

八鹿日高道路三谷トンネル(南側)工事 におけるトンネル掘削の生産性向上

下徳 直毅¹・大西 勝²

¹清水建設（株） 神戸支店 土木部 （〒651-0086兵庫県神戸市中央区磯上通4丁目1-13）

²清水建設（株） 神戸支店 土木部 （〒651-0086兵庫県神戸市中央区磯上通4丁目1-13）。

三谷トンネル(南側)工事では、近隣への配慮よりずり出し方式を連続ベルトコンベヤとしたが、早期開通に向けて効率の良いトンネル掘削サイクルの改善が求められた。また、複数の断層破碎帯の出現が予測され、その正確な位置および性状の把握と適切な支保の選択が課題であった。そこで、S-マックスシステムおよびTSP303と水平調査ボーリングの組合せによる切羽前方探査の導入により、トンネル掘削の生産性を向上し早期到達を達成することができた。

キーワード トンネル掘削、生産性の向上、急速ずり処理、切羽前方探査、断層破碎帯

1. はじめに

近年の山岳トンネル工事では、社会的要請のなかで計画から設計および工事発注までのスピードが速くなると同時に、様々な制約条件下での施工と早期の供用開始が強く求められている。トンネル施工では、当初設計と異なる地質構造や事象に遭遇するリスクがある中で、昼夜の掘削作業は切羽に集約されており、施工速度の改善は難しいものとなっている。トンネル施工の生産性を向上させるためには、順調に掘削できるときに最大限の進捗を生み出すとともに、不良地山の出現区間を早期に予測して適切な施工を行うことで、切羽崩落などの工程遅延の要因を取り除くことが重要となる。

本稿では、八鹿日高道路三谷トンネル(南側)工事にて実施した、ずり出し作業の効率化を図るS-マックスシステム(Speedy Mucking System)の開発と導入結果、および切羽前方の地山を効率よく三次元把握した、TSP(Tunnel Seismic Prediction)探査と先進コアボーリングの組み合わせによる切羽前方探査について報告する。

2. S-マックスシステムの開発

一般的な発破掘削の施工サイクルを図-1に示す。ずり出し作業と、一次吹付けから支保工の建込みおよび二次吹付けまでの支保作業が、それぞれ全体の約30%を占め、トンネル掘進を支配する大きな要素であることがわかる。

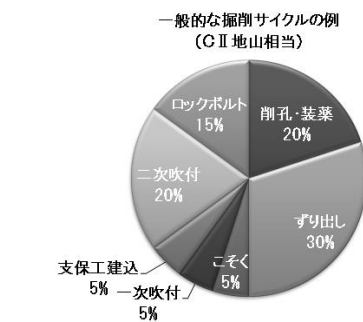


図-1 一般的な掘削サイクルの例

掘削サイクルタイムを短縮するためには、ずり出し作業を短縮し、次工程の支保作業をどれだけ早く開始できるかがポイントとなる。地山等級CⅡ以上の良好地山では、掘削方式に発破掘削が適用される場合が多いが、発破掘削では、機械掘削とは異なり発破の合図とともに一時的に大量のずりが発生する。ずり出し作業全体にかかる時間は、一進行長あたりの掘削体積量にほぼ比例し、配備された機械設備に依存している。

(1) 概念設計

近年のトンネル施工では、ずり出しに連続ベルトコンベヤ方式を採用する現場が増えている。この方式は、大量のずりを連続的に運搬できるとともに、タイヤ方式に比べて運搬車両の往復走行がないことで、トンネル特有の細長い作業空間では、作業の安全性が向上し、坑内大気や路盤などの坑内環境を良好に維持しやすくなる。一方、この設備を施工途中から変更することは、費用が大

きくかさむため、この点では柔軟性に乏しい設備といえる。そこで、連続ベルトコンベヤ方式によるずり出し設備においても、地山状況の変化に適宜対応できる効率の良い、急速ずり処理方法の開発を行うこととした。

開発の基本方針を次の様に定めた。①配備されている機械設備の能力を最大限に利用し、より効率よく稼働させる。②地山状況に応じて、ずり処理が柔軟に対応できるシステムとする。③システムの導入によって発生する安全上のリスクは確実に排除する。④開発システムは、過大な設備や大型化をさせてコストアップを抑制する。

