

変位の大きい脆弱地山における補助工法の設計と施工に関する一考察

Design and Construction of Auxiliary Method for Weakly Ground Condition with Large Displacement

山田 浩幸*1 大村 修一*2 中村 太一*2
Hiroyuki Yamada Shuuichi Omura Taichi Nakamura
加藤 吉文*3 佐々木正博*3 藤澤 勉*3
Yoshifumi Kato Masahiro Sasaki Tsutomu Fujisawa

要旨

穂別トンネルは全長L=4,323mの山岳トンネル工事であり、西工事では、延長L=1,500mをNATMで掘進中である。当該箇所の地質はメランジュと呼ばれる岩石種の異なる岩体（泥岩、緑色岩、蛇紋岩）が複雑に関係した構造を呈しており、硬軟も様々である。また、工区境の土被りの大きい区間（土被り300m以上）において蛇紋岩の出現が想定される。なお、先行して掘削の進む連絡坑では蛇紋岩が確認され、大きな変位を生じている。

今回の報告では、坑口より70mの泥岩区間における脆弱な地山において、変位の収束状況が悪く大きな変位を生じた箇所で実施した対策工の検討経緯を述べるとともに、本トンネルで取り組んでいる切羽前方探査に基づくトンネル地山評価システム（K-tes）を紹介する。

キーワード：山岳トンネル 切羽前方探査 トンネル評価システム 補助工法 支保パターン

1. はじめに

山岳トンネルでは、事前地質調査によって得られる情報には限界があるため、通常の土木構造物とは異なり、設計では標準支保パターンを用い、施工時に得られる切羽観察や計測結果に基づき地山の変化に応じた最適支保パターンに修正していくことが一般的である。近年、長尺鋼管フォアパイリングをはじめとする補助工法のめざましい進歩により、厳しい環境条件（未固結地山、湧水地山、近接施工等）の下においても安全に施工することが可能となってきた。しかしながら、切羽の急変や突発湧水等で不測の事態によりやむなく切羽休止を強いられる場合も少なくない。

本報告では、変位の大きい脆弱地山で実施したトンネル地山評価システムの適用とその結果に基づく効果的な補助工法の選定について述べ、数値解析（逆解析、予測解析）に基づく支保工の安定性の確認と対策工の妥当性の検証に関する検討結果を報告するものである。

2. 適用トンネルの概要

穂別トンネルは道東自動車道（北海道横断自動車道）の夕張IC～十勝清水ICの間に位置しており、全長L=4,323mの山岳トンネル工事である。西工事では延長L=1,500mをNATMで掘進中である。工事概要を表1に示す。



写真1 トンネル施工状況

表1 工事概要

工事名称	北海道横断自動車道 穂別トンネル西工事	
工事場所	北海道勇払郡むかわ町穂別長和	
工期	平成18年3月～平成21年3月	
発注者	東日本高速道路㈱	
施工者	鴻池・飛鳥特定建設工事共同企業体	
工事内容	延長	L=1,500m（道路土工L=12m含む）
	断面	トンネル延長L=1,500m 掘削断面積A=85.0㎡（DⅠ）
	施工法	NATM
	掘削方式	発破工法
	掘削工法	EⅠ、EⅡパターン（上半先進ベンチカット工法） CⅡ、DⅠ、DⅡ、DⅢパターン （補助ベンチ付き全断面工法）
補助工法	天端安定対策	長尺鋼管フォアパイリング（坑口） 注入式フォアボールリング
	鏡面の安定対策	長尺鏡割、核残し 脚部の安定対策：脚部補強ボルト、仮ハート

*1 大阪本店 土木技術部 *2 東京本店 土木部 *3 東日本高速道路㈱

坑口付近の地質は、中生代白亜紀の中部蝦夷層群と呼ばれる地層で、メランジュと呼ばれる岩石種の異なる岩体(泥岩、緑色岩、蛇紋岩)が複雑に関係した地質構造を呈しており、硬軟も様々に泥岩の卓越した堆積岩が分布している。新鮮な場合はC_M級の中硬質な泥岩であるが、造構運動により、随所に破碎質となっていることが想定されていた。

また、地形的には南北方向の断層が卓越しており、図1に示したような断層に沿った破碎帯の存在が想定された。これらの断層に沿って、坑口付近の泥岩層は、著しく破碎され細片化したせん断帯(シェアゾーン)であった。そのため、湧水などによる劣化で、極度に脆弱化し、岩塊の剥落や天端からの崩落が懸念された。加えて、坑口付近では、新生代第四紀の未固結の地すべり堆積物が、厚く堆積している状況であった。

なお、坑口部 28.7m 区間に関しては、事前の調査ボーリングの結果や断面形状が拡幅断面であることもあり、当初より、天端安定対策として長尺鋼管フォアパイリング(AGF工法)が計画されていた。

坑口部の施工においては、脆弱な地山での掘削時に大きな変位を生じ、支保の変状や小崩落の発生等に直面したが、作業時の安全確保と地山に応じた効果的な補助工法の選定に関して検討を実施した。

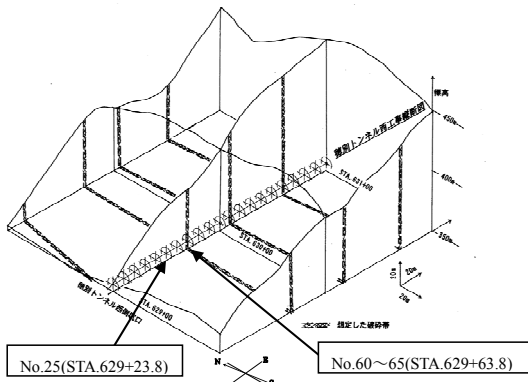


図1 坑口部地質構造

3. 坑口部施工方法の検討

3.1 施工管理手法

トンネルを安全かつ経済的に施工するためには、切羽観察・計測結果に基づく慎重な施工と厳重な計測管理および適切な補助工法の選定が必要となる。

本トンネルでは、先行して施工が完了している避難坑(本坑に併設)の施工データを参考にして、切羽前方探査をコア技術としたトンネル地山評価システム(K-tes)を導入し、前方地山の把握と対策工の検討を行うこととした。トンネル地山評価システムの概要は図2に示すとおりである。

補助工法の選定にあたっては、図3に示すとおり、計測データに基づく地山の変位挙動を把握した上で、前方探査結果を分析・評価することで事前に適切な工法が選定できるものと考えた。

