高水位を有する岩盤内トンネルの挙動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　公彬　呉学雲
長崎大学大学院　フェロー会員　蒋宇静　（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・高水位を有する岩盤下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おいてセメントグラウトの注入を行う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，減水注入領域とトンネルとの間の応力・変位の分布と変化を数値解析により計算し，減水注入の有無によるトンネル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．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．

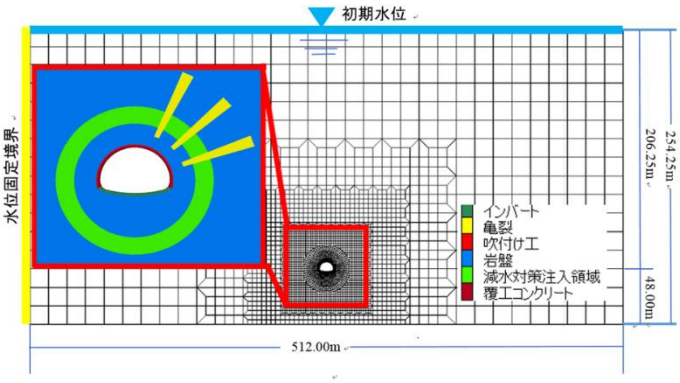

図1　解析モデル

表1　地山物性値

項目	単位	地山	減水注入領域	亀裂
		四万十頁岩	Case1	
変形係数　E	MPa	1000	地山と同様	地山と同様
ポアソン比　ν	-	0.4		
単位体積重量　γ	kN/m³	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^{-4}
間隙率　n	-	0.2	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		

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，減水対策の有無と減水対策注入領域に亀裂を想定した場合とに分けて3つの解析を行った．Case0では減水対策を行わずに覆工コンクリートを設置した場合に，Case1では減水対策を行ってから覆工コンクリートを設置した場合に，Case2では亀裂部だけに減水対策を施さず覆工コンクリートを設置した場合に分けた．解析手順としては，トンネル掘削から支保工設置まで行い，支保工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解析を実施する．

3.　解析結果と考察

S.L.（スプリングライン）上における掘削面右端から95m までの間隙水圧分布を**図2**に示す．減水対策直前のトンネル直上の地下水位は122m あり，トンネルから地下水が排出されることから，間隙水圧は約0.2MPa 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約185m まで上昇し，間隙水圧も地下水位相当の約2.0MPa と地下水圧相当まで回復した．減水対策領域を施すことで領域内外において約0.1MPa の差が生じた．Case2では減水対策を施しているが，亀裂部から

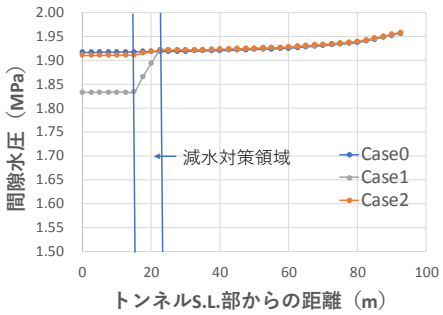

図2　S.L.上における間隙水圧分布

地下水が流入しているため Case0と比べてほとんど変わらない．この結果から各ケースには大きな差がなかった．

トンネル天端とインバート部における各ケースの減水対策後と覆工コンクリート設置後に水位回復した場合の鉛直方向の変位量の比較を**図3**と**図4**に示す．鉛直方向の変位量がマイナスの場合は原点から下向きの方向に変位したことを示し，プラス場合は原点から上向きに方向に変位したことを示す．減水対策後の変位量は各ケースとも，約2.0mm の変位が生じ，水位回復後は変位が減少し約1.0mm の変位に落ち着いた．一方，インバート部における変位量は，減水対策後と比べて水位回復後の方が大きくなった．最終的なトンネル天端とインバート部における変位量は対象の地山に対して想定の範囲内であった．

