

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

松江工業高等専門学校 正会員 岡崎泰幸, 学生会員 ○福間友哉, 正会員 大屋 誠
ドボクリエイト株式会社 正会員 森本真吾
山口大学 正会員 林 久資, フェロー会員 進士正人

1. はじめに

山岳工法によるトンネル施工では、トンネル切羽が自立することを前提として掘削が実施される。しかしながら、地山条件によっては切羽の安定性が確保できずに崩壊現象が発生し、掘削直後に切羽周辺で作業を行う施工者の安全を脅かす場合がある。このような問題を解決するために、切羽の安定性について数多くの研究が実施されているが、既往研究の多くは地山物性の空間的な変動、すなわち不均質性を考慮せずに実施されている場合がほとんどである¹⁾。したがって、現在提案されている評価手法は、地山物性の空間的な不均質性（以下、不均質性と称する。）がトンネル切羽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。

そこで、本研究では、地山物性の不均質性が山岳トンネル切羽の安定性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、特に軟岩地山における地山物性の不均質性をランダム場理論に基づいて考慮したトンネル切羽の基礎的な安定解析を実施し、地山物性の不均質性がトンネル切羽の安定性に及ぼす影響について評価した。

2. 地山物性の不均質性を考慮した切羽の安定解析

(1) 基礎的な解析条件

本研究の解析には、有限差分解析コード FLAC3D ver5.0 の弾完全塑性解析を用いた。図1に、本研究で用いた解析モデルにおける解析領域と境界条件を示す。また、解析時の初期応力については、平均地山強度比が1.0かつ側圧係数が1.0となるような重力場とした。

(2) 地山物性の不均質性の設定²⁾

本研究では、地山物性の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、そのばらつきが対数正規分布に従うと仮定した。そして、各要素間の一軸圧縮強さの自己相関性を式(1)に基づいて考慮しながら解析モデルの各

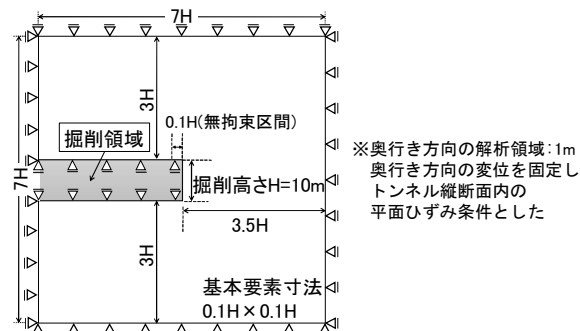


図1 解析領域と境界条件

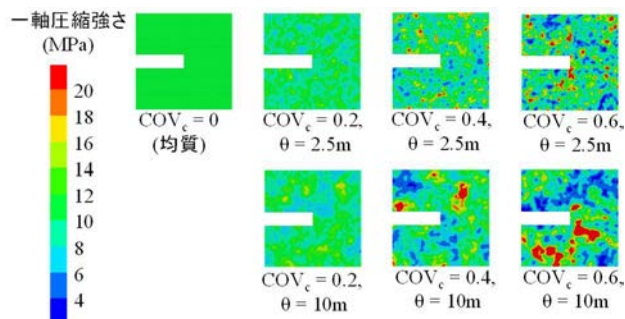


図2 各解析ケースにおけるモデル内の強度分布例

要素の値とすることにより、一軸圧縮強さの不均質性をモデル化した。

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

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。以上のようなランダム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。

本解析における不均質性に関連するパラメータについては、一軸圧縮強さの平均を 10MPa、一軸圧縮強さの変動係数（以下、 COV_c とする。）を 20%、40%、60% の 3 ケースとした。また、自己相関距離 θ については 2.5m、10m の 2 ケースとし、掘削高さ H で除すことにより正規化した（以下、 Θ とする。）。加えて、比較のため、地山を均質と仮定したケースも追加した。図2に、各解析ケースにおけるモデル内の強度分布例を示す。

キーワード 切羽, 安定性, 空間的不均質性, 地山物性, 数値解析

連絡先 〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4 TEL 0852-36-5224

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個とした。

上記のような設定で解析を行う場合、各種地山物性を各要素に与える必要がある。そこで、本研究では解析物性値事例から一軸圧縮強さと他の地山物性値との近似式を求め、その近似式を基に各種物性値を各要素に与えることとした。

