西松建設㈱ 正会員 〇山崎 将義 西松建設㈱ 正会員 山下 雅之

# 1. はじめに

平成22年に改正土壌汚染対策法が施行され,自然由来の重金属等による土壌汚染も法規制の対象となった. 近年,山岳トンネルの掘削ずりに含まれる自然由来の重金属等が問題となる事例が増えつつある<sup>D</sup>. 掘削ずり は法対象外ではあるが,法の基準に照らして分析,判定し,現場内での処理・利用方法や場外搬出時の受入れ 可否を決定することが多くなっている.分析期間中,掘削ずりの仮置場が必要であるが,用地が狭隘な現場で は仮置場が十分に確保できない場合もある.このような場合には,掘削前に先進ボーリングを行い,重金属等 を予測する方法が求められている.従来法として,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.また,工程管理上,作業方法としては施工サイクルへの影響が小 さく,工事を円滑に進められる方法が望まれている.

このような背景から,当社ではコアボーリングに比べてより迅速にかつ安価で実施可能な地山試料採取技術 を開発し,従来のコアボーリングを含め,以下の3つの技術を揃え,現場ニーズや目的に応じた使い分けを可 能としている.

①ドリルジャンボによるノンコアボーリング

②ドリルジャンボを使用して迅速かつ連続的に採取可能なコアボーリングシステム「Core-DRISS」

③コアボーリング

当社保有技術の比較表を表 - 1 に示す.本稿では,最も迅速性に優れた①を活用した切羽前方の重金属等予 測法に着目し,概要と現場実験結果等について述べる.

試料採取技術	コアボーリング	Core-DRISS	ドリルジャンボを用いた ノンコアボーリング				
使用機械	専用機械	施工重機(ド	施工重機(ドリルジャンボ)				
確実性	Ø	0	△ 事前に適用性の確認が必要				
迅速性	Δ	0	Ø				
コスト	Δ	0	Ø				

表-1 地山試料採取技術(当社)の比較

(凡例) ◎:特に優れている ○:優れている △:劣る ※評価は目安を示す.種々の条件により異なる.

#### 2. ドリルジャンボによるノンコアボーリングを用いた切羽前方の重金属等予測法

#### 2.1.技術の概要

本予測法は、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 で得られる地山試料(以下、くり粉と記す)を分析試料として、トンネル掘削前に重金属等の基準適否を評価 するものである.本予測法のフローを図-1に、試料採取イメージを図-2に示す. 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等は、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等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 予測法では、試料採取器具を切羽に設置(写真 - 3、写真 - 4)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).



図 - 1 ノンコアボーリングを用いた切羽前方の重金属等予測法フロー



図-2 本予測法における試料採取イメージ



写真 - 1 従来の試料採取状況



写真 - 2 本予測法における試料採取状況





写真-3 試料採取器具設置状況

#### 写真-4 試料採取器具

#### 2.2.特長

本予測法の特長として以下の点が挙げられる.

①専用の試料採取器具を用いることで試料ロスを防ぎ,対象区間のくり粉を確実に採取し,適正な分析・評価が可能

②コアボーリングに比べて、試料採取は1/5程度の時間で実施でき、費用は半分以下程度で済む

③切羽の複数箇所のノンコアボーリングを同時に実施可能

④削孔作業の支障とならずに、くり粉を安全に採取可能

⑤切羽前方探査(DRISS)との組合せにより、地山性状(硬/軟等)の評価を同時に実施可能

### 3. 現場実証実験

# 3.1.実験概要

本予測法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 ボーリングおよびノンコアボーリングを行い、コア試料と、2種類の方法で採取したくり粉の粒度分布および 溶出量等について比較を行った.

#### 3.2. 試料採取場所および採取方法

試料採取場所は、地質調査の結果、重金属等の基準不適合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。切羽から50mを実験区間とし、コアボーリングとノンコアボーリングで各々水平ボーリングを行い、5m毎の10区間で、区間長1mを対象に試料採取を行った(図-3).なお、両ボーリングの離隔は55cmであった.

くり粉の採取方法は,排水を行いながら各区間1m 長の試料全量を採取する土のう袋を用いた方法(以 下,排水型採取)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 水をせず全粒径を採取するポリビンによる試料採取

(以下,非排水型採取)もあわせて行った.非排水 型採取では,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.



#### 3. 3. 試料調製方法

図 - 3 水平ボーリングにおける試料採取区間

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」<sup>2)</sup>に準拠した.コア試料はジョークラッシャーを用いて粗砕し、2mmふるいを通過したものを試料と した.排水型採取で得たくり粉(以下、くり粉A)は、1日程度の風乾後に2mmふるいを通過したものを試料 とした.非排水型採取で得たくり粉(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.

