

シールド工事での自然由来重金属含有土の浄化技術

一分級洗浄と鉄粉処理を用いた泥水シールド排泥の砒素汚染土浄化

Clarification System of Natural Heavy Metals Containing Soil in Shield Tunneling Site

- Purge of Arsenic-contaminated Soil in Slurry Shield Tunneling with Classification and Magnetic Separation -

今井亮介* 白石祐彰** 小河篤史* 吉田英典***

要旨

近年、シールド工事で砒素や鉛等の自然由来の重金属に遭遇する問題が顕在化している。これらを汚染土壌等として場外搬出処分すると膨大な費用がかかるとともに、最終処分場への負荷が増大することが問題となる。そのため、シールド工事で遭遇する重金属含有土壌の浄化技術の開発と実用化の検討を行った。本技術は、泥水シールド工法の処理プラントに土壌の分級洗浄設備、および砒素や鉛等の重金属を吸着する鉄粉を混合攪拌して回収する設備を付加して、工事で発生する排泥の浄化を行うものである。今回は、東北地方のシールド工事で発生した土壌溶出量基準を超過する砒素を含む排泥を用いて、室内試験と実験プラントによる実規模実験を実施した。その結果、本技術で排泥に含まれる砒素を基準以下まで浄化できることを確認した。また、実規模のシールド工事を想定して、処理プラントの検討と処理費用の算定を行った。その結果、一定量以上の浄化処理を行えば、汚染土壌等として場外搬出処分する方法より、工事費用を削減できることを確認した。

キーワード：泥水シールド、自然由来重金属、砒素、浄化、分級洗浄、鉄粉

1. はじめに

我が国には、砒素や鉛等の自然由来による重金属を含む土壌が広く分布している。そのため、建設発生土や工事排水に含まれる自然由来の重金属等による環境リスクの問題は 1990 年代より増加し始め、2003 年に土壌汚染対策法が施行される中で、より注目されるようになった。2010 年には、同法の改正で自然由来重金属等含有土壌が規制対象となり、今日、これらの問題の解決は建設工事における必須の検討課題となっている¹⁾。

土壌汚染対策法は、一定の手順によって基準不適合土壌が存在するとみなされた土地を要措置区域等と指定し、その区域の土壌に対する措置の方法や搬出される汚染土壌の管理方法を定めている。そのため、トンネル等のこれら区域に指定されない土地から発生する土壌は同法の対象外として扱われる。しかし、同法の改正時には、区域に指定されない土地であっても、基準不適合土壌の運搬やその処理に当っては汚染土壌と同等の扱いをするべきであるとの施行通知が出されている（土壌汚染対策法

施行通知、環水大土発 100305002 号、平成 22 年 3 月 5 日）。また、多くの自治体の条例では基準に適合しない建設発生土の埋め立てを認めていない。そのため、基準不適合土壌は、同法で許可を得た汚染土壌処理施設へ搬出されることが多い。

また、建設汚泥の再生利用に関するガイドライン（建設汚泥の再生利用に関するガイドラインの策定について、国官技第 46 号、平成 18 年 6 月 12 日）では、土壌環境基準、または土壌汚染対策法に基づく土壌含有量基準に適合しない建設汚泥は再生利用の対象外とされている。そのため、基準に適合しない建設汚泥はセメント工場や管理型の処分場等に搬出されることが多い。

このような状況の中で、シールド工事等の建設現場で基準を超過する土壌や建設汚泥が発生した場合、その処分に多額の費用がかかってしまうことになる。

そこで、筆者らは多量の建設発生土や建設汚泥が発生するシールド工事のコスト削減と最終処分場への負荷の低減を目的とし、発生土や汚泥から有害な重金属を取り除く浄化技術の検討を行った。

* 土木本部環境技術室 ** 技術研究所環境研究グループ *** 東日本支社土木第 1 部

その中で、重金属等による汚染土壌の洗浄プラントと機能が類似する泥水シールド工法のプラントに比較的安価に浄化設備を付加することができることに着目した。

そこで、分級洗浄設備と重金属を吸着する鉄粉の混合攪拌と磁力選別機による回収設備を処理プラントに付加して、泥水シールド工事で発生する排泥を浄化する技術の検討を行った。さらに、その技術の実証実験を行い、その効果と適用性を検証した。また、試験結果に基づいて、実規模プラントの設計とコスト試算を行ったので、これらの内容を報告する。

