

# 硬質粘土に含まれる砒素を対象とした鉄粉洗浄技術の開発

三浦俊彦 山崎啓三 高田尚哉  
(本社エンジニアリング本部) (本社エンジニアリング本部)

武田厚 守屋洋一 日笠山徹巳  
(本社生産技術本部) (本社生産技術本部) (本社エンジニアリング本部)

## Washing Remediation of Arsenic Contaminated Stiff Clay Using Iron Powder

Toshihiko Miura Keizo Yamasaki Naoya Takada  
Astushi Takeda Yoichi Moriya Tetsumi Higasayama

### Abstract

Stiff clay including arsenic of natural origin is generated by excavation in Kanto area. Washing tests are performed for applying the iron powder washing technology to arsenic contaminated stiff clay. Washing water is added to the contaminated soil; this changes it into muddy water. The iron powder with high arsenic adsorptive capability is added to the muddy water and adsorbs the dissolving arsenic, and then the iron powder is separated. The washing test shows that 4~8% of iron powder addition and 60 min reaction time were required to remediate contaminated soils. Crushing and separating processes in the tests show that more than 70-% of stiff clay could be changed in less than 0.075 mm of muddy water. The test of continuous washing system, which repeatedly used iron powder to 40 times, prove that it was possible to remediate the arsenic contaminated stiff clay below the water-soluble arsenic standard.

### 概要

関東地方の再開発事業や泥土圧シールド工事では、掘削に伴い自然由来の砒素を含む硬質粘土(土丹塊)が大量に発生することから、安価な対策方法が求められている。筆者らは、泥水シールド工事で発生する砒素汚染泥水の浄化技術である鉄粉洗浄技術を、硬質の土丹塊に適用することを目的として、室内洗浄試験と実証試験を行った。鉄粉洗浄技術とは、汚染土に水を加えて泥水状態とした後に、砒素吸着力の高い鉄粉を汚染泥水に投入し、泥水中の砒素を鉄粉に吸着させて回収して、浄化土とする方法である。3種類の硬質粘土を用いた洗浄試験の結果、鉄粉添加量は乾土量当り4~8%、反応時間60分で浄化が可能であった。実証試験における粉砕・分級工程では、投入した土塊状の硬質粘土の70%以上を0.075mm以下の泥水状態にすることができた。また、連続洗浄システムによる40回繰り返し鉄粉洗浄を実施した結果、鉄粉の吸着効果は持続した状態で安定して浄化ができた。

## 1. はじめに

関東平野に広く存在する海成層である上総層群の硬質粘土(土丹)は、自然由来の砒素を含む場合が多い。そのため、関東地方の再開発事業やシールド工事等では、掘削に伴い自然由来の砒素を含む土砂が大量に発生するケースが多く、安価な対策方法が求められている。

一般に工事で発生した砒素を含む土砂は、場外処理施設等へ搬出されることが多く、土量が多くなると経済的な負担が大きくなる。そのため、浄化して有効利用を図ることが合理的である。浄化方法としては分級洗浄処理<sup>1)</sup>が一般的であるが、硬質粘土は細粒分を主体としていることに加えて、掘削時には一定の強度を持つ土塊として存在することから、分級洗浄の適用が難しい。

そこで筆者らは、泥水シールド工事で発生する泥水中の砒素を除去する手法として開発した鉄粉洗浄技術を、硬質粘土の土塊へ適用することを試みた。鉄粉洗浄技術

は、汚染土に水を加えて泥水状態とした後に、砒素吸着力の高い特殊な鉄粉を汚染泥水に投入し、泥水中の砒素を鉄粉に吸着させて回収して、浄化土とする方法である<sup>2)</sup>。硬質粘土は掘削時には土塊として発生するため、水を加えても容易に泥水状態にならず、そのままでは鉄粉洗浄の適用が難しい。そのため、土塊を効率よく破碎し、泥水状態にすることを目的として、破碎と摩砕、分級を組み合わせた手法について、実機を用いた検証を行った。また、現場から採取した3種類の硬質粘土を対象に、室内試験による鉄粉洗浄の適用性試験を実施するとともに、鉄粉洗浄の連続処理プラントを構築し、鉄粉洗浄の浄化効果の検証を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 鉄粉洗浄の概要

