

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

熊谷 丈瑠¹・石井 雅子²・珠玖 隆行³・横田 泰宏⁴
・伊達 健介⁵・宮嶋 保幸⁶・升元 一彦⁷

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: kumagata@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: miyaishi@kajima.com

³正会員 岡山大学准教授 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山県北区津島中三丁目 1-1)
E-mail: shuku@cc.okayama-u.ac.jp

⁴正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: y.yokota@kajima.com.sg

⁵正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: k.date@kajima.com.sg

⁶正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: miyaj@kajima.com

⁷正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: masumotk@kajima.com

山岳トンネルではコンピュータジャンボから取得できる穿孔データの活用が進められている。著者らは、これらのデータを活用した三次元掘削解析による支保パターン選定技術の研究を進めている。本研究では、破壊エネルギー係数から解析に必要な様々な地山物性値を推定するため、破壊エネルギー係数と地山物性値との相関を多変量正規分布で表したモデルを構築し、実際のトンネルを対象として3次元解析を実施した。解析結果として天端沈下や内空変位を確率分布として取得し、計測値との比較検討を行った。さらに、データ同化を利用することで、解析結果から物性値の多変量正規分布モデルの更新が可能となり、解析精度を向上できる可能性を示した。

Key Words: mountain tunnel, numerical simulation, multivariate normal distribution, data assimilation

1. はじめに

日本の地質構造は複雑に分布していることから、山岳トンネルで実施される事前地質調査には精度に限界がある。そのため、掘削時の切羽観察により地質状況を確認して支保パターンを選定するとともに、計測によって選定した支保パターンの妥当性を確認している。しかしながら、断層部などの地質不良部に遭遇した場合には、通常の支保パターンでは剛性が不足して、過大な変位や崩落が懸念されるため、数値解析によって支保構造が決定されることがある。しかしながら、地質分布を詳細に把握することは難しく、特に断層部などで著しい不均質性を考慮できないため、過剰に重厚な支保構造となること

や、支保耐力不足による変位などのトラブルが発生している。

一方、近年コンピュータジャンボが普及し、発破孔やロックボルト孔などの穿孔データからトンネル周辺の地山情報を詳細に把握することが可能となった。筆者らは、コンピュータジャンボから取得される破壊エネルギー係数を活用した不均質地山モデルによる数値解析手法の開発を進めている¹⁾。

本研究では、破壊エネルギー係数から地山物性値を評価するため、様々な研究や機関でまとめられた岩盤および岩石試験の結果から、複数の地山物性値間の相関を確率的に評価できる多変量正規分布モデルを構築し、多変量正規分布モデルを用いたトンネル周辺の不均質地山モ

デルの三次元掘削解析を実施した。さらに、掘削後の計測結果（内空変位量）から、地山物性値の相関を示す多変量正規分布モデルをデータ同化によって更新することによって、予測解析の精度を逐次向上させることが可能となることを示した。

2. 破壊エネルギー係数による地山物性値の評価

コンピュータジャンボにより空間的に高密度で取得できる破壊エネルギー係数から、三次元掘削解析のための不均質地山モデルを作成するためには、破壊エネルギー係数から地山物性値を推定することが必要である。しかしながら、これまでに破壊エネルギー係数から解析に必要な変形係数や粘着力、内部摩擦角などの物性値を評価した研究は少ない。これに対し、小泉ら²⁾は、コンピュータジャンボから得られたトンネル周辺の破壊エネルギー係数の分布を数値解析に利用するため、独自に作成した破壊エネルギー係数とP波速度の相関を示すデータベースに基づき、以下の手順で三次元掘削解析の不均質地山モデルを作成して解析物性値を決定している。

- ① 独自のデータベースに基づいて、破壊エネルギー係数をP波速度に変換
- ② 日本道路協会の地山等級に対する弾性波速度区分³⁾に従ってP波速度から地山等級を判別
- ③ 地山等級から地山物性値⁴⁾に変換

