

三次元地質モデル逐次更新システム「SG-ReGrid®」の開発とトンネル掘削工事における適用

吉河 秀郎 青野 泰久 齋藤 寛治
(技術研究所) (技術研究所) (土木東京支店)
細江 康太 石川 俊明
(名古屋支店) (九州支店)

Development of "SG-ReGrid®" (Sequential 3D Geological information system using ReGrid of voxel model) and its application to tunnel excavation

Shuro Yoshikawa, Yasuhisa Aono, Kanji Saito
Kouta Hosoe and Toshiaki Ishikawa

山岳トンネル掘削工事において、切羽前方の地質災害リスクを早期に予測することは、安全管理、設計変更の検討、また工程管理のため重要である。切羽前方探査データの可視化技術は向上しているが、それらから三次元的な地質状況を解釈するには専門的な知識や経験が必要になることが多い。本論では、前方探査データから、簡単に地質・硬軟状況を三次元的に可視化できるシステムとして開発を進めている SG-ReGrid について述べ、設楽ダム瀬戸設楽線トンネル工事において設計変更や職員への注意喚起に活用した事例を示す。また、その適用に基づき技術的経験に依存せず、同じ探査結果からある特定のアルゴリズムを用いて地山状況を把握できるようにする方法の一案を示す。

During construction of mountain tunnel, early prediction of geological hazard risks ahead of the tunnel face is important for safety management, consideration of design changes, and schedule management. Although visualization technology for exploration data ahead of the face has improved, expert knowledge and experience are often required to interpret the three-dimensional geological conditions from those data. This paper describes SG-ReGrid that can easily visualize geological and hard/soft conditions in three dimensions from the exploration data, and presents an example of its use in design changes and alerting staff during the construction of the Shitara Dam Seto Shitara Line Tunnel. Based on the application, we also present a method for understanding the rock conditions using a specific algorithm from the same survey results.

1. はじめに

高速道路、新幹線、バイパス道路の建設にかかる山岳地域のトンネル掘削工事において、切羽前方の地質災害リスクを予測することは安全管理のために重要である。リスクを早期に抽出することにより、ゆとりをもった工程で設計変更を検討することが可能になり、工期遅延を防ぐことにもつながる。

トンネル工事で行われる切羽前方探査では、次の調査方法が地山状況などに応じて用いられる。地山状況を直接的に把握できるものとしては、先進ボーリング(以下、先進 Br.)による試料採取、また削孔機械により削孔投入エネルギー値の取得や、

削孔速度・スライム(岩片)・リターン水の色の変化等の調査を含めた削孔調査がある。また、弾性波探査(反射法探査)により、比較的広範囲に物性変化を調査する方法も用いられる。それらの探査結果は、情報化施工や BIM/CIM 推進の背景もあり、三次元的に可視化されるようになってきた^{1),2),3)}。しかし、先進 Br. や削孔調査結果は個別に線状のデータとして表示され、また弾性波探査による反射面は、例えば三次元的に面状に描かれることから、それらの可視化結果から切羽前方の地質状況の変化を空間的にイメージするためには地質専門技術者の知識や経験が必要になることが多いといえる。また技術者間での経験などの差により、地質状況変化を予測する際に解釈の方法や結果には違いが生

じることも考えられる。一方でどの土木工事にも、柱状試料や物理探査データ等から地質構造を考察できる地質専門技術者が常駐することは通常なく、それゆえに探査データの分析・可視化・アウトプットまで扱いやすいシステム開発が求められる。

切羽前方の地質状況を空間的に分かりやすく表現するには三次元地質モデルが有効であり、三次元的に表示されることにより地質専門技術者以外でも地質状況の前方の変化がイメージしやすくなる。三次元地質モデルは、地下構造物⁴⁾、石油・資源探査^{5),6)}、地震防災^{7),8)}などに広く活用されていて、市販のソフトウェアも様々にある。しかし、前述した弾性波探査結果など個々のデータの解釈と同様に、地質モデリングにおいても作成者間の地質データの解釈の違いにより地層の区分や境界面の形状などが変わる可能性は十分にある。

そこで三次元地質モデルを簡易に逐次的に更新できるシステムがあれば有用と考えて、概念設計から始め、現場適用を進めている^{9)~11)}。本研究の主要な目的は、1)切羽前方探査結果を探査後すぐに解析ソフトに取り込み三次元的に地質・硬軟状況を可視化し、切羽前方の状況に簡易かつタイムリーに配慮できるようになること、2)前記作業を地質調査や物理探査の経験に依存せず、同じ情報からある特定のアルゴリズムを用いて地山状況を把握できるようにすること、また、3)更新モデルを長尺鋼管フォアパイリング工法の配置や支保パターン変更などの対策検討・設計変更に活用させることである。

