

## 事例E

### ① 概要

施工年度	： 平成26～29年度
対策土量	： 約27万 m <sup>3</sup>
対策対象の地質	： 新第三紀中新世の砂岩・泥岩・凝灰岩および集塊岩
対策場所	： 本線の盛土材料として利用
対策方法	： 覆土（早期覆土）
設計手法	： 実現現象再現試験（試験盛土など）

### ② 経緯と対応の流れ

本事例では、トンネル掘削および切土による発生土が酸性化することが懸念された。そこで、発生土の酸性化の実態を調査したうえで現地施工を考慮した対策を検討し、その妥当性を現地曝露試験や試験盛土などにより検証した。その一連の成果は文献<sup>1)</sup>にとりまとめられており、ここでは酸性化する発生土の現実的な対策とその検証について、その概要を下記に示す。なお、本路線では酸性化に伴う重金属等の溶出量基準超過は確認されていない。

- 1) 福島広之，佐藤優，山本隆広：酸性化する掘削ずりの対策について—現実的な対策とその検証—，第62回（平成30年度）北海道開発技術研究発表会発表論文集，環6，2020。  
国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所ホームページ，  
[https://thesis.ceri.go.jp/db/documents/public\\_detail/64266/](https://thesis.ceri.go.jp/db/documents/public_detail/64266/)

### ③ 対策要否の判定方法

トンネルの施工段階では、先進ボーリング調査において砒素などの溶出量を確認するとともに、酸性化可能性を評価するために調整pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)試験を行い、トンネル10 m区間ごとにずりの大気曝露後のpHを予測した。これらの試験を組み込んだトンネル発生土の対策要否の判定フローを図7.11に示す。ここでは溶出量基準のほか、酸性化の対策要否を判断するためにpH4.0を判定基準とし、これを下回るものを「酸性化掘削土」と評価して分別し、⑤で示す対策（早期覆土）を講じたうえで道路の盛土材料とした。

調整pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)試験とは、本路線で採用した実現現象における酸性化の有無を施工時に短時間で判定する試験方法である。この試験の実施にあたっては、酸性化の実現象を把握したうえで、過酸化水素水の濃度と試料の浸漬時間を調整することにより酸性化（ここではpH4.0以下とした）の有無を評価している。岩石試料が酸性化する可能性を評価する試験方法には、30%過酸化水素水を用いたpH試験（JGS 0271-2016）が一般的な方法として用いられている。この試験方法は岩石がもつ酸性化のポテンシャルは評価できるが、実際の工事で発生土を盛土した場合の現実的な酸性化状況を評価できず、酸性化の程度を過大に評価する場合もあるため、本路線では調整pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)試験で評価することにより、酸性化する発生土の土量縮減などに寄与した。

酸性化の実現象の把握にあたっては、切土法面や盛土法面で酸性化している深度を調査した。また、地山から掘削直後に得た未風化の新鮮試料を用いて、その試料が大気曝露後に酸性化した場合のpHを予め把握したうえで、そのpHに近似する過酸化水素水の濃度と試料の浸漬時間の条件を検討した。未風化の新鮮試料には、新規にボーリング（深度約120 m）を実施して採取したコアを用い、酸性化後のpHは実現現象に近い状態で酸化促進が可能な保温静置法pH試験（図7.12）にて把握した。この試験方法では、気温20℃で一定に保てる恒温器内に試料を入れ、乾燥が進むと適宜水を加えることにより、試料の酸化を促進させることができる。

保温静置法pH試験の結果、本路線の岩石試料では、多くのものが14～28日後までpHが低下傾向となり、その後56日後まではpHが低いまま安定することが確認された。そこで、このpHを酸性化後の最終的なpHと判断し、このpHに近似する調整pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)試験の条件を検討したところ、過酸化水素水の濃度は1%、浸漬時間は4時間とするのが最適な条件となった。この条件にて、トンネル施工中に先進ボーリング調査を実施することにより、酸性化する発生土の判定を実現現象に基づき合理的に行うことを可能とした。また、酸性化する速度についても把握できたことから、酸性化する発生土の発生から2週間を目安として早期に覆土することが酸性化抑制にあたり有効な対策となることを示した。

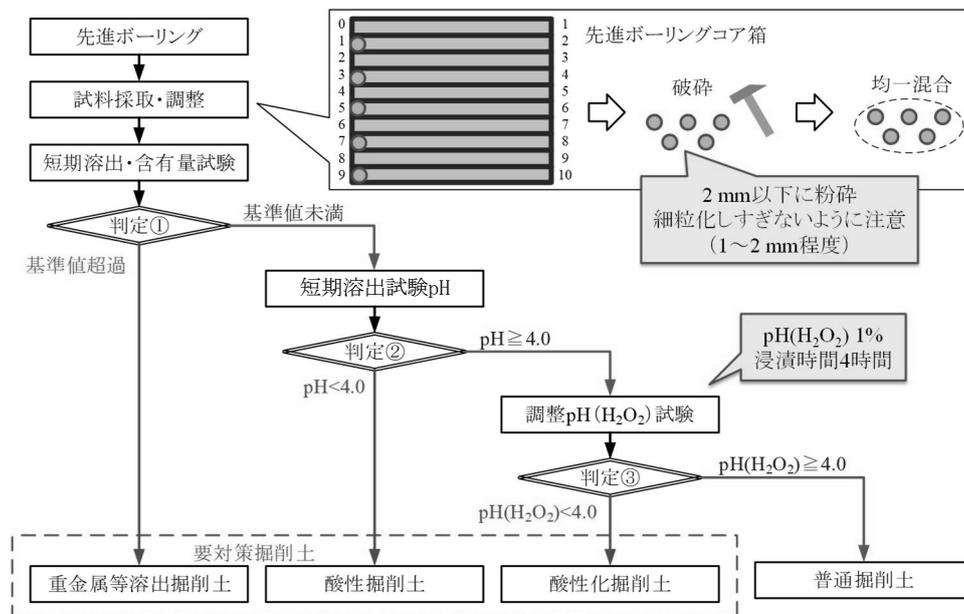


図7.11 対策要否の判定方法<sup>1)</sup>

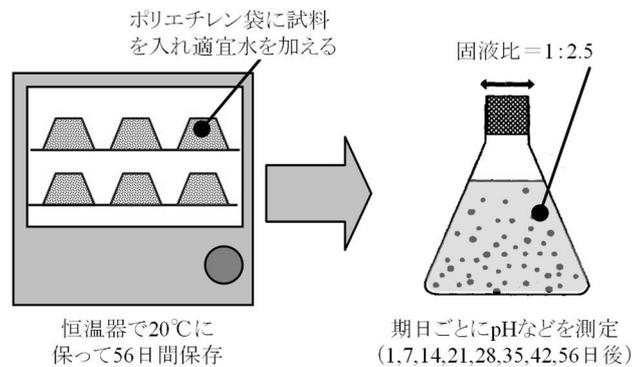


図7.12 保温静置法pH試験<sup>1)</sup>

#### ④ 対策工検討

本路線の土配計画は残土であるが、要対策掘削土は本線の盛土材料として用いた。盛土箇所周辺には雑木林が広がっている。また、酸性化に伴う重金属等溶出量増加のリスクはない。

