

県境付近の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3年2月28日現在の内容をまとめたものです。
- ・本資料は第6回有識者会議にてご説明した「資料3 県境付近の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」を一部、更新したものです。
- ・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。

※中央新幹線が山梨県境付近で交差する断層について、南アルプスの地形地質に精通された有識者より、交差部より北側・南側に伸長する断層を含めて、井川－大唐松山断層であるとの見解を頂いております。一方、当社ではこれまで、文献調査、地表踏査による現地確認や航空写真による地形判読、また弾性波探査やボーリング調査の結果に基づき、交差部の北側・南側に伸長する部分を含めて、「新編 日本の活断層」に記載されている畑薙山断層としての連続性が認められると考え、破碎質な地質の幅を含め、「畑薙山断層帯」として扱ってきております。

交差部付近における断層の存在は、有識者の見解と当社が知得している断層とで共通しており、有識者会議においては、交差部付近の断層の呼び方を「県境付近の断層帯」と改め、資料を構成することといたします。

目 次

(1) 南アルプストンネルの計画概要	・・・1
1) 全体概要	
2) 県境付近の断層帯の概要	
<u>(2) 県境付近の断層帯におけるトンネルの掘削方法の検討</u>	・・・6
1) 工事期間中のトンネル湧水を山梨県側に流出させないトンネル掘削方法	
①静岡県側からNATMで下向きに掘削する工法	
②静岡県側から最新の機械掘削技術を用いて下向きに掘削する工法	
③まとめ	
2) 安全を確保しつつ工事期間中のトンネル湧水の山梨県側への流出を抑えたトンネル掘削方法	
(3) 工事期間中のトンネル湧水を静岡県側に戻す等の対策の検討	・・・27
1) 山梨県側に流出した湧水の県境の稜線を越えた配管による静岡県側への送水	
2) 山梨県境付近への導水路トンネルの取付け	
3) 静岡県側からの長尺ボーリングとケーシングパイプによる揚水	
4) 山梨県境稜線部からの深井戸による揚水	
(4) 千石斜坑等の掘削方法と県境付近の断層帯の掘削方法の比較	・・・39
参考資料1 青函トンネル掘削時における突発湧水事例	・・・44
参考資料2 突発湧水発生時の検討	・・・45
参考資料3 山梨県境付近への導水路トンネル取付けに関する追加検討資料	・・・48
参考資料4 地質調査結果	・・・50

(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 25 km 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^{※1}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。

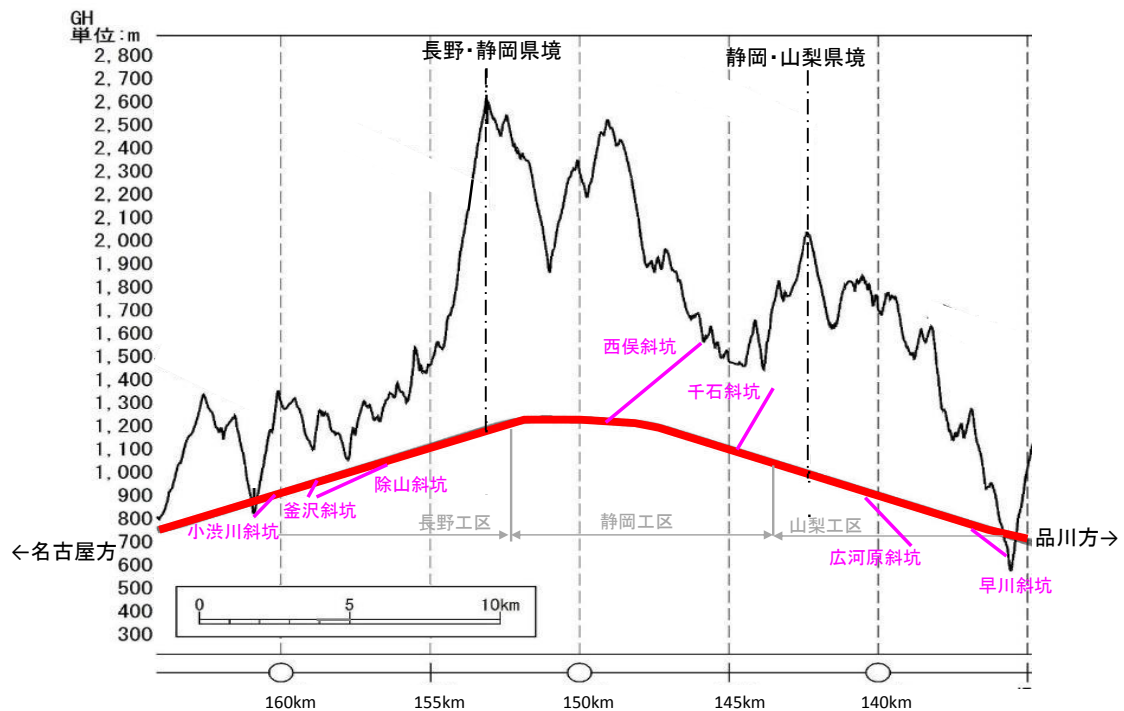
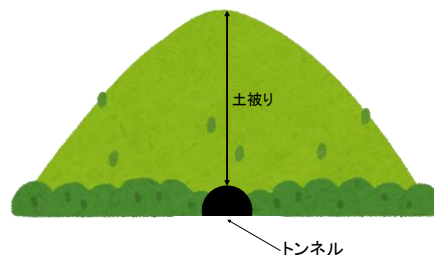


図 1 南アルプストンネル縦断線形

※1 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 1,400m となり、これまで国内のトンネル工事で最大であった 1,300m 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	飛騨	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。
- ・南アルプストンネルは、約25kmの長大かつ急峻なトンネルであるため、地表部からの地質調査には限界があります。地表部から確認できない山深い箇所の地質等を直接確認するために先進坑を計画しています。先進坑の施工時においては、本坑掘削に先立って、本坑よりも小さい断面で、トンネル前方の地質を直接確認し、トンネル湧水状況を把握します。先進坑の掘削結果を本坑掘削時に反映させ、より安全に、環境への影響をより低減させる方法の立案等に使用する目的があります。また、中央新幹線供用開始後は、トンネル維持管理用の通路として使用することを計画しています。

2) 県境付近の断層帯の概要

- ・静岡県と山梨県境付近に中央新幹線と交差する南北方向に伸長する断層があります。この断層は、産業技術総合研究所のシームレス地質図(図2)では、井川-大唐松山断層として明記されています。

- ・一方、当社は、これまで文献調査、地表踏査による現地確認や航空写真による地形判読、「新編 日本の活断層」(図3)による文献調査、及び弾性波探査や大井川(東俣)からのボーリング調査を行い、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。
- ・いずれにしても、県境付近には大きな幅をもった断層帯の存在が考えられます。
- ・なお、お示した地質平面図及び地質縦断図の破碎質な地質の東端ですが、当社が実施した地質調査の調査限界に達したため、これ以上東側の地質の状況について、確認できておりません。よって、図示した位置より更に東側へ破碎質な区間が延長されている可能性はあります。(図4、図5)

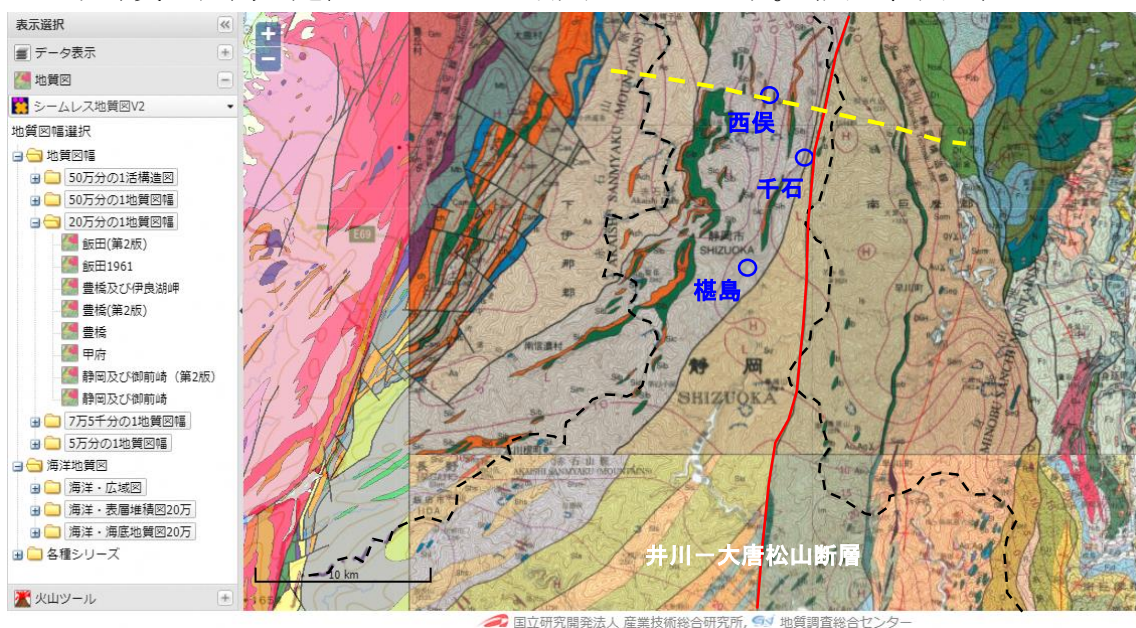


図2 シームレス地質図(20万分の1)

※産業技術総合研究所 地質調査総合センター地質図NAVIより抜粋、一部加筆

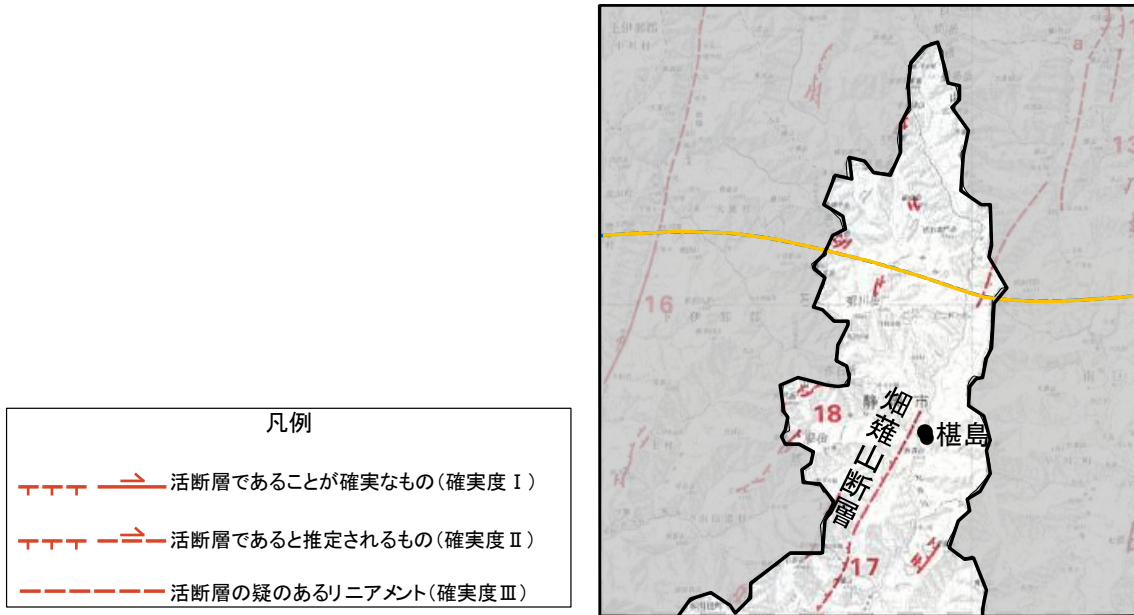


図3 「新編 日本の活断層」(活断層研究会、1991) ※一部加筆

※「(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

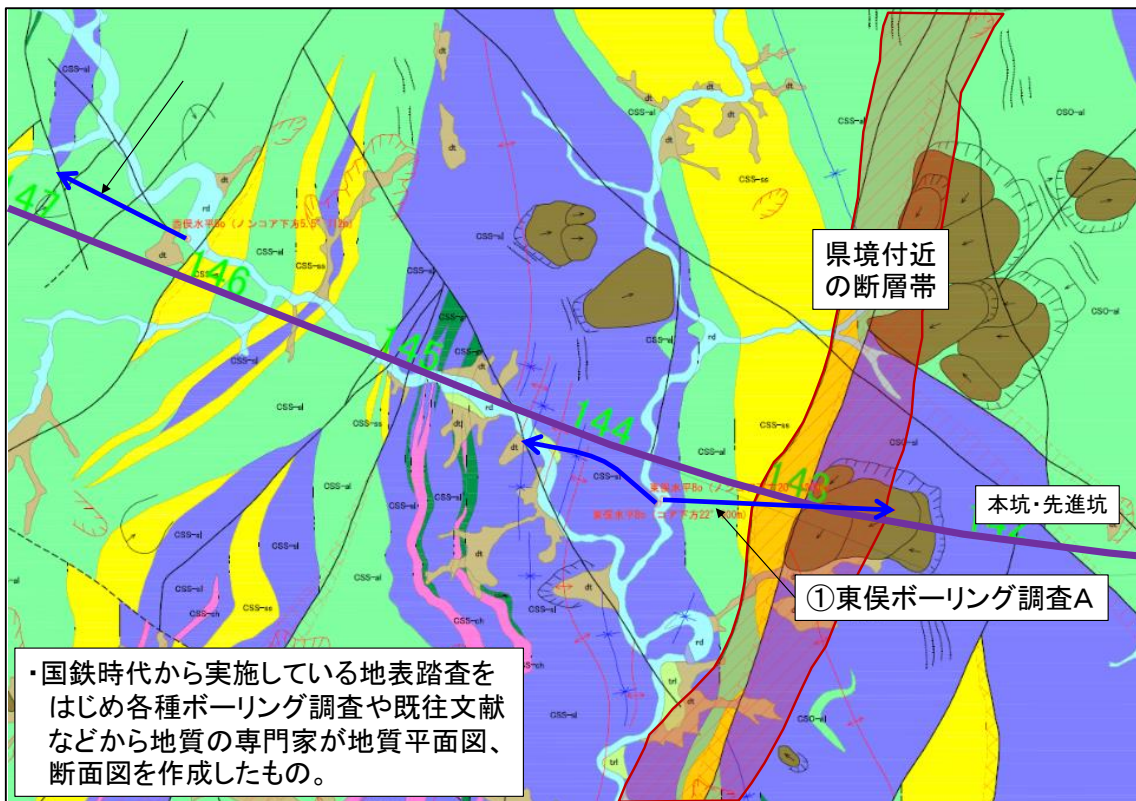


図4 県境付近の断層帯付近の地質平面図

※「(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

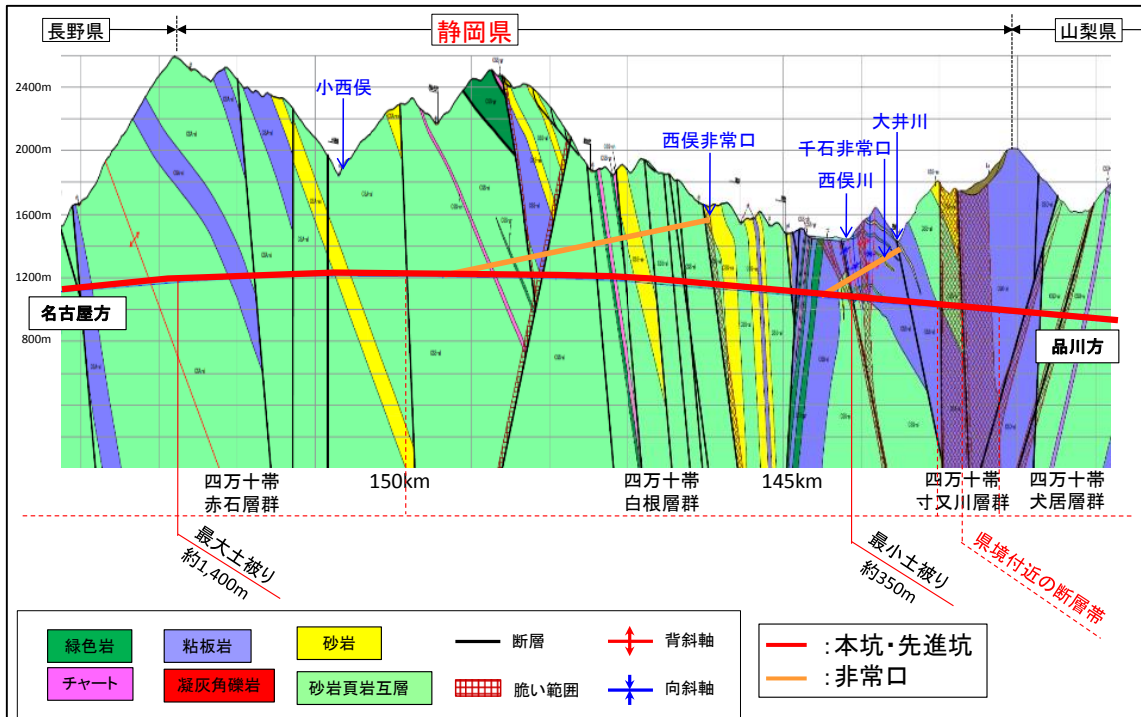


図5 県境付近の断層帯付近の地質縦断図

※「(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

- ・ 県境付近の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) 県境付近の断層帯におけるトンネルの掘削方法の検討

- ・山岳トンネルの掘削において、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。
- ・行政界をまたぎ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、掘削においては、トンネル中間部の頂点に向かって上向きに NATM^{※2} で掘ることが一般的です。
- ・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。
- ・よって、山岳トンネルの掘削における一般的な考え方に基くと、山梨県境付近の断層帯は、山梨県側から静岡県側に向かって上向きに掘削することが一般的です。
- ・しかしながら、山梨県側から上向きに掘削する場合、トンネル湧水が工事の一定期間、山梨県側へ流出することになります。
- ・「ゼロリスクは達成できないことを認識しつつ、「トンネル湧水の全量を戻す」ことを前提に、設計する」という静岡県のご提案を踏まえ、まずは、県境付近の断層帯を掘削する工事期間中において、トンネル湧水を山梨県側に流出させない工法を検討しました。検討した工法について、安全性や自然環境への影響等の課題や問題点を抽出し、評価しました。

※2 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

1) 工事期間中のトンネル湧水を山梨県側に流出させないトンネル掘削方法

- ・トンネル湧水を県外に流出させない工法の検討にあたっては、一般的な掘削方法である NATM に加え、最新の機械掘削技術を用いた工法を検討しました。
- ・具体的には、掘削中のトンネル湧水をポンプアップする等により県外流出を防ぐ工法として、
 - ①静岡県側から NATM で下向きに掘削する工法
 - ②静岡県側から最新の機械掘削技術を用いて下向きに掘削する工法を検討しました。
- ・検討した工法において、「安全性、経済性、環境負荷」を検討項目として、各項目の課題や問題点を抽出し、評価しました。

「安全性」は、工事中における作業員等の人命を最優先事項として考え、評価しました。

「経済性」は、検討した工法に要する工費と追加となる工事期間を検討事項として考え、評価しました。

「環境負荷」は、周辺地下水や上流域の沢水への影響、発生土の増加に伴う新たな地表部の改変について評価しました。

① 静岡県側からNATMで下向きに掘削する工法

- ・図6の通り、県境付近の断層帯を静岡県側から下向きに掘削することで、県境付近の断層帯から生じるトンネル湧水を山梨県側へ流出させない工法を検討しました。

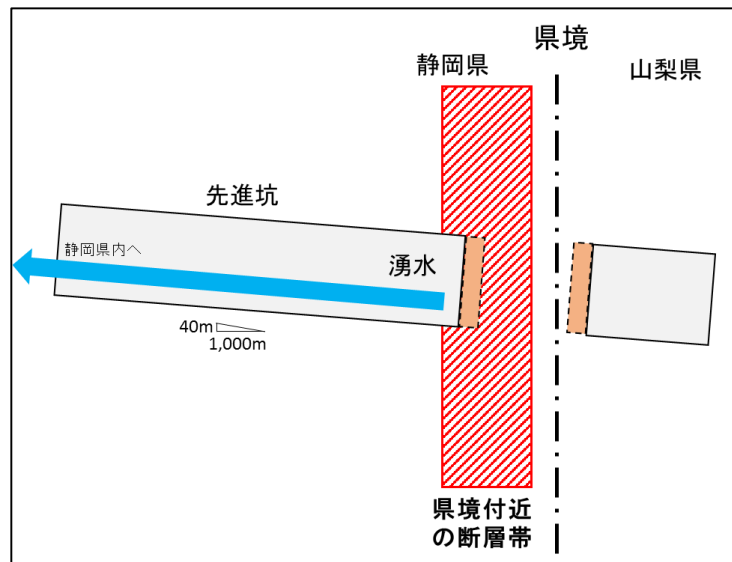


図6 静岡県側からNATMで下向きに掘削する工法

a) 安全性の評価

- ・静岡工区のトンネル掘削においては、高速長尺先進ボーリングなど前方探査技術を活用し、トンネル湧水低減対策（吹付けコンクリートや覆工コンクリート等）を講じることで、トンネル全体の湧水量は、斜坑、先進坑、本坑の合計値で $3\text{m}^3/\text{秒}$ を上限値とし、適切に管理していきます。
- ・また、トンネル湧水をより低減させる対策として、トンネル周辺及び前方に対し、薬液注入を行うことで、慎重に掘削を行っていきます。
- ・しかしながら、こうしたトンネル全体の湧水量管理を行っていたとしても、瞬間的に発生する可能性がある切羽付近の突発湧水^{※3}の湧水量を管理することは困難です。
- ・突発湧水への対応は、トンネル掘削工事の安全を確保する上で、重要な課題であり、切羽付近で突発湧水が発生した際の具体的な状況（以下、モデルケースという）を想定し、安全性について検討しました。

※3 突発湧水：本資料では、掘削前の調査で把握できなかった、短時間に切羽付近で湧出する概ね1分間で60トン程度以上の大量の湧水とします。

7. 突発湧水に関する想定（モデルケースの設定）

【検討に用いる湧水量】

- ・工事の安全性の検討において用いるトンネル湧水量は、切羽付近の突発湧水量とします。
- ・実際にトンネルを掘削する場面においては、突発湧水が発生した場合に、その時点でトンネル内の安全が確保されるかどうか重要です。
- ・過去に実施した地質調査の結果、県境付近の断層帯では大量の湧水が発生するリスクが高いことを踏まえ、今回の安全性の検討では、水収支解析の結果ではなく、青函トンネルでの事例を参考（表2）に、1 m³/秒（60 m³/分）として検討することにしました。

表2 青函トンネルでの切羽付近湧水量

トンネル名		工事完成年	切羽付近湧水量
津軽海峡線	青函トンネル	1988年	約70m ³ /分

【検討に用いる突発湧水発生時の湧水量の経時変化】

- ・突発湧水量の経時変化は、青函トンネルでの事例を参考に設定します^{※4}。
- ・具体的には、まず青函トンネルにおける湧水量の経時変化から（図7）、湧水の低減式を設定します（図7赤線）。突発湧水は時間と共に低減していき、その後、恒常湧水になっていくと考えられ、湧水量は0にはなりません。
- ・設定した低減式を用いて突発湧水（1 m³/秒（60 m³/分））発生時の経過時間毎の湧水量を算出します（図8）。
- ・このモデルケースにより算出した湧水量の経時変化と積算湧水量は、表3に示す通り^{※5}であり、突発湧水の影響が続いている期間（ここでは15日間とします）における積算湧水量（A）＋（B）は約36万m³となります。
- ・また、このうち、恒常湧水分に相当する量（＝突発湧水が発生しなかった場合の湧水量）（A）は約27万m³と算出され、突発湧水分に相当する量（＝突発湧水の有無による湧水量の差）（B）は約9万m³と算出されます。

