

軟岩地山における地山物性の空間的な不均質性を考慮した山岳トンネルの掘削解析

岡崎 泰幸¹・林 久資²・森本 真吾³・大屋 誠⁴・進士 正人⁵

¹正会員 松江工業高等専門学校助教 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4)
E-mail: okazaki@matsue-ct.jp

²正会員 山口大学大学院助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 ドボクリエイト株式会社 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 大学研究推進機構 C206)
E-mail: charlie@dobocreate.jp

⁴正会員 松江工業高等専門学校教授 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4)
E-mail: ohya@matsue-ct.jp

⁵フェロー会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

山岳トンネルの支保設計で数値解析を用いる場合、地山物性の空間的な不均質性を考慮しないのが一般的である。そのため、解析による予測を大きく超える挙動が現場で生じる場合があるのが現状である。そこで、本研究では、特に軟岩地山における地山物性の空間的な不均質性が山岳トンネル掘削時の地山安定性に及ぼす影響を把握するために、ランダム場理論に基づいて軟岩地山における地山物性の空間的な不均質性を考慮した山岳トンネルの切羽到達時の掘削解析を実施し、地山物性の空間的な不均質性が切羽到達時のトンネル周辺挙動に及ぼす影響について評価した。その結果、トンネル掘削時の地山内の不均質状況によっては壁面変位やトンネル周辺の最大せん断ひずみに及ぼす影響が大きいことがわかり、その影響を適切に評価する必要があることがわかった。

Key Words: heterogeneous rock mass, spatial variation, tunnel excavation, numerical analysis

1. はじめに

山岳トンネルの支保工の設計では、設計条件に特殊な条件（例えば、特殊な地山や断面形状など）が含まれる場合、解析的手法が適用される。その際、地山の力学的な挙動が主に地山の材料特性に支配される地山（例えば、軟岩地山や砂質土系地山など）を解析対象とする場合、地山と支保工をモデル化した有限要素法や有限差分法などに基づく連続体解析により、トンネル掘削時におけるトンネル周辺地山の挙動（主に、変位や最大せん断ひずみなど）や支保工に発生する応力を予測・評価し、トンネル掘削時の安定性を照査することが多い¹⁾。しかしながら、このような連続体解析を山岳トンネルの支保設計に適用する場合、地山が本来天然材料であるがゆえに有している地山物性（例えば、ヤング係数や一軸圧縮強さなど）の空間的な変動、すなわち不均質性（図-1 参照）

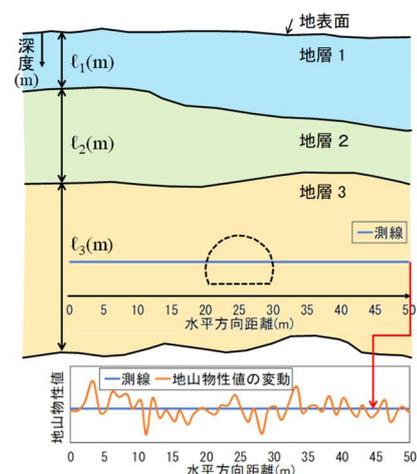


図-1 地山物性の空間的な不均質性のイメージ図²⁾

を考慮せず、地山の各地層（例えば、図-1 中の地層 1~3）を均質な材料と仮定するのが一般的である³⁾。また、そ

の際の各地層の地山物性値は、事前調査で得られた地山物性値にばらつきがあるにも関わらず、簡易的にその平均値が用いられる場合もあるのが現状である⁴⁾。そのため、山岳トンネルの支保設計時に上述したような数値解析を用いたとしても、その解析結果が実際の挙動と異なることは珍しいことではなく、場合によっては予想を大きく超える挙動が生じるケースもある⁵⁾。したがって、トンネル施工時の安全性をより適切に確保するためにも、地山物性の空間的な不均質性がトンネル掘削時のトンネルの挙動や安定性に及ぼす影響を予測・評価する必要がある。

