

⑦-3 環境安全性に配慮した建設発生土の有効利用技術に関する研究（2）

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：防災地質チーム

研究担当者：伊東佳彦、倉橋稔幸、岡崎健治
井上豊基、田本修一

【要旨】本研究では、ハザード評価技術の検討において連続溶出試験および逐次抽出試験を行った。また、リスク評価技術の検討では、現場モニタリング実験および同現場におけるヒ素の二次元移流分散解析によるリスク評価を行った。これらの結果、連続溶出試験および逐次抽出試験では、イオン交換態の含有量を求めることによりヒ素の溶出総量の目安となることがわかった。また、現場モニタリング実験では、本実験期間内において吸着層の対策効果が確認された。二次元移流分散解析によるリスク評価では、盛土設置から 100 年間でリスク評価地点および事業用地境界の地下水中のヒ素濃度は、地下水環境基準値を超えないと評価された。

キーワード：建設発生土、重金属、溶出試験、リスク評価、現場モニタリング実験

1. はじめに

平成 22 年 4 月土壤汚染対策法の一部を改正する法律の施行により、自然由来の重金属類を含有する汚染土壌も規制の対象となった。建設工事区域内で発生した汚染土壌に対しても、より厳格な対応が求められるようになった。一方、国土交通省では、平成 22 年 4 月土壤汚染対策法の一部を改正する法律の施行前に「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)」¹⁾を公開した。このマニュアルでは、汚染への新たな対応の枠組みとして、人の健康および環境への負の影響がどの程度解消されるのかを定量化するサイト概念モデルに基づくリスク評価による設計手法が示された。この手法を導入することにより、対策の効果をリスクの低減という観点で評価できるため、対策の妥当性を明らかにできるとともに、最も効率的な対策の方法を選択することができるようになる。

本研究では、自然由来重金属等含有岩石の長期的なハザード評価技術の検討の一環として、岩石からの重金属等の溶出総量評価方法について、連続溶出試験と逐次抽出試験を行った。また、建設発生土の高精度なリスク評価技術検討の一環として、現場モニタリング実験および同現場における二次元移流分散解析によるリスク評価を行った。本報告では、これらの検討結果について報告する。

2. 研究方法

2. 1 自然由来重金属等含有岩石の長期的なハザード評価技術の検討

2. 1. 1 試料

試験に用いた試料は、北海道内のトンネル建設現場および既存道路沿いの露頭から採取した岩石試料 9 試料および土研式曝露試験を実施中の 6 試料の合計 15 試料である。底質調査法による As 等の全含有量試験結果および pH 試験結果を表-1 に示す。全含有量試験結果より As については、LT4 が最も多く含有している。

表-1 各試料の含有量等試験結果

項目	ヒ素	鉄	カルシウム	総硫黄	含水率	強熱減量	pH(H ₂ O)	pH(H ₂ O ₂)
試料名	mg/kg	%	%	S%	%	%		
溶結凝灰岩 (WT)	3.0	1.22	0.353	0.014	0.4	0.5	9.6	7.2
火山礫凝灰岩2 (LT2)	55.7	3.33	2.62	2.69	9.8	8.3	2.4	1.9
火山礫凝灰岩4 (LT4)	112	23.3	0.0014	28.2	7.9	28.6	1.6	1.2
ワッケ質中粒砂岩 (WS)	11.9	1.68	0.641	0.068	0.1	0.9	10	8.8
粘板岩 (SL)	19.8	3.86	1.83	0.175	0.8	2.4	9.4	8.3
泥岩1 (MS1)	16.9	3.62	0.693	0.681	3.6	4.3	9.5	2.9
泥岩2 (MS2)	9.2	3.6	1.44	0.293	6.1	3.5	11.1	6.1
泥岩3 (MS3)	18.3	3.86	2.02	0.33	2.8	5.8		8.4
泥岩4 (MS4)	8.4	4.29	1.22	0.074	3.2	4.3	11.1	9.6
泥岩 (KB5)	8.3				2.5			
泥岩 (KR)	7.2				3.1			
安山岩 (YN)	11.8				5.5			
砂岩 (SP)	10.6				1.9			
火山礫凝灰岩 (DM)	14.9				6.1			
泥岩 (NK)	9.6				2.3			

⑦-3 環境安全性に配慮した建設発生土の有効利用技術に関する研究（2）

試験前処理として、各試料を風乾後、ジョークラッシャーを用いて粉碎し、2mmふるいを通過したものを連続溶出試験に供した。また、メノウ乳鉢を用いて微粉碎し、150 μ mふるいを通過したものを逐次抽出試験に供した。

