

掘削ずり盛土内の砒素の挙動把握に関する研究

－岩石観察・室内試験・盛土内の水収支からの考察－

Elution Behavior of Arsenic in Excavated Rock

- Considerations Based on Rock Observations, Laboratory Testing, and Water Balance -

清水祐也* 岩本容昭** 太田博光*** 大塚義一* 長 千佳* 倉品 悠*

要 旨

自然由来の有害な重金属類を含むトンネル掘削ずりの適正な対策方法の計画・実施にあたっては、短期および長期溶出現象を高精度に把握することが重要である。これには、対象となる重金属類の物理的・化学的挙動を適切にモデル化した実規模の移流・拡散シミュレーションが有効である。また、従来は一部試料の分析結果から最大溶出可能量を設定・評価しており、実現場の盛土内部全体の溶出挙動把握を試みた事例は少ない。本報では、実現場で実施した盛土後のボーリング調査で採取したコア試料の観察および砒素溶出試験と盛土内の水収支から、重金属類の形態と溶出特性や盛土内の水の挙動など、モデル化に必要な基礎性状を確認した。

キーワード：自然由来、砒素、掘削ずり、拡散防止対策、溶出量

1. まえがき

トンネル工事で発生する掘削ずりに含まれる自然由来の有害な重金属類（以下、重金属）が問題となる事例が増えている。これら重金属は、主として水を媒体として拡散するため、土壤汚染対策法の溶出量基準を超える掘削ずりを搬出する場合、受入先では重金属の拡散防止対策を講じる必要がある。拡散防止対策の種類としては、ベントナイト混合土や不透水性のシートなどの難透水性の材料で発生土を覆い封じ込める方法や、溶出した重金属類の吸着層を作り、周辺地盤・水域への拡散を防ぐ方法、あるいは不溶化処理後に埋め戻す方法などがある。

こうした受入先の拡散防止対策を計画する上で、重金属の周辺環境への拡散予測が重要となる。これには、受入先での重金属の溶出特性と移動媒体となる水の挙動を明らかにする必要がある。また、これらの情報については、受入時のみではなく、掘削ずりの経時変化をも考慮することが重要である。

本研究では、重金属の拡散予測方法を確立することを目的として、砒素を含む掘削ずりを盛土材料として利用した岩手県の押角トンネル工事において、重金属の溶出特性や盛土内の水の挙動を把握するための試験を進めている。本報では、重金属の溶出特性を把握するために実施した岩石観察、砒素溶出試験結果および対象地の雨量と浸出水量に基づく盛土の水収支について報告する。

2. 押角トンネル工事の概要

本研究の対象フィールドとした押角トンネルの位置を、**図-1**に示す。押角トンネル工事は、岩手県の北上高地を縦断する唯一の幹線道路である国道340号線に位置し、幅員が狭小で、急勾配が連続している押角峠を迂回するトンネルの工事である。その工事範囲には、国道340号線と並行してJR岩泉線が通っていたが、平成26年4月1日に廃線となった。この路線にあったJR線のトンネルが岩手県に移管され、これを拡幅して道路トンネルとして築造した。鉄道トンネルは、昭和16年に着工、昭和22年11月25日に開通しており、完成から約70年経過していた。押角トンネル延長は3,094mであり、宮古