そのような理由から、例えば、熊坂⁶⁾や著者ら⁷⁾は、近似した対数正規分布や正規分布に従う地山物性値を有限差分法の各正方形要素または要素群にランダムに与えることにより、軟岩地山における地山物性の空間的な不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施し、地山物性の不均質性がトンネル周辺の応力や変形、支保工応力に及ぼす影響について検討している。一方、近年では、地山物性の空間的な不均質性をより合理的に考慮し、そのような不均質性がトンネル掘削時の挙動や安定性に及ぼす影響を確率的に評価するために、ランダム場理論をトンネル掘削解析に導入する試みも実施されている。例えば、Songら⁸⁾は、切断正規分布に基づくランダム場を有限差分法に基づく連続体解析に導入し、風化地山における地山物性の空間的な不均質性がトンネル掘削時の様々なトンネル挙動（例えば、変形や塑性領域など）に及ぼす影響を調査・評価している。また、Aliら⁹⁾は、対数正規分布に基づくランダム場をアダプティブ有限要素極限解析に導入し、非排水地山における地山物性の空間的な不均質性が上載荷重を受けるトンネルの掘削時の安定性に及ぼす影響について調査・評価している。その他にも、上記と同様にランダム場を連続体解析に導入して、トンネル縦断方向の地山物性の空間的な不均質性がトンネル掘削時の内空変位などに及ぼす影響を確率的に評価しているもの⁹⁾や、風化の激しい実地山を対象に地山物性の空間的な不均質性がトンネル掘削時の内空変位に及ぼす影響を確率的に評価しているもの¹⁰⁾などもある。このように、トンネル掘削時における軟岩地山や砂質土系地山の地山物性の空間的な不均質性に対して、いくつかの解析的アプローチが行われているが、限定された条件（例えば、低土盛りや円形断面など）に基づく検討が多く、軟岩地山に掘削される二車線道路トンネルの標準断面程度の山岳トンネルを対象とした地山物性の不均質性に対する影響評価は十分に実施されていない。

そこで、本研究では、特に軟岩地山における地山物性の空間的な不均質性が山岳トンネル掘削時の地山安定性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、ランダム場理論に基づいて軟岩地山における地山物性の空間的な

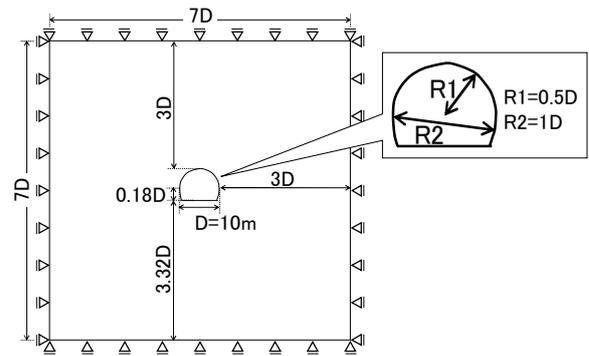


図-2 解析領域と境界条件

不均質性を考慮した山岳トンネルの切羽到達時の掘削解析を実施し、地山物性の空間的な不均質性が切羽到達時のトンネル周辺挙動に及ぼす影響について評価する。本報告では、掘削解析シミュレーションを試みた一部の結果のみを報告する。

2. 地山物性の不均質性を考慮した掘削解析

本章では、特に軟岩地山を対象にして地山物性の空間的な不均質性を考慮した山岳トンネルの切羽到達時の掘削解析を実施する。このトンネル掘削解析には、有限差分解析コード FLAC3D¹¹⁾ ver.5.0 の弾完全塑性解析（破壊規準：モールクーロンの破壊規準）を用いた。以下に、トンネル掘削解析を実施した際の各種条件について示す。

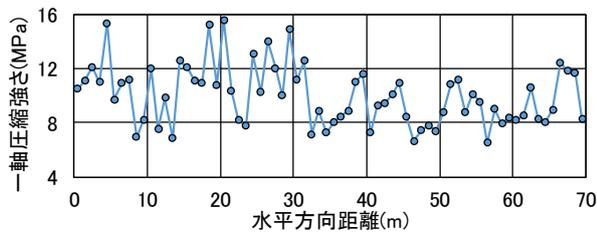
(1) 解析領域と境界条件

図-2に、本研究の解析モデルにおける解析領域と境界条件を示す。ここで、図中のDはトンネル直径であり、トンネル掘削形状については道路トンネルの二車線標準断面例¹²⁾を参考に定めた。また、奥行き方向の解析領域は1mとし、トンネル掘削方向の変位を固定することで、平面ひずみ状態を仮定し、疑似二次元解析とした。加えて、解析モデルにおける基本要素寸法は0.1Dとした。

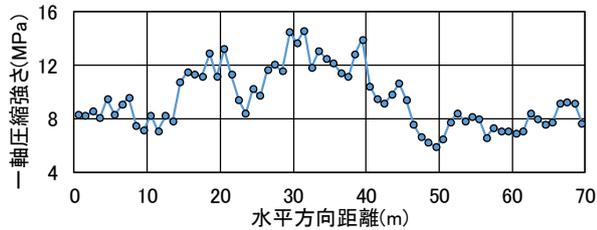
(2) 地山物性の空間的な不均質性の設定

本研究では、地山物性の空間的な不均質性を表現するために、ランダム場理論を連続体解析（FLAC3D）に導入した。まず、空間的に変動する地山物性として一軸圧縮強さに着目し、そのばらつきの分布が対数正規分布に従うと仮定した。ここで、対数正規分布を採用したのは、岩石の一軸圧縮強さの度数分布が対数正規分布に近い分布形状を示すためである¹³⁾。そして、対数正規分布に従う一軸圧縮強さを解析モデルの各要素の値とすることにより、一軸圧縮強さの空間的な不均質性をモデル化した。

