

高圧噴射工法を用いた地盤浄化工法 とその適用例

早崎勉¹・川端淳一²・大島博³・浦満彦⁴
伊藤圭二郎²・浜村憲²・上澤進⁵

¹正会員 工博 鹿島建設(株) 土木管理本部 (〒107-8388 東京都港区元赤坂1-2-7)

²正会員 工博 鹿島建設(株) 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

³正会員 工修 鹿島建設(株) 名古屋支店 (〒460-0004 愛知県名古屋市中区新栄町2-14)

⁴正会員 工修 鹿島建設(株) 環境本部 (〒160-0004 〒163-1028 東京都新宿区西新宿3-7-1)

⁵正会員 ケミカルグラウト(株) 環境本部 (〒160-0004 〒163-1028 東京都港区虎ノ門2-2-5)

高圧噴射攪拌工法を土壌・地下水浄化のための原位置浄化工法に適用したエンバイロジェット工法について述べた。エンバイロジェット工法は高濃度の汚染源部のみを部分的に除去置換するジェットリプレース工法と、有機塩素化合物による汚染浄化に効果のある還元鉄粉を必要な部分に必要な量混合攪拌するジェットブレンド工法がある。本報告ではこれらの原位置浄化効果工法の原理を述べると同時に、現場に適用し、短期間に環境基準を達成する浄化を行うことができた事例を紹介する。

キーワード：土壌地下水汚染, 高圧噴射工法, 有機塩素化合物, 還元分解

1. はじめに

有機塩素化合物は主要な土壌・地下水汚染物質の一つであり、長期間地中に滞留し地下水を通じて広範囲な地下水汚染を引き起こすことで知られている。著者らは有機塩素化合物による汚染を、早期に環境基準レベルまで浄化できる原位置汚染対策として、高圧噴射工法を活用する浄化工法（以下エンバイロジェット工法と称する：図—1）を開発した。エンバイロジェット工法とは、汚染された箇所を部分的に除去し、粘土、セメント、加重材を配合した無害な置換体で置き換えることを可能にした「ジェットリプレース工法」と、還元鉄粉等のように有機塩素化合物に対して生化学的な汚染物質分解作用を持つ浄化材料を、部分的に原地盤と混合する「ジェットブレンド工法」の二つのタイプであり、本報文はこれらの二つの工法の原理及び実現場へ適用した事例を示したものである。

2. 有機塩素化合物汚染の形態とエンバイロジェット工法

発がん性物質として知られる有機塩素化合物は難溶解性であり、水に対する溶解度は 150mg/L(テトラクロロエチレン)～1,000mg/L(トリクロロエチレン)程度である。しかし、これらの飽和溶解濃度はそれぞれの物質の環境基準に比較すると 10,000～100,000 倍ということになり、原液が地下水中に混

入すればすぐに高濃度の汚染が引き起こされることになる。また、有機塩素化合物の原液は、比重が水より重くまた粘性も小さいことから、原液の状態で地下水中でも鉛直下方に浸透し、粘土層等があればそこに滞留する。図—2には典型的な汚染形態を示す。特に帯水層底部難透水層（粘土層）上面には多くの原液が滞留しやすいため、ここが地下水汚染源となつて、半永久的に周囲の地下水を汚染し続けることになる。また、有機塩素化合物原液の浸透状況や浸透後の分布は地中のマクロ/マイクロな不均質性に左右されるため、汚染源の分布を精細に予測することは極めて難しく、汚染状況の把握は一般にボーリングによる点のデータを組み合わせて推定するしかない。

このような汚染を浄化するためには、原理的には、①汚染源となっている原液漏洩地点鉛直方向の汚染部分及び帯水層下部の難透水層（主として粘性土）上部に滞留する汚染源浄化、②広範囲に広がる地下水汚染の浄化という二つ観点から浄化を考える必要がある。このうち、汚染源を除去する方法には汚染の濃度、量に応じて様々な種類があるが、粘性土に大量の原液が浸透しているような場合には、浄化剤の注入・攪拌のみでは浄化は難しい場合も多く、ジェットリプレース工法のような置換・除去工法が確実である。

