

# さぐり削孔による切羽前方予測と地山挙動について

## PREDICTION OF GEOLOGICAL CONDITION OF FORWARD TUNNEL FACE WITH DRILLING ENERGY AND THE BEHAVIOR OF TUNNEL EXCAVATED

皆川聡一<sup>1)</sup>・荒川宗久<sup>2)</sup>・伊藤毅浩<sup>3)</sup>・橋詰 茂<sup>4)</sup>

Souichi MINAGAWA, Munehisa ARAKAWA, Takehiro ITOH and Sigeru HASHIZUME

On tunnel excavation, It has been important for safety and economy to predict of geological condition of forward tunnel face. In Sekiya-Tunnel, we have excavated the prediction method using drilling energy that is calculated by hydraulic pressure and drilling velocity from exploring drilling.

This paper describes that the forward geological condition is extrapolate from the behavior of drilling energy, and this method is useful the one of data of management of construction.

**Key Words:** NATM, exploring drilling, prediction of geological condition, management of construction,

### 1. はじめに

山岳トンネルの施工では、安全の確保や経済的な工程の確保等の点から、切羽前方地山の性状把握は重要な課題の一つとである。また、トンネル支保パターンは事前の調査結果等をもとに設定されているが、実際には掘削後の切羽の状態と既掘削区間の状況から判断し決定されることが多い。これは、設計段階でトンネル掘削位置周辺の地山性状を精度良く把握することが難しいといったこともその理由の一つに挙げられる。

東北横断自動車道酒田線（山形自動車道）関谷トンネル工事では「さぐり削孔」の削孔データを利用し、ジャンボの油圧とノミ下がりから求まる打撃エネルギーによって定量的に地山性状の評価を行う切羽前方探査<sup>1)</sup>を施工時の一工種として採り入れ連続的に実施している。その結果、打撃エネルギーの変動から切羽前方の地山性状の変化が推測可能であり、施工管理の一資料として利用できることが示されたのでここに報告する。

### 2. 関谷トンネルの概要

高速自動車国道東北横断自動車道酒田線（山形自動車道）関谷トンネルは、山形県東田川郡朝日村に位置する全長 1,958m の 2 車線トンネルである。周辺の地質は新第三紀中新世の早田川層と大綱層が基盤岩で、これを覆って月山溶岩・泥流堆積物・段丘堆積物および崖錐堆積物が分布している。終点側の STA.26+58～11+50 付近の約 1200m 間には変質安山岩と凝灰角礫岩が分布し、亀裂の多い区間と少ない区間が交互に出現するとともに、断層や突発湧水が予想される箇所がある。

また、起点側の残り約 750m 区間では凝灰質泥岩に含まれるスメクタイトによるスレーキングや盤膨れ等も予想されている。図-1 に当トンネルの位置図を、図-2 にトンネル地質縦断面図を示す。地質調査結果によれば、

