

排水—非排水区間が共存する防水型トンネルの 基礎的な水理挙動に関する一考察

淡路 動太¹・砂金 伸治²・日下 敦²・河田 皓介²

¹正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:d-awaji@pwri.go.jp

²正会員 独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

排水—非排水区間の共存する防水型トンネルの水理挙動に関する基本的な特徴を把握するために、単純な地質モデルを用いた3次元浸透流解析を実施した。その結果、(1)トンネル近傍の透水係数の違いが水理挙動の変化速度に大きな影響を持つため、地下水位低下の最低許容レベルが制限される場合には、トンネル近傍の透水係数に加えて、掘削から非排水化を実施するまでの期間についても留意する必要があること、(2)トンネル掘削によるゆるみ域のようなトンネル近傍が高透水状態となるケースでは、排水—非排水区間境界部周辺で湧水量の局所化が顕著となるため、止水壁のような区間境界部での処理によって湧水の局所化を低減することがトンネル構造の安定性を確保する上で重要となること、(3)防水型トンネルによって地下水位の回復率を高めるためには、排水区間での止水注入や止水壁の設置等による坑内湧水量を低減することが重要であることが明らかとなった。

Key Words : water-proof mountain tunnel, hydrological behavior, three-dimensional seepage analysis

1. はじめに

山岳工法により建設されるトンネルは一般に排水構造であるが、近年、トンネル内への導水を行わない非排水構造を持つ防水型トンネルとすることで、地下水位低下などによる周辺環境への負荷を低減する事例が増加している(図-1)。しかし、山岳トンネルの防水化は、静水圧の作用に対する覆工コンクリートの高耐力化や真円に近いトンネル断面形状の採用による掘削断面積の増大、そして、地山の止水性を担保するために行われる薬液注入工等により、建設コストの増大を招き、防水型トンネルの事業の成立性を困難なものとする場合がある。また、トンネル建設に伴う周辺水理場の変動は、各地域の複雑な地質性状に大きく依存するため、防水型トンネルの計画は、特殊トンネルとして事例ごとに独自の検討が進められることが多い。このように、防水型トンネルの計画、設計は、水理場の評価や覆工構造について必ずしも統一された考え方が示されていない。

本報告では、防水型トンネルにおける水理挙動の基本的な特徴と留意点を把握するために、単純な水理モデルを用いた3次元浸透流解析を実施した。とくに、排水区間と非排水区間が共存する防水型トンネルに着目し、単純化した地質モデルにおいて、地山の透水係数、トン

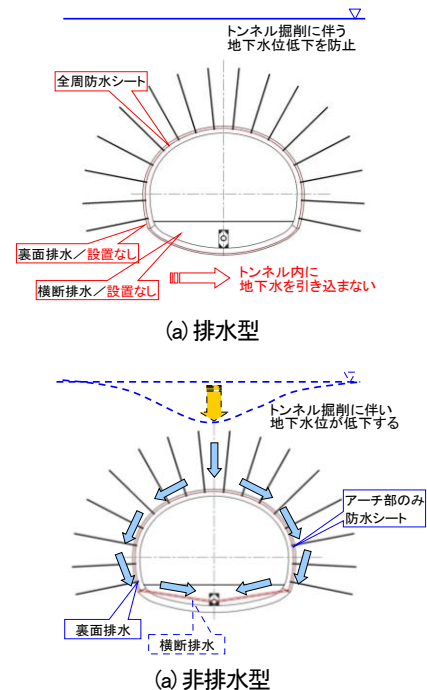


図-1 排水型と非排水型構造の相違点

ネル近傍の透水係数、および排水—非排水区間境界部の止水処理の有無等の影響についてパラメータスタディを行い、防水型トンネル周辺の基礎的な水理挙動について考察を行った。

2. 防水型トンネルの実施タイプと採用目的

防水型トンネルが計画された 15 の道路トンネルにおいて事例分析を行い、採用目的と実施タイプの関係について整理を行った。防水型トンネルは、地下水位低下の許容レベルに応じて、トンネル内への導水を掘削時から低減するもの（Type I：掘削時防水型と称する）^{たとえば 1)}と掘削時の地下水位の低下は許容し、供用期間中に地下水位の回復を図るもの（Type II：掘削後防水型と称する）^{たとえば 2), 3)}に分類できる。本事例分析では、図-2 に示すように Type I の採用割合は全体の 3 割程度である。Type I と Type II の両者の最終的な覆工構造は基本的に同一であるが、Type I では、掘削時のトンネル内への導水を抑止するために、基本的に掘削前に薬液注入工等を実施し、トンネル周辺地山を止水構造とするのが特徴である。ただし、注入範囲については現場毎に検討されており、トンネル掘削によるゆるみ範囲や過去の施工事例等からトンネルの周囲 3～10m の範囲に設定されるケースが多い。一方、止水注入工を事前に実施しない Type II では、排水—非排水区間境界部において、非排水区間から排水区間へのトンネル縦断方向の地下水の流下を防止する止水壁の検討が必要である。この止水壁には、ファンカーテングラウトで構築されるケースと、不透水層まで防水型トンネル区間を延長することによって、不透水層を止水壁とするケースが認められた^{たとえば 4)}。このように防水型トンネルでは、区間端末部における地下水の縦断方向の流れへの対処が防水構造構築の要点となっており、各地形、地質条件に応じて慎重に検討が進められている。

