

穿孔データを利用した三次元不均質モデルによる掘削シミュレーション

鹿島建設(株) 正会員 ○石井 雅子 正会員 宮嶋 保幸
鹿島建設(株) 正会員 升元 一彦 正会員 岩前 伸幸
東京都市大学 正会員 珠玖 隆行

1. はじめに

山岳トンネル工事において、トンネル支保パターンは当初設計で地山等級毎に予め選定されており、掘削時に切羽観察や坑内変位計測などの現場計測を行いながら、その結果に基づいて発注者との協議の上、最終的な支保パターンを決定している。また、断層などの特殊地山条件下では事前に解析的な検討を行ったうえで、支保パターンを選定している。しかしながら、地山状況に応じた支保パターンを選定できず、支保耐力不足による変状トラブルが発生している。その原因として、断層などの特殊地山では地質が複雑なため、地山状況を適切に評価できず地山状況と支保パターンに齟齬が生じていることが考えられる。したがって、トンネルを安全かつ経済的に掘削するためには、地山状況を適切に評価し、最適なトンネル支保工を選定することが重要であるといえる。

一方、山岳トンネル工事では、コンピュータジャンボの普及に伴い、穿孔に要するエネルギーを表す破壊エネルギー係数（Energy value : E_v （以下、 E_v とする））による地山状況の評価への活用が進められている¹⁾。従来は、図-1 に示すように、統計解析処理によってコンター表示された E_v 分布を工事関係者で情報共有し、施工の安全性と合理性の向上に役立ててきた。しかしながら、支保パターン決定には直接結びついておらず、定性的な評価に止まっていた。そこで、 E_v 分布を力学解析に活用することで、地質分布の不均質性を反映し、地山状況を適切に評価した三次元モデルによるトンネル掘削を数値解析的に再現する手法（以降、掘削シミュレーションと呼ぶ）により、最適な支保パターン選定が可能と考える。さらに、従来の解析は地山等級毎の標準的な地山物性値を入力する決定論的な評価方法が一般的であるが、岩盤は自然材料であり割れ目の影響などばらつきを有するため、岩盤物性のばらつきを考慮した確率論的な評価方法とすることで、より信頼性を担保することができると考える。そこで、各地山物性値の割付けに、岩盤データベースに基づく統計的変換モデルを利用し、地山挙動を確率論的に評価できるようにした。このように地山状況を適切に評価した掘削シミュレーションを適用することで地山状況に応じた支保パターンが選定され、変状トラブルによる工程遅延がなくなり、経済性・安全性に優れた掘削が実現できると考える。

本報では、掘削シミュレーションのうち、あるトンネル現場を対象に穿孔データを利用した三次元不均質モデルによる解析を実施し、発生変位を確率論的に評価したので、その結果について報告する。

