

岩盤の変形係数を用いた簡便な構成モデルとトンネル掘削解析への適用

大成建設 フェロー会員 ○青木 智幸

1. はじめに

山岳トンネルの掘削時の変形挙動を評価する数値解析では、地山（岩盤）の構成モデルに弾性体を仮定することが多い。しかし、小土被りトンネルの掘削解析をする際には、トンネル下方の解析領域の大きさによって地表面の沈下量を過小評価することが既往の研究で広く知られてきた¹⁾。一方で、岩盤は一般に完全な弾性挙動を示す訳では無く、例えば平板載荷試験などの原位置試験では、載荷時と除荷時に異なる変形挙動をすることが知られており、除荷時の荷重－変位曲線の傾きから求められる弾性係数は、同様に載荷時の傾きから求められる変形係数よりも数倍大きい²⁾。そこで、変形係数と弾性係数の2つのパラメータで表現する簡便な構成モデルを検討した。これを用いて小土被りトンネルの掘削解析を行う事により、弾性モデルによる解析結果と比較して、観測される結果により類似するトンネルの変形挙動が得られることが分かった。

2. 変形係数のモデル

岩盤は一軸圧縮試験や平板載荷試験で載荷時に比較的直線的な応力－ひずみ関係を示し、除荷および再載荷時にはより大きな傾きの直線を通る挙動を示す（図-1）。これをひずみ硬化型弾塑性モデル³⁾で表現する。変形係数 D は拘束圧に依存せず一定とするため、降伏条件に用いる内部摩擦角 ϕ とダイレーション角 ψ をゼロとする。一軸載荷時の載荷時の直線の傾きを D とすると、ひずみ硬化を定義するせん断硬化パラメータ e^{ps} と粘着力 c の関係は次式で与えられる。

$$c = \frac{\alpha D}{2(\alpha - 1)} e^{ps} \tag{1}$$

ここで、 $\alpha = E/D$ 、 E は弾性係数（＝ヤング率）である。引張破壊は考慮しない。変形係数とセットとなる載荷状態の時のポアソン比 ν^D と除荷－再載荷状態のポアソン比 ν との関係は次式で表される。

$$\nu^D = \frac{2\nu + \alpha - 1}{2\alpha} \tag{2}$$

以下、この構成モデルを本稿では、一般的な弾性モデルと対比して「変形係数モデル」と称する。

3. トンネル掘削解析

トンネル掘削解析にはFLAC v.8.1³⁾を使用し、土被り10mの位置に半径5mのトンネルが存在するモデルを解析した（図-2）。トンネル下端から下方境界までの距離 L について、10、20、30mの3種のモデルを使用した。変形係数モデルの地山物性値を、表-1に示す。弾性モデルのケースでは、 E 、 ν に D 、 ν^D の値をそれぞれ使用した。解析に当たっては、まず、側圧係数 $K_0 = 0.5$ となるように自重計算で初期応力を与え、次にトンネル部分を全断面掘削した。表-2に解析ケース一覧を示す。

トンネル掘削により発生した変位の比較を図-3に示す。なお、

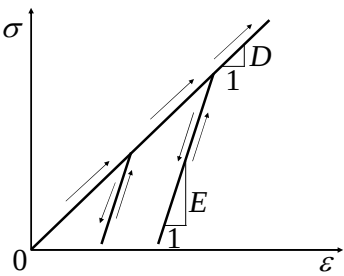


図-1 応力－ひずみ関係

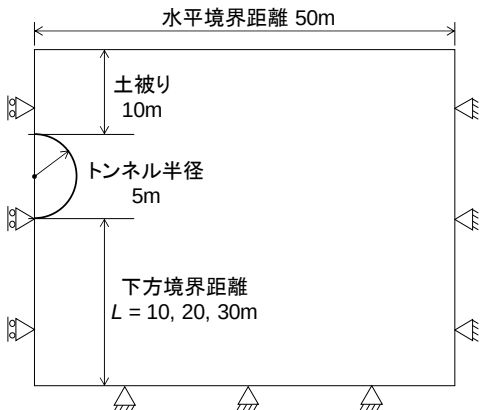


図-2 数値解析モデルと境界条件

表-1 地山物性値（変形係数モデル）

密度 (kg/m ³)	D (MPa)	ν^D	α
2,100	150	0.35	3.0

キーワード 山岳トンネル 小土被り 数値解析 沈下 変形係数 解析領域

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設株式会社 技術センター TEL：045-814-7221

地表面沈下以外は、先行変位率 50%として計測変位相当量をプロットしている。トンネル坑内の天端沈下や内空変位は、変形係数モデルでも弾性モデルでもほぼ同等の値を示した。脚部沈下は、変形係数モデルでは下方境界距離の大きさに関わらず沈下を示すのに対し、下方境界距離の大きい弾性モデルの E1 では隆起を示す。また、盤ぶくれ量に関しては、弾性モデルの方が顕著に大きい値を示している。地表面沈下に関しては、変形係数モデルでも弾性モデルでも下方境界距離が小さいケースほど沈下量が多い傾向を示すが、全般に変形係数モデルのケースの方が大きな沈下を生じている。