酸性化状況の現地調査において、盛土法面で酸性化する深度は40 cmであったことから、盛土法面での酸性化への対策は当時に公開されていた「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），平成22年3月」に示される覆土（厚さ50 cm）とした。この覆土により、発生土の盛土法面からの酸性水流出を防止し、発生土の盛土の深部への酸性化を抑制することとした。

#### ⑤ 対策施工（試験盛土）

酸性化する発生土の盛土への対策が覆土で問題ないかを確認するため、実際の施工規模での盛土試験施工を実施した（図7.13）。試験は覆土ありとなしの2ケースで行った。覆土ありのケースでは、覆土なしと同じ大きさの盛土に厚さ50 cmの覆土を行った。盛土材料は、酸性化することが明らかな切土施工箇所より掘削して調達し、掘削直後はpH7.0～8.5、保温静置法ではpH2.6～3.3、調整pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)試験ではpH2.6～3.0であることを確認した。

試験盛土の開始直後から覆土なしの盛土法面のpHを定点にて測定し、酸性化状況を確認した。盛土直後はpH7.7であったが、急激に酸性化し1ヶ月後にはpH3.6となり、それ以降はほとんど変化せず酸性のままであった。この間、盛土法尻には酸性の溜まり水が確認されたが、覆土ありの盛土では酸性水の流出は認められなかった。

盛土内部の酸性化状況を確認するため、試験開始より2年後に盛土を半分掘削し、その掘削断面を詳細に調査した（図7.14）。上下鉛直方向に50 cm間隔で格子を設け、その格子ごとに代表的な箇所pHを現地にて測定した。その測定結果を図7.15に示す。図から分かるように、覆土なしのケースではほとんどの盛土法面



pHを測定した。このコアは、先進ボーリングにより大気曝露されてから2年2ヶ月から3年5ヶ月程度経過したものであり、酸性化する場合にはこの期間中にpHが十分に低下しているものと考えられる。そこで、これらのコアのpHを測定して施工段階における評価と比較した。

試料採取は、評価対象の区間長が約1 kmと長いことから、5 m間隔で合計205試料を採取し、pHを測定した。また、一部の区間においては、先進ボーリング調査での試料採取方法（コア2 m間隔で5箇所から採取し均等混合して1試料とする）と同じ条件で試料を採取した。

そのpH測定結果を図7.16に示す。図示されるように、施工段階に実施した調整pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)試験でpH4前後まで低下した箇所と、時間経過したコアがpH4前後まで低下している箇所はほぼ同じであることが確認できたため、酸性化可能性の評価は妥当であったと考えられる。また、時間経過したコアの一部は、ボーリング直後のpHから変化しないことも確認できた。

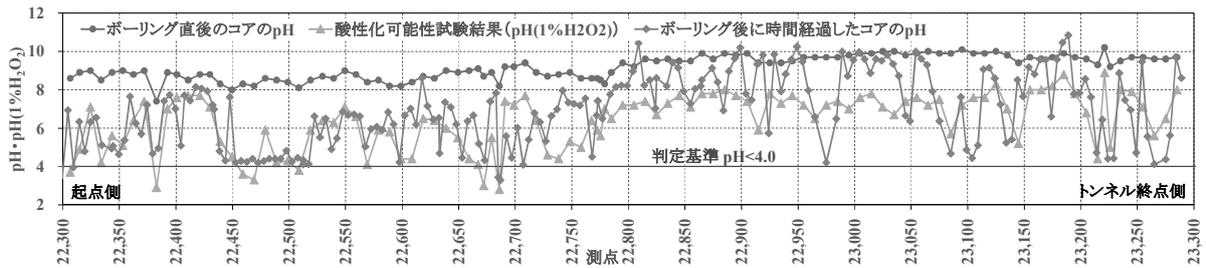


図7.16 トンネル先進ボーリング調査におけるpH測定結果<sup>1)</sup>

## 事例F

### ① 概要

施工年度	： 平成28年～令和元年度
対策土量	： 約19.1万 m <sup>3</sup>
対策対象の地質	： トンネル区間：新第三紀の元神部層の未風化岩 切土区間：新第三紀の元神部層および受圧層の弱風化岩
対策場所	： 本線外の町有地の沢埋の盛土材料として使用
対策方法	： 覆土工法と酸性浸出水に対し、現地発生土の緩衝効果と表流水との混合による緩衝効果
設計手法	： 現地発生土の緩衝効果をバッチ試験や室内カラム試験で評価。表流水との混合効果を地球化学的モデルにて評価

### ② 経緯と対応の流れ

事前の地質調査において、トンネル掘削の対象となる基盤岩（新第三紀の元神部層の未風化岩）と切土区間の弱風化岩（新第三紀の元神部層および受圧層の弱風化岩）にて酸性化することが判明したため、有識者との協議を踏まえ、酸性化の判定手法や対策工の検討を行った。

### ③ 対策要否の判定方法

#### ○トンネル区間

先進ボーリングによるコアから2 mピッチで試料採取し、10 m区間ごとに5箇所分を均等混合して1試料とし、図7.17および表7.4に示す手法により酸性化を判定した。

判定基準について、判定Aは「土懸濁液のpH試験」を用いた。この時の判定値は一般排水基準のpH5.8とした。pH5.8未満については、酸性掘削土（既に酸性化が進んでいる要対策土）と判定した。判定Bは「土懸濁液のpH試験」を用いた。当該地で出現する基盤岩は、土懸濁液のpH試験でpH7.8未満となると砒素の溶出量が環境基準値以下となり、さらにpHが低下し強酸性となっても砒素は溶出しないことを確認したため、判定Bの判定値はpH7.8とした。判定Cは、将来的な酸性化の状況の評価するものである。岩石試料が酸性化する可能性を評価する試験方法には、30%過酸化水素水を用いたpH試験（JGS 0271-2016）が一般的な方法として用いられている。この試験方法は岩石がもつ酸性化のポテンシャルは評価できるが、実際の工事で発生土を盛土した場合の現実的な酸性化状況の評価できず、酸性化の程度を過大に評価する場合もあるため、本路線では調整pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)試験（過酸化水素水濃度3%で浸漬時間2時間）で評価することにより、酸性化する発生土の土量縮減などに寄与した。また、判定Cの判定値は一般排水基準のpH5.8とした。pH5.8未満については、酸性化掘削土（将来的に酸性化する要対策土）と判定した。

