

突発湧水発生箇所空洞充填と減水工に関する報告

Report on reducing water levels and filling cavities in areas where sudden flooding occurs

井内 厚志* 田中 義晴**
 Atsushi Iuchi Yoshiharu Tanaka
 喜納 竜飛** 永田 謙一郎***
 Ryuga Kina Kenichiro Nagata

要 約

本工事は、日田市と中津市を結ぶ地域高規格道路（日田山国道路 L=8.8 km）のうち、延長 1,558 m の避難坑を NATM 工法により施工するものである。突発湧水と切羽崩落の影響によりトンネル背面におよそ 10 m³ の空洞が形成された。長期的なトンネルの安定性を確保するため、空洞部の充填を行う必要があるが、空洞部には常に多量の湧水が流入している状態であった。空洞充填は、湧水による充填材の流出が懸念されたため、空洞部の充填を行うことは困難であった。湧水量の推移を 1 年近くモニタリングを行ったが、減少する傾向はみられなかったため、時間経過に伴う湧水量の減少は期待できないと判断した。そこで、止水系ウレタン注入材（以下、KOD-M と称す）によって空洞部に流入している湧水量の低減を図った減水工と、水中不分離性を有する可塑性グラウト材を用いた空洞充填工を実施した。本稿では、上記の大量湧水下での空洞充填の施工結果について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 空洞部の状況と施工上の課題
- § 3. 減水工の検討
- § 4. 空洞充填工の検討
- § 5. 施工結果
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

本工事は、日田市と中津市を結ぶ地域高規格道路（日田山国道路 L=8.8 km、図一参照）のうち、延長 1,558 m の避難坑を NATM 工法により施工するものである。

地質は凝灰角礫岩（D 級）を主体としており、一部地下水を豊富に賦存した風化安山岩（C 級）が貫入している。この凝灰角礫岩と風化安山岩の層境では湧水の発生が懸念されていたため、穿孔検層（DRISS）と電磁波探査（FDEM 探査）による切羽前方探査を実施しながら慎重に掘削を行った。凝灰角礫岩の掘削を進めていたところ、湧水の発生と切羽天端部の小崩落が発生した（図一



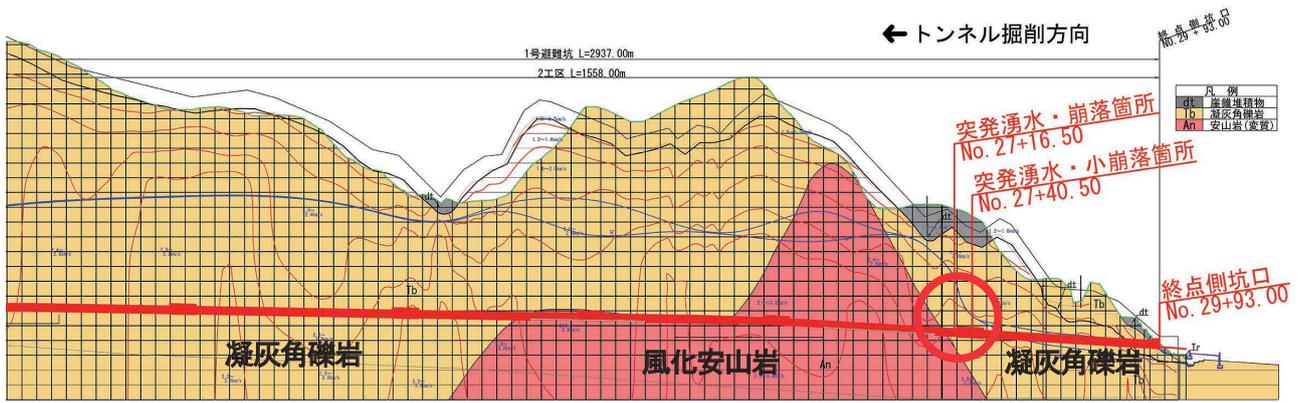
図一 日田山国道路位置図

2 参照）。層境が近くに存在していると判断し、掘削補助工 A（小口径鋼管先受け工・鏡ボルト工 φ76.3 mm, L=9.5 m, シリカレジとウレタン注入材の併用）と掘削補助工 B（水抜きボーリング）を適用した。ところが、さらに L=24.0 m 掘進した地点にて、再び突発湧水により大きな切羽の崩落が発生したため、掘削作業を一時中止し、対策工を追加した（写真一、2 参照）。対策工実施後、掘削作業を再開し、一次支保の構築を完了することができた。崩落部を一時的に安定させることができたが、