※4：湧水量の経時的な変化の記録が残された書面のグラフ等から数値を読みとったため、誤差を含んでいます。

※5：モデルケースでは、突発湧水が発生してから約1時間後では11%、1日後に63%、5日後には75%まで湧水量が低減される低減式としています。

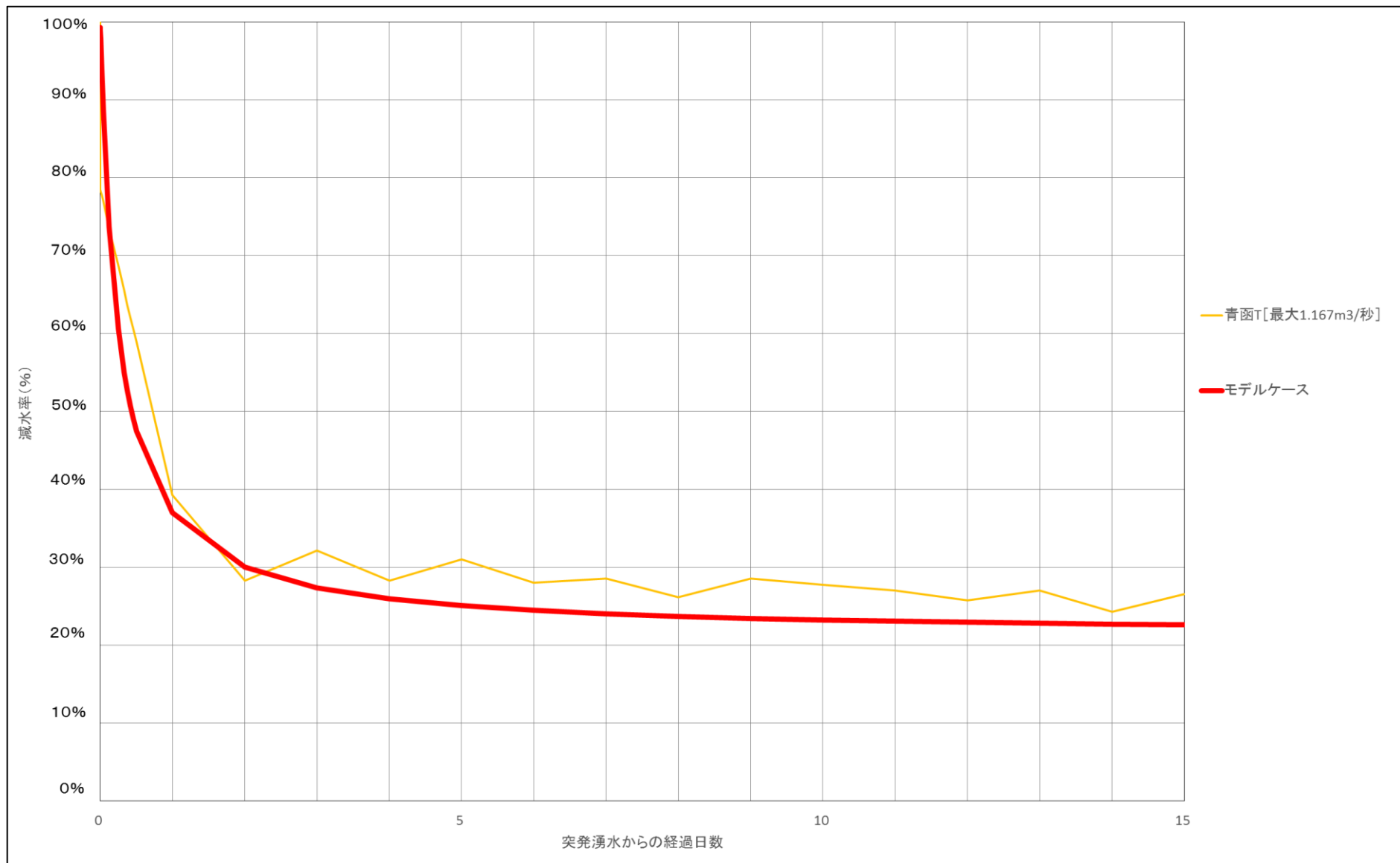


図7 切羽付近における突発湧水発生時の湧水量の設定

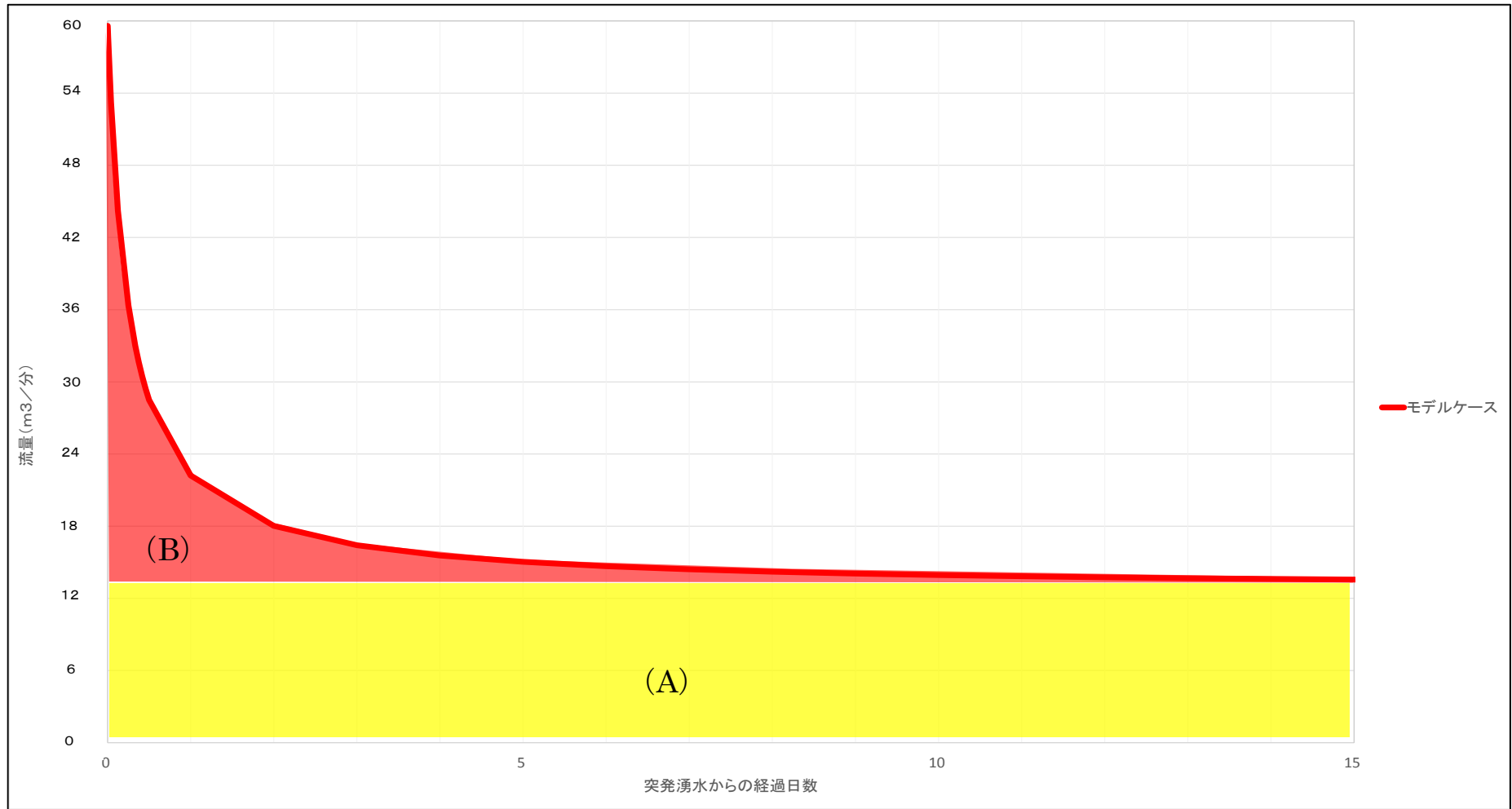


図8 モデルケースにおける湧水量の推移

表3 モデルケースによる切羽付近における湧水量の経時変化と積算湧水量

	モデルケースの湧水(60m ³ /分)が発生した際の湧水量の経時変化と積算湧水量								
	3分	5分	10分	30分	1時間	1日後	5日後	10日後	15日後
単位時間当り湧水量(m ³ /分)	60	59	59	56	53	22	15	14	14
積算湧水量(m ³)	180	478	1,071	2,245	3,935	50,626	154,597	258,839	357,904

【解析における突発湧水の取り扱い】

- ・現実の断層帯の地質では、良質な部分と破碎質な部分が存在し、破碎質な部分において突発湧水（1 m³/秒）の可能性がありますが（図9左図）。
- ・一方で、水収支解析では、ブロック毎に均一な地質を想定していることから、突発湧水を再現することはできません（図9右図）。ただし、県境付近の断層帯の透水係数を一括りで大きく設定していること等から、発生するトンネル湧水の総量としては、実際のトンネル湧水量より大きめに算出されていると考えています。

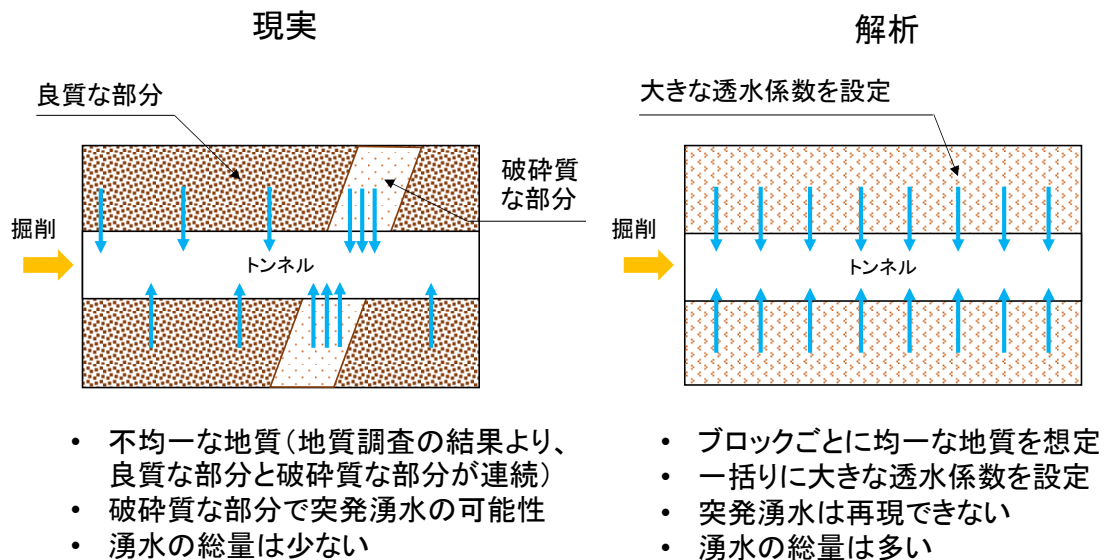


図9 断層帯における現実と解析の違い（イメージ）

- ・なお、トンネル掘削に伴う河川流量への影響を評価する上では、突発湧水（1 m³/秒）を含む湧水量の総量が重要であり、湧水積算量に着目する必要があります。第8回有識者会議でお示したように、水収支解析においては、山梨県側へ流出する期間に流出する湧水量の総量は、JR 東海モデルでは約 0.03 億 m³（平均値 0.12 m³/秒）、静岡市モデルでは約 0.05 億 m³（平均値 0.21 m³/秒）と算出しました。
- ・これらを踏まえ、山梨・静岡県境から先進坑貫通までの掘削期間において、モデルケースによる突発湧水量と解析（静岡市モデル）による山梨県側へ流出する湧水量の総量を比較したイメージが図10となります。
- ・図10における突発湧水が発生しなかった場合の湧水量（A）及び突発湧水の有無による湧水量の差（B）は、図8における（A）及び（B）と同じ量を示しています。

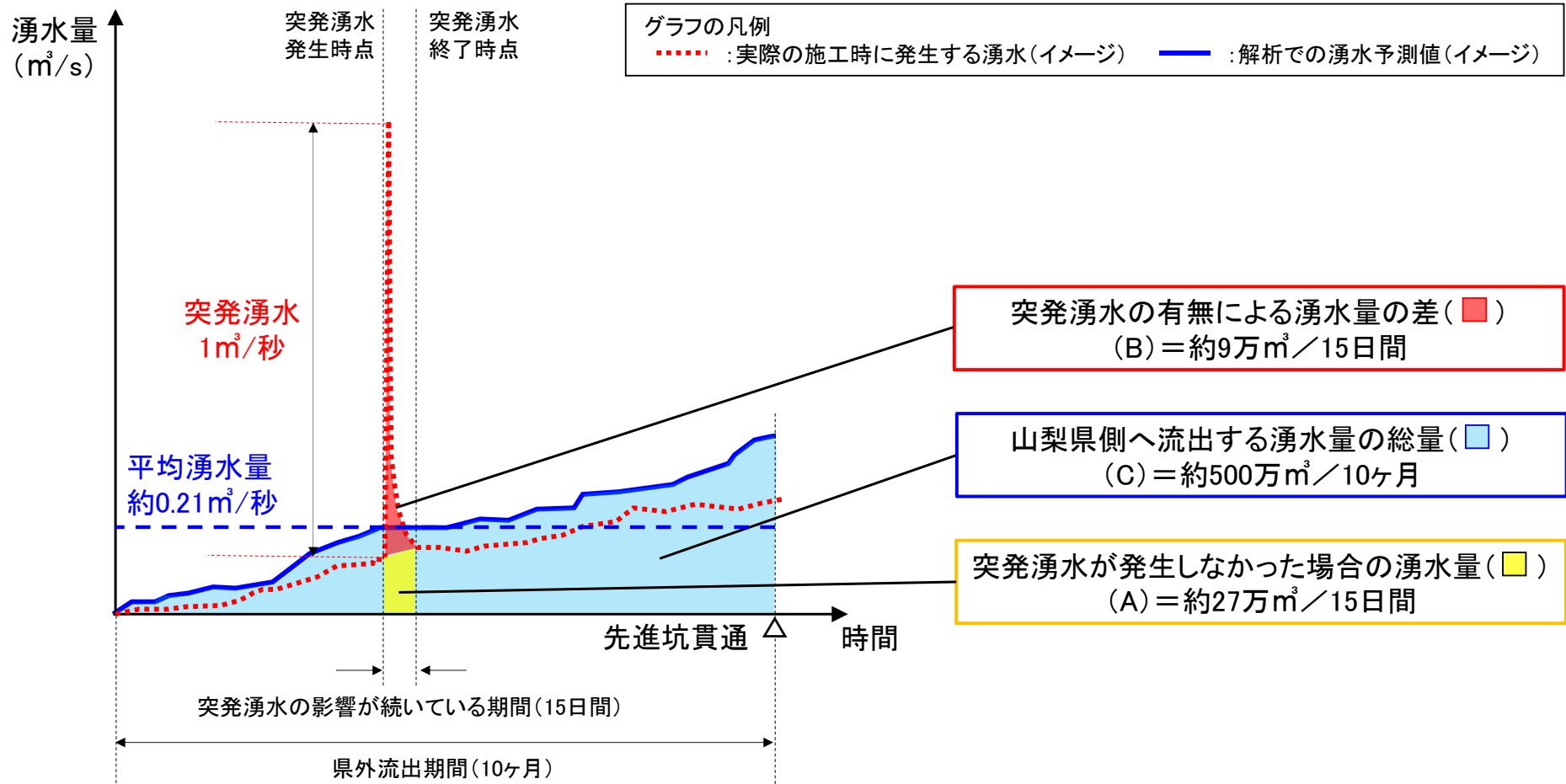


図10 モデルケースによる突発湧水量と解析(静岡市モデル)による山梨県側へ流出する湧水量の総量の比較(イメージ)

イ. 突発湧水発生時のトンネル坑内の状況

- ・モデルケースに基づき、切羽付近で突発湧水が発生した際の坑内の状況を想定し、工事の安全性を検討します。
- ・検討においては、実際の先進坑のトンネル径（約6m）、勾配（4%）を用い、トンネル坑内にどの程度の湧水が溜まるのかを経時的に再現しました。
- ・検討に用いた計算結果は、「参考資料2 突発湧水発生時の検討」に記載します。

【突発湧水発生3分後の状況】

- ・突発湧水発生後、3分後には合計180 m³の湧水が発生するため、切羽から後方35m程度、最深部はトンネル底面から1.5m程度まで水没します。
- ・切羽周辺では大量の湧水と細かい土砂が足元を埋め尽くし、また、後方35mまで水没している状況では、作業員が後方へ避難するまでに時間を要する可能性があります。

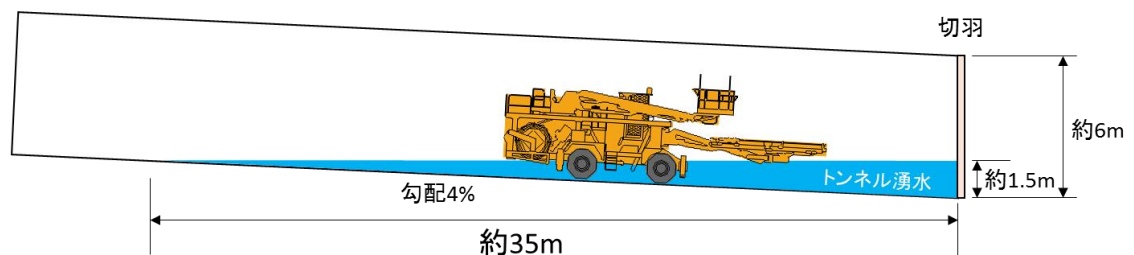


図 1 1 突発湧水発生3分後のトンネル坑内の状況

【突発湧水発生10分後の状況】

- ・突発湧水発生後、10分後には合計約1,100m³の湧水が発生するため、切羽から後方約90m程度、最深部は3.5m程度まで水没範囲が広がります。
- ・この時点でトンネル切羽付近は完全に水没することになるため、作業員が取り残された場合、救出は不可能となります。また、トンネル掘削機械類も水没した状態となります。

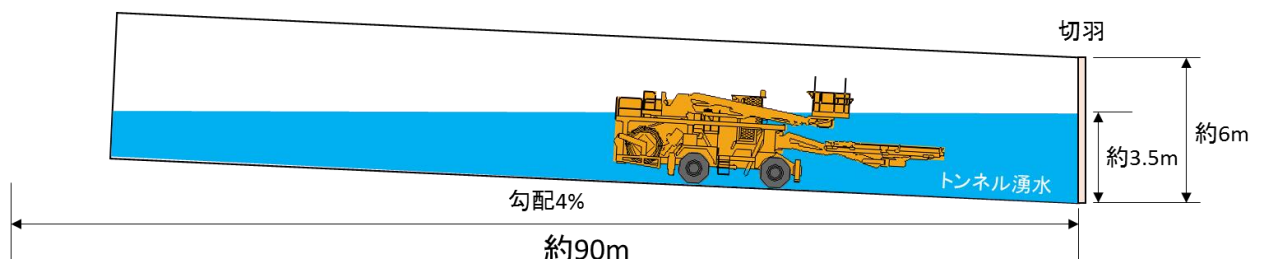


図 1 2 突発湧水発生10分後のトンネル坑内の状況

【突発湧水発生 1 時間後の状況】

- ・突発湧水発生後、1 時間後には合計約 4,000m³ の湧水が発生するため、切羽から約 180m 後方まで水没範囲が広がります。
- ・約 180m 後方までトンネルが水没すると、重機や電気設備が水没することになり、大規模な停電が発生することによりポンプ等の機器類が動作しなくなる可能性があります。
- ・また、突発湧水が発生するまでには、ポンプで揚程可能であった区間にまで停電影響が及ぶため、水没の範囲が更に広がる可能性があります。

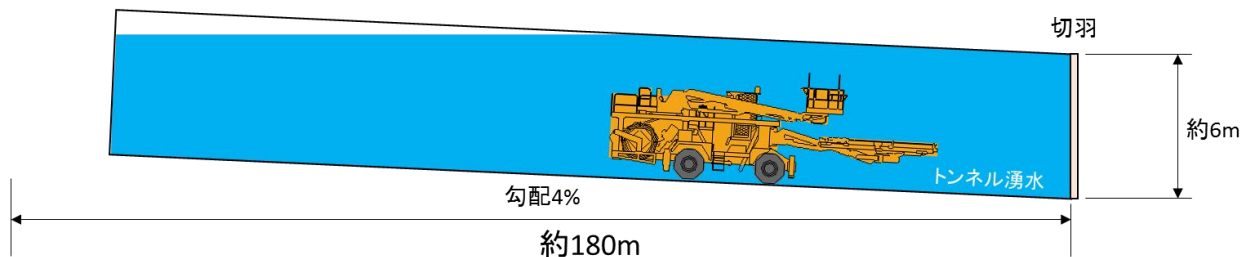


図 1 3 突発湧水発生 1 時間後のトンネル坑内の状況

以上の通り、県境付近の断層帯を下向きで掘削する場合、突発湧水により切羽周辺が水没することになり、工事の安全を確保するという観点で課題があります。

b) 経済性の評価

- ・突発湧水が発生した場合には、機械類が水没し故障する可能性があるため、山梨県側から上向きで掘削する場合と比較し、費用は増加する可能性があります。
- ・静岡県側から下り勾配で掘削する場合、上り勾配で掘削する場合と比較し排水の効率が落ちるため、掘削速度が下がる可能性があります。
- ・掘削速度が下がることで工期が延長になり、機械類の損料が増加する可能性があります。
- ・また、突発湧水が発生し、トンネル坑内が水没してしまった場合には、復旧のための期間が必要となるため、山梨県側から上向きで掘削する場合と比較し、工期は延びる可能性があります。

c) 環境負荷の評価

- ・本検討案の掘削範囲は、山梨県側から上向きで掘削する場合と同じであるため、周辺地下水や上流域の沢水への影響、発生土の増加に伴う新たな地表部の自然改変等は発生しません。

