

自然由来のヒ素を含む大量湧水の減水対策

熊谷組 正会員 ○中出 剛
 熊谷組 手塚 仁 古田島信義 片山 政弘
 鹿児島県 木佐貫 浄治

1. はじめに

北薩横断道路は、鹿児島県北西部と鹿児島空港を結ぶ地域高規格道路であり、北薩トンネルはその経路上にある紫尾山を最高峰とする出水山地を貫く、延長 4,850m の長大トンネルである(図-1)。このトンネル工事のうち、出水工区（工区延長 2,610m）では、掘削中に最大 1,200t/h の大量湧水に見舞われ、トンネル貫通後も恒常的に約 600t/h の湧水が発生した。この湧水は、坑口から 1,500～2,200m の区間では 0.1～0.3mg/L の高濃度のヒ素を含有していることが確認され、施工中は通常のトンネル工事用の濁水処理設備に塩化第二鉄を用いたヒ素処理設備を追加設置することにより対応にあたった。ヒ素処理においては、公共用水域における水質汚濁に係わる環境基準（環境対策基本法第 16 条）に基づき、排出先河川でのヒ素濃度が 0.01mg/L 以下となることを目標としており、恒久的な対策工として、ヒ素を含む大量湧水を抑制することが求められた。

このため本工事では、湧水抑制対策として、湧水箇所の地山をトンネル坑内から改良して、トンネル外周部に難透水ゾーンを形成し、坑内湧水量を抑制する減水対策工を実施した。本稿では、実施した減水対策工の概要とその効果について報告する。

2. 工事概要

2.1 地形・地質概要

北薩トンネルは、紫尾山（標高 1,067m）を最高とする標高 500m～600m 程度の山地が連なる出水山地に位置し、最大土被りは約 370m となる。北薩トンネル周辺の地質は、白亜紀の四万十層群と新第三紀中新世に貫入した紫尾山花崗岩からなる。本工事箇所の地質縦断面を図-2 に示す。出水側坑口から約 1,700m までの区間は四万十層群の砂岩、頁岩、またはこれらの互層、坑奥側は四万十層群より年代の新しい花崗岩で構成されており、紫尾山花崗岩周囲の四



図-1 北薩トンネル位置図

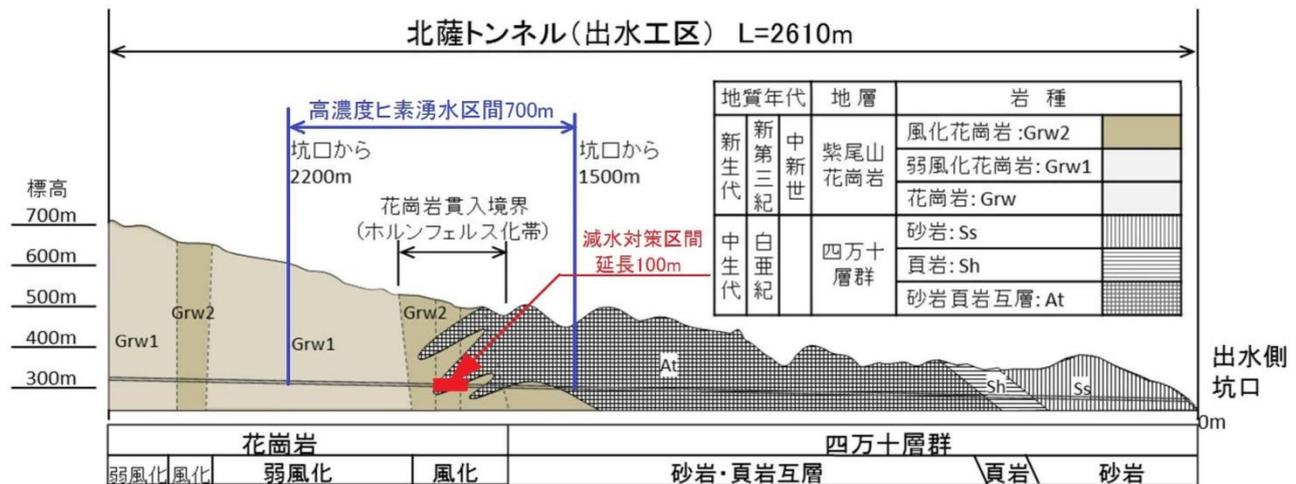


図-2 地質縦断面図

Water reduction measures for copious amount water inflow rich in naturally-derived arsenic :
 Tsuyoshi Nakade, Hitoshi Tezuka, Nobuyoshi Kotajima, Masahiro Katayama(Kumagai Gumi Co.,Ltd.),
 George Kisanuki(Kagoshima Prefecture)

