

山岳トンネルの施工時における地表面沈下対策工とその選定に関する一考察

鹿島建設(株) 正会員 ○玉村 公児
西松建設(株) 正会員 大谷 達彦
(株)ケー・エフ・シー 正会員 岡部 正
(株)熊谷組 正会員 森崎 泰隆
長崎大学 正会員 蔣 宇静

1. はじめに

近年、都市部での利便性、機能向上の観点から大断面のトンネルを厳しい条件下（構造物などの直下または近傍部、小土被り、脆弱地山など）で山岳工法により掘削する事例が多くなってきている。施工においては、トンネル掘削に伴う地表面沈下の発生に対して適切な対策工を行うことが重要となってきた。このような背景を踏まえ、土木学会では「トンネル工学委員会、技術小委員会、山岳トンネルの地表面沈下検討会：部会長 長崎大学 蔣教授」を設置し、地表面沈下の予測評価と合理的対策工の提案を目的として活動を行っている。この部会の対策WGでは、地表面沈下対策の分類・選定・評価についてとりまとめを進めており、本報告ではこの内容の一部を紹介する。

表－1 掘削工法による対策

目的	掘削工法による対策工の例
断面閉合	仮インバート
早期閉合	ベンチ長の短縮およびインバートによる閉合
脚部補強	側壁導行先進工法による側壁コンクリートの構築

2. 地表面沈下対策工の分類と目的

地表面沈下対策工としては、掘削工法による対策と補助工法による対策に大別できる。

掘削工法による対策は、地表面沈下対策という観点から掘削工法を選定する手法であり、仮インバートを用いた断面閉合を行う方法、ベンチカット工法においてインバートによる早期閉合を行い、地盤の支持力などを確保する方法、側壁導坑先進工法を採用し、側壁コンクリートによって本坑掘削時の脚部の支持力を確保する工法などがある（表－1）。

また、補助工法による対策は、先受け工、脚部補強工、鏡面補強などの補助工法により地表面沈下の抑制効果を直接的に期待する手法、地山自体を薬液注入などで改良し地山の安定性を図る手法などがある（表－2）。

さらに、地山条件や掘削断面の形状寸法により選定した掘削工法だけでは掘削時における切羽の安定性が問題となる場合、掘削工法と補助工法を併用する場合が多い。

表－2 補助工法による対策

目的	補助工法による対策工の例
直接的沈下抑制	長尺先受け工、脚部補強工、鏡面補強
地山改良	ジェットグラウト、薬液注入、深層混合改良
その他の対策	止水注入、坑外からの垂直縫地ボルト

3. 地表面沈下対策の選定と効果

地表面沈下対策のための工法の適用にあたっては、地山条件、沈下の影響を受ける地表、地中構造物などの調査を行い、各工法の効果、適用性、周辺環境に与える影響およびトンネル工事工程、施工方法などを十分考慮した上で選定しなければならない。施工時には、変化する現場状況・目的に応じた適切かつ迅速な対策工の選定が要求される。対策工の選定を行う際には、切羽観察記録や計測データなどより現場状況をよく吟味し、各種の対策工の施工条件や費用対効果などについて比較検討する必要がある。対策工の選定では、類似条件における実施事例を参考に比較対象となる対策工の選定を行う経験的手法やFEMなどを用いた数値解析手法が用いられている。また、対策工の採用により得られる効果は、各種工法によって異なり、地山性状、立地条件、施工方法ならびに経済性などを踏まえた上で総合的な検討を行う必要がある。施工時に実施する

キーワード 山岳トンネル、地表面沈下、補助工法、対策工選定、早期閉合

連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設(株)土木設計本部プロジェクト設計部 TEL03-6229-6633

各種挙動計測（計測工 A，計測工 B）や数値解析の結果に基づき採用される対策工の効果を判断し，目的に応じた適切な工法を選定することは工事を停滞なく合理的に進める上できわめて重要である．

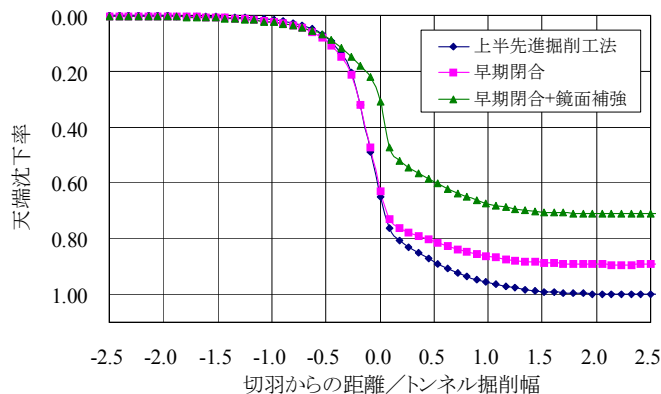
また，対策工の効果は，主目的とする効果とそれに付随した二次的効果を併せ持つことが多く，複数の対策工を組み合わせる用いることも少なくないことから，数値解析を実施することで，実際の施工時の効果をケーススタディすることが可能となる．対策工の期待される効果について三次元解析で評価した例を図－1，図－2に示す．