以上の評価を表4にまとめ、お示しします。

表4 案①の評価^{※6}

安全性	経済性	環境負荷
×	△	○

※6：評価は、山梨県側から上向きで掘削する場合と比較し行っています。経済性の評価については、費用と工期の評価を勘案しています。

費用については、数十億円規模の増額を△、数百億円規模の増額を×としています。工期の評価について、1年未満の延伸を△、複数年に及ぶ延伸を×としています。

本検討案は、費用が△、工期が△であることから、経済性の評価を△としています。

② 静岡県側から最新の機械掘削技術を用いて下向きに掘削する工法

- ・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い、少ない作業員数で、高速で掘削する機械掘削が採用される傾向にあります。
- ・県境付近の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工法については、安全性等の検討に先立ち技術的な実現可能性を検討しました。

a) TBM工法

- ・TBM工法は、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です。

7. 事例1：二軒小屋発電所、赤石沢発電所 導水路トンネルの例

- ・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14、写真1）

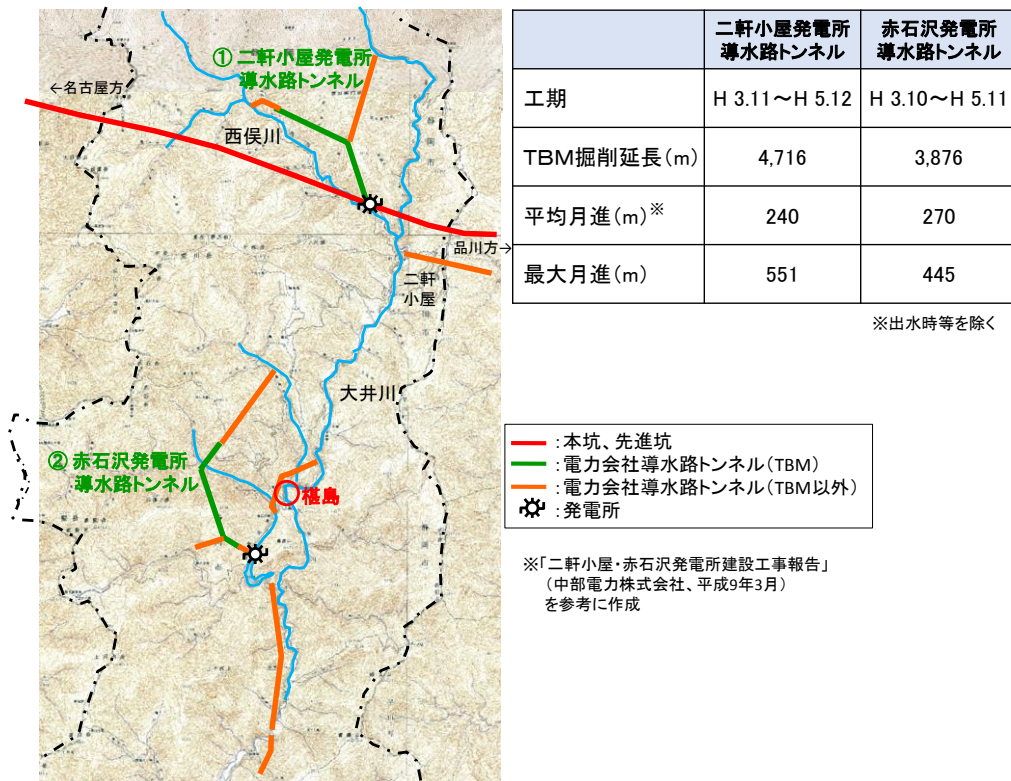


図14 静岡県内南アルプス地域の水力発電導水路トンネル

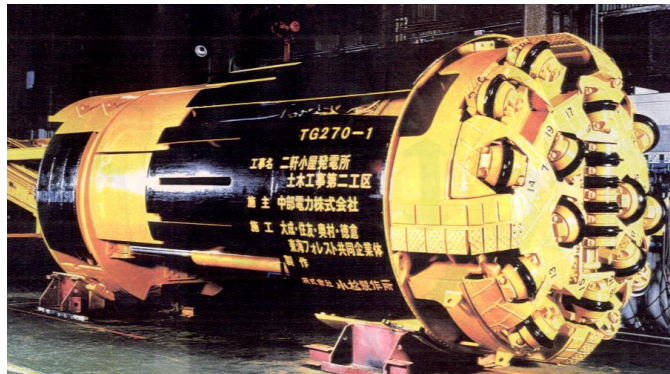
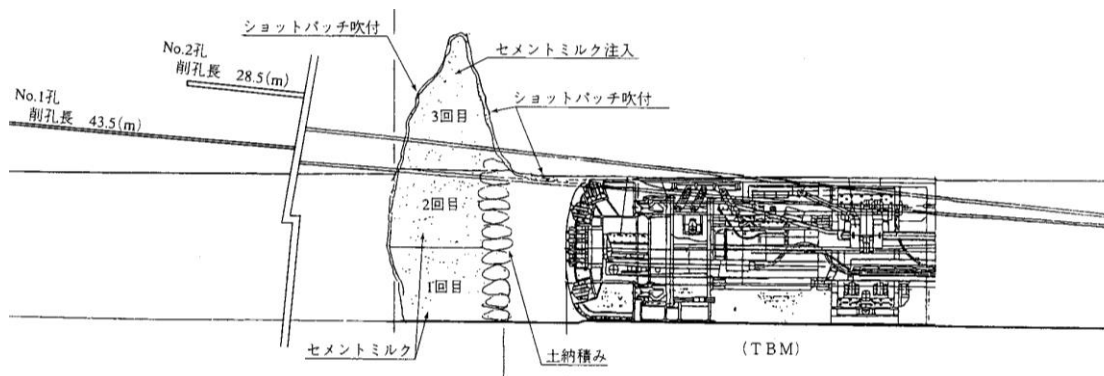


写真1 二軒小屋発電所のTBM (φ2.6m)

- ・ 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、県境付近の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。なお、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。
- ・ 当該トンネルは、県境付近の断層帯ほど、地質が悪くない条件でしたが、トンネル切羽が前方から崩れたことや(図15)、岩盤の一部が脆く、TBMの先端が下向きに下がってしまう事象(ノーズダウンともいいます)が生じたため、掘削ができなくなることがありました。掘削再開までに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15 二軒小屋導水路トンネル切羽前方崩落対応事例

1. 事例2：東海北陸自動車道飛驒トンネルの例

- 国内で、地質の脆い箇所では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16、図17）



図16 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

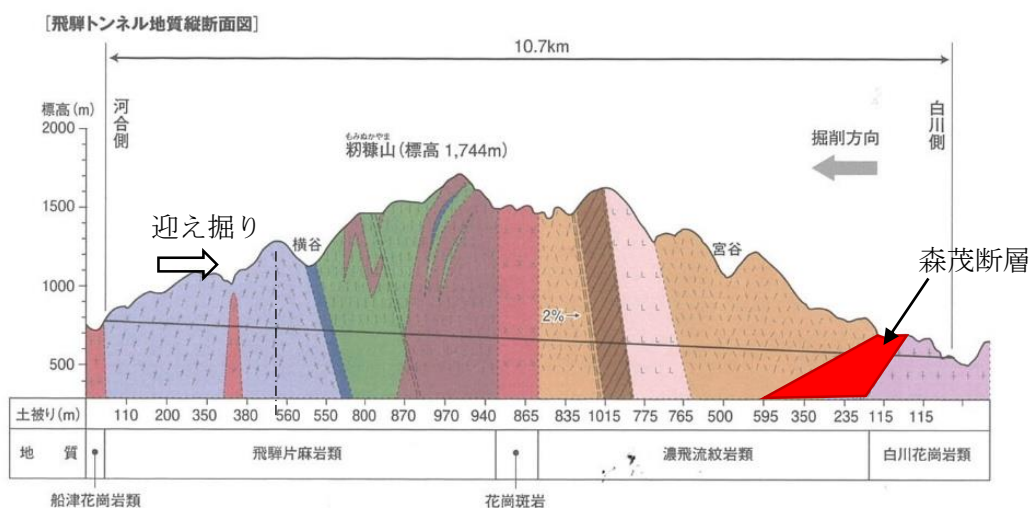


図17 飛驒トンネル地質縦断面図

※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 TBM、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 による掘削が実施され、この区間においては比較的順調に掘削が進みました。



写真 2 飛驒トンネル本坑 TBM (φ 12.84m)

※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。

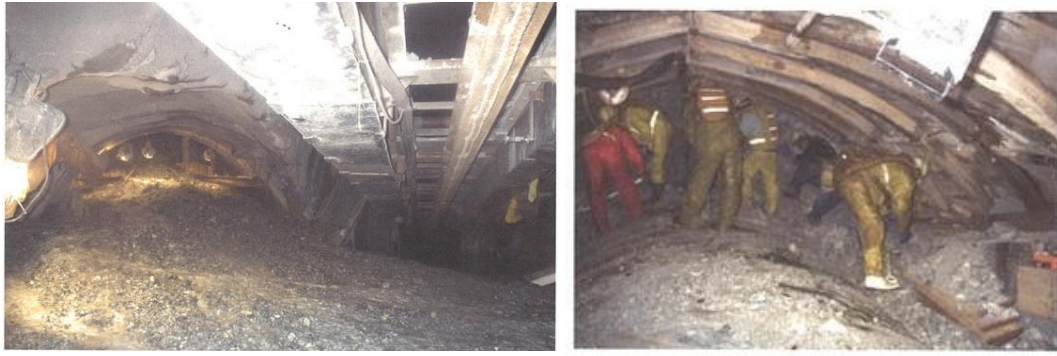


写真3 飛驒トンネル TBM 土砂崩落復旧状況

※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

- ・地質の脆い区間が長く繰り返し出現すると考えられる県境付近の断層帯をTBM工法で掘削すると、事例1、事例2で生じたような掘進不能の状況が長期間に及ぶことが考えられます。
- ・また、TBM工法も、NATM同様、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。
- ・県境付近の断層帯において、高圧突発湧水が発生すれば①同様、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。

b) 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いきます。（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18）。近年では高水圧下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1 MPa^{※8}程度が限界です。

※8 水圧 1MPa=水深 100m でかかる圧力（1cm²当りに約 10kg）と同じ圧力。シールド外径 10m以上での高水圧施工実績の最大は 0.78MPa（シールド技術変遷史、平成 28 年 3 月、一般社団法人日本トンネル技術協会）

水圧・土圧

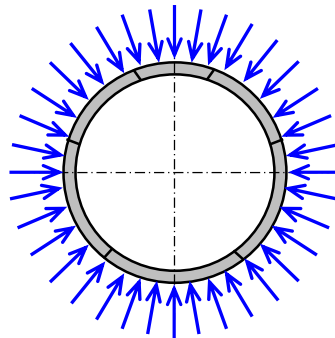


図 1 8 水圧・土圧の作用図

- ・県境付近の断層帯では、土被りが約 800m 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 800m 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技術的な実現可能性に大きな課題があります。

表 5 案②の評価

安全性	経済性	環境負荷
技術的な実現可能性に大きな課題あり		

③ まとめ

- ①～②の通り、山梨県側へトンネル湧水を流出させない工法を検討した結果をまとめると表6の通りです。
- ②案については、技術的な実現可能性に課題があり、特に安全性の観点では、①案は、突発湧水発生時の作業員避難上の課題が残ります。

表6 各案の評価のまとめ^{※9}

工法	安全性	経済性	環境負荷
①静岡県側からNATMで下向きに掘削する工法	×	△	○
②静岡県側から最新の機械掘削技術を用いて下向きに掘削する工法	技術的な実現可能性に大きな課題あり		

※9：評価は、山梨県側から上向きで掘削する場合と比較し行っています。経済性の評価については、費用と工期の評価を勘案しています。

費用については、数十億円規模の増額を△、数百億円規模の増額を×としています。工期の評価について、1年未満の延伸を△、複数年に及ぶ延伸を×としています。

①の検討案は、費用が△、工期が△であることから、経済性の評価を△としています。

2) 安全を確保しつつ工事期間中のトンネル湧水の山梨県側への流出を抑えたトンネル掘削方法

- ・ 県境付近の断層帯の掘削方法について、工事期間中もトンネル湧水を山梨県側に流出させない工法を検討しましたが、安全性、経済性、技術的な実現可能性の観点から課題があります。
- ・ 特に安全性の観点では、最善の案であるとは言い難いと考えられます。
- ・ よって、県境付近の断層帯については、突発湧水が発生した場合であっても湧水が切羽周辺に溜まることなく（自然流下させ）、工事の安全をより確実に確保することのできる山梨県側からの上向き掘削とすることが、最善の工法であると考えます。
- ・ しかし、本工法では、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出することになるため、先進坑を掘削する際、以下の対策をとることで、作業員の安全を確保しつつ、出来る限り山梨県側へ流出する湧水の総量を低減します。

①トンネル内における安全対策

- ・ 立入禁止範囲を設定し、切羽付近で作業に従事する作業員を明確にします。
- ・ 突発湧水により、トンネル坑内に置いている資材が後方へ流下することで、他の機器類や、近辺で作業している作業員と衝突するなど、安全性が低下する可能性があるため、架台等で地盤面と切り離し流出防止対策を行います。
- ・ トンネル坑内の電気設備は湧水により電気ショートすると、大規模な停電が生じ、作業員の避難に支障をきたす恐れがあるため、同様に架台等で地盤面と切り離して対策を行います。

②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、破砕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。（図19）

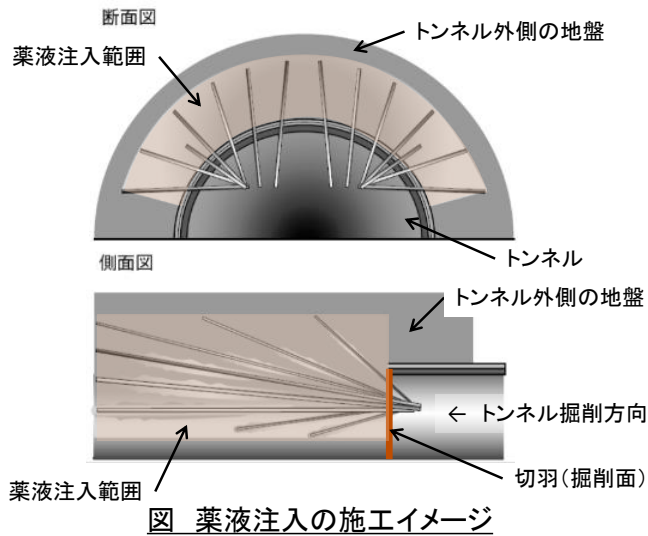


写真 薬液注入工の施工例

※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

図 薬液注入の施工イメージ

図 19 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

③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、県境付近の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県境付近の断層帯の地下水をポンプアップして大井川に流すことを計画します。(図20)
- ・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せんが、県境付近の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、ボーリングにより得られた県境付近の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、過去に大井川(東俣)から実施した斜めボーリングで県境付近の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4 地質調査結果」の図46参照)。

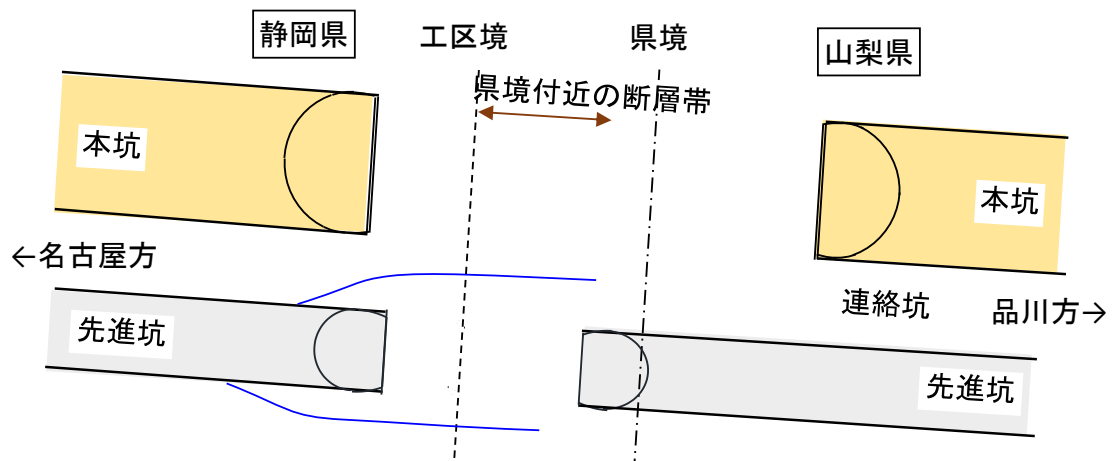


図 20 静岡県側先進坑からのポンプアップ

④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いう防御壁を構築し、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5)

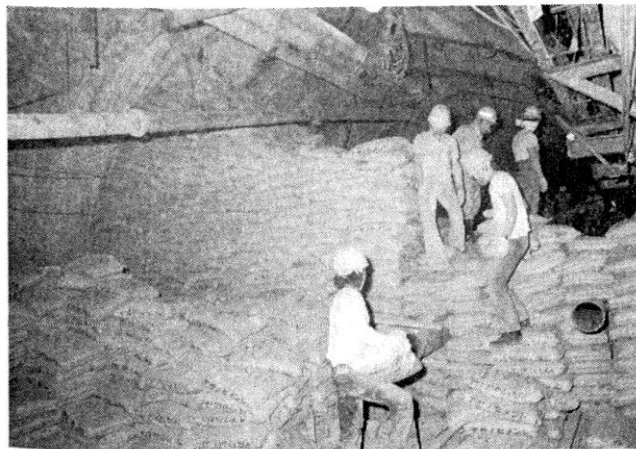


写真5 青函トンネル作業坑におけるバルクヘッド構築状況

※「(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

- ・高圧突発湧水が落ち着いたところで、トンネル湧水をポンプで排水を行いつつ、先進坑から別の迂回坑を掘削して周辺の水圧を下げ、また、先進坑や迂回坑の切羽周辺から追加のボーリングを行うほか、薬液注入等を行いトンネル湧水を低減することで先進坑の早期貫通を目指します。

⑤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、県境付近の断層帯を避ける位置に設置する横坑の貯水プール（釜場）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、県境付近の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21）

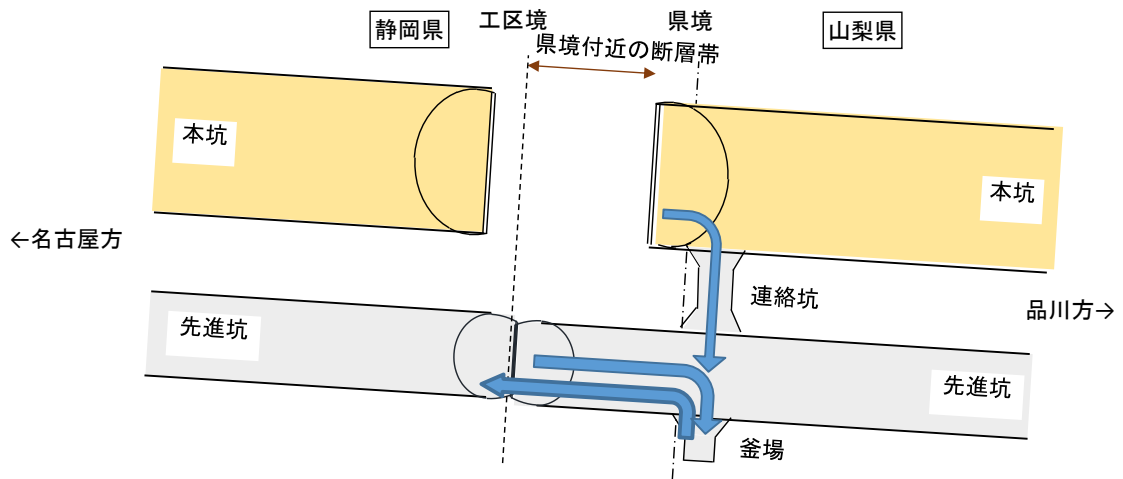


図21 先進坑貫通後のトンネル湧水ポンプアップ

※「(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、一部修正

(3) 工事期間中のトンネル湧水を静岡県側に戻す等の対策の検討

- ・(2)でお示した通り、県境付近の断層帯の掘削においては、山梨県側へ流出するトンネル湧水を極力低減しながら掘削しますが、加えて、流出する湧水を静岡県側へ戻す等の対策を検討しました。

- ・具体的には、

- 1) 山梨県側に流出した湧水の県境の稜線を越えた配管による静岡県側への送水
- 2) 山梨県境付近への導水路トンネルの取付け
- 3) 静岡県側からの長尺ボーリングとケーシングパイプによる揚水
- 4) 山梨県境稜線部からの深井戸による揚水の検討

について、検討しました。

1) 山梨県側に流出した湧水の県境の稜線を越えた配管による静岡県側への送水

- ・山梨県側の非常口（広河原非常口）から静岡県内に向けて地表部に配管を設置し、山梨県側へ流出した湧水を、県境を越えて静岡県側へ戻す方法を検討しました。
- ・具体的な検討にあたっては、配管は山梨県から静岡県にかけて整備されている登山道を活用する計画とし、国土地理院の地形図や過去に現地踏査した際の写真等を用いて地表の勾配や状況を考慮し、詳細に検討しました(図22、図23)。
- ・山梨県の広河原非常口から車両でアプローチ可能な区間は、非常口から約1.8km（平均勾配は約12%）である東京電力の広河原発所までです。
- ・残りの約5.3kmの区間は、人力で資機材を運搬し登山道に配管を設置することになります。
- ・本計画では、幅員が狭く急峻な登山道（平均勾配23%、最急勾配58%とほぼ直壁のような箇所もある）において、約5.3kmの区間を人力で資機材を運搬し、配管を敷設することは容易ではなく、施工上技術的な課題があります。
- ・また、配管の途中には、ポンプアップのための揚程設備を設置する必要があるため、新たな自然改変が伴うことになります。

広河原～伝付峠～大井川配管経路図



図 2 2 計画平面図

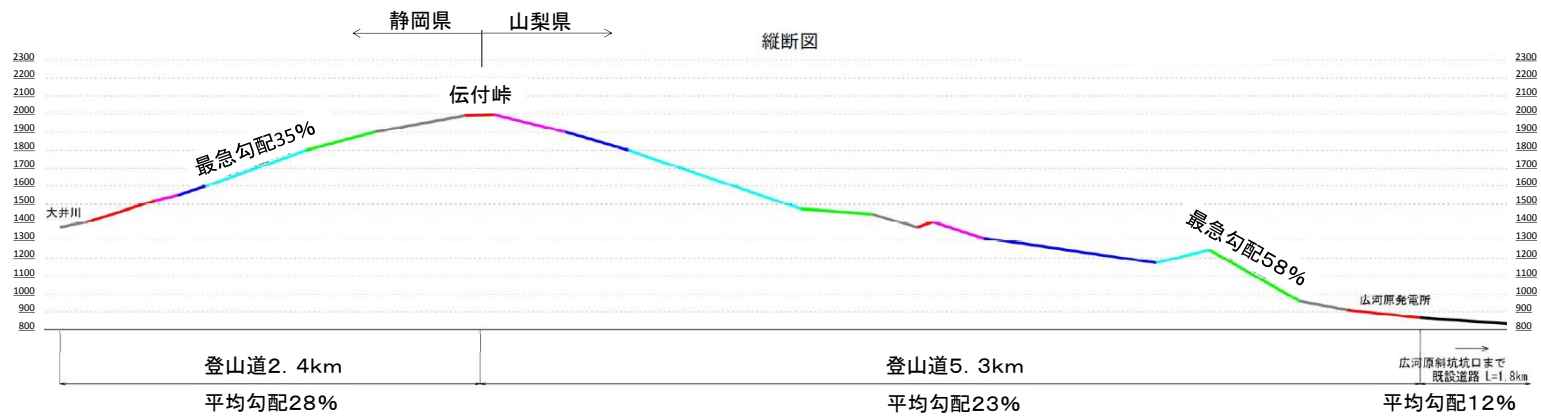


図 2 3 計画縦断面図

2) 山梨県境付近への導水路トンネルの取付け

- ・現計画では静岡県内に設置する導水路トンネルの取り付け位置を、山梨県境付近へ取り付けることとし、導水路トンネルを用いて静岡県側へ戻す案を検討しました。

① 県境付近の断層帯に沿って導水路トンネルを建設する案

- ・山梨県境付近に導水路トンネルを取り付ける場合、図24に示すような計画が考えられます。

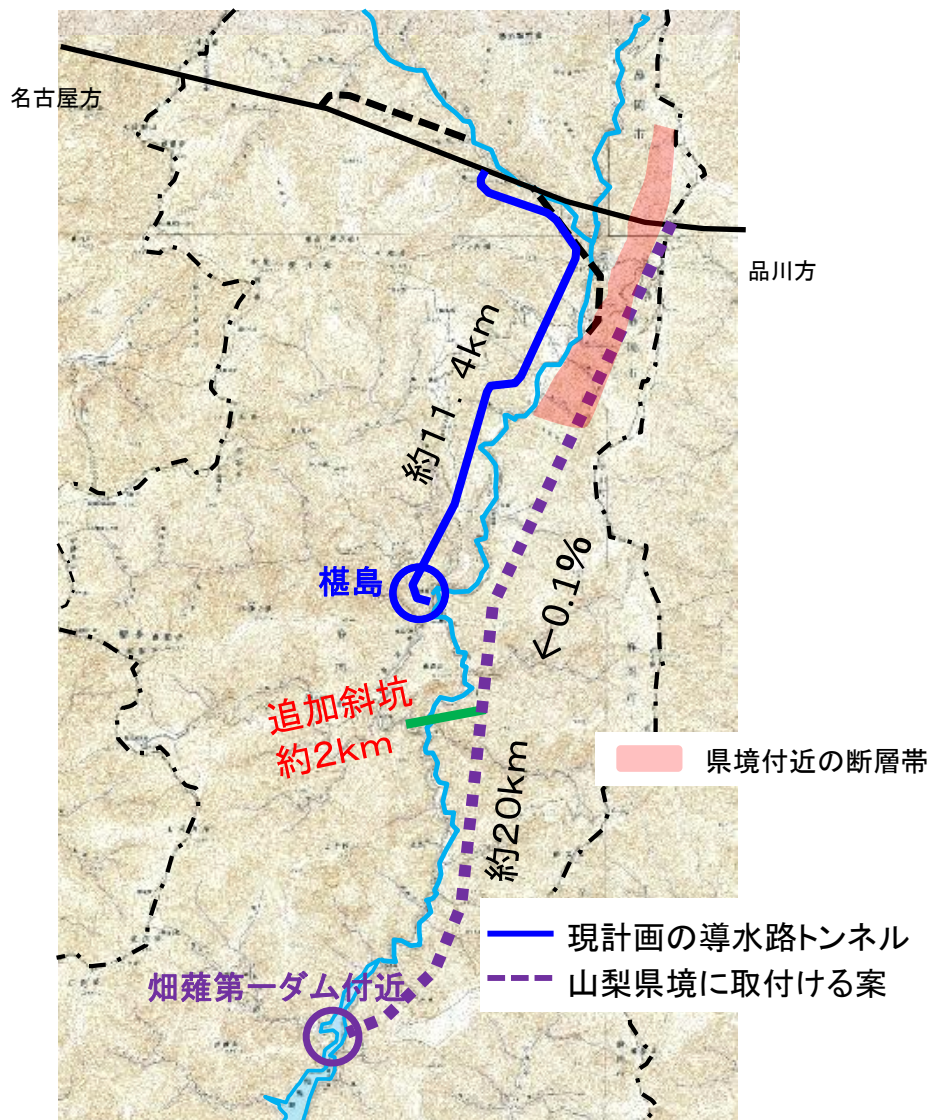


図24 山梨県境付近へ導水路トンネルを取付ける計画

※「(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

- 本計画では、過去の地質調査の結果、県境付近の断層帯と考えられる部分に沿って、導水路トンネルを建設することになります。
- 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。
- 本計画の場合、トンネル全長約 20km のうち、北側半分の約 10km の区間においては土被り約 500m～1,100m の箇所を、県境付近の断層帯に沿ってトンネルを掘削することになります。
- 本計画の条件下では、高圧突発湧水の発生や大きな土圧が作用する可能性が高いため、トンネル掘削自体に技術的な課題があります。
- 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ります。

