

建設事業における自然由来の重金属等に関する環境リスクマネジメント

門間聖子*

Environmental Risk Management of Natural Origin Heavy Metals in Rocks Excavated in Construction Works

Mariko MONMA*

Abstract

In the construction industry in Japan, environmental risk management started in the 1970s concerning the elution of acidic water or heavy metals from rocks in road or railway construction works. OYO Corporation has also tackled environmental risk management since that time. We clarified the risks of elution of heavy metals and of acidic water in road tunnel construction works through analyses of exposed rocks and boring cores in mineralization and alteration zones. To avoid such risks in tunnel construction works, we reviewed analysis methods to discriminate these risks and adopted a simplified oxidation test of adding hydrogen peroxide water to measure pH, while establishing a discrimination index by measuring sulfur (S) and calcium (Ca) using an X-ray fluorescence spectrometer to obtain a S/Ca mole ratio. As a result, we succeeded in reducing the amount of soil to be processed. Environmental risk management may cause a business loss if not implemented. On the other hand, appropriate environmental risk management significantly reduced the cost and improved the workability of road tunnel works by reducing the areas to be treated to 9% of the total planning route from the initial estimate of 42%, demonstrating the effectiveness of environmental risk management for rocks to be handled in construction works. Meanwhile, we also clarified issues where there is insufficient knowledge on the effect of different grain diameters on elution and elution characteristics of elements themselves, or ineffective use of embankment due to its uncertain mechanism, though we confirmed the phenomena of reducing elution with this process. In future, theoretical grounds need to be added to these issues, in which phenomena-related knowledge is being collected, to ensure the safety and security of social infrastructure construction works.

Key words: Environmental risk, Risk management, Natural origin heavy metals, Acidic water, Characteristic of elution

要 旨

我が国の建設事業においては、1970年代より道路や鉄道建設において岩石からの酸性水および重金属等の溶出に対する環境リスクマネジメントが行われ始めており、当社においても、同時期よりそれらの環境リスクマネジメントに取り組んでいる。道路トンネルの建設における事例では、鉍化変質帯分布域において、露頭の岩石およびボーリングコアの分析により、重金属等の溶出リスクおよび酸性水発生リスクがあることを明らかにした。このため、トンネル建設の際にそれらのリスクを判別するための分析方法を検討し、過酸化水素水を添加してpHを測定する簡易酸化試験ならびに蛍光X線分析装置による硫黄(S)とカルシウム(Ca)の測定で得られたS/Caモル比による判別指標を設定し、処理すべき土量の低減に資した。このような環境リスクマネジメントを行う意義として、それを行わないことにより事業損失を生じた例がある。一方で、道路トンネルの事例では、適切な環境リスクマネジメントにより当初は全体の42%と想定された要対策区間を9%にまで減少することができ、コスト縮減および施工性の向上に大きく寄与した。このように、建設工事で取り扱われる岩石に対する環境リスクマネジメントは有効である一方、粒径の違いが溶出性に及ぼす影響や元素そのものの溶出特性に関する知見が不足しているといった点や、盛土処理により溶出性が低減する現象がみられるものの、メカニズムが不明確なため有効活用されていないといった課題も明らかとなった。現在、現象面での知見の集積が行われているこれらの課題について、理論的な裏付けを加えることで社会基盤整備における安全・安心を確たるものにしていく必要があると考える。

キーワード：環境リスク、リスクマネジメント、自然由来重金属等、酸性水、溶出特性

*応用地質（株）技術本部

*OYO Corporation Engineering Headquarters

1. はじめに

一般に、環境リスクとは「人為活動によって生じた環境の汚染や変化（環境負荷）が、環境の経路を通じて、ある条件のもとで人の健康や生態系に影響を及ぼす可能性（おそれ）」を意味するが、環境汚染等によって被害補償を求められる可能性をリスクとして捉える観点もある¹⁾。工場から排出される化学物質による大気をはじめとする環境汚染、地下水の過剰採取による表層土壌への塩類集積、あるいは人々の日常生活において排出される生活雑排水による河川や湖沼の水質汚染等、環境リスクが問題となる例は多岐にわたる。

本報文においては、これらの環境リスクのうち、建設事業によって岩石が掘削された際、それらに由来含まれる砒素や重金属（以後、「重金属等」と称する）ならびに酸性水の原因物質としての硫黄に起因して生ずる“人の健康や生物への影響”および“補償による経済的損失を負う可能性”を重金属等リスクと定義し、このリスクの評価方法およびマネジメントについて論ずる。

2. 建設事業における重金属等に関する環境リスクへの取り組み

2.1 取り組みの経緯

我が国の建設事業においては、当初は重金属等リスクはもとより環境リスク全体について配慮されることは少なかった。建設事業による環境リスクが認識され始めたのは、1950年代後半からの経済の高度成長と共に、急速に整備が進められた道路建設に伴う自然環境の破壊である²⁾。その後、1984年(昭和59年)には国レベルの大規模事業を対象とする環境アセスメントの実施が閣議決定され、建設事業に伴う環境リスク低減への取り組みが本格化した。

そのような中、岩石の掘削による環境影響への対応も見られるようになった。環境汚染は建設事業においては負の要因であることから公表されないことが多かったが、1999年から2005年にかけて東北新幹線盛岡―新青森間に建設された八甲田トンネルは先駆的な事例として広く知られている。八甲田トンネルは岩手県の八甲田山北東部を通過する全長26kmのトンネルで、大盛鉱山をはじめとした鉱脈鉱床分布域を通過する。このため、鉱化変質帯の掘削に伴う酸性水発生が懸念された³⁾。その後、同トンネルでは酸性水に伴う重金属等の溶出にも対応することとなった³⁴⁾。

なお、諸外国における地盤中の重金属等による環境リスク問題としては、自然の土壌に含まれる砒素による河川水や地下水の汚染問題⁵⁾が知られているものの、建設事業に伴う岩石中の重金属等による環境リスクを扱った事例については報告がなく、社会基盤整備における重

金属等に関する環境リスク問題は、現時点においては我が国特有の問題と考えられる。

2.2 建設事業における岩石構成成分の環境動態に関する研究

建設事業においては、1970年代から鉱山地域を通過する道路や鉄道建設において岩石からの酸性水および重金属等の溶出に対する環境リスクマネジメントが行われ始めた。当時の道路・鉄道建設における掘削対象の岩石の環境リスクの評価においては、溶媒に水を用いた溶出による重金属等の溶出リスク評価が主体であったが、服部ら(2007)⁴⁾は硫化鉱物の酸化溶出に着目し、火山岩類に対しては硫黄含有量、泥岩に対しては硫黄/カルシウムモル比について、酸性水発生リスク評価の指標としての有効性を示した。また、細川ら(2007)⁶⁾は道路トンネルにおける掘削対象岩石の酸性水発生・重金属等溶出リスク評価手法として、2~5mmに粉砕した岩石100gに500mLの蒸留水を添加して3分間振とう、7分間静置後に測定したpH、ならびに硫黄含有量、硫黄/カルシウムモル比、強熱減量を指標とする方法が有効であることを示した。

酸性水発生リスクについては、我が国においては1950年代に農用地の酸性硫酸塩土壌対策として評価手法の研究がはじめられた⁷⁾。村上(1967)⁸⁾は酸性硫酸塩土壌の原因物質が可酸化性硫黄、鉱物としては黄鉄鉱として土壌に含まれることを特定した。また、酸性硫酸塩土壌に該当するか否かの判定方法としては、佐々木(1977)⁹⁾により30%過酸化水素水処理後の土壌のpHが3.5以下を示すものを便宜的に酸性硫酸塩土壌とするの指標が示された。その後、奥村ら(1990)¹⁰⁾により消毒薬として利用されている3%過酸化水素水処理による酸性硫酸塩土壌の判定方法の検討がなされた。

また、酸性硫酸塩土壌に関連し、海成起源の泥岩において掘削後の酸化に伴い重金属等の溶出性が変化する現象に関連する研究としては、市原(1960)¹¹⁾が硫化鉱物の酸化による海成粘土中の粘土鉱物の変化を示したほか、千木良(1988)¹²⁾は泥岩中の黄鉄鉱の酸化による成分の溶脱について論じている。さらに、須藤ら(2010)¹³⁾は海成堆積層である竜の口層の泥岩を対象に、風化により重金属等の溶出挙動や形態に変化が生ずることを示している。

3. 道路建設における環境リスクマネジメント事例

当社においても、上述した我が国の動向とほぼ同じ時期に重金属等による環境リスクに対するマネジメントに取り組んでいる。ここでは、道路建設における環境リスクマネジメント事例として、火成岩を対象とした事例について述べる。

3.1 地質状況

対象となる A トンネルは国道バイパスの建設ルート上に位置し、事前の地質調査の結果、ルートの一部に鉱化変質帯が確認された。この鉱化変質帯には重金属等が含まれる可能性があることから、トンネルルート上に分布する地質に対する重金属等リスク評価を行い、トンネル建設に伴う環境リスクの低減を図るものとした。