#### 3. 4. 分析試験方法

重金属等の分析は,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(環告第18号)と 含有量試験(環告第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.粒度試験は,JISA1204に準拠して行い,全10区間中6区間(5m, 15m, 25m, 35m, 45m, 50m)の試料を対象とした.

#### 3.5.実験結果

(1) 実験区間の地山性状

実験区間の岩質は泥岩で、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.以後50m まで特記すべき性状の変化はなかった.

(2) 重金属等分析結果

重金属等8物質16項目を分析した結果, 砒素溶出量以外の項目は, データは割愛するが, 定量下限値未満または定量下限値に近い値であった.

砒素溶出量の分析結果を図-4に示す. 砒素溶出量は、0.001~0.009mg/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(0.01mg/L)を下回った.



図 - 4 砒素溶出量分析結果

(3) 粒度試験結果<sup>3)</sup>

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-5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(図-5 c)) を例にとると、くり粉Aの粒度分布はコア試料と類似したのに対し、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(図-5 d))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試料を採取したことが主な原因と考えられる.



#### 3.6.考察

(1) 砒素溶出量分析結果の比較

コア試料,くり粉Aおよびくり粉Bの砒素溶出量の濃度分布は,図-4において,いずれも25m区間で相対 的に最大となる山なりの変化を示し,概ね傾向は一致した.今回得られた砒素溶出量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は概ね同様の変化傾向を示した.このことから,ボーリングコア 等の地山試料とくり粉の砒素溶出量について事前に相関関係を確認し,管理図を作成することで,くり粉を分 析試料とした重金属等の予測が可能であると考えられる.

(2) 細粒分による溶出量への影響

図-4において、くり粉Bは、ほとんどの区間でくり粉Aに比べて、コア試料により近い砒素溶出量を示した。くり粉Bは、前記のとおり、コア試料とは異なる粒度分布を示し、Fcは21%~68%大きいことから、細粒分に偏った粒度分布によって、砒素溶出量に影響が出やすく、くり粉Aに比べて高い値を示した可能性があると考えられる。しかしながら、くり粉Bとコア試料を比較した場合、くり粉Bの砒素溶出量は、コア試料のそれを下回る傾向があったことから、溶出量に影響する要因が細粒分以外にもあると考えられた。

溶出量に影響する要因として,次の3つが考えられた.①くり粉の採取に大量の水を使用すること(溶出量 試験の前に削孔水と接触すること),②細粒分の割合の違い,③試料の乾湿の違い.そこで,後述する室内実 験により,これらの影響要因について検証を行った.

# 4. くり粉を測定試料とする妥当性の評価

#### 4.1.実験概要

前記した現場実証実験結果をふまえ、本予測法の技術的課題として、試料の相違(乾いた一塊の岩石試料と 湿潤状態のくり粉)による測定値の信頼性に関わる影響要因の検証が挙げられた.そこで、岩石試料から模擬 的にくり粉を作製して元の岩石試料と分析比較を行い、重金属等の溶出への影響について検証を行った.

#### 4.2.実験方法

(1) 試料および調製方法

岩石試料は、自然由来の砒素を含む三波川結晶片岩類黒 色片岩(砒素溶出量最大0.014mg/L, pH9.3)の掘削ずりを 用いた. 乾燥状態の掘削ずりを粗砕し、図-6に示すフロ ーに従い水と固液比1:70で混合,3分撹拌し、模擬くり粉試 料を作製した.上記の固液比および混合時間の条件は,実 際にくり粉を採取した際(図-2)の条件を基に設定した. くり粉Aの採取を模擬した方法で模擬くり粉A(以下試料 A)を作製し、くり粉Bの採取を模擬した方法で模擬くり粉 B(以下試料B)を作製した.



図-6 模擬くり粉の試料調製フロー

0.075mm

0.01

原土

◆試料A

➡ 試料B

1

10

100

90

80

70 (%) 60

> 40 30

> 20 10

> > 0 0.001

百分率 50

通過質量

(2) 分析試験方法

粒度試験はJISA1204に準拠した. 砒素溶出量は環告第18 号溶出量試験にて測定した.

### 4.3.実験結果および考察

(1) 粒度試験結果

図-7に粒度試験結果を示す.掘削ずりの粗砕2mmアンダ ー試料(以下原土)と試料Bは粒度分布が概ね一致し、細粒分

(粒径0.075mm以下)の割合もそれぞれ25%,27%と同程度で あった.一方, 排水型採取で得た試料Aの細粒分は14%であり, 原土および試料Bより10%程度少ない結果となった.

前記した現場実証実験で用いたコア試料の粗砕2mmアンダ ーの粒度分布は、排水型採取のくり粉Aと類似したが、本実験 の原土の粒度分布は、非排水型採取の試料Bと概ね一致し、異 なる結果となった.これは岩種の違い(前者は泥岩,後者は結 晶片岩)によるものと考えられる.