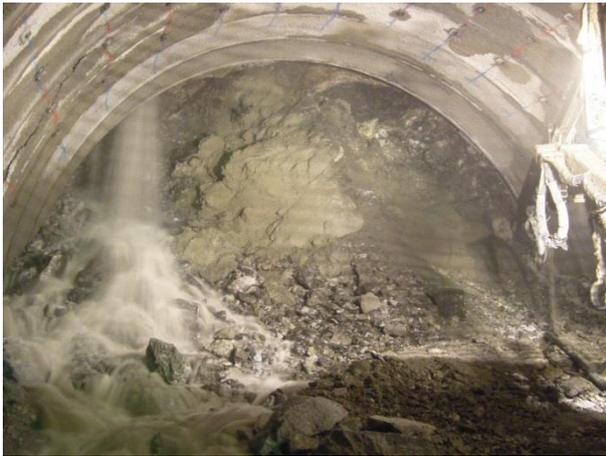


写真-1 貫入境界付近の掘削時の大量湧水状況



写真-2 トンネル掘進後の壁面からの湧水状況

万十層群は熱変成を受けホルンフェルス化している。このうち、坑口から 1,500m～2,200m の区間は高濃度ヒ素湧水区間であり、なかでも坑口から 1,800～1,900m の 100m 区間は、花崗岩と四万十層群の貫入境界で亀裂の発達した区間となる。

2.2 湧水の状況

掘削施工中には写真-1 のような大量湧水(300t/h)が発生した。トンネル掘進後も湧水量は減少せず、トンネル壁面(写真-2)や底面から恒常的な湧水が生じ、掘削中に最大で 1,200t/h の湧水量となった。多量の湧水に対して既往の注入方法では注入材が流されてしまい効果的に止水することができない。そこで湧水対策として、海外で施工実績があり湧水と反応して発泡固結する性質のウレタン系薬液(Carbo Pur(カーボプル)WF)を使用して、大きな水みちを閉塞した。この注入材による止水対策工は単一の湧水孔に対して止水効果が非常に高く、目視確認でも止水が確認できた。しかしながら地山の地下水位上昇に伴い別の小さな水みちから湧水が発生する状況となり、さらなる減水対策が求められた。

3. 減水対策工の計画

3.1 減水対策工の概要

減水対策として掘削後のトンネル構造をウォータータイト構造に再構築することは非常に困難であることから、トンネル周囲に改良による難透水ゾーンを形成し、湧水量を抑制する減水対策工を採用した(図-3)。従来の一般的な減水対策としては、トンネル掘削前に先行して地盤改良を行うプレグラウチング工法が行われているが、今回はトンネル掘削後に坑内から地山の改良を行うポストグラウチング工法による対策となる。ポストグラウチング工法はこれまで極めて施工事例が少なく、施工手法や効果の確認方法が確立されていないことから、試験施工によりこれらを確認し施工を進めた。なお、通常、このような限定された区間を止水(または減水)改良する場合には、改良区間の両端から地下水が廻り込み流入しないよう両端部に遮水壁を構築する場合がある。今回の施工範囲区間では、施工両端部付近に割れ目が少なく地下水を通しにくい花崗岩が分布していたことから、この花崗岩を難透水層として期待し遮水壁は構築しないこととした。

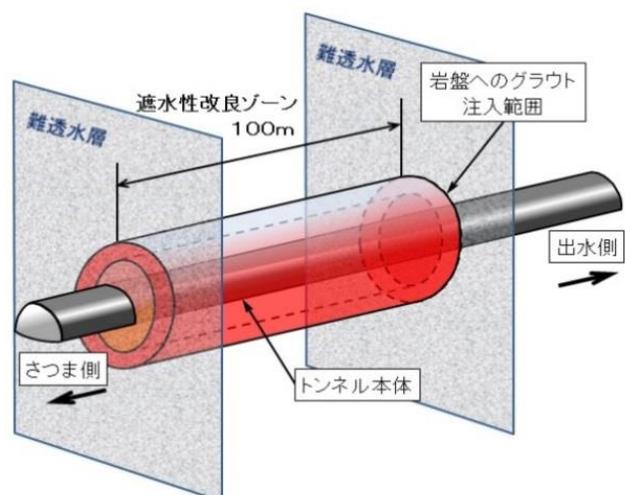


図-3 減水対策工の概要図

3.2 減水対策工の設計

3.2.1 地盤改良仕様の設定

本工法による湧水低減量は地盤改良部における透水特性により決定されるが、ここでは二次元浸透流解析により地盤改良仕様を設定した。まず、図-4に示す解析モデルにおいて、対策前の湧水量から逆解析を行い、原地盤の透水係数を 4.0×10^{-6} (m/s) と推定した。これに対し、トンネル周囲の地盤改良厚さを 1m~5m, 改良部の透水係数を原地盤の 1/100~1/400 の範囲でパラメータとした解析により、減水効果を試算した(図-5)。改良厚が 3m を超えると減水効果が低いことから、減水対策工の改良厚を 3m とし、ヒ素処理施設の規模や工事費等を踏まえて、改良部の透水係数は 4×10^{-8} (m/s) 程度にすることを目標とした。