図 1 に、A トンネルの地質縦断面図を示す。A トンネルは計画路線の大半の部分に新第三紀中新世の安山岩溶岩および同質火山礫凝灰岩が分布している。一方、起点側では粗粒玄武岩がシート状に貫入が見られ、その下位には玄武岩質凝灰岩および泥岩、砂岩が分布している。A トンネルの終点側近傍には高角度の断層が分布するが、この断層沿いには鉱山跡地が点在しており、トンネル計画路線上においても断層付近に強い鉱化作用を受けた部分が認められる。

3.2 トンネル計画路線上に分布する岩石の重金属等溶出状況

トンネル計画路線上で地表地質踏査およびボーリング調査を行い、それぞれの調査で得られた岩石試料、ボ

ーリングコア試料を用いて重金属等の溶出状況を調べた。採取した試料は粉碎した上で 2mm のふるいを全通させ、環境省告示第 18 号溶出量試験、同第 19 号含有量試験、ならびに全硫黄含有量試験（地球科学的試料の化学分析法 1、26.3（地質調査所（1976）に基づく）¹⁴）を行った。また、第 18 号溶出量試験の検液については、pH、電気伝導率、硫酸イオン濃度についても測定した。それらの結果を表 1 に示す。

表 1 に示した分析結果から、トンネル計画路線上に分布する岩石の性状について以下のとおり考察した。

(1) 重金属等によるリスク

溶出量試験結果を見ると、試験対象の試料のうち土壤汚染対策法に定める溶出量基準を超過した試料は、No.8 の鉱化変質を受けた安山岩溶岩のみである。しかし、同様に鉱化変質を受けた安山岩溶岩において、No.6 のトンネル断面位置に出現するボーリングコア試料では基準の超過が認められない。このため、トンネル断面位置に出現する岩石については、基準を超えた重金属等が溶出する可能性は極めて低いものと判断した。

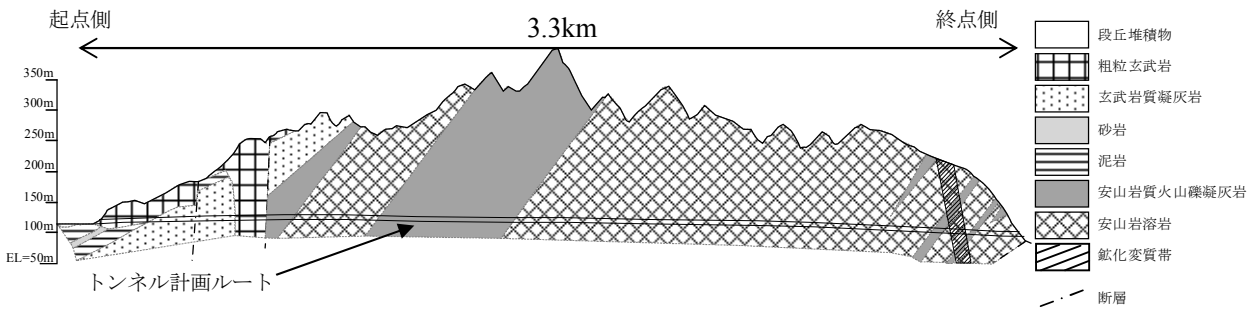


図 1 A トンネルの地質縦断面図

表 1 トンネル計画路線上に分布する岩石の分析結果（上；溶出量，下；含有量）

試料 No.	分析項目	Cd (mg/L)	Pb (mg/L)	As (mg/L)	Cr ⁶⁺ (mg/L)	Hg (mg/L)	Se (mg/L)	F (mg/L)	B (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	pH (-)	EC (mS/m)
No.1	粗粒玄武岩*	ND	ND	0.003	ND	ND	ND	ND	ND	12	9.4	12.4
No.2	玄武岩質凝灰岩*	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	10	9.4	11.4
No.3	泥岩**	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.7	5.9	2.6
No.4	安山岩質火山礫凝灰岩**	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.1	ND	0.2	7.3	6.7
No.5	安山岩溶岩*	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.3	7.4	6.4
No.6	安山岩溶岩（鉱化変質）*	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	27	6.2	11.0
No.7	安山岩溶岩（鉱化変質）**	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.1	ND	6.9	5.4	4.9
No.8	安山岩溶岩（鉱化変質）**	ND	0.11	ND	ND	ND	ND	0.1	ND	20	4.3	7.4
土壤溶出量基準		0.01	0.01	0.01	0.05	0.0005	0.01	0.8	1	—	—	—

試料 No.	分析項目	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	As (mg/kg)	Cr ⁶⁺ (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Se (mg/kg)	F (mg/kg)	B (mg/kg)	T-S (%)
No.1	粗粒玄武岩*	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
No.2	玄武岩質凝灰岩*	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
No.3	泥岩**	ND	5	ND	ND	ND	ND	50	ND	ND
No.4	安山岩質火山礫凝灰岩**	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
No.5	安山岩溶岩*	ND	ND	ND	ND	ND	ND	50	ND	0.05
No.6	安山岩溶岩（鉱化変質）*	ND	93	1	ND	ND	ND	90	ND	2.43
No.7	安山岩溶岩（鉱化変質）**	ND	14	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.05
No.8	安山岩溶岩（鉱化変質）**	ND	100	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.43
土壤含有量基準		150	150	150	250	15	150	4,000	4,000	—

*：ボーリングコア **：露頭試料

一方、含有量試験結果では全試料とも基準値を満たしており、含有量基準を超える、すなわち直接摂取された場合にリスクが生ずる岩石は分布しないものと判断した。

(2) 酸化溶出によるリスク

硫黄含有量を見ると、No.6およびNo.8がそれぞれ2%を超える値を示している。地殻中の平均存在量が260mg/kg (=0.026%)と言われている¹⁴⁾ことから、これらの試料は比較的高い含有量を示していると言える。このため、これらの岩石はトンネル工事に伴い掘削されて空気中の酸素と水に接触して酸化が進行した際に(すなわち風化した際に)、図2に示すようなメカニズムにより硫酸酸性水を発生させる可能性があるかと判断した。なお、No.8については溶出量試験の溶出水のpHが4.3とやや低い値を示していることから、露頭において既に酸化が進行しつつある試料であると解釈される。

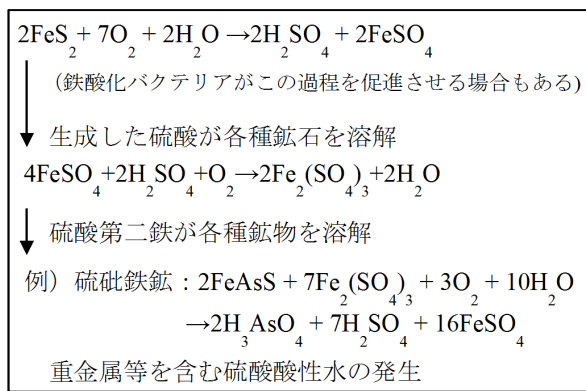


図2 硫化鉱物の酸化による重金属等溶出促進のメカニズム¹⁵⁾

このように、酸化の進行により酸性水を発生させる可能性のある岩石の存在が判明したことから、強制的に酸化を進行させ、その際の溶出液のpHや重金属等の溶出状況を把握するために、同じ試料を用いて酸性化可能性試験を実施した。

試験は、前述の試験と同様に粉碎して2mmのふるいを全通させた後に分取したものについて実施した。試験方法は地盤工学会のpH試験方法²⁸⁾に準じ、10mmol/L水酸化ナトリウム溶液を加えてpH6に調整した30%過酸化水素水を用い、試料2gに対し20mLの過酸化水素水を添加して反応が収まるまで室温で放置した。反応終了後、固液比1:10となるよう蒸留水を添加し、pHを測定した。また、酸化反応後の重金属等溶出量を測定する場合は、より多くの検液を必要とするため、試料量を50gとし、同様の比率で過酸化水素水や蒸留水を添加して分析に供した。この酸性化可能性試験の結果を表2に示す。

表2に示したとおり、強制的に酸化を進行させた場合、No.3の泥岩およびNo.6、No.8の鉱化変質を受けた安山岩溶岩において重金属等が土壤溶出量基準を超える値

表2 トンネル計画路線上に分布する岩石の酸性化可能性試験結果

試料 No.	Cd (mg/L)	Pb (mg/L)	As (mg/L)	Cr ⁶⁺ (mg/L)	Hg (mg/L)	Se (mg/L)
No.1 粗粒玄武岩*	ND	ND	0.005	ND	ND	ND
No.2 玄武岩質凝灰岩*	ND	ND	ND	ND	ND	ND
No.3 泥岩**	ND	ND	ND	ND	0.0026	0.011
No.4 安山岩質火山礫凝灰岩**	ND	ND	ND	ND	ND	ND
No.5 安山岩溶岩*	ND	ND	0.002	ND	ND	0.003
No.6 安山岩溶岩(鉱化変質)*	0.15	1.9	0.006	ND	ND	0.032
No.7 安山岩溶岩(鉱化変質)**	ND	ND	ND	ND	ND	0.002
No.8 安山岩溶岩(鉱化変質)**	0.008	0.21	ND	ND	ND	0.010
土壤溶出量基準	0.01	0.01	0.01	0.05	0.0005	0.01