2. 1. 2 連続溶出試験

連続溶出試験は、溶媒に純水を用いた環境庁告示第46号の付表で示される方法を準用した溶出試験を、試験後の残渣を用いて複数回実施するものである。試験の溶出回数は、Asが基準値以下、ないしは最大値を示したあと減少傾向を示すまで行った。試料により異なるが、最大で10回溶出試験を行った。各試験後溶液の水質分析にはICP-MSを用い、pHはガラス電極法により測定した。

2. 1. 3 逐次抽出試験

逐次抽出試験では、イオン交換態、炭酸塩態、鉄・マンガン氧化物態、有機態/硫化物態および難溶性鉱物態の5形態の抽出処理を行った²⁾、各抽出処理方法を表-2に示す。また、抽出後の検液の分析ではICP-MSを用いた。

表-2 抽出処理方法

抽出段階	抽出溶媒	試験条件(振とう・温度)	液/固比	重金属類の存在形態
step1	1mol/l リン酸二水素ナトリウム	密閉、常温(23±2℃)、1h振とう(200rpm)	20ml/1g	吸着態(イオン交換態)
step2	1mol/l 酢酸ナトリウム	密閉、常温(23±2℃)、5h振とう(200rpm)	20ml/残渣	炭酸塩態
step3	0.04mol/l 塩酸ヒドロキシルアミン、25% 酢酸	開放、5h加熱(85±2℃)、手動攪拌	20ml/残渣	鉄・マンガン氧化物態
step4	0.02mol/l 硝酸、30% 過酸化水素水、step3混合液	開放、5h加熱(85±2℃)、30min振とう(200rpm)	30ml/残渣	有機物態/硫化物態
step5	20ml濃硝酸	開放、1h煮沸、振とう操作なし	20ml/残渣	難溶性鉱物態

2. 2 建設発生土の高精度なリスク評価技術の検討

2. 2. 1 現場モニタリング実験の概要

本検討で対象とした道路建設現場は、北海道内の一般国道をバイパスする地域高規格道路であり、工事区間のトンネル掘削ずりを本線道路盛土材として利用する計画となっている。

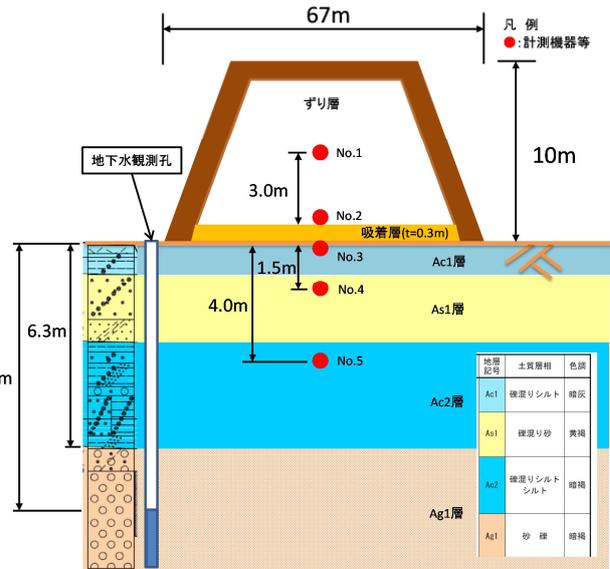


図-1 現場モニタリング実験の概要

トンネル地山は、トンネル起点側に新第三紀の硬質泥岩と破碎質泥岩、終点側に第四紀の火砕流堆積物が分布している。過年度に現場で実施した調査結果によれば、起点側に分布する泥岩からは土壤環境基準(0.01mg/L)を超過するヒ素溶出量が検出されており、確認されたヒ素溶出量は最大で0.063mg/Lであった。

実験現場は、工事区間のAsを含有するトンネル掘削ずりを本線道路盛土材として利用した道路盛土で実施している。実験期間は、平成23年12月より平成27年3月までの3年3ヶ月間実施する予定である。実験の概要を図-1に示す。幅約67m、高さ約10mの道路盛土内および盛土の下部地盤内に図-1に示す位置において、盛土・地盤内環境を測定するための計測機器および間隙水を採取するための土壤溶液採取器を埋設した。計測機器は、温度、土中酸素濃度、体積含水率である。また、地下水の水位および水質