また、防水型トンネルの採用目的は、大きく分けて次の 3 つに分類することができる。すなわち、トンネル掘削の影響圏に存在する水源の確保や利水権の保護を目的とする水源保全型、生態系の保全や文化財などへの環境負荷の低減を目的とする自然保護型、そして、地下水位低下による圧密沈下の防止などの近接構造物の影響低減を目的とする変状防止型と言える。図-3 に各採用目的別にみた防水型トンネルの実施タイプの採用傾向を示す。水源保全型では、Type II が採用されるケースが多く、自然保護型や変状防止型では掘削時から水位低下を極力低減させる必要性が高いために Type I が採用されるケースが多いことが分かる。

とくに、保全対象地域が限定できる場合には、トンネル延長上の一部を非排水区間とし、残りを排水区間とすることで、非排水仕様のトンネル区間延長を低減し、事業の経済性を向上させる事例が認められた。排水区間と非排水区間が共存する場合には地形や地質の複雑性に加え、境界部周辺での複雑な水理挙動が想定される。このため、排水—非排水区間が共存する防水型トンネルの合理性を評価するためには、はじめに、一般化した条

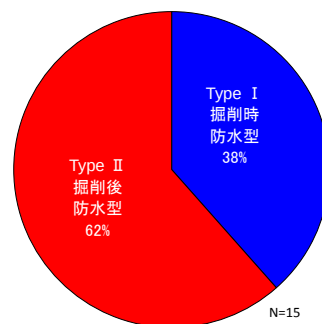


図-2 防水型トンネルの採用比率

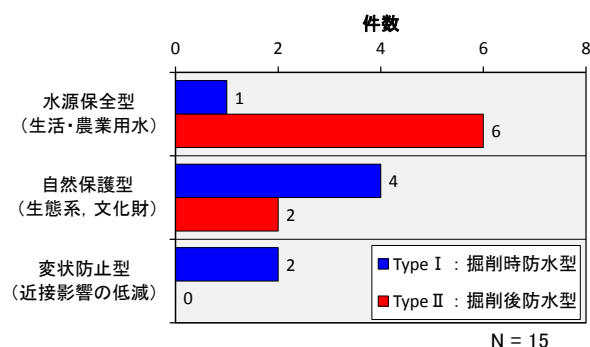


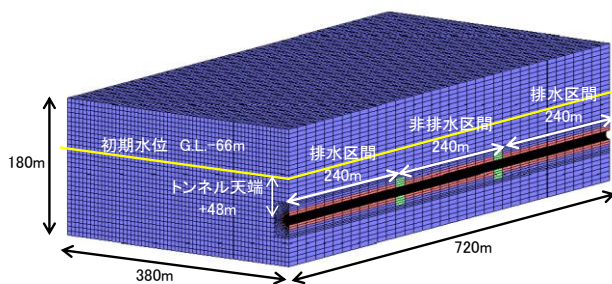
図-3 防水型トンネルの実施タイプごとの採用目的

件下における基礎的な水理挙動について理解を進める必要がある。次章以降では、排水—非排水区間共存型の防水型トンネルについて、単純な地質モデルを用いた 3 次元浸透流解析を行い、トンネル周辺部の基礎的な水理挙動について考察を行う。

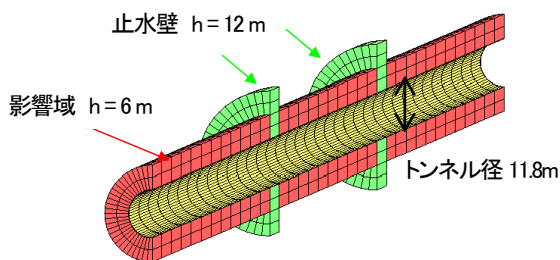
3. 浸透流解析による水理挙動の検討

(1) 解析条件

排水—非排水区間が共存する防水型トンネルにおける基礎的な水理挙動を再現するために、ここでは不圧地下水を持つ均質な地山において地下水面以下でトンネル掘削が行われることを想定し、トンネル延長の中央部に非排水区間、その両側に排水区間が設けられた排水—非排水共存型の防水トンネルを模擬した 3 次元浸透流解析を行った。解析モデルには、比較的透水性の高い地山から難透水性の地山に相当⁵⁾する 1.0×10^{-4} cm/s, 5.0×10^{-5} cm/s, 1.0×10^{-5} cm/s の 3 種類の透水係数を設定した均質な地山 (720m×380m×180m) の中に半径 5.9m の円形トンネルを設置した (図-4)。また、トンネル掘削に伴うゆるみによる高透水帯の形成やトンネル周辺部の止水注入による低透水帯の形成の影響を検討するために、トンネル外周部の 6m 区間を影響域として透水係数を変



