

トンネル掘削における地山物性値の早期推定法に関する 基礎的検討

新潟大学大学院自然科学研究科	学生会員	滝沢	壮太
新潟大学工学部	正会員	阿部	和久
株式会社福田組	正会員	若月	和人
新潟大学工学部	正会員	紅露	一寛

1. はじめに

トンネル工事では地山の状態を常に把握し、適切な支保構造や工法等を検討することが重要である。そのため、トンネル坑内測定点の変位データを用いた逆解析により地山物性値を推定し、以降の施工に活用することも行われている。しかし、従来の二次元平面ひずみ場に基づく推定法では変位収束後の計測データを用いるため、掘削直後の対策を講ずることができないという問題点があった。この課題を解決するため竹内の研究¹⁾では、切羽面近傍の変形から早期に弾性定数等を推定する手法について検討し、切羽面に近い位置での計測データを使用し得ることがわかった。ただし、当該研究では弾性問題を前提としており、実際のトンネル切羽面近傍における地山は塑性変形することを考慮すると、弾塑性解析が望ましいと考えられる。先行研究²⁾では、地山の有限要素内の力学状態を隣接要素へシフトさせて掘進を表現することで、弾塑性における数値解析の効率化を図った。しかし、トンネル工事での吹付けコンクリートと鋼製支保工の延伸も考慮した掘進の再現は必ずしも容易ではない。そこで本研究では、掘削域の要素密度を操作することで掘進過程を表現した解法を構成し、それに基づいた地山物性値の早期推定可能性について基礎的検討を行う。

2. 対象とする問題のモデル化と解法

(1) 対象とする問題

地山内にトンネルがあり、時間と共に一定の速度で水平方向に掘進する問題を考える。地山を弾塑性材料とするならば、応力は弾塑性履歴を受ける。十分遠方からトンネルが掘進してきたと仮定すると、その段階でトンネル周辺の応力分布は定常状態となっており、次式が成り立つ。

$$\sigma(x, t) = \sigma(x + v\Delta t, t + \Delta t) \quad (1)$$

ここで、 σ は地山応力、 x は掘進方向座標、 t は時刻、 Δt は時間増分、 v は掘進速度である。

(2) 境界要素法の導入

先行研究²⁾では有限領域の境界部分を変位拘束して解析を行っているため、掘削前方域において、応力場のシフトによる不自然な変位と応力分布が認められた。また、解析

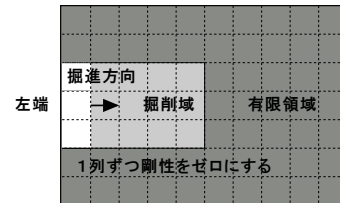


図1 解析における掘削過程の表現方法

領域を大きく取ることによってこの影響は低減できるものの、領域の拡大により解析負荷が増大するという問題点があった。そこで外部無限域を考慮するために境界要素法を導入する。

(3) 掘削過程の表現

トンネル空洞となる部分（掘削域）も含めて最初に要素分割しておく。次に、図1における領域左端から順にトンネル掘削域の要素メッシュにおける剛性をゼロにする。代わりに、力学状態が乱れないよう、剛性をゼロにするまで作用していた地山応力と等価な節点力を加え、その後徐々に解放し最終的にゼロにする。この手順を繰り返してトンネル掘削過程を表現する。これにより力学状態をシフトすることなく、また要素分割を更新することなくトンネル掘削を表現することができる。同時に、鋼製支保工と吹付けコンクリートの延伸も、あらかじめ剛性がゼロの状態でのトンネル壁面に設置しておき、掘削の進行と共に剛性を所定の値へと戻すことで表現する。

3. 地山剛性の早期推定可能性の検討

(1) 目的関数

推定の検討で用いる目的関数 J は次の誤差二乗和で設定した。

$$J = \|\hat{\mathbf{u}} - \mathbf{u}\|^2 \quad (2)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{u}}$ は各測定点における相対変位測定値からなるベクトル、 \mathbf{u} はそれに対する順解析値ベクトルである。ここでの相対変位とは、ある基準点から見た測定点における変位である。式(2)の目的関数 J と地山剛性との関係性を求めることで推定可能性について検討する。また、測定点数を変化させ、早期推定の可能性についても具体的に検討する。

(2) 解析条件

図2に示す解析モデルと表1の物性値を用いて解析を

Key Words: 効率的解法, 地山物性値, 逆解析

連絡先: 〒950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL: 025(262)7028, FAX: 025(262)6775