1) 日本道路公団鶴岡工事事務所

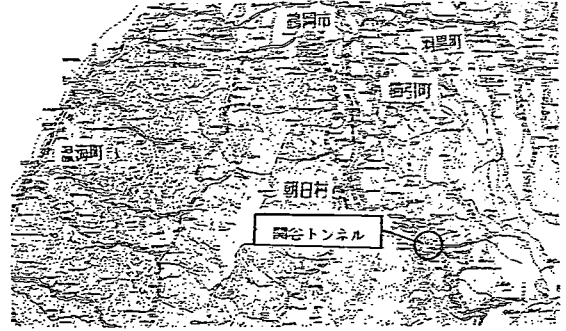
2) 前田建設工業（株）東北支店 関谷トンネル作業所

3) 前田建設工業（株）東北支店 関谷トンネル作業所

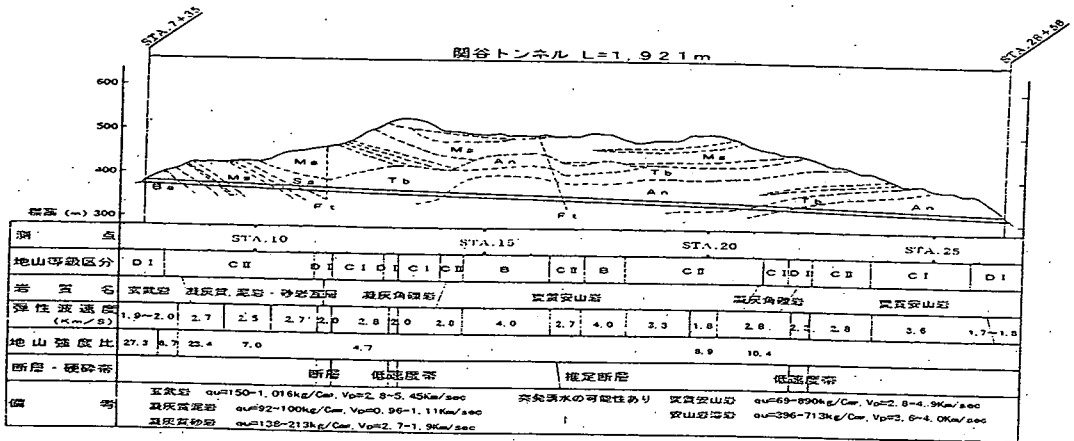
4) 正会員 前田建設工業（株）技術研究所

変質安山岩は「暗緑～暗紫灰色の溶岩であり、割れ目は不規則で、岩は硬い。」また、凝灰角礫岩は「径 5～50cm の角礫を含み、マトリックスは砂～火山礫様で硬い。無層理で礫も雑混入する。」と記載されている。実際に掘削を行った切羽の状態も地質調査結果の記述に近く、岩自体の強度は硬いものの亀裂がランダムに多数発達する地山であった。但し風化・変質は、想定よりも強く受けている様子が伺えた。

なお、当トンネルでの掘削は、補助ベンチ付全断面掘削工法の発破方式で実施されている。



図—1 関谷トンネル位置図



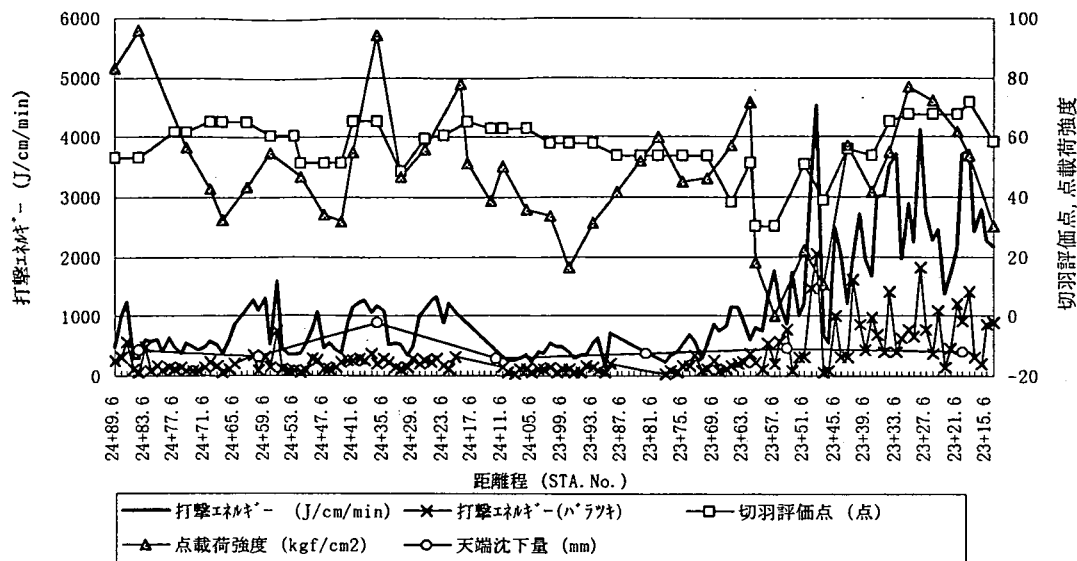
図—2 トンネル地質縦断面

### 3. 打撃エネルギーによる切羽前方地山の予測

打撃エネルギーとは、ドリフターの打撃力によってビットが岩石を破砕するのに必要なエネルギーと削孔速度から求められる値である。著者らは、この打撃エネルギーは主に岩石の硬軟によって変化するものと考えた。従って、1回の前方探査（1＝約 30m）の中で打撃エネルギーが大きくなれば岩は硬くなり、逆に小さくなっていけば軟らかくなっていくことが想定される。また、短い区間で急激にエネルギーが上昇すれば、現在の地山に対して強度の極端に高い転石などの存在が、急激に低下し再び元に戻るような現象が見られた場合には粘土層の狭在等が考えられる。