2. 浄化技術の概要

2.1 浄化設備の全体構成

一般的に泥水シールド工法の処理プラントでは、シールドマシンから輸送される排泥を振動ふるいとサイクロンを用いて、粗粒分（75 μ m以上）と細粒分（75 μ m未満）を含む泥水に分離する。粗粒分は一次処理土としてプラントから排出され、建設発生土として盛土等の埋め立てに利用される。細粒分を含む泥水は貯泥槽に貯蔵され、再びシールドマシンの切羽に循環されるが、余剰分はフィルタープレス等の脱水機械で処理され、二次処理土（脱水ケーキ）として排出される。これらの二次処理土は産業廃棄物（建設汚泥）として処理される。

本技術は、泥水シールド工法の処理プラントに分級洗浄設備と鉄粉の混合攪拌設備と回収設備を付加するものである。粗粒分は分級洗浄設備で分級洗浄し、細粒分を含む泥水には鉄粉を混合攪拌した後、磁力選別機により鉄粉を回収する。これら2つの機能により、土壌中の重金属を土壌溶出量基準以下まで低減させることができる。排泥の処理プラントの概要を図-1に示す。

2.2 分級洗浄

一般的に自然由来の重金属含有土は人為的な汚染土壌に比べて、砒素等の重金属の含有量は少ない。土壌溶出量（環境省告示第18号）が環境基準の数倍程度であり、土壌含有量（環境省告示19号）が基準を超えることは殆どない。また、粒径が細くなるほど単位重量当たりの砒素の溶出量は多くなる。そのため、75 μ m未満の細

粒分を分離すれば、諸基準を超過することは少ないと考えられている。しかし、プラントで用いられるサイクロンで分離した一次処理土は75 μ m未満の細粒分が若干混在し、土壌溶出量基準を超過してしまうおそれがある。そのため、一次処理土を分級洗浄機（スパイラルウォッシュャー）で再洗浄して細粒分を取り除く。

2.3 鉄粉浄化処理

水中で鉄粉は、その表面に含水酸化鉄を生成する。含水酸化鉄は砒素や鉛等の重金属イオンを捕捉しながら結晶化する。この性質を利用し、75 μ m未満の細粒分を含む泥水に、砒素や鉛を吸着する鉄粉を混合攪拌した後、ドラム型磁力選別機により鉄粉を回収する。鉄粉による重金属浄化の概念を図-2に示す。

実証実験では、JFE ミネラル株式会社が開発した重金属吸着鉄粉（MSI-X）を使用した。本製品による自然由来の砒素を含む土壌（土壌溶出量0.030mg/L）のビーカーテストでは、鉄粉を10回転用いて、すべての処理土壌の分析で溶出量を環境基準以下に低減できたと報告されている。重金属吸着鉄粉（MSI-X）を写真-1に、その物性を表-1に示す²⁾。