現段階においては、論理的な解釈のもと自動的に地質モデルを更新できるシステムの構築には至っていないが、開発したソフトを用い現場適用した結果、現場施工にいかすことができた事例を示す。また、その際のモデル更新アルゴリズムを1つの方法論として記す。

なお本論文は、吉河ほか¹²⁾に掲載された内容を再構成、および加筆修正したものである。

2. 三次元地質モデル逐次更新システム： SG-ReGrid[®]

三次元地質モデル逐次更新システムについて、流れを図-1に示す。本システムではボクセルモデルを扱う。ボクセルモデルは、地層を立体として表現し境界面および内部の地質情報(属性情報)をもつソリッドモデルから作成できる。地層を細かいボクセ

ル(立方体)の集合体として表現したものがボクセルモデルであり、各ボクセルには属性情報が付与されている。本システムの初期モデルは、地質専門技術者によるノウハウのもと、市販のソフトウェアを用いて施工前の地質調査結果から作成されることを想定している。その初期モデル(ソリッドモデル)から解析対象範囲、すなわち施工時の探査データを入力して逐次更新を行う範囲を選択し、その範囲をボクセルモデル化して、モデル更新部(開発ソフト：SG-ReGrid)に入力する。モデル更新部では、目的に応じてそのボクセルモデルを地質(岩相)区分・硬軟区分などの属性を切り替えることができる。そのため初期モデル(ボクセルモデル)では、施工前の調査による地質区分、弾性波速度分布による区分、当初設計の支保パターンに相当する地山区分(例えば、CII、DI、DIIなど)などを各ボクセルの属性値として使用する。ボクセルの属性値を逐次更新するための材料には、例えば、先進Br.による岩相区分、先進Br.や発破弾性波探査による弾性波速度(Vp)、先進Br.の試験体を用いた一軸圧縮強度試験結果による物性区分、また、油圧ブレーカによる切羽打撃を振動源とした弾性波探査(S-BEAT[®])^{13),14)}による反射面などを用いることができる。地質モデルを更新した結果は、ボクセルモデルによる座標情報と属性情報をあわせて出力することができ、市販ソフトによる解析モデルに反映することができる。また、地質モデルの出力方法として3D PDFに変換することができるため、任意の切断面の作成も容易に可能である。

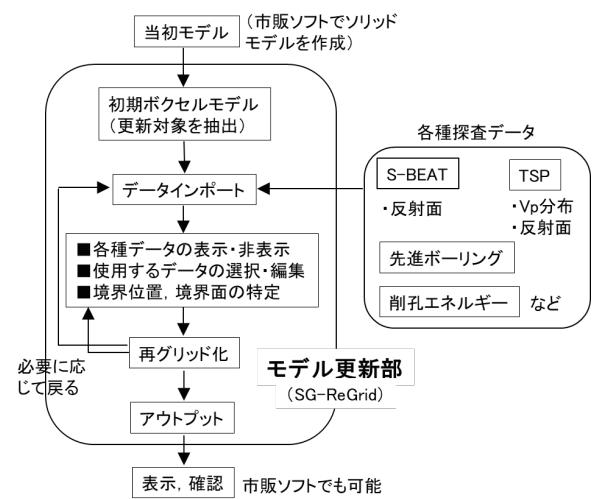


図-1 地質モデル作成・更新のながれ^{9),12)}

3. 開発システムの適用先と探査概要

3.1 地山の地質概要

SG-ReGrid を愛知県設楽町に位置する設楽ダム瀬戸設楽線トンネル建設工事に適用した(図-2)。同域の地山地質は領家變成岩類の砂質片麻岩、珪質片麻岩(および变成チャート)が基盤となり、部分的に閃綠岩の貫入があるとされている。施工前の地質的な懸念としては、局所的な閃綠岩の分布(周囲の岩盤との強度の違い)、片麻岩の風化部、断層など弱層の出現が考えられていた。実際の切羽では、砂質片麻岩がおもな割合を占め、風化が進んだ切羽や部分的な粘土化などの影響を考慮して、日常的な切羽観察や変位計測に加えて切羽前方探査を実施し、肌落ち対策を検討しながら掘削を進めた。本工事は令和6年3月29日に無事竣工した。



図-2 瀬戸設楽線トンネル工事現場の空中写真

3.2 切羽前方探査

当工事では切羽前方探査として、先進ボーリングを4回、またS-BEATによる弾性波探査を7回実施

した(図-3)。S-BEATについては、西・若林¹³⁾や吉河ほか¹⁴⁾などで詳細を述べているため、ここでは概要のみを記す。同システムは当社オリジナルの開発技術であり、油圧ブレーカによる切羽打撃を起振源としたトンネル坑内弾性波探査である。受振センサーを無線式にしていることや、ロックボルトの先端部のナットに治具でセンサーを固定できること等から、掘削作業を極力さまたげることなく実施できるシステムである。本論では斜坑と2号トンネルでの代表的な結果を示す。

