

三次元FEM解析による長尺先受け工の作用効果の検討

STUDY ON EFFECT OF FOREPILES BY THREE DIMENSIONAL FEM ANALYSIS

玉村公児*・森川誠司**・鹿毛豊**・大野清***・高橋祐治****

Koji TAMAMURA, Seiji MORIKAWA, Ryo KAGE, Kiyoshi OHNO, Yuji TAKAHASHI

Forepiling methods in tunneling have caught attentions as a method to reinforce weak ground or prevent surface settlement. However the mechanism how the forepiling has an effect on surrounding ground is not sufficiently examined at fields.

In the stability analysis of ground applying the forepiling method, it becomes much important to understand the three-dimensional ground behavior. In the previous paper (Tunnel Engineering Vol. 4, 1994), a two dimensional longitudinal analysis was performed to study the behavior of ground at cut face with forepiles. In this study, a three dimensional FEM is performed to address the acting mechanism of the forepiling.

key words:forepile, NATM, 3D FEM analysis

1. はじめに

近年、地質不良箇所における切羽安定化工法あるいは土被りの薄い箇所での地表面沈下の抑制工法として長尺先受け工法が脚光を浴びている。しかし、その作用効果の発現メカニズムについては十分に解明されているとは言い難い。

先受け工を必要とするような地山でのトンネルの安定性検討では、切羽近傍での三次元的な挙動の把握が重要である。前報¹⁾では、先受け工を含む切羽近傍の挙動について二次元縦断面解析を行い、いくつかの知見を得た。本報告では、注入式長尺先受け工の作用効果に関して基礎的な知見を得るために、三次元有限要素法解析を実施した。

2. 解析条件

長尺先受け工法による変位、応力解放および緩みに対する抑制効果を把握するために、先受け工を設置しないケースと設置したケースについて三次元弾塑性逐次掘削解析を比較検討した。解析の対象としたトンネルは、図-1のような断面形状のものであり、解析の諸条件は以下に示すとおりである。

*	正会員	工修	鹿島建設株式会社	土木設計本部設計技術部
**	正会員	工修	鹿島建設株式会社	情報システム部
***	正会員	工博	鹿島建設株式会社	土木技術本部技術部
****	正会員		鹿島建設株式会社	土木設計本部設計技術部

2.1 支保工部材

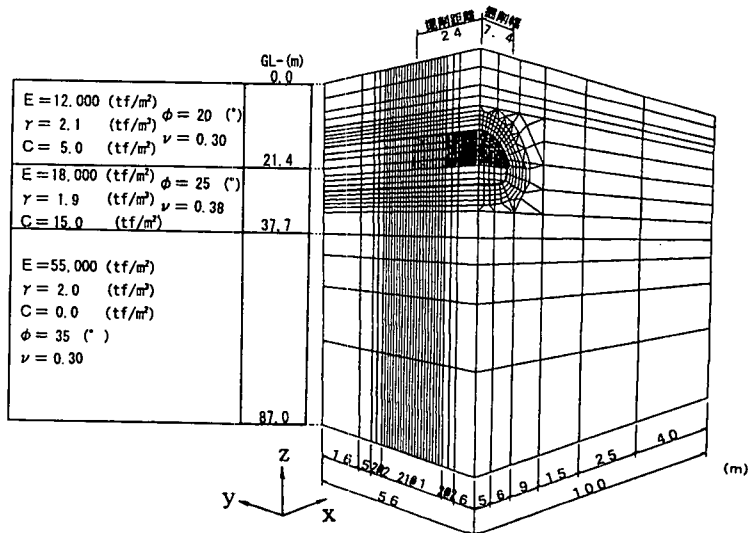
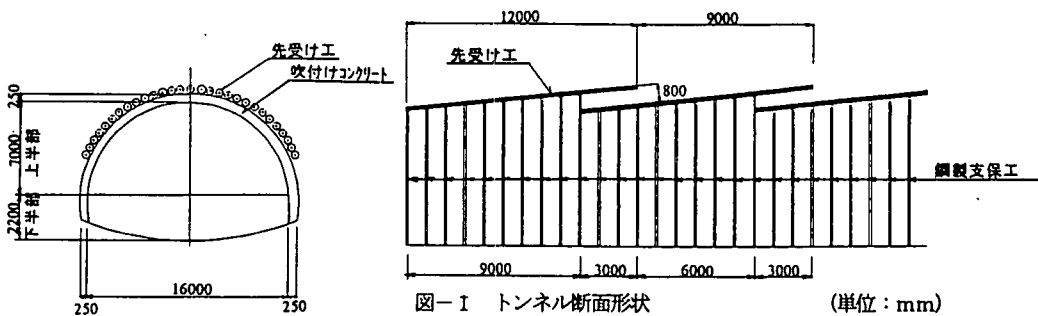
モデル化する支保部材の種類は吹付けコンクリート、鋼製支保工、先受け工とし、各支保部材のFEM要素の種類および諸元を表－1に示す。

