

(16) 大断面トンネルの周辺地山の3次元挙動解析

3-D FINITE ELEMENT ANALYSIS OF GROUND BEHAVIOR AROUND LARGE SECTION TUNNEL

杉江茂彦* ・ 吉岡尚也* ・ 藤原紀夫*

Shigehiko Sugie, Hisaya Yoshioka, Toshio Fujiwara

Introduced are the 3-D FEM analysis of ground behavior around large section tunnel driven in shallow soft subsoil assumed. The influence of interaction between subsoil and long pre-supporting system was taken into consideration. The mechanical properties of subsoil were modeled by an elasto-perfectly plastic type model. And construction sequence was taken into account.

Major findings concerning with the effect of long pre-supporting system are as follows :

1) Ground settlement which occurs at the top of tunnel cross section and ground surface decreases especially in the case of subsoil which competence factor is less than 1.0. 2) Ground stability is improved at the tunnel face and top. 3) However, the load which should be supported by foot ground increases, so thorough investigation is required in respect to the bearing capacity .

1. はじめに

近年の高速自動車道の拡充にともない、3車線以上の幅員をもつ大断面トンネルが、NATMでさかんに施工されてきている。これにともない、土被りが浅く未固結な地山での安定性の確保、また都市部での既設構造物への悪影響の回避を目的として、長尺先受け工を採用する機会が増えている。しかしながら、長尺先受け工の効果がいかに発揮されるかについては、未だ解明されていない点が多い。

そこで、本研究では、3次元FEM(解析コード: GRASP-3D^{1),2)}) によるトンネルの逐次掘削解析で、長尺先受け工がある場合とない場合の地山の応力・変形状態の比較を行ない、地山の安定効果と変形抑制効果を調べた。また、地山の物性に応じて、長尺先受け工の変形抑制効果がどのように変化するかを調べた。以下に、数値解析の概要と解析結果を報告する。

2. 解析方法

土被りが浅く未固結な地山を対象に、大断面トンネル(高さ11m、幅16m)の上半掘削を想定した。有限要素メッシュを図-1に示す。解析条件を以下に示す。

2.1 地山のモデル化

破壊後の剛性低下を考慮し、以下の手順で変形・強度定数をもとめた。

- 1) 初期地山応力は湿潤密度 $\gamma_t=2.0\text{t/m}^3$ の自重計算からもとめた。側圧係数を $K_0=0.43$ とした。
- 2) 地山の物性は地山強度比 C_f (一軸圧縮強度 q_u と初期土被り圧の比)を指標に、 $C_f=0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ の5ケースとした。

* (株)大林組 技術研究所

- 3) 地山の剛性を $E=300qu$ 、ポアソン比を $\nu=0.3$ とした。
 4) 地山要素の破壊判定には、次式のDrucker-Pragerの規準を用い、

$$\sqrt{J_2} = \alpha \cdot 3p + \kappa$$

破壊後の要素については剛性を10分の1に低下させた。ポアソン比を $\nu=0.49$ とした。
 ここに、

$$p = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij} \text{ は平均応力、 } J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \text{ はせん断応力の一般化表現であり、次式の偏差応力 } S_{ij}$$

の2乗積で示される。

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - p \delta_{ij}, \quad \delta_{ij} : \text{Kronecker のデルタ}$$

- 5) 地山の強度定数の設定にあたっては内部摩擦角を $\phi=20$ 度とした。粘着力 c は次式よりもとめた。

$$c = q_u / 2 \tan(45 + \phi/2)$$

また、 c 、 ϕ とDrucker-Prager規準式の定数 α 、 κ とは、次式により対応づけた。

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}, \quad \kappa = \frac{6c \cdot \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}$$

2.2 補強工のモデル化

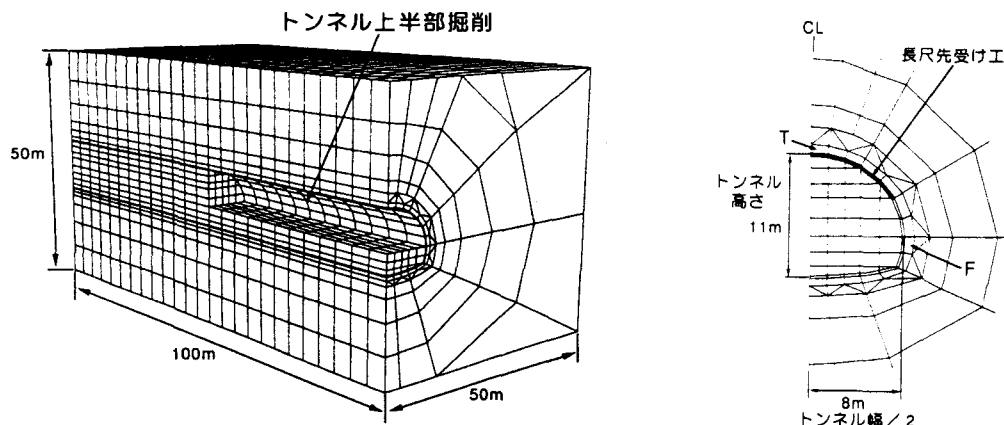
長尺先受け工のモデル化では、打設長さ12m、厚さ30cmのソイルセメントを想定し、弾性体のソリッド要素を用いた。設置位置は図-1(b)に示すとおりであり、トンネル掘進方向のラップ長を4mとした。また弾性ソリッド要素の剛性を $E=100,000\text{tf/m}^2$ 、ポアソン比を $\nu=0.3$ とした。ラップ部の剛性には先の値を2倍して用いた。