(a) 解析モデル全体図



(b) トンネル周辺拡大図

図-4 解析モデル図

表-1 解析ケース一覧

ケース名	透水係数 [cm/s]		
	地山部分	影響域 (6m)	止水壁 (12m)
Case A1	1.0×10^{-4}	ゆるみ: 1.0×10^{-3}	無: 1.0×10^{-4}
Case A2	1.0×10^{-4}	影響無: 1.0×10^{-4}	無: 1.0×10^{-4}
Case A3	1.0×10^{-4}	止水: 5.0×10^{-5}	無: 1.0×10^{-4}
Case A4	1.0×10^{-4}	止水: 1.0×10^{-5}	無: 1.0×10^{-4}
Case B1	5.0×10^{-5}	ゆるみ: 1.0×10^{-4}	無: 5.0×10^{-5}
Case B2	5.0×10^{-5}	影響無: 5.0×10^{-5}	無: 5.0×10^{-5}
Case B3	5.0×10^{-5}	止水: 1.0×10^{-5}	無: 5.0×10^{-5}
Case C1	1.0×10^{-5}	ゆるみ: 1.0×10^{-4}	無: 1.0×10^{-5}
Case C2	1.0×10^{-5}	ゆるみ: 5.0×10^{-5}	無: 1.0×10^{-5}
Case C3	1.0×10^{-5}	影響無: 1.0×10^{-5}	無: 1.0×10^{-5}
Case A1b	1.0×10^{-4}	ゆるみ: 1.0×10^{-3}	有: 1.0×10^{-6}
Case A2b	1.0×10^{-4}	影響無: 1.0×10^{-4}	有: 1.0×10^{-6}
Case A3b	1.0×10^{-4}	止水: 5.0×10^{-5}	有: 1.0×10^{-6}
Case B1b	5.0×10^{-5}	ゆるみ: 1.0×10^{-4}	有: 1.0×10^{-6}
Case B2b	5.0×10^{-5}	影響無: 5.0×10^{-5}	有: 1.0×10^{-6}
Case C1b	1.0×10^{-5}	ゆるみ: 1.0×10^{-4}	有: 1.0×10^{-6}
Case C2b	1.0×10^{-5}	ゆるみ: 5.0×10^{-5}	有: 1.0×10^{-6}

化させて解析を実施した。また、排水—非排水区間境界部に設置される止水壁の影響を検討するために、止水壁として幅 20m×高さ 12m 区間の透水係数を 1.0×10^6 cm/s に変化させたケースも合わせて解析を行った。各解析ケースにおいて設定した透水係数の一覧を表-1 に示す。

3次元浸透流解析では、初期水位をトンネル天端から 48m (G.L.-66m)，トンネル底盤部から 59.8m の高さで水平方向に設定し、トンネル半断面の設置面と対角を

なす側方境界面を地下水供給のある水位固定境界、その他の境界面は地下水供給のない水位変動境界とした。

はじめに、トンネル掘削時の水位挙動を再現するために、トンネル延長の全壁面を浸出面として、トンネル延長 720m を掘進速度 2.5 m/day で掘削を行うことを想定し、288 日間の非定常解析を実施した。次に、トンネル掘削が完了して水位が下がった状態から、非排水区間のトンネル壁面を非浸出面に設定することで非排水化を再現し、非排水化後、一年間 (365 day) まで非定常解析を行い、地下水位の回復状況および坑内湧水量の経時変化を求めた。

(2) 解析結果と考察

a) トンネル周辺の水位低下状況と地下水流向

図-5(a), (c)に各解析ケースの結果を代表し、Case A1 および Case A3 における非排水化後一年経過した時点での圧力水頭分布を示す。Case A1 は比較的透水性の高い 1.0×10^{-4} cm/s の地山中に、掘削に伴うゆるみの影響を想定して影響圏の透水係数を 1.0×10^{-3} cm/s に高透水化させたケースで、Case A3 は影響圏を止水注入により部分的に難透水化させた影響を想定して透水係数を 5.0×10^{-5} cm/s に低下させたケースである。縦断方向の圧力水頭分布をみると、非排水区間中心部に向かって地下水位の高まりが認められ、これに伴ってトンネル壁面近傍で圧力水頭が高くなっている。非排水区間中心部 (A 断面) における横断方向の圧力水頭分布は、水位固定境界面からトンネル方向に向かって緩やかに低下し、トンネル位置では天端高さより高い位置に一定の水位が保たれており、トンネル覆工への水圧の作用が想定される。一方、排水区間 (B 断面) ではトンネル位置で底盤高まで地下水位が低下し、覆工への水圧の作用は想定されない。また、排水区間のトンネル周辺部を高透水化した Case A1 に比べて、低透水化した Case A3 では、非排水区間における圧力水頭が高くなっており、回復水位も高くなる傾向が認められる。

Case A1 および Case A3 における全水頭分布図を図-5(b), (d)に示す。非排水区間の縦断方向における全水頭分布では、非排水区間の中心から排水区間への地下水流動を示す動水勾配が顕著である。また、非排水区間の横断方向断面 (A 断面) では水位固定境界からトンネル方向に向かって水平方向に近い地下水流動を示す動水勾配が認められる。一方、排水区間では縦断面と横断面 (B 断面) の両方でトンネル中心方向に向かう地下水流動を示す動水勾配が顕著で、とくにトンネル壁面近傍では勾配が大きくなっている。したがって、排水—非排水境界周辺部はトンネル中心方向に向かう地下水流動と非排水区間から排水区間に向かう縦断方向の地下水流動の両者が認められ、地下水が集まりやすい状態になっていると

