

大断面TBM掘削における岩盤不連続面の定量化 に基づく切羽不安定現象の検討

Study of the unstable phenomena at the face based on the quantification of discontinuity
in rock masses for the large section TBM excavation

川北真嗣¹・○大塚勇²・岩野政浩³・島屋進⁴・松原誠⁵

Masatsugu Kawakita, Isamu Ohtsuka, Masahiro Iwano, Susumu Shimaya and Makoto Matsubara

¹非会員 工修 日本道路公団 中部支社清見工事事務所 (〒506-0101 岐阜県高山市清見町牧ヶ洞2447)

²正会員 工修 大成建設株式会社 土木設計部 (〒166-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail:ohtsuka@ce.taisei.co.jp

³正会員 Ph.D 大成建設株式会社 土木設計部 (〒166-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

⁴正会員 工修 大成・西松・佐藤工業共同企業体 (〒501-5627 岐阜県大野郡白川村萩町字寺田3296)

⁵非会員 理修 株式会社地層科学研究所 (〒501-5627 岐阜県大野郡白川村萩町字寺田3296)

In the Hida tunnel, the main tunnel is excavated by means of the large section TBM with a diameter of 12.84m. The overburden is more than 1,000m, and in-situ earth pressure around the tunnel is assumed to be very high. Host rock is Nouhi-rhyolite, and the geological feature is including many discontinuities, although the base of rock is very hard. Due to the structural features of discontinuities and high earth pressure, the mass of rock falls out in the shape of a dome ahead of the face. In this paper, we analyze the crack datum which is inspected at the face and acquire the quantitative index. The three-dimensional excavation analyses using crack tensor theory have been performed so as to analyze the unstable phenomena at the face.

Key Words : TBM, crack tensor, density of cracks, face collapse, three-dimensional excavation, indent analyses

1. はじめに

(1) 目的

飛騨トンネルは、東海北陸自動車道と中部縦貫自動車道（高山清見道路）が連結する、飛騨清見ジャンクションから白川郷インターチェンジまでの間に建設中のトンネルである。本トンネルは延長10.7kmの長大トンネルであり、現在、直径12.84mの大断面TBMで本坑を掘進中である。検討対象区間では、本坑を挟むように、切羽に向かって右側に避難坑、左側に作業坑を、本坑と平行に先行して掘削している。土被りは最大約1,000mであり、大きな地圧の作用を受けている。岩盤は濃飛流紋岩であり、その特徴は、岩盤基質部が非常に硬質であるが、多くの亀裂を含んでいる。TBMの切羽では岩盤亀裂の影響によって切羽前方がドーム状に抜け落ちる先掘れの現象が多発した。

本トンネルのように高土被りで初期地圧の非常に大きな大断面TBMの掘進施工事例は少なく、トンネル周辺の岩盤挙動や直立した切羽の挙動については不明な点が多い。そこで、切羽で発生している先掘れや不安定切羽のメカニズムを把握し、これらの現象と亀裂面の方向、密度およびすべり特性などの関係を調べておくことが重要である。