3.2.2 トンネル構造への影響

減水対策工により湧水量を抑制することで、事前の解析検討ではトンネル直上の地下水位が 170m 程度まで上昇すると予測された(図-6)。減水対策工はトンネル坑内への湧水を許容しており、トンネル自体は排水型構造であるが、地下水位回復に伴う水圧作用がある場合は地山やトンネル構造に与える影響が懸念された。このため、水と応力・変形の連成解析により地下水回復に伴う周辺地山やトンネル支保工の挙動について解析検討を行った。図-7に対策前後でのトンネル周辺地山の応力分布を示す。対策によりドーナツ形状の改良領域の外側で間隙水圧の増加に伴う有効応力の変化がみられるが、全応力の大きな増加は生じていない。トンネル内空変位や支保工応力についても有意な増加挙動は生じないと考えられた。

3.2.3 グ라우チングの施工方針

掘削完了後の坑内からトンネル全周方向に改良を行う工法については、これまで事例が少なく確立された手法がないことから、ダムのコソリデーショングラウチング工法を遮水性の改良を目的として採用することとした。改良部の目標透水係数はルジオン値 (Lu) に換算して約 0.4Lu であるが、一般的なダムグラウチングでの改良目標値

(2.0~10.0Lu) に比較して極めて小さいことから、通常使用している高炉セメント (平均粒径 $10 \mu\text{m}$) や超微粒子セメント (平均粒径 $3 \mu\text{m}$) 等の注入材料では、所定の改良効果を得ることが難しいと予想された。

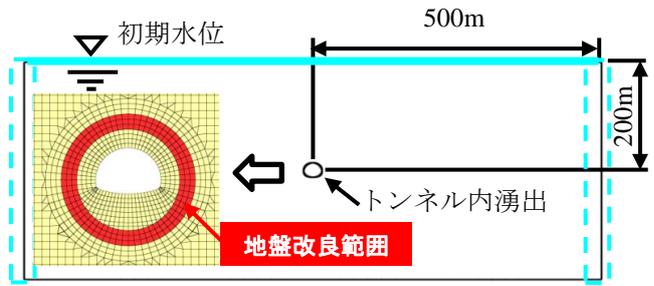


図-4 浸透流解析モデル

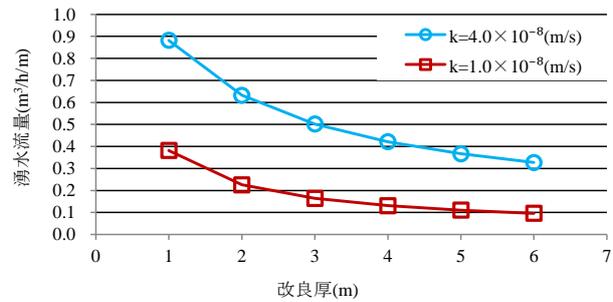


図-5 改良厚および改良部透水係数と減水率

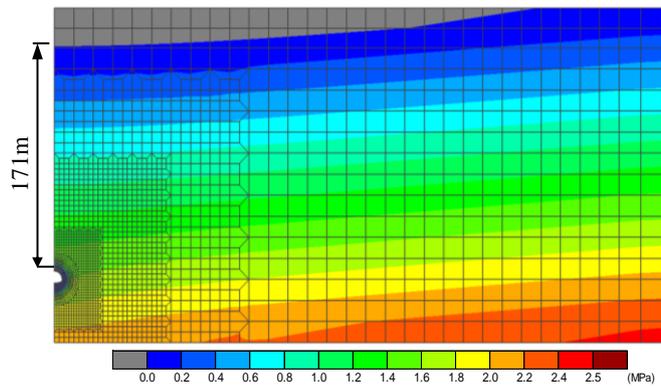


図-6 減水対策後の間隙水圧分布図

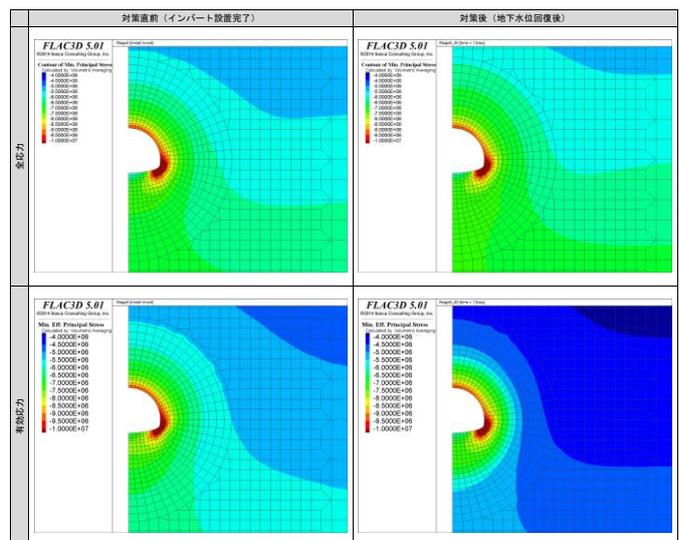


図-7 トンネル周辺の応力分布

このため、超微粒子セメントよりも粒子が細かく浸透性が高い、極超微粒子セメント(平均粒径 $1.5\mu\text{m}$)を用いることとした。

減水対策工の施工対象区間(図-3)は、湧水量が特に多い低速度帯の 100m 区間とし、施工にあたっては、図-8 に示すように、トンネル壁面から深さ 3.6m をカバーロックとし、3.6m から 6.6m の 3.0m 区間にグラウチングを実施することで、厚さ 3.0m のリング状の改良ゾーンを形成する計画とした。

