

(57) 土被りの浅い軟岩トンネルにおける計測管理の一事例

応用地質株式会社 正会員 三上 元弘 正会員 ○細田 宏
正会員 満 弘之 正会員 進士 正人

Case Study on Monitoring of Stability for Shallow Tunnel in Soft Rock

OYO Corporation H.Mitsu,M.Shinji,H.Hosoda and M.Mikami

SUMMARY

It is very important to estimate a stability of the ground and the settlement of the surface due to tunnel excavation. Especially, in a shallow depth and soft rock tunnel, the estimation of a stability and a settlement plays an important role. Authors established hazard warning levels in the process of excavation by using finite element analysis and authorized standards. Field measurements were carried out using Sliding Micrometer ISETH, OYO Q-Tilt and SINCO Tiltmeter. And the evaluation for the stability of the tunnel was carried out by the back analysis method.

As a result of these excutions, the tunnel excavation was completed successfully, securing safety of the buildings and holding settlements and deformations of the ground less than the hazard warning levels.

1. はじめに

土被りが浅い上、大半が未固結堆積物からなる地山でのトンネル施工において、掘削に伴う地上構造物の安全及びトンネルの安定を評価する管理基準の採用の方法は、未だ確立されていないのが実状である。しかし、このようなケースに技術者が遭遇した場合、何らかの方法を用いて管理基準を設定し、施工を進めなければならない。また施工方法も問題に対応した方法に変更する必要がある。本報文では、このようなケースにおける地上構造物の安全の確保及びトンネルの安定性の評価のための管理基準値の設定、並びに計測システム、計測結果について得られた知見を述べる。

2. 地形地質状況及び掘削方法、計測システム

トンネルルート上は、標高約330mの平坦な切土造成地になっており、その周囲は最大傾斜40°程度の急斜面となっている。トンネルはこの造成地の下を貫くが、トンネルの斜め上方には重要な構造物が位置している。

トンネルの掘削は、側壁導坑先進上部半断面工法が採用され、極力地山を緩めないように、矢板に代えて掘削後直ちに一次覆工として吹付けコンクリートを施工する等、NATM工法の長所を取り入れ、地表面沈下の防止を図っている。

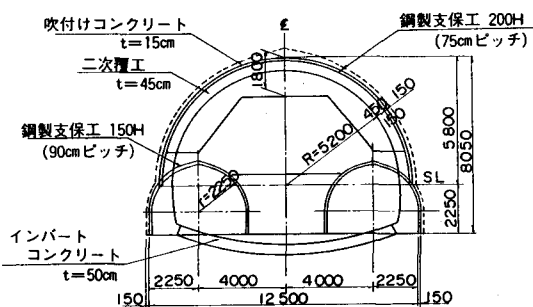


图-1 加背割图

トンネルルート沿いには、新第三系中新統の凝灰角礫岩を基盤として、これを覆って第四系更新統の段丘堆積物及び同完新統の軽石流堆積物等の未固結堆積物が分布している。凝灰角礫岩は割れ目がほとんど無く全体的に軟質な岩盤で、特に基質部分は極度のスレーキング性を有し、X線粉末回折や陽イオン交換容量などの室内試験結果から、膨潤性の高いモンモリロナイトを含むことが明らかとなっている。段丘堆積物および軽石流堆積物はそれぞれN値30～50および10～20であるが、いずれも基質の固結度はかなり低い。

トンネルの土被りは約30mであるが、このうち岩盤（凝灰角礫岩）の土被りは6m足らずであり、凝灰角礫岩の上方には地下水を胚胎する未固結堆積物が分布している。このため、トンネル掘削時にアーチアクションが十分発揮されないことや、トンネル掘削による緩みで地下水が浸透し凝灰角礫岩がスレーキングにより劣化してトンネルの安定が問題となること、トンネル周辺に生じた変位が地上の構造物へ直接影響することなどが懸念された。

