

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・加藤吉文²・大村修一³・久保田 聡⁴

Hiroyuki YAMADA, Yoshifumi KATO, Shuuichi OMURA, Satoshi KUBOTA

¹ 正会員 (株) 鴻池組 土木技術部 (山岳トンネル担当) (〒530-8517 大阪市北区梅田 3-4-5)

E-mail:yamada_hy@konoike.co.jp

² 東日本高速道路㈱ 千歳工事事務所 (〒066-0037 千歳市新富1-2-14)

³ 鴻池・飛島共同企業体 穂別トンネル西工事事務所 (〒054-0201 北海道勇払郡むかわ町穂別稲里 418-5)

⁴ 鴻池・飛島共同企業体 穂別トンネル西工事事務所 (〒054-0201 北海道勇払郡むかわ町穂別稲里 418-5)

In recent years, mountain tunnels under critical construction conditions increase. For example, tunnel portals are located on specific ground such as a slope, weak unconsolidated ground or spring water ground. Thus, a number of auxiliary methods are applied to the tunnel stability, and rationality of a cost and execution is inspected with the face stability by measurement or numerical analysis.

In this paper, tunnel estimation system based on geologic ahead prediction of face by using mechanical data is presented, and the auxiliary method adapted to construction site under critical ground condition with large displacement is described.

Key Words: mountain tunnel, forward investigation method, tunnel estimation system, auxiliary method, support pattern

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。



写真-1 トンネル施工状況

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 $L=4,323\text{m}$ の山岳トンネル工事である。西工事では西側の延長 $L=1,500\text{m}$ をNATMで掘進中である。工事概要を表-1に示す。

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・飛島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ル工* (坑口) 注入式フォアパイル工*	
		鏡面の安定対策：長尺鏡ボルト, 核残し	
脚部の安定対策：脚部補強ボルト, 仮ハート			

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、メラング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、硬軟も様々で泥岩の卓越した堆積岩が分布している。新鮮な場合はCM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、ほとんどせん断されたシャープゾーンとなり、著しく破碎され細片化していた。そのため、湧水などにより水がつけば、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ル工 (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。

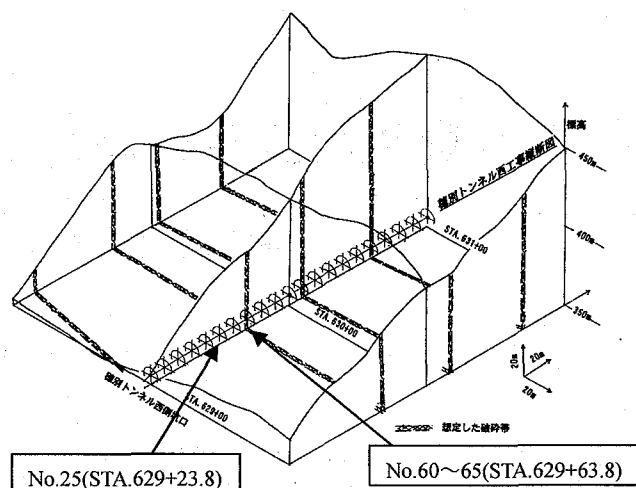


図-1 坑口部地質構造

3. 坑口部施工方法の検討

(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の施工データを参考にした上で、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。

