

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

A Study on choice of the auxiliary method by tunnel estimation system

山田浩幸¹・原田雅也²・田中英男³・三木秀二⁴

Hiroyuki YAMADA, Masaya HARADA, Hideo TANAKA, Shuuji MIKI

¹ 正会員 (株) 鴻池組 土木技術部 (山岳トンネル担当) (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町 3-6-1)

² 中日本高速道路㈱ 岐阜工事事務所 (〒504-0957 岐阜県各務原市金属団地131)

³ 鴻池・ロッテ共同企業体 平山トンネル工事事務所 (〒501-4613 岐阜県郡上市大和町名皿部 900)

⁴ 鴻池・ロッテ共同企業体 平山トンネル工事事務所 (〒501-4613 岐阜県郡上市大和町名皿部 900)

It's hard to obtain enough data by the prior geological investigation for construction of mountain tunnels. Usually, standard support patterns are used, and then they are modified to the optimized support patterns based on geological condition of face or the measurement data. Recently, it is possible to construct the tunnel upon the hard condition (unconsolidated rock and fracture zone, etc) by development of auxiliary method. However, forward investigation method of face is not established. In this paper, tunnel estimation system based on geologic prediction ahead of face by mechanical data is presented, and the evaluation applied to construction site 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。本論文では、トンネルジャンボにおける機械データを用い、切羽前方地山予測をコア技術としたトンネル地山評価システムの概要とトンネルを安全かつ経済的に施工するために、実現場で試行的に導入し、補助工法、支保パターン等の採用資料として

実施工に反映させた事例について述べる。



写真-1 前方探査実施状況

2. トンネル地山評価システムの概要

今回、構築したトンネル地山評価システム (K-tes: Konoike tunnel estimation system) は切羽前方探査においてトンネルの標準機械であるドリ

ルジャンボの穿孔時の機械データを収集・分析することにより、切羽前方の地質を穿孔エネルギーとして定量的に評価する。一方、施工の進捗とともに得られる支保パターン毎の切羽評価点や計測データを機械データと同様のファイル形式（CSV形式）で保存、更新を行い、リアルタイムに施工情報をデータ化する。システム内に蓄積された施工データと前方探査により得られた穿孔エネルギーを比較し、地山の変化に基づく適切な支保パターンの選定や必要な対策工（補助工法）の検討を行う。本システム導入により、これまでは、個別に実施して整理していた前方探査データ、切羽観察（評価点）、計測データを系統的に一元管理し、いわゆる巻物（展開図）的に整理することで情報化施工の実現を図るものである。図-1にK-tesの出力結果例、図-2にシステムの概念図を示す。

