

# 旧四谷第二中学校校庭土壌浄化工事

## Application of In situ Remediation method for VOC Contaminated Soil

武井 正孝\*      大桐 武弘\*\*  
 Masataka Takei    Takehiro Ogiri  
 大西 徳治\*\*\*    稲葉 力\*  
 Noriharu Onishi    Tsutomu Inaba

### 要 約

当社では、揮発性有機化合物（VOC）に汚染された地盤の原位置浄化技術として、VAMP-crete工法を開発した。この工法は、深層混合処理工法（AMP工法）のシステムを用い、浄化薬剤である酸化鉄粉を地中に送り込み、原位置において汚染土と混合し、汚染物質を化学分解する工法である。また、石膏系固化材も同時に送り込み、混合攪拌によってほぐされた地盤の地耐力の低下を、できるだけ抑制しようとしている。本工法を実工事に適用した結果、汚染土壌の浄化に関しては、環境基準の数倍～十倍程度の汚染土を、1ヶ月程度の期間で基準を下回るレベルまで浄化することができた。一方、地耐力に関しては、一部で効果が認められたものの、効果が認められなかった箇所もあり、この原因として、原地盤の含水比が予想以上に高かったことが考えられ、そのチェックの重要性を認識した。また、本工法の適用範囲の明確化などの今後の課題が明らかになった。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工法の概要
- § 3. 浄化工事の概要
- § 4. おわりに

### § 1. はじめに

近年、産業構造の変化に伴う工場の増改築、隣接地の都市化等による工場の閉鎖とそれに伴う再開発などにより、土壌・地下水汚染が顕在化することが多くなっている。また、土壌汚染対策法（平成15年2月施行）など、土壌汚染対策に関連する法律や条例の制定は、土壌汚染対策を促進させる契機となっている。

土壌汚染の対象物質の内、揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds: VOC）は、他の汚染物質と異なり、比重が水よりも重く、地下水に溶解して移動しやすいことから地中深部まで汚染されることが多く汚染も拡散しやすい。このような汚染の対策技術としては、汚染土を掘り出しプラントで処理するよりも、原位置で処理する対策の方が、周辺環境に与える影響も小さく有効と

なる。また、最近では、既に跡地利用が決定されたことにより、早期に浄化したいという要求も多くなっている。

以上のような背景を踏まえ、当社では、VOC汚染土壌の原位置浄化工法「VAMP-crete工法（VOC treating by AMP-method and simultaneous concreting）」の開発を行った。この度、本工法を実工事に適用する機会を得、その施工を通して、本工法の効果と今後の課題を明確にすることができた。ここでは、これを機に、本工法の概要、実工事への適用結果および今後の課題について報告する。

### § 2. 工法の概要

本工法は、地盤改良技術であるスラリー系の深層混合処理工法「AMP工法<sup>1)</sup>」の機械・設備を利用し、浄化薬剤を混合したスラリーを地中に送り込み、汚染土壌と原位置で混合することにより、VOCに薬剤を接触させ、化学分解する土壌浄化工法である。その際、原位置混合により地盤がほぐされ、地耐力が低下するのをできるだけ防ぐために、スラリーには浄化薬剤とともに固化材も混合している。

#### 2-1 原位置混合攪拌システム

本工法のシステム概要を図-1に、施工機械を写真-1に示す。施工システムは、原位置混合を行う改良機本

\* 技術管理部

\*\* 関東（支）東電舟渡（出）

\*\*\* 企画技術部企画技術課

体とスラリー供給プラントから構成される。スラリー供給プラントは、水槽、ミキサー、アジテータおよび高圧ポンプなどにより構成される。ミキサーには水、浄化薬剤および固化材が投入され、スラリーが練り混ぜられる。改良機に取り付けられている攪拌翼は、「特殊ループ式ビット」と呼ばれ、本工法のベースとなったAMP工法独自のものであり、写真-1に示すようにループ状の羽根が全体として球根状に巻かれた特徴的な形状をしている。原位置混合時のビットは反時計回りに回転しながらスラリーを横方向に噴射する。そして段階的に引き上げられる。1ステップ引き上げられるごとに、スラリーの噴射により切削されたビット周囲の土は、スラリーと一緒にビットの下側に取り込まれ、ビットの下半分のループ状の羽根とその羽根に植え付けられている爪により次々に切られ攪拌される。さらにループ状の羽根は、取り込んで攪拌した土を downward に押し付ける効果を発揮する。本工法の特長のひとつであるスラリー混じりの汚泥が地上に排出されないメカニズムは、このようなビットとその周りの土の挙動によると考えられる。

