

## (44) 亀裂性岩盤における除荷時の地山挙動

東京電力(株) 高津浩明  
佐藤工業(株) ○ 篠川俊夫  
佐藤工業(株) 稗田 肇

### Ground behavior under unloading process in jointed rock masses

Hiroaki Takatsu, Tokyo Electric Power Co., Inc.  
Toshio Shinokawa, Sato Kogyo Co., Ltd.  
Hajime Hieda, Sato Kogyo Co., Ltd.

#### Abstract

Ground surface above a tunnel was excavated by quarrying in a dam site, which ground consists of rhyolite. During the excavation of ground surface, field measurements were performed in order to investigate the tunnel and ground behavior under unloading process in jointed rock masses.

From field measurements, it is recognized that the tunnel is slightly uplifted due to ground surface excavation. From numerical analysis, it is found that deformation characteristics are different from under a process of tunnel excavation (loading process) and one of ground surface excavation (unloading process). The crack tensor analysis, which is one of the numerical analyses used for jointed rock masses is applied to investigate ground behavior under unloading process due to ground surface excavation in jointed rock masses. It is found that the crack tensor analysis in which crack tensor are estimated using data of seams and alterations as joints, can be used to analyze anisotropic behavior in jointed rock masses.

#### 1. はじめに

ダム湛水池内の流紋岩からなる原石山下部に掘削されたトンネルにおいて、原石の採取に伴いトンネル上部の地山が掘削されるために土被りが減少する。そこで、亀裂性岩盤の掘削除荷時の挙動を把握する目的で、予めトンネル内より諸計器を設置して、原石山採取時のトンネルおよび周辺地山の挙動計測を行った。

本論文では、計測データから亀裂性岩盤の地表面掘削による除荷時の地山挙動を把握し、これを数値解析でシミュレートすることにより、除荷時の弾性係数と変形の異方性を評価するとともに、併せて実施した平板載荷試験や節理調査などの原位置調査データとを照合し、亀裂性岩盤除荷時の大規模構造物挙動に適用すべき原位置諸試験データの評価を行った。

ここで、トンネルから見て地圧がかかるトンネル掘削時を載荷時、トンネル上部地山が掘削され土被りが減少する原石山掘削時を除荷時と定義する。

#### 2. 現場概要

トンネル一帯は、新第三紀中新世の流紋岩からなり、岩石は堅硬ではあるが、岩盤は割れ目が発達し一部粘土を挟在する。なお、幅50cm以上の大きな断層や破碎帯は見当たらない。

トンネルは、ダム湛水池内の原石山下部に掘削された延長340mの工事用道路トンネルである。掘削はNATMによるタイヤ方式の全断面掘削で行われた。掘削にあたって、地山の挙動を把握する目的でA計測・B計測が行われている。トンネル掘削が終了した3年後、トンネル上部ではダム用の原石を採取するために大

規模な掘削が行われ、土被りが最大で80mから20mまで減少した。原石山掘削時にもトンネル掘削時の計測機器を利用して上部の地山の切取りがトンネルおよび周辺地山に与える影響を調べるために計測を行った（A計測15断面、B計測2断面）。トンネル縦断面図を図-1に示す。

なお、本論文では、検討断面を浮上り現象がより明確に現れているB計測第1断面について、内空変位、天端沈下および地中変位の変形挙動に着目して報告する。B計測第1断面の地山は電研式岩盤等級でC<sub>H</sub>級～C<sub>M</sub>級の流紋岩であり、原石山掘削により土被りが46.2mから20mまで26.2m減少した。

