーリングデータ以外の箇所はソフトウェアによる推定や技術者による推定となる。ジャストポイントの調査データのない推定範囲では、程度の差はあれ不確実性を持つものである。そのため、不確実性を後工程に引き継ぐために不確実性のある情報を記録する必要がある。引き継ぐ情報としては、解析の考え方や、推定アルゴリズム、地質解釈の根拠となる文献資料の明示・参照先、不確実性を評価した方法等である。使用する引き継ぎ書は国交省が「3次元モデル作成引継書シート⁴⁾」を公開しているのでこれを活用することが望ましい。

4. 3次元地盤モデル活用のための課題

作成した3次元地盤モデルを今後活用していくにあたって、今回3次元地盤モデルを作成した際に特に感じた課題とそれに対して考えられる対策を以下に2点あげる。

・地層分布の不確かさを表現できないこと

これは本事例の失敗談の一つではあるのだが、本3次元地盤モデルでは使用したボーリングデータが少ないため、地層の正確性を担保できない範囲があることが、3次元モデル作成範囲を決定した後に使用するボーリングデータを集めている段階で発覚した。例として①エリアの地層の正確性が担保できない部分を図-4.1に示す。このことについては、成果物提出の際に引継ぎ事項として申し送りをしたが、今後3次元地盤モデルが独り歩きをする可能性も考えられる。設定した範囲内で3次元地盤モデルとして明確に描画されることで、引継ぎ事項を見なければどの部分がどの程度の不確かさであるかわからないま

ま使用される懸念がある。

今後の対応としては、前述したように3次元地盤モデル作成範囲を決定する際は、ボーリングデータを先行して収集し、ある程度の正確性が担保できる範囲を設定する必要があると考える。

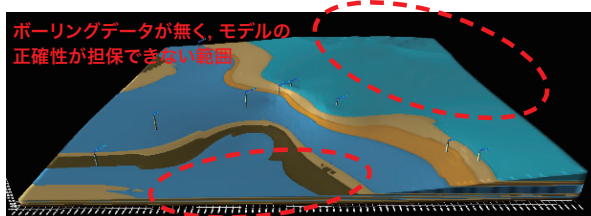


図-4.1 ①エリアモデル中の正確性が担保できない範囲

・段階ごとの使用ソフトが不明なこと

3次元地盤モデルを作成する我々調査は、最初の段階であり、調査後の設計・施工・維持管理各段階で使用するソフトウェアは不明確である。それらのソフトウェア全てで取り扱えるような3Dモデルを作成することができるのか確認は取れていないが、土量の計算などソフトウェアごとに独自の機能を使用している場合があり、現段階では難しいと考える。つまり、現状では各段階でそれぞれが使用ソフトウェアに合わせて十全に使えるように3次元モデルの手直しをする必要があると思われる。ソフトウェア間の互換は、共通した仕様をもとに引き継いだ3次元モデルデータを出来るだけ元の状態に再現し、それぞれの機能が使用できるようにすることが必要である。現在、LandXML及びJ-LandXMLというデータフォーマットがあるため、それを足掛かりに各ソフトウェア間の互換性が広まっていくことを期待する。

5. まとめ

本事例では、納品の際にノートPCを持ち込み、専用ビューアを用いることで、発注者の目前で実際に作成した3次元地盤モデルを動かし、基盤となる洪積層の傾斜や軟弱な沖積層の層厚の変化等を説明した。発注者にはそれによりご納得頂けて本来の目的を達成することができた。しかし、納品したデータが今後の工程で満足に使用できるデータなのかはわからず、課題が残る状態である。

建設工事は測量、調査、設計、施工、維持管理と各段階に分かれており、各段階で使用されるソフトの特徴も異なるが、測量・設計・施工では利活用が進んでいるため、地質調査成果の連携も今後強化されるのではないかと考えている。

3次元地盤モデルは、今後ますますの発展が期待される技術でもある。今後のソフトのアップデートのみならず、技術研鑽による自身のアップデートも楽しみながら行っ

ていきたい。また、本記事が読者の方々の3次元モデル作成の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 3次元地質解析技術コンソーシアム「3次元地質解析マニュアル Ver3.0.1」<https://www.3dgeoteccon.com/3%E6%AC%A1%E5%85%83%E5%9C%B0%E8%B3%AA%E8%A7%A3%E6%9E%90%E3%83%9E%E3%83%8B%E3%83%A5%E3%82%A2%E3%83%AB>
- 2) 国土地理院「基盤地図情報ダウンロードサービス」<https://service.gsi.go.jp/kiban/app/>
- 3) 国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」<https://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/service.html>
- 4) 国土交通省「BIM/CIMポータルサイト」https://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/standard_old.html

斜面と地下構造物

応用地質株式会社 東京支社 防災リスクコンサルティング部 グループマネージャー 田中康博



1. はじめに

ダムや橋梁などの上部構造物においては、令和5年度より国土交通省直轄の土木工事や詳細設計でBIM/CIM原則適用が開始され、3次元モデルが成果物として納品される体制が整備されつつある。

一方で、地盤の3次元モデル作成は依然として推奨項目(図-1)に留まっており、活用の不足に起因して、地下構造物と地盤・斜面との干渉把握における課題が生じている。

調査段階で地盤3次元モデルを構築し、予備設計段階で地下構造物モデルと統合することで両者の関係性を明示すれば、詳細設計において地盤が構造物に及ぼす影響の可視化が可能となる。これにより、変状リスクの高い箇所に対する補強対策の見落とし防止が期待できる。また、施工段階では掘削前面の地質状況が予測可能となるため、施工リスクの低減に寄与する。さらに、維持管理段階でトンネル等の地下構造物に異常が確認された際も、その要因が地盤に起因するものか否かの迅速な判別が可能となる。

本稿では、斜面と地下構造物の関係性を3次元モデルにより可視化し、事業効率化および品質向上に寄与した事例について報告する。

○：義務 ○：推奨

		測量 地質・土質調査	概略設計	予備設計	詳細設計	工事
3次元モデル の活用	義務項目	-	-	-	○	○
	推奨項目	○	○	○	○	○
対象としない業務・工事		> 単独の機械設備工事・電気通信設備工事、維持工事 > 災害復旧工事				

図-1 BIM/CIM原則適用の適用範囲¹⁾

2. 地すべり事業での事例

地すべり防止施設の配置計画を検討する際は、3次元すべり面と地すべり防止施設の3次元的な位置関係を適切に把握する必要があるが、BIM/CIMを活用することにより、3次元的な位置関係が視覚化され、適切な理解が促進され、事業効果に貢献する。また、地すべり防止施設の効果評価を行うためには、整備状況に応じて地下水面などの地中の情報を時系列的に把握する必要がある。

地すべり対策工の配置検討は、現在、2次元断面と経験則からの定性的評価によりなされており、対策工設計が過大にも過小にもなり得る状況である。特に直轄地すべり事業では、対策規模が大きいことに加え、変位が収

束せず、地すべり事業が長期化するケースも多い。そのため、対策工効果の見積りは、事業計画の合理性を説明する上でも重要な課題となっている。

2.1 甚之助谷地すべりの事例

甚之助谷地すべりでの事例は、地形地質、すべり面、地すべり対策工といった要素を地すべり3次元モデルとして統合し、地すべりブロックと対策工変状位置の関係性を明らかにした²⁾(図-2.1.1)。

3次元モデルの構築により、中間尾根ブロックの側部が、図-2.1.1に示す河床の左岸側まで到達し、左岸ブロックを包含することが明らかになった。また、地すべりブロックの底部が、河床部よりも深部に位置することが示せた。

中間尾根ブロックの3次元形状が明らかになったことで、対策工の変状が、どの地すべりブロックによる変状であるかを視覚的に示すことができた。

また、2号集水井では、掘削時に高角度の黒色粘土からなる破碎帯が確認されていた(図-2.1.2の矢印位置)。2号集水井の地すべり活動に伴う変状は、この破碎帯付近で発生していた。しかし、この破碎帯の走向傾斜は、左岸ブロックの底部や側部の走向傾斜とは異なっていた。そのため、この破碎帯の形成が、地すべりによるものかどうかの確証が得られていなかった。

今回のモデリングにより、中間尾根ブロックの3次元モデルでの側部の走向傾斜と破碎帯の走向傾斜が概ね一致することから、左岸ブロックではなく、中間尾根ブロックの活動による破碎帯であるとわかった。

したがって、2号集水井の変状は中間尾根ブロックの活動によって生じていたことが明らかとなった。

3次元モデルを用いた解析の結果、集水井の変状要因は、当初推定されていた左岸ブロックではなく、中間尾根ブロックの挙動によるものであることが判明した。これにより、地すべりメカニズムの解明が大きく進展した。