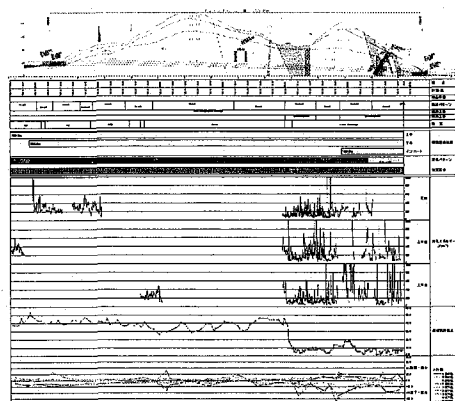


図-1 K-tes 出力結果例

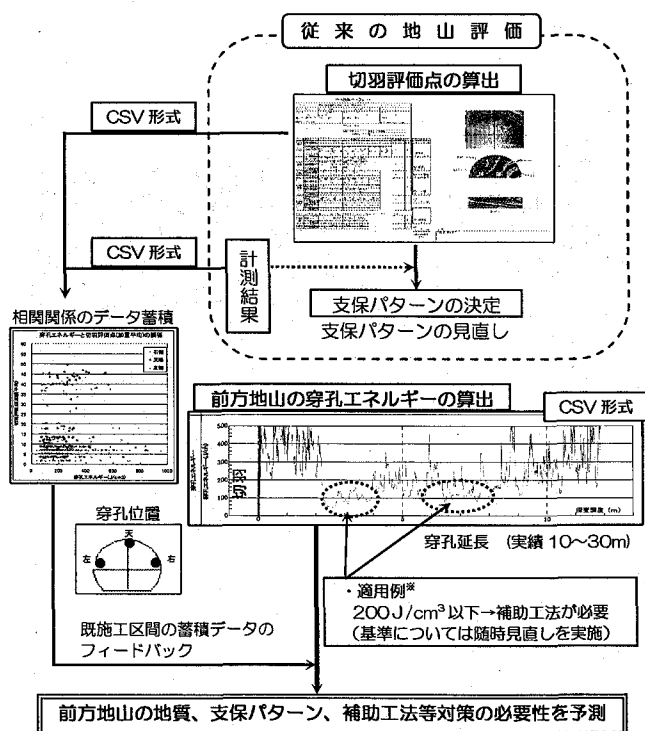


図-2 トンネル地山評価システム概念図

3. 実トンネル現場での試行

(1) 適用トンネルの概要

平山トンネルは、暫定2車線で供用開始している東海北陸自動車道の瓢ヶ岳PAから白鳥ICまでの4車線化事業（延長L=24.2km）のうち、トンネル工事を主体とする延長1,549mの高速道路（Ⅱ期線）工事である。本トンネルは比較的硬質なチャート層の分布地域であり、山裾部にはチャートの礫からなる崖錐地形となっている。ジュラ紀中期の小駄良川層の徳永砂岩部層に属し、地質的に美濃帯メランジによって形成された地質構造であり、いわゆる付加体地質の特徴である地質が不連続で変わりやすい特徴を有している。終点側坑口部には主に白色、灰色、黒灰を呈するチャートが分布しており、低速度帯（2.6～2.8km/sec）や断層が存在する。尾根沿いには急峻な露岩帯を形成している。ただし、亀裂面の密着度は低く、山裾付近の岩塊がブロック状に崩壊して山裾部に転石として点在している。



図-3 現場位置図

表-1 平山トンネル工事概要

工事名称	東海北陸自動車道 平山トンネル工事
工事場所	岐阜県郡上市大和町洞戸～名皿部
工期	平成17年3月～平成20年1月
発注者	NEXCO中日本
施工者	鴻池・ロッテ共同企業体
延長	L=1,549m（道路土工L=153m含む）
断面	トンネル延長L=1,396m 掘削断面積A=66.6m ² （一般部）
施工法	NATM
掘削方式	発破工法
掘削工法	DIIIパターン（上半先進ベンチカット工法） CI, CII, DIパターン（補助ベンチ付き全断面工法）
補助工法	終点側 長尺鋼管フォアハイルング 起点側 長尺鋼管フォアハイルング

(2) 坑口部施工方法の検討

I期線とII期線との間には小沢が発達して集水地形となっている。この場所では、I期線工事の施工記録によれば、湧水量が非常に多く、長距離の水抜きボーリング(300~500m)を実施している。さらに、湧水による局所的な地山崩壊も発生しており、II期線工事においても同様の地質状況が想定されるため、慎重に施工する必要がある。本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・計測結果による慎重な施工とともに厳重な計測管理及び適切な補助工法の選定が必要であり、設計においては図-4に示すとおり、長尺鋼管フォアパイリング(AGF-P)が計画されていた。本トンネルにおける施工上の問題点として大きく分類して①坑口部、破碎帯における未固結部分での切羽の安定(天端・鏡面)、②坑口部上部斜面の安定、③トンネル湧水の発生と支保の施工といった事項が想定され、適切な対策工を選定、施工することでトンネルの安定を確保するとともに、安全かつ経済的な施工が望まれた。事前の情報から図-5に示すように、終点側坑口部の地質構造を推定し、トンネル掘削時に地山のグラウンドアーチが形成しにくいことを、先行ゆるみ及び天端の安定性確保が重要であると考えた。I期線工事でも天端崩落が頻発して発生していることから、本トンネルでも同様の現象が生じる可能性があり、トンネル掘削が断層・破碎帯を貫くため、脆弱な未固結地山でも効果を期待できる工法の選定が必要であった。