2.2 解析モデル

- 解析に用いたメッシュと地山物性値を図－2に示す。解析モデル作成にあたっては以下の条件を設けた。
- 地表面は水平とし、地層は成層とする。
 - 解析断面は、半断面とする。
 - トンネル掘削径(D)は14.8mとし、土被りは16.0m (≒1.1D)とする。
 - 周辺地盤はソリッド要素でモデル化する。
 - 地山は弾塑性体とし、破壊基準はDrucker-Pragerの降伏条件を用いる。
 - 境界条件は、下面は水平ローラー、鉛直方向拘束、上面はフリーとし、それ以外の面は水平方向拘束、鉛直ローラーとする。

表－1 支保部材諸元

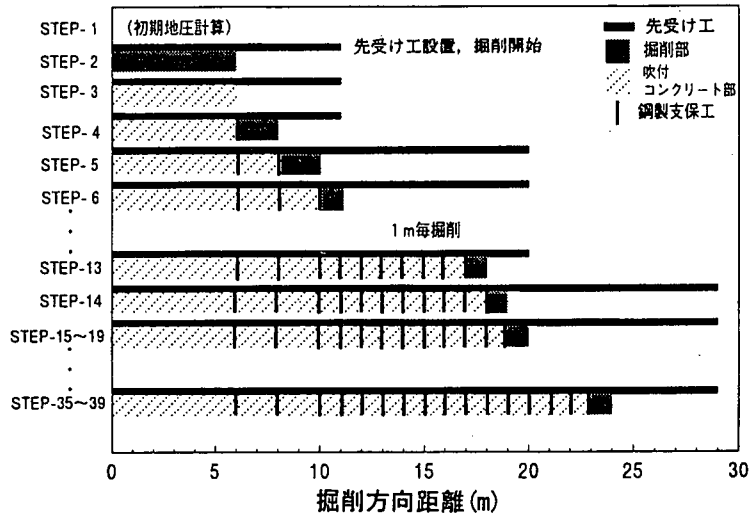
支保部材	要素種類	弾性係数 (kgf/cm ²)	断面積 (cm ²)	断面2次モーメント (cm ⁴)
吹付けコンクリート	ソリッド要素	4.0×10 ⁴	t=25cm	—
鋼製支保工(H-250X250X9X14)	ビーム要素	2.1×10 ⁶	92.18	10,800
先受け工(φ114.3mm, t=6mm)	ビーム要素	2.1×10 ⁶	29.02	356.5



図－2 解析モデルおよび地盤物性値

2.3 掘削ステップ

掘削ステップを図－3に示す。解析は実施工に近いステップを設定し、図－2においてモデル手前から上半断面の掘削を行うものとした。今回の解析は、ベンチカット工法で全長24mを掘削するものとしたため、上半断面の掘削のみとした。なお、掘削距離19m以降（STEP15以降）は、1 m掘削分の解放力を5分割した荷重を1STEPとし作用させた。



図－3 解析ステップ

3. 解析結果

3.1 地山応力

先受け工なしのケースとありのケースのトンネル周辺地山の応力経路を図－4に、また図－4に示した要素のうちトンネル天端部の要素の直応力とせん断応力をそれぞれ図－5，6に示す。

図－4のA，Bから分かるように、先受け工設置範囲内にあるトンネル天端部および肩部では、先受け工なしのケースで応力はDrucker-Pragerの破壊基準を越えているが、先受け工ありのケースでは応力はほぼDrucker-Pragerの破壊基準内にあり安全な状態になっている。ここで、Drucker-Pragerの破壊基準は以下の式により示される。

3方向の直応力を $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 、せん断応力を $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ とすると、

$$\alpha J_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (\text{引張: } +)$$

