

第68回(2024年度) 北海道開発技術研究発表会論文

自然由来重金属等対策盛土内における酸素濃度の長期観測結果について

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チーム

○遠藤 のぞみ
山崎 秀策
倉橋 稔幸

自然由来重金属等対策盛土においては、重金属等溶出や吸着に影響する盛土内環境の長期的な挙動が明らかではない。そこで本稿では、対策盛土内の酸素濃度に着目し、施工後2年程度から10年超を経過した2つの対策盛土と1つの試験盛土を対象に酸素濃度の長期連続観測を行った。その結果、盛土内部は施工後1年程度を経過すると徐々に貧酸素状態へ移行する傾向にあることが分かった。また、施工から10年超を経過した盛土底部でも貧酸素環境が保たれるが、断続的に酸素の供給が認められることが明らかとなった。

キーワード：盛土内酸素濃度、自然由来重金属等、環境保全

1. はじめに

トンネル掘削等の発生土にはヒ素や鉛などの有害な自然由来重金属等を含有するものがあり、これを盛土等で活用する場合、地下水環境への自然由来重金属等の流出を抑止・低減するための対策が実施されている。一方、長期的な盛土内の重金属等の溶出実現象については不明な点が多く、盛土内が酸化あるいは還元環境になることで、重金属等の溶出傾向が変化する可能性がある。例えば、盛土内が酸化環境である場合は、対策土中の黄鉄鉱が酸化分解しヒ素等の重金属等の溶出を促進する可能性がある。また、吸着層工法で使用される鉄系吸着材等には、還元環境下では重金属等の吸着挙動が変化する可能性も考えられる。

そこで本報告では、盛土内環境の酸素濃度に着目し、寒地土木研究所防災地質チームで継続的に調査を行ってきた施工後2年程度から10年超が経過した3つの自然由来重金属等盛土を対象に、盛土内の酸素濃度を計測し、降雨や積雪に応じた2~3年程度の長期的な酸素濃度の変化について考察した。

2. 調査対象の概要及び盛土内環境の計測方法

本報告では盛土施工から11~13年経過した実盛土をケース1、盛土施工後から2年11ヶ月にわたり計測した実盛土をケース2及び1年8ヶ月にわたり計測した試験

盛土をケース3として取り扱う。

(1) ケース1 (盛土施工後11~13年)

ケース1 (図-1) は道北地域に位置する幅約50 m、高さ6.5 mで、1~2段の小段部を有する道路盛土であり、調査時の2024年時点では施工後13年が経過していた。盛土材には、ヒ素を溶出する白亜系の海成堆積岩（砂岩・泥岩）が用いられた。盛土材は、周辺土壤を用いた厚さ50 cmの覆土（シルト質砂礫）で覆われ、盛土天端にはアスファルト舗装が施工されていた。また、盛土材の下には、現場周辺の河川浚渫土（砂質土など）を基材に、重金属等を吸着する鉄系人工資材を添加した層厚30 cmの吸着層が敷設された。

盛土肩部に盛土内観測孔 (図-2) を掘削し、盛土底部となる深度4.7 mの位置（吸着層の直上）に温度・土壤水分計（静電容量式：METER社製 STM）と土中

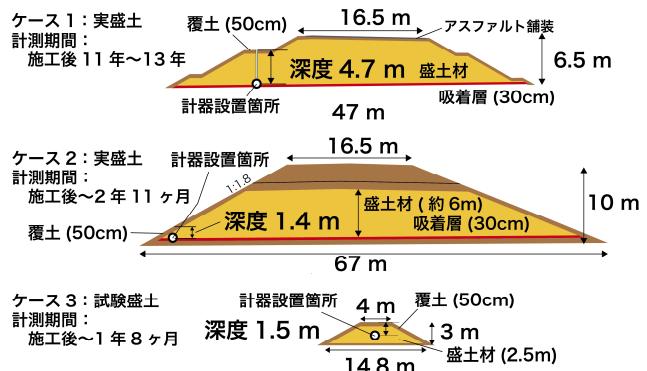


図-1 調査盛土の断面図（ケース1~3）

酸素濃度計（日本環境計測社製 MIJ-03）を掘削土と共に埋設し、その上にペントナイトペレットにより遮水層を設け、掘削土で埋め戻した。地温及び土壤水分の計測を2022年12月から、土中酸素濃度の計測を2023年5月から開始した。

