

トンネルの2次元解析におけるパラメータ設定に関する一考察

大成建設(株) 正会員 大塚 勇, 板垣 賢, 横畑 友幹, 〇蔭山 凌

1. はじめに

山岳トンネルの掘削解析においては一連の作業に要する時間から、2次元解析を用いた設計が主流となっている。このとき、トンネル掘削に伴う地山の3次元的な挙動を2次元問題(平面ひずみ)として扱うため「応力解放率」を設定する必要がある。応力解放率の設定方法については、いくつかの知見が得られているが、施工実績から経験的に定めていることが多い等の課題点も述べられている¹⁾。本研究では入力物性値を様々に変化させた3次元逐次掘削解析の結果より、解析結果と応力解放率との関係を整理し、2次元掘削解析における応力解放率の設定方法を提案する。

2. 解析条件

地山条件、土被り、吹付け剛性を様々に変化させ、有限差分コードFLAC3Dを用いて3次元掘削解析を行う。解析モデルを図-1に示す。地山は弾性体とし、ソリッド要素によりモデル化する。表-1に検討に用いた地山物性値を示す。本坑の支保部材は吹付けコンクリートのみとし、シェル要素にて切羽1m後方よりモデル化する。側圧係数は1.0とする。

掘削進行1mのサイクルタイムを8.3時間と仮定し、図-2に示すようにシェル要素の弾性係数を材齢(切羽進行)に応じて1m掘削ごとに变化させる。なお、吹付けコンクリートの材齢と弾性係数の関係は、既往の試験結果²⁾を対数近似して設定した。図-3に示す通り、吹付け厚は10cm, 20cm, 30cmの3パターン、地山物性値はA, B, Cの3パターン、土被りは500m, 1000m, 1400mの3パターンであり、計27ケースの解析を実施する。

3. 解析結果

トンネル壁面変位 U_a とトンネル壁面半径方向応力 σ_r との関係(理論解)は、等方等圧状態における弾性論による以下の式で表すことができる。

$$U_a = \frac{a(1 + \nu)(P_0 - \sigma_r)}{E} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 P_0 : 初期地圧[kN/m²] a : トンネル半径[m] ν : 地山ポアソン比[-]
 E : 地山変形係数[kN/m²] U_a : トンネル壁面変位[m] σ_r : トンネル壁面半径方向応力[kN/m²]

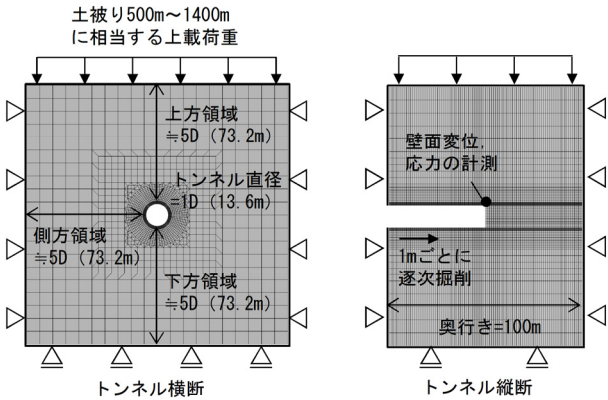


図-1 解析モデル

表-1 地山物性値

	単位体積重量 γ [kN/m ³]	変形係数 E [kN/m ²]	ポアソン比 ν [-]
A	27.0	200×10^3	0.30
B	27.0	500×10^3	0.30
C	27.0	$1,000 \times 10^3$	0.30

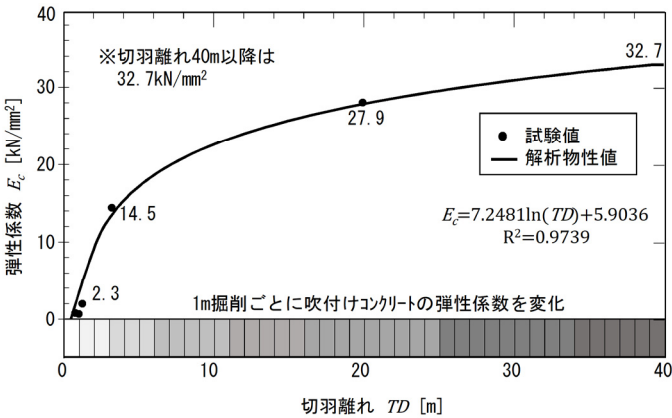


図-2 材齢に応じた吹付けコンクリートの弾性係数

地山変形係数 土被り 吹付け厚

$$\begin{bmatrix} 200 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 \\ 500 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 \\ 1000 \times 10^3 \text{ kN/m}^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 500\text{m} \\ 1000\text{m} \\ 1400\text{m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 10\text{cm} \\ 20\text{cm} \\ 30\text{cm} \end{bmatrix}$$

⇒3×3×3=27ケース

図-3 解析ケース

キーワード トンネル, 特性曲線, 掘削解析, 応力解放率

連絡先: 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株)土木本部 TEL03-5381-5129

解析結果の一つ(B地山, 土被り 500m, 吹付け厚 20cm)について, 各ステップにおけるトンネル壁面変位 U_a およびトンネル半径方向応力 σ_r をプロットしたものを図-4に示す. 解析値と理論解は一致しないことがわかる. 理論解は切羽の接近に伴って線形的な地山の応力解放を仮定している. 一方で3次元掘削解析では切羽を境界として地山の有無が急変するためであると考えられる.