以上のような状況を踏まえ、本検討では、切羽で発生している現象を解析的に把握し、施工に反映させることを目的としている。

(2) 解析手法

岩盤内の亀裂を定量化する方法として、クラックテンソルを用いて岩盤を等価連続体とモデル化した三次元掘削解析によって岩盤崩落現象について検討する。

クラックテンソルを用いた等価連続体解析では、

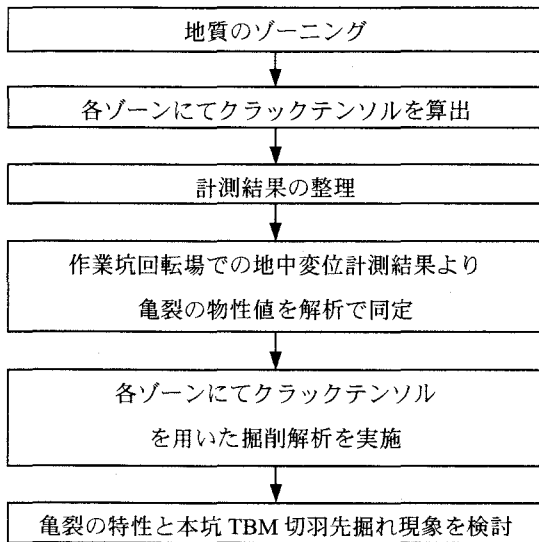


図-1 検討フロー

基質岩盤部を弾性体として解き、その結果に亀裂の挙動を加えて、不連続面を含む岩盤の挙動を表現する。本坑切羽にて発生している先掘れ現象が不連続面の組合せによる構造的なものと、潜在亀裂の急激な開放による強度低下によって引き起こされているとすれば、本手法は現象の予想に適用できるものと考えられる。

岩盤に応力 σ_{kl} が作用し変形する際に生じるひずみを二つのひずみ成分の和として考える。一つは岩盤基質部の弾性ひずみ($\varepsilon_{ij}^{(m)}$)であり、式(1)のように表せる。もう一つはクラックの開口およびせん断変形によって発生するひずみ($\varepsilon_{ij}^{(c)}$)であり、式(2)のように表せる。

$$\varepsilon_{ij}^{(m)} = \frac{1}{E} \left\{ (1 + \nu) \delta_{ik} \delta_{jl} - \nu \delta_{ij} \delta_{kl} \right\} \sigma_{kl} \quad \text{式(1)}$$

$$\varepsilon_{ij}^{(c)} = \left\{ \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{g} \right) F_{ijk} + \frac{1}{4g} (F_{ik} \delta_{jl} + F_{il} \delta_{jk} + F_{jk} \delta_{il} + F_{jl} \delta_{ik}) \right\} \sigma_{kl} \quad \text{式(2)}$$

ただし、E: 岩盤基質部の変形係数 (kN/m²)

ν : 岩盤基質部のポアソン比

g, h: 亀裂剛性 (kN/m²) $g = r \times ks$, $h = r \times kn$

r: 亀裂半径 (m)

ks: 亀裂のせん断剛性 (kN/m³)

kn: 亀裂の垂直剛性 (kN/m³)

F_{ij}: 2階のクラックテンソル成分

F_{ijkl}: 4階のクラックテンソル成分

クラックテンソル (F_{ij}, F_{ijkl}) は、亀裂による岩盤の異方性を示すパラメータであり、亀裂の幾何学

的な性質を表すテンソル量である。クラックテンソルはTBM面盤の観察窓から観測された亀裂の走向・傾斜・密度によって求められる。

(3) 検討概要

本検討のフローを図-1に示す。

まず、現場で得られた亀裂のデータをもとに、同様な傾向を示す亀裂群をグループ化し、トンネル延長に沿ったゾーニングを行い、各ゾーンにて、クラックテンソルを求める。次に、作業坑の回転場で行われた地中変位計測結果を示し、クラックテンソルを用いた掘削解析によって、計測結果を再現できる亀裂の物性値を同定する。最後に、各ゾーンにおけるTBM切羽前方の岩盤挙動を解析的に評価し、各ゾーンでの実現象と比較することによって、亀裂の特性と切羽先掘れの関係性を導く。

2. 地質のゾーニング

切羽の崩落が著しい区間については補助工法としてAGFを用いながら掘削しているが、崩落した岩塊によってカッターヘッドが捕捉されることがあり、TBM掘削に大きな支障をきたすことがある。

亀裂の特徴としては全体的に連続性が高く、拘束圧が解放されると容易に剥離する。切羽前方では亀裂に囲まれた岩塊が崩落しており、亀裂の卓越方向から形成されるブロックと崩落形状は合致しているため、亀裂の影響によって岩塊が崩落するものと考えられる。