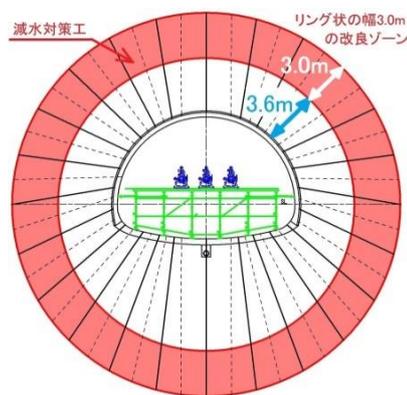


図-8 改良範囲とグラウチング工法の孔配置

4. グ라우チングの試験施工と本施工

4.1 グ라우チングの施工の概要

グラウチングは、ダム基礎処理技術の指針である「グラウチング技術指針・同解説 平成 15 年 7 月」¹⁾に基づき事前に試験施工を実施し、その結果を基に減水対策工のグラウチングを計画した。同書では、ダム基礎岩盤またはリム部の地盤へのグラウチングの調査、計画、施工および効果の判定に関する基本的な事項について規定している。

本グラウチング計画では、ダムにおける岩盤をトンネル周辺の岩盤に置き換え、同書に準じて計画した。以下に施工範囲、改良目標値、注入材料、規定孔の孔配置、配合切替、注入圧力について説明する。

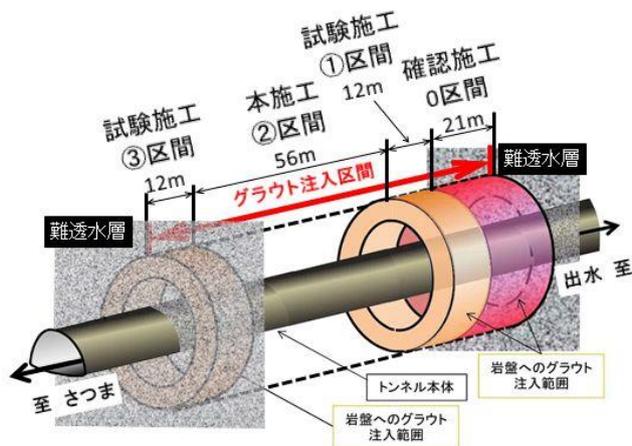


図-9 施工区間の名称

4.2 施工計画

4.2.1 施工範囲

本減水対策工は、図-9 に示すようにまず試験施工として①区間(花こう岩層: 12m)、③区間(四万十層: 12m)を施工し²⁾、一部施工方法を見直して②区間(地層混在: 21m)の施工を行なった。②区間の施工で、見直した施工方法の有効性を確認したため、同工法により②区間(地層混在: 56m)の本施工を実施した。

4.2.2 改良目標値と注入材料

前章の減水対策工の計画より、改良部の透水係数は $4 \times 10^{-8}(\text{m/s})$ 程度にすることを目標とした。なお、グラウチングはルジオン値で施工を管理することから、改良目標値を $0.4Lu$ と設定し施工した。注入材料は、ダムの基礎処理工で一般的に使用している高炉セメントや超微粒子セメント等の注入材料では、改良が難しいことが予想されたため、極超微粒子セメントを使用することとした。

極超微粒子セメントは平均粒径が小さく耐久性に優れたセメント系の材料であり、超微粒子セメントでは注入が困難な地盤に対しても高い浸透性を確保している。そのため極超微粒子セメントは、これまで液状化対策等の砂質地盤への適用事例は多いが、亀裂性岩盤への適用事例は無く、この度の減水対策工が初めてとなった。

4.2.3 規定孔の孔配置および施工順序

グラウチングは中央内挿法を基本として施工した。中央内挿法とは、図-10 に示すように 1 次孔(①)を施工した後に 1 次孔に囲まれた個所を 2 次孔(②)として施工し、2 次孔を施工した後に 2 次孔に挟まれた個所を 3 次孔(③)として施工する方法である。図-11 は、②区間および③区間で施工した孔配置展開図の一部で、左右方向がトンネル延長方向、上下方向がトンネルの円周方向を示している。

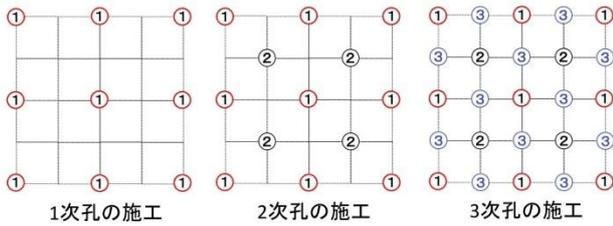


図-10 中央内挿法

また、同孔配置は4次孔までを規定孔としており、4次孔を最終次数孔とするもので、4次孔の改良範囲をエレメントと称し、改良効果を判定する最小単位と定義した。

4.2.4 配合切替と注入圧力

試験施工の結果から施工方法を一部見直し、0区間および②区間で実施した注入仕様を表-1に示す。注入圧力は1.0MPaとし、注入するセメントミルクの配合は一般的なダムグラウチングに準じ、表中の配合切替基準に示すように、注入前に実施する水押し試験の結果から、そのルジオン値の大小や注入状況により濃度を切替えるものとしている。また、ルジオン値が30Lu以上となる孔については、経済性を考慮して粗詰として高炉セメントを使用した。粗詰後は極超微粒子セメントを使用して遮水性を改良しており、ここでの分析結果にはほとんど影響しないものとする。

