

4

重金属汚染土壌の浸漬処理工法による実証試験

沼田 佳久^{*1}・中根 淳^{*1}

概 要

浸漬処理工法とは、重金属類に汚染された土壌を洗浄液に浸け置くことにより、土粒子に付着した重金属類を剥離し易い状態にした後、水道水によるすすぎ洗いと分級処理により、汚染土壌を浄化して再利用を図る工法である。本稿では、事前に行うトリータビリティ試験、実大規模の実証試験を通じて、洗浄液の種類や浸漬期間等が浄化効果に及ぼす影響、浄化後土壌の再利用性、および周辺環境への影響などについて検討した結果を報告する。

キーワード：鉛汚染土壌、洗浄分級、浸漬処理、クエン酸

DEMONSTRATION TEST OF IMMERSION TREATMENT OF SOIL CONTAMINATED
WITH HEAVY METALSYoshihisa NUMATA^{*1} Atsushi NAKANE^{*1}

Abstract

The immersion treatment method purifies soil contaminated with heavy metals for reuse. In this treatment, polluted soil is immersed in a cleaning liquid, to make heavy metals sticking to soil particles easy to detach, then the soil is rinsed with tap water and classified. Through treatability tests conducted before actual application and full-scale demonstration tests, the authors studied the effect of the kind of cleaning liquid and immersion duration on the purification effectiveness, possibility of reuse of treated soil, and impact on the environment. This paper discusses the results of these studies.

Keywords: soil contaminated with lead, cleaning and classification, immersion treatment, citric acid

^{*1} Geotechnical Engineering Group, Engineering Technology Center, Engineering Division

重金属汚染土壌の浸漬処理工法による実証試験

沼田 佳久*1・中根 淳*1

1. はじめに

平成 15 年 2 月 5 日に土壌汚染対策法が施行され、環境省が指定する特定有害物質を取り扱う事業者は、その施設を廃止する際に土壌汚染調査を実施し、調査結果に応じて適切な措置を講ずることが義務づけられた。また、土壌汚染は、鉛、ヒ素によるものが多いことも判明しており¹⁾、これら重金属汚染土壌の浄化工法として、洗浄分級処理、熱処理、固化・不溶化処理、ファイトレメディエーションなどの研究が進められてきた。このような背景から、ここでは、比較的安価で広範囲の重金属類に対応することができる洗浄分級処理工法に着目し、効果的な浄化方法を開発したので報告する。なお、本工法は、(株)奥村組および五洋建設(株)との共同研究により開発したものである。

2. 工法概要

図-1 は、浸漬処理工法の施工手順を示したものである。本工法は、汚染土壌を洗浄する前

に、予め浸漬水に漬け置いて、汚染物質を剥離されやすい状態とすることで洗浄効果を高めようとするものである。具体的には、以下の①～⑦に示す手順で浄化作業を進める。

- ① 処理土量に見合う規模の水槽に汚染土壌および浸漬水を投入し一定期間静置する。
- ② バックホウで攪拌し上澄み液と浮遊する細粒土砂を水中ポンプで汲み上げる。
- ③ 残った土壌を圧送ポンプやバケットなどを用いて、アジテータ車へ投入する。
- ④ アジテータ車に水道水を投入し、ドラムで攪拌しながら土壌を洗浄する。
- ⑤ 洗浄後、土壌を震動ふるい機に投入し、粗粒土と細粒土にふるい分ける。
- ⑥ 得られた粗粒土は、必要に応じて水分調整・pH 調整を施して再利用を図る。
- ⑦ 工程②および⑤で発生した細粒土砂は、濁水処理施設で脱水固化した後、産業廃棄物として処理し、水は再利用する。