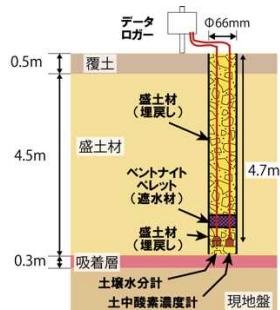


図-2 盛土内観測孔へのセンサー設置方法（ケース1）

（2）ケース2（盛土施工後～2年11ヶ月）¹⁾

ケース2は、道北地域に2011年に施工された道路盛土であり、盛土材にヒ素を溶出する新第三紀中新世の泥岩が用いられた。盛土は幅約67 m、高さ約10 m、覆土は法面部で0.5 m厚、天端部で2 m厚であり、計測期間内は天端部は未舗装である。また、盛土材の下には層厚0.3 mの吸着層が敷設されている。盛土施工時に盛肩部を再掘削し、盛土底部（吸着層直上）の深度1.4 mに、地温・土壤水分計（ケース1に同じ）、土中酸素濃度計（ケース1に同じ）を埋設した（図-1）。なお、文献¹⁾では2011年12月～2012年11月までの計測期間だが、本報告では2014年11月までのデータを追加し、新たに分析を行った。

（3）ケース3（盛土施工後～1年8ヶ月）²⁾

ケース3は2005年に道北地域に設置された実験盛土であり、ヒ素を含有する白亜系～古第三系の粘板岩を盛土材に、現場周辺で採取された床堀土（粘性土）を覆土材料に用いた。盛土は幅14.8×16.8 m、高さ3.0 m（盛土材2.5 m+覆土0.5 m）であり、盛土天端から1.5 mの深度に静電容量式の土壤水分計、温度計、ガルバニ式の酸素濃度計を造成時に埋設し計測を行った（図-1）。ただし、使用機器の詳細は不明である。なお、文献²⁾では2005年12月～2006年11月までの計測期間だが、本報告では2007年7月までのデータを追加し、新たに分析を行った。

3. 計測結果と気象条件

（1）ケース1（盛土施工後11～13年目）

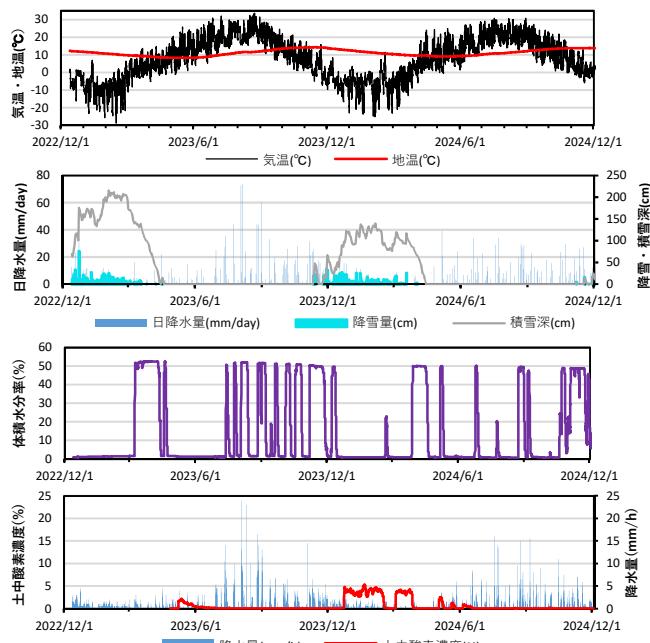


図-3 ケース1の盛土内環境の観測結果及び気象データ

ケース1における盛土深部（深度4.7 m）における地温、体積水分率及び土中酸素濃度の観測結果並びに気象データを図-3に示す。なお、気象データは各盛土設置箇所近傍の気象庁アメダスデータ地点の気温、日降水・降雪量及び積雪深を利用した。

2022年12月～2024年12月における気象観測結果として、寒暖差は+30～-20°Cであり、積雪深は2022年度は最大2mが、2023年度は1.2 mが記録されている。両年とも、3月上旬に日最高気温がプラスに転じると融雪が始まり、4月中旬に積雪がゼロとなった。例年、融雪後の4月～7月は降雨が散発的な少雨期であり、7月～9月中旬は日降水量が20 mm超かつ降雨が数日間継続するイベントが複数回発生する多雨期である。その後11月上旬より降雪が開始し積雪期となる。

盛土底部の深度4.7 mに設置した温度計、土壤水分計による体積水分率、土中酸素濃度を図-3に示す。盛土底部の温度は、8～15°Cの季節的な温度変化を示し、気温の変化から2～3ヶ月程度遅延した。また、最低気温が -20°Cに達する気象条件下においても盛土内はマイナスとならず間隙水は凍結しないことが確かめられた。