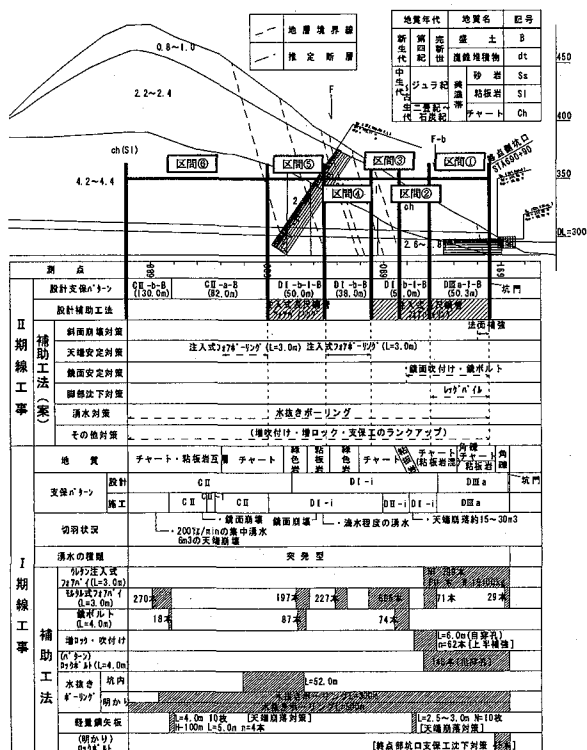


図-4 終点側坑口部の問題点と対策工

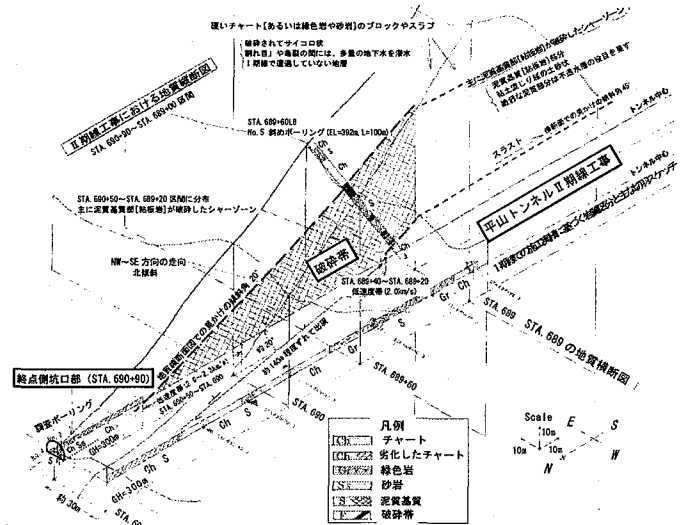


図-5 終点側坑口部の地質構造の推定

(3) 補助工法の選定と施工時の管理

補助工法の選定にあたっては、前述の地形・地質状況およびI期線施工結果を考慮して、本トンネル終点側坑口部における施工条件を考慮した上で、採用可能であると考えられる天端安定対策として以下の工法を一次選定した。

- ① パイプルーフ工法
- ② 長尺鋼管フォアパイリング
- ③ ウレタン注入式フォアボーリング
- ④ 薬液注入工法
- ⑤ 垂直縫地工法

これらの工法に関して、表-2に示すとおり「施工性」、「信頼性」、「経済性」といった観点から、比較検討を実施した結果、上部斜面への影響を極力小さく抑えるために、先行ゆるみの抑制効果の高い長尺鋼管フォアパイリングを選定した。また、先受け工法の選定にあたっては、土被りや先行ゆるみ範囲の大きさにより先受け効果が異なるため注意する必要がある。すなわち、図-6に示すとおり、先受け長さが短いと前方のゆるみを押さえきれずに先行変位を生じることとなるため、上部斜面への影響は免れない。

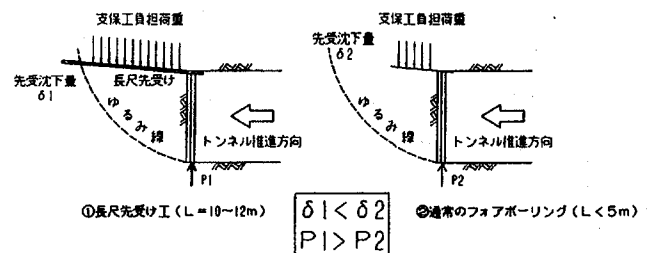


図-6 先受け長さと支保反力の関係²⁾

表-2 補助工法比較検討表

対策工	①パイプルーフ工法	②長尺鋼管フォアパイル工法	③ウレタン圧入式フォアパイル工法	④薬液注入工法	⑤垂直縫地ボルト工法
概要図					
信頼性	上部緩み土圧に対して坑内より剛性の高いパイプを平行に施工し、トンネル施工時に支保工で受けながら掘進する。 パイプを支保工で確実に受けていくため、緩みを抑制し切羽安定性もよく上部斜面への影響も抑えられる。	長尺でかつダブルに鋼管を配置するため、先受け効果が高い。地山の変位に応じて施工規模を変更できる。	セメント系の注入材に比べて粒子が細かく流動性が高いため、注入の確実性は高いが先行変位は止められない。限定された範囲を確実に固結改良でき改良ゾーンの強度、効果の確実性も高く実績も多い。	湧水や亀裂の多い地山での逸散等により、注入の確実性に懸念があり十分な改良効果が望めない。均一な地山改良ができれば、切羽の自立性の向上、クラウン部地山の崩落、崩壊防止に効果がある。	地表面ボーリングを行い、セメントミルクを注入した後、縫地ボルトD32(SD35)を挿入することにより、地山の縫付け、および吊下げ効果を発揮する。
施工性	地質によっては、パイプ間からの地山の抜け落ち、および余割りが懸念される。亀裂の多い地山やクラッキーな地山では掘削が困難となる。	幅幅が不要で牽引方式によるため施工が確実。特別な機械を必要としない。	掘削サイクルに取り込める。特別な機械を必要としない。	地表からの作業は可能であるが、削孔延長が長くなる。坑内の施工の場合、掘削サイクルには取り込めない。	施工ヤードが斜面となり、工事用進入道路及び足場が必要となる。斜面作業となり施工性に劣る。
経済性	パイプルーフ推進用の架台が必要となる。延長が長くなると大口径のパイプ施工となり割高となる。	9m毎に打設本数や範囲を変更でき、ウレタン系とセメント系の複合注入により経済的。	注入範囲は薬液注入工法に比べて少なくて済むが、材料が高価で経済的には不利。	注入範囲が広範囲となり注入量も多くなることから経済性は劣る。	斜面上の施工では費用がかかる。トンネル掘削時に先受工の併用が必要。
工期	トンネル掘削に先立ち施工を完了させる必要があるため、工期に大きく影響する。	鋼管打設は9m毎の打設となるが多少時間がかかる。	掘削サイクルに取り込めるため、工期的に若干の遅れが出る程度である。	注入作業に時間がかかり掘削サイクルに取り込めない。	事前に施工できるため掘削サイクルには影響を及ぼさない。
総合評価	△	◎	○	×	△