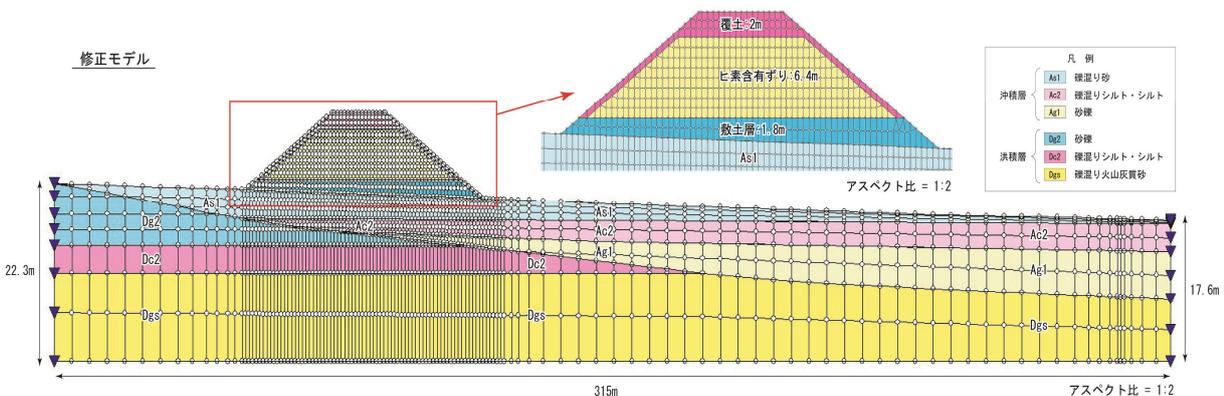


図-2 解析モデルの要素分割および材質区分図

を把握するため、盛土法尻に地下水観測孔を設置し、地下水位計を設置した。間隙水および地下水の採水方法は、間隙水については土壤溶液採取器から負圧吸引により採水し、地下水については使い捨てのペーラーを用いて採水した。採水した間隙水および地下水の分析項目は pH および As で、pH はガラス電極法、As は ICP-MS を用いて測定した。盛土下部の地盤は、氾濫原堆積物と考えられる沖積層が分布し、リスク評価のポイントとなる帯水層として Ag1 層がある。

2. 2. 2 モニタリング実験現場における二次元移流分散解析

解析モデルの要素分割および材質区分図を図-2に、サイト概念モデルを構築するにあたりモデル化に用いた入力パラメータ及び境界条件を表-3に、それぞれ示す。入力パラメータは、周辺地盤で実施した地質調査結果に基づき設定した。境界条件は、アメダスおよびモデル現場周辺で観測している地下水位観測孔から求めた想定地下水位により設定した。二次元移流分散解析には、Dtransu-2D/EL³⁾を用いた。

表-3 入力パラメータおよび境界条件

水理パラメータ					
地質区分	記号	有効間隙率 (%) ⁴⁾	比貯留係数 (1/m) ⁴⁾	透水係数 (m/s)	
沖積層	礫混じり砂	As1	15	3.3×10^{-6}	
	礫混じりシルト・シルト	Ac2		8.1×10^{-7}	
	砂礫	Ag1		3.1×10^{-5}	
洪積層	砂礫	Dg2		3.1×10^{-5}	
	礫混じりシルト・シルト	Dc2		3.1×10^{-6}	
	礫混じり火山灰質砂	Dgs		5.1×10^{-7}	
盛土部	覆土	-		1.0×10^{-5}	
	ヒ素含有ずり	-		1.7×10^{-5}	
	敷土	-		1.5×10^{-6}	
移流分散解析の入力パラメータ					
発生源濃度	0.0125g/day				
分散長	$\alpha = 0.82 (\log_{10} L_p)^{2.446}$				
遅延係数	198 (敷土層)、4100 (沖積層)				
リスク評価地点	事業用地境界および盛土法尻から180m下流の飲用井戸				
境界条件					
設定位置	設定値				
上流側側方境界	固定水頭EL185.6m				
地表部	降雨浸透量43mm/年				
モデル下部	地下水面下-10m程度				
下流側側方境界	固定水頭EL181.7m				