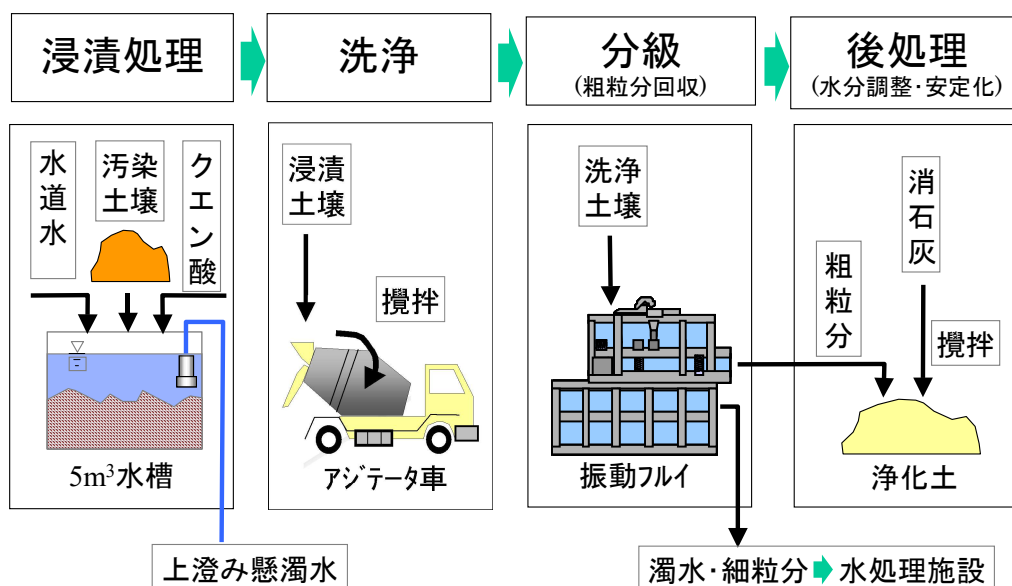


図-1 施工順序図

*1 エンジニアリング本部 技術センター 地盤グループ

3. トリータビリティ試験

3. 1 試験目的

本試験は、実大規模による試験（実証試験）を実施する前に、粒径毎の鉛濃度を把握するとともに、浸漬水、浸漬期間の違いによる鉛の除去効果の差異を検証し、結果を実証試験に反映させるものである。

3. 2 土壌特性

試験に使用した土壌は、実証試験に用いたものと同じ土壌であり、粒径別の鉛含有量は、表－1に示すとおりである。本土壌は、シルト分を約 32%含んでおり、鉛などの重金属類は細粒分に多く吸着することを考慮すると、シルト分を分級処理するだけでも相当量の鉛を除去することが可能であると思われる。

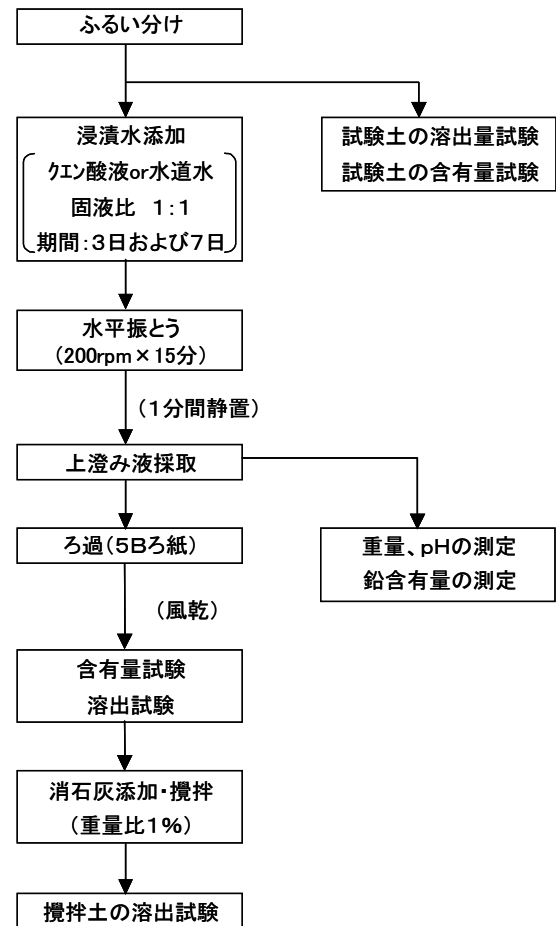
3. 3 試験ケース

試験ケースは、表－2に示すとおり、浸漬水の種類（クエン酸、水道水）、浸漬期間をパラメータとした 3 ケースとした。なお、試験方法は、図－2に示すとおり、実際の施工と同様の工程となるように配慮している。

