

自然由来重金属等のリスク管理 —トンネル掘削土の合理的対策における妥当性評価—

旭川開発建設部 道路設計管理官 ○千葉 哲也
米山 康裕
パシフィックコンサルタンツ(株) 山本 隆広

一般国道40号の音威子府バイパス事業では、自然由来の重金属等を含むトンネル掘削土が大量に発生したため、吸着層工法やサイト概念モデルを用いたリスク評価に基づく合理的な対策を平成22年度より実施してきた。その妥当性を評価するため、盛土への降雨浸透率、人工資材による吸着層の効果の経年変化、地下水モニタリングについて本論でとりまとめ、自然由来の重金属等のリスク管理は原地盤活用や吸着層により十分に可能であることを示す。

キーワード 自然由来重金属等、サイト概念モデル、リスク評価、
降雨浸透率、吸着層、地下水モニタリング

1. はじめに

(1) 事業概要

一般国道40号は、旭川市から稚内市に至る延長250 kmの幹線道路で、このうち音威子府村から中川町の一部は雪崩による特殊通行規制区間となっている。このため、その解消とともに道路交通の定時性や安全性の向上と現道の交通事故低減などを目的として、総延長約19 kmのバイパス事業を行っている(図-1)。4本のトンネルはすでに貫通しており、現在は明かり区間などの工事を進めている。



図-1 バイパス全体図

(2) 地質概要

本路線の基盤地質は、上部蝦夷層群西知良内層の泥岩、中部蝦夷層群佐古丹別層の砂岩およびそれらに貫入した北海道中軸部神居古潭構造帯の一部を形成する蛇紋岩などである。これらの地質のうち、泥岩や砂岩はすべてのトンネルに出現しており、先進ボーリングのコアによる溶出量試験において砒素やセレンが土壌汚染対策法(以下“土対法”と略記)における溶出量基準0.01 mg/Lを超過している。

2. 自然由来重金属等を含むトンネル掘削土の対策

(1) 本路線における掘削土対策の基本的な考え方

トンネル掘削土が自然由来の重金属等を含む場合、その対処は2010年3月に示された「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)¹⁾」(以下“対応マニュアル”と略記)に基づき行われている。重金属等を含む掘削土への対応に関する法律としては、土壌汚染対策法(以下“土対法”と略記)がある。同法は2003年に施行され、2010年には自然由来であっても適用対象と改正されているが、トンネルは坑口を除き土対法第4条(3,000 m²以上の形質変更)の適用対象外とされ、また、固結した岩盤は土対法の適用対象外とされている²⁾。このため、いわゆるトンネル掘削土(ずり)は土対法の適用対象外とされている²⁾。

本路線でトンネル掘削土への対応が必要となった時点では、対応マニュアルは公開前であったが、周辺環境への配慮とコスト削減を両立する合理的な対策が検討された。具体的には、吸着層工法やサイト概念モデルに基づくリスク評価を採用した。これにより、従来工法(土対法に準拠した二重シートによる遮水工)より大幅なコスト削減を達成している。以下に、それぞれの対策工法と評価方法について示す。

(2) 吸着層工法による対策

本路線では平成22～23年度にトンネル掘削土の対策として人工資材による吸着層工法が施工された。この工法は、吸着性能が高い人工資材(吸着材)を砂質土などの母材に混ぜ込み、厚さ30 cmの吸着層を敷設した後、重金属等を含むトンネル掘削土を盛土する対策である(図-2)。吸着材には、市販資材のうち対策対象とした砒素

への吸着性能が優れた鉄系やセリウム系の資材が用いられた。その配合量は、掘削土からの重金属等の溶出量に応じて、吸着層の下面で地下水環境基準以下となるように設計され、吸着容量に基づく設計³⁾により、吸着層母材中に30～130 kg/m³とされた。吸着層母材には、近隣の河道掘削工事による発生土が活用された。このような実施工における吸着層の効果を長期的に検証した例は皆無であるため、研究対象とした。