4. 探査結果の可視化と地質モデル更新

最初に2章で述べたように、汎用ソフトで作成したソリッドモデルからモデルを更新する範囲を決定する(図-4A 黒枠)。範囲が大きいほど更新時間が長くなるためである。今回は図-4Bに示すように、斜坑と本坑トンネルが入る範囲を選択して、ボクセルモデルに変換してSG-ReGridに入力している(図-4C)。範囲としては、150m×350m×標高440～540mであり、ボクセルのメッシュサイズは2m、合計で320,345個のボクセルとなる。

4.1 斜坑での探査結果

斜坑(作業用トンネル)では坑口から先進Br.が行われた(図-3)。SG-ReGridには、孔口座標と、掘削方向の水平角・鉛直角、そしてボーリング調査会社による報告書に記載されている岩相区分とそれぞれの深度を入力することで図-5のように表示できる。先進Br.から、TD(Tunnel distance:坑口からの距離)60m付近に、周囲と比べてより脆弱で粘土化したアプライトがみられた。図-5のように、先進Br.から弱層の出現位置はおよそ予測することができるが、線状データのため、切羽に弱層がどのように入っ

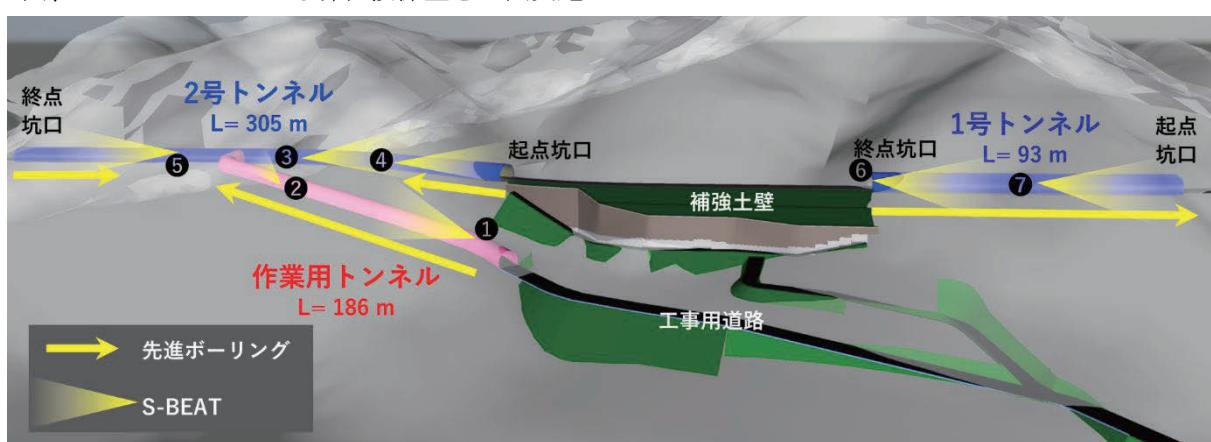


図-3 先進ボーリングとS-BEAT(1～7の番号)の実施位置

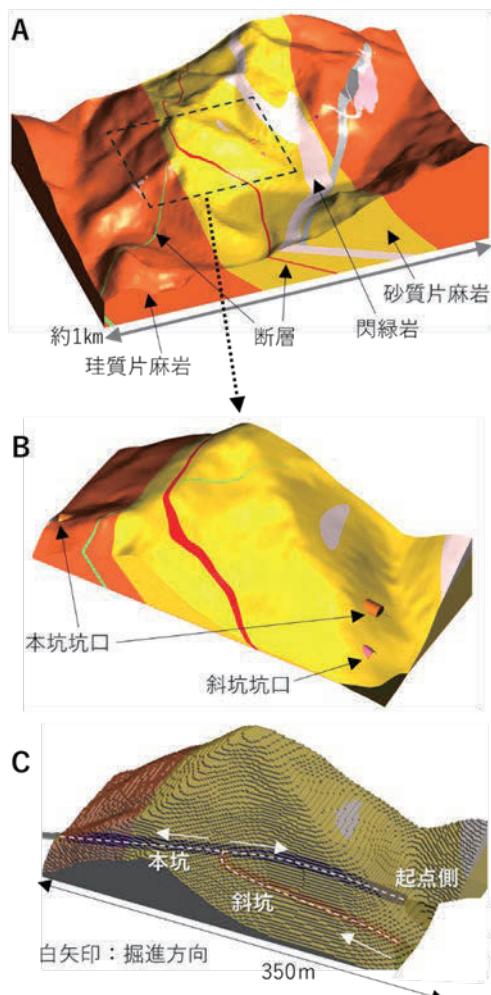


図-4 初期モデルの作成^{10),12)}

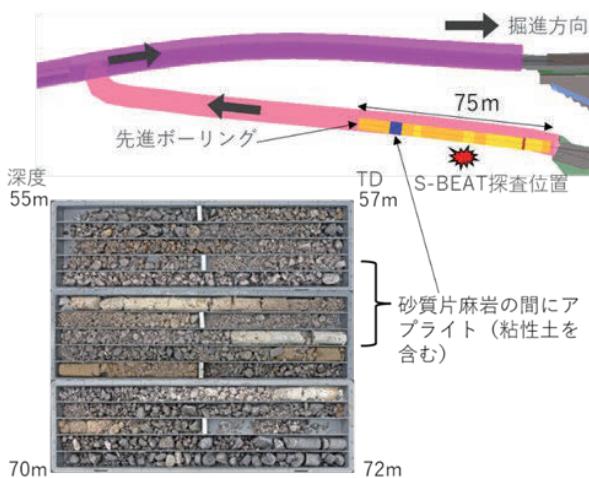


図-5 先進ボーリングの実施と弾性波探査^{11),12)}

てくるか、すなわち弱層の走向傾斜は別途調べる必要がある。それに対して S-BEAT による弾性波探査を実施した(図-5)。そのデータ解析は S-BEAT 専用ソフト^{13),14)}で行った。図-6A は上記のデータ処理

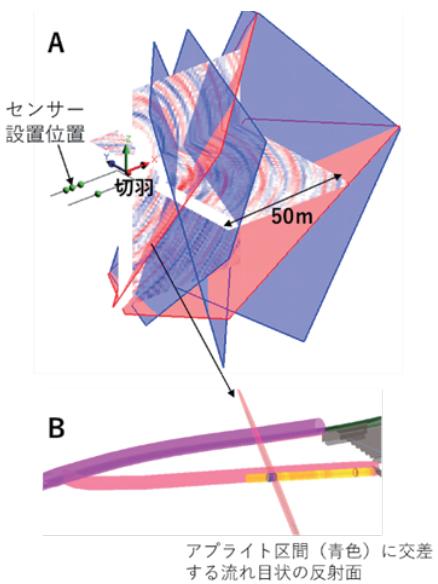


図-6 探査データの可視化^{11),12)}

A : S-BEAT による反射面の分布
B : 先進 Br. と反射面の交差

