

(9) 計測結果に基づく膨張性地山挙動の把握

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

Consideration on the Swelling Rocks based on the Field Measurements

Hiroyuki MITSU, Motohiro MIKAMI and Masato SHINJI, OYO Corporation

Abstract

Behavior of the tunnel in a swelling rock media consists of elastical behavior and time-dependent behavior, and the time -dependent behavior occurs at the early stage of tunnel excavation. Therefore, A primary lining constructed in a swelling rock media has to be considered the time-dependent behavior.

This paper deals with a precisely measurement result of a tunnel during construction. By this result, the behavior of the displacement of the ground and the stress distribution of linings during tunnel excavation were as follows.

- 1) More than half of the displacement of the ground is separated as the time-dependent behavior.
- 2) The stress share ratio of steel lining to shotcrete lining is 35 to 1. So that, the steel lining plays an important role in the swelling rock media.

Considering the above results, the authors designed primary lining, and confirmed its adequacy by the next field measurement.

1. はじめに

膨潤性を有する地山では、その挙動に時間依存性を示すことから、支保の機能は単に掘削に伴う応力の解放に対するものだけではなく、時間依存性に起因した荷重に対しても考慮する必要がある。そして時間依存性の挙動は、一次覆工施工段階でも顕著に現われることから、これに対抗できる様な支保構造とする必要がある。

筆者らはこの様なことを念頭においてトンネル掘削に伴う計測を密な頻度で実施し、地山の変形挙動と支保部材の荷重負担状況を詳細に捉えて、いわゆる弾性挙動と時間依存性の挙動の分別を試みた。そしてこの計測結果により一次覆工の設計の見直しを行い、引き続いてトンネル坑内計測を実施して、設計の妥当性を検討した。

2. 切羽状況と地山物性

当該地に分布する地質は、先第三紀の花崗岩を基盤岩とした新第三紀中新世の火山岩類、碎屑岩等とこれらの被覆層で構成されている。地質構造は、切羽側へ30°程度の流れ盤となる単斜構造である。

計測断面の地質状況は、比較的硬質な凝灰岩と、粘土化が著しく軟質な凝灰岩が互層状を呈している。硬質な凝灰岩は、切羽においてはハンマーピックがようやく突き刺さる程度であり、300 kgf/cm² 程度の一軸圧縮強度を示す。

一方粘土化が著しい凝灰岩は暗灰色を呈し、割れ目などの分離面は認められない。室内試験によると、変質によりモンモリロナイトを多量に含み、CEC 値も大きい。また水浸すると特異な膨張形態を示し、泥状化

を伴って崩壊に至る。

同じく切羽下部では軽微な不整合面が認められ、泥岩が一部偽礫状に分布する。更にその下位には粘土化の著しい凝灰岩が分布する。

このように、地盤状況は非常に複雑であり、計測結果の解釈においては、このような切羽状況を充分に考慮する必要がある。

表-1に、室内試験結果の一覧を示した。

3. 坑内計測

3-1. 計測機器の配置と計測システム

計測配置を、図-1に示す。地山の変形挙動を捉えるために地中変位計を埋設したほか、通常のA計測の断面も併設し、内空変位及び天端沈下の測定も実施した。また、支保部材の安全性及び支保パターンの妥当性を確認することを目的として、ロックボルト軸力計、吹付けコンクリート応力計、及び鋼製支保工応力計を設置した。

一方計測システムについては、地山の時間依存性の挙動を把握するために自動計測を行い、密な測定を実施した。図-2に計測システムブロックダイアグラムを示す。

3-2. 計測結果

切羽面においては上記の様に膨潤しない硬質部と大きな膨潤性を示す変質部が細かく層状に入り込んで分布しているため、計測結果についても測定位置によりばらつきが見られ、測点毎に特徴ある挙動を示している。

1) 地山の変形挙動

図-3に、地中変位測定結果の代表例を示す。この内、(a)図は、坑壁からの深度8mを不動点とした時の地山の変位を経過日数との関係でプロットしたものである。インポート打設により地山の変形挙動がほぼ収束しているのがわかる。

トンネル掘削による切羽の進行に伴って応力の開放が生じるが、その時点でほぼ瞬間的に(この場合、計測間隔の1時間以内)生じる変位を弾性変位とし、弾性変位の終了から次の切羽の進行までの間に、時間の経過に伴って累積する変位を時間依存性の変位として(a)図で示されたように計測変位を分別すると、同(b)、(c)図となる。すなわち、弾性変形は切羽距離14m(トンネル直径の1.5倍程度)でほぼ収束している