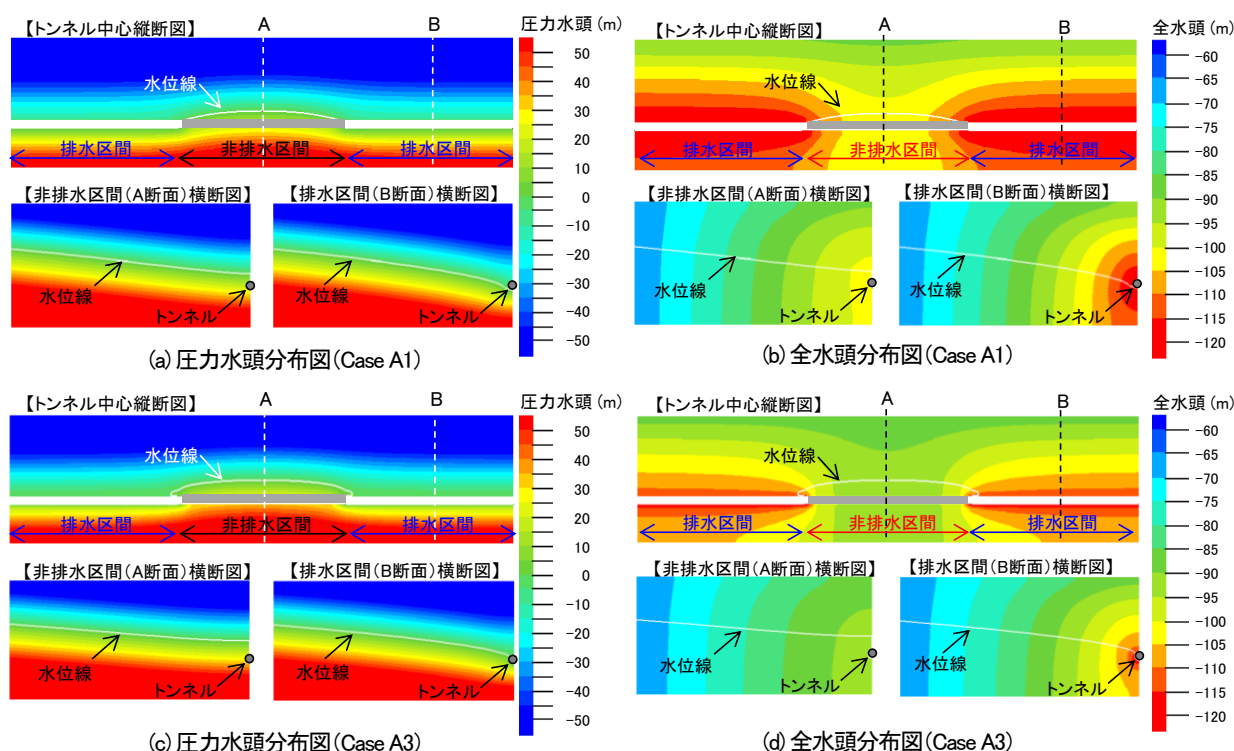


図-5 圧力水頭および全水頭分布に関する解析結果（上段：Case A1，下段：Case A3）

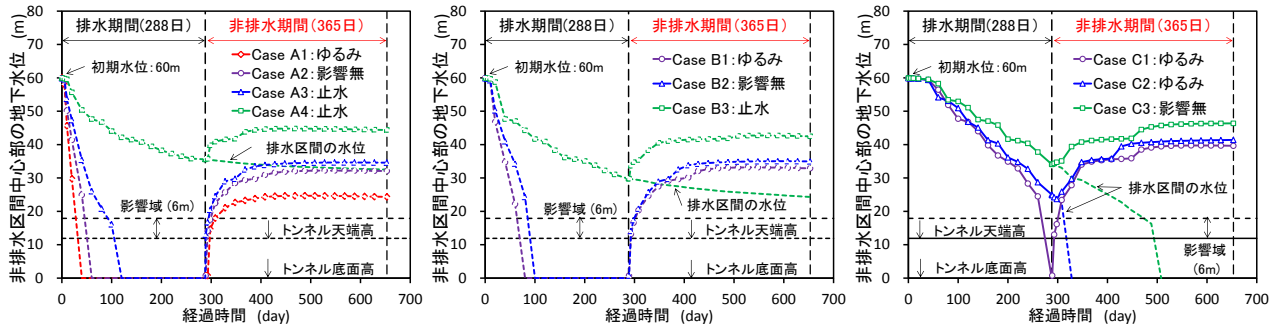
考えられる。また、トンネル周辺部を高透水化した Case A1 では Case A3 に比べて、排水区間におけるトンネル周辺の動水勾配が大きくなっており、トンネル坑内への湧水量が多くなっていることを示している。