そこで、岩盤の亀裂データ、施工実績および岩塊の崩落形状などから同様の岩盤性状と考えられる区間をグループ化し、トンネル延長に沿ってゾーニングを行い、図-2に示すようにTBM掘削区間を6つの区間に分け、各区間でクラックテンソルを求めた。図-2の上段はトンネル平面図を示しており、中段に各ゾーンの亀裂のシュミットネットと密度コンター図を、下段に亀裂の特性を示す。下段に記されている「F₀」と「A^(F)」は、2階のクラックテンソルの三つの主値F₁、F₂、F₃を用いて式(3)と式(4)のように表せる¹⁾。

$$F_0 = F_1 + F_2 + F_3 \quad \text{式(3)}$$

$$A^{(F)} = \frac{1}{F_0} \left\{ (F_1 - F_2)^2 + (F_2 - F_3)^2 + (F_3 - F_1)^2 \right\}^{1/2} \quad \text{式(4)}$$

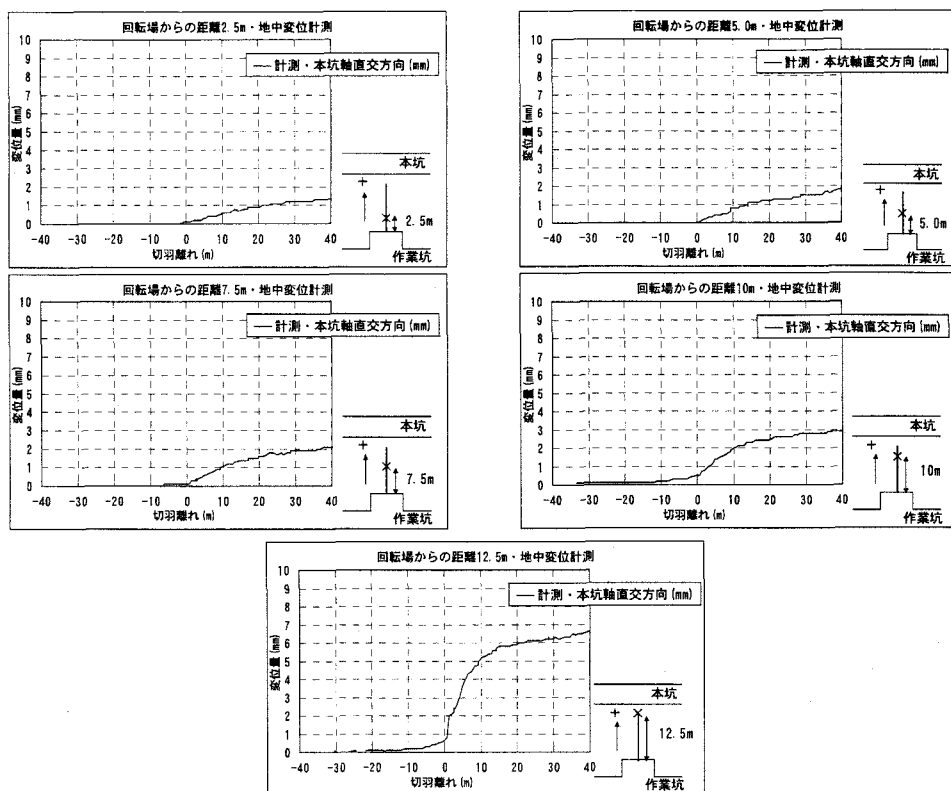


図-4 地中変位計の経距変化図

亀裂の密度は11と平均的な値である。岩級はCM級が主体である。次章で述べる地中変位計測を行った場所は、この区間より約150m前方であるが、同様な亀裂の性状であったため、地中変位計測結果のシミュレーション解析では、この区間のクラックテンソルを用いた。

3. 地中変位計測結果

地中変位計の計測配置図を図-3に示す。本坑TBMが到達する前に、作業坑の大型車両回転場の切羽から本坑側に向けて、地中変位計を配置し、本坑掘削による地山の挙動を計測した。回転場の掘削延長は6mである。地中変位計の測点は回転場から本坑に向けて2.5mピッチで設置されており、回転場の切羽を不動点としている。

