

畑薙山断層帯におけるトンネルの掘り方・ トンネル湧水への対応（素案）

本資料は令和2年8月25日現在の内容をまとめたものです。
今後、有識者会議委員のご意見を踏まえ、内容やデータを加除訂正してまいります。

目 次

1. 南アルプストンネルの概要

- (1) 全体概要
- (2) 畑薙山断層帯の概要

2. 山岳トンネルにおける一般的な考え方

3. 工事期間中のトンネル湧水を山梨県側に流出させない対策の検討

- (1) 山梨県境付近への導水路トンネルの取付け
- (2) 静岡県側から最新の機械掘削技術を用いたトンネル掘削の検討
- (3) 山梨県境稜線部からの深井戸による揚水の検討

4. 畑薙山断層帯を山梨県側から掘削する場合のトンネル湧水への対応

5. 千石斜坑等の掘削方法と畑薙山断層帯の掘削方法の比較

参考資料 1 青函トンネル掘削時における突発湧水事例

参考資料 2 地質調査結果

1. 南アルプストンネルの計画概要

(1) 全体概要

- ・南アルプストンネルは山梨県～静岡県～長野県に至る総延長約 25km のトンネルであり、トンネルの縦断線形（図 1）は、静岡県と長野県の県境付近の赤石山脈高峰部におけるトンネル土被り※を極力小さくするため、県境付近にトンネルの頂点を設定する線形として計画しました。

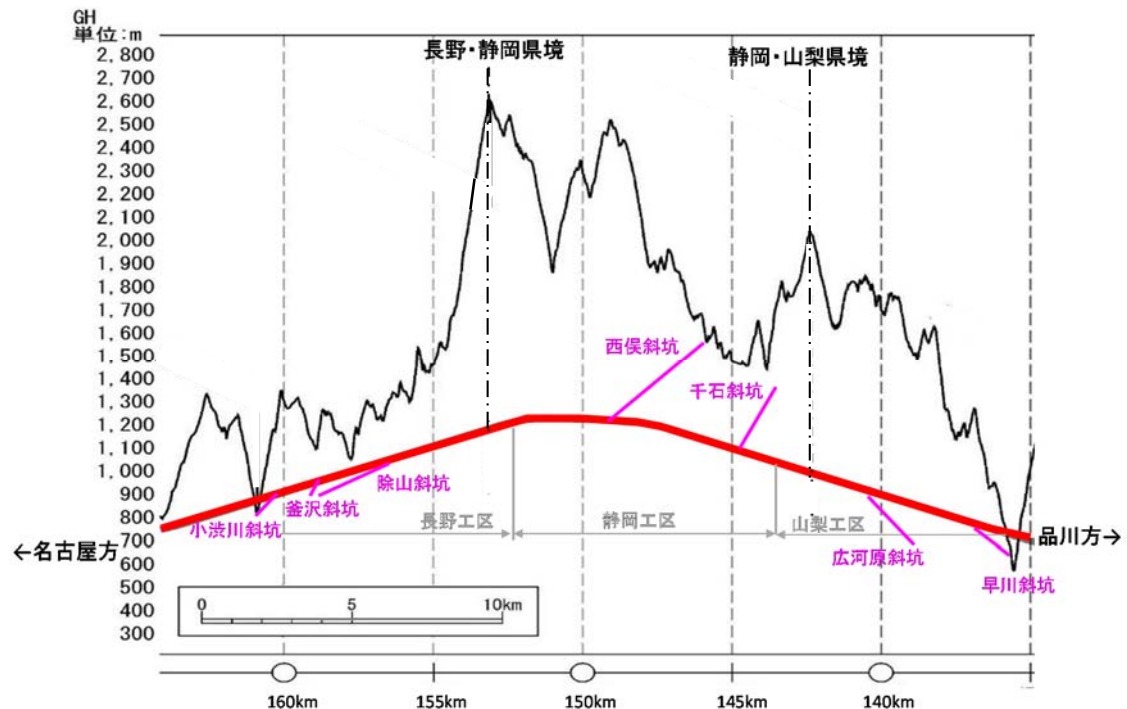
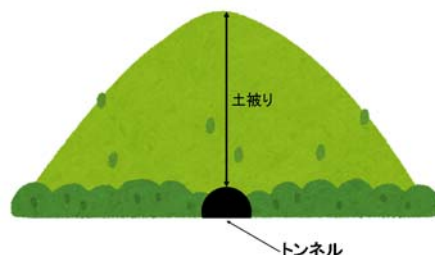


図 1 南アルプストンネル縦断線形

※地表面からトンネル天井部までの地盤の深さ



- ・トンネルの土被りが大きくなると、トンネル掘削時にも大きな影響を与えます。トンネル上部にある地山が弛んだ状態にあると、土被りに相応した重さが「山の重み」としてトンネルに掛かります。山の重みが大きくなるほどトンネル掘削時の切羽が壊れやすくなり、トンネルの掘削がより困難となります。
- ・中央新幹線では、走行方式として超電導磁気浮上方式を採用しており、最

急勾配は40%と在来型の粘着駆動方式よりも大きくとることができます。この走行特性を生かし、山梨県と長野県の本線坑口部からトンネル中央部に向かって急勾配とすることで、土被りを極力小さくすることが可能となりますが、それでも長野県と静岡県との県境付近では最大土被り1400mとなり、これまで国内のトンネル工事で最大であった1300mを超える大きさとなります。（表1）

表1 国内における大土被りトンネル

No.	トンネル名称	用途	長さ(m)	土かぶり(m)
1	大清水	鉄道	22,221	1,300
2	新清水	鉄道	13,500	1,200
3	関越(上)	道路	11,060	1,190
4	飛驒	道路	10,740	1,015
5	恵那山(上)	道路	8,650	950

※交通政策審議会資料による

- ・一般にトンネルは両坑口付近から掘削を進めて行きますが、トンネル延長が長くなる場合、両坑口のみから掘り進めると工期（時間）がかかり過ぎるため、トンネルの途中に斜坑を設置し、複数の工区に分けて工事を行います。
- ・南アルプストンネルの場合、全部で7箇所の斜坑を設けており、静岡県内では、斜坑を2か所（千石、西俣）計画しています。
- ・静岡県内では、先進坑及び本線トンネルが地中深くを通過することから、工事の起点となる斜坑は地上部から下向きに掘削することになります。

（2）畑薙山断層帯の概要

- ・静岡県と山梨県境付近には畑薙山断層帯があります。
- ・畑薙山断層帯は、「日本の活断層」（活断層研究会、1991）（図2）に記載されており、これまで当社が実施してきたボーリング調査の結果から、約800mの範囲において破碎質な地質が繰り返し出現していることを確認しています。（図3、図4）

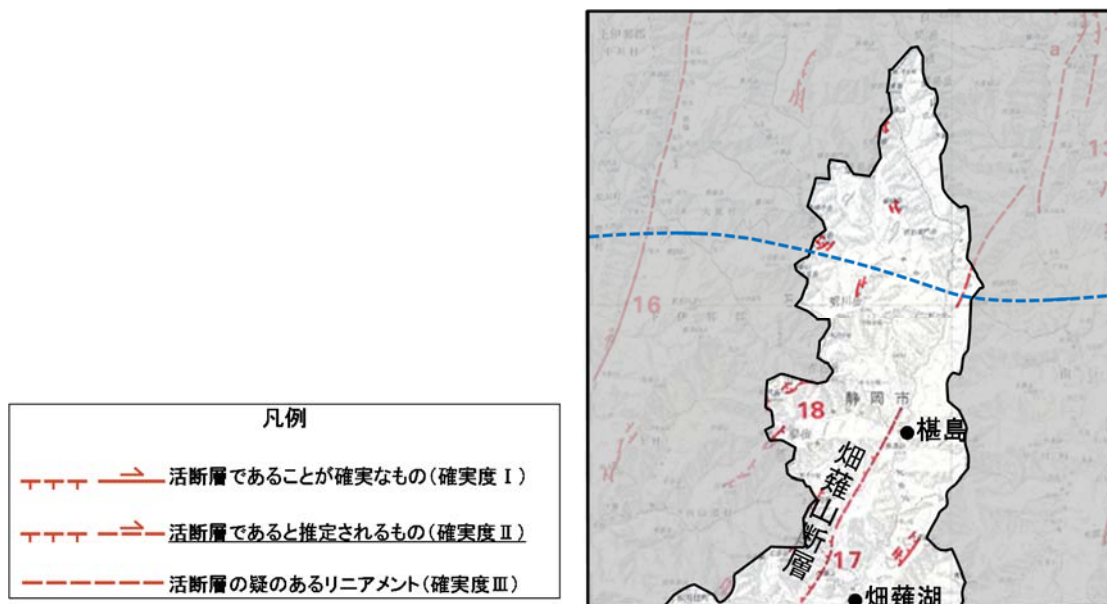


図2 「日本の活断層」(活断層研究会、1991) ※一部加筆

※「(前略) 引き続き対話を要する事項」に対する再見解(その1、その2) P46より抜粋
 注) 環境影響評価においては、主要な活断層としては、『日本の活断層』及び地震調査研究推進本部における活断層の長期評価資料に記載された活断層の内、確実度又は活動度が高いものを記載しており、対象事業実施区域内には活断層は存在していないものとしています。

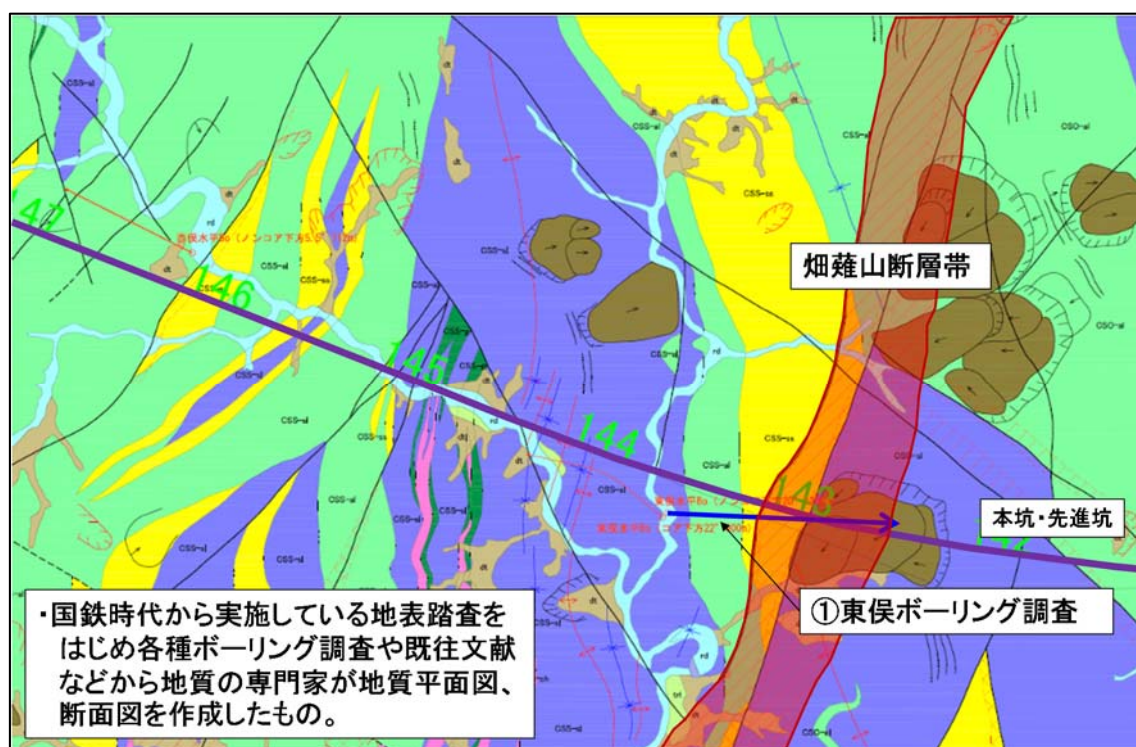


図3 煙薙山断層帯付近の地質平面図

※「(前略) 引き続き対話を要する事項」に対する再見解(その1、その2) P47より抜粋、一部修正

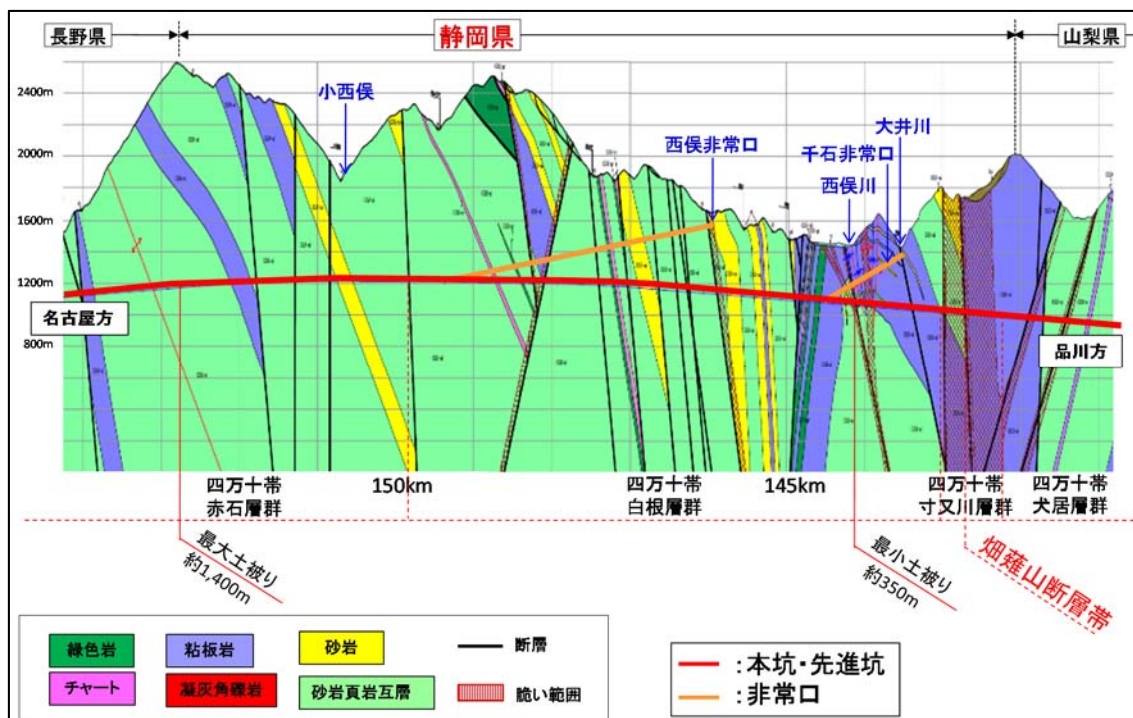


図4 畑薙山断層帯付近の地質縦断図

※「(前略) 引き続き対話を要する事項」に対する再見解(その1、その2) P48より抜粋、一部修正

- ・畑薙山断層帯におけるトンネル土被りは約800mと大きいため、断層や破碎帯に遭遇した際には、高圧突発湧水や大きな土圧の作用がトンネル掘削に大きな影響を与える可能性があります。

2. 山岳トンネルにおける一般的な考え方

- ・山岳トンネルにおいて、トンネル湧水は自然流下により処理することが基本です。
- ・行政界にまたがって山岳トンネルを計画する場合は、可能な限り行政界を頂点とする山形（凸型）に設定し、トンネルの建設においては、トンネル中間部の頂点に向かって上向きに掘ることが一般的です。
- ・山岳トンネルの掘削工法について日本で最も実績があるのはNATM^{※1}です。
- ・南アルプストンネルは前述のとおり、3県にまたがる長大トンネルで、静岡県と長野県の県境付近にトンネルの頂点があります。静岡県と山梨県の県境付近にある畑薙山断層帯のトンネル掘削は、一般的な考え方に基づけば、山梨県側から静岡県側に向かってNATMで掘り進めることとなりますが、この掘り方では静岡県内のトンネル湧水が工事の一定期間、山梨県側に流出することとなります。
- ・これまで、静岡県と対話を行ってきている中で、工事期間中のトンネル湧水を山梨県側に全く流出させない対策として、導水路トンネル（※）の本線取り付け位置を山梨県境付近とすることや、畑薙山断層帯の掘削についてこれまでの考え方によらないトンネルの掘り方の検討を求められています。

※南アルプストンネルのトンネル湧水を自然流下により大井川に流す導水路トンネルの設置を計画しておりますが、導水路トンネルの本線取り付け位置は、山梨県境から約4 km静岡県側に入った位置に計画しています。

※1 トンネル周囲の地盤がトンネルを支えようとする保持力を利用し、吹付けコンクリートやロックボルト打設等により、地盤の安定を確保しながらトンネルを掘進する工法

3. 工事期間中のトンネル湧水を山梨県側に流出させない対策の検討

(1) 山梨県境付近への導水路トンネルの取付け

- ・ 静岡県内に設置する導水路トンネルの取り付け位置を山梨県境付近とする検討案です。
- ・ 静岡県内で計画する導水路トンネルは、トンネル湧水を自然勾配で安定的かつ恒久的に河川へ水を戻すことを目的としており、このトンネルを山梨県境付近に取り付けることで、工事期間中を含めて静岡県内のトンネル湧水を大井川へ戻すことができる方法として検討しました。
- ・ 山梨県境に取り付ける場合の計画線を図5に示します。山梨県境付近には畑薙山断層帯があり、この断層帯に沿って建設することになります。