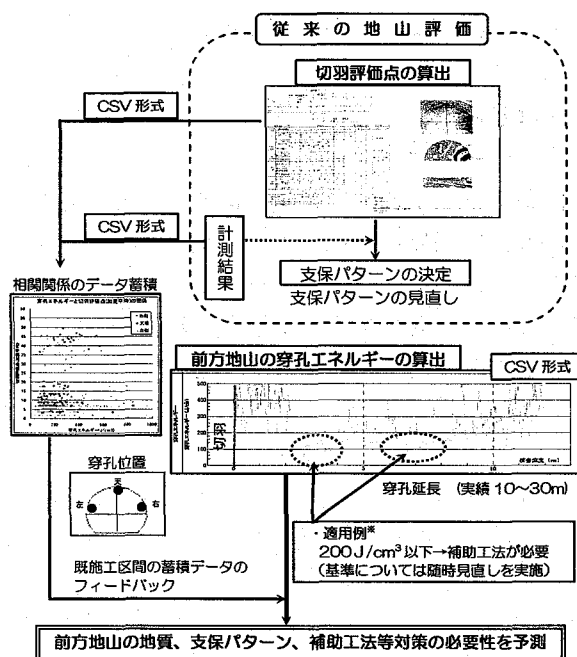


図-2 トンネル地山評価システム (K-tes) 1), 2)

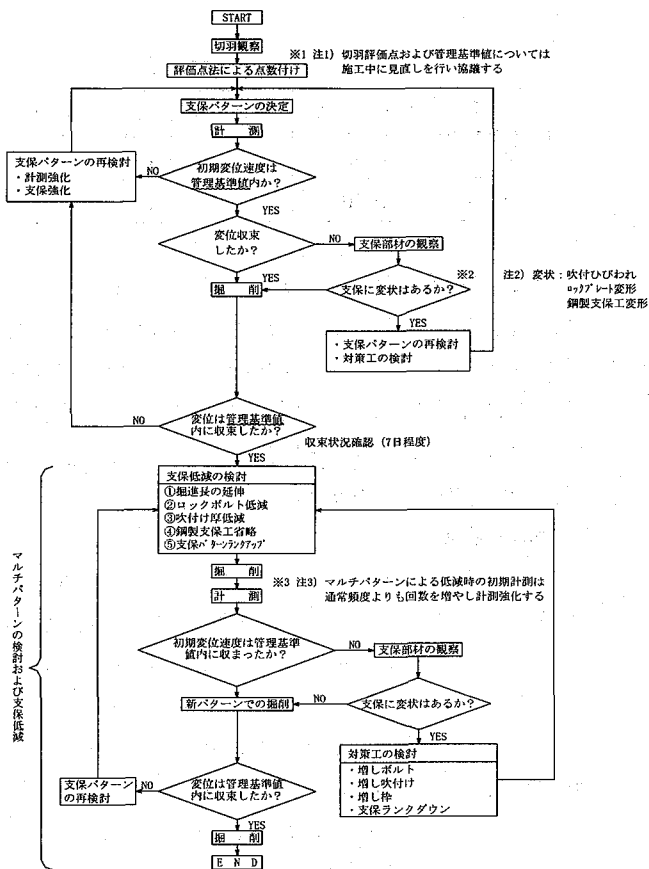


図-3 施工時補助工法選定フロー²⁾

(2) 坑口部における変状対策 (STA. 629+23)

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、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。

表-2 AGF-P と AGF-HITM の比較¹⁾

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/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/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間の改良を図る。 ・トンネルの拡張は行わない。
ビット	ロストビット方式	総掘ビット方式 (ロストビット方式)
打設方法	前方打撃で牽引方式のため、ロードによる先端部掘削の負担はほとんどない。	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、カッパラー式	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。 ・施工ビットが短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。 ・鋼管先端ではラップ状となり、鋼管間および鋼管より下の地山の崩落が懸念される。(鋼管配置で対応可)	・総掘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。 ・直線等では支持効果が小さい。 ・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。	