② 県境付近の断層帯を避けて導水路トンネルを建設する案

- ・県境付近の断層帯を避けて計画する場合、山梨県境の直下に導水路トンネルを建設する計画が考えられます（図25）。

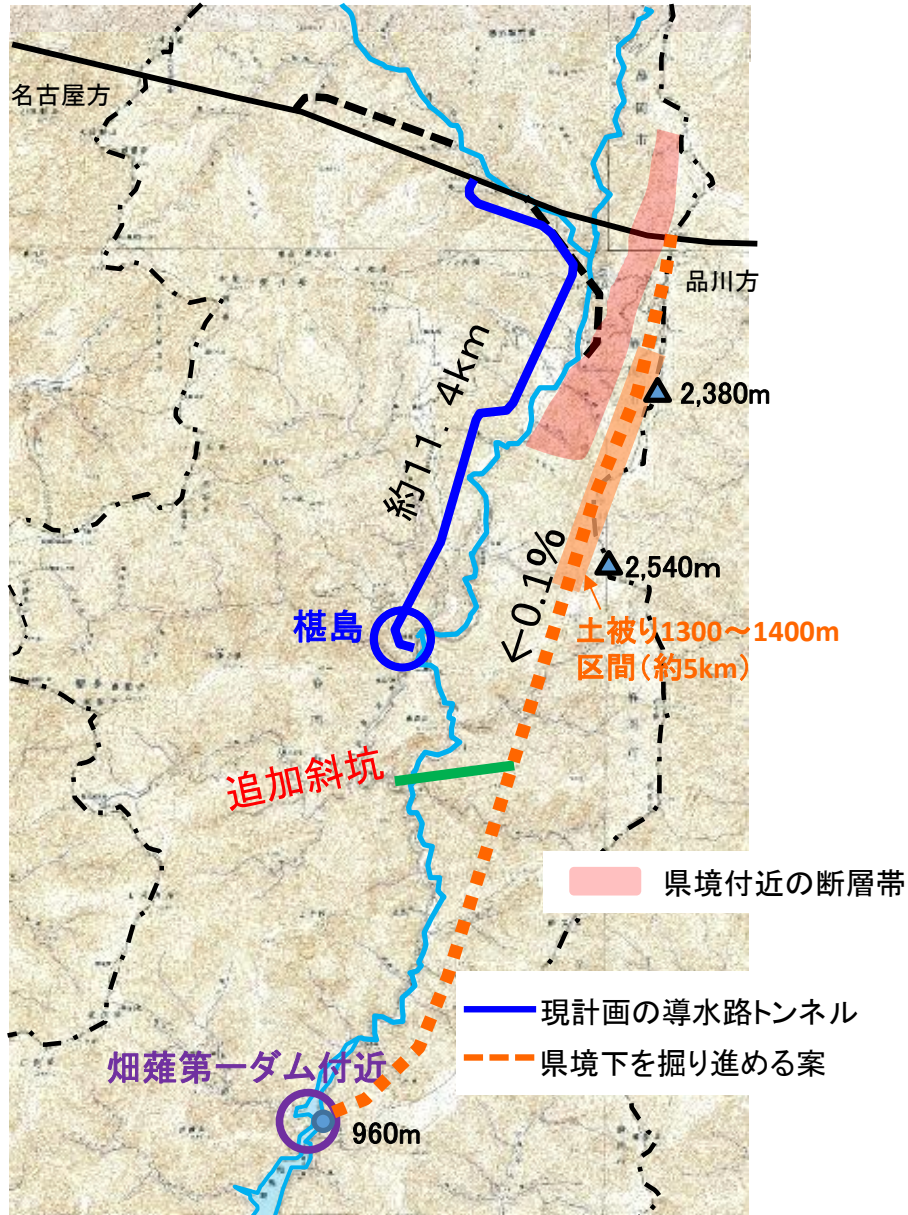


図25 山梨県境下を掘り進め導水路トンネルを取付ける計画

※「(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

- ・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 5 km も連続します。
- ・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しております。
- ・本計画では、土被りが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、トンネル掘削自体に技術的な課題があります。また、この導水路トンネルは、県境付近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、全体の工期が大幅に伸びることになります。

3) 静岡県側からの長尺ボーリングとケーシングパイプによる揚水

- ・静岡県から掘削する先進坑から、山梨県側の先進坑へ貫通させる長尺ボーリングを複数本掘削し、掘削したボーリング孔とケーシングパイプを利用して、トンネル湧水を静岡県側へ戻すことを検討しました（図26）。
- ・工区境から県境までは距離にして約1,000mですが、県境付近には断層帯が存在しているため、脆い地質部を長距離（約800m以上）に亘り、ボーリングする必要があります。
- ・高速長尺先進ボーリングのボーリング径は、ボーリング開始時点では約250mmですが、1,000m掘削時には、ボーリング掘削径も口元部から徐々に細くなっており、120mm程度になっています。
- ・ボーリング孔1本を使って、トンネル湧水を理論上揚水できる湧水量は約0.84m³/分（約0.014m³/秒）であり、県境付近の断層帯から山梨県側へ流出すると想定される量約0.21m³/秒^{*10}を戻すためには、約15本のボーリングが必要です。
- ・静岡工区で採用する高速長尺先進ボーリングは、南アルプストンネルの掘削のために10年以上の年月をかけ、JR東海とメーカーで共同開発した最新の工法です。
- ・本工法は、約1,000m前方の水平掘削において、従来の工法では困難であったボーリング先端位置の把握や掘進方向のコントロールが可能であるなどの特徴があります（図27）。
- ・しかし、この最新のボーリング工法を用いたとしても、断層帯のように地質が脆い箇所において、これだけの数の長距離のボーリングを、静岡県側の先進坑から山梨県側の先進坑に向けて精度良く行うことは、技術的に課題があります。

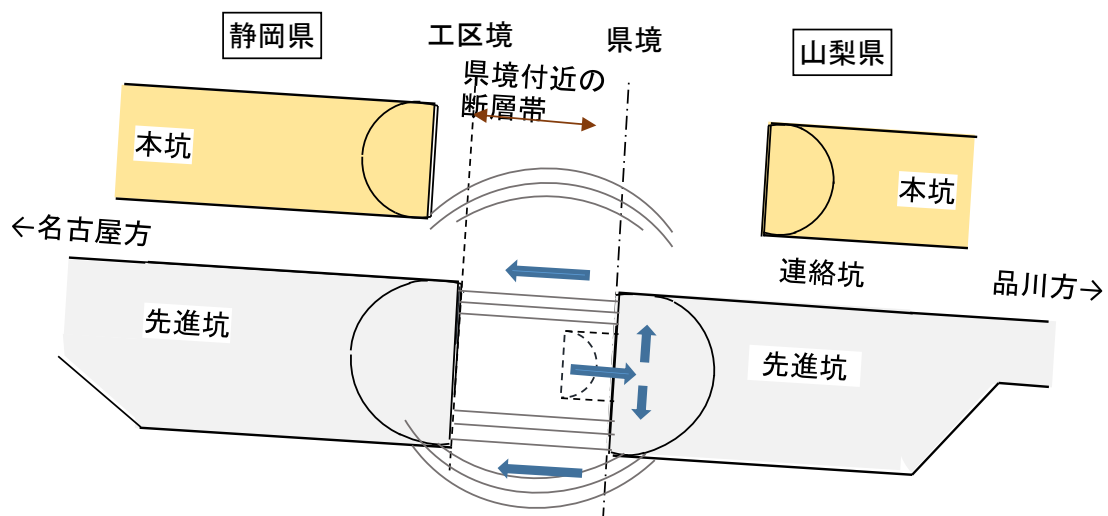
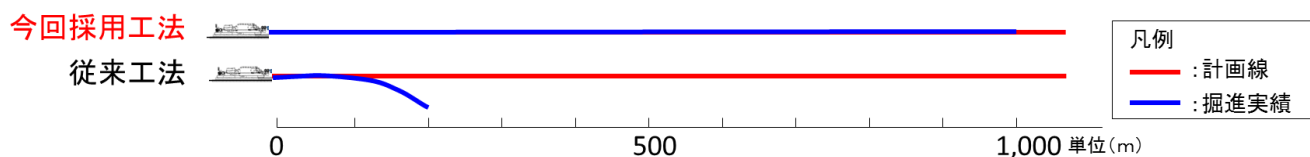


図26 長尺ボーリングからの揚水検討図

※静岡県中央新幹線環境保全連絡会議（地質構造・水資源専門部会）令和元年10月より抜粋



項目	今回採用工法		従来工法 (ワイライク工法等)	
水平掘削の 方向制御	約1,000m可	○	約100mまで	×
施工速度	約20m/日	○	約6m/日	×
不良地山への 適応範囲	比較的広い	△	比較的狭い	×
地質情報	掘削土等	△※	コア採取	○

※掘削土(スライム)や機械の削孔エネルギーなどから地質情報の把握が可能

図 2 7 先進ボーリングの特徴の比較 (今回採用と従来工法)

- ・なお、高速長尺先進ボーリングマシンである FSC-100 により、山梨県内の斜坑や先進坑の坑内から実施した調査ボーリングの実施例を表 7 に示します。
- ・それぞれの現場において、1,000m を超える延長をボーリングすることができ、その精度は概ねボーリング到達時に計画線に対し、上下左右ともに 10m 以内でコントロールすることができていますが、お示しした事例は、ボーリング時に大きな断層や地質のトラブルとなる要因が無い状況下での実績です。

表 7 長尺先進ボーリングの実施事例

調査箇所	施工日数 (日)	Bo延長 (m)	ボーリング掘削完了時精度(計画線に対し)	
			上下方向	左右方向
南アルプストーンネル(山梨工区) 広河原斜坑①	69	1170	上方5m	右側5m
南アルプストーンネル(山梨工区) 広河原斜坑②	85	1100	下方8m	右側3m
南アルプストーンネル(山梨工区) 早川先進坑	58	1071	下方3m	左側7m
第四南巨摩トンネル(西工区) 早川東斜坑	109	796	0m	左側10m

※10 : (4) にて詳述しますが、工事の一定期間、山梨県側へ流出するトンネル湧水量は、平均約 0.21m³/秒としています。

4) 山梨県境稜線部からの深井戸による揚水

- ・地表部から深井戸で地下水をくみ上げ、静岡県側へ戻すことを検討しました。
- ・山梨県側からの先進坑が県境付近に達するまでに、一定の間隔で深井戸^{※11}を多数設置し、深井戸から地下水を揚水して静岡県側へ戻すことで、本来、トンネル内に湧き出るはずの湧水を予め極めて少なくしておくという対策です(図28)。
- ・県境付近の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る必要があります。
- ・まず、このような土被りの箇所において、地質が脆い県境付近の断層帯に多数の深井戸を確実に掘ってポンプを設置することは技術的に課題があります。

※11：地下水をくみ上げる方法としてはディープウェルがあり、ディープウェルとは、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ポンプによりくみ上げる方法です。

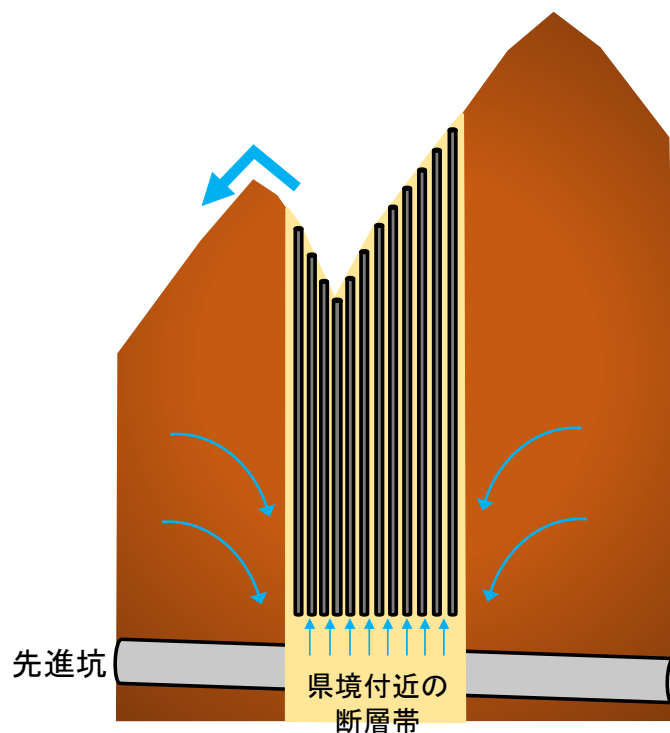


図28 深井戸のイメージ

※「(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、一部修正

- ・また、設置するポンプについて、現地状況を踏まえ現実的に設置可能な温泉用深井戸水中ポンプ(図29)にて、約800mの地下深くから地下水を揚水することができるかどうかを検討しました。
- ・国内でも最高峰の揚程能力を有するポンプの規格は、口径65mm、最大揚程約

700m、最大吐出量 0.04m³/分 (0.0007m³/秒)、重量 241kg/基であり、これ以上の能力を有するポンプは現状ありません。

- ・図 2 9 に示す通り、ポンプの規格を考慮すると、ピークパワーで揚水しても約 800m の地下深くから地表面まで揚水することは不可能です。
- ・なお、山梨県側へ流出すると想定されるトンネル湧水量平均約 0.21m³/秒^{*10} とすると、この湧水量を揚程するためには、深井戸径約 150mm を約 315 本設置する必要があり、延べボーリング延長は 220,000m 以上と膨大な延長になります。

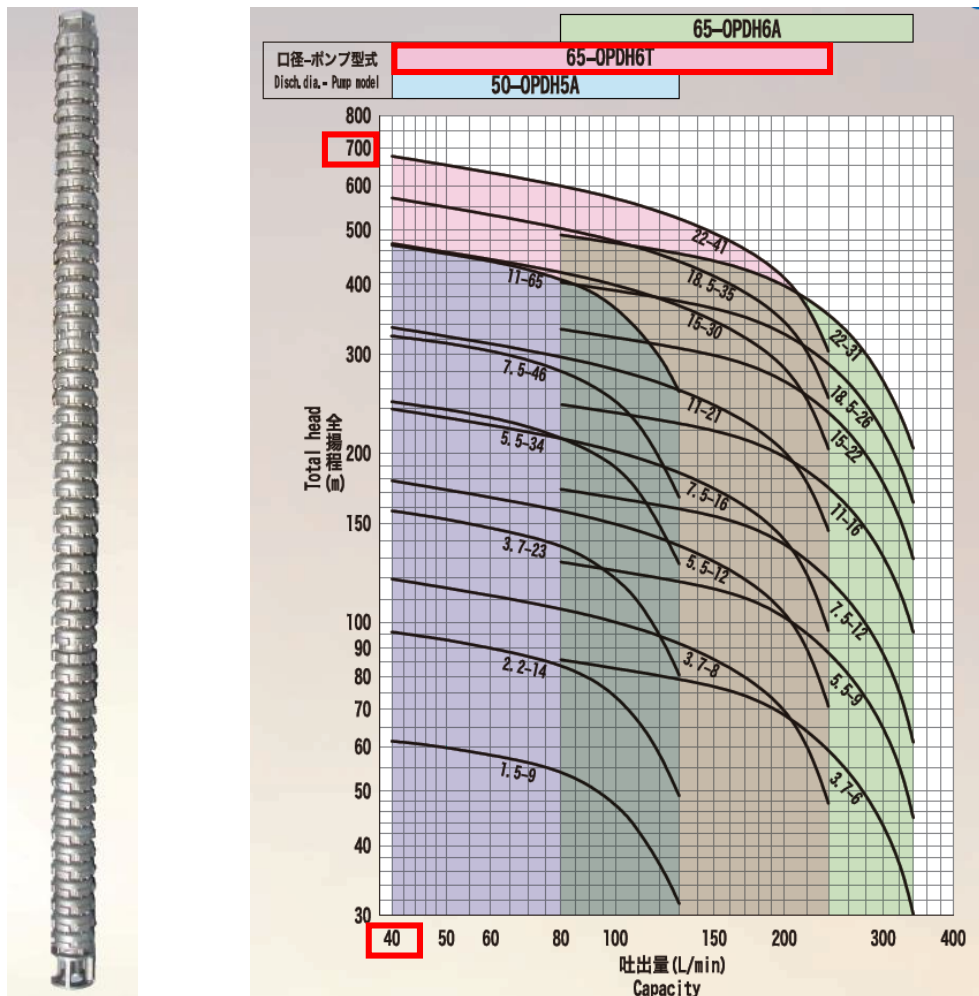


図 2 9 温泉用深井戸水中ポンプと処理能力図

※おかもとポンプ株式会社 製品カタログ (総合版) 機種名: OPDH6T より抜粋

- ・更に、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 3 0)
- ・県境稜線部では、平坦地が少ないため大型機械を設置し移動させる場所がなく、また樹木伐採や造成工事により、新たな自然改変を伴います。

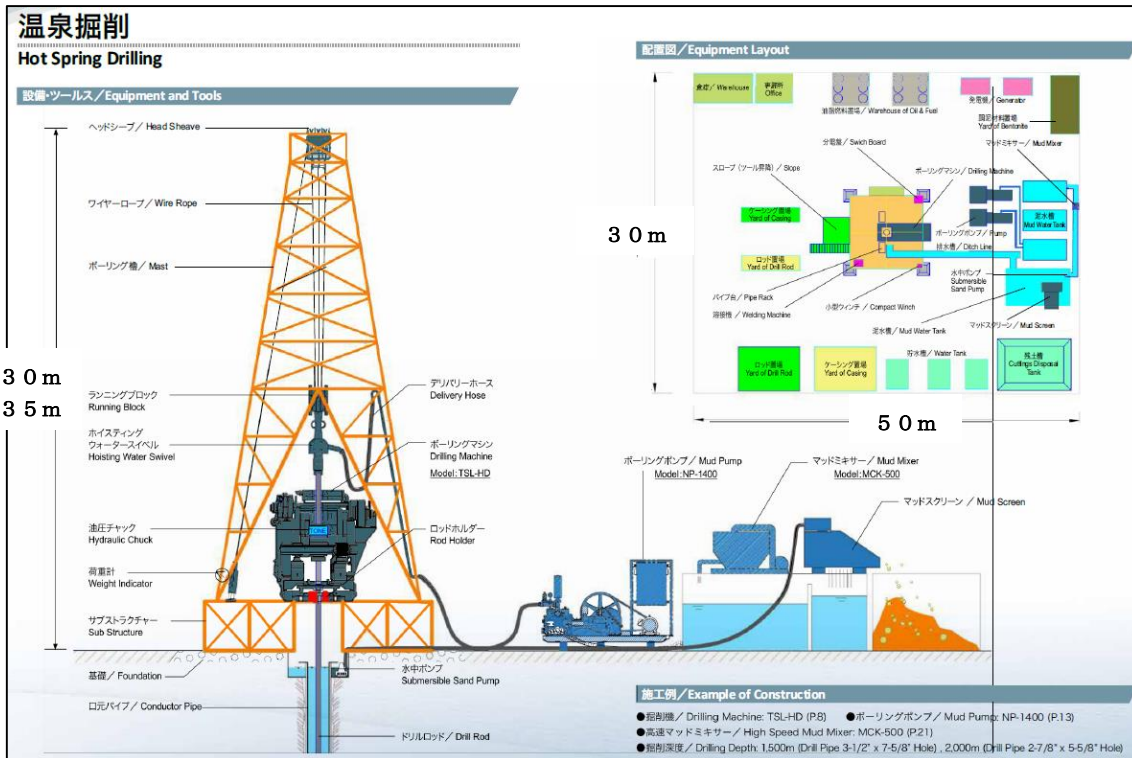


図 30 深井戸掘削設備のイメージ

※株式会社東亜利根ボーリング製品総合カタログより抜粋、一部加筆

- ・以上の通り、県境付近の断層帯に多数の深井戸を確実に掘削することが技術的に困難であること、現地に設置可能で地下 800m から揚水することが可能なポンプが存在しないこと、新たな自然改変が生じることから、本検討案は現実的ではないと考えています。

(4) 千石斜坑等の掘削方法と県境付近の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。

さらに、千石斜坑の到達箇所から先進坑や本坑を山梨側へ下向きに掘削をすすめるうえで、大井川（東俣）と交差します。

- 一方で、県境付近の断層帯は安全上、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) 先進坑の県境付近断層帯、5) 本坑と大井川（東俣）交差部のそれぞれの区間について、トンネル土被りや地質調査（実施位置は図3-1のとおり）から得られた情報を比較表（表8）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（調査A）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（探査a、探査b）の結果は、P波速度が4.5km/秒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

- 大井川（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（調査B）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（調査C）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1,200L/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) 先進坑の県境付近断層帯

- ・大井川（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（調査D）の結果、県境付近の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2,000L/分程度（ボーリング掘削径約120mm）に達しています。
- ・先進坑の県境付近断層帯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。
- ・先進坑の県境付近断層帯と西俣斜坑沿いを比較すると、前者の方が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、大規模な高圧突発湧水が生じるリスクが大きいと考えられます。
- ・先進坑の県境付近断層帯と本坑と大井川（東俣）交差部を比較すると、前者は破碎質な地質が800mにわたり繰り返し出現し、またボーリング調査時の湧水量も2,000L/分と非常に大きな規模であることに対し、後者は断層として幅3m程度の小規模なもので、湧水量も100L/分程度であり、前者の方が大規模な高圧突発湧水が生じるリスクが大きいと考えられます。

5) 本坑と大井川（東俣）交差部

- ・大井川（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（調査B）において、口元から100m付近において、先進坑及び本坑が大井川（東俣）直下で交差すると想定される断層が出現しています。
- ・断層としては、幅3m程度の小規模なものであり、断層の前後に破碎部は伴っておらず、湧水量も僅少であり調査時も問題なくボーリング掘削ができ

ています。

- ボーリング結果から、本坑と大井川（東俣）交差部における大量湧水の可能性は小さいと考えておりますが、地質が急激に変化する可能性がありますので、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、湧水に伴うリスクを極力小さくしながら慎重に掘削します。

