

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：55201

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14382

研究課題名（和文）地盤物性の空間的な不均質性を考慮した山岳トンネル掘削時のトンネルの安定性評価

研究課題名（英文）Stability evaluation during mountain tunnel excavation considering spatial heterogeneity of geomechanical properties

研究代表者

岡崎 泰幸 (Okazaki, Yasuyuki)

松江工業高等専門学校・環境・建設工学科・准教授

研究者番号：50806081

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、数値解析による山岳トンネルの設計の高度化に寄与することを目的とし、地盤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た。そして、地盤物性の不均質の程度や不均質地盤における設計条件の違いがトンネル掘削時のトンネルの安定性に及ぼす影響について評価した。その結果、山岳トンネルの安定性の指標である限界せん断ひずみを超過する確率を各解析ケースにおいて示すことができた。これにより、地盤の不均質性の程度と設計条件を事前に把握することができれば、トンネルの崩壊リスクを簡易的に推定し、設計変更等の判断に用いることができると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現状の数値解析を用いた山岳トンネルの設計は、地盤物性の空間的な不均質性がトンネルの安定性に及ぼす影響に関するリスク評価を十分にできていないと考えられる。実際に近年でも、数値解析による設計時の地盤物性の空間的な不均質性に関する評価不足が山岳トンネルにおける事故発生要因の1つとなっている場合がある。そこで、本研究では、地盤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、不均質地盤におけるトンネルの崩壊リスクを簡易的に推定できるようにした。これを活用することで、地盤物性の空間的な不均質性に関するリスク評価をより詳細に実施できるようになると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the tunnel excavation analyses considering spatial heterogeneity of geomechanical properties was carried out to contribute to advancement of mountain tunnel design by numerical analysis. The effects of degree of heterogeneity and difference in design conditions in heterogeneous ground on tunnel stability during tunnel excavation were evaluated. As a result, it was possible to calculate the probability of exceeding the critical shear strain that is stability index of mountain tunnels for each analysis case. Based on these results, it was considered that if the degree of heterogeneity and design conditions could be grasped in advance, it was possible to easily estimate the collapse risk of tunnel and utilize the results of this study for judgment on design change.

研究分野：トンネル工学

キーワード：山岳トンネル 空間的な不均質性 地盤物性 数値解析 安定性評価

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

山岳トンネルの設計では、地盤と支保工がモデル化された有限要素法などの連続体解析により、トンネルの安定性を評価することがある。しかしながら、この際、地盤が本来有している地盤物性の空間的な不均質性を考慮せず、地盤の各地層を均質な材料と仮定するのが一般的である。そのため、現状の数値解析を用いた山岳トンネルの設計は、地盤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安定性に及ぼす影響に関するリスク評価を十分にできていないと考えられる。実際に近年でも、数値解析による設計時の地盤物性の空間的な不均質性に関する評価不足が山岳トンネルにおける事故発生要因の1つとなっている場合があるのが現状である。したがって、数値解析による山岳トンネルの設計をより高度なものとし、施工時の安全性などを適切に確保するためには、地盤物性の空間的な不均質性がトンネルの安定性に及ぼす影響を適切に評価していく必要がある。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、数値解析による山岳トンネルの設計の高度化に寄与することを目的とし、特に軟岩地盤を対象にして地盤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た。そして、地盤物性の不均質の程度や不均質地盤における設計条件の違いがトンネル掘削時のトンネルの安定性に及ぼす影響について評価した。

3. 研究の方法

(1) 基本的な解析条件

本研究の解析には、有限差分解析コードFLAC3D ver5.0の弾完全塑性解析（破壊基準：モークローンの破壊基準）を用いた。図-1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。図-1に示すトンネル掘削高さHについては、三車線道路トンネルの標準断面の掘削高さ程度の10mとした。また、現実的な施工と対応させるため、切羽から1mを無支保区間（無拘束区間）とした。奥行き方向の解析領域は1mとし、奥行き方向の変位をすべて拘束することで、トンネル縦断面内の平面ひずみ条件とした。

解析時の初期応力については、地山強度比GSR（表-1参照）が0.5、1.0、1.5、2.0および側圧係数が1.0となるような重力場とした。以上の諸条件に基づいて掘削解析を実施した。

(2) 地盤物性の空間的な不均質性の設定

本研究では、地盤物性の空間的な不均質性を表現するため、連続体解析であるFLAC3Dに確率場理論を導入した。まず、空間的に変動する地盤物性を一軸圧縮強さとし、そのばらつきが対数正規分布に従うと仮定した。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で、地盤における一軸圧縮強さの空間的な不均質性をモデル化した。

このような空間的に変動するモデル化を行う場合、通常、各要素間の地盤物性値の自己相関性（元データと任意の距離分をずらしたデータとの相関性）を考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が、本研究では、水平・鉛直方向の自己相関性が等しい単一指数型の自己相関関数を採用した。以上のような確率場を生成する手法としては、Cholesky分解による手法を採用した。

