

7、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

(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、TBMやシールド工法による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、
 - 静岡県側から標準工法であるNATMで下向きに掘削する工法
 - 静岡県側からTBMやシールド工法による機械掘削で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) 静岡県側から標準工法であるNATMで下向きに掘削する工法

- ・図 7-1 の通り、山梨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。

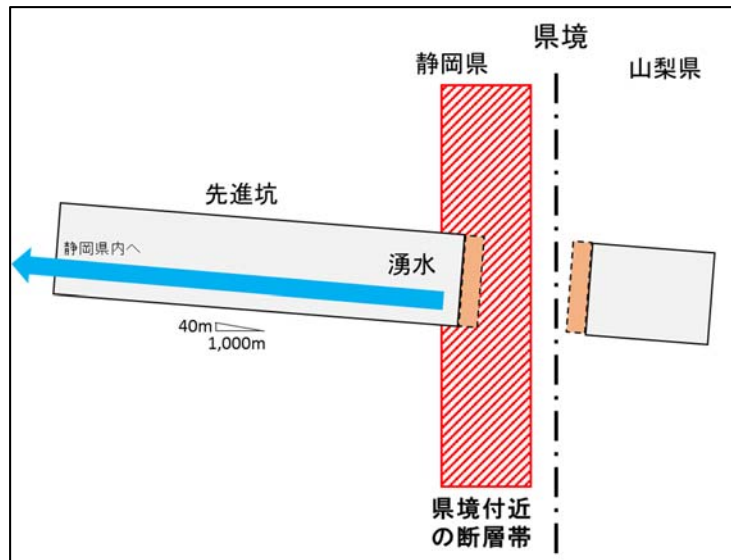


図 7-1 静岡県側からNATMで下向きに掘削する工法

ア. 安全性の評価

- ・静岡県側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^{※1}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。

※1 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。

① 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、山梨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 7-1）に、 $1\text{ m}^3/\text{秒}$ （ $60\text{ m}^3/\text{分}$ ）として検討することにしました。

表 7-1 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 $70\text{ m}^3/\text{分}$

【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^{※2}。
- ・ 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 7-2）、湧水の低減式を設定します（図 7-2 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（ $1\text{ m}^3/\text{秒}$ （ $60\text{ m}^3/\text{分}$ ）発生時の経過時間毎の湧水量を算出します（図 7-3）。
- ・ 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 7-2 に示す通り^{※3}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 m^3 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 m^3 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 m^3 と算出されます。