試料 No.	F (mg/L)	B (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	pH (-)	EC (mS/m)
No.1 粗粒玄武岩*	0.1	ND	1.2	8.5	14.6
No.2 玄武岩質凝灰岩*	ND	ND	1.9	8.7	22.4
No.3 泥岩**	ND	ND	4.5	6.4	5.1
No.4 安山岩質火山礫凝灰岩**	ND	ND	0.8	8.4	10.0
No.5 安山岩溶岩*	ND	ND	13	7.4	12.0
No.6 安山岩溶岩(鉱化変質)*	0.06	ND	1200	2.5	279
No.7 安山岩溶岩(鉱化変質)**	ND	ND	62	5.3	10.3
No.8 安山岩溶岩(鉱化変質)**	ND	ND	1100	2.8	152
土壤溶出量基準	0.8	1	-	-	-

*: ボーリングコア **: 露頭試料

を示した。この結果から、泥岩および安山岩溶岩の鉱化変質部においては、酸化が進行した場合に酸性水や重金属等を溶出するおそれがあるものと判断した。

このうち、No.3の泥岩は、酸化後のpHは6.4と弱酸性であり硫酸イオン濃度や電気伝導率はさほど高い値を示していない。このため、泥岩における水銀とセレンの基準超過は硫黄分(硫化鉱物)に起因するものではないと考えられるが、「安全側に考える(根拠が不明なものにはリスクの高いものとみなす)」という建設事業の基本的考え方を踏襲して、安山岩溶岩の鉱化変質部と同様に酸化溶出のおそれありとみなした。なお、この泥岩はトンネル断面に出現する可能性が極めて低いと予測されたことから、安全側に考えた場合でも事業コストに与える影響はそれほど大きくはないものと想定された。

3.3 岩石の重金属等リスクの判定手法の検討

前項で述べたとおり、トンネル計画路線上に分布する岩石のうち泥岩と安山岩溶岩の鉱化変質部については、地盤内部に存在する状態では重金属等の溶出は見られないが、掘削後に酸化が進行すると酸性水発生や重金属等の溶出を引き起こす性状を示すことが明らかとなった。これらの岩石に対して、トンネル工事では次のように対応するものとした。

- 泥岩: トンネル断面に出現する可能性が極めて低く、出現した場合でも量は少ないと想定されること、また、肉眼で識別が可能であることから、トンネル掘削中に切羽の地質観察を行い、泥岩が認められた場合は即時に重金属等の対策をすべきものとして取り扱う。
- 安山岩溶岩の鉱化変質部: トンネル断面において鉱化変質部が出現する可能性のある区間は延長約300m、掘削土量は約30,000m³に及ぶ。このため、肉眼によ

る変質の有無だけでなく、工事中に重金属等の溶出の程度を迅速に判定できる試験を行うことで、より厳密に対策の要否を判定し、事業コストの削減を図る。

このため、出現可能性の高い安山岩溶岩の鉱化変質部について、トンネル工事中に掘削された岩石の重金属等リスク有無を迅速に判別できるような試験方法（以下、「指標分析」とその際の判断指標を検討することとした。

指標分析方法の検討は、図3に示す流れで実施した。また、試料採取位置の例を巻末図1に示す。

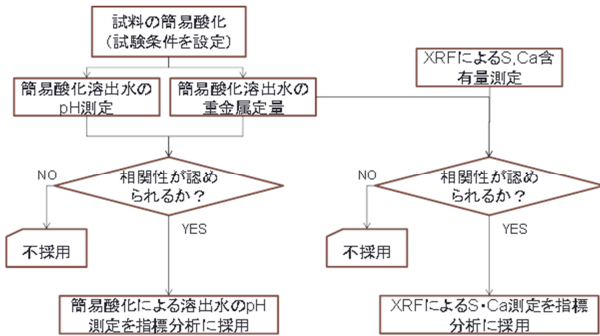


図3 指標分析方法検討の流れ

以下に、検討内容を(1)予備検討、(2)簡易酸化による指標分析方法の検討、(3)XRF（蛍光 X 線分析法）による指標分析方法の検討の順に述べる。

(1) 予備検討

予備検討は、簡易酸化試験の試験条件の設定のための検討である。過酸化水素水の濃度および反応時間の違いによる pH、電気伝導率の経時変化を確認し、指標分析で行う試験条件を設定した。

試料は、対象としたボーリングコアのうち鉱化変質を受けた部分より抽出したコアを粉砕し、2mm 目のふるいを全通させたものを各深度から等量取り分けて混合したものを用いた。

過酸化水素水の濃度は3%、5%、10%、15%、30%の5段階とした。地盤工学会の「過酸化水素水を用いた pH 試験」において示されている濃度は30%であるが、これは劇薬扱いとなり、取扱いには危険を伴う。このため、工事現場でより安全に試験を行うことを考慮して、30%を最大値とし、それより低い濃度（このうち3%はオキシドールとして市販されている過酸化水素水と同程度の濃度）の範囲で段階的に設定した。なお、比較対象として0%（ブランク）についても実施した。

反応時間は15分後、30分後、45分後、1時間後、2時間後、6時間後、24時間後の7段階とした。工事中はより迅速に判定することが求められるため、地盤工学会の試験方法で反応終了の目安としている24時間を最大値とし、それより短い範囲で段階的に設定した。

反応後の溶液の pH 測定は JIS K 0102 : 1998 12.1(ガラ

ス電極法)、電気伝導率測定は JIS K 0102 : 1998 13(電気伝導度計による測定)により実施した。

試料に過酸化水素水を添加すると激しく反応して発泡し、反応前には淡灰色を呈していた試料は淡褐色に変化した。予備試験の結果を図4に示す。

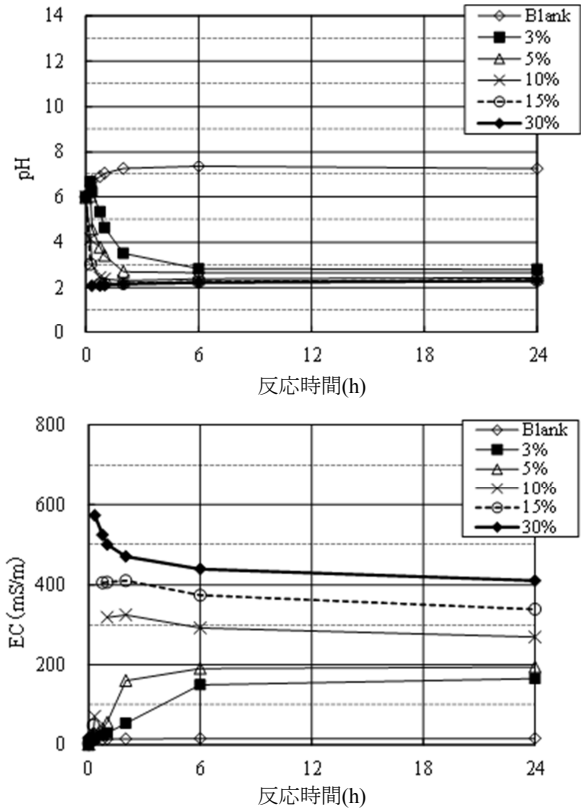


図4 予備試験結果図

これらの試験結果から、反応時間については、pH、電気伝導率とも経過時間 6 時間でほぼ値が安定していたため、6 時間と設定した。一方、過酸化水素水濃度については、pH では濃度ごとの顕著な差は見られないが、電気伝導率においては、15%以下の濃度の場合には30%の場合と比較して24 時間を経過しても低い値を示している。このことは、15%以下では成分の溶出量が不十分である、すなわち重金属等の溶出量を十分に評価できない可能性を示唆している。したがって、過酸化水素水濃度は30%と設定した。

(2) 簡易酸化による指標分析方法の検討

簡易酸化による指標分析方法の検討に際しては、(1)で設定した簡易酸化方法(30%過酸化水素水を添加して6 時間後の酸化状態を見る)で酸化させた場合の重金属等の溶出量を分析し、その値と重金属等が土壤溶出量基準を超過するときの溶液の pH の相関からしきい値を設定した。

試料は、予備試験と同じボーリングコア(安山岩溶岩)のうち、風化の影響を強く受けている地表面から深度20mを除いた、深度21.8~145.0m までの51 試料をそれ

ぞれ粉碎して2mm目のふるいを全通させたものを用いた。

試験は、上記の試料 x(g)に対し x×10(mL)の30%過酸化水素水を添加して6時間反応させ、反応終了後に固液比 1:10 となるよう蒸留水を添加した後に上澄みを採取して検液とし、その検液について pH および電気伝導率の測定、ならびに重金属の定量を行った。定量対象の重金属種は、既出表 2 に示した酸性化可能性試験で土壤溶出量基準を超過したカドミウム、セレン、鉛とした。

巻末表 1 に、これらの試験結果ならびに各試料における変質鉱物の確認状況を示す。同表によれば、重金属等が土壤溶出量基準を超過した試料はその多くが黄鉄鉱(硫化鉱物)を伴う試料であることがわかる。一方で、No.35 や No.51 など、肉眼では変質鉱物が確認できない試料でも基準超過を示している。このことは、肉眼による変質の有無の判別だけでは、掘削対象の岩石の重金属等溶出リスクを十分には把握できない可能性があることを示唆している。