ここで

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \{ (\sigma_m - \sigma_x)^2 + (\sigma_m - \sigma_y)^2 + (\sigma_m - \sigma_z)^2 \} + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2$$

$$\sigma_m = J_1 / 3, \quad \tau_{oct} = \sqrt{6J_2} \quad \dots \diamond$$

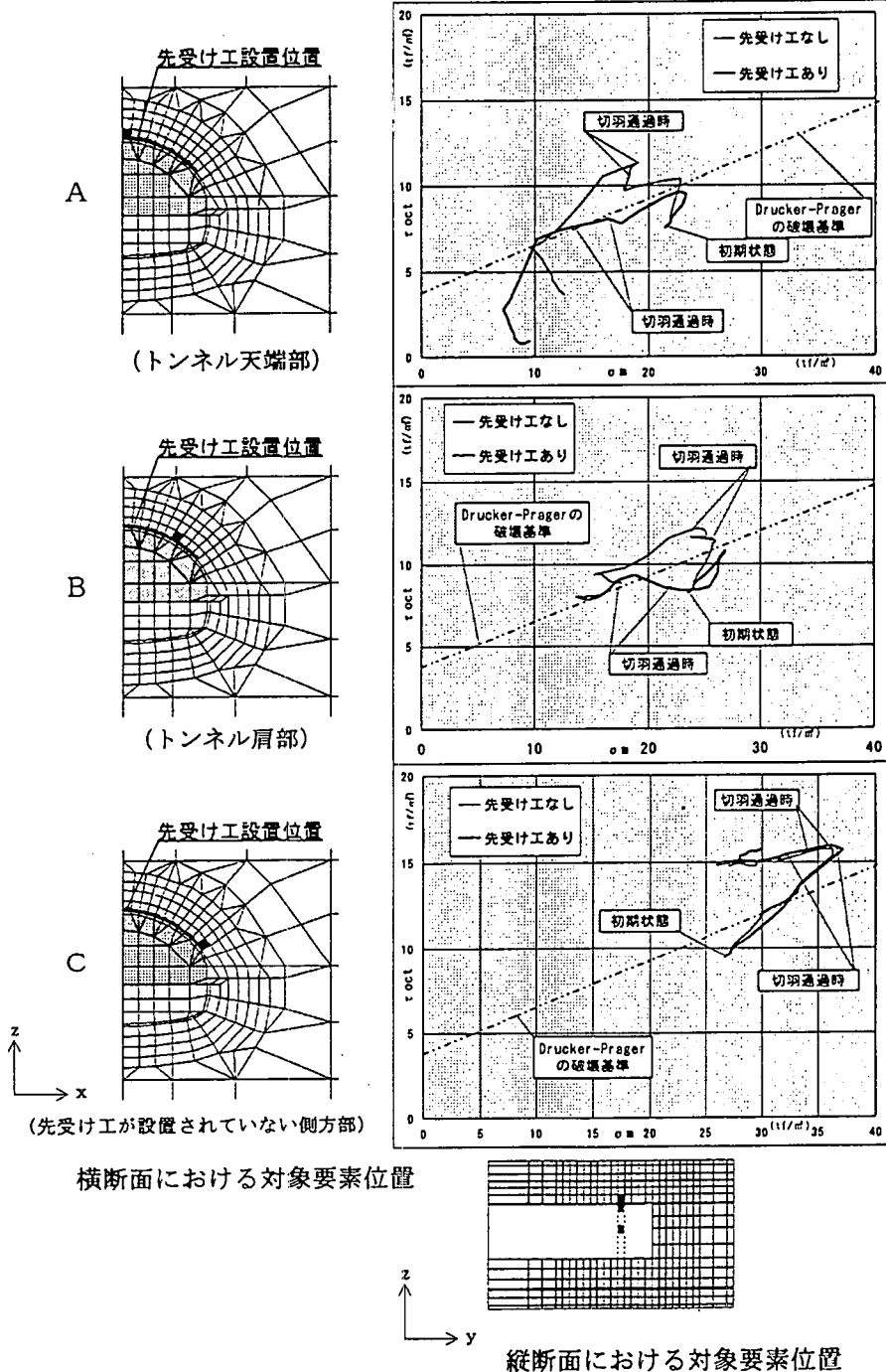
$$\alpha = \frac{\sin \phi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \phi}}, \quad k = \frac{3c \cdot \cos \phi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \phi}}$$

上式の c および ϕ はMohr-Coulombの降伏条件における粘着力および内部摩擦角である。

切羽通過時の応力の破壊への接近度合を破壊基準線の法線成分で比較すると、先受け工ありのケースがなしのケースに比べて小さくなっている。この現象をトンネル天端部について、直応力とせん断応力に分けて分析すると、切羽通過時の直応力については、 z 方向で減少している他、 x および y 方向では先受け工あり