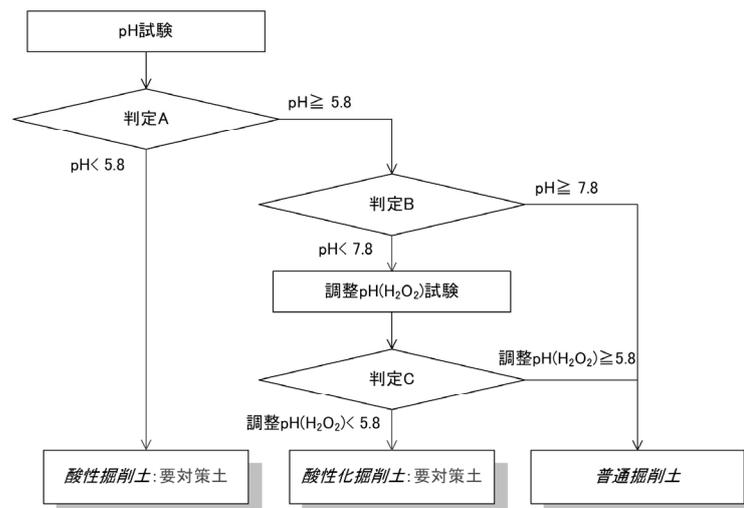


図7.17 対策要否の判定方法

表7.4 各種試験方法

試験	試験方法・規格
判定 A および B 土懸濁液の pH 試験	地盤工学会 土懸濁液の pH 試験方法に準じて実施
判定 C 調整 pH(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) 試験	地盤工学会 過酸化水素を用いる pH 試験方法に準じて実施 ※過酸化水素水濃度 3%と浸漬時間を 2 時間

○切土区間

酸性化の懸念のある発生土は、基盤岩強風化部と未風化部の境界部より数～十数 m程度下方に分布している可能性が高い。このため、切土区間では、暗灰色を呈する発生土は酸性化と判定した。

④ 対策工検討

土配計画の関係から要対策土は道路本線外の町有地の沢埋(約80万m<sup>3</sup>)の盛土材料として使用する計画である。沢埋箇所周辺には雑木林が広がっている。また、酸性化に伴う重金属等溶出量増加のリスクはない。

沢底の未固結堆積物は層厚1～2 mと薄く連続性も乏しいため、酸性水中和の効果が小さい。このため、対策工の検討は、酸性浸出水に対し①現地発生土の緩衝効果の定量的な評価、②表流水との混合による緩衝効果の定量的な評価を行った。

1) 酸性浸出水に対し現地発生土の緩衝効果の定量的な評価

現地発生土の緩衝効果について、バッチ試験(緩衝効果確認試験)、連続バッチ試験(連続緩衝効果確認試験)および室内カラム試験で確認を行い(図7.18)、現地発生土を酸性化掘削土の下方に層厚1:1で敷設することで河川環境基準値(項目類型C以上 pH6.5)を下回らないことを確認し、酸性水を緩衝する効果があることを示した。

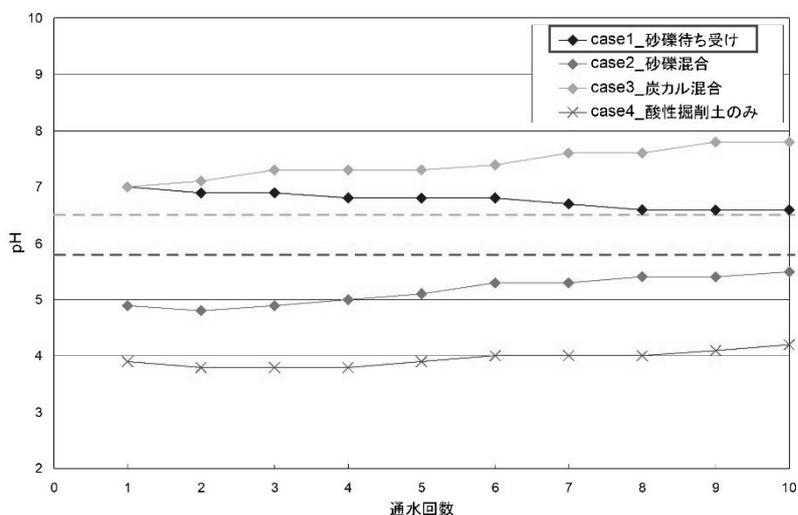


図7.18 室内カラム緩衝効果確認試験結果

2) 酸性浸出水に対し表流水との混合による緩衝効果の定量的な評価

酸性浸出水に対し、沢部の表流水との混合による緩衝効果について、室内混合試験により緩衝効果の概略検討を行った。その結果を踏まえ、化学組成に基づく地球化学的モデルによる熱力学計算によって水質予測を行った。予測解析は、USGS(米国地質調査所:U.S. Geological Survey)において公開されている地球化学的解析コードPHREEQC6)を用いた。

予測解析の結果、盛土箇所流末の浸出水はpH 5.8を満足する結果となった。また、切土より発生する段丘堆積物(砂礫)を酸性化掘削土の下部へ敷設する計画となっており、このことも考慮すると、万が一酸性化したとしても、周辺環境へ与える影響は極めて小さいものと判断した。

### 3) 対策工法

上記の検討を踏まえ、対策工法としては酸性化抑制対策として「覆土工法」を採用し、酸性水拡散防止として「現地発生土の緩衝効果」および「表流水の緩衝効果」を考慮した（図7.19）。

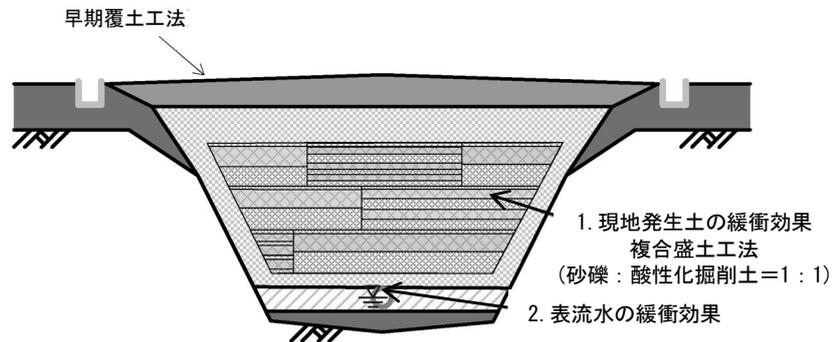


図7.19 対策工法の模式図

### ⑤ モニタリング状況

沢埋盛土箇所の施工前に配置した河川水モニタリング地点において、盛土の施工中は月1回の頻度で、覆土完了後の施工後モニタリングは年4回の頻度で2年間継続し、河川環境基準値（項目類型C以上 pH6.5）を下回ることは認められなかったため、モニタリングを終了している。なお、施工前・施工中・施工後のモニタリング結果は、モニタリング台帳を作成して一元管理し、施工前からのモニタリングの経緯とその結果を容易に確認できるようにした。

## 事例G

### ① 概要

施工年度	未施工
対策土量	31.4万 m <sup>3</sup> (評価対象としたトンネル発生土の全量)
対策対象の地質	新第三紀中新世の元神部層 (凝灰質泥岩砂岩互層)
対策場所	道路本線の盛土材料として使用
対策方法	鉛直ボーリングコアの過酸化水素水pH(H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )は3.5以下の区間が確認されたが、大気曝露されてから約3年程度経過後に再分析を行った結果、計画トンネル断面位置のすべてで4.0以上であり、酸性化する可能性は極めて低いと評価した
設計手法	—

