

特集：公共事業に関わる地盤・水質汚染に対する新たな取組み

掘削ずりによるヒ素汚染対策としての覆土処理に関する現場実験

田本修一* 阿南修司** 伊東佳彦***

1. はじめに

道路建設事業における土壤汚染対策工は、シート等による遮水による汚染拡散防止対策が主体となっているが、費用が高く全体工事費の大幅な増加の要因となっている。

ヒ素や鉛などの重金属類は土壤による吸着効果が大きい。このため、重金属類を含有する岩石ずりなどを覆土することによって、降雨による水の浸透と酸素の侵入を抑制し重金属類の溶出を低減させるとともに、岩石ずりから溶出した重金属類は敷土への吸着により外部への溶出濃度を低減されると期待される。

本レポートでは、経済的な汚染拡散防止対策の確立のため、ヒ素（以下、Asという）が溶出するトンネル掘削による岩石ずりを用いて、現地発生土等の覆土によるAsの溶出抑制効果を検討するため、北海道開発局内の道路建設現場で実施した現場実験結果について報告する。

2. 実験方法

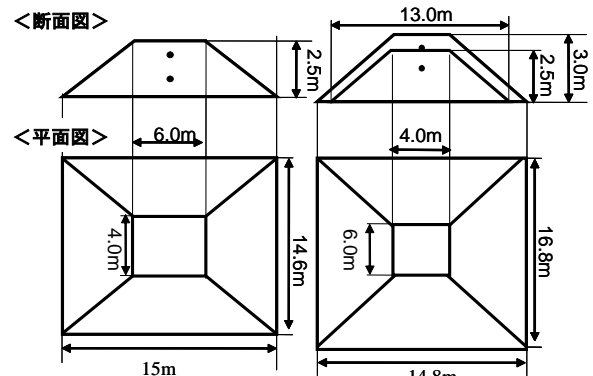
2.1 現場実験

現場実験は、北海道開発局旭川開発建設部管内一般国道450号旭川紋別自動車道上川町中越地区において行った。実験期間は平成17年12月～19年7月である。実験は、表-1に示す通り無対策のケース1と複数の異なる材料を用いて覆土したケース2～4の合計4ケース実施した。盛土形状を図-1に示す。盛土内に設置した計測機器は、土中水分量（体積含水率）、地温、酸素濃度であり、各計測機器は図-2に示す通り盛土天端から0.5m、1.5mの深度で埋設した。また、実験期間中の盛土内間隙水を分析するため、計測機器と同深度に土壤溶液採取器を全ケースに設置し、盛土底部からの浸出水を採水するため、集水容器を設置した。実験に用いた掘削ずり（粘板岩）は、表-2に示す通りAs含有量が

10.5mg/kgを示し、振とう速度以外を公定法（平成15年環境省告示第18号）に準じた溶出試験結果は0.011mg/Lを示した。採水中のAsは、水素化物発生プラズマ発光分析法（ICP-AES法）により測定した。なお、盛土底部からのAs流出拡散防止のため、底部には二重の遮水シートを敷設した。

表-1 実験ケース一覧

ケース	路体材料	路体乾燥密度 (g/cm ³)	路体透水係数 (cm/s)	覆土材料	覆土乾燥密度 (g/cm ³)	覆土透水係数 (cm/s)
1	掘削ずり (粘板岩)	1.99	3.22 × 10 ⁻²	—	—	—
2				床掘土	1.19	2.11 × 10 ⁻⁴
3				購入土	1.52	9.06 × 10 ⁻⁴
4				購入土 + 3%ウッドチップ	1.44	7.63 × 10 ⁻⁴



