

大和御所道路トンネル掘削土処理対策に関する 施工について

荘司 匡岐¹

¹近畿地方整備局 奈良国道事務所 工務課 (〒630-8115 奈良県奈良市大宮町3-5-11)、

京奈和自動車道路大和御所道路御所区間8工区の計画路線近傍には、鉍脈や変質帯、圧砕岩が分布している。そのため、自然由来の重金属がトンネル掘削土に含まれているおそれあり、対策や処理が課題となっている。平成24年に、奈良国道事務所は、専門家・学識者・関係機関との協議の結果を踏まえ、「大和御所道路トンネル掘削土処理対策に関する施工マニュアル(案)」を策定した。本論文では、トンネル掘削によって発生する重金属を含んだ岩石を適切に処分すべく、大和御所道路水泥トンネル工事での試験施工結果、変質岩判別方法の検討および今後の本施工への導入の改善点、取り組みについてとりまとめを行った。

キーワード 自然由来重金属、ヒ素、トンネル、施工マニュアル

1、はじめに

京奈和自動車道路 大和御所道路御所区間奈良県橿原市の橿原高田ICから奈良県五条市の五条北ICまでの延長13.4kmの高規格幹線道路である。平成24年3月に橿原高田ICから御所IC間(6工区3.7km)が供用し、平成27年3月には御所ICから御所南IC間(7工区2.5km)が供用された。御所南ICから五条北IC間(8工区7.2km)は、平成28年度供用予定である。8工区は、山間部であることから、区間の7割をトンネルが占めている。トンネル4カ所うち巨勢山トンネルは施工済みである。残りのトンネル(朝町トンネル、水泥トンネル、新田東佐味トンネル)については、既往の調査ボーリングコアを用いて重金属類を対象として分析した結果、2箇所(新田東佐味トンネルと水泥トンネル)の岩石から土壌汚染対策法の溶出量基準値(0.01mg/L)を超過する自然由来のヒ素が検出された。改正土壌汚染対策法(以下、改正土対法)では、重金属含有岩であっても岩盤自体処理の対象外となっているが、事業者として、改正土対法に準拠し、トンネル掘削によって発生する重金属を含んだ岩石を適切に処分すべく、自主的な対応を実施することとなった。そこで、平成24年度に専門家・学識者・関係機関を交えた検討委員会での審議結果や、奈良県をはじめとした関係機関との協議結果を踏まえ、「大和御所道路トンネル掘削土処理対策に関する試験施工計画(案)(以下、試験施工計画)」を策定した。本論文では、試験施工の結果およびその評価、本施工へ導入にむけた改善点、取り組みについて紹介する。