連続ベルトコンベヤ方式での標準的な機械編成を図-2に示す。自走式クラッシャ（処理能力300t/h）と連続ベルトコンベヤ（250t/h、ベルト幅610mm）を組み合わせ、サイドダンプ式ホイールローダ（バケット容量3.1m³）で切羽下のずりを掻き集めてクラッシャに積み込むものである。

連続ベルトコンベヤ方式によるずり出しを採用している現場では、発破での退避距離を80m程度として、支保工建込みや吹付け作業に必要な距離を約40～60m、その後方からクラッシャまでの約40～20mは、重機車両の離合・待機場所、動力の電源設備が配置さる。クラッシャの切羽側40m程度の間は、工夫により有効活用できるスペースとなっている。ずり出しの状況とホイールローダの動きをみると、切羽下でずりを掻き集めたのちにクラッシャまで移動し積込みを行っている間は、切羽下は作業のない待ち状態（途中からはかき寄せ作業やこそく作業が入る）となっている。また、切羽下のずりを掻き集める時間が長くなると、ベルトコンベヤ上にずりが満載されていない状況が見られる。

(2) 実証試験

a) ホイールローダ2台による連続処理

汎用のホイールローダ2台により、ずり処理を交互連続的に行う検討を行った。これにより、切羽下の作業待ち状態を最小化するとともに、ホイールローダのオペレータは、クラッシャのクラッシング状況に応じて積込

み、あるいは仮置きをおこなうことで、連続ベルトコンベヤへの積載量を最大化し、設備能力を最大限に発揮させることができる。仮置きしたずりは次工程の吹付け作業中に1台のホイールローダで二次ずり出しを行うものとした。

2台のホイールローダによるずり処理の実証試験（掘削断面積77.5m²、支保パターンCⅡパターン）を行い1サイクルの時間を比較した結果、ずり出し時間は83分から74分となり9分程度短くなった。

b) 移動式伸縮ベルトコンベヤによる並行作業

一方、切羽下のずり処理途中より次工程の吹付け作業を並行しておこなう方法の検討を行った。ホイールローダでのずり処理・運搬作業と吹付け作業を狭隘な切羽下で並行して実施するには、作業員の安全を確保するために強固なプロテクターを設置するなどの、より特別な安全対策が必要になると考えられた。そこで、移動式伸縮ベルトコンベヤ台車（図-3）を考案し、旋回が主であるバックホウで積込みを行うことで、重機の稼働範囲を最小化させることとした。これは後方に伸張すると約25mになるベルトコンベヤ装置を汎用の履帯台車に搭載した運搬装置である。

急速ずり処理のイメージは、初めにホイールローダによるクラッシャへの積込みと移動式伸縮ベルトコンベヤ台車による後方へのずり仮置きを並行して行う。ある程度ずり処理が進んだ段階で、移動式伸縮ベルトコンベヤによるずり処理を継続しながら、支保作業の一次吹付け作業を開始する。後方に下がったホイールローダは、仮置きされたずりをクラッシャへ積込むというものである。

こちらについても、実現場の協力を得て、ずり処理の実証試験（掘削断面積79.1m²、支保パターンDⅠ-hパターン）を行った（図-4）。1サイクル比較では、3.1m³ホイールローダ単独での作業時間が45分であったのに対し、0.7m³バックホウの積込みによる移動式伸縮ベルトコンベヤ台車との併用では、作業時間は36分となり9分程度短くなった。