以上の比較より、県境付近の断層帯は、山梨県側から上向きに掘削することが現実的であると考えています。

表8 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	⑤本坑
		①大井川交差部	②西俣川付近	③斜坑沿い	県境付近断層帯	大井川交差部
トンネル土被り		約 80m	約 500m	約 1000m	約 800m	約 400m
ボーリング調査概要	調査位置	調査A	調査B	調査C	調査D	調査B
	削孔長	140m	900m	700m	1200m	900m
	削孔方向	鉛直	斜め下向き	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	コア
	調査時の概況	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・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1200L/分程度で推移 	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・100m付近で大井川（東俣）直下の断層と交差 ・約3m程度の破碎質区間あり。 ・断層部付近削孔中の口元湧水量は僅少程度
弾性波探査概要	探査位置	探査a、b、c	探査a	—	—	—
	測線長0内、該当箇所の測線位置	探査a全長3.27km(3.20km～3.27km付近) 探査b全長3.295km(0～0.2km付近) 探査c全長0.8km	探査a全長3.27km(2.0km～2.7km付近)	—	—	—
	探査結果	<ul style="list-style-type: none"> ・探査a及び探査b、大井川交差部P波4.4km/s～4.6km/s ・探査c、県境付近断層帯と考えられる低速度帯を線形回避 	<ul style="list-style-type: none"> ・探査a、P波約4.5km/s～5.0km/s 	—	—	—

RQD：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。

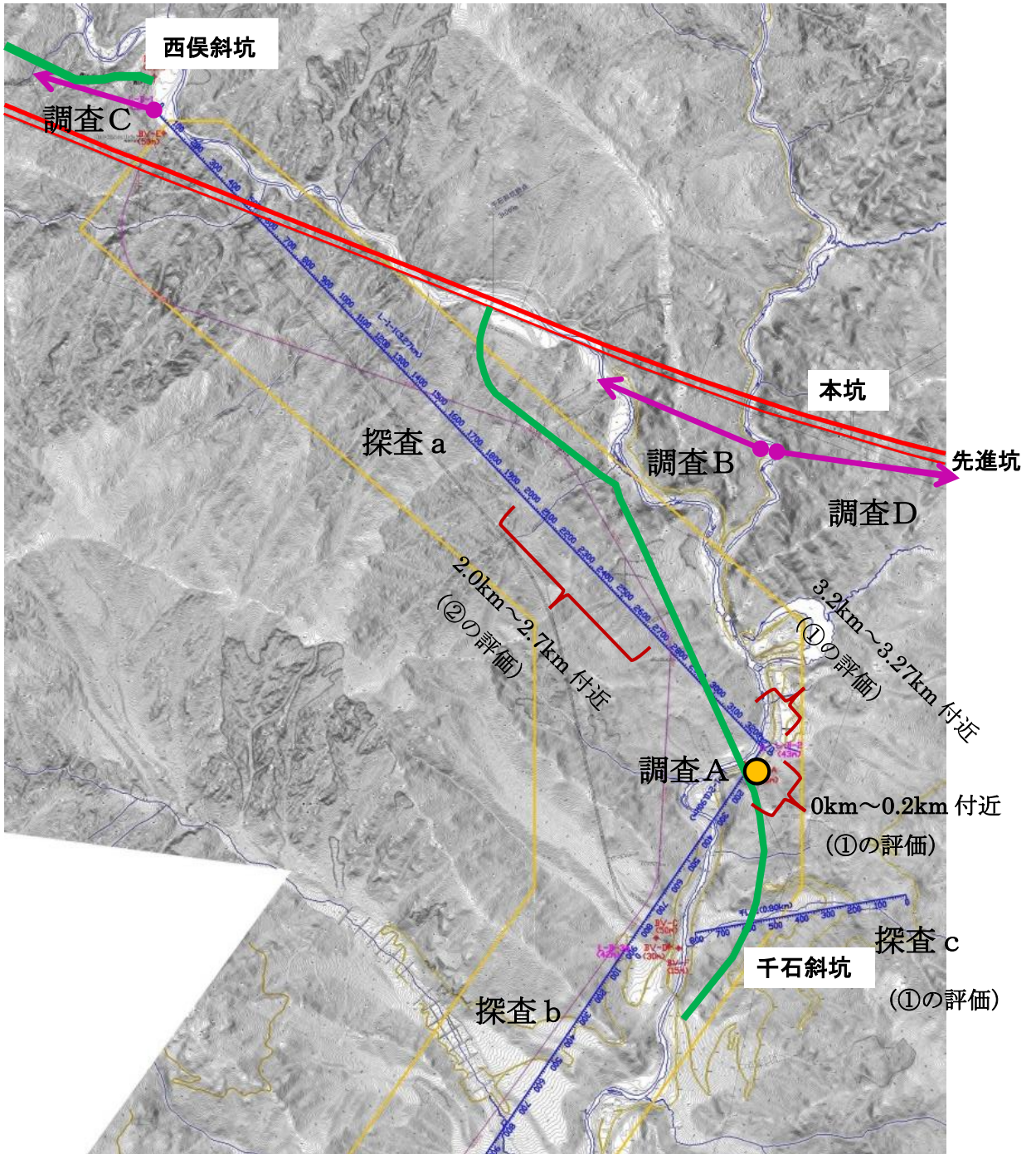


図 3 1 地質調査位置図

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

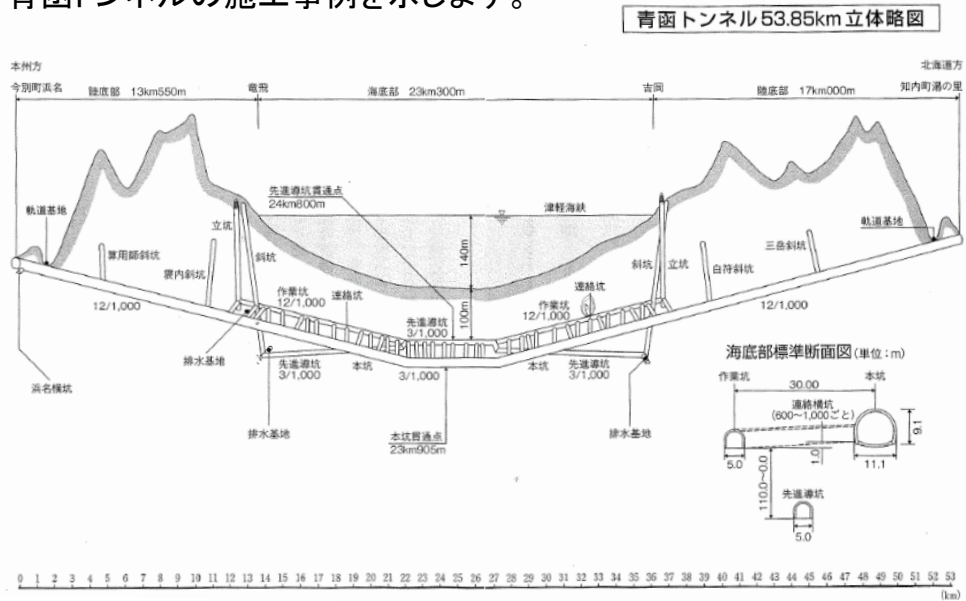
参考資料1 青函トンネル掘削時における突発湧水事例

※「(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。



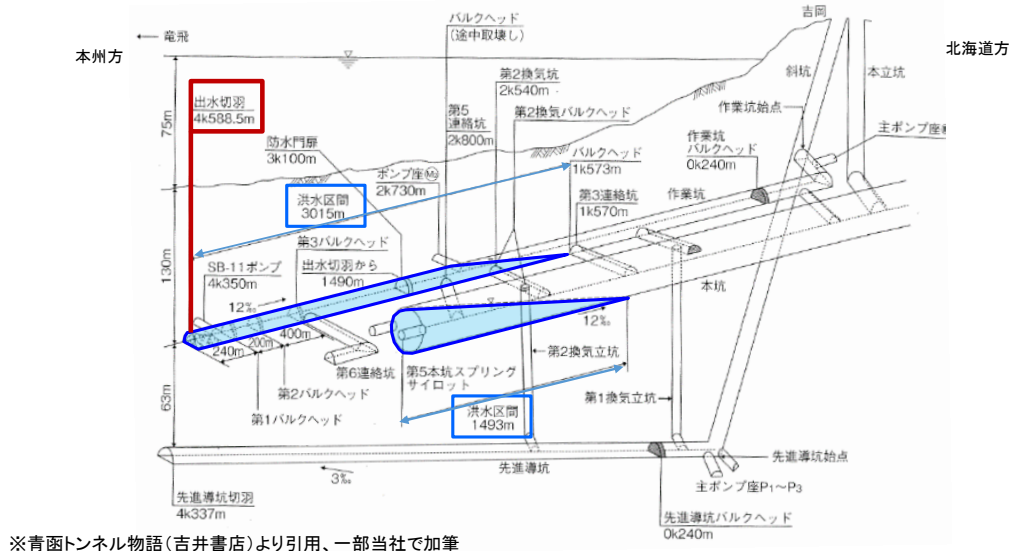
※青函トンネル物語(吉井書店)より引用、一部当社で加筆

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)

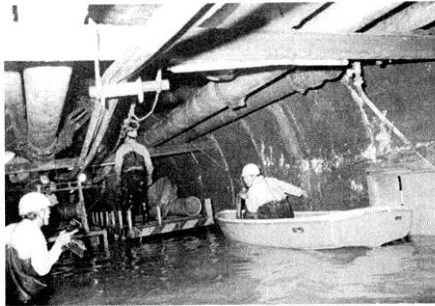
○青函トンネルにおける突発湧水(2)

- ・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せんが、詳細は不明です。

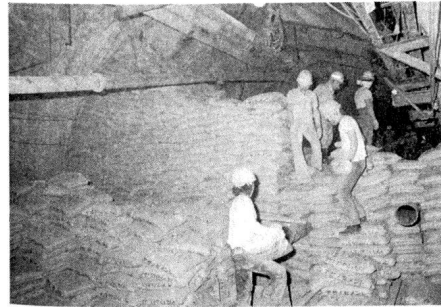
「3 全量の戻し方(1)」(見解)

○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 突発湧水発生時の検討

・突発湧水が先進坑を下向きに掘削している時に生じた場合、先進坑のトンネル断面で、計画縦断勾配である下向き 4%の勾配を踏まえ、トンネル後方に湛水する量を切羽からの距離ごとに算出しました。(図3 2、図3 3、表9)

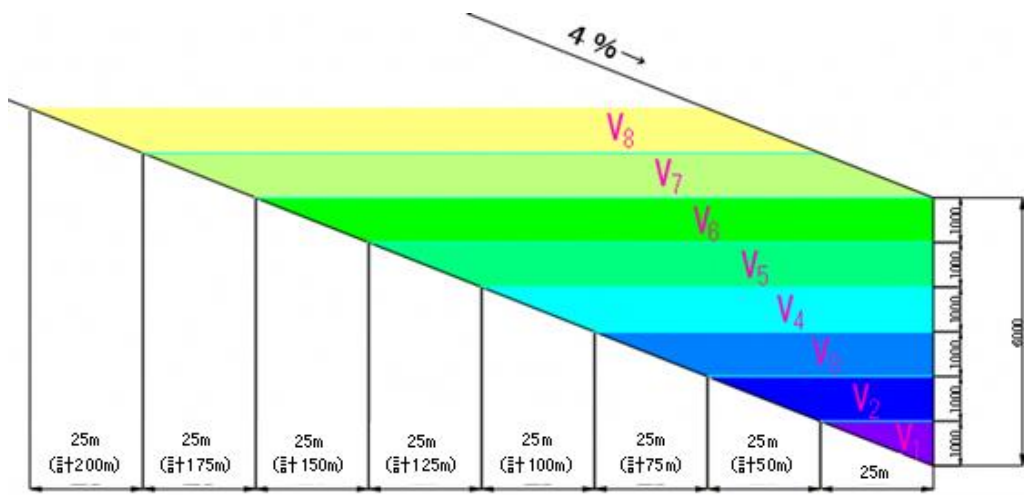


図3 2 先進坑切羽からの浸水分布図

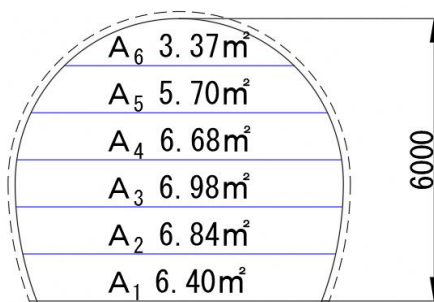


図3 3 先進坑高さ1m当りの求積図

表9 浸水分布における浸水体積と切羽からの浸水距離

体積 (m ³)	積算体積	浸水高さ	切羽からの距離 (m)
V ₁	80.0	80	25
V ₂	245.5	326	50
V ₃	418.3	744	75
V ₄	589.0	1,333	100
V ₅	743.8	2,077	125
V ₆	857.1	2,934	150
V ₇	899.3	3,833	175
V ₈	899.3	4,732	200
V ₉	899.3	5,631	225
V ₁₀	899.3	6,531	250
V ₁₁	899.3	7,430	275
V ₁₂	899.3	8,329	300

参考資料3 山梨県境付近への導水路トンネル取付けに関する追加検討資料

- ・導水路トンネルの計画について、産業技術総合研究所の地質図にトンネル計画を重ね合わせ、さらにトンネル縦断図を作成し、確認しました。
(図34、図35)

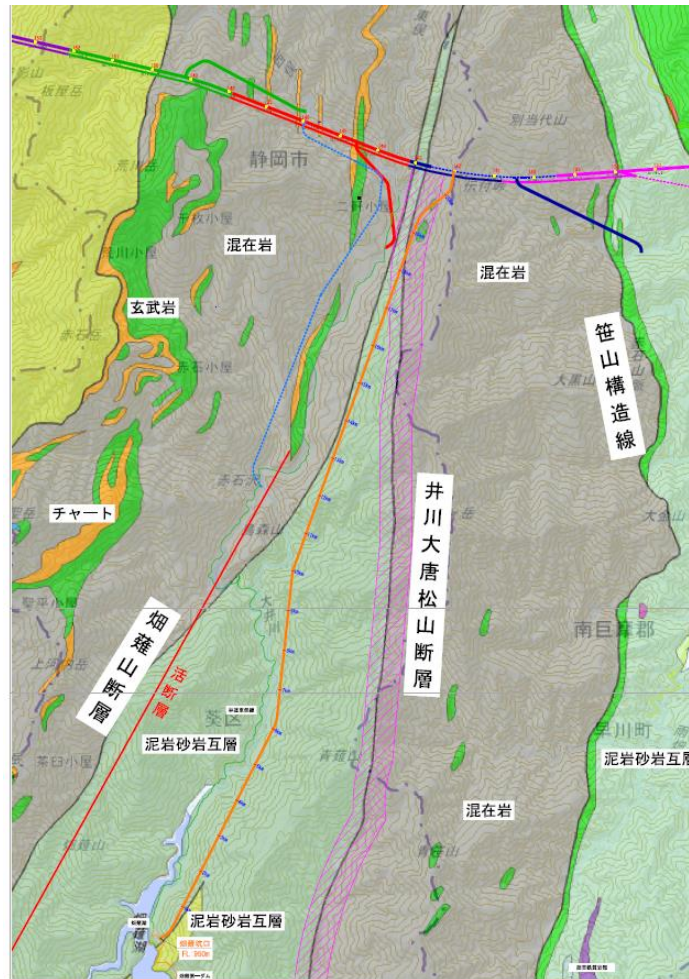


図34 県境付近へ導水路トンネルを取付ける計画（産総研地質平面図）

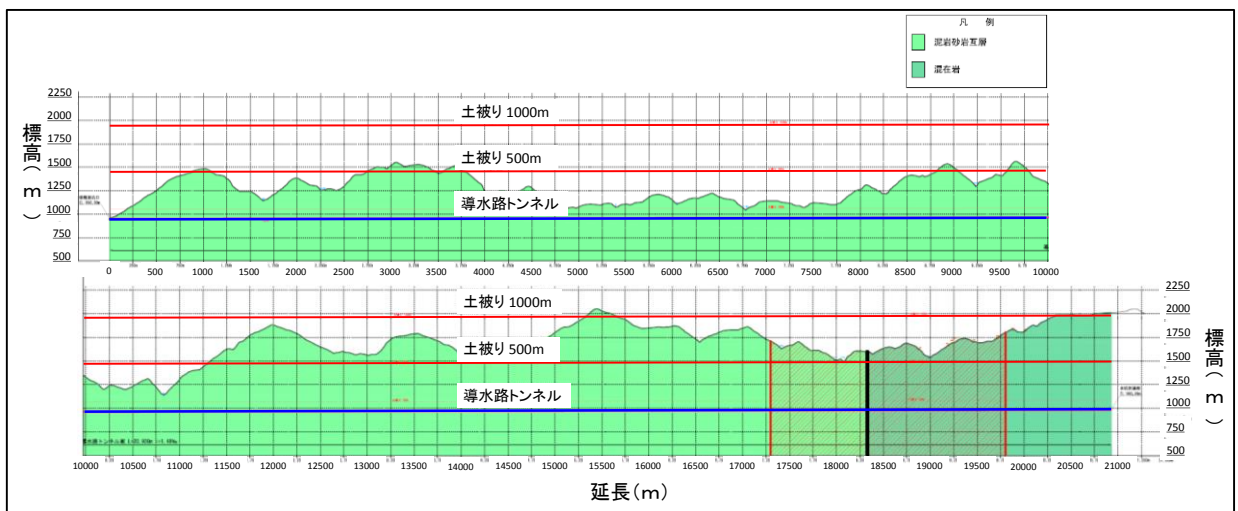


図35 地質縦断図

- ・産総研の地質平面図では、山梨県との県境付近には、井川－大唐松山断層が明記されています。
- ・井川－大唐松山断層に伴う脆い地質の範囲がどの程度東西方向に広がっているか詳細が分からないため、平面図では、断層を含み約 800m の幅で表現しております。
- ・産総研の地質平面図（図 3 4）では、県境付近へ導水路トンネルを取付けるためには、井川－大唐松山断層を南北方向に平行して掘削する必要があります。
- ・地質縦断図（図 3 5）で見て頂けると、坑口 0 km から 4 km 付近と 11 km 付近から到達部 20 km 付近までの区間約 13 km において、土被りが 500m 以上の大土被りとなり、長大なトンネルを掘削することは、技術的にも難しいと考えます。

参考資料4 地質調査結果

(1) 千石斜坑の大井川交差部

- ・調査A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6、図36、図37）で示します。

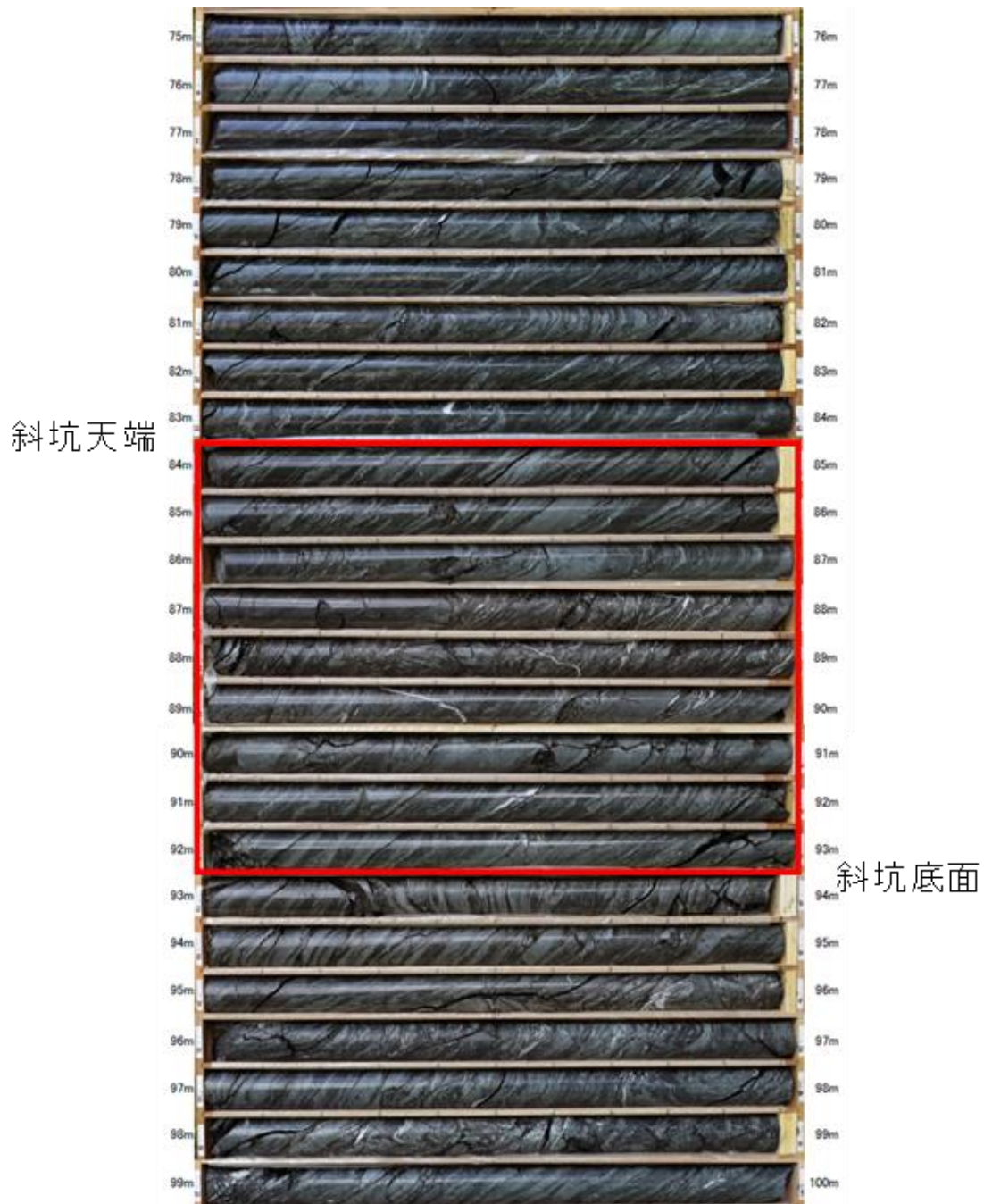
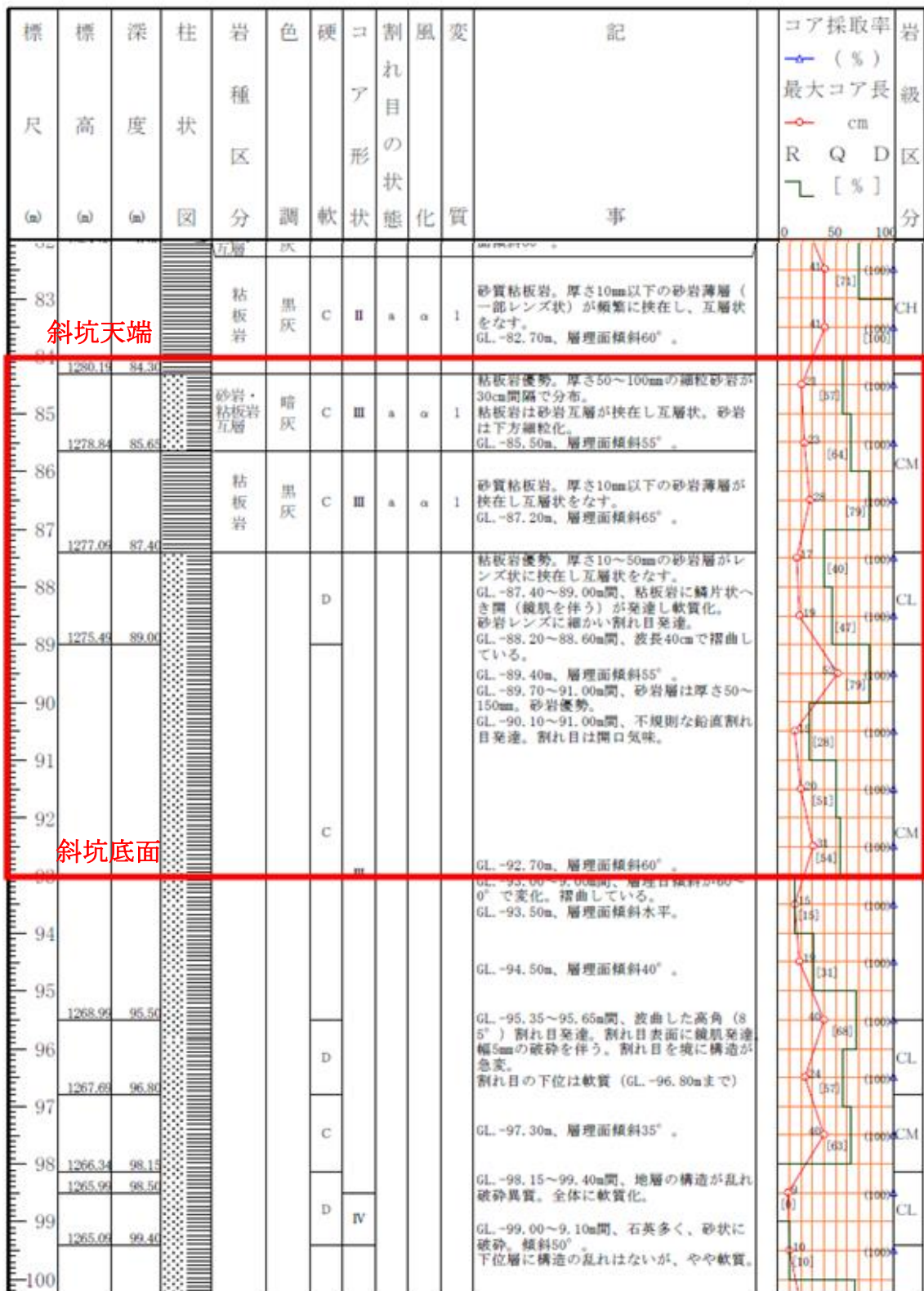