一方、広範囲に広がった地下水汚染対策に対しても多くの方法があるが、揚水処理のような物理的方法では地盤の不均質性、把握しきれない汚染源の存

在などにより早期の浄化は難しい。これを解決するために、各種の生・化学的分解工法が提案されているが、還元鉄粉による分解浄化方法は比較的高濃度の汚染にも対応可能であると同時に、効果の持続性が高い方法であり、分解浄化方法としては確実性の高い工法であるといえる（表-1）。ジェットブレード工法は還元鉄粉のような細粒状の浄化剤を、施工範囲外へ拡散させることなく、高精度に地盤内の特定深度において原地盤と攪拌・混合した造成体をつくることのできる方法であり、造成体の本数や施工位置により、現場のスペック（浄化目標、浄化期間）に見合った設計を行うことが原理的に可能となる。すなわち深部に浸透する傾向のある有機塩素化合物の原位置浄化方法としては、薬液注入工法を利用して浄化剤を地盤中に入れる工法等に比べてより確実であり、また、地盤の特定深度のみを乱して浄化材料を攪拌混合できるという点で、機械攪拌に比べて優れた特徴を持つ技術であるといえる。

原位置浄化工法としてのエンバイロジェット工法の長所を以下に示す。

- ・注入工法等を利用した原位置浄化工法に対して改良範囲が明確であり、原位置浄化工法としては浄化予測がしやすい。
- ・大深度汚染に対して必要深度のみ部分的に浄化を行うことが可能であり、地中深く浸透した後、平面方向に拡散する有機塩素化合物のようなVOC汚染の形態に合致し、コストメリットを発揮する。
- ・部分置換、浄化剤の混合等、複数の用途に応用が可能である。

これに対して、本工法の課題としてはスライム処理が必要であることが挙げられる。

3. エンバイロジェット工法の原理

(1) ジェットリプレイス工法

a) 原理

ジェットリプレイス工法は汚染地盤中の特定深度において約 30MPa の高圧ウォータージェットより円柱状に原地盤を切削し泥濁化させながら、高比重のモルタルを注入して汚染部分を除去し、置換する技術である。置換体の強度はモルタル中の固化材量を調整して決定することができるため、跡地の建物利用に対する支障や、地盤沈下等の地盤変状を生じることなく浄化を完了することができる。この工法を用いることにより、粘性土に浸透して地下水汚染の汚染源となったVOCその他の地中の汚染物質を部分的に除去することが可能であり、浄化を極めて短

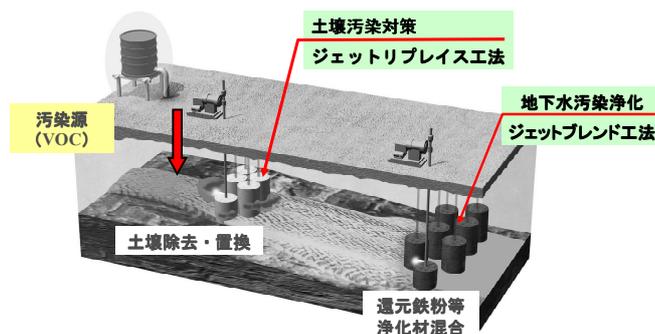


図-1 エンバイロジェット工法概念図

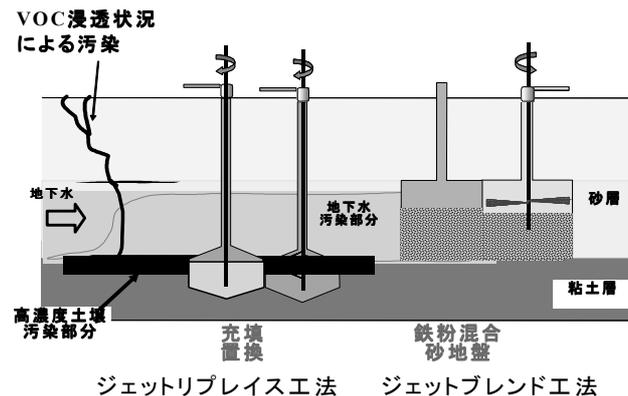


図-2 有機塩素化合物の汚染形態とエンバイロジェット工法の適用概念

表-1 各種分解浄化方法の原理と特徴

分解浄化方法の種類		使用薬剤	特徴
化学的分解法	酸化分解	過酸化水素など	高濃度可。薬剤の効果持続性短い
	還元分解	還元鉄粉等	比較的高濃度可。薬剤の効果持続性長い
微生物分解	好気分解	メタン, 酸素, 栄養塩等	低濃度向。薬剤の効果持続性短い。
	嫌気分解	水素徐放剤, 栄養塩等	低濃度向。薬剤の効果持続性やや長い