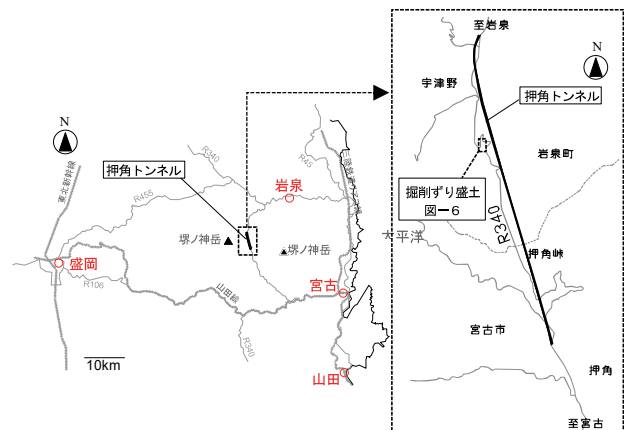


図-1 押角トンネルの位置図

* 土木本部土木部環境技術室 ** 東日本支社土木技術部 *** 東北支店土木第1部

市和井内を起点、岩泉町大川地内を終点とし、平成 28 年 10 月より両側から同時に掘削を行い、平成 30 年 10 月に覆工コンクリート打設まで完了した。

本工事では、トンネル設計のための事前調査が行われており、砒素の土壤溶出量基準を超過することが確認された。砒素が基準超過した地盤については、検出した場所や岩種に特徴はなく、現地での判別は難しいとの判断により、すべての掘削ずりを要対策土として取り扱うこととなった。掘削ずりは、雨水や地下水などの水から遮断するため、ベントナイト混合土で封じ込め対策を講じる形で、盛土材料として使用された。盛土量は約 18 万 m³ で、両坑口の途中の国道沿いに掘削ずり盛土を設け、一部国道の付け替えを行った。本工事では、非常に狭隘な地形に大規模な盛土を行うため、掘削ずり盛土の容量を増やす目的で、盛土東側法面の最下段に高さ 8m、延長 273m の大型ブロックによる擁壁を構築した。

3. 周辺の地質

押角トンネル周辺の地質図²⁾を、**図-2**に示す。また、同地層が形成され現在に至るまでの流れに関するイメージを**図-3**に示す。

押角トンネルは、刈屋川断層と並行して築造されている。地層としては中生代のジュラ紀から白亜紀にかけて形成された付加体に位置しており、粘板岩と砂岩が分布している。付加体とは、大陸縁辺における海洋プレートの沈み込みに伴う付加作用によって形成された地質体であり、中央構造線に沿って帯状に分布する。この付加体では、強い圧力を被り、断層や褶曲が複数生じて地層の分布が複雑化するとともに、多くの亀裂を内在することがある。また、上述の粘板岩は、海底で堆積したシルトや粘土成分からなる泥岩や頁岩が低温高圧環境下に置かれ弱い変成作用を被ることのできる岩石である。杉本³⁾は、押角トンネル周辺のこれらの地層は北部北上帯の高屋敷ユニットに属するとしている。

また、押角トンネルの東および西側約 2km の位置には、白亜紀に貫入した花崗閃緑岩の岩体が存在している。

事前に行われた押角トンネルの坑道における地質調査結果¹⁾を見ると、北西～南東方向に延び、30～70°で南西方向に傾斜する亀裂が発達した頁岩が主体で、これに頁岩砂岩互層や砂岩が挟在している。トンネル起点側の坑口付近の頁岩の一部は強い風化作用を被っているが、

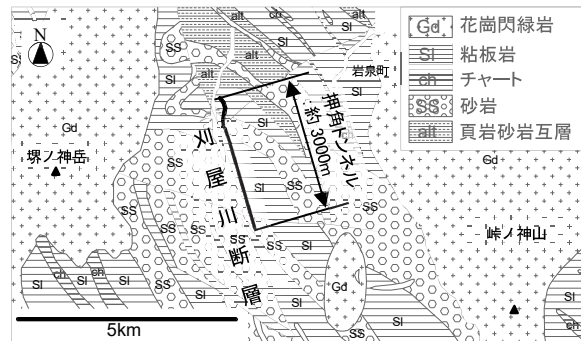


図-2 押角トンネル周辺の地質図

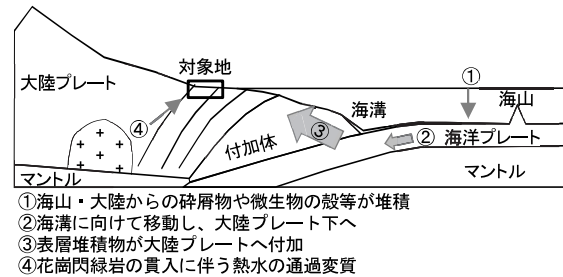


図-3 地層形成までの流れのイメージ

全体的には硬質で風化作用はあまり受けていない状況である。事前調査における岩石の観察結果の詳細については 4 章で示す。

4. 事前調査結果

4.1 岩石観察

事前調査では、既存トンネル内からのボーリング調査および坑内の現地踏査が実施され、報告書として取りまとめられている。トンネル坑内におけるボーリング調査地点と調査結果を基に作成されたトンネル坑道に沿った地質断面図を、**図-4**に示す。ボーリング調査は、起点側坑口より 50m、300m、600m、2,550m 地点で行い、既存トンネルの鉛直上方と水平方向にそれぞれ 10m 掘削している。ボーリングは、ロータリー式ボーリング（ワイビーエム社製 YBM05）により実施されている。掘削は、清水もしくは泥水を送水して行われているが詳細は不明である。坑道沿いの地質は硬質な頁岩を主体とし、厚さ数 m～数十 m 程度の砂岩や頁岩砂岩互層が挟在している。調査の結果、全てのコア試料で亀裂が確認され、特に 2,550m 地点の鉛直方向のボーリングコアの深さ 1.38m～1.58m で亀裂が多く認められた。現地踏査