### ② 経緯と対応の流れ

事前の地質調査において、トンネル掘削の対象となる基盤岩(新第三紀の元神部層)にて、過酸化水素水pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)は3.5以下の箇所が確認されたため、発生土の酸性化の評価方法等について検討を行った。

### ③ 対策要否の判定方法

トンネル区間の鉛直ボーリングコアの過酸化水素水pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)は3.5以下の区間が確認された。しかし、大気曝露されてから約3年程度経過後(2年7ヶ月~4年9ヶ月経過)にボーリングコアのpHを測定したところ、計画トンネル断面位置のすべてでpH4.0以上となり(図7.20)、実現象(地山から掘削されて大気曝露された環境下)において酸性化する可能性は低いと評価した。

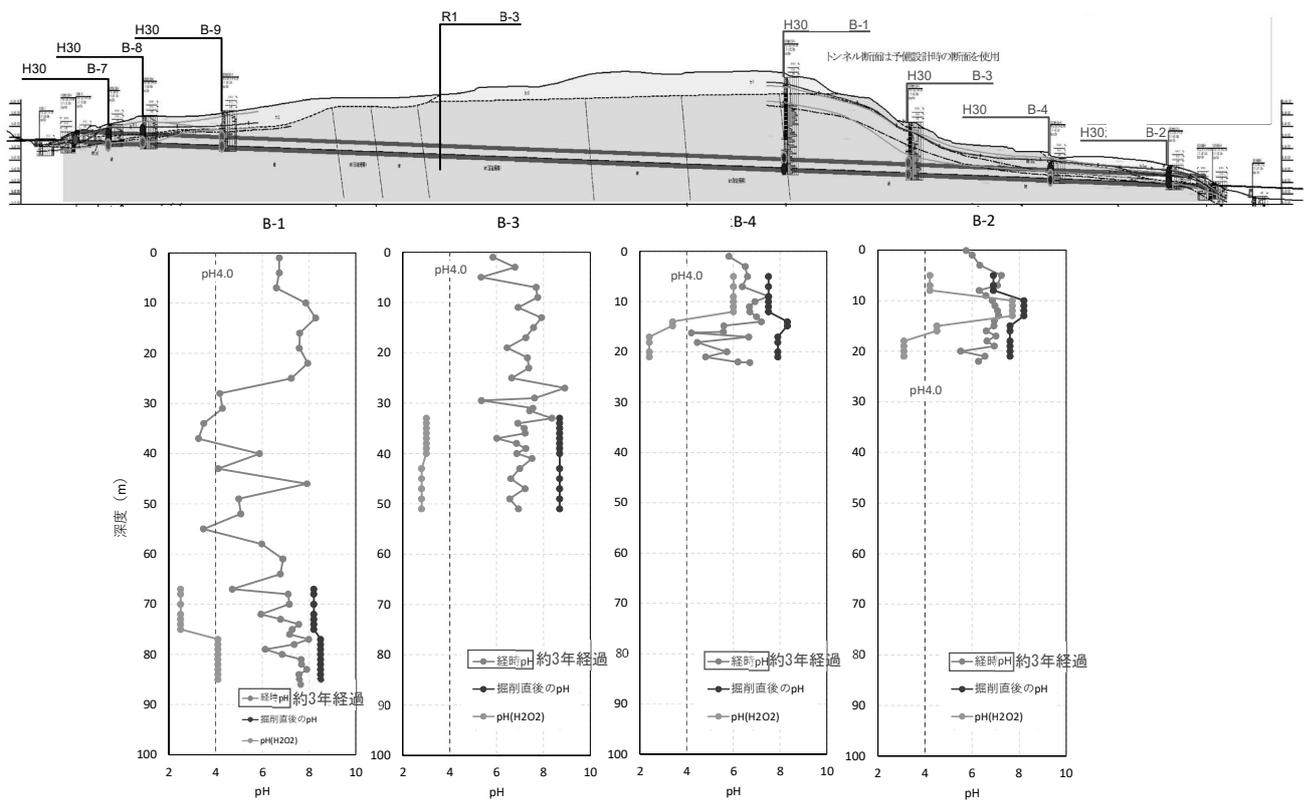


図7.20 鉛直ボーリングコアの各種pH試験結果

## 事例H

### ① 概要

施工年度：平成28～30年  
対策土量：50,900 m<sup>3</sup>  
対策対象の地質：新第三紀 泥岩  
対策場所：本線の盛土材料としてトンネル掘削土を使用  
対策方法：酸性化抑制を目的とした人工資材の敷設と覆土  
設計手法：経時コア分析及び酸化速度試験（保温静置法）により酸性化傾向と重金属等の溶出傾向変化を確認。酸化速度試験（保温静置法）・カラム試験により酸性化抑制資材による対策の適用性について検討

### ② 経緯と対応の流れ

事前の地質調査において、トンネル掘削の対象となる泥岩が酸性土（一部は重金属等も溶出）に該当することが判明したため、酸性硫酸塩土壌による影響の把握を行い、有識者による検討会も含めて対応方法について検討を実施した。

### ③ 対策要否の判定方法

事前の地質調査では、pH(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)が3.5以下を示すものを酸性土として評価した。その後の酸性土対策検討においては、経時コアを用いたpH(H<sub>2</sub>O)および溶出量試験、酸化速度試験（保温静置法）により酸性化による影響を評価した。

### ④ 対策工検討

本路線はトンネル掘削土を盛土材料として使用する計画であるが、盛土箇所は市街地に隣接しており酸性硫酸塩土壌の酸性化に伴う重金属等溶出リスクの増加が懸念されたことから、複数の酸化抑制資材について適用性・経済性・盛土構造について検討した。

#### 1) 酸化速度試験による酸性化や溶出特性の傾向把握と対策資材の適用性検討

酸化速度試験（保温静置法）により、原岩と酸性化抑制材混合時のpH低下傾向と重金属等の溶出傾向について把握し、酸性化のリスクと酸性化抑制資材の適用性について検討を実施した。酸性化抑制資材の検討は、現地発生土・炭酸カルシウム系材料（ホタテ貝殻を原料とする資材）・酸化マグネシウム系材料、ドロマイトを対象とした。試験の結果から、炭酸カルシウム系材料（ホタテ貝殻を原料とする資材）ではpHの低下を抑制することが可能であり、適用性が高いものと評価した。試験結果の例を図7.21に示す。