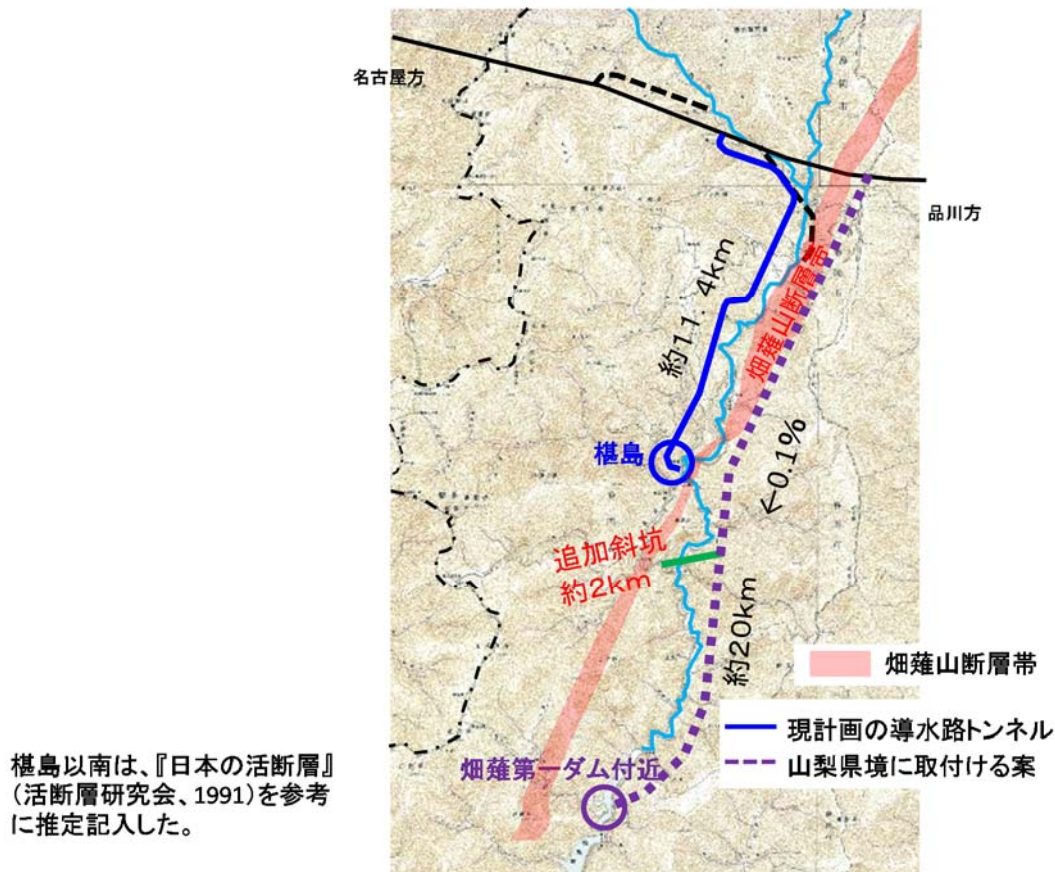


図5 山梨県境付近へ導水路トンネルを取付ける計画

※「(前略) 引き続き対話を要する事項」に対する再見解(その1、その2) P73 より抜粋、一部修正

- ・ トンネルの線形を検討する際、断層や破碎帯などの地質が脆い箇所とは直交するか、難しい場合でも極力短い距離で交差する事が基本です。
- ・ 山梨県境付近へ導水路トンネルを取付ける場合、トンネル全長約20kmのうち、北側半分の区間においては、畑薙山断層帯に沿って、土被り約500m～1,100mで約10kmに亘ってトンネルを掘削することになり

ます。

このような条件下では、トンネル掘削時において、約10kmに亘って不良地質への遭遇、高圧湧水や大きな土圧が作用する可能性が高いため、トンネル掘削は極めて困難になると考えます。

- また、供用後においても、断層や破碎帯と並行する区間は、大きな土圧の作用によりトンネル変形やトンネル構造物の強度低下を引き起こすなど、維持管理上の要注意箇所となることから、それが約10kmに亘って連続することは避けなければならないと考えます。
- また、畑薙山断層帯を避けるように、山梨県境の直下を掘り進めて山梨県境付近へ導水路トンネルを取付ける平面線形にしたとしても、県境部の稜線下では、土被りがこれまでの国内最大を超える約1,300～1,400mと極めて大きくなり、更にその区間が約5kmも連続します。(図6)

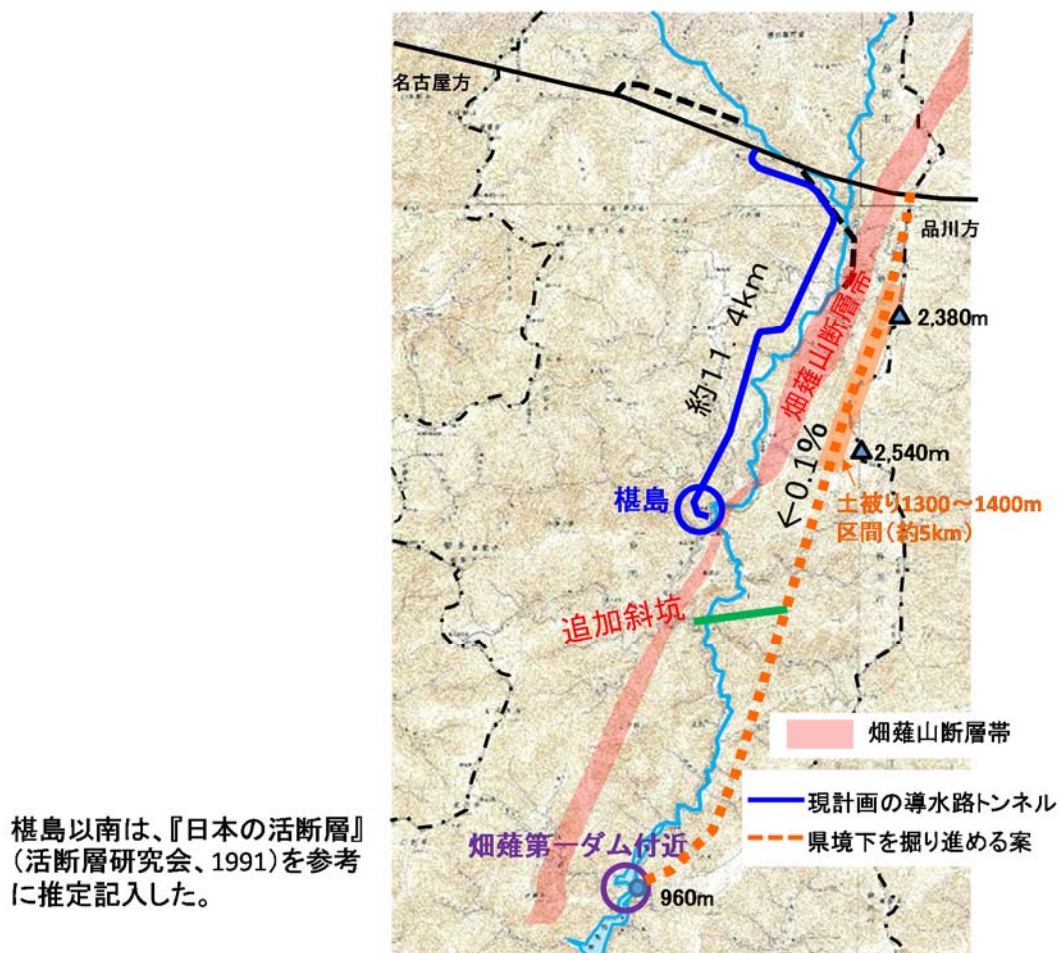


図6 山梨県境下を掘り進め導水路トンネルを取付ける計画

※「(前略) 引き続き対話を要する事項」に対する再見解(その1、その2) P75より抜粋、一部修正

- ・南アルプストンネルの本線において、土被りが1,300mを超える区間が約800mあります。この超大土被り区間においては、最新の計測・設計・施工の技術を用いて、トンネルを貫通させる覚悟でおります。
- ・一方、本検討案では本線トンネルよりもさらに大きく条件が悪くなることから、トンネル掘削は極めて困難であると考えています。また、この導水路トンネルは、畑薙山断層帯のトンネル掘削を開始するまでに完成する必要があることを考えると、本検討案は避けなければならないと考えております。

（２）静岡県側から最新の機械掘削技術を用いたトンネル掘削の検討

- ・畑薙山断層帯を静岡県側から山梨県側に向かって、一般的な山岳トンネル工法であるNATMにより下向きに掘削すると、断層や破碎帯に遭遇した際に高圧突発湧水が生じ、切羽周辺が水没するリスクがあります。
- ・昨年10月の専門部会やその後の再見解で、昭和51年に青函トンネルの工事中に発生した70m³/分（約1.2m³/秒）の突発湧水による作業坑・本坑の水没事例を用いながらご説明※させて頂いているように、水没すると作業員の安全性に問題が生じるほか、機械や設備の修理が必要となると工期は大幅に遅れることになります。

※ 説明資料は、参考資料1として末尾に添付

- ・一方、トンネル掘削技術に関しては、近年、より深い位置により長いトンネルが計画されることに伴って、少ない人数で、高速で掘削する機械掘削が採用される傾向にあります。
- ・そこで、畑薙山断層帯を静岡県側から山梨県側に向かって下向きに機械掘削することについて検討しました。

<TBM工法>

- ・静岡県内の南アルプス地域において、過去（平成3年～平成5年）に水力発電所の導水路トンネル（二軒小屋発電所、赤石沢発電所）をTBM※で掘削した事例があります。（図7、写真1）

※TBM（トンネルボーリングマシン）と呼ばれる機械を使用し、岩盤など堅い地盤にトンネルを造る工法

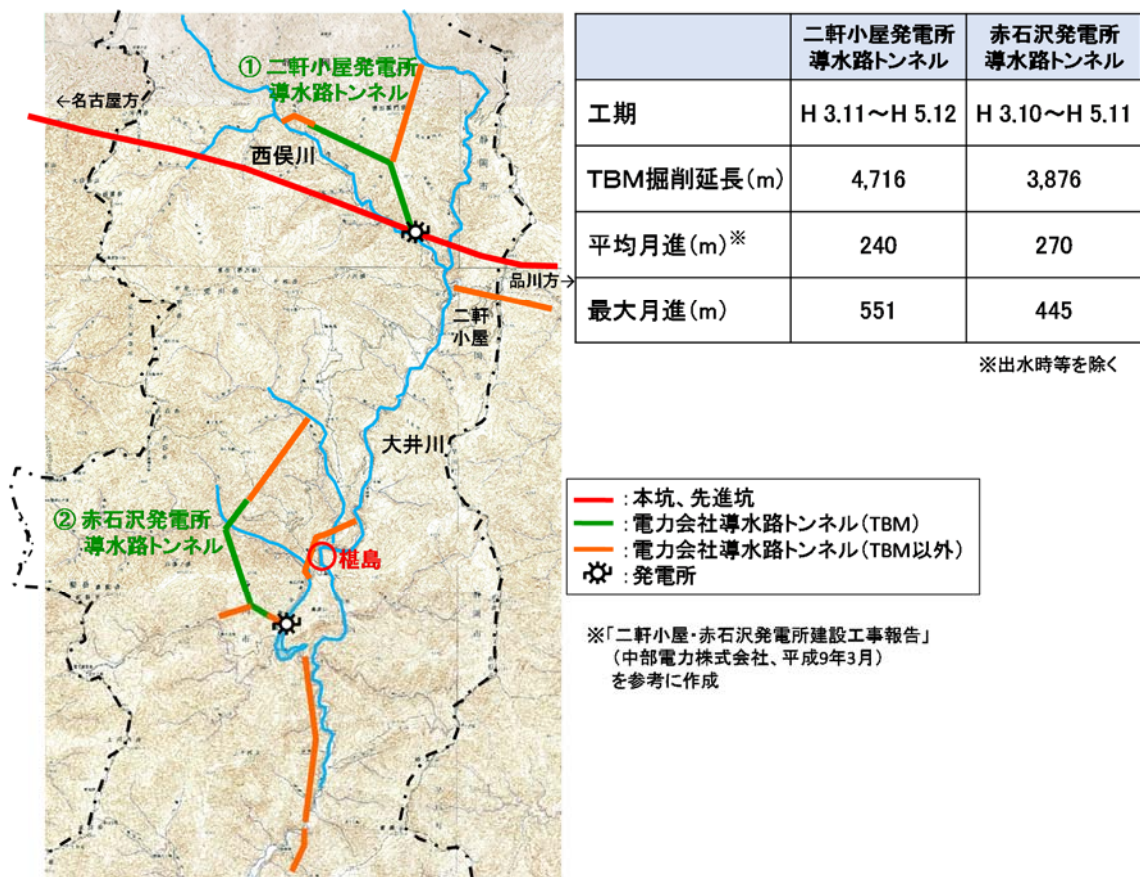


図7 静岡県内南アルプス地域の水力発電導水路トンネル

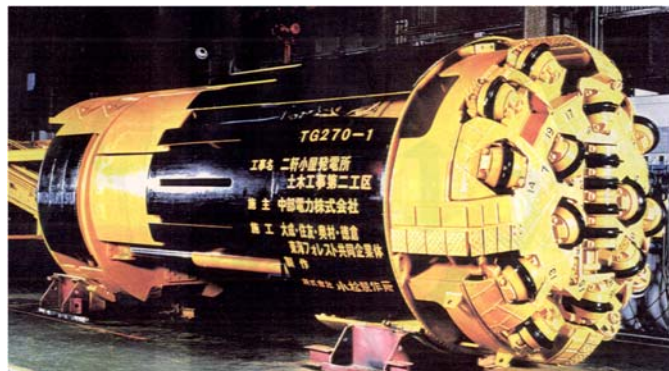
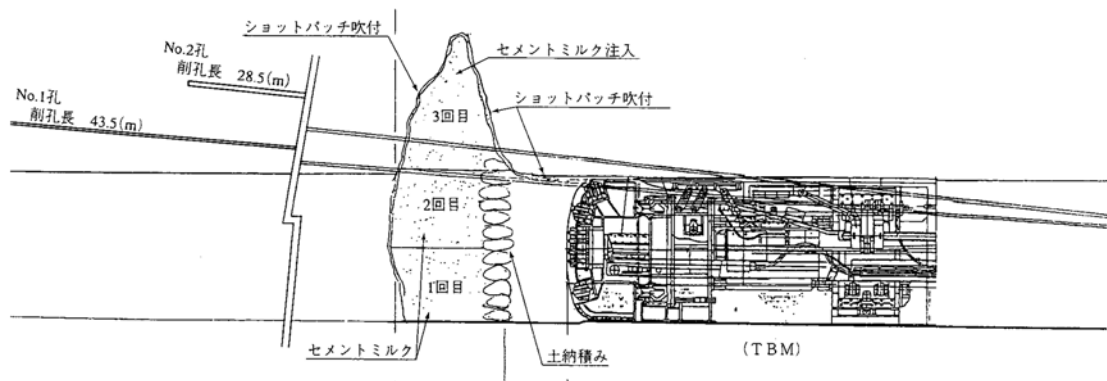


写真1 二軒小屋発電所のTBM (φ2.6m)

- ・ いずれの導水路トンネルも最大土被りが500mを超える区間で掘削を行っており、赤石沢発電所導水路トンネルでは最大土被り約850mの区間が一部ありました。しかし、畑薙山断層帯のように土被り約800mで、かつ地質の脆い区間が連続する区間はありませんでした。また、トンネルの湧水は二軒小屋発電所導水路トンネルで突発湧水として最大約6m³/分(約0.1m³/秒)が記録された区間があります。

- ・なお、トンネル湧水以外の要因でTBM掘削ができなくなる事象が生じました。それらは主にトンネル切羽が前方から崩れたことや（図8）、TBMを支える岩盤の一部が脆かったため、TBMの先端が下向きに下がってしまう（ノーズダウンともいいます）という事例でした。それぞれ復旧までに2ヶ月ほどの時間を要したと記録されています。



※「二軒小屋・赤石沢発電所建設工事報告」（中部電力株式会社、平成9年3月）を参考に作成

図8 二軒小屋導水路トンネル切羽前方崩落対応事例

- ・畑薙山断層帯では地質が脆い区間が繰り返し出現するため、TBM自体にも大きな土圧がかかり、拘束されて掘削できなくなるような事態が考えられます。
- ・国内で、地質の脆い箇所でTBMを用いて掘削に挑戦することになったトンネル事例として、東海北陸自動車道飛驒トンネル（1997年～2007年に施工、延長10.7km）があります。（図9、図10）



図 9 飛驒トンネル位置図

※秘境を貫く飛驒トンネルの物語（中日本高速道路株式会社）より抜粋

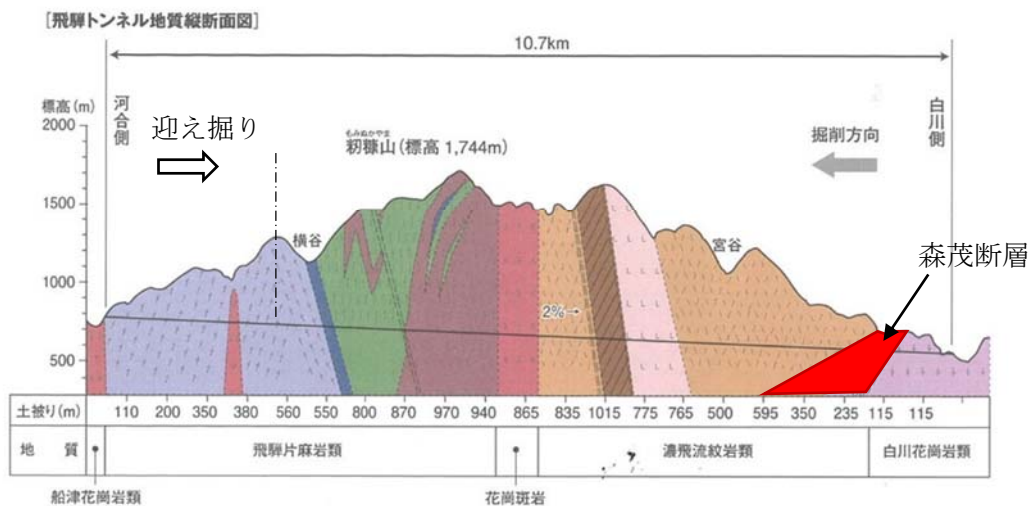


図 10 飛驒トンネル地質縦断面図

※秘境を貫く飛驒トンネルの物語（中日本高速道路株式会社）より抜粋、一部加筆

- ・飛驒トンネルでは、調査坑（南アルプストンネルで言う先進坑と同じ役割のトンネル）と本坑について、最大の土被りが約1,000mとなる区間を白川側から上向きに掘削することで計画され、調査坑は直径4.5mのT