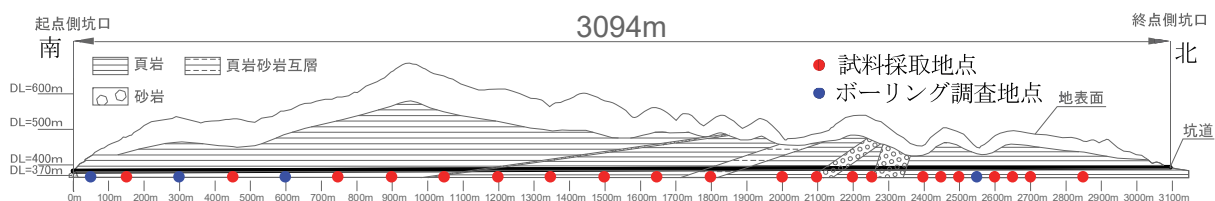


図-4 地質断面図

の結果においても、程度の違いはあるが全ての範囲で亀裂が確認されている。これら亀裂に沿って風化している範囲や白色の脈が存在する。また、2,550m 地点水平方向以外の全てのコア試料で、鏡肌や擦痕が確認されており、現地踏査では小規模な破砕帯が複数確認されている。また、既存の覆工コンクリートと地盤との隙間に粘土や砂が溜まっている場所が確認されている。

4.2 砒素溶出試験および酸性化可能性試験結果

事前調査において、図-4に示す地点の岩石試料を対象に、砒素溶出量および酸性化可能性試験が実施された。図-5に、砒素溶出試験と検液の pH および酸性化可能性試験結果を示す。岩石試料の採取は、ボーリング調査を実施した地点にはボーリングコアより採取し、その他の地点では、削岩機による人力掘削で行われた。試験は「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）」⁴⁾に従い行われた。

溶出試験では、頁岩部で 22 検体中 8 検体、砂岩部で 2 検体中 1 検体、頁岩砂岩互層部で 1 検体中 1 検体が基準を超過した。溶出試験時の検液の pH は 25 検体全てでアルカリ性を示し、25 検体中 3 検体は pH11 付近の強いアルカリ性であった。

酸性化可能性試験では、25 検体中 2 検体が、長期的な酸性化の可能性があるものと評価される pH3.5 以下を示した。また、pH3.5 以上であるが、2 検体で pH5 付近の酸性まで酸性化している。酸性化した試料 4 検体の砒素溶出量をみると、4 検体中 3 検体で不検出、残りの 1 検体も 0.001mg/L と低い値であった。

5. 掘削ずり盛土部におけるボーリング調査

掘削ずり盛土部での土質・地質判別や締まり具合等の地盤状況を把握するため、オイルフィード型ロータリー式試錐機を用いてボーリング調査を実施した。削孔径は φ86 mm とした。図-6に、調査位置を示す。ボーリング延長は、B-1 : 19.0m、B-2 : 20.0m、B-3 : 16.0m、B-4 : 16.0m、B-5 : 8.0m で、オールコアサンプリングを行った。

5.1 コア試料の観察結果

盛土部で実施したボーリング調査によるコア試料については、肉眼およびデジタル顕微鏡（Skybasic 社製 Wi-Fi Digital Microscope）を用いて観察を行った。コア試料の代表として、B-1 地点のコア写真を写真-1に示す。また、代表的な頁岩と砂岩を写真-2に、デジタル顕微鏡で撮影した試料を写真-3に示す。

コア試料は全体的に φ2~5cm 程度の角礫状の礫からなり、一部で φ10cm 以上の礫がある。その分布に傾向はない。写真-3左上で見られるように、頁岩には層状の構造（層理面）が確認できる。また、写真-1の深度 9.1m 付近や、写真-2左、写真-3右下のように、白

