

坑口部 巨石による 変状対策と覆工設計

寺西 淳次*

Junji TERANISHI

諏訪 至***

Itaru SUWA

内田 裕二**

Yuji UCHIDA

1. はじめに

本工事は長崎県の北部に位置する松浦佐々道路において松浦ICから平戸IC間に計画されているトンネルのうち、松浦IC側の松浦1号トンネルを新設する工事であり、全長1,204 m、掘削断面積109.3 m² (C II) の高規格道路トンネルをNATMにより施工するものである(図-1)。掘削始点となる終点側坑口上部には岩盤の一部と見られる玄武岩岩塊が露頭しており、坑口付後にトンネル掘削を開始すると、その巨岩の一部が切羽に現れ、大きな変位をもたらした。その変状対策と長期安定性確保のための覆工設計について報告する。

2. 工事概要

工 事 名：長崎 497 号松浦 1 号トンネル新設工事

発 注 者：国土交通省 九州地方整備局

施 工 者：西松・谷川特定建設工事共同企業体

施工場所：長崎県松浦市志佐町庄野免地先～白浜免地先

工 期：2019 年 11 月 22 日～2024 年 10 月 31 日

3. 巨石直下の掘削

終点側坑口からトンネル掘削を開始するとすぐに岩盤の一部と想定されていた露頭した巨岩(写真-1)の一部が切羽に現れ、当該区間の掘削を終えると、独立した一つの大きな岩塊であることが判明した。この岩塊は、トンネル上部に直接上載荷重として作用し、脚部の地山がぜい弱であったため、トンネルに大きな沈下をもたらした。初期変位が非常に大きく、早急な対策が必要となり、支保工を縦断方向に連結し、サイドパイルを打設するなどして変位抑制を試みたが効果は小さかった。最終的に1次インバートによる閉合まで実施し、切羽離れが30 m程度(≒2D)に達してようやく収束が確認できた。掘削直後の変位速度は20～30 mm/日で、切羽を停止しても

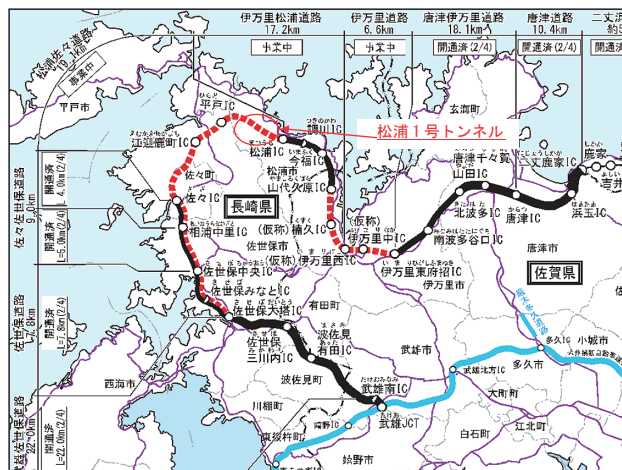


図-1 松浦 1 号トンネル位置図



写真-1 玄武岩岩塊の露頭状況

変位が進む状況にあった。支保工連結とサイドパイルの施工により、切羽停止時は6 mm/日、サイドパイル増設により切羽停止時で1.5 mm/日、切羽進行時で5 mm/日、インバートの閉合により1 mm/日程度に変位速度を抑えることができたが、最終沈下量は145 mmに達した。この変位は縫い返しが必要なレベルに達していたが、巨石の再掘削が更なる荷重作用を引き起こす懸念から、建築限界を侵さない範囲で覆工をシフトさせ、覆工巻厚を確保して縫い返し作業を回避した。

4. 長期安定化対策の検討・覆工設計

一次支保の変位は収束し安定していたが、供用後の長期にわたる乾湿繰り返しや雨水の浸透により岩塊周辺にゆるみが生じ、再度荷重としてトンネルに作用する懸念が残るため、長期安定性の検討が必要と判断した。

4-1 一次支保の負担過重の推定

一次支保が負担している荷重の推定はフレーム計算により実施した。解析に必要な地山の変形係数は、ボーリング孔で実施した孔内水平載荷試験と室内試験の一軸圧縮強度試験から得られた平均値を採用した。トンネルに作用する荷重は、全土被り荷重を基本とし、支保工の発生応力度が許容応力度を超過する荷重割合を算出して、

* 九州(支)松浦1号トンネル(出)(現:嘉手納給水施設(出))