表-1 室内岩石試験結果一覧表

	一軸圧縮強度 kgf/cm ²	単体 g/cm ³	C E C 値 meq/100g乾	モンモリロナイト 含有量 %	スレーキ 指数
新鮮部	278	1.86	148.1	4	0
	258	1.77	147.9	7	0
変質部	—	0.87	131.1	64	4
	—	0.59	135.8	64	4

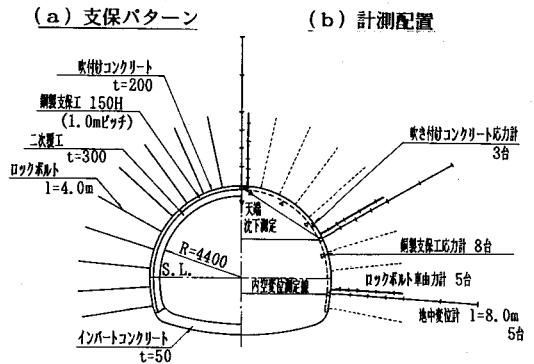


図-1 支保パターン及び計測配置

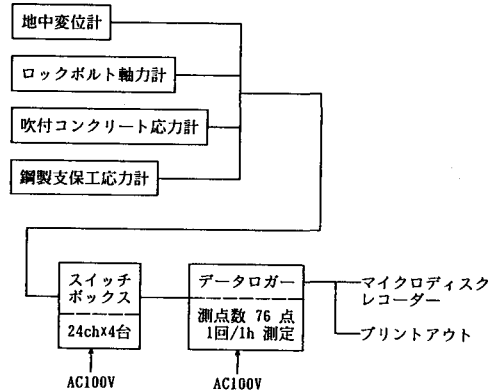


図-2 計測システムブロックダイアグラム

のに対して、時間依存性の変形は、ほぼ直線的に進行している。

地中変位計測結果を区間変位としてトンネル横断面方向について整理すると、図-4のようになる。この図には、切羽の観察結果を考慮した変質帯の分布も併せて示してあるが、時間依存性の挙動が卓越する区間は、変質帯の分布する区間と良い一致を示している。

2) 支保部材に作用している荷重

ロックボルト軸力、吹付けコンクリート応力、及び鋼製支保工応力の経時変化の代表例を図-5、6、7に示す。

① ロックボルト軸力

図-3に示した地中変位計と同じ位置に配置されているロックボルト軸力計の計測結果を図-5に示した。坑壁付近に最大荷重が発生しており、奥に行くに従って次第に小さくなっている。上半掘削に伴う荷重の伸びが大きく、下半掘削による影響はあまり受けていない。特に、インバート打設後の伸びはほとんど認められず、測点によってはむしろ荷重の減少傾向を示すものもある。

② 吹付けコンクリート応力

吹付けコンクリート応力は、切羽の進行と共に荷重の増加傾向が認められるが、下半切羽の通過及びインバート掘削時に一時的に荷重の低下が見られる。これは、下半部の掘削に伴い上半脚部が取り払われることに起因しているものと思われる。特徴的なのは、インバート打設後も応力増加が見られることであり、特にアーチ左肩部に設置されたT-1ではその傾向が大きい。

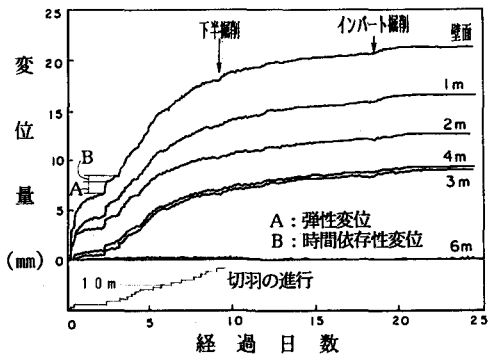
③ 鋼製支保工応力

図-7に、上半左側鋼製支保工に作用している応力の経時変化を示したが、吹付けコンクリート応力と同様の傾向を示している。すなわち、下半切羽の通過に伴い、アーチ下部に近いS-1、S-2に顕著な荷重の低下が見られ、天端に近付くに従ってその傾向が小さくなっている。また、インバート打設後においても荷重の上昇が見られる。