c) 実証試験のまとめ

急速ずり処理に係る二つの実証試験の考察をまとめる。

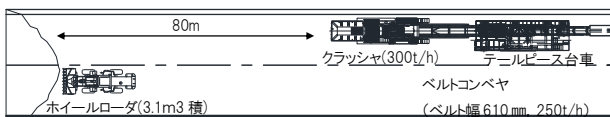


図-2 機械編成

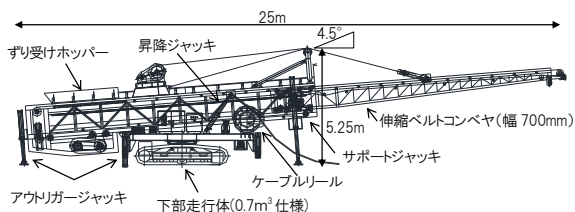


図-3 移動式伸縮ベルトコンベヤ台車



図-4 実証試験（移動式伸縮ベルトコンベヤ台車）

①2台のホイールローダによる急速ずり処理は、次工程への引き渡しに有用である。②吹付け作業中の2次ずり出しでの安全は、立ち入り禁止措置と安全設備の配置で確保する。③移動式伸縮ベルトコンベヤ台車は、移動段取りに時間がかかる、坑内での駐機場所の確保、硬岩では積込み部にクラッシャが必要などの課題がみられ、実施工への適用性はまだ低いと判断された。

3. S-マックスシステムの現場導入

S-マックスシステムは、導入効果の予測シミュレーション、ずり出し作業時の安全管理、そして2台のホイールローダによる急速ずり処理（図-5）の3システムを総称している。掘進速度を上げるために、施工中の三谷トンネル（南側）工事への導入を実施した。

(1) 導入効果の事前予測

はじめに導入効果を予測シミュレーションで検討した。この効果予測シミュレーションは、掘削断面積、切羽下からクラッシャ積込み位置までの移動距離、仮置き場の位置および面積、ホイールローダ2台による処理量、時間とともに変化する2台の離合位置と拡大する仮置き場の面積を定式化し、2台相互の動きを干渉し作業効率を低下させる影響係数 k を導入した関数(1a)を用いている。

$$F(m) = kW(t)/m \quad (1a)$$



図-5 S-マックスシステム

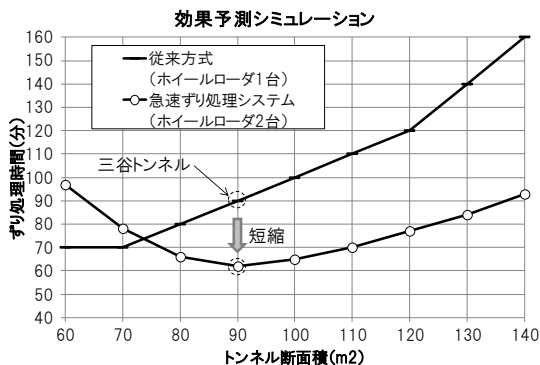


図-6 効果予測シミュレーション

影響係数 k は、ホイールローダ1台によるずり処理時間 $F(1)$ に対して、ホイールローダ m 台でのずり処理時間が単純に $1/m$ 倍とならないことを意味する。トンネル断面積が大きい場合は、標準のずり処理時間に対して概ね半分程度の時間短縮となるが、トンネル断面積が小さくなるに従い相互が干渉してずり処理時間が増加傾向に転ずる。三谷トンネル（南側）工事（掘削断面積約91m²）でのずり処理時間は、約90分から約60分への短縮が見込まれた（図-6）。

(2) 安全管理

安全管理の概念を図-7に示す。ずり処理作業中のホイールローダによる重機接触災害の防止を図るため、作業エリアの前後へ「立ち入り禁止措置」と稼働中のホイールローダを停止させるための「重機呼び出し装置」を配置する。これらの設備は、トンネル施工において標準化されている汎用の安全設備を組み合わせたものであるが、導入の初期は関係者が慣れるまで、監視員による直接確認もあわせて行った。

(3) S-マックスシステムの導入効果

2台のホイールローダが交互に移動しながら、各オペレータは、「積込み」または「仮置き」を確認しながらずり処理を行った（図-8）。導入前と導入後の掘削サイクルタイムの比較を図-9に示す。地山等級の変化（CII, CI）や多少の機械トラブルを含めた平均値となっているが、ずり処理時間は導入前の94分から65分になり、掘