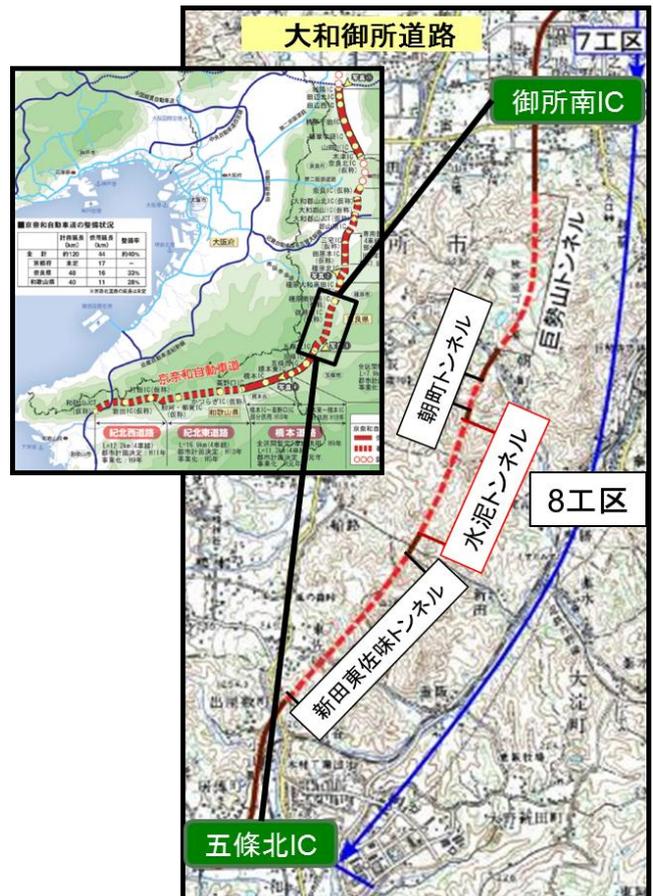


図-1 調査位置図

2、 試験施工について

(1) 目的

既往調査の結果、基準を超過するヒ素を溶出する岩石は、花崗閃緑岩（かこうせんりょくがん）の変質帯（変質岩）と圧砕岩であった。試験施工は、トンネル掘削時に、花崗閃緑岩の変質帯（変質岩）の判別を確実に実施するため次の3点に着目しおこなう。

- ①変質程度によるヒ素溶出量、含有量の相違確認
- ②判定方法の施工性確認
- ③試料採取混合方法の妥当性の確認

それらの結果をもとに、施工関係者間で岩石判別の認識を共有するための判別表を作成し、試験施工の実施結果の評価、掘削土処理マニュアル（案）を修正し、本施工へ導入にむけた取りまとめをおこなうことを目的とする。

(2) 対象

本論文では、現在掘削作業がおこなわれている大和御所道路水泥トンネル工事を対象に試験施工の結果を紹介する。水泥トンネルは、延長 1,172mのトンネルであり、全長にわたって、花崗閃緑岩、低速度帯や小規模な鉱山跡が点在している（図-2）。ヒ素が基準超過する可能性のある変質岩は、熱水により変質した岩石であり、熱水は岩石の亀裂に沿って流動する。そのため、変質岩は亀裂が多いと考えられる低速度帯の周辺に多く分布すると想定され、既往のボーリングコアの結果からも、基準値を超えたヒ素が検出されている。したがって、今回の試験施工の実施位置としては、掘削の初期段階で低速度帯を含む終点側坑口の付近で実施した。

