

## トンネル建設における地質的課題（３）

### ～トンネル建設で発生する掘削ズリ中の自然由来の重金属類の評価・対策～

防災地質チーム

#### １．はじめに

北海道内には、海成堆積岩や熱水変質の影響を受けた火山岩が広く分布しており、これらの地質におけるトンネル等建設工事で発生する掘削ズリにおいて、環境基準を超過して重金属類が溶出したり、酸性水が流出したりする事例が確認されている。これらの対策は、平成15年2月に施行された土壤汚染対策法に準拠して行われているが、同法は「人為由来」の「土壤」を対象とするものであり、上記のような「自然由来」の「岩石」を主体とする建設発生土には適用しがたい部分もある。例えば、人為由来と自然由来では、対象となる重金属類の化学状態が異なる場合もあり、土壌と岩石では粒径分布が著しく異なる。このため、両者では溶出形態が大きく異なることが容易に想像される。また、同法の基準値は、人間が汚染された土壌や地下水を長期間摂取（具体的には70年）した場合のリスクを想定して設定されている。しかし、現実には住民が居住しない、ないしは現場から数km以上離れた地域に居住しているような山間部においても土壤汚染対策法と同等な対策が実施されていることもある。もちろん、自然豊かな国土に重金属類を含有する掘削ズリをいたずらに拡散させるのは好ましくないが、環境の保全と経済性について、より合理的な評価や対応の整備が求められている。

本報では、トンネル掘削によって発生する掘削ズリ中に含まれる自然由来の重金属類の評価・対策について、留意すべき点や課題などを最近の情勢や研究成果を踏まえて概説する。

#### ２．重金属類の概要

自然由来の重金属類は、海水（ふっ素等）、温泉水（鉛やひ素等）やお茶（ふっ素）等に含まれ、古来より我々の生活の身近に存在し、共存してきたものである。カドミウム、クロム、水銀、セレン、鉛、ひ素、

ふっ素、ほう素は人間の生活に不可欠な元素であり、主に地球表層を構成する地殻から採取され、工業的に加工され活用されている。鉄・銅などの主要な金属元素のように身近に接する元素ではないが、加工品の添加物として用いられ、それらの性能向上に欠かせない元素である。我々の健康を維持する上でもひ素・ふっ素・セレンなどは微量ながら必須元素として位置づけられている。

重金属類による人の健康への影響経路については、地下水、大気の摂取、および公共用水域を介した魚介類、農作物といった媒体を通じての摂取、岩石や土壌の摂食（直接摂取）及び皮膚接触（吸収）による直接摂取がある。その中から土壤汚染対策法では、地下水の摂取、土壌の直接摂取の２つの経路による人の健康への影響を考慮した基準が定められている（表－１）。地下水経由の摂取については、土壌溶出量基準が設定されており、直接摂取に関しては土壌含有量基準が設定されている。なお、農作物を介した経路については、農用地の土壤汚染防止に関する法律により農用地の土壤環境基準が設定されているため、自然由来の重金属等を含む岩石・土壌を農用地に造成等に利用する場合には留意が必要である。

表－１ 土壤汚染に係る基準値<sup>1)</sup>

| 特定有害物質の種類    | 指定基準                       |                    |
|--------------|----------------------------|--------------------|
|              | 土壌溶出量基準<br>(mg/l)          | 土壌含有量基準<br>(mg/kg) |
| カドミウム及びその化合物 | 0.01以下                     | 150以下              |
| 六価クロム化合物     | 0.05以下                     | 250以下              |
| シアン化合物       | 不検出                        | 遊離シアン<br>50以下      |
| 水銀及びその化合物    | 0.0005以下<br>アルキル水銀は<br>不検出 | 15以下               |
| セレン及びその化合物   | 0.01以下                     | 150以下              |
| 鉛及びその化合物     | 0.01以下                     | 150以下              |
| 砒素及びその化合物    | 0.01以下                     | 150以下              |
| ふっ素及びその化合物   | 0.8以下                      | 4000以下             |
| ほう素及びその化合物   | 1以下                        | 4000以下             |