表-1に、本研究で実施したトンネル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）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）程度になるようにした上で、掘削高さの異なるトンネルにおいても汎用性をもたせるために、掘削高さHで除すことにより正規化した（表-1内 θ 参照）。加えて、自己相関距離が要素間距離よりも小さい場合も考慮して、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）

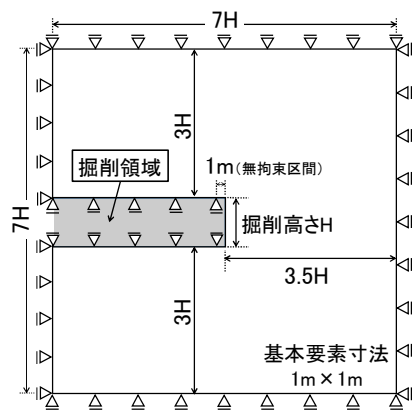


図-1 解析領域と境界条件

表-1 掘削解析における各種パラメータ

パラメータ	値
掘削高さH	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	0.2, 0.4, 0.6
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 $\theta(=\theta/H)$	Random, 0.25, 0.5, 1.0
各ケースの解析モデル数	1000(※均質は1ケース)
地山強度比GSR($=\mu_c/\text{土被り圧}$)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0

も追加している。それぞれのケースの解析モデル内における強度分布例は、図-2に示すとおりである。図-2では、掘削領域のサイズがわかりやすいように掘削後の解析モデルを示している。また、各解析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1000ケースとした。

以上の操作により、一軸圧縮強さの空間的な不均質性のモデル化を行ったが、弾完全塑性解析（破壊規準：モールクーロンの破壊規準）を行う場合、単位体積重量 γ 、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 などのパラメータを各要素に与える必要がある。そこで、本研究では、砂質土から硬岩までの解析物性値事例をプロットし、一軸圧縮強さ σ_c と各種パラメータとの関係を近似した。そして、その近似した一軸圧縮強さとの関係式を用いて、各種パラメータを各要素に与えることとした。

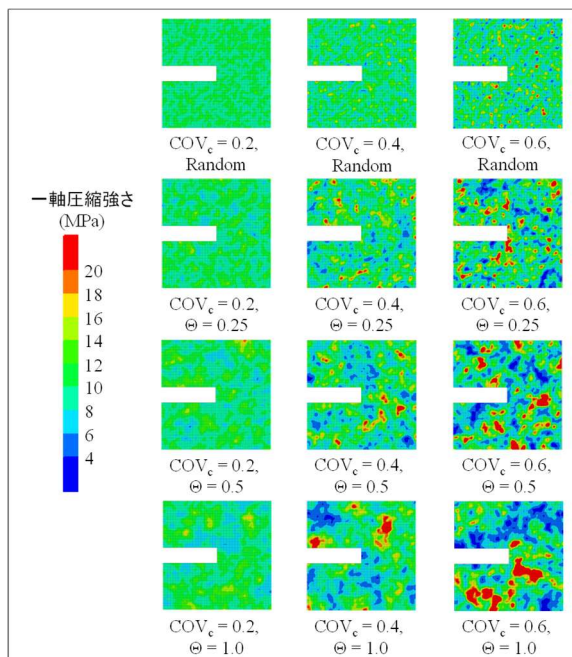


図-2 各解析ケースのモデル内の強度分布例

4. 研究成果

本章では、前章で実施した地盤物性の空間的な不均質性を考慮したトンネル掘削解析の結果を示す。特に本研究では、山岳トンネルの安定性に影響を及ぼすと考えられるトンネル周辺の最大せん断ひずみ γ_{max} の解析結果に着目し、軟岩地盤における地盤物性の空間的な不均質性がトンネルの安定性に及ぼす影響について評価する。

そこで、本研究では、トンネルの安定性を定量的に評価するために、すべての各解析ケースにおいてトンネル周辺の γ_{max} が限界せん断ひずみを超過した確率（以下、超過確率と称する。）を図-3に示すように求めた。ここで、限界せん断ひずみとは、トンネルの安定性評価に用いられる指標であり、その値は文献等を参考に算出している。

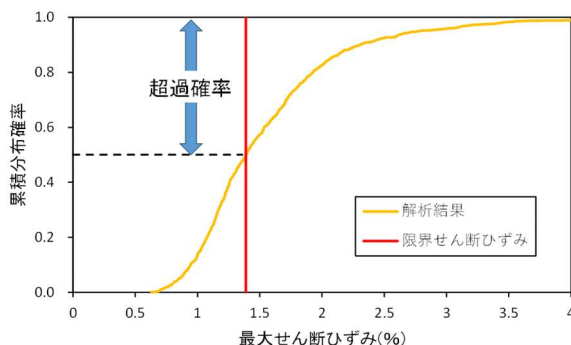


図-3 超過確率の算出イメージ

図-3に示すように求めた結果をすべてまとめたものを図-4に示す。ここで、図-4内に示す各箇所の4つのプロットの集合は、 COV_c とGSRの値は等しくしてあるものの、すべてのパラメータを1つのグラフに収めるため、 Θ の値は左上がrandom、右上が0.25、左下が0.5、右下が1.0と異なるように示している。加えて、トンネルの崩壊リスクの大きさを視覚的にわかりやすくするために、図内の超過確率を0%（黄緑）、0~1%（黄色）、1~10%（橙色）、10%~100%（赤色）の4段階に分けて示している。

