

ノンコアボーリングを用いた地山の重金属類事前予測法の開発 Development of a Prior Estimation Method of Heavy Metals Ahead of the Tunnel Face Using Rock Samples Obtained by None-Core Boring

山崎 将義*

Masayoshi Yamazaki

山下 雅之**

Masayuki Yamashita

佐藤 透**

Toru Sato

石渡 寛之*

Hiroyuki Ishiwata

要 約

山岳トンネルにおいて、地山に特定有害物質の重金属類が存在する可能性がある場合、掘削ずりを分析し、基準適否を判定した上で仕分けを行い、再利用先または処分先に搬出する。分析期間中の仮置場が必要となるため、仮置場の用地が十分に確保できない場合は、掘削前に重金属類を予測する方法が求められている。事前予測の従来法として、掘削前にコアボーリングで得られた地山試料を重金属分析する方法があるが、迅速性とその費用に課題がある。そこで、コアボーリングに取って替わる、迅速かつ安価で実施可能なノンコアボーリングで得られるくり粉を分析用試料とする事前予測法を開発した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 技術概要
- § 3. 現場実証実験
- § 4. 考察
- § 5. まとめ
- § 6. おわりに

§ 1. はじめに

2010年4月に改正土壤汚染対策法が施行され、自然由来の有害物質についても法規制の対象となった。山岳トンネルにおいて地山に自然由来の重金属類の溶出リスクがあり、掘削ずりを基準不適合の土壌として取り扱う可能性がある場合は、定期的に掘削ずりを分析し、基準適否の判定を行う¹⁾。その後、再利用先または処分先に搬出するため、分析期間中の仮置場が必要となる。

ここで、用地が狭隘な現場で仮置場が十分に確保できない場合には、掘削前に切羽からコアボーリングを実施し、採取したコアを分析試料として判定する方法が用いられる場合がある²⁾。しかしながら、コアボーリングは専用の削孔機械を要することによるコスト増加および探査時間が長いことによる工程の長期化という課題がある。

そこで、汎用削岩機を用いたノンコアボーリングによって迅速かつ安価で採取できる地山試料(以下、くり粉)を分析対象とし、掘削前に基準適否を判定する方法を開発したので報告する。

§ 2. 技術概要

本技術は、コアボーリング専用機械を使用せず、山岳トンネルの汎用削岩機を用いたノンコアボーリングで得られるくり粉を分析試料として、トンネル掘削前に重金属類の溶出リスクを評価する調査技術である³⁾。本技術による重金属類調査フローを図-1に、試料採取イメージを図-2にそれぞれ示す。

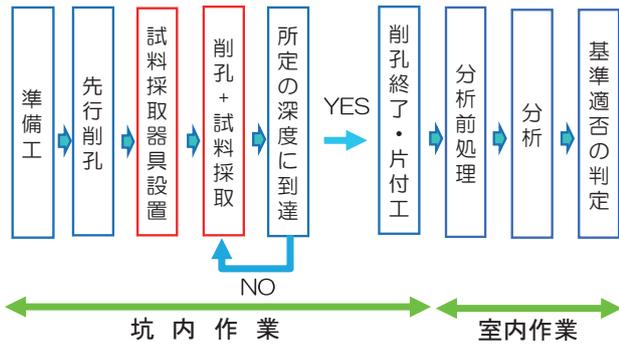
ノンコアボーリングは、削孔に水(約60L/分)を使用するため、くり粉は孔口から泥水状で排出される。削孔時に地山から遊離した重金属は、一般に、削孔泥水中の細粒分に吸着し易いと考えられるため、くり粉を用いて地山の重金属類を適正に分析評価するためには、試料採取時に細粒分をロスなく回収し、後の分析評価に反映させることが重要となる。このため、バケツ等の汎用容器を孔口に添えて試料を採取する方法(写真-1)では、削孔泥水をロスし易く、細粒分の回収率が低いため、分析試料としての信頼性が高くなかった。本技術では、採取器具を切羽に設置して削孔することで、削孔作業の妨げにならず、対象区間の削孔泥水を全量回収可能とした(写真-2~4)。