期間に終わらせることが可能となる（図-3）。置換効果の品質確認方法については、施工中には設計充填量すなわち切削範囲と同等の体積分以上の充填材が注入されたかどうか、また、施工後はコアサンプリングによる置換率、土壌溶出量値の測定により、浄化効果の確認を行うことができる¹⁾。

b) 施工方法及びスライム処理方法

図-3にジェットリプレイス工法の施工概要図を

示す。施工にはいくつかの方法があるがここでは三重管を用いた方法を説明する。ボーリング孔にウォータージェット（空気・水）を噴射する経路と置換材を注入する経路がそれぞれ独立した構造をもった三重管を高濃度汚染深度まで挿入する。次に三重管を回転させ、ウォータージェット交差噴流による地盤切削を行って対象改良範囲を泥水状にする。最後に三重管の下部から固化材や粘土等によって泥水より高比重に調整された充填モルタルを低圧注入して、泥水を置換しながら円柱状の置換改良体を造成し終了する。

施工時に切削された汚染スライムは、切削時の圧縮空気のエアリフト効果と充填モルタルの置換により、ガイドパイプを通して地上のばっ気用タンクまで配管によって運搬される。そこでジェットポンプ等によりばっ気浄化された後⁴⁾、分級浄化される。最終的に残った泥水は脱水された後、再度同じ現場において粘土として、置換用の充填モルタルや埋め戻し土として再利用することが可能となる。

(2) ジェットブレンド工法

a) 原理

ジェットブレンド工法の施工概要図を図-4に示す。ジェットブレンド工法は還元鉄粉水等の浄化材料との混合水を高圧で噴射しながら原地盤の帯水層と混合し、円柱状の混合体を造成するものである（図-4参照）。地中深い帯水層内に、予め設計した鉄粉混合率を高精度に確保しながら地盤中に還元鉄粉を攪拌・混合することが可能であることが実証されている³⁾。使用するウォータージェットの種類によって、混合体の直径は異なるが現在もっとも実績が多い例としては直径3m程度の造成体であり、一度に鉄粉を混合できる平面範囲としては最大規模である。

b) 施工法及びスライム処理方法

ジェットリプレース工法と同様に施工対象深度まで管を建て込んだ後、予め所定の濃度に調合した鉄粉混合水をウォータージェットとして地盤中に高圧噴射する。攪拌開始後は高速度で引き上げながら、原地盤の土と鉄粉との円柱状混合地盤を造成する。鉄粉混合率は鉄粉水濃度と管の引き上げ速度により決定される。鉄粉を効率よく送るためには鉄粉の十分な混合、スムーズな高圧噴射を確保するために特殊な鉄粉混合液を調合することが必要である。ウォータージェットによる切削中には原地盤中の土粒子の一部がスライムとして、地中に上がってくるが、その分の体積減少分（改良体積の1割程度）につい