結果の反射面分布を色の濃淡で振幅強度を示している。青色と赤色は波動の押し引きの違いである。反射波解析結果は 3 次元データであり、そこから縦断面と平面図を表示させている。また、青色と赤色の面は、その三次元の反射面(放物線状)分布の中から振幅が大きいものから上位 5 番目までを示している。それぞれの放物線状データの中で最も反射強度が強い位置において法線をひき、その接線を描いたものが青赤の面になる。これらの面は、面の中心点の XYZ 座標と、面の走向傾斜角度の情報をもつ。それをテキストファイルとして出力し、SG-ReGrid に入力することができる。斜坑における S-BEAT による反射面を先進 Br. と合わせて示すと、先進 Br. でみられた弱層部に交差する面が認められる(図-6B、先進 Br. の青色部分)。S-BEAT は今までの実績から、明瞭な反射面は岩盤性状境界面の位置およびその走向傾斜に相当する可能性が高いため^{14),15)}、本トンネルでもアブライト層を含むより脆弱な層の出現を示す傾斜の傾向であると判断した。また、先進 Br. ではアブライトは約 4.5m の長さでみられたため、前記の反射面と同じ走向傾斜の面を 1 枚作成・追加し(図-7A)、その 2 つの面で挟まれる範囲を新しく弱層としてモデル化した(図-7B)。境界面の定義方法については、例えば升本ほか¹⁶⁾に記されるような論理モデルの一般的な考え方と同様に、地層の上下関係や優先順位を定義づけしている。SG-ReGrid ではボクセルモデルで更新するため、反射面の境界付近のボクセルが境界の上下左右どちらの範囲(属性の場合、地質の違

いに位置するかは、各ボクセルの中心点を基準として判断させている。今回の弱層の場合、その周囲の基盤岩である砂質片麻岩(図-4)より新しく優先順位の高い地層として設定しているため、初期モデルのボクセルの属性情報が弱層設定範囲において入れ替わることになる。なお、このケースの地質モデル更新にかかる時間は、例えばWindowsノートPCでCPU:Intel(R)Core(TM)i7 CPU @1.80GHz、RAM:16.0GBの場合、約10分である。この更新時間は、上述した新たな層境界を設定後、モデル更新の実行ボタンを押してから更新完了(新たな弱層の表示)までの時間である。実際の切羽では、当該区間で深さ2m程度の抜け落ちが発生した(図-7C)。その周囲と