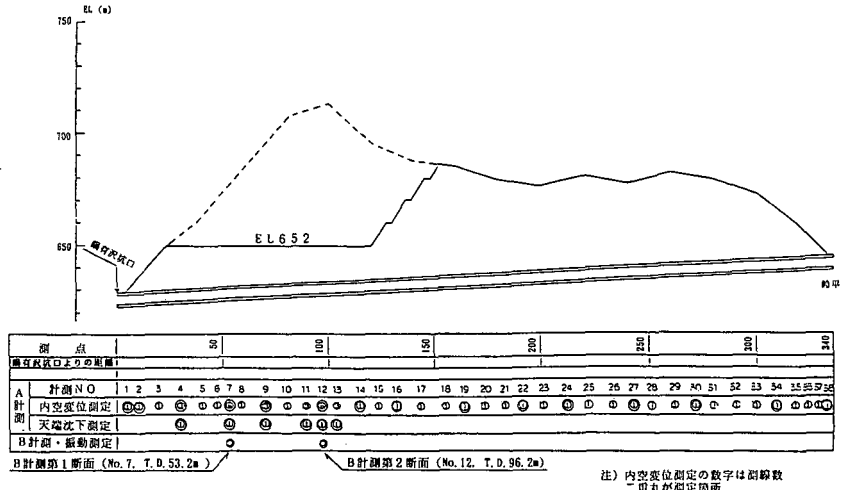


図-1 トンネル縦断面図

3. 原位置調査・試験結果

当サイト周辺ではダムサイト等の岩盤性状を把握する目的でボーリング調査、岩石試験、平板載荷試験や節理調査等の岩盤調査・試験が実施されている。岩石試験および平板載荷試験から得られる弾性係数を表-1に示す。ここで、除荷時の弾性係数は、載荷荷重が除荷される過程における荷重範囲での勾配として定義する。

表-1 弾性係数一覧表

|                  | 岩石      | 弾性係数 | 岩 盤     |         |        |         |
|------------------|---------|------|---------|---------|--------|---------|
|                  |         |      | 平板載荷試験  |         | 三方弾性解析 |         |
|                  |         |      | 変形係数    | 接線弾性係数  | トンネル掘削 | 原石山掘削   |
| C <sub>H</sub> 級 | 458,000 | 載荷時  | 16,000  | 64,000  | 14,000 | 128,000 |
|                  |         | 除荷時  | 71,000  | 284,000 |        |         |
|                  |         | 除荷時  | 81,000  | 324,000 |        |         |
|                  |         | 除荷時  | 81,000  | 324,000 |        |         |
| C <sub>M</sub> 級 | 416,000 | 載荷時  | 12,000  | 48,000  |        |         |
|                  |         | 除荷時  | 26,000  | 104,000 |        |         |
|                  |         | 除荷時  | 22,000  | 88,000  |        |         |
|                  |         | 除荷時  | 199,000 | 796,000 |        |         |

除荷時弾性係数E<sub>sec</sub> : 載荷荷重60→40kgf/cc'の除荷過程  
除荷時弾性係数E<sub>sec</sub> : 載荷荷重60→5kgf/cc'の除荷過程  
(注1) : C<sub>M</sub>級の除荷時の弾性係数E<sub>sec</sub>については載荷荷重60→40kgf/cc'で変位差なし。

不連続面データとしては、トンネル掘削時の切羽観察結果から得られトンネル全長の地質展開図に示されているシームと変質帯を採用する。節理分布状況を図-2に、節理のトンネル横断面での見かけ傾斜角の頻度分布を図-3

4. 計測結果

4.1 トンネル掘削時

トンネル掘削終了時の内空変位（水平測線）、天端沈下および地中変位（鉛直測線）を表-2に、内空変位と地中変位から得られる変形モードを図

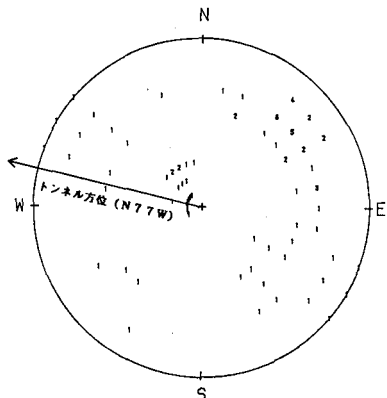


図-2 節理分布状況

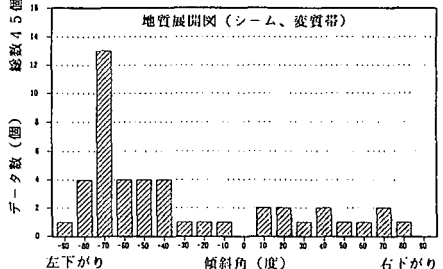


図-3 見かけ傾斜角の頻度分布図

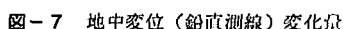
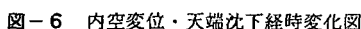
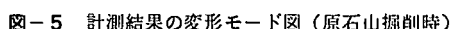
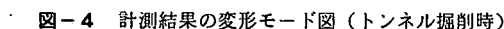
地山の変位は、最大で内空変位が3.53mmと小さく、良好な岩盤状態にあると推定される。変形モード図から、地中変位のうち右斜測線（EX-2）の変形が大きく現れており、地形および初期応力の異方性の影響を受けていると考えられる。