鉄粉洗浄のフローをFig. 1に示す。鉄粉洗浄は、脱離工程と鉄粉による吸着工程、鉄粉の分離工程、脱水の4工程

から構成される。脱離工程は、水またはpH調整を兼ねた脱離液を用いて、土粒子表面に吸着している砒素を水または脱離液中に溶解させる工程である。鉄粉吸着工程は、砒素吸着力の高い特殊鉄粉を添加して、水または脱離液中に溶解した砒素を鉄粉表面に吸着させて除去する工程である。鉄粉による砒素の吸着原理は、鉄粉表面が酸化・腐食することで生じる酸化鉄および水酸化鉄と砒素が共沈して、鉄粉の表面に強く吸着する性質を利用したものである。砒素を吸着した鉄粉は、鉄粉の比重が高いことを利用して、比重分離機等を用いて泥水から回収する。脱水工程は、鉄粉と砒素が除去された泥水を脱水し、浄化土を得る工程である。

使用する鉄粉は、砒素の吸着用に加工された鉄粉で、比重は7.5g/cm<sup>3</sup>、平均粒径60~80μmである。泥水中の砒素を効率よく吸着・除去するためには、泥水のpHは8以下にすることが望ましいため、必要に応じて鉄粉添加前の泥水のpH調整が必要となる。また、鉄粉の砒素吸着量は数mg/gと大きいため、回収後の鉄粉は、飽和吸着量に達するまで複数回利用可能である。

### 3. 硬質粘土の鉄粉洗浄室内試験

実証試験を実施する前に、現場から採取した3種類の硬質粘土(土丹)を対象に、室内試験によって鉄粉洗浄の浄化効果を調べた。

#### 3.1 試験方法

硬質粘土試料の初期性状をTable 1に示す。3種類の試料は関東地方の開削工事現場から採取した土丹で、採取直後に試験に使用した。いずれの試料土においても、pHは8程度の弱アルカリ性で、環告18号溶出試験による砒素溶出量は土壌溶出量基準(0.01mg/L以下)を超過していた。硬質粘土試料を湿潤状態のまま水を加えてミキサーで攪拌し、泥水状態とした。その泥水を分級により75μm以上の砂分を除去した後、水を加えて比重1.2程度の泥水試料を作製した。鉄粉反応を進めるために、泥水に希塩酸を添加してpHを約7に調整した後、特殊鉄粉を乾土量あたり最大8%添加して、60分間攪拌した。攪拌後、泥水中の鉄粉を磁石で回収し、0.45μmフィルターでろ過をして、ろ液のpHと砒素濃度を測定した。洗浄後の試料土となる固形分は、風乾した後に環告18号の砒素溶出量を測定した。

#### 3.2 結果と考察

Table 2に試験結果を示す。いずれの試料土も、ろ液の砒素濃度と固形分の砒素溶出量は、鉄粉の添加とともに低減した。試料土Aは鉄粉4%、試料土Bは鉄粉8%、試料土Cは鉄粉2%で砒素溶出量が土壌溶出量基準適合となった。試料土Bで浄化に必要な鉄粉量が多かったのは、初期の砒素溶出量が大きいことが原因である。同程度の溶出量にも関わらず、試料土Cの方が試料土Aよりも浄化に必要な鉄粉量が少なかったのは、固形分のpHが低く浄化が

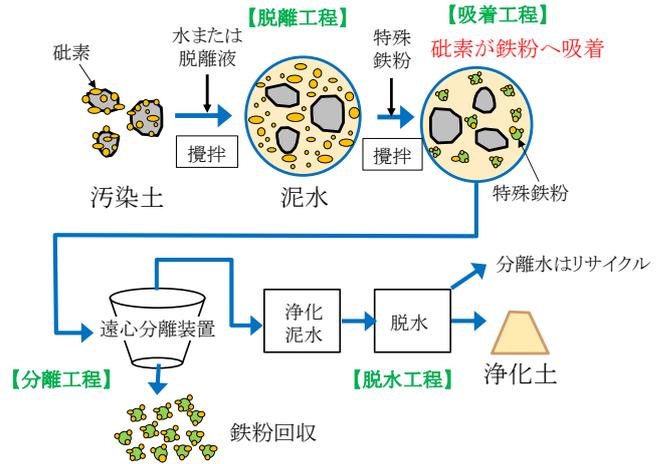


Fig. 1 鉄粉洗浄のフロー  
Scheme of Washing Remediation Using Iron Powder

Table 1 試料土の性状  
Properties of Arsenic Contaminated Soils

試料土	含水比 (%)	pH	電気伝導率 (mS/m)	砒素溶出量 (mg/L)
A	43.0	8.4	82	0.070
B	36.1	8.1	65	0.089
C	34.5	8.2	18	0.071

