

先受け設置時の地盤沈下予測手法

STUDY ON THE GROUND SETTLEMENT PREDICTION METHOD FOR FOREPOLING

鈴木久尚¹⁾・江崎雅章²⁾

Hisanao SUZUKI, Masaaki EZAKI

Generally, numerical analyses, such as FEM and framework structure analyses, are used to predict ground settlement when forepoling is provided. This report includes sensitivity analysis of the effectiveness of forepoling against ground settlement according to axisymmetric FEM analysis. Then, on the basis of analytical results, a study was made of the ground deformation prediction method, which assumed presence of forepoling. The results indicated that the proposed prediction method was useful for the setting of support effects with relative ease, given the ground conditions, forepoling structure, and tunnel shape, by assuming the forepoling support effects as functions of four parameters.

Key Words: forepoling, FEM analysis, ground settlement prediction

1. はじめに

先受けを施した場合の地盤沈下予測は、FEM解析や骨組み構造解析などの数値解析が一般に用いられている。

先受け設置による支保効果は、図-1の地山応力とトンネル変位との関係に示すように、覆工打設までの地山の応力解放 Δp 、地山変位 Δu をおさえることとなる。本稿では Δp に相当する、先受けによるみかけの内圧効果による荷重 σ_p を設定すべく、軸対称FEM解析を用いて地盤沈下に対する先受けの効果についての感度分析を行い、得られた結果をもとに先受けの存在を考慮した地盤変位予測手法について検討する。

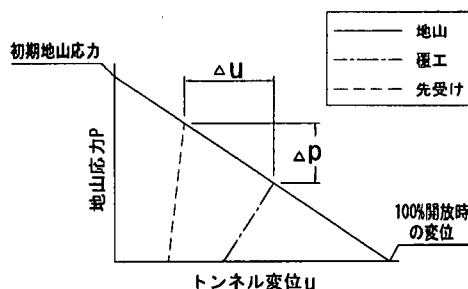


図-1 地山応力とトンネル変位との関係

2. 検討方法

地盤変位に対する感度分析は、図-2に示す軸対称弾性FEMモデルを用いて行う。切羽から1mの区間では、トンネル掘削に伴う応力解放を想定し、単位の荷重を作用させる。ここで、切羽は鏡ボルト等により安定しているものとし、解析上は変位を無視できると仮定し拘束とする。また、覆工は若材令時を想定し、弾性係数 $4,000\text{MN/m}^2$ 、覆工厚20cmとした。先受け材は長尺鋼管フォアパイリング相当を基本とし、軸対称モデルにおける鋼管のモデル化は、断面剛性および曲げ剛性が鋼管と同一となるようにモデル化した。

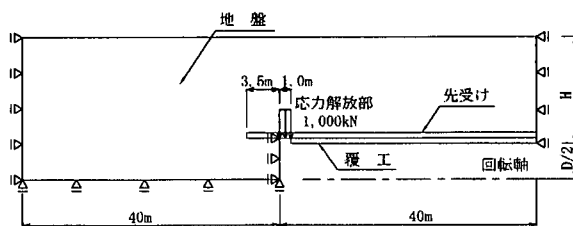


図-2 軸対称FEMモデル

- 1) フェロー パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通技術本部 トンネル部
2) 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 交通技術本部 トンネル部

以上の条件をもとに、基本ケース N を設定し、表-1 に示すトンネル外径 D、土被り厚 H、先受け材の剛性 EI、地盤の変形係数 E をパラメータとして変動させたときの、各パラメータが切羽部の天端沈下量に及ぼす影響を感度分析する。

3. 感度分析結果

図-3～図-6 に各パラメータが切羽部のトンネル天端沈下量に及ぼす影響について感度分析した結果を示す。沈下量は、特に先受け材の剛性、地山の変形係数の影響を大きく受ける。ここで、基本ケース N の、無対策の場合の天端沈下量 δ_1 (図-7) に対する先受け材を設置したときの天端沈下量 δ_2 の比は 0.30 となった。