本坑切羽からの離れを横軸に、地中変位量を縦軸とした各測点の経距変化図を図-4に示す。これらの図は山鳴りによる影響を取り除いて補正した図である。地中変位の符号は作業坑から本坑に向かう方向を正とする。

いずれの測点でも、本坑の切羽が近づくにつれて変位量は増大する。本坑断面に近い測点ほど変位量は大きい。切羽通過前の先行変位量は比較的小さく、回転場に近い3測点（2.5m、5.0m、7.5m）では先行変位量はほとんどなく、本坑に近い2測点（10.0m、12.5m）で本坑切羽到達前約10m（ $\approx 1D$ ）から変位が発生し始める。また、切羽が40m離れても変位は収束せずクリープ的な挙動を示している。

4. 計測結果のシミュレーション解析による亀裂物性値の同定

亀裂を含んでいる岩盤を等価連続体に置き換え、亀裂の影響を岩盤の剛性低下および異方性として考慮することができるクラックテンソルを用いた三次元逐次掘削解析を実施する。

飛騨トンネルでは、初期応力測定により初期地圧が明らかとなり、一軸圧縮試験より岩盤の変形特性を表す物性値も既知である。不明な物性値は亀裂の剛性（式(2)中の k_n と k_s ）であり、現場の計測結果と合うように亀裂の剛性を同定した。

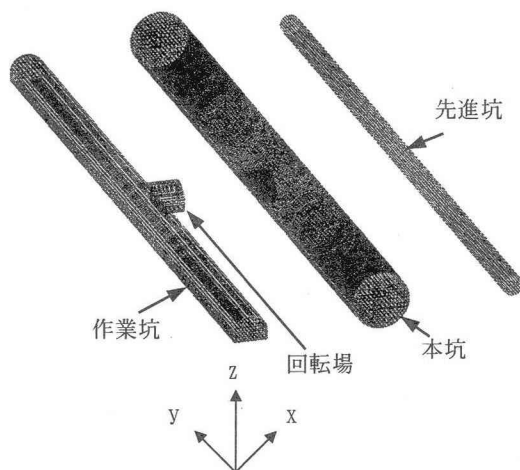


図-5 解析モデルの鳥瞰図

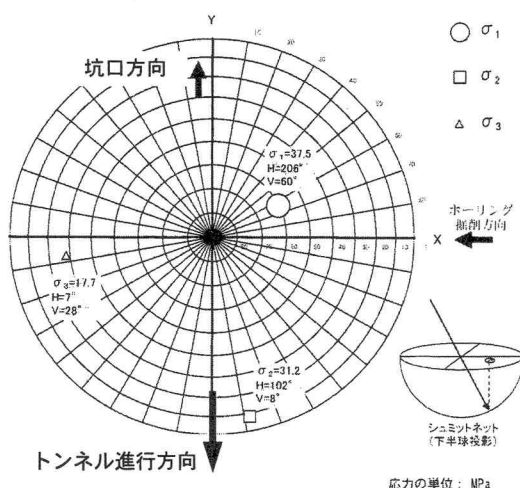


図-6 主応力方向の下半球投影表示図

本章では、クラックテンソルを用いた三次元掘削解析によって、前章で述べた変位計測データを模擬し、回転場での地中変位計測結果と合うように亀裂の剛性を変化させて、解析を実施した。

(1) 解析モデル

回転場を考慮したモデルを用いて、回転場で行われた地中変位計測結果と解析結果を比較し、亀裂の剛性(kn、ks)を推定する。図-5に解析モデルの鳥瞰図を示す。

(2) 解析用物性値

a) 岩盤の物性値

表-1に岩盤の物性値を示す。剛性の比率は

表-1 岩盤の物性値

項目	物性値	備考
単位体積重量 γ (kN/m ³)	28	現地試験結果
弾性係数 E (kN/m ²)	7.76×10^7	— " —
ポアソン比 ν	0.25	— " —
亀裂の垂直剛性kn	パラメトリックスタディにより決定 文献2)	文献2)
亀裂のせん断剛性ks		
粘着力 C (kN/m ²)	6.0×10^3	文献2)
内部摩擦角 ϕ (°)	55	— " —