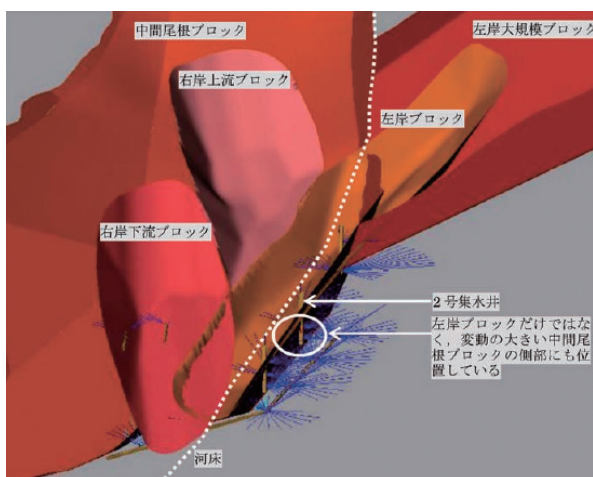


図-2.1.1 すべり面と地すべり対策工の関係²⁾

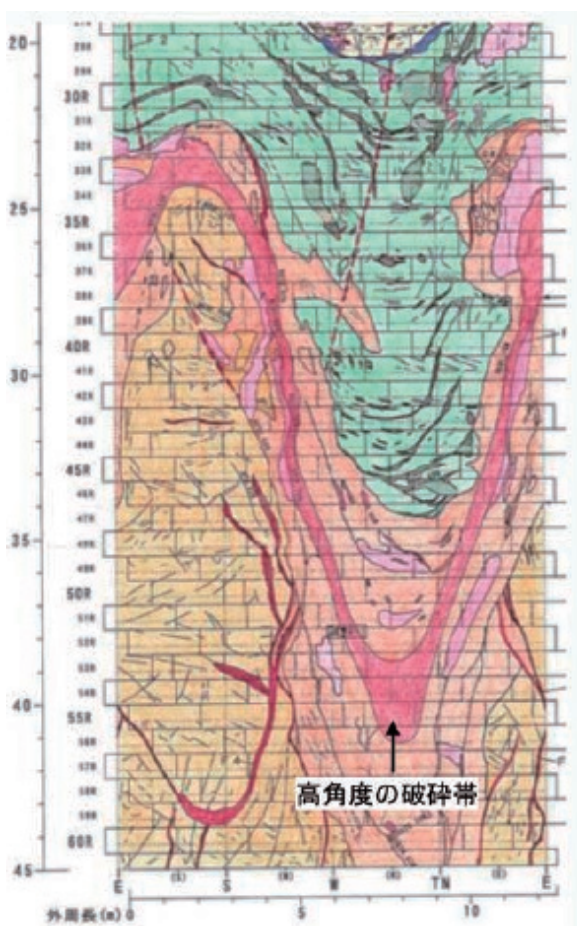


図-2.1.2 2号集水井壁面スケッチ²⁾

2.2 怒田八畝地すべりの事例

怒田八畝地すべりでも、甚之助谷地すべりと同様に、すべり面と地すべり対策工の関係性を可視化し、事業効果検証に活用した。

3次元モデルは地形地質、すべり面(変位深度)や地下水等の地盤情報のほか、調査観測施設、対策施設等をモデル化した³⁾。

当モデルは地すべり対策工検討や事業効果把握において3次元データとして活用されている。その他に、画面キャプチャし2次元画像として説明等の場面で利用され

ることも多い。その場合、すべり面や地下水面等のサーフェス(面)は2次元画像では色の濃淡のみのため、わかりにくくなる問題点がある。このため、サーフェスの等高線を作成して、モデルに組み込むことで、2次元画像でも読み取りやすくする工夫を行った(図-2.2.1上)。また、対策施設と地下水面、すべり面の交差関係が判り難くなるため、オブジェクトの追加や色調を調整して、視覚的に判りやすくする工夫を行った(図-2.2.1中、下)。

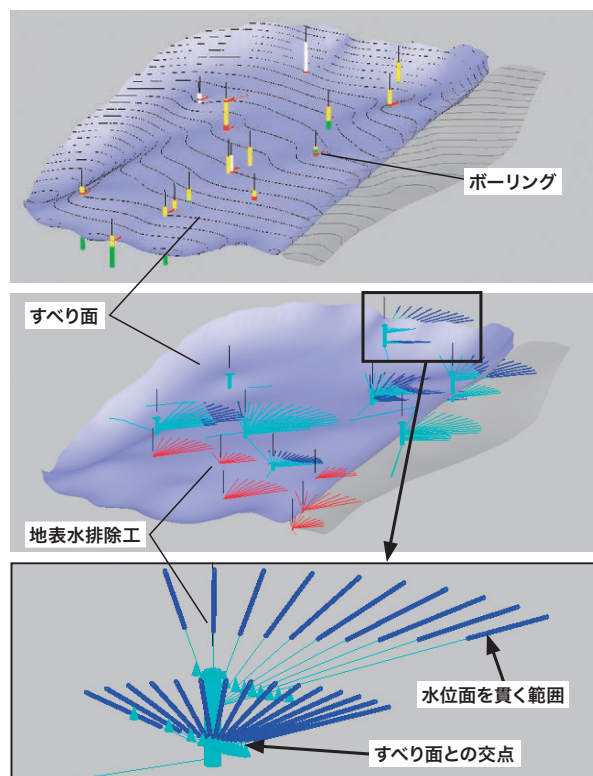


図-2.2.1 怒田八畝地すべりでの3次元モデル³⁾

3. 道路事業での事例

3.1 切土のり面

切土のり面での鉄筋挿入工と地下水排除工との干渉関係を明らかにした3次元モデル事例(図-3.1.1)について紹介する。

本事例では、地下水排除工の設計における3次元モデル作成で、後述するパラメトリックモデリングを活用した半自動プログラム⁴⁾を作成し、モデル作成を効率的に実施した。

具体的には、横ボーリング打設位置を「点」要素として半自動プログラムにセットし、横ボーリング工のモデルを自動生成する。その後、横ボーリング工の伸長方向や本数、角度などをパラメータ操作で変化させ、設計条件をモデル上で確定する。モデル上に地下水位面や既設構造物を反映させておくことで、2次元では確認が困難であった各孔の地下水位との関係や既設構造物との干渉状況が可視化できるため、より効果的で高品質な対策工の概略設計となる。

また、すべり面をモデルに反映させることで、各孔の有

効長が把握できるため、2次元では一律で同延長としていたボーリング延長を孔ごとに設計でき、過大・過小設計の防止や工費削減につながる。

設計案に変更が生じた場合でも、2次元設計では平面図と断面図を作成する工程まで戻るため、時間的コストや労力への負担が大きかったが、3次元モデルと半自動設計プログラムを利用することで、打合せをしながらでも修正設計や図面作成を容易に行うことが可能となった。

本事例では、実際に打合せ中に、鉄筋挿入工と干渉しない横ボーリング工の配置および施工性も考慮した打設位置を調整しつつ、打合せ中に、横ボーリング工の打設位置の座標・方向・延長を定めることができた(図-3.1.1)。

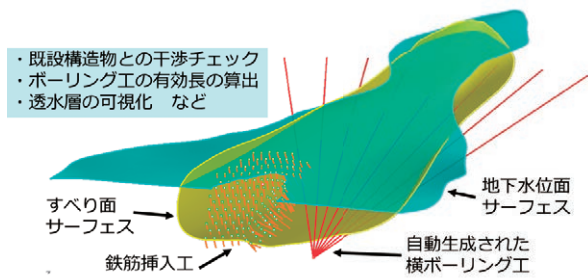


図-3.1.1 概略設計時のモデル画面状況⁴⁾

3.2 トンネル

道路トンネルの切羽で確認されたシームの位置やインバート施工範囲、およびすべり面の関係性を統合した3次元モデルを構築した。これにより、地すべりと道路トンネルの空間的な相関を可視化し、道路事業との円滑な連携に資するモデルを実現した(図-3.2.1)。

トンネル変状の誘因となり得るシームやすべり面を3次元的に把握したことで、維持管理段階における変状発生時の原因特定が容易となった。具体的には、発生した変状が地すべり等の外力に起因するものか、あるいは構造自体の経年劣化によるものかを迅速かつ正確に判別することが可能となった。

今後は、トンネル設備や点検記録の属性情報をモデルへ統合することで、維持管理業務における利便性および意思決定の精度をさらに向上させる計画である。

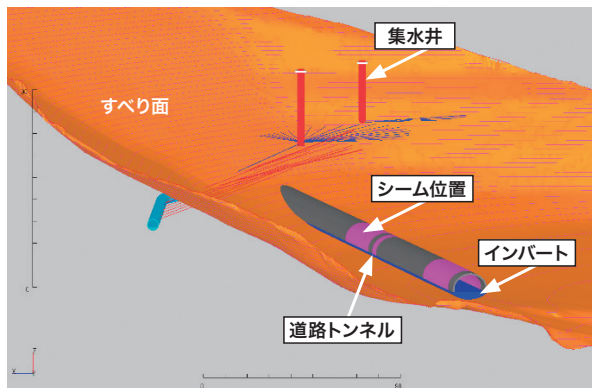


図-3.2.1 道路トンネルとすべり面の関係を可視化したモデル事例

4. 地中の3次元モデルのさらなる活用事例

4.1 AR(拡張現実)での活用

インフラツーリズムでARを活用した事例⁵⁾⁶⁾を紹介する。亀の瀬地すべりは、「インフラツーリズム魅力倍増プロジェクト」のモデル地区に選定され、地すべり歴史資料室、排水トンネル、集水井、旧大阪鉄道亀瀬隧道の見学がインフラツーリズムとして実施されている。また、2020年6月19日には、「龍田古道・亀の瀬」として、日本遺産認定(文化庁)を受け、文化的な側面を有した地すべりである。2023年3月29日に新しい亀の瀬地すべり歴史資料室が完成した。大阪や奈良からアクセスが良いこともあり、見学者は多い。

インフラツーリズムをさらに活性化させるため、幅広い層(教育機関、インバウンドなど)の見学者が、よりわかりやすく地すべり防止施設などを理解できるように、ARを活用し、アプリとして整備した。

ARアプリ中の回せる3次元モデルは、様々な角度から地すべり防止施設の配置状況を見ることができるコンテンツで、既存の3次元モデルを活用して見栄えを整えた上でアプリに組み込んでいる(図-4.1.1下)。地すべり歴史資料室内のCIMモデルパネルをマーカーとして現地で見込み体験できるコンテンツとした。