さらに、当手法による打撃エネルギーは 20cm 削孔毎のデータから求められるので、ある削孔長（例えば 1 進行長＝1.2m）に含まれる 20cm 単位の打撃エネルギーのバラツキの大きさが岩盤の均質さの程度を表しているものと考えた。すなわち、比較的均質と見なせる地山の場合打撃エネルギーのバラツキは小さくなり、断層や破砕帯などの区間では打撃エネルギーのバラツキが大きくなっていくものと考えた。

以上の想定のもとに、STA.24+89.6～STA.23+19.4 の約 170m 区間を試行区間として、打撃エネルギーと掘削後の切羽で得られる各種の情報とを比較した。打撃エネルギーと各種データの深度方向の分布を図—3 に、ある打撃エネルギーの範囲における点載荷強度の傾度を図—4 に示す。さらに、試行区間における結果から作成した、打撃エネルギーによる地山の評価区分を表—1 に示す。



図—3 試行区間における打撃エネルギーと各種データとの関係

表—1 打撃エネルギーによる地山の推定方法

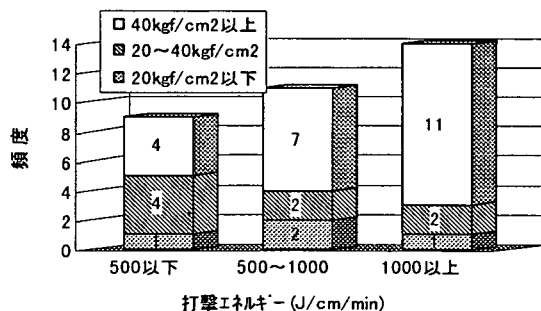
|                  |     |       | 打撃エネルギー                    | 地山の評価    | 切羽評価点の傾向                                   | 沈下量の傾向 |
|------------------|-----|-------|----------------------------|----------|--------------------------------------------|--------|
| パ<br>タ<br>ー<br>ン | I   | I-1   | 1 進行長 (1.2m)               | 1000 以上  | 点載荷強度 $\sigma \geq 40 \text{ kgf/cm}^2$ 以上 | 高くなる   |
|                  |     | I-2   | 当たりの打撃エネルギーの平均値            | 1000~500 | $\sigma \geq 40 \text{ kgf/cm}^2$ 以上       | 不明     |
|                  |     | I-3   |                            | 500 以下   | $40 > \sigma \geq 20 \text{ kgf/cm}^2$     | 低くなる   |
|                  | II  | II-1  | 打撃エネルギーの深度方向への変化           | 上 昇      | 良くなる                                       | 高くなる   |
|                  |     | II-2  |                            | 変化なし     | 現状のまま                                      | 少なくなる  |
|                  |     | II-3  |                            | 下 降      | 悪くなる                                       | 低くなる   |
|                  | III | III-1 | 1 進行長 (1.2m)               | 大        | 強い破碎を受けている                                 | 低くなる   |
|                  |     | III-2 | 当たりの打撃エネルギーのバラツキ           | 中        | 亀裂が発達する(現状の地山)                             | 不明     |
|                  |     | III-3 |                            | 小        | 比較的亀裂が少ない                                  | 高くなる   |
|                  | IV  | IV-1  | 1 回の探査 (約 30m) 中に現れる局所的な変動 | 上 昇      | 新鮮な岩の部分が出現する                               | 高くなる   |
|                  |     | IV-2  |                            | 変動なし     | 現状のまま                                      | 不明     |
|                  |     | IV-3  |                            | 下 降      | 粘土層を狭在する                                   | 低くなる   |

試行区間における地山は、全体に亀裂が発達し、破碎されていた。また、大局的には均質な地山であった。

図—3を見ると、打撃エネルギーと点載荷強度試験の傾向は、同様の動きを示すが切羽評価点については、各切羽毎に僅かな変化はあるものの変動は小さく、ほとんどが50~60点に集中している。このことは、計測結果にも現れており、沈下量も平均して10mm程度で収束している。