(2) 砒素溶出量

試料採取に水を使用する影響

湿潤状態の試料 A および試料 B と、乾燥状態の原土の溶出 量を比較した結果を図-8に示す.原土と粒度分布に差のない 試料Bの溶出量(平均約0.011mg/L)は原土(平均約0.012mg/L)



0.1

による影響

との差は認められなかった.よって、試料採取に水を使うことによる溶出量への影響は小さいと考えられる. なお, 試料 A の溶出量(平均 0.009mg/L)は原土に比べて相対的に低かった. 試料 A は砒素が水(排水)に 移行した可能性が考えられたが、排水中の砒素を測定した結果、0.001mg/L 未満であった.

-221-

②試料採取方法(粒度分布)の違いによる影響

細粒分が原土および試料 B より少ない試料 A は,前記のと おり相対的に低い溶出量を示した.図-8の実験データを用い, くり粉と原土の砒素溶出量の相関関係を調べた結果を図-9 に示す.相関係数(R)は試料 A, B それぞれ 0.90, 0.96 を示 し,両くり粉とも高い相関性が確認された.これらのことから, 粒度の違いにより溶出量に差が生じるものの,くり粉 A でも 原土との相関性を求めることができ,重金属等の評価に支障は ないと考えられる.くり粉 A は,排水をしながら対象区間の 全試料を採取できるため,全試料の採取が量的に困難なくり粉 Bに比べて,より代表性に優れた試料が得られるといった利点 がある.くり粉 A とくり粉 B の比較表を表-2 に示す.今後, 更にデータを蓄積し,適用可能な岩質・条件を把握したい. ③試料の乾湿の違いによる影響

試料 A および試料 B の乾湿の違いでの比較結果を図 - 10 に示す.いずれも風乾後に溶出量が低下し,湿潤試料の方が原 土により近い溶出量であった.よって,予測の判定に用いる試 料は湿潤試料が適すると考えられる.自然由来砒素を含む土壌 に関し,湿潤試料の方が風乾試料に比べて相対的に高い砒素溶 出量を示す傾向が報告されている<sup>4</sup>.本実験では試料の種類が 異なるが,類似の傾向が認められた.



図 - 9 くり粉と原土の砒素溶出量相関図

項目	くり粉A (排水型採取)	くり粉B (非排水型採取)	備考	Ĵ 0.016	■風乾なし  □風乾有り
試料の代表性	優	劣 ※	※連続的な採取は大 量となり実施困難	) 0.012 副 1.008	
分析前処理の 所要時間 (10試料)	約9時間	約12時間	くり粉Bは固液分離に 約3時間要する(遠心 分離機2台使用時)	쑍 0.004 ₩ 岩 0.000	
細粒分のロス	あり	なし	細粒分による溶出量 への影響が大きい地 質には、くり粉Bが適	図 - 1(	0 くり粉の乾湿による影響

表 - 2 くり粉 A およびくり粉 B の比較表

# 5. まとめ

従来法に比べて迅速かつ安価で実施可能な地山の重金属等の予測方法として,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予測法を検討し,その適用可能性を現場実証実験で確認した.さらに,現場実証 実験の結果をふまえ,重金属溶出への影響要因について室内実験で検証を行った.それらの結果から,以下の 知見が得られた.

① 現場実証実験の結果,実験区間において、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、 くり粉はコア試料と概ね同様の変化傾向を示したことから、事前にボーリングコア等の地山試料とくり粉 の砒素溶出量の相関関係を確認し、管理図を作成することで、本予測法により、重金属等の予測が可能で あると考えられる。 ② くり粉を分析試料とすることによる重金属等の溶出への影響要因について検証を行った結果,考えられた3 つの影響要因評価に支障がなく、本予測法の有効性が示された.

# 6. おわりに

掘削ずりに含まれる重金属等の品質管理方法については明確な法規制が無いため,現場毎に関係者が協議を 行い,掘削ずりの搬出先あるいは再利用先を考慮の上,地質状況および施工条件に合う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等を迅速評価することで,施工区間の重金属等の基準適否を予見でき,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,データを蓄積し,本予測法を 自然由来の重金属等が懸念されるトンネル現場の切羽前方のスクリーニング評価等に活用したい.

#### 参考文献

- 1) 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,vol.45(2),pp.59-64,2014.
- 2) 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),平成22年3月, pp.29-66, 2010.
- 3) 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地山試料の重金属類の溶出 特性,地盤工学会第49回地盤工学研究発表会講演集,pp.2031-2032, 2014.
- 4) 海野円,根岸昌範,太田綾子,高畑陽:自然由来の砒素含有土を用いた簡易溶出試験法確立のための基礎 的検討,土木学会第69回年次学術講演会講演概要集,pp.747-748, 2014.