

注入式フォアポーリングの効果に関する解析的検討

大成建設 正会員 ○坂井 一雄
 大成建設 フェロー会員 青木 智幸
 大成建設 正会員 小池 真史

1. 概要

山岳トンネル工法では、切羽の安定性を確保することが安全な掘削にとって非常に重要である。したがって、切羽での湧水による地山の劣化や緩みによる軟化などによって、天端の崩落や肌落ちが生じる時には、天端安定対策工として注入式フォアポーリングを施工するケースがある。一般的にフォアポーリングは、現場にて定性的にその効果が把握されているが、先受け長が短く地山の変位・変形抑制効果が小さいと認識されている^{*1)}ため、数値解析上では考慮されないことも多い。そこで本論文では、注入式フォアポーリングの合理的な設計法や妥当性検証方法の確立に資することを目的に、注入式フォアポーリングの効果を三次元解析で表現する方法を検討した。解析では天端の崩落要因を地山の劣化や軟化などに起因する強度特性の悪化と捉え、強度定数低下によりモデル化する方法を試行した。その結果、注入式フォアポーリングの打設の有無による天端周辺の緩み領域の拡大程度の違いを評価することで、その効果を表現できた。

2. 地山の強度低下と注入式フォアポーリングのモデル化

天端の崩落や肌落ちの原因は、風化や切羽に発生した湧水が地山の劣化を引き起こすこと(岩盤中の微細な亀裂の粘着力成分が湧水により失われる)が考えられる。また、掘削による地山の応力再配分の影響で壁面近傍の拘束圧を失うこと、もしくは強度以上の地圧が作用し、地山のひずみが増大して軟化することも原因の一つである。図1に地山の強度低下に関する概念図を示す。

地山の劣化や軟化などは強度特性の低下であるため、数値解析上で地山をモール・クーロンの破壊規準に従う弾完全塑性体とすれば、図2に示すように粘着力の低下により、地山の劣化と軟化を表現できると考えた。なお解析では、強度低下に主眼を置き、降伏前の変形係数の低下は考慮していない。

一方、注入式フォアポーリングで岩盤中へのウレタン系注入材を用いた注入を想定した場合、岩盤の亀裂内部へ注入材が浸透・固化することにより、掘削に伴う地山の緩みと、それに起因する強度・剛性の低下を抑制できると考えられる。そこで、数値解析では注入効果として掘削前後で地山が粘着力を損なわず、周辺地盤が緩んでも、健全な状態が保持できる、すなわち元の粘着力を保持できるものと考えた。ただし、注入効果による岩盤物性の大幅な向上は期待できないことが多いため、剛性や強度の向上は考慮しないものとした。また、注入用中空ボルトはビーム要素によりモデル化した。

【地山の劣化と軟化の概念図】

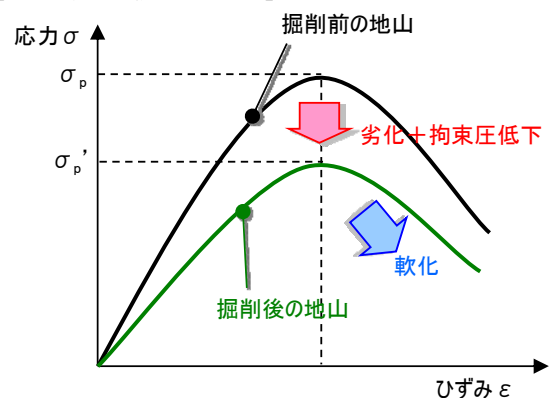


図1 地山の強度低下に関する概念図

【数値解析上の強度定数の低下】

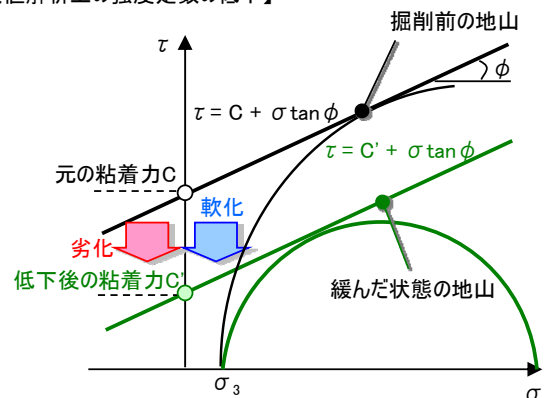


図2 解析上の強度定数の低下

キーワード トンネル, 補助工法, 注入式フォアポーリング, 三次元解析

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設技術センター土木技術研究所 TEL 045-814-7217