3. 研究結果

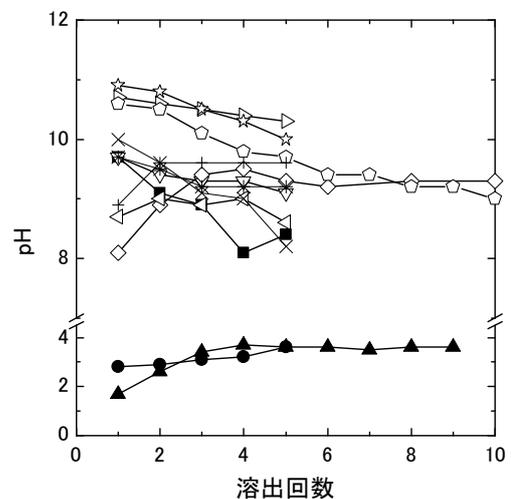
3. 1 自然由来重金属等含有岩石の長期的なハザード評価技術の検討

3. 1. 1 連続溶出試験

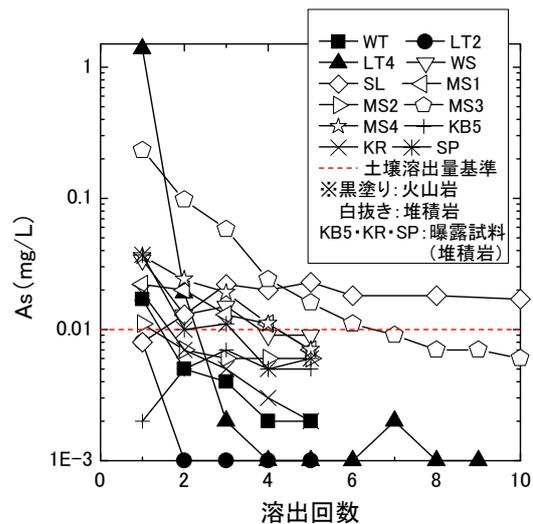
溶出回数と pH、As 溶出量との関係を図-3に示す。同図において定量下限値未満のものは、便宜上、定

量下限値としてプロットした。pH は 4.5 以下の酸性または 8 以上のアルカリ性を示し、すべての試料で As が溶出しやすい環境⁴⁾であった。pH は、SL を除き溶出回数が増加するほどアルカリ性のものは低下する傾向を示し、酸性のものは高くなる傾向を示す。

As は、SL を除き 1 回目の溶出で最大値を示し、その後減少する傾向を示す。また、SL および MS3 を除き溶出回数が 5 回目までには、基準値を下回った。一方、SL では、1 回目の溶出量が基準値以下であったものが、5 回目の溶出で最大値を示し、その後、10 回目まで基準値を超過しながら徐々に減少傾向を示した。



(1) pH



(2) As

図-3 溶出回数と pH、As 溶出量の関係

3. 1. 2 逐次抽出試験

As の逐次抽出試験結果および連続溶出試験において基準値超過分の As 基準値超過総量を表-4 に示す。また、試料毎の各形態で抽出された As の割合を図-4 に示す。なお、表-4 に示す LT2 の As 基準値超過総量は、溶出量基準値を超過していないため、便宜上、溶出回数 1 回目の溶出量とした。

表-4 逐次抽出試験結果および基準値超過総量

試料名	As抽出量 (mg/kg)					As抽出量合計	As累積溶出量 (mg/kg)
	イオン交換態	炭酸塩態	鉄・マンガン酸化物態	有機物態/硫化物態	難溶性鉱物態		
WT	0.978	0.14	0.563	0.580	0.717	2.98	0.151
LT2	19.7	1.41	2.94	2.29	25.2	51.5	0.0744
LT4	25.0	0.867	2.21	30.7	45.3	104	13.8
WS	2.38	0.980	1.64	5.74	2.55	13.3	0.541
SL	4.20	0.956	1.23	6.61	7.25	20.2	1.20
MS1	3.66	0.541	1.09	6.24	6.21	17.7	0.585
MS2	1.75	0.149	0.222	1.87	4.02	8.01	0.102
MS3	8.61	1.34	2.44	4.59	5.09	22.1	3.568
MS4	1.76	0.29	0.232	2.15	4.38	8.81	0.781
KB5	1.87	0.127	0.633	5.47	1.5	9.60	
KR	1.11	0.224	0.709	2.97	3.21	8.22	0.181
YN	0.738	0.0773	0.277	6.05	4.33	11.5	
SP	1.61	0.279	2.41	4.75	2.26	11.3	0.558
DM	0.829	0.114	0.339	7.09	5.82	14.2	
NK	0.617	0.0943	0.448	4.77	4.12	10.1	