2-2 浄化薬剤および固化材

浄化薬剤としては、VOC汚染土壌の浄化用に開発された酸化鉄粉（酸化鉄系 VOC 分解材）を、固化材とし

表-1 酸化鉄粉と固化材の主な性状

	酸化鉄系分解材	固化材
主成分	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	石膏系無機質
比重	4.3(真比重)	0.8~1.0(高比重)
備考	平均粒径 0.07μm	1%水溶液 pH 6.5~7.5

(メーカー仕様より引用)

ては石膏系固化材を用いている。両者の主な性状を表-1に示す。酸化鉄粉は、従来の鉄粉に比べ粒径が細かく比重も小さいので、水と混合して送るスラリー圧送には有利である。この酸化鉄粉のVOC分解機構に関しては、文献<sup>2)</sup>において考察されている。固化材として石膏系のものを用いたのは、中性系の固化材であるため、酸化鉄によるVOC分解反応を阻害しないためである。(酸化鉄によるVOC分解反応は、文献<sup>2)</sup>における検討から、強アルカリ性の下では反応が阻害されることが確認されている。したがって、セメント系固化材を用いると地盤内がアルカリ雰囲気となり、VOC分解反応が妨げられる。)

なお、本工法の開発に際し、酸化鉄粉、固化材、水および(汚染)土壌を用いた一連の配合試験を行い、室内試験上では酸化鉄粉による浄化と固化材による強度増加が両立しうることを確認している<sup>3)</sup>。

2-3 施工手順

本工法では、1サイクルの施工により、円柱状の改良域(酸化鉄粉と固化材が混合される領域：以後浄化杭と呼ぶ)が形成される。浄化杭1本あたりの施工手順を図-2に示す。まず、ビットを時計回りに回転させながら削孔を行い、所定の深度まで到達させる。なお、削孔は、原則としてエア噴射のみにより行い、削孔水は使わない。次に改良時には、スラリーを横方向に噴射しながら、ビットを反時計回りに回転させ、所定の速度で引上げていくことにより混合攪拌がなされる。スラリーの噴射圧は20MPaの超高压であり、これによりビットの周囲が切削され、浄化杭は拡幅する。径1.5mのビットを用いた場合には、施工仕様と地盤条件にもよるが、2.1~2.5m程度の改良径を確保することができる。