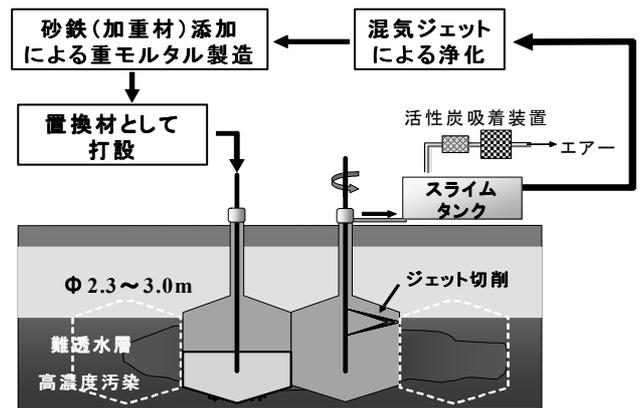


図-3 ジェットリプレース工法の概念図

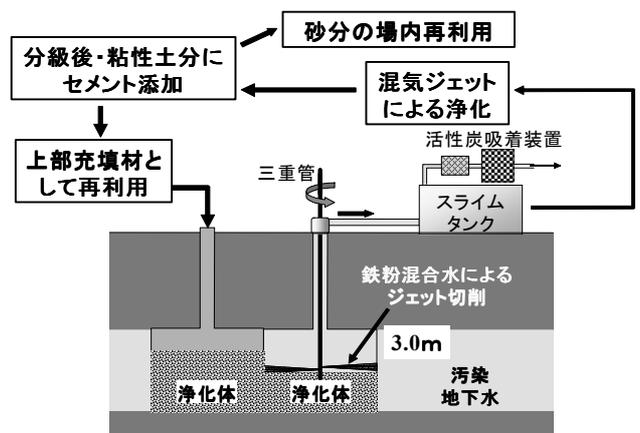


図-4 ジェットブレンド工法概念図

ては、施工後造成体上部に充填材を注入して地盤変状を防止することが可能である。鉄粉の攪拌による透水性については、過去の実績から低下はおきておらず、むしろ攪拌により透水性は比較的高めとなっており、透過性浄化壁としても十分な機能を持つことができる。所定直径（e.g. 3m）を確保できているか否かについては、施工後に造成体と想定される場所内でボーリングサンプル（鉄粉混合土）を採取し、サンプル土を用いた有機塩素化合物の分解実験を行って、想定される浄化効果が発揮できるかどうかにより確かめることができる^{2),3)}。

図-4中に示されるように、汚染スライムは、ジェットリプレース工法と同様に、エアーリフトとジェットポンプによりばっ気浄化され、分級された後、砂については充填材の配合や現場の埋め戻し土として、また粘土については、ジェットリプレースの配合材料や改良して現場埋め戻し土として使用されることが可能となる。

4. 施工事例

(1) 汚染状況と地盤条件

当現場はテトラクロロエチレンによる汚染現場で

あり、施工開始後1年以内に全域で土壌及び地下水汚染を環境基準以下とすることが求められた。地盤状況と地下水汚染の状況を図-5、図-6に示す。汚染は典型的な有機塩素化合物の汚染形態となっており、汚染物質が漏洩した汚染源において表層から帯水層下面（粘土層上面）GL-10m までに高濃度の土壌汚染が点在し、汚染源の地下水下流側においては、帯水層の底面の粘性土上部には高濃度の土壌汚染が検出されており、地下水汚染源となっているものと推定された。これに伴って地下水汚染は、図中のほぼ全面に広がっている。地下水濃度は汚染源付近では環境基準の100倍以上であり、下流にいくにしたがって徐々に低くなっている。また帯水層は中砂～粗砂でできており、透水係数は 10^{-2} cm/s オーダであった。

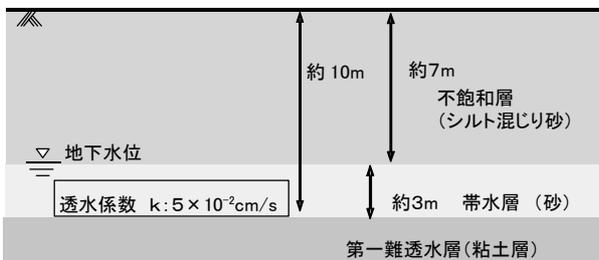


図-5 地盤条件

《地下水調査結果》

- ◻: 地下水基準値以内地点
・数字は対基準値倍率を示す
- ◻10: PCE地下水基準値超過地点
・赤数字は基準値に対する超過倍率を示す
- ・NDはいずれの物質も分析定量限界以下を示す