b) 地下水位と坑内湧水量の経時変化

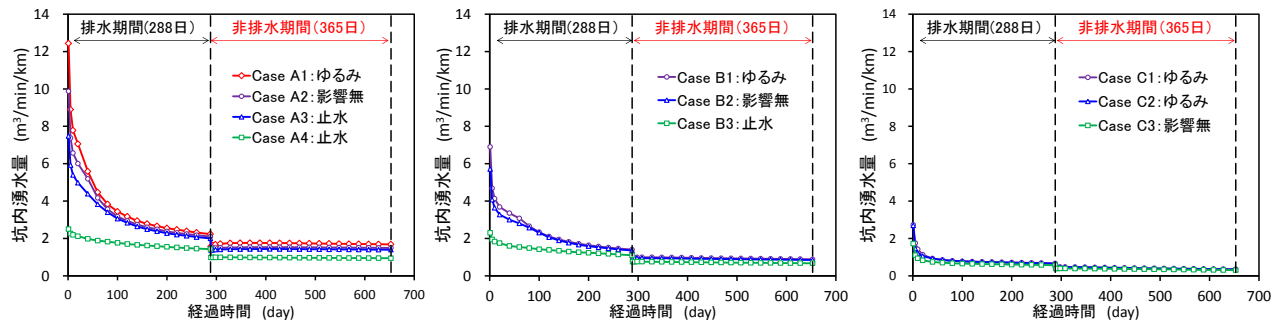
図-6 に防水区間中心位置における水位と坑内湧水量の経時変化を示す。地山の透水係数が $1.0 \times 10^4 \text{ cm/s}$ および $5.0 \times 10^5 \text{ cm/s}$ である Case A と Case B では、ゆるみを考慮したケース (Case A1, B1)，影響圏の透水係数を地山と同程度および $5.0 \times 10^5 \text{ cm/s}$ としたケース (Case A2, A3, B2) のいずれにおいても、掘削後速やかに地下水位がトンネル底盤部まで低下していることが分かる (図-6(a), (b))。また、坑内湧水量は掘削初期の水位が高い状態では著しく高い値を示すが、水位の低下と共に定常状態に近づく挙動を示す (図-6(d), (e))。しかし、影響圏の透水係数を $1.0 \times 10^5 \text{ cm/s}$ まで低下させたケース (Case A4, B3) では、トンネル掘削後の地下水位の低下速度は緩やかとなり、288 日後でも地下水位はトンネル位置まで低下せず (図-6(a), (b))，坑内湧水量の値も低い値で比較的安定した挙動を示している (図-6(d), (e))。地山自体の透水係数が $1.0 \times 10^5 \text{ cm/s}$ となる Case C では、トンネル掘削の影響圏を高透水化させたケースでも、掘削に伴う地下水位の低下速度に大きな違いは認められず (図-6(c))，坑内湧水量においてもその差は小さい (図-6(f))。これは、トンネル周辺が

高透水化しても、基本となる地山の透水係数が小さいため、地下水の移動速度が遅く、トンネル側への地下水供給量が制限されているためと考えられる。一方、基本となる地山の透水係数が高い場合には、地下水の移動速度も速くなり、トンネルに対して地下水の供給を十分に行うことができるため、トンネル周辺部での透水係数の変化が与える影響が大きくなると考えられる。

トンネル掘削後 288 日でトンネル中心部を非排水化すると、すべてのケースで地下水位が上昇に転じ、非排水化後一年で、回復水位は定常状態に近い挙動を示している (図-6(a), (b))。また、トンネルの非排水化に伴って、速やかに坑内湧水量が低下し、その後は顕著な変動を示さない。なお、影響圏の透水係数を $1.0 \times 10^5 \text{ cm/s}$ まで低下させた Case A4 および Case B3 では、トンネル掘削後 288 日の時点で、水位はトンネル位置まで低下しない挙動を示しているが、図中の点線で示した排水区間における地下水位挙動は、水位低下速度がより緩慢となり、非排水化後一年が経過しても、排水区間の地下水位はトンネル高さまで低下しない結果となった (図-6(a), (b))。一方で、地山の透水係数を $1.0 \times 10^5 \text{ cm/s}$ とした Case C でも、トンネル掘削後 288 日では地下水位がトンネル天端の高さまで低下していないが、地下水流動が緩慢なため、トンネル中心区間の非排水化後も排水区間における水位の低下速度は大きな変化を示さず、一定の速度で地下水位が低下していき、非排水化後