3. 4 試験結果

試験結果を表－3、表－4に示す。表－3において、Case2 と Case3 との比較から、浸漬水にクエン酸溶液を用いた方が水道水の場合よりも除去率は高く、クエン酸によって鉛の剥離が促進されたことがわかる。次に、Case1 と Case2 との比較から、浸漬期間を長くして

も除去率の向上はわずかであり、工程短縮の観点からも、浸漬期間は 1 日で良いことがわかった。また、表－4に示すとおり、浄化後の土量は初期値の 82%～86%程度であり、懸濁水として排出される土量は、14%～18%程度であった。



図－2 試験方法

表－1 試験土壌の粒径別鉛含有量

土質	粒径 (mm)	土粒子重量 割合	Pb濃度 (mg/kg-dry)	乾燥土1kg中の Pb含有量(mg)	Pb含有率 (%)
細礫	4.75～2.00	0.04	110	4.4	3
粗砂	2.00～0.85	0.06	210	12.6	9
中砂	0.85～0.25	0.28	110	30.8	22
細砂	0.25～0.075	0.30	90	27.0	19
シルト	0.075以下	0.32	210	67.2	47

表－2 試験ケース

ケース	浸漬処理 (固液比)	固液比	浸漬期間
Case1	クエン酸-1%	1:1	3
Case2	クエン酸-1%	1:1	7
Case3	水道水	1:1	7

表－3 鉛総量の変化

試験ケース	処理前の鉛量 (mg)	鉛の除去量 (mg)	処理後の鉛量 (mg)	除去率 (%)
Case1	37	13	24	35
Case2	41	16	25	39
Case3	58	15	43	26

表－4 土粒子重量の変化

試験ケース	処理前(g)	処理後(g)	残留率(%)
Case1	414	355	86
Case2	414	339	82
Case3	414	356	86

4. 実証試験

4. 1 試験目的

本実証試験は、以下に示す項目を把握することを目的として実施した。

- ①鉛の除去効果
- ②浄化土壌の粒度組成
- ③土量の変化
- ④浄化土壌の健全性
- ⑤施工サイクル
- ⑥周辺環境、作業環境への影響

4. 2 試験設備

試験設備の配置を図－3に、使用機械の一覧表を表－5に示す。施工にあたっては、特殊な機械は使用せず、全て一般の汎用機器を用いている。実施工では、施工規模に応じてこれら汎用機械の仕様等の組み合わせをアレンジすることが可能であり、施工費を抑える上でも有効な要素となっている。

4. 3 試験ケース

試験ケースは、表－6に示す5ケースであり、各ケースに使用した土量は約2m³である。浸漬水には1%クエン酸溶液および水道水を用

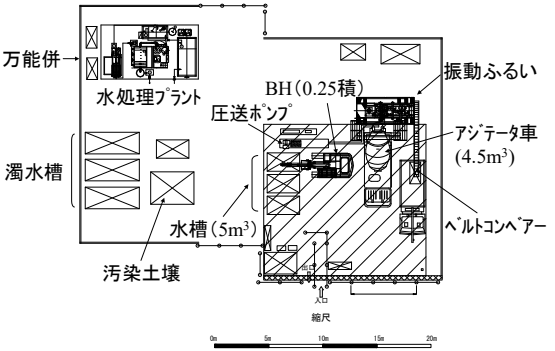
い、クエン酸による鉛の除去効果を確認することとした。また、固液比、浸漬期間、分級方法を変化させ、各ケースの鉛除去率の違いを検証した。ここに、攪拌分級とは、浸漬水に浸漬した土壌をバックホウで攪拌した後、懸濁水を水中ポンプで汲み上げる工程を示す。なお、浸漬期間については、トリータビリティ試験の結果を踏まえ3日以内とし、アジテータ車による洗浄は、全て水道水を用いた。

4. 4 試験方法

浄化手順は「2. 工法概要」に示した手順で行った。詳細を以下に示す。

- ① 浸漬処理：汚染土壌を粒径5cm以上の土塊を取り除きながら5m³水槽に投入し、その後浸漬水を1：1の固液比で注水する。
- ② 重量測定：土砂投入後の水槽をクレーンおよび荷重計を用いて計量する。
- ③ 洗浄：上澄みを除去した浸漬後の土壌をスラッジポンプでアジテータ車に投入した後、3.3m³の水道水を注水し、15分間攪拌する。
- ④ 分級：アジテータ車から土壌を振動ふるい機に投入し、60分間の振動ふるいおよび付随するサイクロンで粗粒分および細粒分を含む懸濁水にそれぞれ分級する。
- ⑤ pH調整：分級した粗粒分について、消石灰によりpH調整を行う。
- ⑥ 含有量等の分析：各処理段階で土壌、および濁水をサンプリングし、溶出試験および含有量試験を行う。