Table 2 洗浄試験の結果  
Results of Washing Tests

試料土	試験条件			ろ液		固形分	
	泥水比重 (g/cm <sup>3</sup> )	鉄粉添加量 (%)	鉄粉反応時間 (分)	pH	砒素濃度 (mg/L)	pH	砒素溶出量 (mg/L)
A	1.20	0	60	7.6	0.007	8.3	0.021
		2	60	7.7	0.002	8.3	0.011
		4	60	7.9	<0.001	8.3	0.007
		8	60	7.5	<0.001	8.3	0.005
B	1.20	0	60	7.4	0.034	7.7	0.030
		2	60	7.4	0.002	7.7	0.018
		4	60	7.5	<0.001	7.7	0.013
		8	60	7.5	<0.001	7.7	0.007
C	1.20	0	60	7.5	0.012	7.9	0.017
		2	60	7.5	<0.001	7.9	0.008
		4	60	7.4	<0.001	7.9	0.005
		8	60	7.3	<0.001	7.9	0.004

進みやすかったためと考えられる。鉄粉を添加していないケースのろ液の砒素濃度は、砒素溶出量よりも小さい値となったが、これは液固比や水との接触時間が異なることに加えて、pH調整により一部の砒素が土粒子に吸着したことが原因と推測される。試料土によって浄化に必要な鉄粉量は異なるが、洗浄後の土は土壌溶出量基準適合となったため、鉄粉洗浄が適用できると判断した。

## 4. 実証試験

### 4.1 実証試験の概要

実証試験は、粉碎・分級処理と鉄粉洗浄処理の2工程に大別される。実証試験のフローをFig. 2に示す。試料土は、

室内試験で用いたBとCの硬質粘土を混合して使用した。掘削直後の試料には大きな土塊が多く含まれていたため、バックホウ等で粒径100mm以下になるまで一次破碎をしてから使用した。なお、土塊の一軸圧縮強度は3,000～4,000kN/m<sup>2</sup>程度で、港湾構造物の技術上の基準で目安とされる土丹の一軸圧縮強度1000kN/m<sup>2</sup>よりも少し大きい値であった<sup>3)</sup>。

粉碎・分級処理工程は、土塊を含む硬質粘土試料に水を加えて、粉碎・摩砕処理装置で細粒化させた後、土砂分離装置で粒径0.075mm以下の泥水と0.075～2mm、2mm超過の粗粒分に篩分けする工程である。鉄粉洗浄は、0.075mm以下の泥水が浄化対象となるが、硬質粘土試料に含まれる0.075mm以上の砂等の粗粒分も浄化できることが望ましい。汚染土中の砒素は主に細粒分に含有し、粗粒分には比較的少ないことから、土砂分級機に水を散布する装置を導入し、0.075mm以上の粗粒分に細粒分を含まないように水洗浄しながら分級することで浄化を図った。

鉄粉洗浄は、前述のように脱離工程と鉄粉による吸着工程、鉄粉の分離工程、脱水の4工程から構成される。粒径0.075mm以下の泥水に鉄粉を添加し、一定時間攪拌した後に遠心分離装置により泥水中から鉄粉を除去・回収した。鉄粉回収後の泥水は、フィルタープレスにより固液分離を行って固形分を浄化土とした。本試験では、鉄粉の回収と浄化効果を検証するとともに、鉄粉反応槽と遠心分離装置を4セット設置し、現場処理に近い連続運転を実施して、そのシステムの検証を行うことも目的とした。

## 4.2 粉碎・分級処理試験

**4.2.1 試験方法** 粉碎・分級処理のフローをFig. 3に示す。また、試験設備と試験土壌の様子をPhoto 1とPhoto 2に示す。硬質粘土塊を破碎する装置には、回転連続式粉碎・摩砕処理装置を使用した。主に砂利や碎石の洗浄・摩砕に用いる装置であるが、粘土塊の粉碎にも使用実績があることから選定した。円筒型で本体シェルとその内部を貫通するロータで構成され、シェルとロータをそれぞれ反対方向に回転させて、粘土塊を破碎・摩砕して泥水化する。Table 3に主な装置の仕様を示す。本試験では、粒径100mm以下の試料土を定量供給装置により4～12t/hで投入し、水を3～8m<sup>3</sup>/hで投入しながら粉碎を行った。処理後の泥水は土砂分級装置で0.075 mm以下の泥水と0.075～2 mm、2 mm以上の土砂に分級し、粒径ごとの重量と砒素溶出量を測定した。

