

高水位を有する岩盤における非排水性構造トンネルの挙動解析

大成建設株式会社(元長崎大学) 正会員 ○前野 克治 長崎大学院工学研究科 フェロー会員 蔣 宇静
株式会社熊谷組 正会員 手塚 仁 青木 宏一

1. 研究の背景・目的

近年、トンネルの湧水対策はトンネル周囲に防水シートを敷設、または水圧に耐えられる覆工コンクリートを打設することが一般的である。しかし、高土被り・高水位を有する岩盤下での非排水構造トンネルの設計法は確立されておらず、個々のトンネルでの対応となっている。本研究の対象となる高土被り・高水位下でのトンネルの減水対策としては、トンネル周囲の地山においてセメントグラウトの減水注入を行い、岩盤の細かい亀裂まで塞ぎ、ドーナツ状の改良帯を形成させることによって湧水を遮断することである。このような減水対策を施したトンネルの周辺地山やトンネル支保工の安定性の評価を行った事例は少ない。また、注入改良帯の形成により、トンネル上部の周辺地山においてアーチ効果が得られるので、覆工コンクリートや支保工に作用する荷重が軽減し、覆工コンクリートの規模が小さくできるといったコストダウン効果が期待できる。

そこで本研究では、減水対策によるトンネル周辺地山の変形挙動と覆工コンクリートに生じる応力の変化を解析し、トンネルの安定性を評価することを目的とする。

2. 解析モデルについて

本研究に用いる解析モデルは対象現場を参考に設定し、図1に示す。モデルの規模は高さ254.25m、幅500mの矩形領域とし、土被りはトンネル天端から200mとした。下方領域については、境界の影響を低減させるよう3D程度(D:トンネル径12.5m)とした。また、左右対称な形状であることから、トンネル中心部を通る鉛直方向の軸を対称とした右半分でモデル化した。

境界条件としては、モデルの底面は鉛直変位を固定、モデル左右の境界は水平変位を固定した。水理境界条件については、モデル右端の水位を固定し、初期水位は地表面に設定した。

3. 物性値と解析ケース

3.1 地山物性値と支保工およびインバートの物性値

解析用物性値を表1と表2に示す。透水係数 k は、地山部を 4×10^{-6} m/s、改良部については、 4×10^{-8} m/sとした。鋼製支保工はH125(SS400)、吹き付けコンクリートは厚さ20cm(普通吹き付け：設計基準強度18N/mm²)とする。インバートは、厚さ45cmの普通コンクリートとする(設計基準強度18N/mm²)。なお減水注入領域については、透水係数 k を地山の約1/100とし、変形係数は試験値を参考に設定する。覆工コンクリートは、インバートと同様の物性値とする。

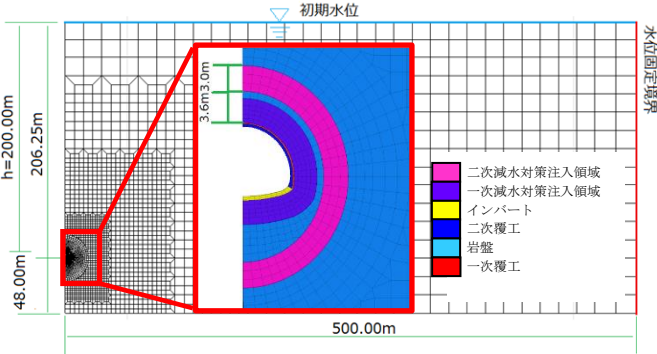


図1 解析モデル

表1 地山物性値

項目	単位	地山	減水注入領域		
		四万十頁岩	Case1	Case2	Case3
変形係数 E	MPa	1000	地山と同様	100	2200
ポアソン比 ν	-	0.5		地山と同様	地山と同様
単位体積重量 γ	kN/m ³	27			
粘着力 c	MPa	0.4			
内部摩擦角 ϕ	度	35			
透水係数 k	m/sec	4×10^{-6}	4×10^{-8}	4×10^{-8}	4×10^{-8}
間隙率 n	-	0.2	地山と同様	地山と同様	地山と同様
スケプトンB値	-	0.8			
岩盤等級	-	CL級			

表2 支保工物性値

項目	単位	鋼製支保工	吹き付けコンクリート	インバート
弾性係数	MPa	200000	4000 (掘削後) 22000 (硬化後)	22000
ポアソン比	-	0.3	0.2	0.2
断面積	m ²	30×10^{-4}	0.2	-
断面二次モーメント	m ⁴	839×10^{-8}	-	-
要素	-	ビーム要素	ソリッド要素	ソリッド要素

3.2 初期応力の設定

トンネル掘削前は、土被り 200m の地表まで地下水位があるものとし、天端においては水圧 2.0MPa とした。全応力は土被り圧相当の 5.4MPa、水平方向は側圧係数 $K=1.0$ として、地圧の鉛直成分は γH (H : 土被り)、水平方向は $K\gamma H$ として算出した。