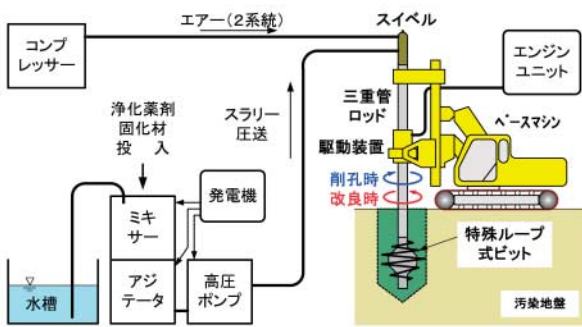


図-1 システム概要



写真-1 施工機械とビット

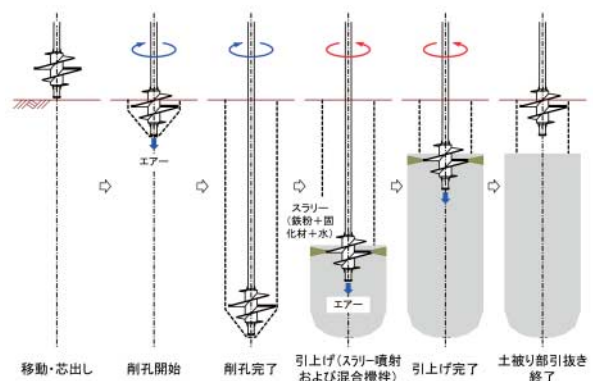


図-2 浄化杭1本あたりの施工手順

2-4 本工法の特徴

本浄化工法の特徴を以下に箇条書きでまとめて示す。

- ① 採用した酸化鉄粉は、VOCの分解過程において、分解に時間のかかる副生成物を生じないため、従来の鉄粉に比してVOCの分解速度が速い<sup>2)</sup>。
- ② 中性系の固化材を、酸化鉄粉と一緒に注入・混合することにより、地耐力の低下を抑えられるので、浄化工事後の土地利用に有利である。
- ③ 浄化処理（スラリーを注入しての原位置混合攪拌）に伴う汚泥の排出がない。ただし、削孔に伴い、掘削体積の15%程度の排土は発生する。
- ④ ベースマシンは0.5m<sup>3</sup>の自走式バックホウ（幅2.6m×長さ6.7m×高さ3.1m）を利用するため、比較的狭隘な場所でも施工できる。特に空頭については、5m程度あれば施工が可能のため、工場建屋内のような空頭の少ない場所に適している。

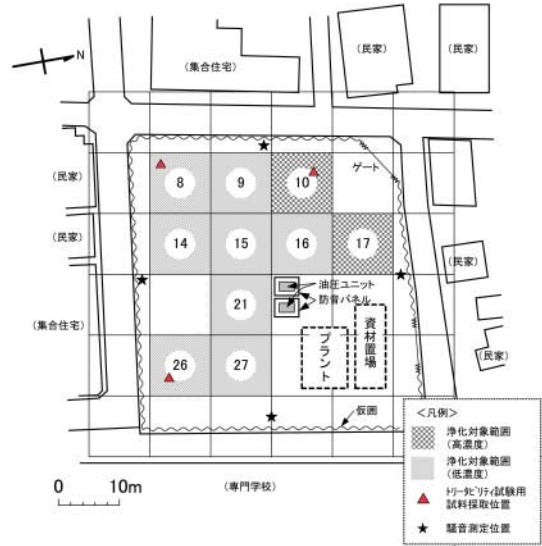


図-3 浄化対象区画と周囲の状況

§ 3. 浄化工事の概要

3-1 工事概要

本工事は、土壌汚染調査により確認されたVOCを、東京都土壌汚染対策指針（平成15年2月）における溶出量基準値を満足するレベルまで浄化することを目的とする。工事概要を以下に示す。

- 工事名：旧四谷第二中学校校庭土壌浄化工事
- 発注者：新宿区
- 工事場所：東京都新宿区大京町1番地
- 工期：平成16年3月17日～平成16年7月30日
- 工事数量：
 

施工面積	1,000m <sup>2</sup>
土壌浄化土量	3,060m <sup>3</sup>
廃材処理	39m <sup>3</sup>

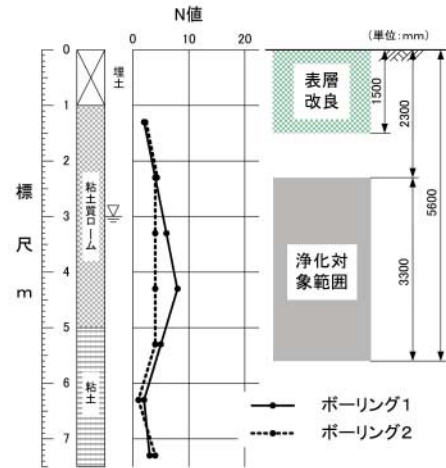


図-4 土質柱状図

3-2 汚染状況

浄化対象の場所は、中学校の校庭として使用されていたが、2001年3月に閉鎖され、2004年4月から定借50年にて介護老人施設が建設される計画となっていた。浄化対象地の平面図を図-3に示す。図に示すように全36区画の内、網掛けで示した10区画（1区画は10m四方）において、テトラクロロエチレン（PCE）およびシス1,2-ジクロロエチレン（cis 1,2-DCE）の汚染が確認された。汚染濃度は、いずれも溶出量基準値の数倍～十倍程度であり、汚染深度は3～5m程度の範囲であった。

3-3 浄化対象地盤の概要

浄化対象地盤の平均的な土質柱状図を図-4に示す。浄化対象地盤の土質は、地表から1m程度までは埋土、その下5m程度までは関東ローム、さらにその下には10m程度まで粘性土が続いている。図中には、平均的な浄化対象範囲も示している。各区画で浄化対象深度は若干異なるが、平均的には、深度にして2.3～5.6mの