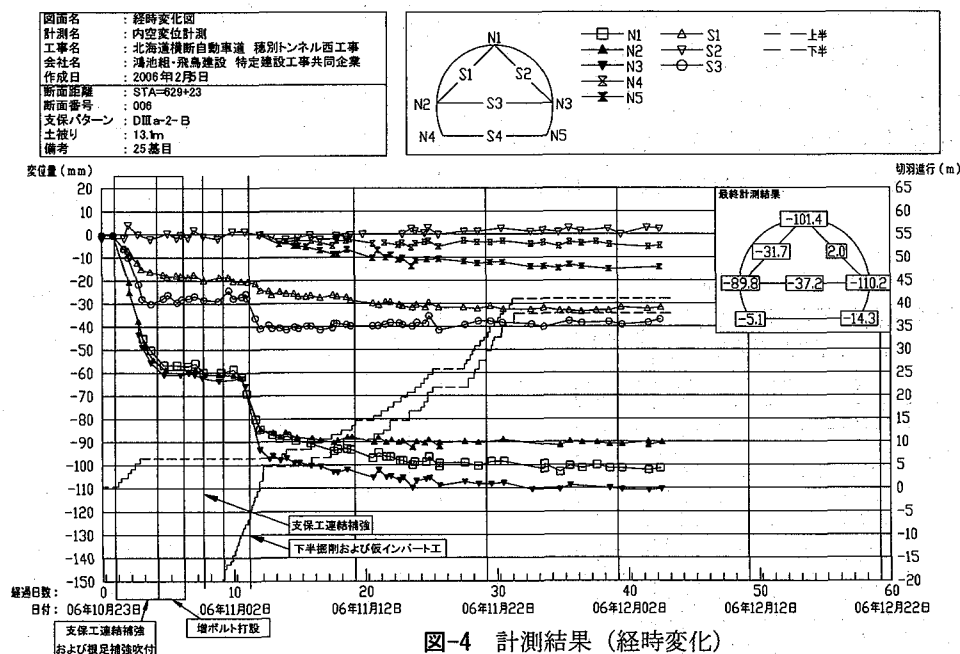
掘削時には、AGF-HITM の効果により切羽の安定は確保されたものの、図-4 に示すとおり、計測変位が収束せずにクリープ的に増加する状況であった。

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やげモードを呈し、トンネルの支保にも変状が見られた。

2) 対策工の検討

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、収束には至らなかった。

したがって、下半掘削を先行してインバート吹付けを施工することで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結果、変位は収束し安定した。



3) 数値解析による安定性の評価⁴⁾

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。

ここでは、解析の概略を示すが、詳細に関しては関連文献⁴⁾で別途報告しているので参考にされたい。

a) 逆解析結果

図-4に示す経時変化の特徴は、上半掘削時の挙動としては、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。また、それに対して内空変位量が小さいことから、共下がりの挙動が示されていた。また、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-5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。

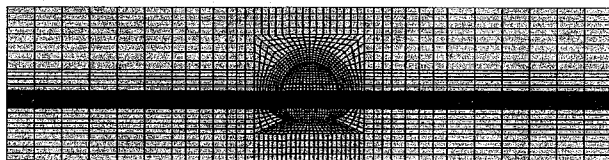


図-5 有限要素モデル

解析に用いた計測値および物性値を表-3, 4に示す。表-2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	0.7
	S2	-1.0	-1.4	0.7
	S3	-26.0	-37.1	0.7
	N1	-55.0	-78.6	0.7
	N2	-58.0	-82.9	0.7
下半掘削時	N3	-58.0	-82.9	0.7
	S1	-31.7	-52.8	0.6
	S2	2.0	3.3	0.6
	S3	-37.2	-62.0	0.6
	N1	-101.4	-169.0	0.6
下半掘削時	N2	-89.8	-149.7	0.6
	N3	-110.2	-183.7	0.6
	N4	-5.1	-8.5	0.6

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I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II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III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。

b) 解析結果

表-5には、第Iステップの上半掘削時、および第IIステップの上半・下半掘削時における計測点の沈下量を示している。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絶対値の相違はみられるが、変形のモードとしては良好な結果が得られている。特に、トンネル脚部が沈下するといういわゆる共下がり現象が表現されていることがわかる。

表-5 計測点における変位と同定結果

計測点における沈下量とヤング率推定結果	
上半掘削時	
	層1 ヤング率: 97.8 MPa
	層2 ヤング率: 2.6 MPa
下半掘削時	
	層1 ヤング率: 16.8 MPa
	層2 ヤング率: 0.3 MPa

c) 予測解析と安定性の評価

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、支保工の諸元については表-6にまとめた。支保工の物性値は、一般値として資料³⁾を基に設定した。