**4.2.2 試験結果** 粉碎・摩砕処理装置における投入土量と0.075 mm以下の重量割合の関係をFig. 4に示す。0.075mm以下の重量割合が大きいほど細粒化が進むことを示しているが、投入土量と0.075mm以下の重量割合には相関性が見られず、加水量が6～8m<sup>3</sup>/hの条件で、0.075mm以下の重量割合は約70%以上となり、安定した細粒化が可能であることがわかった。本試験で検証はできなかったが、加水量6～8m<sup>3</sup>/hの条件であれば、さらに投入土量を大きくしても細粒化ができる可能性があった。加水量

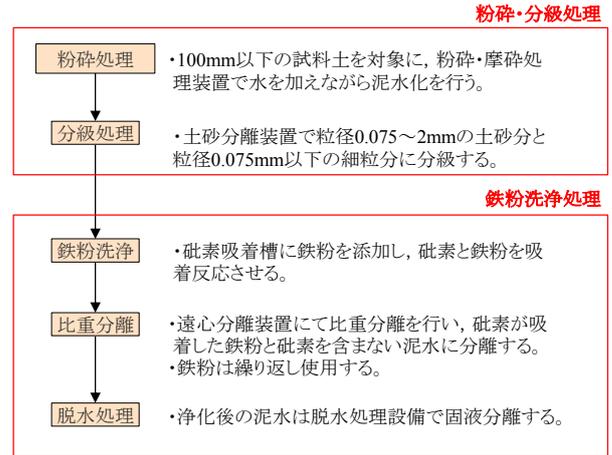


Fig. 2 実証試験のフロー

Scheme of Substantiation Tests

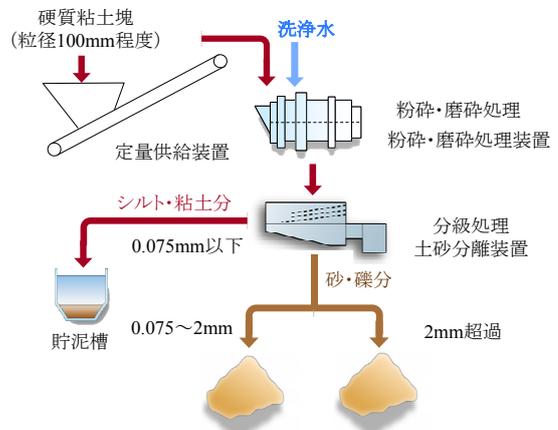


Fig. 3 粉碎・分級処理のフロー

Scheme of Crushing and Soil Classification



Photo 1 粉碎・分級設備

Devises of Crushing and Soil Classification



Photo 2 試験で用いた硬質粘土試料

Stiff Clay

が6m<sup>3</sup>/hで、含水比50%の硬質粘土を12t/h投入することを仮定すると、硬質粘土に砂分が含まれないとすれば、比重1.38の泥水が作成できる計算となる。硬質粘土試料の場合、動粘度の制限からポンプ圧送には泥水比重を1.25以下にすることが望ましいため、本処理時における加水量を少し増やすか、または作成した泥水に少量の水を添加すれば、鉄粉洗浄に適した泥水の作成が可能である。

加水量6m<sup>3</sup>/h以上のケースにおける粉碎・分級処理前と処理後試料土の粒径加積曲線をFig. 5に示す。本処理により、粒径の大きい硬質粘土が、効率よく細粒分となり泥水状態にできることが確認できた。分級除去された0.075mm～2mmは主に砂分であったが、その一部と2mm以上の大部分は硬質粘土の小さい塊であった。実施工時にはそれらを再度粉碎工程に投入することで処理は可能となるが、本試験では確認のため砒素溶出量を測定した。その結果は0.008mg/Lで土壤溶出量基準適合であった。