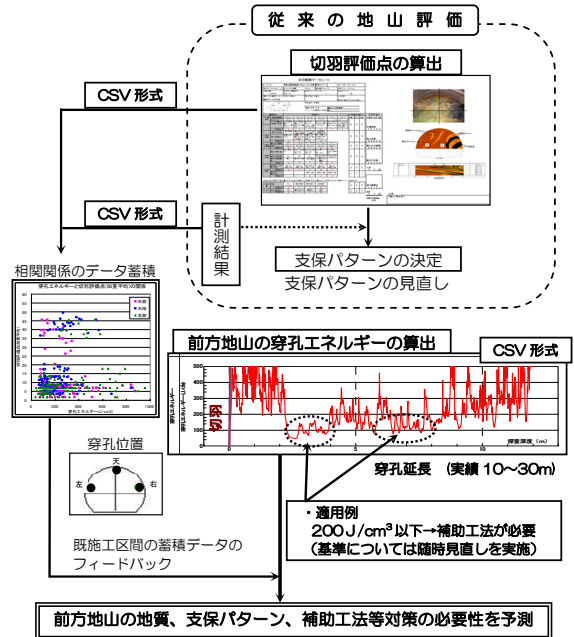


図2 トンネル地山評価システム(K-tes)¹⁾

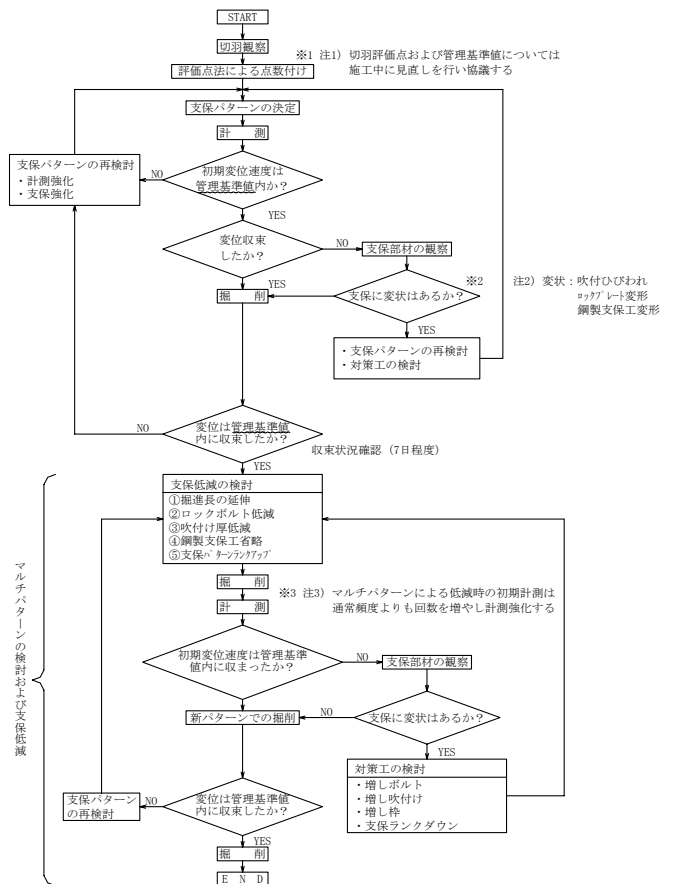


図3 施工時補助工法選定フロー¹⁾

3.2 坑口部における変状対策 (STA. 629+23)

3.2.1 計測結果と変状状況

坑口部の施工においては、補助工法として天端安定対策を目的として当初より計画されていた長尺鋼管フォアパイリングを施工したが、その工法としては、先受け効果を高めるために表2に示す特徴を有するAGF-HITMを採用した。

掘削時には、AGF-HITMの効果により切羽の安定は確保されたものの、図4に示すとおり、計測変位が収束せずにクリープ的に増加する状況であった。特に天端および脚部の沈下が大きく、変状のモードとしてはひしゃげモードを呈し、トンネルの支保工にも変状が見られた。

3.2.2 対策工の経緯

対策工として①支保工連結補強および足元吹付けによる応力緩和や②ロックボルト増し打ち (L=6.0m) を実施したが、収束には至らず計測結果ではだだららと変位が増大していく状況であった。

したがって、トンネルの早期閉合を図ることで変位を収束させることが必要であると判断し、下半掘削を先行してインパート吹付けを施工することにより断面閉合によるトンネル構造の強化と形状による応力緩和を図った。早期閉合の施工により変位は収束しトンネル構造としての安定性を確保することができた。

表2 AGF-PとAGF-HITMの比較

工法	AGF-HITM	AGF-P
概		
要	・坑内より剛性の高いパイプ (L=10m, φ=89.1~114.3mm) を 30~60cm ピッチで断面、5m~9m 毎で施工し支保工で受けながら掘進する。 ・パイプ内より地山へウレタン系とセメント系の複合注入を行い、パイプ間の改良を図る。(湧水箇所ではウレタン系注入材)	・坑内より剛性の高いパイプ (L=12.5m, φ=114.3mm) を 45cm ピッチで断面程度で施工し、支保工で受けながら掘進する。 ・パイプ内より地山へウレタン系の注入を行いパイプ管の改良を図る。 ・トンネルの拡張は行わない。
ビット	ロストビット方式	拡幅ビット方式 (ロストビット方式)
打設方法	前方打撃で牽引方式のため、ロッドによる先端部塩ビ管の損傷はほとんどない。	後方打撃方式のため打撃により曲がり鋼管の破損が考えられる。(ロストビット方式の場合は HITMと同様)
鋼管の接続	ネジ加工、カップラー式	ネジ加工 (ネジ込み)
改良範囲	いずれの範囲でも2段以上の鋼管で支持する多段方式	いずれの範囲においても1本の鋼管で支持する。
長所	・ウレタン系とセメント系の複合注入により限定された範囲を確実に改良できアーチ形成が可能となる。 ・パイプを支保工で確実に受けるため沈下及び地すべり抑制効果が高い。 ・トンネルジャンボにより施工でき、無拡張のため新たな設備を必要とせず、工期も比較的短い。 ・施工ピッチが細かいため切羽の変化に応じて範囲の変更が可能で経済的。	・ウレタン系を使用するため、限定された範囲を確実に改良できアーチ形成が可能。 ・トンネルジャンボにより施工でき、無拡張のため新たな設備を必要とせず、工期も比較的短い。
短所	・ロストビットにより削孔を行うが、玉石等大きな塊があるとジャミングが発生する。 ・鋼管先端ではラッパ状となり、鋼管間および鋼管より下の地山の肌膚が懸念される。(鋼管配置で対応可)	・拡幅ビットによる掘削を行うが、砂礫層やクラッキーな地山ではジャミングにより穿孔不能となる。 ・拡張はしないが鋼管の間に地山を挟むため、地山条件によってはAGFに比べ沈下が発生する懸念がある。 ・先打ちとなるため地山の変化に対応しにくい。
施工性	・鋼管径が小径化できるので施工性は良く、ビットの選択も不要。	・HITMに比べ鋼管径が大きく施工延長も長いため施工性は劣る。 ・地山によりビットの選択が可能。 ・掘削等では支保効果が小さい。 ・鋼管のジョイントが弱点となる。
信頼性	・多段となり支持効果は高くなる。	