以上の浄化能力に係わる事項の他、浄化前後の粒度、施工サイクル、騒音、振動、粉塵、臭気、風向風速等の測定を行った。



図－3 試験設備配置図

表－5 使用機械一覧表

名称	形式名	仕様	動力 (KW)	重量 (kg)
油圧式バックホー		0.25m ³ 積		
アジテータ車		4.5m ³ 積		10000
圧送ポンプ	MSP1003	最大輸送量:30m ³ /h		3000
振動ふるい機	サンドマスター3S型	泥水処理能力:1.7m ³ /min	2.2×2	7000
水中ポンプ		2インチ	0.4	12

表－6 試験ケース

ケース	鉛含有量 (mg/kg-dry)	浸漬処理 (固液比)	浸漬期間 (日)	分級方法	後処理洗浄
Case1	130	1%クエン酸(1:1)	1	1日後攪拌分級+振動ふるい	水道水
Case2	55	1%クエン酸(1:0.5)	1	1日後攪拌分級+振動ふるい	水道水
Case3	31	水道水(1:1)	1	1日後攪拌分級+振動ふるい	水道水
Case4	67	1%クエン酸(1:1)	3	2,3日目攪拌分級	水道水
Case5	38	1%クエン酸(1:1)	3	3日後振動ふるい	水道水

4. 5 試験結果

(1) 浄化効果

浄化前，浄化後における鉛の含有量を表－7および図－4に示す。固液比を 1:1 とし，浸漬過程でバックホウにより土壌を攪拌した Case1 および Case4 で最も高い除去率が得られた。浸漬水として水道水を用いた Case3 での除去率は低く，浸漬水にクエン酸溶液を用いたことによる浄化効果の向上が顕著に現れる結果となった。次に，浸漬水を半分に減じた Case2 および水槽内でバックホウによる攪拌を行わなかった Case5 では，鉛の除去率は低下した。これは，Case2 では，浸漬水が汚染土壌中に十分に浸透しなかったためであり，Case5 では，攪拌による粗粒分からの離脱が無かったためと思われる。

(2) 粒度分布

初期土壌および浄化後土壌の粒径加積曲線を図－5に示す。全てのケースにおいて細粒分が確実にカットされていることがわかる。

(3) 土量の変化

浸漬処理による土量の変化の算定は，以下の要領で行った。

- ① 処理前の土壌の湿潤重量および含水比から初期土壌乾燥重量を求める。
 - ② 洗浄後土壌の湿潤重量および含水比から，洗浄後土壌乾燥重量を求める。
 - ③ 処理過程で発生した懸濁水の比重および体積から，懸濁水中に含まれる土壌乾燥重量を求める（廃棄土壌乾燥重量）。
- よって，

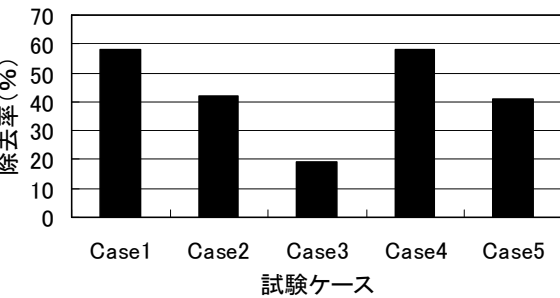
再利用率 = $\frac{\text{洗浄後土壌乾燥重量}}{\text{初期土壌乾燥重量}}$ (1)

可能最大再利用率
= $\frac{\text{初期土壌乾燥重量} - \text{廃棄土壌乾燥重量}}{\text{初期土壌乾燥重量}}$ (2)