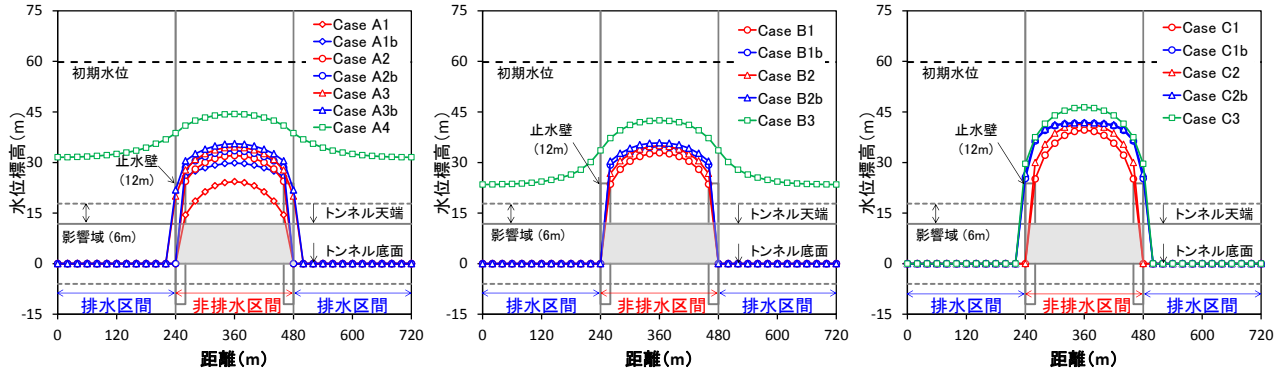


(a) 地下水位: 地山透水係数 = 1.0×10^{-4} cm/s (b) 地下水位: 地山透水係数 = 5.0×10^{-5} cm/s (c) 地下水位: 地山透水係数 = 1.0×10^{-5} cm/s

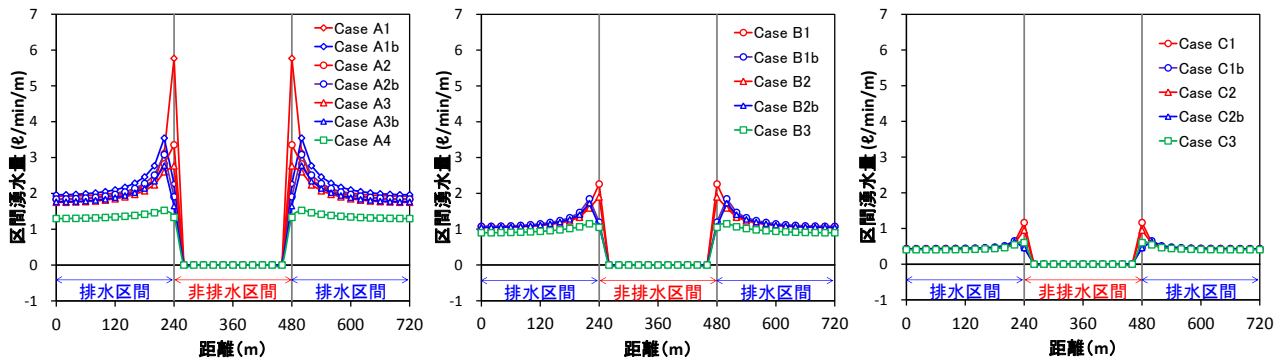


(d) 坑内湧水量: 地山透水係数 = 1.0×10^{-4} cm/s (e) 坑内湧水量: 地山透水係数 = 5.0×10^{-5} cm/s (f) 坑内湧水量: 地山透水係数 = 1.0×10^{-5} cm/s

図-6 防水区間中心位置の地下水位（上段）および坑内湧水量（下段）の経時変化に関する解析結果



(a) 地下水位: 地山透水係数 = 1.0×10^{-4} cm/s (b) 地下水位: 地山透水係数 = 5.0×10^{-5} cm/s (c) 地下水位: 地山透水係数 = 1.0×10^{-5} cm/s



(d) 坑内湧水量: 地山透水係数 = 1.0×10^{-4} cm/s (e) 坑内湧水量: 地山透水係数 = 5.0×10^{-5} cm/s (f) 坑内湧水量: 地山透水係数 = 1.0×10^{-5} cm/s

図-7 トンネル縦断方向の水位分布（上段）および区間湧水量分布（下段）に関する解析結果

一年以内にはトンネル底盤の高さまで地下水位が低下する結果となった。

以上のように、地下水流動の経時変化を見ると、地山の透水係数が 1.0×10^{-4} cm/s や 5.0×10^{-5} cm/s 程度のケースでは、トンネル掘削やトンネルの非排水化等に対して水理挙動は敏感に応答し、速やかに水位変動が生じるが、 1.0×10^{-5} cm/s 程度では水理挙動は緩慢となり、定常状態に達するまでには多くの時間を有することを示唆する結果となった。したがって、防水型トンネルにおいて、地下水位低下の最低許容レベルに制限が設けられるような場合には、トンネル周辺の透水係数に加えて、掘削から非排水化までの期間についても留意する必要があると考えられる。

c) 排水—非排水境界部の水理挙動

地山およびトンネル周辺の影響域の透水係数を変化させたケースに加え、排水—非排水区間の境界部に止水壁を設置した各解析ケースの縦断方向の地下水位分布図を図-7(a)~(c) に示す。地山の透水係数が高く、さらに影響圏を高透水化した Case A1 では、トンネル周辺を高透水化させていない Case A2 や Case A3 に比べて非排水区間全体で地下水位の回復率が小さくなっている。しかし、Case A1 に止水壁を設置した Case A1b では、Case A2 や Case A3 とほぼ同程度まで非排水区間の地下水位が回復していることが分かる (図-7(a))。つまり、トンネル周辺にゆるみ域のような高透水ゾーンができていても、止水壁を構築することによって非排水区間から排水区間への地下水流動を抑制することができれば、ゆるみ域形成に伴う水位の低下を軽減できる可能性がある。しかし、その他のケースで認められるように基本的な回復水位が止水壁の高さを超えている場合に止水壁を設置しても、回復水位の高さには顕著な違いは認められないことが分かる (図-7(a)~(c))。