このようなモデル化を行う際、一般に地山内のある2点間の地山物性値の相関性は2点間の距離が大きくなる



(a) 自己相関距離が小さいケース



(b) 自己相関係数が大きいケース

図-3 自己相関係数の違いによる一軸圧縮強さの変動例

① 各要素間の自己相関係数を表す相関行列Kを作成する

$$K = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & 1 & \dots & \rho_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

n: 要素の総数

② 相関行列Kを上三角形行列Sと下三角形行列S^Tに分解する

$$K = SS^T$$

③ n個の独立な正規乱数で構成される乱数行列Rを生成する

$$R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$$

④ 以下の式により要素間の相関性を考慮した正規乱数R*に変換する

$$R^* = S^T R$$

⑤ 得られた正規乱数R*, 一軸圧縮強さの平均 μ_c および変動係数COV_cを用いて対数正規乱数に変換し、各要素の一軸圧縮強さを決定する

図-4 ランダム場の生成手順¹⁸⁾

につれて低下することが知られているため¹⁴⁾、通常、各要素間の一軸圧縮強さの自己相関性（元データと任意の距離分をずらしたデータとの相関性）に配慮したモデル化を行う必要がある。このような自己相関性のモデル化に関しては様々な関数が提案されている¹⁹⁾が、本研究では、以下の式(1)に示すような水平・鉛直方向の自己相関性が等しいと仮定した単一指数型の自己相関関数を採用した。ここで、式(1)を採用したのは、岩石の一軸圧縮強さの自己相関性が単一指数型の自己相関関数によって最も適切に説明できた事例があるためである¹⁵⁾。

$$\rho(x_{ij}) = \exp\left\{-\frac{2x_{ij}}{\theta}\right\} \quad (1)$$

ここで、 x_{ij} は要素i, jの中心間の距離である。また、 θ は自己相関距離と呼ばれる定数であり、任意の2点間の相関度合いを特徴づける定数である。例えば、自己相関距離が小さいケースでは、周辺の値との相関が低いため、ランダム的に値が変動する（図-3(a)参照）。逆に、自己相関係数が大きいケースでは、周辺の値と相関を有するため、値が滑らかに変動する（図-3(b)参照）。また、図-3に示すようなデータ（例えば、切羽前方の削孔データから推定した一軸圧縮強さなど）があれば、自己相関係数を算出することができるため、適切な自己相関関数の

表-1 掘削解析における各種パラメータ

パラメータ	値
トンネル直径D	10m
一軸圧縮強さの平均 μ_c	10MPa
一軸圧縮強さの変動係数COV _c	0(均質), 20, 40, 60%
水平・鉛直方向の自己相関距離 θ の比	1.0(等方)
正規化した自己相関距離 $\Theta = \theta/D$	Random, 0.25, 0.5, 1.0
各ケースの解析モデル数	20(※均質は1ケース)
地山強度比Gn(= μ_c /土被り圧)	1.0
掘削応力解放率	0.4

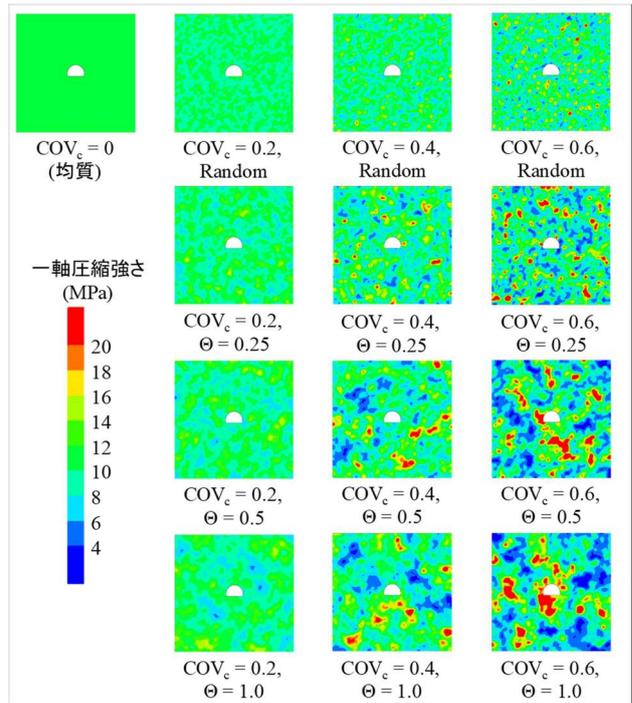
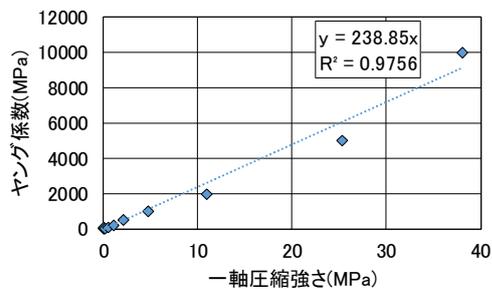