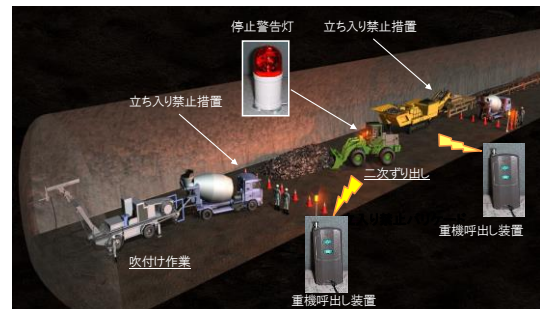


図-7 安全管理システム



図-8 S-マックスシステム実施状況

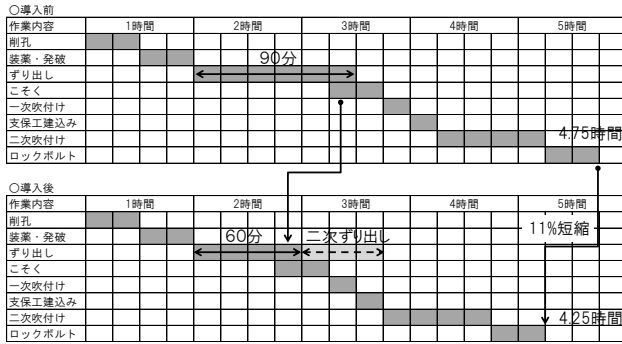


図-9 掘削サイクル（導入後11%短縮）

削サイクルタイムは約11%短縮された。また、作業員からは、ずり置きの手順が明確に定められたことで、クラッシャの詰りが発生した場合でも慌てることなく冷静な対応をとることができるとの意見が聞かれた。

一方、実用での課題も明らかになった。トンネル湧水のある区間では、仮置き場周りの排水処理が不適切で仮置きずりが浸水すると、泥濁化した細粒分とずりが同時にクラッシャへ投入され、フィーダー部に絡み付いて目詰まりを起こす原因となった。また、仮置き場の路盤に岩盤の風化層があった場合、二次ずり出し時に風化層を掘り込んでしまい、掘削進行に伴いクラッシャを前進させたときに機体が傾き、後方の搬出ベルト上をずりが滑って、ずりを排出できない不具合が発生した。これらの課題については、改善を重ねている。

4. 切羽前方探査

三谷トンネル（南側）工事では、事前の地質調査により、No. 26+90からNo. 27+40付近に約50mにわたる断層破砕帯の存在が予測され、その前後も弾性波速度の低下域となっていた（図-10）。この区間に対して適切な支保パターンを選定と安全なトンネル掘削を行うために、切羽前方の地山状態を効率的に精度よく把握することとした。

TSP303は、トンネルに特化した弾性波による切羽前方探査システムであり、切羽前方の弾性波反射面や三次元的な弾性波速度の分布状況、岩盤物性値の評価を行うことができる。これと水平調査コアボーリングを組み合わせることで、実物とその拵がりを確認することとした。

TSP303探査を先行実施し、得られた情報よりボーリングの適切な位置と方向を決定した。水平調査ボーリングでは、岩石コア採取の他に原位置試験を行い、地山の掘削挙動を確認する三次元FEM解析用の物性値を求めた。