※2：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。

※3：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。

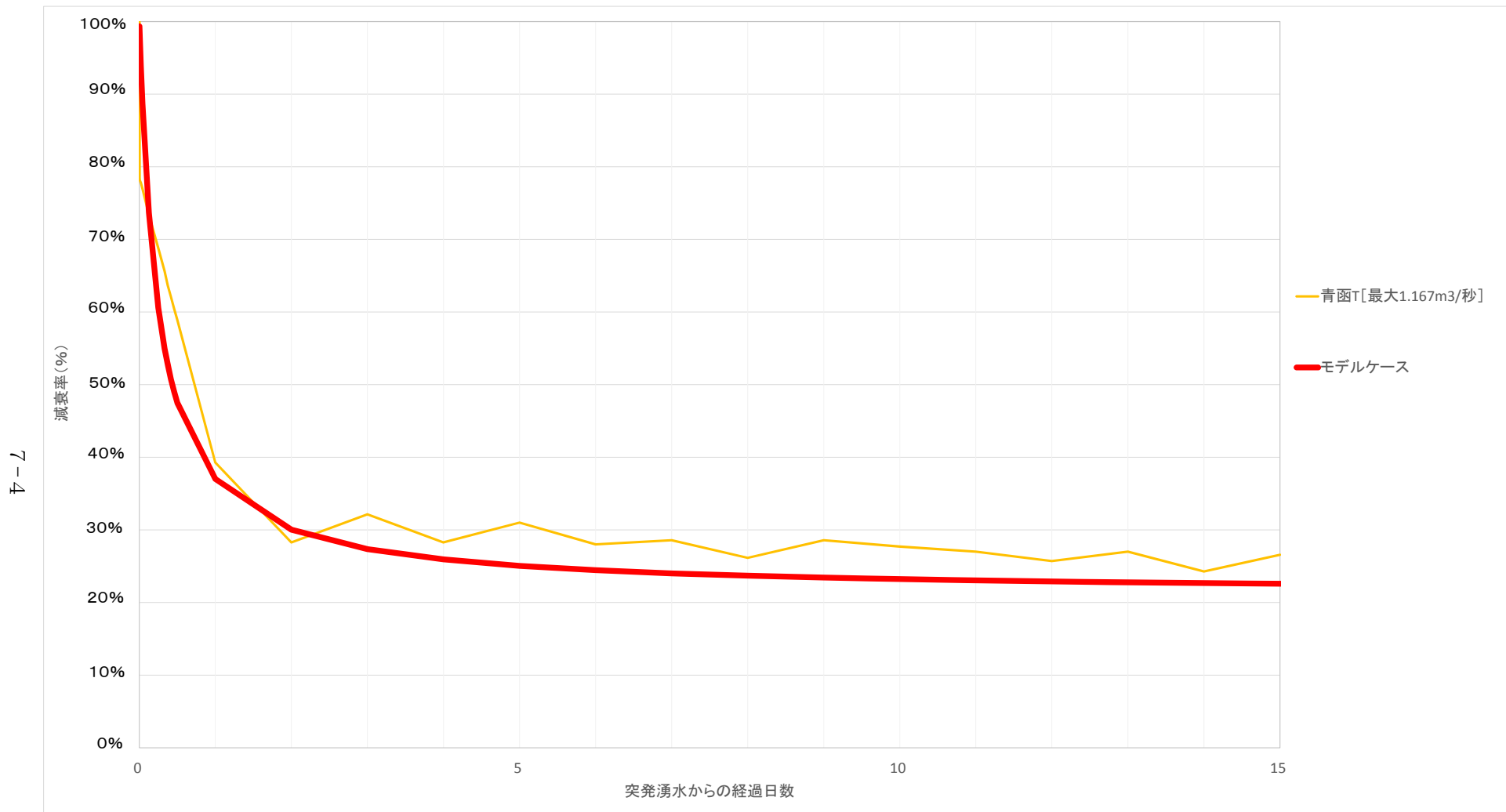


図 7-2 突発湧水量の設定

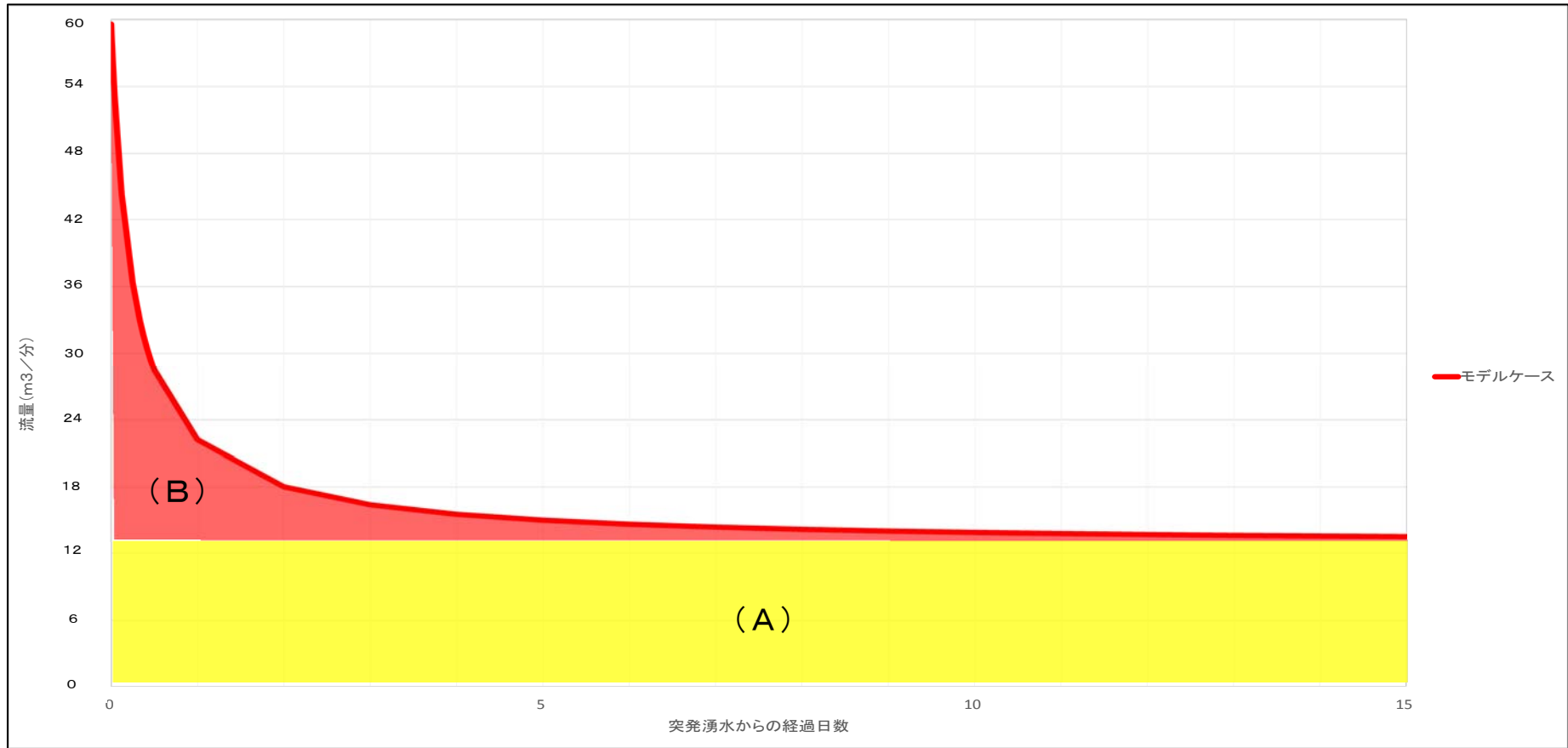


図 7-3 モデルケースにおける湧水量の推移 ※第9回有識者会議の指摘を踏まえ修正予定

表 7-2 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、破碎質な部分の一部に粘土質な部分が存在し、この粘土質な部分が不透水層となり大量の湧水を蓄えているため、粘土質な部分が崩れると突発湧水（ $1 \text{ m}^3/\text{秒}$ ）の可能性がありますが（図 7-4 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 7-4 右図）。ただし、山梨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。