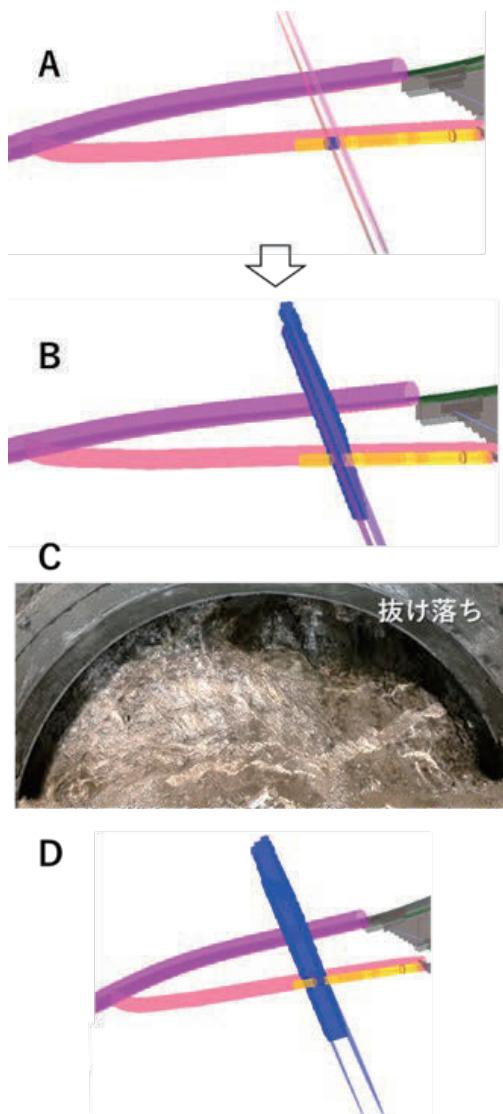


図-7 地質モデル更新による予測と実現¹²⁾象。A: 反射面を追加・移動、B: 反射面(境界面)の間を弱層区間として層を追加(青い層をモデル化)、C: 切羽写真、D: 弱層の幅を拡大

比べて土砂状に風化した範囲が卓越していた。SG-ReGridによる可視化により、補助工法の事前検討資料として受発注者間で情報共有することで、対策工選定を円滑に行うことができた。また切羽作業者に対して3D地質モデルを使用して注意喚起することにより、肌落ち災害リスクを大幅に低減して、切羽作業の安全性向上にも寄与することが出来た。その弱層範囲は先進Br.でみられた区間(4.5m)よりも長く、合計で12m程度、切羽の不安定箇所は続き、最大で31mmの天端沈下(累積変位)も生じたため、青い層の厚さを12mに広げた(図-7D)。この7.5mの乖離理由は、ボーリング情報は線状のため特定の層の三次元的な広がりの予測は難しいこと、また、実際はアプライトとその周辺地山も含んだ範囲をより脆弱な層(弱層)と判断したためである。

4.2 2号トンネルでの探査結果

つづいて、斜坑と本坑の離隔は20~25m程度と近接しているため、本坑掘削時においても斜坑と同様な事象の発生が想定された。そこで斜坑でのモデル更新結果から、弱層出現位置を平面図と縦断図により特定して、本坑においてもS-BEATを実施した(図-8A)。探査結果から、その弱層から10m程度探査地点側までの範囲において掘削方向に傾斜する反射面と、それとは反対に手前側に傾斜する反射面の2つの傾向が認められた(図-8A、縦断図)。実際の切

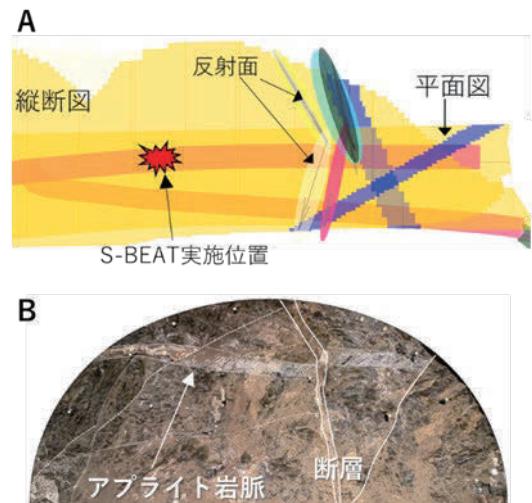


図-8 3Dモデルをもとに作成した縦断図・平面図¹²⁾。斜坑での探査結果から本坑掘削時の影響を検討。A: 本坑における弱層出現予測(青い層)とS-BEATによる反射面分布、B: 当該区間の切羽、白線は断層・岩脈・主な亀裂を示す。