近接した孔において、同時に注入作業を行う

場合は規制を設け、平面に換算した距離で6.0m以上の間隔をあけて行うものとした。また、表-1の注入中断基準でも示しているように、注入量が規定量に達した場合、リークが発生しリークが止まらない場合、およびトラブルが生じた場合は注入を中断し、6時間の硬化待ちの後に再施工するものとした。これらの規制や基準は、ダムグラウチング技術指針・同解説に準じたものである。

4.3 グ라우チングの施工結果

4.3.1 施工結果の概要

0区間と②区間の施工結果を以下に示す。施工範囲は、ほぼ同じ割合で四万十層（1次孔：88孔/168孔）と花こう岩層（1次孔：80孔/168孔）が分布しており、改良前のルジオン値の頻度分布を相関係数で調べると、その相関係数が0.71となりほぼ同じ分布であることが分った。このことから、以下の解析では地層による区別はしていない。

減水対策工施工前の100m区間の区間湧水量は約300t/hであったが、施工終了時には38.4t/hまで減水した。施工終了時に計測した区間湧水量（38.4t/h）に対し、浸透流解析で改良部の透水係数を $2\sim 8 \times 10^{-8} \text{m/s}$ の範囲で変化させて求めた湧水量を比較すると、図-12に示すように実測湧水量を再現する改良部の透水係数は $k=5.5 \times 10^{-8} \text{m/s}$ と推定された。これはルジオン値に換算すると約0.4Luに相当する。

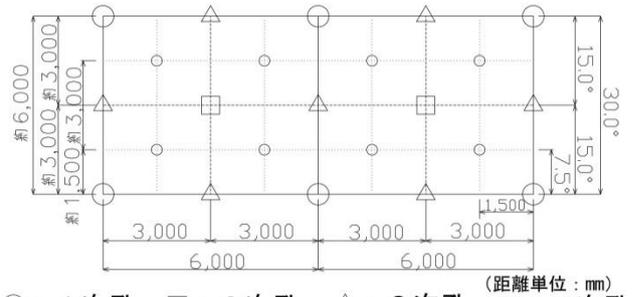


図-11 孔配置展開図

表-1 注入仕様

水押し試験	水押し試験：3段階 0.1MPa→0.5MPa→1.0MPaを基本とし、湧水がある場合は湧水圧をプラスする 昇圧速度：0.1MPa/分以下																																											
改良目標値	0.4 Lu																																											
注入材料	極超微粒子セメント+混和剤[ML-3000(1.5%)], 高炉セメントB種																																											
最高圧力	注入圧力は1.0MPa+湧水圧力(注入前に実測) または、限界圧力 $\geq 0.1\text{MPa}$ +湧水圧力(注入前に実測)																																											
配合切替基準	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">使用配合(C:W)</th> <th colspan="4">極超微粒子セメント</th> <th>高炉セメント</th> </tr> <tr> <th>Lu < 10</th> <th>10 ≤ Lu < 20</th> <th>20 ≤ Lu < 30</th> <th>30 ≤ Lu</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1:10</td> <td>600</td> <td>—</td> <td>—</td> <td>—</td> <td rowspan="5">← 水押し試験の結果 注入開始時の配合と配合切替時の注入量 (g)</td> </tr> <tr> <td>1:6</td> <td>400</td> <td>600</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>1:4</td> <td>400</td> <td>400</td> <td>600</td> <td>600</td> </tr> <tr> <td>1:2</td> <td>400</td> <td>400</td> <td>400</td> <td>400</td> </tr> <tr> <td>1:1</td> <td>600</td> <td>1000</td> <td>1400</td> <td>1400</td> </tr> <tr> <td>規定量(総量)</td> <td>2400</td> <td>2400</td> <td>2400</td> <td>2400</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	使用配合(C:W)	極超微粒子セメント				高炉セメント	Lu < 10	10 ≤ Lu < 20	20 ≤ Lu < 30	30 ≤ Lu		1:10	600	—	—	—	← 水押し試験の結果 注入開始時の配合と配合切替時の注入量 (g)	1:6	400	600	—	—	1:4	400	400	600	600	1:2	400	400	400	400	1:1	600	1000	1400	1400	規定量(総量)	2400	2400	2400	2400	
使用配合(C:W)	極超微粒子セメント				高炉セメント																																							
	Lu < 10	10 ≤ Lu < 20	20 ≤ Lu < 30	30 ≤ Lu																																								
1:10	600	—	—	—	← 水押し試験の結果 注入開始時の配合と配合切替時の注入量 (g)																																							
1:6	400	600	—	—																																								
1:4	400	400	600	600																																								
1:2	400	400	400	400																																								
1:1	600	1000	1400	1400																																								
規定量(総量)	2400	2400	2400	2400																																								
注入速度	20%以下/分以下																																											
昇圧速度	0.1MPa/分以下																																											
注入完了基準	規定圧力で注入量が0.6g/分以下になってから、30分間ダマ押しを行い完了とする																																											
注入中断基準	①グラウト注入量の総量が規定量に達しても、圧力が上昇傾向を示さず完了見込みがない場合 ②リークが発生し、コーキング処理等を講じても取らない場合 ③機械のトラブルによる中断時																																											