のケースでほとんど変化しないが、先受け工なしのケースでは急激に増加している（図－５参照）。また、せん断応力 τ_{yz} についても、先受け工ありのケースに比べてなしのケースの方が大きい（図－６参照）。

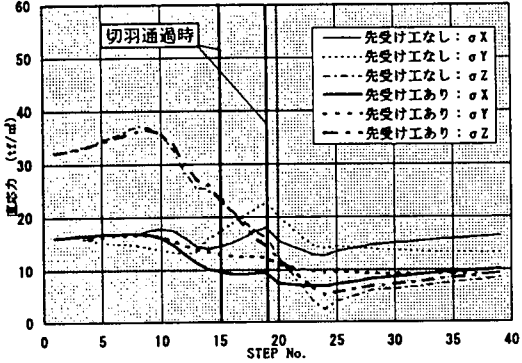
このため先受け工ありのケースでは、式④の平均直応力 σ_m は大きく減少し、八面体せん断応力 τ_{oct} はあまり変化せず破壊領域にはほとんど接近していない。一方、先受け工なしのケースでは、 σ_m はあまり変化しないが τ_{oct} は急激に増加しているため、応力経路は破壊の領域に大きく進んでいる。



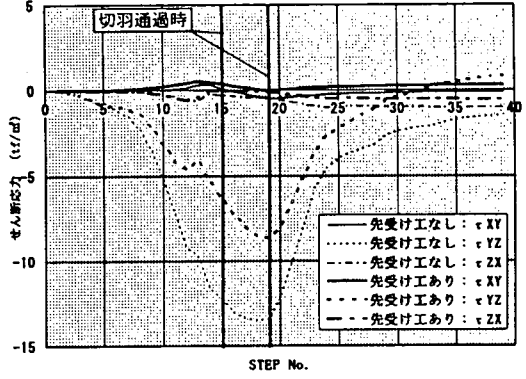
図－４ 応力経路

トンネル肩部についても同様の挙動を示し、先受け工を設置した範囲については先受け工の効果が確認できる。

一方、先受け工を設置していない側方部では、先受け工なしとありのケースで応力経路にほとんど差がなく、先受け工の効果は見られない（図－４のC参照）。

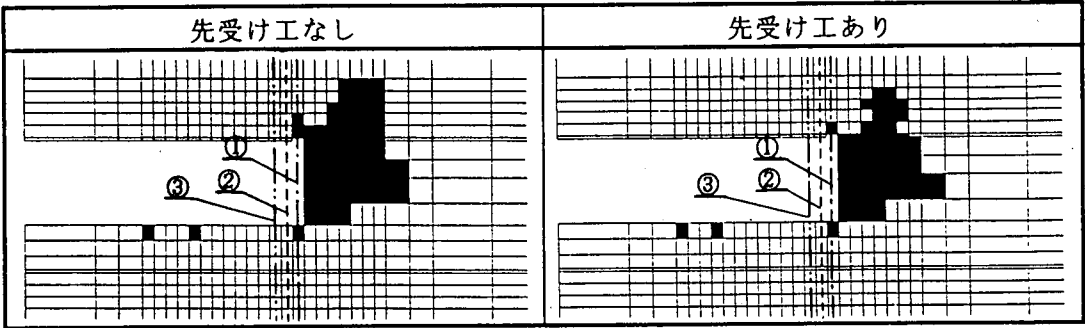


図－５ トンネル天端部の要素の直応力

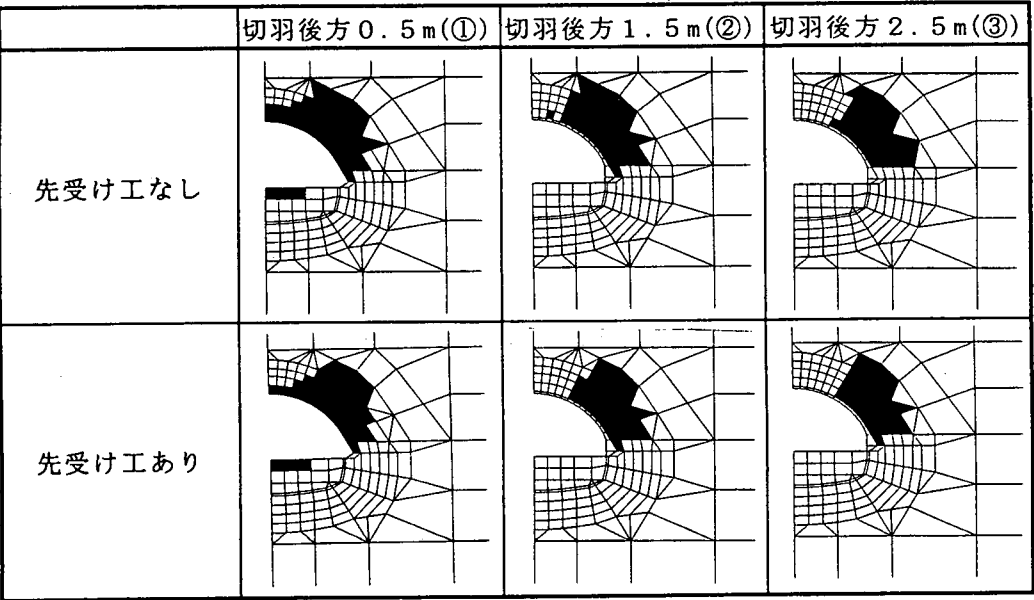


図－６ トンネル天端部の要素のせん断応力

緩み領域：縦断面（掘削距離 2.4 m）



緩み領域：横断面



図－７ 緩み領域

3.2 ゆるみ領域

先受け工ありのケースと先受け工なしのケースにおける緩み領域を図-7に示す。この緩み領域について以下のことが言える。

- ・縦断面において、切羽前方では先受け工なしのケースでは先受け工ありのケースより緩み領域が広範囲で発生している。
- ・切羽後方の横断面の緩み領域は、特にトンネル肩部において先受け工ありよりも先受け工なしのケースで広範囲で発生している。