表-1 検討ケース

計算ケース	トンネル外径 D (m)	土被り厚 H (m)	先受け材の剛性 EI (kN・m ²)	地盤の変形係数 E (kN/m ²)	地盤のポアソン比 ν
1 標準 N		10	10,800	50,000	0.4
2 D-1	5				
3 D-2	15				
4 H-1		5			
5 H-2		15			
6 EI-1			540		
7 EI-2			218,000		
8 E-1				20,000	
9 E-2				200,000	

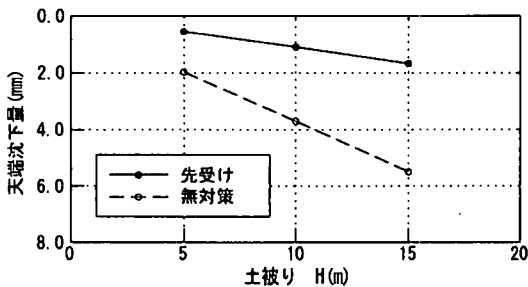


図-3 感度分析結果 (土被り)

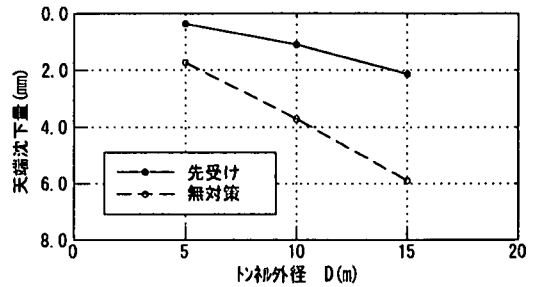


図-4 感度分析結果 (トンネル外径)

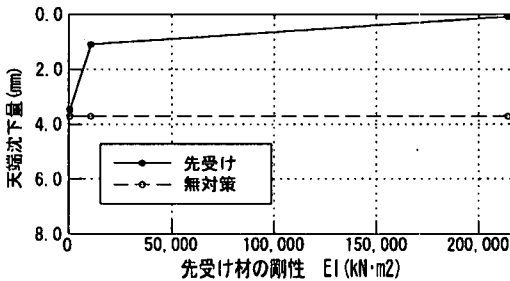


図-5 感度分析結果 (先受け材の剛性)

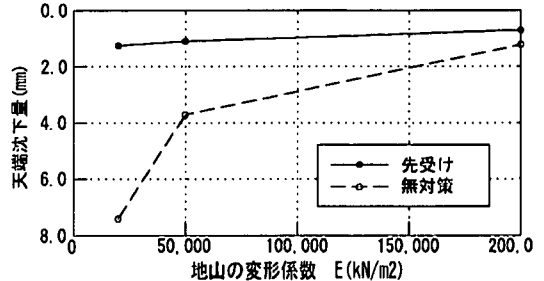


図-6 感度分析結果 (地盤の変形係数)

図-3～図-6 の感度分析結果をもとに、無対策の場合の天端沈下量 δ_1 に対する先受けを設置したときの天端沈下量 δ_2 の比、基本ケースに対する割合を図-8、図-9 に示す。土被り、トンネル外径はパラメータに関する一次式、先受け材の剛性、地山の変形係数は常用対数に関する一次式で近似した。以下にそれぞれの関係式を示す。

$$\begin{aligned}\eta_D(\text{トンネル外径の補正係数}) &= 0.051D + 0.49 \\ \eta_H(\text{土被り厚の補正係数}) &= 0.0099H + 0.90 \\ \eta_{EI}(\text{先受け材の補正係数}) &= -1.19\log EI + 3.75 \\ \eta_E(\text{地盤の変形係数の補正係数}) &= 1.37\log E - 5.45 \\ \eta(\text{基本ケース N の先受けの影響係数}) &= \delta_2 / \delta_1 = 0.30\end{aligned}$$