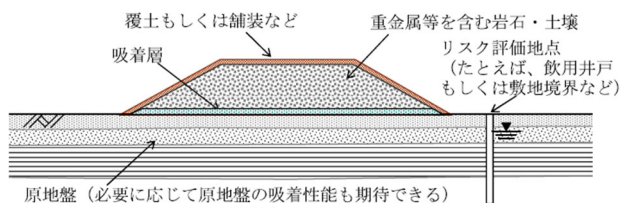


図2 吸着層工法の概要³⁾

(3) リスク評価に基づく対策

対応マニュアルでは、サイト概念モデルによるリスク評価の考え方が示されている。具体的には、盛土箇所でのリスク評価地点を選定し、盛土材料となるトンネル掘削土の溶出特性を評価し、トンネル掘削土（盛土）とリスク評価地点までの曝露経路となる地盤の特性を評価するものである（図-3）。リスクを評価するために調査・評価すべき対象を明らかにし、重金属等の移動プロセスを把握してサイト概念モデルを構築する。リスク評価地点は、本来であれば飲水井戸などの人への曝露地点に設定するが、当バイパスでは安全性と将来の維持管理を考慮し用地境界をリスク評価地点としている。

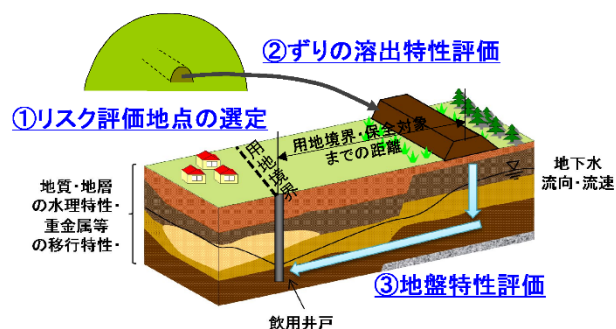


図3 サイト概念モデルの構築と評価対象（文献⁴⁾に加筆）

3. サイト概念モデルによるリスク評価

(1) サイト概念モデルの構築

サイト概念モデルを構築するためには、各種調査を行ってトンネル掘削土の溶出特性と地盤特性を評価する（図-4）。溶出特性の評価では、盛土への降雨浸透率を把握する必要があるが、その実測事例が少ないため、暫定値として盛土法面部は15%もしくは20%、舗装部は10%と仮定した。その他のパラメータの設定方法は、既報^{5) 6)}を参照されたい。

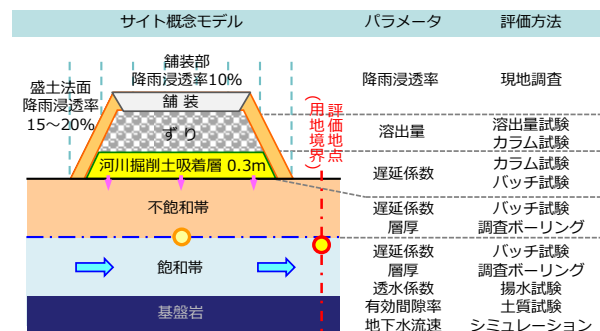


図4 サイト概念モデルとパラメータの評価方法⁶⁾を編集

(2) 解析手法

本路線では、重金属等の移動状況に応じた解析方法を組み合わせて合理的な評価ができる手法を採用している。すなわち、鉛直下方に重金属等が移動する不飽和帯（吸着層から地下水位まで）では一次元移流分散解析（Ogata & Banks式⁷⁾）で、多方向に物質が移動する飽和帯では一次元の地下水流において三次元の分散を扱う解析解（AK2Bモデル）で重金属等の移動状況を評価した（図-5）。詳細は既報^{5) 6)}を参照されたい。