* 九州（支）日田 1 号トンネル（出）
 （現：本社土木設計部）

** 九州（支）日田 1 号トンネル（出）

*** 南巨摩（工）



図一2 日田山国道路位置図

崩落箇所 (No.27+13.5~18.5) は、突発湧水と切羽崩落の影響により、トンネル背面に 10 m³ 程度の空洞が形成された状態であり、常に大量の湧水が空洞部に流入していた。

本稿では、トンネルの長期的な安定性を確保するため、KOD-M によって空洞部に流入している湧水量の低減を図った減水工と、可塑性のグラウト材 (JPG Plas-ZERO) を用いた空洞充填工の施工結果について報告する。

【工事概要】

工事名	令和3年度道改国第2-2号道路改良工事
発注者	大分県 土木建築部
工事場所	大分県日田市大字花月地先
工期	令和4年3月26日～令和9年9月22日
工事内容	トンネル (小断面 NATM) 工事 発破掘削
掘削延長	L=1,567 m (トンネル部 1,558 m)
掘削断面	標準部: 18 m ² 拡幅部: 39 m ²
掘削工法	全断面掘削工法
掘削方式	発破方式
インバート	インバートコンクリート L=1,138 m



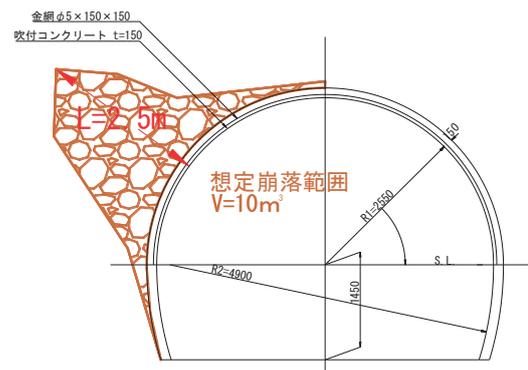
写真一1 崩落前の切羽状況



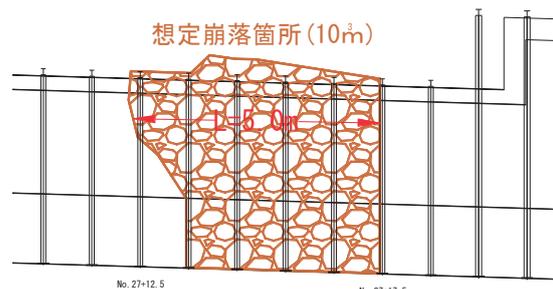
写真一2 突発湧水・切羽崩落状

§ 2. 空洞部の状況と施工上の課題

図一3, 4 に一次支保構築後の空洞部想定断面図・縦断面図を示す。



図一3 空洞部想定断面図



図一4 空洞部想定縦断面図

空洞部は崩落時の状況，実測した結果から，トンネル半径方向にL=2.5 m,トンネル延長方向にL=5.0 m,およそV=10 m³の空洞が形成されていた。トンネル全体の湧水量は，TD553.6 m 時点で，8,400 l/min であり，そのうち，空洞箇所近傍 (No.27+0.5~19.5,L=19.0 m) は，一次支保構築後も 4,000 l/min 以上の湧水が継続しており，湧水量の推移を監視したが1年経過した後も湧水量が減少する傾向はみられなかった。そのため，時間経過による湧水量の減少を期待することができなかった。特に，空洞部には2,000 l/min の湧水が流入していると考えられたため，空洞部に充填材を注入した場合，多量の湧水により，充填材が希釈され，材料分離が発生して空洞外に流出し，充填できないことが懸念された。そのため，空洞充填に先立ち，空洞部に流入している湧水量を低減させる減水工を実施し，充填材が注入できる状態にする必要があった。