次に、簡易酸化後の検液の pH と重金属溶出量の関係を図 5 のグラフに示す。

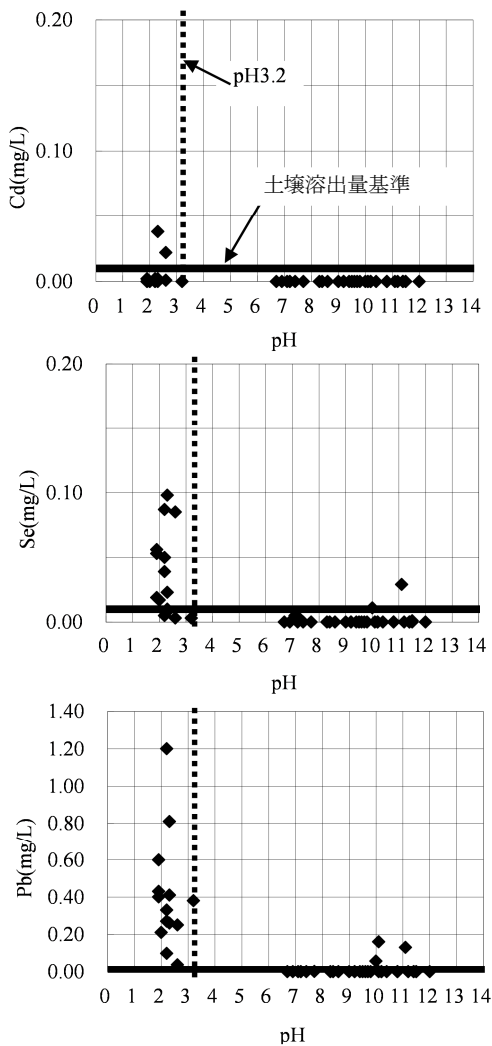
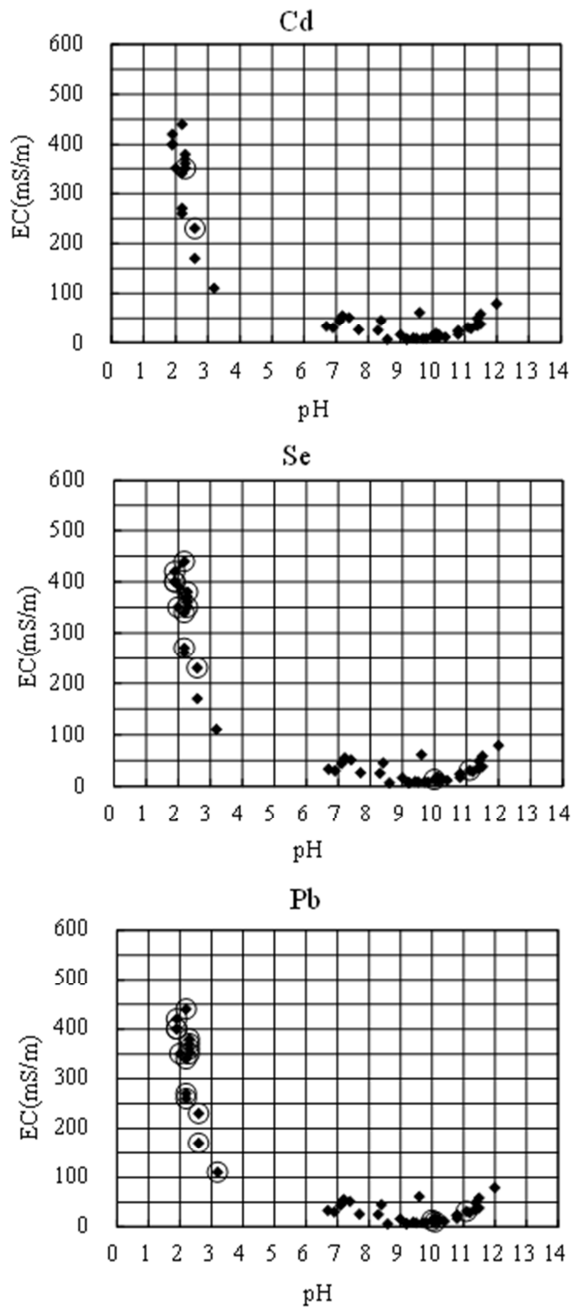


図 5 簡易酸化後の検液の pH と重金属溶出量の関係

同図において、一部の試料で検液がアルカリ性の範囲でセレンあるいは鉛の土壤溶出量基準超過が見られる。これらの試料は、図 6 に示した簡易酸化後の検液の pH と電気伝導率の関係のグラフではアルカリ性かつ電気伝導率の低い領域にプロットされる。試料の酸化に伴う硫酸酸性水の発生による溶出促進という現象では、硫酸の発生により電気伝導率が高い値を示すことから、これらのデータは、硫化鉱物に起因する酸化による溶出促進とは異なる要因と考えられる。このうち、鉛については両性金属であることから、強いアルカリ性を呈した場合にも溶出が見られたものと考えられる。



○：(上から)カドミウム、セレン、鉛が溶出量基準を超過した試料

図 6 簡易酸化後の検液の pH と電気伝導率の関係

これらの結果に基づき、「簡易酸化を行った際の pH が 3.2 以下となった場合、重金属等の溶出リスクありと判断する」という判断指標を設定した。

(3) XRF による指標分析方法の検討

次に、XRF による硫黄およびカルシウムの測定値と重金属等の溶出量の関係から分析方法と判断指標について検討を行った。

硫酸酸性水の発生およびそれに伴う重金属等の溶出促進の原因となる黄鉄鉱の酸化においては、炭酸塩鉱物が緩衝作用を示すことが知られている¹⁵⁾。黄鉄鉱の酸化硫黄およびカルシウムの量のモル比による岩石の重金属等リスクの判定指標は服部ら(2007)⁴⁾をはじめとしていくつかのトンネル工事で用いられている。服部らによれば、岩石の酸化による重金属等リスクの評価においては、硫酸酸性水の原因物質である硫化鉱物中の硫黄だけではなく、発生した酸性水の pH を緩衝する物質であるカルシウムの量についても考慮すべきとされている。

試験は、(2)で用いたものと同一の試料から分取して分析に供した。分析は、湿式分析と XRF 分析の 2 種類の方法を用いて実施した。湿式分析については、硫黄については地球科学的試料の化学分析法 1, 26.3 (地質調査所 (1976) に基づく)¹⁴⁾、カルシウムについては ICP 発光分光分析法 (昭和 63 年環水管第 127 号に基づく) により実施した。XRF については、エネルギー分散型の機器として、セイコーインスツルメンツ社製 SEA2120 型を用いた。

巻末表 2 に分析結果の一覧を示す。硫黄含有量は、定量下限値未満から 14.7% (XRF) の範囲の値を示し、既出巻末表 1 で黄鉄鉱が確認されたとの記載のある深度 115.8m 以深で比較的高い値を示している。一方、カルシウム含有量は定量下限値未満から 5.64% (XRF) の範囲にあり、こちらは深度との関連性は認められない。このため、S/Ca モル比は深度 115.8m 以深で値が大きくなる傾向を示している。

次に、図 7 に硫黄含有量 (湿式分析) と簡易酸化後の検液の重金属溶出量の関係、図 8 に硫黄・カルシウム比 (湿式分析) と簡易酸化後の検液の重金属溶出量の関係、図 9 に硫黄含有量、硫黄・カルシウム比 (湿式分析) と簡易酸化後の検液の重金属溶出量の関係をそれぞれ示した。これらの関係図の作成に際しては、含有量がより高い分解能で得られた湿式分析の結果を用いた。

図 7 では、硫黄含有量が 0.1% を超える試料において簡易酸化後の検液の重金属溶出量が土壌溶出量基準を超過している。ここで、硫黄含有量が 0.1% 未満で基準を超えた試料については、(2)において検液がアルカリ性を呈する試料であることから、酸化による溶出の評価からは除外する。