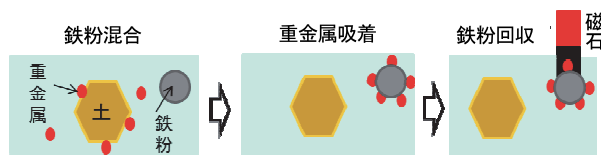


図-2 鉄粉による浄化の概念

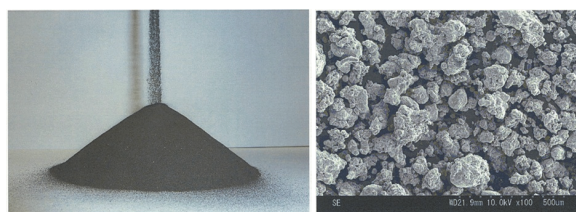


写真-1 重金属吸着鉄粉（MSI-X）

表-1 重金属吸着鉄粉（MSI-X）の物性

成分	外観	粒径	嵩比重	pH
Fe98%以上	暗灰～黒色	Av.130 μ m	Av.3.0g/cm ³	6～8

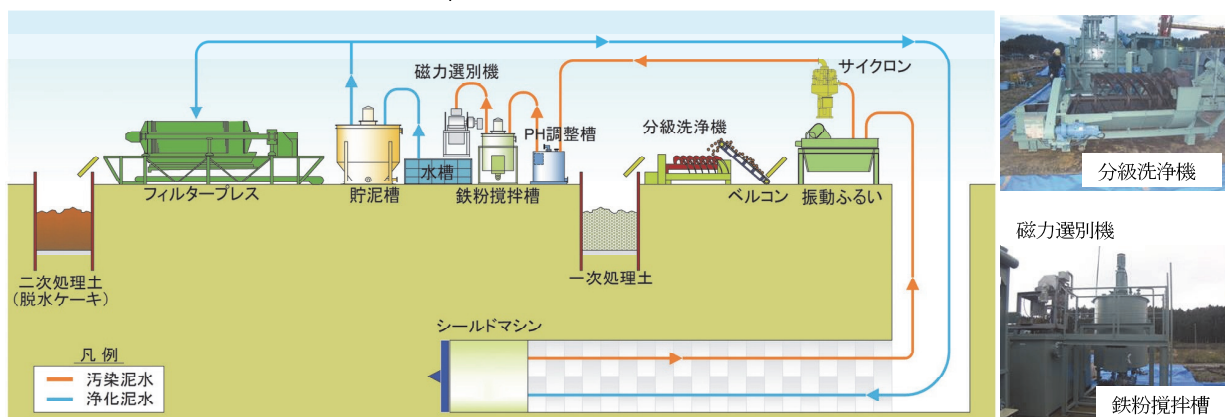


図-1 処理プラントの概要

3. 室内試験及び実証実験

3.1 浄化対象土壌

室内試験および実証実験の試料には、東北地方の泥水シールド現場で発生した一次処理土とサイクロンを通して泥水を再び混合し、シールドマシンから圧送されてきた排泥を再現したものを使用した。再現した排泥の物性値を表-2に、排泥中の土粒子の分析値を表-3、図-3に示す。なお、排泥の pH は 9.2 と高い値を示した。排泥に裏込材のセメント分が若干混入していたためと考えられる。

表-2 再現した試験用排泥の物性値

項目		一次処理土	泥水
混合前	比重	1.8t/m ³	1.2t/m ³
	混合比	体積比	1
		重量比	1
混合後	pH	9.2	
	含水率	68%	

表-3 再現した排泥の土粒子の分析値

項目	分析値	基準値	分析方法
土壌溶出量 (砒素及びその化合物) (mg/L)	0.012~0.015	0.01	環境省告示第18号
土壌含有量 (砒素及びその化合物) (mg/kg)	2.5	150	環境省告示第19号
土壌中の鉄の全含有量 (mg/kg)	35000 (3.5%)	なし	底質調査法
粒度分布	図-3 参照		レーザー法+ふるい法

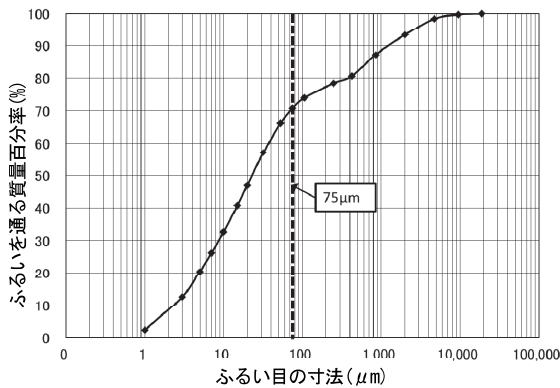


図-3 排泥の粒度分布

3.2 室内試験

実証実験に先立ち、室内試験を行い、分級洗浄と鉄粉の混合・磁力回収の効果および pH の調整による鉄粉の浄化効果を確認した。

a. 分級試験

(a) 試験目的と方法

分級洗浄による浄化の効果を確認するために、以下の手順で試験を行った。

- i. 2L ポリ容器に再現した排泥を 1,290g 入れ、2 時間振とうする

- ii. 泥水を目開き 75μm 篩でふるう

- iii. 篩を通過した泥水を遠心分離機により、土壌と水に分離する

- iv. 分級した土壌の砒素溶出量を分析する

(b) 試験結果

分級した土壌の分析結果を図-4に示す。粗粒分(75μm 以上)の土壌の砒素溶出量は 0.006mg/L と土壌溶出量基準を下回る結果が得られた。一方、細粒分(75μm 未満)の土壌の溶出量は 0.038mg/L と高い値を示した。