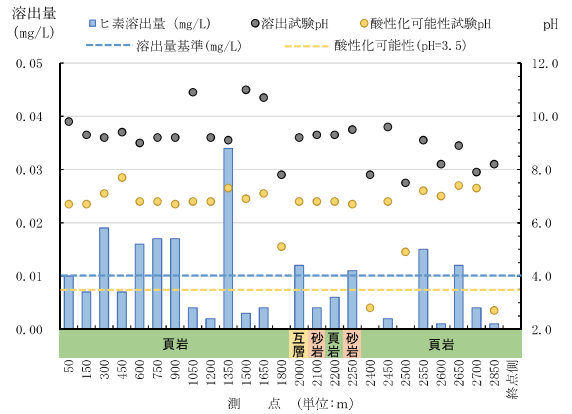


図-5 砒素溶出量と pH の関係

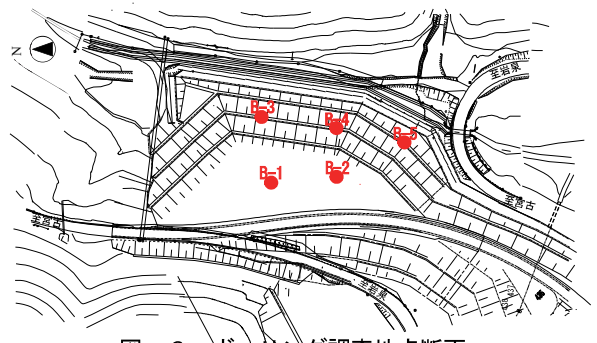
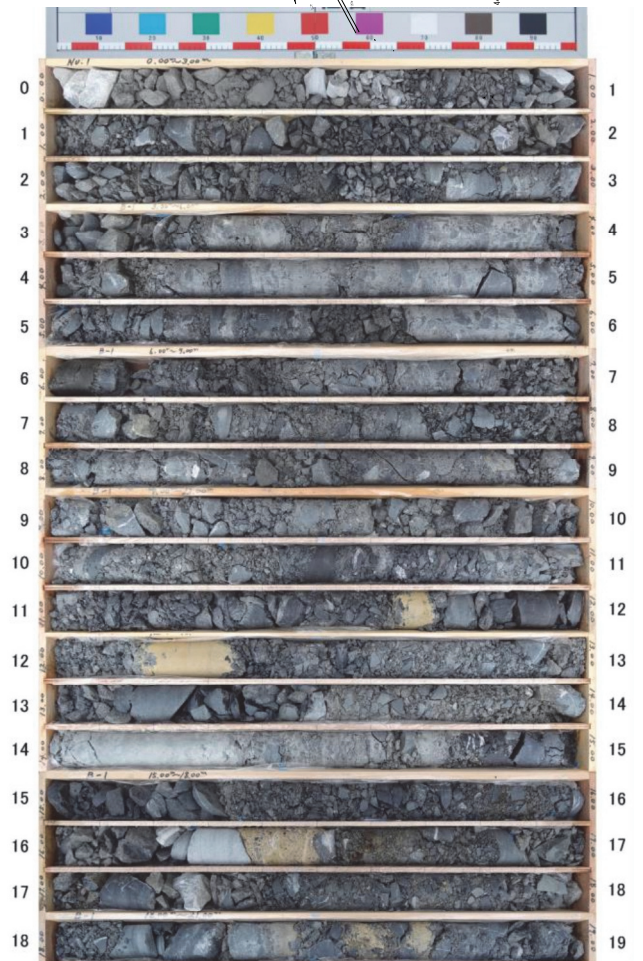


図-6 ボーリング調査地点断面



深度 12.2~12.3m の褐色部分は、仮置きしていたベントナイトが混入したものの
写真-1 盛土内ボーリングコア試料 (B-1 地点)

色の脈が多く認められる。これらの脈は石英や方解石、粘土鉱物からなり、その分布に傾向は認められない。この白色の脈は、過去に熱水が通過してできたものと考えられる。また、破断面に白色の変質物が付着している岩石が多く認められることから、この脈に沿って破碎されていると考えられる。この変質物には、写真-3右上のように、酸化して褐色に変色した部分が認められる。層理面や亀裂のある礫の一部は、手で割ることが可能であった。また、写真-1の深度5.5~6.0mや17.5~18.0mのように、破碎した岩石の隙間を粘土が充填している範囲が確認できる。この粘土は、上述の熱水脈中の粘土や事前調査で確認された断層破碎帯中の粘土、あるいは事前調査で確認されている既存トンネルの覆工コンクリートと地盤の境界にたまっていた粘土であると考えられる。写真-2左のように、砂岩は塊状で層理面などの構造は確認できない。また、写真-3右上のように表面が緑灰色を呈し、変質しているように見える。頁岩では、写真-3左下のように白色の光に対して黄色の光を反射する鉱物が認められるが、鉱物の種類については不明である。