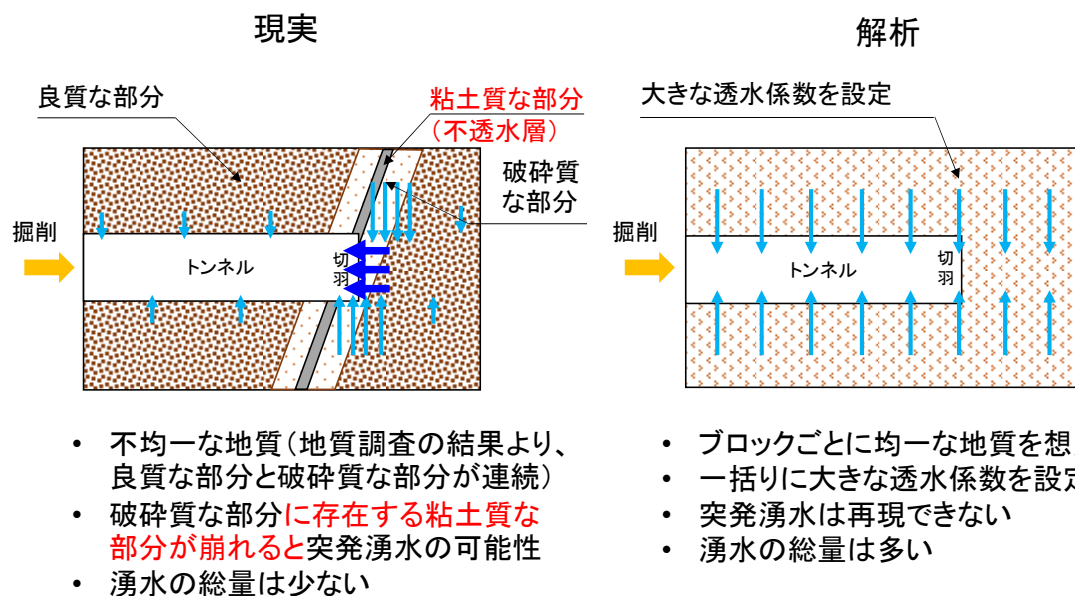
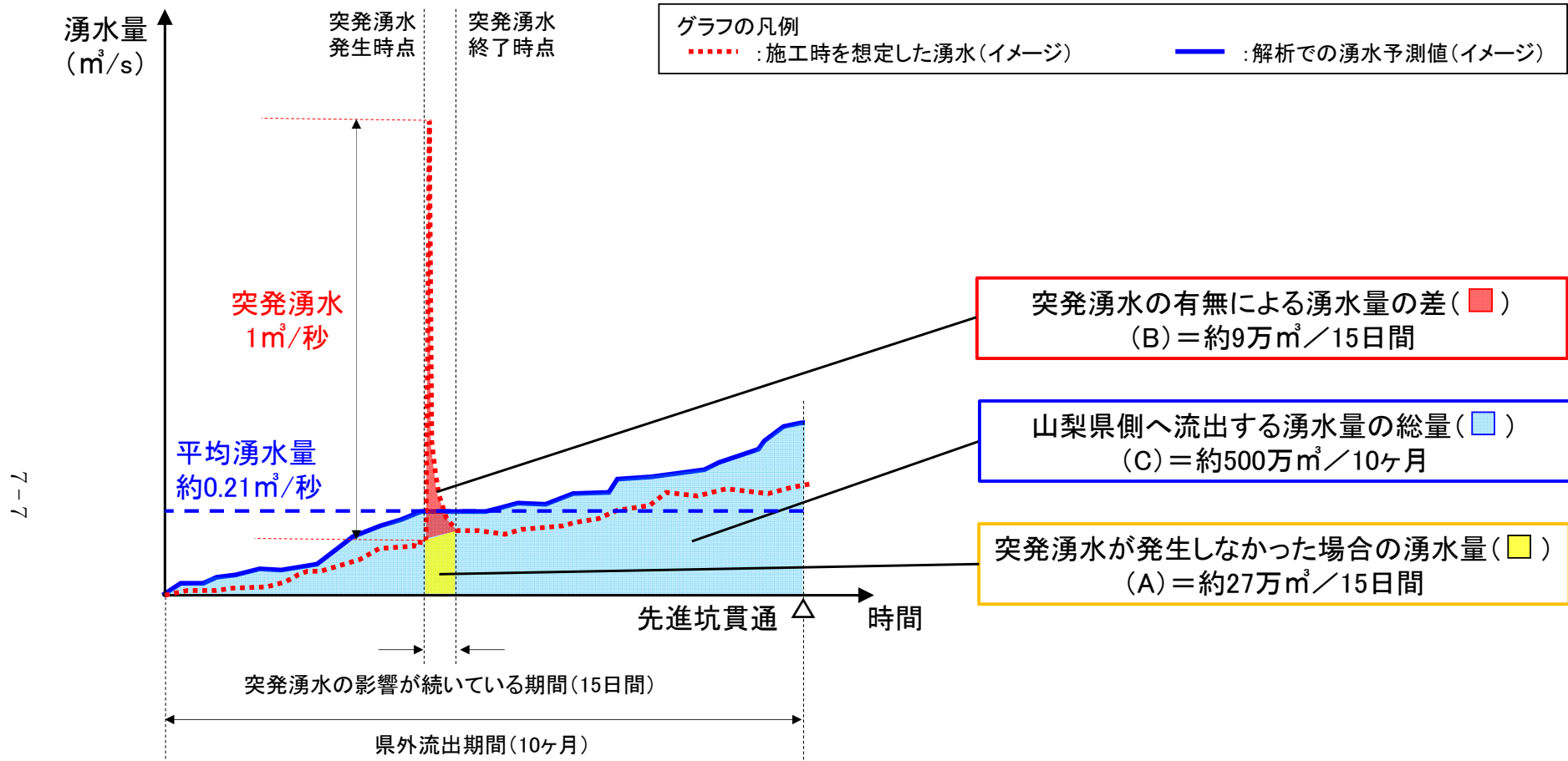