§3. 減水工の検討

3-1 空洞部への湧水の流入状況

突発湧水と切羽崩落発生後，対策工として，崩落箇所の湧水を切羽後方へ導水し，切羽面から出水している湧水の低減を目的に，切羽外周 180°の範囲に水抜きボーリング (φ114.3 mm 鋼管，L=18.5 m,n=18 本) を施工していた。掘削再開時には，切羽面の湧水量の低減に寄与し，湧水による切羽の崩壊の防止，切羽作業での安全性の向上，作業環境の改善など，その効果を発揮したが，一次支保構築後は水みちが変化し，水抜きボーリングによって集水された湧水が，空洞部に逸走している状態となった。

図-5 に空洞部に湧水が流入しているイメージ図を示す。水抜きボーリングにて空洞部前方より集水した湧水は，空洞部に向かって導水される。水抜きボーリングで集水できなかった湧水や，水抜きボーリングから逸走した湧水は，吹付コンクリートの背面を流下して支保工足元付近に水みちを形成し，トンネル坑内に流入している状態であった。また，水抜きボーリングによって導水された湧水は，空洞部を通過する際，すべて空洞内に逸走し，吹付コンクリート背面を流下してトンネル坑内に流入している状態であった。

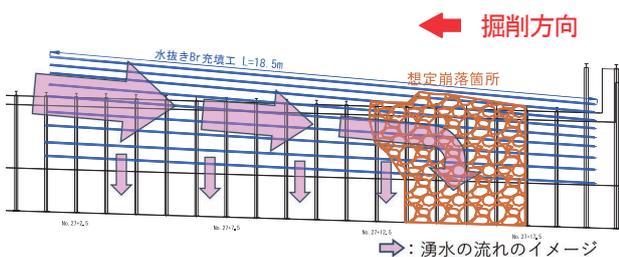


図-5 空洞部への流入イメージ縦断面図

3-2 減水工の計画

(1) 注入材の選定

大量湧水下での地山改良に適した注入材の選定を行った。通常，トンネル工事で一般的に使用されるセメント系の注入材やシリカレジン，大量湧水下では硬化前に流出するため適用は困難である。また，シリカレジン，発泡体を形成するが比較的透水係数が大きいため，減水・止水対策としては不向きである。そのため，大量湧水下でも施工可能な KOD-M を採用することとした。

KOD-M の特徴として，水と接触すると発泡体を形成し，未接触の場合は無発泡体を形成する性質があり，水との接触により固結体の性状が変化する (写真-3 参照)。無発泡体は圧縮強度 60 MPa 程度と高強度であり，透水係数は非常に小さく難透水 (実質的な不透水) である。そのため，湧水を伴った地山内に KOD-M を注入した場合，水と接触し発泡体を形成するが，注入を継続することで，発泡体が止水壁ようになって徐々に水との接触が減り，最終的には水と接触せず無発泡体を形成し高い減水・止水効果を期待することができる。また，高圧ポンプ (最大 20 MPa) を使用することで，亀裂の内部まで薬液を浸透させることができ，水みちの確実な閉塞を期待することができる。



左：水添加1% (7倍発泡) 右：水接触無し (無発泡)
写真-3 KOD-M 固結体比較

(2) 施工方法の検討

空洞部に流入している湧水量の低減を目的に，①，②の薬液注入による減水工を計画した。

- ① 空洞部前方の水抜きボーリング周囲の地山を KOD-M によって地山改良する。地山内の水みちとなっている亀裂や空隙を閉塞し，水抜きボーリング周辺地山の透水係数を小さくすることで，水抜きボーリングに集水される湧水量を低減する (図-6，7 参照)。