打撃エネルギーと点載荷強度の関係は、図—4に示すように、大半が40kgf/cm<sup>2</sup>以上の強度を持っているが打撃エネルギーが小さくなれば40kgf/cm<sup>2</sup>以下の岩の出現頻度が、増えてくることが明らかとなった。

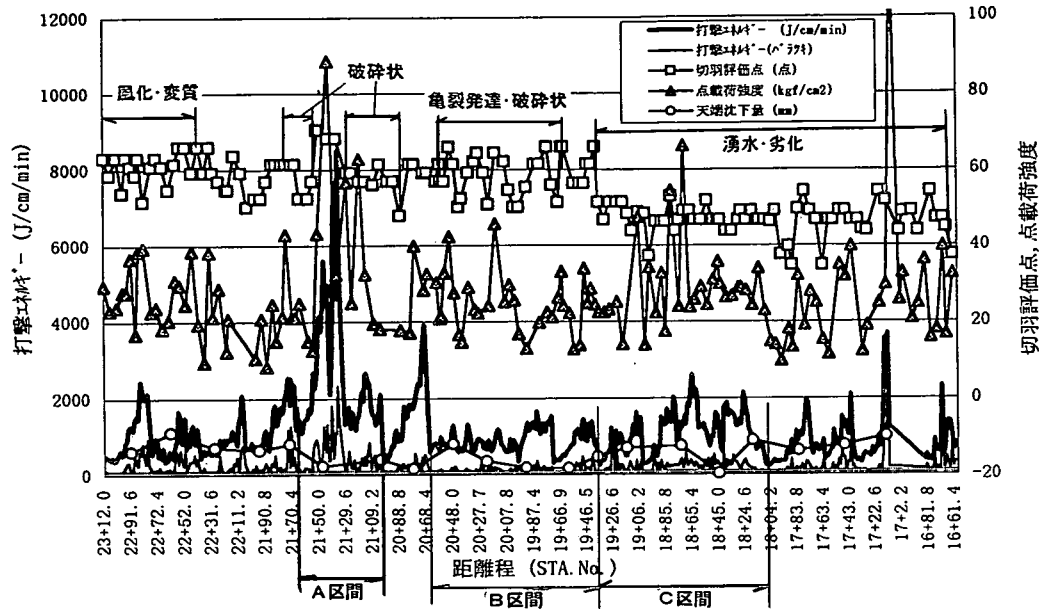
打撃エネルギーを用いて切羽前方地山の推定が可能であると判断されたので、引続き前方探査による地山の推定を行いながら施工を進めていくこととした。



図—4 打撃エネルギーと点載荷強度の関係

4. 結果と考察

図—5に打撃エネルギーと掘削後に得られた各種のデータを、距離程を横軸に取ったものを示す。今回は、図—5に見られる打撃エネルギーに特徴があると思われる区間、および、掘削後の切羽評価点などに顕著な違いが見られる区間のA～Cの3区間について、切羽前方探査実施時の想定と掘削後の結果について検討を行う。表—2に、3区間の想定と結果を示す。