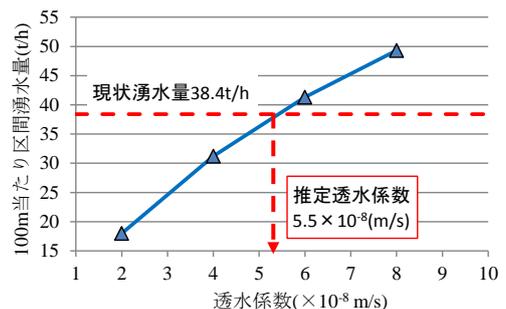


図-12 浸透流解析による改良部の推定

4.3.2 散布図

ルジオン値と単位注入セメント量 (Ce : kg/m) の関係を両対数で図-13 に示す。これより両者には良い相関があることがわかる。ここで定義する単位注入セメント量とは、ボーリング孔1孔当りに注入されたセメントの総重量を注入区間長で除し、1m 当りに換算した値である。

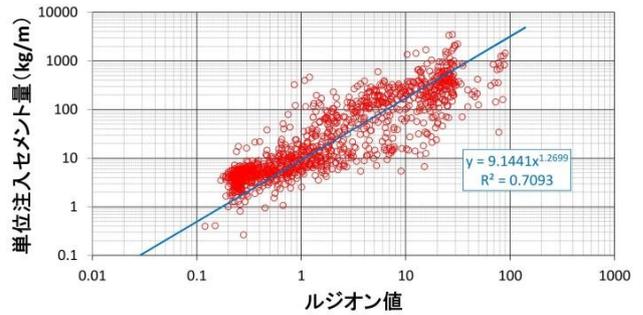


図-13 ルジオン値と単位注入セメント量の関係

4.3.3 次数通減図

次数毎の超過確率値と平均値の計算結果を表-2に示す。中央内挿法によりルジオン値が通減する状況を表-2の計算結果を基に、図-14の次数通減図に示す。ここでは横軸に次数(施工順序)、縦軸にルジオン値をとっており、施工次数にしたがってルジオン値が通減し、良好に改良が進んだ様子が分かる。表-2に示した4次孔の平均値 Lu は、改良目標値とした 0.4Lu には達していないが、この 3.0Lu とは3次孔施工後、4次孔注入直前に計測した値で、4次孔注入後の値ではない。よって、4次孔注入後の平均値を推定する必要がある。

表-2 ルジオン値超過確率値と平均値 (規定孔全孔)

孔区分	次数	孔数	改良目標値 超過確率(%)	平均値 Lu
規定孔	1次孔	168	83.5	15.8
	2次孔	144	85.9	12.1
	3次孔	312	74.1	5.3
	4次孔	600	59.2	3.0
合計		1,224		

4.3.4 ルジオン値の通減傾向近似式

グラウチング技術指針・同解説で規定しているルジオン値次数通減図は、図-14のように横軸に施工の順番をとったもので、次数によるルジオン値の通減傾向を表したグラフであるが、その通減傾向に物理的な意味は無く、近似式を求め4次孔終了後の Lu を推定することはできない。そのため、ここでは横軸に孔密度をとって次数通減図を作図し、規定孔(1次孔~4次孔)の値を基に近似式を求めた。

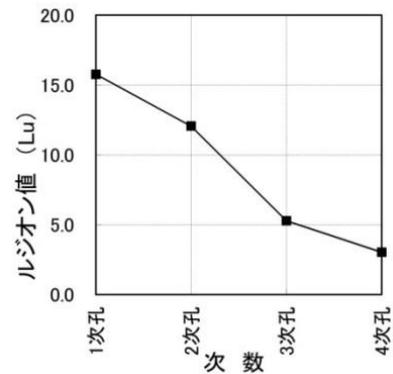


図-14 ルジオン値次数通減図

ここで孔密度とは、図-15に示すように中央内挿法における施工次数ごとの孔の断面積を1次孔の格子面積で除した値と定義した。単位は無次元「m²/m²」である。

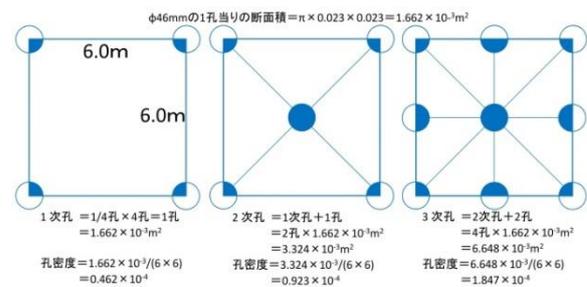


図-15 孔密度の説明

図-16に、横軸に孔密度をとって0区間および本施工区間のルジオン値次数通減図を示す。図中に近似式と重相関係数を示したが、重相関係数からもルジオン値と孔密度は高い相関関係にあり、近似式の精度は高いといえる。