### 3. 最近の情勢

平成15年に土壤汚染対策法が施行されてから今まで6年が経過するが、この間平成19年度には環境省において「土壤環境施策のあり方懇談会」が組織された。その議論の結果を受けて平成20年度同省の「中央環境審議会土壤農薬部会土壤制度小委員会」において、土壤汚染対策法の改正に係わる最終報告書が示された。これらの検討に基づき改正土壤汚染対策法が、平成21年4月17日の通常国会で可決された。今回の法改正の主なものは、以下の通りである。なお、法の詳細は環境省のホームページ<sup>2)</sup>に掲載されているので、そちらを参照されたい。

#### (1) 土壤の汚染の状況の把握のための制度の拡充<sup>2)</sup>

一定規模以上の土地で土壤汚染のおそれのある土地の形質変更時には、都道府県知事が土壤汚染の調査命令を出す。自主調査で土壤汚染が判明した場合は、土地の所有者等の申請に基づき、規制対象区域として指定し、適切に管理することになる。さらに、都道府県知事による土壤汚染に関する情報の収集、整理、保存及び提供に関する努力義務が付与される。

#### (2) 規制対象区域の分類等による講ずべき措置内容の明確化等<sup>2)</sup>

土地の形質変更時に届出が必要な区域を形質変更届出区域とし、盛土、封じ込め等の対策が必要な区域を措置実施区域として、指定することになる。

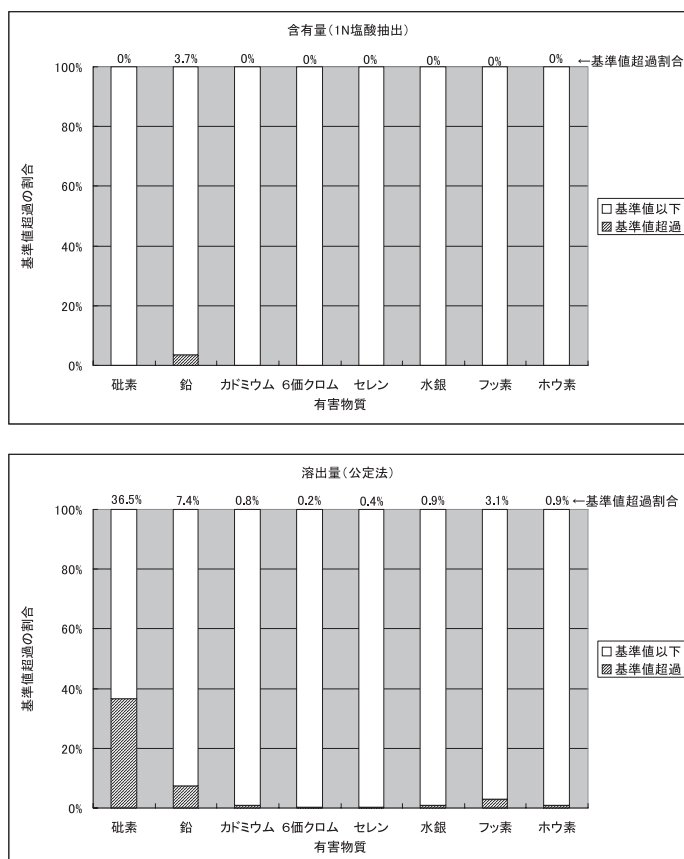
#### (3) 搬出土壤の適正処理の確保<sup>2)</sup>

(2)で述べた区域内の土壤の搬出には事前届出、計画の変更命令、措置命令等の規制を受け、搬出土壤に関する管理票の交付及び保存が義務付けられ、搬出土壤の処理業についての許可制度が新設される。施行期日は、平成22年4月1日までの間において政令で定める日である。