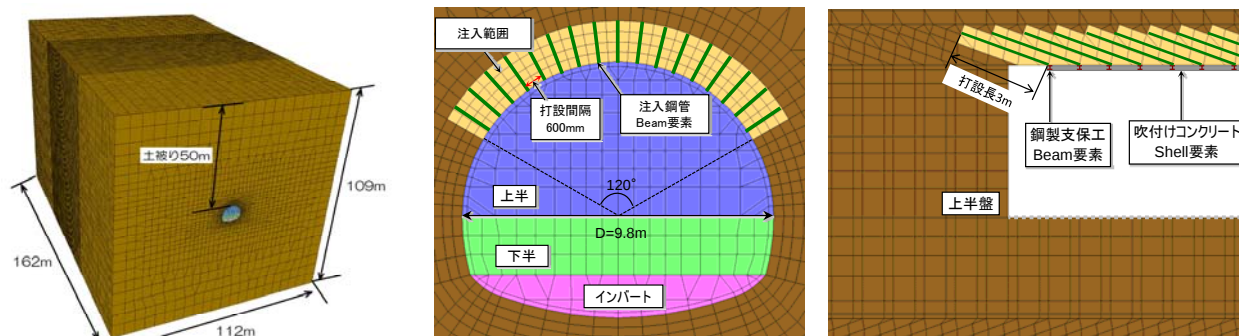


図3 三次元解析モデル

表1 解析条件

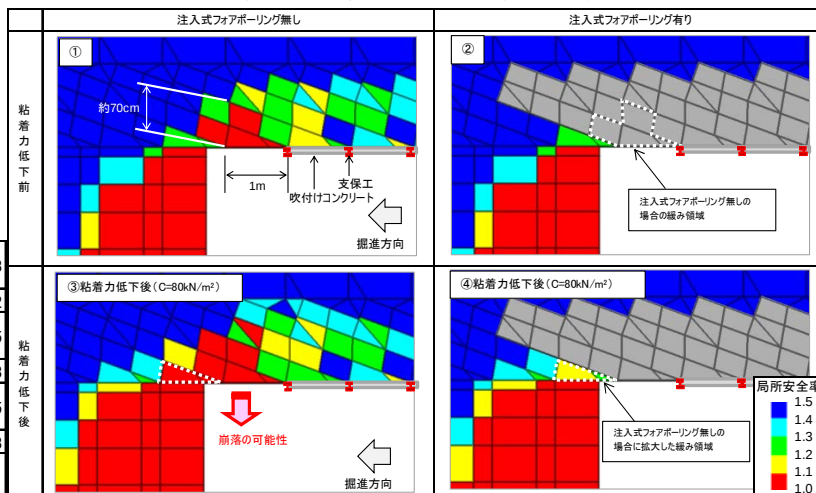
【地山物性値】

応力-ひずみ関係	弾完全塑性体
破壊規準	モール・クーロンの破壊規準
単位体積重量 (kN/m ³)	21.0
変形係数 (kN/m ²)	1.50E+05
ポアソン比	0.35
粘着力 (kN/m ²)	2.00E+02
内部摩擦角度 (°)	30

【一次支保・補助工法 物性値】

吹付けコンクリート (t=150mm)	弾性係数 (MN/m ²)	4.00E+03
	ポアソン比	0.2
鋼製支保工 (H125)	弾性係数 (MN/m ²)	2.10E+05
	ポアソン比	0.3
注入式 フォアポーリング	PUボルト (φ27.2mm、t=5mm)	弾性係数 (MN/m ²) 2.10E+05
		ポアソン比 0.3
	注入範囲 ^{*1)}	粘着力低下無し

*1)・・・弾性係数・ポアソン比は地山相当値

表2 注入式フォアポーリングの有無による緩み領域の違い
(トンネル縦断面図で天端部を拡大)

3. 三次元解析による注入式フォアポーリングの効果の検討

解析モデルおよび解析条件を図3と表1に示す。解析では、地山の強度低下が進行する過程のモデル化として、切羽周辺に生じた緩み領域内の粘着力を 200kN/m^2 から 20kN/m^2 ずつ順に低下させ、その都度緩み領域を判定し、最終的に最も小さな値が 80kN/m^2 となるまで計算を繰り返した。なお、緩み領域は地山の力学特性が掘削前の状態から変化する領域と考え、局所安全率が1.1以下(表2中の赤色)となる範囲を「塑性領域=緩み領域」と評価した。

表2上段に粘着力を失う前の緩み領域を示す。注入式フォアポーリングがない場合(①)、天端素掘り面の上方70cmの範囲に緩み領域が発生する。ただし、①での緩み領域は注入式フォアポーリングをモデル化した場合(②)の注入範囲内に限定されており、その他の範囲では局所安全率分布に有意な差は認められない。表2下段に粘着力低下後の緩み領域を示す。注入式フォアポーリングがない場合(③)、天端部に緩み領域が拡大する傾向が見て取れる。この原因は天端、切羽近傍の地山の粘着力低下に伴い、当初は弾性範囲であった地山に応力が再配分されて、塑性化したことである。一方、注入式フォアポーリングがある場合(④)には、粘着力低下前と比べて、局所安全率は低下するが、緩み領域そのものの拡大は見られない。これは、解析上では注入効果として注入範囲の粘着力が保持される事に起因する。実現現象に置き換えれば、切羽周辺地山が強度低下を生じて注入式フォアポーリングの効果で、緩み領域の拡大が抑制され、崩落や肌落ちといった危険性が低減することを示唆するものであるといえる。

4. まとめ

本論文では、地山の強度低下と注入式フォアポーリングを三次元解析によりモデル化し、緩み領域の拡大傾向の違いに着目することで、補助工法の効果を表現した。今後は、経験的に決定されることが多い注入式フォアポーリングの仕様(打設長、打設間隔および打設範囲)の妥当性を緩み領域や注入範囲の応力状態に着目して、数値解析的に表現する手法の開発を目指したいと考えている。

参考文献 1) 山岳トンネルの補助工法-2009年版-, p. 66, 土木学会, 2009