BM、本坑は直径12.84mの大型TBMで掘削する計画としました（写真2）。また当初は予定されていませんでしたが、計画の見直しにより、河合側から迎え掘りでの下向き掘削としてNATMによる掘削が計画されました。



写真2 飛騨トンネル本坑TBM（ $\phi 12.84\text{m}$ ）

※川崎重工株式会社 HP より引用

- 当時は、最新の掘削技術として挑みましたが、森茂断層（土被り約150m）という不良地山と大量湧水帯により掘削は困難を極めました。土被りの大きい区間では大きな地圧により地山がトンネル内側へ押し出され、押し出された地山にTBMが挟まれて、度々掘進が停止しました。また、大きな地圧は、調査坑で鋼鉄製のTBMを凹ませるほどのものでありました。
- 大量湧水帯でもTBMの掘進が停止しました。トンネル切羽からの湧水量が最大15m³/分（0.25m³/秒）を記録し、その湧水はトンネルの切羽を崩すため、トンネル切羽と密着しながら掘削を行うTBMはたちまち掘進不能に陥ります。
- 一度掘進不能に陥ったTBMが掘削を再開するためには、切羽付近の補強や地盤注入により補強を行う必要があり、大変な時間を要しました。（写真3）
- 前述の森茂断層を含む不良地山（土被り約150m、延長約1.7km）を突破するのに調査坑で約44か月を要しました。



写真3 飛騨トンネルTBM土砂崩落復旧状況

※秘境を貫く飛騨トンネルの物語（中日本高速道路株式会社）より抜粋

- ・また、TBMは、マシンの型式にもよりますが、基本的にトンネル湧水をマシン後方へ強制的に排水処理する必要があります。畑薙山断層帯において、静岡県側から下向き掘削にTBMを用いて掘削した場合、高圧突発湧水が発生すればたちまちTBMは水没してしまい、安全上の問題が生じるだけでなく、機器類が故障し、掘進不能に陥る可能性が高くなると考えられます。

＜ゴットルドベーストンネルのTBM＞

- ・次に、世界における大きな土被りのトンネル掘削事例について検証してみました。
- ・近年の事例として、ゴットルドベーストンネル（スイス）があります。鉄道トンネルで延長約57km、土被りは約2,500mもあり、その規模は南アルプストンネルよりもはるかに大きなものです。（図11、図12）このトンネルで土被りが大きい区間の地質は花崗岩を主体としています。花崗岩は墓石などに用いられるなど、堅硬緻密な岩石として有名であり、トンネル掘削時でも安定して地山を支えることができます。
- ・ゴットルドベーストンネルは、全延長の約75%をTBMで掘削しています。トンネル中間部に立坑を掘り、斜坑含め3箇所からTBMを発進しています。立坑の深さは最大で800mにもなります。地質が安定していると、土被りが大きくてもトンネルボーリングマシンを用いて問題なく掘削を進められるという事例です。

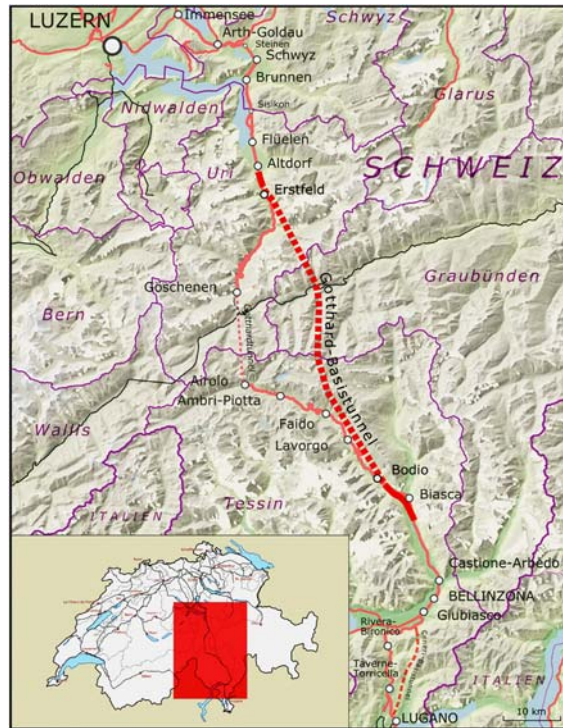


図 1 1 ゴットルドベーストンネル平面図

New Rail Link through the Alps NRLA Gotthard Base Tunnel

between Erstfeld UR and Bodio TI, Switzerland
Length: 57 km / 35.4 mi - Construction: 1995 - 2017

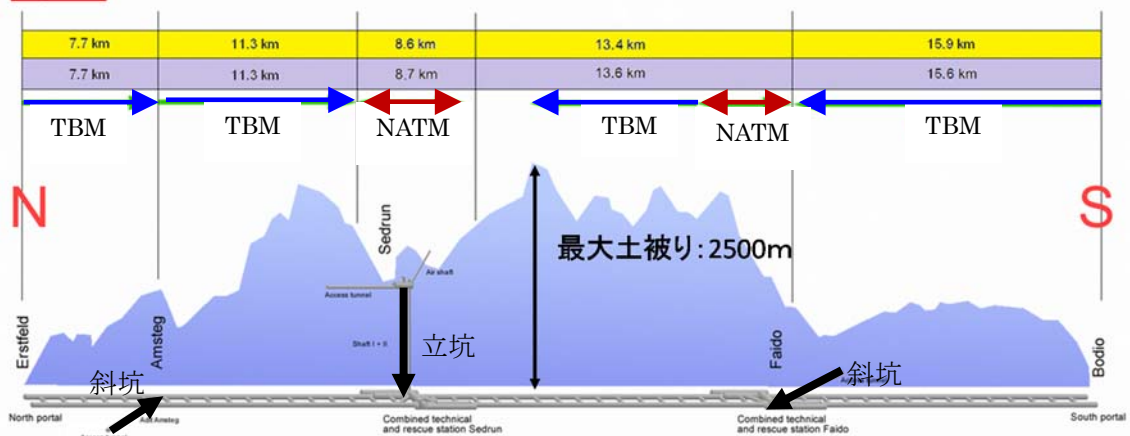


図 1 2 ゴットルドベーストンネル施設計画図

- ・ヨーロッパアルプスは、日本の南アルプスと比べ岩盤は比較的安定しており、年間降水量も少ないため、山中の地下水が少ないことが特徴です。ゴットルドベーストンネルのように地下水が少なく安定した地質においては、土被りが大きくてもTBMを用いて掘削することは十分可能ですが、日本の地質は複雑でかつ断層が多いことから、断層に起因した不良地質へ

の遭遇、大量の湧水が発生するなど難しい工事となることが多いです。紹介した飛騨トンネルのように地質が脆い区間ではTBMを用いた掘削は、安定して掘削することができず、世界的な最新の技術を用いても極めて困難であると考えます。

<シールド工法>

- ・次に都市部での施工に活用されているシールド工法について検討しました。シールド工法は、シールドマシン前面で地山からの土圧や水圧を受け止めながら掘削を行い、掘削した後に、大きな圧力（土圧や水圧）に耐えられるトンネル構造物としてのコンクリートセグメントを構築して掘削を進めて行きます。（写真4）



写真4 コンクリートセグメント

※日本シールドセグメント技術協会公式HPより引用

- ・シールド工法は、土圧や水圧に対抗するためシールドマシン自体の強度やマシン端部の止水処理が求められるほか、トンネル構造物となるコンクリートセグメントは防水構造として水圧に耐えられる強度が求められます（図13）。近年では高水圧化での施工実績も積み重ねられておりますが、最大の記録としても1MPa※程度が限界です。

※水圧1MPa＝水深100mでかかる圧力（1cm²当りに約10kg）と同じ圧力。

水圧・土圧

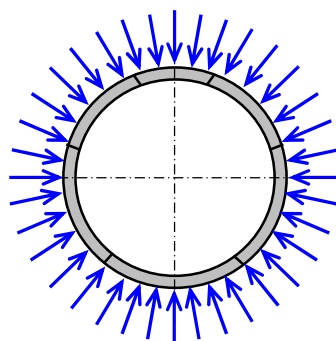


図13 水圧・土圧の作用図

- ・畑薙山断層帯では、土被りが約 8 0 0 m あり、想定される最大水圧は土被りの大きさ分の水圧がかかると単純計算すれば 8MPa（水深 8 0 0 m 相当）となり、現在の施工技術ではシールド工法による対応は極めて困難であると考えます。

（３）山梨県境稜線部からの深井戸による揚水の検討

- ・続いて、トンネルでの対策ではなく、外方からの対策により湧水を戻すことができないか検討しました。
地表部から深い井戸で地下水をくみ上げる方法として、ディープウェルがあります。
- ・ディープウェルは、一般に外径３００mm～６００mm程度の孔径で、深井戸を掘り、強制的に土中の地下水を水中ポンプによりくみ上げる方法です。山梨県側からの先進坑が県境をまたいで掘削するまでに、この深井戸を一定の間隔で多数設置します。深井戸から地下水を揚水することで、先進坑掘削時に山梨県側へ流出するトンネル湧水をなくすというものです。（図１４）

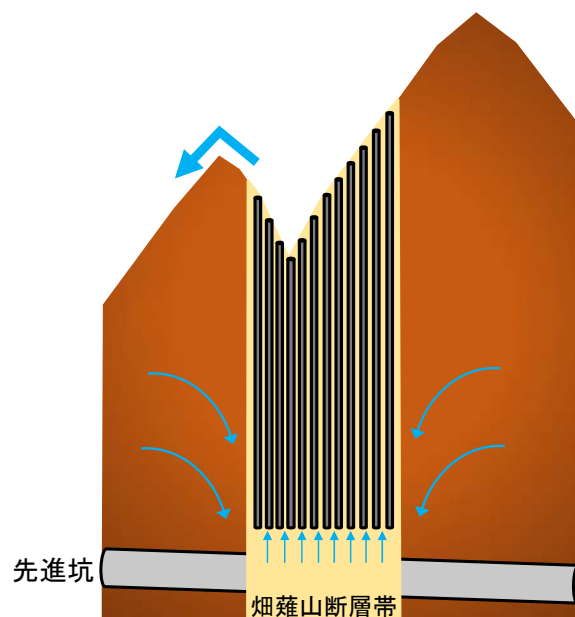


図１４ 深井戸のイメージ

※「（前略）引き続き対話を要する事項」に対する再見解（その１、その２）P76より抜粋

- ・畑薙山断層帯では土被りが約８００mあり、地下水を揚水するためには、深井戸を８００mより地下深くまで掘っていく必要があります。畑薙山断層帯付近では地質が脆く、多数の深井戸を確実に掘って水中ポンプを設置することは極めて困難であると考えます。
- ・また、深井戸を掘削するにあたっては、県境稜線部へ施工機械を運び上げ、設置する必要があります。（図１５）

<結論>

- ・導水路トンネルを山梨県境付近へ取り付ける計画については、畑薙山断層帯に沿って約10kmを掘削すること、及び超大土被り（1,300m～1,400m）区間を延長約5kmに亘って掘削することになるため、極めて困難であると考えます。
- ・畑薙山断層帯（土被り約800m）を静岡県側から山梨県側に向かって、下向きに機械掘削する計画について、TBMによる掘削は、畑薙山断層帯の高圧突発湧水や大きな土圧で掘進不能に陥り水没し安全上の問題が生じる可能性が高く、また、シールド工法による掘削についても、畑薙山断層帯の高圧突発湧水や大きな土圧に対応するシールドマシンやコンクリートセグメントの製作は現実的ではなく、極めて困難であると考えます。
- ・深井戸による揚水も検討しましたが、地質の脆い区間を連続して掘削して水中ポンプを設置することや、県境稜線部へ施工機械を運び、大規模な造成工事を行う計画は現実的ではなく、極めて困難であると考えます。

4. 畑薙山断層帯を山梨県側から掘削する場合のトンネル湧水への対応

- ・静岡県外へトンネル湧水を流出させない方法を検討しましたが、いずれも実現にあたっては極めて困難と考えます。
- ・畑薙山断層帯については、山梨県側からの上向き掘削として計画したいと考えますが、先進坑が貫通するまでの間、トンネル湧水が山梨県側に流れることになる（水収支解析の結果では、先進坑が貫通するまでの間、平均で0.08m³/秒）ことから、先進坑掘削において以下のような対策をとることで、トンネル湧水が県外へ流出する総量を極力低減します。

<前方調査による薬液注入>

- ・切羽周辺からボーリングによる前方探査を実施したのち、破碎帯等に向けて薬液注入を行いトンネル湧水の低減を図ります。（写真5）

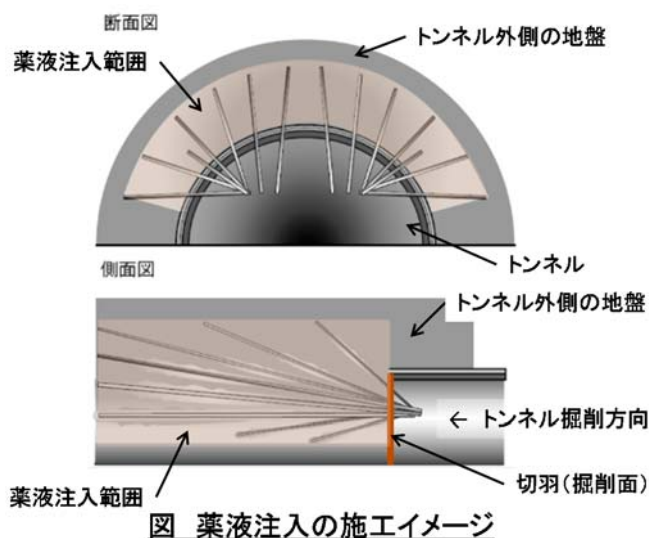


写真 薬液注入工の施工例

※ライト工業㈱、「トンネル工事の補助工法」
（平成25年4月）より抜粋

写真5 トンネル切羽からの薬液注入イメージ

※「(前略)引き続き対話を要する事項」に対する再見解（その1、その2）P68より抜粋

<静岡県側先進坑からのボーリングで湧出する地下水の大井川への揚水>

- ・静岡県側から掘削を進める先進坑では、畑薙山断層帯に向けて高速長尺先進ボーリングを行い、ボーリングの口元から湧出する畑薙山断層帯の地下水をポンプアップして大井川に戻すことを計画します。（図16）
- ・先進坑から実施するボーリングは、先進坑の断面よりもはるかに小さい（外径約120mm程度）ため、トンネルのごく周辺の地下水頭を下げることはできますが、畑薙山断層帯を山梨県側から掘削する際のトンネル湧水全量の全てを集めることはできません。
- ・しかしながら、ボーリングにより得られた畑薙山断層帯の地下水を大井川

に流すことで、山梨県側から県外に流出するトンネル湧水量を低減することができます。

- ・その低減量を予測することは難しいですが、過去に東俣から実施した斜めボーリングで畑薙山断層帯を確認した時のボーリング終了時の口元湧水量として約0.02m³/秒という実績があります（参考資料2 図29参照）。

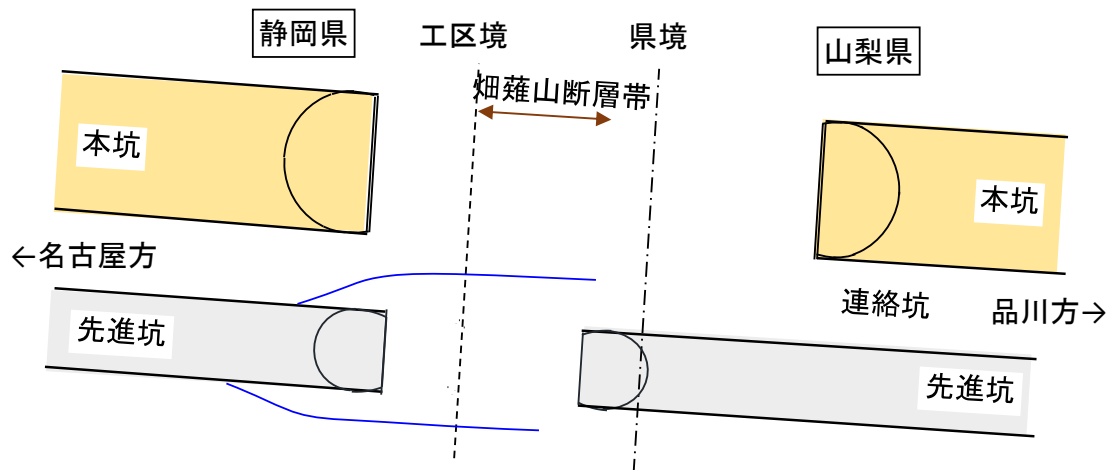


図16 静岡県側先進坑からのポンプアップ

<高圧突発湧水発生時>

- ・高圧突発湧水発生時には、先進坑内の複数箇所バルクヘッドと呼ぶ防御壁を構築し、作業員の安全性を確保しながら高圧突発湧水の早期収束を図ります。（写真6）

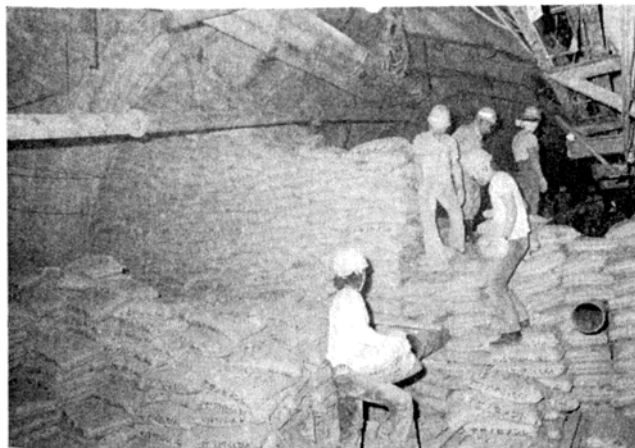


写真6 青函トンネル作業坑におけるバルクヘッド構築状況

※「(前略)引き続き対話を要する事項」に対する再見解(その1、その2) P55より抜粋

- ・高圧突発湧水がある程度落ち着いたところで、先進坑の途中から別の迂回坑を掘削して周辺の水圧を下げつつ、先進坑や迂回坑の切羽周辺からの薬液注入により周辺の透水係数を改善させ先進坑の早期貫通を目指します。