このようなことから、掘削時におけるトンネルの安定と地上構造物の安全を確保することを目的として、計測による施工管理を行うこととなった。

計測管理としては、ルート上で地上構造物の配置の関係から見通しがきかないことや、現地が有数の豪雪地帯であることなどの理由により、通常地表面沈下管理に用いられているレベル測量の代替として、多点で簡便に傾斜を測定できる地表面傾斜計を用いて測定を行った。また、地山物性の把握とそれを基にしたトンネルの安定の監視のため、坑外にスライディングマイクロメーターおよび孔内傾斜計を設置し、変位観測を行った。

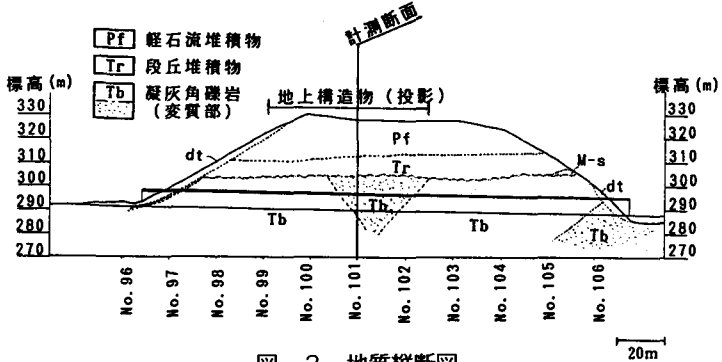


図-2 地質縦断面図

3. 管理基準値の設定

管理基準は地表面傾斜と地表及び地中変位に着目し、以下のように定めた。

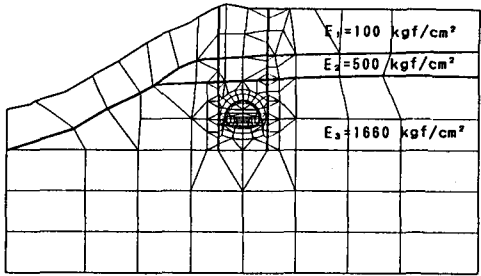


図-3 FEM解析メッシュ

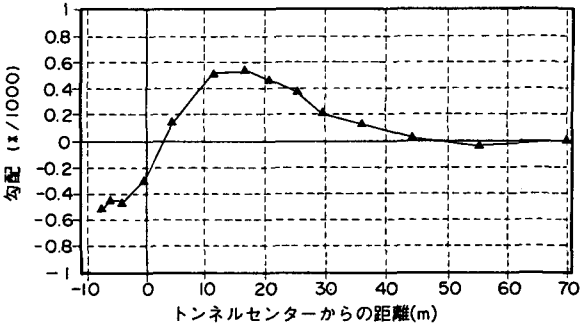


図-4 地表面勾配の予測

まず、地表面傾斜については、図-4に示すように事前のFEM計算によると、トンネル掘削後の地表面勾配が最大で 0.6/1000 程度となった。一般に鉄筋コンクリート構造物に変状が生じるのは1/1000～2/1000とされている^{1) 2)}ことから、地表面傾斜に関しては1/1000を地上構造物に対する管理基準値とした。

次に、地表面沈下に関しては、スライディングマイクロメーターの設置地点における最終沈下量の予測値

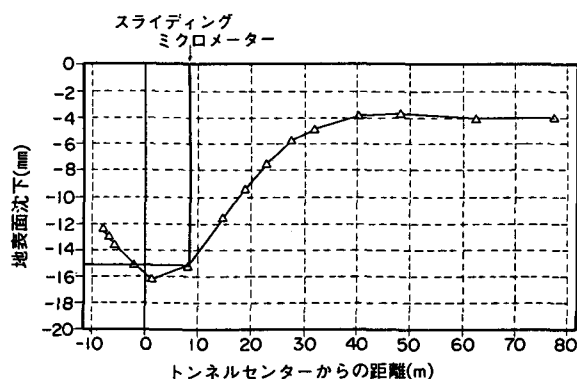


図-5 FEM計算による地表面沈下の予測

表-1 地表面沈下の注意レベル

	基準	対応策
注意レベルⅠ	5mm～10mm	管理者に報告する。
注意レベルⅡ	10mm～15mm	口頭での報告。報告書ができた時、検討会を持つ。
注意レベルⅢ	15mm以上	現場で検討会を開く。そして緊急の対応策を講ずる。

