

防水型トンネルの設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
 研究期間：平 24～平 26
 担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）
 研究担当者：砂金伸治，淡路動太，日下敦

【要旨】

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、地下水環境への配慮から防水型トンネルを採用する事例が増加してきている。本研究では、防水型トンネルの設計法に関する事例分析、水理挙動解析、覆工構造解析を実施し、防水型トンネルにおける設計の合理性について検討を行った。その結果、地下水環境保全の要求レベルに応じた防水型トンネルの実施タイプを選択することにより設計や施工の合理性を高めることができる可能性を示した。また、防水型トンネルに伴う水理挙動解析では、トンネル周辺地山の透水係数が水理挙動に大きく影響を与えるため、特に、排水—非排水区間が共存する防水型トンネルでは、区間境界部で湧水量の局所化に対して覆工背面地下水の縦断方向への流下防止対策を検討し、覆工背面水位の上昇を防止する必要性を示唆した。また、防水型トンネルの覆工コンクリートの構造設計では、断面形状と設計水頭の関連性を把握し、合理的な設計が可能となる目安を示した。

キーワード：山岳トンネル，防水型トンネル，事例分析，3次元浸透流解析，覆工構造解析

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て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等の防水材で覆うことで非排水構造とするため、水圧の作用に対する覆工コンクリートの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。しかし、防水型トンネルの設計は、各地域の複雑な地質性状に大きく依存し、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。このため、防水型トンネルの構築を合理的に進めるための一つの方法として、設計・施工の両面において体系化された手法の確立が求められている。本研究では、防水型トンネルの設計法に関する事例分析、水理挙動解析、覆工構造解析を実施し、防水型トンネルにおける設計の合理性について検討を行った。

2. 研究方法

2.1 既往の防水型トンネルのデータ分析

防水型トンネルが計画された 20 事例を対象に設計および施工に関する事例分析を行った。

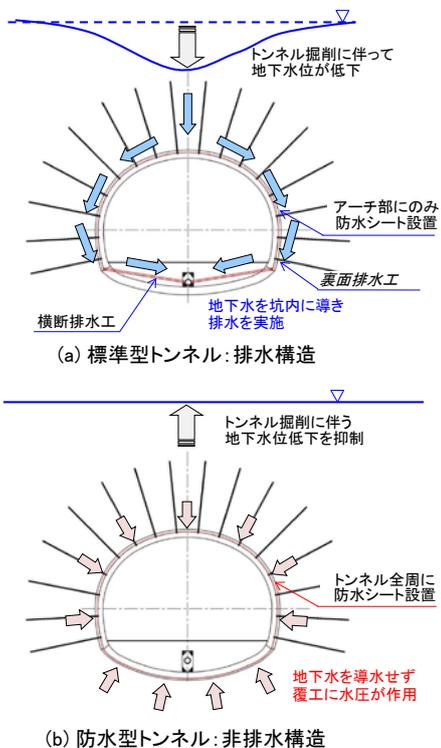


図-1 標準型トンネルと防水型トンネルの違い

2.1.1 施工事例の分析

防水型トンネルの施工事例の分析では、土被り、地山条件、設計水頭、防水型トンネルの実施形式および採用目的について整理を行った。防水型トンネルの実施形式として、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)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を回復するもの (Type 2: 掘削後防水型と称する)²⁾に分類して整理を行った。防水型トンネルの採用目的については、大きく分けて次の3つに分類し整理を行った。すなわち、生態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。

2.1.2 覆工コンクリート設計事例

一般的な山岳トンネルの覆工は、地山の挙動が安定してから施工を行うことが原則であり、この場合は基本的に覆工に力学的機能は付加させない³⁾。一方、防水型トンネルでは、回復した水位が静水圧として覆工に作用することから、基本的にRC構造物として、骨組構造解析等を行い、許容応力度法による断面力照査⁴⁾が実施されている場合が多い。

本研究では内空断面積の縦横比が0.8未満のものを標準形断面、0.8~1.0のものを準円形断面、縦横比1.0のものを真円形断面と分類し、設計事例を比較して検討することを試みた。ここでは、防水型トンネルの覆工コンクリートの設計基準強度、内空断面の断面形状ごとにアーチ部とインバート部の覆工厚および主筋の配筋密度に着目して整理を行った。

2.2 覆工背面における地下水の縦断方向への流下防止対策の検討

2.2.1 検討概要

防水型トンネルに関する水理挙動を理解するためには、トンネル横断方向だけでなく、縦断方向の地下水挙動も考慮した3次元的な再現手法を採用する必要がある。本研究では、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て施工過程を考慮した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の整理を行い、地下水の縦断方向への流下防止対策について検討を実施した。