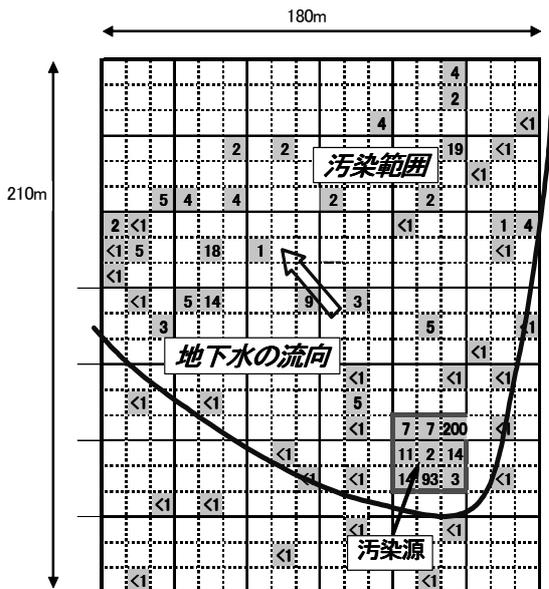


図-6 地下水汚染状況

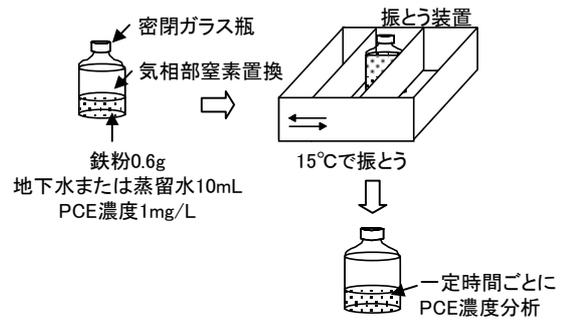


図-7 室内実験の手順

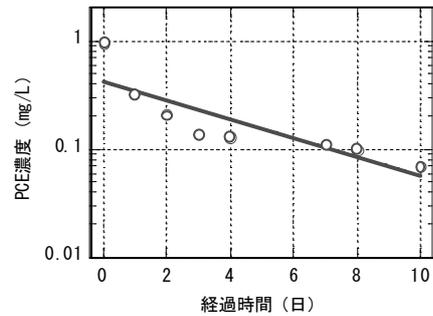


図-8 室内実験結果

(2) ジェットブレンド工法における還元鉄粉の配合量の決定

ジェットブレンド工法において配合すべき還元鉄粉の種類や量については、事前の室内実験により決定した。図-7に室内実験の手順、図-8にその代表的な結果を示す。鉄粉の効果は地下水の水質と鉄粉の種類によって異なるために、ここでは様々な種類の鉄粉を用いた行った結果、図-8に示すような効果を示す鉄粉を用いて施工を行うこととした。これは約10日の滞留で地下水汚染濃度を1/10にできるレベルであり、現場においてもこれと同等の鉄粉混合量、すなわち 20kg/m^3 の還元鉄粉を地盤中に混合できれば、同様の浄化性能を持つ鉄粉混合体を造成できるものと考えられた。したがって現場における鉄粉配合設計量も 20kg/m^3 と決定した。

(3) 現場施工試験及び品質管理方法

ジェットリブレイス工法、ジェットブレンド工法ともに、施工スペックを決定するために事前の現場実験を実施した。

a) ジェットリブレイス工法

現地地盤において3(1)に示す方法を用いて実施施工前に12本の試験施工を実施した。その結果、充填モルタルによる置換をスムーズに実施するための必要条件としてスライムの比重、粘性の管理値を決定した。また、そのような値を得るための施工スペック（噴射量、引き上げ速度、噴射時間）についても現場にあわせた管理値を決めた。表-2中に事前の試験施工によって決定した品質管理項目を示す。

