The Japanese Geotechnical Society

論　文

自然由来の重金属高含有岩盤掘削ずり埋立に対する周辺粘性土の遮水材としての利用可能性

Utilization of Surrounding Clayey Soil as Sealing Material for Mucks Rich in Heavy Metal

五十嵐　敏　文（いがらし　としふみ）
北海道大学大学院　工学研究科

三　上　　隆（みかみ　たかし）
北海道大学大学院　工学研究科

1. はじめに

北海道は火山，温泉，鉱山などが多く変質域が広範に分布する。このような地域においてトンネルなどの岩盤掘削を伴う土木建築工事を実施する場合，掘削ずりの性状に関する情報が不可欠で，場合によってはずり処分に対して措置が必要となる。とりわけ，平成15年２月に土壌汚染対策法が施行されて以来，掘削ずり中の重金属類の含有量や溶出濃度を把握することが必要になった。土壌汚染対策法では，人為由来の汚染に対して適切な措置を講ずることが要求されているが，自然由来の汚染に対する措置までは要求されていない。しかし，トンネルなどの掘削ずりは，元来は自然のものであるが人為的な擾乱が加えられることから，まったくの自然起因とはいえない。

土壌汚染対策法では，リスクの観点から含有量基準と溶出量基準が定められているが，岩石中に含まれる重金属類に注目すると，含有量としては岩石の置かれる環境にかかわらず変化しないが，重金属類の化学形態が主にpHと酸化還元電位によって支配されることから，溶出量（溶出濃度）としては変化することが容易に予想される。すなわち，還元環境から酸化環境へ変化する場合は，重金属類の酸化数が増加するため溶解・沈殿特性や土壌・岩石への吸着・脱離特性が変化し，環境中での移動性も変化する。したがって，岩盤掘削ずりは厳密には自然起因の人為誘発となり，ずりの性状によっては何らかの措置を講ずることが必要となる。しかし，このようなずりは，土壌汚染対策法に定める土壌含有量基準や土壌溶出量基準を若干上回る程度の低含有量・低溶出濃度を呈することが予想されることから，対策が必要な場合でも合理的で経済的な措置が望まれる。本稿では，合理的な措置として岩盤掘削ずり埋立に対して周辺粘性土の遮水材，とくに敷土・覆土としての適用可能性について考察する。

2. 既往の遮水構造

岩盤掘削ずりを含む建設残土に対しては，国土交通省では「建設工事で遭遇する地盤汚染の対応マニュアル（仮題）」（以下マニュアルと称する）を作成している[1]。それによると，対策は暫定対策と恒久対策に大別され，暫定対策には敷土・覆土，浮き遮水壁，バリア井戸，固化・不溶化が挙げられ，恒久対策としては環境庁の「土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針および運用基準」に準拠する，原位置浄化，掘削除去，原位置封じ込め，掘削除去後封じ込めが記載されている[2]。

鉱化変質帯を貫くトンネルにおける掘削ずり対策の代表的な例としては，東北新幹線八戸以北の八甲田トンネル工事がある[3]。そこでは発生する掘削ずりの性状に応じて管理型土捨場に埋め立てるか安定型（一般型）土捨場に埋め立てるかを区分している。そのための判定フローも作成されている[3]。安定型土捨場には遮水構造は適用されないが，管理型土捨場においてはシートやベントナイト材料による遮水構造が適用されている[4]。

3. 合理化方策

八甲田トンネルのように発生する岩盤掘削ずりを安定型と管理型に２分し，管理型の土捨場だけ遮水構造を有するような仕様とする場合には，判定基準を合理化する方法と遮水構造を合理化する方法を分けて考える必要がある。

八甲田トンネルは鉱化変質帯を貫くため，判定フローで対象となる項目は溶出水酸性化ポテンシャルと重金属含有量である[3]。対象重金属類はヒ素，銅，鉛，亜鉛，セレン，カドミウムなどであり，溶出試験に先行して蛍光Ｘ線によって全含有量を測定している。これは土壌汚染対策法で定められている１規定塩酸抽出による含有量よりも保守側の結果となるが，抽出試験を省略している。さらに，対象となる重金属類に対しては溶出試験による溶出水濃度も分析している。ここでの溶出試験の方法は環境庁告示第46号で定められている公定法とは若干異なるが，現場の溶出挙動をできるだけ模擬するように，振とう操作を省略する代わりに56日にも及ぶ長期間の溶出試験を実施している。これは重金属類の溶出というよりも浸出水の酸性化を主に評価するためである。

