

高水位を有する亀裂性岩盤内トンネルの湧水に対する注入改良効果の比較検討

長崎大学大学院 学生会員 ○大勝恵輔

長崎大学大学院 フェロー会員 蔣宇静 (株)熊谷組 正会員 手塚仁 青木宏一

1. 研究の背景・目的

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。高土被り・高水位を有する亀裂性岩盤内の非排水構造トンネルの設計法はまだ確立されておらず、個々のトンネルの対応となっている。トンネルの減水対策としては、トンネル周囲の地山にセメントグラウトを注入することで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湧水を遮断するものがある¹⁾。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。

本研究では、減水対策領域を形成することによって生じる支保工の変位・応力の変化を数値解析により計算し、減水注入による支保工の挙動の変化を調べることを目的とする。

2. 解析モデルについて

2.1 解析モデルの概要

本研究に用いる解析モデルを図1に示す。地表面からトンネル天端までの深さは200mで、トンネルの右上側に亀裂をモデル化した。亀裂幅は岩盤内の細かい亀裂の集まりを想定してモデル化した。減水対策領域は、トンネル外周に幅3mのリング状の地山の透水係数改良域としてモデル化した。ま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、モデル左右両側面は水位を固定し、初期水位は地表面に設定した。

解析用物性値を表1に示す。透水係数(k)は地山部を 4×10^{-6} m/sec、減水注入領域部を 4×10^{-8} m/sec、亀裂部を 4×10^{-4} m/secとした。鋼製支保工はH125、吹付けコンクリートは厚さ20cmとし、インバートはコンクリート厚さ45cm、覆工コンクリートは厚さ30cmに設定した。

2.2 解析ケースと解析手順

本研究では、減水対策を施していないケースと減水対策領域形成の箇所の違いに分けて4つの数値解析を行った。Case0は減水対策を施さずに覆工コンクリートを設置したケース、Case1はトンネル壁面から6mの位置に、Case2はトンネル壁面から3mの位置に減水対策領域を形成したケース、Case3はトンネル周辺に間隔を設けずに減水対策領域を形成したケースである。Case1からCase3はいずれも減水対策領域内部の亀裂を遮断しており、減水対策領域を形成した後に覆工コンクリートを設置した。

本研究で行った解析手順を表2に示す。解析手順としては、トンネル掘削から支保工・インバート設置まで行い、インバート設置後に減水対策を実施する。減水対策後は、覆工コンクリートを設置し、水位が回復するまで応力浸透連成解析を続ける。

3. 解析結果と考察

S.L. (スプリングライン) 部における各解析ケースの水平変位の変化を図2に示す。全てのケースで、減水対策領域形成後、覆工コンクリート設置まで変位が増加する。覆工コンクリート設置後、時間経過とともに変位が減少し

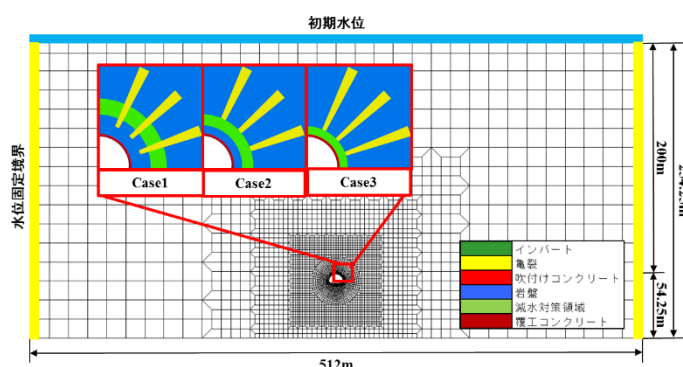


図1 解析モデル

表1 地山物性値

項目	単位	地山	減水注入領域	亀裂
変形係数 E	MPa		1000	
ポアソン比 ν	-		0.4	
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	
間隙率 n	-		0.2	
透水係数 k	m/sec	4×10^{-6}	4×10^{-8}	4×10^{-4}

表2 解析手順

解析ステージ	概要	解析モード
Stage0	トンネル掘削から支保工設置	—
Stage1	インバート設置	非定常
Stage2	減水対策領域形成・水位回復	定常
Stage3	覆工コンクリート設置	非定常
Stage4	水位回復	定常

ていることが確認できる。また、トンネルの内空側に縮小・拡大と明らかに分かれているのが確認できる。正の水平変位は、トンネルと減水対策領域の間に亀裂が無いケースである。負の水平変位は、トンネルと領域の間に高い透水係数を有する亀裂が存在する、または領域の無いケースである。このことから、トンネルと領域の間に高い透水係数を有する亀裂が存在することによって、地下水の動きが活発になり、負の方向に力が及んでいると考えられる。Case2と比較して、S.L.部における水平変位はCase3の方が明らかに大きいことが確認できる。

