

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、検討した工法に対し、追加となる工費及び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。

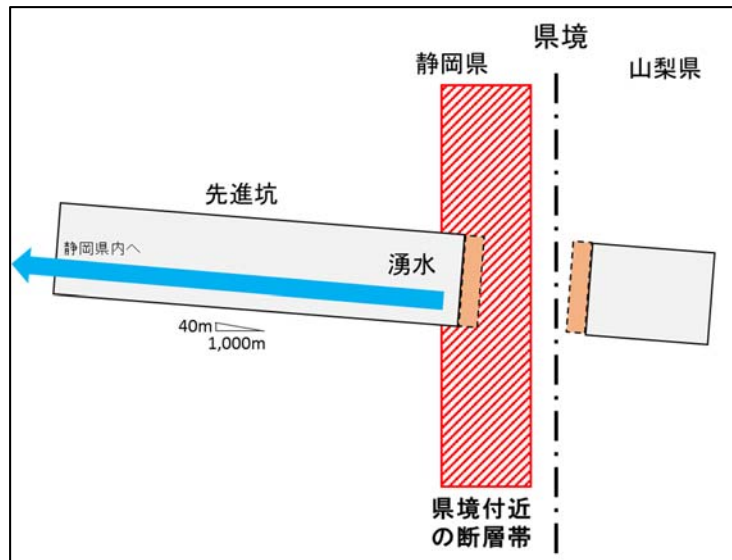


図 7-1 静岡県側からNATMで下向きに掘削する工法

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、トンネル前方の地質や湧水状況を慎重に確認してから、トンネル掘削を進め、さらに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、必要により薬液注入等）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。
- ・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 m^3 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】

- ・安全性の検討は、切羽付近で発生する突発湧水量を用いて行います。
- ・突発湧水は、切羽付近で大量の湧水が瞬間的に予期せぬ形で突然湧出するもので、この瞬間的に発生する大量の湧水を管理することは困難です。また、この突発湧水が、工事実施段階で発生した場合には、安全性に大きな問題が生じます。
- ・実際にトンネルを掘削する場面を想定し、時間の経過とともに突発湧水による影響がどのように生じるかを検討し、各時点でトンネルの安全性が確保されていることを確認することが重要です。
- ・突発湧水は、局所的な地質や地下水の状況に基づいて生じるものであり、その量や短い時間における変化を、事前の解析でどれだけ精度を高めて推定しようとしても不確実性が伴い、正確に推定をすることは困難です。
- ・そのため、切羽付近の最大湧水量が定量的に把握されている過去の湧水事例をもとに、具体的な検討を行うこととしました（表 7-1）。
- ・突発湧水の想定に関しては、切羽付近で大規模な湧水が発生し、さらに瞬間的に発生した切羽付近の湧水量の推移が継続的に確認できる青函トンネルの事例をベースとして検討することとしました。

注) 本来は南アルプストンネルと同様の山岳トンネルでの事例が望ましいですが、湧水量の継続的な記録がしっかりと残されているものはありません。そこで、海底トンネルであり、山岳トンネルと状況は異なりますが、突発湧水が発生してから湧水量が水際線の位置の変化を通じて継続的に確認できる、青函トンネルの事例を参考として、 $1 \text{ m}^3/\text{秒}$ ($60 \text{ m}^3/\text{分}$) の突発湧水を想定しました。

表 7-1 各トンネルにおける切羽付近湧水量

トンネル名		工事完成年	切羽付近の最大湧水量	継続的な湧水記録の有無
津軽海峡線	青函トンネル	1988年	約 $1.167 \text{ m}^3/\text{秒}$	有
中央本線(中央東線)	塩嶺トンネル	1983年	約 $0.700 \text{ m}^3/\text{秒}$	無
山陽新幹線	福岡トンネル	1974年	約 $0.333 \text{ m}^3/\text{秒}$	無
上越新幹線	大清水トンネル	1982年	約 $0.300 \text{ m}^3/\text{秒}$	無
東海北陸自動車道	飛驒トンネル	2008年	約 $0.217 \text{ m}^3/\text{秒}$	無

【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、青函トンネルにおける切羽付近湧水量の経時変化^{※2}（図 7-2）を基に作成した、湧水量の低減式により想定しました。（図 7-2 赤線）
- ・また、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した。(図 7-3、表 7-2)