支保工については、厚さ25cmの吹付けコンクリートとH-250(トンネル軸方向1mピッチ)の鋼製支保工を想定し、弾性体シェル要素でモデル化した。ここで、吹付けコンクリートと鋼製支保工の両者の曲げ剛性(EI)を合成して評価した剛性 $E=2,000,000\text{tf/m}^2$ とポアソン比を $\nu=0.2$ を用いた。

2.3 掘進過程の計算手順

長尺先受け工がある場合の手順を以下に示す。

- 1) 長尺先受け工(打設長さ12m)の設置と同時に、トンネル上半部を掘進方向に1メッシュ分($\Delta 4\text{m}$)掘削。



(a) 掘削計算後の全体メッシュ

(b) トンネル横断面の形状

図-1 有限要素メッシュ

ここで、長尺先受け工については、該当位置のソリッド要素（掘進方向に $\Delta 4\text{m} \times 3$ メッシュ分）の材料定数値を地山の値から長尺先受け工の値に変更することで表現。

- 2) トンネル上半部の掘進（1メッシュ分）と前回掘削部への支保工（シェル要素）の設置。
- 3) 4mのラップ部を設けて長尺先受け工を設置。ならびにつづくトンネル上半部の掘進（1メッシュ分）と前回掘削部への支保工の設置。

ステップ4）以後については、上記の1）から3）を繰り返すことにより、計12段階の掘進過程を計算した。

3. 解析結果

3.1 長尺先受け工の変形抑制効果

図-2に先受け工がある場合とない場合（支保工のみで支持した場合）のトンネル天端の沈下を示す。地山強度比 $C_f = 1.0$ で得られたものである。参考に、補強工を設けずに素掘りしたケースの結果もプロットしている。支保工によって沈下が大きく抑えられている。また先受け工によって沈下が低減している。支保工による支持効果を主体にトンネルの安定性が保たれることは言うまでもないが、長尺先受け工においても補助工法として天端沈下の抑制効果がみられる。

次に、地山物性と沈下量・先受け効果の関係を示す。2.で述べたように、本解析では地山物性を地山強度比 C_f に代表させている。地山の強度と初期剛性を C_f に比例させて与えている。図-3に先受け工がある場合（支保工+先受け工）の天端沈下を、各地山強度比 C_f について示す。図-4に先受け工による沈下の低減率をトンネル天端と地表部で示す。ここで低減率は、先受け工がある場合とない場合（支保工のみ）の沈下