(1) TSP303探査の結果

TSP303での探査結果を図-11～13に示す。Vp、ポアソン比、ヤング率の3要素を低・中・高の3段階に区分し、これを総合して評価した。

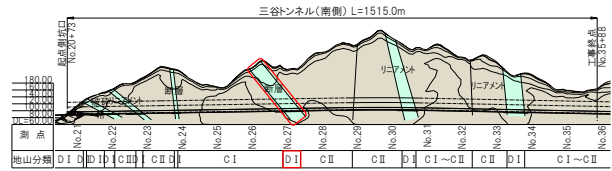


図-10 地質縦断面図

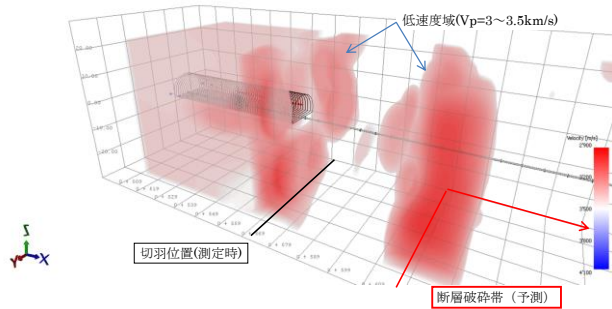


図-11 弾性波速度 (Vp) 分布（3次元表示）

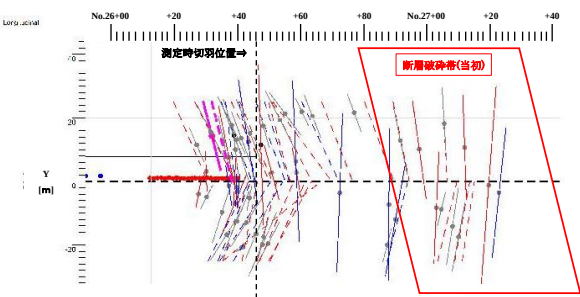


図-12 境界面(弾性波反射面)分布（縦断）

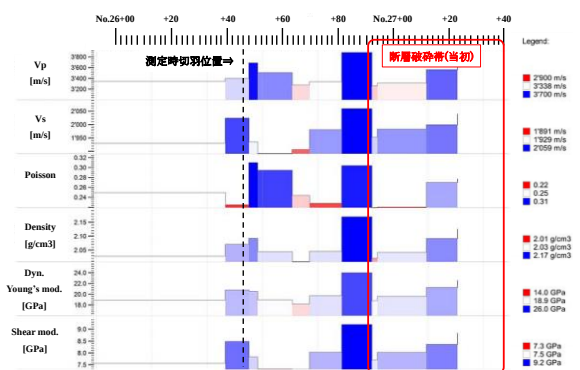


図-13 岩盤物性分布

・ No. 26+30～No. 26+67付近の区間は弾性波速度が急変する境界面が1mピッチで検出され、全体的にき裂の多い区間と推定された。

・ 特にNo. 26+64～No. 26+66およびNo. 26+92.5～No. 26+94.5区間は3要素の内2要素が低く、破砕帯と推定。またNo. 26+73付近には1m程度の強反射面（弱層部）の介在が推定される。

・No. 26+75以降は境界面も少なくなり、岩盤状態が徐々に良くなる。No. 27+10以降は $V_p > 3.66\text{km/s}$ となり、良い岩盤状態にあると推定。ただしNo. 27+12, No. 27+20付近には1m程度の弱層部の介在が推定される。

・岩層の走行・傾斜は、事前調査の傾斜とは異なりトンネル軸にほぼ直交して分布構成されると推定。

以上より、全体的に境界面が多く存在することから、複雑に変化する地層であるといえる。特にNo. 26+30～No. 27+10は全体的にき裂の発達した地山であり、トンネル掘削時においては、天端、側壁からの崩落が懸念される結果となった。一方 V_p を見ると最小 3.2km/sec 、最大 3.8km/s と変化の割合が少なく、 V_p の最小値からみても長く連続する破碎帯の存在は無いと判断された。

(2) 水平調査ボーリング結果

TSP探査の結果をうけて、水平調査ボーリングはNo. 26+66から90mの削孔・コア採取を実施した。図-14に断層破碎帯位置図を示す。予測されていた断層破碎帯(事前調査)に対し、TSP303で推定された破碎帯位置と採取コアより破碎帯と判断した箇所を併記する。

ボーリングより、地山状況は以下の様に推測された。

- ・岩種は事前調査と同じ安山岩質溶結凝灰岩である。
- ・破碎帯は予想されたNo. 26+90より手前から出現し、特にNo. 26+81.9～26+87.8は連続した破碎帯となっている。
- ・No. 26+90～No. 27+40の50m区間全体が破碎しているのではなく、中硬質のき裂性岩片状と礫状が主体であり、その中にコアの原型復旧不可である破碎帯が分布している。
- ・密着したき裂はほとんど見られず、風化物を挟むか、風化物の流出により噛み合わせが悪くなっている。よって破碎帯以外の箇所においても、トンネル掘削時に切羽付近からの剥落が発生するおそれがあると想定された。

(3) 切羽前方探査結果の比較

先進ボーリングおよびTSPの結果から、破碎帯は事前調査において推測されたようにNo. 26+90～No. 27+40間に連続して出現するものではなく、その前後区間を含めて分布する互層状のき裂性地山の所々に、破碎された地山が挟在しているものとした。No. 26+72, No. 27+13, No. 27+23付近の採取コアとTSPの両者で観測された破碎帯がその代表的なものであり、よって支保パターンとしては、部分的な弱部の出現は予想されるものの事前調査から設定されたDⅡ-bパターンではなくCⅡ級の支保パターンにより掘削が可能であると判断された。