※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。

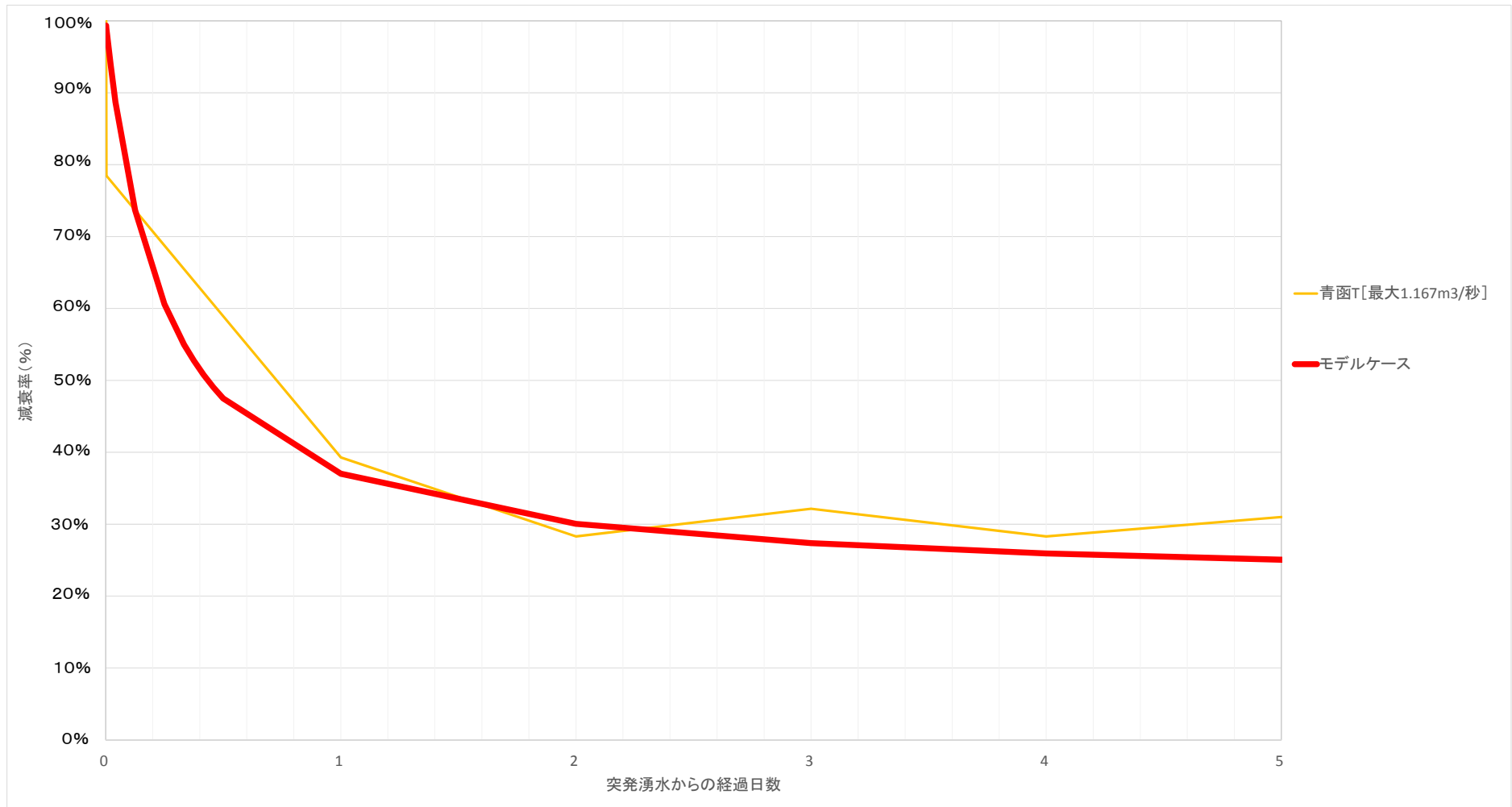


図 7-2 突発湧水発生後の経過日数と減衰率の設定

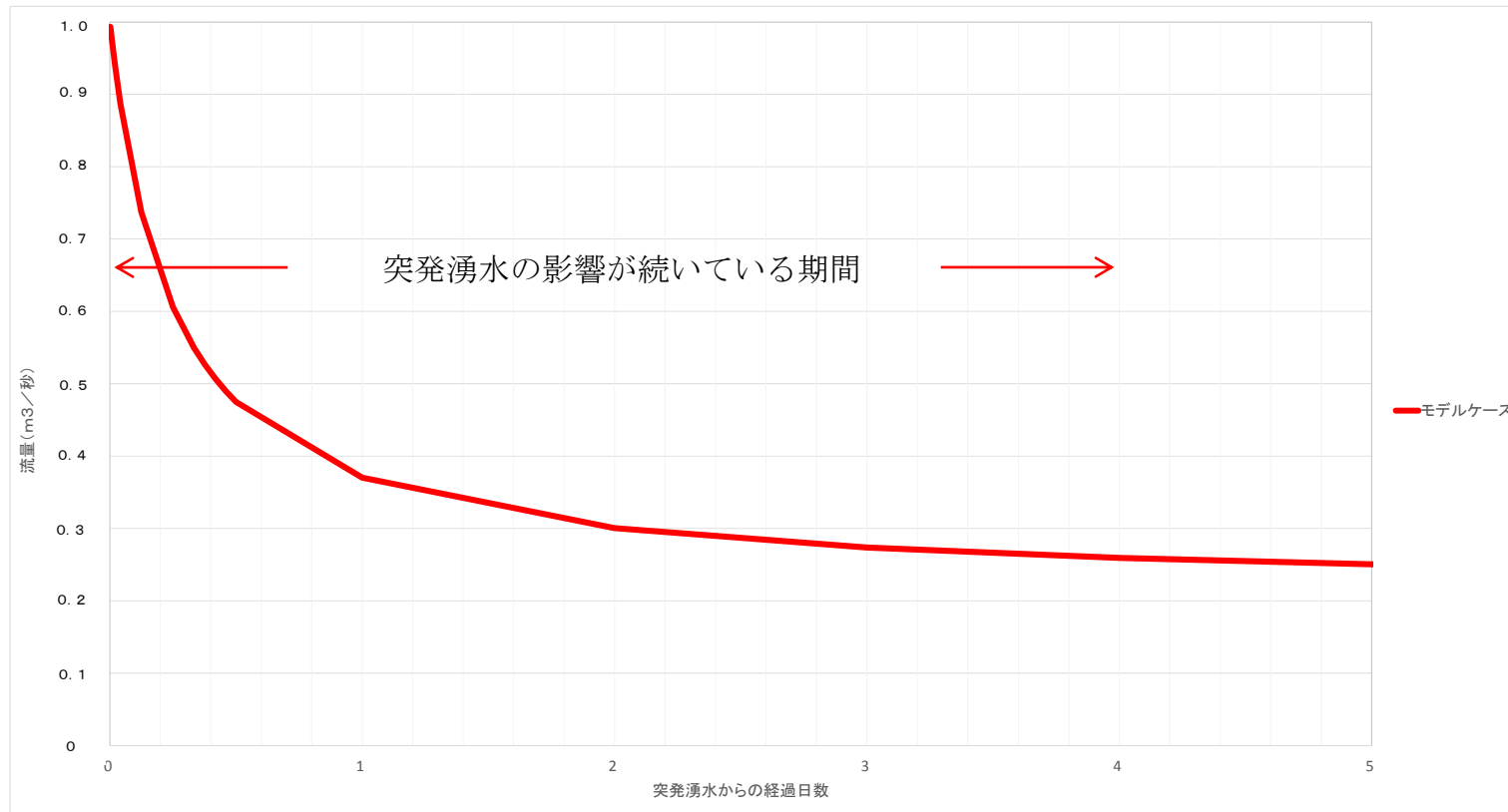


図 7-3 モデルケースにおける湧水量の推移

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(1m ³ /秒)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	4日後	5日後
単位時間当り湧水量(m ³ /秒)	0.99	0.99	0.98	0.94	0.89	0.37	0.26	0.25
積算湧水量(m ³)	180	299	596	1,770	3,460	50,151	131,716	154,122

【突発湧水による影響期間の想定】

- ・青函トンネルでは、作業坑の切羽で突発湧水が発生してから作業坑及び本坑の一部が水没しました。
- ・切羽からの突発湧水は、時間の経過とともに湧水量が低減し、いずれは恒常的な湧水量になると考えられますが、突発湧水の影響範囲はどこまでなのか、また切羽付近に貯まっていく水には、切羽以外で発生しているトンネル湧水が含まれていないかについて、当時の工事関係者へヒアリングを行いました。