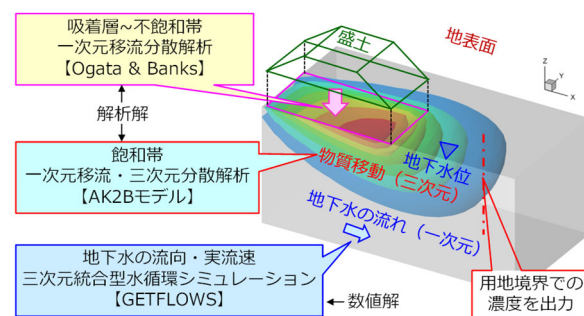


図5 リスク評価における解析手法⁶⁾

(3) パラメータの感度

前節で示した解析手法における各パラメータの感度を把握するため、本路線では標準モデル（図-6）による感度解析を実施しており、感度が高いパラメータは不飽和層の遅延係数、滞水層厚、地下水流速などであることが示されている⁶⁾。このほか、降雨浸透率の感度も高く比例関係にあることが示されている（図-7および表-1）。グラフの横軸はパラメータの変化比、縦軸は解析結果の変化比で、標準値とその解析結果を1とした場合のそれぞれの変化比を示している。なお、降水量はアメダス中川の1981～2015年の平均値1,225 mm/年としている。

感度が高いパラメータのうち、不飽和層の遅延係数は、ボーリング調査などで得られた原地盤試料を用いて吸着性能試験により把握することができる。また、滞水層厚や地下水流速は、地質・地下水調査により解析条件として設定することができる。一方、降雨浸透率は、実際の盛土への浸透量を測定することが容易ではなく、研究例が少ない。そこで、本路線では降雨浸透率を実測し、解析における降雨浸透率の設定の妥当性を検証した。

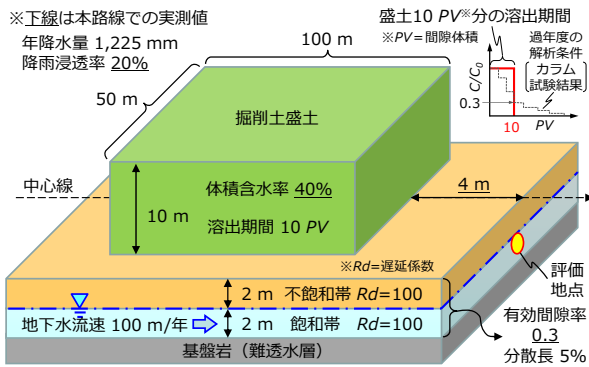


図-6 感度解析における標準モデル⁶⁾

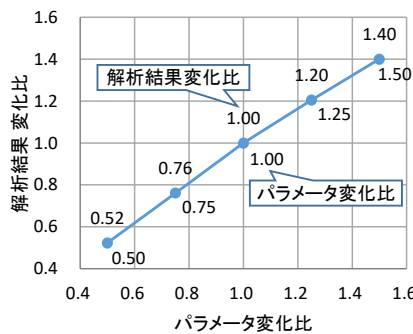


図-7 降雨浸透率の感度解析結果 (文献⁶⁾ を編集)

表-1 降雨浸透率の感度解析結果 (文献⁶⁾ を編集)

項目	ケース	減少②	減少①	標準値	増加①	増加②
パラメータ	降雨浸透率 (%)	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
設定値	変化比	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50
解析結果	濃度比 C/C_0 ※	0.009	0.014	0.018	0.022	0.025
	変化比	0.52	0.76	1.00	1.20	1.40

※盛土の初期濃度を1とした場合のリスク評価地点での最大濃度を比で表したものの

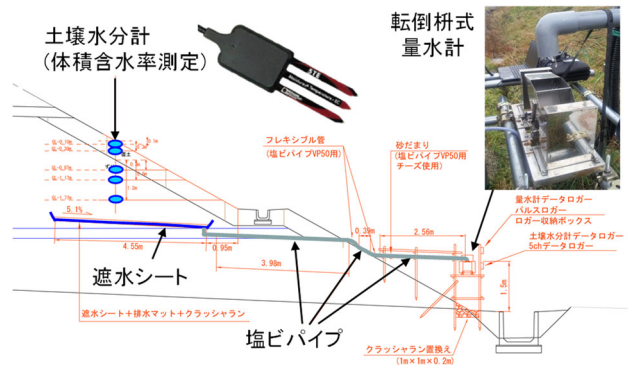


図-8 降雨浸透量の調査施設 (盛土法面部)