### 4.3 鉄粉洗浄試験

**4.3.1 試験方法** 鉄粉洗浄処理のフローをFig. 6に示す。試験設備の様子をPhoto 3に示す。本試験は、粉碎・分級処理により作成した0.075mm以下の砒素を含む泥水を対象とした。鉄粉洗浄設備は、初期泥水を貯めるための貯泥槽、泥水のpHを7に調整した後に鉄粉を添加して所定時間攪拌するための吸着槽、鉄粉回収のための遠心分離装置、鉄粉回収後の浄化泥水を貯蔵する浄化泥水槽、脱水して固液分離し浄化土を得るための脱水処理設備（フィルタープレス）から構成される。吸着槽と遠心分離装置が4セットあるが、これは本洗浄システムは吸着反応時間が律速になっており、並行して複数の吸着槽を使用することで、処理量の増加を図る検証を行ったためである。鉄粉は少量の泥水とともに回収されるが、吸着力が強いことから複数回利用する。そのため、回収鉄粉は次の吸着槽へと移行し、連続的に使用するシステムになっている。吸着力のなくなった鉄粉は最終的に廃棄する。

最初に、吸着槽内で鉄粉が十分混合されるかどうかを確認するために、吸着槽に比重1.17と1.24の泥水を2m<sup>3</sup>、鉄粉を乾燥土量当たり4～8%添加し、攪拌中の吸着槽内の鉄粉分布を調査した。吸着層の上部（泥水表面から50cm）と下部（吸着槽下面から50cm）に設置しているバルブから定期的に泥水試料を採取し、試料中の鉄粉を磁石

Table 3 粉碎・摩砕装置の仕様  
Devices Using for Crushing

種類	処理能力 (t/h)	設置動力 (kW)	寸法 (m)
回転連続式粉碎・摩砕処理装置	25～40 (砂利)	15 (シエル) 37～45 (ロータ)	6.0×2.1×2.1

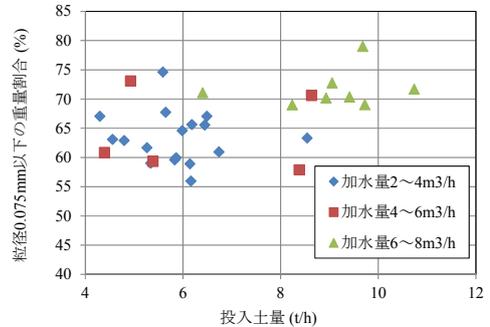


Fig. 4 投入土量と0.075mm以下重量割合の関係  
Relation of Soil Volume and Wight Percentage of Soil under 0.075mm

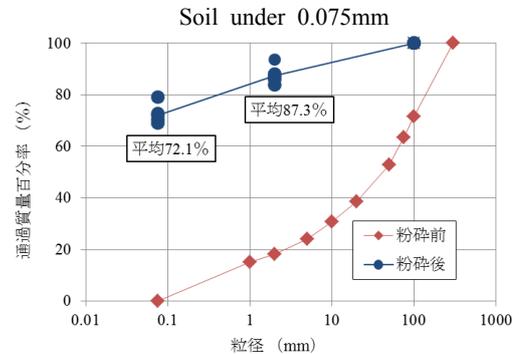


Fig. 5 粉碎・分級処理後の粒径加積曲線  
Grain Size Distribution of Crushing Soils



Photo 3 鉄粉洗浄の設備

Devises of Washing Remediation Using Iron Powder

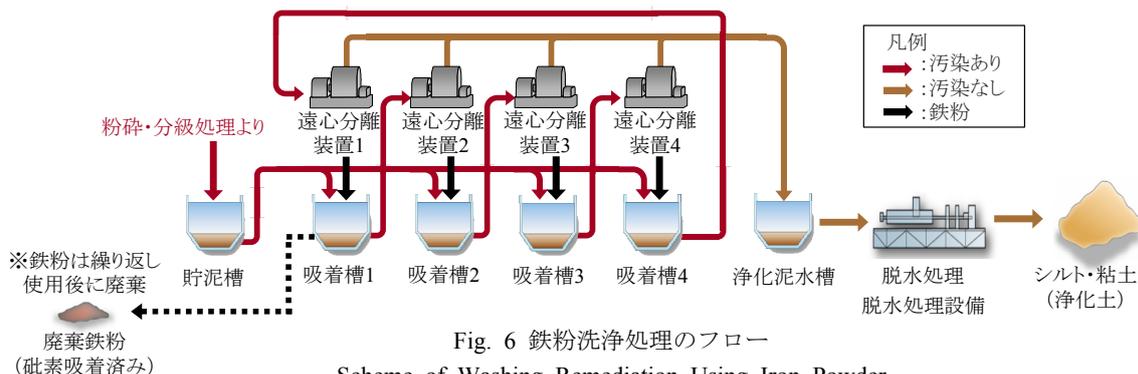


Fig. 6 鉄粉洗浄処理のフロー  
Scheme of Washing Remediation Using Iron Powder

で回収して鉄粉量を測定した。なお、混合性の調査とともに、鉄粉反応に必要な浄化時間を調べるため、鉄粉回収後の浄化泥水を固液分離して、固形分の環告18号試験による砒素溶出量も測定した。