表-2 初期応力 (単位: kN/m²)

σ_{xx}	-31.3×10^3	τ_{xy}	-0.71×10^3
σ_{yy}	-22.1×10^3	τ_{yz}	-8.00×10^3
σ_{zz}	-32.9×10^3	τ_{zx}	1.92×10^3

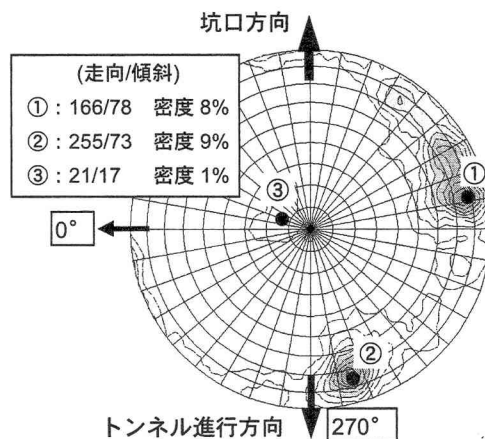


図-7 亀裂密度コンター図

kn/ks=10と設定した²⁾。その他の物性値は現地の試験結果より設定した。

表-2に初期応力の値を示す。初期応力は、前述の地中変位計測を行った回転場において円錐孔底ひずみ法によって計測した。応力は引張を正とし、x座標は+が切羽に向かって右方向、y座標は+がトンネル進行方向、z座標は+が鉛直上方向である。また、図-6に主応力方向の下半球投影表示図を示す。最大主応力の方向は、ほぼトンネル横断面の鉛直方向であり、最小主応力は、トンネル横断面の水平方向とほぼ一致する。図-7には全てのゾーンにおける亀裂密度コンター図を、図-6と同様な方向で示す。トンネル進行方向 (図中①) と断面方向 (図中②) に傾斜の大きな亀裂が密集しており、これらの亀裂郡と

表-3 支保の物性値一覧

	本坑	作業坑	回転場	先進坑
材料	RCライナー	吹付け+ 鋼製支保工	吹付け+ 鋼製支保工	鋼製ライナー
単位体積重量 γ (kN/m ³)	24	24	24	77
トンネル進行方向(y軸方向) 弾性係数 E_x (kN/m ²)	31×10 ⁶	4.0×10 ⁶	4.0×10 ⁶	2.0×10 ⁸
トンネル周方向(x軸方向) 弾性係数 E_x (kN/m ²)		8.3×10 ⁶	6.9×10 ⁶	1.8×10 ⁸
ポアソン比 ν	0.2	0.2	0.2	0.3
厚さ t (m)	0.25	0.1	0.15	4.2×10 ⁻³

表-4 掘削手順

掘削段階	施工内容	掘削開放率
1	先進坑掘削 (全長)	100%
2	先進坑ライナープレート設置 (全長)	0%
3	作業坑掘削 (全長)	60%
4	作業坑吹付けコンクリート (全長)	40%
5	回転場の掘削・吹付けコンクリートの繰り返し (1mピッチで解析)	—
6	回転場掘削完了	—
7	本坑逐次掘削・切羽の8m後方でライナー設置	—
8	本坑掘削完了	—