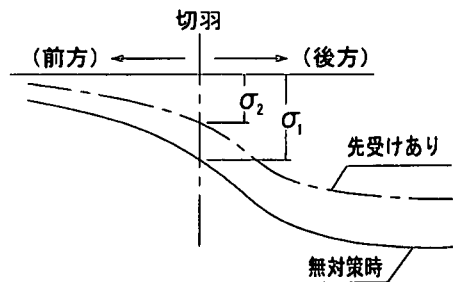


図-7 天端沈下量の概要

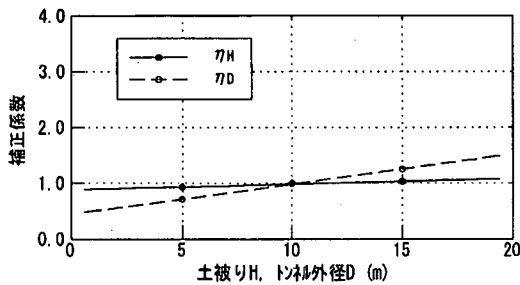


図-8 土被り、トンネル外径の補正係数

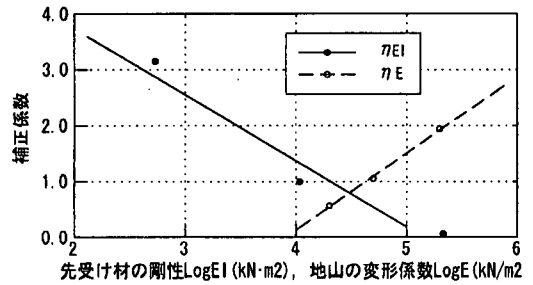


図-9 先受け材の剛性、地山の変形係数の補正係数

4. 先受け設置時の地盤沈下予測手法の検討

以上の結果をふまえ、先受け設置時の地盤沈下予測手法について検討する。先受けの設置により、図-1の地山応力とトンネル変位との関係に示すように、地山の応力解放 Δp 、地山変位 Δu をおさえることとなる。ここでは Δp に相当する、先受けによるみかけの内圧効果による荷重 σ_p を、基本ケースNの先受けの影響係数 η と各パラメータの補正係数からなる関係式として下式のように設定する。

$$\sigma_p = \eta \cdot \eta_D \cdot \eta_H \cdot \eta_{EI} \cdot \eta_E \cdot \sigma_0$$

ここで設定した σ_p は、トンネル上半掘削時にトンネル中心から地山側に作用するものとし、地山の応力解放 σ_t との関係は下式のとおりである。

$$\sigma = \sigma_t \cdot \sigma_p$$

ここに、 $\sigma_t = \alpha \cdot \sigma_0$

α : 地山の応力解放率

σ_0 : 地山の初期応力

5. 現場計測値との比較

以上において提案した手法の適用性を確認するため、現場計測値と解析値の比較を行う。

(1) 対象トンネルの概要

解析対象トンネルの施工条件を表-2に示す。掘削対象地山が未固結地山で、トンネル土被りが2~5mと小さいことから表-3に示す補助工法がなされ地表面沈下対策、切羽安定対策がなされた。

表-2 対象トンネルの主な施工条件

切羽地盤	シルト質細砂
掘削工法	上半先進工法
支保	吹付け 25cm 支保工 H-200(ウイングリブ付き)
先受け工	AGF
トンネル外形	幅 8m, 高さ 9m
土被り	2~5m(計算位置: 5m)

(2) 解析モデル

解析は2次元FEM解析を用いて行う。

解析ステップを図-10に示す。まず、STEP-1で初期応力解析を行い、STEP-2で上半掘削・応力開放を行う。ここで、先受けの支保効果は前項で提案した先受けによる見かけの内圧効果として応力解放とは逆方向にトンネル中心から地山側に作用させるものとする。ここでのそれぞれの補正係数は $\eta=0.3$ 、 $\eta_D=0.898$ 、 $\eta_H=0.950$ 、 $\eta_{EI}=1.00$ 、 $\eta_E=0.855$ である。

STEP-3では上半の覆工を設置し、残りの応力を解放さ

表-3 主な補助工法

AGF	鋼管径 ϕ 114.3mm, 鋼管肉厚 $t=6$ mm, 長さ12.65m, ラップ長6.65m, 打設ピッチ45cm, 打設範囲150°
切羽安定対策	・上半に補助ベンチを設置 ・切羽鏡面に劣化防止のため吹付けコンクリートを施工 ・切羽補強ボルトを切羽毎に打設