以上のことから，現場での判定基準を合理化する方法として下記の項目が考えられる。

ⅰ．含有量測定の合理化
　含有量を公定法と比較して保守側の結果が得られるような簡易な方法（例えば蛍光Ｘ線法）で分析する。

ⅱ．溶出量測定の合理化
　公定法と簡易な溶出試験とで溶出試験を実施しそ

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

の関係を明らかにし，簡易な溶出試験方法を用いる。

iii．測定項目の合理化

含有量と溶出量との関係を把握し，保守側の評価ができるような項目だけを抽出し，その結果に基づき判定する。

どのような判定方法を採用するにせよ，トンネル掘進工程と整合を図りつつ迅速な判定結果を導く必要がある。

八甲田トンネルでは，ヒ素などの溶出濃度は第一溶出量基準を超えても，第二溶出量基準には達しない試料が多いことが明らかにされている[3]。このような溶出濃度レベルに対して，遮水シートで対象ずり全体を覆うような管理型土捨場に埋め立てることは保守側の対応ではあるが，経済的であるとはいえない。そこでマニュアルでは暫定対策とはなっているが，第二溶出量基準程度までの重金属溶出濃度を有する岩盤掘削ずりに対しては，土捨場建設予定地周辺の粘性土を敷土・覆土として利用することができると考え，次章でその概念について記述する。

4.　現地周辺粘性土の遮水材としての利用

ヒ素などの重金属類はセレンや六価クロムを除き，揮発性有機塩素化合物などと比較して土壌への吸着性が非常に高い。そのため，従来から用いられている分配係数を指標とした吸着モデルを土捨場の敷土や覆土に対して採用すると，ある一定の厚さ（あるいは距離）だけ確保することによって地下水中の濃度は減少する。土捨場建設予定地近傍に粘性土が十分にあり，その対象重金属類の吸着能を測定し，土捨場周辺を囲むべき厚さや締め固め密度などを評価することによって，高価なシートやベントナイトなどの難透水性材料を使用することなくリスク低減の観点[5]から管理型土捨場となりうる。もちろん覆土などの破損による重金属類高含有岩盤掘削ずりの直接摂取は防止しなければならないが，このような概念に基づく土捨場の設計は自然由来の汚染に対しては有望であると考えられる。

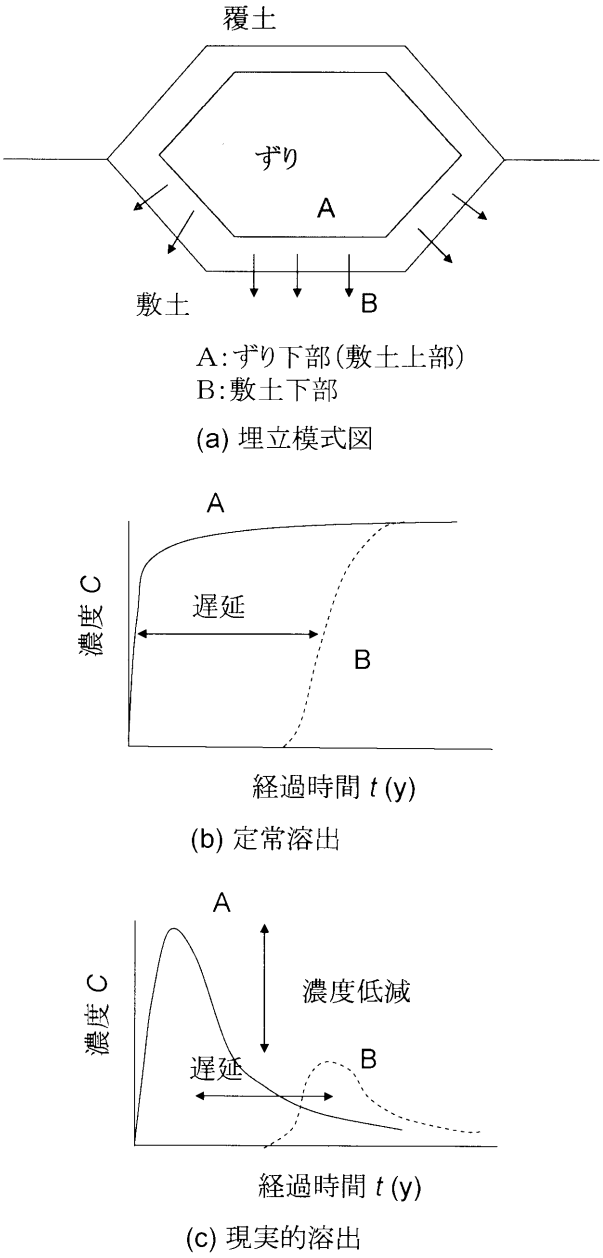
重金属類の吸着モデルとしては分配係数を用いることが多い。分配係数は，液相濃度に比例して固相濃度，すなわち吸着量が増加するというヘンリー型の可逆平衡モデルの比例定数である。すなわち，