図 7-4 断層帯における現実と解析の違い（イメージ）

- ・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（ $1 \text{ m}^3/\text{秒}$ ）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、J R 東海モデルでは約 0.03 億m^3 （平均値 $0.12 \text{ m}^3/\text{秒}$ ）、静岡市モデルでは約 0.05 億m^3 （平均値 $0.21 \text{ m}^3/\text{秒}$ ）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 7-5 となります。
- ・図 7-5 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 7-3 における（A）及び（B）と同じ量を示しています。



※第9回有識者会議の指摘を踏まえ修正予定

図 7-5 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）

② 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6 m）、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、別冊「9、トンネルの掘り方に係る参考資料」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35 m程度、最深部はトンネル底面から1.5 m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35 m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。

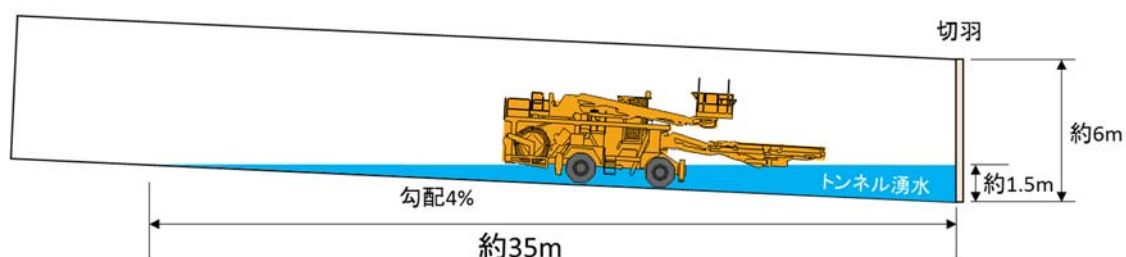


図 7-6 突発湧水発生3分後のトンネル坑内の状況

【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。

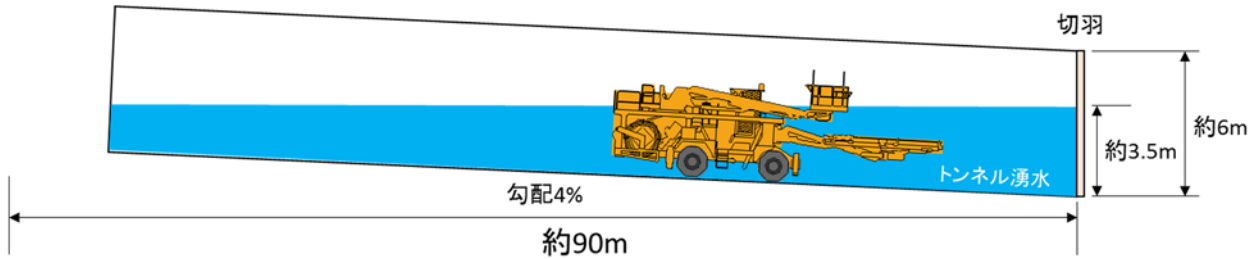


図 7-7 突発湧水発生10分後のトンネル坑内の状況

【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。

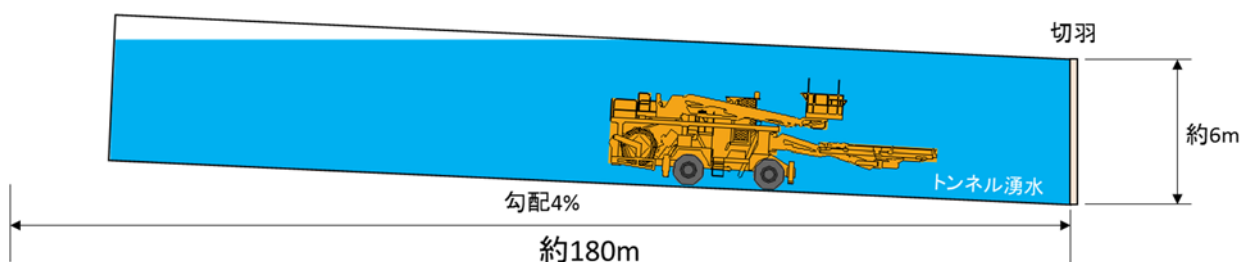
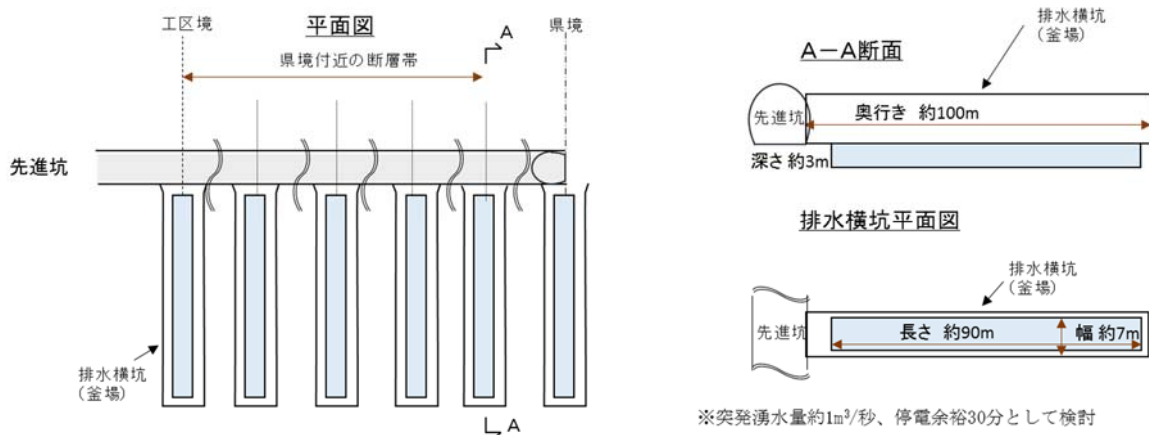


図 7-8 突発湧水発生1時間後のトンネル坑内の状況

③ 突発湧水に備えて順次釜場を設置しながら掘り進める方法の検討

- ・先進坑を下り勾配で施工する場合、突発湧水に備え、作業員の安全性を確保するために掘削の進行に合わせて、順次大きな排水横坑（釜場）を設ける必要があります。
- ・排水横坑（釜場）にトンネル湧水を導くことで、作業員の避難に必要な時間を確保します。