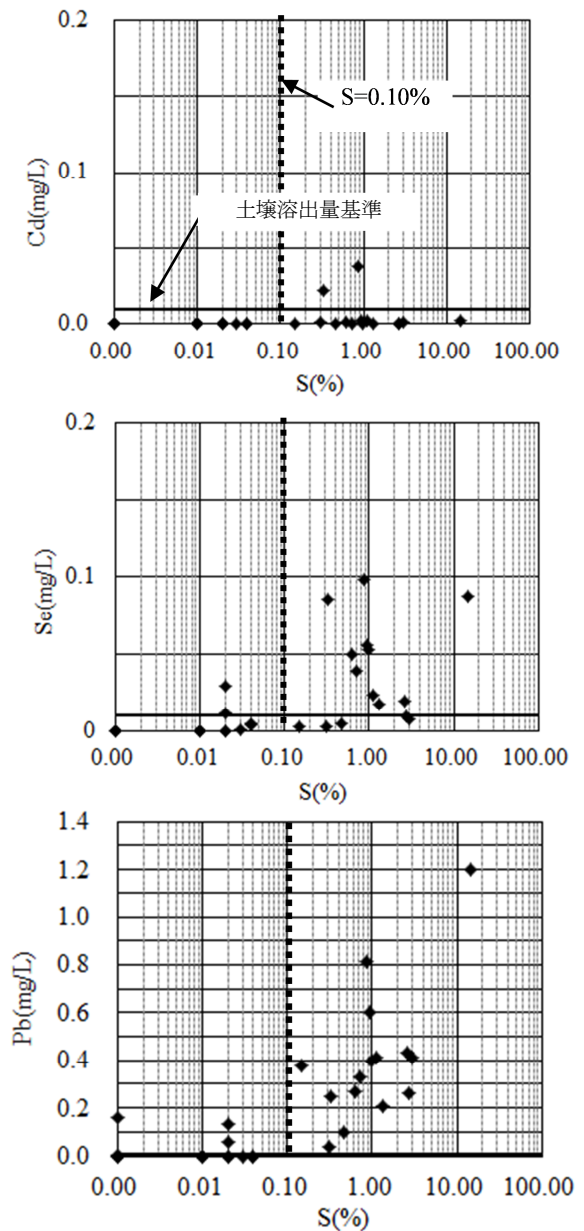


図 7 硫黄含有量 (湿式分析) と簡易酸化後の検液の重金属溶出量の関係

同様に、図 8 では、硫黄・カルシウムモル比が 0.6 を超える試料において簡易酸化後の検液の重金属溶出量が土壌溶出量基準を超過している。0.6 未満で基準を超えた試料については、硫黄含有量の場合と同様、検液がアルカリ性を呈する試料であることから、酸化による溶出の評価からは除外する。

これらを総合して示したのが図 9 である。この図において、簡易酸化後の検液の重金属溶出量が土壌溶出量基準を超過する試料の大半は、グラフ右上の硫黄含有量 0.1%、硫黄・カルシウムモル比 0.6 を超える領域にプロットされる。グラフ右下にプロットされる基準超過試料は、検液がアルカリ性を呈する試料であることから、酸化による溶出の評価からは除外する。

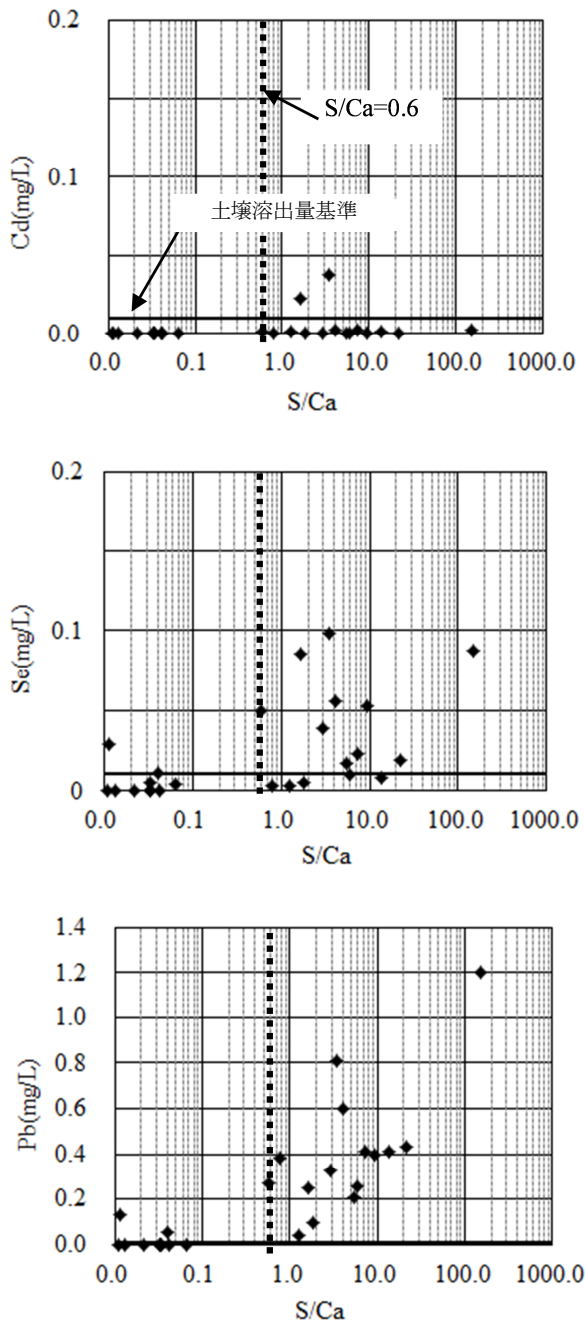


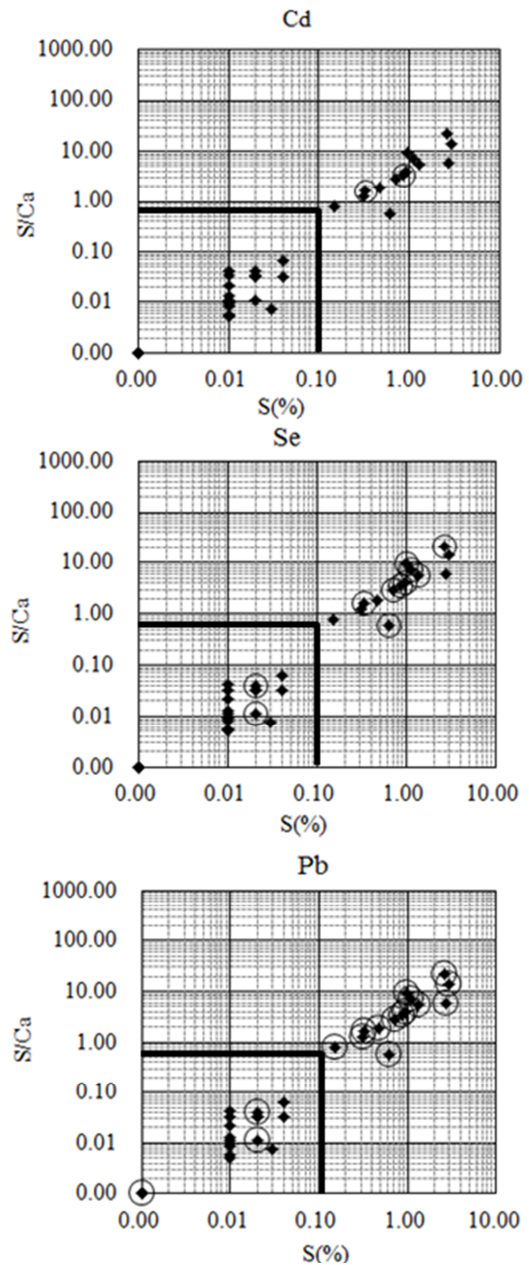
図8 硫黄・カルシウム比（湿式分析）と簡易酸化後の検液の重金属溶出量の関係

以上の結果から、Aトンネルにおいて、工事に掘削された岩石の重金属等リスク有無を迅速に判別するための指標分析方法を提案し、その際の判断指標については次のとおりと結論づけた。

・指標分析方法

工事に採取した岩石を粉砕して2mm目のふるいを全通させ、得られた試料に対して次の分析を行う。

- ①30%過酸化水素水を添加し、6時間反応後のpHを測定する。
- ②蛍光X線分析装置（エネルギー分散型）で硫黄およびカルシウム含有量を測定する。



○：(上から)カドミウム、セレン、鉛が溶出量基準を超過した試料

図9 硫黄含有量、硫黄・カルシウム比（湿式分析）と簡易酸化後の検液の重金属溶出量の関係

・判別指標

①の結果 $pH \leq 3.2$ 、または②の結果 $S/Ca \geq 0.6$ かつ S が検出された*場合に重金属等リスク**ありと判断するものとした。

*：分析結果では $S \geq 0.1\%$ とのしきい値が得られたが、工事現場に持ち込み可能な可搬型 XRF は分解能が低い（検出限界 0.5%程度）ことから、「検出された場合」とした。

**：ここでの「重金属等リスク」とは、酸化が進行した場合に重金属と酸性水を溶出するリスクのことを指す。

4. 建設事業における環境リスクマネジメントの意義

ここでは、建設事業における環境リスクマネジメントの意義について、それを行わなかったために損失を生じた事例、および前章で述べた環境リスクマネジメント手法を建設事業に適用されたことによる効果といった側面から論ずる。また、建設事業で取り扱われる岩石に対する環境リスク評価手法についての課題と今後の展望についても述べる。

4.1 環境リスクマネジメントを行わないことによる事業損失

重金属等を含有する岩石に対する環境リスクマネジメントがなされていないことが原因で事業損失を生じた事例の一つとして、道路建設における残土処理に起因した溜池の水質事故が挙げられる¹⁷⁾。当該事例は、2003年4月に岐阜県可児市に位置する新滝ヶ洞溜池において約100匹の魚類がへい死したことにより発覚したもので、その原因は溜池上流側に盛り立てられた道路建設の掘削残土約3,000m³から浸出したカドミウムを含む酸性水によるものとされている。当該事例ではベントナイト混合土での覆土による雨水浸透量低減ならびに浸出水の水処理で環境影響の軽減を図っているが、水処理施設だけでも設置に約6億円、維持管理費に年間約4,000万円を要しており、事業経費に少なからず影響を与えている。また、問題解決の協議機関である対策協議会は問題発生から11年を経過した現在も継続しており、事業主体が費やした労力も相当量に達している。