a) ケース1 b) ケース2・3・4

図-1 盛土の形状

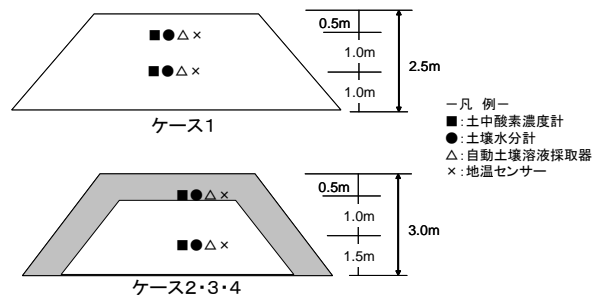


図-2 計測機器の設置位置

表-2 蛍光X線分析結果及び溶出試験結果

試料	掘削ずり (粘板岩)	
	項目	値
蛍光X線	As (mg/kg)	10.5
	S (wt.%)	0.27
	Fe ₂ O ₃ (wt.%)	5.43
	Al ₂ O ₃ (wt.%)	12.1
	CaO (wt.%)	1.59
溶出	As溶出量※ (mg/L)	0.011
	pH	8.3

※振とう速度：120rpm

2.2 バッチ式吸着試験

覆土を施した盛土底部からのAs溶出拡散評価のため、現場実験で用いた試料を使いバッチ式吸着試験及び逐次溶出試験を行った。試験に用いた試料の物理特性を表-3に示す。

表-3 各試料の物理特性

試料名	床堀土	購入土	掘削ずり(粘板岩)
自然含水比 $W_n(\%)$	25.9	26.1	15.4
風乾試料含水比 $W_{dry}(\%)$	13.0	8.8	-
土粒子の密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.649	2.615	2.751
平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	0.0939	0.488	6.64
均等係数 U_e	164.4	150.4	917.4
細粒分含有率 $F_c(\%)$	47.4	21.6	14.3
地盤材料の分類	SCs	SCsG	GS-Cs

バッチ式吸着試験は、20～25℃の温度条件で粉碎した粘板岩50gに脱イオン水500mLを加え、往復振とう機を用いて約200rpm、6時間、24時間及び14日間の振とうを行った。振とう後の各溶出液の遠心分離を行い、溶出液を取得した。その後、吸着試験を実施するため床堀土、購入土を固液比1:10となるよう溶出液内に投入し、4時間振とう後、遠心分離を行い0.45 μm メンブレンフィルターによって固液分離を行った。ろ液中のAsをICP-AES法により分析した。吸着前後のAs濃度変化から各試料への吸着量を求めた。

2.3 逐次溶出試験

逐次溶出試験は、20～25℃の温度条件で粉碎した粘板岩15gに脱イオン水150mLを加え、往復振とう機を用いて約120rpmで1日間の振とうを行った。振とう後、遠心分離を行い0.45 μm メンブレンフィルターによって固液分離し、岩石試料に再び脱イオン水150mLを加え溶出試験を10回繰り返し、ろ液中のpHの測定及びAsをICP-AES法により分析した。

3. 実験結果

3.1 現場実験

実験結果の例として、各計測機器の観測結果を図-3に、水質分析結果を図-4にそれぞれ示す。実験結果の詳細は田本ほかを参照されたい。図-3より、盛土内の地温は冬期間でも氷点下とはならず、酸素濃度は無対策のケースと比較して、覆土を施したケースで夏期に大きく減少し冬期に十分には回復しないことが判明した。す