図-9 降雨浸透量調査施設の設置状況 (盛土法面部)

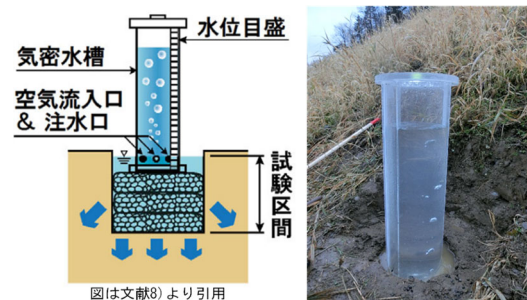


図-10 原位置透水試験の状況 (盛土法面部：覆土)

4. 降雨浸透量調査

(1) 調査方法

道路盛土への降雨浸透率を把握するため、盛土構造や表面の傾斜の違いを考慮し、盛土法面部と舗装部で調査した。盛土法面の勾配は1:1.8で、法面の鉛直下方の路体盛土内に約50 m²の遮水シートを埋め込み、盛土に浸透した降水を盛土外へ排出させ、その水量を転倒桁式の量水計で測定した (図-8・図-9)。覆土の表面から遮水シートの間には土壌水分計を設置し、盛土内の体積含水率を測定した。このほか、覆土の透水係数を把握するため、盛土法面部で原位置透水試験を実施した (図-10)。舗装部についても同様な方法で降雨浸透量を測定した (図-11・図-12)。遮水シートは凍上抑制層の砕石内に設置した。

盛土法面部での降雨浸透量の測定は2012年11月10日に開始し、2022年11月25日まで継続した。この間、最初の冬期は測定したが、凍結により正確に水量を測定できず、降雪で埋没するなどして調査機器が損傷するおそれがあったため、2回目以降の冬期は測定を中断した。

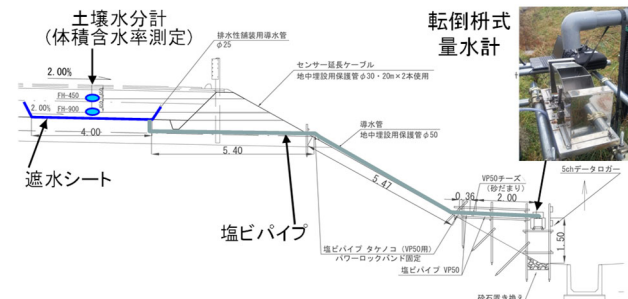


図-11 降雨浸透量の調査施設 (舗装部)

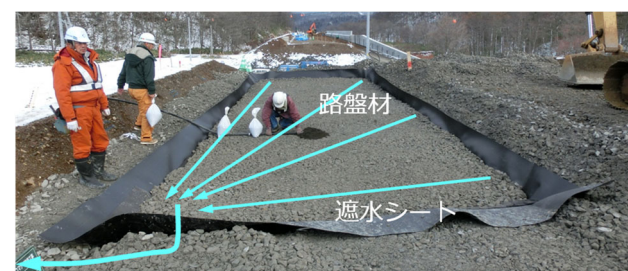


図-12 降雨浸透量調査施設の設置状況 (舗装部)

(2) 調査結果

水量計で測定された水量の累積値を遮水シートの敷設範囲への総雨量で除することで降雨浸透率を計算した。その結果、盛土法面部では、全測定期間での降雨浸透率は約14%であった（図-13）。冬期間の測定は一時中断しているが、便宜上、前年の測定値に累積するとしてグラフに図示している。

観測シーズン（春～初冬）ごとの降雨浸透率も計算した。観測シーズンごとの降雨浸透率と測定範囲の降水量の関係をみると、測定範囲の降水量が60,000 L程度までは降水量が多くなると降雨浸透率が線形近似的に低下する傾向となるが、これより降水量が多くなると、降雨浸透率が概ね一定することが確認された（図-14）。2018年の測定期間の途中には、盛土天端でアスファルト舗装（上層路盤）が施工された。測定箇所はカーブ区間のため調査施設側へ横断方向の勾配があり、法肩部のアスカープは未施工であったため、舗装上への降水が調査施設側へ流入する状況となった（図-15）。このため、2019～2021年の降雨浸透率は、舗装部の面積と舗装下への降雨浸透率（図-17の舗装部の測定結果約5%）を考慮して計算した。2022年はアスカープの代わりに土のうを設置し、盛土法面への流入を防止して測定している。