なお、当該事例は、掘削対象となる中生代の美濃帯の粘板岩中に含まれる黄鉄鉱の存在とその影響を環境リスクとして適切に評価できていれば、一般的な費用(1m³あたり直接工事費約4,000円)¹⁸⁾として数千万円の処理対策規模で対応できていたものと推察される。このことから、重金属等を含有する岩石を取り扱う建設事業においては、環境リスクマネジメントが重要であると評価される。

4.2 環境リスクマネジメントの効果

前章では岩石構成成分の環境動態に着目した環境リスクマネジメントとして、火成岩分布域での事例につい

て述べた。

当該事例においては、トンネル計画路線上に出現する可能性のある岩石について環境省告示第18号溶出量試験を行い、土壤汚染対策法の指定基準を超える重金属等が掘削発生土から溶出する可能性は極めて低いことを明らかにした。また、30%過酸化水素水を用いた強制酸化試験により酸化進行後の環境リスクの評価を行い、掘削後酸化が進行した岩石については、終点側の鉍化変質帯にのみ酸性水や基準値を超える重金属等が溶出する可能性があることを示した。これらの試験およびその評価結果により、最も環境リスクに配慮して施工すべき区間は終点側の鉍化変質帯が分布する260mの区間に限られることを明らかにした(図10)。

本トンネルでは、当初、掘削発生土全体の42%に相当する129,220m³について対策が必要と想定されていたが、前章で示した評価結果により対策が必要な区間は全体の9%に相当する28,500m³となった。このことにより、約4億円の対策コストが縮減できたほか、高リスク区間(分析による溶出リスクの確認を行いながら施工すべき区間)が終点側坑口から約260mと比較的短い距離に限定されたことで、施工管理体制においても大幅に労力が軽減できる結果となった。

また、本トンネルにおける岩石の環境リスクは酸化が進行することで発現されるものであることから、酸化に伴う環境リスクを約1日程度で評価できる指標試験の手法を提案したことにより、岩石のリスク評価に時間を要する(通常約14日)溶出量試験に依らない環境リスク評価が可能となり、試験結果が明らかとなるまでの掘削発生土の仮置き期間を短縮することでコスト縮減および施工性の向上に大きく寄与した。

4.3 建設工事で取り扱われる岩石に対する環境リスク評価手法に係る課題と今後の展望

建設工事において、重金属等を含有する岩石が引き起こす環境影響に対しては、何ら対応を行わなかった時代を経て、その後の知見や経験の蓄積によりリスクマネジメントが行われる事例が増加しつつある。しかし、その環境リスクについては未だ知見が十分とはいえない状況である。それらの課題や知見について、以下に述べる。

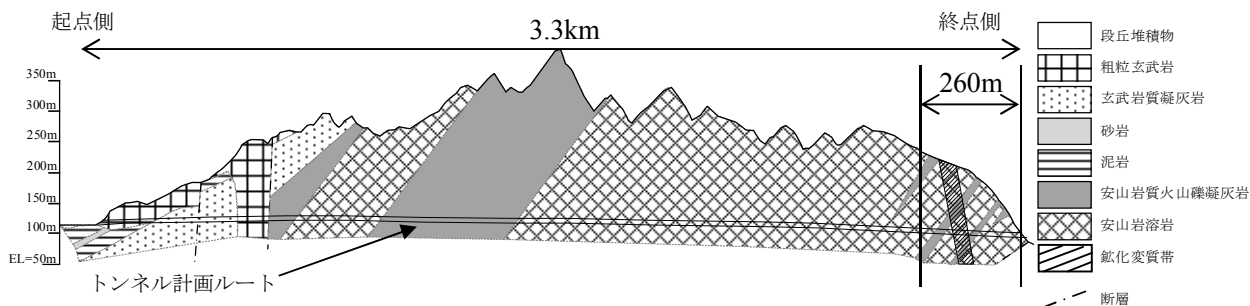


図10 A トンネルにおける環境リスクを有する範囲(図中の260m区間)

(1) 粒径の違いが溶出性に及ぼす影響

建設工事において、重金属等リスクを有する岩石の環境リスク評価を行う手法としては環境省告示第 18 号(46号)溶出量試験の適用が一般化している。これは、地盤材料の重金属等溶出性を評価する国内の基準的試験方法がこれ以外に存在しないためである。

しかしながら、道路や鉄道等の建設工事において岩石を掘削した場合、その粒径は数 cm～数十 cm オーダーとなる場合が多い。小川ら(2013)¹⁹⁾によれば、粉末状～2mm までの粒径範囲では細粒化に伴う過剰溶出は生じていないことが示されているが、2mm を超える粒径での重金属等の溶出性については十分な知見が得られていないのが現状である。

国土交通省が公表した「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)」²⁰⁾においては「岩石を粉砕した試料を用いて試験を行うと、一般に、実際の粒径より大きな溶出量を示すことから、土壌溶出量基準そのもので評価することは適切でない場合がある。」とされており、実大盛土試験、土研式雨水曝露試験、寒地土研式雨水曝露試験といった実粒径での試験によるリスク評価方法が提唱されている。

(2) 盛土処理による溶出性の低減現象

重金属等リスクを有する岩石に対し盛土を行うことで溶出性が低減する事例がある。現在供用されている仙台市地下鉄南北線(1981年着工、1992年全線開通)の掘削発生土盛土に対する文屋ら(2008)²¹⁾の研究によれば、軟岩に相当する鮮新統の泥岩を盛土処理した箇所におけるボーリングコアについて、処理後約 20 年を経過した後も酸化の進行が見られず、カドミウムの溶出量試験においても施工時に既に風化していた部分を除いてはほとんど溶出が見られず、形態も溶出しにくい残渣あるいは鉄酸化物態の割合が高いことが示されている。

また、同じ仙台市の地下鉄東西線における盛土処理地(盛土された岩石は新第三系鮮新統竜の口層の泥岩)の浸出水の測定結果では、図 11 に示すとおり、2008 年 7 月の盛土処理開始以降、約 2 年間は砒素濃度が定量下限値未満である。なお、図中には示していないが、カドミウムは定量下限値未満、鉛・セレン・ふっ素については地下水環境基準値以内の値となっている。事前のボーリングコアの溶出量試験では、粉砕し 2mm 目を通過した試料に蒸留水を添加し、6 時間振とうすることにより土壌溶出量基準(=地下水環境基準)を超過する砒素の溶出が見られた。この点を踏まえると、竜の口層の泥岩については、こぶし大の岩石を多く含むような大粒径の状態で行い、十分に締め固めて酸化進行や雨水浸透を低減させることにより、2 年間もの間重金属等の溶出を抑制することができたと言える。

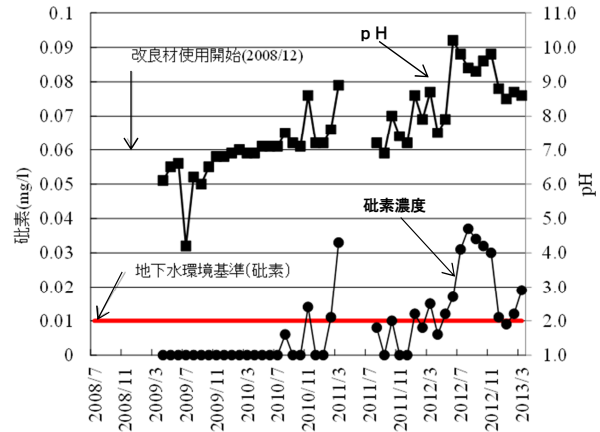


図 11 仙台市地下鉄東西線 要対策土盛土内地下水の砒素濃度および pH の推移

太田ら(2010)²²⁾は、八甲田トンネルの管理型土捨場(重金属等を含有する岩石を盛土処理した場所)内部の水・岩石反応モデルを熱力学計算により検証しているが、実際の土捨場からの浸出水の重金属や砒素の濃度は計算結果と比較して非常に低く(0.001mmol/L 未満)、元素の吸着現象(粘土鉱物へのイオン交換反応による吸着、硫化鉄鉱物の分解により生成される水酸化鉄への錯体による吸着)がその理由であると考察している。このことから、図 11 に見られた盛土内地下水中の濃度低減についても、同様の現象が生じている可能性が考えられる。

このような現象は、掘削された岩石が土壌と比較して粒径が大きいことによる比表面積の減少、あるいは盛土内での吸着効果により重金属等の溶出性を低減させることができる可能性を示すものであり、理論的な裏付けを得ることによりさらなる合理的な環境リスクマネジメントの実現に寄与するものと考えられる。

(3) 元素の溶出特性における知見の集積

前出の図 11 において、盛土開始後 2 年以降(2010 年 7 月以降)は砒素濃度が上昇しているが、その後 pH が上昇し、それに伴い砒素濃度が上昇していることがわかる。この pH の上昇はトラフィカビリティの低下に伴う施工性の確保(含水率調整)のため石灰やセメントを添加したことによる影響と考えられ、このような pH 上昇に伴い、砒素の溶出における pH 依存性に起因して盛土内地下水の砒素濃度が上昇したのと考えられる。軟質な泥岩においては、掘削後の降雨浸透により泥濁化しトラフィカビリティが低下する場合があるが、図 11 のデータを得た事例では 60 万 m³ にわたる大規模な盛土であったことからトラフィカビリティの低下が施工性に大きく影響し、セメント等の地盤改良材によりその改善を図る必要が生じた。近年は砒素の溶出に影響を及ぼしにくい中性固化剤と呼ばれる地盤改良材も実用化されているが、価格が高いため導入が困難であることが多い。