なわち、覆土を施したケースでは、覆土で外気と遮断されることにより酸素の流通が制限されることが確認された。また、雨水や融雪水に

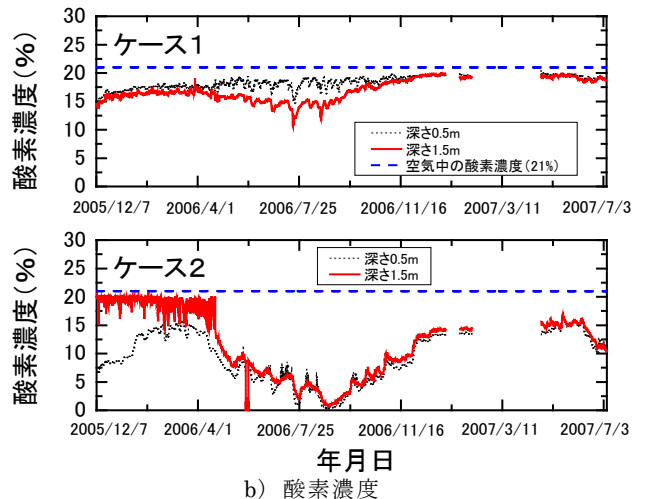
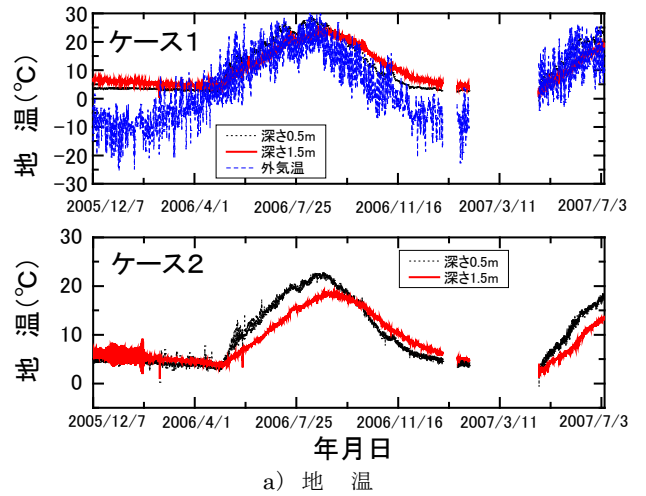


図-3 観測機器の計測結果例 (ケース1・2)

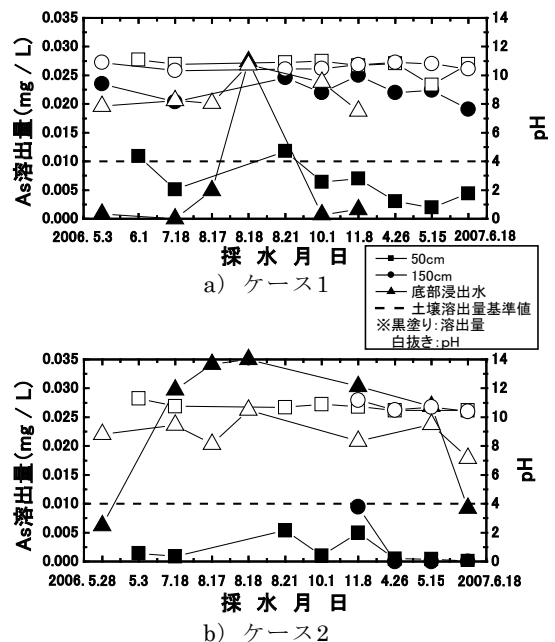


図-4 水質分析結果例 (ケース1・2)

よって盛土内の環境が、嫌気的な環境と好気的な環境の季節変動を繰り返すものと考えられる。

図-4より、盛土内部のAs溶出量は無対策及び覆土を施したケースで土壤溶出量基準値を超過し、pHは10~11のアルカリ性を示した。この結果、覆土のみによる対策ではAsの流出拡散を抑止できないため、敷土に吸着層などの重金属移行抑止層を設ける必要があると考えられる。

3.2 バッチ式吸着試験

吸着量 q は、(1)式²⁾により求めた。また、分配係数 K_d はAsの固液相濃度がヘンリー式で表現されるものと仮定し、(2)式により求めた。

$$q = \frac{(C_0 - C_e) \times L \times 1000}{W \times \left(1 / \left(1 + W_{dry} / 100 \right) \right)} \dots (1)$$

$$q = K_d \times C_e \dots (2)$$

ここで、 q は吸着量、 C_0 は初期濃度、 C_e は平衡濃度、 L は溶液量、 W は試料土量である。なお、試料土乾燥質量比 W_{dry} は表-3の風乾試料含水比より求めた。