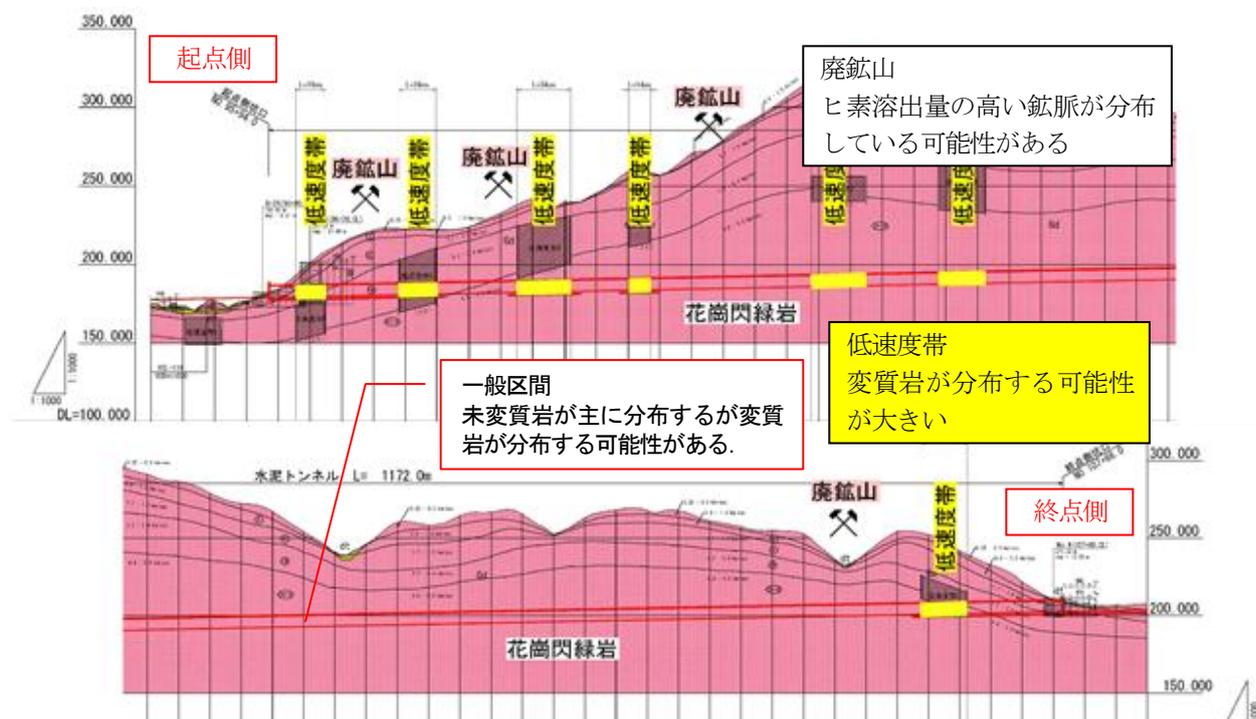


図-2 水泥トンネル地質縦断面図

(3) 方法

大和御所道路トンネル掘削土処理対策に関する試験施工は以下に示す手順で実施した。

- ①切羽スケッチ時に、風化程度を観察し、変質程度の判別が可能か判別した。
- ②切羽に出現する岩石の変質程度を未-微変質、弱-中変質、強変質(変質区分)に判別した。
- ③切羽内の岩石種の変質区分ごとの分布面積の比を集計した。

④判別した岩石を三通りの組み合わせ（表-1）で採取した。方法として、ブレーカーにより砕き落としたものを採取した。

⑤三通りの組み合わせで採取した岩石のヒ素溶出量と含有量を計量証明事業所にて分析した。

表-1 試料の組み合わせ

| | |
|-----|--|
| 試料a | 切羽全体で岩石種や変質区分ごとの分布面積比に応じて均等に採取し、混合した試料 |
| 試料b | 変質区分毎の分布面積比に応じて均等に採取し、混合した試料 |
| 試料c | 岩石種や変質区分でそれぞれ採取した試料 |

この3種の試料採取方法の考え方として、試料aは、切羽内に複数の岩石種が出現した場合、岩石種ごとに切り分けて搬出することが難しいことに基づいている。試料bは、変質岩にヒ素溶出量の高い岩石が多いことを考慮した採取方法である。工事区域外で盛土などに利用した場合、後になって基準値以上のヒ素が溶出するようリスクをできるだけ下がるため、事前に変質岩に特に着目して分析し、ヒ素溶出が基準以上の岩石が混じる岩石は要対策土と判定すべきという考え方に基づいている。試料cは、岩石種や変質区分に応じたヒ素溶出量、ヒ素含有量の特性を把握するために実施するもので、掘削土の取り扱いを判別するためには用いなかった。また、試験施工の分析の頻度と記録については、岩石採取を毎切羽で試料採取と分析を実施した。また、本施工時の岩石判別表に利用するため、分析試料の記載と写真撮影を行う。なお、岩石の判定については、地質専門技術者がおこなう。なお、変質程度の区分は、

「大和御所道路トンネル掘削土処理対策に関する試験施工計画(案)平成25年3月国土交通省奈良国道事務所、試験施工開始時の判別表」を参考に肉眼で観察し、採取試料を決定した。