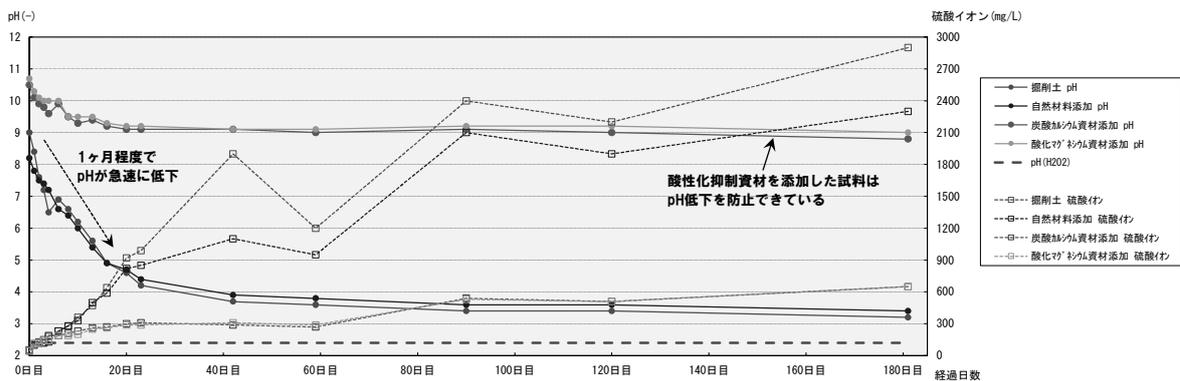


図7.21 酸化速度試験結果

#### 2) 対策資材の効果検証

酸性化抑制資材の効果検証として、適用性が高いと判断された資材（ホタテ貝殻を原料とする資材）と掘削土試料（コアから作成）を用いてカラム試験を実施し、pH傾向や溶出特性について確認を行った。試験の結果から、pHの低下傾向は確認されず重金属等の溶出量増加も確認されなかった（砒素については容量抑制効果が確認されている）。カラム試験による酸性化抑制資材使用時のpH傾向について図7.22に示す。

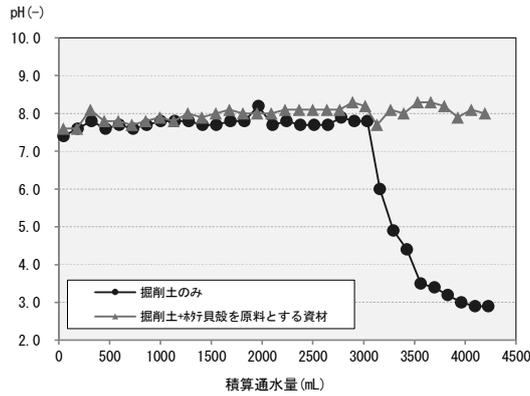


図7.22 カラム試験による酸性化抑制資材使用時のpH傾向確認（初期の傾向）

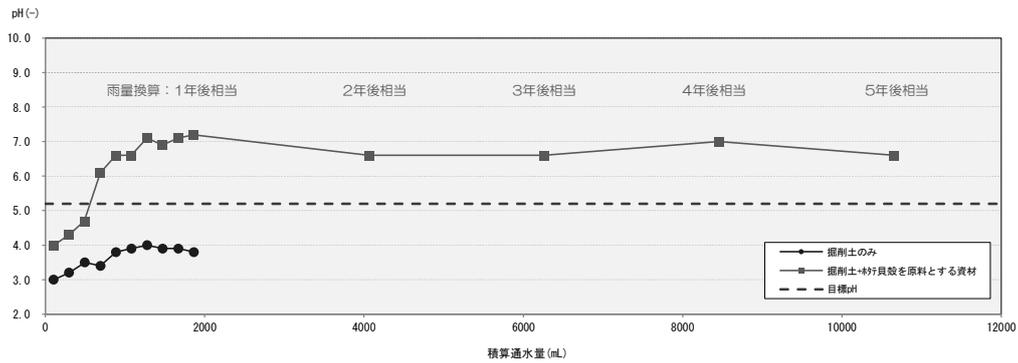


図7.23 カラム試験による酸性化抑制資材使用時のpH傾向確認（長期的傾向）

### 3) 酸性化抑制資材の配合量設定

自然状態で酸性化した掘削土試料（経時コアから作成）を用いて複数配合量に対しpH試験を実施し、中性領域までpHを上昇させる必要資材量を求めた。酸性化抑制資材の配合量とpHの関係を図7.24に示す。

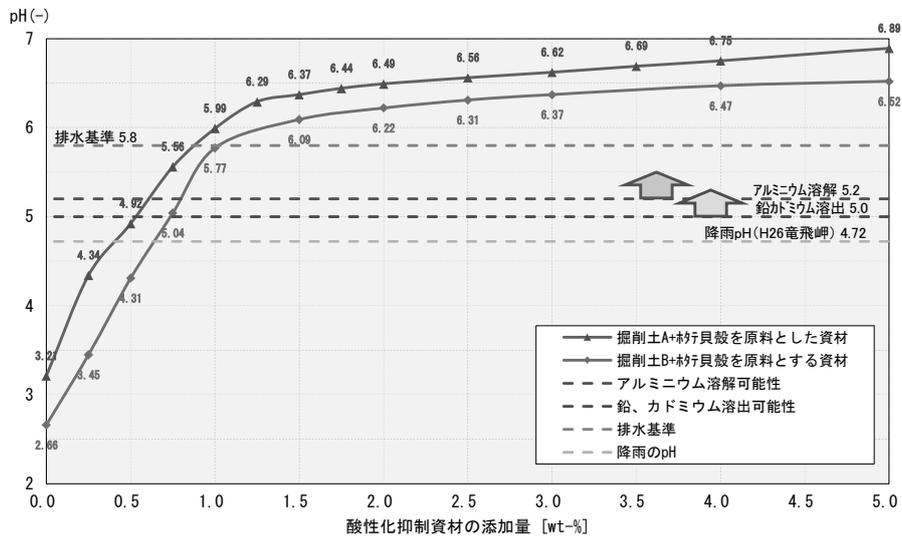


図7.24 カラム試験による酸性化抑制資材使用時のpH傾向確認

### ⑤ 対策施工

対策として選定された酸性化抑制資材の敷設方法は、室内カラム試験の結果から盛土30cm毎に1層の層状敷き均し（散布）する互層構造が適用可能と判断した。

### ⑥ モニタリング状況

盛土箇所に施工前に配置したモニタリング孔において、盛土の施工中は毎月、施工後は年4回の頻度で2年間の地下水水質のモニタリングを実施し、地下水環境基準の超過は認められなかったため、モニタリングを終了している。

### (3) 先進ボーリング調査による溶出量評価の事例

北海道開発局の事業において重金属等の対策を講じるトンネルでは、施工中に実施する先進ボーリング調査において、ボーリングコアを用いた溶出量試験などを実施している。その試験結果が多数あることから、堆積岩の溶出量試験結果を表7.5および図7.25～図7.27に示すとおりにとりまとめた。グラフはヒストグラム（度数分布図）であり、溶出量の対数をとって横軸で示し、任意で設定した範囲において出現する割合を縦軸で示している。グラフの上部に示している青色の線は、試験データから計算される平均値 $\mu$ と標準偏差 $\sigma$ から示される出現確率を示しており、 $\mu \pm 1\sigma$ で68%、 $\mu \pm 2\sigma$ で95%、 $\mu \pm 3\sigma$ で99.7%の出現確率となる溶出量の範囲を示している。この青線の下にある黒丸のプロットは、試験データの分布を示している。