表-4 吸着試験結果

試料名	振とう後 pH	As濃度 (mg/L)		試料土乾燥質量比	吸着量 q (mg/kg·dry)	分配係数 K_d (L/g)
		初期濃度 C_0	平衡濃度 C_e			
床掘土6H	8.7	0.009	0.001	0.885	0.0904	90
床掘土24H	8.6	0.025	0.001		0.271	271
床掘土14DAY	8.3	0.005	0.001		0.0452	45
購入土6H	8.7	0.009	<0.001	0.919	-	-
購入土24H	8.5	0.025	0.001		0.261	261
購入土14DAY	8.2	0.005	<0.001		-	-

吸着試験結果を表-4に示す。試験用溶液の初期濃度は粘板岩の溶出期間によって異なり、24時間溶出操作を行ったAs濃度が最大で0.025mg/Lを示した。これは、水酸化鉄を含む岩石中の粘土鉱物がpHの変化によって吸着と解離の両面の性格を有するため、長期間の溶出操作により吸着剤として作用した可能性が考えられる。

本試験で得られた K_d の最大値は床掘土で271L/g、購入土で261L/gとなった。このことから、覆土材料に使用した床掘土及び購入土は、Asの吸着能を有していることが確認された。

3.3 逐次溶出試験

溶出水中のAs濃度とpHの変化を図-5に示す。As濃度は初回の溶出時に最大値を示し、溶出

回数とともに徐々に減少する。このことから、実現場においては岩石に接触する水が増加することによりAsの溶出量が減少していくと考えられる。溶出回数によってpHは大きく変化せず、pH7.7~8.4の弱アルカリ性を示した。

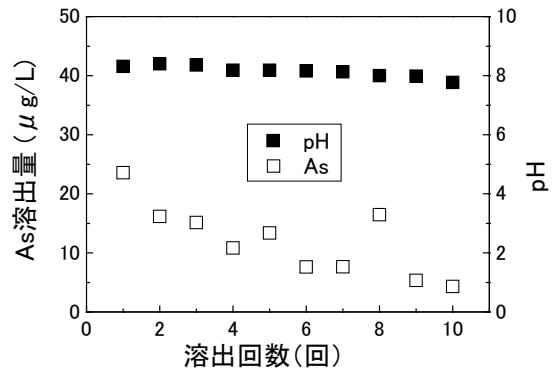


図-5 掘削ずりの溶出回数とAs溶出量・pHの関係

4. Asの溶出・拡散評価

これまでの実験結果を踏まえ、ずりからのAs溶出と覆土材料を敷土として用いた場合のAs吸着を考慮し、敷土外部へのAs漏洩量を評価した。漏洩量の評価に際しては、1次元移流拡散方程式のステップ入力に対する解析解における下記の近似式³⁾に、逐次溶出試験結果を踏まえたずりからのAs溶出濃度を与えて解析した。

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x - \left(\frac{v}{R_f} \right) \cdot t}{2\sqrt{(D/R_f)t}} \right\} \dots (3)$$

$$R_f = 1 + \frac{\rho_d}{\theta} K_d \dots (4)$$

ここで、 C は敷土下部からの漏洩濃度、 x は距離、 v は浸透速度、 R_f は遅延係数、 D は分散係数、 t は時間、 ρ_d は乾燥密度、 θ は体積含水率である。

表-5に示す入力値を用い、逐次溶出試験結果から実際の降雨浸透量を考慮し図-6に示すずり

表-5 パラメータ入力値

パラメータ		入力値	
		床掘土	購入土
ずり層	層厚 (m)	2.5	
	体積含水率 θ	0.3	
敷土層	層厚 (m)	0.5	0.5
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.16	1.2
	体積含水率 θ	0.2	0.2
	分配係数 K_d (L/g)	271	261
	分散係数 D (m ² /y)	0.3	0.3
有効降雨量 v (mm/y)		365	