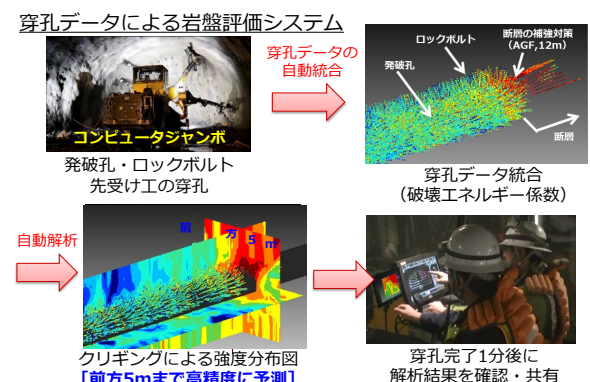


図-1 従来の穿孔データ活用事例

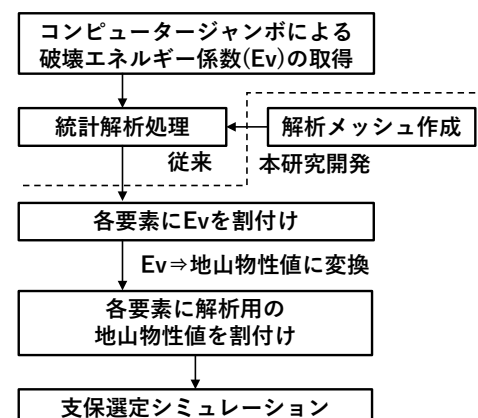


図-2 掘削シミュレーションの流れ

キーワード 山岳トンネル, 穿孔エネルギー, 掘削解析, 支保パターン選定

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 TEL 070-2820-2967

2. 掘削シミュレーションの概要

掘削シミュレーションの流れを図-2に示す。まず、コンピュータジャンボによって取得した E_v を統計解析処理により空間補間し、三次元解析モデルの各メッシュに割り付けることで地山の不均質性を表現する²⁾。次に、 E_v を地山物性値に変換し、各メッシュに解析用の地山物性値を割り付ける。その後、複数の支保パターンによる掘削解析を行い、出力される地山変位と管理基準値を比較することで、安全性と経済性の観点から最適な支保パターンの選定を行う。その際、出力される地山変位は岩盤物性のばらつきに応じた、確率的な評価結果として、地山変位の結果を平均と $\pm 1\sigma$ として得ることができる。

3. 破壊エネルギー係数から地山物性値への変換

従来の解析では、トンネル数値解析マニュアル³⁾などを参考に、地山等級毎の標準的な地山物性値を入力する決定論的な評価方法が一般的である。一方、掘削シミュレーションは岩盤物性のばらつきを反映した確率論的な評価方法を目指している。そこで、以下の手順で E_v から地山物性値への統計的変換モデルを構築した。

まず、 E_v から変形係数 E への統計的変換モデルを構築した。具体的には、図-3に示すように複数現場にて、コンピュータジャンボによりトンネル内から岩盤を穿孔して E_v を取得した。そして、その近傍で $\phi 66$ mm のコアボーリングを行い、孔内載荷試験により変形係数 E を取得した⁴⁾。対象とした岩盤は花崗斑岩およびメタベイサイトであり、硬質な柱状コアを呈する箇所や破砕帯により岩片状となっている箇所などで試験を行い、変形係数が 200~6300 MPa の範囲のデータを取得した。その後、取得した E_v と E のデータに基づいて、2変量正規分布による統計的変換モデルを構築した(図-4)。