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している。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。下半掘削時では、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。

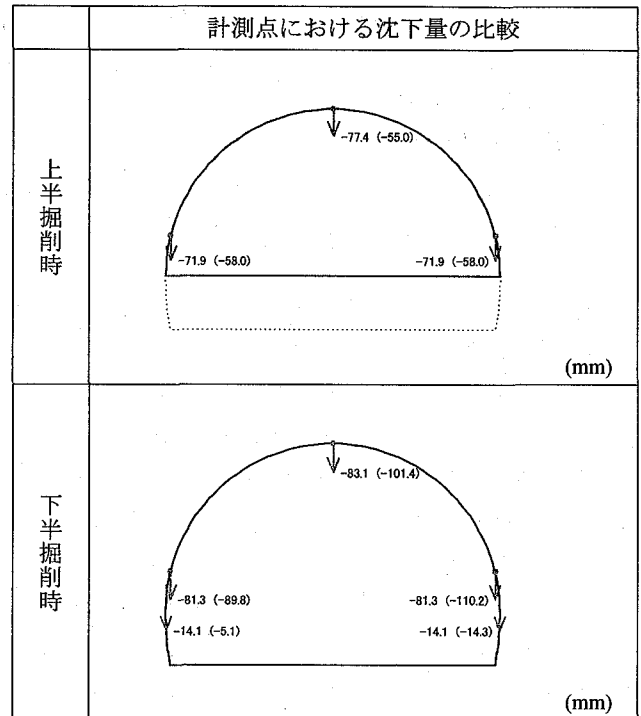
表-7 計測値と予測解析結果

	計測値	解析値		計測値	解析値
計測点	上半完了	上半完了	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-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	

表-8 予測解析結果と変形（沈下）モード



(3) 破碎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。

- ①No60 円周方向支保工付近（下半から天端） 5cm 程度の段差
- ②No52 円周方向支保工付近（SL から肩部） 3mm 程度ひび割れ、吹付け面はく離
- 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、No60 付近において切羽進行方向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 (No61)
- ②上半施工完了部分最大 64mm (No63)

3) 計測結果

計測結果として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 程度でさほど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) 緩み範囲の推定

応急対策に先立ち、崩落高さや緩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。

探査結果を図-6に示すが、まとめると以下の通りである。

- 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変状部分円周方向探査結果（右側ゆるみ範囲）としては、大きな変状区間（No61）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4m～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。

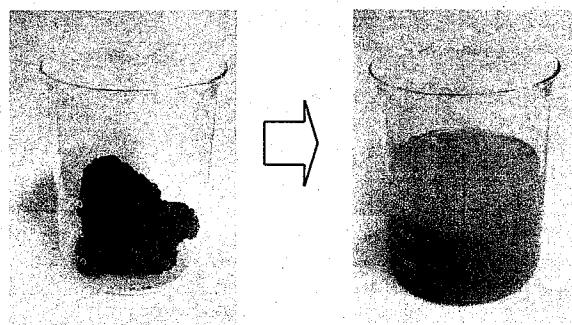
5) 変状原因の推定

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体積している部分と一致しており、想定された断層破碎体と想定された。

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、スレーキングしやすい脆弱な地山であった。

さらに、No53 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 手前において、支保部材により



水浸前

水浸1時間後(泥状)

写真-2 浸水崩壊度試験結果

荷重を二次元的に支えるようになった状態で、十分な支保剛性が確保されず、変状に至ったものと推定される。

6) 変状対策

探り探査に基づく変状区間（D I -b ; No47～65）の対策としては、以下のとおり実施した。

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。

変状状況より、右側天端から側壁部にかけて変形していることから、地山補強範囲としては、トンネル全周とし、シリカレジンにより地山改良ゾーンを形成してアーチを形成させゆるみ荷重の支持を図った。