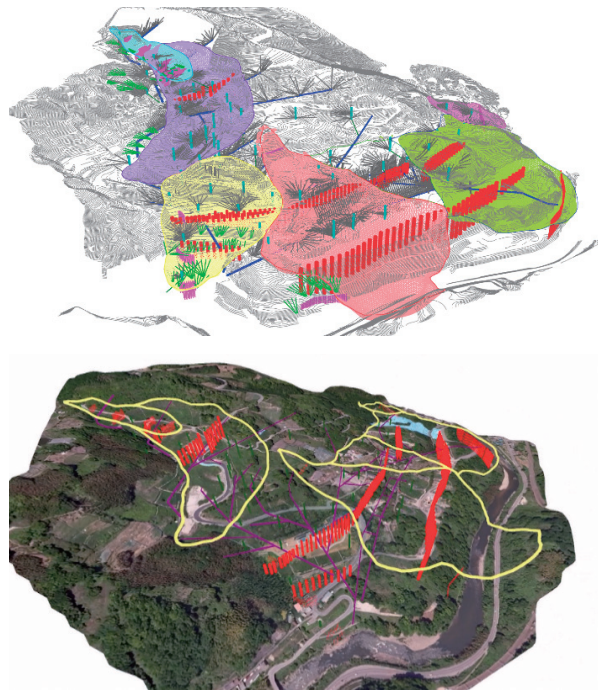


図-4.1.1 ARで活用したBIM/CIMモデル(上)とアプリでの表示状況(下)⁶⁾

4.2 メタバース(仮想空間)での活用

メタバースとは、インターネット上の3次元で表現された仮想空間内で、アバターを介し人々が交流できることを意味する。その空間をワールドと呼ぶ。アバターとは、メタバース上でもう1人の自分となる3次元モデルの分身のことである。

亀の瀬地すべりのインフラツーリズムで、既存の深礎工の3次元モデルを活用して、歴史資料室のメタバースを作成した⁶⁾(図-4.2.1)。本メタバースは再現性を高め、訪問者の事業理解促進および訪問前の事前学習を目的として整備した。また、既存の3次元モデルを活用し、3次元モデルの有効活用に加えて、メタバース作成の費用・工程面も抑えることができた。

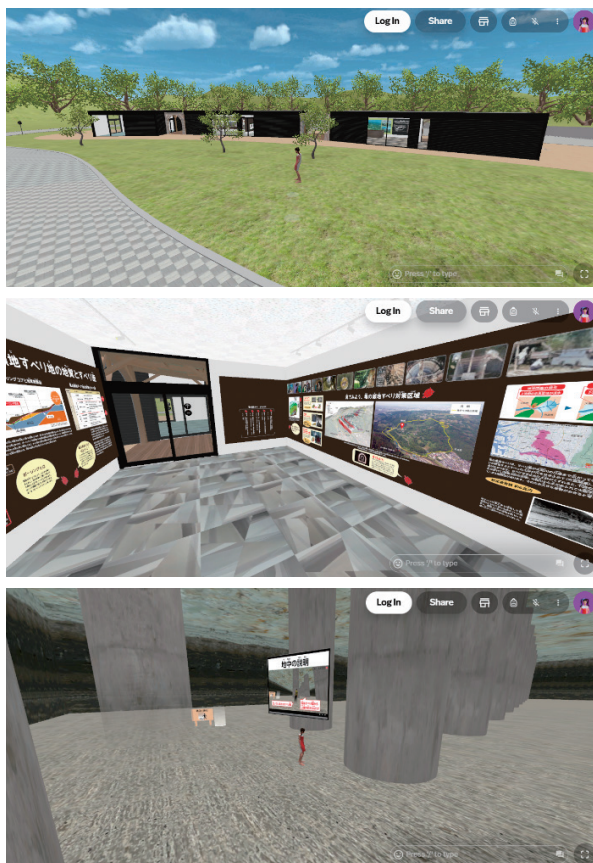


図-4.2.1 亀の瀬地すべり歴史資料室のメタバース
(上)外観(中)内観(下)深礎工⁶⁾

4.3 数値解析での活用

3次元モデルは、数値解析での活用も可能である。

甚之助谷地すべりでの排水トンネルの変状原因を3次元有限差分解析により検証した事例⁷⁾がある。

甚之助谷地すべりの排水トンネルの変状原因は、中間尾根ブロックのすべり(年間約10cm)による場合、排水トンネル覆工の変位量(年間1mm程度)と整合しないため、3次元有限差分法解析(大変形解析が可能なFLAC3Dver.7.0を使用)により覆工変位量の再現を試みた(図-4.3.1)。

解析条件は、中間尾根ブロック、右岸下流ブロックおよび左岸大規模ブロック、基盤および中間尾根ブロックのすべり面をモデル化した(図-4.3.1)。モデル部材はソリッド要素として作成した。また、地すべりブロックと基盤の境界面はインターフェース要素を用いて不連続性を考慮し、境界条件は地表面以外の境界面について境界面の法線方向を固定とした。

地山の力学モデルは、弾性線形モデルを用いて、インターフェース要素はモール・クーロンの弾塑性モデルとした。

解析手順は、①地すべりが動かないように自重解析を実施し、②実強度+低水位ですべりが発生しない(中間尾根ブロックは水位が低い時は動いていない)ことを確認し、③高水位で検証、という流れで実施した。

解析パラメータは、飽和/湿潤密度および不連続面の値を室内試験の結果から、他パラメータは、一般値から採用した(表-4.3.1、表-4.3.2)。また、インターフェース要素の実強度はパラメトリックスタディより求め、 $\phi = 23.0^\circ$ とした。

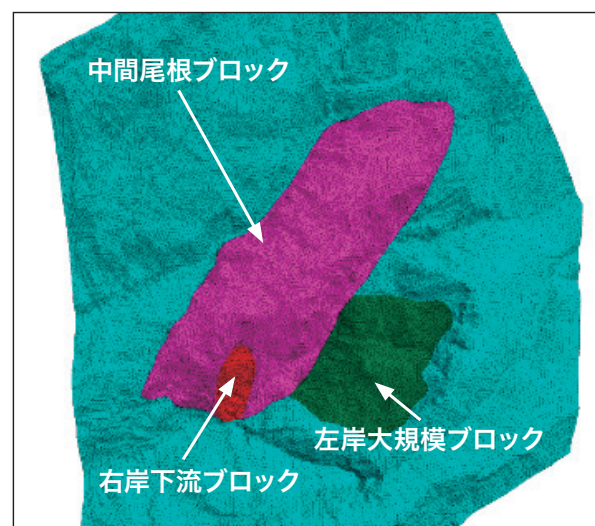


図-4.3.1 解析モデル⁷⁾

表-4.3.1 解析用地層パラメータ

地層名	質量密度(湿) kN/m ³	質量密度(飽) kN/m ³	変形係数 E (MPa)	ポアソン比 ν
中間尾根ブロック	24.0	25.0	500.0	0.35
右岸下流ブロック	22.0	23.0	300.0	0.35
地盤	26.0	27.0	2,000.0	0.30

表-4.3.2 解析用不連続面パラメータ

不連続面	接触面粘着力 kN/m ²	接触面摩擦角 deg
中間尾根ブロック すべり面	0.0	28.0
中間尾根ブロック側面(左岸大規模B接触面)	0.0	28.5

解析の結果、中間尾根ブロックの地表面変位量は、頭部で最も大きく、末端に近づくにつれ変位量が減少していく傾向が得られた。また、1号ボーリング室および坑奥の地中変位量を比較すると、実変状がある1号ボーリング室の地中変位量(約0.5mm)は、実観測の内空変位(約1mm)とおおよそ調和的な結果が得られた(図-4.3.2②)。一方で、坑奥は解析による変位量(約0.5mm)と実変位量(変位なし)が乖離している結果となった(図-4.3.2③)。解析結果と実変位量との乖離は、実変位量はすべり面下部のせん断面の影響が大きく、そのせん断面に変位が集中するため、奥(深部)までは、中間尾根ブロックすべり面の影響が及んでいないと考える。

現地状況と3次元有限差分法解析より、6号排水トンネルの坑口から1号ボーリング室までの変形は、中間尾根ブロックの変位が地すべりブロック下部に分布するせん断面に集中することで発生したゆるみの影響によるものと結論付けた。

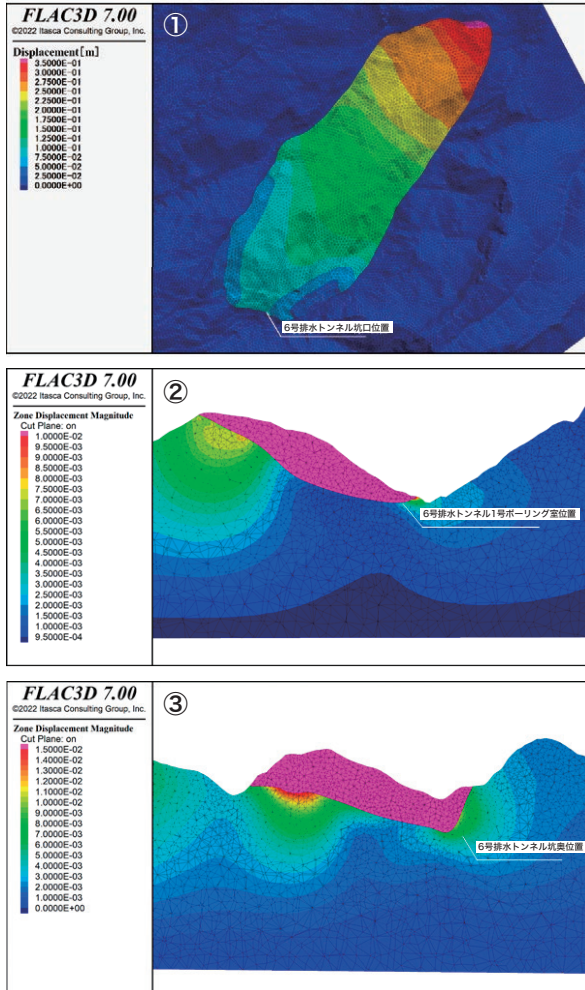


図-4.3.2 変位量解析結果⁷⁾
 (①地表面変位量, ②1号ボーリング室, ③坑奥)