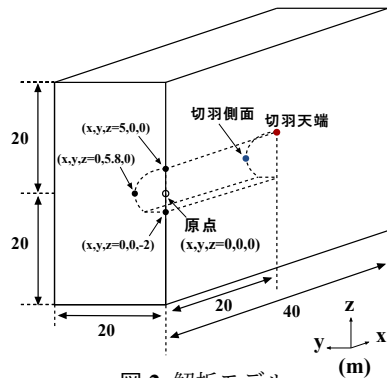


図2 解析モデル

表1 解析用物性値一覧表

地山等級	D1	D2
地山物性値		
ヤング率の正解値 (Pa)	5×10^8	1.5×10^8
ヤング率の初期値 (Pa)	1×10^9	5×10^8
ヤング率の刻み幅 (Pa)	1×10^8	5×10^7
ポアソン比	0.35	0.4
質量密度 (kg/m^3)	2.2×10^3	2.1×10^3
土被り (m)	100, 200	100, 200
粘着力 (Pa)	4×10^5	2×10^5
内部摩擦角 ($^\circ$)	35	30
吹付けコンクリート		
ヤング率 (Pa)	4×10^9	4×10^9
ポアソン比	0.2	0.2
吹付け厚 (m)	0.15	0.2
鋼製支保工		
軸剛性 (MN)	630	833
曲げ剛性 ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	1760	3400
建て込みピッチ (m)	1	1

行う。表1の物性値は坑内変位が大きく、トンネルの安定性が問題となりやすいD地山を対象として設定した^{3),4)}。測定点は切羽面の1m後方を基準点とし、1m刻みでその後方に設定した。測定する変位の方向は側面水平方向と天端鉛直方向の2方向である。また、計測誤差を考慮するため、測定データ \hat{u} は順解析で得られた相対変位に標準偏差1mmのランダムなノイズを与えることで表現した。さらに妥当性の確認のため、1つの条件の下で3回解析を行った。吹付けコンクリートはシェル要素、鋼製支保工は梁要素でモデル化した。解析領域外部は無限弾性場を表現するため、領域境界に境界要素を結合させた。なお、解析領域は対称条件から、図2の様に全体の1/4に設定した。ただし、境界要素方程式の境界積分は鏡像条件を考慮しつつ、全周囲で評価した。

(3) 解析結果

表1の解析条件の下で、ヤング率の推定可能性を検討した。図3は、測定点数が2点の場合を対象に、D2地山で土被りが100mの時のヤング率と目的関数との関係を示したものである。図3より、2回目の目的関数がヤング率 2.5×10^8 (Pa)付近で最小値を取り、やや推定精度に欠けることが分かる。一方、図4は測定点数を3点にして解析を行った結果であるが、3回ともヤング率の正解値と目的関数の最小値が一致している。以上より、上述の地山条件では切羽面から3mの地点までの測定データよりヤング率が推定可能性との結果を得た。なお、土被り200mの場合も同様に解析を行った所、3mの地点までの測定データよりヤング率が推定可能性であることが分かった。また、図5、図6ではD1地山を対象にし、土被り100m(図5)と200m(図6)における解析結果を各々示した。同手順で最低測定点数を探索した結果、土被り100mでは切羽面から8m、土被り200mでは3mの地点までの測定データよりヤング率が推定可能性であった。

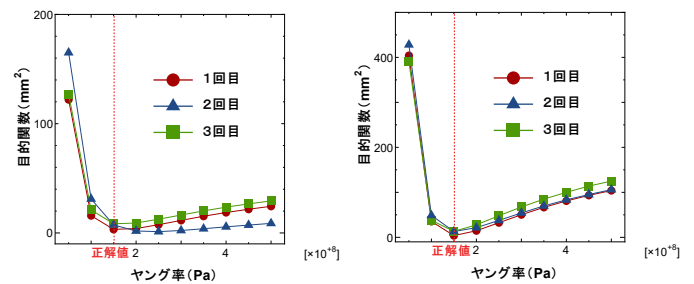


図3 ヤング率と目的関数の関係 (D2地山, 土被り100m, 測定点数2点) 図4 ヤング率と目的関数の関係 (D2地山, 土被り100m, 測定点数3点)

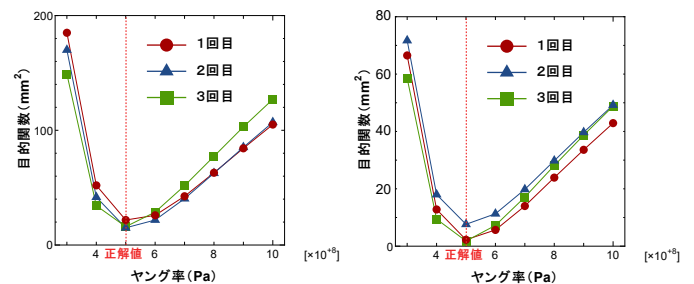


図5 ヤング率と目的関数の関係 (D1地山, 土被り100m, 測定点数8点) 図6 ヤング率と目的関数の関係 (D1地山, 土被り200m, 測定点数3点)

4. おわりに

今後はポアソン比を含む地山物性値の早期推定可能性について、さらに検討するつもりである。

参考文献

- 1) 竹内 新: トンネル構造を考慮した弾性変位に基づく地山物性推定法, 新潟大学大学院自然科学研究科, 令和2年度修士論文, 2021.
- 2) 滝沢壮太, 阿部和久, 若月和人, 紅露一寛: 地山の弾塑性履歴を考慮したトンネル掘削過程の定常解析, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, VI-459, 2021.
- 3) 久武勝保 他: 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務, 丸善(株), 2006.
- 4) 蔦 宇静 他: 実務者のための山岳トンネルにおける地表面沈下の予測評価と合理的対策工の選定, 丸善(株), 2012.