なお、ロックボルト（増しボルト）に関しては、円周方向調査結果から4m を超えるゆるみに発生が想定されており、現在のロックボルトではゆるみ範囲内での定着となるため、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、空洞を充填して、地山のアーチ形成を図った。

注入効果の確実性を図る目的で、超微粒子セメントによる注入を実施した。

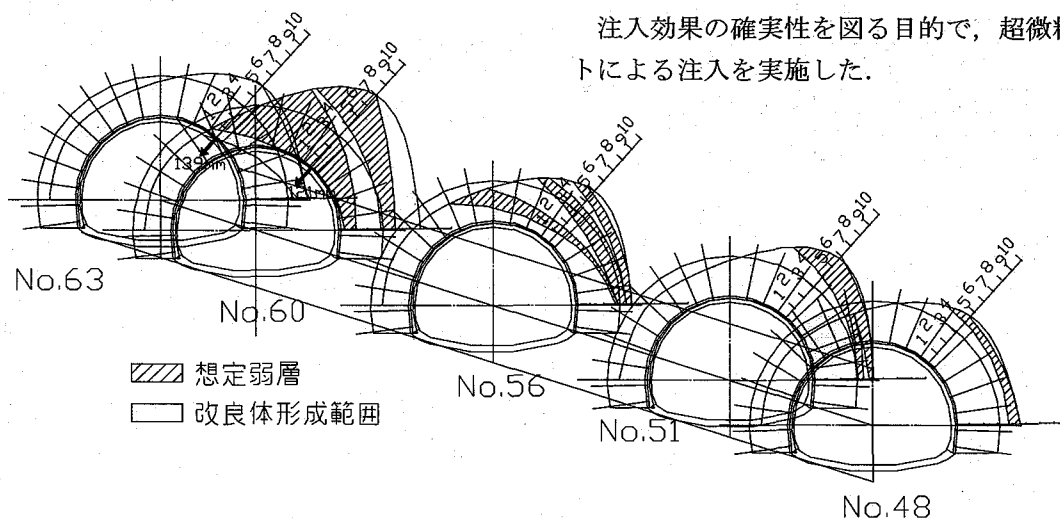


図-6 既施工区間探査結果と改良範囲

③崩落箇所以降の施工

図-7に示す前方探査の結果から、現切羽から15m程度は破碎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（シリカレジン）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）へランクダウンして支保の剛性を高めた。

