

弾塑性解に基づく地山特性曲線の作成と支保の効果に関する研究

鳥取大学大学院 学 ○藤井 翔平 小川 金時

鳥取大学大学院 フェロー 西村 強 正 河野 勝宣

大阪大学大学院 箱崎 宥哉

1. 緒言

NATM はトンネル周辺地盤が空洞掘削に伴う応力解放分を負担しながら、支保との協働により空洞が保持されているという考え方に基づいている。図-1 は、地山の寄与分を支持構造物に対する土圧とトンネル周辺地盤の変位の関係として示している<sup>1)</sup>。しかしながら、設計概念は存在するが、それを具体化するための理論的検証が完了していない状況にあると思われる。そこで本研究では、弾塑性解を用いた簡易的な計算により地山特性曲線 (GRC) を作成することを主とし、複合体 (支保工のうち吹付けコンクリート(SC)と鋼製支保工(SS)を一体化したもの) の理論解<sup>2)</sup>を導入することで地山-支保特性曲線の作図を検討する。

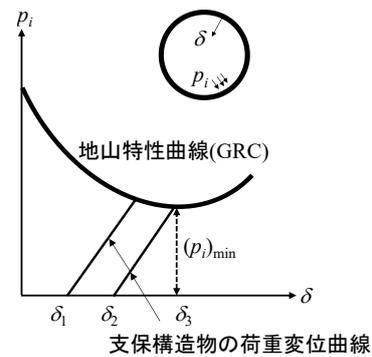


図-1 地山特性曲線及び支保工特性曲線の概念図<sup>1)</sup>

(文献 1) を基に一部抜粋して作図)

2. 地山-支保特性曲線の作成のシナリオ

図-2 は、トンネル掘削過程を 2 次元円孔問題に置き換え、空洞部の応力解放で表現した地山特性曲線 (GRC) を示している。弾塑性解を用いた式により、横軸を半径方向変位  $u_r$ 、縦軸を円孔表面にかかる  $\sigma_{ra}$  として地山の応力負担を表現する。次に、複合体としてモデル化した支保と地盤との連動として特性曲線の構成を行う。図-2 では、剛性  $E_{eq}$  を有する支保工に、 $C^m$  を載荷開始とする荷重変位関係を描いている (赤太破線)。GRC 線との交点が  $B^{st}$  点であり、地山と支保工それぞれの荷重負担分の読み取りが可能である。支保工は、地山との接触面を介して荷重を負担しながら、地山-支保系はつり合い状態に至る。この過程は、GRC 上の  $B^{in}$  点から分岐して最終変位  $C^{st}$  に向かう経路 (図-2 中の青線) として表現される。ここに述べるようなシナリオのもとに地山-支保特性曲線の作成を記述する。

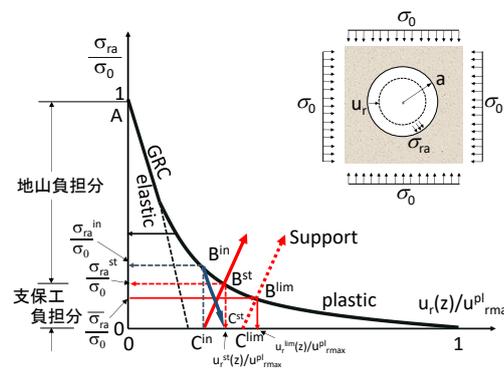


図-2 地山-支保特性曲線の具体化

3. 弾塑性解を用いた地山特性曲線の作成

GRC の弾塑性解に基づく簡便な作成方法を記述する。地盤モデルは均質地盤、等方応力状態を仮定し、地山は弾性係数  $E$ 、ポアソン比  $\nu$ 、強度定数  $(c, \phi)$  を有する材料とする。半径  $a$  の円孔に周りに図-3 のように塑性域が進展するとして、塑性域内の微小領域の力のつり合い式は次式となる。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{(1-\zeta)\sigma_r - S_c}{r} = 0 \tag{1}$$

この式を解けば、内空圧  $\sigma_{ra}$  は次式のように求められる。

$$\sigma_{ra} = \left( \sigma_{rR} + \frac{S_c}{\zeta - 1} \right) \left( \frac{R}{a} \right)^{1-\zeta} - \frac{S_c}{\zeta - 1} \tag{2}$$

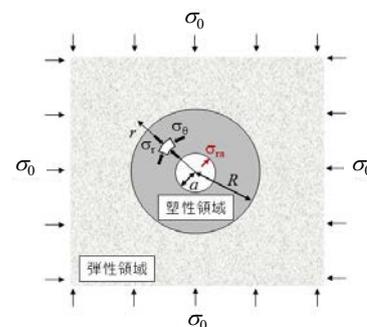


図-3 地盤モデル

キーワード NATM 地山特性曲線 支保工

連絡先 〒680-8552 鳥取市湖山町南 4 丁目 101 鳥取大学

TEL0857-31-5297

ここに、 $\sigma_{rR}$  は弾塑性境界  $r=R$  における半径方向応力、 $\zeta=(1+\sin\phi)/(1-\sin\phi)$ 、 $S_c=2c\cos\phi/(1-\sin\phi)$  である。これを図-2 の縦軸を表現する量として用いる。図-2 の横軸の半径方向変位の計算には、塑性域では体積ひずみが一定とする、塑性域の弾性係数を低下させる、二つの仮定を用いる。塑性領域内の体積ひずみの変化が 0 であるとして円孔表面  $r=a$  における変位  $u_{r=a}$  は次式となる。

$$u_{r=a} = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_0 - \sigma_{rR}) \frac{R^2}{a} \quad (3)$$