5. パラメトリックモデリングによる3次元モデル作成効率化

5.1 パラメトリックモデリングとは

地盤と地中構造物の可視化を目的とした場合の地中構造物においては、現時点では地盤の3次元モデルに高度な精緻化が求められていないことから、その詳細度 (LOD) は100~200程度に設定される傾向にある。

このため、従来の2次元図面から3次元モデルを構築する手法よりも、設計初期段階から3次元モデルを作成し、地盤との空間的な関係性を可視化の方が生産性の観点から合理的である。詳細度が比較的低い段階では、モデル構造が簡素であるため、パラメトリックモデリング手法を適用することで、設計変更への追従やモデル作成自体の効率化を大幅に図ることが可能となる。

パラメトリックモデリングの概要を図-5.1.1に示す。パラメトリックモデリングとは、ビジュアルプログラミング言語(コーディングを必要としない視覚的な言語のことであり、Scratchなどに代表される)によって、構造物などのモデル化工程をプログラム化し、構造物などの寸法や角度などの属性情報を入力するだけで、3次元モデルを自動生成するモデリング手法である。

パラメトリックモデリングができるソフトは、Robert McNeel & Associates開発のRhinocerosのビジュアルプログラミングツールである「grasshopper」やオートデスク社のRevitの「dynamo」、川田テクノシステム社の「PARAMETRIC_Kit」などがあり、広まりつつある。

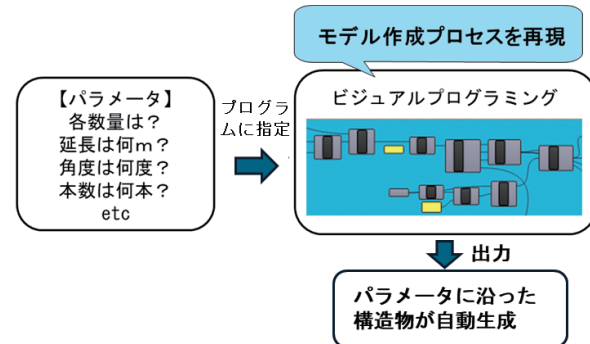


図-5.1.1 パラメトリックモデリングの概要

5.2 パラメトリックモデリングの活用

パラメトリックモデリングの活用として、横ボーリング工と集水井のモデリングの概要を図-5.2.1に示す。

誰もが簡単に扱うことができるという点に重点を置いて構築し、モデル生成のトリガーは点要素とし、構造物の以下の制御項目をパラメータバーで可変式として設定した(図-5.2.2)。

- ・集水井: 井筒径, 井筒延長
- ・横ボーリング工: 呑口深度・位置, 伸長方向, 孔径, 延長, 本数, 開きの角度, 仰角

集水井のモデルは、技術者が設定した点を天端位置として自動生成され、点の移動に伴いモデルもリアルタイムで移動する。集水井モデルは、必要に応じて表示・非表示が可能で、横ボーリング工のみの概略設計にも転用可能なものとした。上記に示した制御項目についても個別にパラメータバーが設定されており、それを用いて入力値を制御し、モデルをリアルタイムで変化させることが可能である。

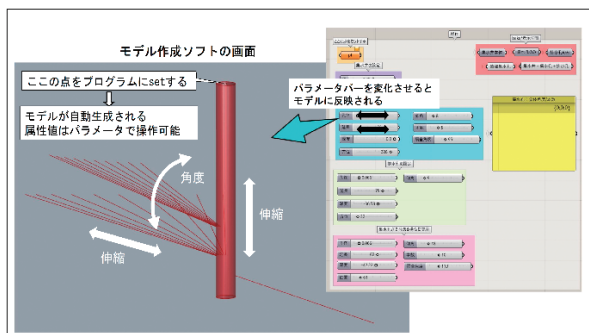


図-5.2.1 横ボーリング工，集水井のパラメトリックモデリングの概要

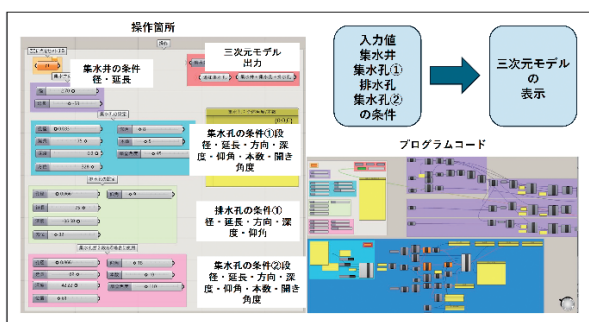


図-5.2.2 パラメータの制御状況

他には、切土工(図-5.2.3)や数値解析結果を活用した3次元すべり面作成のパラメトリックモデリングなどの活用方法もある(図-5.2.4)。これらにより、3次元モデル作成の効率化を図っている。

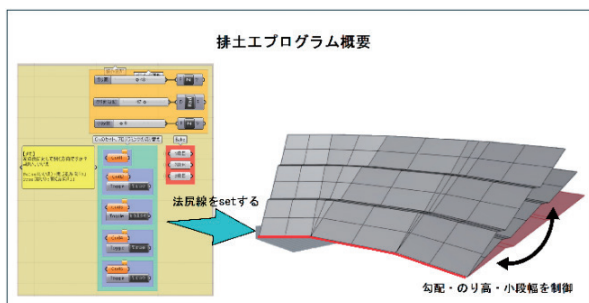


図-5.2.3 切土工のパラメトリックモデリング

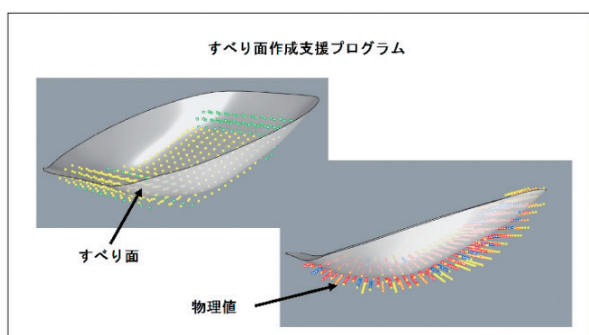


図-5.2.4 3次元すべり面作成のパラメトリックモデリング

参考文献

- 1)国土交通省:第9回BIM/CIM推進委員会資料1, 2023.
- 2)田中康博・藤田重敬・安達忠浩・蚊爪康典・西山昭一:甚之助谷地すべりにおける3次元モデル構築の試み, 地質と調査, 第1号(通巻139号).12-16, 2014.
- 3)小林夏子・窪田安打・田中康博・福井 慧・田所真路・野波英輔:怒田・八畝地すべりでの3次元モデル構築事例, 第62回日本地すべり学会研究発表会講演集, ROMBUNNO.1-20, 2023.
- 4)阿部淳一・田中康博:BIM/CIMとビジュアルプログラミングを用いた地すべり対策工の半自動設計と業務効率化, 全地連「技術フォーラム2024」新潟, ROMBUNNO.CO18, 2024.
- 5)田中康博・田尻一朗・清水宏優・松山晃大:亀の瀬地すべりでのARコンテンツを活用したインフラツーリズム事例, 第62回日本地すべり学会研究発表会講演集, ROMBUNNO.1-22, 2023.
- 6)田中康博・堀川裕太・竹田 保・榛木富三・清水宏優・松山晃大:亀の瀬地すべりでのデジタルインフラツーリズム事例, 第64回日本地すべり学会研究発表会講演集, ROMBUNNO.3-20, 2025.
- 7)阿部淳一・田中康博・本田正和・野村治宏:甚之助谷地すべりでのCIMモデルを活用した排水トンネルの変状メカニズム解明, 第62回日本地すべり学会研究発表会講演集, ROMBUNNO.1-21, 2023.

地質リスク低減に向けた 3次元地盤モデルの活用事例

中央開発株式会社 ソリューションセンター 情報事業部 東野圭悟・小川雄大



1. はじめに

直轄の土木業務・工事では、受発注者の省人化や生産性向上を目的として、BIM/CIM(Building/Construction Information Modeling, Management)が2021年度から小規模なものを除く詳細設計及び工事において「義務項目」として導入され、2023年度より原則適用が開始されている。ただし、「義務項目」は詳細設計及び工事のみであり、測量、地質・土質調査、概略設計、予備設計においては「推奨項目」となっている¹⁾。ここで、地質・土質調査業務の対象範囲は、「小規模なもの及び災害復旧工事等の緊急性を要する業務・工事を除く、地質・土質調査業務共通仕様書に基づき実施する地質・土質調査業務²⁾」となっている。しかし、国土技術政策総合研究所のBIM/CIM事例集³⁾において、地質・土質調査の事例が1例もないことから、地質・土質調査におけるBIM/CIMの活用は進んでいないと考えられる。地質・土質調査においては、ボーリングという点情報を3次元空間へ拡張して可視化する必要があることから、精度の確保などに大きな課題があるためと考えられる。一方で、盛土等防災マニュアルでは「大規模な盛土は3次元の変形解析や浸透流解析等による多角的な検証が望ましい⁴⁾」とされていることに加え、令和6年能登半島地震による被害を踏まえて改定された道路土工構造物技術基準⁵⁾では「地盤等のリスク低減に伴う手戻りやコスト増の緩和⁶⁾」が期待されている。そのため、地質・土質調査のBIM/CIMにおける地盤モデルの3次元化は、3次元FEM解析などのモデリングや地質リスクの可視化と親和性が良いと考えられることから、地質・土質調査におけるBIM/CIMのより一層の活用が期待される。

そこで、本稿では、弊社でこれまでに行ってきたBIM/CIM関連業務のうち、特に地質リスク低減を目的に作成した3次元地盤モデルを活用した事例を紹介し、各事例における活用効果と留意点について述べる。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局企画部: BIM/CIMの活用について国土交通省の方針・関東地方整備局の取り組み, p23, 2024.
- 2) 国土交通省: 直轄土木業務・工事におけるBIM/CIM適用に関する実施方針, 2024.
- 3) 国土技術政策総合研究所: BIM/CIM事例集, <https://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/usecase/index.html>, 閲覧日: 2025/10/19.
- 4) 国土交通省: 盛土等防災マニュアル, p6, 2023.