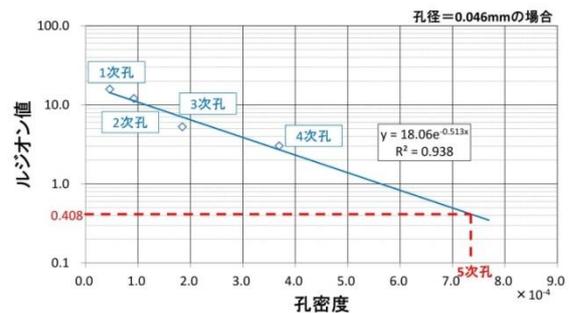


図-16 ルジオン値次数通減図 (孔密度)

この近似式から4次孔注入後の値(全5次孔を施工したと仮定したとき、5次孔の注入前に実施する水押し試験の全結果の平均値の推定値)を計算すると、Lu=0.408となる。この分析結果から、4次孔までの施工で、全エレメントの平均値が改良目標値に達していると判断した。これは、図-12に示した解析結果と一致する。なお、改良前の Lu と推定した改良後の Lu をエレメントの鳥瞰図

として図-17に示す。

5. 施工結果

5.1 湧水量と地下水位

図-18 に減水対策区間(1,800~1,900m)における湧水量とトンネル天端からの水頭の経時変化挙動を示す。同図には降雨量を併せて示しているが、対策前においては湧水量や地下水位が降雨に応じて季節変動を示していることがわかる。

②区間グラウト工の施工が進み対策区間全域が改良ゾーンに覆われた時期（H28.1）から、湧水量や地下水位に急激な変化がみられた。140~180t/hで推移していた湧水量は40t/h程度にまで大きく減少するとともに、梅雨の降雨期においても顕著な増加がみられず、減水対策工により抑制効果が十分図られていることが確認できる。地下水位は湧水量が減少するのに伴い上昇し、降雨期においてトンネル天端から最大 160m 程度にまで達した。事前の解析検討では、対策後の湧水量が 50t/h、地下水位が 171m まで回復すると予測しており、浸透流解析による事前検討の妥当性を確認することができた。

写真-3.4 に減水対策工施工前後におけるトンネル坑内の状況を示す。対策前は天端からの湧水により土砂降り状態であった坑内が、対策後は天端からの滴水もほとんどみられず、減水対策工により湧水が抑制された状況であることが分かる。

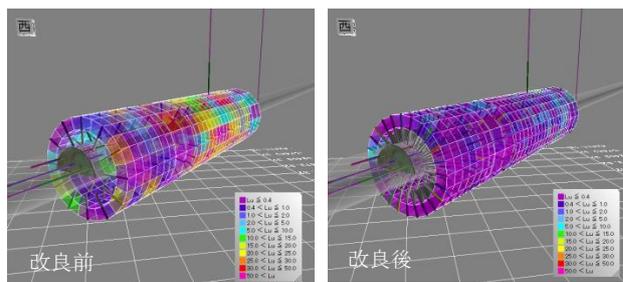


図-17 改良前後のエレメント (Lu)