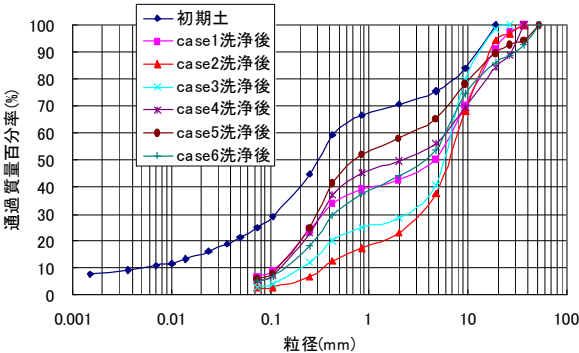
ここに，可能最大再利用率とは，処理過程において土砂の装置への付着などにより生じるロス分が全て再利用できると仮定した場合の利用率である。以上に述べた方法により求めた，再利用率および可能最大再利用率を表－8に示す。ロス重量が処理規模に係わらず概ね一定であると仮定すると，ロス率は，処理規模が大きくなる程小さくなり，再利用率は，有効再利用

表－7 鉛の除去率

試験ケース	鉛含有量 (mg/kg-dry)		除去率 (%)
	洗浄前	洗浄後	
Case1	130	54.1	58
Case2	55	32.1	42
Case3	31	25.0	19
Case4	67	28.2	58
Case5	38	22.3	41



図－4 鉛の除去率



図－5 粒径加積曲線

表－8 土壌の再利用率および可能最大再利用率

ケース	初期土壌乾燥重量 (kg)	洗浄後土壌乾燥重量 (kg)	廃棄土壌乾燥重量 (kg)	ロス重量 (kg)	ロス率 (%)	再利用率 (%)	可能最大再利用率 (%)
	①	②	③	④=①-②-③	④/①	②/①	(②+④)/①
Case1	2190	1230	411	549	25	56	81
Case2	2260	900	510	850	38	40	77
Case3	2320	1140	344	836	36	49	85
Case4	3193	1677	469	1047	33	53	85
Case5	3054	1355	478	1221	40	44	84

表－9 洗浄処理後土壌への負荷に係わる分析結果

土壌種別	摘 要		測定項目						安全性項目		
	試験ケース	分析試料の仕様	粒度	含水比	電気伝導度	全窒素	リン酸	CEC	TOC	副産物	
No. 3M	処理前(Case1)	測定値	図-5	22.4	0.45	0.6	41.8	11.8	9.1		
		土壌負荷評価	—	—	良	不良	不良	良			
	Case1-後処理土壌	測定値	図-5	13.3	0.11	0.2	57.5	6.3	4.3		
		土壌負荷評価	—	—	優	不良	不良	良	増加せず		
	Case2-後処理土壌	測定値	図-5	9.2	0.12	0.1	47.6	6.1	3.1		
		土壌負荷評価	—	—	優	不良	不良	良	増加せず		
	Case3-後処理土壌	測定値	図-5	12	0.11	0.1	44	5.9	3.8		
		土壌負荷評価	—	—	優	不良	不良	不良	増加せず		
	No. 2M	処理前(Case2)	測定値	図-5	18.9	0.22	0.3	38.2	10.2	7.1	
			土壌負荷評価	—	—	優	不良	不良	良		
Case4-後処理土壌		測定値	図-5	17.5	0.18	0.1	32.3	6.7	4.0		
		土壌負荷評価	—	—	優	不良	不良	良	増加せず		
Case5-後処理土壌		測定値	図-5	16.4	0.15	0.1	27.7	5.9	3.6		
		土壌負荷評価	—	—	優	不良	不良	不良	増加せず		
Case6-後処理土壌		測定値	図-5	15.8	0.16	<0.1	34.9	6.6	4.1		
		土壌負荷評価	—	—	優	不良	不良	良	増加せず		

最大可能率に近づくものと思われる。

(4) 土壌の健全性

図－5 に示したとおり，本工法では，浸漬処理過程，および振動ふるい機による脱水処理過程において，濁水を濁水処理プラントへ移して処理するため，洗浄処理後の土壌には粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の土は殆ど残留しない。また，浄化後の土壌の健全性については，植栽基盤への適用性について評価することとした。評価は，植生基盤マニュアル評価基準値²⁾に準拠し，浄化前，浄化後の土壌について行った。各項目の測定結果を表－9 に示す。浄化処理を行った結果，電気伝導度が低下していることから，植物の養分吸収の妨げとなる土壌溶液中の塩類濃度が低下したと考えられ，植栽基盤材料としてはより良好な状態になったといえる。しかしながら，全窒素，リン酸，および，陽イオン交換容量の値は減少する結果となっており，これらについては，以下の原因が考えられる。