なお、上記③各変質区分の岩石の切羽内の分布面積の比を集計するために、本工事では、AR(拡張現実)技術とラインレーザー照射技術を組み合わせた方法でおこなった。3次元座標を高解像度カメラにて撮影した切羽断面画像をパソコンやタブレットの画面上で25点メッシュを重ね合わせ(図-3)、同時にラインレーザーにて実際の切羽断面にも25点メッシュを照射することで(図-4)、岩石を採取する際に、地質専門技術者やオペレーターが、採取する箇所を共有し、円滑に指示することが可能となった。これにより、安全かつ迅速に試料採取をおこなうことができ、サンプリングの精度向上にもつながったと考えられる。



図-3 AR(拡張現実)技術を用いた切羽断面写真



図-4 レーザー照射切羽断面写真

3、結果および考察

(1) 結果

1) 岩質

試験施工区間の岩質は、白亜紀領家帯の花崗閃緑岩が分布しており、全体として割目の発達が目立っていた。特に北東—南西系の割目が顕著で、次いで北西—南東系の割目が交差していた。また、割目に沿った熱水変質は強弱があるものの、区間内の大部分で確認できた。

2) ヒ素溶出量、含有量

はじめに、試料a、試料bの坑口からの距離とヒ素溶出量結果を示す(図-5)。試料a、試料bはともにほぼ連動して推移しており、基準値0.01mg/Lを超過する箇所が多く見られる。特に、低速度帯や廃鉱山付近では、既往のボーリング調査の通り、ヒ素溶出量が基準値を大きく上回っていることが分かる。溶出試験結果から要対策土と判定された基準値超過試料の割合は、84試料中45試料で53.6%であった。試料aで53%、試料bで60%の試料で、ヒ素溶出量の基準超過が確認された。

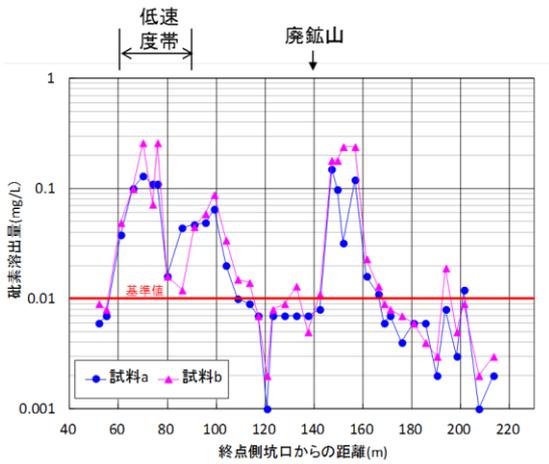


図-5 試料a、試料bの終点坑口からの距離とヒ素溶出量との関係

次に、試料a、試料bの坑口からの距離とヒ素含有量の結果を示す(図-6)。試料a、試料bはともに基準値を超えていないものの、低速度帯や廃鉱山の付近では、他の位置に比べ含有量が高いことが分かる。こちらも、ヒ素溶出量と同様に、試料a、試料bは、連動して推移していることが分かる。