次に遠心分離装置で鉄粉が回収できるかどうかを確認するために、比重1.1~1.3の泥水を2m<sup>3</sup>作成し、鉄粉を乾燥土量当たり4%添加して、遠心分離装置通過後の浄化泥水中に残存する鉄粉量を測定した。浄化泥水量の体積も測定し、鉄粉とともに回収される泥水量の把握を行った。

最後に、本洗浄システムが連続的に稼働するかを検証するために、砒素を含む泥水を用いて、40回の繰り返し洗浄試験を実施した。具体的には、pH7.0、比重1.2に調整した泥水2m<sup>3</sup>を吸着槽1へと移送し、鉄粉を乾土量当たり4%添加して30分攪拌した。その後、泥水を遠心分離装置へ移送して、回収鉄粉が含まれる泥水と浄化泥水に分離した。初期泥水は1回/日の頻度で採取して、固液分離してろ液の砒素濃度と固形分の砒素溶出量を測定した。鉄粉処理後の浄化泥水は、洗浄1回ごとに採取して固形分離し、ろ液の砒素濃度と固形分の砒素溶出量を測定して、浄化効果を調べた。また、鉄粉処理後の浄化泥水は、10回分をまとめて脱水処理設備へと移送し、脱水ケーキの環告18号砒素溶出量と、地盤工学会のA-c法突固めによるコーン指数(JIS A 1228)を測定した。回収した鉄粉は、吸着槽2へと移送した後、貯泥槽から新たな汚染泥水を供給して再度洗浄に利用した。これらの過程を吸着槽1~4で繰り返すことにより、鉄粉を40回繰り返し利用して浄化効果の持続性を調査した。本洗浄システムは、1回の洗浄サイクルごとに鉄粉反応30分と鉄粉投入、鉄粉分離で約45分を要する。実証試験では、浄化泥水の採取等もあったため、1日で最大4回洗浄としたが、実際は6回/日以上洗浄が可能であり、かつ吸着槽が4個あれば同時に2槽で洗浄が可能のため、12回以上の洗浄を実施できる。

**4.3.2 試験結果** 吸着槽での鉄粉混合性を調べるため、吸着槽内部の鉄粉濃度分布を測定した結果をFig. 7に示す。泥水比重1.24のケースは、投入鉄粉濃度を1とすると、吸着槽上部の鉄粉濃度は0.9~1程度、吸着槽下部では1.1~1.2程度で推移しており、上部の鉄粉濃度が少し小さいが、比較的均一に混合できた。比重1.17泥水のケースでは、吸着槽上部が1.1程度、吸着槽下部が1.4以上を示しており、全体的に投入鉄粉濃度よりも多く存在した。これは前ケースの鉄粉が除去しきれずに残存していた可能性もあるが、吸着槽下部が上部に比べて約1.3倍の鉄粉濃度を示すことから、吸着槽上表面の鉄粉は沈降してしまい、下方に鉄粉量が溜まっていることも考えられた。しかし一方で、泥水は吸着槽内を循環していることから、鉄粉が吸着槽底面で沈殿しない限り、鉄粉と泥水の混合性は確保されていると判断した。Fig. 8に、泥水比重1.24のケースにおける固形分の砒素溶出量を示す。砒素溶出量は、攪拌時間30分で溶出量基準以下を達成した。本試験条件では、鉄粉反応時間は30分であり、鉄粉と泥水の混合性は確保されていると判断した。Fig. 8に、泥水比重1.24のケースにおける固形分の砒素溶出量を示す。砒素溶出量は、攪拌時間30分で溶出量基準以下を達成した。本試験条件では、鉄粉反応時間は30分であり、鉄粉と泥水の混合性は確保されていると判断した。