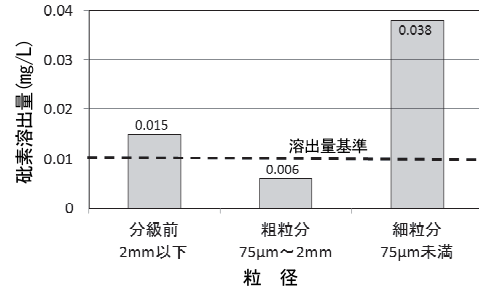


図-4 分級した土壌の分析結果

b. 鉄粉による砒素浄化試験

(a) 試験目的と方法

砒素の濃度が高い値を示す細粒分(75μm 未満)の鉄粉による浄化効果を確認するために以下の手順で試験を行った。

- i. 500mL ポリ容器にサイクロンを通して泥水 240g を入れ、泥水中の土粒子(乾土)に対し、重量比で 5%、10%の鉄粉(MSI-X)を入れる
- ii. ポリ容器を 10 分振とうする
- iii. 泥水をポリバケツに入れ、磁石で鉄粉を取り除く
- iv. 遠心分離機により泥水を土壌と水とを分離する
- v. 磁石で取り除くことのできなかった微鉄粉が遠心分離により沈降管の底に沈むので、沈降管上部の土壌を採取する
- vi. 分離した土壌の砒素溶出量を分析する

(b) 試験結果

鉄粉による浄化処理を行った土壌の分析結果を図-5に示す。鉄粉の添加に比例して、砒素の溶出量が低減することを確認した。5%の添加では土壌溶出量基準を満たすことはできなかったが、10%添加すれば基準を下回る結果が得られた。

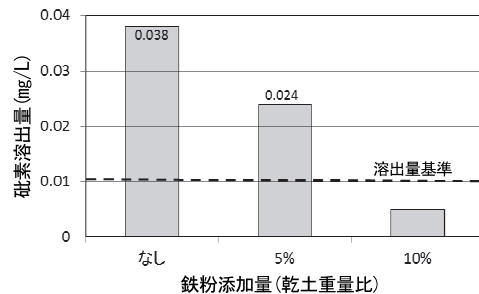


図-5 鉄粉による浄化処理した土壌の分析結果

c. pH調整による鉄粉量低減試験

(a) 試験目的と方法

前述した鉄粉による浄化試験で、細粒分の砒素の浄化効果が確認された。しかしながら、試験に使用した試料のpHが9.2と高いため、鉄粉の添加量を低減することにより浄化費用の低減を図ることを目的とし、鉄粉処理にpHの調整を合わせて砒素の浄化効果を確認した。以下に試験方法を示す。

- i. 500mL ポリ容器にサイクロンを通じた泥水240gを入れ、64%硫酸を添加し、泥水のpHを7、6、4付近に調整し、泥水中の土粒子（乾土）に対して、重量比で5%の鉄粉（MSI-X）を入れる

ii~vi. 「b. 鉄粉による砒素浄化試験」と同じ

(b) 試験結果

pH調整と鉄粉による浄化処理を行った土壌の分析結果を図-6に示す。試料を中性（pH7）に調整し、鉄粉を5%添加した場合、細粒分の砒素溶出量が基準を下回る結果（0.006mg/L）が得られた。また、酸性（pH6および4）に調整すると、さらに低減する結果（定量下限値0.005mg/L以下）が得られた。