2.2.2 解析モデル

本研究に用いた解析モデルの概要を図-2、図-3に示

す。ここでは、自由地下水面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。

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 1.0×10^{-4} cm/secに設定した。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-3)。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 1.0×10^{-3} cm/secと仮定し、地山改良による低透水化は 1.0×10^{-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 1.0×10^{-6} cm/secに設定した(図-3、表-1)。

解析ステップとしては、はじめに初期水位をトンネル天端から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。次に、トンネル掘削時の水位挙動を再現するため、トンネルの全壁面を浸出面として288日間(トンネル延長720mを2.5 m/dayでの掘削を想定)の非定常解析を実施した。

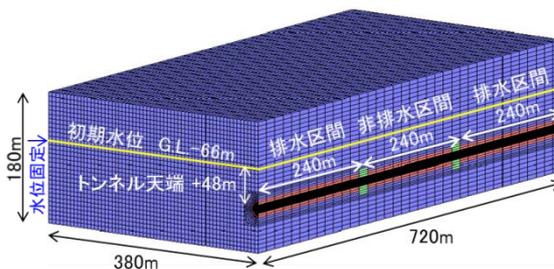


図-2 解析モデル概要図

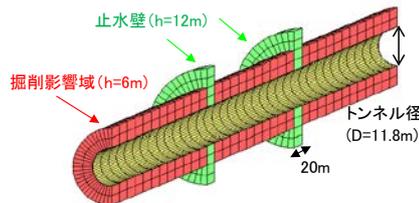


図-3 解析モデルトンネル部拡大図

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 | 1.0×10^{-4} | ゆるみ 1.0×10^{-3} | 無 1.0×10^{-4} |
| Case 1b | 1.0×10^{-4} | ゆるみ 1.0×10^{-3} | 有 1.0×10^{-6} |
| Case 2a | 1.0×10^{-4} | 影響無 1.0×10^{-4} | 無 1.0×10^{-4} |
| Case 2b | 1.0×10^{-4} | 影響無 1.0×10^{-4} | 有 1.0×10^{-6} |
| Case 3a | 1.0×10^{-4} | 改良 1.0×10^{-5} | 無 1.0×10^{-4} |

最終ステップでは、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って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。

2.3 水圧に耐えることができる覆工構造の検討

本研究では骨組構造解析を実施して、RC 構造物として防水型トンネルの覆工コンクリートを設計する際の作用水圧と断面力の基本的な挙動について検討を行った。また、許容応力度法による断面照査法に従い、覆工コンクリートの基準強度、厚さ、鉄筋量の組み合わせに応じた設計耐力を示す M-N 曲線を求め、設計水圧に対する覆工設計の成立性について検討を行った。

本研究で用いた骨組み構造解析は、上述した防水型トンネルでの代表的な内空断面である標準形、準円形および真円形(図-4)のそれぞれについて、自重と水圧を考慮し、トンネル外周部には引張側では未作動となる非線形地盤バネを設置したモデルを用いて検討を行った。

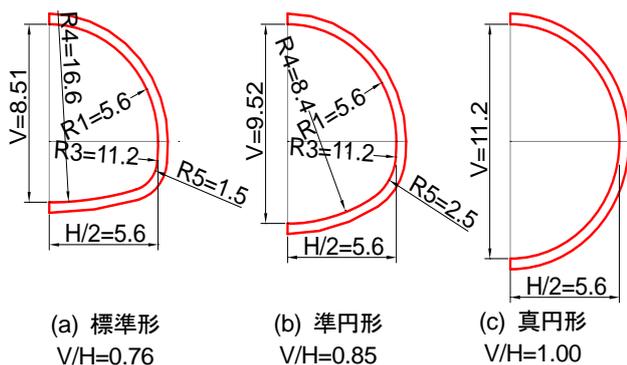


図-4 骨組み構造解析に用いた内空断面諸元

3. 研究結果

3.1 既往の防水型トンネルのデータ分析

3.1.1 防水型トンネルの施工事例の分析結果

図-5 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 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止するために、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。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 の採用が多い傾向にある。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設計の合理性を向上させる事例も一部で認められた。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、区間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。

これまでに検討された防水型トンネルの実施条件について分析した結果を図-6、図-7、図-8 に示す。防水型トンネルは、土被り 1D 未満(D:トンネル掘削幅)の未固結地山から 2D 以上の硬岩まで広い範囲で実施されていることが分かる(図-6、図-7)。また、保全対象である設計水位についても、Type 1 と Type 2 の両