5.2 溶出試験結果

上記ボーリング調査により採取した5箇所のコア試料を用いて、溶出試験を実施した。溶出試験結果を表-1に示す。試料採取深度は、B1地点の地表面を0.0mとして示す。コア試料を50cm間隔で、合計158検体の溶出試験を行った。試験の手順は以下の通りである。

- ① コア試料を25cmで区切り、その間の岩石を均等採取
- ② 24℃で24時間風乾
- ③ メノウ乳鉢で2mm以下の大きさまで粉碎
- ④ ①~③で処理を行った試料から12.5g採取し、地表面から2深度ずつ混合し、50cm毎の分析検体とする
- ⑤ ④で作成した検体に250mLの超純水を添加し、振とう機(TAITEC社製NR-1)を用いて6時間200rpmの横置き水平振とう
- ⑥ 20分間静置後、3000rpmの遠心分離により固液分離し、上澄みを0.45μmのメンブレンフィルターでろ過
- ⑦ シーケンシャル型ICP発光分析装置(SII社製SPS3500)を用いて検液中の砒素濃度を測定

砒素濃度の最大値は0.034mg/L、平均値は0.010mg/Lであった。砒素溶出量の平均値は、(株)建設技術研究所が実施した地山で0.008mg/L、掘削ずり盛土で0.010mg/Lと同程度であるものの、変動係数は地山で1.000、掘削ずり盛土で0.440と、掘削ずり盛土の方がばらつきは小さかった。これは、地山内に偏在していた重金属が分散したためと考えられる。また、地点間で比較すると、B-1地点の砒素溶出量の平均値が他地点に比べ、やや高い数値となった。B-1地点で粘土成分が多いことから、粘土成分に砒素が吸着されている可能性があると考えられる。

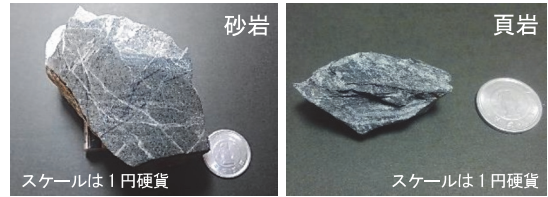


写真-2 盛土内の代表的な岩石試料

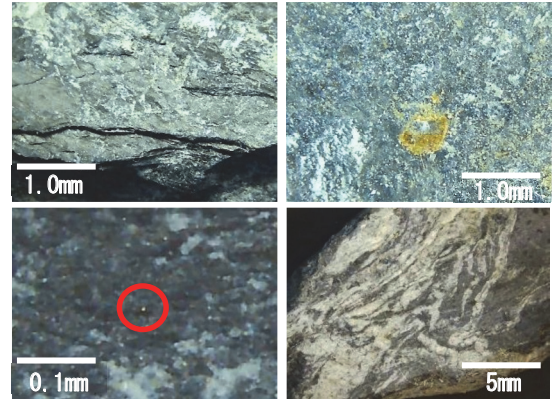


写真-3 デジタル顕微鏡による観察写真 (左上: 頁岩層理面 右上: 砂岩表面と変質部) (左下: 頁岩表面 右下: 頁岩中の脈)