ここで、自然由来の重金属類を含む掘削ズリで問題となるのは、現場外へ搬出する場合には基準値超過分について汚染土として取り扱われる可能性があることである。ただし、規制対象区域のものが該当するため、留意されたい。

このような状況の中で、平成20年度国土交通省に組織された「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」検討委員会では、より現地の実態に即した合理的なマニュアルの完成に向けて鋭意取り組んでいる。

### 4. 掘削ズリの評価

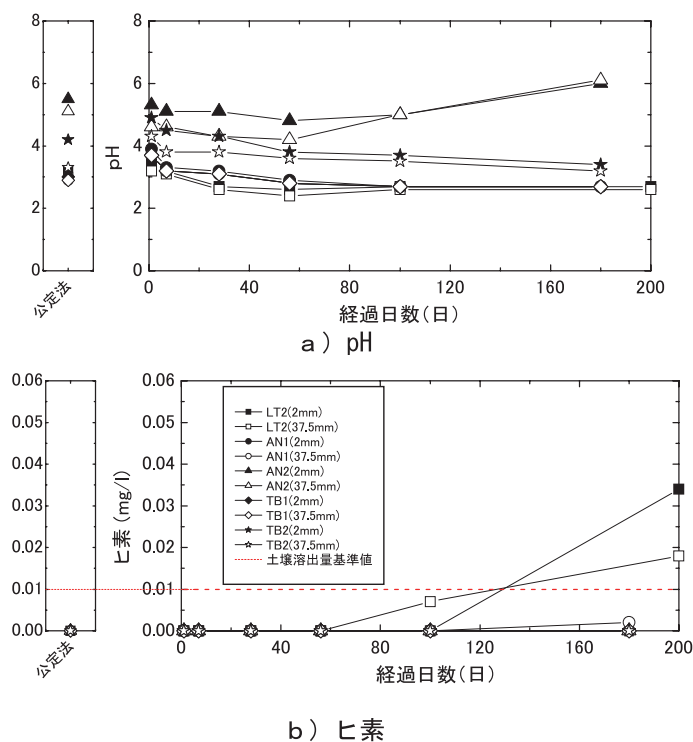


図ー1 重金属類の含有量及び溶出量の基準値超過割合

掘削ズリは、一般に二種類の基準値を用いて評価が行われている。一つ目は掘削ズリ中に含まれている重金属類の含有量、二つ目は掘削ズリから溶け出してくる重金属類の溶出量である。それぞれ環境省が定めた試験方法を準用して得た結果により掘削ズリの評価を行っている。特に北海道内の現場において問題となっているのは、二つ目の溶出量である。図ー1<sup>3)</sup>に全道を対象とした重金属類の含有量(1N塩酸抽出)及び溶出量の基準値超過割合を示す。ここで示した各重金属類のデータは、岩種を問わず試験試料数に対する割合を示したものである。含有量基準値が何らかの形で超過したものは、鉛のみが基準値を超過していた。これは、熱水(鉱化)変質によって火山岩にもたらされた鉛が溶出してきたものと推定される。

一方、溶出量では、図示されるすべての重金属類で基準値を超過する事例が確認される。特にヒ素が36.5%と最も高く、鉛が7.4%とこれに次いだ。このことから、含有量は基準値以下でも、溶出量は基準値を超える場合が多いことがわかる。

溶出量評価は、環境省告示第18号に示される方法



図－2 各溶出条件における溶出試験結果

(以下、公定法という) によって行われている。自然由来の重金属類の溶出現象は試料の状態、反応時間等によって様々なケースがある。例えば、図－2に示すようにpHが3前後という強酸性の環境下では、公定法では検出されなかったヒ素が、100日経過後に検出される場合がある。このため、公定法によって得られる溶出量が基準値未満であっても、直ちに基準値を超過していないと評価することはできないので留意する必要がある。例示したような場合は、必要に応じて酸性環境の溶出試験を実施するとよい。試験方法等の詳細は、参考文献<sup>3)</sup>を参照されたい。