盛土底部の体積水分率は、積雪期や小雨期の大部分はセンサーが不感となる0%で維持され、融雪あるいは多雨期には、体積水分率は浸透水による急激な上昇を示し飽和状態に達した後、しばらくして再び0%まで低下するという融雪・降雨への応答が認められた。

一方、盛土底部の酸素濃度は基本的に多雨期は0%

のほぼ無酸素状態となり、一方、2023年5月～6月の少雨期には酸素濃度は最大2%程度まで、同年12月下旬からの積雪期においては4～5%程度まで上昇する期間が確認された。また、翌年2024年5～6月にかけても前年度と同様2.5%程度まで上昇した後、0%近くまでの上下を2度繰り返し、6月下旬にほぼ0%まで下降した後12月現在まで0%付近を維持している。このように盛土内環境は、断続的ではあるが酸素の供給が認められる環境であることが明らかとなった。

(2) ケース2 (盛土施工後～2年11ヶ月)

ケース2の盛土底部（深度1.4 m）の地温、体積水分率及び酸素濃度並びに気象データを図-4に示す。

図-4に示すように計測箇所の温度は、2012年4月中旬以降は1～2ヶ月遅れで外気温と連動し推移する。一方、体積水分率は、ケース1と異なる挙動を示し、40～50%付近の高い値で季節変動し、温度あるいは降水量と連動し推移している様に見える。土中酸素濃度の挙動は、2011年1～3月の冬季には大気平衡に近い18%程度で安定するが、融雪時期の3～6月に低下し、6～7月末までは0%の無酸素環境となり、その後、多雨期となる8月頃に一度17%程度まで急上昇を示した後、再び無酸素状態まで低下した。2013年5月頃と2014年4月頃に2%程度まで僅かな上昇を示す以外は、その後は無酸素環境が継続した。この結果から、盛土施工（埋設）直後は比較的の酸化環境であるが、施工後1年程度を経て、盛土内が貧酸素環境に移行することがわかる。

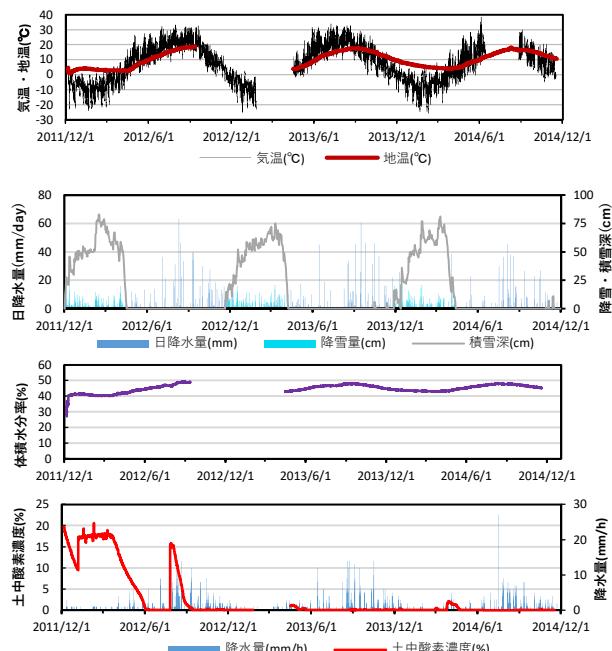


図-4 ケース2の盛土内環境の観測結果及び気象データ

(3) ケース3 (盛土施工後～1年8ヶ月)

ケース3の試験盛土内（深度1.5 m）における地温、体積水分率及び土中酸素濃度の観測結果並びに観測期間中の雨量データを図-5に示す。

盛土内の地温は、施工後から2006年4月中旬頃までは5°C前後でほぼ一定であるが、ケース2と同様に、それ以降は1～2ヶ月遅れで外気温と連動している。

体積水分率は、試験開始から約3ヶ月後の融雪期に20%～23%程度への僅かな上昇が認められ、その後の多雨期には降雨に応答するタイミングで最大30%程度までスパイク状の上昇を示し、その後速やかに25%前後まで低下し、積雪期には再び20～24%で推移した。

