

# 防水型トンネルにおける基礎的な水理挙動 ～排水—非排水区間境界部に関する留意点～

淡路動太・砂金伸治・日下 敦・河田皓介

## 1. はじめに

近年、環境負荷低減に対する社会的な関心の高まりと共に、防水型トンネルを採用し、地下水環境へ配慮しながらトンネル建設を行う事例が増加してきている。標準的な山岳工法のトンネルは排水構造を持ち、周辺の地下水位を下げ、覆工コンクリートへの水圧の作用を防止するのが一般的である(図-1(a))。一方、防水型トンネルでは、トンネル掘削による地下水位低下を抑制するために、トンネル全周をシート防水材で覆い、非排水構造とすることで、覆工コンクリートへの水圧の作用に対する高耐力化が必要になる(図-1(b))。また、トンネル周辺地山の止水性を担保するために行われる補助工法等の検討も必要になる場合がある。このため、防水型トンネルの設計には、トンネル建設に伴う水理挙動を正確に把握することが重要になる。しかし、トンネル建設に伴う水理挙動は、各地域の複雑な地質性状に依存するため、統一された考え方を示すことは難しい状況であった。一方、防水型トンネルに関する水理挙動を理解するためには、単純な水理モデルにおけるトンネル掘削と防水化に伴う水理挙動の基本的な性質について整理することが有効であると考えられる。本稿では、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、単純な水理モデルを用いた3次元浸透流解析を行い、トンネル近傍の透水係数や、排水—非排水区間の境界部における止水壁の影響等について考察した結果を報告する。

## 2. 防水型トンネルの建設条件と採用目的

ここでは、防水型トンネルが計画された20の道路トンネルについて事例分析を行い、防水型トンネルの採用目的と建設条件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 1:掘削時防水型と称する)<sup>1)</sup>

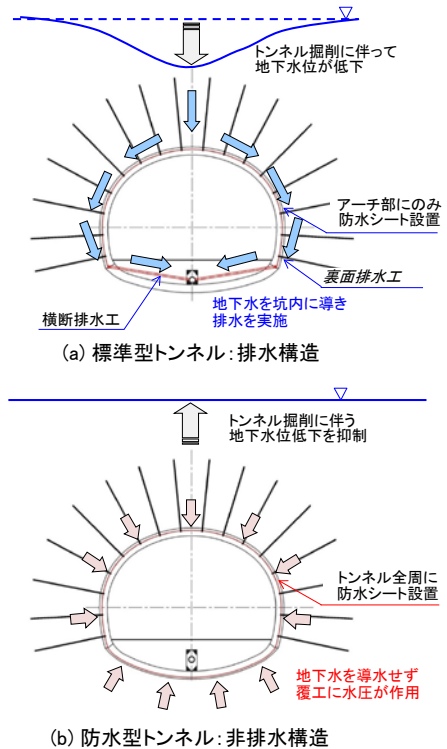


図-1 標準型トンネルと防水型トンネルの違い

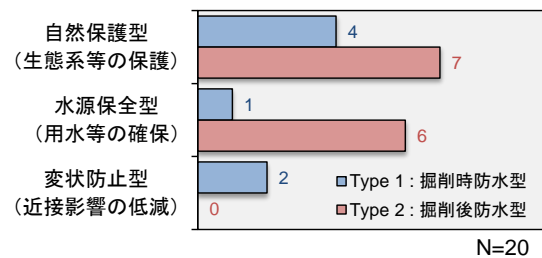


図-2 防水型トンネルの実施タイプと採用目的

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を回復するもの(Type 2:掘削後防水型と称する)<sup>2)</sup>に分類できる。Type 1とType 2における覆工構造は基本的に同一であるが、Type 1では、掘削時のトンネル内への導水を抑制するために、基本的に掘削前に地山改良等を実施し、トンネル周辺地山の止水性を高めるのが特徴である。一方、Type 2では、止水注入工を事前に実施しないため、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流動に対する対策が必要である。

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、生態

Basic Hydrological Behavior of Waterproof Mountain Tunnels which Have Both Drainage and Undrainage Sections

系の保全などを目的とする自然保護型、トンネル掘削の影響圏に存在する用水等の水源の確保を目的とする水源保全型、そして、地下水位低下による周辺地盤の圧密沈下などによる近接構造物の変状防止を目的とする変状防止型である。図-2に各採用目的別にみた防水型トンネルの実施タイプの傾向を示す。Type 1は掘削時から水位低下を極力低減させるため、自然保護型や変状防止型で採用されるケースが多いが、水源保全型では、Type 2が採用されるケースが多いことが分かる。また、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合理性を向上させる事例も認められた。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ため、より慎重な検討が必要になると考えられる。