写真2 変状対策工 (増しボルト, 支保工連結)

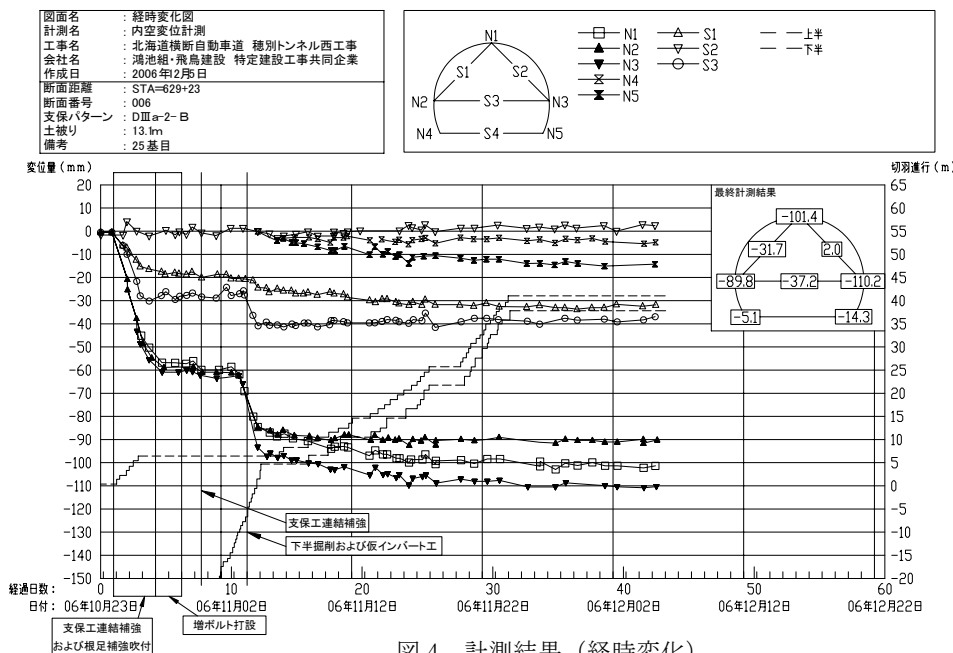


図4 計測結果 (経時変化)

3.2.3 数値解析による安定性の評価

(1) 概要

トンネルの設計段階では、種々の調査や探査の結果や岩盤分類などとの比較のもとで、岩盤の力学定数やその分布が推定される。これに基づき、支保パターンを選定などが行われ、必要に応じ数値解析などによって適切な部材の選定が行われる。しかし、現実にはトンネルの計画線上のすべての岩盤に対して、地層の状態や力学定数などを特定することは困難である。また、岩盤にはクラックから断層に至るまで、大小さまざまな不連続面が存在し、トンネルのスケールにおける巨視的な意味での力学定数を正しく推定することは至難であると言わざるを得ない。図5に示すように、設計時におけるこのような不確実性を補い、安定なトンネルを安全な施工によって建設する手法が情報化施工である。一般的な情報化施工では、設計時に求められた岩盤の変位量などをもとに、施工管理基準値を定めておき、計測される変位量などがこれを上回る場合には、支保パターンや部材などを見直す努力がなされる。

新たに支保パターンや部材を選定する際には、数値解析などを用いることとなるが、現在の計測結果をもたらしめている岩盤の力学定数や初期応力は、何らかの方法で推定する必要がある。これには、逆解析と呼ばれる手法により行われることがある。桜井²⁾らは、初期応力と岩盤の巨視的なヤング率の比を計測結果より同定し、これをもとに数値解析を実施する方法を提案している。この手法は、トンネル掘削という応力変化に対する岩盤の応答を用いて岩盤の物性を求めるために、これが不連続面も含んだ巨視的な物性となっており、後の数値解析において非常に有用な情報となる。

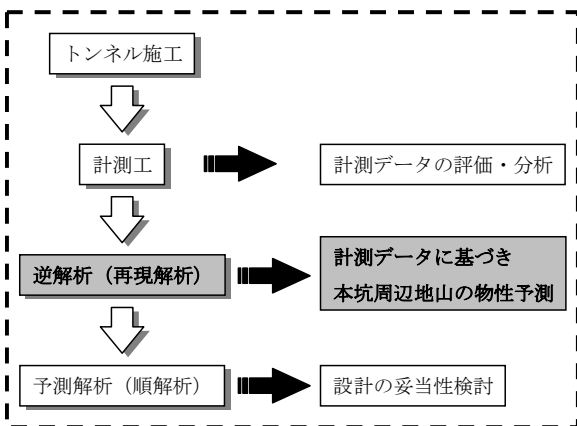


図5 トンネル施工時における設計フロー

(2) カルマンフィルタを用いた逆解析³⁾⁴⁾

桜井らの手法は、極めて効果的であるが、情報化施工をより高度化すると観測点からは、幾つかの解決すべき課題

がある。それは、段階掘削など三次元的な構造変化を伴うような場合に適用しにくいこと、時間とともに剛性が変化するクリープ変形が生じているような場合に適用できないこと、岩盤の強度定数を推定することが難しいことなどである。

このような問題点が解決すれば、例えば切羽前方の変位や地表面沈下など、多くの情報を用いた逆解析が可能となる。また、非弾性的な挙動をしている領域の推定や地盤物性の経時的変化の推定等が可能となる。これらの結果、トンネル周辺の地山の状態を、より多くの情報を基に監視することができることとなり、情報化施工の高度化に寄与すると考える。

1つの解決策として、有限要素法にカルマンフィルタを適用した逆解析手法によって、これらの問題を解決することが試みられている。

今回の検討では、カルマンフィルタを適用した逆解析プログラム（解析コード：Geo-Inverse、株式会社地層科学研究所）を用いて解析を実施した。最初にカルマンフィルタの概略について述べるが、カルマンフィルタに関する詳細については数多くの文献⁵⁾⁶⁾⁷⁾で紹介されていることから、ここでは、その基本的な部分についてのみ触れることとする。

カルマンフィルタを用いた逆解析とは、未知数と観測値との関係を示した観測式により、最も適切と思われる未知数を求める手法である。すなわち、確率論に基づく逆解析の一手法である。また、カルマンフィルタの特徴として、岩盤の変形挙動を計測した際に含まれる観測誤差を考慮できることや解が一意的に求まらない非適切⁶⁾な逆問題に対して有効な解析手法であるなどが挙げられる。

今、未知パラメータ \mathbf{x} がある離散過程の状態方程式にしたがって変化している場合を考える。さらに、状態 $t-1$ から状態 t への遷移が線形変換で表わされるものとする、これは次式のように書ける。

$$\mathbf{x}_t = \Phi_{t-1} \mathbf{x}_{t-1} + \Gamma_{t-1} \mathbf{w}_{t-1} \quad (1)$$