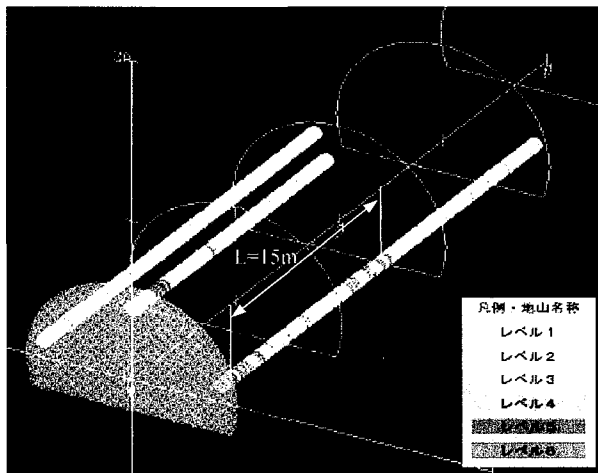


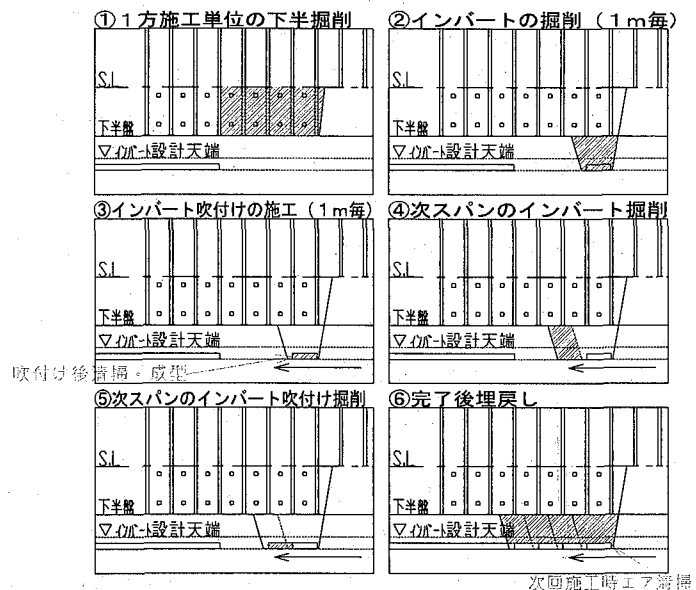
図-7 切羽前方探査結果（3次元表示）

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-8に崩落部対策工および上半沈下対策の概要を示し、図-9にインバート吹付け施工手順を示した。これらの対策により小崩落を生じた断層破碎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

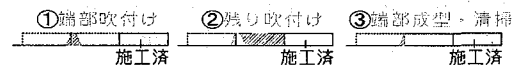


図-9 インバート吹付け施工手順

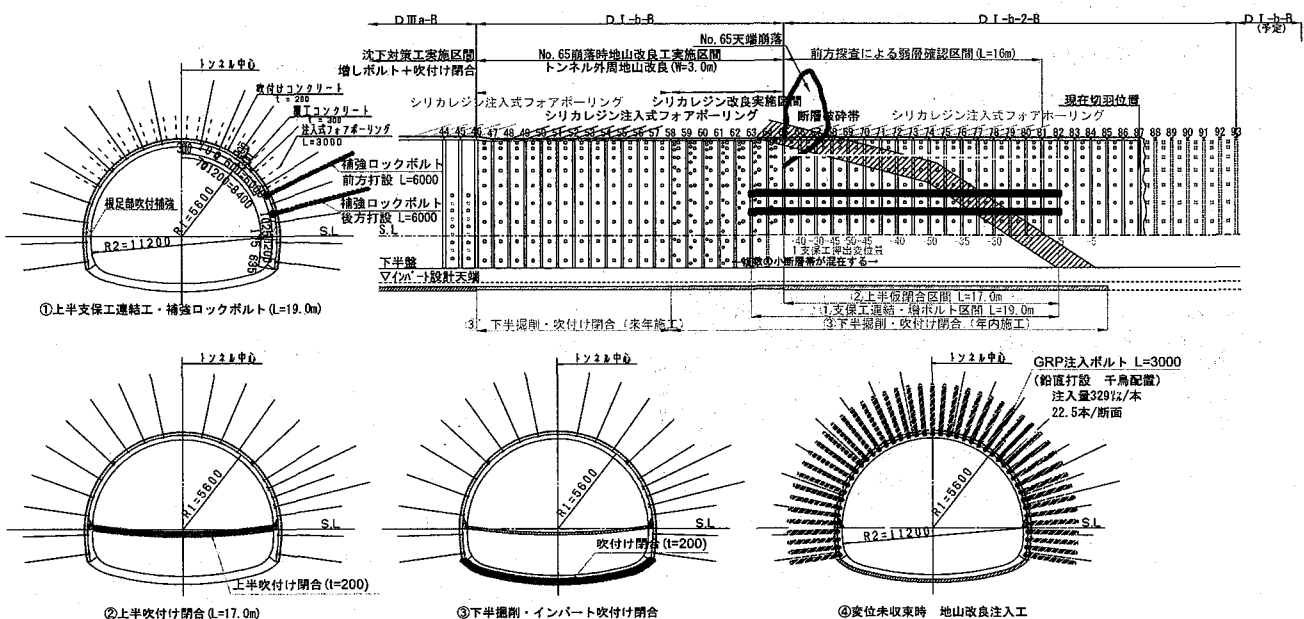


図-8 崩落部対策工及び上半沈下対策

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、トンネルの変状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-10 にこれまでの切羽評価点と穿孔エネルギーの関係、図-11 に切羽評価点とA計測結果の関係および図-12 に穿孔エネルギーとA計測の結果を示すが、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、今回報告した部分崩落部では、切羽評価点が急変しており、両者の相関も悪かったため、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、9月中現在、約500m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が確認され、大きな変位を生じていることもあり、対策工法の検討を現在実施中である。