写真6 コアの状況（赤囲み部：深度84m～93m）



斜坑天端

斜坑底面

図36 柱状図（写真6コアの状況付近の抜粋）

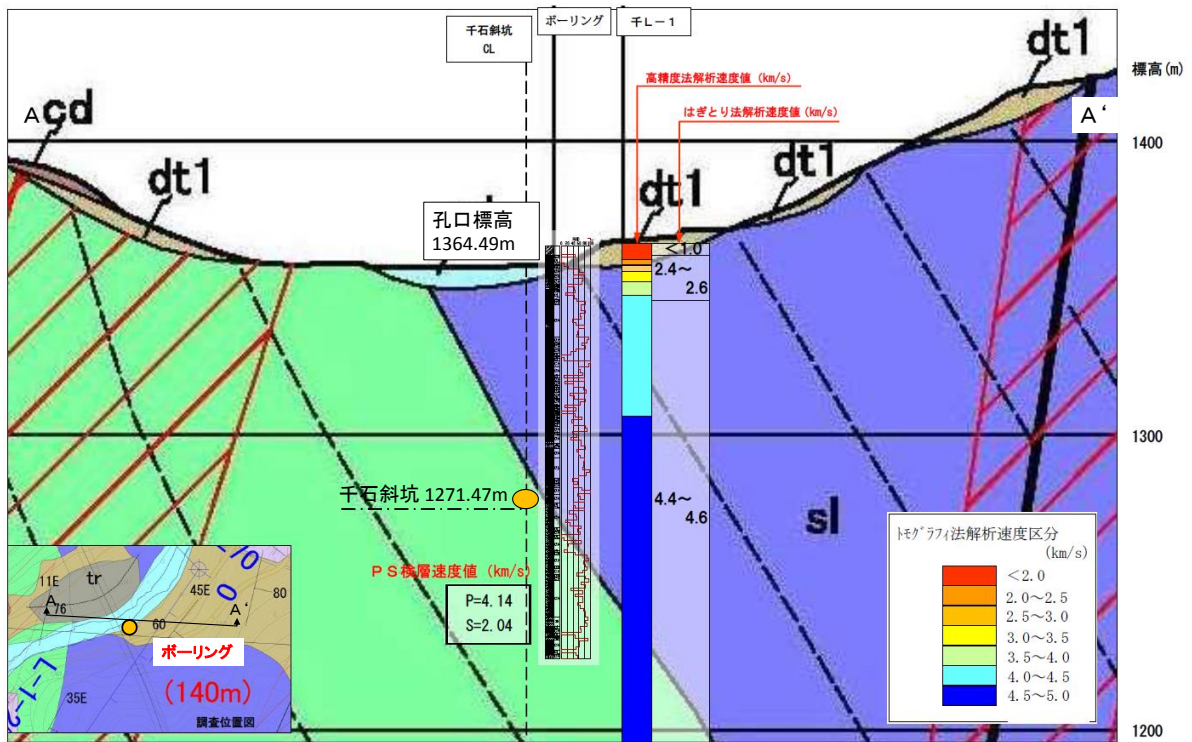


図37 千石斜坑と大井川交差点付近の調査詳細

- ・ 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4.14 km/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a及び探査bの弾性波探査の結果は（図38、図39）に示すとおり、該当箇所のパ波速度は4.5 km/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。

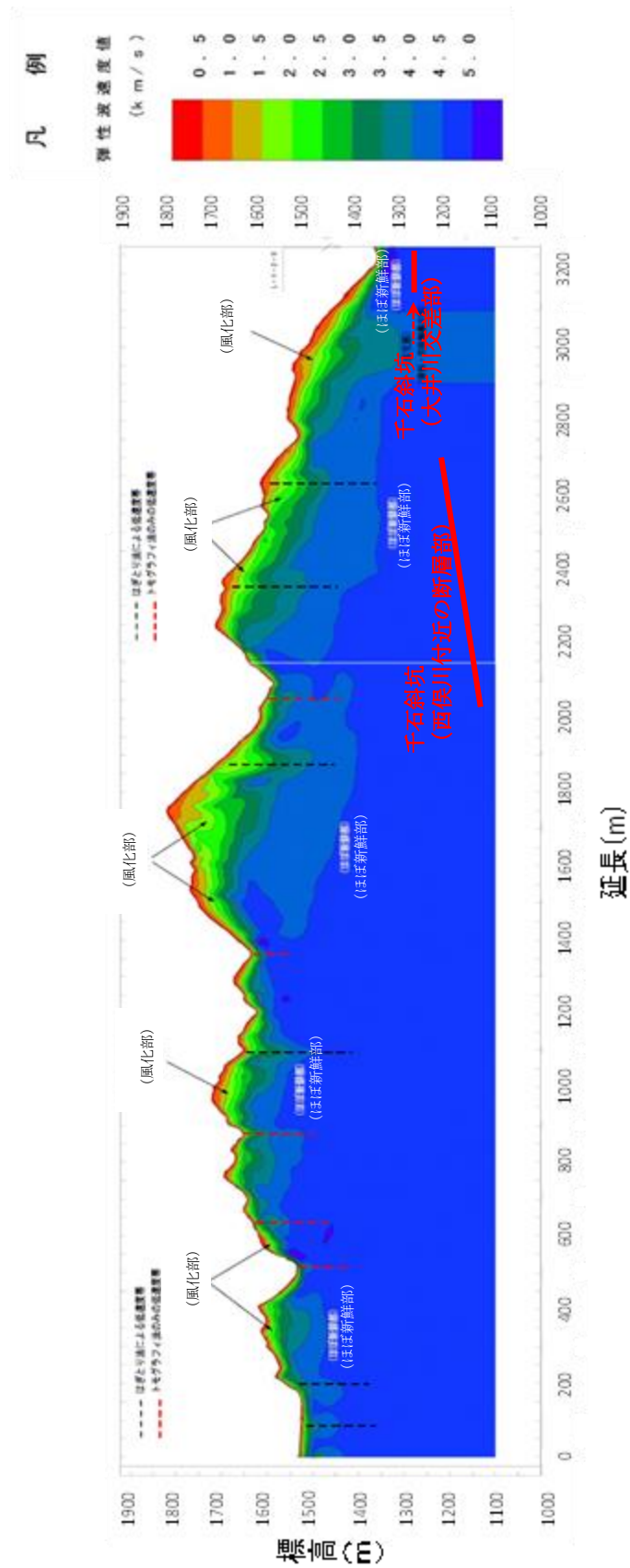


図 3 8 探査 a 弾性波探査の速度分布

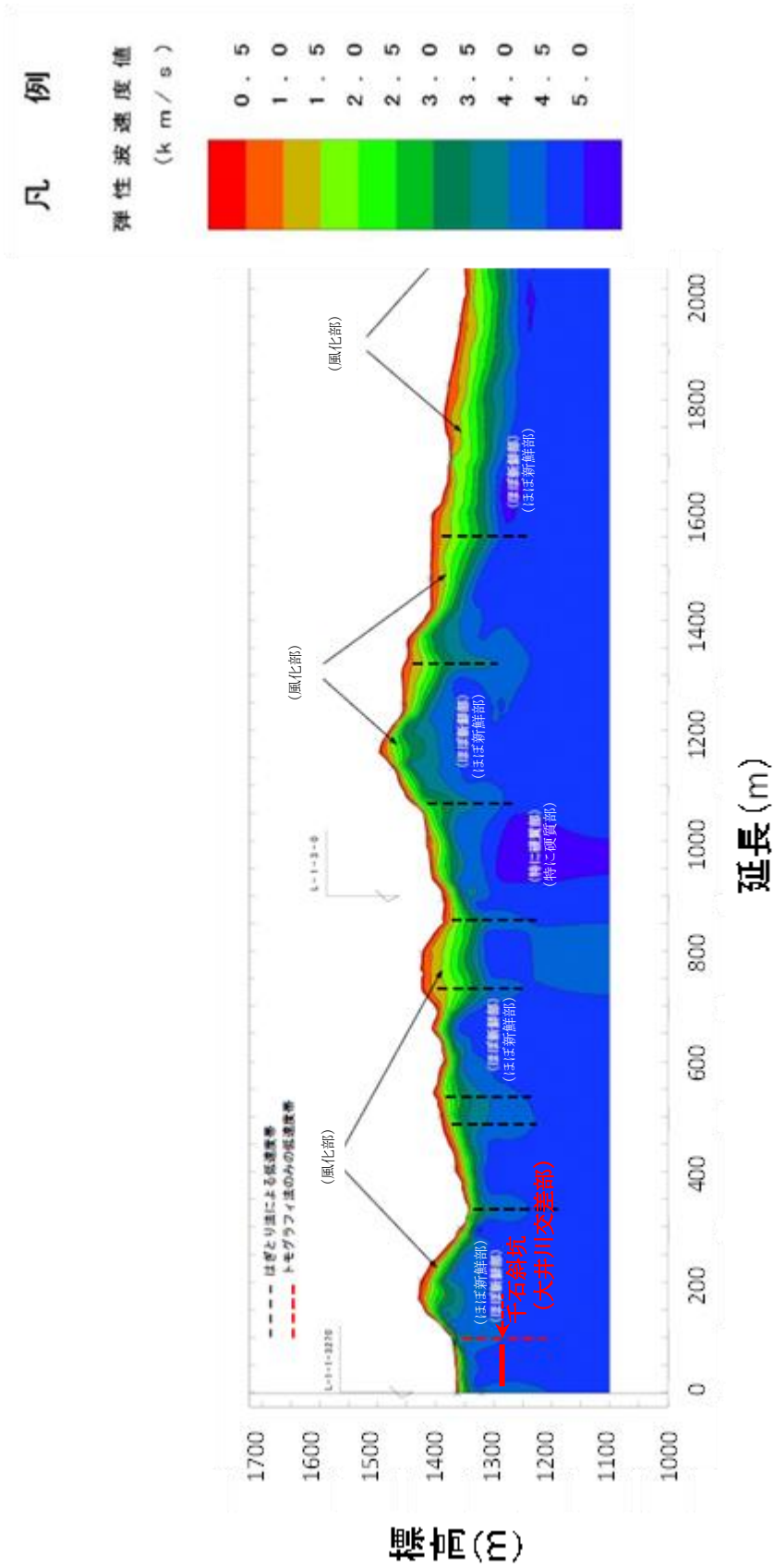


図 3 9 探査 b 弾性波探査の速度分布

(2) 千石斜坑の西俣川付近の断層部

- 調査Bのボーリング調査の結果(図4-1)、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7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。

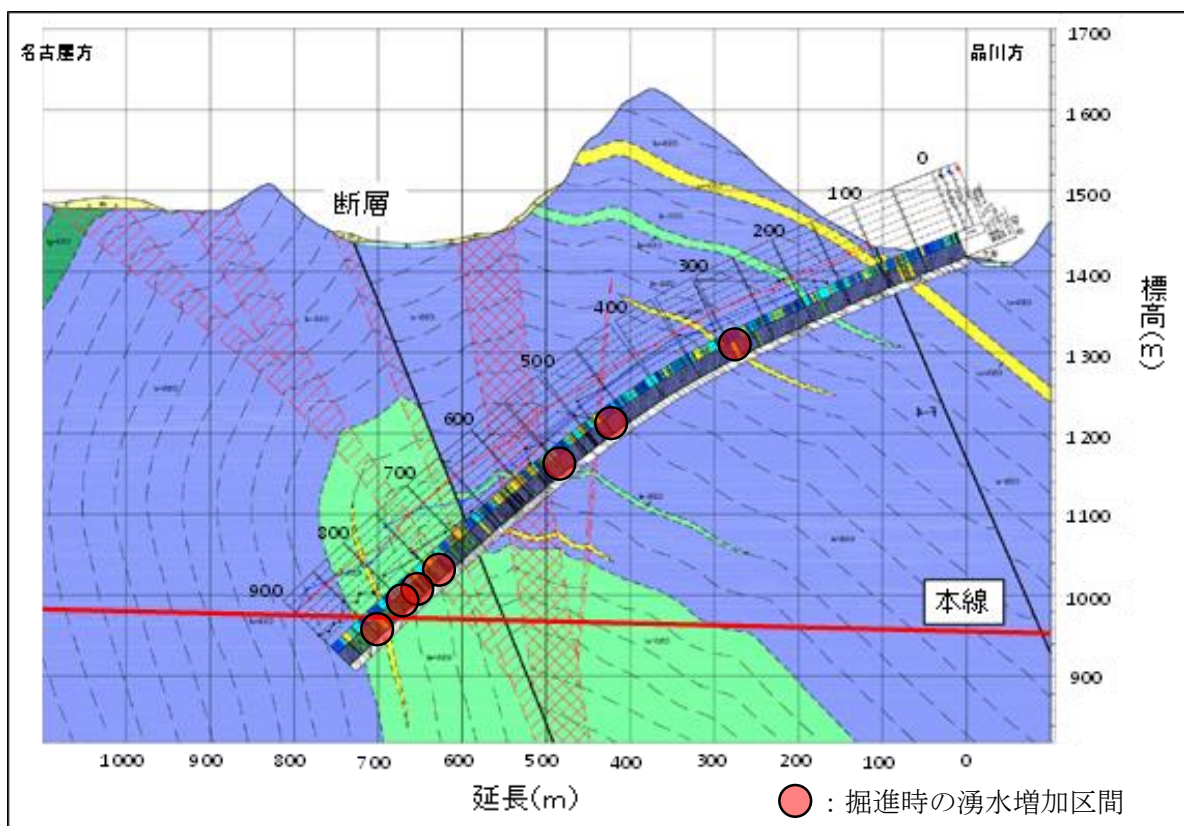


図4-1 ボーリング調査結果

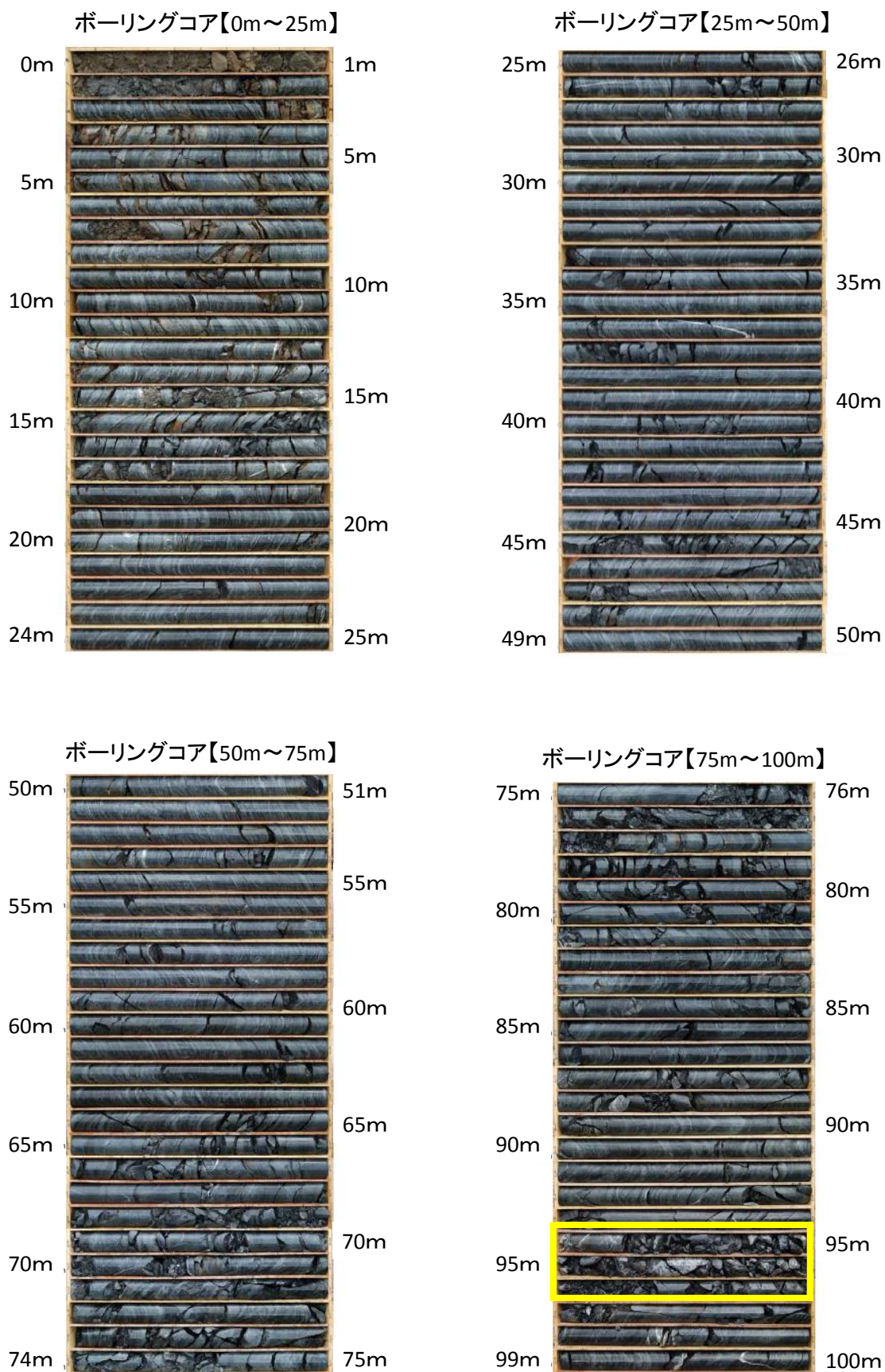


写真7 ボーリングコア写真

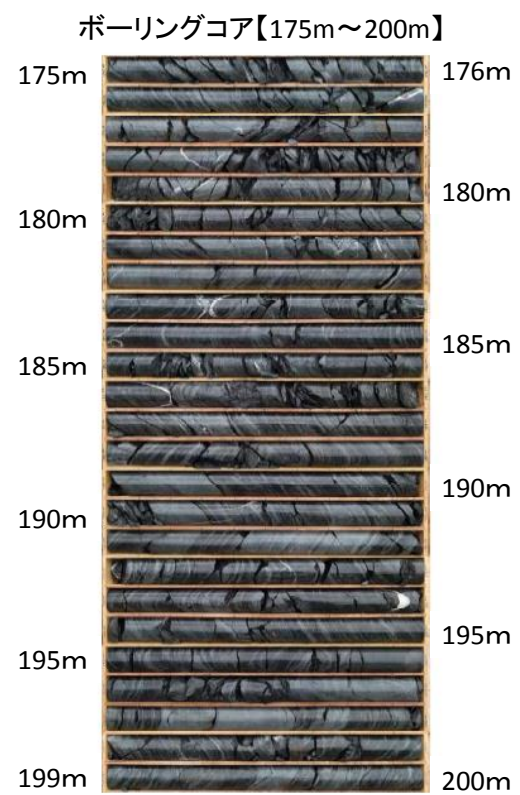
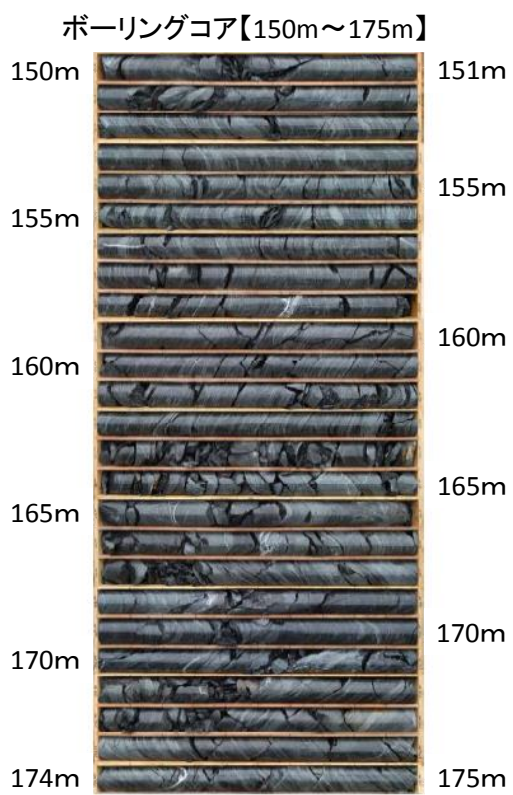
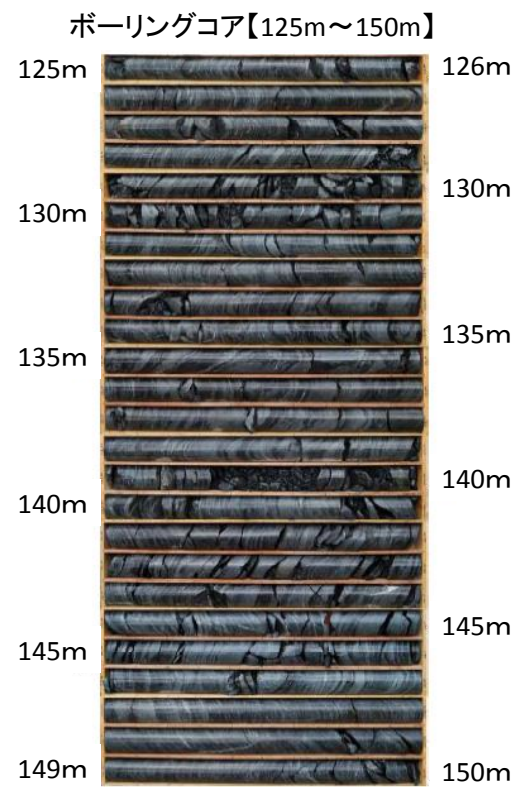
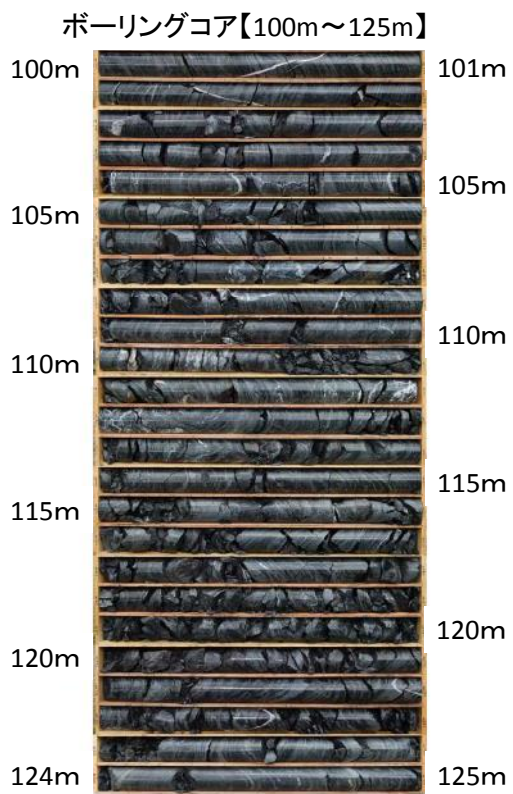