ここに、 Φ_{t-1} : $(n \times n)$ 次元の線形系の状態遷移行列、 Γ_{t-1} : 既知の $(n \times r)$ 次元の駆動行列、 \mathbf{w}_{t-1} : $(r \times 1)$ 次元のシステムノイズベクトルである。また、式(1)は状態方程式と呼ばれる。次に、状態 t に移った後に観測値 \mathbf{z} が与えられたとすると、次式のように書ける。

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \quad (2)$$

ここに、 \mathbf{H}_t : 観測行列、 \mathbf{v}_t : 観測ノイズである。また、式(2)は観測方程式と呼ばれる。

今回の検討で対象としているトンネル変位を用いた逆解析の場合には、未知数 \mathbf{x} は地盤のヤング率、観測値 \mathbf{z} はトンネルの内空変位 \mathbf{u} に相当する。したがって、この未知数と観測変位 \mathbf{u}^* (変位ベクトル \mathbf{u} の一部) との関係を示す有限要素法の剛性方程式について考える。

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (3)$$

左辺の剛性行列 \mathbf{K} に未知パラメータ \mathbf{x} が含まれ、変位 \mathbf{u} は観測変位 \mathbf{u}^* とそれ以外の変位成分 $\tilde{\mathbf{u}}$ に分けられる。したがって、式(3)は、以下のように記述できる。

$$\mathbf{K}(\mathbf{x}) \begin{Bmatrix} \tilde{\mathbf{u}} \\ \mathbf{u}^* \end{Bmatrix} = \mathbf{f} \quad (4)$$

式(3)を観測式に充当するために書き換えれば、次のような非線形関数となる。

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \quad (5)$$

ただし、カルマンフィルタは線形フィルタなので、このままでは適用できない。したがって、観測式 $\mathbf{u}^* = \mathbf{h}(\mathbf{x})$ を推定値 $\hat{\mathbf{x}}_{t-1/t-1}$ (添字の意味は、初めの時刻が推定値を得た時刻、後の時刻が観測値を得た時刻を表す) のまわりで Taylor 展開して線形化する。このような方法は、一般に拡張カルマンフィルタと呼ばれる。

一方、状態方程式から求まる未知数 \mathbf{x} がヤング率と定数であるため、状態 t によって変化しない。したがって、状態遷移行列は単位行列となる。また、この場合システムノイズは考慮しないのが一般的である。

以上のことから、カルマンフィルタについて適切な初期条件と、有限要素法について既知の境界条件の下で観測変位を入力すると、式(1)の状態方程式と式(2)の観測方程式からカルマンフィルタのアルゴリズムにより未知数(ヤング率)が同定できる。

図6にカルマンフィルタを適用した逆解析のフローを示す。

本報告では、研究開発の第1ステップとして、変位の大きい坑口部のトンネルの安定性に関して、このカルマンフィルタを用いた逆解析手法を適用してトンネルの周辺地山の物性値を推定した検討結果について述べる。なお、検討では、素堀のモデルに支保工の効果を割増率で考慮した逆解析により地山のヤング率を同定し、その結果に基づき支保工を含めたモデルによる予測解析を行った。

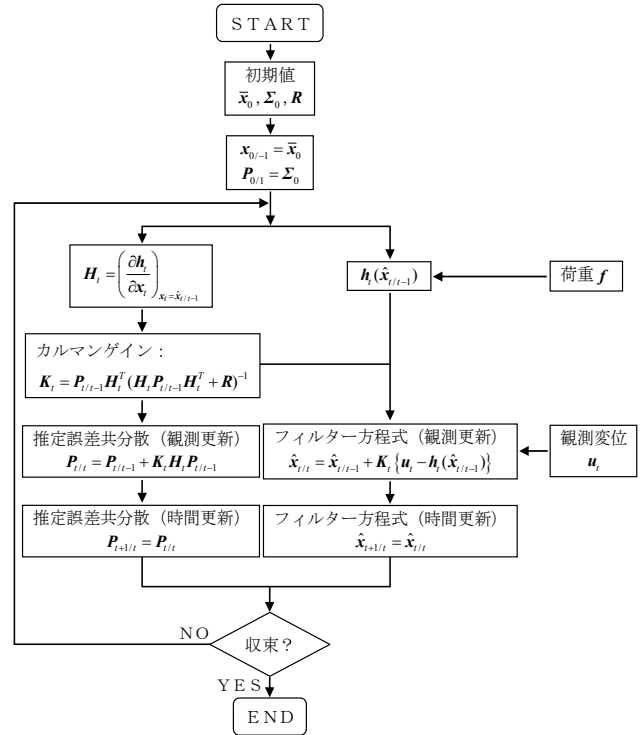


図6 カルマンフィルタを適用した逆解析フロー

(3) 逆解析によるトンネル安定性の検証

変位の大きい坑口部のトンネルの安定性に関して、数値解析を用いて安定性の検証を実施した。

検証の手順としては、以下のとおりである。

- ①計測データに基づく地山物性の評価 (逆解析)
- ②逆算された地山物性により掘削過程を考慮して予測解析を行い、地山の安定性、支保応力を照査。

以下に、計測結果に基づく検討結果の詳細を示す。

前述の図4に示す経時変化の特徴として、上半掘削時に天端沈下と上半脚部沈下量のオーダーがほぼ同じであること、およびそれらに対して内空変位量が小さいことから、共下がり挙動が観察された。一方、下半掘削時には仮インバートによる早期閉合を実施しているため、下半脚部の沈下は抑制されていると判断された。

図7に解析に用いた有限要素モデルを示す。

現場計測結果からは、上半掘削時に共下がり現象がみられていたため、トンネル脚部付近に周囲とは別の物性をもつ層(層2)を仮定し、この部分の物性値も逆解析により求めることとした。

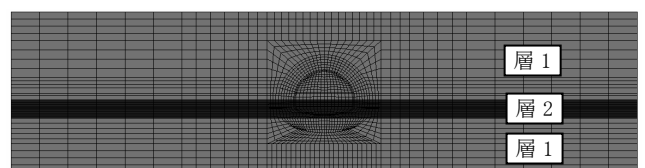


図7 有限要素モデル

解析に用いた計測値および物性値を表3および表4に示す。表3では、現場計測値と支保工を考慮しない場合の推定値を示している。支保工を考慮しない場合の推定値とは、先行変位を考慮して、計測値を一定の割合（割増率）で増加させ、支保工がない場合に計測されると推定される値を求めたものである。この値は事前の数値シミュレーション、ならびに過去の経験などから求めた。