- ・仮に、排水横坑（釜場）を設ける場合、避難に必要な時間を30分※とし、突発湧水がいつ発生するか分からない懸念もあることから、山梨県境付近の断層帯に他の区間よりも設置間隔を短くし、排水横坑（釜場）を設けることとします（図 7-9）。

※トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説（2016年土木学会）に、停電時に備え30分程度の想定湧水量を貯水できる容量とすることが望ましいと記載されているため、その値を採用。



※「中央新幹線建設工事における大井川水系の水資源の確保及び自然環境の保全等に関する引き続き対話を要する事項」に対する見解（その1）を一部修正

図 7-9 山梨県境付近の断層帯を下向きに掘削する際の排水横坑（イメージ）

- ・特に山梨県境付近の断層部では、地質が脆く、地質の不良な箇所での先進坑から直交する位置に多数の横坑を掘削することは、先進坑の構造安定上問題があります。
- ・また、先進坑に加え、排水横坑（釜場）を掘削すること自体が突発湧水の発生する可能性を増加させることになり、技術的に難しいと考えます。
- ・仮に、排水横坑（釜場）を設けることとした場合、先進坑の切羽での掘削作業と排水横坑（釜場）の掘削作業が競合しないように、ある程度の距離を確保する必要があります。

- ・先進坑の切羽と排水横坑（釜場）がある程度距離があるため、排水横坑（釜場）にポンプを設置した場合でも切羽付近の浸水は避けることはできません。
 - ・よって、突発湧水に備えて順次釜場を設置しながら掘り進めることは、安全性の確保に課題があります。
 - ・あわせて、排水横坑（釜場）を掘削することによるトンネル湧水の増加や発生土の増加など、環境への負荷も増加します。
-
- ・以上の通り、山梨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。

イ. 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。

ウ. 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 7-3 にまとめ、お示しします。

表 7-3 案1) の評価※4

安全性	経済性	環境負荷
×	△	○

※4: 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TBMやシールド工法による機械掘削で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。
- ・山梨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。

ア. 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。

① 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7-10、写真7-1)