全窒素の減少：原因として流亡あるいは脱窒が挙げられるが，土壌が浄化によって嫌気的な環境に変化したとは考え難く，本試験条件では，流亡したとみなすのが妥当と思われる。

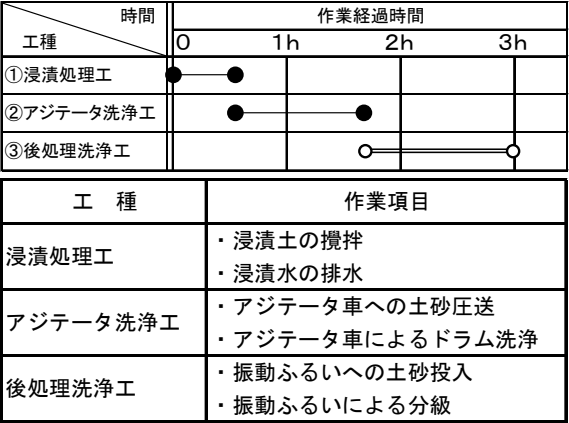
有機態リン酸の減少：クエン酸溶液への浸漬によって土壌の酸性度が上昇したことにより，リン酸固定が生じ，可溶性リン酸の一部が難溶性に変化した。

陽イオン交換容量の減少：洗浄，分級によって，陽イオン交換容量の大きい粘土分が殆ど無い状態となった。

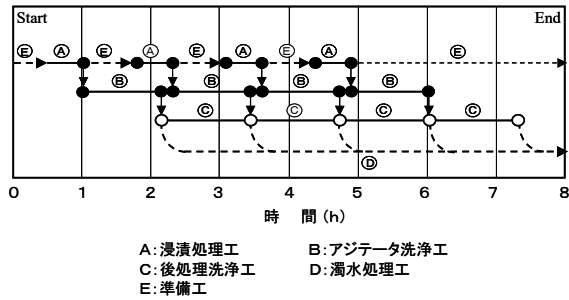
なお，浄化後土壌の溶出液の TOC については，浄化前の値を下回っていたため，洗浄処理によって新たな有害化合物は生成されていないと思われ，副産物組成の調査は実施しなかった。これらのことから，本工法により浄化された土壌は，細粒分や粘土分などを混合して土壌改良を施すことにより，植栽基盤材料として再利用することが可能となる，健全な土壌であると見なせる。

(5) 施工サイクル

今回の浄化プラントを用い，「アジテータ車によるドラム洗浄」，「振動ふるいによる循環分級」の作業時間を固定した条件では，各ケースとも洗浄工がクリティカルな工種となることがわかった。これより，浸漬処理工に多くの作業時間を要した Case1 を代表して，汚染土壌 2.0m^3 に対する本プラントの標準的な浄化作業サイクルとすると，図－6 に示す 1 サイクルの工程表を描くことができる。これに基づいて，1 日 (8h) 単位で組めるネットワークを図－7 に示す。これより，今回の実証試験におけるプラント設定では，1 日 4 サイクルの浄化工程を繰り返すことが可能であり，約 8.0m^3 の汚染土を処理することが可能となる。