5) 国土交通省: 道路土工構造物技術基準, 2025.

6) 国土交通省: 「道路土工構造物技術基準」の改定について, https://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_001960.html, 閲覧日: 2025/10/19, 2025.

2. 三次元的な地層の傾斜を考慮した準3次元地盤モデルを作成した事例

2.1 概要

A道路の地質調査業務において、準3次元地盤モデルを作成する必要があった。A道路は調査着手時に用地買収が進んでいなかったことから、計画道路センターでのボーリング調査を実施できなかった。本事例では、3次元空間に一次元のボーリングデータと二次元地質断面図を配置する必要があったため、両者の整合を図ることが課題であった。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コントロールポイントとして曲面補間した3次元地盤モデル(ソリッドモデル)を準3次元地盤モデルよりも先行して作成し、計画道路センター位置で地質断面図を切り出すことで、二次元地質断面図を作成した。従来よく用いられている調査地点を単純に投影する方法と今回提案した調査地点を曲面で補間する方法の地質断面図作成のイメージ図を図-2.1.1に示す。

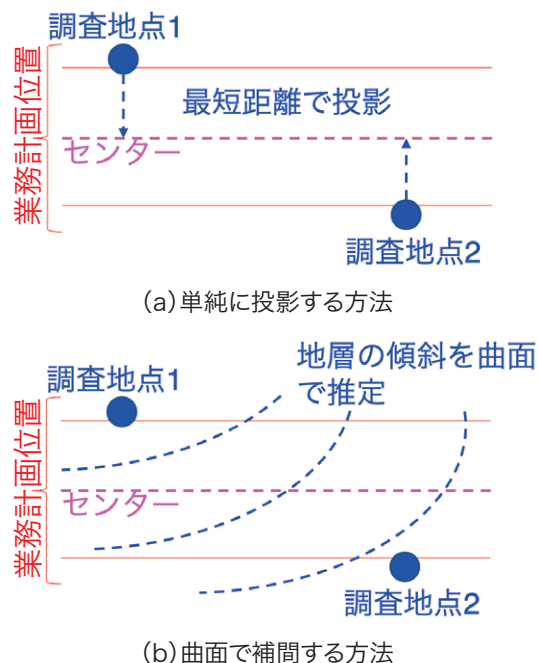


図-2.1.1 地質断面図作成のイメージ図

2.2 地盤状況

当該地の地盤状況を図-2.1.2に示す。対象地は軟弱な沖積粘性土層(Ac1, Ac2)及び沖積砂質土層(As1, As2)が表層を覆っており、始点側で層厚10m以上と厚く堆積している。沖積層の下位には洪積粘性土層(Dc1)

及び洪積砂質土層(Ds1)が互層状に堆積し、T.P.-27m付近に支持層及び工学的基盤になり得る洪積砂質土層(Ds2)が厚く堆積している。そのため、盛土の安定や圧密沈下、液状化、高架の杭に対するネガティブフリクションなどが懸念される地盤条件であった。

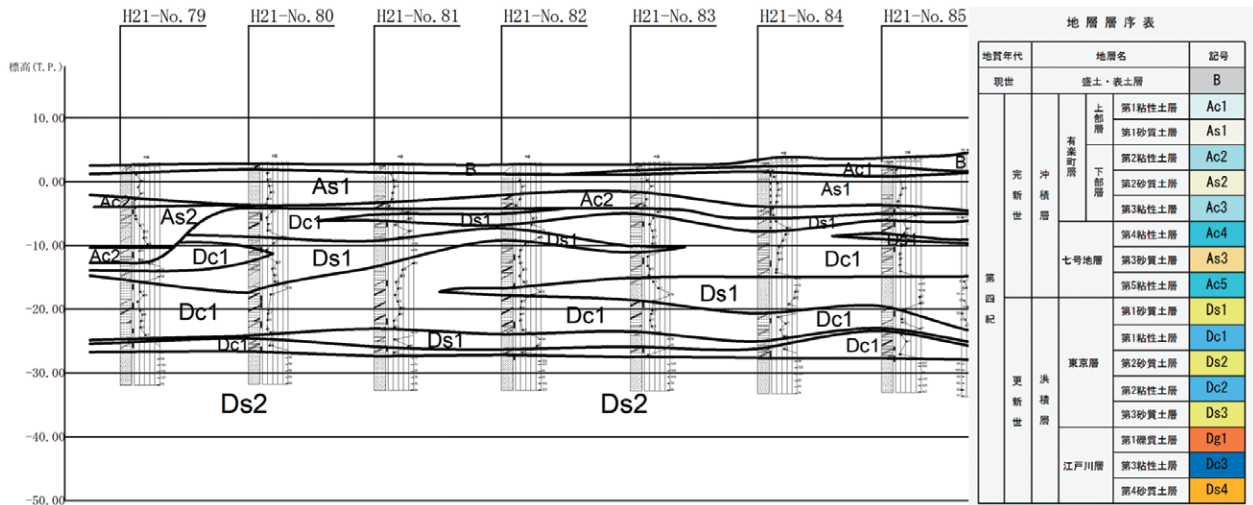


図-2.1.2 当該地の地盤状況

2.3 準三次元地盤モデルの作成

本事例のモデルの作成手順を図-2.1.3～図-2.1.6に示す。モデルの延長は1,800m、登録したボーリングデータ数は31本である。本事例では前述の通り、ボーリング調査地点間を曲面補間することで三次元地盤モデルを先行して作成し、三次元地盤モデルから道路センター位置の地質断面図を切り出した。そして、切り出した地質断面図を使用して準三次元地盤モデルを作成した。

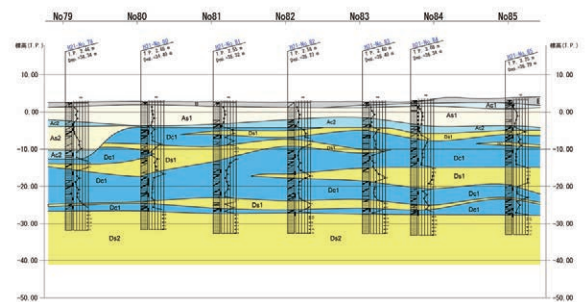


図-2.1.5 準三次元地盤モデルの作成手順③
(道路センター位置の地質断面図の切り出し)

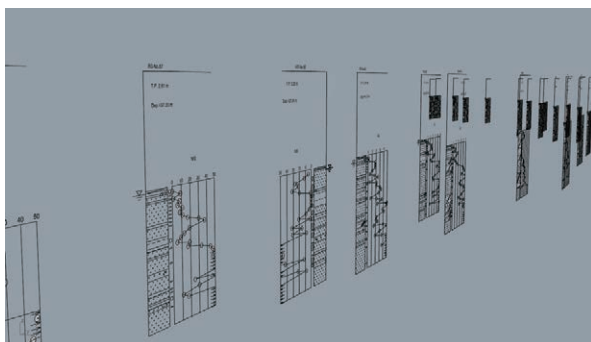


図-2.1.3 準三次元地盤モデルの作成手順①
(ボーリングモデルの作成)

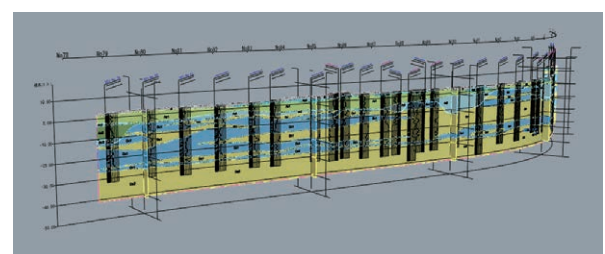


図-2.1.6 準三次元地盤モデルの作成手順④
(準三次元地盤モデルの作成)

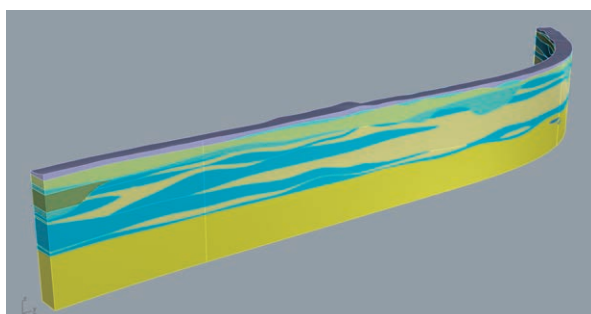


図-2.1.4 準三次元地盤モデルの作成手順②
(三次元地盤モデル(ソリッドモデル)の作成)

2.4 活用効果

本事例においてBIM/CIMを活用したことによって、以下に示す活用効果があった。

- ・例えば、単純にボーリングデータを道路センター位置に投影せずに断面図を作成する際には、ボーリングデータ間を補完するような断面図を追加で作成しながら、計画道路センター位置での断面図を作成する必要があり、データの整合性の確認に非常に手間がかかる。一方、三次元地盤モデルでは、これらの作業

