

防水型トンネルの覆工構造に関する設計事例の分析

土木研究所 正会員 ○淡路動太・砂金伸治・日下敦・河田皓介

1. はじめに

山岳トンネルの覆工は、一般的に地山挙動が安定してから施工することから、基本的に覆工に力学的機能は付加させない¹⁾。しかし、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が実施されている場合が多い²⁾。本稿では、防水型トンネルが計画された20の道路トンネルにおいて、水圧を考慮した覆工構造の設計事例について分析を行った。また、水圧と覆工構造の断面力の関係について、骨組構造解析を実施して、その基本的な挙動について考察を行った。

2. 防水型トンネルの覆工構造に関する設計事例

トンネル覆工を構造計算によって設計する場合、多くのケースで供用開始後の作用が想定される荷重に対して設計が行われている。すなわち、(1)自重、(2)全水圧、(3)土圧、(4)活・死荷重の4つである。このうち、(3)土圧については、一般的に山岳トンネルでは支保工によって地山の安定性を確保していることから覆工への荷重を考慮していないケースが多いが、都市部や小土被りの未固結地山等では、ゆるみ土圧として考慮するケースが認められる。また、(4)活・死荷重のうち、内部死荷重については、インバート部の水圧を相殺することから、安全側の検討として考慮しないケースも認められる。

図-1に各設計水圧に対する代表的な防水型トンネルの覆工構造の設計事例を示す。標準的なトンネル断面では、トンネル全周に載荷される水圧に対して、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る必要がある。また、完全な円形断面では施工性や掘削断面積の面で不利になるが、覆工厚自体は円形近似したものよりも薄くすることができる。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大きいいため、掘削断面形状の建設コストに与える影響が大きく、許容応力を満たす範囲で極力、断面形状を扁平にする試みがなされている。

防水型トンネルとして設計された覆工構造に関する設計水頭と掘削断面の縦横比の関係を図-2に示す。本稿では掘削断面の縦横比が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、1.0のものを真円形断面と分類する。この図から、縦横比0.8未満の標準形断面で設計されたトンネルの設計水頭の最大は20m程度であることが分かる。また、設計水頭が50mに達する所では、トンネル形状が真円形として設計されている。一方、多くのケースでは掘削断面の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個別に実施されていることが分かる。

一般の道路トンネル覆工の設計基準強度は、基本的に18MPaが用いられているが、防水型トンネルでは24～30MPaが採用されていることが多い。

図-3に、防水型トンネルのアーチ部とインバート部の覆工厚の関係を示す。道路トンネルの覆工厚は300～350mmが一般的であるが、防水型トンネルでは、より部材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。また、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傾向が認められる。

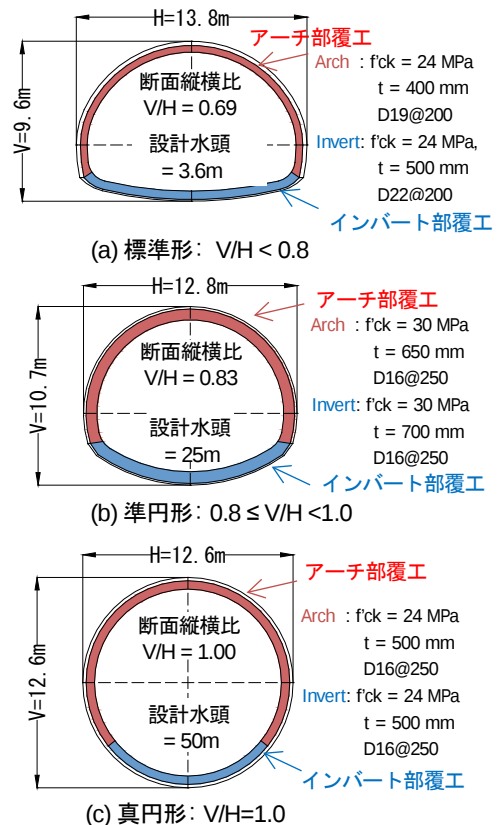


図-1 防水型覆工の設計事例

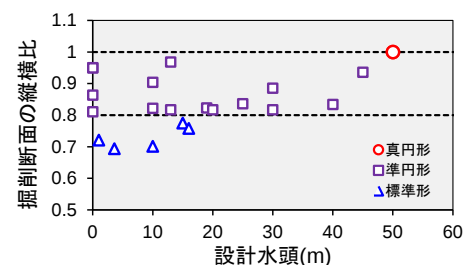


図-2 設計水頭と掘削断面縦横比の関係

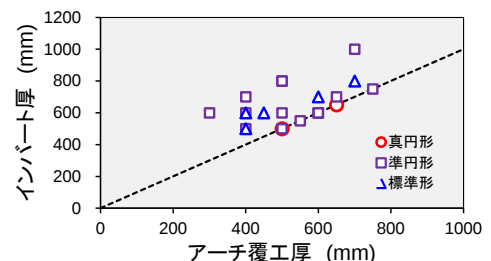


図-3 アーチとインバートの覆工厚の関係

キーワード 山岳トンネル, 防水型トンネル, 覆工構造

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 国立研究開発法人 土木研究所 道路技術研究グループ TEL: 029-879-6791