これらの結果から、先受け工の緩み領域の抑制効果が確認できた。

3.3 変位量

トンネル天端の変位および地表面の変位の結果をそれぞれ図-8, 9に示す。図-8, 9から以下のことがわかる。

- ・トンネル天端部のトンネル軸方向変位(δy)については、先受け工なしのケースに比べ、先受け工ありのケースの方が小さい。このことから先受け工にはトンネル軸方向変位(δy)の抑制効果があるといえる。
- ・先受け工ありのケースの天端沈下量(δz)は、切羽近傍では先受け工なしのケースの値にほぼ等しい。
- ・地表面沈下($\delta'z$)についても、先受け工ありとなしの両ケースであまり差が無い。

以上のように長尺先受け工の変位抑制の効果は非常に小さいという結果になった。

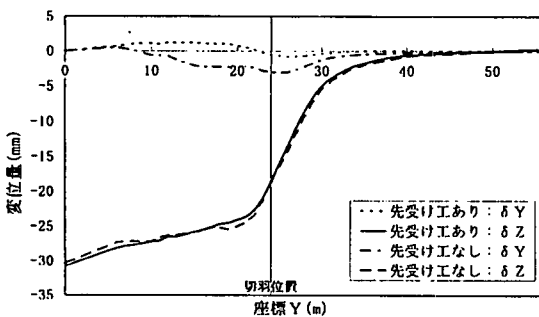


図-8 トンネル天端の変位

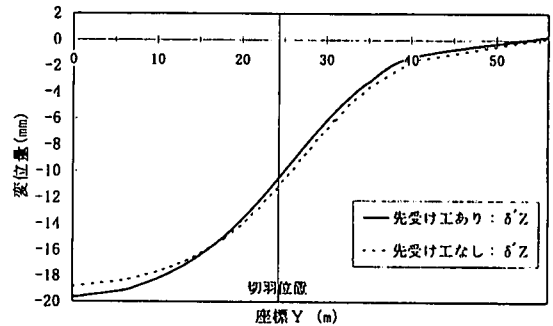


図-9 地表面の変位

4. まとめ

本解析モデルによる三次元FEM解析の結果から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 長尺先受け工は、切羽通過時にその近傍地山の応力状態をより安全な状態に保つ。
- (2) その結果として長尺先受け工の適用により、切羽前方の上方の緩みを抑えることができる。
- (3) 長尺先受け工は、切羽のトンネル軸方向の変位を抑制させる働きがある。
- (4) トンネル天端部および地表面の沈下については、三次元FEM解析上では長尺先受け工により低減される効果は小さく、今後実験結果や実施工の計測データと比較して確認していく必要がある。

【参考文献】

- 1) 高橋 祐治, 大野 清, 森川 誠司, 福岡 孝: 二次元縦断面解析による先受け工の検討, トンネル工学研究発表会 論文・報告集 第4巻, pp.353~358, 1994年11月