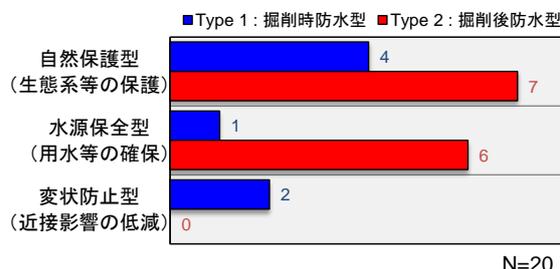


図-5 防水型トンネルの実施タイプと採用目的

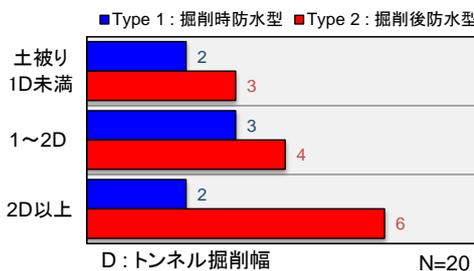


図-6 土被りに関する施工実績



図-7 地山条件に施工実績

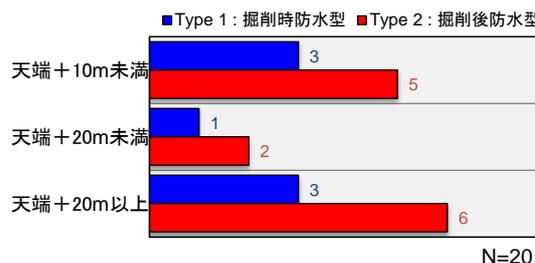


図-8 設計水頭に関する実績

者で様々なケースが認められる (図-8)。

このように、防水型トンネルは、これまでに採用目的や施工条件、設計水頭などについて様々な条件下で計画されてきており、覆工構造や防水機構、水理影響の低減方法について、多くの工夫が実施されている。そして、地下水環境保全の要求レベルに応じた防水型トンネルの実施タイプを選択することにより防水型トンネル建設の合理性を高めることができる可能性があることが分かった。

3.1.2 覆工コンクリート設計事例の分析結果

防水型トンネルの断面形状は、トンネル全周に作用する水圧の大きさにより、インバート半径が大きな標準断面では隅角部で曲げモーメントが増大するため、断面形状をより円形に近づけ、さらにインバート部の耐力をアーチ部に比べて強くする必要がある。一方、完全な円形では覆工の厚さを円形近似したものよりも薄くすることができる場合があるが、施工性の悪化や掘削断面積が増大する。特に、道路トンネルでは、地下鉄や導水路に比べて掘削断面積が比較的大きくなる傾向があるため、トンネル掘削断面形状が建設コストに与える影響は小さくない。このため、施工の合理性が確保出来る範囲で許容応力を満たすように、断面形