* 技術研究所地域環境グループ

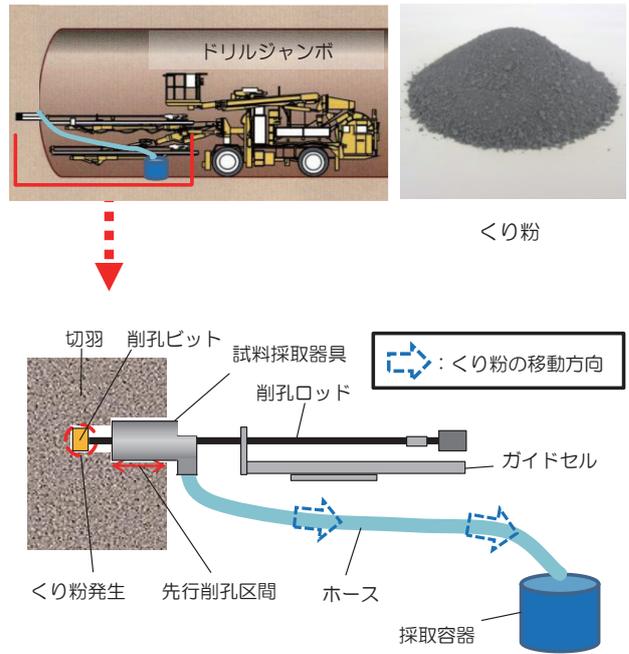
** 技術研究所土木技術グループ

本技術の特長として次の点が挙げられる。

- ①コアボーリングに比べて短時間(約8割減), 低コスト(約5割減)で試料採取が可能
- ②対象区間の全粒径のくり粉を効率的に採取できるため, 分析評価の信頼性が向上
- ③削孔作業の支障とならずに, 施工中のくり粉を安全に採取可能
- ④切羽前方探査(当社技術 DRISS)を同時に実施可能



図一 本技術による重金属類調査フロー



図二 本技術による試料採取イメージ



写真一 従来の試料採取状況



写真二 試料採取器具



写真三 試料採取器具の設置状況



写真四 本技術による試料採取状況

§3. 現場実証実験

3-1 実験概要

本技術の適用性を確認することを目的とし、山岳トンネル現場において実験を行った。同一切羽からコアボーリングとノンコアボーリングをそれぞれ行い、得られた試料を対象に、重金属類分析および酸性化可能性試験を行った。

3-2 実験方法

(1) 試料採取場所および採取方法

試料採取場所は、事前の地質調査で重金属類の基準適否が懸念された新第三紀泥岩を掘削中の山岳トンネル現場である。同一切羽から50mを試験区間とし、コアボーリングとノンコアボーリングでそれぞれ水平ボーリングを行い、5mごとの10区間で、各区間1m長を対象に試料採取を行った(図-3)。

ノンコアボーリングでは、前記の採取器具を切羽に設置して、くり粉の試料採取を行った。くり粉試料採取方法のフローを図-4に示す。採取容器には、排水を行いながら各区間1m長の試料全量を採取できる土のう(以下、排水容器)を基本とした。一方で、試料の粒度が分析試験結果に及ぼす影響を把握するため、排水をせずに全粒径を確実に採取可能であるポリビン(以下、非排水



