

中央導坑先進工法適用時における切掘り断面の支保構造設計手法に関する一提案

大成建設株式会社 正会員 ○市田 雄行, 大塚 勇

1. はじめに

中央導坑先進工法では、導坑掘削による応力解放に伴い地山の初期応力が減少した応力場を切掘りすることから、導坑を先進させない場合と比べて切掘り掘削時のトンネル変位や支保応力が低減される効果が期待される。そこで、トンネルの弾塑性論を用いて導坑掘削後の地山応力と先行変位を定量的に求め、上記応力と変位の状態を踏まえた切掘り断面の支保構造設計手法について検討を行った。本稿ではその結果を報告する。なお、検討は下記 1)~4)の仮定に基づき実施した。

- 1) 等方等圧の初期応力状態を仮定する。
- 2) 地山の降伏は Mohr-Coulomb の降伏条件に従う。
- 3) 導坑および切掘り断面は円形とする。
- 4) 導坑が十分な距離先進した後に切掘り掘削を開始し、互いに切羽の影響は受けないものとする。

切掘り断面の支保構造設計手法および手順について、第 2~4 章にて順を追って説明する。また、以降の文中記載の地山応力および変位は、トンネルに対してそれぞれ半径方向の応力および変位を表す。

2. 導坑の支保構造設計

本章では、導坑掘削を対象として、トンネル壁面の地山応力と変位を算出する方法について述べる。一般的に、トンネル掘削により変化する地山応力と変位は、トンネルの弾塑性論¹⁾に基づき右記の式 1~9 (以降、理論式と称する) を用いて算出できる。例えば、各式中のトンネル中心からの距離 r に導坑半径を代入し、かつ支保内圧 P_i を変数として地山応力 P_r と変位 U_r を逐次求めれば、いわゆる地山特性曲線を描くことができる。また、導坑半径および支保部材の剛性等で定まる支保特性曲線を用いて、図-1 (a) に示すように地山特性曲線との交点を求めれば、この交点が導坑掘削完了時における導坑掘削面の地山応力 (= 支保内圧 P_{ip}) と変位 U_{rp} となる。ここで、支保特性曲線の開始点は初期応力 P_0 を $\alpha\%$ 解放した時点 (α : 応力解放率、一般的に 40~60% 程度) とする。支保内圧 P_{ip} が支保耐力 P_{sp} 以下 (= 導坑

支保構造の成立条件) となるような導坑半径あるいは支保部材仕様を選定し、導坑の支保構造を設定する。

【地山応力 P_r : トンネル半径方向応力】

- 1) 地山が塑性しない場合 ($R_0 < 0$)

$$P_r = P_0 - (P_0 - P_i) \times \left(\frac{a}{r}\right)^2 \quad (\text{式 1})$$

- 2) 地山が塑性する場合 ($R_0 \geq 0$)

・塑性領域内 ($r < R_0$)

$$P_r = \left(P_i + \frac{q}{K}\right) \times \left(\frac{r}{a}\right)^K - \frac{q}{K} \quad (\text{式 2})$$

・弾塑性境界 ($r = R_0$)

$$P_{R_0} = \left(P_i + \frac{q}{K}\right) \times \left(\frac{R_0}{a}\right)^K - \frac{q}{K} \quad (\text{式 3})$$

・弾性領域内 ($r > R_0$)

$$P_r = P_0 - (P_0 - P_{R_0}) \times \left(\frac{R_0}{r}\right)^2 \quad (\text{式 4})$$

【変位 U_r : トンネル半径方向変位】

- 1) 地山が塑性しない場合 ($R_0 < 0$)

$$U_r = \frac{1+\nu}{E} (P_0 - P_i) \times \frac{a^2}{r} \quad (\text{式 5})$$

- 2) 地山が塑性する場合 ($R_0 \geq 0$)

$$U_r = \frac{1+\nu}{E} (P_0 - P_{R_0}) \times \frac{R_0^2}{r} \quad (\text{式 6})$$

【塑性半径 R_0 】

$$R_0 = a \left(\frac{2}{1+k} \times \frac{P_0 K + q}{P_i K + q} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (\text{式 7})$$

$$q = 2c \frac{\cos\phi}{1 - \sin\phi} \quad (\text{式 8})$$

$$k = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}, \quad K = k - 1 \quad (\text{式 9})$$

ここに、

- r : トンネル中心からの距離 (m)
- a : トンネル半径 (m)
- R_0 : 塑性半径 (m)
- P_0 : 初期応力 (MPa)
- P_i : 支保内圧 (MPa)
- q : 地山の軸圧縮強度 (MPa)
- c : 地山の粘着力 (MPa)
- ϕ : 地山の内部摩擦角 (°)

キーワード 中央導坑, 地山特性曲線, 支保特性曲線

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 大成建設株式会社 土木設計部 TEL 03-5381-5296

3. 切掘り面の地山応力と変位（導坑掘削完了時）

本章では、第2章で求めた導坑掘削完了時において、将来的に切掘り面となる位置での地山応力と変位の算出方法について述べる。導坑掘削面の地山応力は支保内圧 P_{ip} と等しいことから、各理論式の P_i に P_{ip} を、 r に切掘り断面の半径を代入して、切掘り面位置の地山応力と変位を求めることができる（図-1 (b) の (P_{rm}, U_{rm}) に相当）。よって、当位置では導坑掘削に伴い P_0 - P_{rm} に相当する地山応力が解放されたことになる。また、この応力解放に伴い当位置では U_{rm} だけ変位しており、これは導坑掘削に伴う先行変位として考えることができる。