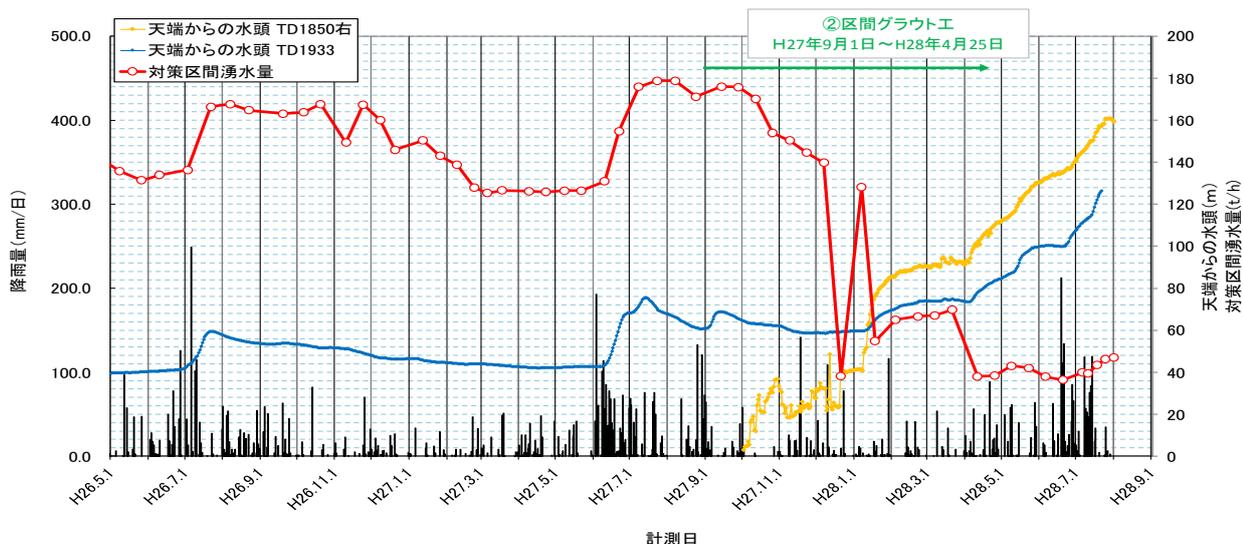


図-18 対策区間湧水量とトンネル天端からの水頭の経時変化



写真-3 減水対策施工前の状況

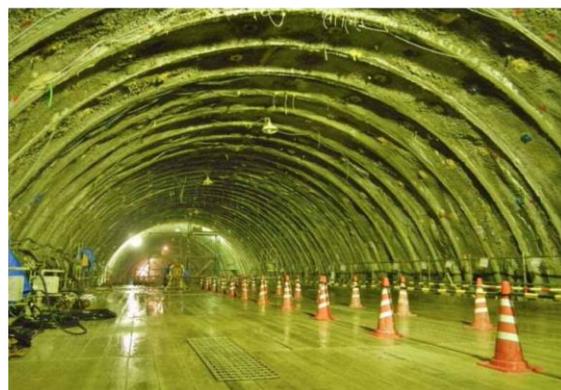


写真-4 減水対策施工後の状況

5.2 改良部の透水性

前章 4.3 節において示したように、改良後のルジオン値は 0.4Lu 程度と推定され、改良目標値に達していると判断される。一般的なダムグラウチングに対して極めて小さな透水係数への改良が達成されており、材料の選定や注入パターンの設定手法が妥当であることを確認できた。

5.3 トンネル内空変位

図-19 にトンネル天端と内空斜め変位，トンネル天端からの地下水位の経時変化図を示す。減水対策工により地下水位は上昇するが，トンネル内空変位にはこれに伴う有意な変形挙動は生じていない。また，併せて計測したトンネル周辺地山の地中変位計においても，同様に地下水上昇に伴う変形はみられていない。これらの挙動は事前の解析検討による挙動と概ね一致しており，高水頭下においても，トンネル構造に影響を与えることなく本減水対策工を適用できることが確認できた。

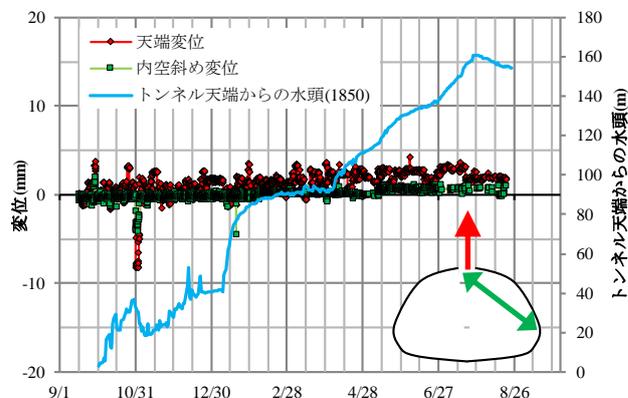


図-19 トンネル内空変位と地下水位

6. おわりに

山岳トンネル工事においては，通常，地下水を排水することから，周辺に減湧水をもたらすなど社会的な影響が大きい場合がある。このような箇所においては，トンネル坑内からの対策として一般に止水工法が採用され，トンネルの構造体は外水圧に対抗できるようウォータータイト型の覆工が採用されるが，経済性や施工性で課題が多い。近年，完全に地下水低下を防止する必要がない場合に，許容できる地下水低下を満足するだけ対策を行う，「地下水抑制工」の考えがある。このような考えに基づいた施工は，一般にはトンネル掘削中のプレグラウチングにて施工されるが，現場・周辺環境条件さえ許容されれば，地下水の湧出状況を観測しながら湧水を必要最小限抑えるためのポストグラウチングの採用が可能となる。このようなポストグラウチングの採用は，トンネルの湧水問題を検討するうえで合理的手法と考える。

今回，これまで施工事例の少ないトンネル掘削後のポストグラウチングによる湧水抑制対策として，ダムのグラウチング技術に基づいた手法を適用し目標の止水効果を達成するなど，その有効性を確認した。また，トンネル周辺に改良ゾーンを設ける減水対策工が，高水頭下のトンネルにおいて，変形などの課題に対し問題なく適用できることが確認された。この結果は，トンネルの地下水問題に直面した場合に，対策工として幅広い選択肢を与えるものであり，山岳トンネル地下水問題に対して画期的成果を提供したものと考える。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター (2003)：グラウチング技術指針・同解説，大成出版社。
- 2) 木佐貫浄治，宮本裕二，鈴木雅文，辰巳勇司(2015)：自然由来のヒ素を含む大量湧水の減水対策試験－北薩横断道路 北薩トンネル（出水工区），トンネルと地下，Vol.46, No.10, pp.19-24.