原石山掘削終了時の内空変位（水平測線）、天端沈下および地中変位（鉛直測線）を表-2に、内空変位と地中変位から得られる変形モードを図-5に示す。また、原石山掘削時における内空変位と天端沈下の経時変化を図-6に、地中変位（鉛直測線）の変化量を図-7に示す。

ここで、地中変位は原石山掘削時（除荷時）であるためトンネル壁面を不動点とする。内空変位が1.37mm縮小し、天端沈下が4mm隆起していることから、トンネルが原石山掘削により縦方向に引っ張られるように変形していると推定される。地中変位は最深部（深度8m）で1mm程度地山側に変位しており、地中変位からも地山はわずかではあるが原石山掘削により浮上っていると推定される。天端沈下の経時変化図より、土被りが30m程度（4D, D:掘削径8.12m）以下になると天端沈下が隆起傾向を示すことがわかる。変形モード図から、地中変位の左斜測線（EX-4）の変形が右斜測線（EX-2）の変形より若干大きく現れている。これは、図-3に示す見かけ傾斜角の頻度分布に対応しており、不連続面による異方性の影響を受けていると考えられる。

|                     |      | 計画結果  | 解析結果   |        | 1997年7月 |
|---------------------|------|-------|--------|--------|---------|
|                     |      |       | □方陣性解析 | □時系列解析 |         |
| トンネル<br>掘削に<br>伴う変化 | 内空変位 | -5.53 | -3.43  | -      | -       |
|                     | 天端下位 | -1.00 | -0.70  | -      | -       |
|                     | 8φ   | 0.00  | 0.00   | -      | -       |
|                     | 6φ   | 0.10  | -0.05  | -      | -       |
|                     | 4φ   | -0.10 | -0.15  | -      | -       |
|                     | 3φ   | -0.35 | -0.21  | -      | -       |
|                     | 2φ   | -0.45 | -0.51  | -      | -       |
|                     | 1φ   | -0.60 | -0.45  | -      | -       |
|                     | 0φ   | -0.70 | -0.68  | -      | -       |
|                     | 中点変位 |       |        |        |         |
| 山頂<br>掘削に<br>伴う変化   | 内空変位 | -1.37 | -1.84  | -0.16  | -0.16   |
|                     | 天端下位 | 4.00  | 3.60   | 4.00   | 4.25    |
|                     | 8φ   | 1.00  | 1.43   | 0.13   | 0.13    |
|                     | 6φ   | 1.00  | 0.93   | 0.08   | 0.08    |
|                     | 4φ   | 0.70  | 0.48   | 0.04   | 0.04    |
|                     | 3φ   | 0.50  | 0.30   | 0.03   | 0.03    |
|                     | 2φ   | 0.40  | 0.16   | 0.01   | 0.01    |
|                     | 1φ   | 0.20  | 0.05   | 0.01   | 0.01    |
|                     | 0φ   | 0.00  | 0.00   | 0.01   | 0.00    |
|                     | 中点変位 |       |        |        |         |

載荷時 D = 14.000kgf/cm<sup>2</sup>      單位(cm), + : 拔大, 隆起, 地山側  
除荷時 E = 128.000kgf/cm<sup>2</sup>      - : 縮小, 沈下, 內空側



## 5. 解析結果

トンネル掘削時および原石山掘削時の過程を、等方弾性解析および異方弾性解析により解析した。異方性については、小田により提案されているクラックテンソルの概念<sup>1)・2)</sup>を採用することにより、亀裂を含む岩盤を等価な異方弾性体として評価した。解析は掘削や支保などの施工過程を考慮した2次元平面ひずみ解析であり、解析モデルを図-8に示す。なお、解析にあたって、初期応力状態は、トンネル掘削終了時の変位計測データから桜井の方法<sup>3)</sup>による逆解析により得られた側圧係数(1.35)を考慮した。

### 5. 1 トンネル掘削時

トンネル掘削時の挙動を等方弾性解析により解析した。弾性係数は、解析断面(B計測第1断面)の地山がC<sub>H</sub>級~C<sub>M</sub>級であることから、表-1に示す平板載荷試験の変形係数からC<sub>H</sub>級~C<sub>M</sub>級の間値である14,000kgf/cm<sup>2</sup>を採用した。

トンネル掘削終了時の内空変位(水平測線)、天端沈下および地中変位(鉛直測線)を表-2に、内空変位と地中変位から得られる変形モードを図-9に示す。解析結果は計測結果とほぼ一致しており、等方弾性解析によりトンネル掘削時の変形を把握できると考えられる。また、変形の強度としては、平板載荷試験の変形係数を採用すればよいと考えられる。