＜先進坑貫通後のポンプアップ＞

- ・山梨県側から先進坑が貫通した後は、畑薙山断層帯を避ける位置に設置する横坑の貯水プールを活用して、トンネル湧水を静岡県側にポンプアップいたします。これにより、畑薙山断層帯の本坑のトンネル湧水は、先進坑を通じて全て静岡県側にポンプアップすることができます。（図17）

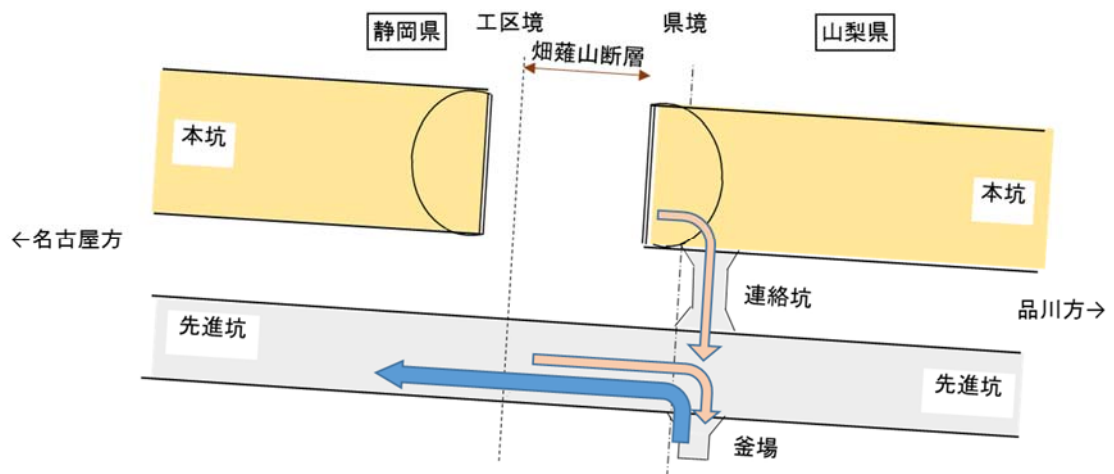


図17 先進坑貫通後のトンネル湧水ポンプアップ

※「(前略) 引き続き対話を要する事項」に対する再見解（その1、その2）P67より抜粋

5. 千石斜坑等の掘削方法と畑薙山断層帯の掘削方法の比較

- ・千石斜坑、西俣斜坑は、「1. 南アルプストンネルの概要」でお示ししたとおり、地形の制約上、地上から下向きに掘削するしか方法はありません。千石斜坑を下向きに掘り進める中で、大井川と交差し、その後、西俣川付近の断層と交差します。また、西俣斜坑を下向きに掘り進める中でも断層と交差します。
- ・一方で、畑薙山断層帯は安全上、山梨県側から上向きで掘る計画です。
- ・①千石斜坑の大井川交差部、②千石斜坑の西俣川付近の断層部、③西俣斜坑沿い、④先進坑の畑薙山断層帯部のそれぞれの区間について、トンネル土盛りや地質調査（実施位置は図18のとおり）から得られた情報を比較表（表2）に整理し、それに基づいてトンネル掘削の向きについて考察した内容を以下に記します。

① 千石斜坑の大井川交差部

- ・千石斜坑の大井川交差部付近で実施した鉛直ボーリング調査の結果、斜坑が大井川と交差する深度でのコア採取率は100%であり、また、弾性波探査の結果は、P波速度が4.5 km/s以上であることから、この調査結果からは地質は悪くはないと想定しています。しかし、地質は急激に変化する可能性があるため、切羽周辺からのボーリングによる前方探査を実施し、破碎帯を確認した場合は薬液注入等を行って、大井川の水を大量に斜坑内に引きこむことがないようにしたうえで、慎重に下向きに掘削します。

② 千石斜坑の西俣川付近の断層部

- ・東俣から西側に向かって実施した斜め下向きボーリング調査の結果、西俣川付近の断層部では、コア採取率が低く、破碎質な地質が400mにわたり繰り返し出現することを確認しました。また、ボーリング調査における断層部削孔中の口元湧水量は400L/分程度（ボーリング掘削径約80mm）です。切羽周辺からのボーリングによる前方探査を実施し、破碎帯を確認した場合には薬液注入等を行い、大規模な高圧突発湧水が生じるリスクを極力小さくしながら、慎重に下向きに掘削します。

③ 西俣斜坑沿い

- ・西俣斜坑ヤードから西側へ西俣斜坑計画線に沿うように実施した斜め下向きボーリング調査の結果、地質は砂岩頁岩互層の中硬岩を主体としており、掘削途中にて、複数の小規模な断層を確認しました。口元湧水量は、ボーリング深度600mまでは掘削延長に応じて伸びていましたが、深度600m以降では、概ね1200L/分程度で継続した状態となりました。湧水が多

い区間では、地質が脆い懸念があるため、切羽周辺からのボーリングによる前方探査を実施し、地質の脆い区間を確認した場合には薬液注入等を行い、大規模な高圧突発湧水が生じるリスクを極力小さくしながら、慎重に下向きに掘削します。

千石斜坑、西俣斜坑は、本線のトンネル（本坑）と異なり、柔軟性をもった線形計画をとることができるため、万が一トンネル前方に大規模な断層など下向きの掘削が難しい区間が確認できた場合は、斜坑の平面線形を含め変更するなど、柔軟な対応を図ります。

④ 先進坑の畑薙山断層帯部

- ・東俣から東側に向かって実施した斜め下向きボーリング調査の結果、畑薙山断層帯では破碎質な地質が800mにわたり繰り返し出現することを確認し、ボーリング中においては、孔壁崩壊や掘削の停止が繰り返し確認されました。また、断層帯削孔中の口元湧水量は2000L／分程度（ボーリング掘削径約120mm）に達しています。
- ・先進坑の畑薙山断層帯部と千石斜坑の西俣川付近の断層部を比較すると、前者は、土被りが大きく、破碎質な幅が広いこと、さらには湧水量も多いことから後者に比べ大規模な突発湧水が生じるリスクが大きいと考えられます。
- ・先進坑の畑薙山断層帯部と西俣斜坑沿いを比較すると、前者は日本の活断層に記載のある断層であること、ボーリング掘削時において回転停止が繰り返し確認されるような脆い地層であり、湧水量が多い破碎帯である可能性が高いことから、大規模な突発湧水が生じるリスクが大きいと考えられます。

以上の比較より、畑薙山断層帯部は山梨県側から上向きに掘削します。

表2 トンネル土被り・地質調査から得られた情報

		千石斜坑		西俣斜坑	④先進坑
		①大井川交差部	②西俣川付近	③斜坑沿い	畑薙山断層帯
トンネル土被り		約 80m	約 500m	約 1000m	約 800m
ボーリング調査概要	調査位置	調査 1	調査 2	調査 3	調査 4
	削孔長	140m	900m	700m	1200m
	削孔方向	鉛直	斜め下向き	斜め下向き	斜め下向き
	試料形状	コア	コア	ノンコア	ノンコア
	調査時の概況	・斜坑が交差する深度でのコア採取率 100%、斜坑通過付近の RQD 平均 55% ・PS 検層（ボーリング孔内における弾性波速度）の P 波は 4.14km/s	・短いスパンで地質の悪い箇所が 400m にわたり繰り返して出現 ・断層部削孔中の口元湧水量は 400L/分程度	・小規模な断層が複数出現することを確認 ・断層部以外は、砂岩頁岩互層の中硬岩地山が連続 ・深度 600m 以降の口元湧水量は概ね 1200L/分程度で推移	・幅 800m に亘り、地質不良部が繰り返し出現することを確認 ・ボーリング中、孔壁崩壊に伴う停止が複数回発生 ・断層部削孔中の口元湧水量は 2000L/分程度
弾性波探査概要	探査位置	探査①、②、③	探査①	—	—
	測線長 0内、該当箇所 の測線位置	探査①全長 3.27km (3.20km～3.27km 付近) 探査②全長 3.295km (0～0.2km 付近) 探査③全長 0.8km	探査①全長 3.27km (2.0km～2.7km 付近)	—	—
	探査結果	・探査①及び探査②、大井川交差部 P 波 4.4km/s～4.6km/s ・探査③、畑薙山断層帯と考えられる低速度帯を線形回避	・探査①、P 波約 4.5km/s ～5.0km/s	—	—

RQD (Rock Quality Designation) : 岩盤の割れ目の多さを表す指標。コア 100cm 当たりに対し、10cm 以上のコアが採取できる割合。

PS 検層 : ボーリング孔を用いて、地盤内を伝達する弾性波 (P 波及び S 波) の速度を測定する方法。

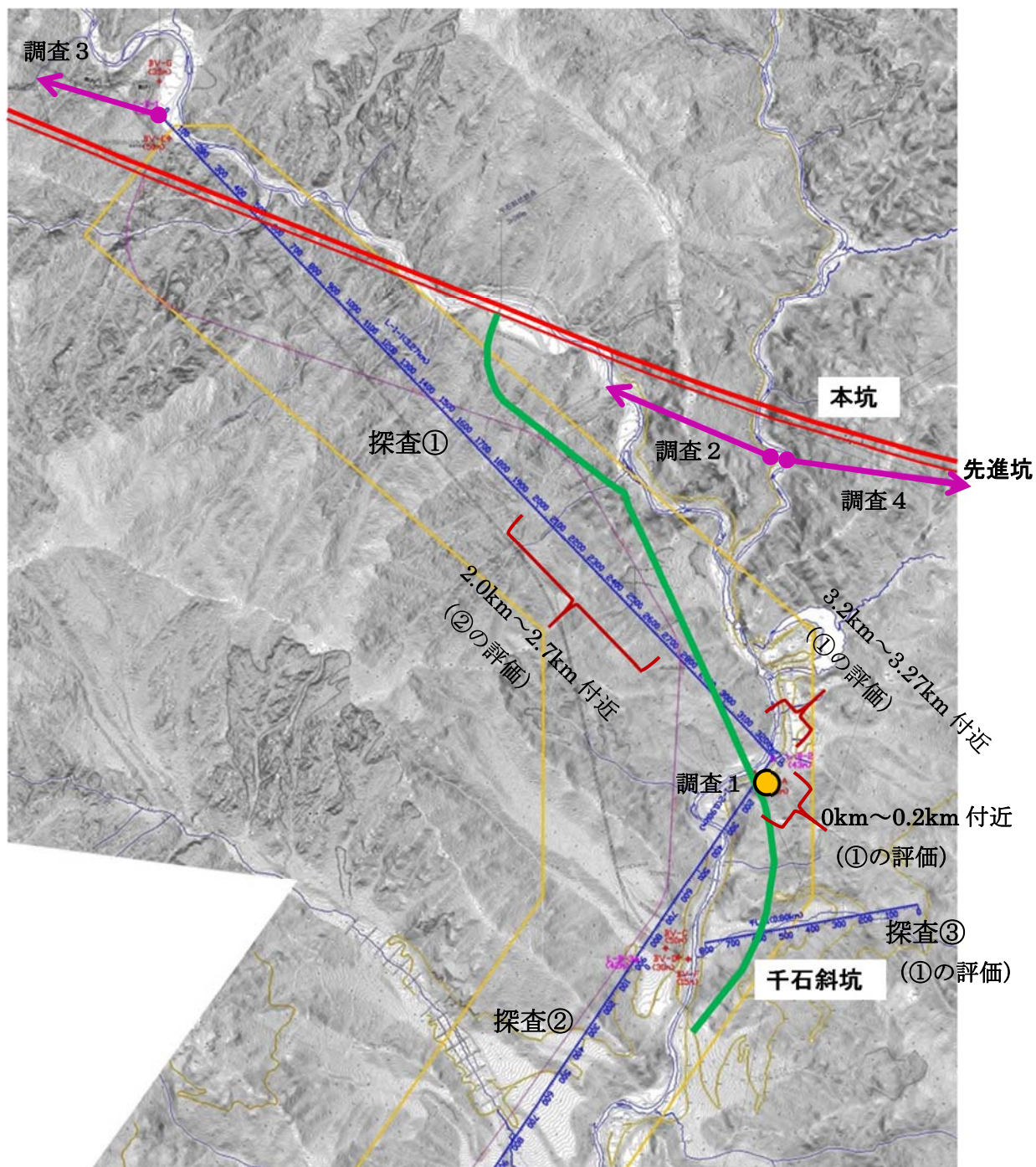


図 1 8 地質調査位置図

凡例	
—	: 本坑・先進坑
—	: 千石斜坑
—	: 弾性波探査
➡	: 斜めボーリング
●	: 鉛直ボーリング

参考資料１ 青函トンネル掘削時における突発湧水事例

※「(前略) 引き続き対話を要する事項」に対する再見解(その1、その2)より抜粋

「3 全量の戻し方(1)」(見解)

○青函トンネルの施工事例

- ・青函トンネルの施工事例を示します。

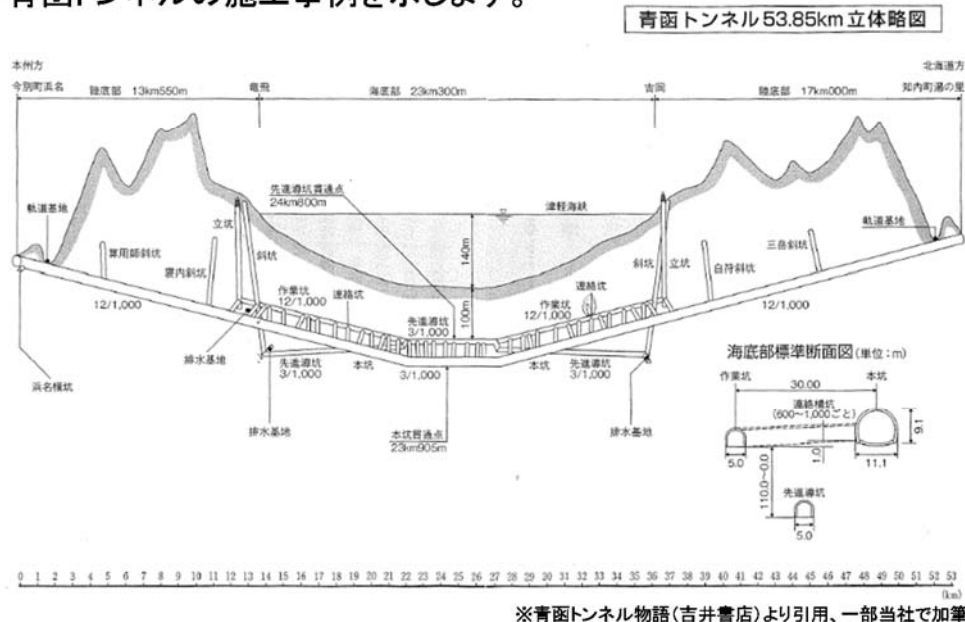
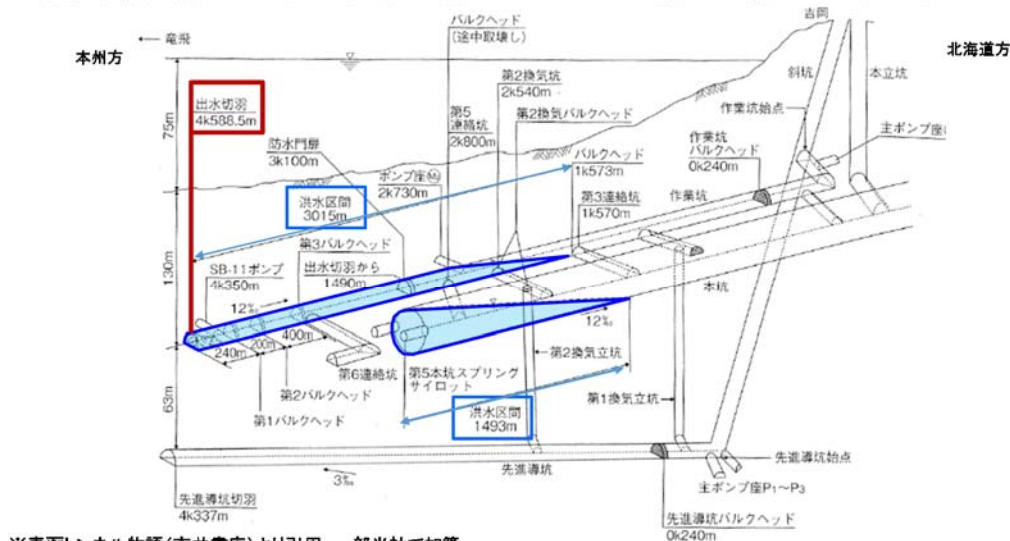


図 青函トンネルの縦断面図と標準断面図

「3 全量の戻し方(1)」(見解)

○青函トンネルにおける突発湧水(1)