したがって、坑口部において上部斜面及び地すべり土塊に影響を与えないように先行ゆるみを押さえるためには、長尺(L=5.0m以上)の採用が必要であると判断した。なお、長尺鋼管フォアパイル工法の工法としては、表-3に示すとおり、ゆるみの発生を最小限とするため、無幅工法であり、打設角度が小さく多段打設が可能なAGF-HITMを採用した。

なお、施工時の設計の修正に関しては、図-7に示すとおり、切羽評価点、切羽前方探査結果及び計測結果に基づくトンネル地山評価システムを参考に、支保パターンの選定や追加対策の検討、支保低減の検討を実施するという方針で施工管理を行った。

表-3 AGF-PとAGF-HITMの比較

工法	AGF-HITM	AGF-P
概略		
要因	・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、4m~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)	・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。
ピット	ロストピット方式	拡張ピット方式(ロストピット方式)
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パイプ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。(ロストピット方式の場合は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。 ・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。 ・トンネルジャンプにより施工でき、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。 ・施工ピッチが短い切羽の変位に応じて範囲の変更が可能で経済的。	いずれの範囲においても1本の鋼管で支持する。 ・ウレタン系を使用するため、限定された範囲を改良できアーチ形成が可能。 ・トンネルジャンプにより施工でき、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。
長所	・ロストピットにより削削を行うが、圧入等大きな設備が必要とされるジャンプが発生する。 ・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剥離が懸念される。(鋼管配置で対応可)	・拡張ピットによる削削を行うが、砂礫層やクラッキーな地山ではジャンプ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位に対応しにくい。
短所	・鋼管径が小径化できるので施工性は良く、ピットの選択も不要。	・HITMに比べ鋼管径が大きく施工延長も長いので施工性は劣る。 ・地山によりピットの選択が可能。 ・産廃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。
施工性	・鋼管径が小径化できるので施工性は良く、ピットの選択も不要。	
信頼性	・多段となり支持効果は高くなる。	

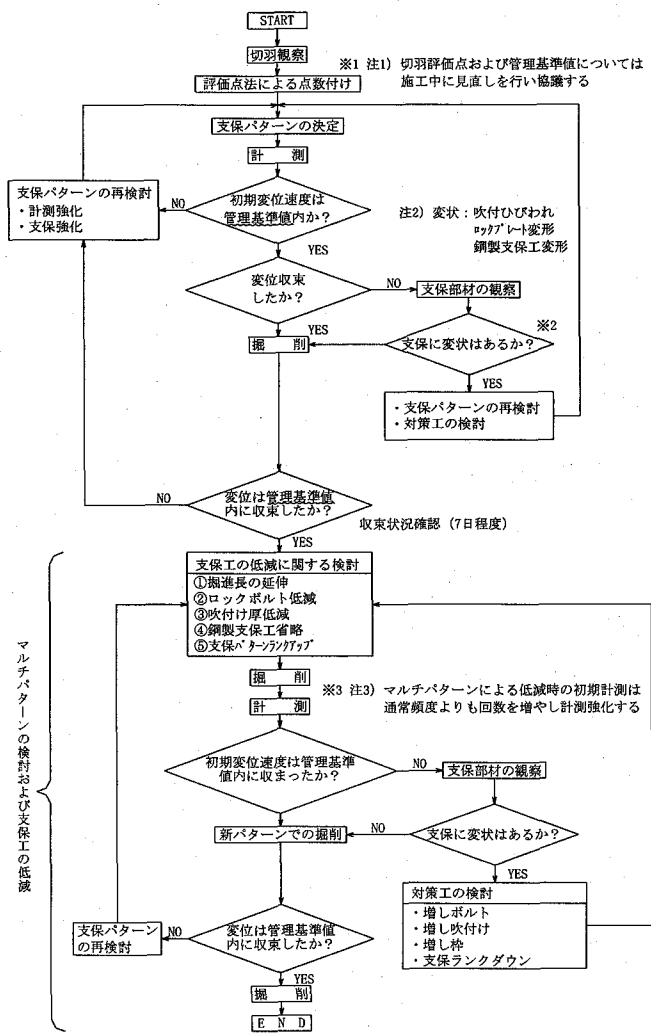


図-7 施工時における設計修正フロー

(4) トンネル地山評価システム試行結果

終点側坑口部において、トンネル地山評価システム(K-tes)を試行的に実施した。前方探査の配置は、原則として左右2箇所(必要に応じて天端を追加)、探査延長は、先受け長をカバーできる $L=15\text{m}$ とした。

今回、終点側坑口より約 $L=630\text{m}$ 区間を対象として実施し、施工に反映させた。穿孔エネルギーの値から前方の地山状況を予測し、補助工法選定の判断材料とした。対象区間においては、部分的には集中湧水(100 L/min)程度の湧水は発生したものの幸いにも、当初予想されていた突発的な湧水は見られず、AGF-HITMの採用により上部斜面への影響なく、天端の安定を確保できた。図-8に坑口部施工結果のまとめを示す。図中に示すとおり、切羽評価点(平均)と切羽前方探査による穿孔エネルギー(平均)の間には比較的良好な相関関係が得られ、特に坑口部のAGF-HITMが施工された箇所では、切羽の一部で地山変化に伴う多少のばらつきは見られたが、切羽全体平均値では閾値(200 J)近傍であった。切羽前方探査の採用により、施工の安全性確保、経済性の面からも有効であることが実証されたものと考えられる。