図-5 各解析ケースにおけるモデル内の強度分布例

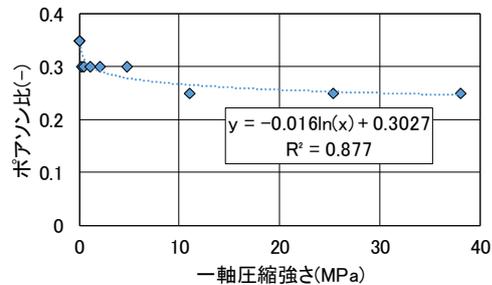
判定や自己相関距離の推定が可能となる。

以上のようなランダム場を生成する手法としては、様々な手法が提案されている^{14), 16)}が、本研究では一般的に用いられることが多いCholesky分解による手法¹⁷⁾を採用した。本研究におけるランダム場の生成手順¹⁸⁾については、図-4に示すとおりである。

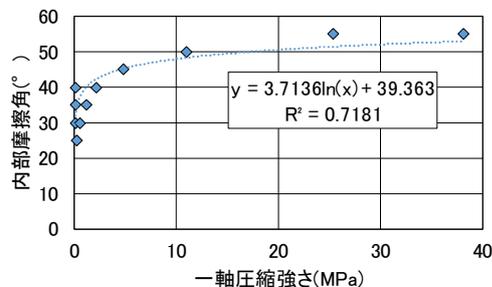
表-1に、本掘削解析における各種パラメータを示す。ここで、一軸圧縮強さの平均 μ_c については、軟岩程度の値である10MPaとし、その変動係数COV_cについては、軟岩の一軸圧縮強さの変動係数（20~50%程度）¹³⁾を参考に、20, 40, 60%の3ケースとした。また、自己相関距離 θ の値については、岩石の一軸圧縮強さの自己相関距離の値（0.3~8.0m程度）¹⁵⁾を包含するように、2.5m, 5.0m, 10mの3ケースとし、トンネル直径の異なるトンネルにおいても汎用性をもたせるために、トンネル直径Dで除すことにより正規化した（表-1内 Θ 参照）。加えて、上記のケースと比較するため、地山を均質と仮定したケース（表-1内COV_c=0(均質)）も解析ケースとし



(a) ヤング係数と一軸圧縮強さとの関係



(b) ポアソン比と一軸圧縮強さとの関係



(c) 内部摩擦角と一軸圧縮強さとの関係

図-6 一軸圧縮強さと他の地山物性値との関係

て追加した。また、自己相関距離が要素間距離よりも小さい場合も考慮し、各要素の一軸圧縮強さをランダムに決定したケース（表-1 内 Random）についても追加した。それぞれのケースの解析モデルにおける強度分布例は、図-5 に示すとおりである。図-5 では、掘削領域のサイズがわかりやすいように掘削後のモデルを示している。また、各ケースにおける強度分布の異なる解析モデル数については表-1 に示すとおりとした。

以上の操作により、一軸圧縮強さの空間的な不均質性をモデル化したが、弾完全塑性解析（破壊規準：モルクーロンの破壊規準）を行う場合、ヤング係数 E 、ポアソン比 ν 、内部摩擦角 φ 、粘着力 c および引張強さ σ_t を各要素に与える必要がある。そこで、本研究では、図-6 に示すように砂質土から硬岩までの解析物性値事例⁹⁾をプロットし、一軸圧縮強さ σ_c (MPa) と E 、 ν 、 φ の関係を近似した。そして、その近似した一軸圧縮強さとの関係式（式(2a)、(2b)、(2c)参照）を用いて、 E 、 ν 、 φ を各要素に与えた。また、各要素の c の値については、定められた σ_c と φ の値から以下の式(2d)を用いて決定した。加えて、各要素の σ_t の値については、岩石の σ_t が σ_c の概ね