この手法では、破壊エネルギー係数から様々な物性値を決定できるが、岩盤の不確実性やリスクを考慮することができず、解析は一意的な結果しか得ることができない。そこで本研究では、岩盤の不確実性を加味するため、破壊エネルギー係数と地山物性値の関係を多変量正規分布で示すモデルを構築した。

(1) 破壊エネルギー係数とP波速度の2変量正規分布モデル

施工中のトンネルでは、岩盤の力学試験を実施することが難しいことから、穿孔時に得られる破壊エネルギー係数と岩盤物性の相関を評価した研究は少ない。そこで筆者らは、図-1に示すように、前方探査として実施される削孔検層の孔を利用して速度検層を実施し、同一深度の破壊エネルギー係数とP波速度の相関を示すデータベース（RockMass/2/3500）を作成している⁵⁾。これまでに表-1に示す6現場の地質を対象として3,500セットのデータを取得している。

作成したデータベースに基づいた、破壊エネルギー係数とP波速度の関係を図-2に示す。図-2に示すように、P波速度に対する破壊エネルギー係数の分散は非常に大きい。これは、岩盤の不均質性や岩種の違い、打撃圧や

フィード圧などの穿孔方法の違いなどによるものと考えられるが、このように分散の大きな相関から、平均値を用いて物性値を一意的に決定することは適切でない。

そこで、このような地山物性値の分散は正規分布と仮定し、式(1)で示す多変量正規分布モデルで破壊エネルギー係数とP波速度の相関を評価した⁹⁾。

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |C|}} \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{x}^T C^{-1} \mathbf{x}\right) \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{x} ：標準正規分布に従うパラメータベクトル、 C ：共分散行列（相関行列）、 n ：パラメータ数である。図-2には、破壊エネルギー係数とP波速度の多変量正規分布モデルに基づき、平均値を赤色の点線で示し、 $\pm 2\sigma$ を灰色の点線で示した。

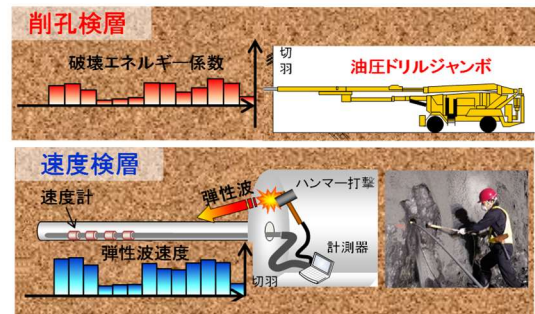


図-1 削孔検層と速度検層による破壊エネルギー係数とP波速度の相関データベースの作成

表-1 破壊エネルギー係数とP波速度の相関データベースの内訳

No.	岩種	データ数
1	粘板岩	300
2	凝灰角礫岩	230
3	頁岩優勢砂岩混在岩	1200
4	粘板岩優勢混在岩, 蛇紋岩	1180
5	凝灰角礫岩	420
6	花崗閃緑岩	170

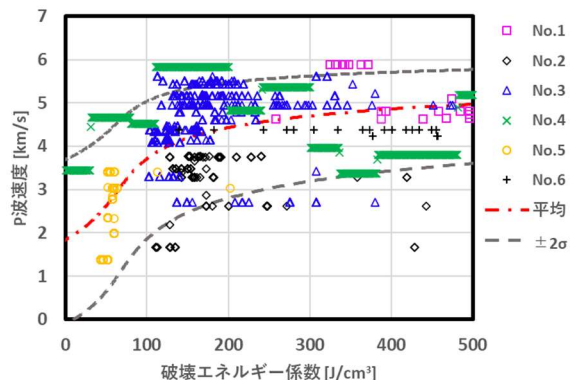


図-2 破壊エネルギー係数とP波速度の関係

(2) 複数の地山物性値間の多変量正規分布モデル

岩盤の粘着力や内部摩擦角、一軸圧縮強度やP波速度などの物性値間の関係は、正の相関、負の相関など相関の程度は様々ではあるが、お互いに相関性を示すことが知られている。また、様々な研究や機関で岩盤や岩石試験が実施されているが、これらの相関を確率的に整理した取り組みは少ない。そこで、公開されている岩盤および岩石試験の結果について、地盤工学会のデータベース⁶⁾など計108件の文献・資料のデータを統合し、**図-3**に示す岩盤データベース(J-ROCK/99816)を作成した⁷⁾。さらに、地山の物性値の様々な組み合わせについて、式(1)に示した多変量正規分布モデルによって相関関係を確率的に評価した。