一方、付加帯という地質的特殊性から、測点690付近では、地山が好転したため、一旦、AGF-HITMの施工を中断したが、写真-2に示すように、切羽右側の肩部から核にかけて一部小崩落が発生し、急

きよ切羽前方探査を追加して実施したところ、前方において地山が急変することが想定され、鏡ボルトの追加やAGF-HITMの採用を再開する結果となった。

以上述べたとおり、現場における地山評価システムの採用により、切羽前方探査結果と既施工区間における切羽評価点、計測データがリアルタイムで比較できることにより、従来であれば、安全側で対策工を採用すべき箇所においても、掘削時に速やかな対応ができることで、その施工範囲を限定する事が可能となり、必要な箇所に必要な対策を合理的に施工するための判断材料としては有効であると考えられる。



写真-2 切羽崩落状況 (測点 689+84.2)

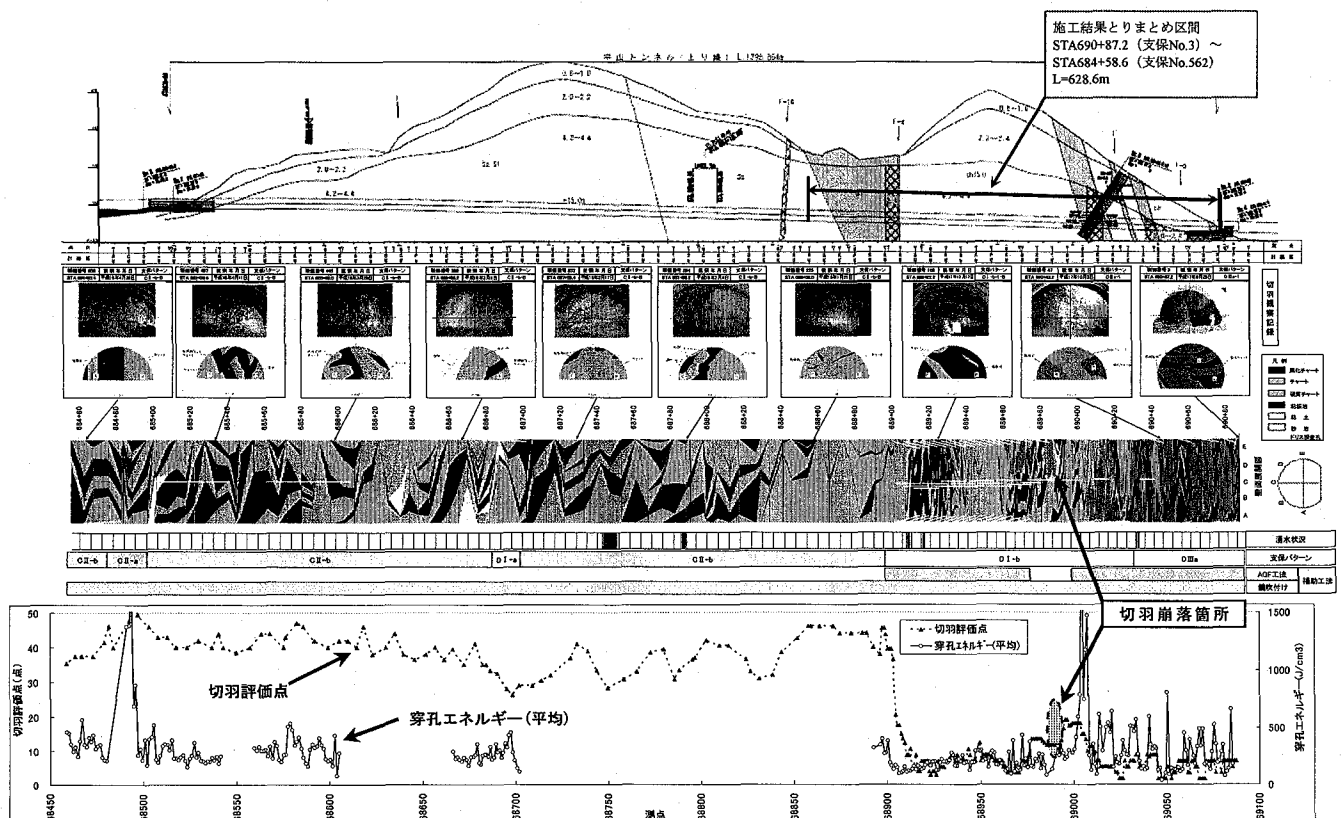


図-8 施工結果まとめ

(5) 施工結果の分析

坑口部より実施した切羽前方探査の結果を図-9に示すように、切羽評価点（加重平均）と穿孔エネルギー（Ed）の指標で整理した。

前方探査の実施位置（天端、左側、右側）により多少ばらつきは見られるものの、切羽全体の平均値としては、太点線で囲まれた範囲、すなわち、切羽評価点が20点以下、穿孔エネルギーが200J/cm³付近の範囲に集中している。一方、切羽評価点が高くなると、穿孔エネルギーのばらつきが大きくなる傾向が見られ、右側は地質（チャート）の影響でばらつきがあるものの、切羽観察や計測結果の結果等の施工実績も踏まえ、補助工法が必要となる穿孔エネルギー（Ed）を200J/cm³以下と設定し、前方探査の結果を補助工法の必要性の判断材料とした。