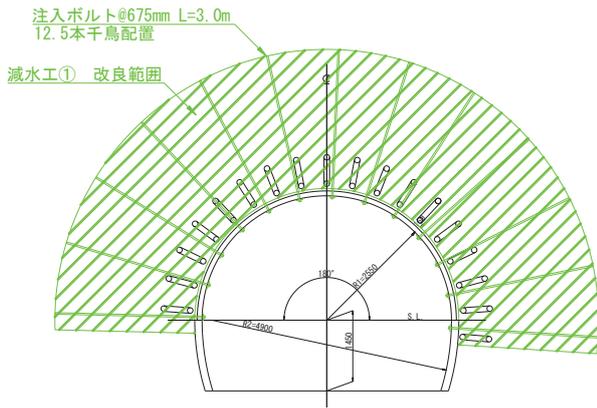


図-6 減水工① 断面図

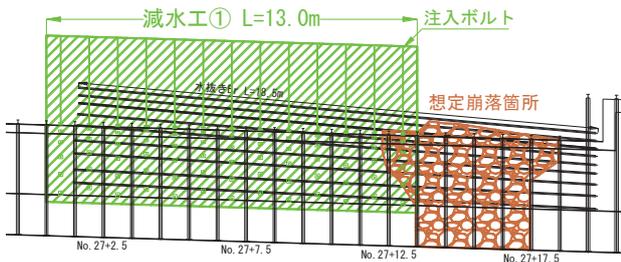


図-7 減水工① 縦断面図

- ② 上記①を実施後、水抜きボーリング鋼管にウレタン注入材を注入充填し、水抜きボーリング内を完全に閉塞することで、水抜きボーリングによって導水され、空洞部に流入している湧水の止水を行う（図-8、9参照）。

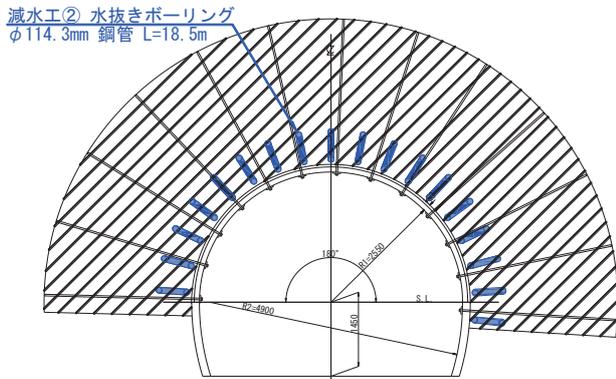


図-8 減水工② 断面図

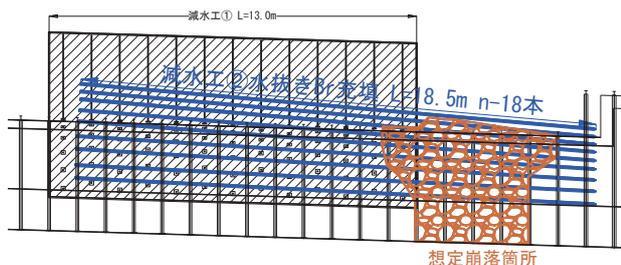


図-9 減水工② 縦断面図

減水工①、②の順序で計画している理由としては、減水工②実施後、減水工①を実施する順で実施した場合、湧水量が多いため、2液混合型の注入材が反応・固化する前に流出し、目的の減水が困難であると考えられたためである。さらに、未反応の注入材が濁水中に流出するため、濁水処理設備への負担増や、注入材の使用量の増加などが懸念された。そのため、減水工①を実施後に、減水工②を実施し、効果的に減水を行う計画とした。

また、当該区間は掘削作業時に掘削補助工を採用しており、地山内にはφ76.3mmの鋼管に加え、キーストンプレート、水抜きボーリングφ114.3mmの鋼管など、多数の鋼材が埋設されている状態であった。そのため、注入ボルトの打設孔を削孔する際、ドリルジャンボなどのパーカッション式の削孔機械では鋼材に接触した場合、施工が困難であるため、小型のロータリー式ボーリングマシンを採用し、ボーリングビットは鋼材の切断が可能なダイヤモンドビットとした。