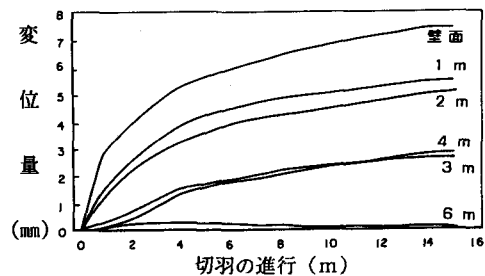
4. 一次覆工の設計の見直し

4-1. 地山挙動の評価

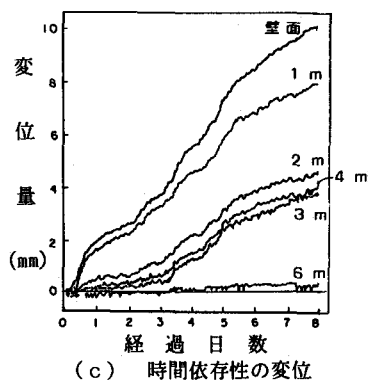
計測結果をもとにして、設計の見直しを行った。そのためには先ず、計測結果を用いて逆解析を行い、地



(a) 全変位



(b) 弾性変位



(c) 時間依存性の変位

図-3 地中変位計測結果

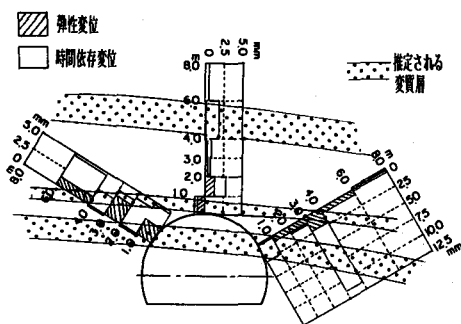


図-4 地中変位の横断面分布

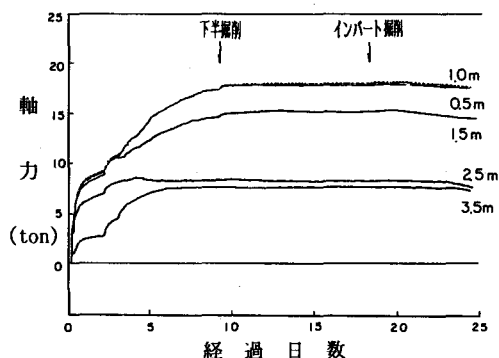


図-5 ロックボルト軸力の経時変化

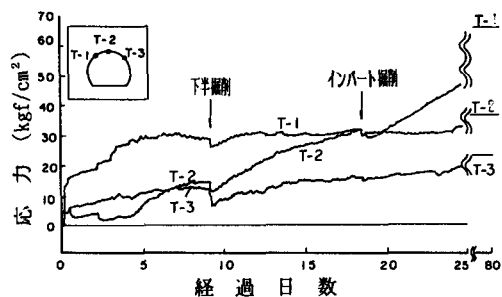


図-6 吹付コンクリート応力の経時変化

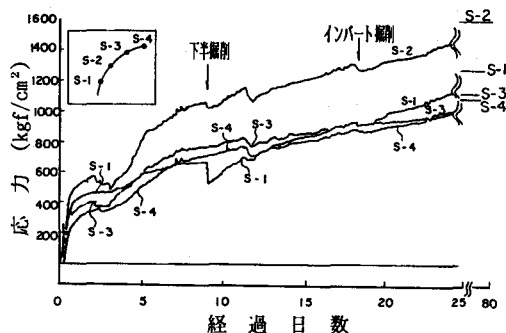


図-7 鋼製支保工応力の経時変化

山物性を推定した。その結果、計測変位のうち弾性変位のみを用いた場合には、地山弾性係数は $7,000 \text{ kgf/cm}^2$ 程度と評価された。これは、調査段階での孔内載荷試験で求められた値とほぼ一致している。次に時間依存性の変位量を含めた地山評価を行ったが、この場合には等価弾性係数として $2,200 \text{ kgf/cm}^2$ が求められた。すなわち、弾性地山として評価した場合には、調査段階での地山評価を基にした設計で充分対応出来ると思われるが、時間依存性の挙動を示す場合には予め時間依存性の挙動を評価することが重要であることを示している。そして全変位量に対する時間依存性の変位量は、計測結果によると、 $2/3$ 程度の大きさとなる。なお、側圧係数は 1.7 となり、比較的大きな値となった。