範囲である。地盤のN値は2～8の範囲で平均的には5程度である。地下水位は深度2～4m程度の間にある。ただし、この地下水は、関東ローム層内の間隙水によるものであり、井戸を設置すると、徐々に排水され、地下水が溜まるような状況であった。

3-4 トリータビリティ試験

実施工における酸化鉄および固化材の混合量を決定するために、トリータビリティ試験（浄化技術適用性試験：採用する浄化技術の仕様や効果を、現地から採取した実汚染土壌を用い、事前に室内試験等により確認する試験）を実施した。なお、採取した汚染土壌の含水比はいずれも110%程度であった。

(1) 試料土採取

試料土の採取位置は、図-3中に▲で示した3箇所である。試料土はボーリングにより採取した。採取位置は、事前に実施されていた土壌汚染状況調査結果を参照し、



比較的高濃度の汚染の存在が予想される区画の中から1箇所 (No.10), それ以外の比較的低濃度と考えられる区画の中から2箇所 (No.8,26) を選定した。

(2) 酸化鉄粉の混合量の決定

汚染濃度に対する酸化鉄粉の混合量の目安を図-5に示す。この図は、酸化鉄粉を用いた浄化工事の既往の実績および本工法開発時の試験施工の結果から一応の目安として作成したものである。トリータビリティー試験では、図-5から求められる目安の混合量を含む数ケースの混合量について試験を実施した。

酸化鉄粉混合量を決定するための試験手順を次に示す。

- ① スラリーの練り混ぜ：酸化鉄、固化材および水を、予め決めた配合にてビーカーに取り、約1時間ハンドミキサーにて混合。
- ② 実施工で想定される混合割合になるように、汚染土とスラリーをモルタルミキサーにて約1.5分混合。
- ③ アルミパックに試料を封入し、室温にて保管。
- ④ 所定の材令にて溶出法 (環告46号) により抽出したVOCを、GC-MSヘッドスペース法にて測定。

試験を行った配合を表-2に示す。固化材混合量は対象土1m<sup>3</sup>あたり150kgで一律とし、酸化鉄の混合量は対象土1m<sup>3</sup>あたり15kg, 30kgおよび50kgの3通りとして試験を実施した。

区画No.10から採取した試料土の内、最も汚染濃度の高かった土に対する試験結果を表-3に示す。酸化鉄混合量50kg/m<sup>3</sup>の場合、材令14日においていずれのVOC濃度とも溶出基準値以下となっている。濃度の低下傾向まで考慮すれば、酸化鉄混合量30kg/m<sup>3</sup>であっても1ヶ月以内に基準値以下まで低下することが予想さ

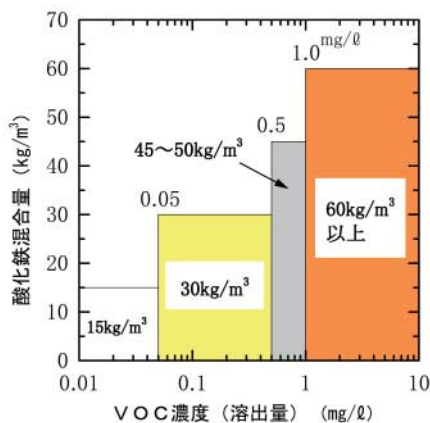


図-5 汚染濃度に対する酸化鉄混合量の目安

表-2 トリータビリティー試験配合一覧表

	酸化鉄	固化材	水
ケース1	15	150	182
ケース2	30	150	179
ケース3	30	150	174

※単位：kg/m<sup>3</sup> (対象土1m<sup>3</sup>あたりの混合量)

表-3 トリータビリティー試験結果 (最大汚染濃度試料の土壌溶出試験結果)

酸化鉄混合量	VOC種別	各材令における溶出量 (mg/L)			
		初期(Blank)	1日	7日	14日
15kg/m <sup>3</sup>	TCE	0.2程度	0.03	0.01	ND
	PCE	0.5程度	0.16	0.11	0.10
	cis1,2DCE	0.5程度	0.17	0.03	0.02
30kg/m <sup>3</sup>	TCE	0.2程度	0.04	ND	ND
	PCE	0.5程度	0.20	0.10	0.03
	cis1,2DCE	0.5程度	0.24	0.02	ND
50kg/m <sup>3</sup>	TCE	0.2程度	0.02	ND	ND
	PCE	0.5程度	0.17	0.03	0.01
	cis1,2DCE	0.5程度	0.19	ND	ND