ヒアリングの結果、以下のことがわかりました。

- ① 突発湧水量は、切羽付近で直接的に計測できないため、湧水による水没水際線の移動速度をもとに、突発湧水量の経時変化を推定した。
 - ② 突発湧水発生前のトンネル全体の恒常湧水量は、海底トンネルという性格上、薬液注入を行っていたため、管理上問題になる湧水量ではなかった。
 - ③ これらを踏まえると、水没水際線が止まるまでの期間を、突発湧水の影響がある期間と考えることについて、支障はない。
- ・ヒアリング結果の③について、水没水際線と最終水際位置に関する内容や、当時の状況が工事誌等に記録がありました。

- ・突発湧水が発生（昭和51年5月6日）時は、切羽周辺の排水設備は水没したため順次機能しなくなり、突発湧水から2日後までに緊急対応として切羽から離れた箇所で止水壁や防水門扉の閉扉、本坑への導水など対策を行いました。それでも水没水際線は移動していました。
- ・昭和51年5月9日に排水設備の緊急増強により、排水能力と湧水量が釣り合い、水没水際線の移動が止まりました（図7-4）。
- ・排水能力と湧水量が釣り合った、最終水際位置とトンネル水没範囲を図7-5に示します。

この状態になるまでの期間が、約4日間であることが確認できました。

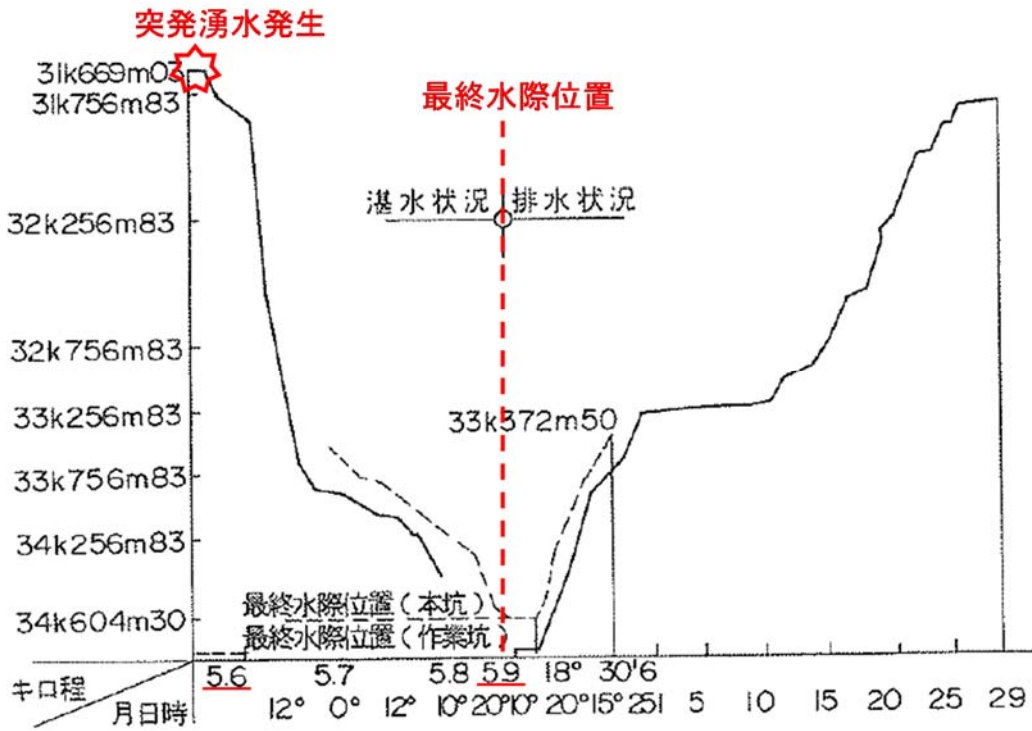