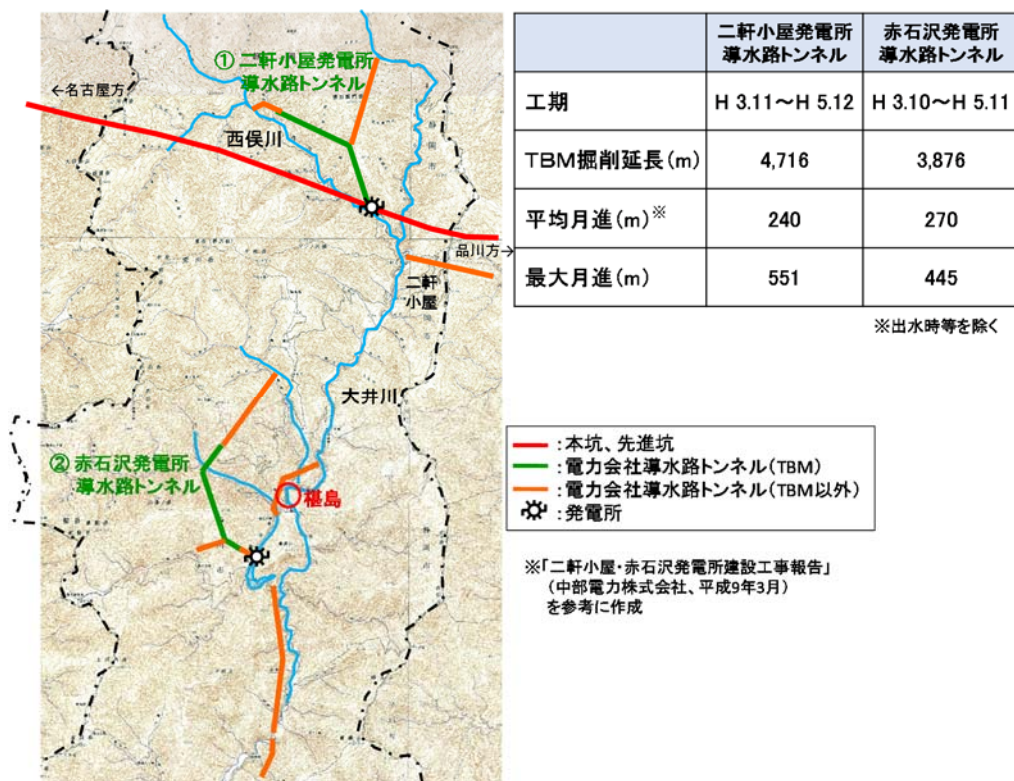


図 7-10 静岡県内南アルプス地域の水力発電導水路トンネル

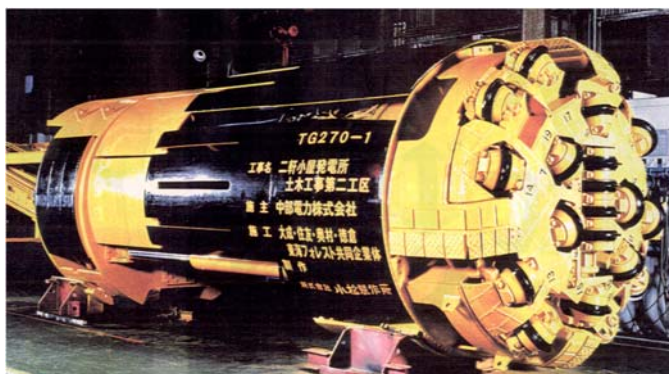
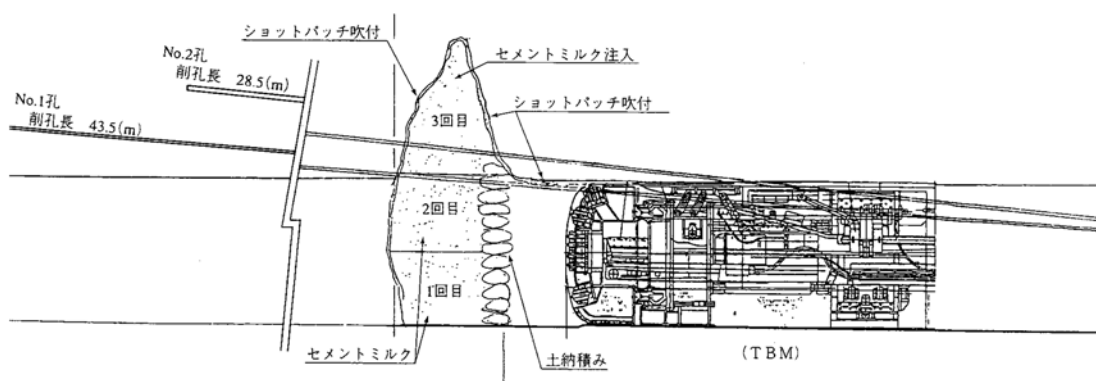