土中酸素濃度は、試験開始後の2005年12月～2006年3月の降雪期は15～20%で推移しており大気平衡に近い値で推移したが、融雪が顕著となる2006年4月頃から緩やかに低下を始め、降雨量の一番多い8月に1%程度の貧酸素環境に到達した。その後は降雨に応じたスパイク状の上昇を伴いながら上昇傾向を示し、積雪期では前年の積雪期より低い15%付近で安定的に推移し、その後2007年6月以降から下降傾向を示した。ただし、2007年の融雪期はデータ欠測となり挙動は不明である。ケース1、2よりも小規模かつ低深度で計測を行った試験盛土であるが、施工後には、実盛土と同様に降雨浸透の影響を受け、盛土内は貧酸素環境に移行することが読み取れる。

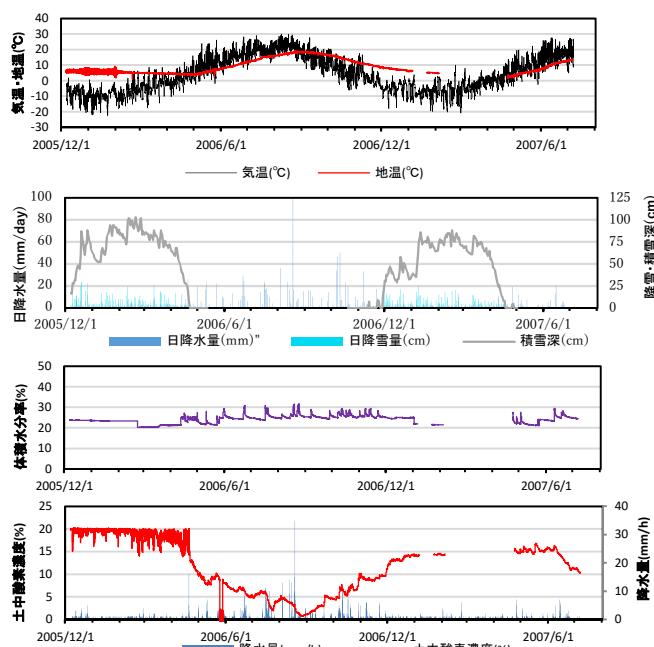


図-5 ケース3の盛土内環境の観測結果及び気象データ

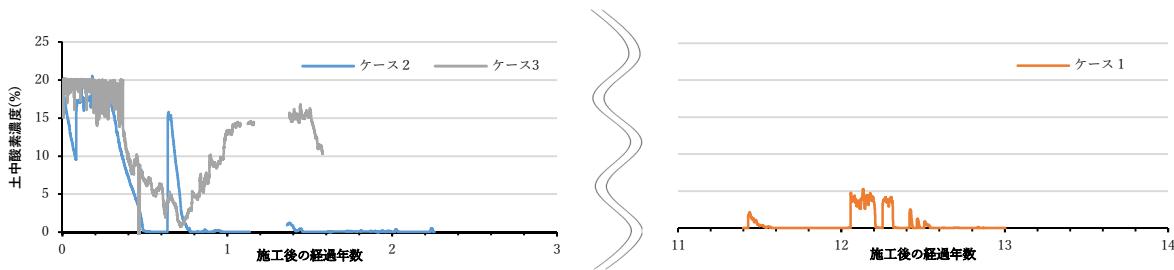


図-6 盛土施工後の経過年数におけるケース1～3の土中酸素濃度の比較

4. 考察

(1) 施工後11～13年経過した盛土内の酸素濃度変化

これまで不明であった盛土内環境の実態の事例として、ケース1の降水量と体積水分率及び土中酸素濃度の関係について以下に述べる。なお、ケース1でのみ土壤水分計の体積水分率が0%を示すことは、ボーリング孔内への設置であるため、センサーと埋め戻し土との接触が不十分であると推定され、体積水分率の出力値の信頼性は疑わしい。しかしながら、体積水分率が急激に上昇し、50%前後で飽和後、緩やかに低下する挙動から、含水量の定性的な変化は正常に捉えており、降雨浸透が盛土底部に到達するタイミングを捉えているものと考えられる。

2023年7月～12月を例に、降雨浸透と酸素濃度の変化傾向を見ると、体積水分率が降雨浸透に応じて急激に上昇する回数が頻発する期間では、酸素濃度は0%付近を示す一方、2023年5月～7月のような体積水分率が0%付近を示す期間が継続する少雨期の場合は土中酸素濃度が上昇する傾向が読み取れる(図-3)。なお、トンネル掘削後の堆積岩類において、化学的風化に伴い酸素が消費される現象は、粘土鉱物などの二価鉄、黄鉄鉱、有機物(炭質物)の酸化が生じるためと考えられている³⁾。このことから、施工後11年経過時点でも盛土材の酸化により盛土間隙の酸素の消費が継続しており、盛土内は貧酸素環境で維持されることが明らかとなった。一方で、盛土底部へ浸透する降雨がない時期に酸素濃度が最大5%程度まで上昇する現象は、盛土材の乾燥に伴い空隙が連結し盛土外と通気することで、盛土底部まで酸素の供給が生じた可能性が示唆される。