4. 解析結果の整理

2次元掘削解析における応力解放率は支保工設置の前後で分けられる場合が多い. 本研究では図-4に示す支保工設置時における地山応力(理論値)を P_1 とし, 以下の式により得られる α を「先行解放率」と定義する.

$$\alpha = \frac{P_0 - P_1}{P_0} \times 100 \dots \dots \dots (2)$$

文献⁽¹⁾を参考に, 以下に定義する地山・支保の剛性比 K_s/K_g と先行解放率 α との関係を用いて解析結果を整理する.

$$\frac{K_s}{K_g} = \frac{E_c \times t}{E_g \times a} \dots \dots \dots (3)$$

ここに, E_c : 吹付けコンクリートの弾性係数[kN/m²]

E_g : 地山の変形係数[kN/m²] t : 吹付け厚[m] a : 掘削半径[m]

なお, 吹付けコンクリートの弾性係数については硬化後の値 32.7kN/mm²を用いた. 全 27 ケースに対して上記の関係をj用いて整理した結果を図-5に示す. 先行解放率と地山・支保の剛性比の関係は, R^2 値が 0.991 の線形近似式で表せることがわかった.

5. おわりに

本検討では入力物性値を様々に変化させた3次元掘削解析を行い, 地山・支保の剛性比と先行解放率の関係をj用いて整理を行った. その結果, 上述の関係は線形であることがわかった. 等方等圧状態の地山に円形トンネルを掘進長 1m で全断面掘削する弾性解析であり, かつ吹付けコンクリートの剛性発現が同じであれば, 土被り(初期地圧), 地山の変形係数, 吹付け厚(支保剛性)が変化しても, 先行解放率を直線の近似式で表すことができる. 吹付けコンクリートの剛性発現が既知であれば少なくとも2ケースの3次元解析を行うことで回帰直線を得ることができ, 初期地圧や地山の変形係数, 吹付け厚を変更した解析を行う際の応力解放率は得られた回帰直線を用いて設定することが可能である. 設計実務においては掘削開始前に3次元の予測解析を行い, 掘削開始後に2次元の逆解析から切羽前方の支保パターンを見直す場合などに有効であると考えられる.

参考文献

- 1) 市田雄行, 小原伸高: トンネルの2次元掘削解析における応力解放率に関する一考察, トンネル工学報告集, 第25巻, I-31, 2015.11
- 2) 川口 哲生, 吉本 宏和, 武田 均: 超高強度材の極若材齢における圧縮強度とヤング係数の発現性に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集, vol.73, V-254, pp.507-508, 2018

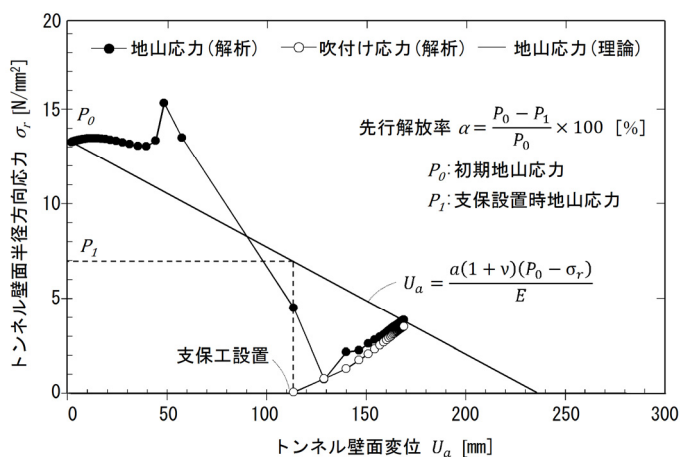


図-4 解析結果の一例

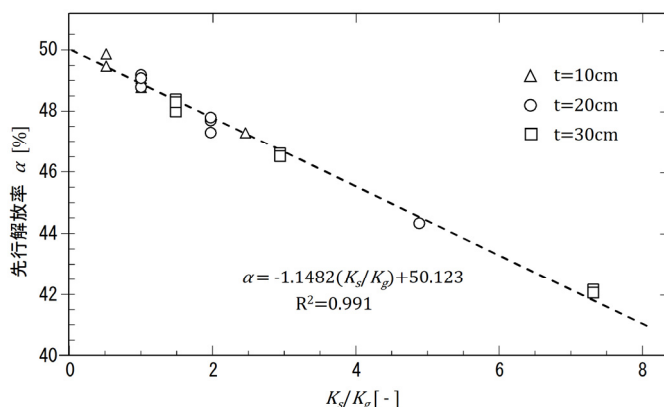


図-5 先行解放率 α と K_s/K_g の関係

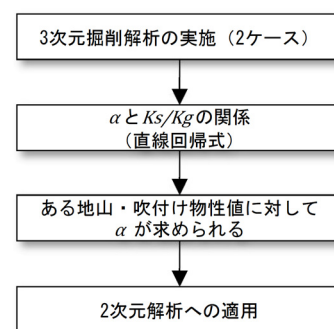


図-6 適用の例