

円形導坑先進工法を用いた押し出し性地山トンネルの数値解析

山口大学 学 ○村田洋一

大広エンジニアリング(株) 正 古谷綾子

山口大学 正 中川浩二

山口大学 正 河原幸弘

1. はじめに

近年、激しい押し出し性土圧が発生する地山において、円形導坑先進工法を採用した事例がある。しかし従来、円形導坑先進工法は、トンネルを掘削する際に過去の実績より経験的に計画されることが多く、解析を行い評価した事例は少ない。そこで、本研究では、市販の3次元有限差分コードFLAC-3Dを用いて、簡単なモデル化をする事により押し出し性地山に対する円形導坑先進工法の評価を行うものである。

2. 対象トンネルの地質及び円形導坑先進工法の概要

今回参考とする、円形導坑先進工法が採用されたトンネルの地質は、新第三紀中新世の泥岩、砂岩を主体とする井戸沢層を基盤岩としている。

ある種の軟質岩盤にトンネルを掘削した場合、トンネル断面が大幅に減少する変形が生じ、支保を破壊する程度の土圧を伴って押し出してくる現象にしばしば遭遇する。このような変形挙動を起こす地山を押し出し性地山と呼ぶ。

円形導坑先進工法は、本坑掘削に先行して掘削し、地質確認、水抜き効果、本坑切り上げ時の切羽の安定や、応力の先行解放、いわゆる“いなし”の効果を期待する工法である。

本研究では、いなし効果を、全断面掘削したときの変位量X2（掘削前の地山におけるトンネル外周位置の変位量）に対する、導坑掘削したときのトンネル外周位置の変位量X1（掘削前の地山におけるトンネル掘削位置の導坑掘削による変位量）の割合（%）で表す。ここでは、全断面掘削の場合はいなし効果を100%として考える。以下に計算式を示す。

$$\begin{aligned} \text{いなし効果(\%)} &= \frac{\text{導坑掘削時の変位}}{\text{全断面の変位}} \times 100 \\ &= \frac{\text{全断面の変位} - \text{本坑切り上げの変位}}{\text{全断面の変位}} \times 100 \end{aligned}$$

3. 解析条件

本研究では、表-1に示す4つのモデルについて解析を行う。各モデルとも、基本的な力学モデルを考える。そこでは、自重は考慮せずモデルに対する外荷重として、土被り100mに相当する上載荷重を考える。この場合、側圧係数は $k=1$ として等方圧縮状態とする。掘削パターンとして、全断面掘削（半径5m）と円形導坑半径（1m, 2m, 3m, 4m）の計5パターン、先進距離（10m, 20m, 30m）の計3パターン、合計 5×3 の15パターンについて、表-1に示す条件で総数60ケースの解析を行った。その地山の物性値として、弾性解析では、日本道路公団が示す地山等級のDⅡ地山を用い、弾塑性解析では、DⅡ地山における粘着力を1/4に低下させて解析を行った。地

表-1 解析モデル

モデル	解析条件	支保形態
モデル1	弾性解析	表掘り
モデル2	弾塑性解析	表掘り
モデル3	弾性解析	支保有り
モデル4	弾塑性解析	支保有り

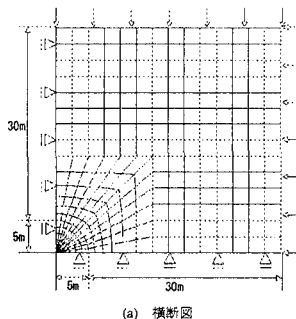


図-1 いなし効果の考え方

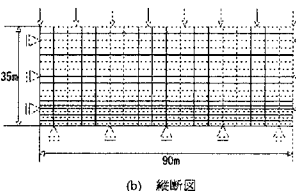


図-2 解析領域図

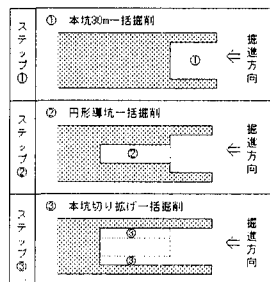


図-3 掘削の考え方

表-2 地山の物性値

	単位体積重量 量 γ (g/cm^3)	弾性係数E (kgf/cm^2)	ポアソン比 ν	粘着力c (kgf/cm^2)	内部摩擦角 ϕ (度)
DⅡ地山	2.1	1500	0.35	2	30
弾性地山	2.1	1500	0.35	—	—
弾塑性地山	2.1	1500	0.35	0.5	30

表-3 支保部材の物性値

	構造要素	単位体積重量 γ (kgf/m^3)	弾性係数E (tf/m^2)	ポアソン比 ν	厚さ t (cm)
吹付けコンクリート	shell	2200	2.0×10^5	0.17	35
鋼製支保工	beam	7847.5	2.1×10^7	0.3	—

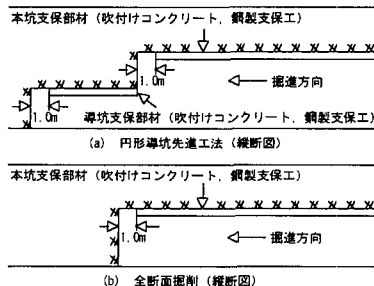


図-4 支保工概要図

山の物性値を表-2に示す。

モデル1, モデル2において, 図-2に解析領域図を示し, 図-3に掘削手順を示す。また, モデル3, モデル4では, 図-3のステップ③において本坑切り掘げ時に5mの逐次掘削を行った。その際に, 支保部材を切羽から常に1mあけるために, 図-2の縦断面図において奥行き20m~70m区間のメッシュを1m間隔として解析を行った。図-4に支保工概要図, 表-3に支保部材の物性値を示す。