次に、 E_v からすべての地山物性値への統計的変換モデルを構築するために、公開されている岩盤および岩

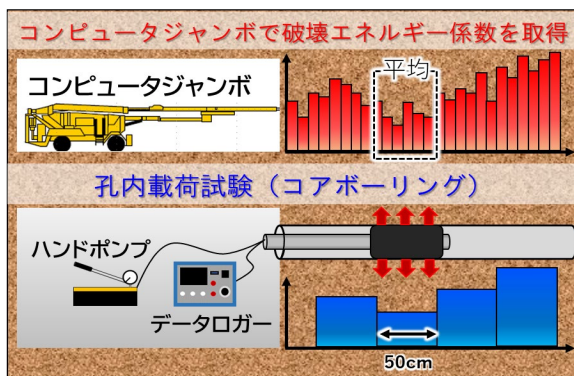


図-3 破壊エネルギー係数と変形係数の取得

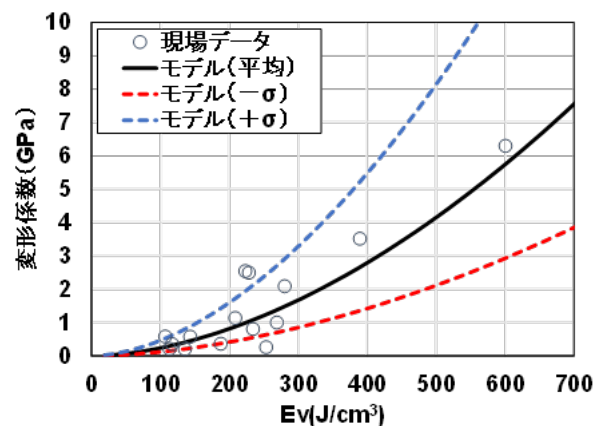


図-4 破壊エネルギー係数と変形係数の関係

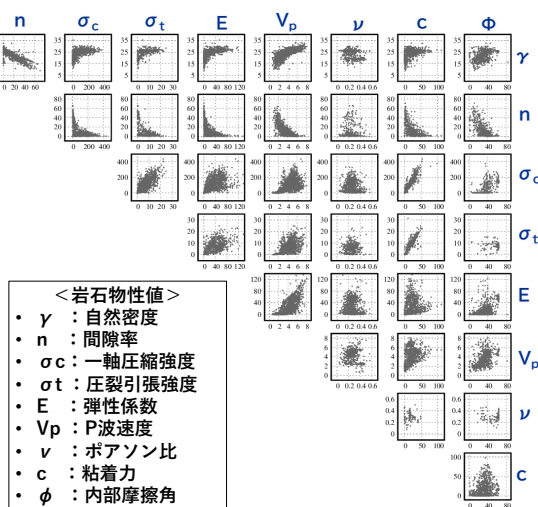


図-5 岩盤データベース

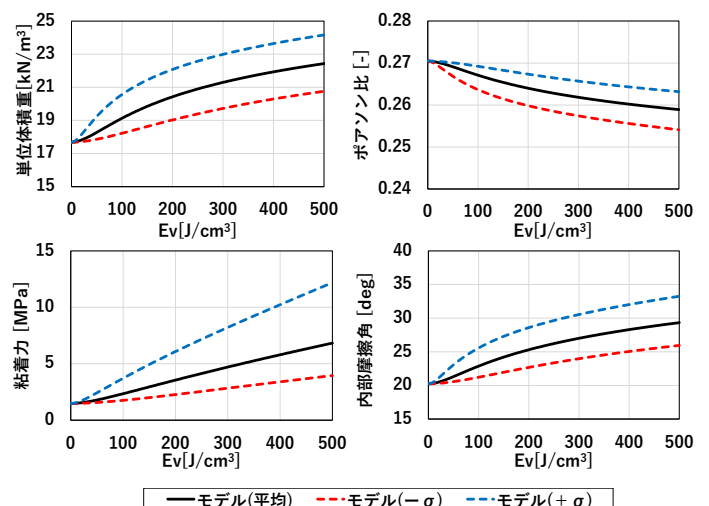


図-6 破壊エネルギー係数と解析物性値の関係

石試験結果から収集した物性データを統合し、各種物性値の相互関係を示す岩盤データベース⁵⁾を整備した(図-5)。岩盤データベースにはEvの情報が含まれていないため、EvからEへの統計的変換モデルを組み合わせ、Evから推定したEが与えられたときの条件付き確率分布を求めることで、Evからすべての地山物性値への統計的変換モデルを構築した。解析に使用する地山物性値への統計的変換モデルを図-6に示す。

4. 三次元不均質モデルによる数値解析

コンピュータジャンボを使用している、あるトンネル現場を対象に、穿孔データを利用した三次元不均質モデルによる掘削シミュレーションを試行し、発生変位の確率論的な評価を試みた。

(1) 不均質地山モデルの作成

コンピュータジャンボで取得した穿孔データ(破壊エネルギー係数)を活用した不均質地山モデルの作成手順を図-7および下記に示す⁶⁾。

- ① 解析メッシュを作成し、コンピュータジャンボから取得した破壊エネルギー係数をメッシュの座標に割付ける。
- ② オーディナリークリギングによりすべての節点の破壊エネルギー係数を決定する。
- ③ ソリッド要素を構成する節点の破壊エネルギー係数の平均値を当該ソリッド要素の破壊エネルギー係数とする。
- ④ 各ソリッド要素に割当てられた破壊エネルギー係数の値から、地山物性値への統計的変換モデルを用いて各ソリッド要素の物性値を設定する。