トンネル支保工の天端における各ケースの最小主応力を図3に示す。減水対策領域設置後、覆工コンクリート設置まで最小主応力が増加し、覆工コンクリート設置後から応力が減少しているのが確認できる。Case1とCase2の応力変化はほとんど同じである。これはトンネル支保工の天端と領域の間に生じる応力はほとんど変わらないことを示している。また、Case3の応力変化が最も大きいことが確認できた。これは、トンネルと領域の間に間隔を設けずに領域を形成することで、領域とトンネルが一体化し、領域に生じる応力がトンネル支保工の天端にまで影響していると考えられる。

S.L.部における各ケースの最小主応力を図4に示す。Case0とCase1は覆工コンクリート設置後も応力が増加していることが確認できた。これは、領域とトンネルの間に存在する亀裂によって、永続的にS.L.部に地下水が集中すると考えられる。覆工コンクリート設置後、Case2とCase3のS.L.部に生じる応力は減少した。これは、領域とトンネルの間に存在する地下水の挙動が一定であり、減水対策領域外の地下水を完全に遮断しているためと考えられる。また、Case2と比較して、Case3の方が生じる応力が小さくなっている。

4. 結論

本研究では、数値解析によって減水注入領域におけるトンネル支保工の変位・応力の変化について検討を行った。その結果、トンネルと減水対策領域の間に高い透水係数の亀裂を有する場合、永続的にトンネル支保工に負荷が生じる可能性があると考えられる。トンネルと減水対策領域の間に間隔がある場合、トンネル天端に生じる応力変化の挙動が同じことから、トンネル支保工の天端を打設するためのコンクリート量を削減することで、コスト削減に期待できる。また、トンネルと減水対策領域の間に間隔を設けずに減水対策領域を形成することで、トンネルと減水対策領域が一体化し、減水対策領域に生じる地下水や地圧が支保工にまで影響が及ぶと考えられる。さらに、トンネルと減水対策領域の間に亀裂を有さない場合、トンネル周辺の地下水の挙動は一定となり、支保工に生じる応力が減少することが分かった。このことから、高土被り・高水位を有する地山におけるグラウチング施工は有効であると考えられる。今後は地山内部の亀裂がトンネル構造物に与える影響を低減させる方法と効果についてさらに検討していく。

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.
- 2) 前野克治, 蔣宇静, 手塚仁, 青木宏一, 王肖珊, 劉楷: 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, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, III-071, pp.394-395, 2017

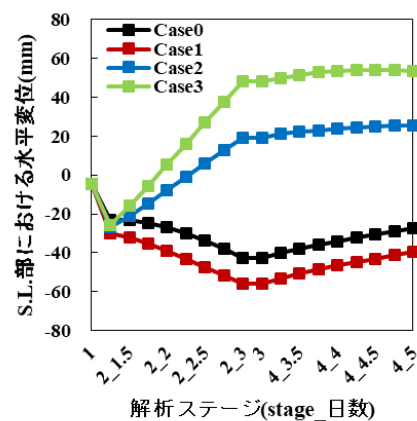


図2 S.L.部における水平変位分布

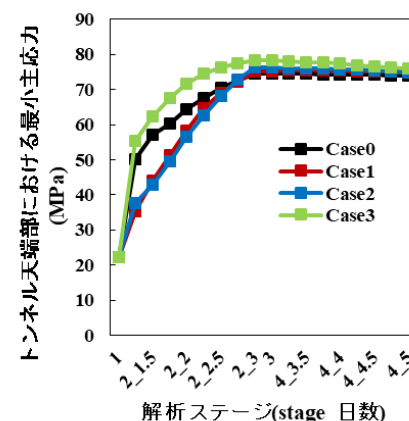


図3 トンネル天端における最小主応力分布

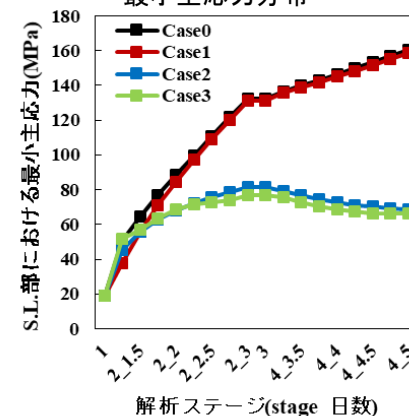


図4 S.L.部における最小主応力分布