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結果を有効に活用し、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東日本高速道路㈱千歳工事事務所の関係者各位に深く感謝の意を表します。

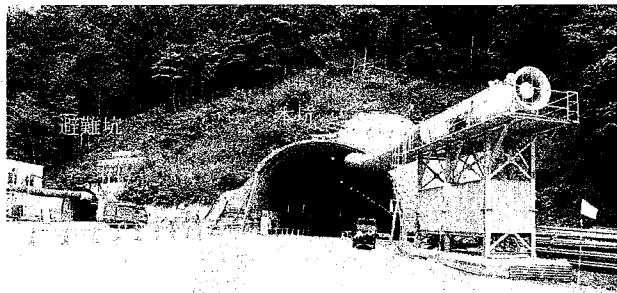


写真-3 西側坑口全景

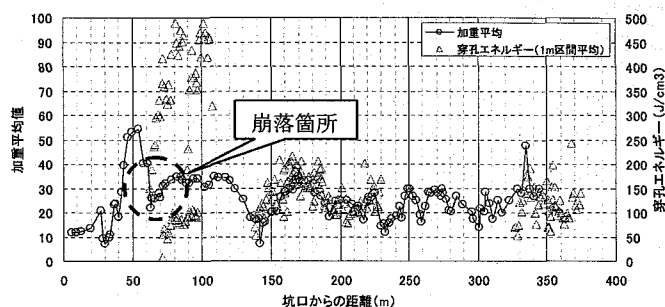


図-10 切羽評価点と穿孔エネルギーの関係

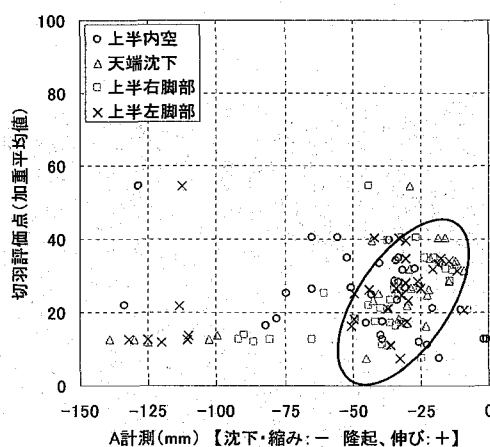


図-11 切羽評価点とA計測の関係

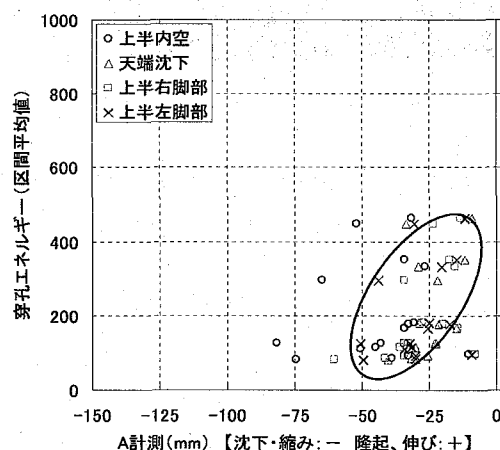


図-12 穿孔エネルギーとA計測の関係

参考文献

- 1) 山田浩幸, 原田雅也, 田中英男, 三木秀二: 前方探査に基づく地山評価システムの構築と適用に関する一考察, 第61回土木学会年次学術講演会, 2006.
- 2) 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, pp93-100, 2006.
- 3) 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.
- 4) 福田毅, 山田浩幸, 藤澤勉, 大村修一, 村上章: 逆解析を用いた情報化施工の高度化に関する一考察, トンネル工学報告集, 第17巻, 投稿中, 2007.