表-1 溶出試験結果

採取深度 (B1地表面-m)	土壌溶出量(mg/L)				
	B1	B2	B3	B4	B5
0.0-0.5	0.028	-	-	-	-
0.5-1.0	0.023	-	-	-	-
1.0-1.5	0.02	-	-	-	-
1.5-2.0	0.029	-	-	-	-
2.0-2.5	0.026	0.007	-	-	-
2.5-3.0	0.034	0.007	-	-	-
3.0-3.5	0.012	0.008	-	-	-
3.5-4.0	0.011	0.008	-	-	-
4.0-4.5	0.013	0.007	-	-	-
4.5-5.0	0.011	0.008	-	-	-
5.0-5.5	0.024	0.008	-	-	-
5.5-6.0	0.011	0.008	-	-	-
6.0-6.5	0.01	0.008	0.01	-	-
6.5-7.0	0.011	0.008	0.012	-	-
7.0-7.5	0.016	0.009	0.013	-	-
7.5-8.0	0.012	0.007	0.012	-	-
8.0-8.5	0.008	0.005	0.01	0.005	-
8.5-9.0	0.011	0.007	0.013	0.005	-
9.0-9.5	0.012	0.008	0.026	0.006	-
9.5-10.0	0.007	0.008	0.008	0.008	-
10.0-10.5	0.005	0.006	0.004	0.008	-
10.5-11.0	0.005	0.006	0.007	0.008	-
11.0-11.5	0.007	0.007	0.01	0.013	-
11.5-12.0	0.009	0.008	0.008	0.014	-
12.0-12.5	0.015	0.01	0.005	0.015	-
12.5-13.0	0.014	0.009	0.006	0.014	-
13.0-13.5	0.015	0.012	0.006	0.008	-
13.5-14.0	0.014	0.011	0.006	0.008	-
14.0-14.5	0.031	0.01	0.005	0.008	-
14.5-15.0	0.023	0.01	0.005	0.003	-
15.0-15.5	0.013	0.01	0.006	0.003	-
15.5-16.0	0.012	0.011	0.006	0.007	-
16.0-16.5	0.013	0.011	0.008	0.005	-
16.5-17.0	0.013	0.011	0.008	0.005	0.005
17.0-17.5	0.01	0.012	0.011	0.004	0.006
17.5-18.0	0.012	0.012	0.01	0.005	0.011
18.0-18.5	0.013	0.01	0.01	0.006	0.017
18.5-19.0	0.012	0.01	0.009	0.007	0.019
19.0-19.5	-	0.013	0.004	0.005	0.021
19.5-20.0	-	0.013	0.006	0.005	0.002
20.0-20.5	-	0.017	0.006	0.005	0.004
20.5-21.0	-	0.012	0.007	0.005	0.003
21.0-21.5	-	0.011	0.014	0.005	0.009
21.5-22.0	-	0.013	0.014	0.006	0.009
22.0-22.5	-	-	-	0.006	0.012
22.5-23.0	-	-	-	0.007	0.014
23.0-23.5	-	-	-	0.005	0.009
23.5-24.0	-	-	-	0.005	0.013
24.0-24.5	-	-	-	-	0.009
平均値	0.015	0.009	0.009	0.007	0.01
標準偏差	0.007	0.002	0.004	0.003	0.006
定量下限値	0.001				
基準	0.01以下				

赤字: 土壤汚染対策法における溶出量基準超過

5.3 砒素含有の原因と盛土内での溶出に関する考察

対象地で確認されている地盤が形成される過程で砒素が混入する原因として、以下の3点が考えられる。

- ①堆積岩の原料となる砕屑物が砒素を含有していた
- ②海底で晶出するフランボイダル黄鉄鉱に取り込まれる
- ③熱水変質作用により濃縮

このうち、①、②に伴う砒素の場合、同一の地層内では、砒素溶出量が同様の結果になると考えられるが、事前調査の結果では、地点によりデータにばらつきがある。

これらの状況から、対象地における砒素含有の原因は③の熱水変質作用に由来すると考えられる。なお、事前調査において、熱水脈量と砒素溶出量との間には相関が認められていないことから、熱水による影響は均一ではなく砒素の濃縮が局所的に生じたと考えられる。

③に由来する砒素は、粘土鉱物に吸着されている可能性が高い。粘土鉱物は、pH の変化に伴い表面の電荷が変化し、酸性ないし中性で正の電荷、アルカリ性で負の電荷を持つ性質を有する^{5) 6)}。そのため、負の電荷を有する砒素は、酸性から中性で粘土鉱物に吸着されている。しかし、ここでは既存トンネルを構築する際、掘削して露出した地盤にコンクリートを吹き付ける作業が行われたため、坑道周辺の地盤はアルカリ性の環境に変化したと考えられ、粘土鉱物に吸着されていた砒素が溶出し、地盤中を移動した可能性がある。この溶出した砒素は、既存トンネル掘削完了後、地盤や地下水の緩衝作用により pH が中性に近づくにつれて、再び粘土鉱物あるいは水酸化鉄に吸着されたと考えられる。砒素が粘土鉱物や水酸化鉄に吸着された形態で地盤中に含まれる場合、トンネル掘削や盛土の過程で、アルカリ性かつ酸化環境に曝されることとなり、雨水等に溶出する可能性がある。

これまでに実施した岩石観察や溶出試験では、砒素の存在形態について断定することができないため、上記考察に対する検証は今後実施していく。

6. 降雨量と盛土からの浸出水量

盛土内の保有水や浸出水の挙動を把握するためには、降雨量と浸出水量を計測し、水収支について検証することが重要となる。そこで、盛土からの浸出水について以下の方法で検討を行った。