トンネル天端における解析ステージごとの最小主応力の比較を**図5**，覆工コンクリートに生じる最小主応力の比較を**図6**に示す．引張破壊の判定が容易になるため，最小主応力を採用した．解析ステージとしては，Stage6は減水対策注入，Stage7は覆工コンクリートの設置，Stage8は水位回復を示す．Stage6では，天端に生じる応力にばらつきが生じたが，最終的に生じる応力に差は見られなかった．これは天端に生じる力がほとんど変わらなかったからではないかと考えられる．各ケース，覆工コンクリート設置後は天端に生じる応力が減少し，その後水位の上昇に伴い圧縮応力が増加した．覆工コンクリート全体において，トンネル天端から肩部にかけて設計基準強度18MPa に対して，基準値を満たした．しかし右側壁下部に非常に大きい圧縮応力が生じた．これはトンネル右側に透水係数の低い亀裂があるため，その周辺で生じる水流が覆工コンクリートに大きな負荷をかけているのではないかと考えている．

4. 結論

本研究では，減水注入領域におけるトンネル周辺や地山の挙動の変化を解析により調べた．その結果，減水対策を施すことにより領域内外で間隙水圧差が生じ，覆工コンクリートに生じる応力が減少するという結果が得られた．しかし，両側壁下部に非常に大きな圧縮応力が生じた．これらのことから地山内部にある亀裂はトンネルの構造に非常に大きい影響を与える可能性が考えられる．今後は地山内部にある亀裂が与える構造物の影響を低減させる方法と効果について検討していく．

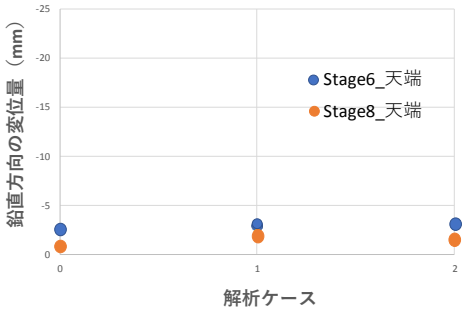

図3　トンネル天端における鉛直方向の変位量の比較

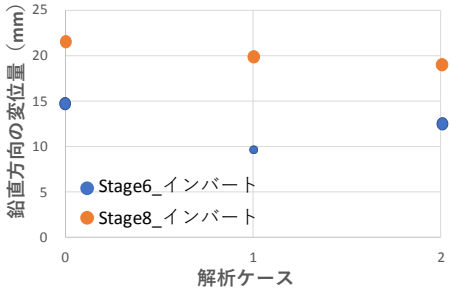

図4　インバート部における鉛直方向の変位量の比較

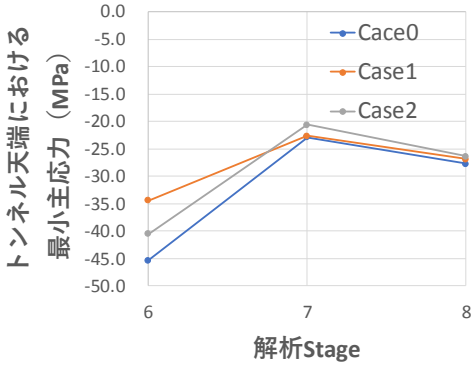

図5　トンネル天端における最小主応力の比較

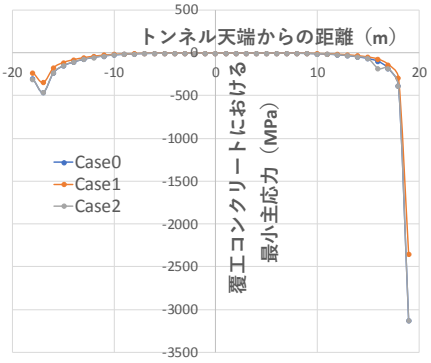

図6　覆工コンクリートにおける最小主応力分布

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，蒋宇静，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

キーワード：減水対策，高水位・高土被り，有限差分法，セメントグラウト施工

連絡先：（〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14，E-mail:bb35514004@ms.nagasaki-u.ac.jp）