図-3に示す岩盤データベースには、P波速度も組み込まれているため、破壊エネルギー係数から前節で示した多変量正規分布モデルを介して、様々な物性値との確率的回帰モデルも取得することができる。**表-2**に、多変量正規分布モデルから取得した破壊エネルギー係数と各物性値との変換式を示す。

3. 不均質地山モデルによる数値解析

(1) 適用現場の概要

コンピュータジャンボの穿孔データを利用し、地山の不均質地山モデルを作成し、三次元掘削解析を実施した。掘削工法は、ベンチ長4mの補助ベンチ付き全断面工法により掘削した。

(2) 不均質地山モデルの作成

コンピュータジャンボによる穿孔データから不均質地山モデルを**図-4**および下記に示す手順で作成した⁸⁾。

- 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り付ける。
- ② オーディナリークリギングにより全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り当てられた破壊エネルギー係数の値から、**表-2**の変換式を用いて地山物性値を各ソリッド要素の物性値として設定する。

(3) 三次元掘削解析の概要

三次元掘削解析には、有限差分コードFLAC3Dを用いた。解析モデルは地表面形状を考慮した3次元モデル(**図-5**)で、解析領域上面は自由境界、側面、底面は口

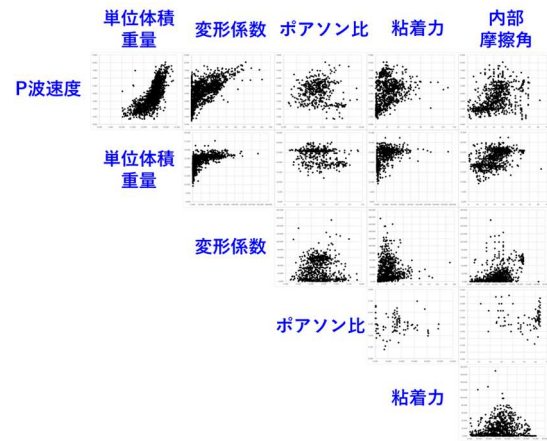


図-3 岩盤データベース

表-2 破壊エネルギー係数 (=x) と地山物性値の変換式

密度 [$\times 10^3 \text{ kg/m}^3$]	-1 σ	0.153x + 1.263
	平均	0.149x + 1.654
	+1 σ	0.123x + 2.054
変形係数 [MPa]	-1 σ	-7e-4x ² + 1.02x - 5.44
	平均	-0.01x ² + 17.54x - 102.54
	+1 σ	-0.18x ² + 1.02x - 5.44
ポアソン比 [-]	-1 σ	-0.026x + 0.483
	平均	-0.019x + 0.346
	+1 σ	-0.017x + 0.250
粘着力 [MPa]	-1 σ	-3e-6x ² + 0.0038x - 0.2704
	平均	-3e-5x ² + 0.0328x - 2.0712
	+1 σ	-8.6919x + 7.3324
内部摩擦角 [deg]	-1 σ	2.4526x + 8.5722
	平均	2.7722x + 25.032
	+1 σ	2.1586x + 44.589