本盛土では、平成30年7月12日までに掘削ずりの搬入を完了したが、被覆範囲の一部は、今後の道路工事などで発生する残土を受け入れるため、図-7に示す天端の一部(浸透範囲S1:約970m²)で未被覆の状態となった。そこで、未被覆範囲からの降雨浸透が生じる状態を利用して、平成30年7月12日から平成30年11月30日までの盛土内に浸透する降雨量と盛土からの浸出水量の計測から、盛土内部における水収支について検討した。降雨量は、図-7に示す雨量測定地点(1箇所)に、転

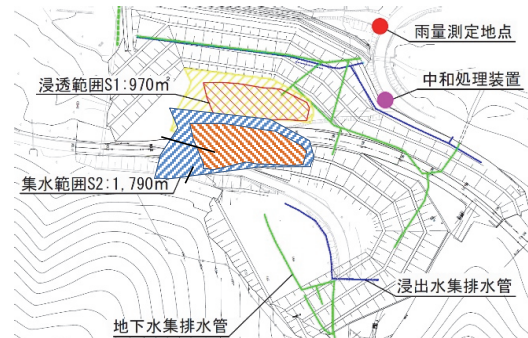


図-7 掘削ずり盛土内の排水設備平面図

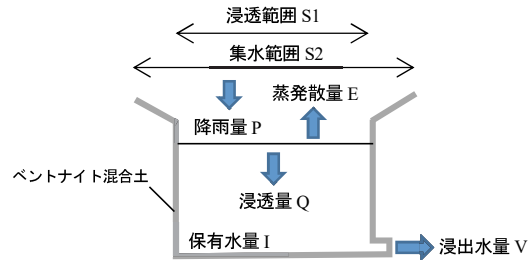
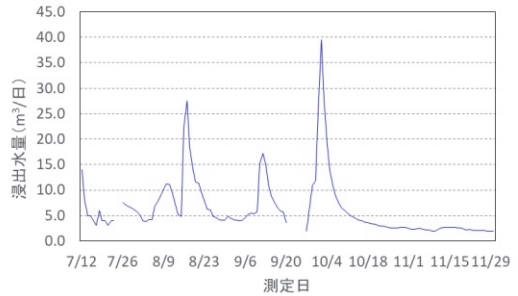
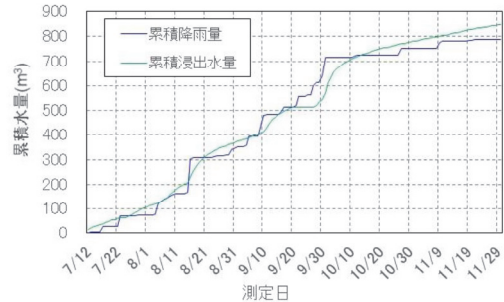


図-8 掘削ずり盛土内部における水収支のモデル



※7月24日、7月25日および9月21日から9月27日は浸出水量の計測データが欠損している。

図-9 浸出水量の日変化



※7月24日、7月25日および9月21日から9月27日は浸出水量の計測データが欠損している。

図-10 降雨量と浸出水量の関係

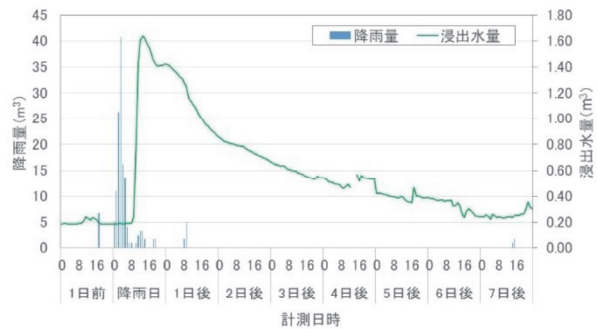


図-11 降雨日(8月16日)前後の降雨量と浸出水量

倒升雨量センサー（大田商事株式会社製 OT-501S）を設置して測定した。また、浸出水量は、図-7 に示す浸出水集排水管から流出した浸出水を対象とし、中和処理施設から放流される水量を超音波流量計により測定した。なお、放流される浸出水については、定期的に砒素濃度が環境基準値以下であることを確認している。

検討した掘削ずり盛土内部における水収支のモデルを図-8 に示す。盛土内部への降雨量 (P) は、前述した天端の一部未被覆範囲（浸透範囲：S1）に加え、盛土の形状から図-7 に示す範囲（集水範囲 S2：約 1,790m²）から雨量が集水していると想定して算出した。なお、集水範囲は未被覆範囲に向けて勾配があることから、表流水として集水範囲外への流出はないものとした。また、盛土内への浸透量 (Q) は、降雨量 (P) から浸透範囲の蒸発散量 (E) を除いた量となる。