図-3 水平ボーリングにおける試料採取区間

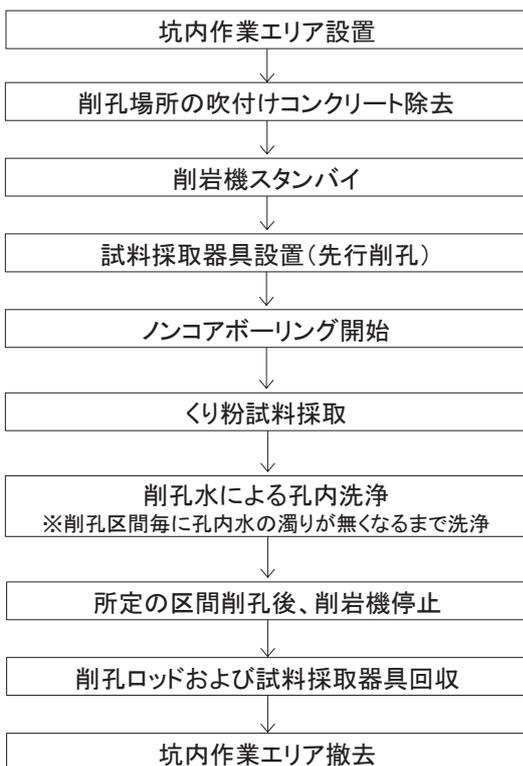


図-4 くり粉試料採取方法のフロー

容器)による試料採取もあわせて行った。非排水容器での採取は、各区間で排水状況を目視確認し、約2Lの削孔泥水を採取した。

(2) 分析用試料の調製方法

分析用試料の調製方法は、国土交通省の「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土砂への対応マニュアル(暫定版)平成22年3月」⁴⁾に準拠した。コア試料はジョークラッシャーを用いて粗粉砕し、2mmふるいを通したものを試料とした。排水容器で採取したくり粉(以下、くり粉A)は、1日程度の風乾後に2mmふるいを通したものを試料とした。非排水容器で採取したくり粉(以下、くり粉B)は、遠心分離機で固液分離後に風乾を行い、2mmふるいを全量通過させたものを試料とした。分析用試料の調製フローを図-5に示す。



a) コア試料



b) くり粉A



c) くり粉B

図-5 分析用試料の調製フロー

(3) 分析試験方法

重金属類分析は、自然由来の可能性のある砒素ほか計8物質を対象とし、溶出量試験（環境省告示第18号）と含有量試験（環境省告示第19号）の計16項目を実施した。ただし、くり粉Bは、先に実施したコア試料の分析結果をふまえ、砒素溶出量1項目のみ実施した。

酸性化可能性試験（pH(H₂O₂））は、地盤工学会の「過酸化水素水を用いるpH試験」⁵⁾に準拠した。本試験は、重金属類の溶出が促進される原因となる岩石・土壌の酸性化の可能性を評価する試験である。

3-3 実験結果

(1) 実験区間の地山性状

本実験を行った50mの区間は、泥岩であった。切羽から12mまでは、亀裂面に褐色酸化物が付着した弱風化層であった。12mから50mまでは、地山性状に大きな変化はなく、亀裂面に僅かに変色がある程度であった。

(2) 重金属類分析結果

分析結果一覧表を表-1に示す。重金属類8物質16項目の分析を行った結果、コア試料、くり粉（くり粉A）のいずれにおいても、砒素溶出量以外の項目は定量下限値未満あるいは定量下限値に近い値を示し、比較評価ができるデータが得られなかった。

砒素溶出量の分析結果を図-6に示す。砒素溶出量は、

0.001~0.009 mg/Lの範囲で検出され、コア試料、くり粉Aおよびくり粉Bのいずれにおいても全区間で溶出量基準（0.01 mg/L）を下回った。

(3) 酸性化可能性試験結果

酸性化可能性試験の結果を、表-1および図-7に示す。コア試料では、全10区間中、50mの1区間を除く9区間で、酸性化可能性あり（pH(H₂O₂）≤3.5）の判定結果であった。一方、くり粉Aでは、初めの3区間（5m、10m、15m）のみ酸性化可能性ありの判定結果であり、コア試料と異なる結果となった。

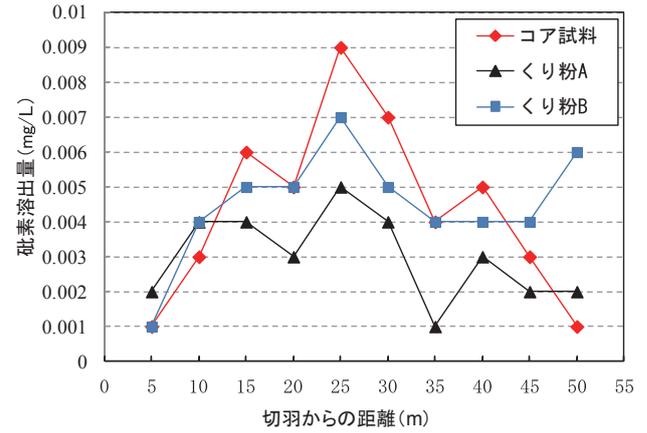


図-6 砒素溶出量分析結果
(くり粉Bの5mの結果は便宜上、定量下限値0.001とした)