自然由来の重金属類は岩石中の鉱物に取り込まれているものなど化学的に結合していることが多く、含有量の全量が溶出することはまれで、その溶出量は岩石と溶液の反応の程度によって変化すると考えられる。このため、環境省告示第18号に示される方法によって自然由来の重金属等の溶出量を測定した場合は、2mm以下の粒径に試料を粉碎すると比表面積が増加するため溶出量を多く見積もる可能性がある。一方で、重金属等が化学結合していることから反応速度が遅く短時間の反応では溶出量を低く見積もる可能性がある。したがって、この方法によって得られた溶出量のみをもって自然由来の重金属等の溶出による人の健康への影響を評価することは困難である。しかしながら、自然由来の重金属等の溶出現象を短時間で適切に評価し

うる試験方法が存在しないこと、人の健康への影響について土壤環境基準に基づく評価が行われることが多いことなどから、環境省で定めた試験を準用しているのが現状である。

試験に供する試料の採取について留意すべき点は、試料内のばらつきを少なくするために可能な限り数kg以上採取する方が望ましい。ただし、ボーリングコアなど採取量が限られる場合は、コアの保存なども考慮して適宜な量を検討されたい。採取した試料は酸化を防ぐために密閉できる容器か袋に保存し、できるだけ空気との接触を避けるようにする。特に細粒の黄鉄鉱などの硫化鉱物が含まれている場合には、酸化防止のための細心の留意が必要である。

## 5. 掘削ズリの対策・処理方法の検討例

自然由来重金属類は、接触する水の液性や溶存酸素の有無など周囲の環境によってその存在形態が変化する。言い換えると、掘削ズリの処分環境を工夫すれば、岩石から溶けにくく、あるいは粘性土などに吸着しやすくすることができる。当チームでは後者の性質を利用することにより経済的で合理的な対策・処理方法の検討を行った。

検討内容は、細粒分を含む現地発生土等を用いて覆土によるヒ素の溶出抑制効果を確認するため、北海道開発局旭川開発建設部管内一般国道450号旭川紋別自動車道上川町中越地区において、覆土による重金属汚染対策工法に関する現場実験を行った。以下、文献<sup>5)、6)</sup>に基づき概要を説明する。実験期間は平成17年12月～19年7月である。実験の盛土形状を図－3に、計測機器設置位置を図－4にそれぞれ示す。また、実験ケース一覧表を表－2に、Asを含有する発生土(粘板岩)の蛍光X線分析結果及び溶出試験結果を表－3に示す。盛土は13～16.8m四方で、高さ2.5～3.0mのものを複数の異なる材料で覆土することによって合計4基築造した。覆土の厚さは0.5mである。なお、盛土底部からのヒ素流出拡散防止のため、底部には二重の遮水シートを敷設した。

実験結果の一例として、図－5に各計測機器の観測結果を、図－6に水質分析結果をそれぞれ示す。なお、実験結果の詳細は参考文献<sup>5)</sup>を参照されたい。図－5より、盛土内の地温は冬期間でもプラス温度を示し、酸素濃度は無対策のケースと比較して、覆土を施したケースで夏期に減少し冬期に増加する傾向を示した。これは、雨水や融雪水によって盛土内の環境が還元状