図 7-4 水際線位置

※津軽海峡線工事誌（青函トンネル）下 日本鉄道建設公団より引用、一部加筆

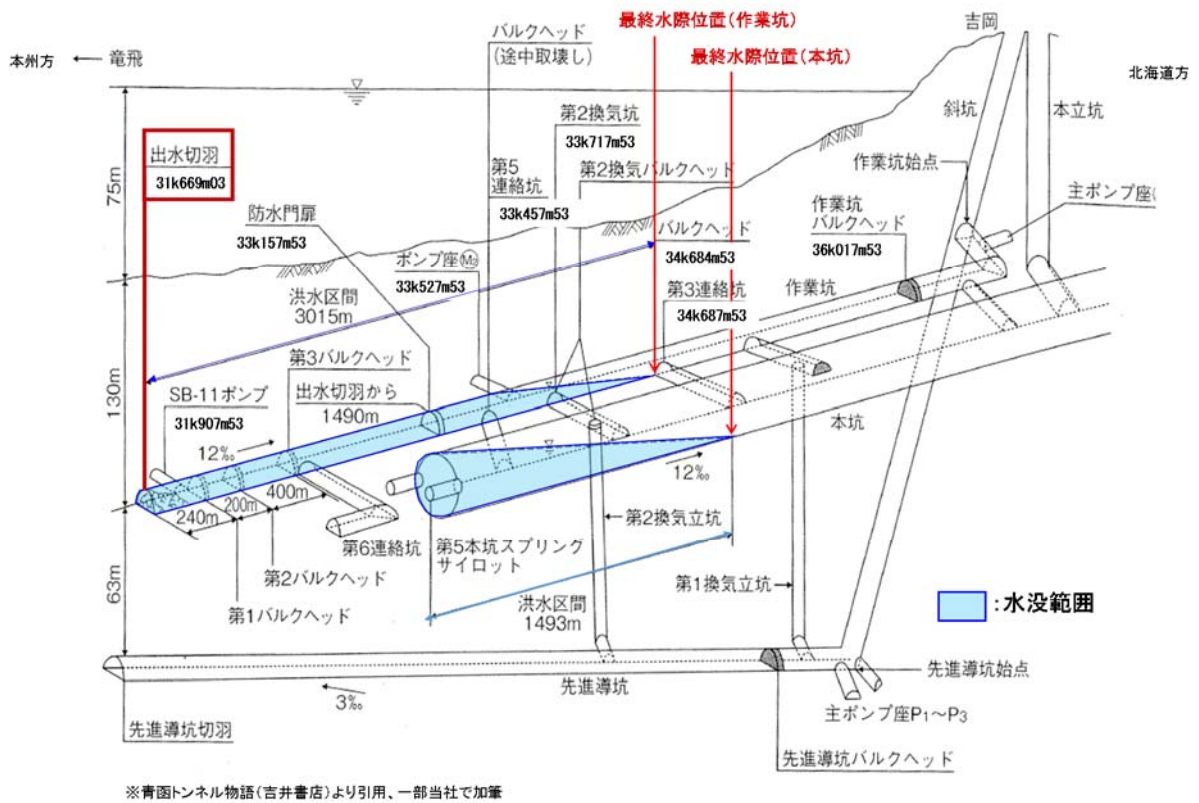


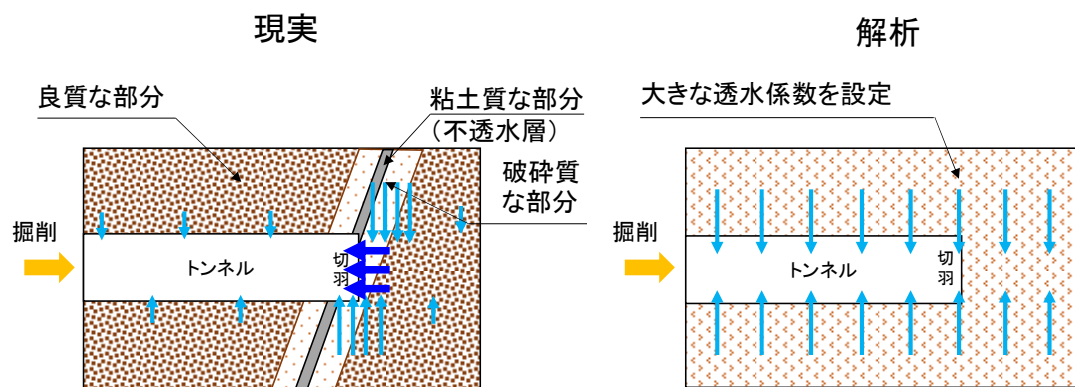
図 7-5 最終水際位置におけるトンネル水没範囲

- ・以上により、突発湧水の影響が続いている期間を4日間とし、5日目以降は、突発湧水後の恒常湧水として考え、検討します。(図 7-3)
- ・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4日間における積算湧水量は、約13万m³となります。

※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%、4日後には74%まで湧水量が低減される低減式としています。

【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 m³/秒）の可能性がありますが（図 7-6 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 7-6 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。



- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ・ 不均一な地質（地質調査の結果より、良質な部分と破碎質な部分が連続） ・ 破碎質な部分に存在する粘土質な部分が崩れると突発湧水の可能性 ・ 湧水の総量は少ない | <ul style="list-style-type: none"> ・ ブロックごとに均一な地質を想定 ・ 一括りに大きな透水係数を設定 ・ 突発湧水は再現できない ・ 湧水の総量が多い |
|--|--|

図 7-6 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 m³ = 300 万 m³（平均値 0.12 m³/秒）、静岡市モデルでは約 0.05 億 m³ = 500 万 m³（平均値 0.21 m³/秒）と算出しました。
- ・これに対し、突発湧水については、山梨県境付近の断層帯で発生する量や時間的な変化を具体的に予測することは困難です。
- ・そのため、青函トンネルの事例をもとに突発湧水の量や時間的な変化を想定し、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 7-7 となります。

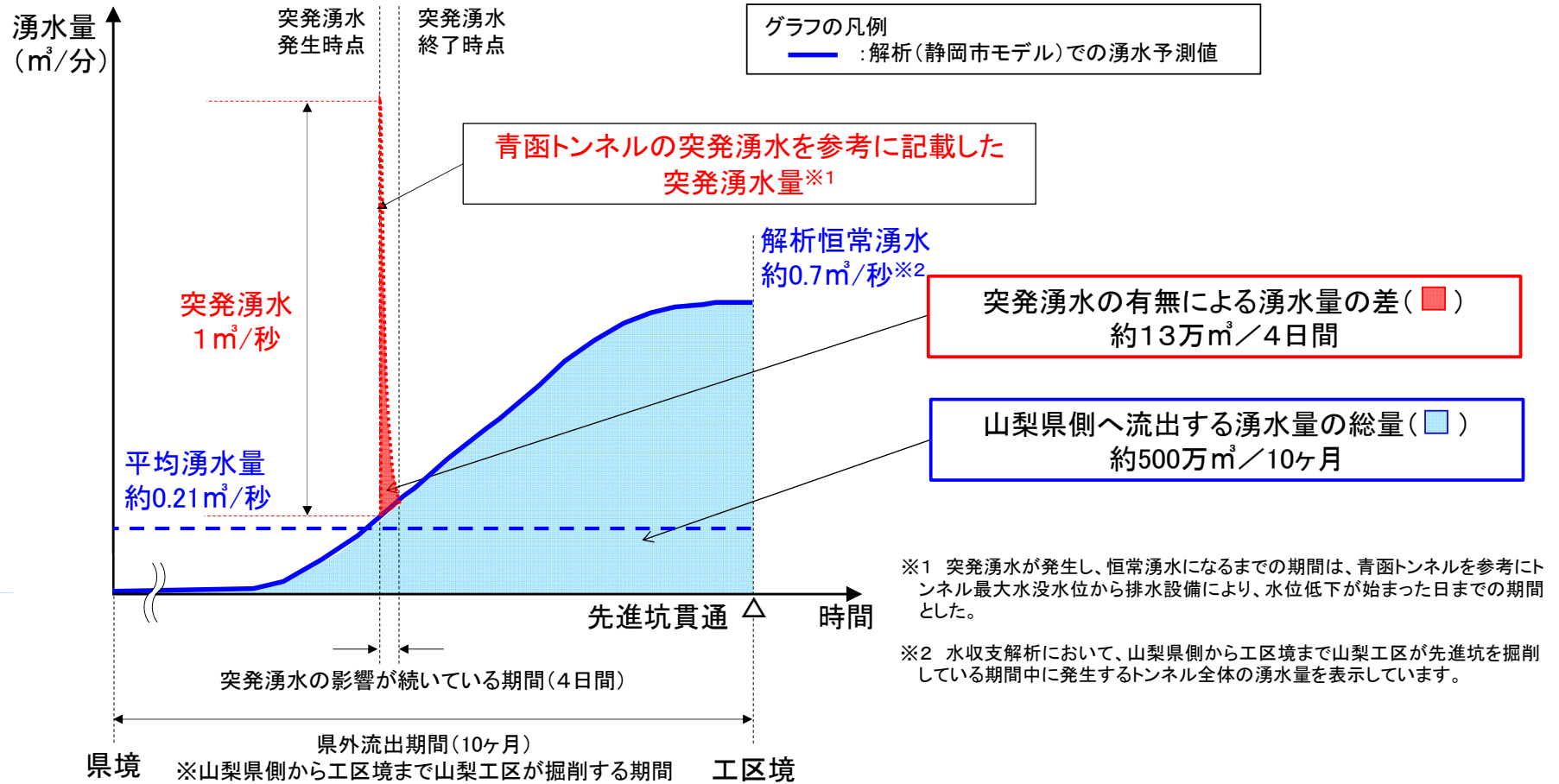


図 7-7 モデルケースによる突発湧水量と解析（静岡市モデル）による山梨県側へ流出する湧水量の総量の比較（イメージ）

- ・水資源利用への影響を考える上では、山梨県側へ流れるトンネル湧水の総量が問題になると考えられます。
- ・突発湧水によるトンネル湧水量は、山梨県側へ流出する解析湧水総量約500万 m^3 に含まれるものと考えております。
- ・仮に青函トンネルの事例をもとに想定した突発湧水の総量約13万 m^3 を、図7-7に示す解析での湧水予測総量にそのまま上乘せするにしても、その総量は山梨県側への流出総量約500万 m^3 に比べて、約3%です。