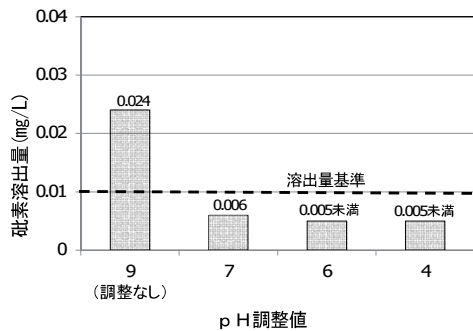


図-6 pH調整と鉄粉処理を行った土壌の分析結果

3.3 実証実験

前述する室内試験で、分級洗浄と鉄粉混合・回収による自然由来の砒素含有土壌の浄化効果を確認できた。そこで、実工事を模擬したプラントによる実証実験を実施した。

a. 実験方法

(a) 実験概要

実証実験では、泥水シールド工事の排泥処理の一連の工程を模擬した実験プラントを用いて、シールド現場から輸送した砒素を含む排泥約34m³の浄化処理を行った。実験概要を表-4に、実験プラントを写真-2に示す。実験では、室内試験と同様にpH調整と鉄粉の添加量による浄化効果を確認するとともに、磁力選別機を通過する泥水の流量と回数を変化させ、鉄粉の回収能力を把握した。

(b) 実験手順及び使用機械

図-7に実験のフローを示す。

表-4 実証実験概要

期間	平成28年11月24日～12月24日	
実験場所	宮城県大崎市奥村組三本木倉庫	
試験試料	東北地方の泥水シールド現場から輸送した排泥および一次処理土（物性値は3.1参照）	
浄化処理量	排泥約2m ³ ×17ケース=34m ³	
パラメータ	鉄粉添加量（%一乾土重量）	なし、5、10
	鉄粉攪拌時間	10分
	pH調整	なし、7、4
	磁力選別機通過時間（L/min）	50、100、150
	同通過回数	1回、2回



写真-2 実証実験プラント

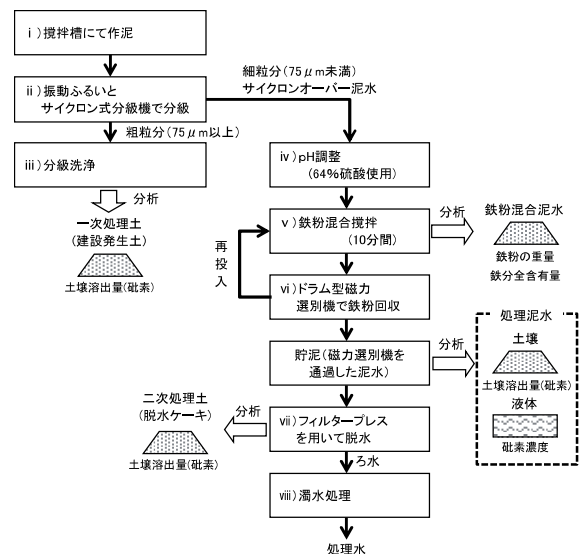


図-7 実証実験処理フロー

i) 作泥

攪拌槽を用いて、現場より搬入した一次処理土と細粒分を含む泥水を混合攪拌（混合比：3.1参照）し、工事で発生した排泥を再現する（写真-3）。

ii) 分級

振動ふるいとサイクロンを用いて、一次処理土と泥水と分離する（写真-4）。

iii) 分級洗浄

分級洗浄機（スパイラルウォッシャー）を用いて、一次処理土を分級洗浄する（写真－5、6）。

iv) pH 調整

pH 調整槽にて、サイクロンで分離された泥水が所定の pH になるまで、希硫酸を添加する（写真－7）。

v) 鉄粉混合攪拌

pH を調整した泥水に鉄粉（MSI-X）を投入し、鉄粉攪拌装置を用いて、10 分間攪拌する（写真－8、9）。

vi) 鉄粉回収

鉄粉を混合攪拌した泥水を、所定の流量でドラム型磁力選別機に投入し、砒素を吸着した鉄粉を回収する。本実験では、磁選機を通過した泥水を再度投入して鉄粉の回収効果を確認した（写真－10）。

vii) 脱水

フィルタープレスを用いて、磁力選別機を通過した泥水を脱水して、二次処理土（脱水ケーキ）を排出する（写真－11、12）。

viii) 濁水処理

フィルタープレスから排出されるろ水は濁水処理装置で水処理を行い、分級洗浄設備で再利用した。



写真－3 作泥(排泥再現)