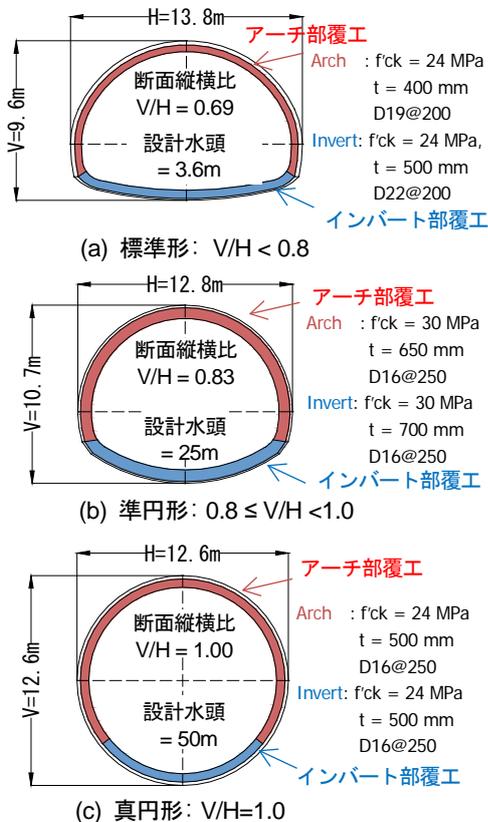


図-9 防水型トンネル覆工の設計事例

状を扁平に近づけて掘削断面積を小さくする試みがなされている。図-9に各設計水圧に対して設計された典型的な防水型トンネルの形状を示す。

道路トンネルにおける覆工コンクリートの設計基準強度は基本的に 18 MPa が用いられているが、図-10

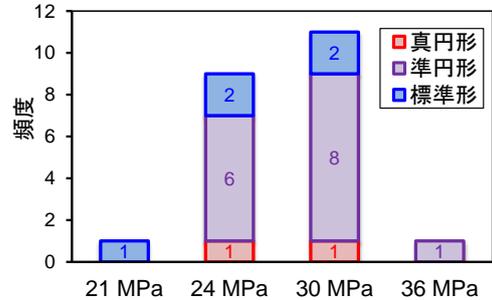


図-10 覆工コンクリート設計基準強度分布

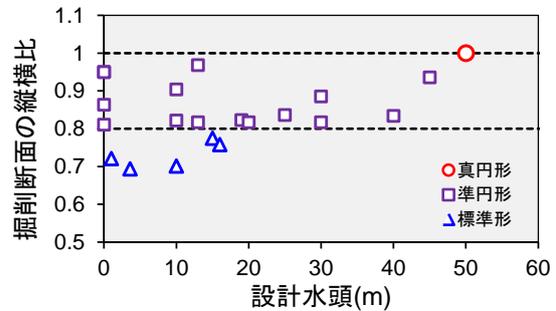


図-11 設計水頭と断面縦横比の関係

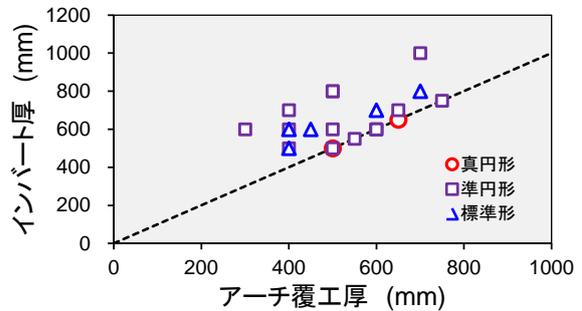


図-12 アーチとインバートの覆工厚の関係

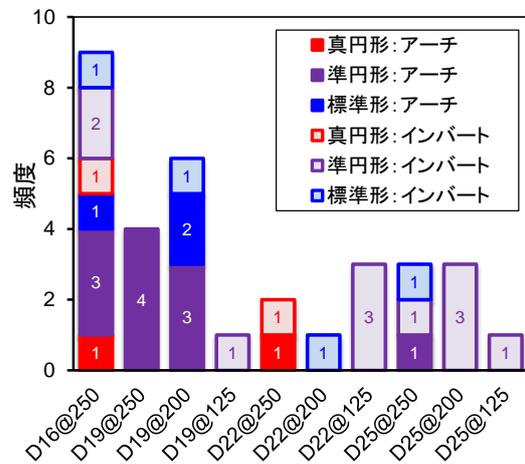


図-13 覆工コンクリートの主筋配筋密度の分布

に示すように防水型トンネルでは、多くのケースで 24～30 MPa が用いられている。

道路トンネルにおいて設計された覆工構造に関する設計水頭と断面縦横比の関係を図-11 に示す。設計実績からは、断面縦横比 0.8 未満の標準形断面で設計されたトンネルでは、設計水頭の最大は 20 m 程度である。また、設計水頭が 50 m に達する所では、トンネル形状は完全な円形として設計されているが、それ以下の設計水頭では断面縦横比も一つのパラメータとして経済的なトンネル形状の検討が行われていることが分かる。

防水型トンネルの覆工コンクリートのアーチ部とインバート部の部材厚の関係を図-12 に示す。一般の道路トンネルの覆工厚は通常部においては 30cm が標準であるが、防水型トンネルでは、より部材厚を厚くすることで高耐力化を実現していることが分かる。真円形断面では、アーチ部とインバート部の厚さは同一である一方で、断面形状がより扁平でインバート部の曲率半径が大きくなるものでは、インバート部の部材厚をより厚くすることで許容応力を満たす設計が行われていることが分かる。

主筋の配筋密度に関する設計実績を図-13 に示す。この図に示されているように、より高い設計水頭に対して設計が行われている準円形断面のインバート部でより配筋密度が高くなる傾向が認められる。

3.2 覆工背面における地下水の縦断方向への流下防止対策の検討結果

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-14 に示す。非排水区間では非排水区間の中心から排水区間への縦断方向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）の両者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勾配が大きくなっている。したがって、