表-1 分析結果一覧表

切羽からの距離(m)		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
砒素溶出量(mg/L)	くり粉A	0.002	0.004	0.004	0.003	0.005	0.004	0.001	0.003	0.002	0.002
	くり粉B	<0.001	0.004	0.005	0.005	0.007	0.005	0.004	0.004	0.004	0.006
	コア試料	0.001	0.003	0.006	0.005	0.009	0.007	0.004	0.005	0.003	0.001
砒素含有量(mg/kg)	くり粉A	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	コア試料	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
鉛溶出量(mg/L)	くり粉A	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	コア試料	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
鉛含有量(mg/kg)	くり粉A	<5	<5	<5	<5	5	<5	<5	<5	<5	<5
	コア試料	6	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
カドミウム溶出量(mg/L)	くり粉A	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	コア試料	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
カドミウム含有量(mg/kg)	くり粉A	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	コア試料	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
水銀溶出量(mg/L)	くり粉A	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
	コア試料	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
水銀含有量(mg/kg)	くり粉A	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
	コア試料	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
セレン溶出量(mg/L)	くり粉A	0.001	0.003	0.003	0.003	0.002	<0.001	0.001	<0.001	0.001	0.001
	コア試料	0.006	0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001
セレン含有量(mg/kg)	くり粉A	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	コア試料	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
六価クロム溶出量(mg/L)	くり粉A	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
	コア試料	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
六価クロム含有量(mg/kg)	くり粉A	<5	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
	コア試料	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
ふっ素溶出量(mg/L)	くり粉A	0.09	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08	<0.08
	コア試料	<0.08	<0.08	<0.08	0.09	<0.08	0.10	<0.08	<0.08	<0.08	0.08
ふっ素含有量(mg/kg)	くり粉A	60	60	50	100	90	60	80	80	80	70
	コア試料	50	100	110	120	100	100	130	150	120	210
ほう素溶出量(mg/L)	くり粉A	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
	コア試料	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
ほう素含有量(mg/kg)	くり粉A	<50	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
	コア試料	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
酸性化可能性試験pH(H ₂ O ₂)	くり粉A	3.1	3.0	3.3	4.6	6.9	6.8	3.6	4.3	4.2	4.1
	コア試料	2.8	2.4	2.5	3.0	2.6	2.6	2.7	2.6	2.7	8.3

§4. 考察

4-1 砒素溶出量分析結果の比較

図-6において、コア試料とくり粉Aの砒素溶出量の濃度分布は、ともに25m区間において相対的に最大となる山なりの変化傾向を示し、両者の傾向は概ね一致した。

今回得られた砒素溶出量のデータは、基準値を下回る低濃度であったが、上記のとおりコア試料とくり粉Aは概ね同様の变化傾向を示したことから、ノンコアボーリングで得られるくり粉を用いた重金属類の事前予測法は、従来のコアボーリングによる方法と同等の事前予測が可能であると考えられる。

4-2 試料の粒度分布による溶出量試験結果への影響

全10区間中6区間(5m, 15m, 25m, 35m, 45m, 50m)の試料を対象に、粒度試験(JIS A 1204 準拠)を行った⁶⁾。結果の例として、15m, 25m, 35mおよび50mの4区間の粒径加積曲線を図-8に示す。試験対象区間のうちコア試料とくり粉Bの細粒分含有率(以下、Fc)の差が最小であった35m区間(図-8c)を例にとると、くり粉Aの粒度分布はコア試料と類似していたのに対し、くり粉BはFcが33%であり、コア試料(12%)に比べて21%、くり粉A(8%)に比べて25%大きかった。同様に他の区間で各試料の比較を行うと、ほとんどの区間でくり粉Aはコア試料と類似した粒度分布を示した。このことから、今回の泥岩の地山では、排水して得たノンコアボーリングの試料と、コアボーリングで得た試料

は、その後の試料調整を経て得られた分析用試料の粒度分布に大きな差異がないことが分かった。一方、くり粉Bは、50m区間(図-8d)においてFcが相対的に最大となる82%を示し、細粒分がコア試料(14%)やくり粉A(5%)に比べて極端に多かった。これは、細粒分が多いタイミングに非排水容器で試料採取したことが主な原因と考えられる。