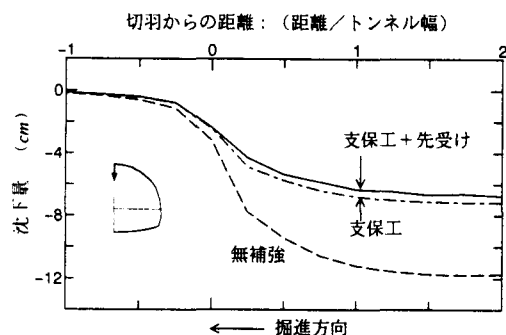


図-2 トンネル天端の沈下（地山強度比 $C_f = 1.0$ ）

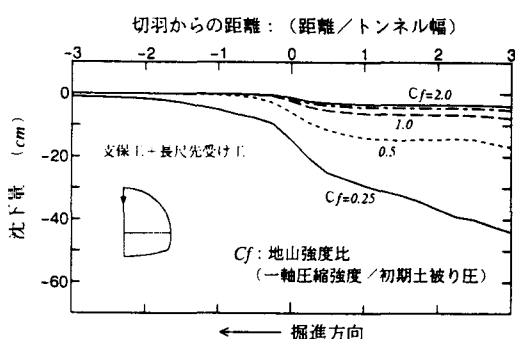


図-3 トンネル天端の沈下（種々の C_f に対して）

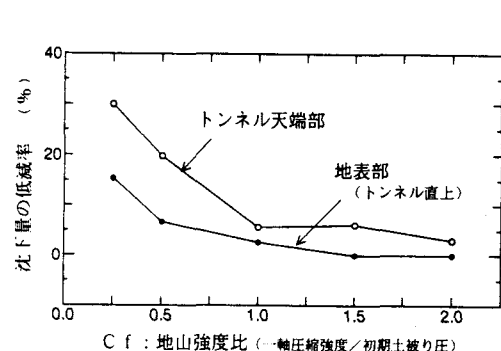


図-4 長尺先受け工による天端・地表沈下の低減効果

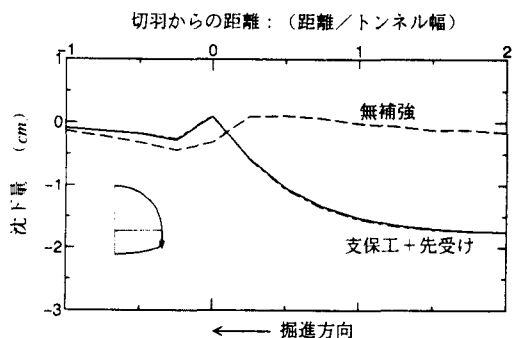


図-5 トンネル上半脚部の沈下（地山強度比 $C_f = 1.0$ ）

量の差を、先受けがない場合の沈下量で除した値である。用いた沈下量は切羽後方にトンネル幅の2倍離れた位置の値である。先受け工による天端・地表沈下の低減率は、地山強度比が小さくなるにつれて大きくなっている。特に $C_f = 1.0$ 付近を数値として、より明確に先受け工の効果が生じている。図-3の天端沈下も、 $C_f = 1.0$ を境に増大している。

上半脚部の沈下を図-5に示す。 $C_f = 1.0$ の結果である。天端部の場合とは逆に、補強工（支保工＋先受け工）を用いたケースの方が、無補強のケースよりも大きく沈下している。補強工を介して上部の地山荷重がより直接的に脚部に伝達されるためである。支持荷重が大きくなる長尺先受け工の場合においては、脚部の支持力確保が重要であることを示唆している。

3.2 地山安定効果

図-6に天端位置（図-1（b）のT位置）の地山要素の応力パスを示す。 $C_f = 1.0$ の結果である。縦軸にせん断応力のパラメータ $\sqrt{J_2}$ を、横軸に平均応力 p をとっている。ともに掘削前の平均応力の初期値 p_0 で除した値を用いている。またDrucker-Pragerの破壊規準線を加えている。図-7は同じく天端位置における地山応力の変化をせん断応力 $\sqrt{J_2}$ と平均応力 p の各々について示している。 $\sqrt{J_2}$ と p は切羽の接近とともに増加し、通過直前でピークを示す。その後切羽の通過により急激に減少しある値に落ちついている。このように応力の変化のしかたは補強の仕様によらず同様である。しかし変化量には差が生じている。先受

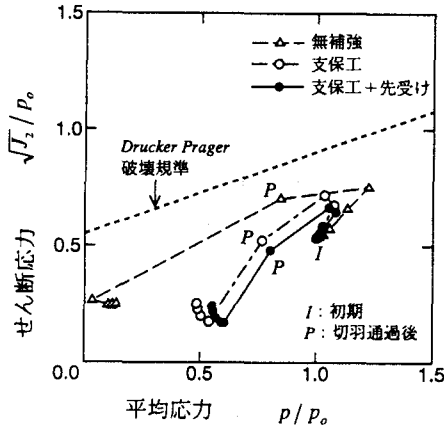


図-6 トンネル天端部の地山応力パス
(地山強度比 $C_f = 1.0$)

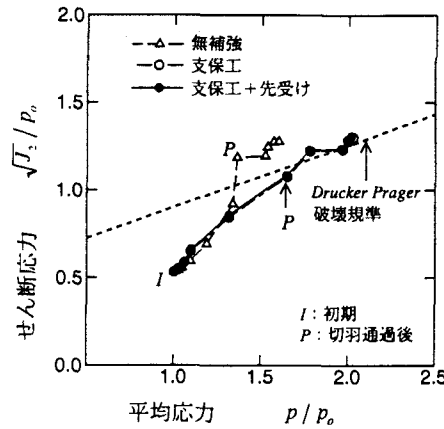
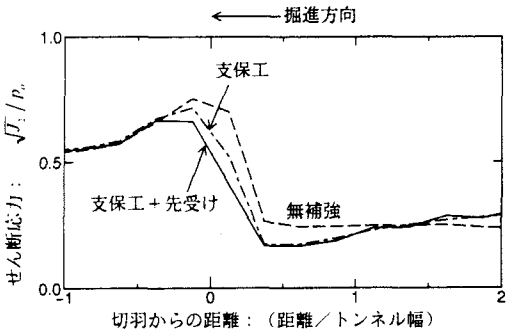
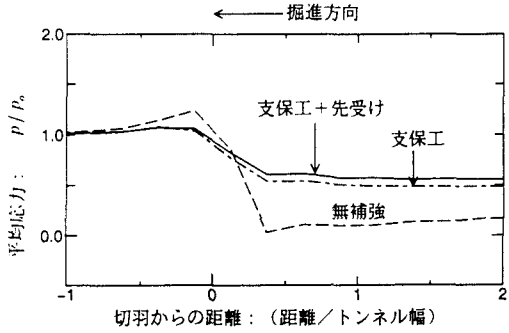