が視覚的に容易となり、効率化による工期短縮を達成した。

- ・三次元地盤モデル(ソリッドモデル)を作成していることから、任意の位置(ランプ部や側道部など)の断面図を切り出すことが可能であった。

2.5 留意点

本事例では、三次元地盤モデル(ソリッドモデル)を先行して作成し断面図を切り出すことで、ボーリング調査結果と断面図の整合性を容易に確認でき、効率化による工期短縮を達成した。しかし、ソリッドモデルを先行して作成することに対する課題として、三次元地盤モデルの限界や不確実性がある。三次元地盤モデルの作成ソフトは、限られた地点の地質調査データだけでモデルの空間補間を行うと、不自然なモデルになる可能性が高く、補填データを追加してコントロールしなければ意図したモデル化を行うことは困難である。また、そもそもボーリング調査地点以外の地層は空間補間されているため、地層間の不確実性は従来の二次元断面図と変わらないが、三次元地盤モデル(ソリッドモデル)では、空間補間による不確実性が見え難くなることに留意が必要である。

3. 人工改変地形における開削トンネルの施工上の問題を把握するために三次元地盤モデルを作成した事例

3.1 概要

本事例で対象とする開削トンネルの周辺は、丘陵地を大規模な谷埋め盛土及び切土により造成した人工改変地形であり、現在の地表面からその改変状況を把握する

ことは困難であった。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+旧表土)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ため、施工上の問題となり、工事費や工期の増加が生じた。本事例では、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の三次元的な把握を行った。

3.2 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道路トンネルであり、複数の谷埋め盛土を横断している。丘陵地の地質は、砂礫が主体の更新統であり、下位には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るため、主要な帯水層となっている。新鮮部は軟岩に該当し、十分な強度を有している。また、トンネル施工によって計画荷重は荷重履歴より小さくなるため、風化部についても大きな問題とはならないと考えられていた。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、既存のボーリング調査結果より、これら軟弱層の分布及び層厚に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。三次元地盤モデル作成前の当該地の地盤状況を図-3.1.1に示す。

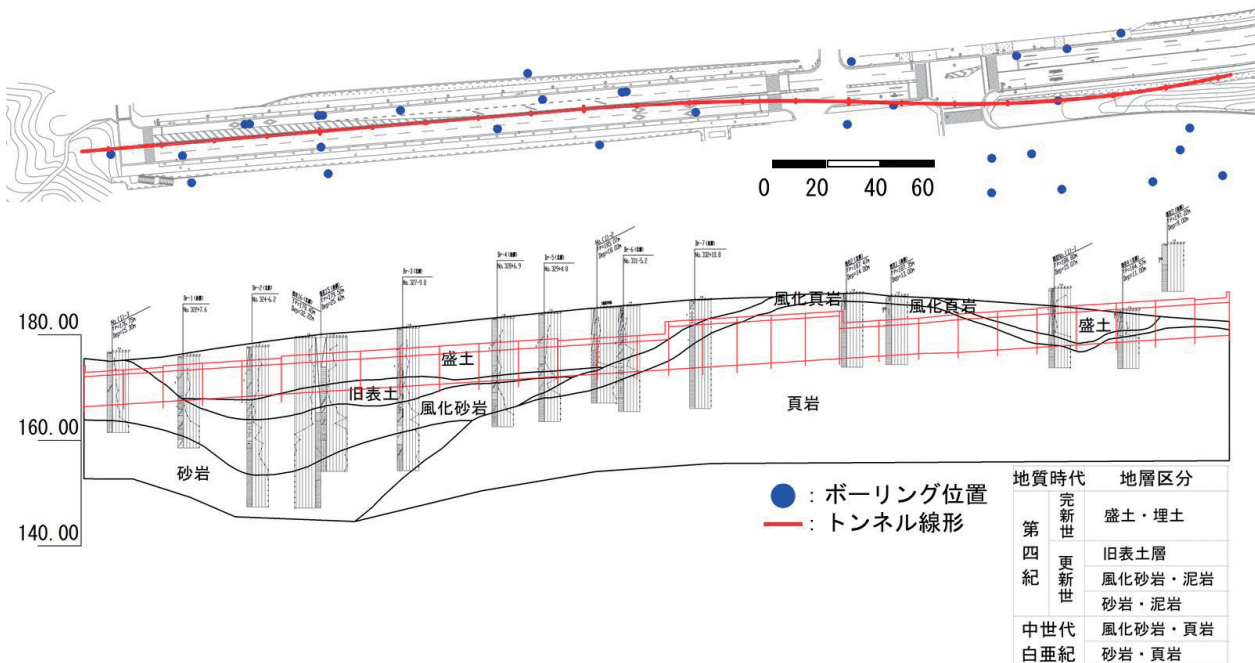


図-3.1.1 三次元地盤モデル作成前の当該地の地盤状況

3.3 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コントロールポイントとして、ボーリング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。具体的な手順を以下に示す。

(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)の地層境界を判別し地層解釈の統一を行った。統一的な解釈で整理したボーリングデータを三次元空間上に配置し、ボーリングモデルを作成した。

(2) 地層境界面の作成

ボーリングモデルから、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モデルを作成した。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DEMと標高を比較することで、モデル化範囲の盛土層全体の形状を作成した。図-3.1.2に作成した盛土層と旧版地形図の等高線を示す。

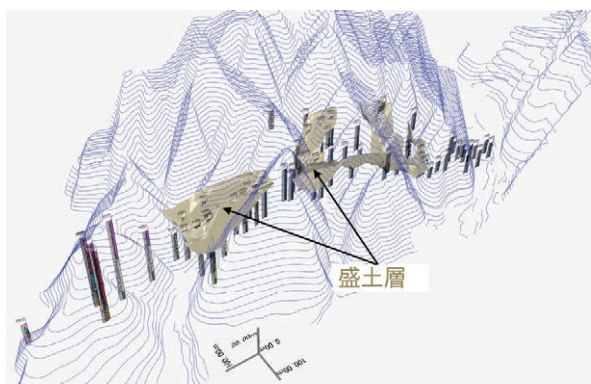


図-3.1.2 盛土層と旧版地形図の等高線の三次元表示

(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モデルを用いてソリッドを切出し、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。

3.4 活用効果

図-3.1.3に示すように、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。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

で想定されていたものよりも、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、三次元化によって軟弱層の詳細な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。

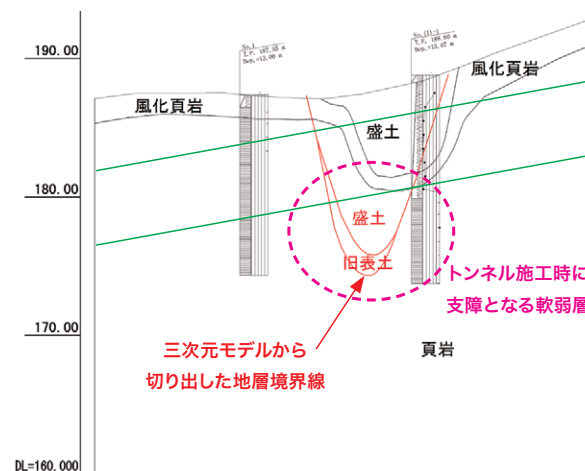


図-3.1.3 既往地質断面図と三次元地盤モデルの地層境界線の対比

3.5 留意点

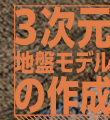
本事例では、既往調査結果だけでなく、旧地形も踏まえた三次元地盤モデルを作成することで、軟弱層の分布範囲を三次元的に明らかにした。造成盛土等の人工地盤をモデル化するには、旧地形図等から盛土分布を三次元地盤モデルに反映することで、精度向上が期待される。また、地質調査前の資料収集整理の段階から、旧地形(旧表土)の情報を反映することができれば、軟弱層の範囲を十分に予測することができたと考えられるため、地質調査においても、調査前の地形の概査をはじめ、資料収集整理が重要である。

4. まとめ

本稿では、地質リスク上の要因となる地層を可視化するために三次元地盤モデルを活用した事例を紹介した。本稿で紹介した事例はどれも、三次元地盤モデルから二次元断面図を切り出したものである。これらは一見すると三次元地盤モデルの作成が手間のようであるが、三次元的な地層の広がりやを考慮して任意の位置の二次元断面図を描くのは相当の労力が必要であることから、三次元地盤モデルを作成することで省人化を図ることが可能である。しかし、三次元地盤モデルの優位性を十分に活用できていないと言えないことから、今後は三次元地盤モデルの精度の見える化などにも取り組み、地質リスクの低減に貢献したいと考える。

地すべり分野における 3次元地盤モデル作成

川崎地質株式会社 企画・技術本部 古谷充史



1. はじめに

国土交通省では、インフラ分野におけるDXの推進および生産性向上を目的として、令和5年度より建設事業の全プロセスにおいて3次元モデルを活用するBIM/CIMの原則適用が開始された。これは、計画・設計・施工・維持管理の各段階においてデータを一貫して連携させることにより、業務の効率化および高度化を図る取り組みである。

地すべり分野においては、令和4年3月に「BIM/CIM活用ガイドライン(案)第3編 砂防及び地すべり対策編」¹⁾が公表され、当該分野におけるBIM/CIM活用の方向性が示されている。本ガイドラインは、砂防構造物および地すべり対策を対象とし、地すべり機構解析や地すべり防止施設の設計・施工、地すべり災害対応等において、測量・調査から設計、施工、地すべり防止施設の効果評価、維持管理に至る各段階でBIM/CIMを活用する際に適用するものである。

また、地すべり災害への対応においても、災害の全体像を的確に把握する手段としてBIM/CIMの活用は有効であると考えられる。一方で、迅速性が強く求められる災害対応時には、通常の地すべり対策事業で用いられるような詳細なBIM/CIMモデルを作成・活用することは困難であり、災害対応に特化したBIM/CIMモデルが必要と考えられた。このような背景から、(国研)土木研究所では、令和3年4月に「地すべり災害対応のBIM/CIMモデルに関する技術資料」²⁾を公表している。なお、現在公表されている「BIM/CIM活用ガイドライン(案)第3編 砂防及び地すべり対策編」には、地すべり災害対応に関する内容も反映されている。