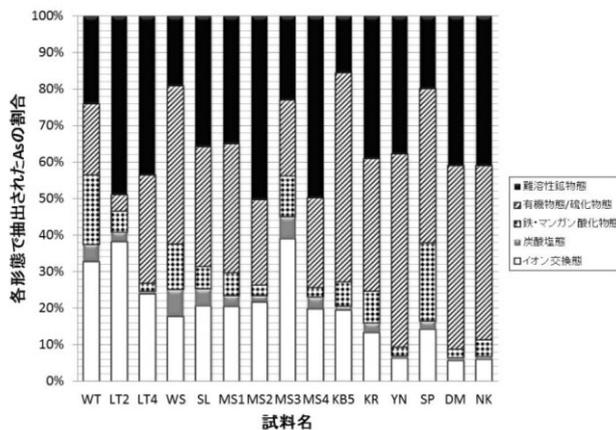


図-4 試料毎の各形態で抽出された As の割合

逐次抽出試験を行ったすべての試料で各形態の As が検出された。図-4 より、イオン交換態は 6.1%~39.0%、炭酸塩態は 0.8%~7.4%、鉄・マンガン酸化物態は 2.1%~18.9%、有機物態/硫化物態は 4.4%~43.2%および難溶性鉱物態は 19.2%~50.2%であった。表-1 および表-4 より、As 累積溶出量は、全含有量の 0.13%~19%であった。また、累積溶出量の最も少ない LT2 に着目すると、既報⁵⁾では As および As を含む硫化物の存在形態の違いによるものと報告したが、水に溶けやすいイオン交換態の抽出量が LT4 と比較してもほぼ同程度であることから、酸性環境下で硫酸カルシウム(石膏)の析出とこれに

ともなう As の共沈・吸着によるものと考えられる。これは、表-1 に示す総硫黄含有量とカルシウム含有量の LT4 との大小関係および既報⁵⁾における LT2 と LT4 の硫酸イオンとカルシウムの溶出傾向から推察される。

3. 1. 3 イオン交換態抽出量と基準値超過総量との関係

基準値を超過する As 基準値超過総量は、pH が酸性を示す LT4 においても、イオン交換態抽出量の 51%であることから、連続溶出試験の初期段階は酸化生成物の溶脱現象を再現していることが考えられる。酸化生成物に起因する成分であるイオン交換態抽出量と基準値超過総量との関係を図-5 に示す。イオン交換態抽出量と基準値超過総量との関係は、LT2 を除けば相関性が高く、As の基準値超過総量は、イオン交換態抽出量の 0.35%~51%であった。このことから、イオン交換態抽出量を求めることにより、As の基準値超過総量、すなわち溶出総量評価の目安となると考えられる。ただし、累積溶出量が最も少ない LT2 のように、硫酸カルシウムの影響により基準値を超過する溶出量が小さく、過大評価となる可能性もある。

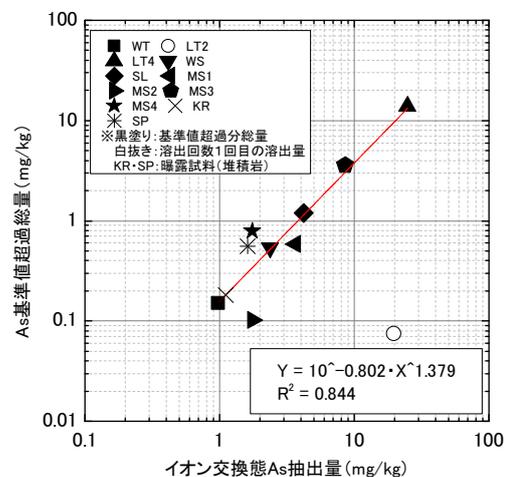


図-5 As のイオン交換態抽出量と基準値超過総量との関係

3. 2 建設発生土の高精度なリスク評価技術の検討

3. 2. 1 現場モニタリング実験結果

(1) 温度、体積含水率、土中酸素濃度、地下水位

盛土・地盤内における温度、土中酸素濃度、体積含水率、地下水位の計測結果を図-6 に示す。なお、地下水位の計測結果に示す降水量は、実験現場周辺に設置されている道路テレメータによる雨量データ