### 3. 浸透流解析による水理挙動の検討

#### 3.1 解析条件

本稿に用いた解析モデルの概要を図-3、図-4に示す。ここでは、不圧地下水を持つ均質地山でのトンネル掘削を想定し、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を持つ円形トンネルの半断面モデルにより、3次元浸透流解析を行った。初期水位はトンネル天端から48mに設定し、トンネル設置面との対角面を地下水供給のある水位固定境界、その他の境界面を地下水供給のない水位変動境界とした。

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。地山部は比較的透水係数の高い $1.0 \times 10^{-4}$  cm/secを設定した。また、トンネル外周部6mを掘削影響域として透水係数を変化させた(図-4)。ここでは、トンネル掘削に伴う掘削影響域のゆるみの影響を $1.0 \times 10^{-3}$  cm/sec程度と想定し、地山改良による低透水化は $1.0 \times 10^{-5}$  cm/secとした。さらに、区間境界部の止水壁として、トンネル外周部12mを透水係数 $1.0 \times 10^{-6}$  cm/secに設定した(図-4)。

はじめに、トンネル掘削時の水位挙動を再現するため、トンネル部の全壁面を浸出面とし、288日間(トンネル延長720mを2.5m/dayで掘削)の非定常解析を実施した。次に、トンネル掘削によって水位が下がった状態から、非排水区間のト

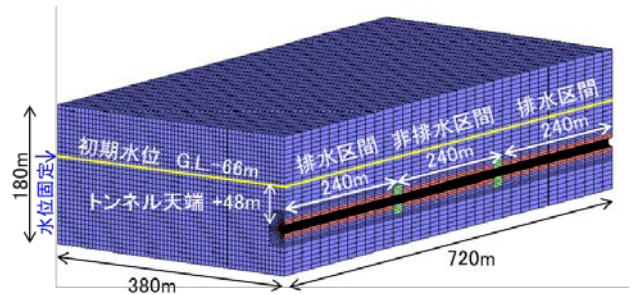


図-3 解析モデル概要図

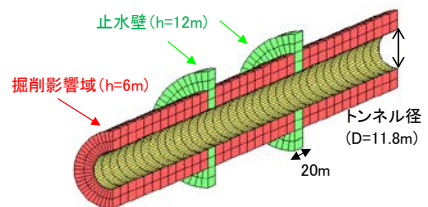


図-4 解析モデルトンネル部拡大図

表-1 解析ケース一覧

ケース名	透水係数 (cm/sec)		
	地山	掘削影響域 (6m)	止水壁 (h=12m)
Case 1a	$1.0 \times 10^{-4}$	ゆるみ $1.0 \times 10^{-3}$	無 $1.0 \times 10^{-4}$
Case 1b	$1.0 \times 10^{-4}$	ゆるみ $1.0 \times 10^{-3}$	有 $1.0 \times 10^{-6}$
Case 2a	$1.0 \times 10^{-4}$	影響無 $1.0 \times 10^{-4}$	無 $1.0 \times 10^{-4}$
Case 2b	$1.0 \times 10^{-4}$	影響無 $1.0 \times 10^{-4}$	有 $1.0 \times 10^{-6}$
Case 3a	$1.0 \times 10^{-4}$	改良 $1.0 \times 10^{-5}$	無 $1.0 \times 10^{-4}$

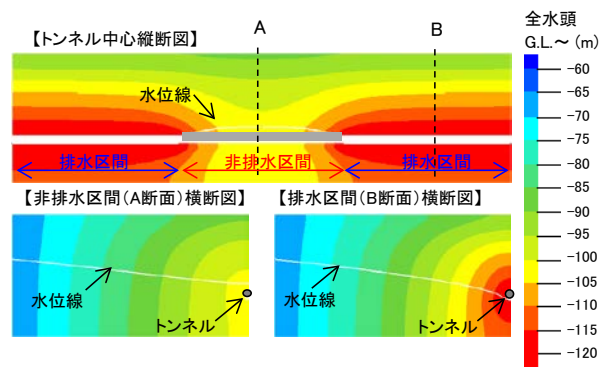


図-5 全水頭分布図 (Case 1a)

ンネル壁面を非浸出面に設定して非排水化を再現し、365日間の非定常解析を行い、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。