3. 静水圧が作用する覆工構造における断面力挙動

防水型トンネル覆工に作用する水圧と断面力の基本的な特徴を理解するために、標準形、準円形、真円形のそれぞれについて図-4に示す代表的な内空断面に対して、弾性部材による骨組構造解析を行った。荷重として自重と水圧を考慮し、部材は厚さ 500 mm、呼び強度 24 MPa 相当、トンネル外周部に地盤反力係数 100 MN/m² 相当の引張側で未作動の非線形地盤バネを設置した。

標準形断面における水圧と断面力分布の関係を図-5 に示す。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、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ので、縁応力が引張となる箇所も認められる。このことは、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、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。

準円形および真円形断面における水圧と断面力分布の関係を図-6、図-7 に示す。準円形から真円形に近づくにつれて水圧の増大に対する曲げモーメントの発生量は小さくなり、全圧縮状態に近づいていることが分かる。

各断面形状において、許容応力度法を用いた断面照査結果の一例を表-1 に示す。標準形断面では設計水頭が天端+20m に達する条件では必要となる部材厚および鉄筋量が著しく増大し、合理的な設計が困難となることが分かる。準円形断面においても、設計水頭が天端+50m に達する所では必要な部材仕様が著しく増大し、合理的な設計を行うことが困難である。真円形断面では図-7 で認められるように作用水圧の増大と共に全圧縮状態となることから、水圧の増大に比例して部材厚が上がっていく特徴が認められる。この結果は、図-2 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

防水型トンネルにおける覆工構造の設計事例の分析および作用水圧と断面力に関する骨組み構造解析により、作用水圧と断面形状の大まかな関係を整理することができた。ただし、トンネルごとの必要内空断面や地盤反力係数によって計算結果は大きく異なるため、各トンネルにおいて個別条件を反映した詳細な検討が必要である。今後、地盤反力係数や断面形状の違いが構造計算に与える影響について検討を進める予定である。本研究が今後の防水型トンネルにおける覆工設計の参考となれば幸いである。

参考文献

1) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳工法）・同解説，2007。
2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012。

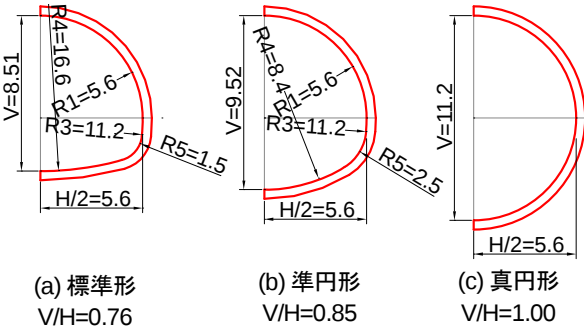


図-4 骨組み構造解析に用いた内空断面

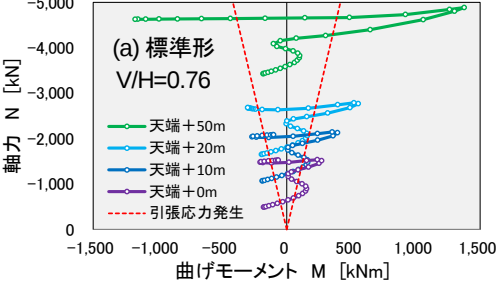


図-5 標準形断面における水圧と断面力の関係

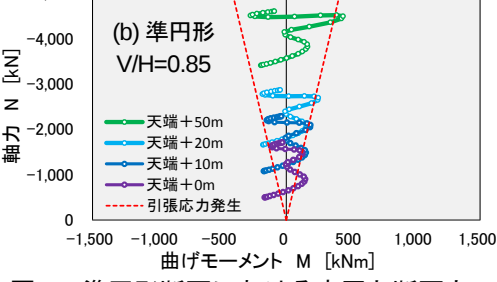


図-6 準円形断面における水圧と断面力の関係

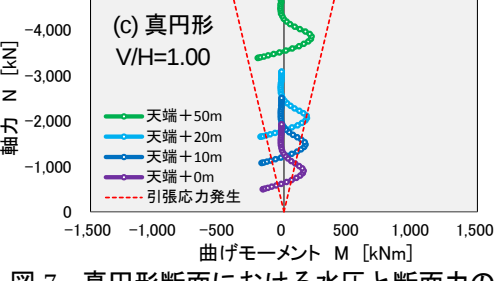


図-7 真円形断面における水圧と断面力の関係

表-1 許容応力度法による断面照査結果の例

水頭	地盤条件	覆工仕様	標準形	準円形	真円形
天端+0m	【軟弱地山】	コンクリート	-	-	30N
		地盤反力係数	-	-	600
	20 MN/m ²	覆工厚 [mm]	-	-	D22@125
		主筋ピッチ	-	-	-
天端+10m	【中硬岩地山】	コンクリート	30N	24N	24N
		地盤反力係数	600	500	500
	100 MN/m ²	覆工厚 [mm]	D19@125	D19@250	D19@250
		主筋ピッチ	-	-	-
天端+20m	【軟弱地山】	コンクリート	-	-	30N
		地盤反力係数	-	-	650
	20 MN/m ²	覆工厚 [mm]	-	-	D25@125
		主筋ピッチ	-	-	-
天端+30m	【中硬岩地山】	コンクリート	36N	24N	24N
		地盤反力係数	800	550	500
	100 MN/m ²	覆工厚 [mm]	D29@125	D22@250	D16@250
		主筋ピッチ	-	-	-
天端+50m	【中硬岩地山】	コンクリート	-	30N	24N
		地盤反力係数	-	650	600
	100 MN/m ²	覆工厚 [mm]	-	D22@250	D25@250
		主筋ピッチ	-	-	-