土壌水分計は設置後約2年は正常に測定でき、降水時に覆土内で体積含水率が大きく変化するが、覆土下部の盛土内での変化は小さいことが確認された（図-16）。

覆土の原位置透水試験は、覆土の土質の不均質性を考慮して近傍の3箇所で行った。その結果、平均の透水係数は $4.17 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ であった（表-2）。

舗装部での降雨浸透率は、約5%であった（図-17）。この調査箇所では、調査施設を設置した後の4年間は舗装が施工されていない状態で測定が継続され、この間の降雨浸透率は約22%であった。その後、舗装が施工されるまでの間は一時測定を中断しており、2021年に舗装が施工される際に測定を再開して2022年まで継続し、この2年間の降雨浸透率が約5%であった。盛土法面部と同様に、降雨浸透率と測定範囲の降水量との関係を見ると、一定の傾向は見受けられず、舗装後2年間の降雨浸透率は舗装前より低くなっている（図-18）。

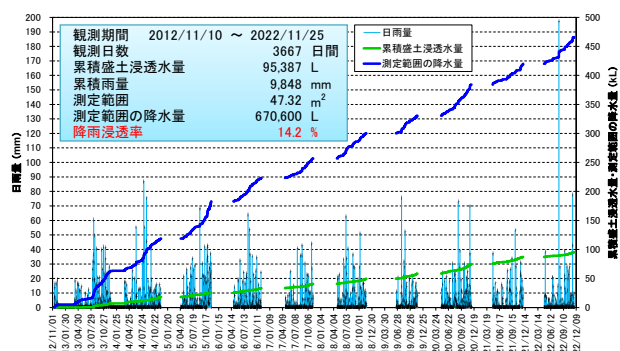


図-13 降雨浸透量調査結果（盛土法面部）

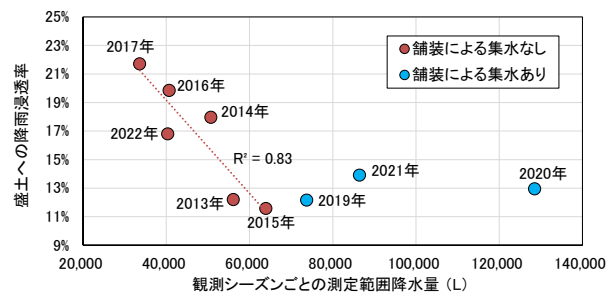


図-14 降水量と盛土浸透率の関係（盛土法面部）

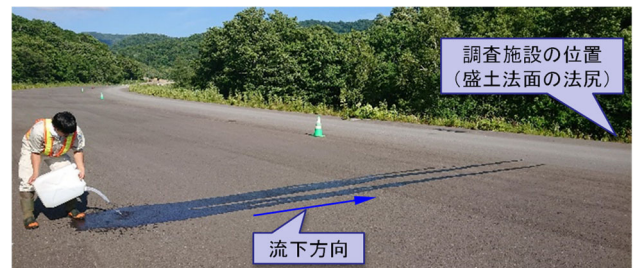


図-15 舗装からの流水（盛土法面部）

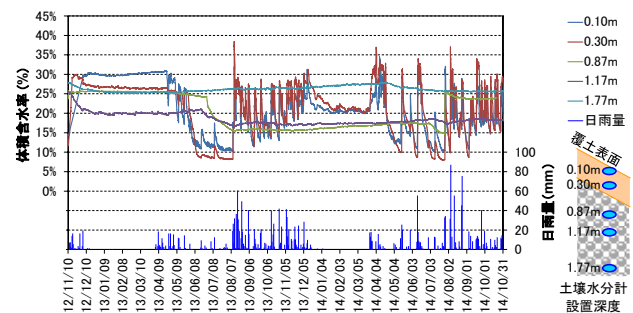


図-16 土壌水分計の測定結果（盛土法面部）

表-2 原位置透水試験結果（盛土法面部）

箇所名	透水係数 (m/s)	
	試験結果	平均値
⑦-1	3.85E-06	4.17E-06
⑦-2	7.99E-06	
⑦-4	6.81E-07	

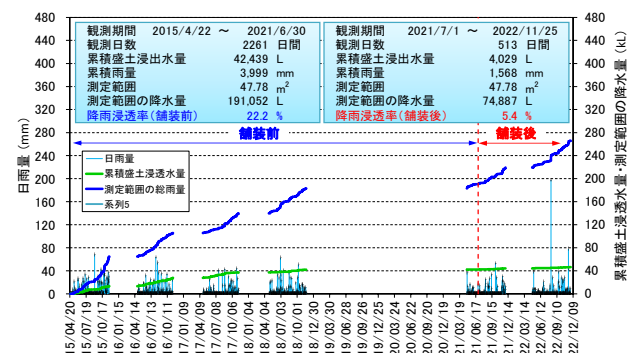