図—5 STA.23+19.4 以降の打撃エネルギーと各種データとの関係

表—2 前方探査実施時の想定と掘削後の状況の比較

| 区 間<br>(STA. ～ )                  | 判断項目                                              | パターン                         | 想 定<br>想定される地山状況                                                                | 総合評価                                                                          | 結 果                                                                            |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| A 区間<br>(STA.21+68.0<br>～21+3.2)  | 打撃エネルギーの値<br>変化の傾向<br>バラツキの程度<br>局所的な変化           | I-1<br>II-1<br>III-2<br>IV-2 | 点載荷強度 40kgf/cm <sup>2</sup> 以上。<br>一度良くなるが元に戻る。<br>ほぼ均質と考えられる。<br>一部弱層を含む可能性あり。 | 現在切羽に見られる地山に比べて良くなっていくものと思われるが、連続性は短く再び元に戻るものと想定される。                          | 打撃エネルギーの上昇している区間については岩の強度も大きくなっていき、ほぼ想定通りであったが、切羽には亀裂が比較的多く切羽評価点は予想より高くなるなかった。 |
| B 区間<br>(STA.20+66.0<br>～19+39.3) | 打撃エネルギーの値<br>変化の傾向<br>バラツキの程度<br>局所的な変化           | I-2<br>II-2<br>III-2<br>IV-2 | 点載荷強度 40kgf/cm <sup>2</sup> 以上。<br>ほぼ一定である。<br>ほぼ均質と考えられる。<br>特になし。             | 現状の地山が比較的長い区間連続しているものと想定される。<br>切羽評価点に関しても特に大きな変動は見られないものと考える。                | 切羽には亀裂が発達し、全体に破碎状であったため、切羽毎の岩相の変化が激しく切羽評価点の変動も比較的大きくなった。                       |
| C 区間<br>(STA.19+38.6<br>～18+11.4) | 打撃エネルギーの値<br>変化の傾向<br>バラツキの程度<br>局所的な変化<br>削孔時の観察 | I-3<br>II-2<br>III-2<br>IV-2 | 点載荷強度 20～40kgf/cm <sup>2</sup><br>ほぼ一定である。<br>ほぼ均質と考えられる。<br>特になし。<br>湧水が確認された。 | 地山強度も低下し、湧水が認められたことから断層破碎帯の存在が想定されるが、打撃エネルギーに局所的な変動が見られないことから、その位置については不明である。 | 地山強度に関しては水の影響で劣化して強度が低くなっていることは想定できたが、湧水のためにさらに切羽評価点が低くなった。                    |
| その他の区間                            | 打撃エネルギーの値<br>変化の傾向<br>バラツキの程度<br>局所的な変化           | I-2<br>II-2<br>III-2<br>IV-2 | 点載荷強度 40kgf/cm <sup>2</sup> が大半を占める。<br>ほぼ一定<br>ほぼ均一<br>上記区間以外は認められず            | 岩の強度はあるものの比較的亀裂が発達している。切羽評価点にも大きな変化は無いものと考えられる。                               | ほぼ想定通りの地山が連続的に出現している。                                                          |

A,B,C,の各区間における想定と結果について考察すると、以下の通りである。

(1) A 区間 (STA. 21+68. 0～21+3. 2)

この区間は、岩の強度については点载荷強度試験結果からほぼ想定通りであったと言える。一部に強度の低くなった箇所もあるが、切羽で採取される試料にバラツキがあることを考慮すればほぼ誤差範囲なのではないかと考えられる。

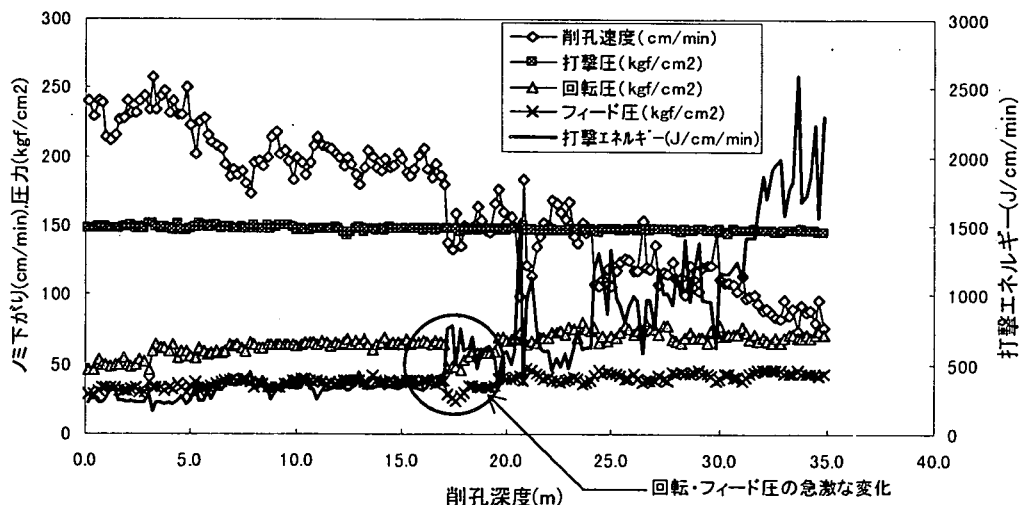
一方、亀裂に関しては、当区間は全体に破碎されており、比較的亀裂の発達した区間であったが、打撃エネルギーの1進行長あたりに含まれるバラツキからは特に顕著な変化は認められなかった。

(2) B 区間 (STA. 20+66. 0～19+39. 3)