本稿では、通常の地すべり対策事業における検討段階でのBIM/CIMモデルの活用例を紹介する。

2. 地すべり分野におけるBIM/CIMの活用

地すべり対策検討に際しては、地形判読・地表踏査・調査ボーリングや動態観測等の調査結果に基づき、地すべり発生誘因、地すべりブロックの規模、すべり面の形状、地下水の状況等について地すべり機構解析を行う必要がある。その上で、地すべり対策の検討においては、地すべりの状況と地すべり対策計画との3次元的位置関係を適切に把握した上で検討することが求められる。

また、地すべり対策後にその効果を評価するためには、対策状況に応じて地盤の変位量や地下水位等の地中情報の時間的変化を観測する必要がある。

これらの評価・検討においてBIM/CIMを活用することにより、3次元的位置関係や時間的変化を可視化することが可能となり、地すべり状況や対策効果をより明確に把握することにつながると考えられる。

地すべり対策におけるBIM/CIMは、現地調査から維持管理に至る各段階の高度化を図る取り組みであり、地形、地質、崩壊規模、保全対象等を3次元モデル化した「バーチャル現場」として活用することで、地すべり機構の解析、対策工の選定、住民への迅速な説明や緊急時の状況把握を効率化する技術である。

・地すべり機構の推定(解析・調査)

3次元地形モデル(DEM)や地質情報(ボーリングデータ等)を組み合わせ、地すべりの規模、すべり面の位置を可視化。複雑な地下構造を把握し、数値解析等の安定性評価に利用する。

・応急・恒久対策工の検討(設計)

モデル上で集水井工や抑止杭、アンカー工の配置・施工計画をシミュレーション。周辺構造物との干渉チェックや、地下水排除工のルート選定を効率化する。

・災害発生時の迅速な対応(緊急対応)

発災直後の空中写真や3D点群データを用いて、崩壊土砂量や変状の進展状況を素早く把握。被害の全容把握と安全な作業計画の立案に利用する。

・避難・警戒体制の検討(ソフト対策)

地すべりの危険箇所を地形モデル上に重ね合わせ、避難ルートや避難所の安全性、警戒避難エリアを検討する。

・可視化による合意形成(住民・専門家への説明)

数値データでは伝えにくい地形の変状や対策工の効果を3Dで視覚的に説明し、会議や住民説明会での理解を促進する。

・維持管理段階(経年変化のモニタリング)

対策施設の完成図面をBIM/CIMモデル化し、管理段階での点検結果とリンクさせることで、施設の健全性や経年劣化の把握を効率化する。

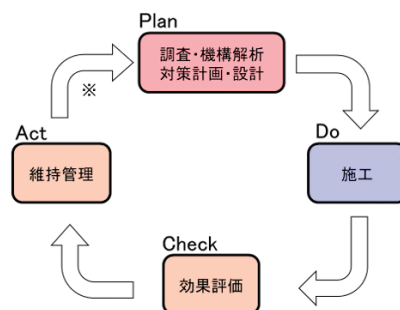


図-2.1 地すべり対策の流れ³⁾

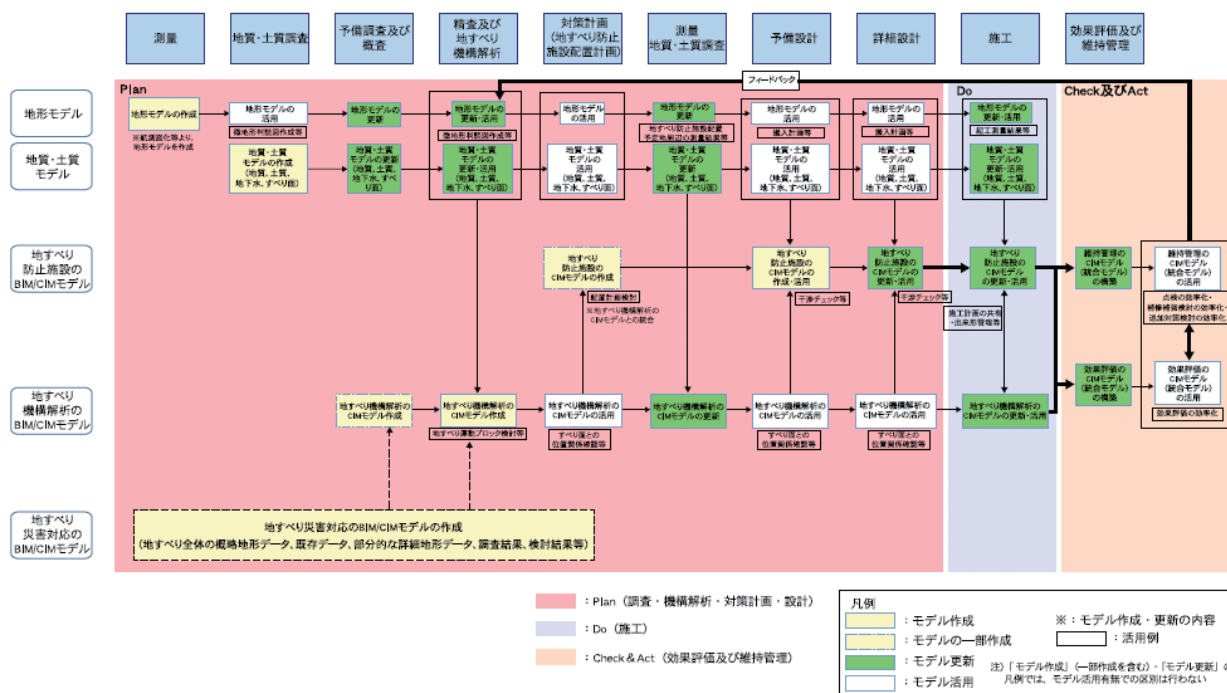


図-2.2 BIM/CIMモデル作成・活用・更新の流れ⁴⁾

3. 地すべり分野におけるBIM/CIM活用事例と課題

地盤リスク低減の鍵を握る「3次元地層推定技術」は、地盤の可視化を通じて設計・施工の合理化や生産性向上に大きく寄与する。しかし、少ないデータからでも「それらしい図」が生成されるため、調査不足によるリスクを見落とす危険性も孕んでいる。そのため、技術の有用性とデータの不確実性を正しく理解した上での運用が重要である。

3.1 3次元地盤モデルの活用事例

ここでは、地下水排除工の配置検討や地すべり形状の把握に用いた事例を紹介する。

3.1.1 地すべり対策検討における活用事例

地すべりの誘因として、すべり面における間隙水圧の上昇は極めて重要な要素であり、対策工としては地下水排除工が広く用いられる。将来的な豪雨に対して地すべりブロックの安定性を確保するには、想定降雨量に基づき上昇許容地下水水位を設定し、適切な排水能力を有する施設を設計する必要がある。

地下水排除工の配置検討において、広域かつ長期的な水位変動予測は重要である。この検討を比較的容易かつ低コストで実施する手法として準3次元浸透流解析を適用した。さらに、3次元安定解析を併用することで、設定された発生確率年における地下水水位条件下でも目標安全率を確保できる地下水排除工(主に集水井)の最適

配置について考察した。

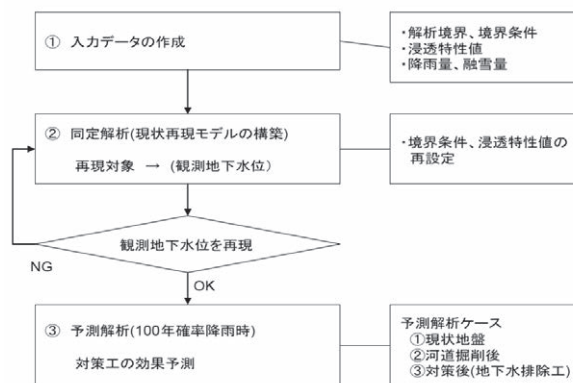


図-3.1.1 準3次元浸透流解析の流れ

この検討に際して、3次元地形モデル(DEM)や地質情報(ボーリングデータ等)を組み合わせ、地すべりの規模、すべり面の位置を可視化した。

また、推定したすべり面形状をTIN(Triangulated Irregular Network)サーフェスで作成した。

TINサーフェスは、不規則な標高点群をドロネー三角分割法で三角形の網(面)として接続し、地表面の起伏を表現する3次元データ構造である。点群、等高線、3Dポリラインから作成され、主に土木設計における地形モデリング、断面図・横断面図の自動生成、土量計算に利用される。