このため、軟質な泥岩を大規模な盛土により処理対策を行うに際しては、砒素の溶出性に影響を及ぼさず、かつ安価な地盤改良材の開発が課題であると言える。

5. おわりに

当社においては、重金属等を含有する岩石の環境リスクマネジメント手法を実際の建設事業に適用してきた。このうち、特に環境動態に着目したリスクマネジメントにおいては、本来であれば形態分析等を行って重金属等の溶出挙動を詳細に把握した上で評価手法の迅速化等の検討を行うことが理想ではあるが、それらの点については仮説とした上で試験や処理対策を行い、迅速試験の有効性や重金属等の拡散防止を現象面で確認することで成立している。

今後は、岩石の粒径、硬さ（細粒化のしやすさ）、重金属等の成因と含有形態を踏まえた溶出のメカニズム、ならびに処理対策手法として多く用いられる盛土処理を行った場合の盛土内部での成分の挙動を明らかにすることで、理論的な裏付けにより社会基盤整備における安全・安心を確たるものにすべく、さらなる研究と実践を進めていきたい。

謝辞：本報文の執筆にあたり、データの匿名あるいは実名での使用を許諾頂いた国土交通省ならびに仙台市交通局関係者の皆様に感謝申し上げます。

参 考 文 献

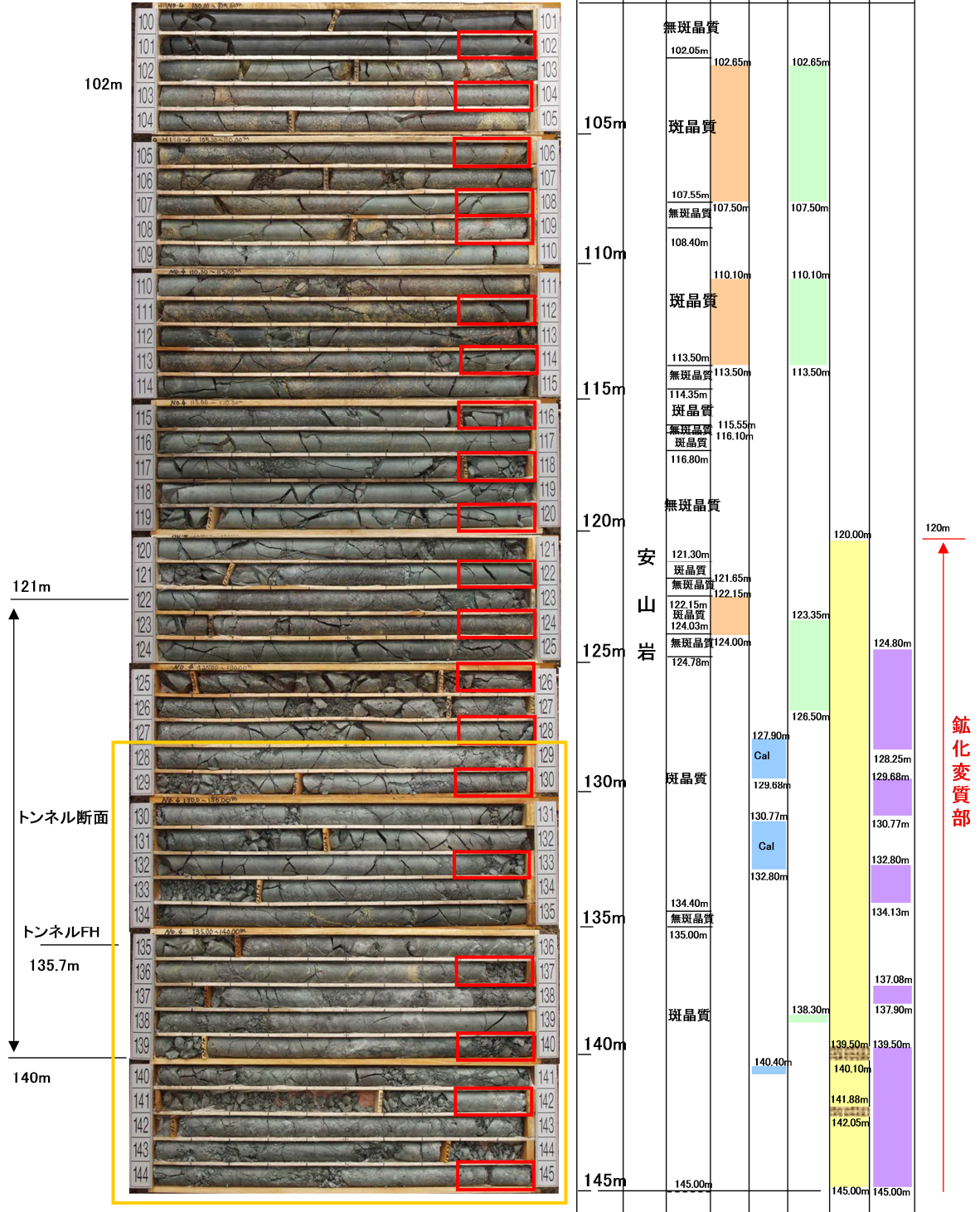
- 1) EIC ネット 環境用語集
<http://www.eic.or.jp/ecoterm/?act=view&serial=551>,
(参照 2017-1-27)
- 2) 西田不二夫. 環境アセスメントの歴史と今後の課題, プレック研究所スタディレポート. 1997, No.1, p. 26-43.
- 3) 北川 隆, 野々村政一. 陸上世界最長トンネルの調査坑試験報告 東北新幹線八甲田トンネル. 2008, トンネルと地下, Vol.28, No.10, p.811-822.
- 4) 服部修一, 太田岳洋, 菊池良弘. 八甲田トンネルにおける掘削残土の酸性水溶出に関する判定手法の評価. 2007, 応用地質, Vol.47, No.6, p.323-336.
- 5) Hemda G, Huw J, Agnieszca D, and Eugenia V. Arsenic pollution sources, Reviews of Environmental Contamination and Toxicology .2008, Vol.197, p.17-60.
- 6) 細川迭男, 菅井皇人, 山崎 充. 自然的原因により重金属等を溶出するトンネル掘削土判定と処理—日本海沿岸東北自動車道 大館～小坂 雪沢第二トンネル—.2007, 応用地質, Vol.47, No.6, p.346-353.
- 7) 農林省農地局計画部資源課編.湖沼の干拓地の不良土壌の改良に関する研究. 1951, 農林省農地局, 58p.
- 8) 村上英行. 可酸化性イオウの形態 酸性硫酸塩土壌の特性と改良法 (第2報) . 1967, 日本土壤肥科学雑誌, Vol.38, No.4, p.117-120.
- 9) 佐々木信夫. 新第三系強酸性硫酸塩土壌に関する研究. 1977, 岩手県立農業試験場研究報告, Vol.20, p.23-54.
- 10) 奥村興平, 島 茂樹, 福田修三, 森川真理子. 酸性硫酸塩土壌の簡易判定方法. 1990, 土質工学会シンポジウム発表論文集, p.255-260.
- 11) 市原優子. 海成粘土にみられる粘土鉱物の風化. 1960, 地質学雑誌, Vol.66, No.783, p.812-819.
- 12) 千木良雅弘.泥岩の化学的風化—新潟県更新統灰爪層の例. 1988, 地質学雑誌, Vol. 94, No.6, p.419-431.
- 13) 須藤孝一, 米田 豪, 小川安正, 山田良一, 井上和弘, 土屋進芳. 竜の口層の堆積岩における重金属類の溶出挙動および形態変化に及ぼす風化の影響.2010, 応用地質, Vol.51, No.4, p.181-190.
- 14) 地質調査所. 地球科学的試料の化学分析法 1 . 1976, 268 p.
- 15) 笹木圭子. 黄鉄鉱の常温酸化溶解に関する実験地球化学研究.1998,鉱物学雑誌, Vol.27, No.2, p.93-103.
- 16) Nicholson , R.V., Gillham , R.W. and Reardon , E. J. Pyrite oxidation in carbonate-buffered solution: 1. Experimental kinetics . 1988, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.52, p.1077-1085.
- 17) 新滝ヶ洞溜池の水質異常に関する情報
<http://www.cbr.mlit.go.jp/tajimi/suishitsu/>
(参照 2017-1-11)
- 18) 国土交通省 NETIS 新技術情報提供システム
<http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/MainSearch.asp?TabType=2> (参照 2017-1-11)
- 19) 小川泰正, 山田亮一, 山崎慎一, 井上千弘, 土屋範芳. 堆積岩類からの重金属類の水溶出試験結果に対する粒径の影響. 2013,資源地質, Vol.63, No.3, p.125-131.
- 20) 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・土壌への対応マニュアル (暫定版) . 2010.
- 21) 文屋ゆかり, 米田 剛, 須藤孝一, 土屋範芳, 井上千弘. 堆積環境の異なる竜の口層試料からの重金属溶出挙動.2008, 廃棄物学会東北支部 第1回研究発表会講演要旨集, p.5-6.
- 22) 太田岳洋, 服部修一, 菊池良弘. 土捨場内部における浸出水水質形成モデルの熱力学的検証. 2010, 日本応用地質学会平成22年度研究発表会講演論文集, p.321-322.