#### 3.2 解析結果と考察

##### 3.2.1 トンネル周辺の全水頭分布と地下水流向

各解析ケースの結果を代表し、Case 1aにおける全水頭分布図を図-5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。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横断方向の地下水と非排水区間から排水区間に向かう縦断方向の地下水の両者が集中する状態になっていると考えられる。

### 3.2.2 地下水位と坑内湧水量の経時変化

止水壁が無い場合の非排水区間中心位置における地下水位の経時変化を図-6に、坑内湧水量の経時変化を図-7に示す。掘削影響域を高透水化したCase 1aおよび地山と同等としたCase 2aでは、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(図-6)。坑内湧水量は掘削初期には高い値を示すが、水位の低下と共に速やかに低下して定常状態に近づいている(図-7)。

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、すべてのケースで非排水区間の地下水位が上昇に転じ、一年程度で、回復水位は定常状態に近い挙動を示している(図-6)。坑内湧水量はトンネルの非排水化に伴って即座に低下し、その後は顕著な変動を示さない(図-7)。

一方、掘削影響域の透水係数を $1.0 \times 10^{-5}$  cm/secに低下させたCase 3aでは、掘削後の地下水位の低下速度は緩やかで、288日後でも地下水位はトンネル位置まで低下していない(図-6)。排水区間における地下水位(図-6中の点線)は、非排水化後、一年経過してもトンネル位置まで低下しない結果となった。坑内湧水量は低い値で変動も小さく安定した挙動を示している(図-7)。

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 $1.0 \times 10^{-4}$  cm/sec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、掘削影響域を $1.0 \times 10^{-5}$  cm/sec程度まで低下させることにより、水理挙動を著しく緩慢にすることができる可能性を示唆する結果となった。

### 3.2.3 排水—非排水区間境界部の水理挙動

止水壁設置の有無を比較した各ケースにおける非排水化1年後の縦断方向の地下水位分布を図-8に示す。掘削影響域を高透水化したCase 1aでは、他のケースに比べて非排水区間全体で地下水位が低いが、Case 1aに止水壁を設置したCase 1bでは、Case 2a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(図-8)。つまり、トンネル