トンネル坑内への区間湧水量 (トンネル延長上の各区間の単位延長あたりのトンネル壁面流入量, $\ell/\text{min}/\text{m}$) の縦断方向分布図を図-7(d)~(f) に示す。また、図-8 に各ケースにおける坑内湧水量 (全湧水量を単位距離あたりで平均した値) と区間湧水量の最大値、および非排水区間における最大回復水位に関する解析結果の一覧を示す。止水壁が設置されていないケース (Case A1, A2, B1, B2, C1, C2) では排水—非排水境界部直近で区間湧水量のピークを持ち、とくにトンネル周辺を高透水化させた Case A1 では排水—非排水区間境界部における区間湧水量の局所化が顕著である。一方、止水壁を設置したケース (Case A1b, A2b, B1b, B2b, C1b, C2b) では排水—非排水境界部にかけて区間湧水量は増大するものの、止水壁のないケースに比べて、坑内湧水量に大きな違いは認められないが、区間湧水量の局所化は低減していることが分かる。また、トンネル周辺を高透水化させ

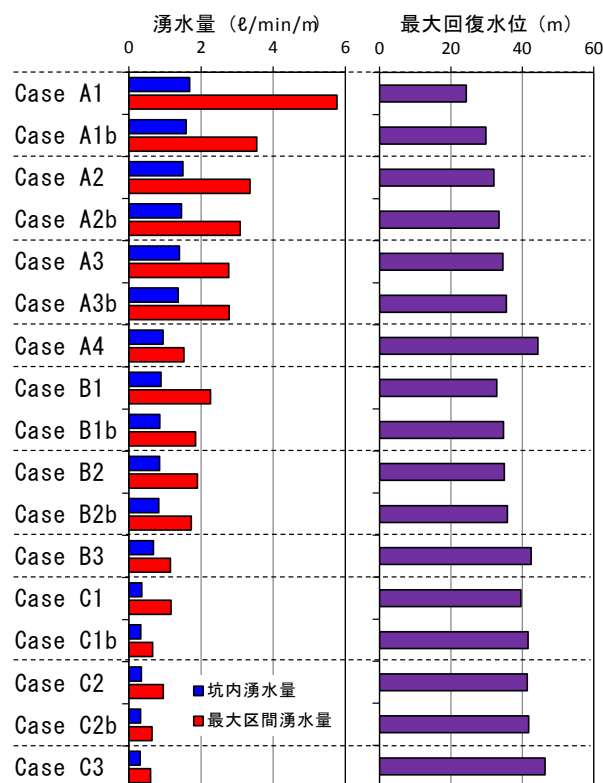


図-8 坑内湧水量、最大区間湧水量および最大回復水位に関する解析結果一覧

た化させたケースでは、止水壁の有無による最大区間湧水量の差が顕著であるが、高透水化させていないケースでは回復水位および区間湧水量への止水壁の影響は顕著ではない (図-8)。この結果は、周辺地山よりもトンネル壁面近傍で高透水帯が形成されるときには、止水壁を区間境界部に設置することにより、高透水帯を非排水区間から排水区間へ縦断方向に流れる地下水流動が抑制され、排水—非排水区間境界部での坑内湧水の局所化を緩和できる可能性を示している。

以上の検討により、排水—非排水境界を持つ防水型トンネルでは、区間境界部での回復水位にギャップが生じ、区間湧水量が局所化する傾向が認められた。とくに、ゆるみ域のようなトンネル周辺が高透水状態になることが想定されるケースでは、止水壁のような区間境界の処理を行わないとトンネル坑内湧水の局所化が顕著となる傾向が認められる。本解析で得られた坑内湧水量 $1 \sim 2 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ は日本トンネル技術会(1983)で報告されている地質別に見たトンネル湧水量の値⁹⁾の中では破碎帯の多い火山岩や深成岩の値に相当している。また、Case A1において局所的に増大している区間湧水量約 $6 \ell/\text{min}/\text{m}$ の値は 50m ピッチで設置した横断排水を想定すると、約 $300\ell/\text{min}$ の湧水量が集まる規模に相当している。このため、排水—非排水境界部近傍では、

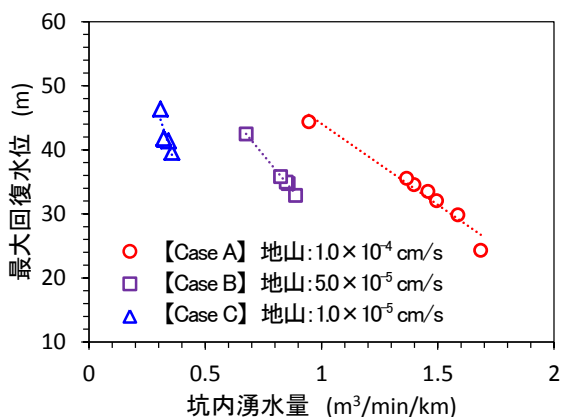


図-9 坑内湧水量と最大回復水位の関係

区間湧水量の局所化に見合った導水処理を検討し、排水区間における覆工背面の地下水位上昇を防止することで、覆工に水压を作用させない配慮が必要になると考えられる。たとえば、区間湧水量の局所化を考慮に入れた横断排水工のピッチや排水孔の大口径化等を検討し、確実に湧水をトンネル坑外へ導水する処置を行うこと等が考えられる。このように、排水—非排水区間が共存する防水型トンネルでは、排水区間のトンネル覆工の安定性を確保するために、排水区間の適切な排水性能を確保し、覆工背面水位の上昇に留意する必要があると考えられる。