写真 7-1 二軒小屋発電所のTBM (φ2.6m)

- ・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の区間がありました。しかし、山梨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、山梨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7-11)、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(ノーズダウンとも言います)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 7-11 二軒小屋導水路トンネル切羽前方崩落対応事例

② 事例 2 : 東海北陸自動車道飛騨トンネルの例

- 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騨トンネル（1997年～2007年に施工、延長10.7km）があります。（図 7-1 2、図 7-1 3）



図 7-1 2 飛騨トンネル位置図

※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

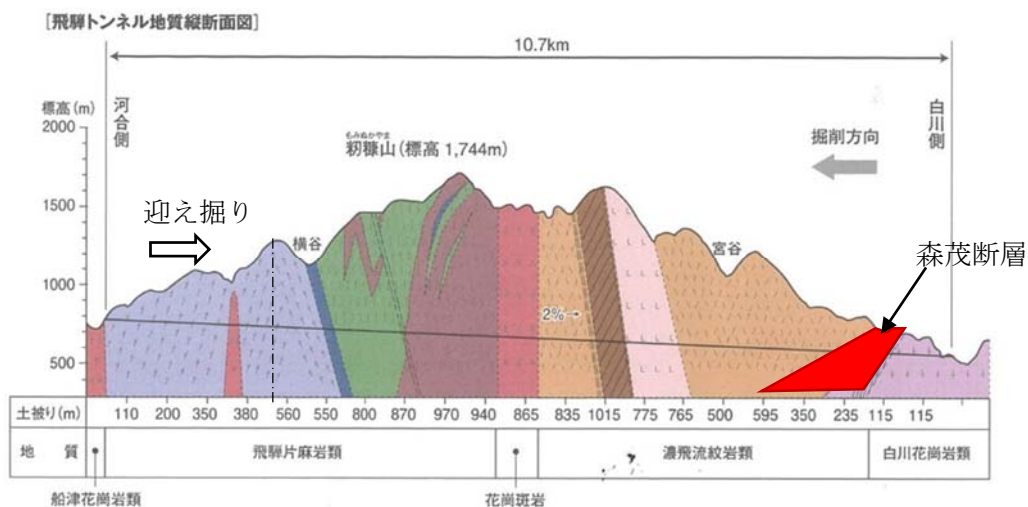


図 7-1 3 飛騨トンネル地質縦断面図

※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、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7-2）。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 7-2 飛驒トンネル本坑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 $15\text{m}^3/\text{分}$ （ $0.25\text{m}^3/\text{秒}$ ）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7-3）
- ・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 7-3 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山梨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。
- ・山梨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。

イ. 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 7-4）



写真 7-4 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 7-14)。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 MP a^{※5}程度が限界です。

※5 水圧1 MP a =水深100mでかかる圧力(1 cm²当りに約10 kg)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0.78 MP a(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

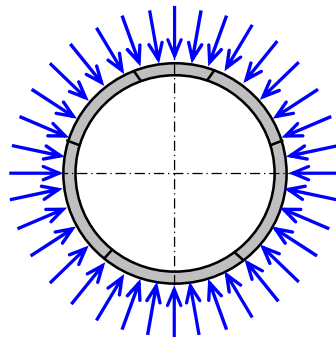


図 7-14 水圧・土圧の作用図

- ・山梨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8 MP a(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 7-4 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 7-5 の通りです。
- ・ 2) 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) は、突発湧水発生時の作業員避難上の課題が残ります。

表 7-5 各案の評価のまとめ^{※6}

工法	安全性	経済性	環境負荷
1) 静岡県側から標準工法である NATM で下向きに掘削する工法	×	△	○
2) 静岡県側から TBM やシーールド工法による機械掘削で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		

※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。

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。