(2) 解析条件

三次元掘削解析には、有限差分コードFLAC3Dを用いた。本検討では、掘削手順を考慮した三次元モデルによる逐次掘削解析を実施する。解析モデル図を図-8、各構造のモデル化方法と境界条件を表-1と表-2に示す。なお、ロックボルトはモデル化していない。解析領域は、着目断面に境界条件の影響が及ばないように十分な領域を設定した⁷⁾。また、土被りは240mとし、モデル化範囲との不足分は上載荷重として考慮した。

今回、従来の解析手法との比較を行うため、決定論的な評価方法と確率論的な評価方法について

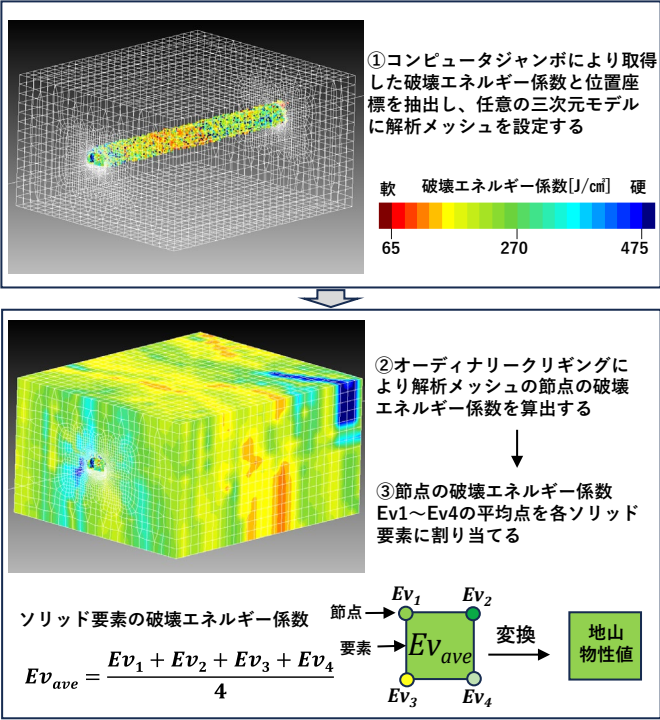


図-7 不均質地山モデル作成手順

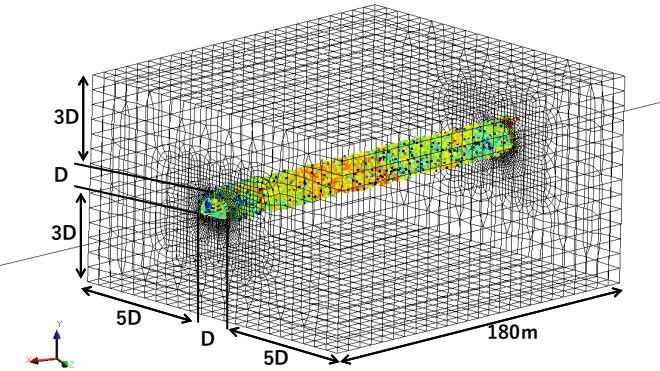


図-8 解析モデル図

表-1 各構造のモデル化

構造	モデル要素	モデル化
地盤	ソリッド要素	弾完全塑性 (Mohr-Coulomb)
鋼製支保工	シェル要素	弾性
吹付けコンクリート	(等価剛性)	弾性

表-2 境界条件

境界位置	水平方向	鉛直方向
上面	自由	自由
側面	固定	自由
底面	固定	固定

表-3 地山物性値 (決定論的な評価方法)