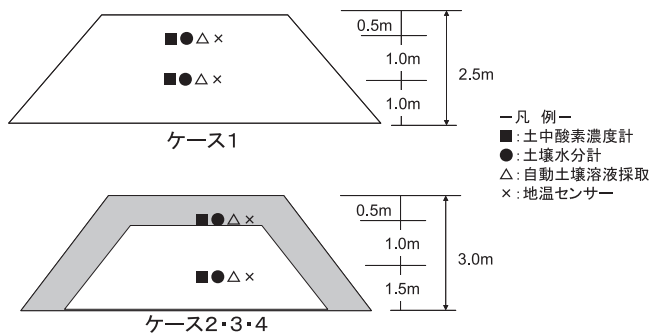
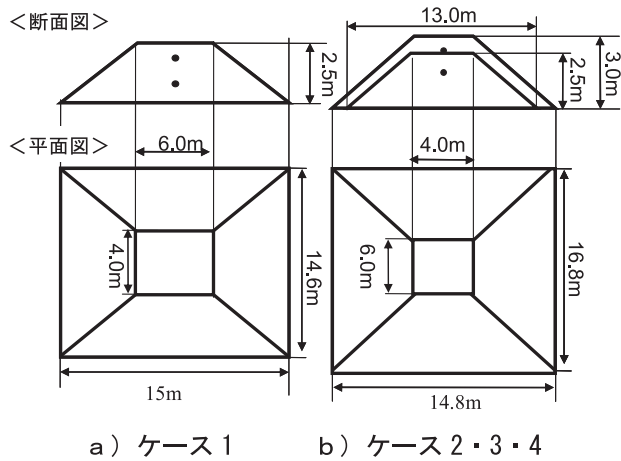


図-4 計測機器の設置位置

表-2 実験ケース一覧表

| ケース     | 1                          | 2                          | 3                          | 4                          |
|---------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 路体材料    | 掘削ずり(粘板岩)                  | 掘削ずり(粘板岩)                  | 掘削ずり(粘板岩)                  | 掘削ずり(粘板岩)                  |
| 覆土材料    | -                          | 床堀土                        | 購入土                        | 購入土<br>+<br>3%ウッドチップ       |
| 路体乾燥密度  | 1.99g/cm <sup>3</sup>      | 1.99g/cm <sup>3</sup>      | 1.99g/cm <sup>3</sup>      | 1.99g/cm <sup>3</sup>      |
| 覆土乾燥密度  | -                          | 1.19g/cm <sup>3</sup>      | 1.52g/cm <sup>3</sup>      | 1.44g/cm <sup>3</sup>      |
| 路体透水係数k | 3.22×10 <sup>-2</sup> cm/s | 3.22×10 <sup>-2</sup> cm/s | 3.22×10 <sup>-2</sup> cm/s | 3.22×10 <sup>-2</sup> cm/s |
| 覆土透水係数k | -                          | 2.11×10 <sup>-4</sup> cm/s | 9.06×10 <sup>-4</sup> cm/s | 7.63×10 <sup>-4</sup> cm/s |

表-3 蛍光X線分析結果及び溶出試験結果

| 試料                                    | 掘削ずり<br>(粘板岩) |
|---------------------------------------|---------------|
| 砒素 (mg/kg)                            | 10.5          |
| 硫黄 (wt.%)                             | 0.27          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt.%) | 5.43          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt.%) | 12.1          |
| CaO (wt.%)                            | 1.59          |
| ヒ素溶出量※ (mg/l)                         | 0.011         |
| pH                                    | 8.3           |