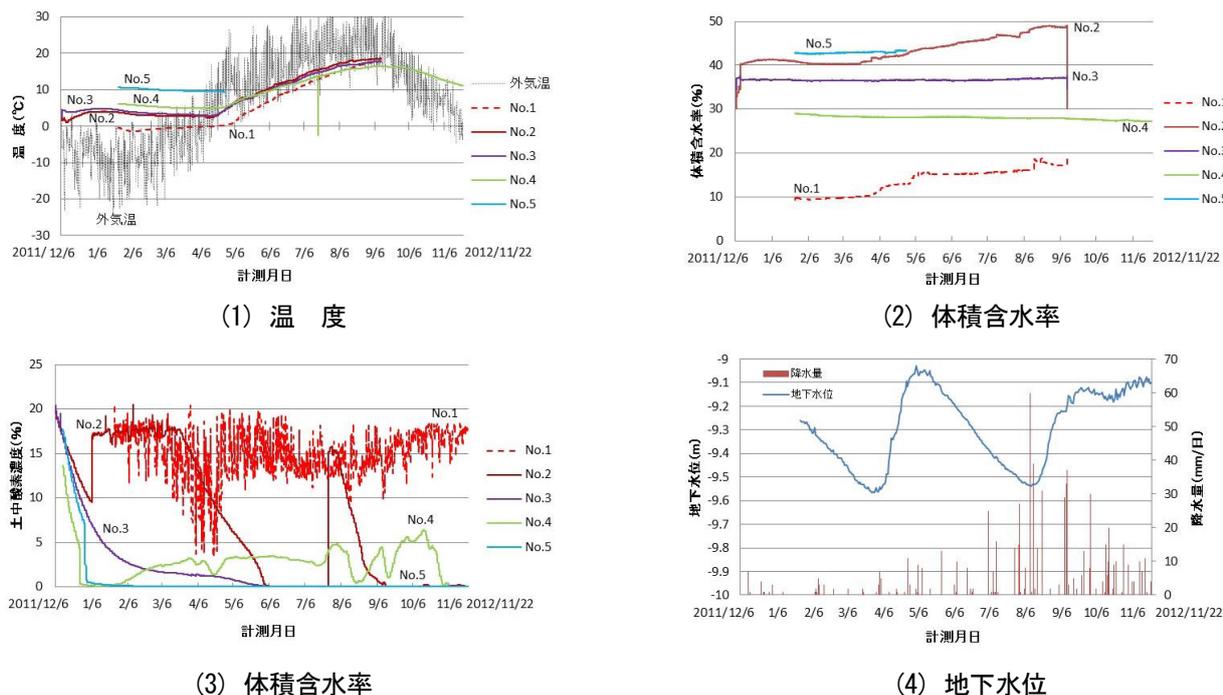


図-6 盛土・地盤内における温度、土中酸素濃度、体積含水率、地下水位の計測結果

を用いた。温度、体積含水率の一部データの欠損については、No.2、3 では計測機器への供給電圧不足、No.5 については原因不明であるが、計測機器の故障によりデータの欠損が生じた。

図-6 に示すように盛土・地盤内の温度は、4 月中旬まで設置深度に応じてほぼ一定であるが、4 月中旬以降は外気温と連動するように推移する。No.5 についてはデータの欠損が生じているが、設置位置が吸着層下部より 4.0m の深度にあるため、温度変化が一定、もしくは緩慢な変化を示すものと推察される。

体積含水率は、盛土内に設置した No.1、2、3 では計測期間の経過とともに上昇する。一方、地盤内に設置した No.4、5 では、概ね一定の体積含水率を示す。吸着層を挟む No.2 と 3 に着目すると、No.2 の体積含水率は計測開始から約 20% 上昇しているのに対し、No.3 では約 3% の上昇である。これは、吸着層の上部で盛土内間隙水が滞留し、一定の浸透速度で吸着層を通過していることを示唆する。

土中酸素濃度は、計測器の設置位置が深くなるほど低下する傾向を示す。盛土内に設置した No.1、2 に着目すると、盛土天端より設置位置の浅い No.1 では酸素濃度の変化が大きく、特に融雪期である 4 月中においては、大きく減少傾向を示す。一方、設置位置が深い No.2 では、No.1 ほどの変化は示さな

いものの、3 月～6 月および 8 月頃に大きく酸素濃度が低下している。これらは、融雪水による還元環境への移行、雨水による酸素の供給という、同じ水の供給でも盛土内環境に与える影響が異なることが推定される。

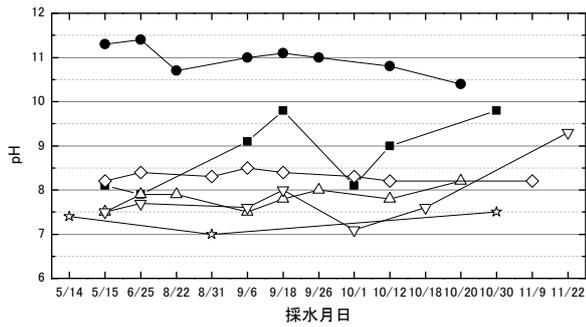
地下水位は、融雪期と降雨による水位の変化が確認されたが、最高水位時でも No.5 より 5m 程下であった。

(2) 間隙水および地下水の水質分析結果

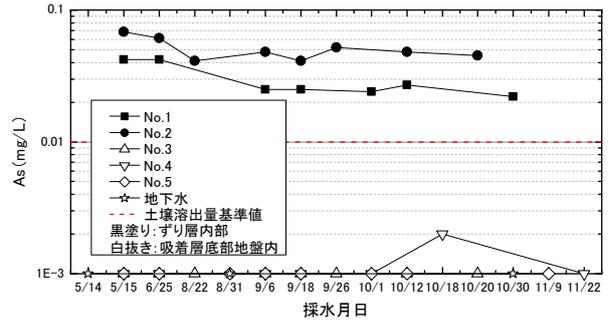
pH、As と採水日の関係を図-7 に示す。定量下限値未満のものは、便宜上、定量下限値でプロットした。同図に示すように、盛土内の pH はアルカリ性を示し、As が溶出しやすい pH 環境⁴⁾であった。No.1 では当初 8.1 であったのが、変動しながら 9.8 まで上昇し、No.2 では当初 11.3 であったのが、10 月には 10.4 まで低下する。地盤内の pH もアルカリ性を示し、7.5～9.3 で推移する。地下水の pH は、7～7.5 の中性～アルカリ性を示す。