表3 解析に用いた計測値

	測点	現場計測値 (mm)	支保工を考慮しない場合の推定値 (mm)	割増率
上半掘削時	S1	-18.0	-25.7	1.4
	S2	-1.0	-1.4	1.4
	S3	-26.0	-37.1	1.4
	N1	-55.0	-78.6	1.4
	N2	-58.0	-82.9	1.4
	N3	-58.0	-82.9	1.4
下半掘削時	S1	-31.7	-52.8	1.7
	S2	2.0	3.3	1.7
	S3	-37.2	-62.0	1.7
	N1	-101.4	-169.0	1.7
	N2	-89.8	-149.7	1.7
	N3	-110.2	-183.7	1.7
	N4	-5.1	-8.5	1.7
	N5	-14.3	-23.8	1.7

表4 解析に用いた物性値

分類	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
層1	0.30	19.6
層2	0.40	19.6

なお、解析ステップに関しては、第1ステップでは、岩盤内に土被り 13.1m 相当の初期応力を与える。第2ステップでは上半を掘削し、掘削時の内空変位量および沈下量を計測値として入力する。同様に第3ステップでは下半を掘削し、この時の計測値より岩盤の物性値を逆解析した。

(4) 逆解析結果

第1ステップの上半掘削時、および第2ステップの上半および下半掘削時における計測点の沈下量を表5に示す。括弧で示した数値は現場計測値である。

これらの結果をみると、計測値と解析値との比較では、絶対値の相違はみられるが、変形のモードでは良好な結果が得られている。特に、トンネル天端と脚部が沈下している共下がり現象が表現されていることがわかる。

(5) 予測解析と安定性の評価

支保工応力の照査により、トンネルの安定性を評価する目的で、逆解析手法により同定されたヤング率を用いてトンネル掘削時の予測解析を実施した。

岩盤の物性値は前述のとおりであり、支保工諸元を表6に示す。なお、支保工の物性値は、一般値として資料⁸⁾を基に設定した。

表5 計測点における変位と同定結果

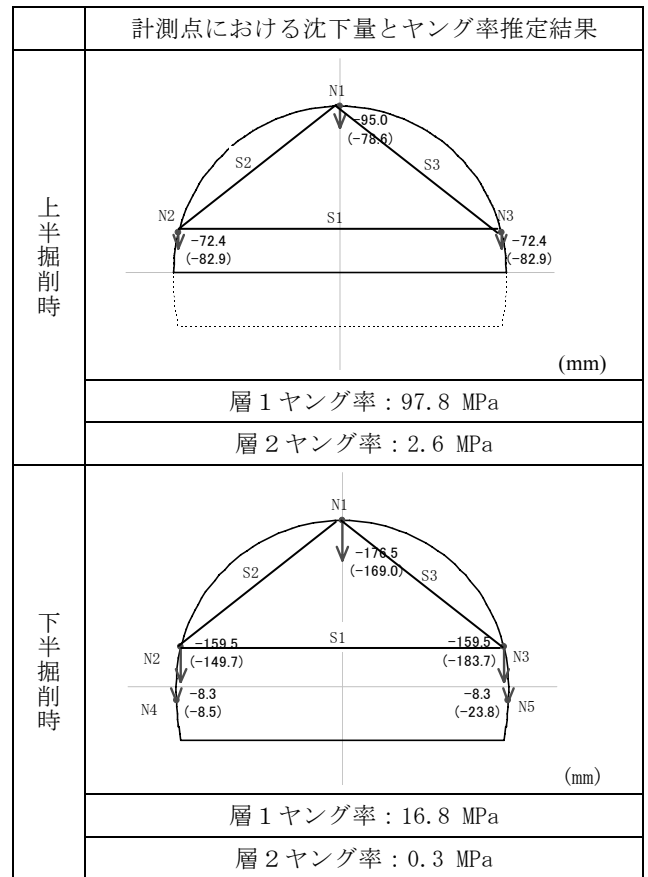


表6 支保工の緒元

ロックボルト			鋼アーチ支保工		吹付け厚 (cm)
長さ (m)	周方向 (m)	延長方向 (m)	上半 (m)	下半 (m)	
4.0	1.2	1.0	H-200	H-200	25

予測解析では、吹付コンクリートおよび鋼製支保工をはり要素でモデル化し、実際の施工過程を考慮したシミュレーションを行った。

表7および表8に上半および下半掘削時に計測された内空変位と沈下量と予測解析により算出された結果を示す。

上半掘削時をみると、天端沈下量は計測値に比べ解析値が大きく、内空変位は解析値が小さい結果となっている。下半掘削時には、脚部沈下量は計測値におおむね一致しており、良好な解析結果が得られた。上半部の沈下量および内空変位量についても、絶対値では計測値と異なる点はあるものの、変形モードはおおむね一致する結果が得られた。また、表9には、支保工の応力照査結果を示す。解析結果に基づけば、支保工に発生する応力は許容応力値内であり安定していることが確認された。

表 7 計測値と予測解析結果

計測点	計測値		解析値		計測点	計測値		解析値	
	上半完了	上半完了	計測点	下半完了		計測点	下半完了	下半完了	
S1	-18.0	1.3	S1	-31.7	-5.5				
S2	-1.0	1.3	S2	2.0	-5.5				
S3	-26.0	-5.5	S3	-37.2	-16.8				
N1	-55.0	-77.4	N1	-101.4	-83.1				
N2	-58.0	-71.9	N2	-89.8	-81.3				
N3	-58.0	-71.9	N3	-110.2	-81.3				
N4	-	-	N4	-5.1	-14.1				
N5	-	-	N5	-14.3	-14.1				

表 8 予測解析結果と変形（沈下）モード

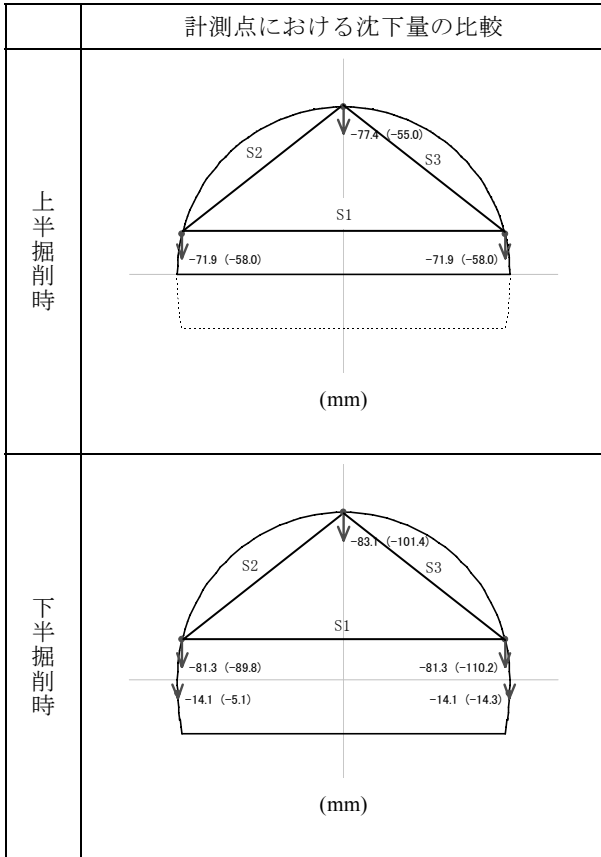


表 9 支保工の応力照査結果

施工過程	吹付けコンクリート		鋼製支保工		ロックボルト	
	応力 (MPa)	許容応力度 (MPa)	応力 (MPa)	許容応力度 (MPa)	軸力 (kN)	耐力 (kN)
上半支保建込	0.91	6.75	53.35	240	105.81	170
下半掘削	1.02		54.35		122.28	
下半支保建込	1.22		144.31		163.18	
インバート掘削	1.27		225.41		164.40	

