

## 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

長崎大学工学部 学生会員 前野 克治 長崎大学大学院 学生会員 王 肖珊 劉 楷  
 長崎大学大学院 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. はじめに

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、大土被り・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大土被り・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も少ない。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減少できるといったコストダウン効果が期待できる。

本研究では、減水注入によるトンネル周辺地山の变形挙動と覆工コンクリート応力の変化を解析・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を図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、問題の対称性より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モデル化した。

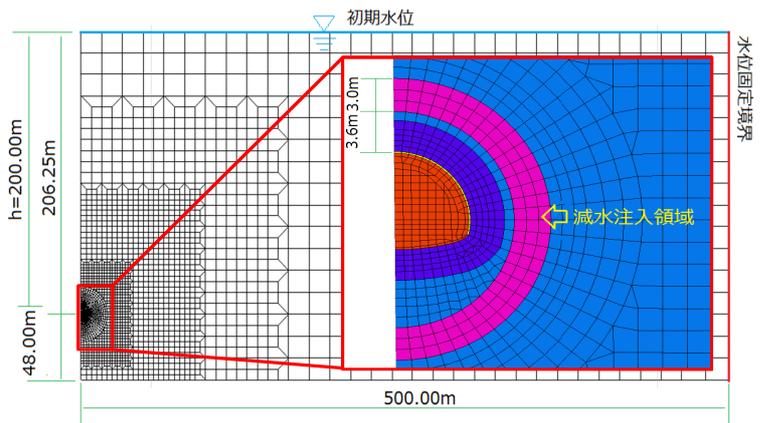


図1 解析メッシュ

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、モデル右端は水位を固定し、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  $4 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 、改良部については、 $4 \times 10^{-8} \text{m/s}$  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  $18 \text{N/mm}^2$ )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  $18 \text{N/mm}^2$ )。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。

#### 3.2 初期応力

トンネル掘削前は、土被り 200m の地表まで地下水位があるとし、天端においては水圧  $2.0 \text{MPa}$  とした。全応力は土被り圧相当の  $5.4 \text{MPa}$ 、水平方向は側

表1 地山物性値

項目	単位	地山
		四万十頁岩
変形係数 E	MPa	1000
ポアソン比 $\nu$	-	0.4
単位体積重量 $\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	27
粘着力 c	MPa	0.4
内部摩擦角 $\phi$	度	35
透水係数 k	m/sec	$4 \times 10^{-6}$
空隙率 n	-	0.2
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 <sup>2</sup>	$30 \times 10^{-4}$	0.2	-
断面二次モーメント	m <sup>4</sup>	$839 \times 10^{-8}$	-	-
要素	-	ビーム要素	ソリッド要素	ソリッド要素

圧係数  $K=1.1$  として、地圧の鉛直成分は $\gamma H$ ( $H$ :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、減水対策の有無に分けて掘削解析を行った。Case1 では減水対策を施工した場合に、Case2 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対応する。解析手順としては、トンネル掘削から支保工を設置まで行い、設置後に減水対策を実施する。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継続する。

### 4. 解析結果と考察

図2に示すようにトンネル掘削完了後の間隙水圧は、トンネルから排水されていることから圧力は地下水位相当の水圧より小さくなっている。減水対策後は、注入領域外側の間隙水圧が約1.7MPaと地下水位相当な数値となった。減水対策を行うことで、減水注入領域の内側は外側と比べて間隙水圧が小さくなる。また、注入領域の外側では間隙水圧が増加することで有効応力が減少する。これにより、岩盤全体が上方へ変位すると考えられる。一方、注入領域の内側では、トンネルが排水構造であることから、間隙水圧はほぼゼロである。

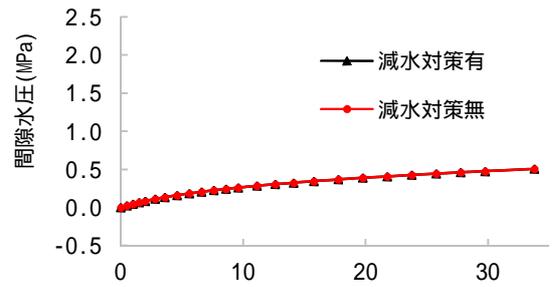
吹き付けコンクリートに発生する応力は、図3に示すように最大で20MPaと大きい値となった。原因として、減水注入領域の形成によって、圧縮応力が発生したと考えられる。しかし、一連の掘削解析において、覆工コンクリートの設置まで特に大きな変位はなかった。図4に示すように減水対策無の場合は約0.6MPaで、それに対して減水対策有の場合は、0.5Paの引張応力で覆工コンクリートにはほとんど発生していない。それは減水対策によって覆工コンクリートへの負担が軽減されたと考えられる。

### 5. おわりに

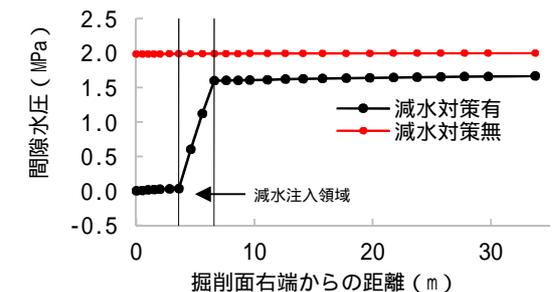
本研究では、減水対策としてセメントグラウト施工を施工しているトンネルを対象にトンネル周辺や地山の挙動と覆工コンクリート応力の変化を解析した。その結果として、有効応力が減少することによって地山の全体がやや上方に変位するが、減水対策により覆工コンクリートに生じる応力が低減した。今後は、注入領域の厚さによる効果を比較検討して、覆工コンクリートの規模を縮小させる可能性を検討していく。

### 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. 10.



(a) トンネル掘削完了後



(b) 減水対策後

図2 間隙水圧分布

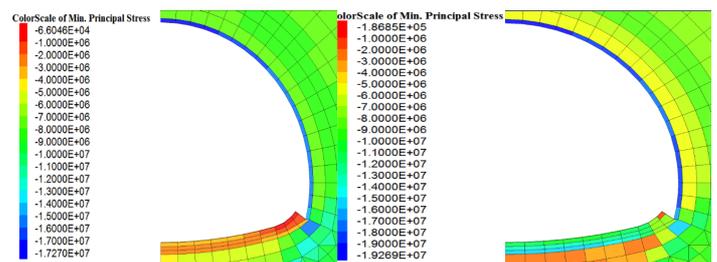


図3 吹き付けコンクリートに生じる応力の比較 (左:掘削完了時, 右:対策時)

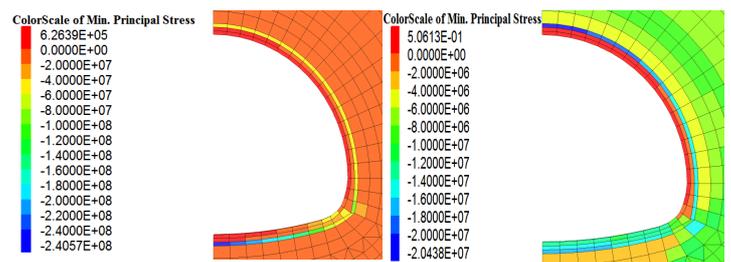


図4 覆工コンクリートに生じる応力の比較 (左:減水対策無, 右:減水対策有)