これらの特徴有するTINサーフェスデータを用いて、数値解析の入力データへの変換を行い、安定性評価に利用した。

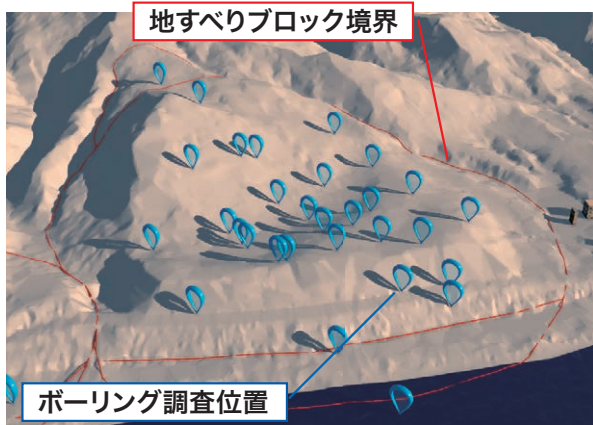


図-3.1.2 調査位置と地すべりブロック

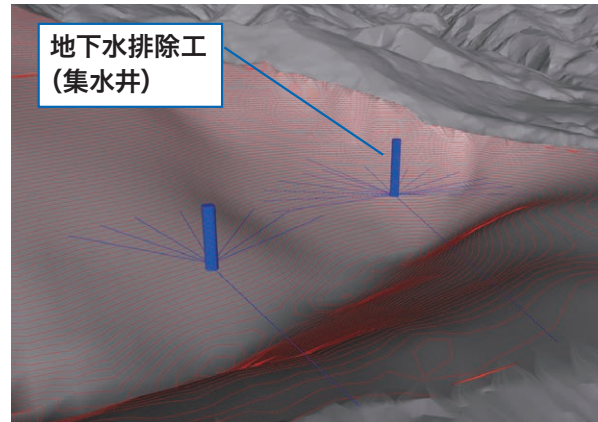


図-3.1.6 地下水排除工(集水井)の配置例

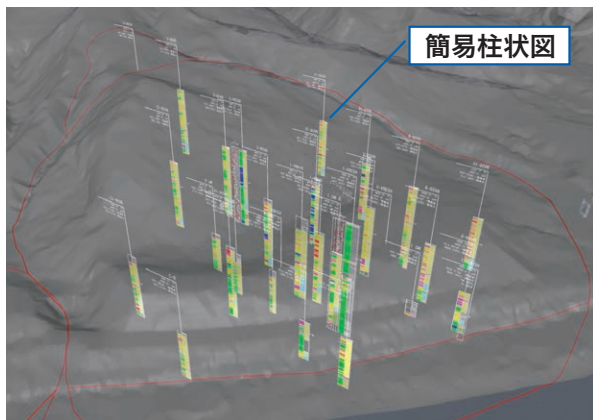


図-3.1.3 ボーリング柱状_3次元配置図

図-3.1.2は3次元地形モデルに、ボーリング調査位置および地すべりブロックを重ね合わせたものである。これは、運動ブロックの範囲を判断するのに用いるためのモデルである。

図-3.1.3～3.1.4は調査結果を基に作成したボーリング柱状図および推定地質断面図を3次元に配置したものである。これは、地すべり機構解析に利用する主測線での調査結果より運動ブロックの範囲や深さ、運動ブロックに作用する地下水位が概略確認でき、主測線での地すべり機構解析や対策計画(地すべり防止施設配置)検討に資するためのモデルである。

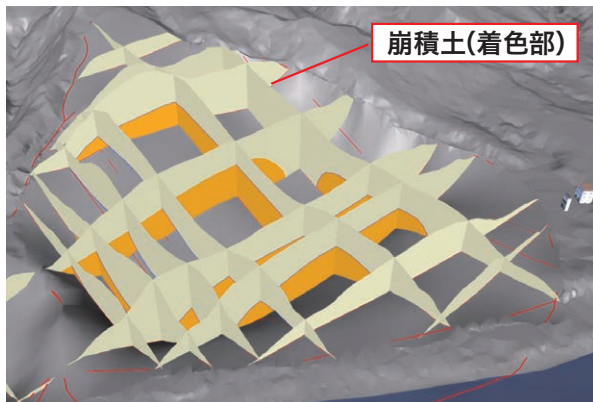


図-3.1.4 パネルダイヤグラム

図-3.1.5は推定したすべり面形状を、TINサーフェスで作成した。これは、複数測線での調査結果に対して、解釈等を加えることで、実態に即した運動ブロックの範囲や深さ、運動ブロックに作用する地下水位が把握できるとともに、地下の水みちや帯水層、地質の破碎部の分布等が把握でき、主測線での地すべり機構解析や対策計画(地すべり防止施設配置)検討、設計等の精度向上や照査に資するためのモデルである。

図-3.1.6は地下水排除工の検討において、配置した地下水排除工(集水井)の配置図である。

将来的な豪雨に対して地すべりブロックの安定性を確保するには、想定降雨量に基づき上昇許容地下水位を設定し、適切な排水能力を有する施設を設計する必要がある。

配置した地下水排除工(集水井)は、浸透流解析の排水条件としたものである。

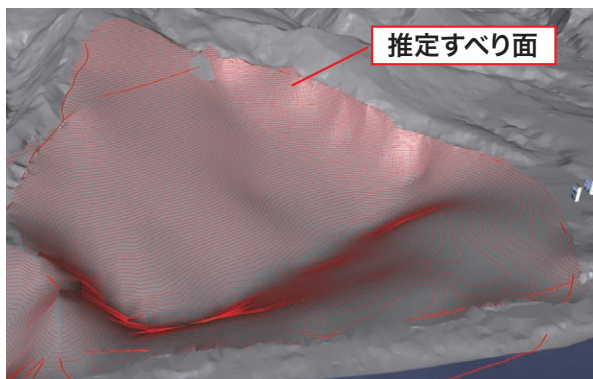


図-3.1.5 推定すべり面

3.1.2 地すべり形状の把握調査での活用事例

地すべり調査において作成するBIM/CIMモデル(3Dモデル)は、既存データ(地理情報、地形データ、調査データ)と新規データ(調査データ)を併せ、調査対象に対応したモデルを作成する。従って、調査計画段階より3Dモデルを導入することが可能である。

そこで、BIM/CIM活用の試みとして調査段階から3Dモデルを導入し、関係者間が立体的なイメージと情報を

共有し、品質の確保、業務の効率化について試行した事例である。

①調査計画時

地すべり等カルテを基にした準3次元モデルから地すべり規模・形状を予測し、関係者間が立体的なイメージ。

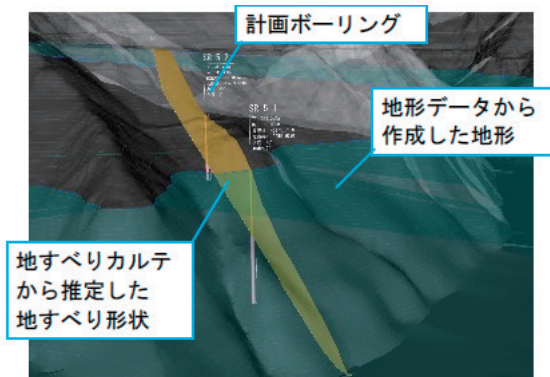


図-3.1.7 調査計画時の3Dデータ

②現地調査終了時

ボーリング位置の照査、原位置試験結果を含めたボーリング結果精査し、関係者間で調査結果の立体的なイメージ。

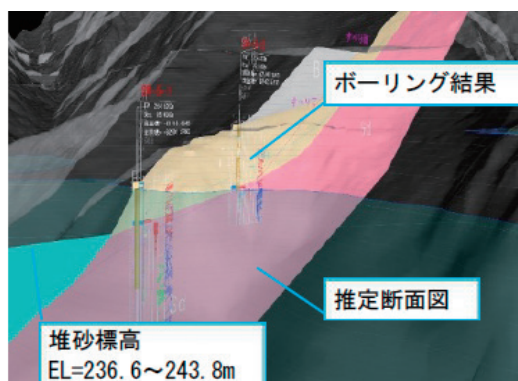


図-3.1.8 現地調査完了時の3Dデータ

③総合解析完了時

総合解析後のデータを3D化

- ・現地踏査を含めた総合解析結果
- ・各調査で確認したすべり面位置の対比

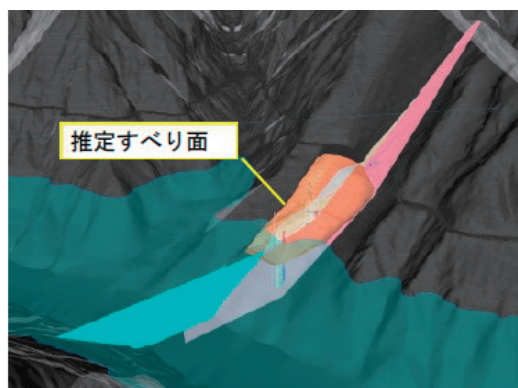


図-3.1.9 現地調査完了時の3Dデータ

3.2 3次元地盤モデルの活用における課題

・情報の不確実性

地盤モデルと各段階(設計、施工等)でのBIM/CIMモデルとを3次元空間に配置することで、地質リスクを関係者間で共有することができる。これは、補足調査等の計画立案や対策検討に関わる意志決定の迅速化が期待できる。

ただし、地形や構造物モデルは実際の形状であるのに対して、地盤モデルは調査結果から推定した性状を表現しているため、使用された地質情報量やモデル作成者の考え方等の様々な条件に依存し、不確実性を含んでいる。したがって、地盤モデルの作成・活用にあたり、不確実性の程度やその影響について、関係者間で共有・引継ぎを行う必要があると考える。

・3次元地盤モデルの修正

地盤モデルを設計から施工段階へ引継ぐ場合、事業段階に合わせて地盤情報が増加していくため初期に作成したモデルを修正する必要が生じる。この場合の課題を以下に示す。

- ①各事業段階の地盤モデルの引継ぎ時には、どのような補間・推定を経たものであるか等の記録の伝達に留意する。
- ②地盤モデルの使用目的や要求性能は、対象構造物及びその事業段階によって異なることに留意する。
- ③事業段階の進捗に伴ってモデルが扱う地盤情報の種類は増え、精度も向上することを踏まえた上で、作成、追加又は利用する地盤モデルを選択する。

参考文献

- 1)国土交通省: BIM/CIM活用ガイドライン(案)第3編 砂防及び地すべり対策編, 2022.
- 2)(国研)土木研究所土砂管理研究グループ地すべりチーム: 地すべり災害対応のBIM/CIMモデルに関する技術資料, 土木研究所資料第4412号, 2021.
- 3)国土交通省: BIM/CIM活用ガイドライン(案)第3編 砂防及び地すべり対策編, p.6, 2022.
- 4)国土交通省: BIM/CIM活用ガイドライン(案)第3編 砂防及び地すべり対策編, p.8, 2022.