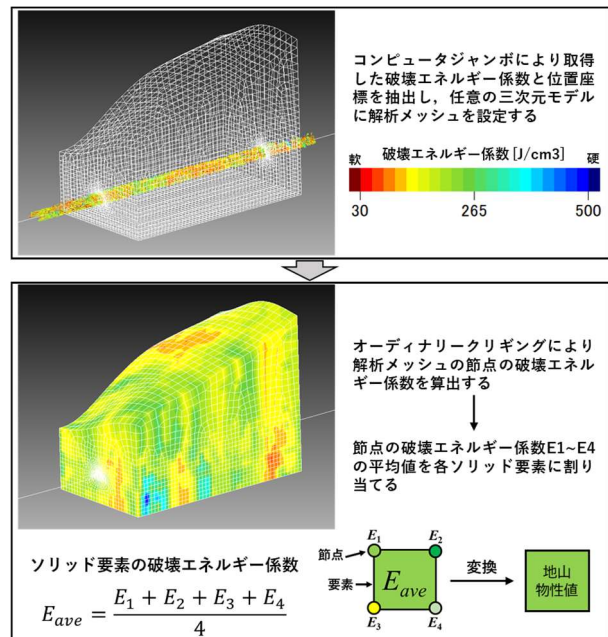


図-4 不均質地山モデル作成手順

ーラー支持とした。吹付けコンクリートは Shell 要素、鋼製支保工は beam 要素でモデル化している。吹付けコンクリートの物性を表-3、鋼製支保工の物性を表-4に示す。なお、ロックボルトおよび補助工法はモデル化していない。

(4) 解析手順

解析は、はじめに側圧係数を $\lambda=1.0$ として、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、240 m であり、1 m 掘削する毎に支保工を導入し収束計算を行った。

(5) 三次元掘削解析の結果

本解析では、多変量正規分布モデルの平均値および $\pm 1\sigma$ の計 3 ケースの計算を実施した。解析結果として、掘削に伴う切羽離れに対する天端沈下量および内空変位量を図-6に示す。図-6では、平均値を実線で示し、薄色で網掛けされた部分が $\pm 1\sigma$ (68%) の信頼区間を示している。ここで、信頼区間とは真の値 (計測値) が含まれることが確信できる数値範囲である。つまり、本研究で作成した多変量正規分布モデルによる数値解析の結果では、薄く網掛けしている箇所の変位が 68% の確率で発生することを示している。図-6には、実際の計測値をプロットしており、解析結果と計測値と比較したところ、天端沈下量、内空変位量ともに、 $\pm 1\sigma$ の信頼区間内に収まっていることが確認できた。このように、地山物性値を多変量正規分布モデルから評価することで、一意的な解析結果ではなく、岩盤の不確実性を考慮した確率的な評価ができる。一方、今回提案した表-3に基づく多変量正規分布モデルから得られる解析結果の $\pm 1\sigma$ 信頼区間では、図-6に示すようにその範囲があまりに広く、施工判断に利用することができない。この課題に対し、データ同化により、計測結果から多変量正規分布モデルを更新し、信頼区間の幅を狭くする方法が有効であると考えている。次章では、データ同化による多変量正規分布モデルの更新を数値実験により実施したので、その一例を示す。

4. 多変量正規分布モデルの更新

データ同化とは数値計算に観測データを取り込んで、計算結果の再現性・予測性能を向上させる手法であり、主に気象学や海洋学等の地球科学分野で発達してきた。近年では、地盤工学分野においてもデータ同化が注目されており、その有効性について実証が進められている⁹⁾。