### 5. 2 原石山掘削時

原石山掘削時の挙動をトンネル掘削時(載荷時)の弾性係数(14,000kgf/cm<sup>2</sup>)を用いて等方弾性解析により解析すると、表-2に示すように、相対変位である内空変位や地中変位については計測結果とほぼ一致するが、絶対変位である天端沈下については計測結果と異なり約9倍の36.6mm大きく浮上る。

天端隆起量に着目して、トンネル掘削時(載荷時)の弾性係数を採用した場合の解析結果(36.60mm)と計測結果(4mm)の比から原石山掘削時(除荷時)の弾性係数を128,000kgf/cm<sup>2</sup>と推定して行った等方弾性解析の解析結果を表-2に示す。内空変位や地中変位については計測結果とほぼ同様であり、天端沈下についても計測結果とほぼ一致する。

岩盤の異方性を評価するために、クラックテンソル解析により原石山掘削時の挙動を解析した。解析にあたって、トンネル掘削時までは等方弾性解析により解析し、原石山掘削時のみクラックテンソル解析により解析した。不連続面データとして得られている情報から不連続面の大きさを正確に求めることがかなり困難であるため、不連続面の走向・傾斜のデータのみからクラックテンソルを求めた。すなわち、2階と4階のクラックテンソル $F_{ij}$

と $F_{ijkl}$ を0階のクラックテンソル $F_0$ と不連続面の走向・傾斜から求められるテンソル $N_{ij}$ と $N_{ijkl}$ の積( $F_{ij} = F_0 \times N_{ij}$ ,  $F_{ijkl} = F_0 \times N_{ijkl}$ )として求めた。ここで、0階のクラックテンソル $F_0$ は $F_0 = 3$ と設定し、不連続面の走向・傾斜から求められるテンソル $N_{ij}$ および $N_{ijkl}$ は図-10に示す。クラックテンソル解析では弾

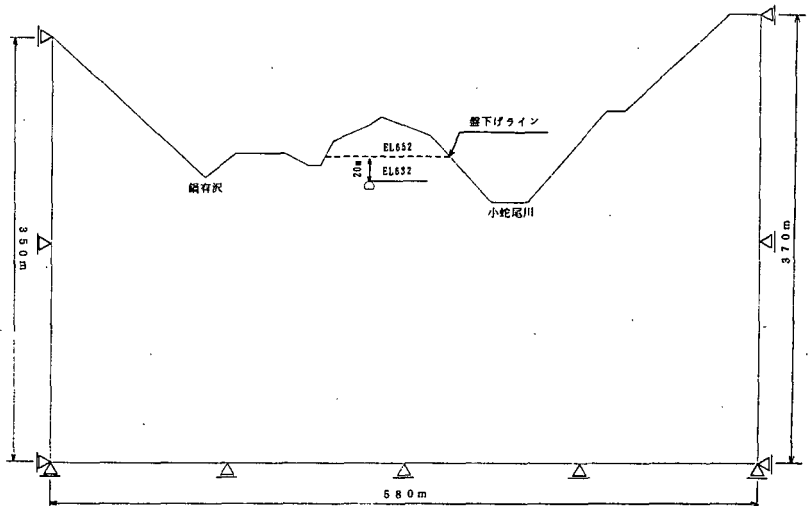


図-8 解析モデル

性係数として岩石の弾性係数を用いるので、表-1に示す岩石試験の弾性係数から $C_H$ 級～ $C_M$ 級の中間的な値である $437,000\text{kgf/cm}^2$ を採用した。また、クラックのせん断剛性 $g$ と垂直剛性 $h$ の剛性比 $R$  ( $R=h/g$ )は $R=10$ とする<sup>4)</sup>。

クラックテンソル解析による原石山掘削終了時の内空変位(水平測線)、天端沈下および地中変位(鉛直測線)を表-2に、内空変位と地中変位から得られる変形モードを図-11に示す。解析結果は計測結果とほぼ一致している。これは、原石山掘削のような大規模な地盤構造物を対象とした亀裂性岩盤の挙動解析に、対象地山の不連続性を代表していると考えられるシームや変質帯のような不連続面を採用してクラックテンソル解析を適用したことにより、解析結果が計測結果により適合したものと考えられる。ここで、0階のクラックテンソル $F_0$ は $F_0=3$ と設定したが、クラックテンソルに関する概算として、一軸状態で等方クラック( $F_{11}=F_{22}=F_{33}=F_0/3$ )を仮定して得られる関係( $E'/E=1/\{(8/3\pi)\times F_{11}+1\}$ )から、岩石の弾性係数 $E$ と $F_0$ から推定される岩盤の弾性係数 $E'$ は $236,000\text{kgf/cm}^2$ である。この弾性係数の値は、表-1に示す平板載荷試験における $C_H$ 級と $C_M$ 級の除荷時の弾性係数の中間的な値にほぼ相当すると考えられる。