(4) 三次元FEM解析結果と破碎帯における支保検証

部分的に出現が懸念される断層破碎帯に対して、三次元FEM解析を実施した。解析に用いる物性値は、No.26+80付近で確認された破碎部において孔内載荷試験を2箇所で行い、変形係数を確認した(表-1)。解析では最小の変形係数であるNo. 1試験結果($E=165.8\text{MN/m}^2$)を

採用し、その他の解析に用いる物性値は、「旧JHトンネル数値解析マニュアル地山物性表」¹⁾のDⅡ相当の値を引用した(表-2)。最大変位量を把握するために、破碎帯相当の物性値がトンネル周辺に様に分布している単一層モデルとして鉛直変形量を求めた。解析結果では、切羽離れに伴う天端沈下(図-15)の最大値が32mmであった。切羽後方のおおよそ2D範囲(16m)で変位が収束している。

トンネル掘削時の地山・支保の健全性を確保するための管理基準として、限界ひずみによる方法²⁾での確認も行った(図-16)。No. 1より、限界ひずみを求めると、降

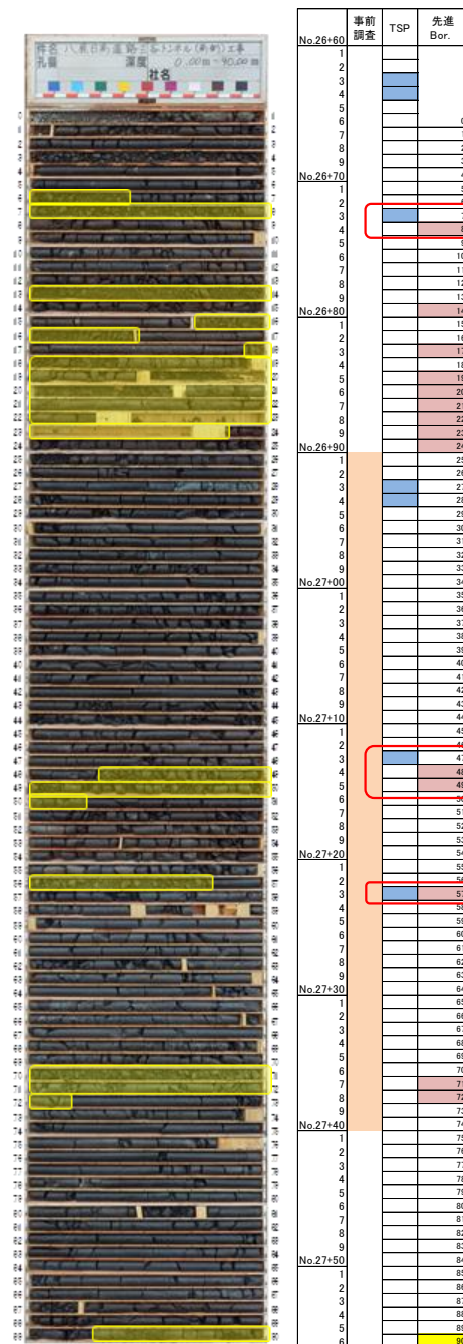


図-14 断層破碎帯位置図

伏応力 859 kN/m^2 (0.8 MPa) $\Rightarrow$ 限界ひずみ 0.4% (下限) となり、三谷トンネル (南側) での上下半掘削完了時のトンネル高さは 8.0 m であることから、天端沈下の管理限界値 (下限) は限界ひずみ $0.4\% \times 8.0 \text{ m} = 32 \text{ mm}$ となる。

三次元FEM解析結果の最終天端沈下量 32 mm と地山の限界ひずみに基づく管理限界値は等しくなり、破碎帯が出現した場合もD I-bパターンを適用することで地山および支保の安定性は確保できるものとした。

(5) A計測結果の検証

実施工での破碎帯区間の支保パターンは、当初設計のD I-bではなくC II-bが採用された。No. 26+73断面でのA計測結果 (沈下量) を図-17に示す。 $32 \text{ mm} \times 1/3 = 10 \text{ mm}$ 以下で収束し、地山と支保の健全性が確保された結果となった。