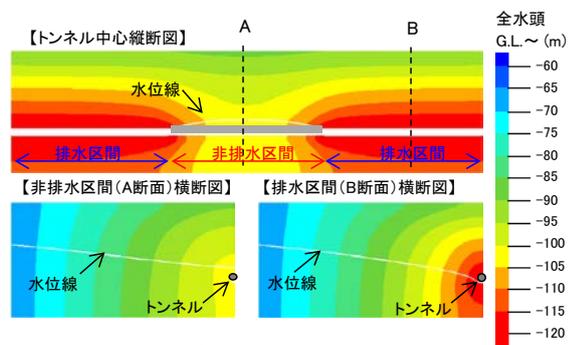


図-14 全水頭分布図 (Case 1a)

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-15 に、坑内湧水量の経時変化を図-16 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-15）。一方、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、ほぼ定常状態となっている（図-16）。

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-15）。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-16）。このように、本解析で再現した排水—非排水区間が共存するトンネルでは、排水区間の坑内湧水が定常的に存在するため、非排水区間の水位は初期水位の高さまでは完全に回復しない結果となっている。

一方、掘削影響域の透水係数を 1.0×10^{-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の高さまで低下していない（図-15）。また、排水区間における地下水位（図-15 の点線）は、非排水化一年経過後でもトンネルの高さまで低下しない結果となった。一方、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-16）。

以上のように、地下水位と坑内湧水量の経時変化に着目すると、地山の透水係数が 1.0×10^{-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て速やかに水位変動が生じるが、掘削影響域を 1.0×10^{-5} cm/sec 程度まで低下させることにより、水理挙動は著しく緩慢にな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-17 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

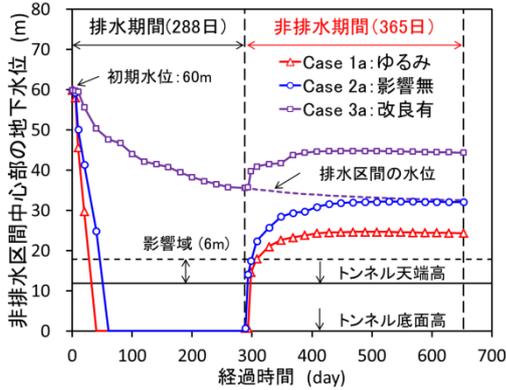


図-15 非排水区間中心部の地下水位の経時変

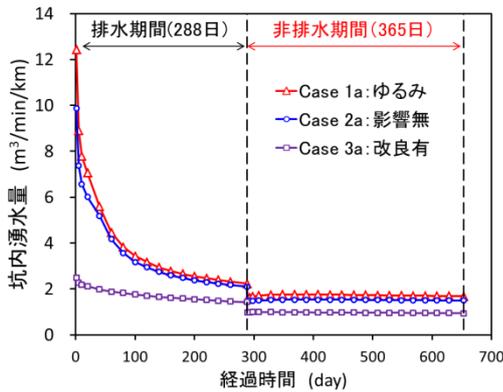


図-16 坑内湧水量における経時変化

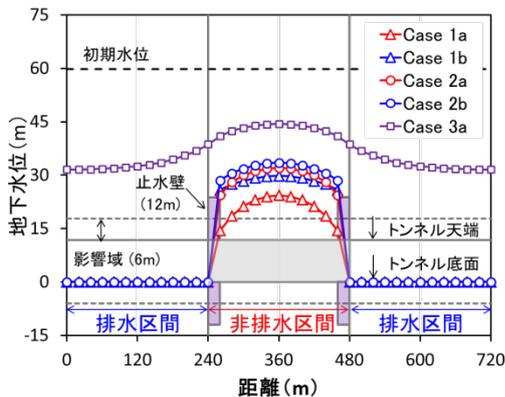


図-17 非排水化1年後の地下水位分布

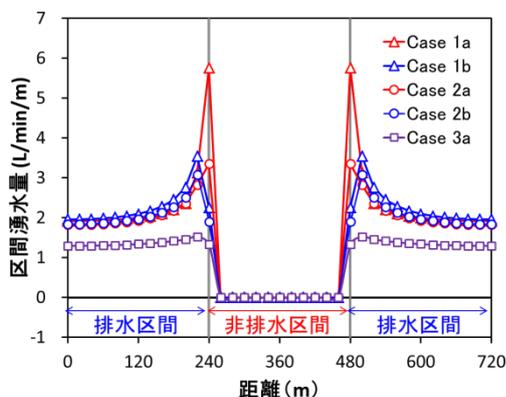


図-18 非排水化1年後の区間湧水量分布

-17). つまり、トンネル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-17)。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の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 (トンネル延長方向の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-18 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がピークを示し、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-18)。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、50 m 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-非排水区間境界部の近傍では、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。