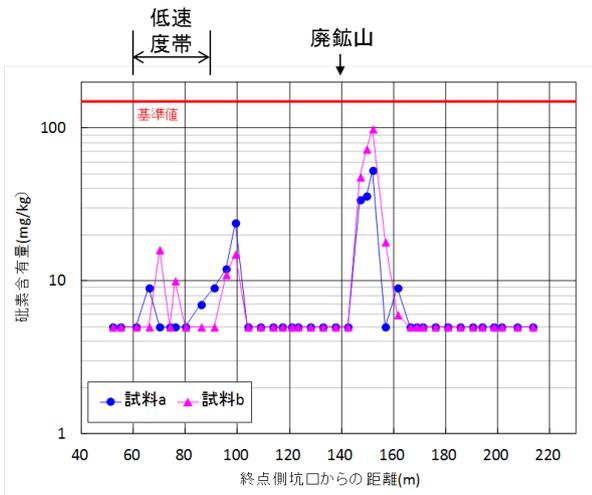


図-6 試料a、試料bの終点側坑口からの距離とヒ素含有量との関係

試料cについては、採取した試料を中～強質岩、弱変質岩、鉱脈、鉱化変質帯に分類し、他の試料と同様の分析をおこなった。ヒ素溶出量を図-7に示す。結果として、岩の変質程度に関わらず、多くのサンプルで基準値を上回っているものの、変質が顕著なものはヒ素の溶出量が多いことが分かる。基準値の0.01mg/Lを超過する検体が、100 試料中47 試料(47.0%)を占めた。変質程度別の溶出量基準値超過率は、未～微変質岩で27.2%、弱変質岩で47.5%、中～強変質岩で56.3%であった。なお、試料a、試料bと同

様に低速度帯、廃鉱山付近では、高濃度のヒ素溶出量が確認された。

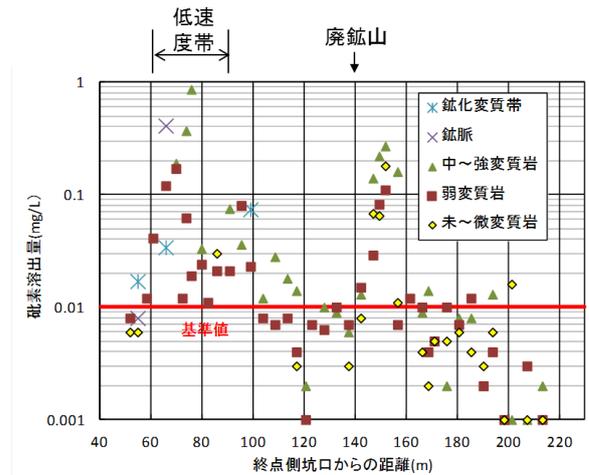


図-7 試料cの終点側坑口からの距離とヒ素溶出量との関係

図-8 に示すとおり、試料cのヒ素含有量は、5～110mg/kgの値が検出されたが、大半が定量下限値の5mg/kg未満を示す結果となった。低速度帯、廃鉱山付近の変質の程度が大きいものについては、含有量が多い検体がみられた。

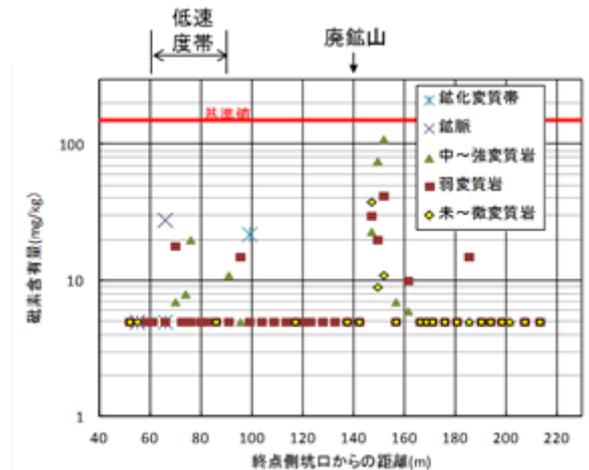


図-8 試料cの終点側坑口からの距離とヒ素含有量との関係

3) pH、電気伝導度、酸化還元電位

現場において、試料cのpH、電気伝導度、酸化還元電位を測定した結果を図-9～図-11に示す。pH試験値については、pH9～11の範囲内で弱アルカリ側の値となったが、変質程度やヒ素溶出量、含有量別では対して明瞭な相違傾向は見出せなかった。電気伝導率と酸化還元電位についても、明瞭な傾向は見られなかった。いずれの分析でも明確な相関関係は確