単位 体積重量 (kN/m ³)	変形係数 (MPa)	粘着力 (MPa)	内部 摩擦角 (deg)	ポアソン比
22	500	0.5	40	0.3

検証を行った。決定論的な評価方法における地山物性値は、「山岳トンネル設計施工指針 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 令和5年3月」を参考として、表-3に示すように解析対象区間の平均的な地山等級に応じた物性値を与えた⁸⁾。一方、確率論的な評価方法における解析物性値は、図-4および図-6に示す統計的変換モデルを用いた。決定論的な評価方法および確率論的な評価方法における変形係数の分布を図-9に示す。決定論的な評価方法では単一土層モデルとし、確率論的な評価方法では不均質地山モデルとした。また、鋼製支保工（H-200）と吹付けコンクリート（吹付け厚 25 cm、高強度コンクリート 36N/mm²）を構成する合成シェル要素の物性を表-4に示す。

解析手順は、自重解析により解析メッシュに初期応力を与えたのち掘削解析を行った。対象としたトンネルの掘削延長は 180m であり、計算の簡略化のため、前後 50m 区間は一括掘削とし中央の 80m 区間を 1m掘削する毎に支保工を導入する逐次掘削とし、収束計算を行った。

(3) 解析結果

本解析では、統計的変換モデルにおける平均値および $\pm 1\sigma$ の計 3 ケースの計算と、従来の決定論的な評価方法である地山等級毎の標準的な地山物性値での計算を実施した。掘削完了後におけるモデル中央部付近の天端沈下および内空変位の経距変化グラフを図-10に示す。実際のトンネルで計測された坑内変位の実測値も併せて示す。同図より、実測値における天端沈下量および内空変位量は、掘進するにつれて増大する傾向であることが確認できる。これに対して、従来手法での結果は、単一土層モデルによる解析のため掘進方向に変化する変位の傾向を捉えることができない。一方、破壊エネルギー係数を割り付けた不均質地山モデルでは、掘進方向に天端会沈下量および内空変位量が増大する傾向を示しており、実測値の大きな傾向を捉えられていることが確認できた。

また、岩盤物性のばらつきを反映した確率論的な評価により、発生変位における平均、 $\pm 1\sigma$ の結果を示すことができた。さらに、解析結果

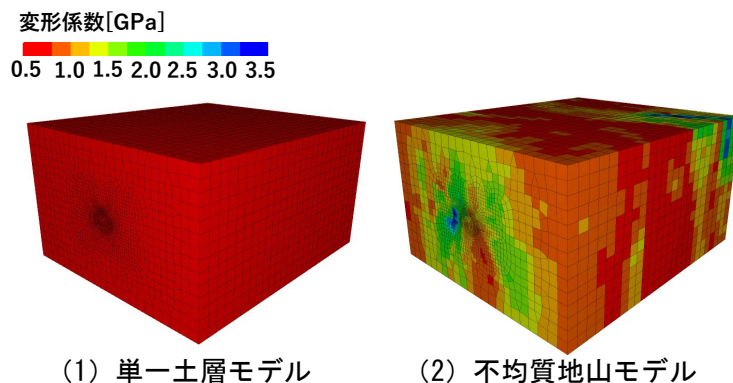
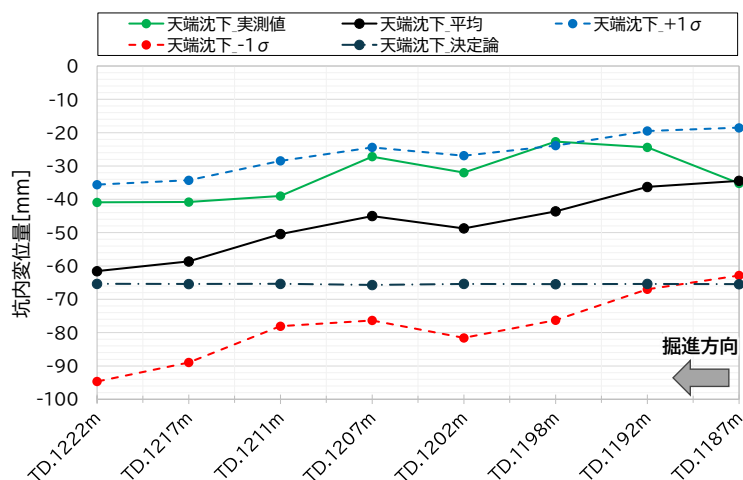