本研究では、二次元掘削解析において一般的に知られる Kastner の弾塑性理論を用いた数値実験を実施し、デ

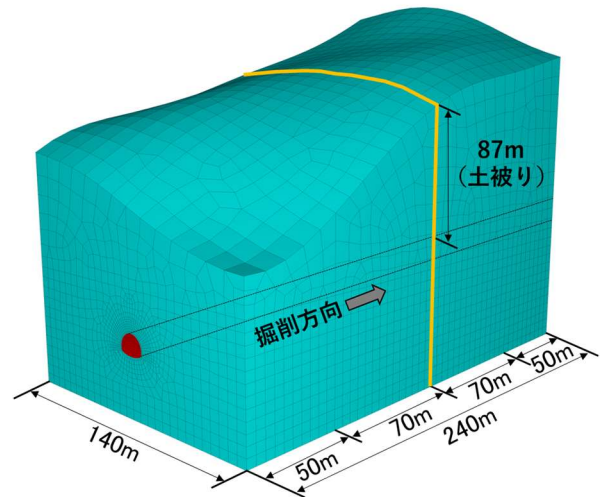


図-5 解析モデル

表-3 吹付けコンクリートの物性

項目	単位	値
弾性係数	MPa	4000
ポアソン比	-	0.2
吹付厚さ	cm	15

表-4 鋼製支保工の物性

項目	単位	値
弾性係数	GPa	20
ポアソン比	-	0.3
断面積	cm ²	30
断面二次モーメント	cm ⁴	839

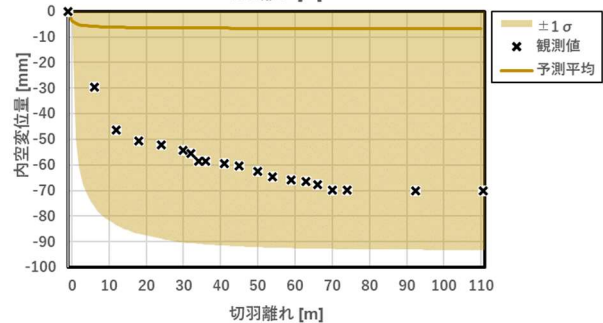
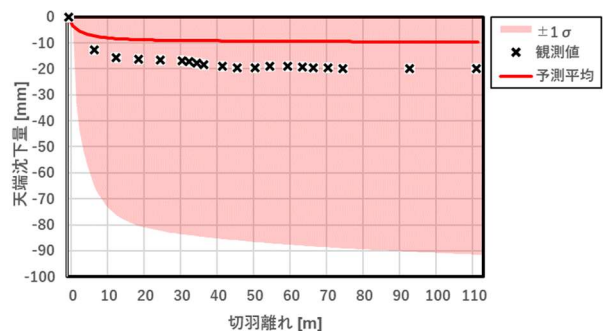


図-6 A計測の観測値と数値解析結果

ータ同化による多変量正規分布モデル更新の有用性について検討した。本稿では、その一例として粒子フィルタを用いたデータ同化の結果を示す。

(1) Kastner の弾塑性理論による数値実験

地山を完全弾塑性体と仮定し、側圧係数=1とした円形トンネル(図-7)のKastnerの弾塑性理論に基づき、掘削境界面の変位量 u_0 は次式で求められる¹⁰⁾。

$$u_0 = R_0 \frac{E}{1+\nu} \sin\phi (p_0 + c \cot\phi) \left[\frac{(p_0 + c \cot\phi)(1 - \sin\phi)}{p_u + c \cot\phi} \right]^{\frac{1 - \sin\phi}{\sin\phi}} \quad (2)$$

$$p_0 = \gamma_t \cdot h \quad (3)$$

ここで、 R_0 ：掘削直後の坑道半径、 E ：変形係数、 ν ：ポアソン比、 ϕ ：内部摩擦角、 p_0 ：初期応力、 c ：粘着力、 p_u ：内圧、 γ_t ：密度、 h ：土被りである。

本数値実験における未知パラメータベクトル $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_5]^T$ は以下により定義される。

x_1 ：単位体積重量 [kN/m³] x_2 ：変形係数 [GPa]

x_3 ：ポアソン比 [-] x_4 ：粘着力 [kPa]

x_5 ：内部摩擦角 [deg]