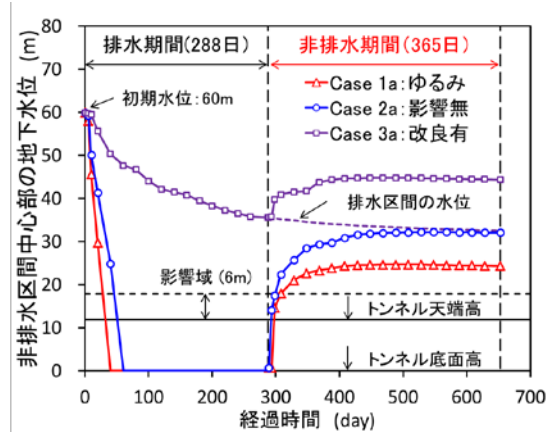


図-6 非排水区間中心部の地下水位の経時変化

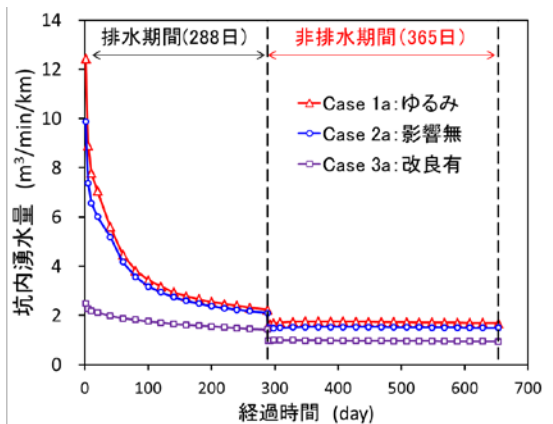


図-7 坑内湧水量における経時変化

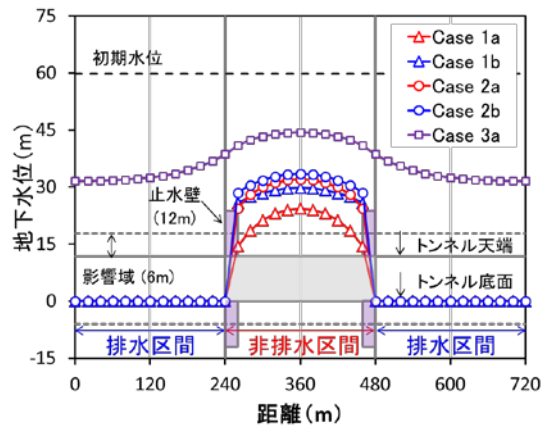


図-8 非排水化1年後の地下水位分布

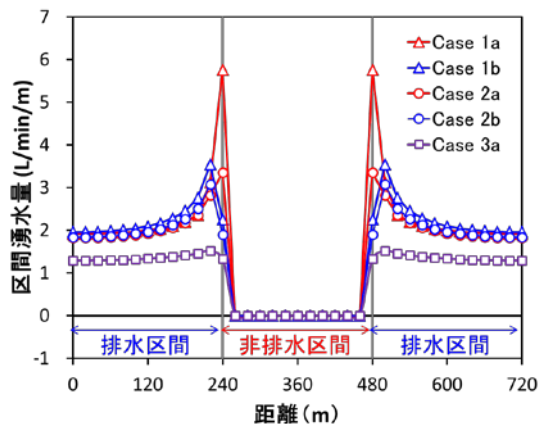


図-9 非排水化1年後の区間湧水量分布

周辺に高透水帯ができていても、止水壁の構築により非排水区間から排水区間への地下水流動が抑制され、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ことを示している。ただし、Case 2aに止水壁を設置したCase 2bでは回復水位の高さに顕著な差は認められないことから、基本的な回復水位の高さが止水壁の高さを超えている場合には、止水壁による回復水位向上への効果は小さいことを示唆している（図-8）。一方、掘削影響域を低透水化したCase 3aでは、排水区間でも水位はトンネル高さまで低下しておらず、それに伴って非排水区間の水位は、その他のケースに比べて高い位置にあると考えられる。

トンネル坑内への区間湧水量（トンネル延長単位長さあたりのトンネル壁面流入量、L/min/m）の縦断方向分布図を図-9に示す。止水壁が設置されていないCase 1aおよびCase 2aでは排水—非排水区間境界部で区間湧水量のピークを示し、特に掘削影響域を高透水化させたCase 1aで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Case 1bおよびCase 2bでは、排水—非排水区間境界部近傍で区間湧水量が大きくなるものの、止水壁のないケースに比べて、区間湧水量の局所化は顕著ではない（図-9）。この結果は、止水壁の設置により、非排水区間から排水区間への縦断方向の地下水流動が抑制され、区間境界部での湧水の局所化が緩和された可能性を示している。

本解析で得られたCase 1aの区間湧水量の最大値約6 L/min/mは、50mピッチの横断排水工を想定すると、約300 L/minの湧水量が一箇所に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、区間湧水量の局所化に見合った導水処理を検討することで、排水区間における覆工背面の地下水位上昇を防止し、覆工に水圧を作

用させない配慮が必要になると考えられる。

#### 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) 透水係数 $1.0 \times 10^{-4}$  cm/sec程度の地山では、トンネル掘削や非排水化等に対して、速やかに水位変動が生じるが、掘削影響域の透水係数を $1.0 \times 10^{-5}$  cm/sec程度にすると、水理挙動が緩慢となる可能性が示唆される。
- 2) 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、境界部での区間湧水量の局所化に対して、適切な排水性能を確保し、覆工背面水位の上昇を防止する必要がある。

本研究で行った数値解析は極端に事象を単純化したモデルであるため、実際の検討には地質条件の複雑性、降雨などの涵養条件等を各検討対象に応じて十分に吟味することが必要である。今後は、防水型トンネルの水位挙動について、計測データとの比較を行い、合理的な防水型トンネルの設計手法について研究を進めていきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 坂巻俊次、粕谷光晴、齋藤宏樹、伊達健介、成田望：地下水環境保全を目的とした非排水構造トンネルの地上注入工と掘削工、トンネル工学報告集、Vol.23、pp.189～196、2013
- 2) 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

淡路動太



国立研究開発法人土木研究所  
道路技術研究グループトンネル  
チーム 主任研究員、博  
(理)  
Dr. Dohta AWAJI

砂金伸治



国立研究開発法人土木研究所  
道路技術研究グループトンネル  
チーム 上席研究員、博  
(工)  
Dr. Nobuharu ISAGO

日下 敦



国立研究開発法人土木研究所  
道路技術研究グループトンネル  
チーム 主任研究員  
Atsushi KUSAKA

河田皓介



国立研究開発法人土木研究所  
道路技術研究グループトンネル  
チーム 専門研究員  
Kosuke KAWATA