(2) 対策盛土の盛土内環境の経年変化について

ケース1～3は、形成年代は異なるものの共通してヒ素を溶出する堆積岩を盛土材としている。以下に、3ケースの酸素濃度計測結果を時系列的に比較することで、盛土内環境が盛土材の酸化(化学的風化)に

伴い、経年にどのように変化するのか考察した。ケース1～3の酸素濃度の長期観測結果を施工開始時期からの時系列として比較した結果を図-6に示す。

各ケース毎に、測定機器の設置位置や深度、盛土の大きさ及び盛土造成時からの経過時期によって、土中酸素濃度の数値が意味するところには違いがあると考えられるが、定性的にはいずれも積雪・少雨期には酸素濃度が上昇し、融雪・多雨期に減少する変化傾向は共通している。また、盛土造成から2～3年程度の経過を記録したケース2及びケース3では、2年目の土中酸素濃度が初年と比較して低下傾向にある。これは、盛土造成直後には、盛土内の酸素濃度は大気平衡に近い状態にあるが、降雨イベントを伴いながら、長期間経過することにより盛土内への酸素供給が徐々に停滞・阻害され、堆積岩の酸化により盛土内の酸素が消費されることで、盛土内が貧酸素環境へと徐々に移行した結果と解釈される。なお、施工後に盛土表面で植生が形成された影響した可能性も考えられる。なお、ケース2(深度1.4m)とケース3(深度1.5m)の初期の酸素濃度変化は類似していることから、盛土施工後のモニタリング期間は施工直後と、1年超での挙動は異なる盛土内環境での現象となる可能性に留意が必要であろう。

盛土造成から11～13年経過したケース1(深度4.7m)については、施工後10年以上が経過しても盛土底部(吸着層直上)の盛土内環境は完全な無酸素状態にならず、貧酸素環境ではあるが間欠的に酸素が供給されることが、本研究の観測結果によって明らかになった。このことから、酸化により酸素を消費する盛土材を用いた場合、通常大気平衡の酸化的条件で実施される盛土材の溶出評価試験・実現象再現試験の実施方法や、吸着材・不溶化剤などの性能評価試験などにおいては、試験環境を貧酸素条件として実施することが、実際の盛土内環境における重金属の溶出傾向の把握に有効であると考えられる。

5. まとめ

本報告の結果は以下のようにまとめられる。

- ・長期観測を実施した3ケースそれぞれは、測定機器の設置位置、盛土の大きさ及び盛土造成時からの経過時期によって、土中酸素濃度に異なる挙動を示すが、積雪・少雨期に上昇し融雪・多雨期に減少する変化の傾向はいずれのケースでも共通している。
- ・造成直後で酸素濃度が高い盛土について、降雨イベントを伴いながら盛土内酸素を消費し1年超程度を経過すると、徐々に安定的な貧酸素状態の環境に移行していくと考えられる。
- ・造成から10年以上が経過した盛土でも、盛土底部は貧酸素状態であるが断続的に酸素が供給されていることが明らかとなった。このことから貧酸素状態の環境で盛土材の溶出評価試験等や吸着材等の性能評価試験を実施することが、より実現象に近い重金属等の溶出傾向の把握に有効と考えられる。

謝辞：本研究の実施にあたり、北海道開発局旭川開発建設部には現地調査および施工情報の提供について、多大なご協力を頂いた。ここに厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1)田本修一、伊東佳彦：道路建設現場におけるサイト概念モデルによるリスク評価と盛土モニタリング実験、第10回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp.117-124、2013
- 2)田本修一、伊東佳彦、日下部祐基、五十嵐敏文、渡邊歩、青木卓也：覆土による重金属汚染対策に関する現場実験、地盤工学会北海道支部第47回技術報告会、pp.247-250、2007
- 3)大山隆広、千木良雅弘、大村直也、佐々木和裕、長岡亨：不飽和領域での堆積岩の化学的風化作用-泥岩トンネル孔壁の風化速度と微生物の影響-、応用地質、第39巻、第6号、pp.511-523、1999