図-6において、くり粉Bは、結果的にくり粉Aに比べて、コア試料により近い砒素溶出量を示している区間も見られるが、上記のとおり、粒度試験の結果、コア試

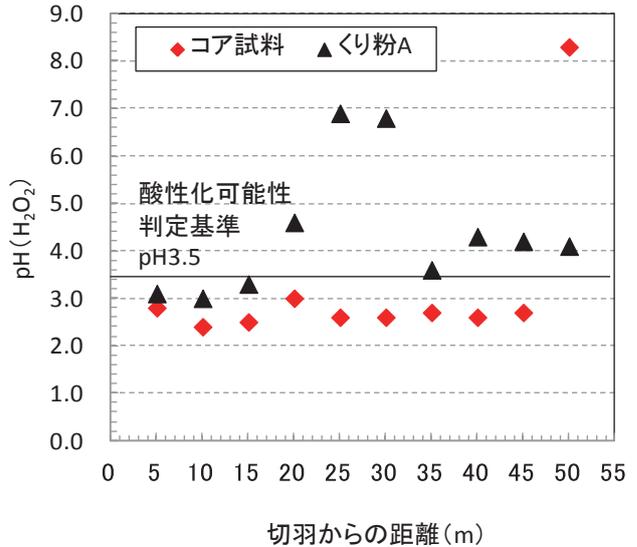
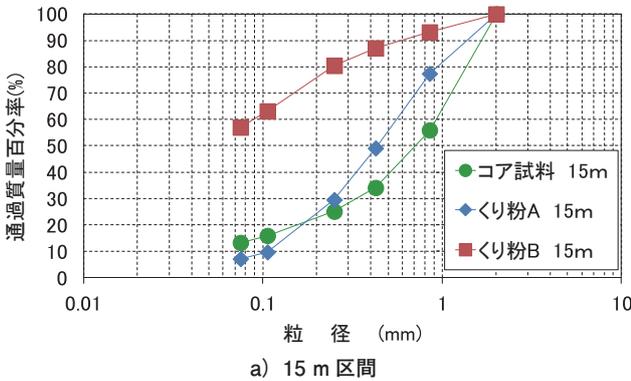
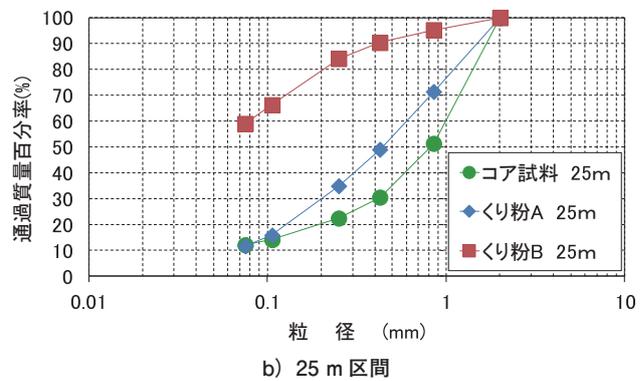


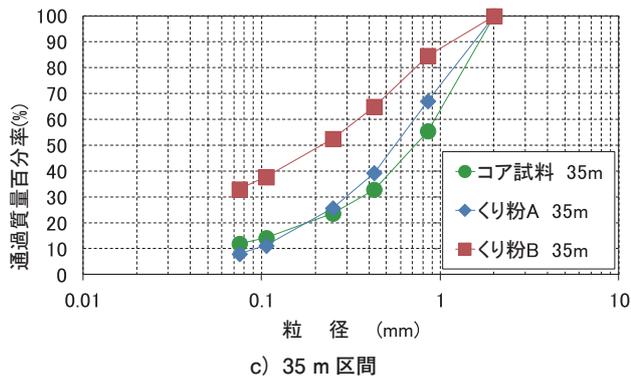
図-7 酸性化可能性試験結果



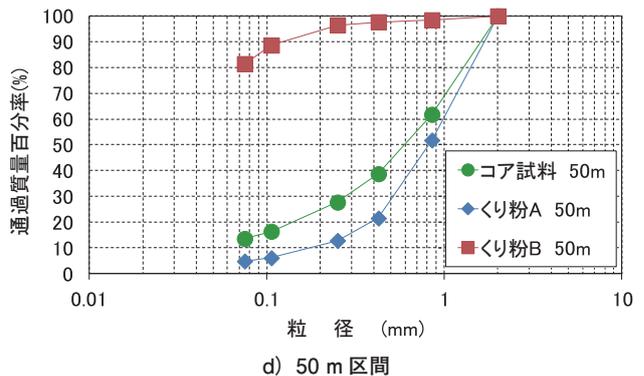
a) 15 m 区間



b) 25 m 区間



c) 35 m 区間



d) 50 m 区間

図-8 粒度分析結果

料とは粒度分布が明らかに異なり、細粒分が21%~68%多いことから、細粒分に偏った粒度分布によって、砒素溶出量への影響がコア試料に比べて出やすいと考えられるため、過大評価となっている可能性があると考えられる。

粒度分布が類似したくり粉Aとコア試料の砒素溶出量に差が生じた原因として、コアボーリングとノンコアボーリングの削孔位置が若干異なることによって、岩石が元来有する溶出ポテンシャルに違いがあったことが一因と考えられる。