図-4 に地表面沈下分布として、ケース D1 と E1 の解析結果を示す。変形係数モデルの方の沈下量が多いが、沈下を生じる幅（影響範囲）も弾性モデルの結果と比較して大きい。

図-5 には、トンネル周囲の地山の最大主応力のコンターを示した。トンネル掘削により周囲の地山に応力再配分が生じ、トンネル下方の地山内部では水平方向の応力が増加するが、下方境界距離が特に小さい弾性モデルのケース E3 だけが境界の影響を顕著に受けて応力分布がかなり異なっている。一方、同じ下方領域距離が 10m の変形係数モデルを使用したケース D3 では、他のモデルと比較して応力分布に大きな違いはない。

4. まとめ

「変形係数モデル」を開発し、小土被りトンネルの掘削解析を行った。弾性モデルと比較し、以下の点でトンネル工事で観測される変形挙動により近い結果が得られたと考える。

- 1) 変形係数モデルを使用することにより、極端に小さな下方境界距離を設定せずに、比較的大きな地表面沈下を表現できる。
- 2) 下方領域距離が小さい場合、弾性モデルでは再配分される応力分布に有意な影響を与える場合がある。盤ぶくれ挙動やインバート工の効果を検討する際には、変形係数モデルの方が実際の挙動に近い可能性があり、今後更に検証を進めていきたい。

参考文献

- 1) 土木学会: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,トンネルライブラリー第24号,第5章, pp.125-189, 2012.
- 2) 例えば 土木学会:原位置岩盤試験法の指針, p.186, 2000.
- 3) ITASCA:Constitutive Models, FLAC ver. 8.1 Online Manual, pp.1-65 - 1-70, 2020.

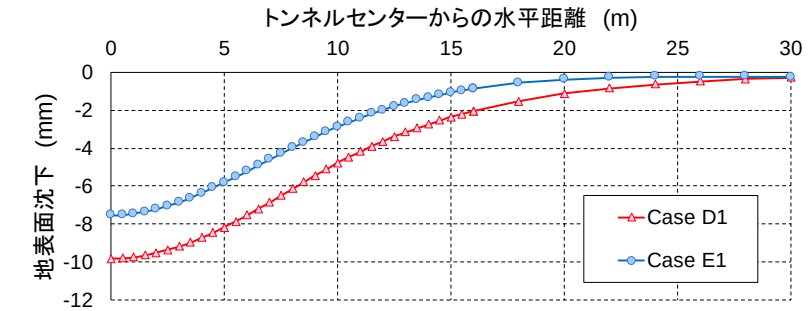


図-4 地表面沈下分布の比較

表-2 解析ケース一覧

ケース	構成モデル	下方境界距離 L (m)
D1	変形係数	30
D2	変形係数	20
D3	変形係数	10
E1	弾性	30
E2	弾性	20
E3	弾性	10

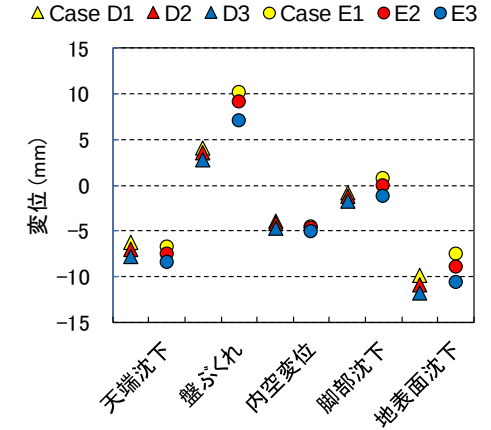


図-3 発生変位の比較
(符号: 沈下方向が負、内空変位は収縮が負)

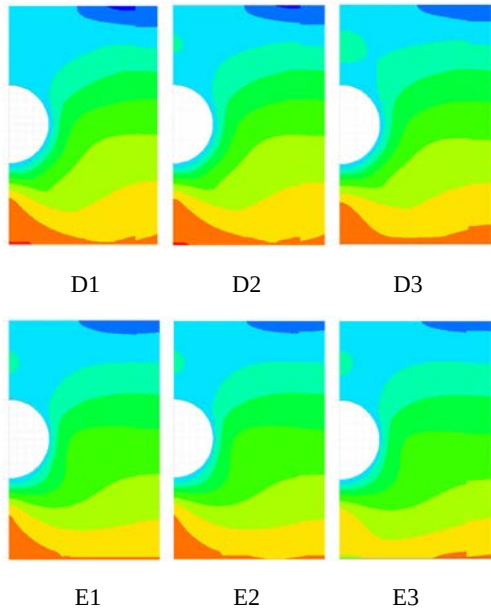


図-5 最大主応力コンター
(符号: 圧縮が正)