試験試料位置凡例

<室内分析・試験>

予備検討に用いた試料 (128~145m混合)

本検討に用いた試料 (各深度 計50試料)



巻末図1 試験試料採取位置の例 (深度 100~145m)

巻末表1 簡易酸化による重金属等溶出状況

試料		変質鉱物*					溶出試験結果**					
No.	採取深度	Hem	Epd	Chl	Py	Qz	Cal	pH	EC (mS/m)	Cd (mg/L)	Se (mg/L)	Pb (mg/L)
1	21.8~22.0m							9.0	16	ND	ND	ND
2	24.8~25.0m	○	○					9.7	8	ND	ND	ND
3	27.8~28.0m		○					10.1	10	ND	ND	0.16
4	30.8~31.0m		○					10.2	15	ND	ND	ND
5	33.8~34.0m							9.2	6	ND	ND	ND
6	36.8~37.0m							9.4	9	ND	ND	ND
7	39.8~40.0m							8.6	6	ND	ND	ND
8	42.8~43.0m							10.1	19	ND	ND	ND
9	45.8~46.0m							9.2	7	ND	ND	ND
10	48.8~49.0m		○					10.2	15	ND	ND	ND
11	51.8~52.0m			○				9.5	8	ND	ND	ND
12	53.8~54.0m	○	○	○				10.8	24	ND	ND	ND
13	55.8~56.0m	○	○	○				9.8	8	ND	ND	ND
14	57.8~58.0m		○	○		○		11.2	28	ND	ND	ND
15	59.8~60.0m	○	○	○				10.4	11	ND	ND	ND
16	61.8~62.0m	○	○	○				11.4	34	ND	ND	ND
17	63.8~64.0m			○				10.8	17	ND	ND	ND
18	65.8~66.0m		○	○				11.4	37	ND	ND	ND
19	67.8~68.0m		○					7.7	26	ND	ND	0.001
20	69.8~70.0m							12.0	79	ND	ND	ND
21	71.8~72.0m		○					10.2	11	ND	ND	ND
22	73.8~74.0m		○					8.4	45	ND	ND	ND
23	75.8~76.0m							8.3	25	ND	ND	ND
24	77.8~78.0m		○					7.4	51	ND	ND	ND
25	79.8~80.0m		○			○		6.7	33	ND	ND	ND
26	81.8~82.0m		○					7.2	52	ND	ND	ND
27	83.8~84.0m		○	○		○		6.9	30	ND	ND	ND
28	89.7~89.9m							11.4	49	ND	ND	ND
29	95.0~95.2m		○					10.8	23	ND	ND	ND
30	97.8~98.0m	○						9.6	61	ND	ND	ND
31	101.8~102.0m						○	11.5	58	ND	0.001	ND
32	103.8~104.0m	○	○					11.5	38	ND	ND	ND
33	105.8~106.0m	○	○					2.6	230	0.022	0.085	0.25
34	107.8~108.0m		○				○	7.2	55	ND	0.004	ND
35	108.8~109.0m							2.2	340	ND	0.039	0.33
36	111.8~112.0m	○	○					11.1	31	ND	0.029	0.13
37	113.8~114.0m		○				○	10.0	13	ND	0.011	0.057
38	115.8~116.0m				○		○	2.0	350	ND	0.017	0.21
39	117.8~118.0m				○			2.3	370	0.001	0.008	0.41
40	119.8~120.0m				○		○	2.6	170	0.001	0.003	0.037
41	121.8~122.0m				○		○	3.2	110	ND	0.003	0.38
42	123.8~124.0m	○	○		○		○	2.2	270	0.001	0.050	0.27
43	125.8~126.0m	○	○		○			7.1	44	ND	0.005	ND
44	127.8~128.0m				○		○	1.9	400	0.002	0.056	0.60
45	129.8~130.0m				○			2.3	380	0.002	0.023	0.41
46	132.8~133.0m				○	○	○	2.2	260	ND	0.005	0.098
47	136.8~137.0m				○			2.3	360	ND	0.010	0.26
48	139.8~140.0m				○			1.9	420	ND	0.019	0.43
49	141.8~142.0m				○			2.2	440	0.002	0.087	1.2
50	144.8~145.0m				○			1.9	400	ND	0.053	0.40
51	128.0~145.0m							2.3	350	0.038	0.098	0.81
土壤溶出量基準								—	—	0.01	0.01	0.01

*Hem : Hematite , Epd : Epidote, Chl : Chlorite, Py : Pyrite, Qz: Quartz, Cal: Calcite

**ND: 定量下限値未満

巻末表2 硫黄，カルシウム含有量分析結果

No.	試料 採取深度	湿式分析			蛍光X線分析 (XRF)		
		S(wt%)	Ca(wt%)	S/Ca (モル比)	S(wt%)	Ca(wt%)	S/Ca (モル比)
1	21.8~22.0m	ND	2.78	0	ND	2.82	0
2	24.8~25.0m	0.01	1.49	0.01	ND	1.82	0
3	27.8~28.0m	ND	1.19	0	ND	1.47	0
4	30.8~31.0m	ND	1.46	0	ND	1.64	0
5	33.8~34.0m	ND	0.40	0	ND	0.62	0
6	36.8~37.0m	0.01	0.30	0	ND	0.56	0
7	39.8~40.0m	0.01	0.37	0	ND	0.58	0
8	42.8~43.0m	ND	0.18	0	ND	0.40	0
9	45.8~46.0m	ND	0.14	0	ND	0.20	0
10	48.8~49.0m	ND	1.01	0	ND	1.20	0
11	51.8~52.0m	ND	0.18	0	ND	0.33	0
12	53.8~54.0m	ND	0.58	0	ND	0.71	0
13	55.8~56.0m	ND	0.32	0	ND	0.38	0
14	57.8~58.0m	ND	5.59	0	ND	7.76	0
15	59.8~60.0m	ND	0.25	0	ND	0.26	0
16	61.8~62.0m	ND	0.37	0	ND	0.53	0
17	63.8~64.0m	ND	0.24	0	ND	0.23	0
18	65.8~66.0m	ND	4.94	0	ND	6.47	0
19	67.8~68.0m	ND	0.33	0	ND	0.44	0
20	69.8~70.0m	0.01	2.41	0	ND	3.70	0
21	71.8~72.0m	ND	0.26	0	ND	0.38	0
22	73.8~74.0m	0.02	0.74	0	ND	1.00	0
23	75.8~76.0m	ND	0.13	0	ND	0.17	0
24	77.8~78.0m	0.02	0.76	0	ND	1.05	0
25	79.8~80.0m	0.01	0.57	0	ND	0.80	0
26	81.8~82.0m	0.01	1.30	0	ND	1.65	0
27	83.8~84.0m	0.01	1.13	0	ND	1.42	0
28	89.7~89.9m	ND	3.36	0	ND	4.68	0
29	95.0~95.2m	0.01	0.94	0	ND	1.31	0
30	97.8~98.0m	0.01	2.21	0	ND	3.23	0
31	101.8~102.0m	0.03	5.04	0	ND	5.64	0
32	103.8~104.0m	ND	0.26	0	ND	0.25	0
33	105.8~106.0m	0.33	0.25	1.6	ND	0.29	0
34	107.8~108.0m	0.04	0.77	0.1	ND	1.03	0
35	108.8~109.0m	0.72	0.31	2.9	0.24	0.44	0.7
36	111.8~112.0m	0.02	2.20	0.01	ND	3.09	0
37	113.8~114.0m	0.02	0.61	0.04	ND	0.81	0
38	115.8~116.0m	1.32	0.30	5.5	0.39	0.43	1.1
39	117.8~118.0m	2.99	0.27	13.8	4.89	0.42	14.6
40	119.8~120.0m	0.31	0.31	1.2	ND	0.50	0
41	121.8~122.0m	0.15	0.24	0.8	ND	0.19	0
42	123.8~124.0m	0.62	1.33	0.6	ND	1.58	0
43	125.8~126.0m	0.04	1.51	0	ND	1.85	0
44	127.8~128.0m	0.94	0.29	4.1	0.94	0.20	5.9
45	129.8~130.0m	1.12	0.19	7.4	1.55	0.18	10.8
46	132.8~133.0m	0.47	0.32	1.8	ND	0.41	0
47	136.8~137.0m	2.72	0.57	6.0	4.33	0.78	6.9
48	139.8~140.0m	2.62	0.15	21.8	5.20	0.20	32.5
49	141.8~142.0m	14.50	0.12	151.0	14.70	ND	183.0
50	144.8~145.0m	0.98	0.13	9.4	0.16	0.22	0.9
51	128.0~145.0m	0.87	0.31	3.5	0.41	0.33	1.6
定量下限値		0.01	0.01	—	0.10	0.10	—

ND: 定量下限値未満