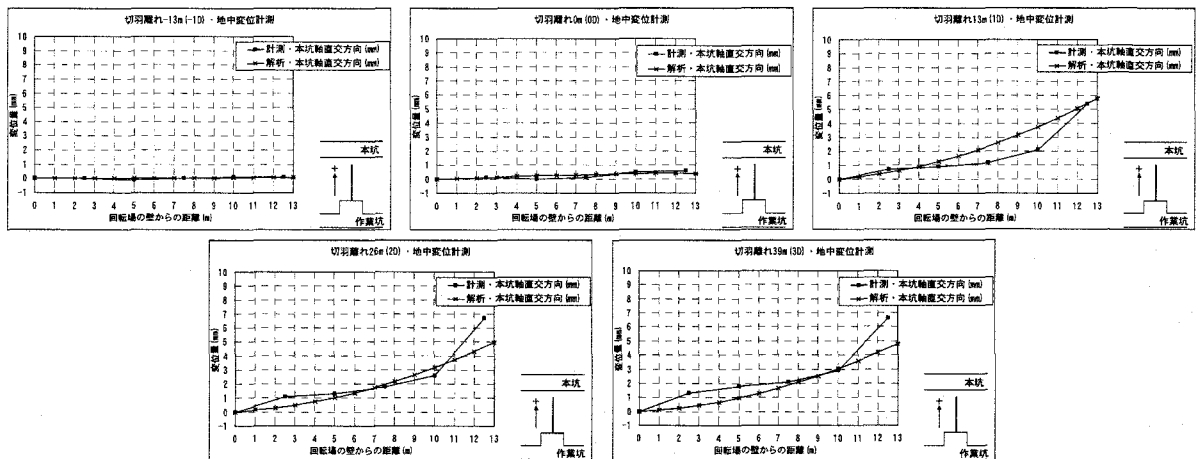


図-8 地中変位計測結果と解析結果の比較

水平に近い亀裂群 (図中③) によって、切羽前方の先掘れが発生している。

b) 支保の物性値

各トンネルの支保は異方性シェルでモデル化した。表-3に支保の物性値一覧表を示す。作業坑と回転場は吹付けコンクリートと鋼製支保工の合成した弾性係数とし、トンネル周方向と進行方向で異なる弾性係数を用いて異方性を考慮する。

なお、今回の解析では、AGFは考慮していない。

(3) 解析手順

表-4に掘削手順を示す。先進坑・作業坑は1つのステージですべてを掘削し、岩盤と支保に作用する掘削解放力は、掘削解放率によって与える。先進坑は掘削解放率100%で掘削し、支保には解放力を作させない。作業坑は掘削解放率60%で掘削し、残りの解放力を支保に作用させる。作業坑の掘削終了後に回転場を掘削し、本坑は逐次掘削を行い、8m後方でライナープレートを設置する。