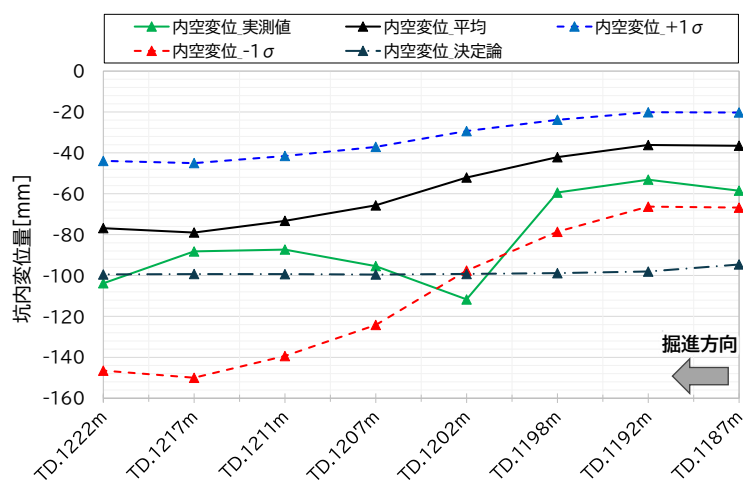
図-9 変形係数の分布

表-4 合成シェル要素物性値

単位 体積重量 (kN/m ³)	変形係数 (MPa)	等価厚さ (m)	ポアソン比
30.9	1.37×10^4	0.2	0.2



(1) 天端沈下量



(2) 内空変位量

図-10 経距変化グラフ

と実測値を比較したところ、天端沈下量および内空変位量が $\pm 1\sigma$ の信頼区間内に概ね収まっていることから、今回構築した統計的変換モデルの妥当性を確認することができた。このように、地山物性値を統計的変換モデルで評価することで、一意的な解析結果ではなく、岩盤物性のばらつき、不確実性を考慮した確率的な評価が可能となる。今後さらに、データ同化技術により既掘削区間で得られた坑内変位計測結果を反映した力学モデルに更新することで、実測値に近づき岩物性のばらつきも小さくなり、より信頼性の高い予測解析が可能になると考える。

5. まとめ

不均質な地山状況を適切に評価し、最適なトンネル支保工を設計するための掘削シミュレーションの研究開発を進めており、今回、その試行結果について報告した。まず、コンピュータジャンボで取得される穿孔データ（破壊エネルギー係数）を活用し、地質分布の不均質性を反映させた三次元不均質モデルを作成した。また、破壊エネルギー係数から地山物性値へ変換するための統計的変換モデルを構築し、岩盤物性のばらつきを反映させた確率論的な評価方法を確立した。今後は、掘削シミュレーションにデータ同化技術を組み込むことで、あらゆる地山を対象により精度の高い予測解析が可能になると考える。さらに、予測対象となる切羽前方の地山モデリングについて検討を進める所存である。

参考文献

- 1) 杉本他：地山予報を施工サイクルに取り入れた新しい山岳トンネル施工法，土木建設技術発表会，II-05，2023.
- 2) 小泉他：穿孔エネルギーを用いた解析モデルの高精度化とトンネル掘削シミュレーション，土木学会トンネル工学研究発表会報告集，第30巻，2020.
- 3) 高速道路総合研究所：トンネル数値解析マニュアル，p2-13，2017.
- 4) 熊谷他：破壊エネルギー係数による変形係数の推定と掘削解析への適用，令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会，III-168，2022.
- 5) Shuku et al.：Bayesian Updating for Rock Properties Based on a Rock Database，Geo-Risk2023，84-92，2023.
- 6) 熊谷他：穿孔データを活用した地山物性値の多変量正規分布モデルによるトンネル掘削解析技術，土木学会トンネル工学研究発表会報告集，第32巻，2022.
- 7) 鉄道・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工指針，p. 315，2023.
- 8) 鉄道・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工指針，p. 322，2023.