この区間での打撃エネルギーは、当トンネルの中では一般的な傾向を示している区間であったが、実際に切羽評価点と比較した場合、各切羽の亀裂間隔や亀裂の状態などに違いが出たため結果として切羽評価点は上下に繰り返し変動するような結果となった。しかしながら、連続した区間として地山を評価する場合、各切羽毎の評価点の変化だけでなく着目する区間全体の傾向として評価を行うべきである。そのような観点から当区間の地山性状を評価した場合、切羽評価点として 60 点を中心に同じ様な地山が連続して分布しているものと判断でき、想定通りであったと考えられる。

(3) C 区間 (STA. 19+38. 6～18+11. 4)

さぐり削孔実施時の観察状況から、湧水が確認されており、実際の掘削時にも切羽から最大 150l/mn の湧水を記録している。その為、今までの打撃エネルギーと地山性状の関係から想定される評価よりも実際の地山の評価は低いものとなっている。しかし、図—6 に示すように、20cm 単位で測定される生データでは、削孔時に湧水量の増加が確認された深度付近で、回転圧およびフィード圧が一時的に減少するといった変動が見られた。つまり、削孔時のデータによって、湧水量の増加する位置等も推定可能であることが明らかとなった。



図—6 多量湧水の認められた区間での削孔データの状況

(4)計測結果との比較

当トンネルにおける天端沈下計測の収束値は、図―5に示すとおりであるが、図―5からも分かるように変位量はほとんど無く収束している。一般に地山強度が低い程、トンネルの変形は大きくなると考えられており、打撃エネルギーの変化から変位についても予測が可能ではないかと考えたが、今回のトンネルのように全体的に見れば均質な地山で、かつ変形量の小さい場合、顕著な違いは見られなかった。ちなみに、STA.21+95.0 の断面で支保部材に発生する応力も計測している。それぞれの収束値を表―3に示す。

表―3 支保工発生応力計測結果(STA.21+95.0)

| 項 目                | 位 置           | 左根足部  | 左肩部   | 天端部   | 右肩部   | 右根足部  |
|--------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 吹付けコンクリート応力        |               | 9.02  | 21.86 | 4.76  | -0.79 | 5.77  |
| 鋼製支保工応力<br>(H-125) | 軸力 (ton)      | 24.21 | 26.26 | 13.83 | 15.03 | 16.57 |
|                    | 曲げモーメント (t・m) | -0.16 | 0.06  | 0.19  | -0.27 | -0.14 |
|                    | せん断力 (ton)    | -0.32 | 0.34  | 0.33  | -0.14 | -0.12 |
| 坑内変位測定 (沈下量) (mm)  |               | 15.8  |       | 13.7  |       | 11.3  |

なお、表―3に示される吹付け応力・鋼製支保工軸力は、圧縮方向を正とし、曲げモーメントは内側引張りを正としている。また、沈下量に関しては、沈下方向を正とする。

1 断面だけの計測結果ではあるが、打撃エネルギーが、1000 (J/cm/min)程度を示す地山の支保部材に発生する応力は、採用した支保パターン (CⅡ-b) では許容範囲内で収束している。数値的には支保部材に発生している応力は小さいものであるが、当トンネルのように亀裂の発達している地山では、総合的に判断すれば採用した支保パターンは妥当なものであったと考える。

5. おわりに

以上のようにさぐり削孔時の削孔データを利用した打撃エネルギーという指標を用いて切羽前方の地山性状を推定するとき、打撃エネルギーの値から岩の強度が、深度方向への変化の傾向やバラツキの大きさの程度から地山性状をある程度予測できることが明らかとなった。

さらに、連続的に実施し、実際の掘削によって切羽に出現した地山状況と想定時の地山状況を比較検討していくことによって推定精度を向上させていくことが可能であり、打撃エネルギーの状態から地山の状態をある程度想定できるので施工管理の一資料として十分活用できることが明らかとなった。

当トンネルにおいては、残り 500m 程度で凝灰質泥岩を主体とする区間に入っていくことになるが、その区間では、現在とは異なる地山性状を示すことが予想される。今後もこの打撃エネルギーによる切羽前方地山の推定を行っていき、地質の違いによる新たな知見が得られた場合には、別の機会を得て改めて報告したい。

6. 参考文献

1).橋詰茂, 井上博之: 削孔データを用いた切羽前方探査システムの研究, 第10回岩の力学国内シンポジウム, 1998.1