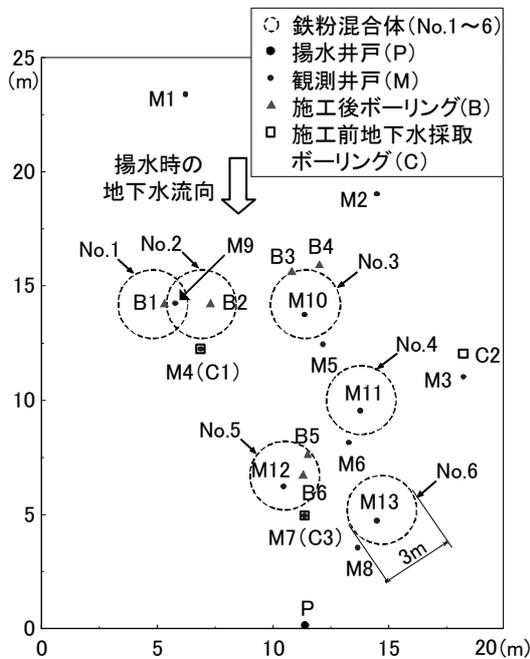


図-9 ジェットブレンド工法試験施工平面図

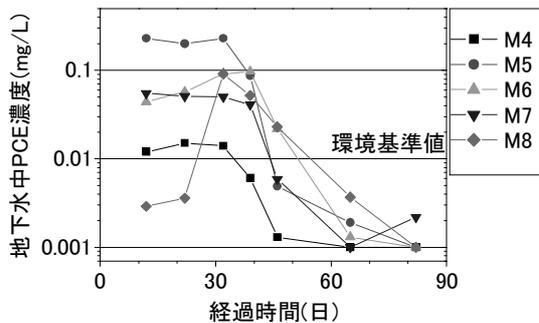


図-10 事前試験施工モニタリング結果

b) ジェットブレンド工法

当該地盤において、図-9に示す平面配置でジェットブレンド工法による鉄粉混合体造成の実験施工を実施した。この施工配置は、平面的に約30%の改良率となる施工間隔でNo.2~6の鉄粉混合体を配置し、No.1とNo.2についてはラップさせた場合の鉄粉混合状況及び浄化効果について確認するため実施した。鉄粉は20kg/m³以上を確保するように施工スペックを決定した。施工後には、鉄粉が混合されているかどうかを確認するためのボーリングサンプリング(B1~B6)を行うと共に、揚水井Pで揚水することによって地下水の流れを制御して各モニタリング井戸(M1~M13)において浄化効果を確認した。施工後に行ったB1~B6のボーリングサンプルのうち、GL-8(m)とGL-9(m)のサンプルに対して、所定の分解能力を有しているかどうかを確認するためのバッチ試験を行った。また、既知量の砂と鉄粉を混合したサンプルでもバッチ試験を行い、基準

表-2 エンバイロジェット工法の品質管理項目

ジェットリプレース工法	
施工時	・汚染スライムの性状 ・モルタル充填量
施工後	・コアサンプリングによる体積置換率 ・コアサンプリング土壌溶出値による浄化確認
ジェットブレンド工法	
施工時	・引き上げ速度、噴射量 ・鉄粉濃度 ・地盤中の鉄粉残置量
施工後	・コアサンプリングを用いた室内分解実験による有効鉄粉含有量の測定 ・観測井戸における濃度モニタリング

となる分解速度定数を求め、ボーリングサンプルを用いた場合のバッチ試験結果を基準としてこれと比較することで、鉄粉混合体の分解能力を評価した(表-3参照)。これより施工中心から1.5(m)までのボーリングサンプルについては、基準値(0.3(1/hour)以上)の分解速度定数を有しており、深度方向の分解能力の差異も見られなかった。また、中心から1.7(m)離れたB4のサンプルは分解反応を示しておらず、鉄粉混合範囲外であると考えられる。以上から、ほぼ想定通りにφ3(m)の範囲内において、鉄粉混合造成体としてはほぼ均質な混合ができていることを確認した。

図-10に鉄粉混合体下流側における地下水濃度の経時変化を示す。どの観測井戸においても、施工実施後2ヶ月の間に十分な浄化効果のあることが確認された。

表-3 ボーリングサンプルによる分解試験結果

ボーリング孔名	施工中心からの距離(m)	サンプル採取深度(G.L.m)	サンプルの分解速度(目標:0.3>)(day ⁻¹)
B1	0.5	-8	0.4
		-9	0.8
B2	1.0	-8	0.5
		-9	0.9
B3	1.5	-8	0.7
		-9	0.5
B4	1.7	-8	0.0
		-9	0.0
B5	1	-8	0.6
		-9	0.7
B6	1.3	-8	0.8
		-9	0.9

(4) 対策方法

対策方法の立案にあたっては図-6に示す地下水濃度分布、及び地下水の高濃度部で実施した10m区画に1箇所ずつ帯水層上面粘性土の土壌サンプリングによる土壌溶出量分析結果より次のような対策計画を立案・設計した。