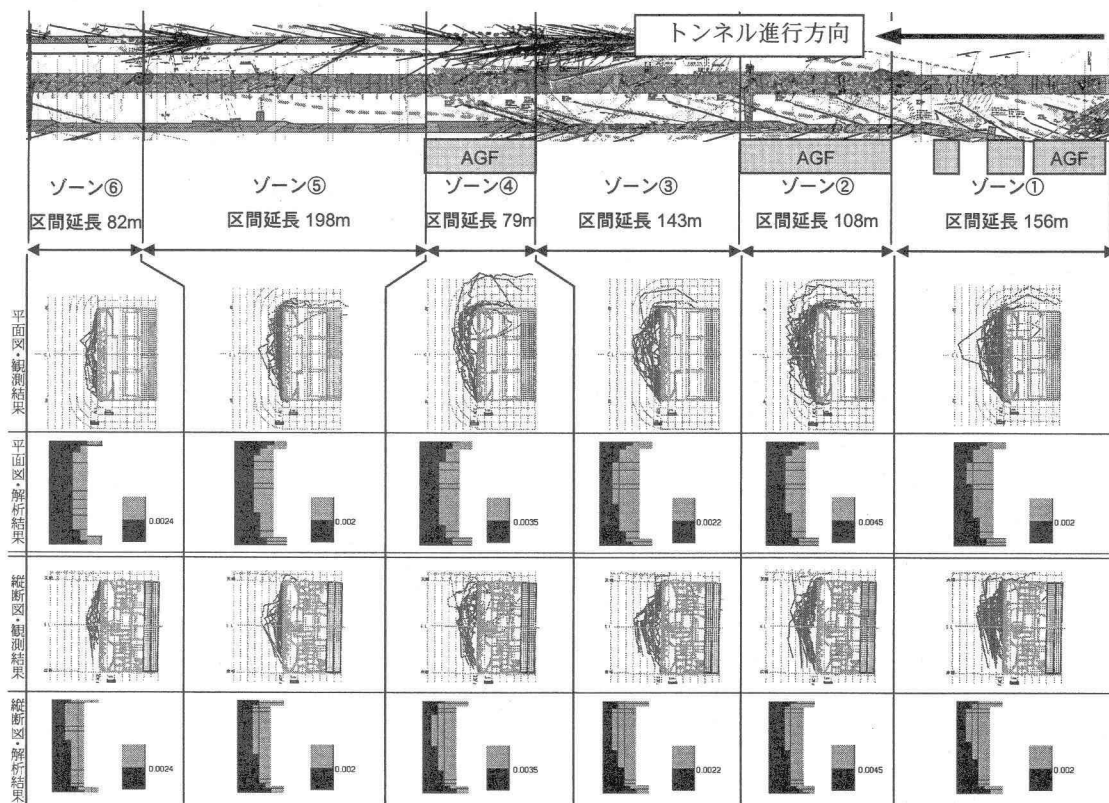


図-9 切羽の崩落形状と解析によるせん断ひずみ分布の比較

表-5 F_0 (亀裂密度) と崩落が発生するひずみ値の関係

	ゾーン①	ゾーン②	ゾーン③
ひずみ値 (%)	0.20	0.45	0.22
F_0	8.7	18	9.6

	ゾーン④	ゾーン⑤	ゾーン⑥
ひずみ値 (%)	0.35	0.20	0.24
F_0	14	6.9	11

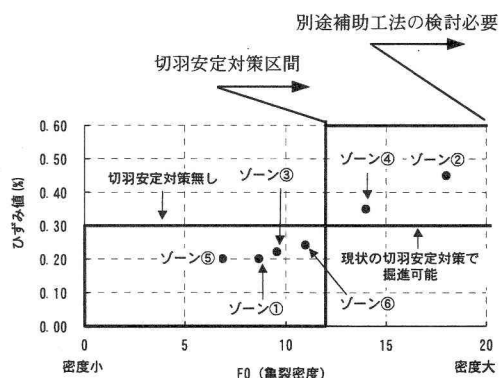


図-10 F_0 (亀裂密度) と崩落が発生するひずみ値の関係

(4) 解析結果

ゾーン⑥のクラックテンソルを使い、亀裂の剛性をパラメトリックに変化させて解析を行った結果、 $kn=2.90 \times 10^7 (\text{kN/m}^3)$ 、 $ks=2.90 \times 10^6 (\text{kN/m}^3)$ とした場合に解析結果と計測結果がよく合う結果となった。比較した結果を図-8に示す。

この図は、横軸に回転場切羽からの距離を、縦軸に地中変位量をとった地中変位分布図である。本坑の切羽位置が計測断面よりも2D手前から切羽通過後

3Dまで1D毎にプロットした。計測結果では、回転場に最も近い測点 (2.5m) と、本坑に最も近い測点 (12.5m) で不連続的な挙動を示しているが、その間の測点 (5.0m、7.5m、10.0m) では直線分布となっており、弾性的な挙動を示している。回転場に近い測点 (2.5m) と回転場切羽の固定点 (0.0m) の間で相対変位が大きいのは、測点間に不連続面などが存在し、局所的に測点間の相対変位を大きくしているものと考えられる。また、本坑に最も近い測点

(12.5m)では本坑掘削によって本坑周辺の岩盤が塑性化した影響で、大きい変位となっているものと考えられる。解析結果では、この不連続的な挙動は表現できていないが、両者は概ね一致している。