認できなかったため、判定の補助手段として利用は現状難しいと思われる結果となった。

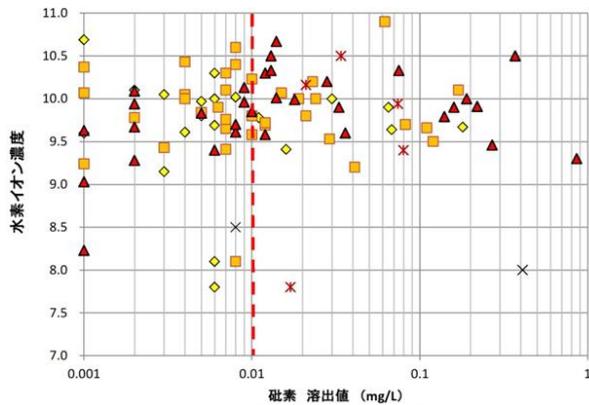


図-9 ヒ素溶出量とpHの関係

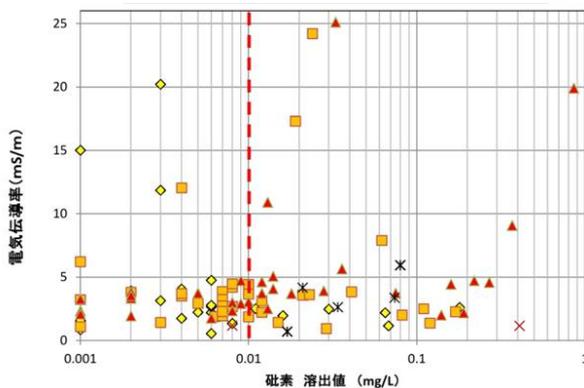


図-10 ヒ素溶出量と電気伝導度の関係

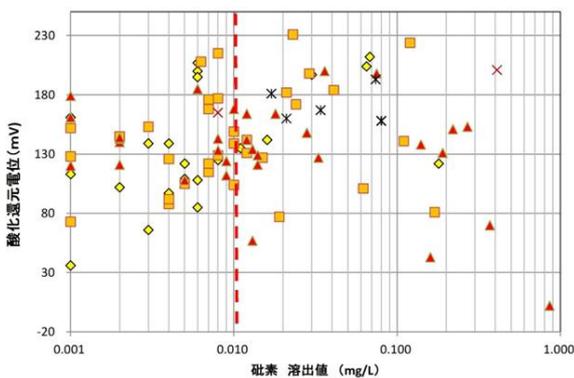


図-11 ヒ素溶出量と酸化還元電位の関係

(2) 考察

1) 高濃度のヒ素が検出された切羽の特徴

高濃度のヒ素が検出された切羽として、低速度帯、廃鉱山付近で相対的高濃度のヒ素溶出量、含有量が確認された。また、試料cの分析結果より、低速度帯、廃鉱山付近では、変質程度に係らず、高濃度のヒ素溶出量、含有量が確認された。

高濃度のヒ素が検出された切羽の特徴として以下の点が挙げられる。

- ◎全体に灰白～灰緑色を帯びている。
- ◎未変質新鮮岩と比べると脆弱でハンマーの打診で鈍い音がする。
- ◎断層沿いの灰白色粘土または灰白色強変質岩に暗黒灰色の微細鉱物が散在して見られることがある。

図-12、図-13に高濃度のヒ素が検出された代表的な切羽の写真を示す。

図-12では、断層沿いの灰白色粘土または灰白色強変質岩に暗黒灰色の微細鉱物が散在して見られることがある。指圧で容易に砕ける程度の脆弱部が混じり、崩れ易くなっている。また、断層沿いは破碎され、土砂～粘土化が進んでいる。



図-12 ヒ素の高濃度溶出値を得た代表的切羽写真

図-13では、割目沿い暗茶褐色に変色している部分とその周辺は溶出量、含有量ともに高濃度となることがある。暗茶褐色部は水酸化鉄が生成しており、この水酸化鉄に地下水中に溶解しているヒ素が吸着していることで高濃度のヒ素が検出されるものと推定される。