注) ND：不検出 (検出限界未満)  
網掛けは溶出基準値 (下記) を超えていることを示す；  
TCE：0.03mg/L以下, PCE:0.01mg/L以下, cis1,2DCE：0.04mg/L以下。

れるものの、本工事では安全を考慮し、高濃度の区画に対しては50kg/m<sup>3</sup>を採用することとした。

一方、低濃度の区画から採取した試料の汚染濃度は最大で0.03mg/L (PCE)であった。試験結果は割愛するが、酸化鉄混合量15kg/m<sup>3</sup>の場合、いずれのVOCも材令1日で溶出基準値以下まで低下した。したがって、低濃度の区画に対しては、酸化鉄混合量15kg/m<sup>3</sup>で十分であると判断した。

(3) 固化材混合量の決定

本工法開発の一環として行った配合実験において、①固化材混合量を増やすほど、スラリーと土壌を混合して作成した供試体の強度が増加するが、②スラリー1m<sup>3</sup>中の中の固化材量が670kg以上になると、スラリーの粘性が急激に増加し、ポンプ圧送が困難となることが明らかになっている<sup>3)</sup>。本工事では、土壌1m<sup>3</sup>あたり約230ℓのスラリーが注入される仕様としたので、ポンプ圧送が可能な範囲で最大の固化材混合量は約150kg/m<sup>3</sup>となる。したがって、トリータビリティー試験では、その混合量により得られる強度を確認することとした。試験方法は次の通りである。

- ① 汚染土壌1m<sup>3</sup>に対し、表-2のケース3の配合となるように各材料を混合する (スラリーの練り混ぜ方法および汚染土とスラリーの混合方法は酸化鉄混合量を定める試験と同様)。
- ② 混合した試料土を径100mm、高さ100mmのモールドに一定の方法で詰め、密封し室温で養生する。
- ③ 所定の材令にてポータブルコーン貫入試験を実施する。

なお、強度確認のための試験としてコーン貫入試験を用いたのは、簡易に行えることが主な理由である。

材令7日における試験結果を表-4に示す。コーン指数qcはほぼ500kN/m<sup>2</sup>に達しており、この程度の値であれば粘土の場合、経験的にN値5以上の強度に相当する<sup>4,5)</sup>。したがって、固化材混合量は150kg/m<sup>3</sup>とした。

表-4 トリータビリティ試験結果  
(材令7日におけるコーン指数)

土壌 1m <sup>3</sup> あたり 混合量	元土の 含水比	コーン指数(材令7日) qc(kN/m <sup>2</sup> )	
		個別値	平均
酸化鉄：50kg/m <sup>3</sup> 固化材：150kg/m <sup>3</sup> 水：174kg/m <sup>3</sup>	108%	571	530
	111%	530	
	114%	490	

3-5 浄化杭の有効径，配置および施工順序

浄化杭の有効径としては，地盤条件（粘性土でN値10未満）と本工法の施工仕様（スラリー注入圧20MPa，注入量は70ℓ/分で1m引上げあたり800ℓ注入）から，既往のAMP工法（地盤改良）での実績により2.1mを見込むことができる。

浄化杭の配置平面図を図-6に示す。浄化杭は，対象区域の周囲に施工する止水壁部と，止水壁に囲まれた内部の浄化杭とに分けて施工する。止水壁部の浄化杭は，浄化対象範囲の外部に汚染が拡散するのを防ぐために，内部の浄化杭に先立って施工した。止水壁部の浄化杭は，確実に壁状にする必要があることから，隣接する浄化杭が300mm程度ラップするように配置している。一方，内部の浄化杭は千鳥状に配置し，隣接する浄化杭同士のラップは100mm程度としている。