3.3 水圧に耐えることができる覆工構造の検討結果

3.3.1 断面形状ごとの設計水圧に対する断面力分布

図-19 に覆工厚を 600 mm とした時の標準形、準円形および真円形断面の各地盤反力係数における水圧と断面力分布の関係を示す。図中には、解析を行った全断面位置の曲げモーメントと軸力の関係を示している。また、図中の赤破線はコンクリート設計基準強度 30 N/mm²、主筋 D25 で 125 mm ピッチの複鉄筋構造とした時の断面力が許容応力度内となる限界位置を示している。

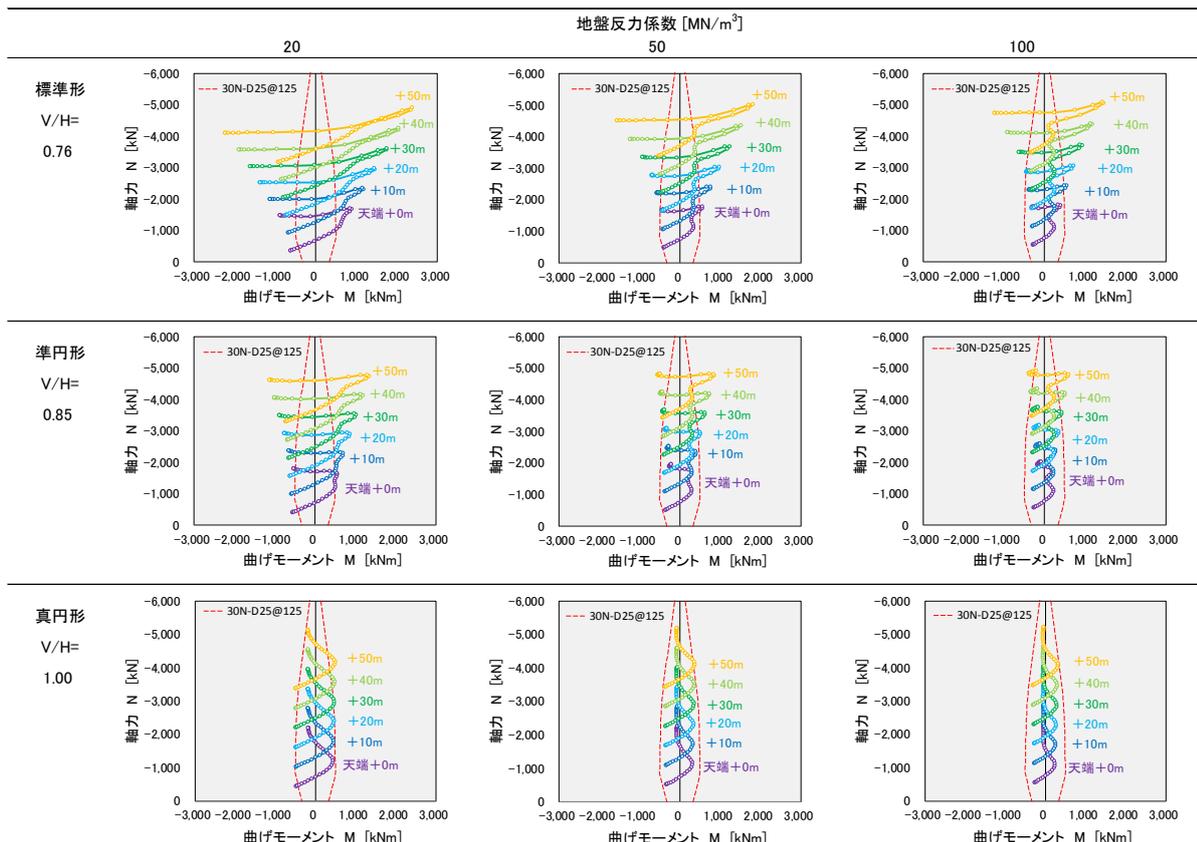


図-19 各設計水頭と地盤反力係数に対する断面力の発生状況と断面形状の関係

標準形断面では下半～インバートにかけての隅角部を中心に大きな曲げモーメントが発生するのが特徴で、特に最大曲げ圧縮応力度の発生位置では、水圧の増加に伴って、軸力に対して曲げモーメントの発生割合が著しく大きくなっている。また、設定された地盤反力係数の影響が顕著であり、地盤反力係数が小さい時、発生する曲げモーメントは著しく大きくなる傾向が認められる。一方、水位が低い段階でも、曲げモーメントの発生割合が大きいため、縁応力が引張となる箇所も認められる。このことは、標準形断面でRC構造を持たない一般的なトンネル覆工で、排水工の閉塞などにより背面水位を持つような条件が発生した場合には、比較的低い水位の段階でも、引張りひび割れが発生する可能性を示唆している。特に地盤反力係数が小さい時には、この傾向が顕著になると考えられるため注意が必要である。