- ・青函トンネルでは、突発湧水により、4回水没しました。
- ・そのうちの代表例として、昭和51年、北海道方で最大約70m³/分(約1.2m³/秒)の出水により、作業坑約3km、本坑約1.5kmにわたり水没しました。
- ・なお、最大約70m³/分の出水が発生した日の2日後には約20m³/分となっています。



「3 全量の戻し方（１）」（見解）

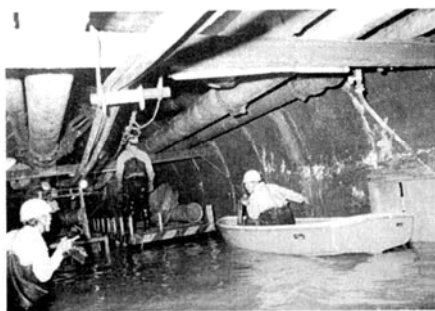
○青函トンネルにおける突発湧水（２）

- ・出水箇所は、破碎帯と呼ばれる脆弱な地質箇所、事前に切羽（掘削面）手前から先進ボーリングにより地質を確認しつつ、掘削を進めていました。
- ・さらに、事前に切羽（掘削面）手前から、地盤への薬液注入を行なうなどの対策をしていましたが、出水が発生しました。
- ・出水に対応するため、複数箇所にバルクヘッド（隔壁）を構築して水を防ごうとし、また、作業坑に設置している防水門扉を使用しましたが、それぞれ突破され作業坑と本坑が水没しました。（斜坑底の主ポンプ座の水没を防ぐため、本坑に導水）
- ・復旧のために、青函トンネルの本州方の現場や上越新幹線のトンネル建設現場のポンプなどが集められ、復旧作業に使用されました。
- ・機械・電気設備などにも、大きな被害あったと思われますが、詳細は不明です。

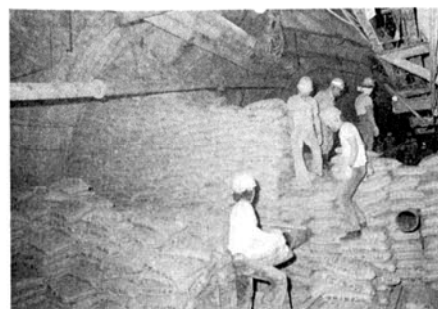
「3 全量の戻し方（１）」（見解）

○青函トンネルにおける突発湧水（３）

- ・この出水より人的被害が出たとの記録はありませんが、作業員等に対する安全性が低下しました。
- ・水没した作業坑、本坑を復旧するために、約半年の工期を要しました。
- ・最終的に、作業坑は迂回させることにより出水箇所を通過しました。



作業坑排水



作業坑バルクヘッド築造

出典：津軽海峡線工事誌（青函トンネル） 日本鉄道建設公団青函建設局

参考資料 2 地質調査結果

①千石斜坑の大井川交差部

- ・調査 1 のボーリング調査の結果、斜坑が交差する深度で得られたコアの状況及び柱状図を（写真 7、図 1 9、図 2 0）で示します。

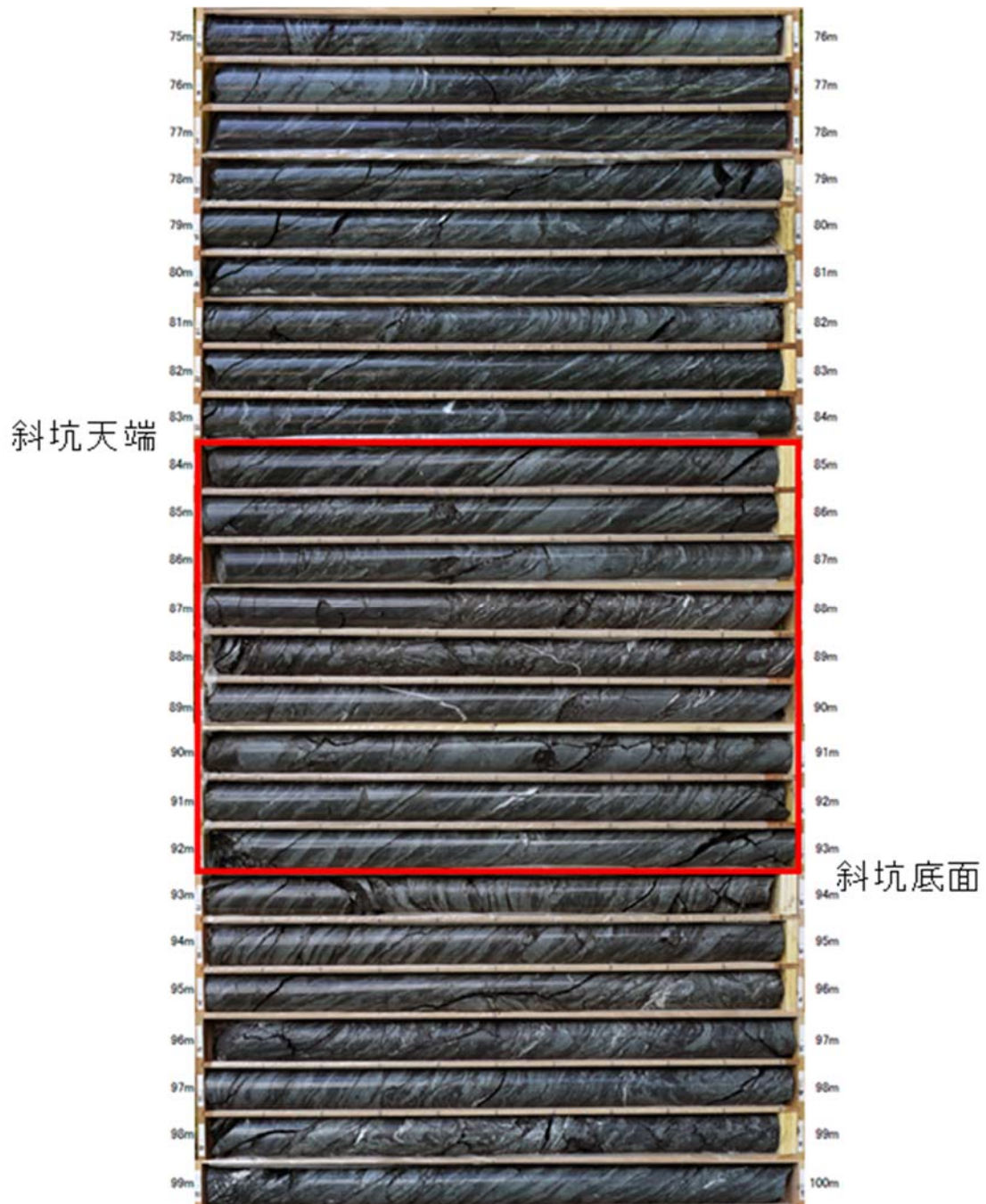


写真 7 コアの状況（赤囲み部：深度 8 4 m～9 3 m）

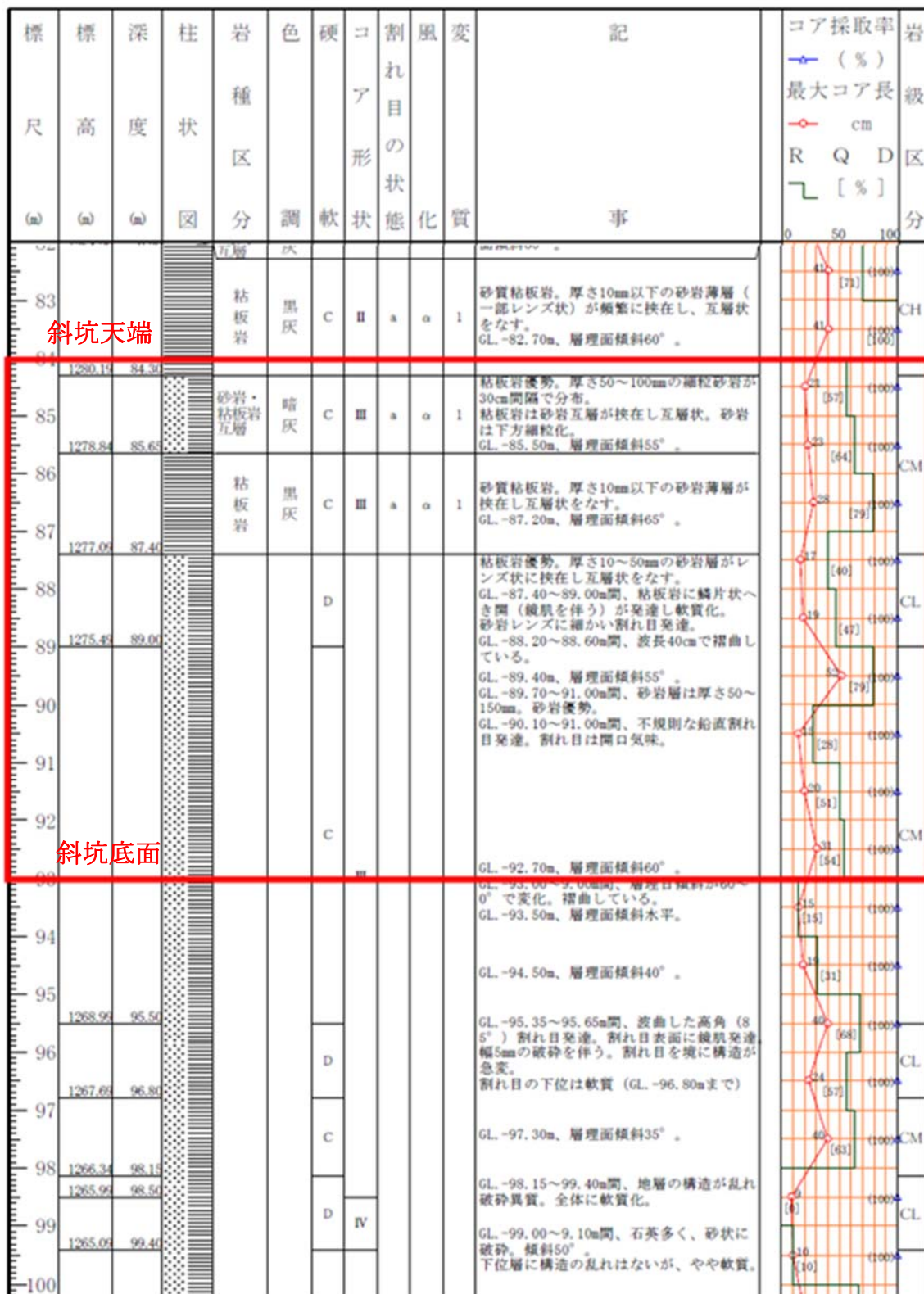


図 1 9 柱状図（写真 7 コアの状況付近の抜粋）

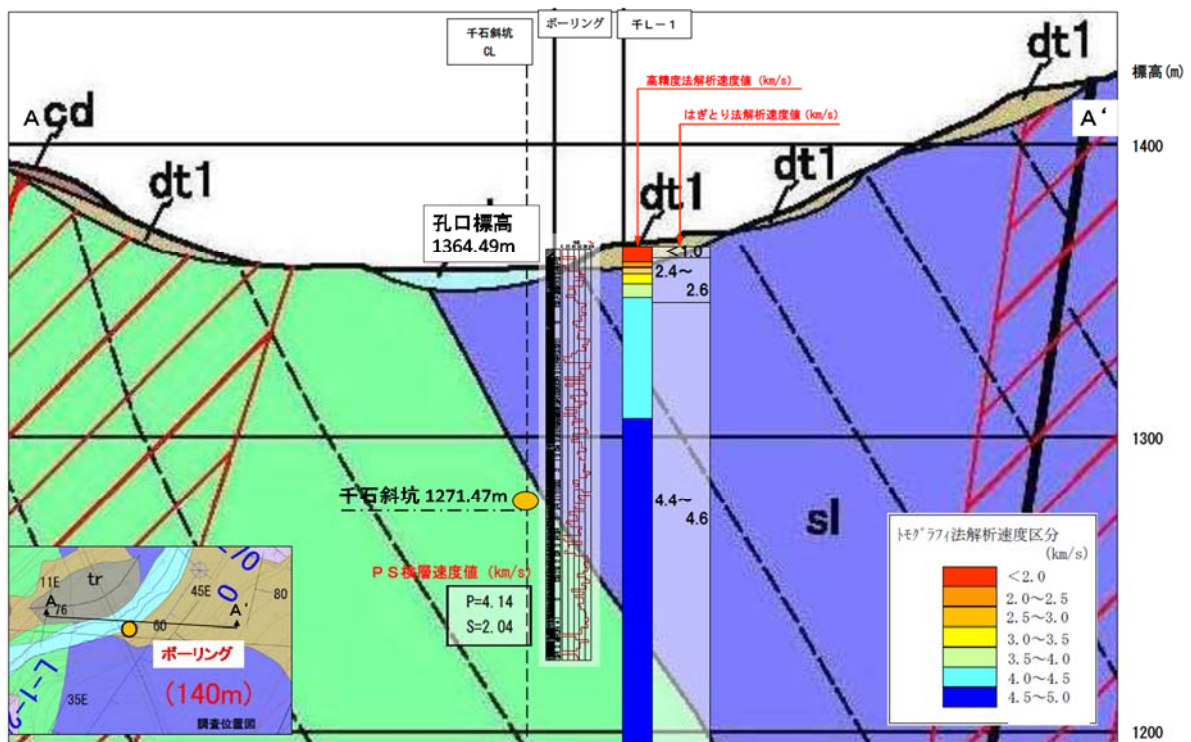


図 2 0 大井川交差部付近の調査詳細

- ・コア採取率は100%（地質が悪いとボーリング中にコアが細分化してしまい、取得できない区間が出ます）、千石斜坑通過付近のRQD（コア100cm当たりに対し、10cm以上のコアが採取できる割合）は平均55%であり、ボーリング柱状図作成及びボーリングコア取扱い・保管要領（案）・同解説（平成27年6月 一般社団法人全国地質調査業協会連合会）によると、RQD50%～75%の範囲は「普通」（他に「非常に良い」「良い」「悪い」「非常に悪い」という評価区分がある）という評価となります。また、P波速度は4.14km/sであり、トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説（2016年制定 土木学会）によると地山等級「ⅡN」となり、調査地域における地質で、はく離性の著しいまたは細層理の中生代、古生代の堆積岩類（粘板岩、頁岩等）では、上から2番目（全部で4段階の区分）に良いという評価になります。
- ・探査①及び探査②の弾性波探査の結果は（図21、図22）に示すとおり、該当箇所のP波速度は4.5km/s以上であり、トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説（2016年制定 土木学会）によると地山等級「ⅢN」となり、調査地域における地質で、はく離性の著しいまたは細層理の中生代、古生代の堆積岩類（粘板岩、頁岩等）では、一番良い評価になります。

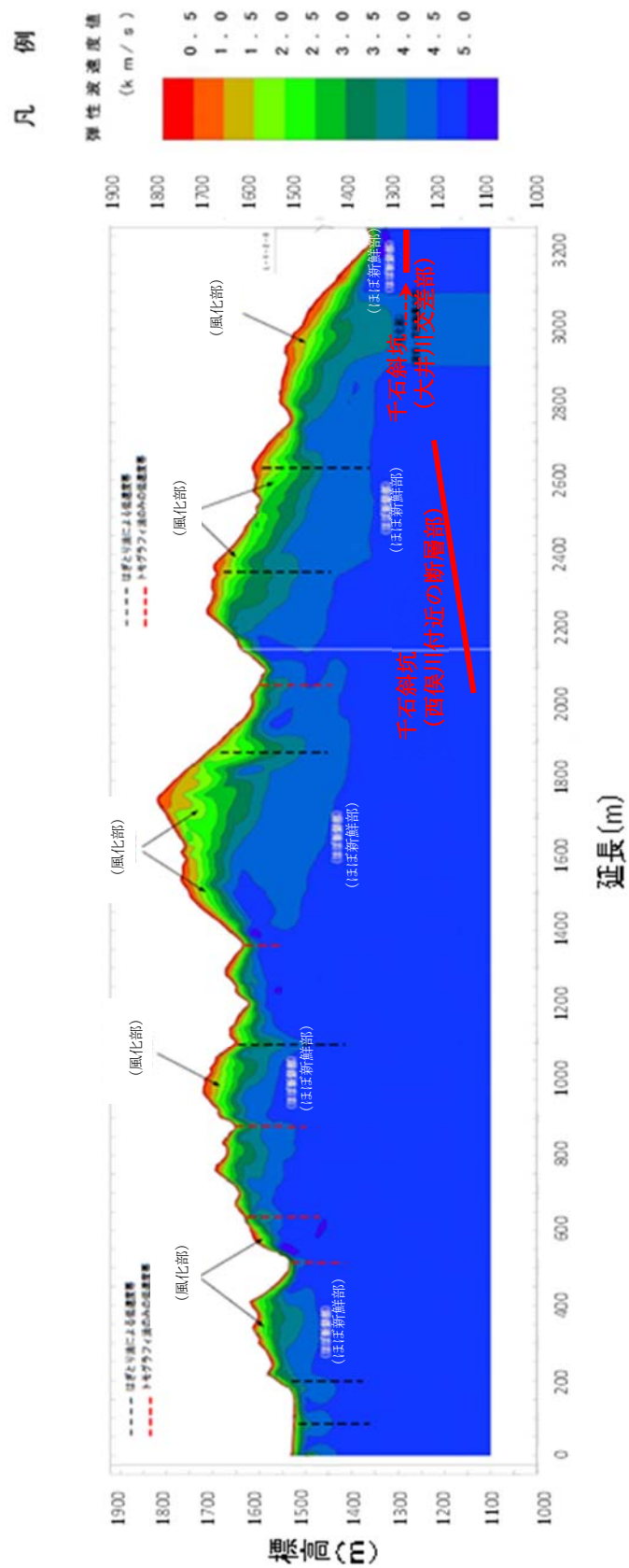


図 2 1 探査①弾性波探査の速度分布

凡 例

弾性波速度値
(km/s)