$$q = K_d \cdot C \quad \cdots\cdots(1)$$

ここで，q は固相濃度（吸着量），K_d は分配係数，C は液相濃度である。この式を用いると，地下水の移動速度（実流速）v_w と地下水中の溶質（ここでは重金属類）の移動速度 v_s との比である遅延係数 R_f を下記の式に示すように容易に見積もることができる。

$$R_f = \frac{v_w}{v_s} = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここで，ρ_b は媒体のみかけ密度，θ は媒体の体積含水率である。マニュアルにおいても地下水中の溶質の移行速度が遅いことから暫定対策として敷土・覆土が採用されている。これは**図―1 (a)，(b)** に示すように溶出率が一定で，ソース（掘削ずり）からの溶出濃度が一定のステップ状となる場合に敷土・覆土の遅延効果を期待するものである。しかし，溶出率が常に一定ということは実際の掘削ずりでは考えにくい。

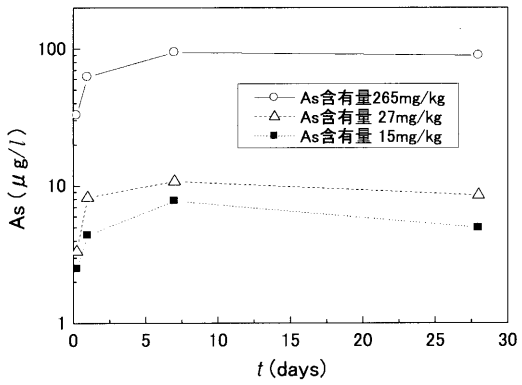


図―1　粘性土を敷土・覆土として利用したときの概念図（a）埋立模式図，（b）定常溶出，（c）現実的溶出

図―2 は，変質火山岩からのヒ素溶出濃度をバッチ溶出試験で調べた結果であり，液相（溶出）濃度を縦軸に，溶出時間を横軸にプロットしている。この図から，1日までは急激に溶出濃度が上昇するが，その後の経過時間に対する濃度上昇が明瞭には認められない。このことは，初期の表面層からの急激な溶出とその後のゆっくりとした内部からの溶出という2段階の溶出現象が起きていると考えられるからである。このような溶出挙動は，黄鉄鉱の酸化・溶解[6]や石炭灰からの種々の元素の溶出現象[7),8]でも認められている。溶出率が一定でなく，初期に高く経過時間とともに減少する場合，溶質移行の遅延という効果のほか液相濃度の減少効果も期待できる。す