図-19では、各設計水圧に対する軸力の発生量は、標準形、準円形および真円形の各断面形状間でほぼ同程度であるが、準円形から真円形に近づくにつれて曲げモーメントの発生量が著しく小さくなっていることを示している。また、標準形では水圧の増大に伴って最大曲げモーメントの発生量が顕著に増大する傾向が認められるが、断面形状がより真円に近づくにつれて、

水圧の増大に伴う曲げモーメントの発生量は小さくなり、真円形における最大曲げモーメントの値は、水圧の大きさに寄らず、ほぼ一定の値を示している。

3.3.2 許容応力度法による各断面形状の設計の成立性

図-20は、各断面形状において覆工厚を変えた時の各作用水圧に対する最大断面力の値をそれぞれ地盤反力ごとに結んだものである。図中の赤破線は、主筋としてD25を125mmピッチで配置した複鉄筋構造において、覆工コンクリート設計基準強度を24, 30, 36 N/mm²とした時のそれぞれの断面力が許容応力以内となる境界線を示している。

標準形断面における最大断面力の値は、作用水圧の増加に伴って曲げモーメントが著しく増加するため、地盤反力係数が100 MN/m³以下では、設計水頭が天端+20mを超えると覆工厚や設計基準強度によらず、許容応力を満足することが困難であることが分かる。また、準円形断面における最大断面力の値は、水圧の増加に伴う曲げモーメントの増大傾向が比較的小さくなるため、地盤反力係数が100 MN/m³以上であれば、設計水頭が40mに達していても許容応力を満足させる条件が存在することが分かる。ただし、設計水頭が天端+50mを超えると、許容応力を満足させるためには、地盤反力係数で200 MN/m³程度になるような