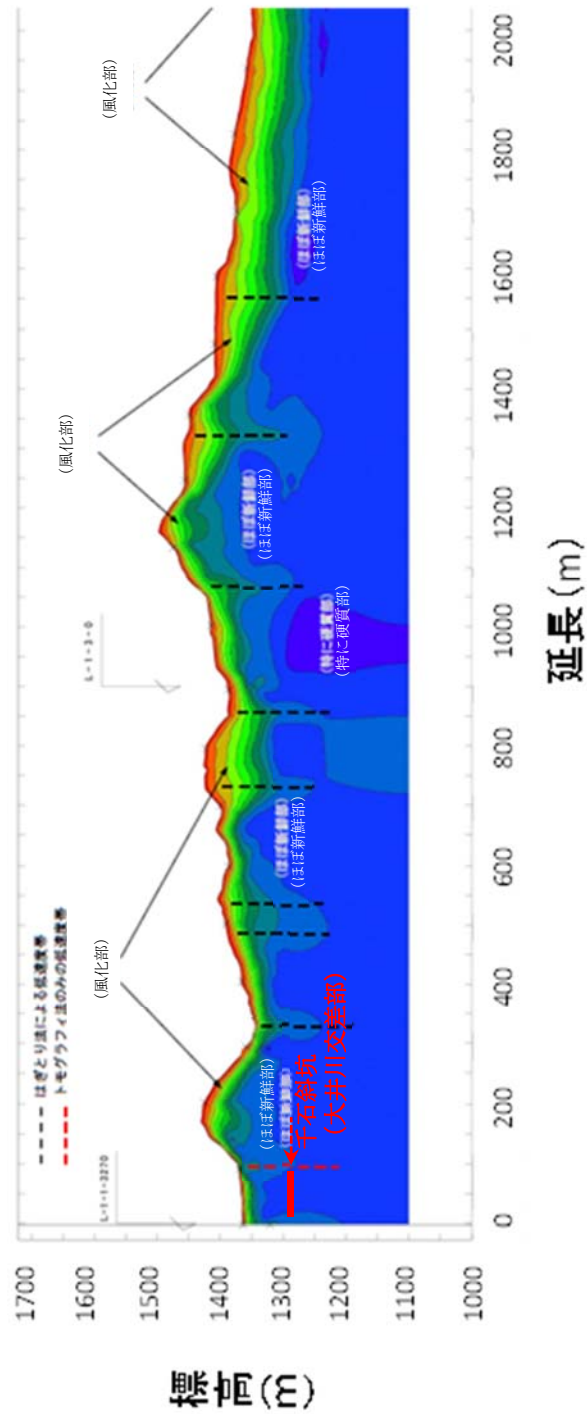
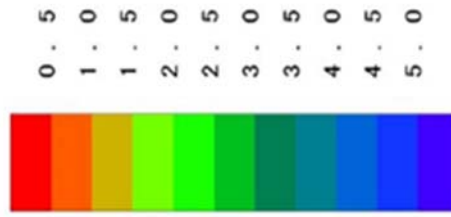


図 2 2 探査②弾性波探査の速度分布

- ・ 探査③の弾性波探査は、大井川から畑薙山断層帯にかけて調査を実施しました。図 2 3 の P 波速度分布に示すように、測線の 2 0 0 m ～ 4 0 0 m 付近に低速度帯が検出され、断層帯の影響による可能性があります。
- ・ 千石斜坑は、この低速度帯とは重ならない位置で計画されています。

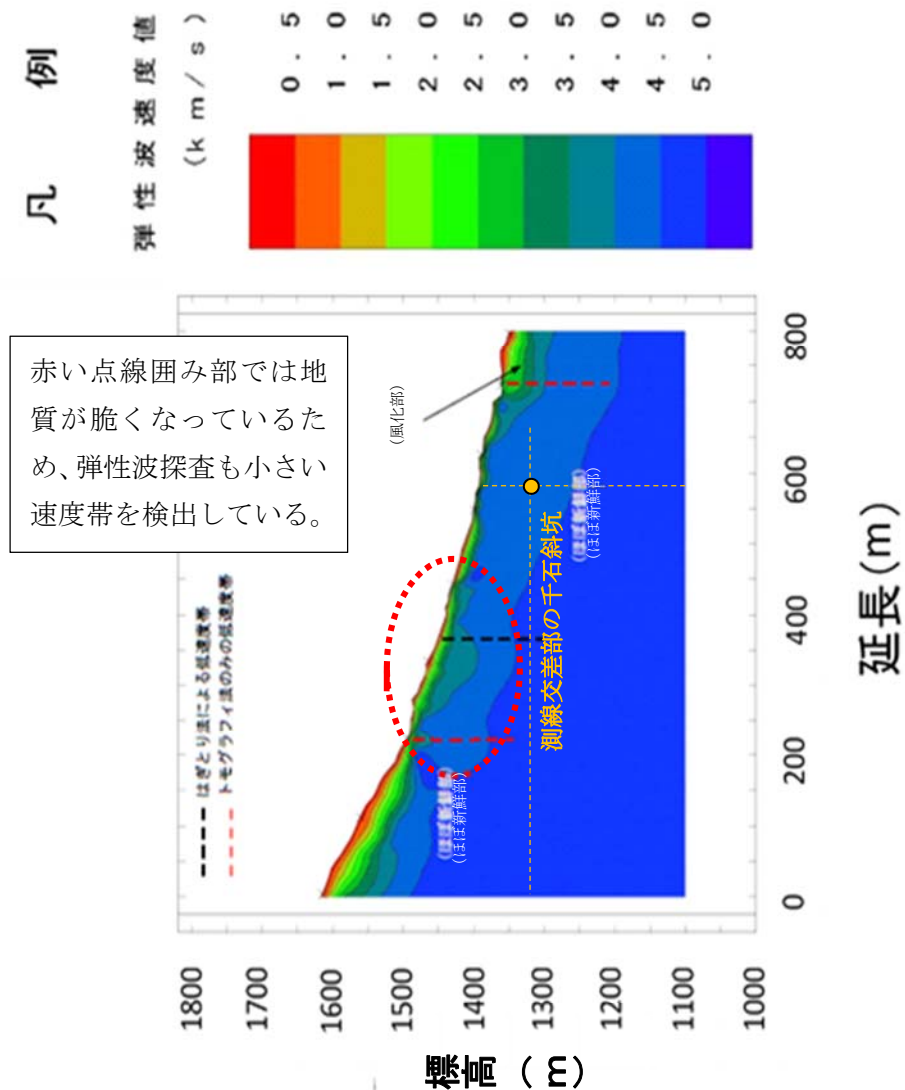


図 2 3 探査③弾性波探査の速度分布

②千石斜坑の西俣川付近の断層部

- ・調査2のボーリング調査の結果（図24）、断層部及びその周辺においては、短い間隔で地質が悪い箇所が約400mに亘り、繰り返し出現したことを確認しました。当該箇所のコアの状況を写真8で示します。湧水量が増加した区間のコア写真には赤い囲みで表記します。（5m延長で赤い囲みを表記）
特に状態の悪い深度690mから700mにかけてはコア採取率約50%、RQDは平均6%であり、ボーリング柱状図作成及びボーリングコア取扱い・保管要領（案）・同解説（平成27年6月 一般社団法人全国地質調査業協会連合会）によると「非常に悪い」という評価となります。

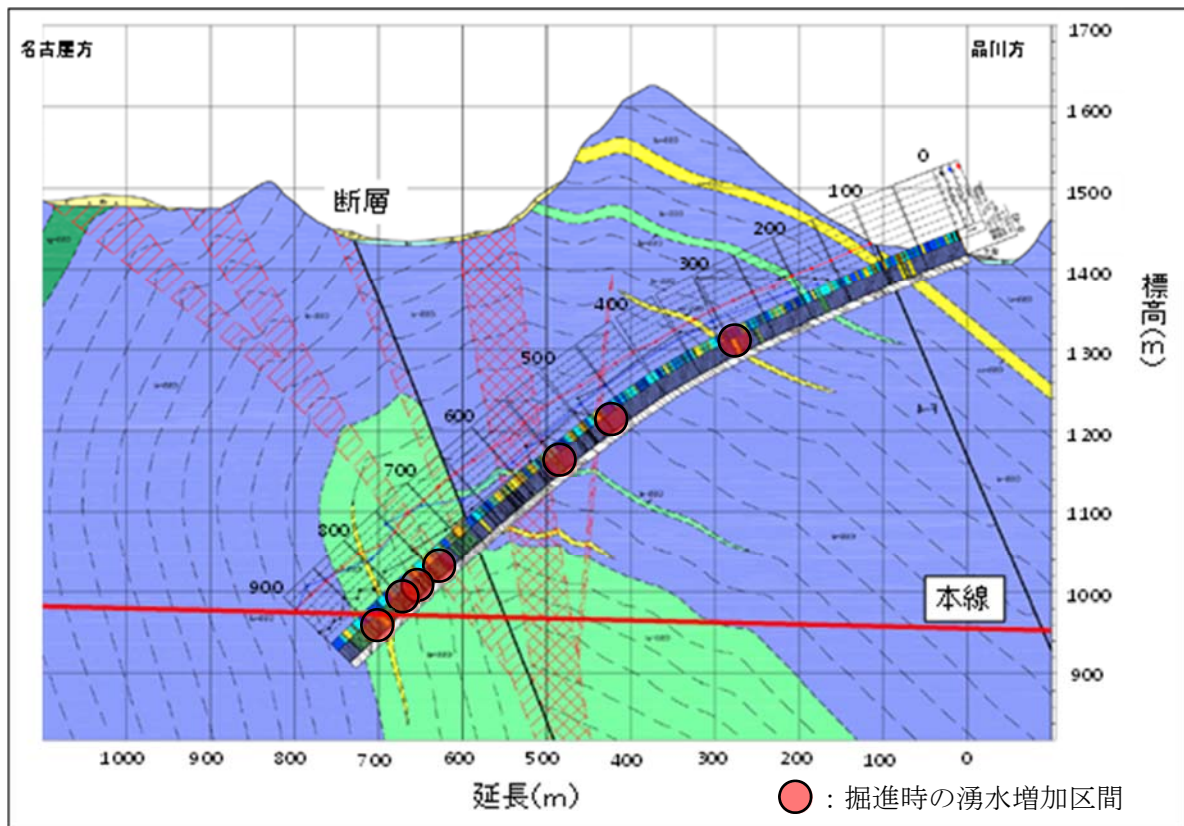


図24 ボーリング調査結果

写真8 ボーリングコア写真

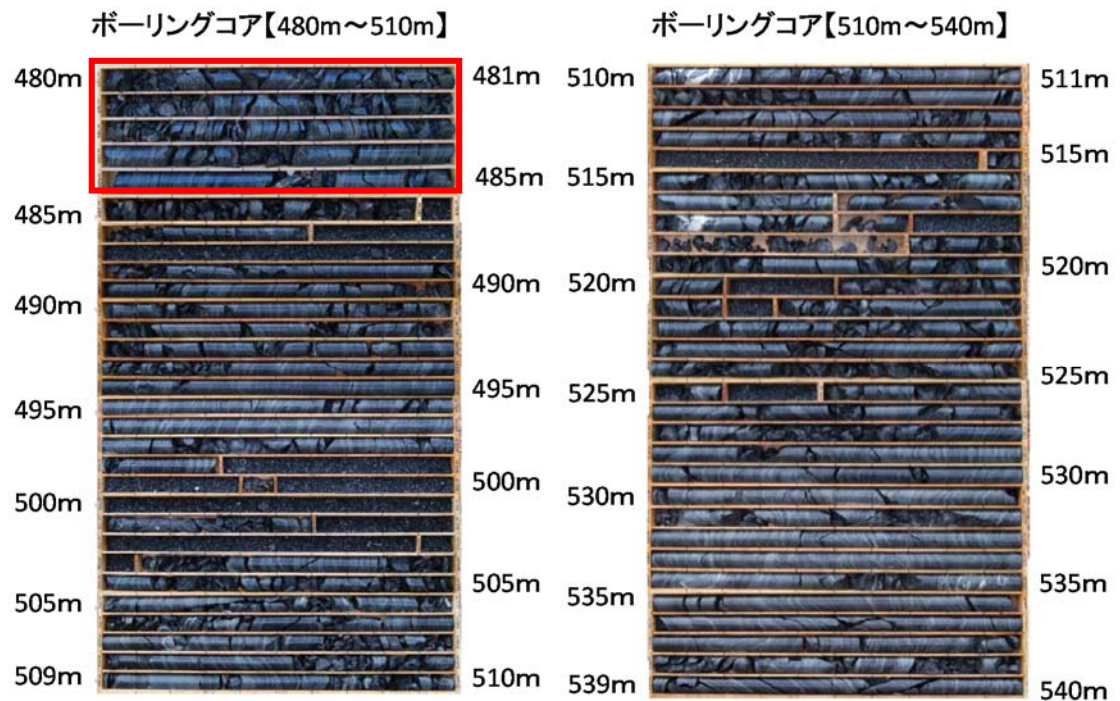
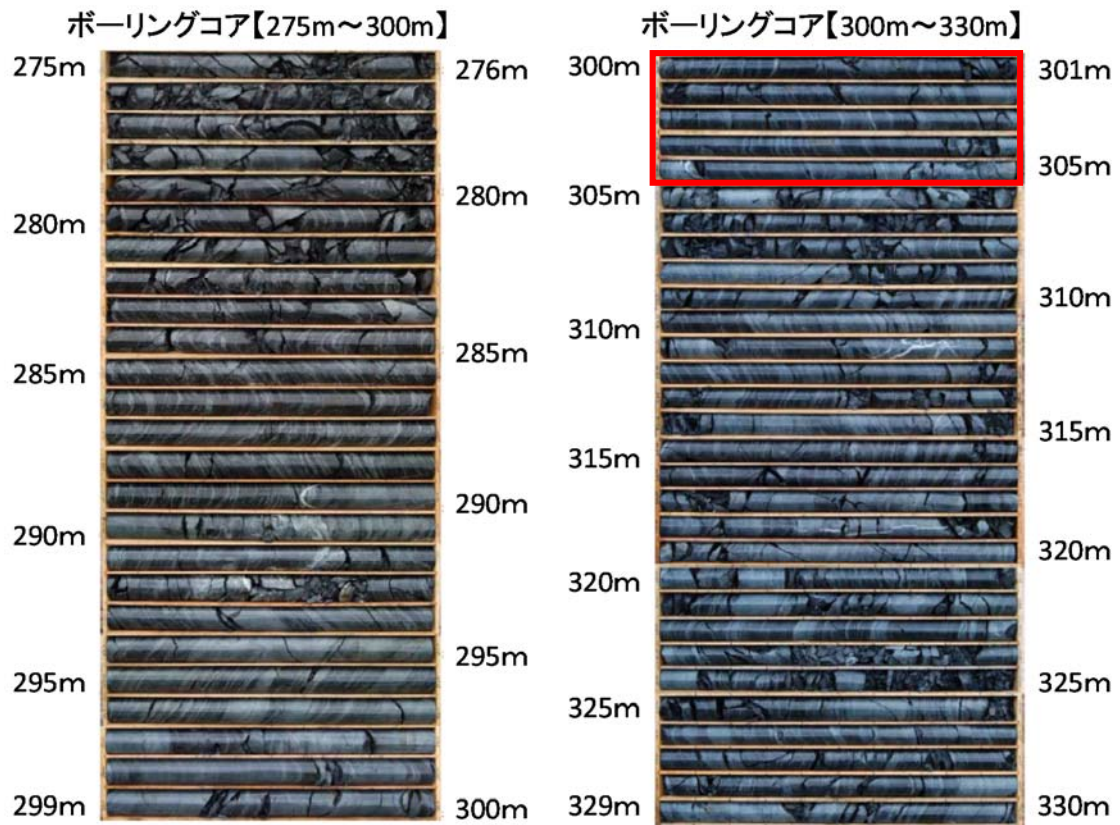