表-1 孔内載荷試験結果

試験番号	深度	変形係数	降伏応力
No. 1 (L)	1.5m	165.8 MN/m^2	859 kN/m^2
No. 2 (R)	1.8m	397.9 MN/m^2	$2,071 \text{ kN/m}^2$

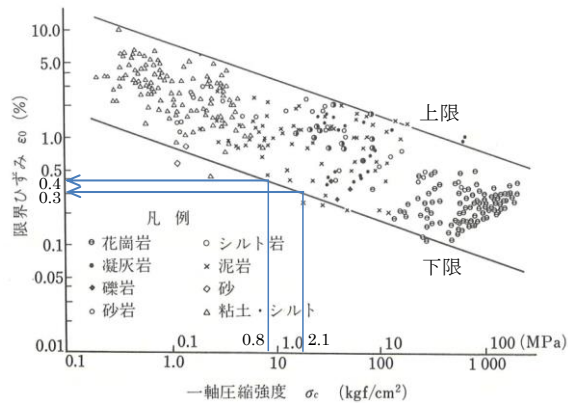


図-16 一軸圧縮強度と限界ひずみの関係

5. おわりに

三谷トンネル (南側) 工事では、トンネル掘削の生産性向上を目的に、切羽前方探査の効率化と急速ずり処理が可能なS-マックスシステムを検討導入し、トンネル掘進の速度改善をはかることができた。

今後もこれらの技術を各現場に展開するとともに、さらなる生産性向上のために、各現場の特性に合わせた技術の開発・ブラッシュアップを進めてゆく。

参考文献

- 1) 旧 JH 試験研究所 試験研究所 道路研究部：トンネル数値解析マニュアル；試験研究所技術資料 第 358 号, p. 3-26
- 2) 櫻井俊輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法；土木学会論文報告, No. 317, P97, 1982. 1

表-2 解析に用いた物性値

項目	単位	値	備考
弾性係数	kN/m^2	165,800	現場試験
ポアソン比		0.35	*) D II 相当
単位体積重量	kN/m^3	21.0	*) D II 相当
粘着力	kN/m^2	200	*) D II 相当
内部摩擦角	° (度)	30.0	*) D II 相当

*) 旧 JH トンネル数値解析マニュアル地山物性表

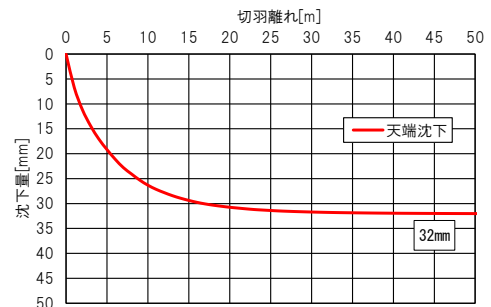


図-15 掘削後の天端沈下量と切羽離れの関係

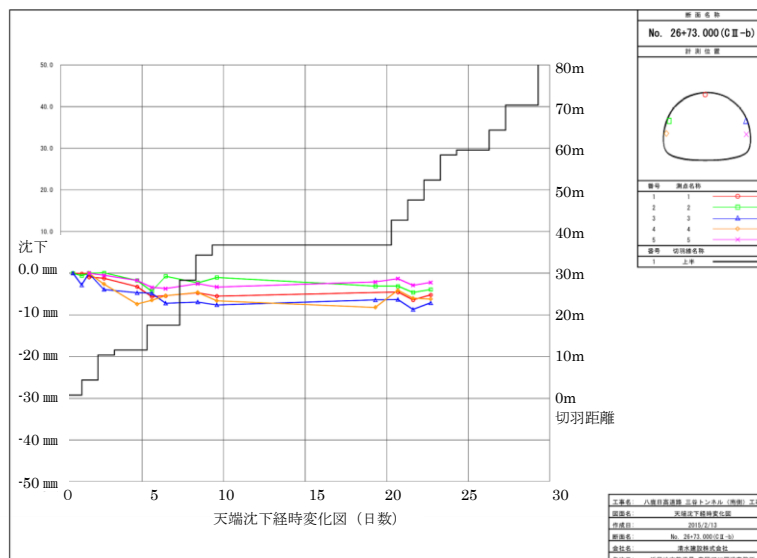


図-17 A計測結果 (天端沈下量) : No. 26+73