- ・一方、トンネルの掘り方を考える上では、切羽で発生する突発湧水の瞬間的な湧水量が安全性を考える上では重要となってきます。山梨県境付近の断層帯を静岡県側から下り勾配で掘削する場合、1 m^3 /秒の突発湧水が発生すれば、後述するとおり、1時間後には切羽から約170mが水没することになり、安全上の課題が大きいということでもあります。

- ・なお、今回想定した青函トンネルの事例での検討も、あくまで1つの想定結果であり、実際には突発湧水発生時の瞬間的な湧水量が1 m^3 /秒を超えたり、発生期間が延びたり、複数回発生する可能性など、不確実性があります。それらの可能性を考慮し、突発湧水が発生した場合の水資源利用へ影響を及ぼす可能性については、重要度の高いリスクとして、第7章に記載の通りの対応をとってまいります。

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、湧水だけで湛水した場合、トンネル湧水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。
- ・実際には、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程度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 7-8）
- ・実例として、国道482号蘇武トンネルにおける大量の湧水（約8 m³/分（0.133 m³/秒）と崩落土砂（約600 m³）で重機等が埋まった状況を図 7-9 に示します。

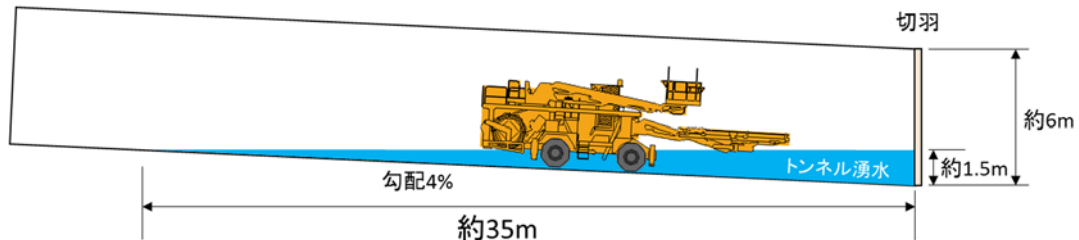


図 7-8 突発湧水発生3分後のトンネル坑内の状況

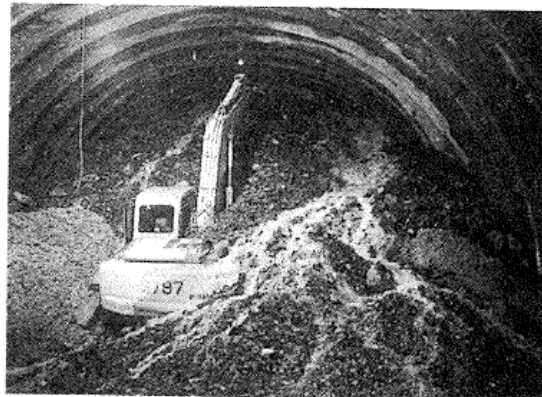


図 7-9 大量湧水と崩落直後の状況

※トンネル技術者のための地相入門（土木工学社）より抜粋

【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600m³の湧水が発生するため、切羽から後方約70m程度、最深部は3.0m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7-10)