が、前述のFEM計算で約15mmとなった(図-5)ことから、地表面沈下に関しては、安全側を見て計算値の約1/3の5mmを一応の目安とし、注意レベルを表-1のように設定した。

トンネル掘削時の地山の安定性の評価に関する管理基準は、種々提案されている。桜井³⁾は、地山の破壊をひずみで管理する「直接ひずみ評価法」を提案し、これによる管理基準の設定方法を示しており、本トンネルでもこの方法によった。本トンネルにおける管理基準値は一軸圧縮試験によりトンネル周辺地山の限界ひずみが1.3%程度と判断されることから、これを地山に関する管理基準値とした。

4. 現場計測

計測は、図6、7に示す計測断面において、トンネル掘進方向左側にスライディングマイクロメーター(深度46.0m)を、右側に孔内傾斜計(深度48.0m)を設置して行った。また、構造物の周囲に、地表面傾斜計を設置した。

上半切羽の進行に伴う地表面及び地中沈下の推移を図-8に示す。上半切羽が20m手前まで達した時点から沈下が生じ始めているが、本トンネルでは、上半切羽が計測断面の約1D(D=12m)手前で2か月間停止したため、その間にクリープ的な変位が生じたことがわかる。クリープ変位量は地表面とトンネル天端の間

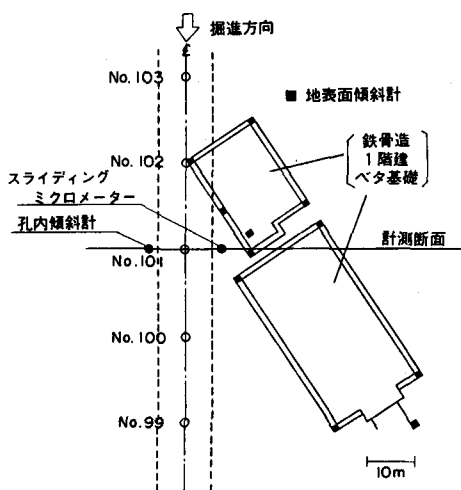


図-6 計測器の設置位置(1)

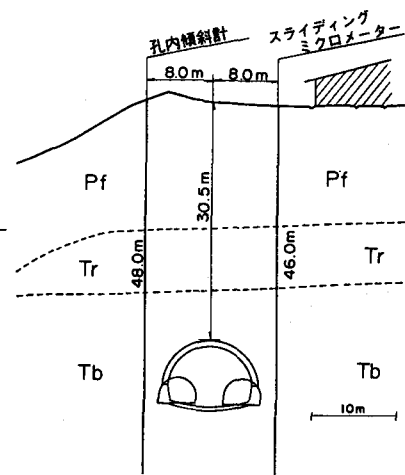


図-7 計測器の設置位置(2)

ではほぼ同程度であるが、S.L.付近では比較的小さくなっており、掘削断面より上方が一体となって沈下したことがわかる。また、クリープ変位が生じた分、切羽掘削再開後の変位速度は小さいが、切羽の測定断面