3-6 スラリーの配合

施工に用いたスラリーの配合を表-5に示す。このスラリーの配合は，浄化杭1本ごとに，表-2に示した割合で酸化鉄粉および固化材が混合されるように決定している。

また，安全を考慮し，止水壁部浄化杭への酸化鉄粉混合量は，内部の浄化杭よりも多い30kg/m<sup>3</sup>とした。ただし，汚染濃度の高いNo.10および17の区画に含まれる止水壁杭については50kg/m<sup>3</sup>とした。

表-5 スラリー 1m<sup>3</sup>あたりの各材料の配合

(単位：kg/m<sup>3</sup>)

	酸化鉄	固化材	水	適用箇所
配合① (ケース1に対応)	65	649	789	内部浄化杭 (区画10,17を除く)
配合② (ケース2に対応)	130	649	774	止水壁杭 (区画10,17を除く)
配合③ (ケース3に対応)	217	649	754	区画10,17

表-6 浄化工事後の土壌溶出量分析結果

区画No.	材令	試料採取 深 度	土壌溶出試験結果 (mg/ℓ)		
			TCE	PCE	cis1,2DCE
8	9日	3~6m	(3深度3汚染物質ともND)		
9	20日	3~4m	ND	ND	ND
		4~5m	ND	0.002	ND
		5~6m	ND	ND	0.004
10	31日	3~6m	(3深度3汚染物質ともND)		
14	10日	3~4m	ND	0.001	ND
		4~5m	ND	0.002	0.004
		5~6m	ND	ND	ND
15	7日	3~6m	(3深度3汚染物質ともND)		
16	8日	3~6m	(3深度3汚染物質ともND)		
17	14日	3~4m	ND	0.001	ND
		4~5m	ND	ND	ND
		5~6m	ND	ND	ND
21	15日	3~4m	ND	0.002	0.004
		4~5m	ND	ND	0.011
		5~6m	ND	ND	ND
26	9日	3~6m	(3深度3汚染物質ともND)		
27	6日	3~4m	ND	0.001	ND
		4~5m	ND	0.001	ND
		5~6m	ND	ND	0.007

注) 材令：各区画の中央付近の浄化杭の施工日から分析実施日までの経過日数

3-7 浄化効果の確認結果

浄化杭施工後，浄化措置完了の確認として，ボーリングにより試料を採取し，土壌溶出量の分析を行った。試料の採取頻度は，土壌汚染対策法の技術的事項として示されている頻度<sup>6)</sup>に倣い，平面的には100m<sup>2</sup>に1地点(各区画の中央)，深度的には1mごととした。

分析結果を表-6に示す。分析は，試料採取位置に該当する浄化杭施工後6~31日経過後に行われたが，いずれの地点および深度においても，溶出量基準値を下回る分析結果が得られた。

3-8 地耐力の確認結果

地耐力の確認試験として，前項の試料採取ボーリングに併せて，いくつかの区画において標準貫入試験を実施した。その結果を図-7に示す。施工前と同程度のN値5に近づいている結果もある一方，全深度においてN値1となっている結果もある。後者の原因のひとつとして，対象地盤の含水比が大きく影響していたことが考えられる。浄化対象地盤は関東ロームが主体で含水比が高く，また浄化対象区域内に古井戸があったことから，局部

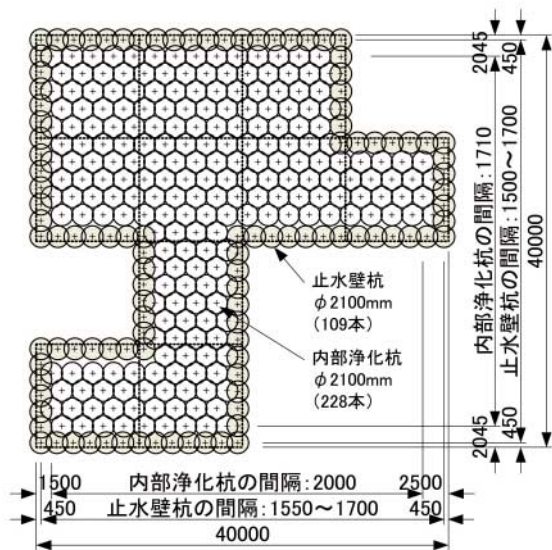


図-6 浄化杭の配置図

的に高含水比地盤が存在していた可能性がある。

本浄化工事後には、建物の基礎として場所打ちの施工が行われることから、杭の曲げ耐力の確認に供するために、事後調査試料採取のボーリング孔を利用し、孔内水平載荷試験も併せて実施した。その結果を表-7に示す。地盤の変形係数に関しては、施工後は施工前の1/8~1/10程度にとどまった。