図-13 ヒ素の高濃度溶出値を得た代表的切羽写真

2) 施工業者から試験施工結果の報告についての評価、今後の取り組み

i) 切羽観察及スケッチによる変質程度の判別

切羽観察及びスケッチにより切羽で岩石の変質程度を判別する方法は、時間的な制約もあり、また切羽の観察と坑外の明るい場所での岩石の観察（岩を割って内部を観察）が必要であったため困難であった。実際の施工上での変質程度の判別は、切羽からできる限り均等に試料を採取し、坑外に試料搬出後、切羽観察結果と試料を照合の上、切羽の変質区分を行った。切羽観察の時間は、工程上及び安全管理上、短時間（約 10 分程度）作業を余儀なくされるが、現状の工程上可能である。今後、施工を進めていく中、当現場において変質程度の判別方法の具体的手法としては品質上もこの方法が望ましいと考える。



図-14 試料採取の様子

上記より、スケッチによる変質程度の判別については、トンネル内部の暗部では、見た目だけの分類が難しく、時間的に制約もあることから、トンネル坑外に持ち出したうえでの判断が必要であることが分かった。また、この方法の方が工程に影響を及ぼすことなく、判別することが可能であった。よって品質確保の観点からも、変質程度の判断は切羽で行うより、この方法が適していると言える。

ii) 分析試料の採取方法及び手順

代表試料を得るためには、切羽の変質程度と各変質程度の分布割合を反映したものでなければならない。試料採取の工程としては、発破後、ズリ搬出し、ブレイカによるコソク終了後、吹付けまたは支保工設置までの準備時間の合間に行うことが無駄が少なく、工程上問題が少ない。ただし、試料採取手順としては、切羽の状態によっては崩落による危険を伴う。今回採取方法手順として切羽からの直接採取を

回避し、地質専門技術者が切羽観察中、変質区分の確認に必要と考える切羽上のポイント（5～7 点程度）をブレイカオペレータにその場で伝えた。ブレイカオペレータが各点毎に切羽（上半）から岩を砕き落とし、落とした試料を分析試料として採取した。なお、各採取ポイントの切羽上の位置を記録し、変質区分けに役立てることとした。なお、現在、本施工においても当手法を継続実施している。

分析試料の採取方法及び手順については、判別の統一性を確保する意味で、専任の地質専門技術者が継続して判別していく行が必要が望ましいと考えられる。

4、おわりに

本論文では、大和御所道路水泥トンネルを対象に、トンネル掘削土処理対策に関する施工について、試験施工の結果、考察および今後の改善点についてまとめた。試料採取の際の、各変質区分の岩石の切羽内の分布面積の比を集計方法として、AR（拡張現実）技術とラインレーザー照射技術を組み合わせる方法をおこなうことで安全性や精度の向上、サイクルタイムへの影響低減の一助となる可能性を示した。更に、この方法を用いて採取した試料を分析することで変質程度における相違や判別方法についての検討をおこなった。実際に施工業者にヒアリングすることで、現場での意見踏まえたマニュアルの修正の方向性を定めることができた。今後の課題としては、岩の変質程度の判別方法の精度向上が挙げられる。また、pH、電気伝導度、酸化還元電位以外の項目における変質程度やヒ素の溶出量、含有量との関係について引き続き、検討委員会の委員との協議のうえ、検討する必要がある。

謝辞：本論文の作成にあたり、大和御所道路水泥トンネル工事受注者である（株）竹中土木の皆様には、資料の提供および多大なご助言ご協力をいただきました。ここに感謝の意を示します。

（参考文献）

- 1) 奈良国道事務所（2013）大和御所道路トンネル掘削土処理対策に関する試験施工計画（案）
- 2) 奈良国道事務所（2013）大和御所道路トンネル掘削土処理対策に関する施工マニュアル（案）
- 3) 吉安 勇介（2014）「大和御所道路トンネル掘削土処理対策に関する施工マニュアルについて」平成 26 年度近畿地方整備局研究発表会