写真7 ボーリングコア写真

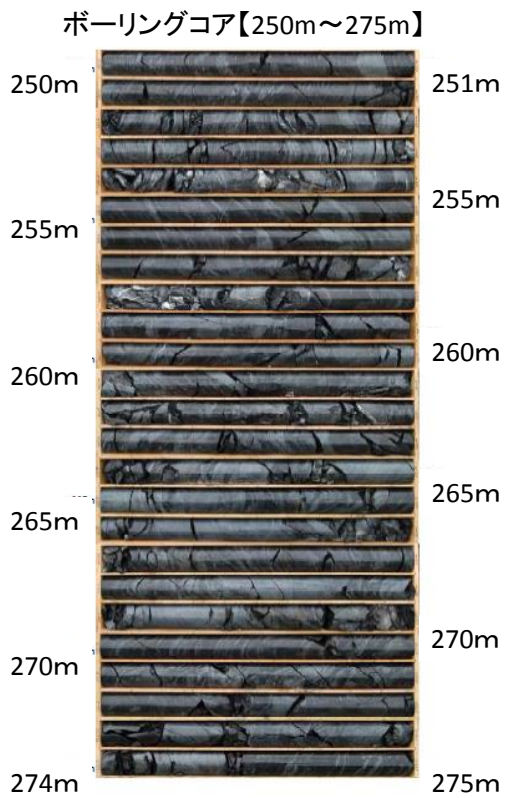
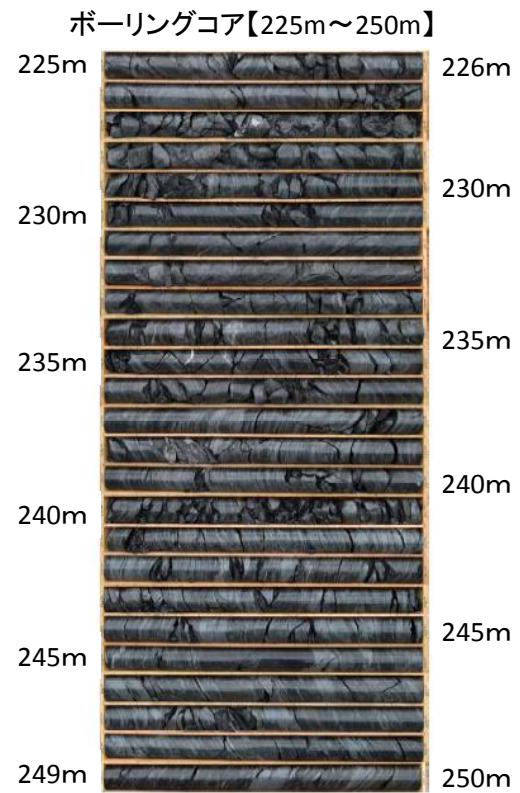
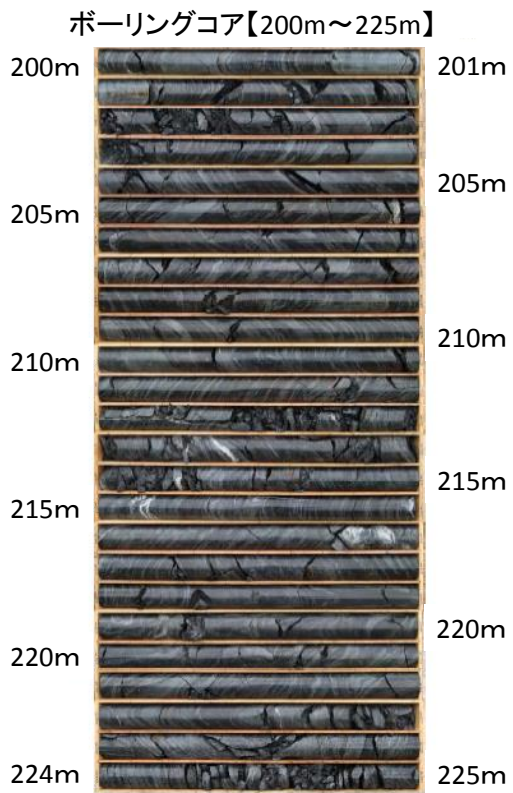


写真7 ボーリングコア写真

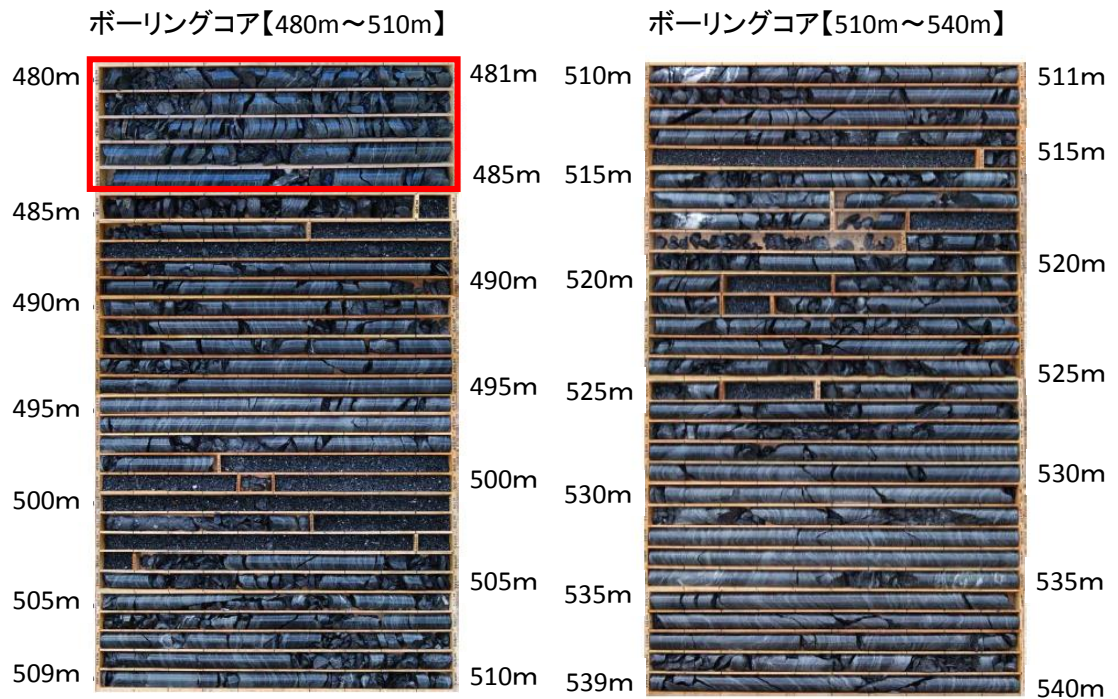
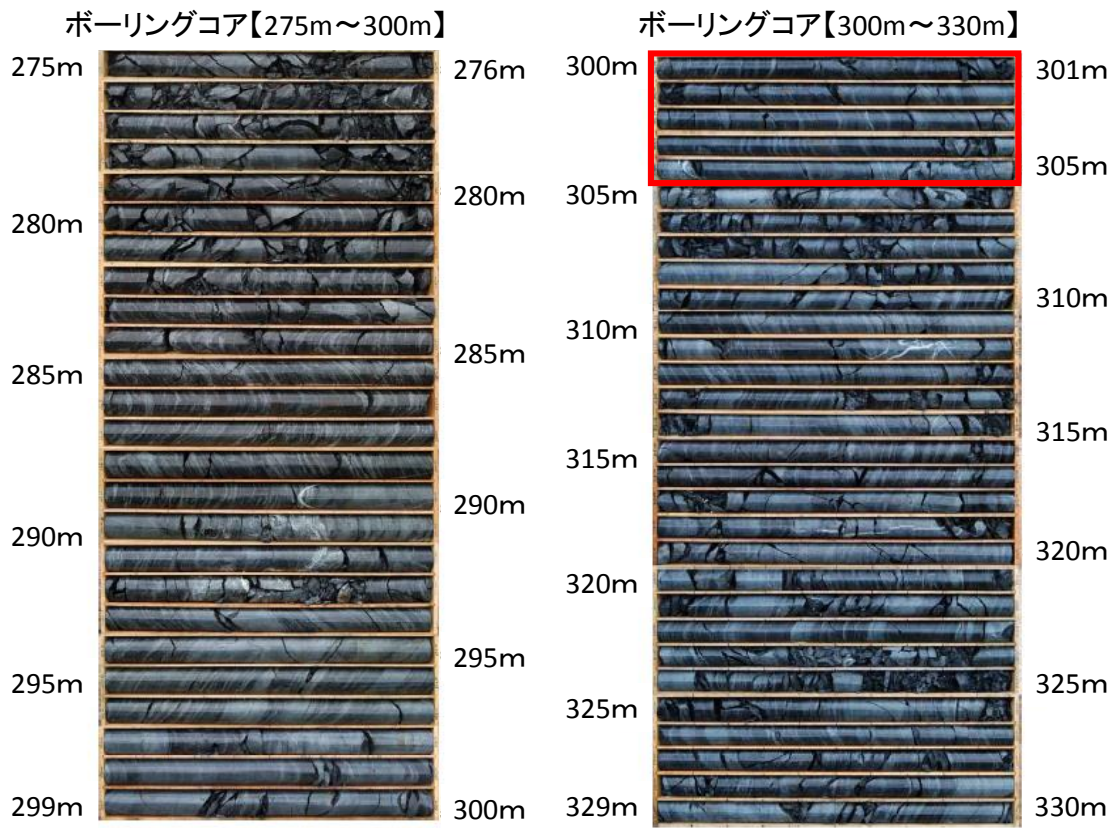
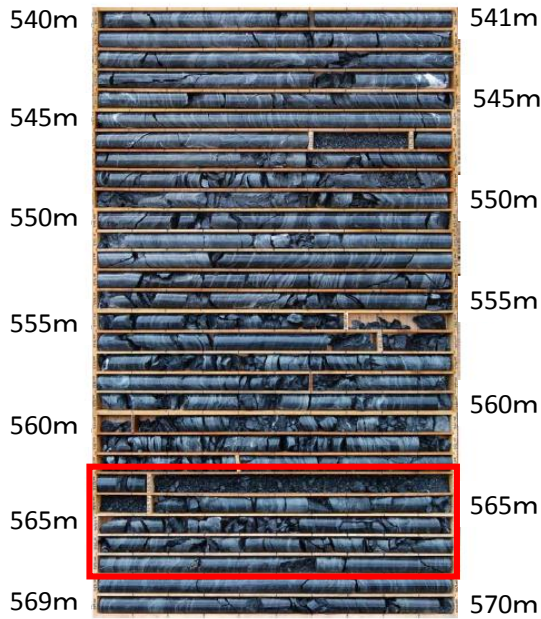


写真7 ボーリングコア写真

ボーリングコア【540m～570m】



ボーリングコア【570m～600m】



ボーリングコア【600m～630m】



ボーリングコア【630m～660m】



写真7 ボーリングコア写真

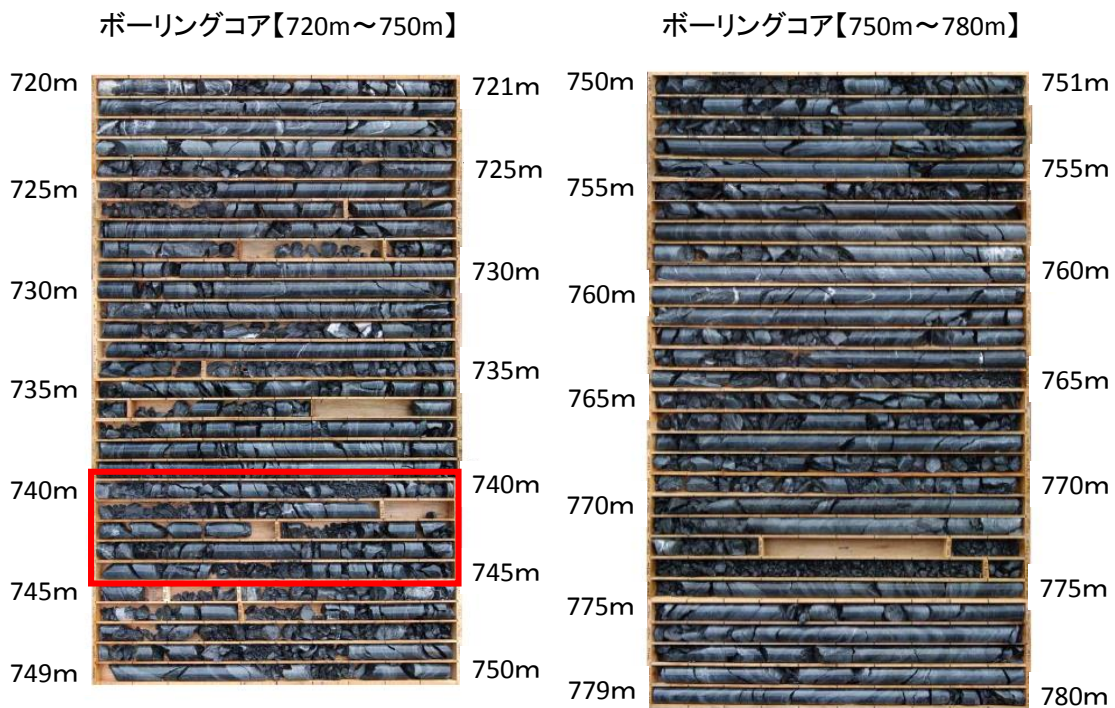
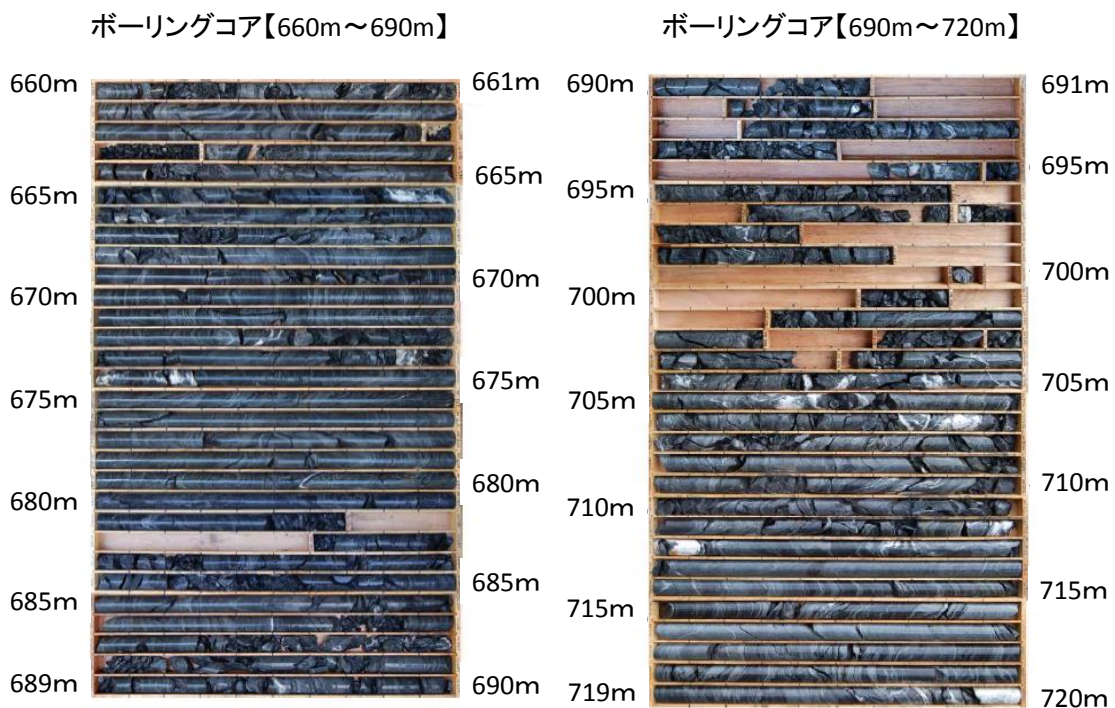


写真7 ボーリングコア写真

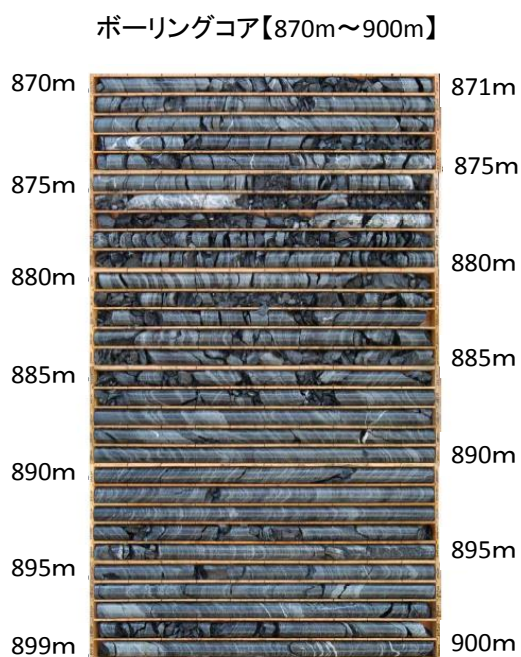
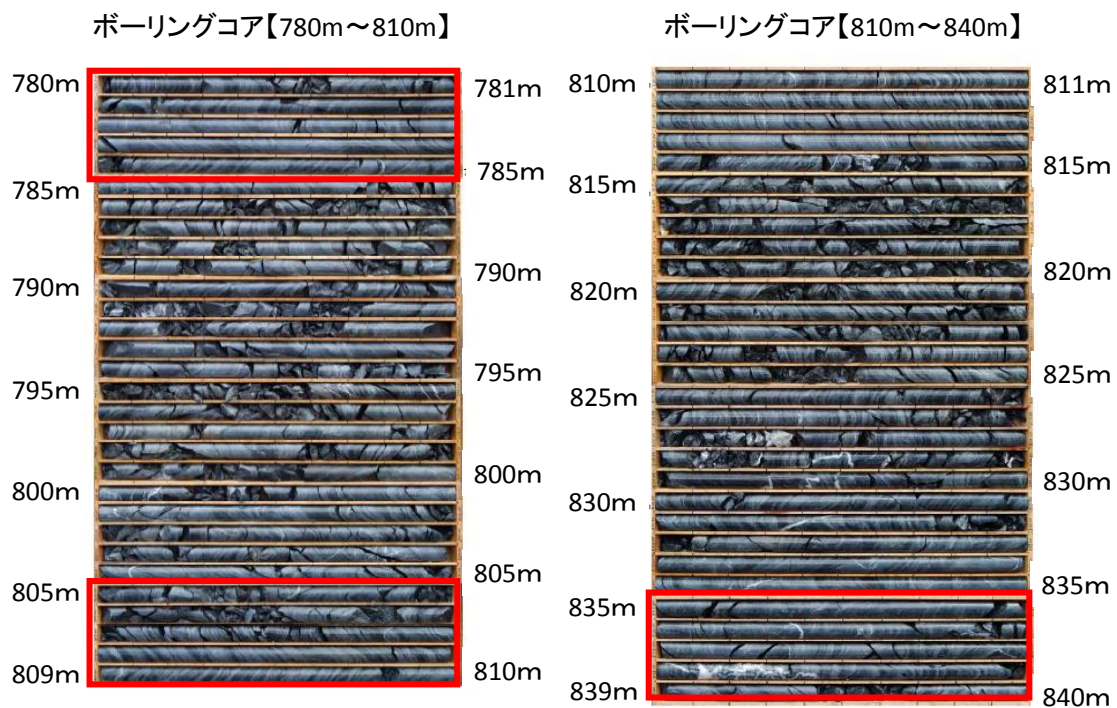


写真7 ボーリングコア写真

- ・調査Bのボーリング調査における口元湧水量の推移を図4 2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8）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^{※12}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。