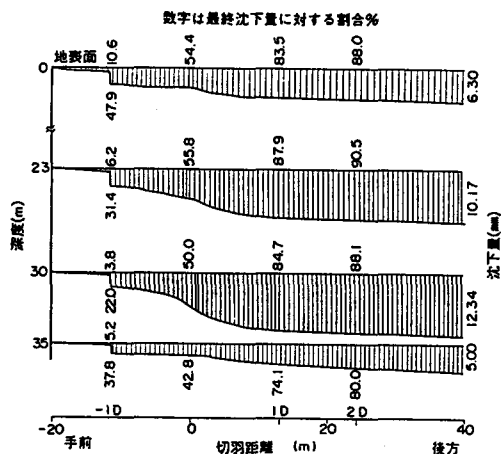


図-8 上半切羽の進行に伴う地表面及び地中沈下の推移

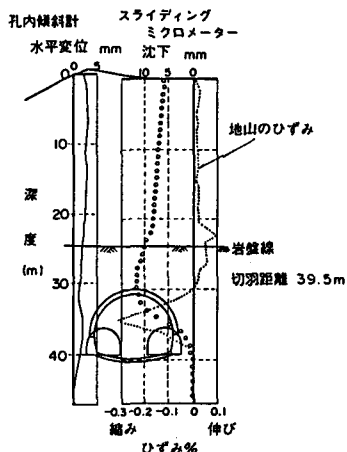


図-9 地中変位の計測結果

通過時に変位速度は増加している。切羽到達時には最終変位量の50%前後の変位が生じていることから、切羽停止時にも応力解放に伴うクリープ変位が進んでいたと考えられる。図-9には、上半切羽距離が39.5m時の地中変位挙動を示す。これによるとトンネル上半掘削断面付近にのみ縮みが認められ、天端より上方は、わずかに伸びが生じていることがわかる。この付近の地質状況は、深度24m付近に未固結堆積物と凝灰角礫岩の境界があり、凝灰角礫岩の部分の沈下に追従して、上方の未固結堆積物が沈下していることがわかる。しかし、同一断面での内空変位はほとんど認められなかった。掘削終了後の地表面沈下量は約6mmであり、注意レベルⅠに達している。また、孔内傾斜計の観測結果によると、トンネルS.L.付近で2mm程度の水平変位が生じている。

地山のひずみに関しては、最大ひずみが約0.3%であり、管理基準値内に収まっている。

地表面傾斜に関しては、すべての計測点が同一断面には位置しないが、計測範囲の地質構造がほぼ水平であることから任意の断面で同条件と考え、トンネルセンターからの距離に注目して整理し、図-10に実測値とFEM解析による予測値との比較を示した。これによると、全体的に予測値よりやや大きくなっており、トンネルセンターから15mほど離れた点の勾配が最も大きいが、管理基準値の1/1000には達していない。

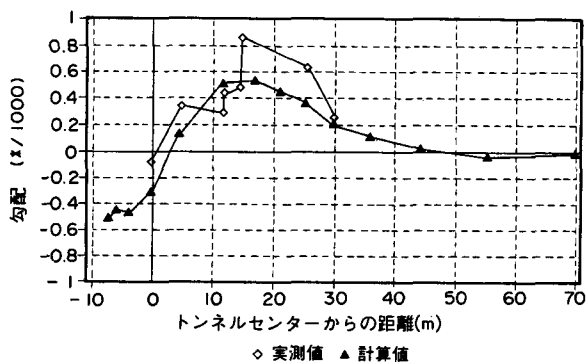


図-10 実測値とFEM解析による予測値との比較

5. 地山の安定性の評価

先に述べたように地山の安定性を評価する方法は、「直接ひずみ評価法」により行った。この評価法を実施するためには、計測値から地山のひずみ分布を推定する必要がある。ここでは桜井の逆解析手法を用いて計測変位に最もよく一致する地山の初期応力並びに弾性係数を求め、次にこれらの値を用いて順解析を実施し、地山のひずみを推定した。図-11に逆解析の結果の一例を示す。この結果から明らかなように、傾斜計及びスライディングマイクロメーターによって得られた計測値と逆解析によって得られた解析値は工学的に十

分な精度で一致しており、今回の逆解析の妥当性を示している。

逆解析によって得られた初期応力及び地山の弾性係数は以下の通りであった。

$$\begin{array}{ll} \sigma_{x0} = -6.02 \text{ kgf/cm}^2 & (-0.61 \text{ MPa}) & E_1 = 103.3 \text{ kgf/cm}^2 & (10.5 \text{ MPa}) \\ \sigma_{y0} = -5.40 \text{ kgf/cm}^2 & (-0.55 \text{ MPa}) & E_2 = 516.4 \text{ kgf/cm}^2 & (52.7 \text{ MPa}) \\ \tau_{xy0} = -0.26 \text{ kgf/cm}^2 & (-0.03 \text{ MPa}) & E_3 = 1714.4 \text{ kgf/cm}^2 & (175.2 \text{ MPa}) \end{array}$$