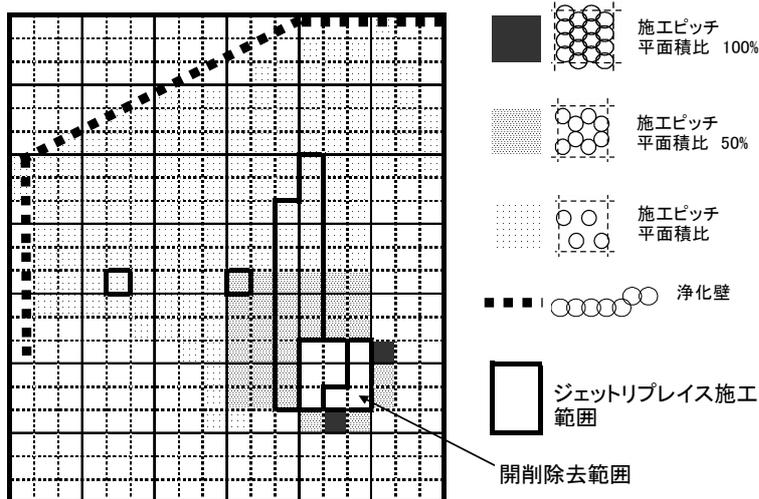


図-11 浄化対策概要平面図

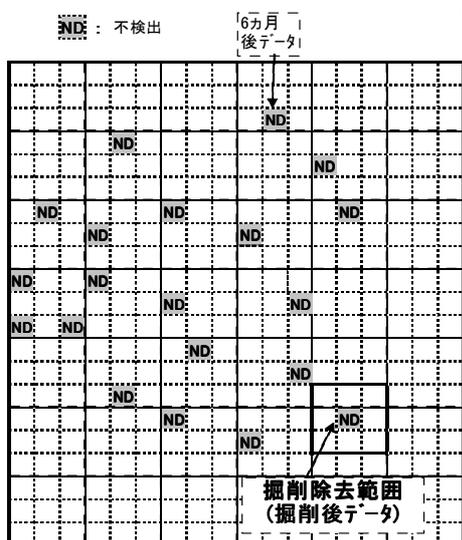


図-12 対策8ヵ月後の地下水濃度データ

- ・汚染漏洩部(図中赤枠内):GL-10mまでの全面掘削
- ・帯水層下部の粘性土の高濃度土壌汚染検出箇所:高さ1mのジェットリプレイス工法を施工。(図-11 中黒枠内)
- ・地下水対策:濃度に応じた施工ピッチでジェットブレンド工法を施工。
- ・下流側(北西部)敷地境界において,ジェットブレンド工法により透水性浄化壁を構築する。

(5) 実施工による浄化効果

ジェットブレンドのピッチについては現地の地下水流速,地下水汚染濃度,造成体の浄化性能,環境基準以下とするまでの目標工期を勘案して設計した実施工時には表-2のような品質管理項目を設定して施工を行った。これらの品質管理項目のうち施工

後十分な品質を満足できなかったと判断された場合には,再施工等の方策をとるものとして施工を実施した。施工はほぼ3ヶ月にわたって実施され,ほとんど不具合を発生することなく終了した。

施工後における品質を確認した結果,ジェットリプレイス施工範囲については,すべてのボーリングサンプルにおいて土壌溶出値が環境基準値未満であることを確認した。これらのうちの一点で置換率の不足した施工場所があったが,浄化効果に問題はなかった。地下水浄化については,施工対象範囲の各地点でモニタリングを行って,8ヵ月後には当該区域内の地下水濃度が環境基準値以下であることが確認された。

図-12はその際の地下水濃度データを示す。

5. おわりに

エンバイロジェット工法は,広範囲に広がった地下水汚染を短期間で浄化したり,透水性浄化壁を深部帯水層に対して部分的に構築することができる等の長所と,スライム処理等の課題を持つ工法であるが,本報告においてはそれらの長所を生かし,課題を克服して現場適用する方法と事例を示した。今後も当該分野の社会的課題である原位置浄化の品質の確保とコストダウンに貢献したいと考えている。

【参考文献】

- 1) 川端淳一,伊藤圭二郎,河合達司,上沢進(2002):ウォータージェットを用いた汚染地盤の修復技術について,土と基礎,Vol.50, No.10, pp.25-27.
- 2) 伊藤圭二郎,川端淳一,河合達司,浜村憲,上沢進(2005):ジェットブレンド工法による鉄粉のPCE汚染地盤への混合とその浄化効果について,第40回地盤工学研究発表会報文集,2005
- 3) 川端淳一,伊藤圭二郎(2005):ウォータージェット工法を用いた地盤汚染浄化技術-エンバイロジェット工法-,基礎工 Vol.33, 384号
- 4) 福浦清,今田勝也,伊藤圭二郎,今立文雄,川端淳一(2003):混気ジェットポンプを用いたスラリー中のVOC処理,第9回地下水・土壌とその防止対策に関する研究集会講演集