** 九州(支)松浦1号トンネル(出)

*** 土木設計部設計二課

全土被り荷重の55%までが一次支保が負担できる結果を得た。一次支保の状態では地山が安定していることから、この結果を下記の通り整理した。

- ・一次支保が負担している外力は全土被りの55%
- ・残り45%の外力は地山が支持している
- ・一次支保と地山は一体となって外力を支持している

4-2 覆工設計

一次支保の耐力低下を想定し、負担している荷重を覆工で受け替える構造(RC)を検討した。すなわち、覆工設計で考慮する設計荷重は全土被り荷重の55%と設定した。この考え方は下式の通り、一次支保の耐力が低下しないのであれば110%の荷重負担となり10%の余裕代があると考えられることもでき、「覆工耐力の余力の概念」とすることもできる。

$$\text{一次支保負担 (55\%)} + \text{覆工負担 (55\%)} = 110\%$$

想定する覆工構造(RC)の仕様は、現実的に施工が可能と考えられる下記条件の通りに設定した。

覆工構造(RC)の仕様

覆工厚(アーチ): $t=450\text{ mm}$

覆工厚(インバート): $t=500\text{ mm}$

コンクリート設計基準強度: $\sigma'_{ck}=36\text{ N/mm}^2$

鉄筋(SD345): アーチ D29@150

インバート D22@150

フレーム計算の結果、コンクリート・鉄筋の発生応力は許容応力度を超過し、何らかの方法で周辺地山を改良し、地山の変形係数を改善し覆工の変形を拘束する必要がある。このため、変形係数E(地盤ばね)をパラメータとして繰り返し計算を行い、発生応力が許容応力度以下となる変形係数を算出した結果、周辺地山に必要な変形係数は $E=60\text{ MPa}$ となった。

さらに、45%の荷重を負担する地山に、将来劣化が生じた場合や地震時等の不確定荷重に対する場合を考慮して、限界状態設計法(終局限界状態)による覆工の安全性照査を実施した。将来の不確定な荷重として全土被り荷重を想定し、覆工が100%負担する場合を終局限界状態として検討を行った。荷重値を全土被りとした場合の発生断面力をM-N耐力カーブにプロットした結果、覆工・インバートとも耐力カーブ内に収まり、安全性が確保されることが確認できた(図-2)。

5. 地山改良

地山の変形係数 $E=60\text{ MPa}$ を実現するための地山改良を検討した。改良工法はトンネル内からの注入工法によるものとした。材料は対象地質が硬質な玄武岩塊を多く含む崩積土主体となるため、限定注入が可能なゲルタイムの短いものから、高強度で耐久性の高いウレタン系注入材(高強度シリカレジン)を採用した。また、実施工前に試験施工を行い、孔内水平載荷試験により改良地山の変形係数が必要値以上となる注入量を決定、確認した。

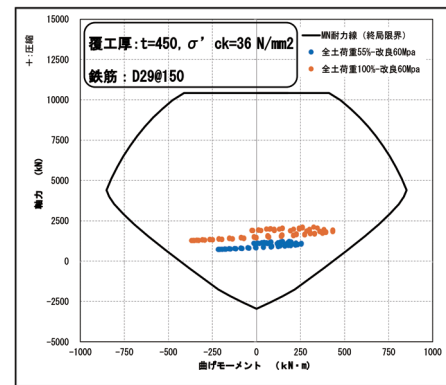


図-2 終局限界状態の照査結果

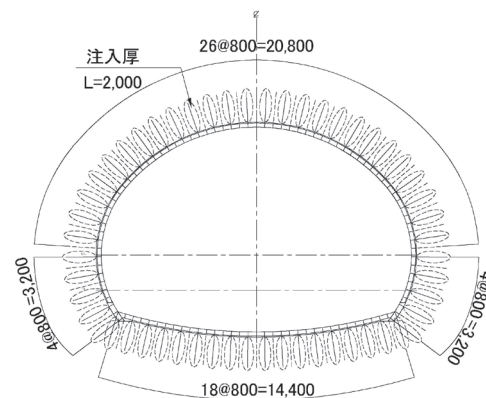


図-3 周方向注入範囲

縦断方向の注入範囲は岩塊荷重がトンネルに直接作用すると想定できる範囲として、切羽観察記録から想定される岩塊の大きさに対し前後に2mずつ追加した延長とした。横断方向は、地山改良の目的が覆工の発生応力を低減させることであり周辺地山と一体となって覆工の変位を拘束することが重要であるため、360°全周とし、改良厚は参考文献¹⁾を参考に $t=2\text{ m}$ とした(図-3)。

6. おわりに

本トンネルは坑口掘削から巨岩の出現による沈下の増加に影響され、変位の抑止に非常に苦労した。その区間の覆工については建築限界・覆工厚の確保を地山の再掘削を行うことなく実現し、地山を再度緩めることなく長期安定性も確保した。本報告が同種的事象や対応が必要なトンネル施工の一助となれば幸いである。

謝辞. 本長期安定化対策検討にあたりご指導・ご助言をいただきました。松浦佐々道路トンネル技術検討委員会の長崎大学 蔭教授をはじめ、東京都立大学砂金教授、土木研究所日下上席研究員ほか各委員の皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人 土木学会：トンネルライブラリー 20 山岳トンネルの補助工法—2009年版—, p. 136, 2009. 9.