収集した試験データより、堆積岩は構成する泥岩・砂岩・礫岩を含む割合より、試験データを泥岩・泥岩砂岩互層・砂岩泥岩互層・砂岩・礫岩と粒度で大別した。この他、有意なデータ数が得られた凝灰岩・凝灰角礫岩・安山岩・玄武岩に分類し、それぞれのヒストグラムを作成した。その結果、砒素・セレン・鉛の溶出量は対数正規分布することが示される。したがって、溶出量とその出現確率は平均値に近いものほど出現確率が高く、これより溶出量が大きくなるか小さくなると、その出現頻度は低くなると言える。堆積岩は、粒度が小さいほど（泥岩が多いほど）溶出量基準を超過する確率が高まり、約8～9割程度が溶出量基準を超過している。一方で、砂岩や礫岩と粒径が大きくなるほど基準超過の確率は小さくなることも示されている。凝灰岩・凝灰角礫岩・安全岩・玄武岩は、堆積岩よりも基準を超過する確率が低く、その割合は1～2割程度である。

これらのことから、堆積岩（とくに泥岩）の分布域では、自然由来の重金属等の溶出が懸念されることから、施工前に調査を十分に行って重金属等への対応の要否を検討することが肝要である。また、それぞれの事業で得られた調査結果と本事例で示す砒素などの濃度分布と比較することにより、濃度の高低を把握し、濃度分布を想定したうえで追加調査の必要性などを検討することが可能となる。

表7.5 収集した試験データの概要

項目	内容
トンネル本数	31本
データ数	全データ数3,627 (砒素3,601・セレン1,896・鉛1,013)
評価対象	先進ボーリング調査で得られたボーリングコア
試験方法	短期溶出試験 (10 mを1区間として5地点均等混合し1試料として試験)

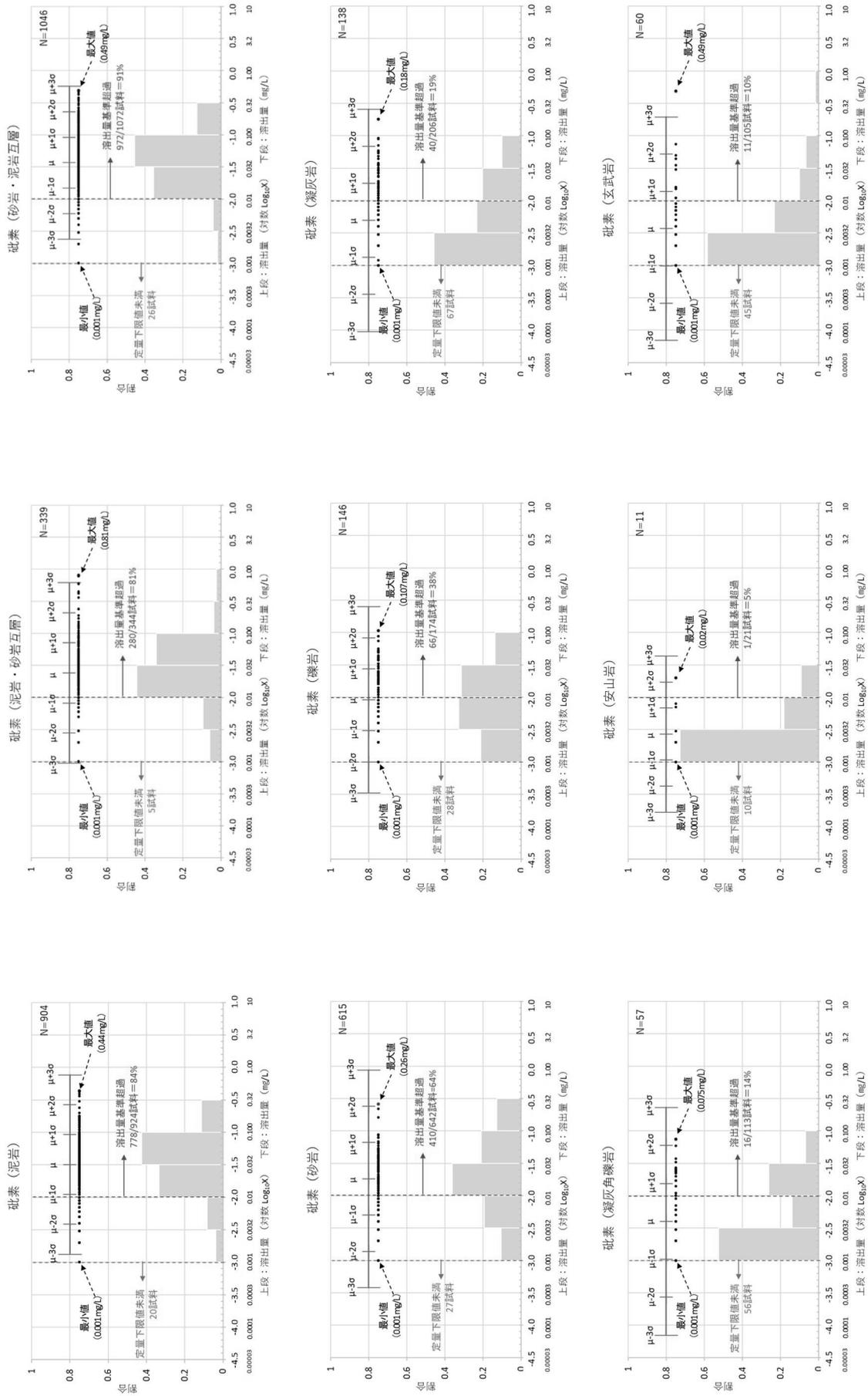
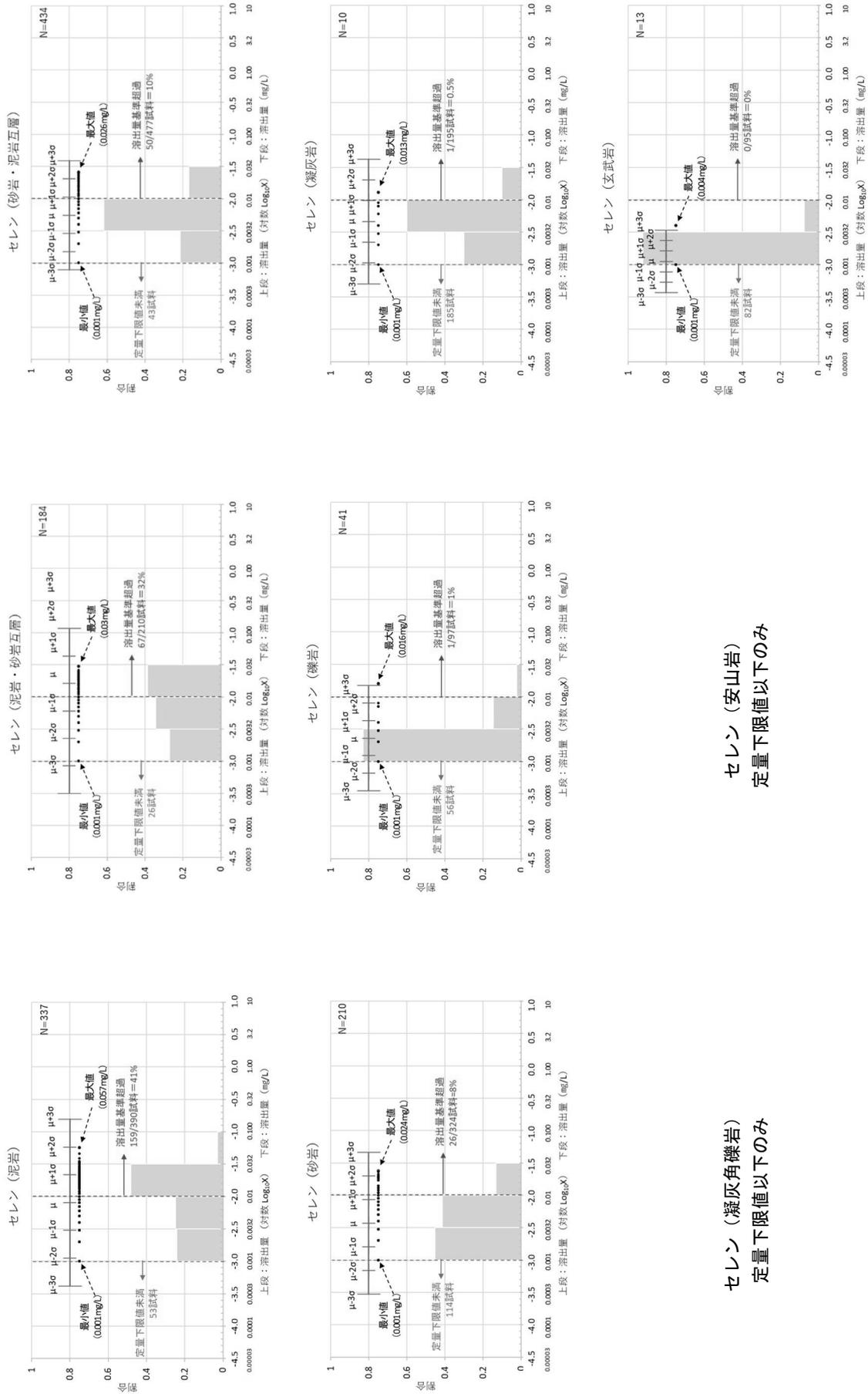