4. 切掘り断面の支保構造設計

切掘り断面の掘削を対象として、切掘り掘削完了時における地山応力と変位を、第2章と同様にして地山特性曲線と支保特性曲線の交点より求める。このとき、第3章にて理論式より求めた地山応力 P_{rm} と変位 U_{rm} は、図-1 (c) に示す切掘り断面を対象として求めた地山特性曲線上に理論上プロットすることができる。

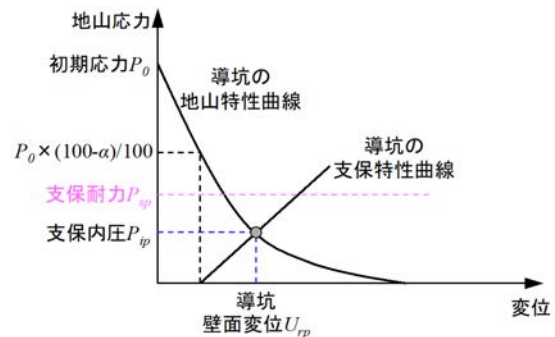
上記検討結果を踏まえ、切掘り断面を対象とした地山特性曲線と支保特性曲線の交点を算出するにあたり、図-1 (d) に示すとおり導坑掘削完了時における地山応力 P_{rm} と変位 U_{rm} を切掘り掘削の開始点として、地山応力 P_{rm} を $\alpha\%$ 解放した時点で支保特性曲線を描くことで両曲線の交点を求める。以上の一連手順を通して、導坑掘削に伴う初期応力の先行解放および先行変位を考慮した切掘り断面の支保構造の設計が可能となる。

なお、第2章で述べた導坑支保構造（導坑半径、支保部材仕様）の設定方法と同様に、切掘り断面の支保構造も図-1 (d) の支保内圧 P_{im} が支保耐力 P_{sm} 以下となるように設定する。ただし、支保構造が過大となる、または P_{im} が P_{sm} を超過する場合には、第3章の手順に戻り「導坑支保構造の成立条件」を満足する範囲内で導坑支保構造を適宜変更する。このとき、導坑掘削完了時における切掘り面位置の地山応力 P_{rm} を減少させることで、切掘り掘削完了時の支保内圧 P_{im} を調整する。

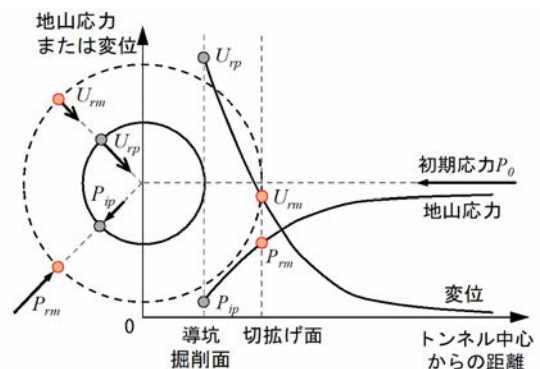
5. まとめ

本稿では、トンネルの弾塑性論に基づく理論式を用いて導坑掘削に伴う地山の応力解放および先行変位を定量的に求め、これらを考慮した切掘り時の支保構造

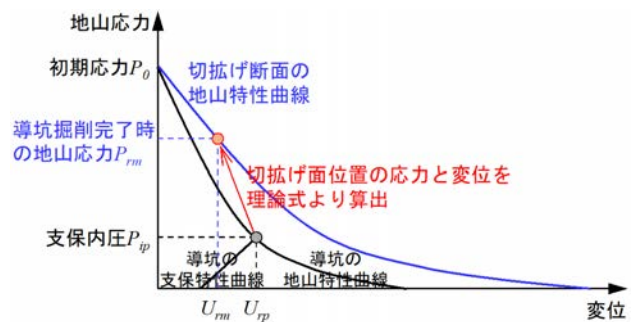
設計の簡易手法について示した。なお、地山へ許容させる変位の設定は課題として残るが、今後は中央導坑先進工法の施工実績を参考に、本手法の妥当性および実用性について検証したい。



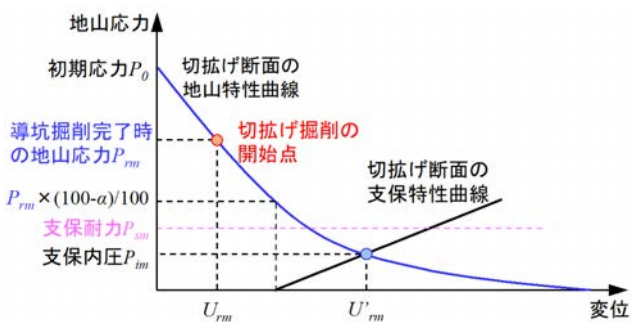
(a) 導坑支保構造の設計



(b) 導坑周辺の地山応力と変位の状態（導坑掘削完了時）



(c) 切掘り面の地山応力と変位（導坑掘削完了時）



(d) 切掘り断面の支保構造の設計

図-1 切掘り断面の支保構造の設計手順

参考文献

- 1) Kastner, H (金原弘 訳): トンネルの力学, pp.37-64, 1974.2