3.2.4 破砕帯における補助工法の検討 (STA. 629+63.8)

(1) 変状状況

切羽前方探査を実施し、地質の変化に対応して施工を進めていったが、STA. 629+63.8 (支保工 No. 65) 付近において部分的な小崩落が発生した。

主な変状としては、以下に示すとおりである。

- ① No. 60 支保工付近の下半から天端にかけて周方向に 5cm 程度の段差
- ② No. 52 支保工付近の SL から肩部にかけて周方向に 3mm 程度のひび割れ、および吹付けコンクリートのはく離
- ③ その他、ロックボルトプレートずれや SL 部ひびわれが見られた。

(2) 内空断面測定結果

内空断面に関しては、No. 60 付近において切羽進行方向に向かって右側天端から下半にかけて、変形に伴い以下に示す変位を生じていた。

- ① 上下半施工完了部分 最大 46mm (No. 61)
- ② 上半施工完了部分 最大 64mm (No. 63)

(3) 計測結果

計測結果は、以下に示す状況であった。

① 内空変位・天端沈下

内空変位および天端沈下に関しては、既設の測点では、今回の変状に伴う大きな変化は見られなかった。また、変状後に新設した測点においても変状後の変位は 1mm 程度で大きな変位は見られなかった。

② 地表面沈下

地表面沈下に関しても、内空変位・天端沈下同様、今回の変状に伴う影響は見られなかった。なお、地表面における亀裂等も観察されなかった。

(4) ゆるみ範囲の推定

応急対策に先立ち、崩落高さやゆるみ範囲を把握する目的でジャンボによる探り削孔および機械データに基づく探査を実施した。その探査結果を図 8 および図 9 に示す。

探査結果の概要をまとめると以下のとおりである。

- ① 天端部分では切羽前方 2~3m 付近および 7m 付近で穿孔エネルギーの小さい箇所が検出されている。
- ② 右側では切羽から 4m 程度および 8m 付近、11m から 16m 付近にかけ、穿孔エネルギーの小さい箇所が検出されている。左側に関しては右側に比べると穿孔エネルギーが高いものの、切羽から 11m 付近までは相対的に穿孔エネルギーが低くなっている。
- ③ 変状区間における右側ゆるみ範囲の分布としては、大きな変状部分 (No. 61) に関しては、7m 付近まで穿孔エネルギーの小さい箇所が検出されており、そのほかの断面においても 4~5m 程度の範囲まで穿孔エネルギーの小さい箇所が検出された。

(5) 変状原因の推定

天端崩落および変状を生じた箇所は、当初の地質調査結果から地表面に崖錐が堆積している部分と位置が一致しており、想定された断層破碎帯と考えられた。

また、一部崩落した部分のズリの状態を観察した結果からは、破碎帯の土砂化したもので、写真3に示すとおり、浸水崩壊度試験によれば、浸水後1時間程度で泥状となり、スレーキングしやすい脆弱な地山であった。

さらに、No.53付近から湧水が観察されており、破碎帯の存在を示唆するものであった。

変状のメカニズムとしては、トンネル掘削の進行に伴い、切羽から5m手前の支保部材に荷重が二次元的に作用するようになった時点で、十分な支保剛性が確保されていなかったため、変状に至ったものと推定される。

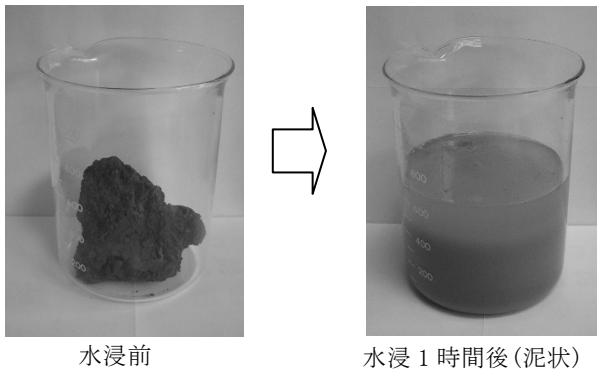


写真3 浸水崩壊度試験結果

(6) 変状対策

図8に、探り調査に基づく変状区間(D I-b ; No. 47~65)のゆるみ範囲の調査結果と改良範囲を示す。

変状対策は以下の方針で実施した。

①巻厚不足部分

変状により必要な巻厚が確保できない部分に関しては、周辺地山を補強した上で縫い返しにより、必要な巻厚を確保した。

なお、周辺地山の補強方法としては、変状状況が右側天端から側壁部にかけて変形していることから、地山補強範囲をトンネル全周とし、シリカレジンを注入した地山改良ゾーンにおいて、アーチアクションを形成させることにより、ゆるみ荷重の支持を図った。

さらに、ロックボルト（増しボルト）に関しては、前述のとおり、円周（横断面）方向における探り調査結果から4mを超えるゆるみの発生が想定されており、現在のロックボルト（L=4.0m）ではゆるみ範囲内での定着となることから、長尺ロックボルト（L=6.0）の打設を行った。