盛土内の As は、No.1、2 でいずれも土壌溶出量基準値を超過したが、時間の経過とともに減少している。これは、連続溶出試験の As の溶出傾向と同様の溶出傾向を示している。また、No.1 と 2 を比較して採水深度が深くなると、As 溶出量が大きくなる。地盤内および地下水の As は、定量下限値未満～0.002mg/L であった。吸着層を挟む No.2 と 3 に着目

⑦-3 環境安全性に配慮した建設発生土の有効利用技術に関する研究 (2)



(1) pH



(2) As

図-7 pH、As と採水日の関係

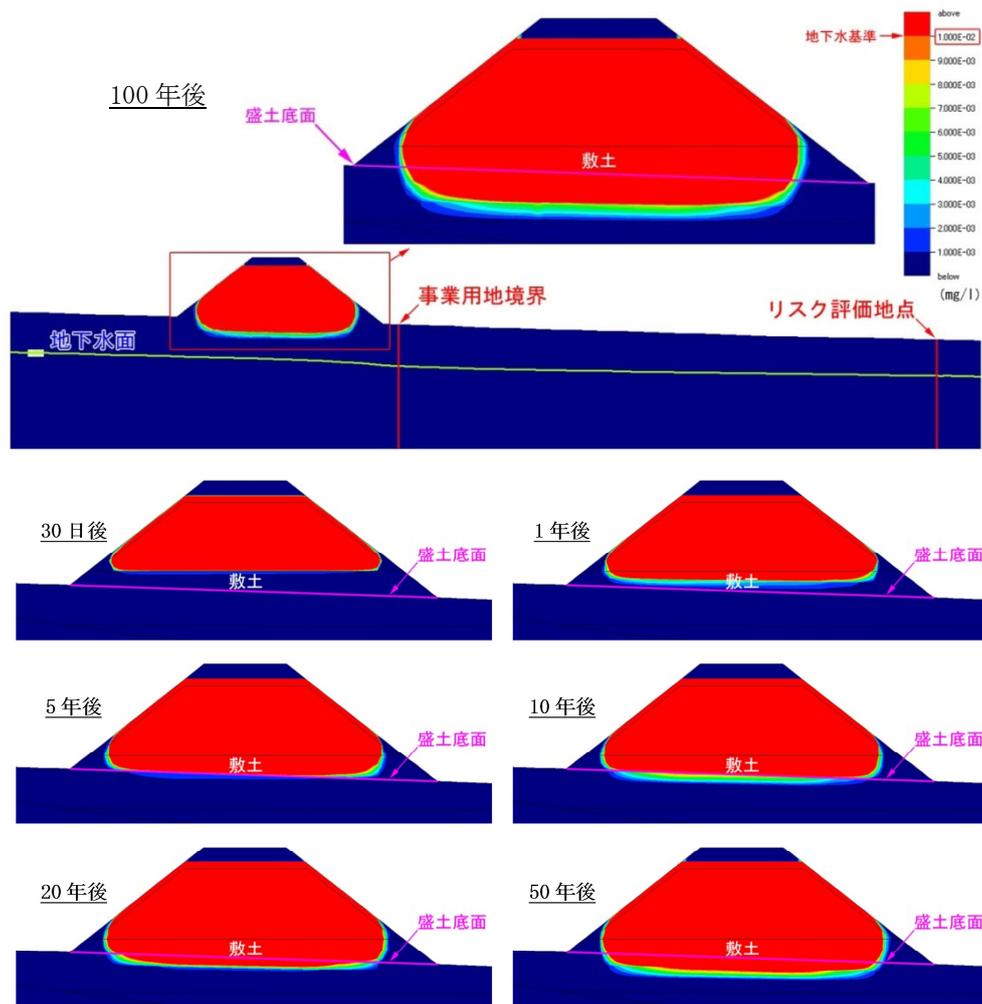


図-8 解析期間 100 年間の As 濃度の変化

すると、吸着層上部の No.2 で基準値を超過していた As が、吸着層下部の No.3 では定量下限値未満であったことから、吸着層の対策効果が確認された。

3. 2. 2 モニタリング実験現場における二次元移流分散解析結果

解析期間 100 年間の As 濃度の変化を図-8 に示す。盛土部直下の濃度分布を見ると、As の基準値超過は

盛土の施工より 10 年まで敷土内に留まるが、20 年で敷土を超え、以後、徐々に不飽和部の鉛直方向へ広がる傾向が見られた。しかし、盛土設置から 100 年間でリスク評価地点および事業用地境界の地下水中の As 濃度は、地下水環境基準値を超えないと評価された。