次に遠心分離装置での鉄粉回収試験の結果をFig. 9に示

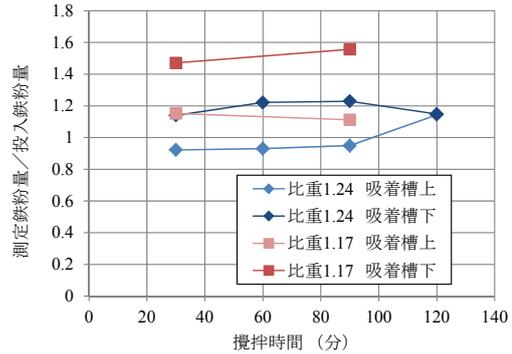


Fig. 7 吸着槽内の鉄粉濃度分布

Distribution of Iron Powder Density in Adsorption Container

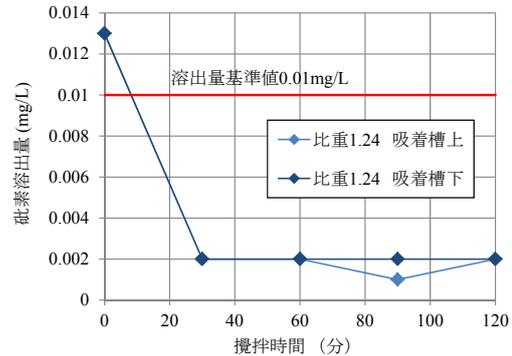


Fig. 8 浄化後固形分の砒素溶出量

Water-soluble Arsenic Content of Solid after Washing

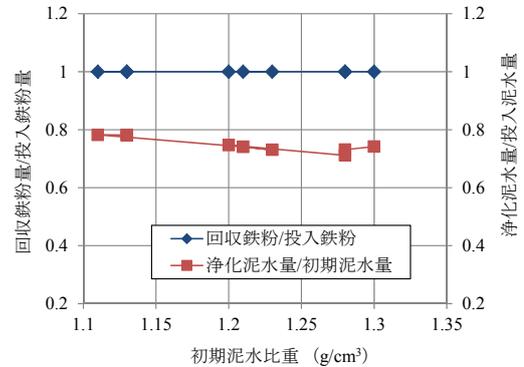


Fig. 9 泥水比重と回収鉄粉量, 泥水量の関係

Relation of Muddy Water Density and Collected Iron Powder, Muddy Water

す。初期泥水の比重に係らず、鉄粉回収量はほぼ100%に近い値となり、本装置で鉄粉を回収できることが確認できた。浄化泥水量は、初期泥水量の70~80%程度で、鉄粉とともに回収される泥水量は20~30%であった。回収された鉄粉と泥水は、そのまま新しい汚染泥水に投入し、再度利用する。その際に20~30%泥水量が増えることになるため、吸着槽容量を処理対象量よりも少し大きめに設定することが必要と考えられた。

最後に本洗浄システムを用いて繰り返し洗浄試験を実施した結果をFig. 10とFig. 11に示す。処理前泥水のろ液の砒素濃度と固形分の砒素溶出量は、作成した日によって異なっており、ろ液の砒素濃度は0.003~0.05mg/L、固形

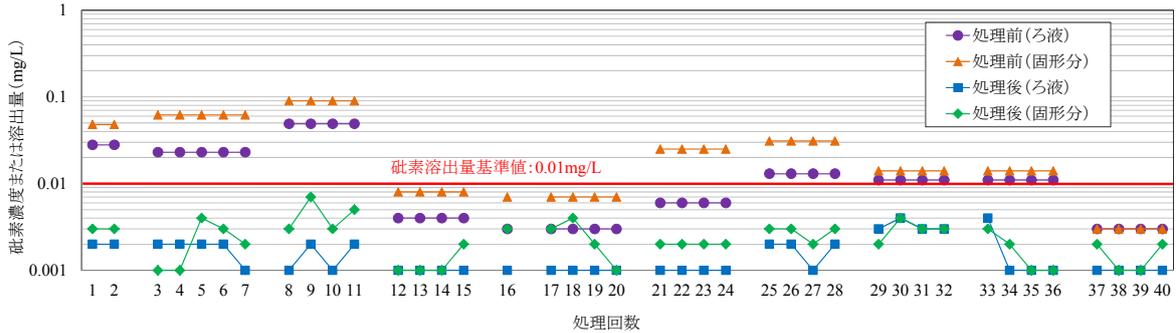


Fig. 10 繰り返し洗浄試験における砒素の浄化結果  
Results of Arsenic Remediation in Repeat Washing Tests