4-3 酸性化可能性試験結果

酸性化可能性試験 (pH (H₂O₂)) において、コア試料とくり粉Aの結果が一致しなかった原因として、ボーリング位置が同一でないことにより、試験に影響する硫黄成分 (硫酸イオンの根源) および炭酸塩の分布に違いがあった可能性が考えられる。

コアボーリングでの調査の結果、図-7においてpH (H₂O₂) が唯一アルカリ性側の値 (pH8.3) を示した50m区間のコア試料を分析した結果、アルカリ成分である炭酸塩の含有が確認された。このことから当該地山の黄鉄鉱に起因する硫酸イオンは、炭酸塩によって一部が中和され、酸性化が抑制されている可能性が考えられる。前記したとおり、コアボーリングとノンコアボーリングの削孔位置は同一ではないため、pH (H₂O₂) に影響する硫黄成分 (硫酸イオンの根源) と炭酸塩のバランスが区間毎にコア試料とくり粉では異なり、その影響が試験結果に表れた可能性が考えられる。

§5. まとめ

コアボーリングに比べて迅速かつ安価で実施可能な地山の重金属類の事前予測方法として、ノンコアボーリングで得られるくり粉を分析用試料とする事前予測法を検討し、その適用可能性を実現現場における実験で確認した。本技術をコアボーリングによる従来法と比較した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 試験区間において、対象重金属 (砒素溶出量) は基準を下回る低濃度であったが、くり粉試料 (くり粉A) はコア試料と概ね同様の変化傾向を示したことから、本技術により、従来のコアボーリングによる方法と同等の事前予測が可能と考える。
- 2) 試料採取方法として、2つの方法すなわち①排水容器を用い対象区間全長の試料を採取する方法と、②非排水容器を用い任意のタイミングで全粒径の試料を一定量採取する方法を試した。その結果、①の採取方法によりコア試料と類似した粒度分布を示す試料 (くり粉A) を採取できた。このことから、今回の泥岩の地山では、①の採取方法が適すと考えられた。一方、②で得た試料 (くり粉B) は、粒度分布がコア試料と異なり、細粒分に偏っており、

コア試料に比べて、砒素溶出量が過大に評価されている可能性が考えられた。

- 3) 酸性化可能性試験において、くり粉Aの結果がコア試料と一致しなかった。その原因として、pH (H₂O₂) に影響する硫黄成分と炭酸塩のバランスが区間毎にコア試料とくり粉では異なった可能性が考えられた。

§6. おわりに

自然由来の重金属類が法規制の対象となったことで、近年、山岳トンネルの掘削ずりに含まれる重金属類が問題となる事例が増えつつあり⁷⁾、仮置場の確保が課題となる事案も顕在化している。

掘削ずりに含まれる重金属類の品質管理方法については法規制が無く、掘削ずりの搬出先あるいは再利用先を考慮し、発注者と協議の上、現場ごとに地質状況および施工条件に合った方法を模索しながら計画、実施されているのが現状である。

掘削ずり発生前に重金属類を迅速評価することで、施工区間の重金属類の溶出リスクを予見でき、施工を円滑に進められる利点があるため、そのニーズはさらに高まると考えられる。今後、本技術を地山性状 (岩種および亀裂状況) の異なる現場に適用してデータを積み重ね、地山の重金属類事前予測法として展開を図る所存である。

参考文献

- 1) 服部修一, 太田岳洋: 重金属などを含む掘削残土の分別処理方法, トンネルと地下, pp. 51-61, 2008.
- 2) 鴨崎顕治, 戸沼 淳: 重金属を含んだ掘削土の処理方法について, 日本トンネル技術協会第56回施工体験発表会 (山岳), pp. 89-96, 2005.
- 3) 山崎将義, 佐藤透, 山下雅之, 石渡寛之: ノンコアボーリングを用いた地山の重金属類事前予測法, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, 2014. (投稿中)
- 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含有岩石・土砂への対応マニュアル (暫定版), pp. 29-66, 2010.
- 5) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説 (第一回改訂版), pp. 164, 2003.
- 6) 佐藤透, 山崎将義, 山下雅之, 石渡寛之: ノンコアボーリングによる切羽前方重金属類の溶出特性, 地盤工学会第49回地盤工学研究発表会, 2014. (投稿中)
- 7) JTA 技術委員会安全環境小委員会自然由来重金属文献調査ワーキング: 自然由来の重金属を含むずりの処理対策に関する文献調査, トンネルと地下, pp. 59-64, 2014.