羽でも、その予測のようにV字状に岩石が抜け落ちる傾向にあった。図-8Bにその区間の切羽写真を示す。斜坑における探査結果の三次元モデル化と、弱層の出現状況の整合性により、探査データの信頼性が向上していたため、ここでも事前にAGF工法(注入式長尺鋼管フォアパイリング工法:切羽前方・上部からの崩落を防止する工法)や鏡ボルト工法(切羽から前方にボルトを打ち込んで切羽安定化を図る工法)といった補助工法の事前検討を行い、遅延無く無事に掘削を完了することができた。

5. 地質モデル更新の自動化に向けた提案

ここでは、柱状試料や物理探査データから地質構造を考察できる専門技術者ではなくても、4章で示した前方探査データの解釈や地質モデルの更新について、同様な探査項目があれば同じ方法でモデル化するための方法を提案する¹²⁾。図-5、6、7において専門技術者による考察が必要な項目として、1)先進Br.からモデル化すべき弱層の判別、2)S-BEATによる反射面の選択、3)反射面のコピーと移動、4)モデル化した弱層の厚さの見直しがあげられる。1)はボーリング調査会社によって作成される報告書に書かれている岩相区分などの記載を参考すれば良いため判断は難しくなく、モデルを更新する技術者の経験には依存しない。今回の場合、報告書を参照し、よ

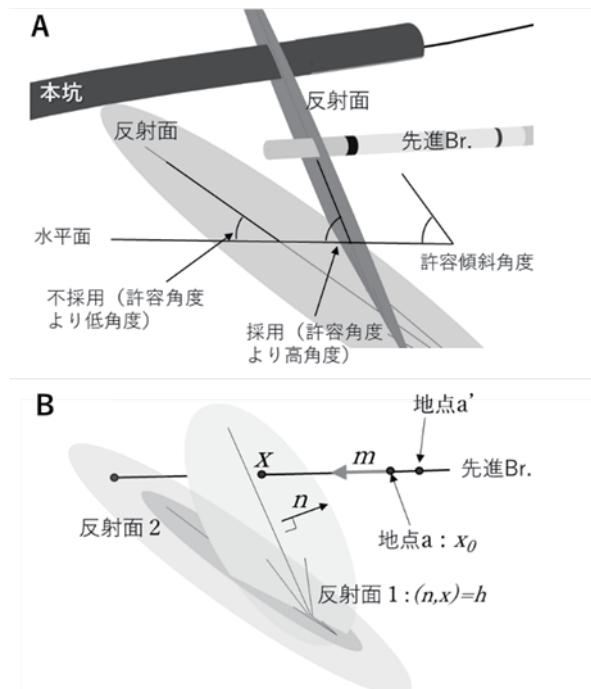


図-9 反射面の選択・編集方法の提案¹²⁾

り破碎質で粘土化が進んでいる範囲に着目した。4)においても、実際の切羽と変位状況により現場関係者で判断された地質的懸念範囲であるため、地質技術者の判断には依存していない。そこで2)と3)について条件設定を行うことで自動的に更新ステップが進む方法を次に述べる。図-9に反射面の選択・編集の方法を、図-10に更新ステップのながれを示す。

まず、図-6のようにS-BEATによる反射面は反射強度が高いものから順に5枚表示される。反射面の選択の際、地山のおもな層理面の走向傾斜の傾向に応じて、反射面の傾斜角度 θ について閾値をもうけた方が良い(図-9A)。例えば、施工前の地質調査結果から水平な地層が卓越すると判断される地域では、 θ は 0° に近い方が良いが、切り立った地層が多い場合は θ を $20\sim30^\circ$ 程度にすると良い。本論の場合、地山地質を考慮して θ は 20° として、 20° 未満の水平に近い反射面は無視して、その次に近い距離にある反射面を選択する。この閾値設定により、モデル化したい層に関する反射面をなるべく限定することが可能になると考える。

次に、先進Br.による弱層(図-5の青い層)の層境界を地点aおよび地点a'に(図-9B)、先進Br.と各反射面との交点を求める。図-9Bの中では、描画の都合上、反射面は径を持った平面として表しているが、実際は無限平面として以降の計算を行っている。符号付距離hとした場合の平面は、反射面の法