(3) 注入方法の検討

注入にあたり懸念されたのは、多量の湧水による注入材のリーク・流出による濁水処理設備への負担増や周辺環境への影響、注入材の使用量の増加である。

天端崩落と突発湧水発生後、当該区間にて小口径鋼管先受け工を実施した際、湧水量が多いため、鋼管口元から未反応の注入材のリークが多く確認された。そのため、試験的に鋼管口元に機械式パッカを使用し、鋼管口元からのリーク防止対策を講じた。その結果、鋼管口元からの未反応の注入材のリークが減少し、注入材の使用量を低減させることができた。これらのことから、減水工①の注入ボルトには機械式パッカ(HIPREX ボルト、写真-4参照)を使用し、口元からの注入材のリークを防止する計画とした。さらに、注入材2液を混合するミキシングユニットをダブルミキサーとすることで、2液を確実に混合させ、未反応液の低減や反応時間短縮を図った。また、注入管理方法は止水・減水を目的としているため、過去の施工実績から高压注入での圧力管理(限界注入圧10MPa)とした。注入中は、高压注入の圧力やトンネルに偏圧がかかることが懸念されたため、注入作業中は常時計測監視を実施した。



写真-4 HIPREX ボルト膨張前後

§4. 空洞充填工の検討

4-1 充填材の選定

空洞部の充填に先立ち、前述の減水工を実施し空洞部に流入している湧水量の低減を試みたが、すべての湧水を完全に止水することは非常に困難である。そのため、減水工実施後の空洞部に流入している湧水量に応じて充填材を使い分けすることとした。空洞部に流入している湧水量は300 l/min 未満まで低減していることを前提とし(300 l/min 以上の場合は追加の減水工を検討する)、使用する材料の性能から、空洞部での湧水量が0~150 l/min であれば安価なセメント系の充填材を使用し、150~300 l/min であれば可塑性のグラウト材を使用する計画とした。

