

## (64) 土被りの浅い未固結地山に施工したトンネルの三次元掘削挙動

秋田県北秋田土木事務所

今井 太平

〃

正会員

大塚 行雄

応用地質株式会社

正会員

大塚 康範

〃

正会員

〇満 弘之

### Three Dimensional Behavior of Shallow and Loose Ground

Taihei IMAI , Yukio OHTSUKA , Akita Prefectural Government

Yasunori OHTSUKA, Hiroyuki MITSU, OYO Corporation

#### Abstract

Before the tunnel was excavated in the shallow and loose ground, "Trivec" system was installed to measure three dimensional behaviors of the ground.

From the measurement results, it seems that the heaving phenomenon of the ground surface in front of cutting face and others can be understood by taking it into consideration that the settlement of tunnel crown occurs more lately than that of ground surface and proceeds rapidly when the cutting face passes over the measuring section.

In this article, the three dimensional behaviors of the ground surrounding tunnel during the excavation, which were observed by "Trivec" system, are illustrated. We clarify the above mentioned hypothesis using three dimensional FEM analysis and propose an observational method on a tunnel excavated in a shallow and loose ground.

#### 1. はじめに

トンネルを安全に、かつ経済的に施工するために施工管理の一環として、いわゆる「計測管理」が実施されている。土被りの大きい山岳トンネルの場合には、掘削の影響は地表部まではほとんど及ばないことから主にトンネル坑内においてトンネル周辺に関しての計測が行われる。解析においても同様の考え方でトンネル縦断方向に単位厚さを考慮した、平面ひずみによる二次元解析が行われている。

しかしながら、土被りが小さい場合には地形状況もトンネル掘削に影響を及ぼし、同時に、掘削による影響も顕著に地表部に現れる。従って、地上構造物が存在する場合には地表部において、沈下のみならず不等沈下に起因した地表面勾配の変化にも着目して計測管理を行うことになる。そして、解析を行う場合にもこれらのことを考慮することが必要であり、構造物の相対的な位置関係を考慮して三次元的に解析する必要がある。

本報文では、トンネル掘削に伴い計測された地山の三次元挙動に基づいて、三次元FEM解析による理論的な検討結果を報告し、併せて土被りの浅いトンネルにおける施工管理手法について考察する。

#### 2. トンネルの概要

対象としたトンネルは、秋田県大館市の南東に位置する国道103号大館南バイパスの山館トンネルである。本トンネルは国道バイパスルートに延長約200mで計画され、段丘平坦面下をいわゆるメガネトンネルで

貫く計画となっている。

施工は、先ず一期線を先行して完成させ、一期線供用後に二期線施工にかかる予定で、昭和63年度に着手し、現在一期線施工が完了している。

当地区は、標高90m程度の段丘地形とその周辺に分布する比高差30m程度の沖積低地からなり、トンネル部には新生代第三紀中新世の泥岩及び凝灰岩類を基盤として、これを被う新生代第四紀沖積世の段丘堆積物からなっている。トンネルの土被りは概ね15～22mである。

凝灰岩は塊状で割れ目の発達は少なく、一軸圧縮強度は30kgf/cm<sup>2</sup>程度を有する。また、泥岩はシルト岩と互層をなし、一部凝灰岩の薄層を挟在する。一軸圧縮強度は100 kgf/cm<sup>2</sup>程度である。

図-1に、地質断面図を示す。また、図-2にトンネルの標準断面図を示す。

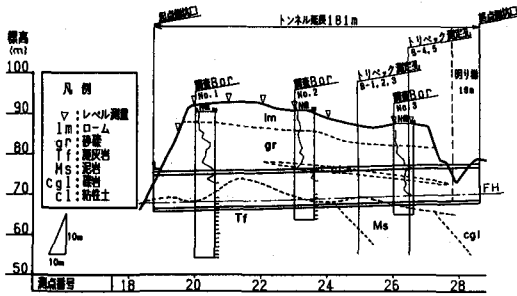


図-1 地質断面及び計測機器配置縦断面図

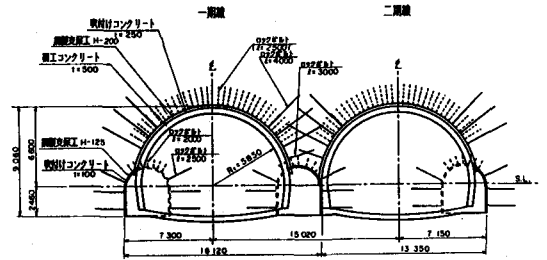


図-2 標準断面図

### 3. 計測機器について

計測は、地表面沈下についてはレベル測量を実施し、また地中変位についてはトリベック<sup>1)</sup>を用いた。トリベックは、ボーリング孔内に1m間隔で設置したメジャリングマーク間の相対変位をゾンデを用いてボーリング深度方向に連続的に捉えることのできる測定器である。特長としては、①孔軸方向の伸び・縮み、及びそれと直交する二方向の変位を一回の測定で求めることができ、地山の三次元的な挙動が観測可能である、②メジャリングマークとゾンデの接触方法を線接触とした工夫が凝らされ、計測値の再現性の向上が図られている、③そのため測定精度が孔軸方向で5/1,000mm、孔軸直交方向で5/100mmとなっている、などの点が挙げられる。