※振とう速度:120rpm

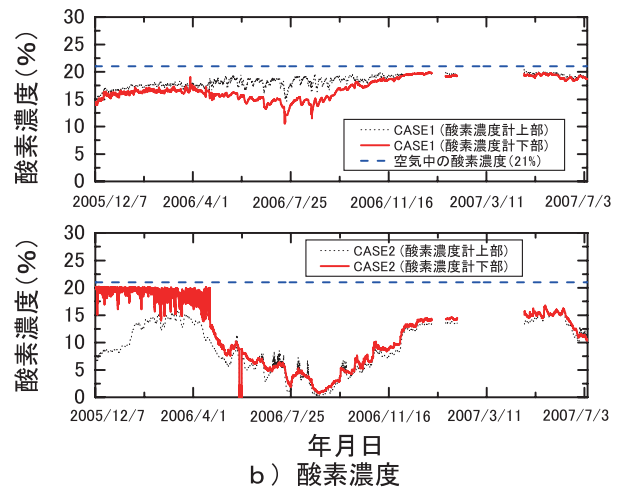
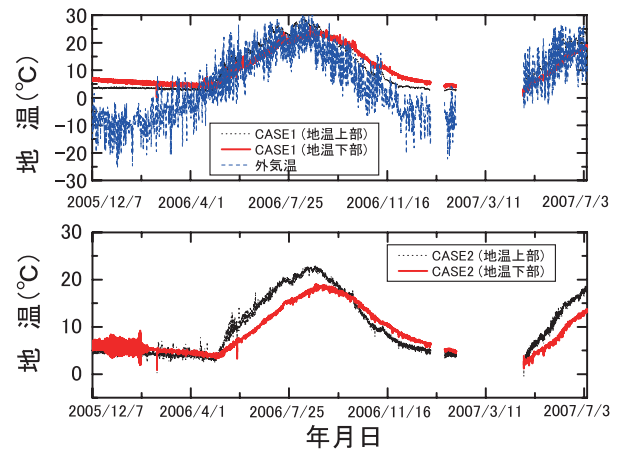
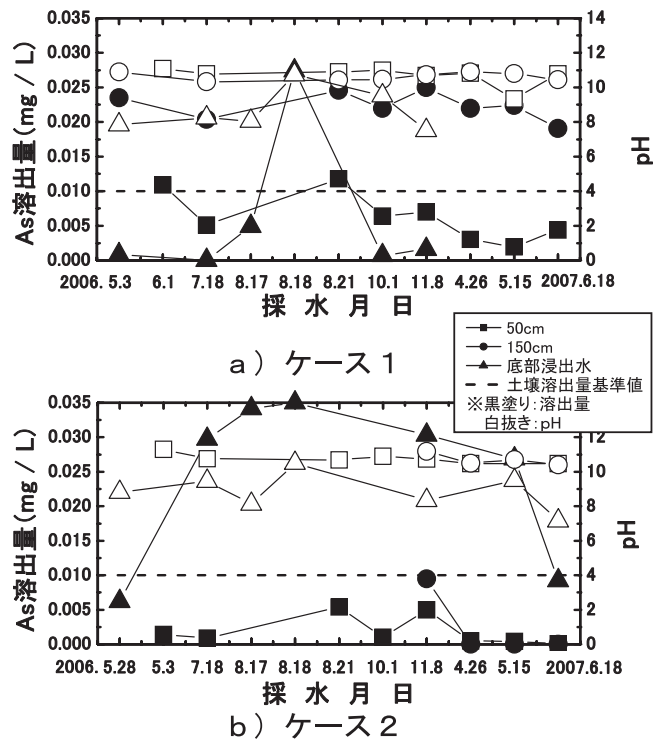
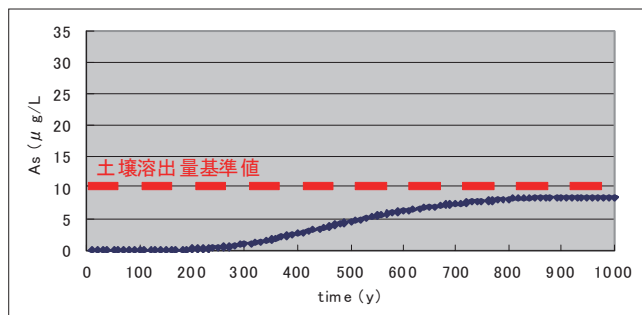
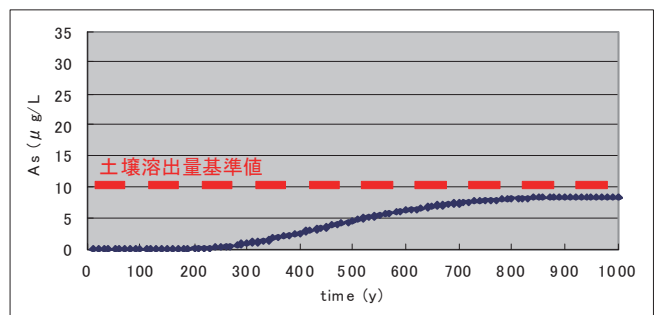