なお、初期条件として、土被り $h=50$ m、掘削直後の坑道半径 $R_0=7.5$ m、内圧 $p_u=0$ kNを設定した。

(2) 多変量正規分布モデル更新の試行

観測データとして変位量を 50mm と仮定し、データ同化に用いる粒子数は 10000 組とした。データ同化による更新前の元の多変量正規分布モデルを事前分布、更新後の分布を事後分布とし、変位量のヒストグラムを図-8 に、地山物性値のヒストグラムを図-9 に示す。変位量については、事前分布が広く分布しているのに対し、データ同化後の事後分布では正解値 (50 mm) の土約 10 mm の精度で予測できることが確認された。地山物性値については、更新後における変形係数の分布が大きく狭まること確認された。一方で、単位体積重量、ポアソン比、粘着力、内部摩擦角についての分布はほぼ変化していない。つまり、本ケースにおいて、変形係数の変位量に与えられる影響が支配的であることが分かった。このことから、変形係数以外の地山物性値を更新対象から除外し、計算コストを削減したとしても、予測精度に大きな影響は与えない可能性が示唆された。

本研究では、簡易モデルによりデータ同化を実施したが、今後は FDM 解析による複雑なモデルのデータ同化を実施する必要がある。FDM 解析では一度の計算に多大な時間を要するため、データ同化を行うにあたり、精度だけでなく、計算コストにも留意する必要がある。今後は異なるデータ同化手法や初期条件を変えた数値実験を行い、地山物性値の事後分布の変化から、解析結果への