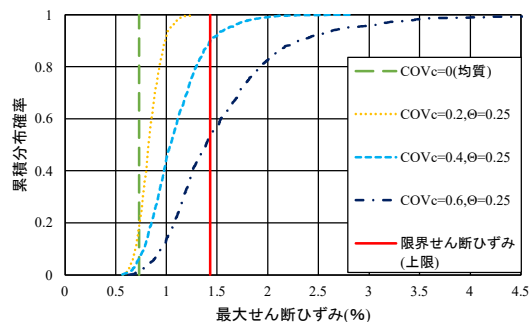
3. 数値解析結果および切羽安定性分析

本研究では、山岳トンネル切羽の安定性に影響を及ぼすと考えられる切羽周辺地山の最大せん断ひずみ（以下、 γ_{max} とする。）の最大値に着目し、地山物性の不均質性がトンネル切羽の安定性に及ぼす影響についての評価を試みる。

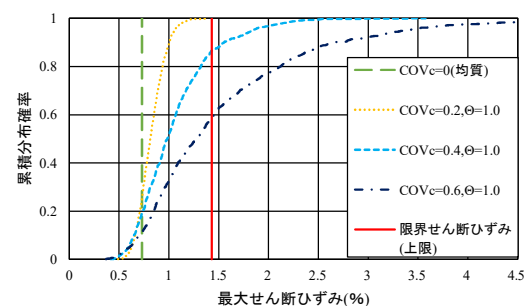
そこで、まず各解析ケースにおける γ_{max} の最大値のばらつき度合いを把握するために、各解析ケースにおける1000個の解析モデルの解析結果から γ_{max} の最大値を抽出し、累積分布表示を行った（図3参照）。図3内に示す限界せん断ひずみ（上限）は、櫻井ら³⁾が提案しているトンネルの安定性評価に用いられる γ_{max} の上限側の許容値である。この許容値の算出には、解析で設定した一軸圧縮強さの平均値の際の値を用いている。

図3から、 COV_c が大きくなるにつれて、 γ_{max} の最大値のばらつきが大きくなることがわかる。また、均質モデルと不均質モデルの解析結果を比較すると、 $COV_c=0.2$ では解析ケースのうち約75%~81%、 $COV_c=0.4$ の場合は約81%~94%、 $COV_c=0.6$ の場合は約89%~99%のケースで、均質モデルよりも不均質モデルの方が大きな γ_{max} が生じていることがわかる。すなわち、一般的に用いられている均質地山を模擬した数値解析においては、切羽周辺の γ_{max} に着目した場合、多くのケースで最大値を過小評価している可能性があることがわかった。

続いて、解析結果と限界せん断ひずみ（上限）の比較を行う。図3から、 $COV_c=0.2$ では解析ケースのすべてが限界せん断ひずみ（上限）を超過していないことがわかる。その一方で、 $COV_c=0.4$ の場合は解析ケースのうち約10%~13%、 $COV_c=0.6$ の場合は約41%~47%のケースで、限界せん断ひずみ（上限）を超過しており、 COV_c と Θ が大きくなるにつれて限界せん断ひずみ（上限）を超過する割合が大きくなる傾向にあることがわかる。これらの結果から、地山の不均質性の程度（ COV_c と Θ ）によっては切羽の崩壊リスクが高くなる可能性があり、



(a) $\Theta=0.25$ の解析ケース



(b) $\Theta=1.0$ の解析ケース

図3 各解析ケースの最大せん断ひずみのばらつき

そのリスクは COV_c と Θ が大きくなるほど高くなる傾向にあることがわかった。

4. まとめと今後の課題

本研究では、軟岩地山における地山物性の不均質性をランダム場理論に基づいて考慮したトンネル切羽の基礎的な安定解析を実施し、地山物性の不均質性がトンネル切羽の安定性に及ぼす影響について評価した。その結果、地山の不均質性の程度（ COV_c と Θ ）によっては切羽の崩壊リスクが高くなる傾向にあることがわかった。今後は、地山強度比や掘削高さなどを変化させて解析を行うことにより、地山物性の不均質性を考慮した切羽の安定性指標を提案したいと考えている。

参考文献

- 1) 例えば、田村武，足立紀尚，小西真治，辻鉄也：剛塑性有限要素法によるトンネル切羽の安定性評価について，土木学会論文集，No.638/III-49，pp.301-310，1999。
- 2) 岡崎泰幸，林久資，進士正人：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，トンネルと地下，Vol.52，No.9，pp.71-78，2021。
- 3) 櫻井春輔，川嶋幾夫，大谷達彦，松村真一郎：トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ，土木学会論文集，No.493/III-27，pp.185-188，1994。