4. まとめ

本研究では、自然由来重金属等含有岩石の長期的なハザード評価技術の検討の一環として、連続溶出試験と逐次抽出試験を行った。また、建設発生土の高精度なリスク評価技術検討の一環として、現場モニタリング実験および同現場における二次元移流分散解析によるリスク評価を行った。これらの検討結果をまとめると以下のとおりである。

4.1 自然由来重金属等含有岩石の長期的なハザード評価技術の検討

(1) 連続溶出試験における As の溶出傾向は、溶出初回に最大値を示し、溶出回数経過とともに減少するものと、徐々に増加し最大値を示した後、減少するものがあった。

(2) 基準値超過総量の最も少ない LT2 は、水に溶けやすいイオン交換態の抽出量が LT4 と同程度であったことから、酸性環境下で硫酸カルシウムの析出とこれにともなう As の共沈・吸着によるものと考えられた。

(3) As の基準値超過総量とイオン交換態抽出量の関係を整理した結果、イオン交換態抽出量を求めることにより、連続溶出試験において As の基準値超過総量、すなわち As の溶出総量評価の目安となることがわかった。

4.2 建設発生土の高精度なリスク評価技術の検討

(1) 盛土モニタリング実験の結果、吸着層を挟む No.2 と 3 に着目すると、吸着層上部の No.2 で基準値を超過していた As が、吸着層下部の No.3 では定量下限値未満であったことから、本実験期間内においては吸着層の対策効果が確認された。

(2) モニタリング実験現場における二次元移流分散解析の結果、盛土設置から 100 年間でリスク評価地点および事業用地境界の地下水中の As 濃度は、地下水環境基準値を超えないと評価された。

今後の課題として、自然由来重金属等含有岩石の長期的なハザード評価技術の検討では、岩石からの重金属等の溶出総量評価方法の構築に向け、データの蓄積を行い、土研式雨水曝露試験との比較検討を行って行く予定である。また、建設発生土の高精度なリスク評価技術の検討では、現場モニタリング実験を継続し、盛土内から地盤内への移行成分（トレーサー）と移行特性の評価方法について検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 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：国土交通省 HP、2010.3.
<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/recyclehou/manual/index.htm>
- 2) 丸茂克美、江橋俊臣、氏家亨：日本各地の土壌中の重金属含有量と鉛同位体組成、資源地質、第 53 巻、第 2 号、pp.125-146、2003.
- 3) 西垣誠、菱谷智幸、橋本学ほか：飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究、土木学会論文集、No.511、III-30、pp.135-144、1995.
- 4) 鈴木哲也、竹花大介、榊原正幸、板谷利久：重金属を含有する掘削土砂の処理判定と対策、土と基礎、第 52 巻、第 9 号、pp.13-15、2004.
- 5) 田本修一、伊東佳彦、倉橋稔幸、阿南修司、五十嵐敏文：岩石の有害物質溶出に関する考察（その 8）－水質組成と溶出源評価に関する検討一、(社)日本応用地質学会平成 23 年度研究発表会講演論文集、pp.159-160、2011.

UTILIZATION TECHNIQUES OF EXCAVATED WASTE FOR THE SAKE OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION (2)

Budget : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Geological Hazards Research Team

Author : ITO Yoshihiko

KURAHASHI Toshiyuki

OKAZAKI Kenji

INOUE Toyoki

TAMOTO Shuichi

Abstract: In FY2012 we conducted serial batch leaching tests and sequential extraction procedures for the speciation of particulate trace heavy metals in surplus-soil, a field monitoring experiment by adsorption layer, and a risk assessment by two-dimensional convection-dispersion analysis of arsenic in the field monitoring experiment. It was found that the total amount of arsenic elution could be evaluated by a content of ion exchanger by ICP-MS. It also resulted that the adsorption layer absorbed most of leaching arsenic. And the two-dimensional convection-dispersion analysis revealed that a concentration of arsenic in groundwater exceeded value of the environmental quality standards in 100 years embankment installation at site boundary.

Key words: surplus-soil, heavy metal, leaching test, risk assessment, field monitoring experiment