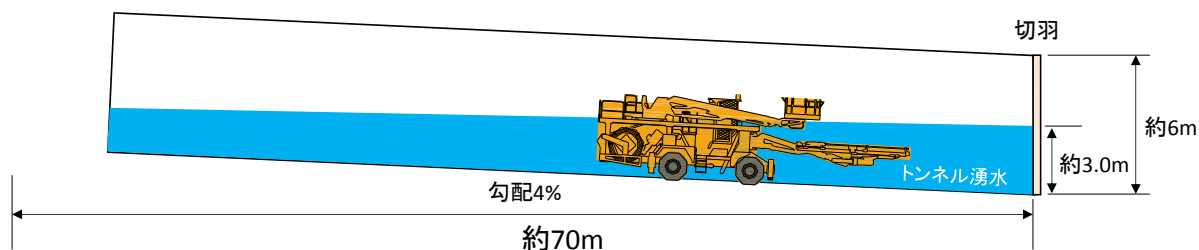


図 7-10 突発湧水発生10分後のトンネル坑内の状況

【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3,500m³の湧水が発生するため、切羽から約170m後方まで水没範囲が広がります。
- ・約170m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。(図7-11)
- ・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。

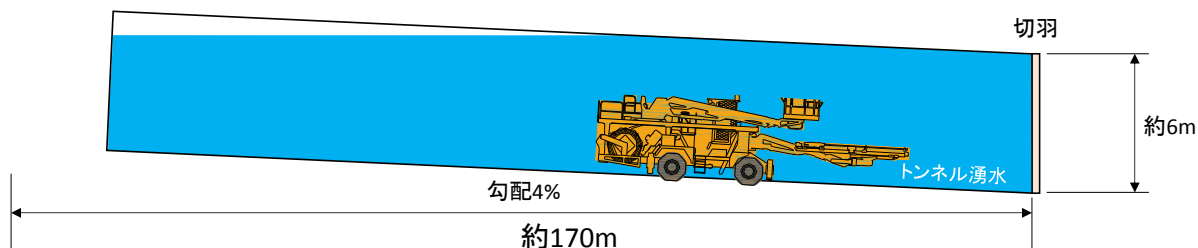
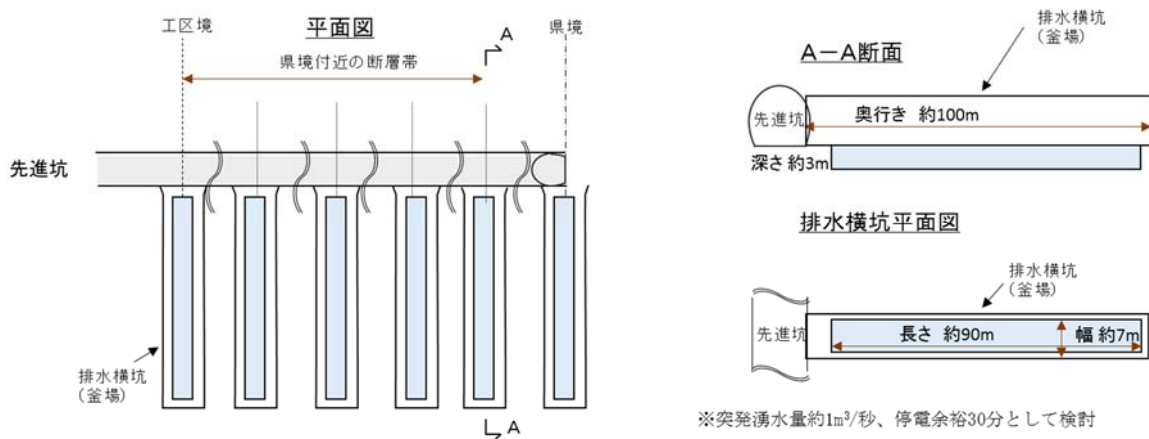


図 7-11 突発湧水発生1時間後のトンネル坑内の状況

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 7-12）。

※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 7-12 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。
- 想定する突発湧水量が $1 \text{ m}^3/\text{秒}$ を超えたり、複数回発生する可能性もあるなど、不確実性があるため、突発湧水に備えて順次釜場を設置しながら、先進坑を掘り進めることは、安全性の確保に課題があります。
- また、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危険が高いこと、排水横坑を備えながら掘削を進めるためにも、切羽と排水横坑との距離をある程度確保しなければならず、工事の安全を確保するという観点でみると課題があります。

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。
- ・ **そのため、リスク管理として山梨県境付近の断層帯は、山梨県側から上向き勾配による施工を考えています。**

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。