写真－4 分級



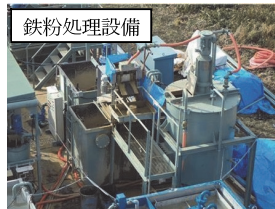
写真－5 分級洗浄



写真－6 分級洗浄処理



写真－7 pH調整



写真－8 鉄粉処理



写真－9 鉄粉攪拌翼



写真－10 鉄粉回収(磁力選別)



写真－11 脱水



写真－12 二次処理土

(c) 分析

実験での分析対象と分析項目を表－5に示す。

表－5 分析対象と分析項目

分析対象	分析項目
一次処理土	砒素の土壌溶出量（環境省告示第18号※1）
磁力選別機を通過した泥水	①遠心分離器で土壌と液分に分離 ②分析 土壌分：砒素の土壌溶出量（同上） 液分：砒素濃度（JIS K 0162 61.2）
二次処理土	砒素の土壌溶出量（同上）
鉄粉回収量※2	泥土混じり鉄粉の重量 泥土混じり鉄粉の鉄全含有量（底質調査法）

※1 土壌溶出量 0.005mg/L 未満の値は測定器の検出値であり、分析会社の定める定量下限値以下である。

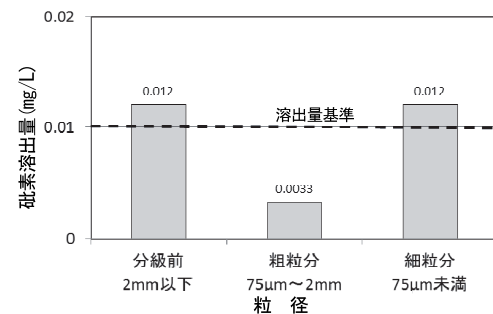
※2 磁選機から排出される鉄粉には、土粒子が混在するため、鉄粉の回収量は泥土混じりの鉄粉の重量と鉄の全含有量より、以下の計算式で算出している。

$$\text{鉄粉回収量} = \text{泥土混じり鉄の回収重量 (kg-乾土当り)} \times \text{鉄粉の全含有量 (\%)} \times \{97\% (\text{鉄粉中の鉄分配比率}) \div 85\% (\text{使用前鉄粉の鉄全含有量の分析結果})\}$$

b. 実験結果

(a) 分級洗浄効果

振動ふるい、サイクロン、分級洗浄設備により排出された粗粒分（75μm 以上）と泥水に含まれる細粒分（75μm 未満）の砒素の溶出量の分析結果を図－8に示す。洗浄分級された粗粒分の溶出量は 0.0033mg/L（6 検体 0.0030～0.0039mg/L の平均値）であり、元土の 1/3～1/4 程度まで低減された。



図－8 分級した土壌の砒素溶出量

(b) pH 調整と鉄粉処理による効果

サイクロンを通過した細粒分を含む泥水の pH 調整と鉄粉処理を行い、土粒子分と液分の砒素分析を行った。その結果を図－9に示す。砒素は高アルカリでは溶解しやすくなる。そのため、pH を 7 に調整するだけで砒素の測定値は 1/3 程度に低減した。更に鉄粉処理を行うことにより、基準値の 1/10 程度まで低減することが確認された。

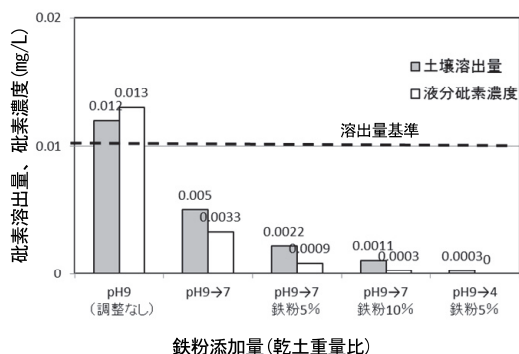


図-9 泥水の砒素分析結果

(c) 磁力選別機による鉄粉の回収効率

ドラム型磁力選別機を通過する鉄粉を混合した泥水の流量を変える(50、100、150L/min)とともに、計2回通過させて、混合した鉄粉量に対する回収率を求めた。鉄粉の回収率を図-10に示す。