4-2. 支保部材の荷重分担率

吹付けコンクリートと鋼製支保工の応力分担比を求めることは、FEMなどの数値解析を実施する際の入力値の設定に必要である。鋼製支保工を、吹付けコンクリートと同じ断面を有する部材として等価な弾性係数で評価し、解析により求められるこの断面作用荷重を実際の鋼製支保工の断面積で受け持つと想定すると、吹付けコンクリートと鋼製支保工に作用する応力は弾性係数比となり $1:14$ 程度と試算される。

これに対して実測の応力分担率は図-8のようになる。初期段階において鋼製支保工の荷重負担の増加が

著しい。これは、吹付けコンクリートの若材令期間では、剛な鋼製支保工による荷重負担が大きいことを物語っている。そして、吹付けコンクリートと鋼製支保工の応力分担の割合は、最終値として平均的に 1 : 35 程度となっている。

4-3. 一次覆工の設計の見直し

現場計測結果により、吹付けコンクリートと鋼製支保工の弾性係数比は 1 : 35 と評価された。そこで、地山弾性係数を $2,200 \text{ kgf/cm}^2$ として吹付けコンクリートと鋼製支保工の計測値に最も合うように一次覆工の弾性係数を FEM により求めると、それぞれ $10,000 \text{ kgf/cm}^2$ 、及び $350,000 \text{ kgf/cm}^2$ と評価される。

そこで、これらの物性値を用いて土被りの最も大きな箇所において FEM 解析を行ったところ、同じ支保パターンを採用した場合に一次覆工に生じると予想される応力は、支保部材の許容応力値程度に収まるものと思われたが、SL 付近のロックボルトには許容値以上の荷重が生じることが懸念されたことから、左右各 3 本の増しボルトを行うこととした。

そしてここで提案した支保パターンの妥当性を確認することを目的として、最大土被りの断面でトンネル坑内計測を実施した。計測結果は図-9 に示す様に、吹付けコンクリート応力及び鋼製支保工応力が、推定した値よりも多少大きくなっている。また、ロックボルトには 10 tf 以下の軸力しか発生しなかったが、この計測断面の数 m 先では一部ベアリングプレートの変状が発生したことから、地盤の膨潤性のばらつきに起因して支保部材の荷重負担にも測点によってばらつきが生じているものと思われる。しかしながら、支保構造全体として評価した場合には、対象地盤全体に対してバランスの取れた構造になっているものと判断した。

5. おわりに

今回、トンネル計測を実施した結果、膨潤に起因すると思われる時間依存性の挙動は、一次覆工施工段階でも顕著に現われることがわかった。従って、吹付けコンクリート、鋼製支保工、ロックボルト等の一次覆工の支保機能を有効に利用することと、この結果を二次覆工に反映させることで、より合理的な設計が可能になるものと考ええる。また、変形の収束と負担荷重の収束はその時期が異なることから、必ずしも同一の現象としては対処できず、地山の安定性と支保部材の安全性の確保のためにはこの両方をそれぞれにモニターして、トンネルの計測管理を実施し、設計に反映させる必要がある。

<参考文献>

- M.Otsuka, T.Kondoh (1981): On the Displacement Forecasting Methods and their Application to Tunnelling by NATM, Proc. of the Int. Symp. on Weak Rock, pp.945-950.
 進士正人、岡部幸彦 (1988): 変位計測結果に基づく地山物性値の推定、応用地質年報 No.10, pp.19-29.

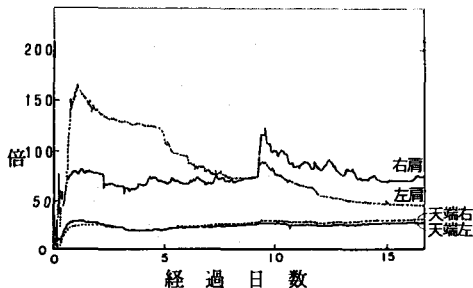


図-8 吹付コンクリートに対する鋼製支保工の応力分担の経時変化

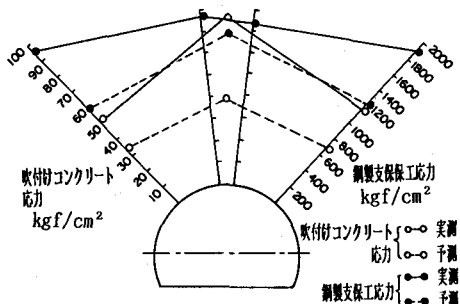


図-9 最大土被り断面での計測結果