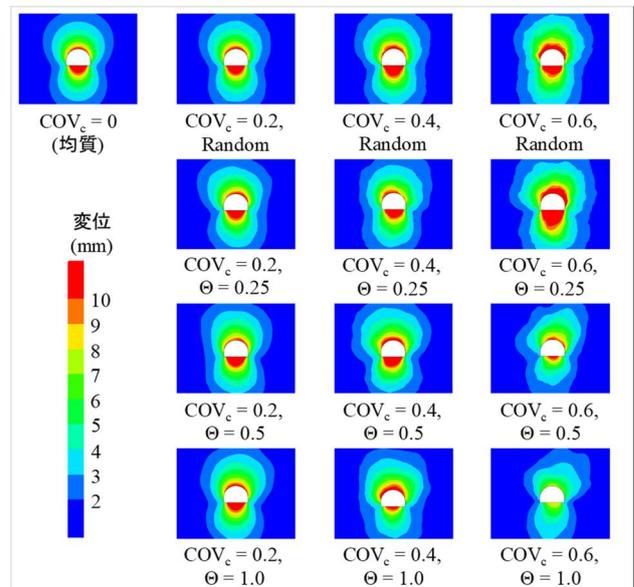


図-7 各解析ケースにおけるトンネル周辺の変位コンター図例

1/10 になる⁹⁾ことから、以下の式(2e)により定めた。

$$E = 238.85\sigma_c \quad (2a)$$

$$\nu = -0.016\ln(\sigma_c) + 0.3027 \quad (2b)$$

$$\varphi = 3.7136\ln(\sigma_c) + 39.363 \quad (2c)$$

$$c = \sigma_c(1 - \sin\varphi)/2\cos\varphi \quad (2d)$$

$$\sigma_t = \sigma_c/10 \quad (2e)$$

(3) 初期応力と掘削応力解放率の設定

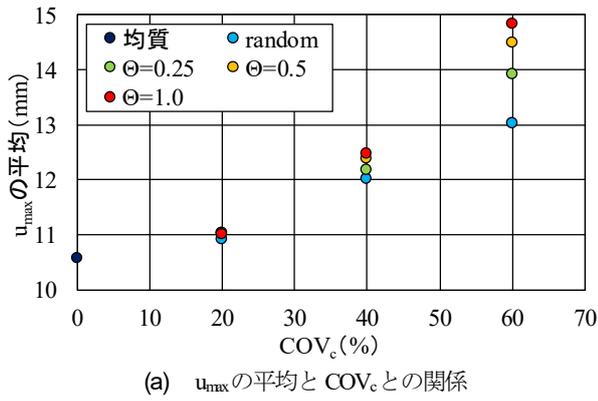
初期応力については、地山強度比 G_n が 1.0 となるような等方応力状態とした。また、掘削応力解放率については、切羽到達時の地山状況について検討するため、40% と設定した。以上の諸条件に基づいてトンネル掘削解析を実施した。

3. 数値解析結果

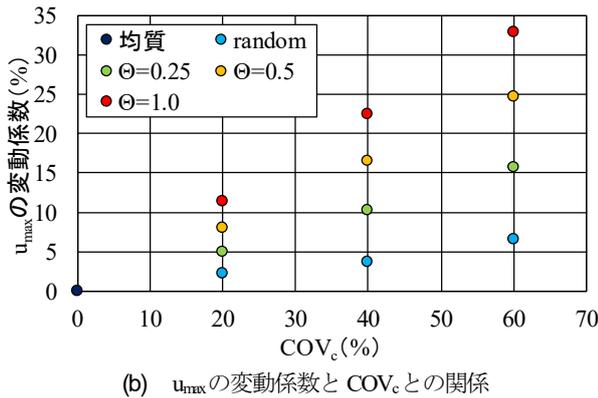
本章では、第 2 章で実施した地山物性の空間的な不均質性を考慮したトンネル掘削解析結果を示す。特に本研究では、山岳トンネルの切羽到達時の地山安定性に影響を及ぼすと考えられるトンネル周辺変位と最大せん断ひずみの解析結果について調査し、軟岩地山における地山物性の空間的な不均質性がトンネル周辺挙動に及ぼす影響について評価する。

(1) トンネル周辺変位

図-7 に、各解析ケースにおけるトンネル周辺の変位コンター図例を示す。ここで、図中の各解析結果は、図-5 に示した強度分布例と同じ解析モデルの解析結果を示している。図-7 から、 COV_{σ_c} と Θ が大きい解析ケースほど、均質の解析結果と比較して変位が大きいまたは小さい場



(a) u_{\max} の平均と COV_c との関係



(b) u_{\max} の変動係数と COV_c との関係

図-8 各解析ケースにおける u_{\max} の統計値

合があり、それに加え均質の解析結果に生じている変形の左右対称性も失われていることがわかる。すなわち、軟岩地山内の地山物性の空間的な不均質状況によっては、トンネル周辺変位に及ぼす影響が大きいといえる。