1回目の通過では流量が50L/minのケースで平均86.1%の回収結果が、100L/minのケースで最も回収率が高い(平均92.1%)結果が得られた。測定のパラッキも配慮し、今回の試験で使用した磁力選別機は100L/min以下の流量であれば85%以上の鉄粉の回収が行えると考えられる。

磁力選別機を通過した泥水を再び、同機に通した場合は、泥水の流量に係わらず5~6%の鉄粉を回収することを確認した。

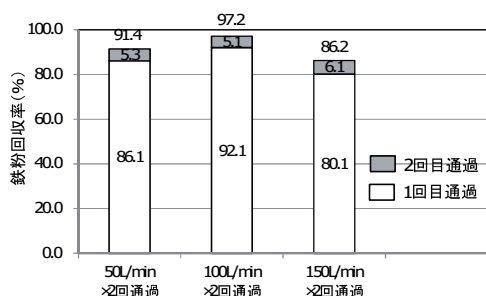


図-10 磁力選別機による鉄粉の回収率

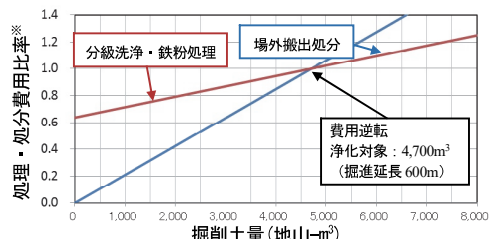
4. 実工事での浄化費用の算定

前述した実験の結果を踏まえて、実工事の処理プラントの設計を行い費用の算定を行った。想定する泥水シールド工事モデルの概要を表-6に示す。

費用算定は、泥水処理プラントに付加する砒素の浄化設備の損料をインシヤルコストとし、鉄粉他の薬剤費、運転管理費、浄化した土壌の運搬・処分費をランニングコストとして加算した。そして、同量の掘削土を汚染土壌等として運搬・処分する場合の費用と比較した。費用の比較結果を図-11に示す。費用比較では4,700m³(掘進延長約600m)以上の砒素汚染土を浄化処理した場合、工事費用が安くなる結果となった。

表-6 想定する泥水シールド工事モデルの概要

項目		数量他
シールド外径		3.33m
シールド延長		4,500m
掘削量(地山)		39,000m ³
プラント排泥処理量		170m ³ /h
プラント設置期間		23ヶ月
土質	粒度分布	粗粒分(75μm以上) 70%
		細粒分(75μm未満) 30%
土壌の汚染(砒素)		土壌溶出量基準の3倍程度
鉄粉	添加量(MSI-X)	10%-乾土
	転用回数	5回



金額を1.0とした場合の比率を示す。
※分級・鉄粉処理と場外搬出処分が同じとなる金額を1.0とした場合の比率
図-11 浄化費用の比較

5. おわりに

分級洗浄と鉄粉を用いた浄化処理による砒素を含むシールド排泥の実証実験を実施し、以下の結果を得た。

- i. 分級前の土壌の砒素溶出量に対して、分級洗浄により、粗粒分の溶出量を1/3~1/4程度に、pH調整と鉄粉処理により、細粒分の溶出量を1/10程度に低減することができた
- ii. 磁選機により、混合した鉄粉の85%以上を回収することができた
- iii. 室内でのピーカー試験と実証実験では同等の砒素分析結果が得られたことより、今後はピーカー試験で鉄粉添加量等のプラント設計が行える
- iv. 費用試算では、一定の量(4,700m³)以上の汚染土壌を本技術の処理の対象とした場合、場外搬出処分を行うより、コストを削減できる

以上より、本技術は実工事での適用性が高いと考えられる。ただし、その適用性は対象土壌の粒度分布等の諸条件に左右されるため、実際の工事では、室内試験による適用性の確認と浄化設備の個別設計を行う必要がある。

今後は、自然由来重金属に遭遇したシールド工事において、本技術を発注者に提案していく所存である。

【参考文献】

- 1) (独)土木研究所、(一財)土木研究センター、地盤汚染対応技術検討委員会、建設工事で発生する自然由来重金属等含有土対応ハンドブック、大成出版社、2015
- 2) 石神大輔、渡辺哲哉、「鉄粉『MSI-X』を用いたシールド工事等の自然由来重金属への対応」、環境浄化技術、2014.9-10、pp.81-82