写真8 ボーリングコア写真

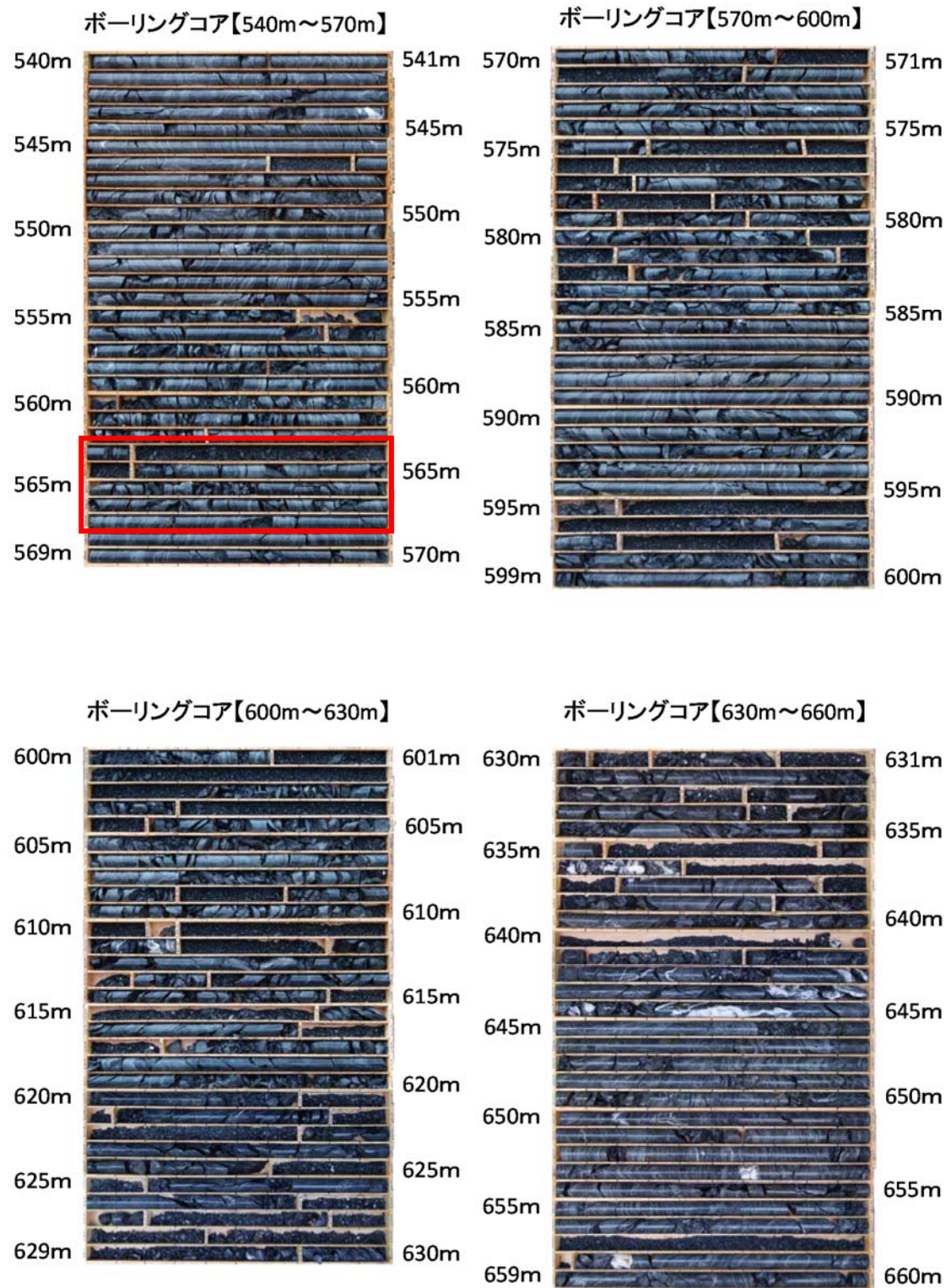


写真8 ボーリングコア写真

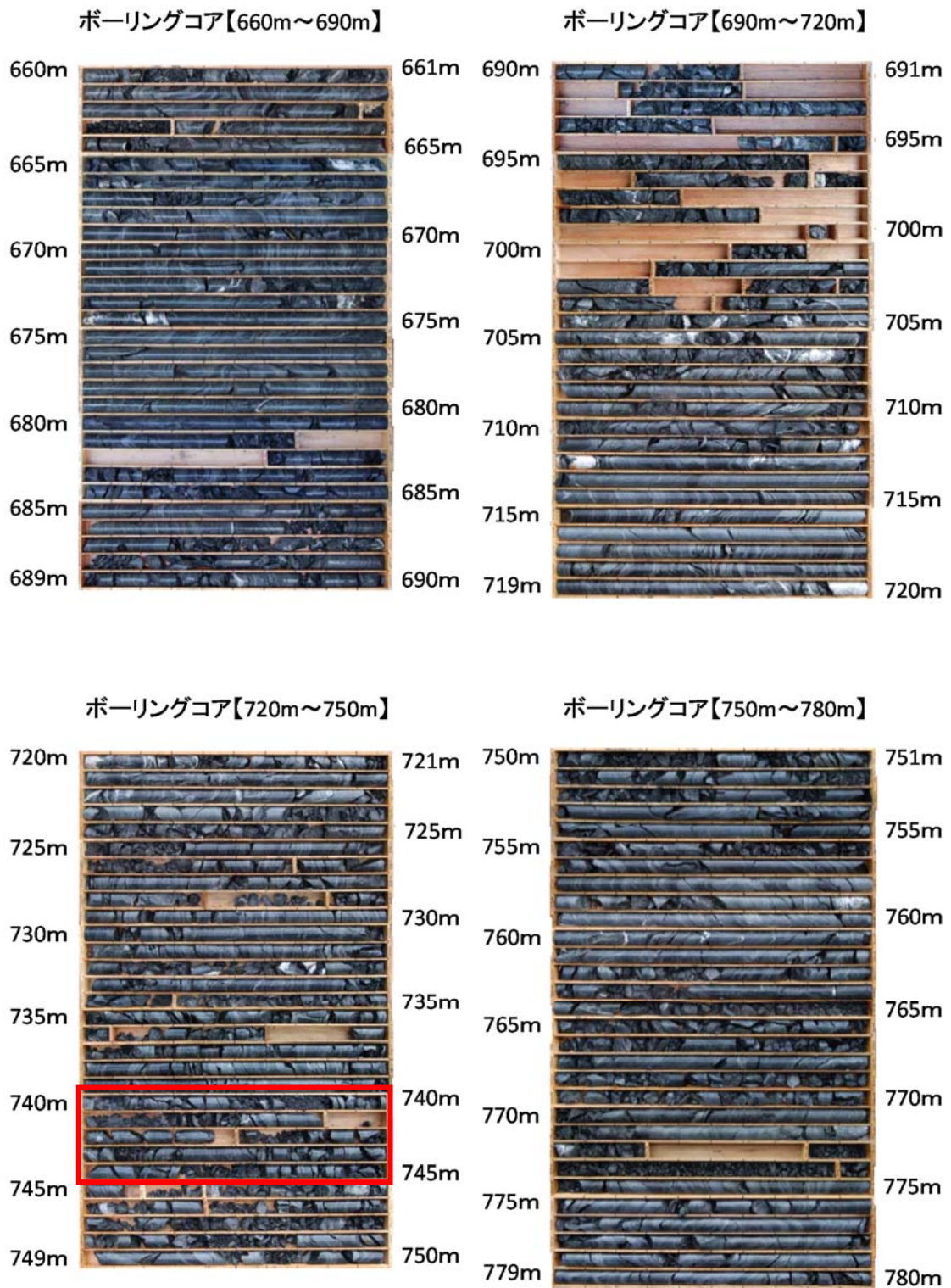
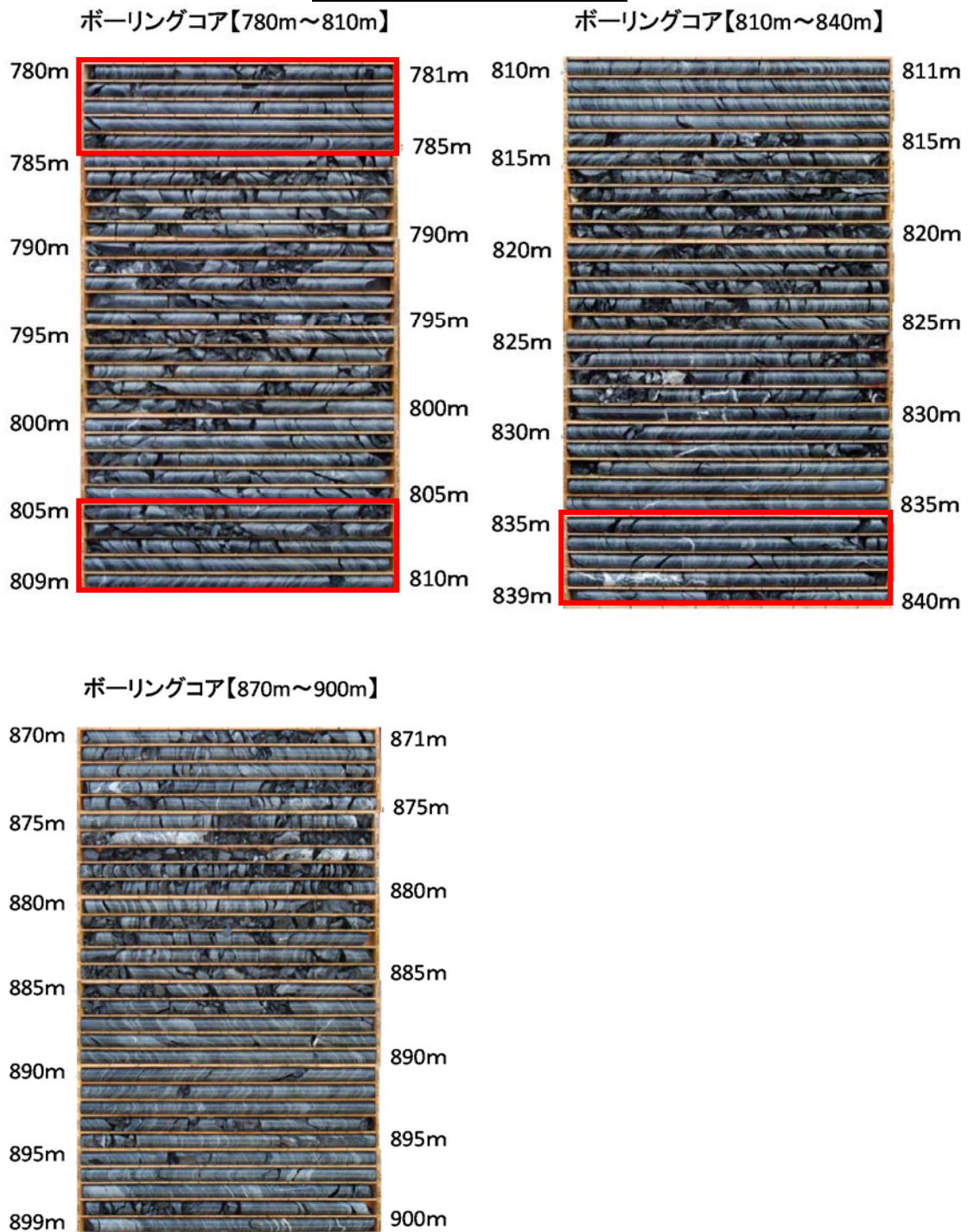


写真8 ボーリングコア写真



- ・調査2のボーリング調査における口元湧水量の推移を図25で示します。
深度300m付近で湧水量が急激に増加している箇所がありますが、断層部とは考えにくい場所であり、コアの状況（写真9）を見ても割れ目が見られる程度です。断層部及びその周辺においては、口元湧水量は深度567m付近ボーリング孔の保護を目的としたセメンチングを行いながら掘削を行うことにより、概ね400L／分程度で落ち着いていると言えます。

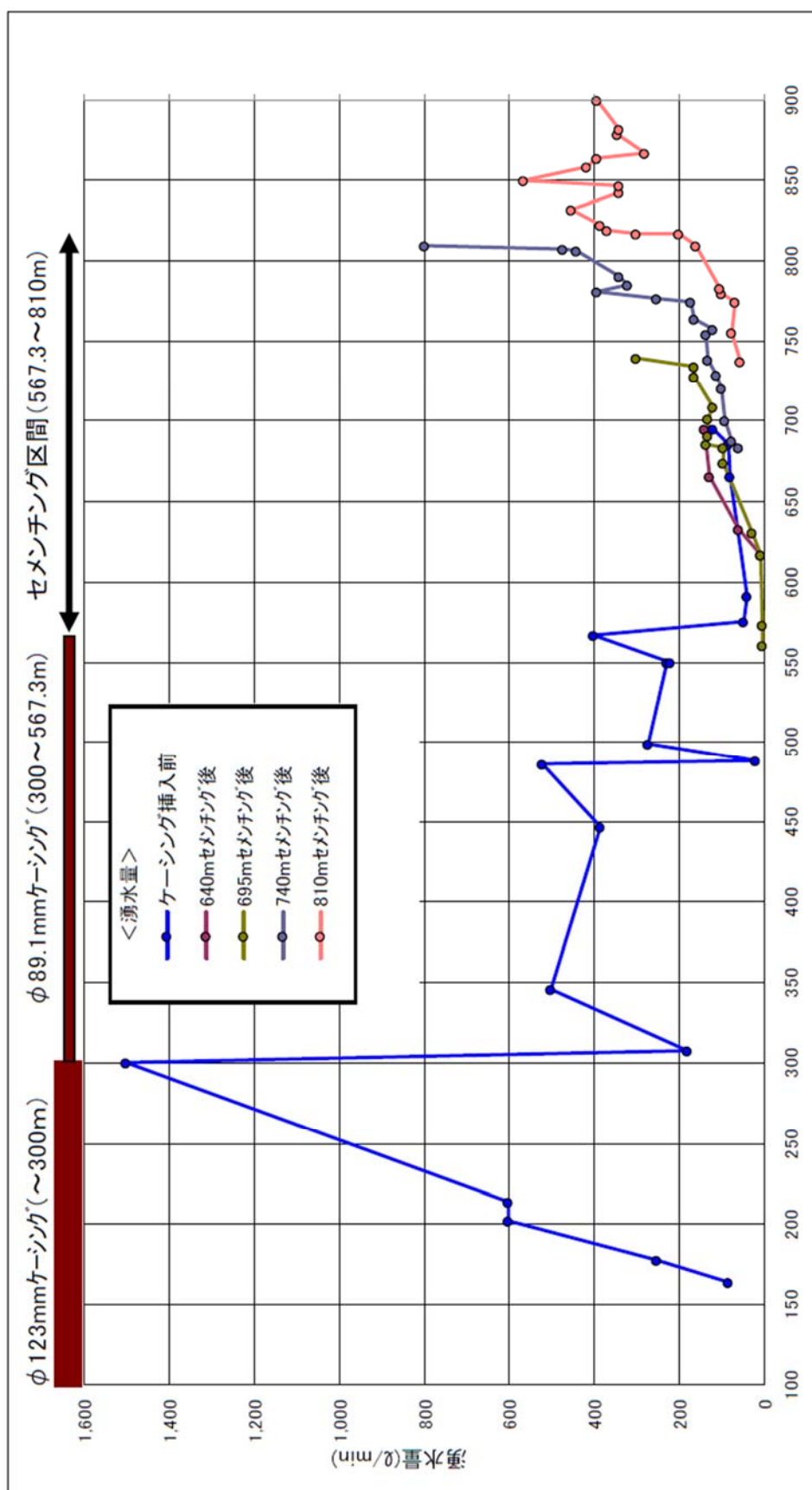
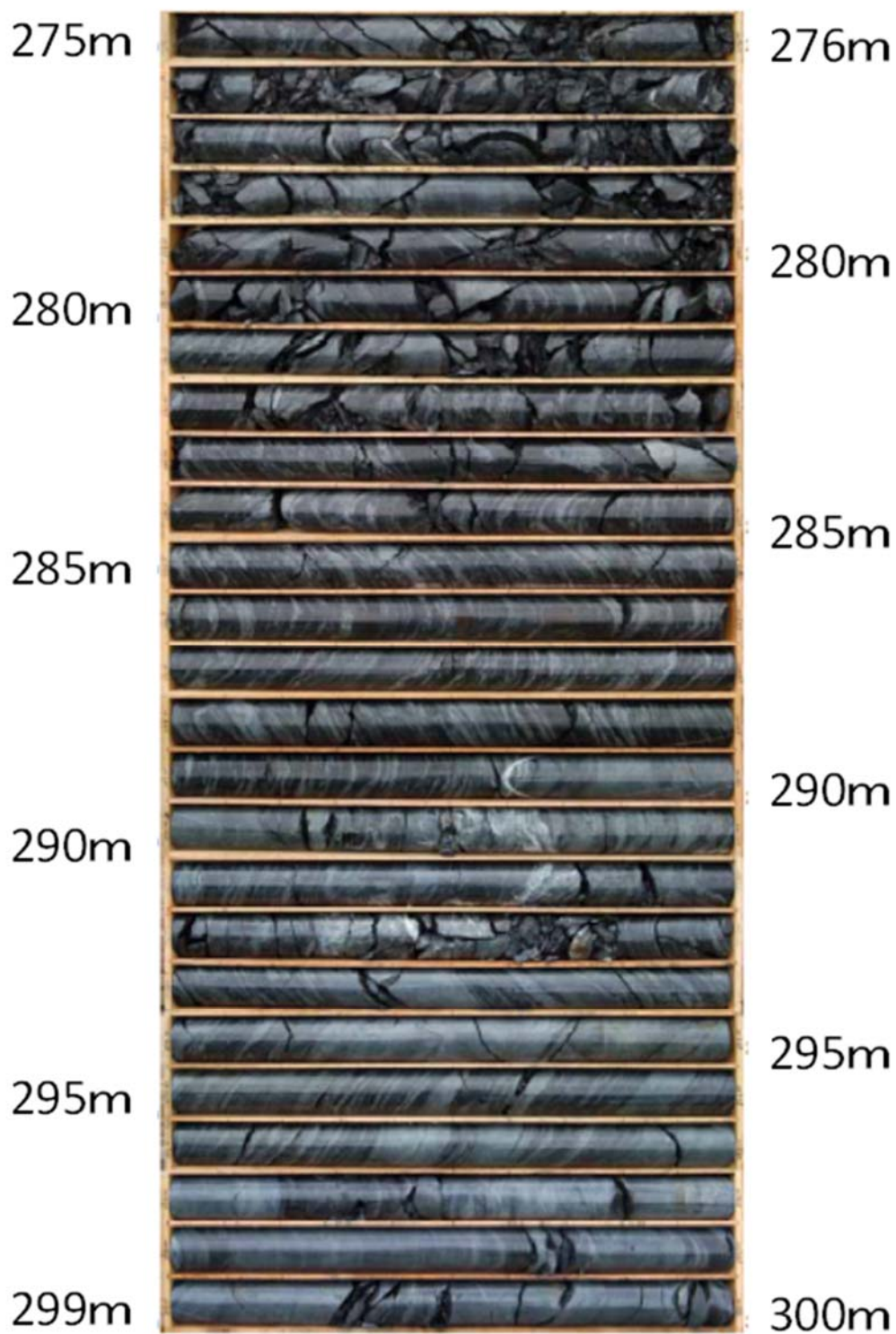