4-2 空洞充填工の施工

図-10~13に施工ステップ図、図-14に充填工・充填確認孔配置縦断面図を示す。空洞充填工施工ステップは、下記の①~④通りである。

① STEP. 1

比重の重たい充填材が徐々に湧水中で沈積することで空洞部の低い位置から充填が行われる。

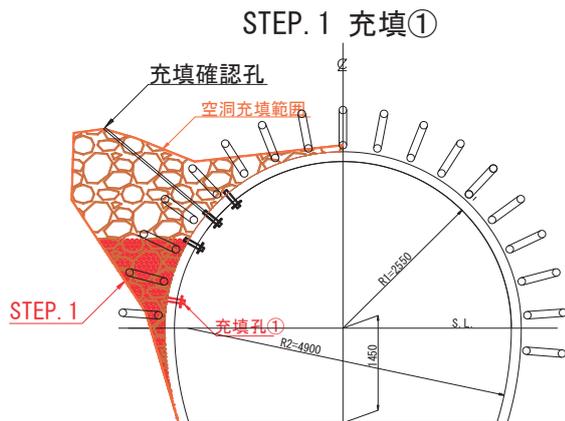


図-10 空洞充填工施工ステップ図

② STEP. 2

充填材の沈積に合わせて徐々に充填孔をトンネル上部へ移動し、天端付近までの充填を行う。

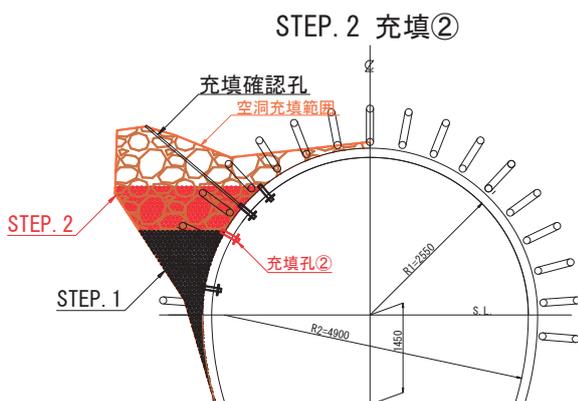


図-11 空洞充填工施工ステップ図

③ STEP. 3

充填孔より上部にある空洞に対しては、吹き上げる方式で充填を行う。

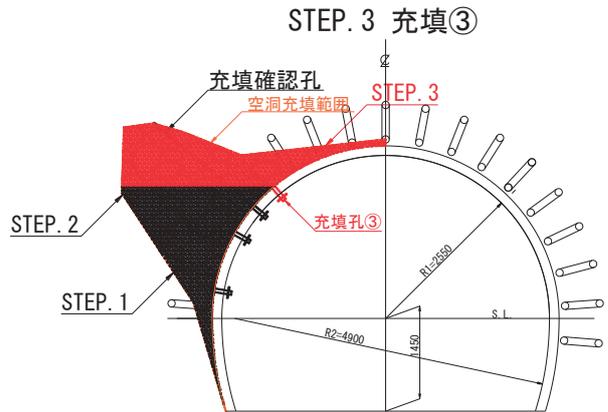


図-12 空洞充填工施工ステップ図

④ STEP. 4

事前に探り削孔で設定した空洞部の一番高い位置に設置した充填確認孔から充填材のリークを確認して充填完了とする。

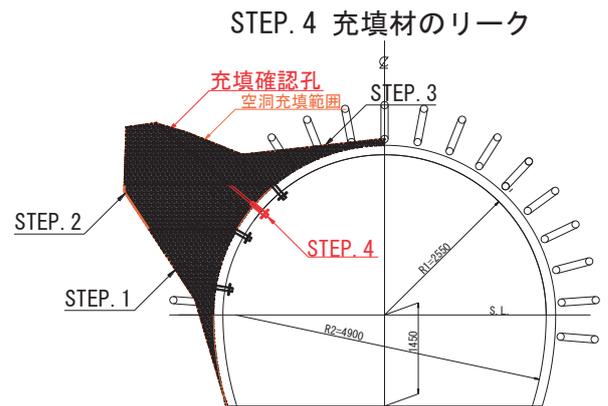


図-13 空洞充填工施工ステップ図

想定崩落箇所

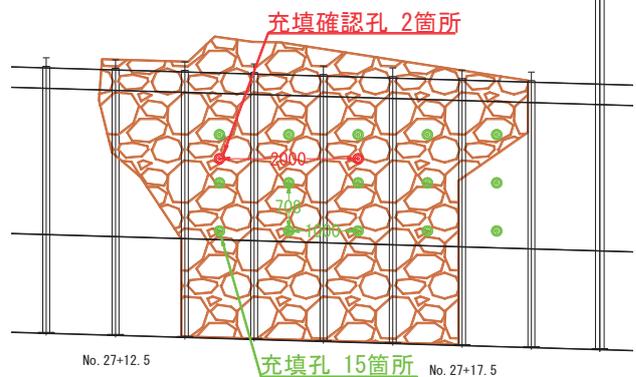


図-14 充填工・充填確認孔配置縦断面図

充填中は、充填時の圧送ポンプの圧力や硬化前の充填材による側圧など、トンネルに偏圧がかかることが懸念されたため、充填作業中は常時計測監視を実施する計画

とした。また、硬化前の充填材の側圧を低減させるため、充填は数日に分けて行い、各ステップにて充填材が硬化していることを確認した後に次ステップの充填を行う計画とした。

§ 5. 施工結果

5-1 減水工施工結果

注入ボルト打設孔の削孔作業、注入作業は工程短縮のためロータリー式ボーリングマシン4台と注入ポンプ4台を導入し、4班体制にて施工を行った。減水工①の施工範囲の各断面には1~13 ring とナンバリングを行い、施工スペースが確保できるようそれぞれのボーリングマシンは1, 4, 7, 10 ring から坑口方向へ向かって施工を進めた(図-15参照)。また、隣り合う作業にて施工箇所が近接し注入材が逸走しないよう各作業場は離隔を取るよう計画した(図-16参照)。