しかしながら、塑性域内の体積ひずみの変化がないとするには、非圧縮性材料あるいは平均主応力一定の条件が必要であるので、塑性領域のヤング率  $E$  を低減させる簡易式も求めた。これは、内半径  $a$ 、外半径  $R$  の円筒が内圧  $\sigma_{ra}$ 、外圧  $\sigma_{rR}$  を受けるときに、内半径と外半径に生じる変位の解をもとにしており、次式である。

$$u_{r=a} = \frac{1}{E^*} \left\{ (1-\nu^*) \frac{\sigma_{ra} a^2 - \sigma_{rR} R^2}{R+a} + (1+\nu^*) \frac{aR(\sigma_{rR} - \sigma_{ra})}{R+a} \right\} + \frac{1+\nu}{E} (\sigma_0 - \sigma_{rR}) R \quad (4)$$

塑性領域の弾性係数、ポアソン比には上付き\*をつけて区別している。なお、後出の例では、塑性化に伴うポアソン比の低下はなく、弾性状態の値を保持するとしている。

#### 4. 地山と支保の連動を表現する地山—支保特性曲線

本章では、支保が設置されたのちに初期応力を基準とする荷重を地山と支保が連動して負担する過程を有限要素解析により示す。図-4 に有限要素解析で用いるモデルを示す。トンネル（半径  $a=5(\text{m})$ ）は円形とし、初期応力  $\sigma_0(=2.4\text{MPa})$  を仮定する。等方応力状態（側圧係数  $k=1$ ）としている。地盤は、弾性係数  $E=500\text{MPa}$ 、ポアソン比  $\nu=0.49$ 、粘着力成分  $c=400\text{kPa}$ 、せん断抵抗角  $\phi=30^\circ$  に設定し、平面ひずみで弾完全塑性体としている。トンネルの掘削過程は空洞部となる部分の応力解放により模擬し、応力解放率  $\lambda=(\sigma_0-\sigma_{ra})/\sigma_0 \times 100(\%)$  で解放量を示すことにする。図-5 の横軸は、円孔表面( $a=5\text{m}$ )における半径方向変位  $u_a$  をトンネル半径  $a$  で除したもので、弾塑性理論解(2)と(3)による GRC は青色で、有限要素解析結果は橙色で示している。この図では、理論解と有限要素解析による GRC に差がみられる。そこで、式(4)を用いた例を破線で示しているが、塑性域の弾性係数を 10%程度低下させると有限要素解析を表現できそうである。同図には、吹付けコンクリート(SC)と鋼製支保工(SS)を一体化したものの荷重変位関係（赤色）も書き加えている。これと GRC との交点に対する縦軸を読めば、地山と支保工の過重負担割合を算定することができる。一体化させた支保工を曲げ要素として、 $\lambda=80\%$ において設置したとき関係も示しているが、GRC から分岐する様子を見ることができる。ここまでの結果には切羽からの距離と 2次元問題の応力解放率の関係、ロックボルトの効果のモデル化などが検討事項として残されている。研究を進める予定である。

参考文献：1)土木学会：トンネル標準施工方書[共通編]・同解説/山岳工法編・同解説, 73-79, 2016. 2)箱崎他, 円形ライニングとしてモデル化した支保工と地山の相互作用に関する有限要素解析, 2021年度地盤工学会研究発表会に投稿中

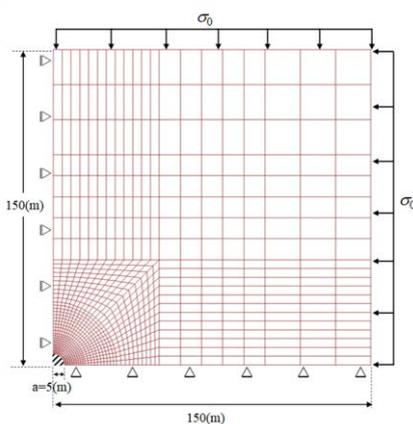


図-4 有限要素解析モデル

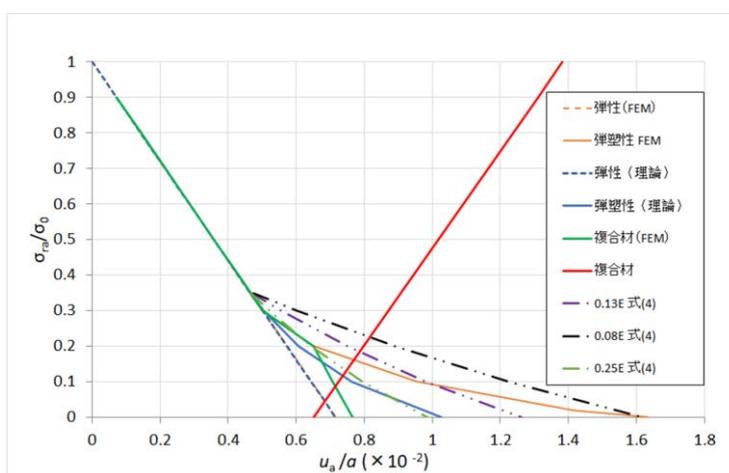


図-5 地山-支保特性曲線