3-9 施工に伴う環境負荷について

本施工事例における環境面での主な問題点とその対応策について、以下に箇条書きで示す。

- ① 騒音について：本工法における最大の騒音発生源は、改良機の油圧ユニットである。本工事では、この騒音を低減させるために、油圧ユニットを防音パネルで囲むこととした。この油圧ユニットを敷地のほぼ中央付近に設置し（図-3参照）、全ての機械が稼動した状態で敷地境界付近（図-3参照）で騒音測定を行ったところ、騒音のレベルは70dB程度まで低減された。
- ② 排土の処理について：本工事における削孔時の排土量は、改良杭1本当たり1.5~2.0m<sup>3</sup>であった。本工事における改良杭1本あたりの削孔体積は約10m<sup>3</sup>であるので、排土量は掘削体積の15~20%であり、既往のAMP工法の実績（15%）よりもやや多

めであった。なお、本事例では、汚染が深部であったため、排土には汚染は認められず、建設残土としての処理が可能であった。しかし、表層部まで汚染されている地盤の場合には、削孔土に対する浄化処理も別途必要となる。

- ③ ビットによる削孔およびスラリー注入時において、孔口からの“泥はね”が著しかったため、孔口部に泥除けの覆いを設置した。また、地中からVOCが上昇し、地上（泥除けの覆いの内部）に放出される可能性も考えられたので、1日1回検知管を用いてVOC濃度の測定を行った。しかし、測定の結果、VOCが検知されたことはなかった。

§ 4. おわりに

VAMP-crete工法を本工事に適用した結果、VOC汚染土壌の浄化に関しては、環境基準の数倍~十倍程度の汚染を、浄化杭施工後1ヶ月程度の間環境基準値以下まで浄化することができた。しかし、本工法のもうひとつの目的である地耐力の低下抑制に関しては、十分な効果を確認することができなかった。今後は、事前に対象地盤の含水比の把握を確実にを行うことに留意するとともに、本工法の固化方法（石膏系固化材をスラリーで送る方法）の適用可能な土質や含水比の範囲、またどのような強度特性がどの程度保持できるのかを明確にすることが必要である。さらに、高含水比の地盤の場合には、例えば酸化鉄粉や固化材を粉体のまま送り込むシステムを採用する等、地盤の含水比と地耐力に関する要求レベルに応じた対応方法を確立したいと考えている。

参考文献

- 1) 武井正孝, 稲葉 力：AMP工法の概要と施工事例, 西松建設技報, Vol. 26, pp. 91-92, 2003.
- 2) 桜井 薫, 佐々木謙一：酸化鉄系材料「MT-VOC」によるVOCs分解に関する一考察, 第9回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp. 100-101, 2003.
- 3) 稲葉 力, 武井正孝：酸化鉄と石膏系固化材を用いたVOC処理技術, 第39回地盤工学研究発表会, pp. 2227-2228, 2004.
- 4) 地盤工学会編：地盤調査法, pp. 202, 1995.
- 5) 前掲4), pp. 225.
- 6) 環境省監修：土壌汚染対策法に基づく調査および措置の技術的手法の解説, 土壌環境センター編, pp. 167, 2003.

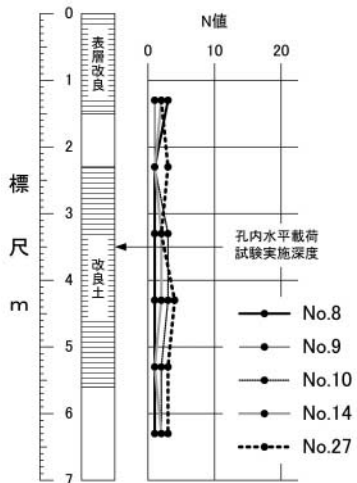


図-7 施工後の標準貫入試験結果

表-7 孔内水平載荷試験結果

	変形係数 E <sub>m</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	
	値の範囲	平均値
施工前	8.7~16.8	12.8
施工後	0.8~2.8	2.3