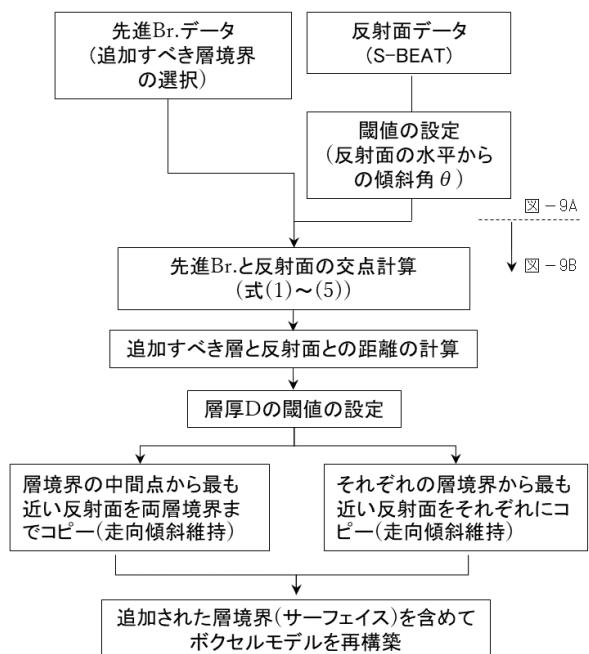


図-10 自動的に地質モデルを更新するステップの提案¹²⁾

線ベクトル n 、反射面上の点 x の内積として式(1)で表される。

$$(n, x) = h \quad (1)$$

一方ボーリング上の点 x は、地点 a を x_0 、ベクトルを m 、直線パラメータを t とすると式(2)で表される。

$$x = x_0 + tm \quad (2)$$

反射面とボーリングの交点では、これらが両方満たされるため、

$$(n, x_0 + tm) = h \quad (3)$$

となり、そして t に関して解くと、

$$t = \frac{h - (n, x_0)}{(n, m)} \quad (4)$$

となる。最終的に反射面とボーリングの交点 x は式(5)で求められる。

$$x = x_0 + \frac{h - (n, x_0)}{(n, m)} \quad (5)$$

そして、地点 $a \cdot a'$ の中間点と上で求めた先進 Br. と反射面の交点の距離を算出する。地点 $a \cdot a'$ の XYZ 座標は、先進 Br. の柱状データの中心線からそれぞれ用いる。

ここで、この地点 $a-a'$ 間の距離 D に閾値をもうける。 D は注目すべき層の長さ(厚さ)や、対象とする地山の地質構造により変化させることができ、掘削もしくは前方探査の初期段階で専門技術者により設定されると良い。例えば本論の場合、先進 Br. から D は 5m とした。 D が閾値より小さい場合、地点 $a-a'$ 間の中間地点座標から最も近い反射面を選択して、その走向傾斜と同じ面を地点 $a \cdot a'$ にコピーする。 D が閾値より大きい場合は、 a に最も近い反射面を a の位置にコピー、 a' に最も近い反射面を a' の位置にコピーする。反射面と地点 $a \cdot a'$ の距離は式(1)～(5)で示したように、反射面の中心からの距離ではなく、反射面とボーリングの交点座標から求める。この距離が 2 枚以上の反射面で同じ場合は、反射波

の振幅が大きい方を選択する。コピーして新たに作成する反射面の中心は地点 $a \cdot a'$ と同じ座標にする。

本章で述べた方法は、先進 Br. や削孔調査、弾性波探査が実施されることを前提にしている。しかし、当トンネルのように斜坑から近接する本坑の掘削や、供用中のトンネルに併設したトンネル掘削のように、切羽観察結果がある場合は、弱層の範囲と主たる走向傾斜から新たにモデル化することが可能であり、図-8 で示したように平面図・縦断図を用いることで近接・併設トンネルでの懸念範囲について事前に対策工検討が可能になる。

6. まとめと課題

本論では、三次元地質モデルを逐次的に簡易に更新できるシステムとして開発を進めている SG-ReGrid について述べ、設楽ダム瀬戸設楽線トンネル工事における活用事例を示した。同システムにより、受発注者間で円滑に設計変更の協議を行うことができ、また職員への注意喚起にも役立てられた。そして、この事例をいかし、地質調査や物理探査の経験に依存せず、同じ情報・アルゴリズムを用いて地山状況を把握できる方法を示した。

従来の地質モデル更新作業は、特殊なソフト操作のため経験を積んでいないと即座の対応は難しく、またモデル更新自体にも時間がかかるのが一般的である。一方で、SG-ReGrid は用いるデータを必要最小限にしていること等から、今回の事例では所要時間 10 分程度と格段に早い。また、5 章までに示した自動化につながる方法を取り入れれば、データ入力に 5-10 分かかったとしても作業負担は軽く、モデル更新の試行錯誤にも向いていて使い勝手が良い。

しかし、どのトンネル工事でも有用なシステムにするためには、探査項目やデータの種類の組み合わせごとの論理的な更新アルゴリズムの提案と検証が必要である。例えば、先進 Br. について今回は岩相を用いたが、試料の強度試験結果による硬さの区分として、削孔データと関連付けることも可能である。その他、境界面の形状を実際に近い曲面で作成する機能の追加など、細かな改良も必要であろう。