5. 本坑切羽前方の岩盤挙動分析

本章では、本坑掘削時の切羽前方の岩盤挙動を三次元掘削解析によって分析する。各ゾーンで求めたクラックテンソルを解析に取り入れて、ゾーン毎に解析を行い、各ゾーンの崩落現象と解析結果の比較を行い、亀裂による影響について検討を行った。

(1) 解析条件

解析モデル、解析手順は前章と同様であるが、回転場の掘削は行っていない。

解析用物性値は前章で示した値を用い、亀裂の剛性(k_n , k_s)は前章で、同定した値($k_n=2.90 \times 10^7(\text{kN/m}^2)$, $k_s=2.90 \times 10^6(\text{kN/m}^2)$)を用いる。クラックテンソルは、各ゾーンで求めたクラックテンソルを用いる。

(2) 解析結果

各ゾーンでの切羽の挙動を分析した。各ゾーンで実際に発生した切羽の崩落と、解析で求めたせん断ひずみ分布図の比較を図-9に示す。図-9ではひずみのしきい値を調節して、実際の崩落分布と、解析のひずみ分布が等しくなるようにひずみ値を設定した。そのひずみ値を各ゾーンでまとめた表を表-5に示す。このひずみ値は、崩落が発生するひずみレベルであり、この値が小さければ、小さいひずみレベルでも崩落することを意味する。

各ゾーンで崩落が発生するひずみ値の大きさは異なり、ゾーン②、④、⑥ではゾーン①、③、⑤よりも大きなひずみが切羽前方に発生しているにも関わらず、崩落の程度が同様なのはAGFによる注入の効果であると考えられる。

亀裂の密度(F_0)が比較的大きいゾーン②、④、⑥で崩落現象が発生するひずみ値が大きな値を示している。弾性係数から求めた限界ひずみ³⁾に $(1+\nu)$ を掛けて(ν :ポアソン比)、限界せん断ひずみ値を算定した結果、上限値0.17%、中央値0.071%、下限値0.018%となる。一軸試験で求めた限界ひずみと、拘束圧を有し三軸状態の解析結果を一概に比較することはできないが、全てのゾーンで崩落が発生

するひずみ値は限界せん断ひずみの上限値を超えている。

各ゾーンにおける F_0 (亀裂密度)と崩落が発生するひずみ値の関係をプロットしたものを図-10に示す。 F_0 が12以下であれば無対策で掘進でき、 F_0 が12以上になれば切羽安定対策が必要になることが分かる。飛騨トンネルにおけるこれまでの実績では、ゾーン②で F_0 が18と最大である。今後 F_0 が20以上になった場合に切羽の安定を保ちながらTBMの掘進を進めるためには別途補助工法の検討が必要と考えられる。

6. まとめ

クラックテンソルを用いた三次元逐次掘削解析を行った結果、以下の知見を得た。

- ①解析で求められた切羽前方のひずみ値が限界値を越える場合、TBM掘進に伴って岩塊が切羽前方に崩落する現象を説明することができた。また、ひずみの分布状況は切羽前方のみに広がり、トンネル断面外には広がらない結果となった。
- ②解析で求められたひずみ分布には異方性が現れ、現場にて観測された切羽の崩落形状と同様な傾向を得ることができた。
- ③亀裂の密度を指標として、切羽安定のための補助工法の要否を判断できることが分かった。
- ④亀裂が多く亀裂密度が大きい区間ではAGFが施工されており、AGFを採用したゾーンでは、切羽前方に大きなひずみが発生しているにも関わらず、注入の効果により切羽の自立性は確保されたことが定量的に示された。

謝辞：解析を行うにあたって、ご指導頂いた関係各位に、この場を借りて謝意を表する。

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, 35-3 (350), pp. 29-34, 1987.
- 2) 不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書, 社団法人地盤工学会岩の力学委員会, 1995.
- 3) 桜井春輔:都市トンネルへのNATMの適用, 土木学会関西支部講習会テキスト, 1987.