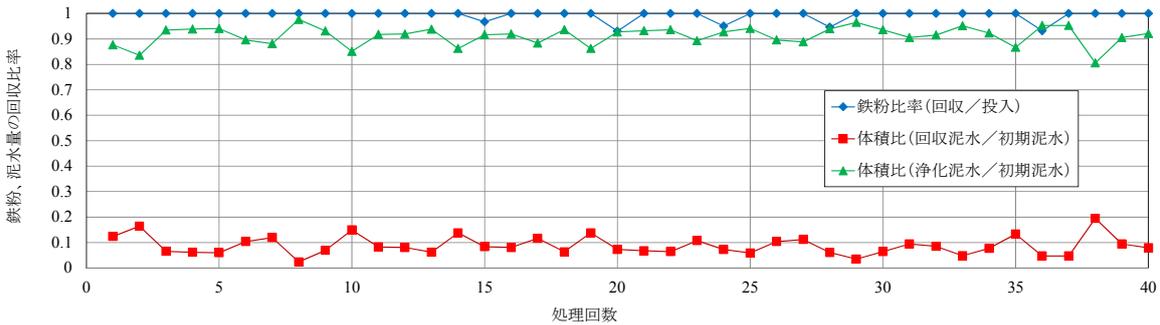


Fig. 11 繰り返し洗浄試験における鉄粉と泥水回収量の結果  
Results of Collection Weight in Iron Powder and Muddy Water

分の砒素溶出量は0.003~0.09mg/Lの範囲で変動した。これは、砒素溶出量の異なる2種類の硬質粘土試料を用いたこと、そして試料の保管状態に差があり、比較的乾燥しやすい状態で保管していた試料については、pHが低下して砒素溶出量が低減したこと<sup>4)</sup>等が原因と考えられた。処理後泥水のろ液の砒素濃度と固形分の砒素溶出量は、処理前に比べて大きく低減し、土壤溶出量基準値適合の低い値で安定した。したがって、本試験の範囲では、鉄粉を40回繰り返し使用しても砒素の吸着効果が持続されて、浄化が可能であることが検証できた。また、遠心分離装置で回収した鉄粉量は、投入量のほぼ95%以上に達しており、泥水比重1.2と比較的粘性が高い汚染泥水に対しても、遠心分離装置で安定的に鉄粉が回収できることがわかった。Table 4に処理後の浄化土(脱水ケーキ)の性状を示す。pHは中性で、砒素と鉛溶出量ともに土壤溶出量基準適合であった。コーン指数も433~608kN/m<sup>2</sup>と第三種発生土基準(400kN/m<sup>2</sup>)以上であり、盛土等に有効利用できる強度を有していることが確認できた。

### 5. まとめ

砒素を含む硬質粘土を対象に、鉄粉を利用した洗浄無害化技術の開発を目的として、実汚染土を用いた室内洗浄試験と、硬質粘土の破碎・分級による泥水化方法の調査、鉄粉洗浄の連続処理プラントによる浄化効果の検証を行った。その結果を以下に要約する。

- 1) 3種類の砒素を含む硬質粘土試料を用いた室内鉄粉洗浄試験では、鉄粉4~8%、反応時間60分で浄化が可能であることを確認した。

Table 4 浄化土壌(脱水ケーキ)の性状  
Properties of Remediated Soils

処理回数	含水比 (%)	pH	砒素溶出量 (mg/L)	コーン指数 (kN/m <sup>2</sup> )
1~10	48.2	7.8	0.001	608
11~20	46.9	7.8	0.001	484
21~30	46.4	7.7	0.001	470
31~40	45.7	7.7	0.001	433

- 2) 実証試験における粉碎・分級工程では、投入した土塊状の硬質粘土試料の70%以上を0.075mm以下の泥水状態にすることができた。
- 3) 粉碎・分級工程で泥水化した試料を用いて、連続洗浄システムによる40回繰り返しの鉄粉洗浄を実施した結果、処理後土壌の砒素溶出量を土壤溶出量基準適合まで安定して浄化できることが検証できた。また、遠心分離装置では95%以上の鉄粉が回収できており、鉄粉を再利用できるシステムを確立した。

### 参考文献

- 1) 三浦俊彦, 他: 鉛汚染土の分級洗浄処理の適用事例と品質管理手法の検討, 大林組技術研究所報, No.70, (2006.12)
- 2) 三浦俊彦, 他: 鉄粉を利用した砒素汚染土壌の洗浄無害化技術, 大林組技術研究所報, No.77, (2013.12)
- 3) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (1994)
- 4) 海野円, 他: 自然由来砒素含有土の保管条件が砒素溶出特性に及ぼす影響, 第11回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.425~428, (2015.7)