②崩落部

崩落部空洞に関しては、吹付けコンクリートにより応急的に地山崩落を抑えた後、空洞を充填することにより、地山のアーチ形成を図る対策を実施した。

なお、注入効果の確実性と改良効果の耐久性を図る目的で、注入材としては超微粒子セメントを選定し、周辺地山改良を実施した。

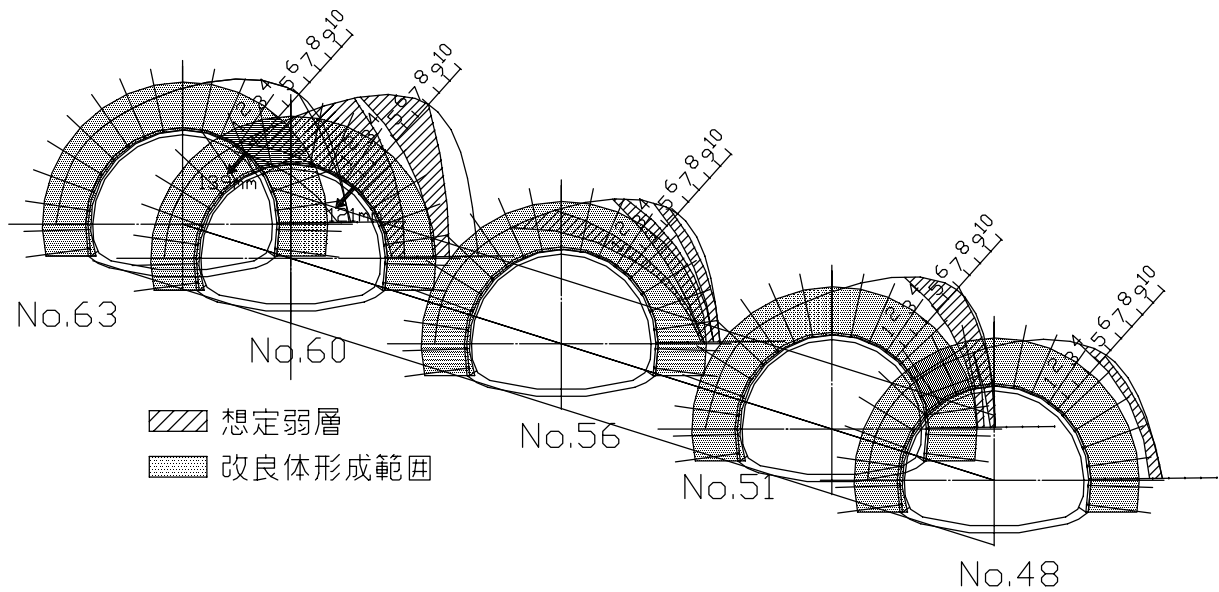


図8 既施工区間探査結果と改良範囲

③崩落箇所以降の施工

図9に示す切羽前方探査の結果から、現切羽から15m程度は破砕帯での施工となることが想定された。

部分崩落を受けて、以降の施工に関しては、補助工法として、長尺鏡ボルトによる鏡面の安定対策と天端部分のゆるみ防止の目的から坑口部で採用実績のある注入式フォアポーリング（シリカゼン注入）による先受け工を選定した。

なお、支保パターンをDIIパターン（鋼製支保工をH-125からH-150）に変更して支保の剛性を高めた。

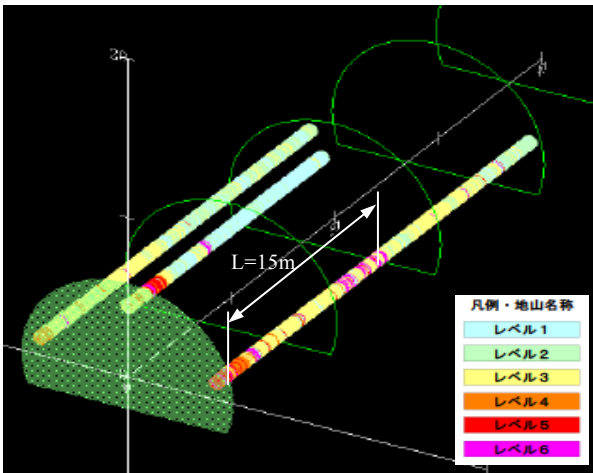


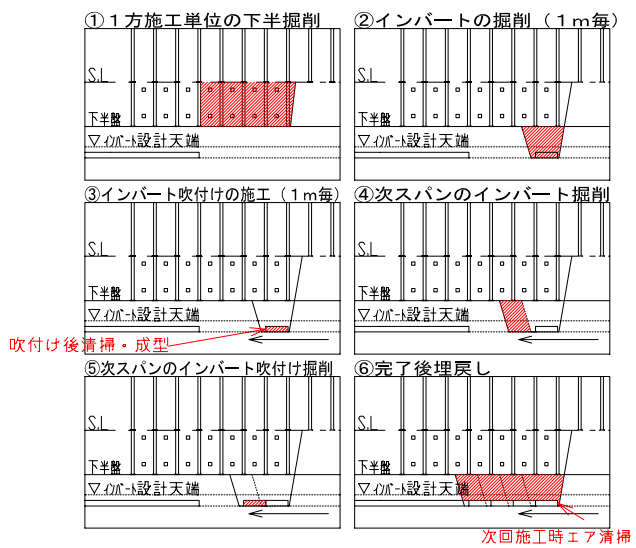
図9 切羽前方探査結果（3次元表示）

また、これまでの計測結果の分析より、天端沈下および脚部沈下が卓越する地山であることから、沈下に伴うゆるみ増大を抑制する目的で、インバート吹付けによる早期閉合を速やかに施工し、全体の変位を抑制する工法とした。

図10に崩落部対策工および上半沈下対策の概要を示し、図11にインバート吹付け施工手順を示す。

これらの対策により小崩落を生じた断層破砕帯を無事突破する事ができた。

その後も地山の状況に応じて、天端安定対策としての注入式フォアポーリングや長尺鋼管フォアパイリングおよび鏡面安定対策としての長尺鏡ボルト等の補助工法を駆使してトンネルの安定を図っている。とりわけ、インバート吹付け併用掘削に関しては、本トンネルの変位の特徴の1つである共下がりに対して高い沈下抑制効果を確認している。