3.3 解析ケースと解析手順

本研究では、減水対策無と注入領域の変形係数の違いを考慮して 4 つの解析ケースを設定した。Case0 では減水対策をせず、覆工コンクリートを施工した場合に、Case1, Case2, Case3 では減水対策領域の変形係数をそれぞれ $E=1000\text{MPa}$, $E=100\text{MPa}$, $E=22000\text{MPa}$ と設定した減水対策を施工した場合に対応する。トンネル掘削から支保工の設置まで行い、設置後に減水対策注入領域に各ケースの物性値を設定し実施する。また、水位が回復するまで解析を継続する。対策後は覆工コンクリートを設置し、排水条件で覆工コンクリートに生じる応力と地山全体の水位が定常状態となるまで解析を継続する。

4. 解析結果と考察

4.1 間隙水圧分布

図 2 に S.L. (スプリングライン) 上における掘削面右端から 35m までの間隙水圧分布を示す。減水対策前はトンネル直上の地下水位が 65m あり、トンネルから排水されていることから、間隙水圧も 0.6MPa 以下と地下水圧相当よりも低くなる。減水対策後は地下水位が 176m まで上昇し、間隙水圧も約 2.0MPa と地下水圧相当まで回復した。今回は、支保工部の止水効果によって注入領域と大きな差は現れなかった。

4.2 支保工および覆工コンクリートに生じる応力

図 3 と図 4 に各ケースの天端における覆工コンクリートおよび支保工に生じる圧縮応力の比較を示す。Case1 では、減水対策を施工することで支保工への応力が減少した。一方、覆工コンクリート設置後は水位の上昇に伴い圧縮応力が増加した。Case2 では変形係数が最も小さかったため、大きな圧縮応力の変化が発生しなかった。Case3 では、天端部の覆工コンクリートに生じる圧縮応力が最大となったが、全ケースとも設計基準強度の 10%以内に収まっているため、減水対策注入領域のアーチ効果が現れ、覆工コンクリートの規模(厚さ)の削減が可能と考えられる。

5. 結論

本研究では、減水対策としてセメントグラウト施工を施工しているトンネルを対象に、トンネル周辺や地山の挙動と覆工コンクリートの圧縮応力の変化を再現した。その結果、減水対策を施工することによって領域内の間隙水圧が減少し、領域内外では間隙水圧の差が生じることが分かった。また、覆工コンクリートや支保工に生じる圧縮応力が減少するケースがみられた。今後は注入領域の厚さによる効果を比較して、覆工コンクリートの規模を縮小させる可能性を検討していく。

参考文献

- 1) 木佐貫浄治, 宮本裕二, 鈴木雅文, 辰巳勇司: 自然由来のヒ素を含む大量湧水の減水対策試験, トンネルと地下, 第 46 巻 10 号, pp.19-24, 2015.

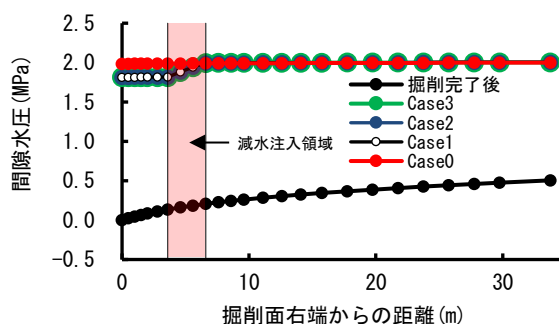


図 2 S.L. 上における間隙水圧分布

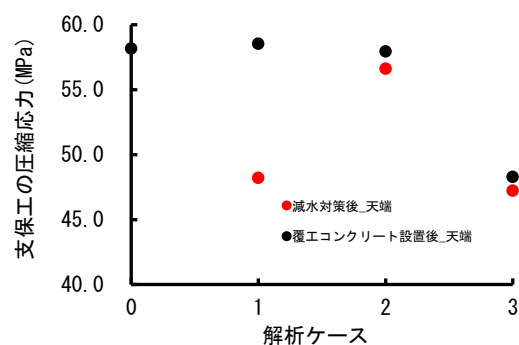


図 3 支保工の圧縮応力の比較

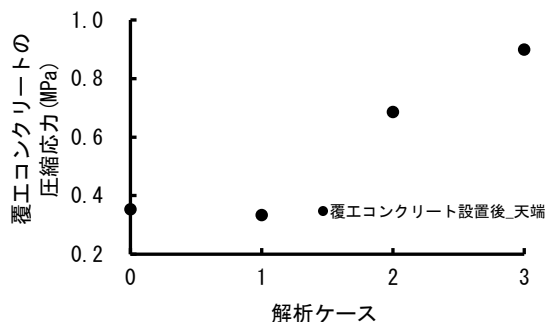


図 4 覆工コンクリートの圧縮応力の比較