図-17 降雨浸透量調査結果（舗装部）

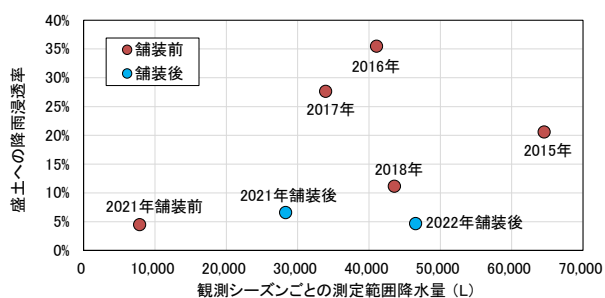


図-18 降水量と盛土浸透率の関係（舗装部）

(3) 考察

実際の道路盛土で降雨浸透率を調査したところ、盛土法面部では約14%、舗装部では約5%であったことから、リスク評価時に暫定的に設定した降雨浸透率（盛土法面部15もしくは20%、舗装部10%）は妥当な値であったと考えられる。盛土法面部では、約10年間にわたり測定を継続して得られた結果であることから、信頼度が高く有益な調査結果であると考ええる。また、舗装部は測定期間が短いものの降雨浸透率の測定例は少なく、有意な調査結果であると考ええる。

調査により確認された降雨浸透率と測定範囲の降水量の関係（図-14）から、盛土法面部での降雨浸透状況は図-19のとおり考えられる。すなわち、降水が少ない場合は盛土への浸透が卓越するが、盛土への浸透が許容量に達すると、盛土法面での表面流出が増加し、見かけ上は降雨浸透率が低下すると考えられる。この許容量は、覆土とトンネル掘削土の路体盛土の透水係数や降水状況と関連する飽和度に依存すると考えられる。また、植生の繁茂状況にも影響されることが考えられるが、路体盛土の透水係数は不明で植生状況も定量的に調査していないため、ここでは定量的な評価を控える。

舗装部では、舗装の有無により盛土天端での降雨浸透率は極端に変化することが確認された。2018年舗装前には、舗装後と同様な降雨浸透率となっている。この測定箇所は、工事用道路として利用されダンプトラックなどの往来が多く、2018年の測定時には路面が非常に緻密かつ硬質に締め固められていたため、降雨浸透率が低くなったものと考えられる。締め固めが増すにつれ降雨浸透率が低下する状況は、調査結果（図-17）の舗装前における累積盛土浸透水量（緑線）が年々低下する（傾きが緩くなる）ことから推察される。