図-3にトリベックの概要を示す。

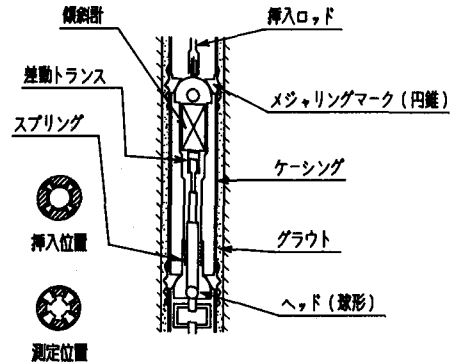


図-3 トリベックの概要

### 4. 計測結果

図-4に、上半掘削に伴う計測結果の例として測点No.25 + 0断面におけるトリベック測定結果を示す。図(a)の鉛直方向変位は基盤岩の上面から生じており、トンネルの両側では縮みの変形が優勢なのに対して、天端上方では伸びの変形となっている。図(b)は、水平変位のうち、トンネル横断方向の変位を示しているが、地形の影響を受け全体が谷側に傾斜している。特に滑りに起因するような変形は認められないことから、トンネルの掘削に伴う変形が大きく影響しているものと思われる。また、図(c)及び図(d)はトンネル縦断方向変位を表したものであり、図(c)は上半到達直前の計測結果を、また図(d)は上半掘削終了後に計測した結果を示している。切羽の接近に伴い、当初は起点側に生じた変位が、切羽の到達後は次第に逆の

終点側に変位する傾向が天端より上部で顕著に認められる。

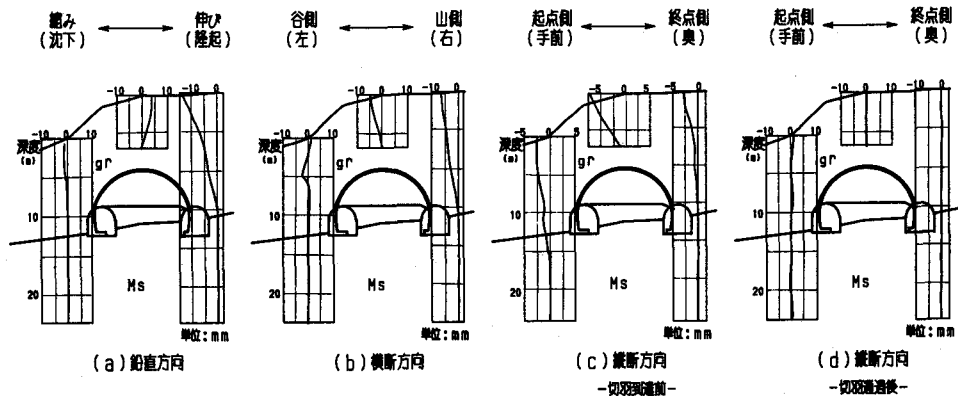


図-4 トリバック測定結果 (測点番号25+0断面)

5. 解析

5-1. 解析方法

上半掘削に伴う地山の変形モードを把握するため、三次元のFEM解析を行った。図-5に示すように切羽の進行過程を考慮して15ステップの解析を行い、上半素掘り (支保工なし) での掘削時の変形挙動解析を実施した。解析ケースを図-6に、また入力条件を表-1に示す。

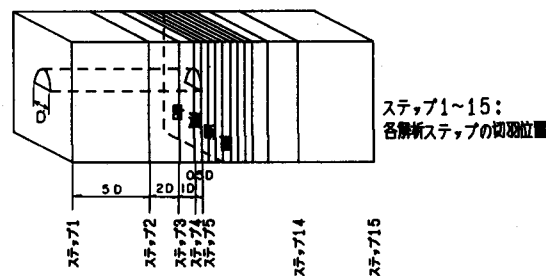


図-5 三次元解析メッシュ概念図

| ケース  | 条 件                   |
|------|-----------------------|
| ケース1 | 土被り1D (D=トンネル直径) 地山均質 |
| ケース2 | 土被り0.5D 地山均質          |
| ケース3 | 土被り0.5D 地山不均質 (2層)    |