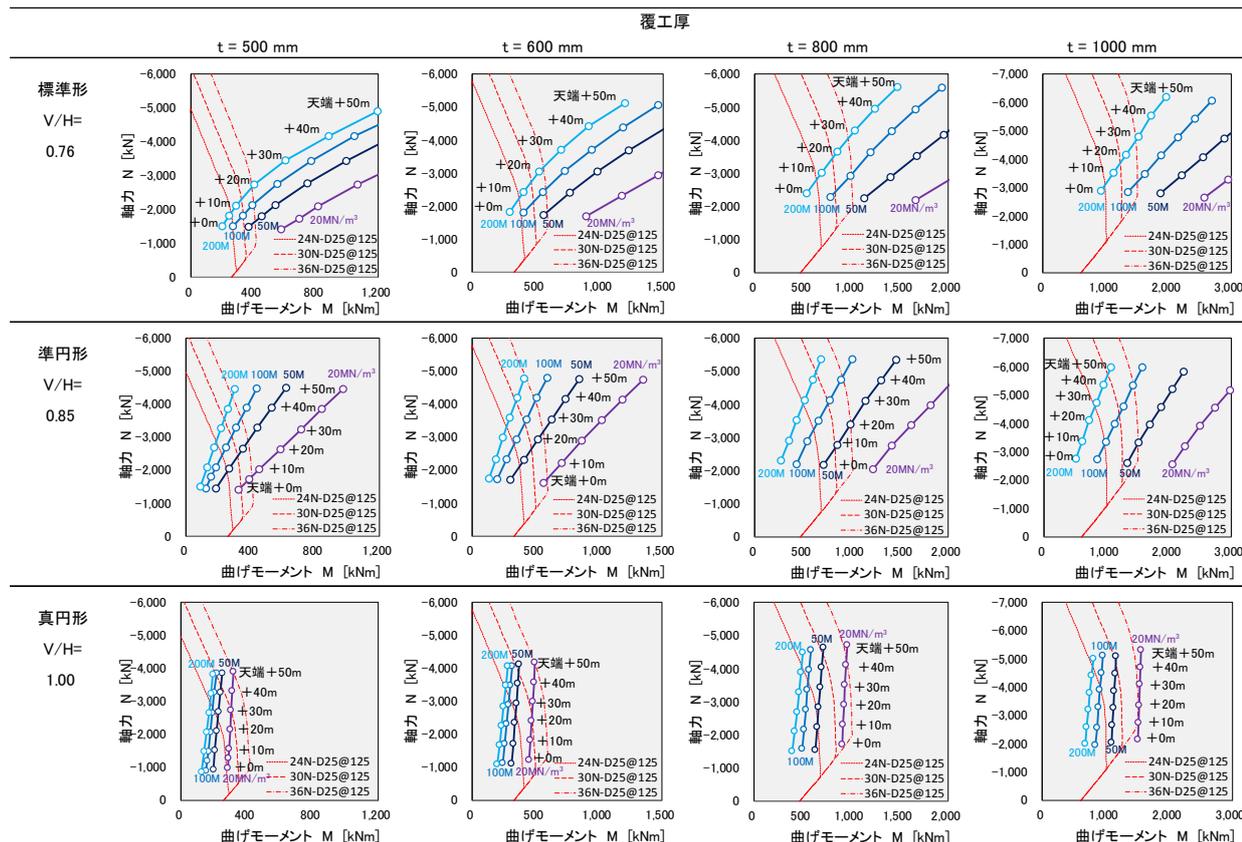


図-20 各設計水頭と地盤反力係数に対する最大断面力と覆工コンクリートの許容応力の関係

硬質な岩盤の分布が必要になる。一方、真円形断面における最大断面力の値は、作用水圧の増加に伴う曲げモーメントの増大が小さいため、設計水頭が天端+50 m に達するケースでも十分に許容応力を満足させる条件が存在していることを示している。

以上のことから、各断面形状において、許容応力度法を用いた断面照査方法によりトンネル覆工コンクリートの設計を行うと、標準形断面では設計水頭が天端+20 m 程度に達する条件で合理的な設計が困難となり、準円形断面では設計水頭が天端+50 m 程度に達する所で設計の合理性を失うが、真円形断面では設計水頭が天端+50 m に達しても十分に許容応力を満たす条件が存在することが分かる。この結果は、図-11 に示した設計実績における設計水頭と掘削断面の縦横比の関係と調和的である。

4. まとめ

防水型トンネルの設計方法に関して、事例分析、水理挙動解析、覆工構造解析による検討結果から、以下の知見が得られた。

1) 施工事例の分析結果から、地下水環境保全の要求レベルに応じた防水型トンネルの実施タイプを選択することにより防水型トンネルの合理性を高めることがで

きる可能性があることがわかった。

2) 防水型トンネルに関する水理挙動解析の結果から、トンネル周辺地山の透水係数は水理挙動に大きく影響を与えるため、特に、排水—非排水区間が共存する防水型トンネルでは、区間境界部の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、地下水の縦断方向への流下防止対策を検討し、覆工背面水位の上昇を防止する必要があることがわかった。

3) 防水型トンネルに関する覆工構造解析の結果から、覆工コンクリートの構造設計では、設計水頭に対して地盤反力と断面形状が主要な設計パラメータとなることがわかった。また、断面形状と設計水頭の関係をもとにした合理的な設計の可能性を示した。

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。
- 3) トンネル標準示方書(山岳工法)・同解説，土木学会，2006。
- 4) 道路橋示方書 (I 共通編，IV 下部構造編)・同解説，日本道路協会，2002。

RESEARCH ON DESIGN METHOD OF WATERPROOF TUNNEL

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2014

Research Team : Road Technology Research
Group (Tunnel)

Authors : ISAGO Nobuharu

AWAJI Dohta

KUSAKA Atsushi

Abstract: Waterproof rock tunnels have been constructed when it was necessary to reduce the impact on the hydrological environment. This study performed case analyses of existing waterproof rock tunnels, seepage analysis on the hydrological behavior and frame structural analysis for design of waterproof lining to discuss the practicability of design and construction. The results of the case analyses show that the appropriate choice of construction type by considering the construction conditions and the allowable level of the hydrological environment enable the reasonable design. The results of the seepage analysis of the waterproof–drainage coexistence tunnels indicate that measures such as a ground improvement, a curtain grouting and installation of the appropriate drainage systems are required to ensure stability of tunnel structure and to preserve the hydrological environment when the excavation disturbed zone has a relatively high permeability. The possibility of rational design of the lining structure was also shown on the basis of the relation between sectional shape and design water head.

Keywords: Waterproof rock tunnel, Hydrological environment, Lining structures, Waterproof structures, Seepage analysis