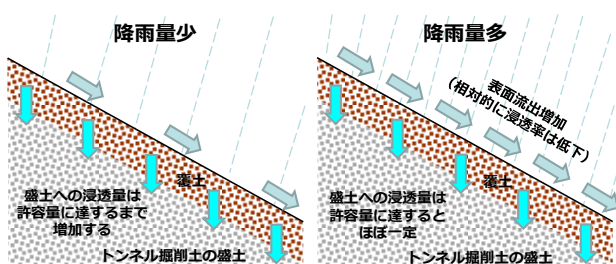


図-19 盛土法面部での降雨浸透状況の想定

5. 人工資材による吸着層の効果

(1) 対策概要

Bトンネル（図-1）の掘削土は砒素が溶出量基準を超過したため、平成23年（2011年）に鉄系の人工資材を用いた吸着層工法にて対策（路体盛土）が施工された。砒素の溶出量は平均0.082 mg/Lであり、設計溶出量³⁾は0.16 mg/kg、吸着材の吸着容量は1.0 mg/g、吸着材の配合量は45 kg/m³であった。

(2) 調査方法

人工資材による吸着層の施工箇所において、盛土の小段からボーリング2孔（深度7.6 mおよび深度6.0 m）を実施し、覆土（0.3 m）、トンネル掘削土（4.7 m）、吸着層（0.3 m）、原地盤（2.3 mもしくは0.7 m）のコアを採取した。採取にあたっては極力乱さないように、トンネル掘削土の盛土はダブルコアチューブで、吸着層とその下部の原地盤は打込みサンプラーを使用した。調査は令和4年7月に実施しており、吸着層の施工から概ね11年が経過している。

(3) 調査結果

採取したボーリングコアより分析用の試料を採取した。吸着層とその直下1 mの原地盤では、砒素の移動状況を詳細に把握するため5 cm間隔で、この下部の原地盤試料とトンネル掘削土の盛土は50 cm間隔で試料採取し、溶出量試験を実施した（図-20）。

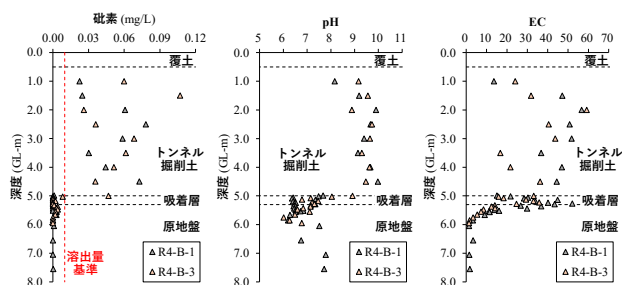


図-20 吸着層施工箇所のボーリング試料の溶出量試験結果

(4) 考察

トンネル掘削土の盛土は施工後11年経過しても依然として溶出量基準を超過するが、吸着層の下部の原地盤から採取した試料は基準以下となっているため、人工資材（鉄系）による吸着層は十分な対策効果を発揮していると評価できる。トンネル掘削土はpH9～10のアルカリ性であるが、吸着層で低下してpH6～7程度の中性となっており、同様にECも吸着層で低下し、その直下の原地盤で漸減している。これらの挙動も吸着層による効果を示しているものと考えられる。なお、調査箇所の地下水流下流側の直近にある地下水モニタリング孔では、盛土施工後の5年間で砒素は定量下限値未満であることが確認され、モニタリングを終了している。

6. 地下水モニタリング

(1) 調査方法

掘削土対策の妥当性を確認するため、重金属等を含むトンネル掘削土の盛土箇所において地下水モニタリングを行っている。モニタリングの頻度は、施工前は4回/年、施工中は1回/月、施工後は4回/年を基本とし、モニタリング項目は対策対象の重金属等（砒素・セレン）、pH、地下水位などである。モニタリング孔の配置は、盛土の下部の地下水流向に対して上流側と下流側の2箇所を基本としている（図-21）。施工後のモニタリング期間は2年間を基本とし、仮置き場として運用している箇所などでは適宜期間を延長している（前章の人工資材による吸着層の効果検証箇所など）。