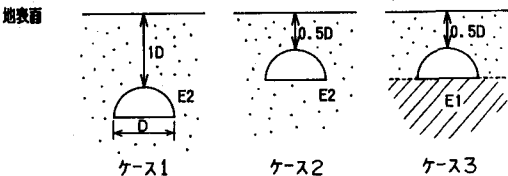


図-6 解析ケースとその概念

5-2. 解析結果

1) 切羽前方の地表面の隆起現象

解析によると、切羽が近付くにつれて切羽前方の地表面がわずかに隆起する現象が見られる。図-7に示すように地山が均質で土被りが浅い場合 (0.5D) にはその現象が顕著であるが、土被りが大きくなるとその傾向は小さくなる。また、地山が不均質 (上部の地山が下部に比べて軟質) な場合には、隆起現象はほとんど認められない。

表-1 入力条件一覧

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| 地山弾性係数 | E1=1.000kgf/cm <sup>2</sup> , E2=100kgf/cm <sup>2</sup> |
| 単位体積重量 | 1.8gf/cm                                                |
| ポアソン比  | 0.4                                                     |
| 初期応力   | 重力解析による                                                 |
| 掘削条件   | 上半素掘り                                                   |
| ステップ数  | 15ステップ                                                  |

図-8にトンネル縦断方向の各測点における実測の地表面沈下を一覧にして示した。地表面の隆起現象については、測点No.22~23付近では僅かに隆起現象が観測されている。同図には、基盤の位置と土被りの大きさについてもトンネル縦断方向に整理して示したが、同図より測点No.22~23付近では起点側に対して基盤の位置が下がっており、更に逆解析結果によると、上部の砂礫層が比較的硬質なことから、上述した解析

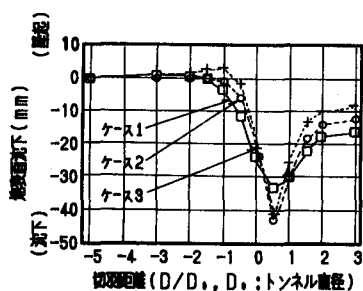


図-7 三次元FEMによる切羽距離と地表面沈下の関係

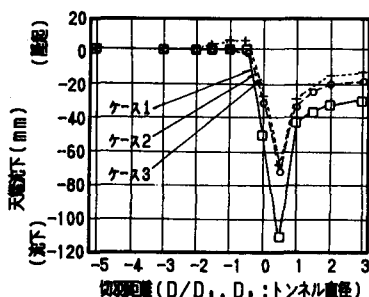


図-9 三次元FEMによる切羽距離と天端沈下の関係

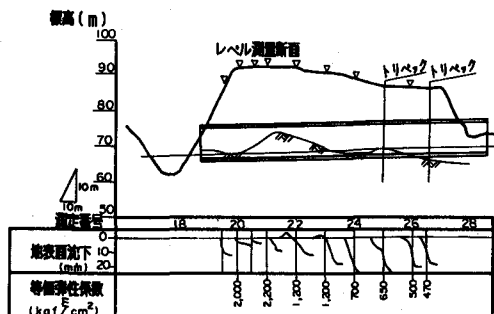


図-8 地表面沈下測定結果図  
(一期線センター上)

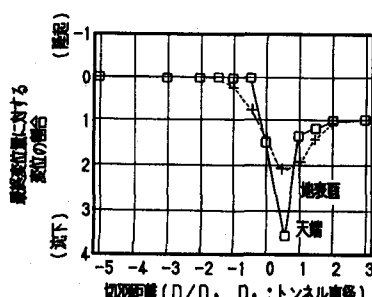


図-10 三次元FEMによるトンネル縦断方向の変位特性曲線

における比較的均質な条件に近いことが推察される。

これに対し、測点No. 25～26付近は測点No. 22～23付近と同様に基盤の位置は低いものの、終点側の砂礫層が軟質であること(逆解析結果)から基盤岩との弾性係数の差が大きく、解析ケース3の様に不均質な状態に近いものと判断される。

## 2) トンネル天端付近の変形挙動

図-9に三次元FEM解析に基づくトンネル天端沈下と切羽距離との関係を示した。この結果によると、切羽到達前  $-0.5D$  で顕著な変形が生じ始め、 $0.5D$  通過時点で最大値を示し、 $2D$  通過時点では変形はほぼ収束している。図-7に示した地表面沈下と天端沈下を生じ方の違いを検討するために解析ケース1(土被り $1D$ 、地山均質)を例として地表面沈下と天端沈下曲線を同一図面にプロットしたトンネル縦断方向の変位特性曲線を図-10に示した。同図より、地表面沈下が天端沈下に先立って変形の生じる傾向があることが分かる。

これを実測の例で示したのが図-11である。トリベックによるトンネル縦断方向変位を示しているが、深度  $0\sim 1m$  の地表付近の変位が先ず発生し、その後に深度  $6\sim 7m$  の変位が生じている。