図-9 に、浸出水量の日変化を示す。測定開始日から 10m³ 以上の浸出水が観測されており、これらは計測期間中の浸透水に加え、計測開始時点における盛土内の保有水（保有水量：I）が浸出したと考えられる。

図-10 は、計測された降雨量と浸出水量の各累積水量の変動を示す。計測最終日時点の累積降雨量と累積浸出水量を比較すると、累積浸出水量の方が 50m³ 程度多い。また、ここでは蒸発散量 (E) が考慮されていないため、浸出水量 (V) が浸透量 (Q) よりも蒸発散量 (E) に上記 50m³ を加えた水量分多い計算となる。これは、上述の保有水 (I) の浸出によると考えられる。

図-11 では、日降雨量が 134mm と多く、前後に日 10mm 以上の降雨がない、平成 30 年 8 月 16 日前後の時間降雨量と浸出水量の変化を示す。8 月 16 日前後に数 mm 程度の雨が降っているが、その後の浸出水量の明確な上昇は認められない。8 月 16 日の 0 時から降り始めた雨は、3 時に最大の 24mm となり、6 時には 2mm 以下まで減少し、20 時には雨が止んでいる。この間の降雨量の累積は約 150m³ であった。一方、浸出水量は、8 月 16 日の 10 時から増加し、14 時に最大の 1.64m³/時間となった。さらに、降雨日の 7 日後には降雨前と同程度まで減少し、この間の累積浸出水量は 120m³ であった。その後、継続的に約 0.2m³/時間の浸出水量が排出されており、降雨日の 13 日後に累積浸出水量が約 150m³ となった。

降雨量が最大となった 3 時から 11 時間後の 14 時に浸出水量が最大となっていることから、浸透範囲に降った雨水は 11 時間後には浸出水として排水されたと考えられる。一方で、浸出水量の減少には 7 日間要し、累積降雨量と同量の浸出水の発生に 13 日間要している。また、時間数 mm 程度の降雨では、浸出水量の明確な変化は確認されなかった。以上の結果から、降雨量が一定量を超えると一部の雨水が、水の通りやすい経路を移動して速やかに浸出水として排出され、残りの水は緩やかに移動して数日後に浸出水として排出されると考えられる。

このような掘削ずり盛土内における水の挙動について、原位置不飽和透水試験や蒸発散量に関する考察を行うことで、今後検証を進める。

7. まとめ

押角トンネル工事の掘削ずり盛土において、砒素の物理的・化学的挙動を適切にモデル化した実規模の移流・拡散シミュレーションに必要な要素を確認した。本研究で明らかになったことは以下のとおりである。

i) 砒素の形態と溶出特性

掘削ずり盛土内では、粘土鉱物や水酸化鉄に吸着する形で砒素が存在し、アルカリ環境や還元環境下で砒素が溶出しやすいと考えられる。この砒素の形態や溶出特性に関する考察は、推察したものであり、溶出機構は確定していない。今後は、盛土内の砒素の形態について水酸化鉄や粘土鉱物の分布や pH 等と溶出量との関連性について検証し、溶出機構を解明したい。

ii) 降雨量と浸出水量

浸出水量が浸透量よりも多い結果となったことから、計測以前の降雨による保有水が相当量存在すると考えられる。今後、継続的な浸出水量および降雨量の計測に加え、不飽和透水試験やカラム試験を実施し、これまでに実施した試験結果とあわせて、掘削ずり盛土における浸出水の挙動について検証したい。

【謝辞】

本研究では、岩手大学の大河原正文准教授に溶出試験の実施と研究全般について御指導いただき、(株)ハイドロ総合技術研究所の森田修二技師長に盛土内の水収支等について御指導いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) ㈱建設技術研究所、「一般国道 340 号押角トンネル設計調査業務委託概要報告書【調査編】」、pp.1-16、2015
- 2) 日本工営(株)、「土木技術者のための岩手の地質」、岩手県土木技術振興協会、附図、1991
- 3) 杉本幹博、「北上山地外縁地向斜地域の層位学的研究」、東北大地質古生物研報、no. 74、pp.1-48、1974
- 4) 建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル検討委員会、「建設工事における自然由来重金属等岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）」、pp.51-60、2010
- 5) 白水晴雄、「粘土鉱物学—粘土科学の基礎—」、朝倉書店、p.185、1988
- 6) A.Carrillo, J.I.Drever, “Adsorption of arsenic by natural aquifer material in the San Antonio El Triunfo mining area, Baja California”, Mexico. Environ. Geol., 35、pp.251-257、1998