続いて、地山物性の空間的な不均質性がトンネル周辺変位に及ぼす影響を定量的に評価するために、各解析ケースにおけるすべての解析モデルの解析結果を対象に、トンネル壁面変位の最大値（以下、 u_{\max} とする。）の統計値（平均および変動係数）について調査する。この際、山岳トンネル施工時の変位計測では、一般に底盤の変位を計測しないことから、 u_{\max} は底盤の変位を除いたトンネル壁面変位の最大値とした。図-8に、各解析ケースにおける u_{\max} の統計値を示す。

図-8(a)から、 COV_c が増加すると u_{\max} の平均が大きくなることがわかる。すなわち、地山内の一軸圧縮強さのばらつきが大きくなると、トンネル壁面が局所的に変形しやすくなるといえる。これは、地山物性のばらつきが大きくなることにより、低い物性の領域がトンネル周辺に存在しやすくなるためである。一方で、 Θ が大きくなるにつれて u_{\max} の平均が大きくなることもわかる。これにより、地山内の一軸圧縮強さの空間的な変動のスケール（自己相関距離）が大きくなると、トンネル壁面が局所的に変形しやすくなるといえる。ただし、この結果に関しては解析モデル数（標本数）が少ないことから、更なる検討が必要と考えられる。また、図-8(b)から、 COV_c

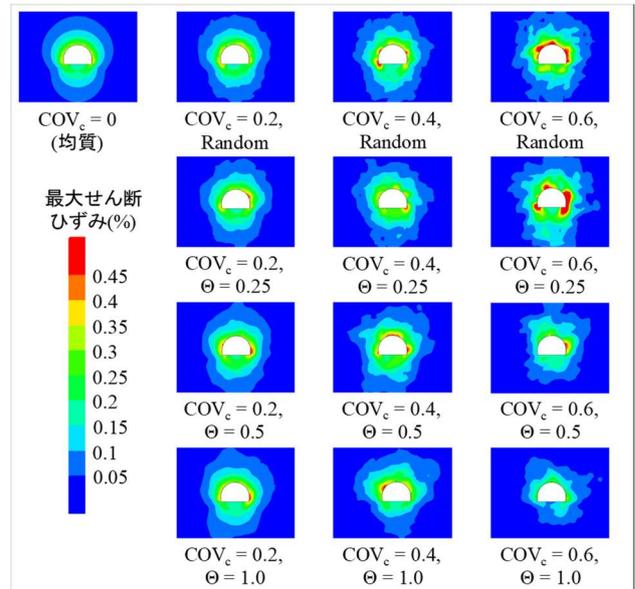


図-9 各解析ケースにおける最大せん断ひずみコンター図例

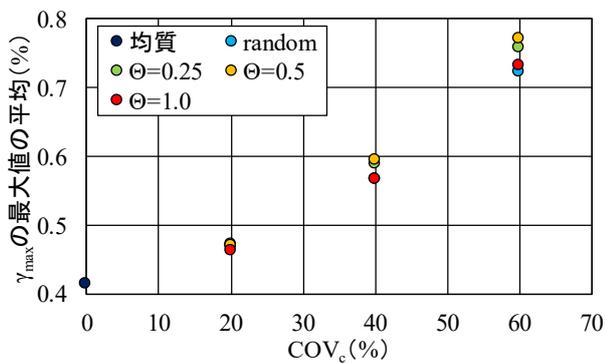
と Θ が増加すると u_{\max} の変動係数が大きくなることがわかる。すなわち、地山内の一軸圧縮強さのばらつきと空間的な変動のスケール（自己相関距離）が大きくなると、 u_{\max} のばらつきが大きくなるといえる。以上の軟岩地山内の不均質状況によっては u_{\max} に及ぼす影響が大きい結果を踏まえると、軟岩地山におけるトンネル施工時の安全性をより適切に確保した設計を行うためには、地山物性の空間的な不均質性がトンネル掘削時のトンネル周辺変位に及ぼす影響を適切に評価していく必要があると考えられる。