## 6. おわりに

計測された亀裂性岩盤の地表面掘削による除荷時の地山挙動や原位置での岩盤調査等から、数値解析を用いて、除荷時の弾性係数の値およびジョイントによる異方性の効果を評価した。これにより、亀裂性岩盤の地表面掘削による除荷時の地山挙動は、対象地山の不連続性を代表していると考えられるシームや変質帯のような不連続面データを用いてクラックテンソル解析を行うことにより予測精度が向上することが示された。また、トンネル掘削時(載荷時)と原石山掘削時(除荷時)では、地山の弾性係数が異なり、原石山掘削時(除荷時)は平板載荷試験の除荷時の弾性係数にほぼ相当することが示された。

## 謝辞

クラックテンソル解析の適用に関しては埼玉大学山辺正助教授よりご指導いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 小田匡寛：不連続性岩盤の力学へのアプローチ、土と基礎、Vol.35, No.3, pp.29-34, 1987
- 2) 山辺正, 原夏生, 小田匡寛：クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形解析と入力パラメーターの決定に関する研究、土木学会論文誌, No.382, pp.121-130, 1987
- 3) 桜井春輔, 進士正人：マイクロコンピュータによる地下空洞掘削時の安定性の評価、土木学会論文報告集, No.358, pp.37-46, 1983
- 4) 多田浩幸, 石塚与志雄, 山辺正, 小田匡寛, 前川恵輔：不連続性岩盤の三次元掘削解析の実岩盤への適用、第24回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.146-150, 1992

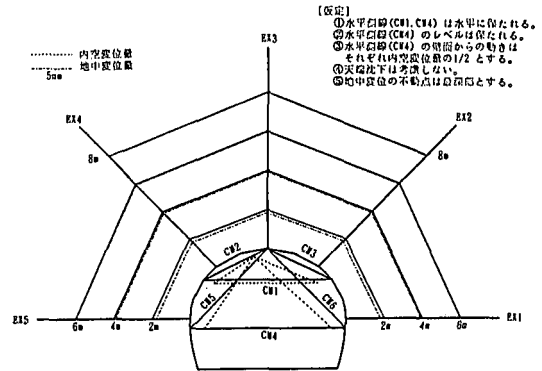


図-9 等方解析結果の変形モード図(トンネル掘削時)

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $N_{ij}$   | $\begin{Bmatrix} 0.3607 & 0.1260 & -0.0904 \\ 0.4428 & 0.1041 & 0.1965 \end{Bmatrix}$                                                                                                                                                                            |
| $N_{ijkl}$ | $\begin{Bmatrix} 0.1749 & 0.1182 & 0.0463 & 0.0295 & -0.0427 & 0.0098 \\ 0.2827 & 0.0633 & 0.0619 & -0.0374 & -0.0405 & 0.0029 \\ 0.0869 & 0.0127 & -0.0163 & -0.0029 & -0.0374 & 0.0295 \\ 0.0463 & 0.0295 & 0.0127 & -0.0163 & -0.0029 & 0.0463 \end{Bmatrix}$ |

図-10 走向・傾斜から求められるテンソル $N_{ij}$ ,  $N_{ijkl}$

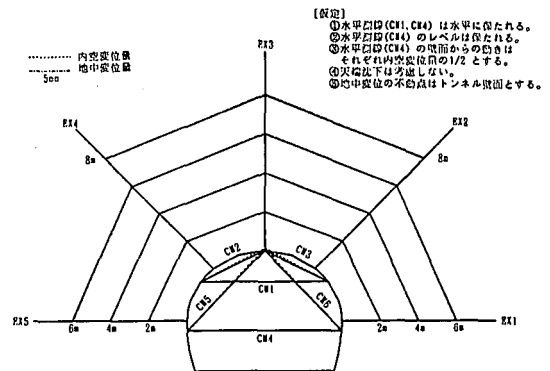


図-11 異方解析結果の変形モード図(原石山掘削時)