図-8 トンネル上半脚部の地山応力パス
(地山強度比 $C_f = 1.0$)

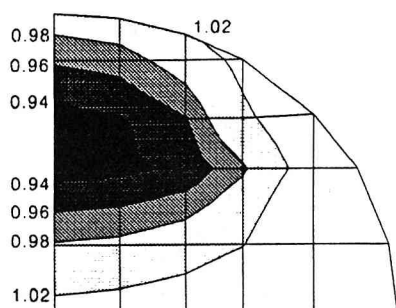


(a) せん断応力の成分

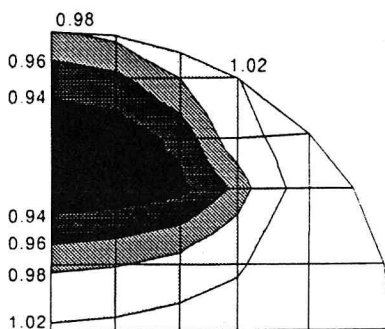


(b) 平均応力の成分

図-7 トンネル天端部の地山応力の変化 (地山強度比 $C_f = 1.0$)



(a) 先受け工あり (支保工+先受け工)



(b) 先受け工なし (支保工のみ)

図-9 切羽の局所安全率 (LSF) コンター (地山強度比 $C_f = 1.0$)

け工ありのケースでは $\sqrt{J_2}$ が小さく抑えられているのに加え、 p の減少が小さい。このために応力パスが破壊規準線からより離れた位置にあり、先受け工が天端地山の安定性を高めている。

図-8に上半脚部 (図-1 (b) のF位置) の応力パスを示す。天端部とは異なり、 $\sqrt{J_2}$ 、 p ともに増加過程を経て収束している。無補強のケースでは切羽の通過によって $\sqrt{J_2}$ が急増し、応力点が破壊規準線の上方にある。支保工・先受け工のケースでは $\sqrt{J_2}$ の急増が抑えられている。収束時の p は無補強のケースに比べ、支保工・先受け工で大きい。補強工を介しての支持荷重の増加であり、図-5の結果と対応している。

図-9に切羽の局所安全率 (LSF) コンターを示す。 $C_f = 1.0$ の結果である。LSFはMohr-Coulombの破壊規準を用いて次式よりもとめた。

$$LSF = \frac{2c \cdot \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

本結果では局所安全率 (LSF) 1以下の範囲が広がっているが、天端付近を中心に先受け工を設けたことによる安全率の向上がみられる。

4. おわりに

土被りが浅く未固結な地山での大断面トンネルの掘削施工を想定し、長尺先受け工の変形抑制効果ならびに地山安定効果を3次元FEM解析で調べた。地山の破壊判定にはDrucker-Pragerの破壊規準を用い、破壊後の剛性低下を考慮した。また長尺先受け工のモデル化には弾性ソリッド要素を、支保工 (吹付けコンクリート+鋼性支保) には弾性シェル要素を用い、上半掘削過程を逐次計算した。得られた結果は主に以下である。

- 1) 長尺先受け工によるトンネル天端部および地表部の沈下への抑制効果は、地山の物性 (強度・剛性) によって大きく異なる。特に地山強度比 $C_f = 1.0$ 以下の地山で効果が大きい。
- 2) トンネル天端部および切羽地山において長尺先受け工による安定性の向上がみられた。
- 3) 上半脚部では補強工を介して大きな地山荷重が作用するため地山応力が大きく増加する。長尺先受け工の採用では、周辺地山の安定向上と変形低減効果を発揮させる上で、脚部の支持力確保が重要である。

5. 参考文献

- 1) 杉江茂彦・飯塚敦・太田秀樹：3次元土/水連成FEMにおける種々の離散化と計算精度・効率，構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，第18巻，pp.33-38, 1994.7
- 2) 杉江茂彦：実務分野における3次元土/水連成FEM解析の利用状況，地盤工学会誌「土と基礎」，vol.43, No.7, pp.11-14, 1995.7