図 2 5 ボーリング時の口元湧水量

ボーリングコア【275m～300m】



ボーリングコア【300m～330m】

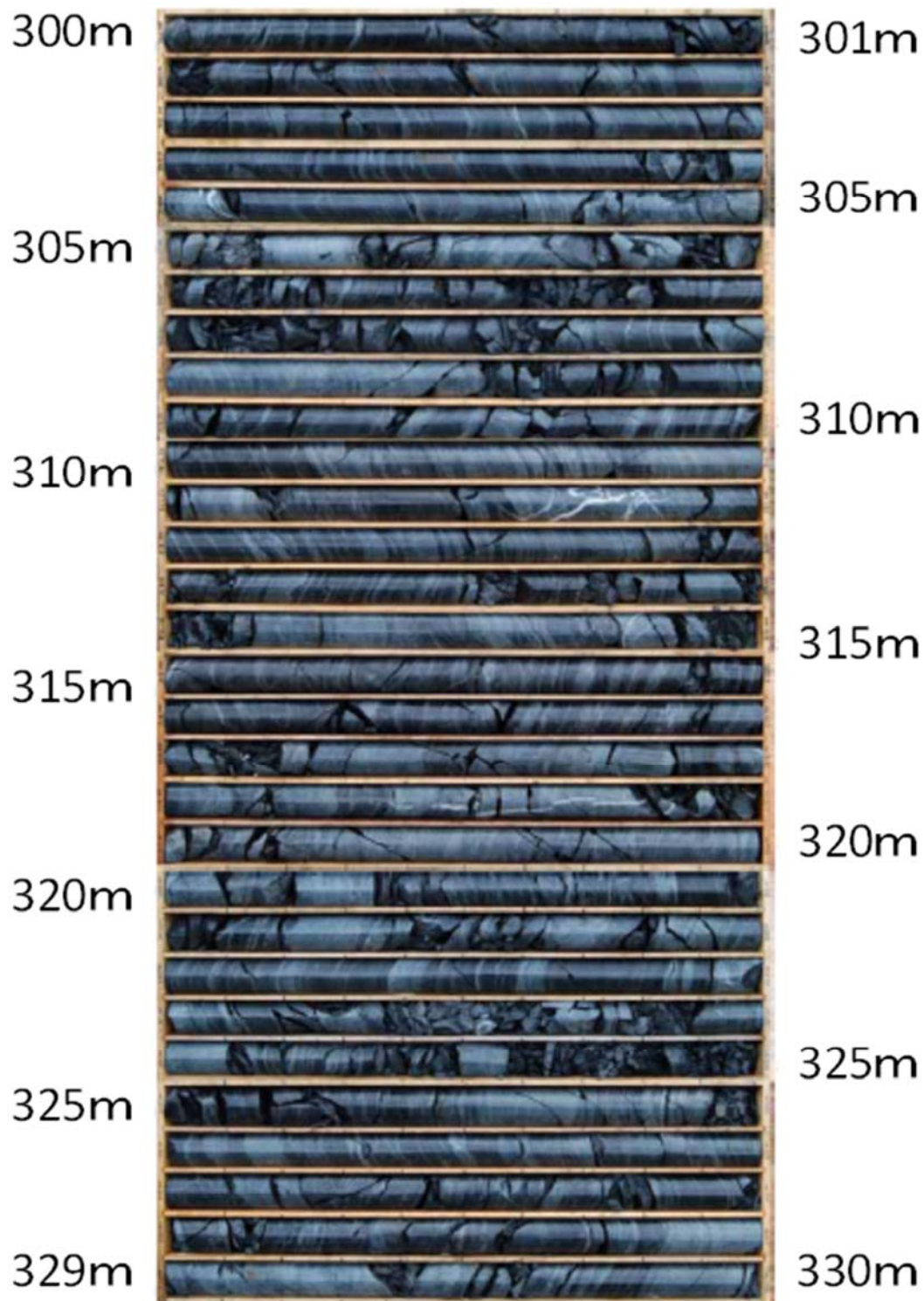


写真9 深度300m付近のコア写真

- ・探査①の弾性波探査の結果は図21に示すとおりであり、P波速度は4.5 km/s以上であることからトンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説（2016年制定 土木学会）によると地山等級「ⅢN」となり、当該地質では一番

良いという評価となります。ただし、弾性波探査は、深度が大きくなると信頼性が低下する傾向にあります。

③西俣斜坑沿い

- ・調査3のボーリングはノンコアで削孔しました。(図26)

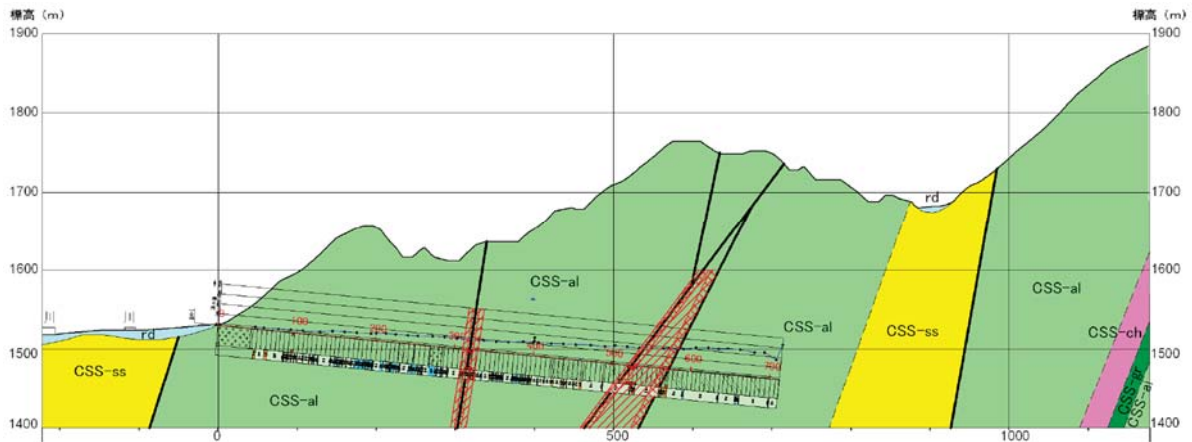


図26 ボーリング調査結果(西俣斜坑沿い)

これまで、山梨県内の斜坑の坑内からのノンコアボーリングのデータとその後の斜坑の掘削実績から、ノンコアボーリング削孔時のデータによる地山の評価を積み重ねています。ノンコアボーリング削孔時の削孔岩盤の単位体積あたりの消費エネルギー(ビットの回転や推進)が少ないほど、破碎質な岩盤であると評価しています。

- ・調査3のボーリングによる消費エネルギーの推移及び口元湧水量の推移について、図27に示します。ボーリング深度600mまでは、ボーリング掘削延長に応じて口元湧水量も増加していきましたが、深度600m以降は口元湧水量が概ね約1200L/分で推移しました。
- ・調査期間中の最大口元湧水量は、約1700L/分を計測しました。

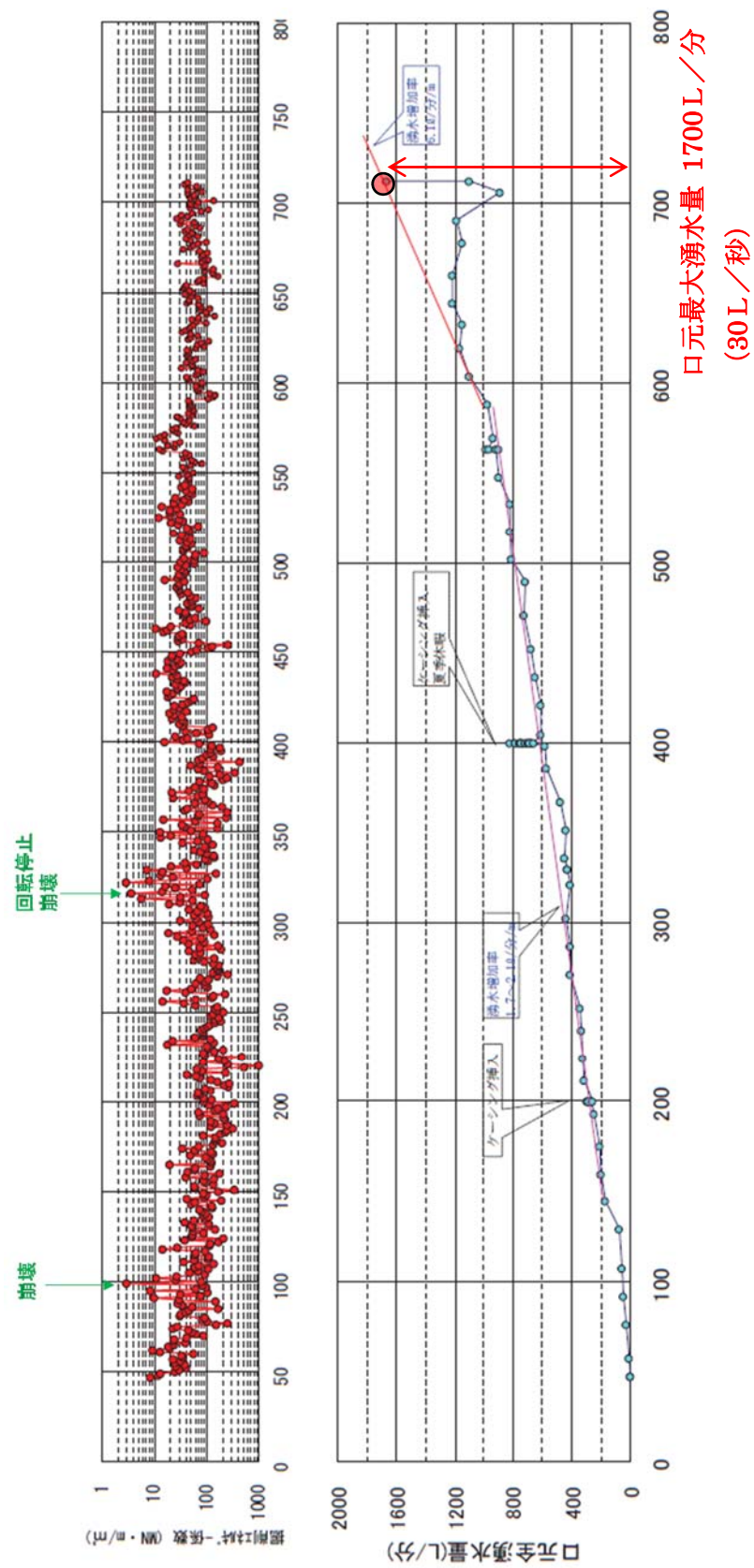


図 2 7 ボーリング調査時の掘削データ (西俣斜坑沿い)

④ 畑薙山断層帯

- ・調査4のボーリングはノンコアで削孔しました。(図28)

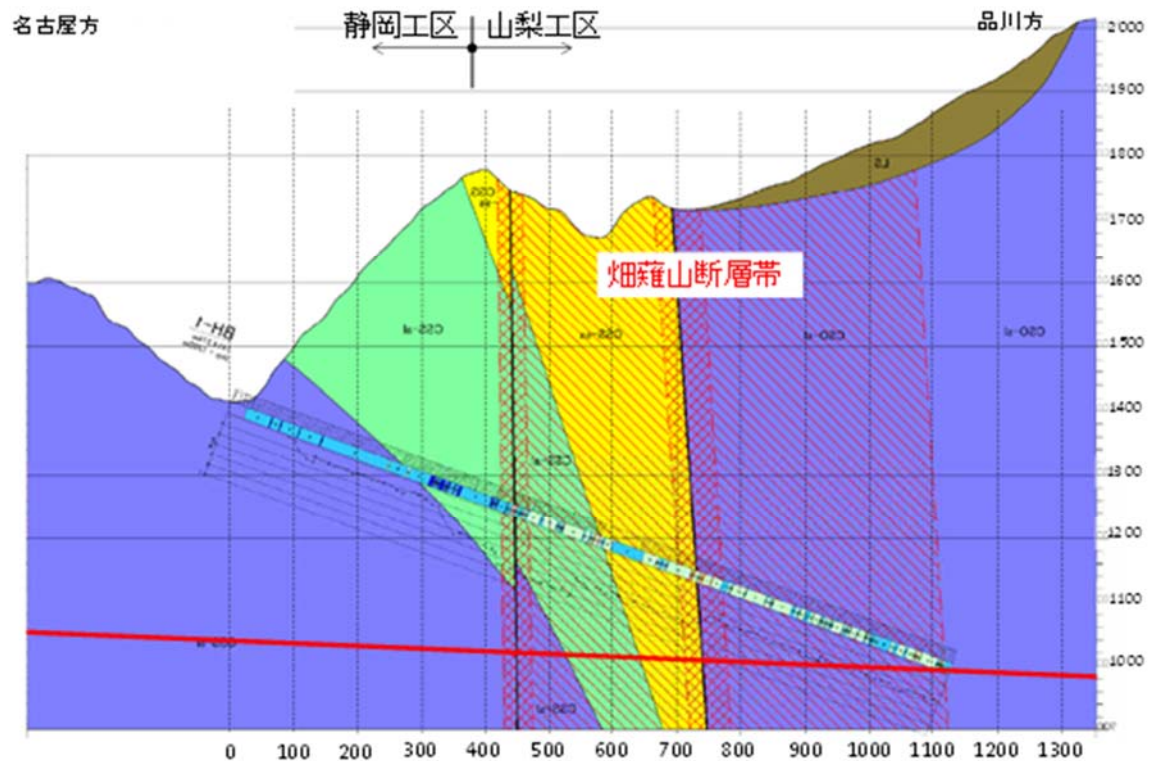


図28 ボーリング調査結果(畑薙山断層帯)

ノンコアボーリング削孔時のデータによる地山の評価については、調査3と同じ指標で行っています。

- ・調査4のボーリングによる消費エネルギーの推移、また、孔壁崩壊に伴う回転停止などの異常発生状況について図29に示します。口元湧水量の推移も併せて示しています。ボーリング深度360m以深において、口元湧水量が急激に増加し、最大口元湧水量が約2600L/分を記録、消費エネルギーが少ない破碎質な地質や孔壁崩壊に伴う回転停止が繰り返し発生し、約800mにわたって継続しました。

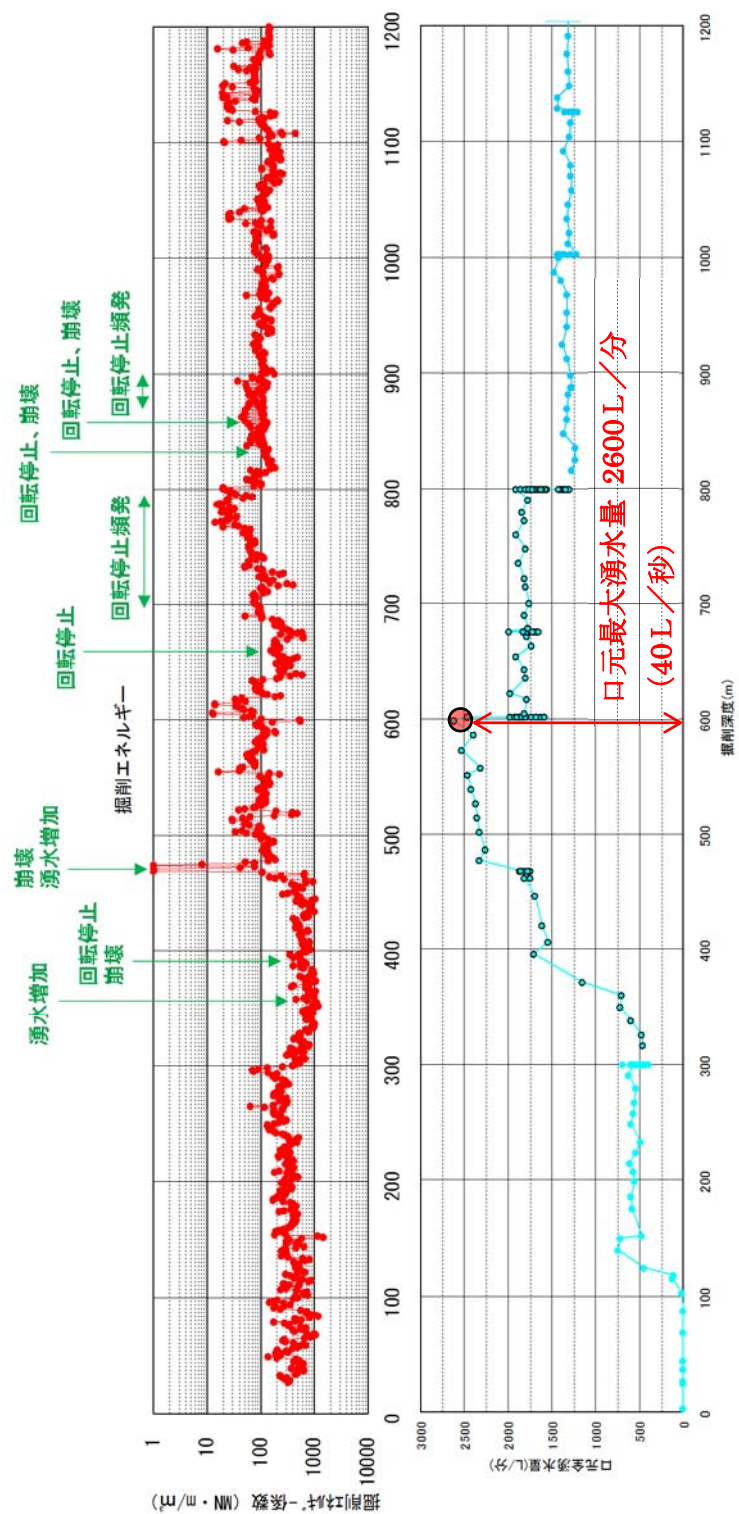


図 2 9 ボーリング調査時の掘削データ②

- ・ 口元湧水量の推移を調査 2 や調査 3 と比較すると、その量が格段に多いことが確認できます。