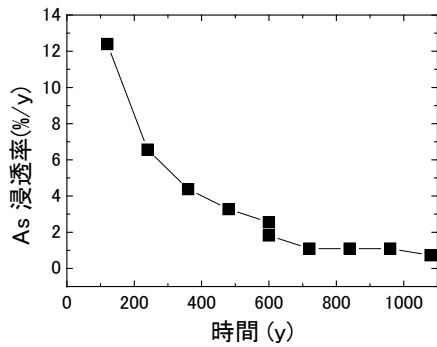


図-6 経年変化とAs浸透率の関係

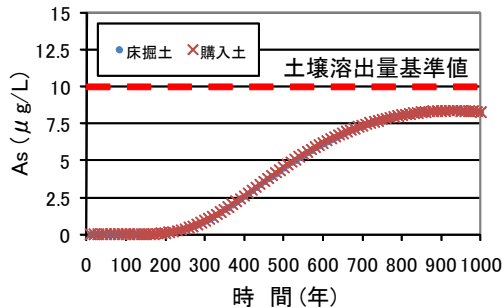


図-7 敷土底部からのAs漏洩解析結果

からのAs浸透量を設定した。ここで、分配係数 K_d は吸着試験の最大濃度における吸着量から算定した値を採用した。

これらを入力条件とした敷土底部からのAs漏洩解析結果を図-7に示す。この図より、十分な濃度低減が期待できる結果となった。いずれの場合も、細粒分を含む現地発生土を用いることによりAs漏洩濃度の低減が可能であり、Asを含有する掘削ずりの処理対策の合理化を図ることができる。ただし、 K_d を求めるための吸着試験は大気条件下で行った試験であり、覆土を施した盛土内の酸素濃度は夏期には5%以下の還元的環境下になる。今後、同環境下におけるAsの溶出挙動及び吸着能を明らかにする必要があるものとする。

5. まとめ

本レポートでは現場実験を行い、以下の知見が得られた。

- ・盛土内の地温は冬期間でもプラス温度を示し、酸素濃度は無対策のケースと比較して、覆土を施したケースで夏期に大きく減少し冬期に十分には回復しないことが判明した。

- ・盛土内のAs溶出量は、無対策及び覆土を施したケースの両方で土壤溶出量基準値を超過した。

- ・Asの溶出・拡散評価を行うために実施した室内試験では、覆土材料に使用した床掘土及び購入土は、Asの吸着能を有し、ヘンリー式で仮定することにより表現が可能であった。

- ・室内試験結果より実施したAsの溶出・拡散評価では、細粒分を含む現地発生土を用いることによりAs漏洩濃度の低減が可能であったことから、現地発生土の吸着効果を利用した処理対策が有効であることが明らかとなった。

謝 辞

本実験は北海道大学、(独) 土木研究所寒地土木研究所の共同研究「自然由来の重金属による汚染岩石の地盤汚染対策工に関する研究」で行われたものである。ここに、本実験にご協力頂いた関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) (独) 土木研究所：建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル、123p、鹿島出版会、2004
- 3) Bear, Y.: Hydraulics of Groundwater, McGraw Hill, 1979

田本修一*



独立行政法人土木研究所寒地土木研究所寒地基礎技術研究グループ防災地質チーム 研究員
Shuichi TAMOTO

阿南修司**



独立行政法人土木研究所寒地土木研究所寒地基礎技術研究グループ防災地質チーム 上席研究員(特命事項担当)
Shuji ANAN

伊東佳彦***



独立行政法人土木研究所寒地土木研究所寒地基礎技術研究グループ防災地質チーム 上席研究員、工博
Dr. Yoshihiko ITO