これから明らかなように、先に述べたFEM解析で用いた地山の弾性係数と逆解析結果は、よく一致する。このときのトンネル周辺の変位分布を図-12に、また、トンネル周辺の最大せん断ひずみ分布を図-13に示す。この図から明らかなように、トンネル周辺には0.6 %以下のひずみが生じており、限界ひずみの管理基準値 (1.3%) から比較しても十分安全に掘削が終了していることがわかる。

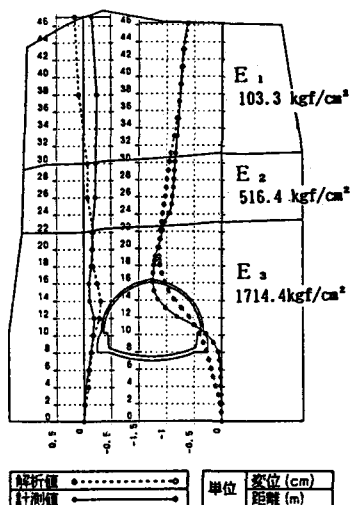


図-11 計測値と解析値の比較

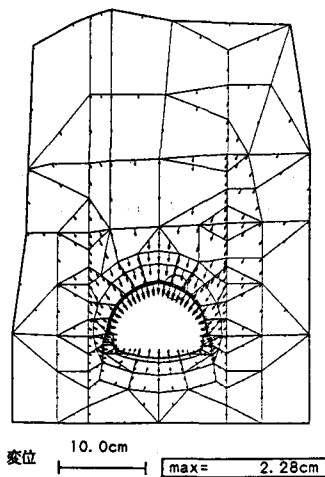


図-12 トンネル周辺の
変位分布

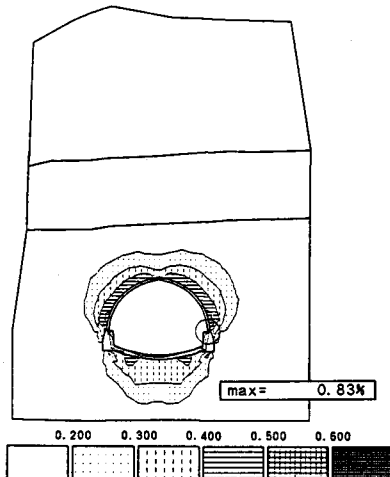


図-13 トンネル周辺の
最大せん断ひずみ分布

6. まとめ

一般に土被りの浅い地山においては、トンネル掘削に伴う地表面の沈下が問題となるが、土被りが30m 程度の場合には地表面沈下はあまり大きな問題とならない場合が多い。しかしトンネル直上に分布する地質が脆弱である場合や、モンモリロナイトなど不安定な粘土鉱物が含まれる場合には、それらの特殊性を考慮して地表面の沈下も検討を要すると考えられる。

本トンネルでは、上述したような劣悪な地質状況により、トンネル掘削の影響が直接地上構造物に及ぶことが懸念されたことから、事前のFEM解析及び既往の資料により管理基準値を設定し、スライディングミクロメータ、孔内傾斜計、地表面傾斜計を用いて計測管理を行った。同時に、計測結果を用いて逆解析を随時実施することで、地山の安定性を評価した。その結果、掘削により生じたトンネル周辺岩盤の変位(沈下)に未固結堆積物が追従して沈下しているものの、地表面の沈下及び傾斜は、管理基準内に収まり、地上構造物の安全を確保するとともに、トンネル掘削を無事終了することができた。

参考文献

- 1) 日本建築学会「建築基礎構造物設計基準」
- 2) 土木学会「トンネルの地質調査と岩盤計測」
- 3) 桜井春輔「トンネル工事における変位計測結果の評価法」土木学会論文報告集 第317号
- 4) (社)日本トンネル技術協会「NATMの計測指針に関する調査研究報告書」昭和58年3月