また、図-10に前方探査結果の一例を示す。ここでは、切羽位置から12m前方を穿孔した結果、現切羽は比較的良好な状態であったが、2m～8m区間にかけて穿孔エネルギーが200J/cm³以下となり、設計においても、前方に断層破碎帯の出現が予想されていたこともあり、現切羽から長尺鋼管フォアパイリングを施工することで切羽の安定が図れた。

このケースでも、穿孔エネルギーが200J/cm³以下で、補助工法が必要となることが再確認された。

本トンネルでの試行により、穿孔エネルギーにより前方地山の地質状況を把握し、支保パターン、補助工法の必要性を判断することができた。図-11は

AGF 施工区間における切羽評価点（加重平均）と切羽前方探査による穿孔エネルギーの比較、図-12はA計測と穿孔エネルギーの関係を示したものである。

穿孔エネルギーのばらつきの原因はレンズ状に分布する比較的硬質なチャート層の存在であるが、地質的に変化の著しい本トンネルにおいて200J/cm³という指標が1つの目安となると判断できる。

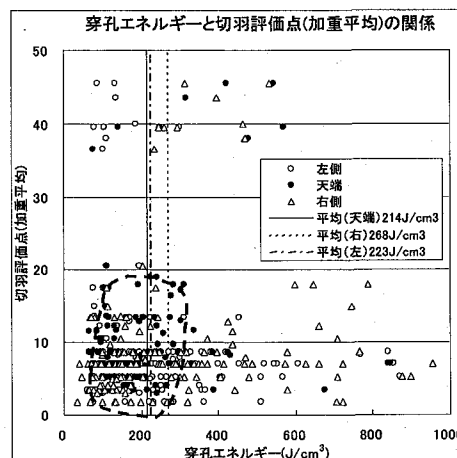


図-9 切羽評価点と穿孔エネルギーの関係

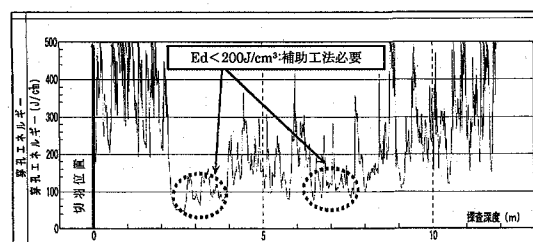


図-10 前方探査結果と補助工法の選定（測点 690 付近）

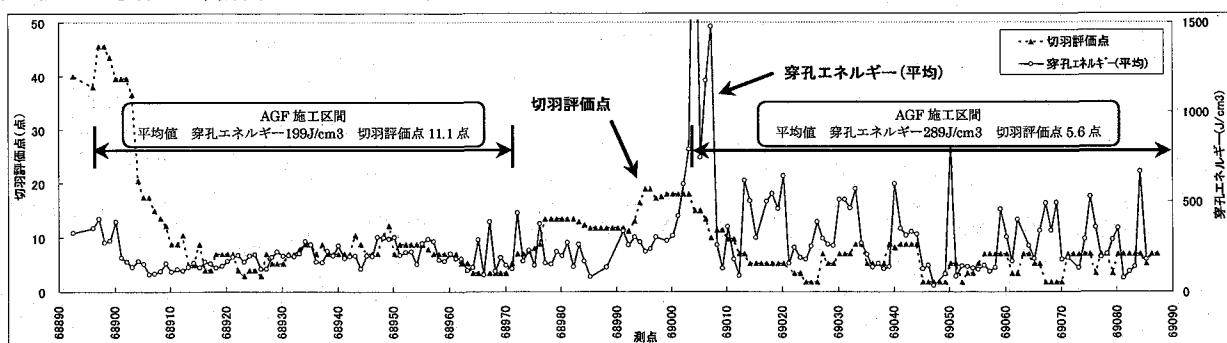


図-11 切羽評価点と穿孔エネルギーの比較

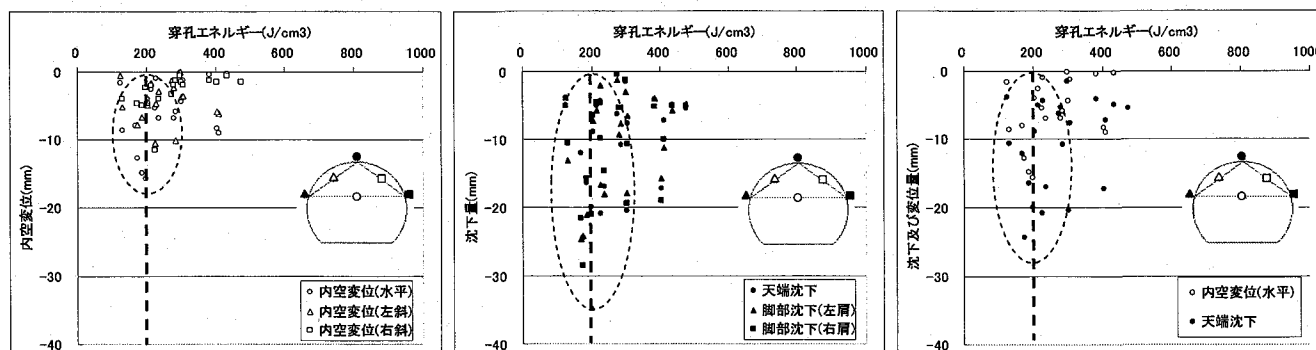


図-12 A計測結果（収束値）と穿孔エネルギーの関係

4. トンネル地山評価システムによる補助工法選定

(1) トンネル切羽前方探査フローの提案

今回、現場にて試行したトンネル地山評価システムによる補助工法の選定に関して、図-13にトンネル切羽前方探査フロー（案）を示した。本トンネルのように、地質状況の変化が多い場合には、切羽前方の状態をいかに正確に予測し、適切な対策工（補助工法、支保構造等）を選定できるかといったことが、掘削を円滑に進める上で重要となる。破碎帯や湧水箇所の範囲を知り、必要な先受け長や先受けの剛性といった補助工法の規模に関して、切羽前方探査結果に基づき掘削事前に判断することで、施工時の安全性は高まり、経済的な面からも有効であると考えられる。また、今回採用したトンネル地山評価システムにおいては、既施工区間の切羽評価点、計測結果がリアルタイムに整理できることから、これまでの管理手法に比較して、切羽時点においてより精度の高い判断が可能となる。さらに、トンネル切羽前方探査フローにあるように、前方探査(DRISS)

を精度良く実施することで、安全性を確保した上で、経済的施工作の実現（支保低減）を実施する判断材料にもなることが期待できる。

今後の課題としては、種々の岩種等で適用事例を増やすことで、補助工法の必要性を判断する閾値の確立を進めることが考えられる。長大トンネルであれば、オンサイトのトンネルの施工で積み重ねられる施工データ（地質状況と切羽評価点、計測データ等）そのものが、そのトンネルの次施工段階における対策工を判断する上での重要な情報となる。今後、本システムの適用事例を増やし、より効果的な情報化施工の実現を図っていきたいと考えている。

(2) トンネル地山評価システム導入の効果

山岳トンネルにおける地山評価に関して、現状では、掘削時に切羽の状態を観察し、切羽評価点として点数化し、支保パターン毎の評価実績や計測結果と比較することにより地山評価を実施している。この方法では、切羽前方未掘削部の地山評価が行えないため、表-4に示すような課題が考えられる。