※吹付け手順

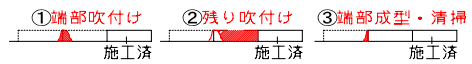


図11 インバート吹付け施工手順

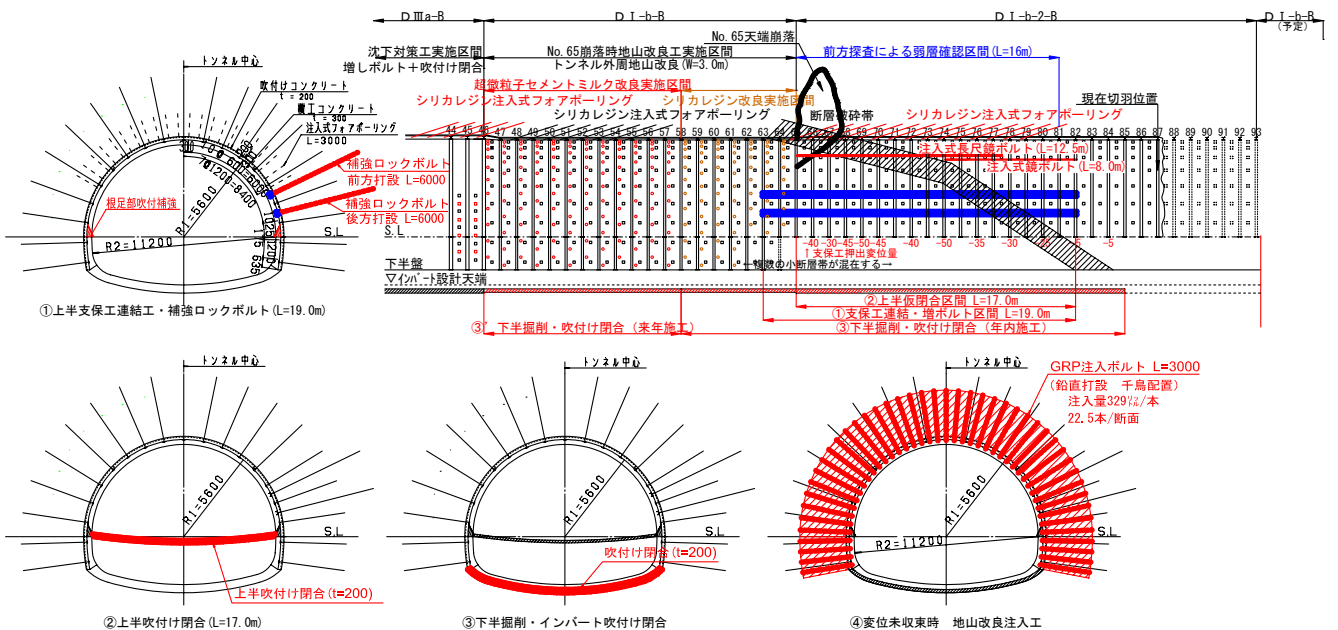


図10 崩落部対策工及び上半沈下対策

4. まとめ

今回の坑口部および断層破碎帯での補助工法の選定に関して、計測結果や切羽前方探査結果を参考にFEM解析（逆解析、予測解析）を用いて検討を行い、効果的な対策工の検討や対策効果の検証ができた。

また、施工ではトンネルの変形モードを把握することにより種々の補助工法の組み合わせを行うとともに、最終的にはインバート吹付けを施工することにより変位を収束させることができた。

100mmを超える大きな変位（沈下）を示す脆弱地山において、掘削後早期にインバート吹付けを施工するインバート吹付け併用掘削により変位抑制効果が期待できることが実証できた。

図12に切羽評価点と穿孔エネルギーの関係、図13に切羽評価点とA計測結果の関係、および図14に穿孔エネルギーとA計測の結果を示す。部分的な崩落箇所を除き、切羽前方探査結果と切羽評価点の間に高い相関関係があることが分かる。なお、今回報告した崩落箇所では、切羽評価点が急変しており、両者の相関が悪かったため、結果的に不測の事態を予測できなかった。

その後の施工では、切羽評価点30点以下、穿孔エネルギーで200J/cm³以下の地山が続き、地山状況に応じて長尺鏡ボルト、長尺鋼管フォアパイリング等の補助工法を駆使して、2008年3月末現在、約900mの掘削を完了している。

今後、工区境の土被りの大きい区間（土被り300m以上）において蛇紋岩の出現が想定され、先行して掘削の完了している避難坑では蛇紋岩区間で大きな変位を生じていることもあり、技術検討委員会の指導の下、対策工法の検討を実施中である。今回報告した泥岩区間でのトンネル地山評価システムおよび数値解析による予測と効果の検証等の管理手法を有効に活用し、慎重な施工を行う所存である。

最後に、補助工法の検討ならびに施工管理においてご指導頂いた技術検討委員会の関係者各位に深く感謝の意を表します。



写真4 西側坑口全景

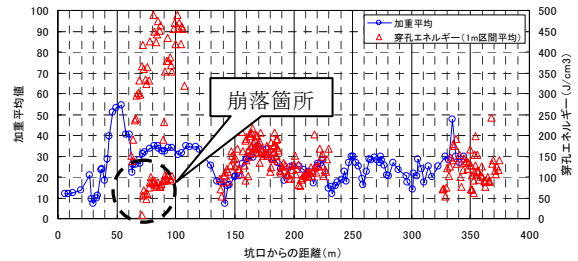


図12 切羽評価点と穿孔エネルギーの関係

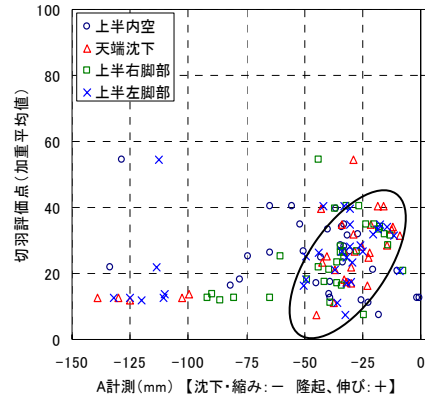


図13 切羽評価点とA計測の関係

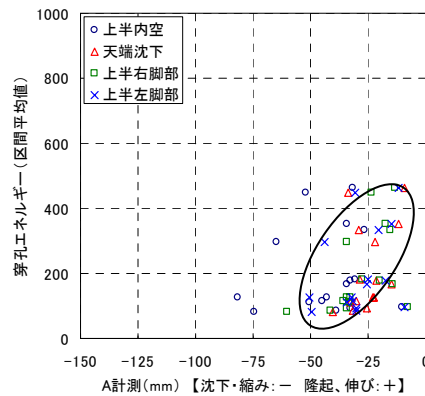


図14 穿孔エネルギーとA計測の関係

参考文献

- 1) 山田浩幸、原田雅也、田中英男、三木秀二：トンネル地山評価システムを用いた補助工法選定に関する一考察、トンネル工学論文集、第16巻、pp.93-100、2006.11.
- 2) 桜井春輔・竹内邦文：トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法、土木学会論文報告集、No.337、pp.137-145、1983.9.
- 3) 村上 章・鈴木 誠：講座「地盤工学における逆解析」8.盛土の施工管理、土と基礎、Vol.43、No.11、pp.73-79、1995.
- 4) 村上 章・長谷川高士：Kalman フィルター有限要素法による逆解析と観測点配置、土木学会論文集、第388号/Ⅲ-8、pp.227-235、1987.12.
- 5) 星谷 勝・齊藤悦郎：建設技術者のためのデータ解析と応用－カルマンフィルタを中心として－、pp.13-27、鹿島出版会、1991.
- 6) 登坂宣好・大西和榮・山本昌宏：逆問題の数理と解法－偏微分方程式の逆解析－、東京大学出版会、1999.
- 7) 村上 章・堀 宗朗・登坂宣好・鈴木 誠：有限要素法・境界要素法による逆問題解析－カルマンフィルタと等価存在物法の応用、コロナ社、2002.
- 8) 土木学会：2006年制定 トンネル標準示方書 山岳工法・同解説、2006.