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



図―2　変質火山岩粉砕試料に対するAs溶出濃度変化

なわち，図―1(c)に示すように，溶質は固相である敷土・覆土への吸着と液相である地下水とに分配され，溶出濃度の低減をもたらす。敷土・覆土外側で溶出濃度を満足すればよいわけであるが，そのためには溶出パターンを明らかにすることが重要である。すなわち，初期溶出濃度，その継続時間，溶出濃度の低減パターン，溶出後期の濃度を明らかにし，その特徴を踏まえた評価が望まれる。この溶出挙動と敷土・覆土の分配係数，密度，体積含水率がわかれば，敷土・覆土の必要厚さも評価することができる。ここで注意しなければならないことは，液相濃度が低くても分配係数が高く，溶出量ではなく含有量で基準値を上回わらないかを確認しておくことである。たとえば，ヒ素などは関東ロームのような非晶質アルミニウムを含む土壌に多く吸着される[9]。式(1)において液相濃度を第一溶出量基準とし，分配係数を関東ロームに対するヒ酸のラングミュア吸着等温式からの換算値13.3 m^3/kg を代入すると[10]，含有量は133 mg/kgとなり，含有量基準は満足する。このことから，ヒ素の吸着性が高い土壌でも第一溶出量基準を超えなければ含有量基準を超えることはないと判断される。

表―1には現地粘性土を使用する場合の検討事項を整理した。ただし，現地粘性土が入手困難な場合は，この方法は使用できない。

5. ま と め

土壌汚染対策法における含有量基準あるいは溶出量基準を超える岩盤掘削ずりに対しては，従来の遮水工だけに頼る埋立ではなく，「自然のものを自然の力で」という地球化学的な観点から現地周辺粘性土を用いた重金属移行抑止層を設けることは有効であり，かつ合理的であると考えられる。今後，種々の現場でその適用性を検討することはますます重要となるであろう。

表―1　現地粘性土を使用する場合の留意事項

項目	内容
周辺粘性土の存在	・存在の有無 ・存在量とその分布 ・採取可能性
粘性土の特性	・物理特性 ・透水特性 ・締固め特性 ・化学特性 ・吸着特性
使途	・暫定対策としての使用 ・恒久対策としての使用 ・各対策における使用部位
設計・施工	・各対策における仕様の決定 （掘削ずりからの溶出特性を考慮） 敷土・覆土としての厚さ 敷土・覆土としての密度
モニタリング	・予測結果確認のためのモニタリング

参　考　文　献

1) 国土交通省監修：「建設工事で遭遇する地盤汚染の対応マニュアル（仮題）」，1997.
2) 環境庁水質保全局編：「土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針運用基準」，財務省印刷局，1999.
3) 服部修一・太田岳洋・木谷日出男：酸性水発生に関わる掘削残土の応用地質学的検討―鉱山に近接して施工される八甲田トンネルにおける岩石特性評価法―，応用地質，Vol. 43, No. 6, pp. 359～371, 2003.
4) 服部修一・太田岳洋・木谷日出男：土壌・地下水汚染対策を考慮したトンネル工事，北海道資源・素材フォーラム2004＆廃棄物学会北海道支部第5回セミナー　土壌・地下水汚染対策の現状と課題―北海道の環境保全を目指して―，pp. 23～28, 2004.
5) 協同組合地盤環境技術研究センター：環境サイトアセスメントフェイズⅠ・Ⅱ技術マニュアル，鹿島出版会，2002.
6) 五十嵐敏文・井筒崇文・岡　泰道：2段階溶出モデルによる黄鉄鉱の酸化・溶解速度の評価，応用地質，Vol. 43, No. 4, pp. 208～215, 2002.
7) 佐藤一男：石炭灰からの微量元素溶出挙動のモデル化（その1），電中研研究報告 T88303, 1989.
8) 五十嵐敏文・下垣　久：バッチ法およびカラム法によるホウ素の地中移行特性，日本地下水学会誌，Vol. 40, No. 2, pp. 121～132, 1998.
9) Sakata, M.: Relationship between adsorption of arsenic (III) and boron by soil and soil properties, Environmental Science and Technology, Vol. 21, No. 11, pp. 1126～1130, 1987.
10) 五十嵐敏文・下垣　久：石炭灰中微量物質の土壌への吸着特性，電中研研究報告 U91330, 1991.

（原稿受理　2004.5.6）

NII-Electronic Library Service