(2) トンネル周辺の最大せん断ひずみ

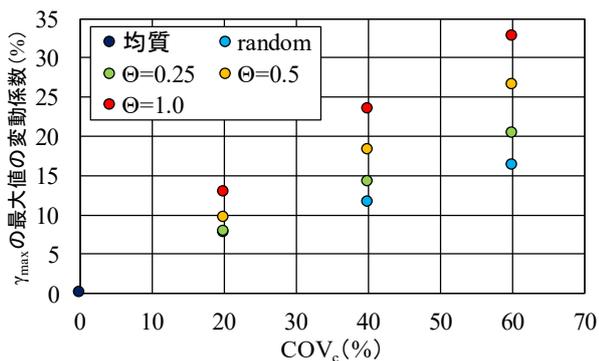
図-9に、各解析ケースにおけるトンネル周辺の最大せん断ひずみコンター図例を示す。ここで、図中の各解析結果は、図-5に示した強度分布例と同じ解析モデルの解析結果を示している。図-9から、 COV_c と Θ が大きい解析ケースほど、均質の解析結果と比較して最大せん断ひずみが大きいまたは小さい場合があり、それに加え均質の解析結果に生じている最大せん断ひずみ分布図の左右対称性も失われていることがわかる。すなわち、軟岩地山内の地山物性の空間的な不均質状況によっては、トンネル周辺の最大せん断ひずみに及ぼす影響が大きいといえる。

続いて、地山物性の空間的な不均質性がトンネル周辺の最大せん断ひずみに及ぼす影響を定量的に評価するために、各解析ケースにおけるすべての解析モデルの解析結果を対象に、トンネル周辺の最大せん断ひずみ（以下、 γ_{\max} とする。）の最大値の統計値（平均および変動係数）について調査する。図-10に、各解析ケースにおける γ_{\max} の最大値の統計値を示す。

図-10(a)から、 COV_c が増加すると γ_{\max} の最大値の平均



(a) γ_{\max} の最大値の平均と COV_c との関係



(b) γ_{\max} の最大値の変動係数と COV_c との関係

図-10 各解析ケースにおける γ_{\max} の最大値の統計値

が大きくなることわかる。すなわち、地山内の一軸圧縮強さのばらつきが大きくなると、トンネル周辺の γ_{\max} が局所的に増加しやすくなるといえる。これは、 u_{\max} の平均の時と同様に、地山物性のばらつきが大きくなることにより、低い物性の領域がトンネル周辺に存在しやすくなるためと考えられる。一方で、 Θ が大きくなるにつれて γ_{\max} の最大値の平均が大きくなる傾向にあることもわかる。これにより、地山内の一軸圧縮強さの空間的な変動のスケール（自己相関距離）が大きくなると、トンネル周辺の γ_{\max} が局所的に増加しやすくなると考えられる。ただし、この結果に関しては u_{\max} の平均の時と同様に、解析モデル数（標本数）が少ないことから、更なる検討が必要と考えられる。また、図-10(b)から、 COV_c と Θ が増加すると γ_{\max} の最大値の変動係数が大きくなることわかる。すなわち、地山内の一軸圧縮強さのばらつきと空間的な変動のスケール（自己相関距離）が大きくなると、トンネル周辺に生じる γ_{\max} の最大値のばらつきが大きくなるといえる。以上の軟岩地山内の不均質状況によっては γ_{\max} の最大値に及ぼす影響が大きい結果を踏まえると、軟岩地山におけるトンネル施工時の安全性をより適切に確保した設計を行うためには、地山物性の空間的な不均質性がトンネル掘削時のトンネル周辺の γ_{\max} に及ぼす影響を適切に評価していく必要があると考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、ランダム場理論に基づいて軟岩地山における地山物性の空間的な不均質性を考慮した山岳トンネルの切羽到達時の掘削解析を実施し、地山物性の空間的な不均質性が切羽到達時のトンネル周辺挙動に及ぼす影響について評価した。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 地山内の一軸圧縮強さのばらつきが大きくなると、トンネル壁面が局所的に変形しやすくなり、トンネル周辺の最大せん断ひずみが局所的に増加しやすくなる。
- 2) 地山内の一軸圧縮強さのばらつきと空間的な変動のスケール（すなわち、自己相関距離）が大きくなると、トンネル壁面変位やトンネル周辺の最大せん断ひずみの最大値のばらつきが大きくなる。
- 3) 地山内の不均質状況によってはトンネル壁面変位やトンネル周辺の最大せん断ひずみに及ぼす影響が大きいことから、トンネル施工時の安全性をより適切に確保した設計を行うためには、地山物性の空間的な不均質性がそれらに及ぼす影響を適切に評価していく必要がある。