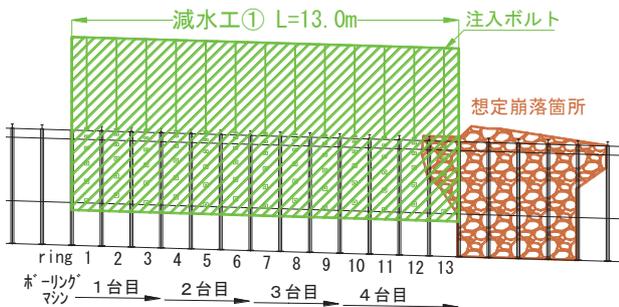


図-15 充填工・充填確認孔配置縦断面図

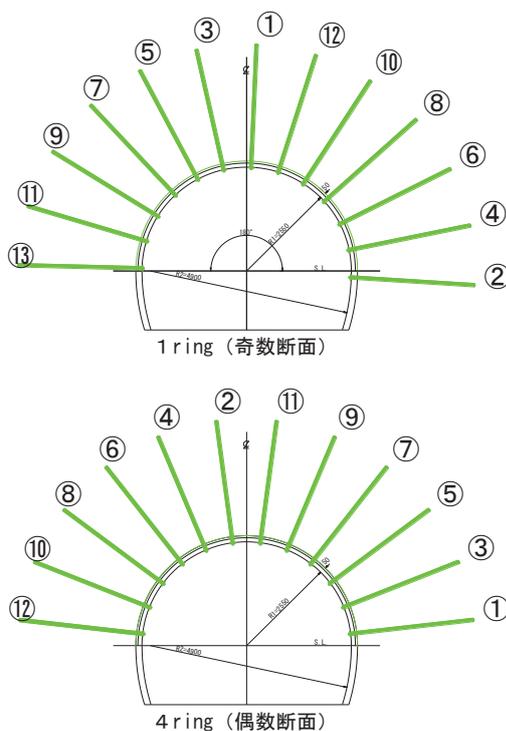


図-16 注入工施工順序図

9 ringにて計測した内空変位データを図-17に示す。8, 9 ringにて注入実施時にSLでの内空変位が発生した。注入作業中に変位が発生し、注入を中断すると変位が止まったことから、注入ポンプによる圧力にて変位が発生していると判断した。そのため、以降の注入では注入孔から湧水がある場合は限界注入圧8MPa、湧水がない場合は初期圧+2.5MPaに変更した。その後は大きな変位は発生せず、減水工②まで完了した。トンネル全体湧水量は、減水工①終了時点で8,400 l/min → 5,700 l/min (2,700 l/min 減)となった。減水工②では5,700 l/min → 5,400 l/min (300 l/min 減)となり、空洞充填工の実施目安としていた空洞部での湧水の流入量も300 l/min以下であったため、想定崩落箇所の空洞充填工を実施した。

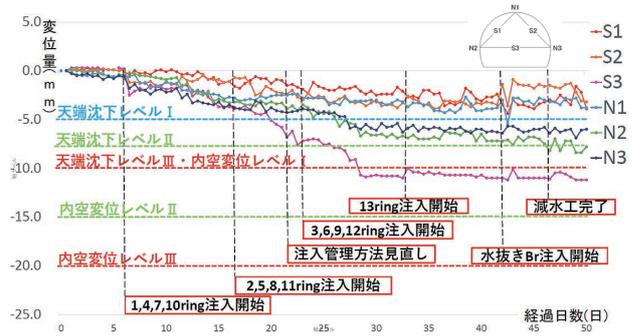


図-17 9 ring 内空変位計測データ

5-2 空洞充填工施工結果

空洞充填工は、当初計画通りに施工は進み、想定崩落箇所 10 m³ とほぼ同量の 10.066 m³ の注入が完了した時点で、充填確認孔から充填材のリークを確認することができた。また、その際の注入ポンプでは、一次支保に過度な圧力が作用しないよう0.2MPaを上限圧力として管理した。さらに、充填作業は過度な側圧がかからないよう数日に分け施工を行ったため、内空変位も小さく作業を終了した。

§ 6. まとめ

大量湧水下での空洞充填という、施工事例の少ない施工であったが、当該区間での掘削時の状況や崩落状況、水みちの状態、過去の施工実績などから減水工、空洞充填工を計画した。施工中も湧水状況確認や変位計測結果などから、施工方法を工夫することで安全に空洞充填を完了することができた。トンネル全体の湧水量も8,400 l/min から5,400 l/min へと3,000 l/min の湧水量を減らすことができた。今後は、今回の施工に伴う地下水位の復水や季節的な大雨によるトンネルへの影響が懸念されるため、引き続き計測監視を行うことが重要であると考えられる。最後に、本稿が今後の工事の一助になれば幸いである。