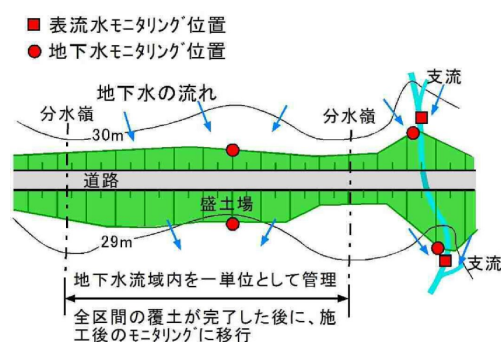


図-21 モニタリング位置の基本的な配置⁹⁾

(2) 調査結果

重金属等を含むトンネル掘削土の盛土10箇所を対象に、合計26孔で地下水モニタリングを実施した結果、地下水環境基準に適合した回数は、施工前212回中210回（99%）、施工中783回中775回（99%）、施工後197回中197回（100%）であった。施工前はバックグラウンド濃度として砒素が観測されたものである。施工中は、覆土の未施工箇所の近傍でセレンの一時的な濃度上昇を確認したもので、覆土後には濃度が低下し地下水環境基準を満足した。施工後2年以上の期間で異常がない箇所はモニタリングを順次終了しており、今年度中にすべてのモニタリングが終了する予定である。

(3) 考察

多数の箇所でモニタリングを実施したが、地下水環境基準の超過は確認されなかったことから、対策は妥当であったと評価できる。本路線での施工後モニタリングの期間は、対応マニュアルで示される標準的な2年間であり、この間のモニタリング結果をもって掘削土対策の妥当性を判断している。この一方で、建設現場の周辺環境やステークホルダーの差異によっては、施工後のモニタリング期間を2年以上と適宜設定することも考えられ、施工前のリスクコミュニケーションにおいて、対策方法だけでなくその後の効果検証（モニタリング）の方法についても合意形成しておくことが重要と考える。

7. おわりに

本論では、自然由来の重金属等を含むトンネル掘削土の合理的対策について、その効果を対策後に検証した。人工資材を用いた吸着層工法について、施工11年後の状況を調査し、吸着層の機能は保持し続けていると評価した。サイト概念モデルによるリスク評価では、移流分散解析において感度が高いパラメータの1つである降雨浸透率を実際の道路盛土で計測し、盛土法面部は約14%、舗装部は約5%であることを把握した。地下水モニタリングでは、トンネル掘削土を路体盛土した箇所において、施工後に地下水環境基準を満足していることを確認した。これらのことから、吸着層やリスク評価による合理的対策は十分に効果を発揮し、対策目標を達成したと評価できる。したがって、堆積岩から溶出する自然由来の重金属等のリスク管理は、原地盤活用や吸着層により十分に可能であると考えられる。今後、他事業などで自然由来の重金属等を含む掘削土への対応が必要となった場合に、本論で示した成果が一助となれば幸いである。

謝辞：本研究にあたり、北海道大学大学院工学研究院の五十嵐敏文教授（当時）およびオハイオ州立大学の茨木希准教授（当時）には多大なご指導を賜り、心から厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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（2010）：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）。
- 2) 環境省水・大気環境局土壌環境課：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン（改訂第3.1版）（2022），Appendix-20。
- 3) 一般社団法人北海道環境保全技術協会（2012）：吸着層工法設計マニュアル。
- 4) 一般社団法人北海道環境保全技術協会（2012）：自然由来重金属等の対策におけるリスク評価マニュアル。
- 5) 荒木大輔・掛田浩司・宮川浩幸（2013）：コスト縮減に向けた自然由来重金属等の対策事例について—サイト概念モデルの構築—，平成24年度北海道開発技術研究発表会。
- 6) 藤原拓也・高橋裕樹・山本隆広（2018）：サイト概念モデルによる重金属等を含むトンネル掘削土の対策事例—感度解析によるリスク評価結果の総括—，平成29年度北海道開発技術研究発表会。
- 7) A. Ogata and R. B. Banks (1961) : A Solution of the Differential Equation of Longitudinal Dispersion in Porous Media, US Geological Survey Professional Papers 411-A, 1961.
- 8) 能野一美・向谷光彦・古川修三・久保慶徳（2019）：地下水面より上の地盤を対象とした透水試験の透水係数算定式に関する研究，地盤工学ジャーナル Vol.14, No.3, 273-286。
- 9) 北海道開発局（2022）：道路設計要領第4集トンネル参考資料2