図-5 観測機器の計測結果例 (ケース1・2)





a) 床掘土（敷土厚 1.0m）



b) 購入土（敷土厚 1.0m）

図－7 解析結果（敷土厚：1.0m）

況と酸化状況の季節変動を繰り返すものと考えられた。図－6より、盛土内部の砒素溶出量は、無対策及び覆土を施したケースで土壤溶出量基準値を超過し、pHは10～11のアルカリ性を示した。この結果より、盛土底部の地盤を新たに汚染させないとするならば、覆土のみによる対策では砒素の流出拡散を抑止できないため、敷土に吸着層などの重金属移行抑止層を設ける必要があると考えられた。

次に、上記現場実験の結果を受けて、室内試験と解析により重金属移行抑止層の検討を行った。室内試験の内容は、現場実験の掘削ズリを用いて盛土内部からのヒ素の溶出傾向を把握するための連続溶出試験（一つの試料に公定法を複数回行う溶出試験）、覆土材料を用いて敷土層とした場合のヒ素吸着性能を把握するためのバッチ式吸着試験を行った。試験結果などの詳細は、参考文献<sup>6)</sup>を参照されたい。これらの試験結果により得られたパラメータを1次元移流拡散方程式の近似式<sup>7)</sup>に連続溶出試験結果を踏まえたズリからのヒ素の溶出濃度を与えて解析した。解析結果を図－7に示す。この図より、敷土厚1.0mとした場合、十分な濃度低減が期待できる結果となった。このことから、細粒分を含む現地発生土を重金属移行抑止層として用いることによりヒ素溶出濃度の低減が可能であり、ヒ素を含有する掘削ズリの処理対策の合理化を図ることができる結果といえる。ただし、この設計では、掘削ズリの高さに対して敷土層の厚さが4割程度必要になるため、吸着機能を有する現地発生土が、多量に必要となる。現状では、吸着資材などを用いて敷土層の吸着能力を高めて敷土層厚を薄くするなどの対応が必要と考える。

## 6. おわりに

本文では、土壤汚染対策法の法改正に見られる最近

の情勢と掘削ズリの評価に用いられている溶出試験の留意点、及び当チームで実施した掘削ズリの対策・処理方法の検討例について紹介した。

今後は、土壤汚染対策法の改正を契機としてより身近な課題に対して策定予定の「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」の解説など、現場で活用できる情報を提供していきたい。

最後に、現場実験、試験データの提供、データ整理にあたりご指導いただいた国立大学法人北海道大学大学院工学研究科の五十嵐敏文教授（共同研究「自然由来の重金属による汚染岩石の地盤汚染対策工に関する研究」の実施相手機関）にお礼申し上げる。また、トンネル事業における各種資料の提供にご協力いただいた国土交通省北海道開発局各開発建設部、現場実験や室内試験の実施にご協力いただいた同北海道開発局旭川開発建設部の関係各位に厚くお礼申し上げます。

（文責：田本修一）

## 参考文献

- 1) (独) 土木研究所：建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル（暫定版）、土木研究所資料第3903号、平成15年7月
- 2) 環境省：<http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kaisei2009>。
- 3) 田本修一他：トンネル掘削ずりの汚染評価と対策技術、2007トンネル技術の特別講演と技術研究発表会、pp.15-22、平成19年2月
- 4) 田本修一・岡崎健治・阿南修司・伊東佳彦：酸性化した溶出水による岩石ずりの重金属類溶出量評価に関する考察、第8回環境地盤工学シンポジウム、投稿中、平成21年7月
- 5) 田本修一他：覆土による重金属汚染対策に関する現場実験、地盤工学会北海道支部第47回技術報告会、pp.247-250、平成19年2月

- 6) 田本修一他：覆土による重金属汚染対策に関する  
現場実験（その２）、地盤工学会北海道支部第48回  
技術報告会、pp.157-160、平成20年２月
- 7) Bear, Y.: Hydraulics of Groundwater, McGraw Hill,  
1979.