図7.25 先進ボーリング調査における溶出量の分布（砒素）



セレン (安山岩)  
定量下限値以下のみ

セレン (凝灰角礫岩)  
定量下限値以下のみ

図7.26 先進ボーリング調査における溶出量の分布 (セレン)

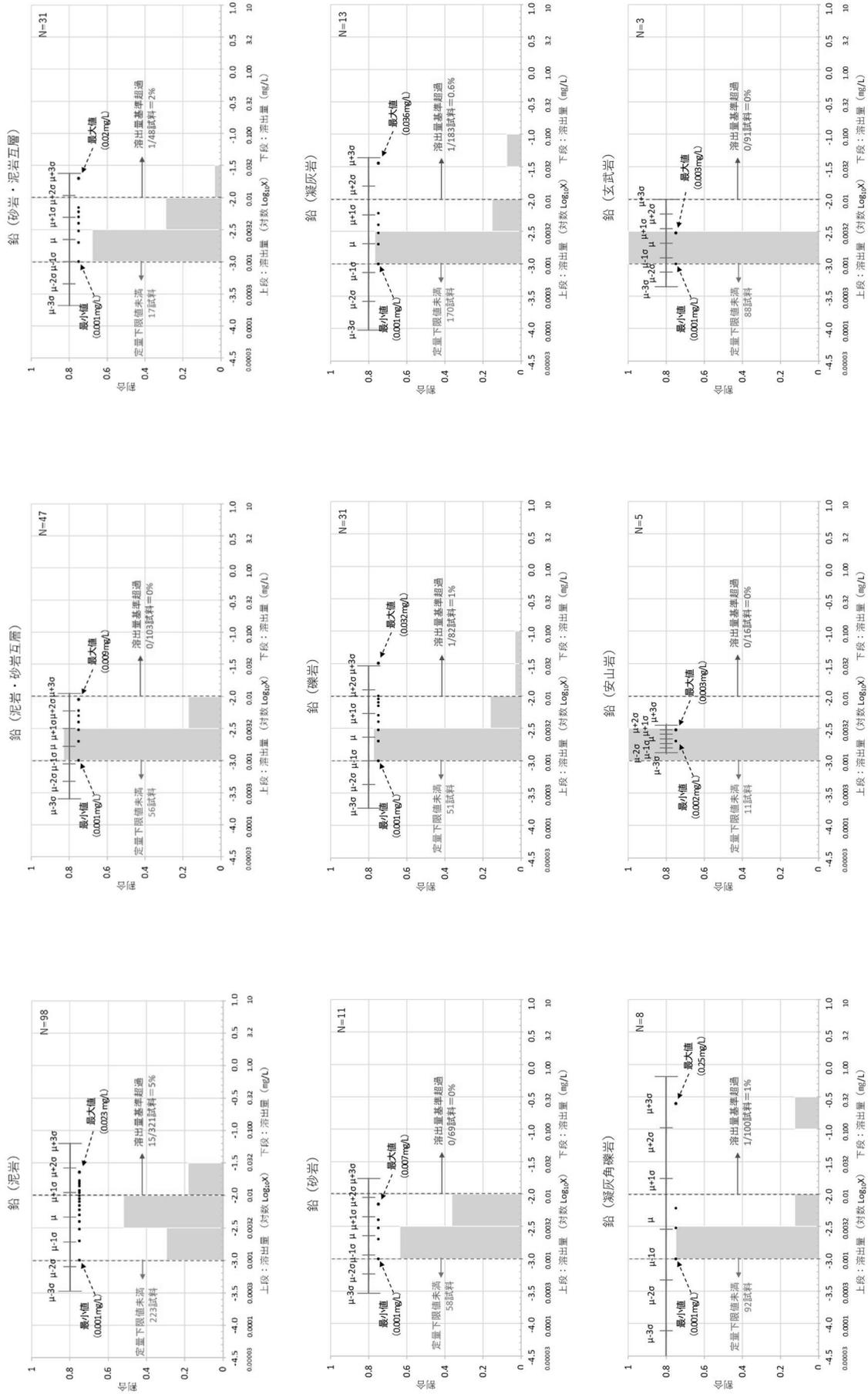


図7.27 先進ボーリング調査における溶出量の分布 (鉛)

(4) 原地盤などの吸着性能評価の事例

サイト概念モデルに基づくリスク評価にあたっては、盛土箇所の原地盤や吸着層に用いる建設発生土について重金属等の吸着性能を評価する必要がある。吸着性能の評価では、検討対象の発生土と原地盤試料などを用いてバッチ試験を行い、得られた試験結果をヘンリー式などにより近似し、分配係数として評価することが多い。このようにして評価された試験データが北海道開発局の事業において相当数あることから、試験データを取りまとめ、表7.6および図7.28～図7.32に示すとおりに整理した。

バッチ試験などで評価された分配係数は、鉛、砒素、セレンの順に大きいことが図7.28より把握できる。カドミウム、ふっ素、ほう素はデータ数が少なく総じて分配係数は低くなっている。なお、カドミウムは、試験時の溶液が酸性であったため分配係数が低くなったと考えられる。