4. 近年の事例に見られる地表面沈下抑制対策

これまで，標準的な掘削工法は上半先進掘削工法で行われ，天端安定対策や地表面沈下対策は，長尺鋼管先受け工法を主流とする補助工法が一般に用いられてきた．しかし近年では，さらに対策効果が期待できるものとして，早期閉合を目的とした対策工が行われるようになっており，掘削工法として補助ベンチ付き全断面掘削工法の採用事例が多く，鏡面補強などの補助工法と併用して施工されるケースも見られるようになった（表－3）．早期閉合を目的として補助ベンチ付き全断面掘削工法を採用する際には，切羽面が上半先進掘削工法に比べて大きく，切羽面の自立や安定性が要求されたため鏡面補強などの補助工法が必要となる場合がある．よって，鏡面補強などの対策規模が上半先進掘削工法より大きくなる場合があるため，安全性や経済性など総合的に比較検討することが必要となる．道路および鉄道トンネルの小土被り部で早期閉合を行った場合の変位計測抑制効果の例を図－3に示す．なお，抑制効果については変位計測結果の値を評価する方法として，抑制効果（％）＝ $\{1 - (\text{閉合後最終値} \div \text{閉合前最終値})\} \times 100$ で算出した．この結果から早期閉合はある程度の変位抑制効果を期待でき，地表面沈下抑制にも効果があるものと考えられる．

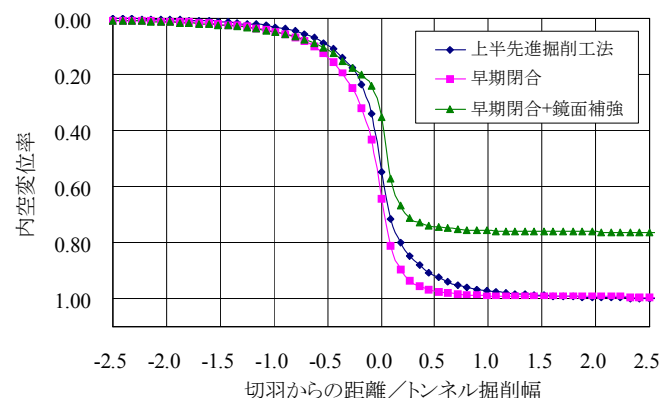
5. おわりに

山岳トンネルの地表面沈下検討部会の対策WGでは，主として合理的な地表面沈下対策工の選定・評価について，実務者にとって有用な情報をライブラリーに盛り込めるようとりまとめを進めていきたいと考えている．



※天端沈下率は上半先進掘削工法の最大天端沈下量で無次元化した

図－1 解析による対策工の期待される効果評価例①



※内空変位率は上半先進掘削工法の最大内空変位量で無次元化した

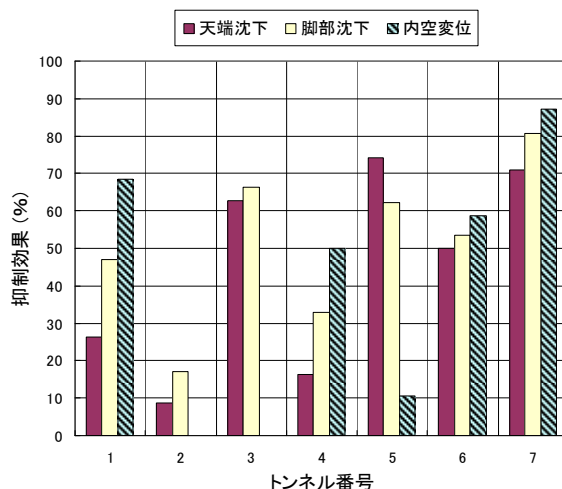
図－2 解析による対策工の期待される効果評価例②

表－3 事例調査による地表面沈下対策としての早期閉合事例

期間	早期閉合事例数	鏡面補強との併用事例数
～2000	0	0
2001～2005	5	3
2006～2009	23	20

※事例調査対象文献

・施工体験発表会	(社)日本トンネル技術協会	1993～2009 年
・トンネル工学論文集報告集	(社)土木学会	1994～2009 年
・トンネルと地下	(株)土木工学社	1994～2009 年
・土木技術	(株)土木技術社	1997～2009 年
・土木施工	(株)山海堂	1997～2009 年



図－3 早期閉合の変位計測抑制効果例