図－6 単位浄化サイクル

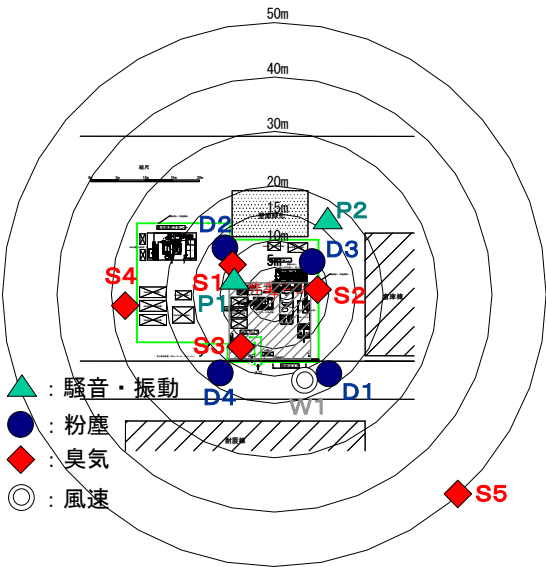


図－7 一日あたりの浄化サイクル

(6) 環境への影響

汚染土壌の浄化の対象となる場所は、主として都市域である。都市域において、周辺環境および作業環境に悪影響を及ぼすことなく施工することが可能であることを確認することとした。方法は、騒音（2箇所）、振動（2箇所）、粉塵（4箇所）、臭気（5箇所）、および風向風速（1箇所）を計測し、騒音、振動規制法基準値、環境基準値等と比較するものである。それぞれの測定位置を図－8に、測定機器の一覧を表－10に示す。また、土壌浄化過程に発生する可能性のある二次汚染については、敷地内の3地点においてサンプリングを行い、溶出試験により確認した。

測定の結果を表－11および表－12に示す。騒音の最大値は、アジテータ車稼働時に、振動の最大値は、振動ふるい機稼働時に発生しているが、全て基準値以下であった。なお、騒音については、仮囲いによる低減効果も大きいようである。粉塵、臭気についても基準値以下



図－8 振動、騒音、粉塵、臭気、風速の計測位置

表－10 環境計測の測定機器

機器名	仕 様	使用数
騒音測定器	RION-NL-06	2
振動測定器	RION-VM52	2
風速計	カノマックスMODEL6531	1
粉塵計	柴田科学 P-5L	1
臭気	ニオイセンサ	1

表－11 騒音、振動の測定結果

騒音規制法基準：85dB超過（特定建設作業）				
項目	浸漬土攪拌・上水排水	土砂圧送（アジテータ投入）	アジテータ攪拌	振動ふるい分級
8m測点	75	80	80	72
16m測点（仮囲い外測定値）	55	58	64	56
16m測点の騒音レベル（理論値）	69	74	74	66
（仮囲いによる騒音低減）	14	16	10	9

振動規制法基準：75dB（特定建設作業）				
項目	浸漬土攪拌・上水排水	土砂圧送（アジテータ投入）	アジテータ攪拌	振動ふるい分級
8m測点	47	53	38	69
16m測点	40以下	42	33	59

表－12 粉塵、臭気、風速、二次汚染の測定結果

測定項目	測定値	備考
粉塵（風下境界）	約0.01mg/m ³	環境基準値<0.1mg/m ³
臭気	約120	ブランク=100
風速	約2m/s	飛散発生>約5m/s
二次汚染	Pb<0.01mg/L	敷地内3地点

であった。また、二次汚染については、汚染土壌の取り扱いに細心の注意を払った結果、発生を防止することが出来た。今後、大量に汚染土壌を浄化する場合において二次汚染を防止するには、土壌の取り扱いに関する作業員の教育、

定期的な二次汚染のチェックなど、適切な配慮が必要であると思われる。

以上の結果から、本工法は、都市域においても問題なく適用することが可能であるといえる。

5. まとめ

- ① 予めクエン酸溶液に浸漬することにより、鉛汚染土壌の浄化効率は向上する。
- ② クエン酸濃度は1%程度、浸漬期間は1日で十分な浄化効果を期待できる。
- ③ トリータビリティ試験は、実証試験の結果と同様な傾向を示し、やや安全側の評価となることから、本工法による浄化効果を判定する方法として有効である。
- ④ 浄化土壌の再利用率は、浄化規模が大きく

なる程向上すると推定される。

- ⑤ 浄化後土壌が緑化の可能性を示す物性を保持していることから、本工法では、一定の健全性を有した処理が可能である。
- ⑥ 振動、騒音、粉塵等は規制基準値以下を示し、地域環境への影響は小さいことを確認できた。

参考文献

- 1) 土壌・地下水汚染の現状と調査・対策技術の動向, (社)土木学会, 2004.
- 2) 緑化事業における植栽基盤整備マニュアル, (社)日本造園学会, 2000.
- 3) 浸漬処理による重金属汚染土壌の浄化技術実証試験結果報告書, (株)奥村組, 2003.