4. 円形導坑先進工法(素掘り)の力学的挙動

本研究では, 全断面掘削と円形導坑先進工法を素掘りで行い, 導坑導入効果について比較・検討を行った。

モデル1の解析結果より, いなし効果は導坑半径が大きくなるほど大きくなり, 導坑先進距離によるいなし効果の違いは得られなかった(図-5参照)。

モデル2の解析結果についても, モデル1と同様な結果が得られた(図-6参照)。また, 実施工では約2mの導坑半径を採用しているため, 本解析において, 全断面掘削と円形導坑半径2mの最終沈下量を比較すると, 約5~10%の変位抑制効果が働いたと考えられる(表-4参照)。次に, 先進距離による切羽押出し量の相違が得られなかったため, 例として, 図-7に先進距離20mの場合の切羽押出し量を示す。この図から, 切羽の押出し量は導坑半径が大きくなるほど変位が抑制される結果が得られた。

5. 円形導坑先進工法(支保有り)の力学的挙動

支保工の効果を確認するため, 支保部材を入れて解析を行った。

モデル3の解析結果より, いなし効果は導坑半径が大きくなるほど大きくなり, 導坑先進距離によるいなし効果の違いは得られなかった(図-8参照)。

モデル4の解析結果についても, モデル3と同様な結果が得られ(図-9参照), また, 前述の素掘りの解析と同様に全断面掘削と円形導坑半径2mの最終沈下量を比較すると, 約15%の変位抑制が働いたと考えられる(表-5参照)。先進距離による切羽押出し量の相違が得られなかったため, 図-10に先進距離20mの場合の切羽押出し量を示す。この図から, 切羽の押出し量は円形導坑半径4mの時最も大きくなる。この理由として, 支保部材によって天端付近の変位が抑制されるため, 解放されている切羽に応力が集中し, 切羽の押出しが大きくなったと考えられる。

6. 結論

以下に本研究の結果をとりまとめる。

- ・円形導坑半径が大きくなるほど, いなし効果は大きくなる。また, いなし効果による変位の抑制を見ることができる。
- ・円形導坑先進距離による, いなし効果の違いは得られない。
- ・図-5と図-8, 図-6と図-9を比較すると, 支保部材によっていなし効果が低減されることが分かる。以上より, 導坑の安定を保ちつつ大きな変形を生じさせることにより, 大きいいなし効果を得ることができる。

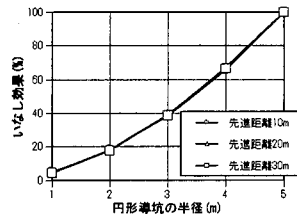


図-5 モデル1のいなし効果(35m地点)

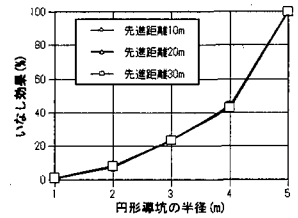


図-8 モデル3のいなし効果(35m地点)

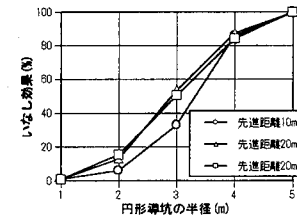


図-6 モデル2のいなし効果(35m地点)

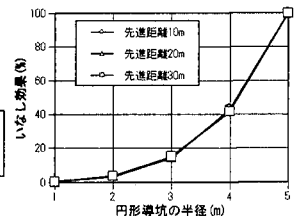


図-9 モデル4のいなし効果(35m地点)

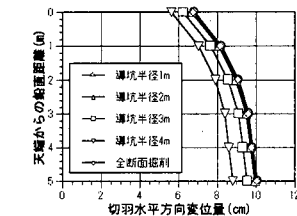


図-7 モデル2の切羽押し出し量

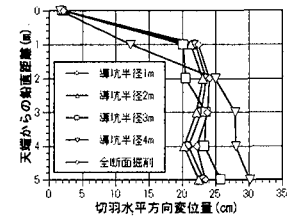


図-10 モデル4の切羽押し出し量

表-4 モデル2の最終沈下量(35m地点)

	先進距離10m		先進距離20m		先進距離30m	
	変位量(cm)	変位抑制(%)	変位量(cm)	変位抑制(%)	変位量(cm)	変位抑制(%)
導坑半径1m	54.14	1.8	70.70	1.8	80.75	-1.1
導坑半径2m	52.84	4.1	65.24	9.4	75.41	5.6
導坑半径3m	44.53	19.2	56.61	21.4	66.11	17.2
導坑半径4m	40.77	26.0	57.57	20.0	66.06	17.3
全断面掘削	55.11	-	71.98	-	79.87	-

表-5 モデル4の最終沈下量(35m地点)

	先進距離10m		先進距離20m		先進距離30m	
	変位量(cm)	変位抑制(%)	変位量(cm)	変位抑制(%)	変位量(cm)	変位抑制(%)
導坑半径1m	5.77	5.9	5.65	9.0	5.67	9.0
導坑半径2m	5.19	15.3	5.19	16.4	5.26	15.6
導坑半径3m	4.65	24.1	4.64	25.3	4.65	25.4
導坑半径4m	4.29	30.0	4.28	31.1	4.30	31.0
全断面掘削	6.13	-	6.21	-	6.23	-