d) 最大回復水位と坑内湧水量の関係

図-9 に各解析結果における非排水区間の最大回復水位と坑内湧水量の関係を示す。この図からも明らかなように、基本的に回復水位の高さは坑内湧水量と負の相関を持つことが分かる。また、ベースとなる地山の透水係数によって定まるトンネル側への地下水供給能力の違いによって、回復水位と坑内湧水量の関係は異なるトレンドを示すことが示唆される。いずれにしても、回復水位を高くするためには、坑内への湧水量を低減することが根本的な対策の考え方となり、そのために、排水区間での止水注入や、止水壁の設置、適切な非排水区間長の設定等による坑内湧水量低減を主眼に置いた対策を検討することが重要であると考えられる。

4. まとめ

排水—非排水区間が共存する防水型トンネルの基礎的な水理挙動に関する3次元浸透流解析の結果から、以下の知見が得られた。

- (1) トンネル周辺地山の透水係数の違いにより、トンネル掘削やトンネルの非排水化等に対して水理挙動の変化速度に顕著な違いが認められるため、地下水位の最低許容レベルに制限がある場合には、トンネル

壁面近傍の透水係数に加えて、掘削から非排水化までの期間についても留意する必要がある。

- (2) 排水—非排水区間が共存する防水型トンネルでは、区間境界部で区間湧水量が局所化する傾向が認められることから、排水区間のトンネル覆工の安定性を確保するために、区間湧水量の局所化に見合った導水処理や止水壁の設置等により、適切な排水性能を確保することで、覆工背面水位の上昇を防止する必要がある。
- (3) 防水型トンネルによる回復水位を高く保つためには、坑内湧水量を低減することが基本的な考え方であり、そのために、排水区間での止水注入等や、止水壁の設置、適切な非排水区間長の設定等による坑内湧水量低減を主眼に置いた対策の検討を行うことが重要である。

なお、本研究で行った数値解析は事象を極端に単純化したモデルであるため、実際の検討には地形や地質条件の複雑性、降雨や流水などの涵養条件等の各検討対象に応じた個別条件を十分に吟味することが必要である。今後は坑内湧水の局所化に見合った排水設備の検討や覆工背面の水位上昇メカニズム等の検討を進め、より合理的な防水型トンネルの設計手法について考察を進めていく予定である。

謝辞： 検討を行うにあたり、対象トンネルの設計、施工条件、計測データ等をご提供頂いた国土交通省の関係各位に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 足立賢一，千場洋，吉富幸雄，野中良裕：山岳トンネルにおける高水压ウォータータイトの施工—圏央道 八王子城跡トンネル—，トンネルと地下，Vol.38，No.11，pp.785-792，2007。
- 2) 森勝利，岡村貴彦，諏訪至：都市部山岳トンネルにウォータータイト構造を採用—さがみ縦貫道路 愛川トンネル—，トンネルと地下，Vol.40，No.10，pp.725-735，2009。
- 3) 石垣弘規，山根丈，藤田一宏：周辺水文環境を総合的に分析しトンネルを施工—名護東道路 2 号トンネル—，トンネルと地下，Vol.41，No.11，pp.843-849，2010。
- 4) 狩野浩資，景山浩孝，安部学：流域の水利用への影響を考慮したトンネル構造—中国横断自動車道尾道松江線—，トンネルと地下，Vol.43，No.11，pp.839-845，2012。
- 5) 河野伊一郎：地下水工学，鹿島出版会，p.17，1983。
- 6) (社)日本トンネル技術協会：トンネル工事に伴う湧水濁水に関する調査研究（その2）報告書，p.122，1983。

(2014. 9. 15 受付)

A STUDY ON HYDROLOGICAL BEHAVIOR OF WATER-PROOF MOUNTAIN TUNNELS WHICH HAVE BOTH DRAINAGE AND UNDRAINAGE SECTIONS

Dohta AWAJI, Nobuharu ISAGO, Atsushi KUSAKA and Kosuke KAWATA

To understand basic hydrological behavior of water-proof mountain tunnels which have both drainage and undrainage sections, three-dimensional seepage analysis under simple geological conditions have been conducted. As a result, the following findings are obtained: (1) the permeability of ground around the tunnel and the period from excavation to water-proofing of tunnel are important for control of minimum groundwater level because the differences of permeability around the tunnel have strong influences on the fluctuation velocity of groundwater level, (2) the measures to reduce the permeability of the ground at the boundary between drainage and undrainage sections, such as fan curtain grouting, are important for local increase of water inflow around the section boundary in the case of forming of high permeability zone around tunnel with excavation, and (3) the measure to reduce the water inflow, such as chemical grouting and water-proof wall, are important for ensure the recovery rate of groundwater level.