※12 セメンチング：ボーリング孔が崩れないように保護することを目的に、岩盤の割れ目等にセメントを注入し固める方法。

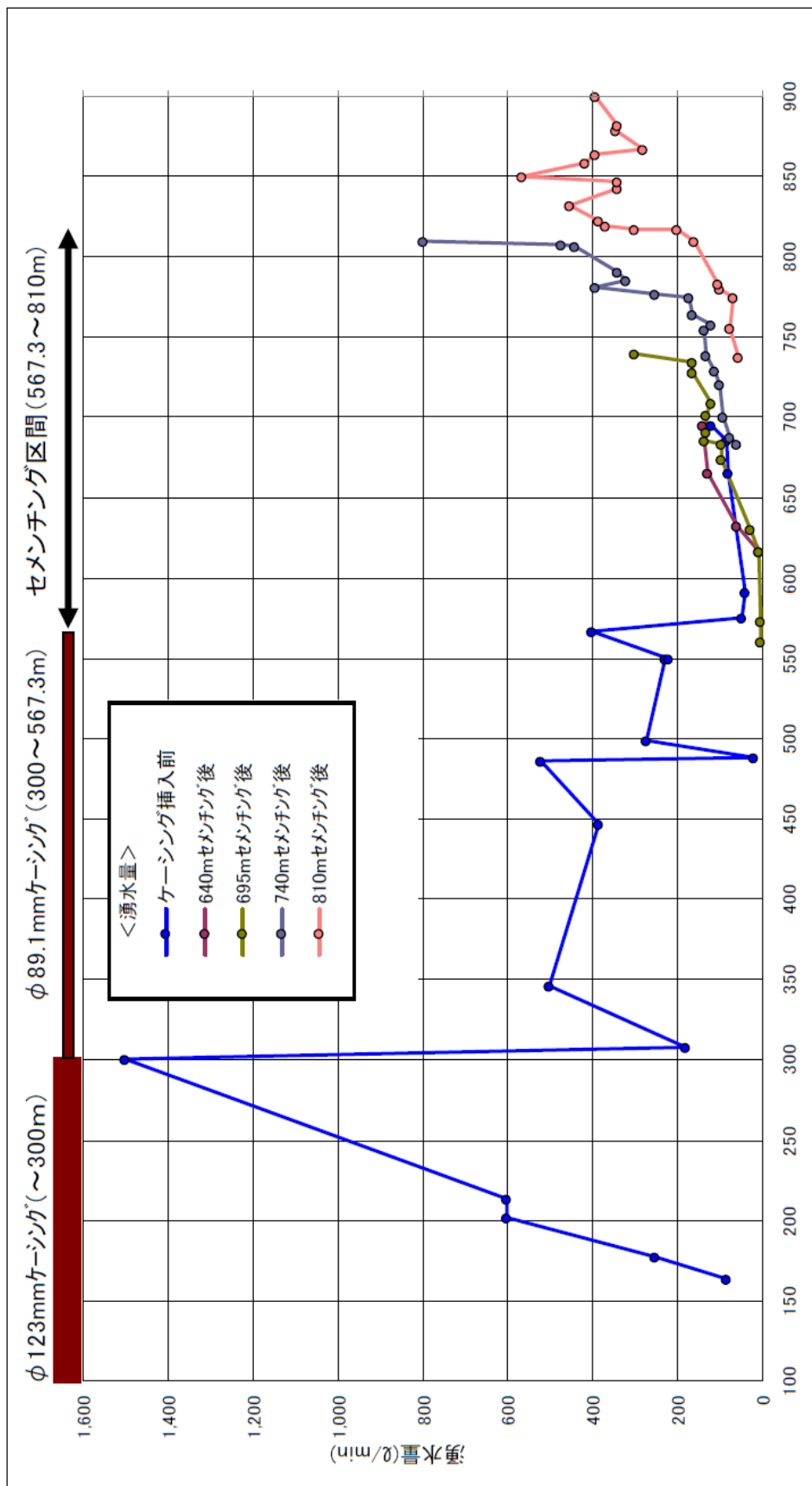


図4 2 ボーリング時の口元湧水量

ボーリングコア【275m～300m】

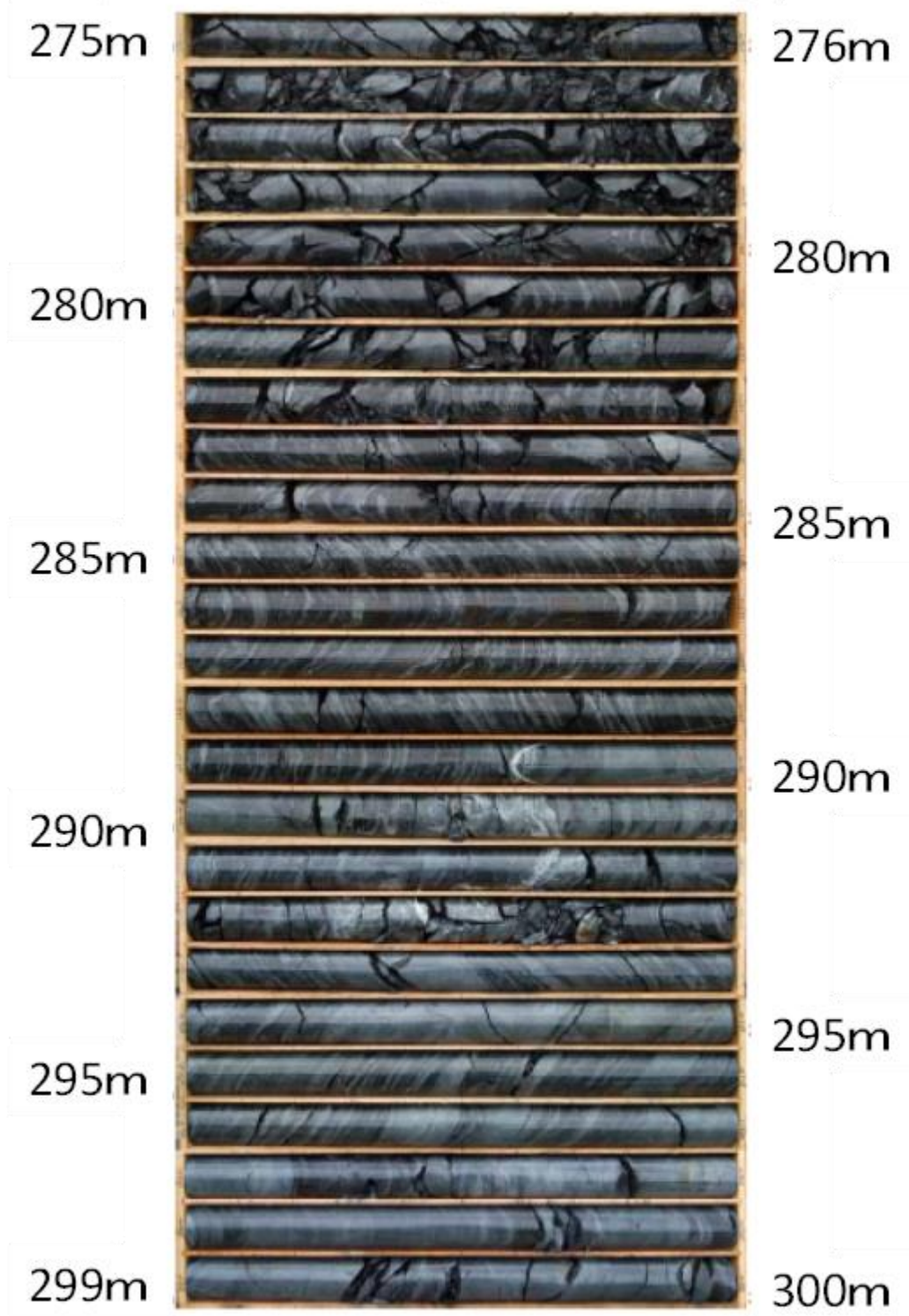


写真8 (1) 深度300m付近のコア写真

ボーリングコア【300m～330m】

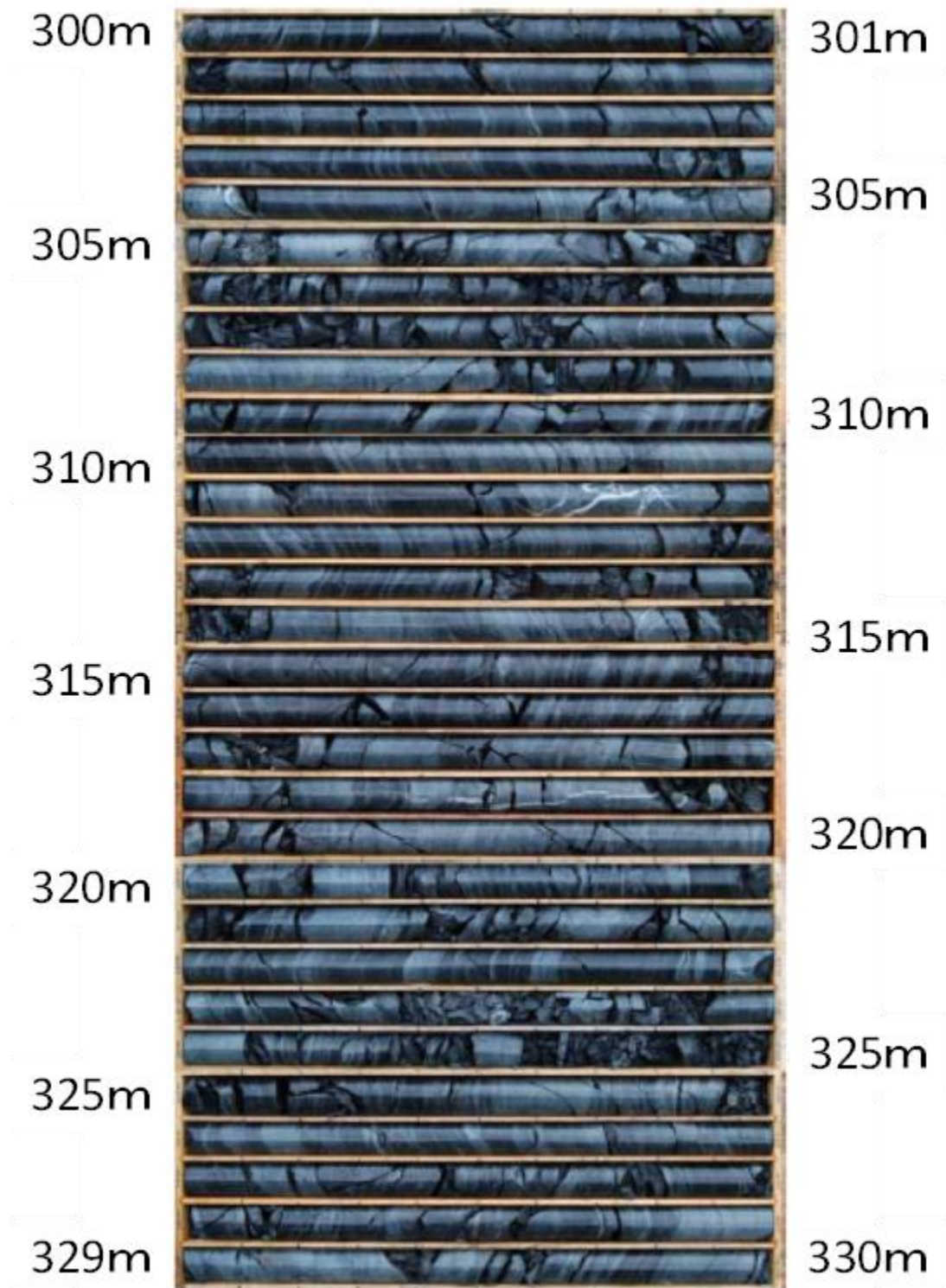


写真8（2） 深度300m付近のコア写真

- ・探査aの弾性波探査の結果は図38に示すとおりであり、P波速度は4.5km/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Cのボーリングはノンコアで削孔しました。(図43)

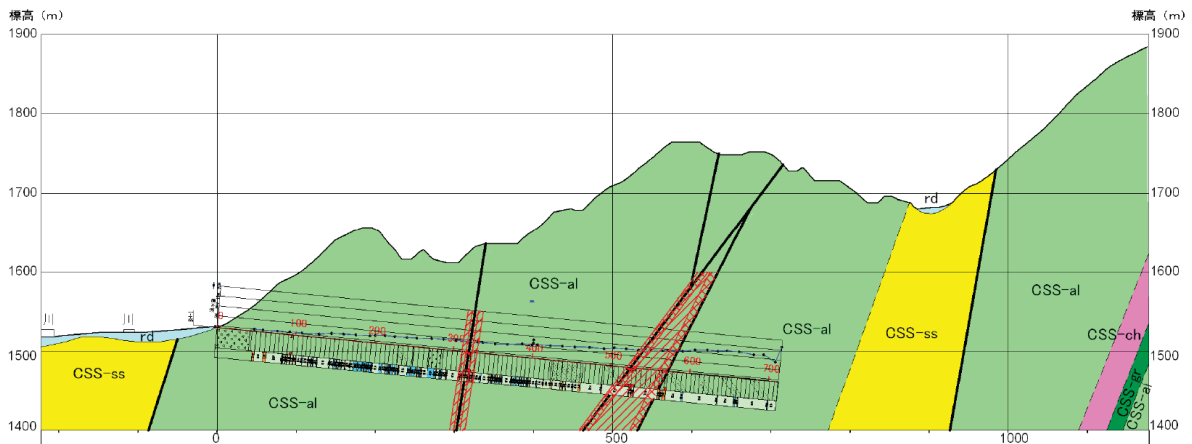


図43 ボーリング調査結果(西俣斜坑沿い)

- ・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C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44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1,200L/分で推移しました。
- ・調査期間中の最大口元湧水量は、約1,700L/分を計測しました。

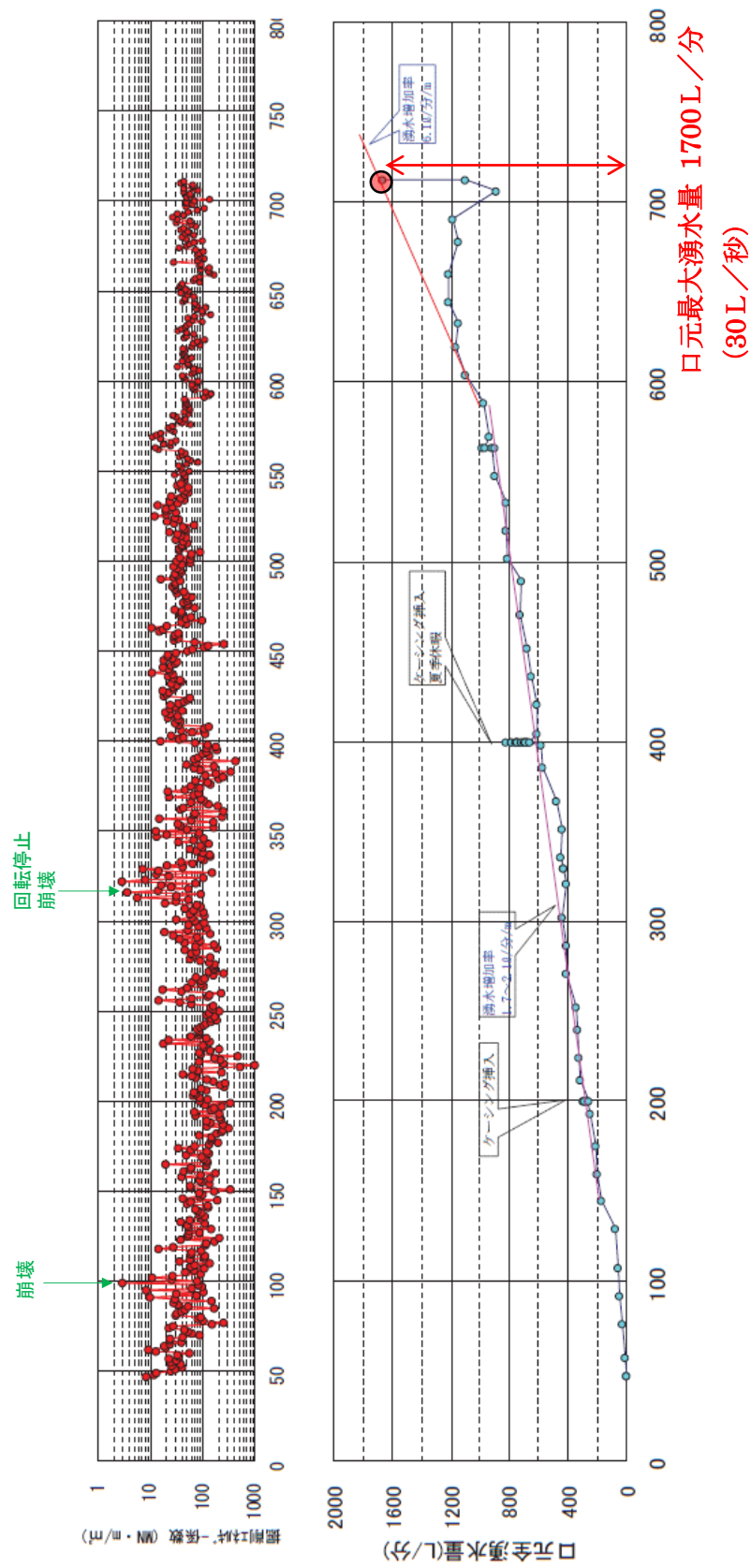


図 4 4 ボーリング調査時の掘削データ (西俣斜坑沿い)

(4) 先進坑の県境付近断層帯

- ・調査Dのボーリングはノンコアで削孔しました。(図45)

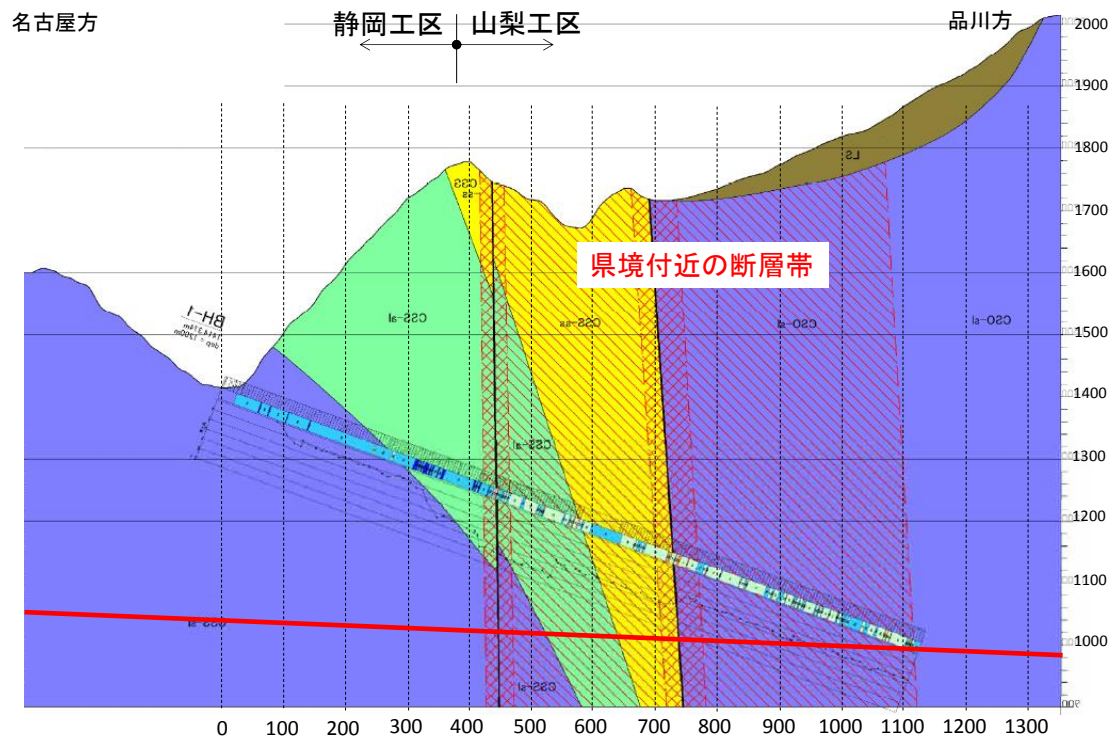


図45 ボーリング調査結果(県境付近の断層帯)

- ・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Cと同じ指標で行っています。
- ・調査D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46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2,600L/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。
- ・調査の限界により、調査区間より山梨側の地質の確認はできておりません。よって、ボーリング調査結果よりさらに山梨側へ破碎質な地質が連続している可能性は否定できないと考えております。

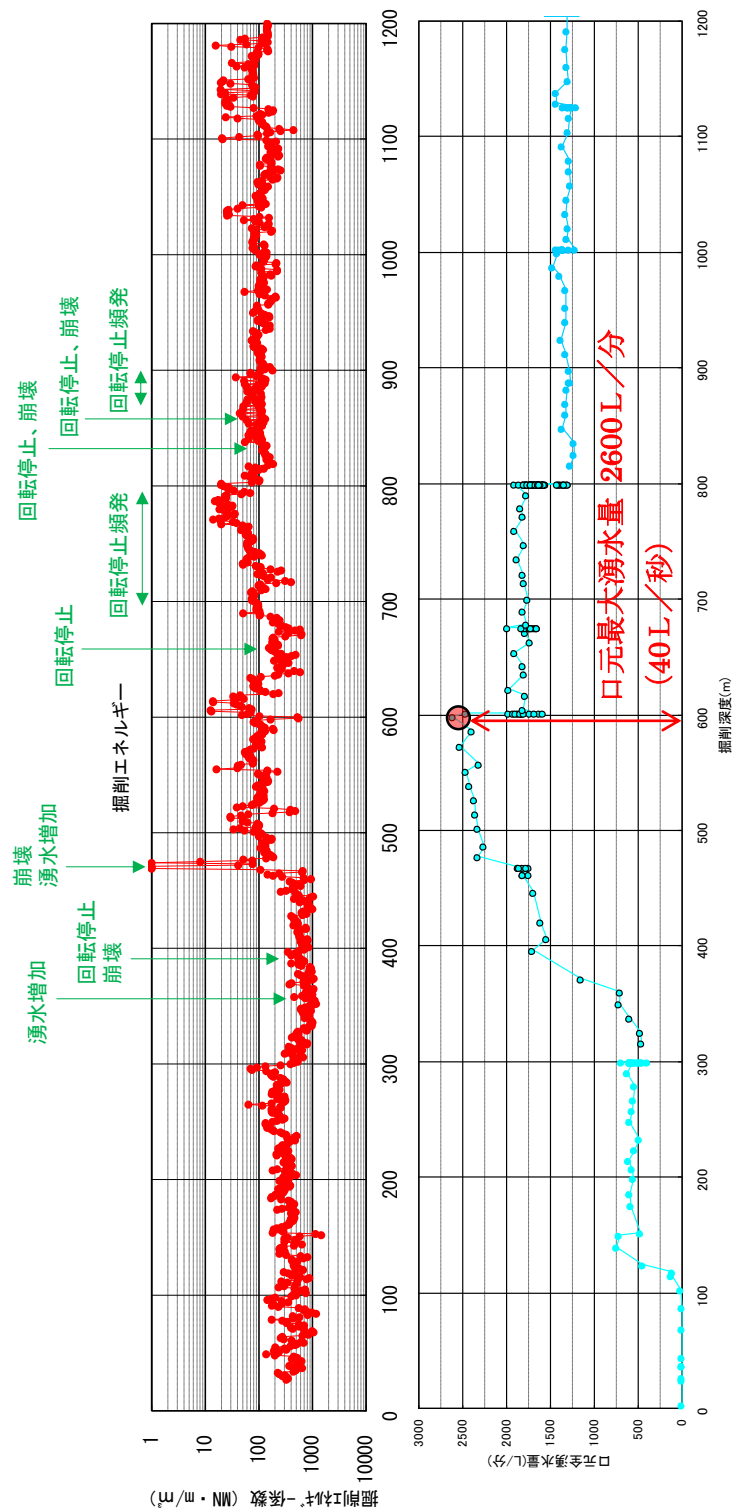


図4 6 ボーリング調査時の掘削データ（県境付近）

- ・口元湧水量の推移を調査B（図4 2）や調査C（図4 4）と比較すると、その量が格段に多いことが確認できます。

(5) 本坑と大井川（東俣）交差部

- トンネルの計画にあたっては、本線に沿った断面で地質縦断図を作成しています。作成の際、安全にトンネルの施工を進めるという観点から、該当する地層における他の調査結果なども参考にしうえて、可能性や程度に関わらず少しでも施工上の留意点として考えられる事柄を南アルプストンネル全般にわたって列挙し、コメントとして記載しています。
- 本坑と大井川（東俣）交差部について、地質縦断図と地質縦断図に付しているコメントを図47に示します。図41や図42に示す通り、深度600m付近までの当該箇所と同じ地層において、湧水量が増えている箇所が確認されており、当該箇所において湧水量が増える可能性を否定できないことから、湧水に対する懸念を記載しています。
- しかしながら、本坑と大井川（東俣）交差部付近の断層と考えられる箇所に関しては、調査Bの斜め下向きボーリングにおいて、約100m付近で状況を直接確認しています。当該箇所のコアの状況は写真7のとおりです（当該箇所を黄色囲みで示します）。幅3m程度の小規模な破碎質な区間を確認しましたが、湧水量も僅少であり、特にトラブルなく掘削を進めております。
- 以上のボーリング結果から、本坑と大井川（東俣）交差部における大量湧水の可能性は小さいと考えておりますが、地質が急激に変化する可能性がありますので、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、湧水に伴うリスクを極力小さくしながら慎重に掘削します。

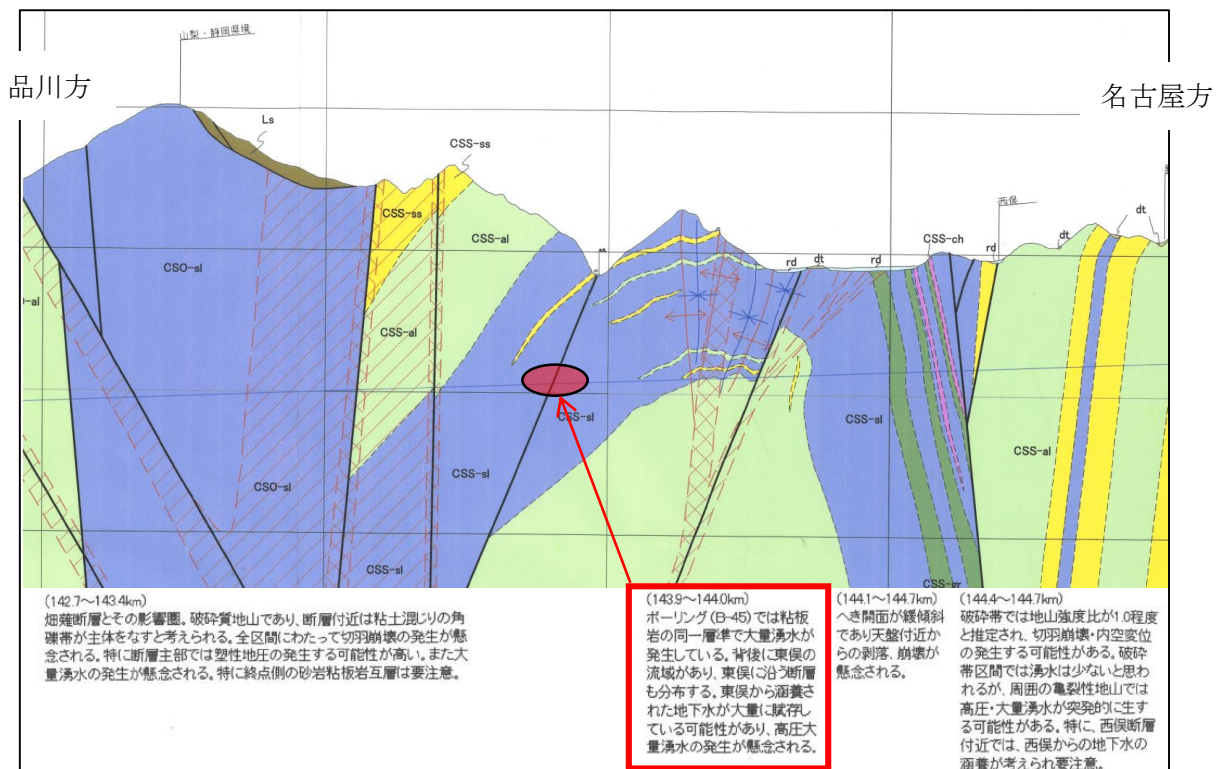


図47 地質縦断図と施工上の留意点