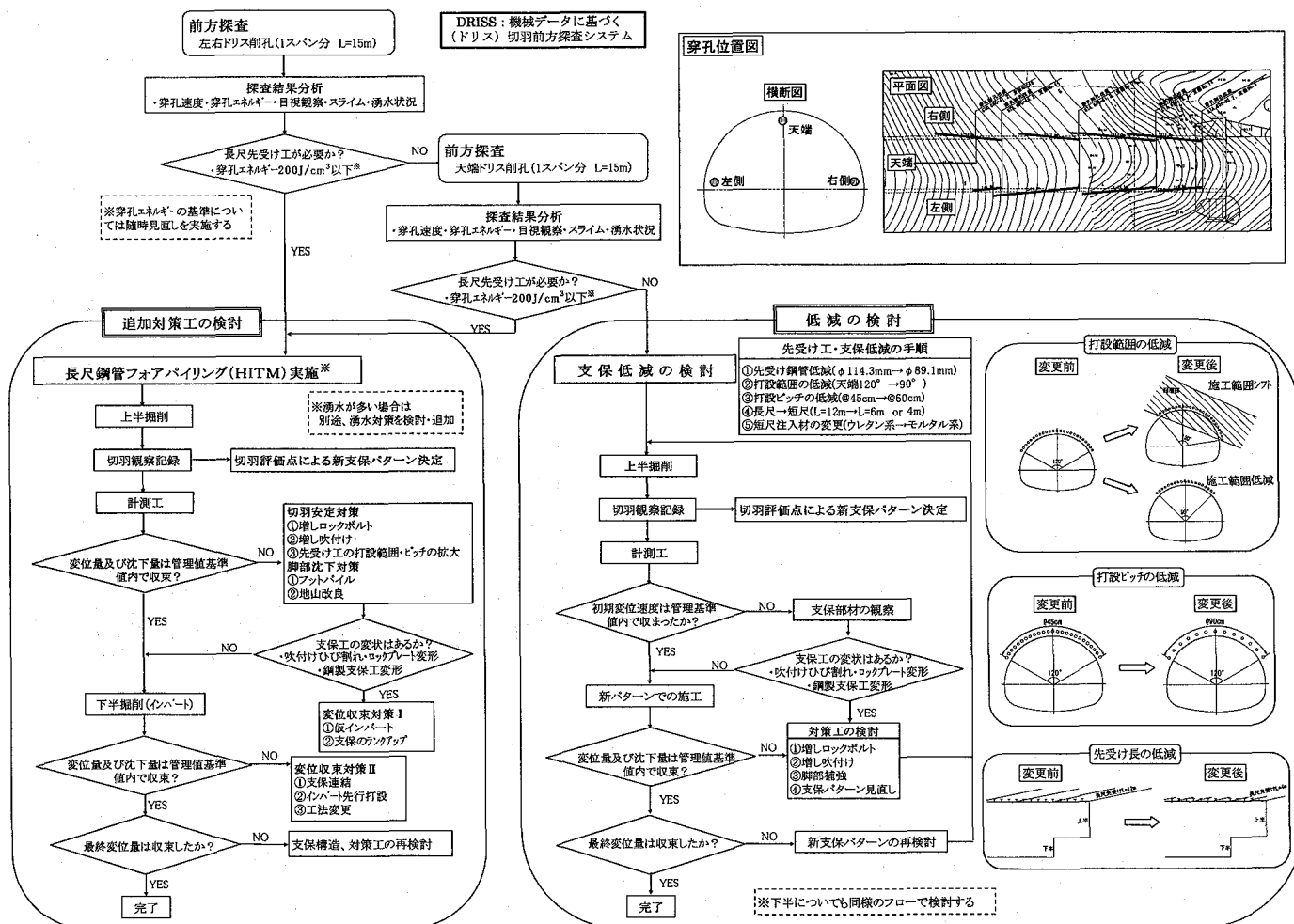


図-13 トンネル切羽前方探査フロー図（案）

表-4 トンネル地山評価における課題

項目	地山評価における課題
①	地質の変化が多い地山（坑口部、破砕帯、付加体地質等）では、地質の急変により切羽に出現した地山の評価結果とその直後の地質が異なる場合がある。
②	坑口や破砕帯で必要となる補助工法の必要区間長や範囲を事前に設定できない。（特に長尺先受け工の場合）したがって、地山の変化が多い地山ではどうしても安全側の対策を取らざるを得ないため、結果的に不経済な施工となる場合がある。
③	想定外の突発的な湧水や地質の急変が発生する可能性があり、対策工の検討・実施の間、掘削が止まり工程の遅延をまねく場合がある。

今回試行したトンネル地山評価システム（K-tes : Konoike tunnel estimation system）は、前述のとおり、トンネルの標準機械であるドリルジャンボの穿孔時の機械データの収集・分析により、切羽前方の地質を穿孔エネルギーとして定量的に評価する切羽前方探査技術をコア技術としている。一方、施工の進捗とともに得られる支保パターン毎の切羽評価点や計測データをリアルタイムに施工情報としてデータベース化する。当システム内では、蓄積されたこれらの施工データと切羽前方探査により得られた穿孔エネルギーを関連づけてデータベース化しており、これらの相関関係と新たに得られた穿孔エネルギーから、地山状況を把握し、それに適合した支保パターンの選定や必要な対策工（補助工法）の検討のための資料として用いる。本工法導入の効果は、表-5に示すとおりである。

表-5 トンネル地山評価システム導入の効果

項目	システム導入の効果
①	地山の急変や突発湧水といった切羽前方地山の予測ができるため、支保の設計や対策工の必要性を掘削に先立って検討、実施できる。
②	掘削作業の安全性、トンネルの品質向上が期待できる。