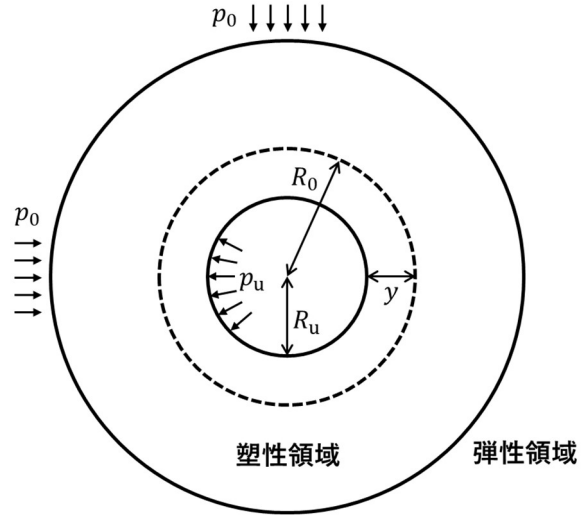


図-7 トンネル周辺地山の応力モデル

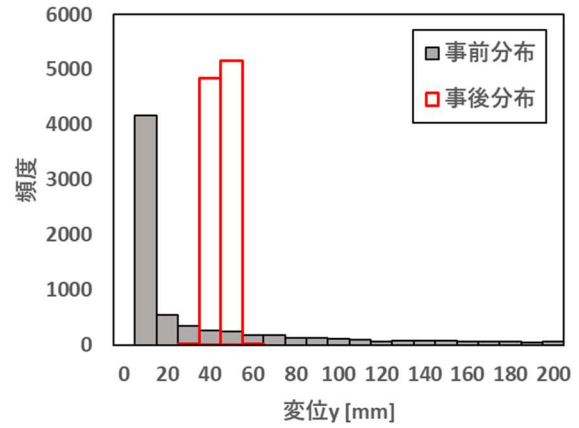


図-8 変位のヒストグラム

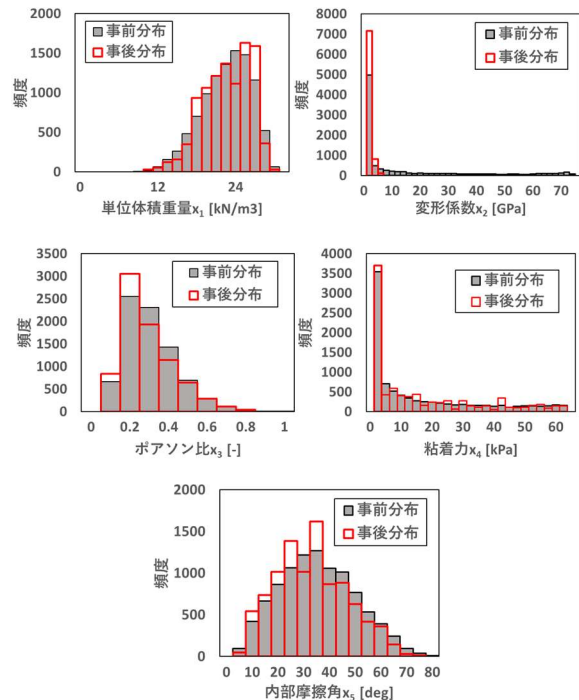


図-9 地山物性値のヒストグラム

影響が支配的な地山物性値のみ更新対象とするなどし、より実務的なデータ同化手法の検討を進める所存である。

5. おわりに

本研究では、破壊エネルギー係数を割り付けた不均質地山モデルでの解析において、破壊エネルギー係数から地山物性値へ変換するための多変量正規分布モデルを作成し、多変量正規分布モデルを使用した三次元掘削解析を実施した。さらに、Kastnerの弾塑性理論とデータ同化を組み合わせた数値実験により、多変量正規分布モデルの更新を試みた。今後は、今回実施した FDM 解析にデータ同化を組み込むことで、あらゆる地山を対象に、より精度の高い予測解析が可能となると考える。一方で、破壊エネルギー係数と地山物性値の直接的な関係についても調査を進め、予測精度の更なる向上を目指す。

参考文献

- 1) 熊谷丈瑠, 石井雅子, 宮嶋保幸: コンピュータジャンボの穿孔データを活用した 3 次元掘削解析の有用性について, 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.
- 2) 小泉悠, 升元一彦, 宮嶋保幸, 福島大介, 宮石雅子, 黒川紗季: 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) 土木学会編: 2016 年制定 トンネル標準示方書 [共通編]・同解説 / [山岳工法編]・同解説, p.48, 2016.
- 4) 土木研究所: トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル, pp.16-21, 1994.
- 5) 石井雅子, 熊谷丈瑠, 横田泰宏, 伊達健介, 升元一彦, 宮嶋保幸, 珠玖隆行: 穿孔データによる岩盤物性評価のための確率的回帰モデルの作成, 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, III-167, 2022.
- 6) 地盤工学会: 原位置岩盤試験データベース (2008 年度版), p.175, 丸善, 2009.
- 7) Shuku, T. and Phoon, K.K: Transformations and correlations among some properties of intact rocks and rockmass in Japan (under review).
- 8) 福島大介, 北村義宜, 村上和哉, 相緒春奈: トンネル周辺岩盤の硬軟分布を考慮した掘削解析手法, 令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, VI-460, 2021.
- 9) 村上章, 西村伸一, 藤澤和謙, 中村和幸, 樋口知之: 粒子フィルタによる地盤解析のデータ同化, 応用力学論文集, Vol.12, pp.99-105, 2009.
- 10) Y.M.Cheng: Modified kastner formula for cylindrical cavity contraction in mohr-coulomb medium for circular tunnel in isotropic medium, Journal of Mechanics, Vol. 28, No. 1, pp.163-169, 2012.

(2022. 8. 26 受付)

Simulation of Tunnel Excavation by Multivariate Normal Distribution Model to Estimate Rock Properties using Drilling Data

Takeru KUMAGAI, Masako ISHII, Takayuki SHUKU, Yasuhiro YOKOTA, Kensuke DATE, Yasuyuki MIYAJIMA and Kazuhiko MASUMOTO

Quantitative evaluation of geological condition by drilling energy is one of the practical trend during drilling and blasting tunnel excavation. The authors are studying the proper selection of support patterns based on 3D excavation analysis, taking into account the geological distribution behind the tunnel face. In this study, a multivariate normal distribution model was developed to estimate geotechnical properties from drilling energy, and excavation analysis was conducted using the developed multivariate normal distribution model. The results confirmed that the confidence zone of the predicted values for both settlement and convergence covered the measured values. The results of an attempt to update the multivariate normal distribution model using a data assimilation technique suggested the possibility of improving the prediction accuracy.