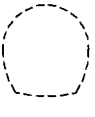
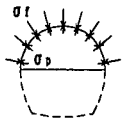
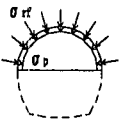
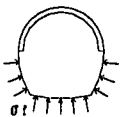
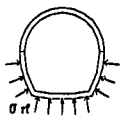
STEP-1	STEP-2	STEP-3	STEP-4	STEP-5
初期応力解析	上半掘削・応力解放	上半吹付け、支保の設置 縦方向のアーチングの影響	下半掘削・応力解放	下半吹付け、支保の設置 縦方向のアーチングの影響
				
	$\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ $\sigma_1 = \alpha \sigma_0$ $\sigma_2 = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5 \sigma_0$ σ_1 : 無対策時の解放応力 σ_2 : 先受けによるみかけの内圧効果 α : 応力解放率 ($\alpha=0.4$) σ_0 : 初期応力	$\sigma = \sigma_{rl} + \sigma_s$ $\sigma_{rl} = (1 - \alpha) \sigma_0$ σ_s : 縦方向のアーチングの影響による荷重	$\sigma_1 = \alpha \sigma_0$	$\sigma_1 = (1 - \alpha) \sigma_0$

図-10 解析ステップ

せる。STEP-4 は下半掘削・応力解放、STEP-5 で下半の吹付けを行い残りの応力解放を行う。

以上の解析ステップのもと、図-11 に示す解析モデル、表-4 の地質条件を用いて解析を行った。

(3) 解析結果

表-5 に地表面ならびにトンネル周辺の計測値と実測値の比較を行う。

先受けによる内圧効果として本稿で提案した手法を用いた場合の計算結果は、内圧効果を考慮しない場合と比べてトンネル上部では 2 割～3 割程度、トンネル下部では 6 割程度の沈下量となっている。

また、実測値と比べると計算値は地表面中央、トンネル周辺の各部において 5 割～8 割と小さな値となっており、特にトンネル脚部においてその差は大きい。これは、特に先受け工を施工した場合には支保工脚部の地耐力が不足する傾向が強く、ここで発生した大きな沈下量がトンネル全体に影響を及ぼしたことが要因と考えられる。

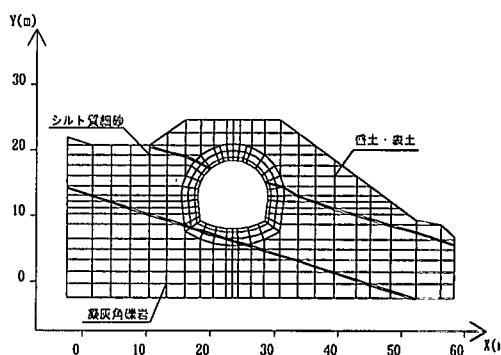


図-11 解析モデル

表-4 地質条件

地質名	表土・盛土	シルト質細砂	凝灰角礫岩
N値	4～8	11～22	>50
変形係数 $E(kN/m^2)$	15,000	40,000	125,000
ポアソン比 ν	0.40	0.40	0.40
単位体積重量 $\gamma_1(kN/m^3)$	16	18	18

6. おわりに

今回提案した先受け設置時の地盤沈下予測手法は、先受けの支保効果を 4 つのパラメータの関数とすることにより、地盤条件、先受け構造、トンネル形状が決まれば地盤変位に対する支保効果を比較的容易に設定することができるため有用であると考え。今後は、切羽変位の拘束、トンネル脚部の沈下評価方法に対して検討を加えるとともに、他の現場計測地との比較を行い本手法の適用性を再度確認したいと考えている。

表-5 計測値と実測値の比較 (沈下量)

	計算点	補助工法 なし	補助工法 あり
地表面	左路肩	-28.4	-12.1
	中央	-124.3	-35.8 (-63)
	右路肩	-43.8	-17.6
トンネル 外周	天端	-177.8	-41.6 (-54)
	左脚部	-25.9	-16.5 (-36)
	右脚部	-28.1	-18.7 (-39)

() 内は実測値

単位:mm