表7.6 収集した試験データの概要

項目	内容
路線数等	16路線（平成22～令和4年度の45業務）
データ数	全データ数1,080 (砒素655・セレン292・鉛119・カドミウム7・ふっ素5・ほう素2)
評価対象	盛土箇所の原地盤 918試料 建設発生土（盛土材料・吸着層材料） 162試料
試験方法 (評価方法)	バッチ試験（ヘンリー式による分配係数算出） 1,060試料 カラム試験（移流分散解析による遅延係数算出） 20試料 どちらの試験も使用する溶液は岩石試料から作製したものを使用

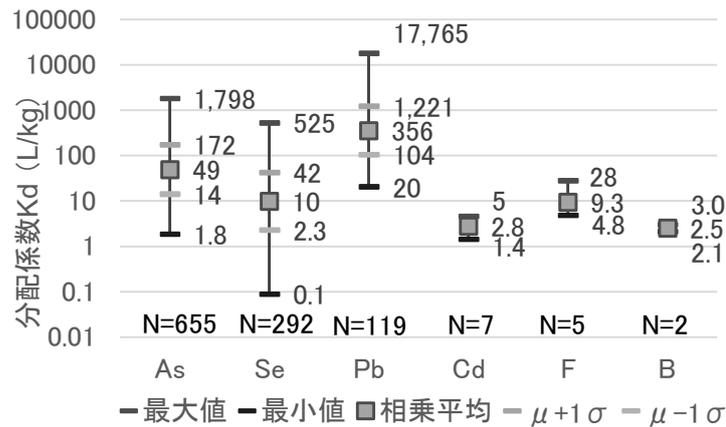


図7.28 盛土箇所の原地盤と建設発生土の分配係数（重金属等別）

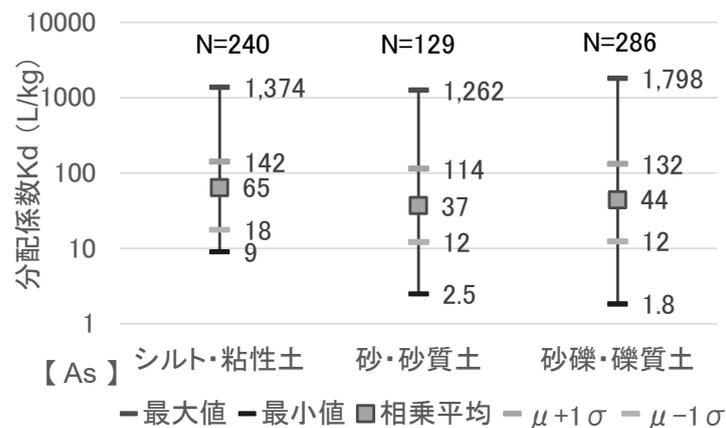


図7.29 盛土箇所の原地盤と建設発生土の分配係数（砒素・土質別）

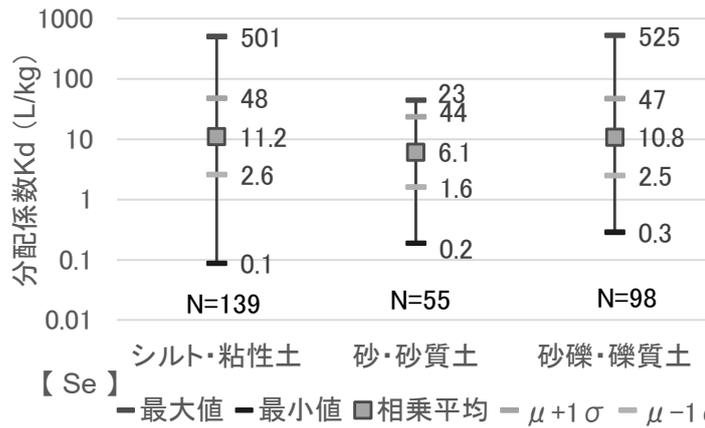


図7.30 盛土箇所の原地盤と建設発生土の分配係数（セレン・土質別）

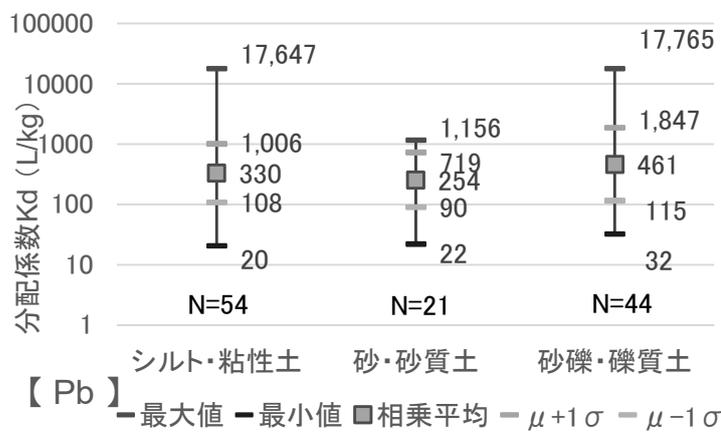


図7.31 盛土箇所の原地盤と建設発生土の分配係数（鉛・土質別）

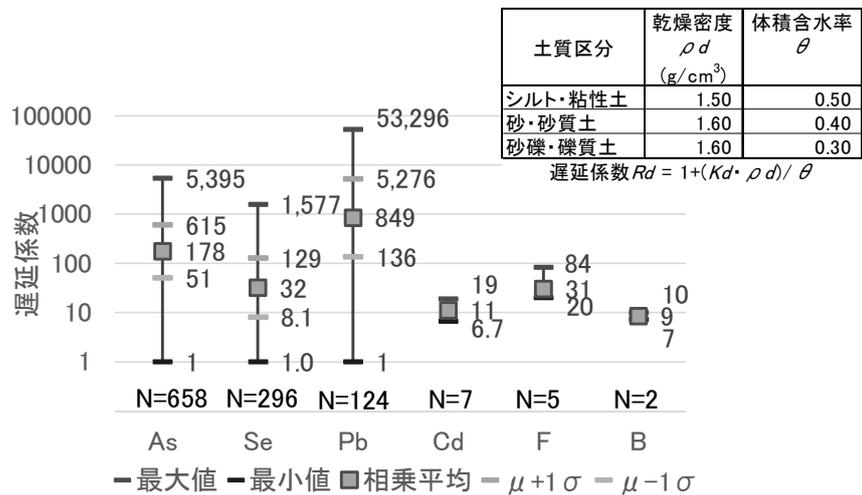


図7.32 盛土箇所の原地盤と建設発生土の遅延係数（参考）  
（乾燥密度・体積含水率を付表のとおりとして算出）

図7.28～図7.32 凡例

Kd : 分配係数 Rd : 遅延係数 N : データ数  $\mu$  : 相乗平均  $\sigma$  : 標準偏差  
As : 砒素 Se : セレン Pb : 鉛 Cd : カドミウム F : ふっ素 B : ほう素