また山岳トンネル工事では、地山の地質によるが、トンネル内空変位や坑内湧水の対策工が必要になることがしばしばある。変位や湧水量の予測解析が必要になるが、これも一般的にはリソースが増える作業であり、手軽にどのトンネルでも日常的に実施するわけにはいかない。省人省力化が求められるなか、

探査データ取得・地質モデル更新・予測解析をデジタルツインにより簡易に実行できる可能性がある。当社では、データ集約から予測解析までの一連の流れを実施可能なシステムを検討し、トンネル掘削工事への導入を進めている^{17),18)}。

謝辞

SG-ReGrid の開発にあたって、(株)地層科学研究所の方々には大変にご協力頂きました。記して御礼申し上げます。

＜参考文献＞

- 1) 山下雅之, 山本悟, 三井善孝: ドリルジャンボの削孔データを使用した3次元地山評価システム (DRISS-3D)の開発, 西松建設技報, Vol.41, No.15, pp.1-5, 2018
- 2) Hemmi, R., Ide, Y., Kakimi, K., Shizawa, T. and Ito, F.: Automatic blasting design and construction system optimized for geological conditions, Proceedings of World Tunnel Congress 2024, pp.1469-1474, 2024
- 3) 畑浩二, 杉浦伸哉, 後藤直美, 藤岡大輔: 山岳トンネルにおけるICTを活用した予測型CIMの開発, 土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.71, No.2, II-78-II-85, 2015
- 4) 加藤信義, 津坂仁和, 名合牧人, 山上順民, 松原誠, 重廣道子, 相澤隆生, 亀村勝美: 地下構造物建設における地盤・地質情報の三次元化適用事例, 地質と調査, No.139, pp.17-22, 2014
- 5) Labourdette, R., Hegre, J., Imbert, P. and Insalaco, E.: Reservoir-scale 3D sedimentary modeling: approaches to integrate sedimentology into a reservoir characterization workflow, Geol. Soc. Spec. Publ., No.309, pp.75-85, 2008
- 6) 高野修, 辻隆司: 石油探鉱開発における三次元地質・貯留層モデルリング: 堆積岩・シーケンス層序学・サイスミック地形学・物理探査学・地球統計学の融合による地質モデルの構築, 地質学雑誌, Vol.119, No.8, pp.567-579, 2013
- 7) 地震調査委員会: 長周期地震動評価 2016年試作版—相模トラフ巨大地震の検討—, 地震調査研究推進本部, https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lphshm/16_choshuki/, 2016
- 8) 堀川晴央, 水野清秀, 石山達也, 佐竹健治, 関口春子, 加瀬祐子, 杉山雄一, 横田裕, 末廣匡基, 横倉隆伸, 岩淵洋, 北田奈緒子, Arben Pitarka: 断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデル, 活断層・古地震研究報告, No.3, pp.225-259, 2003
- 9) 吉河秀郎, 福田毅, 松尾勝司: 三次元地質モデルの逐次更新方法の提案, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会要旨集, VI-199, 2021
- 10) 吉河秀郎, 青野泰久, 齋藤寛治: 三次元地質モデル逐次更新システムの開発と現場適用例, 日本応用地質学会令和5年度研究発表会講演論文集, pp.15-16, 2023
- 11) Yoshikawa, S. Aono, Y., Saito, K. and Nishi, T.: Sequential 3D geological information system using re-grid of voxel model based on exploration data ahead of the tunnel face, Proceedings of World Tunnel Congress 2024, pp.655-659, 2024
- 12) 吉河秀郎, 佐ノ木哲, 岩永昇二, 齋藤寛治: 切羽前方探査データを用いた三次元地質モデルの逐次更新方法, 応用地質, Vol.65, No.6, pp.273-280, 2025
- 13) 西琢郎, 若林成樹: トンネル掘削振動を利用した前方探査手法の研究開発, 応用地質, Vol.56, No.6, pp.343-349, 2016
- 14) 吉河秀郎, 青野泰久, 淡路動太, 邊見涼, アドザム アズマ, 平野宏幸: トンネル坑内探査システムの効率化と汎用化, 第15回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp.115-120, 2021
- 15) 吉河秀郎, 青野泰久, 淡路動太, 西琢郎: 複数手法を組み合わせた切羽前方探査システム, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会要旨集, VI-466, 2019
- 16) 升本眞二, 塩野清治, 根本達也, 野々垣進: 三次元地質モデルの基本要素と地質構造の論理モデル, 地質学雑誌, Vol. 119, No. 8, pp. 519-526, 2013
- 17) 清水建設ニュースリリース:
<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2021/2021038.html>
- 18) 清水建設ニュースリリース:
<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2025/2025033.html>