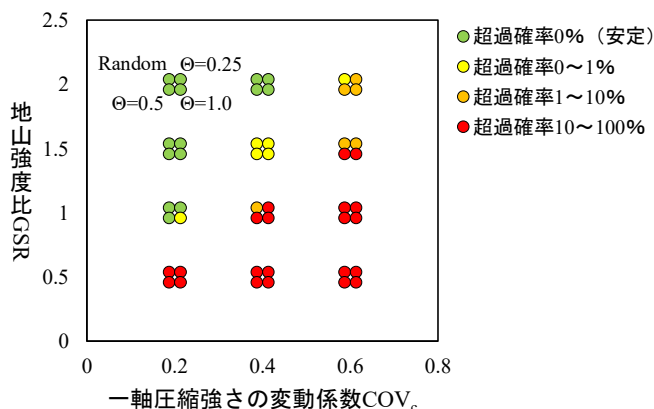


図-4 H=10の各解析ケースにおける超過確率

図-4から、GSRが小さくなるにつれ、 COV_c は大きくなるにつれて、超過確率が高くなることがわかる。また、 Θ が大きくなるにつれて、超過確率がやや大きくなる傾向にあることもわかる。以上の関係性を踏まえて、トンネルの安定性指標であるGSRが高いケース（ $GSR=1.5, 2.0$ ）を確認すると、 COV_c 、 Θ が大きくなることで、超過確率（トンネルの崩壊リスク）が高くなることがわかる。すなわち、地盤物性の空間的な不均質性を考慮することで、従来見落とされていたトンネルの崩壊リスクなどもより詳細に検討することができるといえる。また、以上で示したような各種パラメータ（ COV_c 、 Θ 、GSR）を事前に把握することができれば、本研究でまとめたトンネルの崩壊リスクのグラフ（図-4参照）を参考にすることで、トンネルの崩壊リスクを簡易的に推定し、設計変更や補助工法の必要性などの判断に活用することができると思われる。

今後は、鏡吹付けコンクリート等の補助工法を考慮した解析を行い、補助工法の有無の影響も考慮したより汎用性の高い切羽の安定性指標を提案したいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yasuyuki Okazaki, Hisashi Hayashi, Shingo Morimoto, Makoto Ohya, Masato Shinji	4. 巻 P1053
2. 論文標題 Effects of Spatial Heterogeneity of Geomechanical Properties on Tunnel Behaviour during Tunnel Excavation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2022	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岡崎泰幸、林久資、進士正人	4. 巻 52
2. 論文標題 地山の空間的不均質性が山岳トンネル掘削時挙動に及ぼす影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 トンネルと地下	6. 最初と最後の頁 71～78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 OKAZAKI Yasuyuki, HAYASHI Hisashi, FUKUMA Tomoya, MORIMOTO Shingo, OHYA Makoto, SHINJI Masato	4. 巻 78
2. 論文標題 EFFECT OF SPATIAL HETEROGENEOUS DISTRIBUTION OF GEOMECHANICAL PROPERTIES ON STABILITY OF TUNNEL FACE	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. F2 (Underground Space Research)	6. 最初と最後の頁 22～32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejusr.78.1_22	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岡崎泰幸、大屋誠、林久資、進士正人、森本真吾	4. 巻 58
2. 論文標題 地山物性の空間的な不均質性が山岳トンネル掘削時の天端沈下量に及ぼす影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 建設機械	6. 最初と最後の頁 39～46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okazaki Y., Fukuma T., Ohya M., Morimoto S., Hayashi H., Shinji M.	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of spatial heterogeneity of geomechanical properties on stability of tunnel face	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Expanding Underground - Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World	6. 最初と最後の頁 811 ~ 819
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1201/9781003348030-98	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Yasuyuki Okazaki, Hisashi Hayashi, Shingo Morimoto, Makoto Ohya, Masato Shinji
2. 発表標題 Effects of Spatial Heterogeneity of Geomechanical Properties on Tunnel Behaviour during Tunnel Excavation
3. 学会等名 ITA-AITES World Tunnel Congress 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡崎泰幸、福間友哉、大屋誠、森本真吾、林久資、進士正人
2. 発表標題 地山物性の空間的な不均質性が切羽の安定性に及ぼす影響
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasuyuki Okazaki, Tomoya Fukuma, Makoto Ohya, Shingo Morimoto, Hisashi Hayashi, Masato Shinji
2. 発表標題 Effect of spatial heterogeneity of geomechanical properties on stability of tunnel face
3. 学会等名 ITA-AITES World Tunnel Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	進士 正人 (Shinji Masato)		
研究協力者	林 久資 (Hayashi Hisashi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------