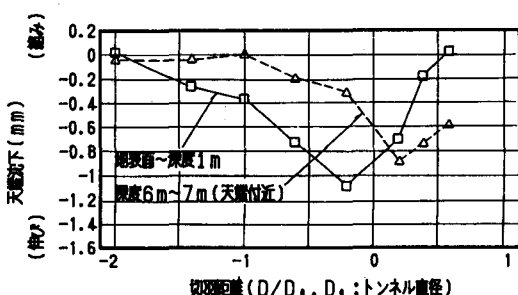


図-11 トリベックによる切羽距離と天端沈下  
の関係(測点番号25+0断面)

## 6. 施工管理に関する考察

土被りの浅い未固結地山のトンネル施工において、計測を主体にした施工管理を行う場合には天端沈下と

地表面沈下に着目して管理することが多い。しかし、天端沈下は通常行われるトンネル坑内A計測では切羽到達以後しか計測することができない。また、三次元の解析結果に示されるように、切羽が通過する前後のわずかな区間 ( $-0.5D \sim 0.5D$ ) で最大の沈下が生じることから、トンネル周辺の地山の安定性を評価するためには切羽到達前より測定精度の高い計測が必要となる。

このようなことから、ここでは切羽通過に伴うトンネルの三次元挙動に基づいた計測管理手法について考察する。

図-12に三次元解析から得られた天端付近の沈下と地表面沈下の差を取った相対変位を示す。また、図-13には、トリベックの計測結果を整理して、天端付近の沈下と地表面沈下の差をとった相対地中変位を示す。両図より、トリベックによる実測結果と三次元FEM解析結果のそれぞれの相対変位は傾向が良く一致しており、切羽通過前後の地山の变形挙動を特徴的に示していることがわかる。すなわち地山内では、切羽通過直前に収縮の変位が生じ、その後変位の方が変わって切羽通過直後まで引張り過程となり、 $0.5D$ 通過時点で最大の引張りが生じる。以後は引張り領域内で変位の絶対値は次第に小さくなり、切羽が $1.0D$ 程度通過した時点ではほぼ収束の傾向を示す。

このように、切羽通過前後の地山は三次元的に見て複雑な挙動を示すが、これは地表面沈下と天端沈下とは時間的にも方向的にも変位の現れ方が異なることによると考えられる。従って今後この種のトンネルにおける計測管理のポイントの一つは、一度変形した地山がその後の切羽の進行に伴い引張から圧縮側に変位の戻りを生じ、ひずみが小さくなってより安全側に推移するかどうかを確認することにあるものと考えられる。

尚、このような地山の挙動は垂直縫地ボルトの軸力の発生状況でも報告されており<sup>2)</sup>、トリベックによる計測管理が地山の安定性の確認のみならず、垂直縫地ボルト等の補助工法施工時の管理やその妥当性の検証にも有効なことを示している。

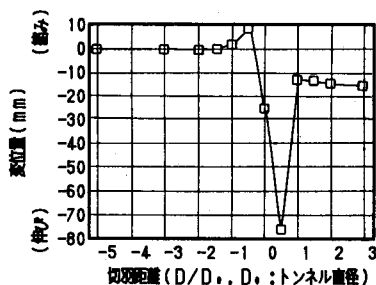


図-12 三次元FEM解析による  
地表面～天端間の変位

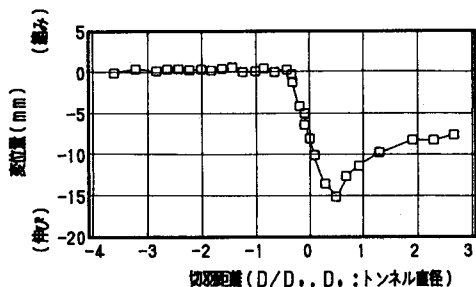


図-13 トリベックによる地表面～天端間  
の変位 (測点番号26+10 断面)

## 7. おわりに

土被りの浅い未固結地山において、トンネル掘削に伴う地山の三次元挙動を捉える機会を得たが、その計測結果とFEMによる三次元解析結果は良い一致を示した。即ち、土被りの浅い未固結地山の变形挙動は、二次元による解析では把握できない様な複雑な挙動を示し、この特徴を正しく理解することが計測管理の正しい方法に結び付くものと考えられる。

## <参考文献>

- 1) Köpel, J., Amstad, Ch., Kovari, K. (1983): The Measurement of Displacement Vectors with the "Trivec" Borehole Probe, Proc. Int. Symp. on Field Measurement in Geomechanics.
- 2) 前田忠顕、北田正彦、佐々木健二 (1986): 垂直鉄筋縫地工で坑口を掘る、トンネルと地下、第17巻9号