③	前方地山の予測により、補助工法の区間や範囲を合理的に決めることができるため、経済性が向上する。
④	補助工法を事前に準備することができるため、掘削作業を止めることなく、確実な工程計画が可能となる。

5. おわりに

今回、切羽前方探査予測及び施工データのシステム化によりトンネル地山評価システムを構築するとともに、実現場において補助工法の必要性の判断資料として試行的に適用した。

試行結果からは、切羽評価点（平均）と穿孔エネルギー（切羽全体平均値）の間に比較的良好な相関が見られ、切羽前方予測により、補助工法の選定に参考となる資料となりうる事が確認された。

本トンネルにおいては、長尺鋼管フォアパイリングの採用に関する閾値としては、切羽評価点（平均）が20点以下、穿孔エネルギーは200 J/cm³が妥当な値であると確認された。

今回の試行のように、付加体地質という変化の著しい地山において切羽前方の地山状況を適切に評価できることは、作業の安全性確保と同時に、必要な対策の検討を掘削に先立ち実施することで特に長尺の先受け工を採用する際の施工区間や施工範囲の決定が可能であるなど、経済的にも有効であると考えられる。今回は切羽面3箇所（天端、左・右）の機械データを採取し、地質の走向を含めた前方地山の推定を効率的に予測することで切羽を止めることなく対策工の検討や資材の調達を行うことができ、確実な工程管理の実現も可能となった。

補助工法採用の目安となる閾値に関しては、今後本現場での施工実績を積み重ね、評価・分析を進めていきたいと考えている。

写真-3に坑口の状況を示すが、現在、トンネルの施工はL=696m（2006.5月現在）の掘削を完了している。今後も実現場での適用事例を増やし、補助工法の判断指標の確立に努める所存である。



写真-3 適用現場全景

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投稿中, 2006.
- 2) 脚部補強工 技術資料 (第三版), ジェオフロンテ研究会, p1, 2004.