今後は、解析ケースや解析モデル数（標本数）を増やして軟岩地山における地山物性の空間的な不均質性を考慮したトンネル掘削解析を実施することにより、軟岩地山における地山物性の不均質性がトンネル周辺挙動（トンネル掘削時の地山安定性）に及ぼす影響をより定量的かつ統計的に評価していく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル・ライブラリー16 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務，丸善，pp.119-130，2006。
- 2) 岡崎泰幸，林久資，森本真吾，進士正人：地山物性の空間的な変動がトンネル掘削時の支保工応力に及ぼす影響，トンネル工学報告集，Vol.29，I-46，pp.1-9，2019。
- 3) 吉田秀典，高森大資，和田光真：非均質性が岩盤構造物の挙動に及ぼす影響と設計に関する研究，応用力学論文集，Vol.6，pp.387-396，2003。
- 4) Song, K. I., Cho, G. C. and Lee, S. W. : Effects of spatially variable weathered rock properties on tunnel behavior, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.26, Issue 3, pp.413-426, 2011.
- 5) 岡崎泰幸，青柳和平，熊坂博夫，進士正人：トンネル掘削時のトンネル支保工応力に地山の不均質性が与える影響，土木学会論文集F1特集号（トンネル工学），Vol.72，No.3，pp. I_1-I_15，2016。
- 6) 例えば，熊坂博夫：地山の不均質性の分布スケールがトンネル周辺の応力状態に及ぼす影響について，土木学会第 60 回年次学術講演会概要集，3-239，pp.477-478，2005。

- 7) 例えば, 熊坂博夫: 不均質な弾塑性地山におけるトンネル周辺地山の応力状態に関する検討, 土木学会第63回年次学術講演会概要集, 3-317, pp.633-634, 2008.
- 8) Ali, A., Lyamin, A.V., Huang, J., Sloan, S.W. and Cassidy, M.J.: Undrained stability of a single circular tunnel in spatially variable soil subjected to surcharge loading, *Computers and Geotechnics*, Vol.84, pp.16-27, 2017.
- 9) Gong, W., Juang, C.H., Martin, J.R., Tang, H., Wang, Q. and Huang, H.: Probabilistic analysis of tunnel longitudinal performance based upon conditional random field simulation of soil properties, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.73, pp.1-14, 2018.
- 10) Lü, Q., Xiao, Z., Zheng, J. and Shang, Y.: Probabilistic assessment of tunnel convergence considering spatial variability in rock mass properties using interpolated autocorrelation and response surface method, *Geoscience Frontiers*, Vol.9, Issue 6, pp.1619-1629, 2018.
- 11) Cundall, P. A. and Board, M.: A Microcomputer Program for Modeling Large-Strain Plasticity Programs, *Proc. of the 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, pp.2101-2108, 1988.
- 12) 土木学会: 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.20, 2016.
- 13) 伊藤洋, 北原義浩: 地盤物性のバラツキの評価法(その1)ー地盤物性のバラツキの実態とその表示法ー, 電力中央研究所研究報告, 384025, 1985.
- 14) 若井明彦, 鶴飼恵三, 谷茂: 不均質な土構造物の地震時残留沈下量に関する信頼性設計のための基礎的研究, 応用力学論文集, Vol.8, pp.663-672, 2005.
- 15) Liu, H. and Qi, X.: Random field characterization of uniaxial compressive strength and elastic modulus for intact rocks, *Geoscience Frontiers*, Vol.9, Issue 6, pp.1609-1618, 2018.
- 16) 齋藤雅彦, 川谷健透: 透水係数の空間分布モデルの適用性に関する一考察, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.245-258, 2001.
- 17) Baecher, G. B. and Christian, J. T.: *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, pp.408-410, John Wiley & Sons, 2003.
- 18) 笠間清伸, 善功企: 数値極限解析による地盤強度の空間的不均一性を考慮した斜面の信頼性評価, 材料, Vol.59, No.5, pp.336-341, 2010.
- 19) 日本鉄道建設公団: NATM設計施工指針, 1996.

(2020. 8. 7 受付)

EXCAVATION ANALYSIS OF MOUNTAIN TUNNEL CONSIDERING SPATIAL HETEROGENEITY OF GEOMECHANICAL PROPERTIES IN SOFT ROCK MASS

Yasuyuki OKAZAKI, Hisashi HAYASHI, Shingo MORIMOTO, Makoto OHYA
and Masato SHINJI

When numerical analysis is used in the support design of mountain tunnels, it is common not to consider the spatial heterogeneity of geomechanical properties. For this reason, there are cases where behaviors that greatly exceed predictions by numerical analysis may occur at the site of construction. In this study, in order to grasp effects of spatial heterogeneity of geomechanical properties in soft rock mass on tunnel stability during excavation of a mountain tunnel, Tunnel excavation analyses considering the spatial inhomogeneity of geomechanical properties were carried out based on random field theory, and effects of the spatial heterogeneity of geomechanical properties on behavior around a tunnel were evaluated. As a result, it was clear that the effect on displacement and shear strain around a tunnel was large depending on inhomogeneous condition in soft rock mass during tunnel excavation, and it was necessary to properly evaluate the effect.