水平井戸を用いた土壌・地下水汚染の浄化方法

山内 仁*・笠水上光博*

Remediation System utilizing Horizontal Well

Hitoshi YAMAUCHI* and Mitsuhiro KASAMIZUKAMI*

Abstract

Some approaches have been conducted to regenerate and to conserve soil environments contaminated by toxic substances. However, sites requiring remediation are usually inside plants in operation and it is difficult to place remediation equipment, including wells, there. This is one obstacle to soil environment regeneration.

Horizontal wells are installed at the required depth by boring from ground surfaces. Using this method, it is possible to install contaminated soil and groundwater remediation wells right under plants and tanks from the outside into contaminated zones without stopping production lines.

Using a gas-pipeline drilling technique, the horizontal well was installed for remediation volatile organic compounds. The problems of constructing the horizontal well and the effects of remediation were examined.

There was concern that contaminants are included in water used for boring and muddy water when a drilling head passes through a contaminated section during the construction, and these water and muddy water diffuse towards the surroundings.

Influenced areas of soil vapor extraction are more than a radius of 4.9 m horizontally and a radius of 3.9 m vertically. Because a long screen can be placed horizontally in this well, it is expected that the well is effective in the remediation of horizontally spread contaminants.

Key Words: horizontal directional drilling, horizontal well, soil vapor extraction, contaminated soil and groundwater, volatile organic compound, remediation

* 国際航業(株)地盤環境エンジニアリング事業部()

要 旨

近年、有害物質に汚染された地盤環境を再生し保全していくためのアプローチがなされているが、浄化を必要とするサイトは井戸を含めた浄化設備の設置が困難な稼働中の工場建屋内であることが多く、これが地盤環境再生の阻害要因の1つとなっている。

水平井戸とは、地上から斜めに掘削を進め、必要な深度に水平に設置した井戸である。本工法を用いることにより、工場建屋やタンク直下の土壌・地下水汚染に対して、生産ラインを止めることなく建屋やタンクの外から汚染ゾーンに浄化用の井戸を設置することができる。

筆者らは、ガス管理設技術を用いて、揮発性有機塩素系化合物の浄化を目的とした水平井戸を設置して、施工性と浄化効果の検討を行った。

施工時にはドリルヘッドが汚染区間を通過する際に、掘削に使用する水や発生する泥水中に汚染物質が含有され、これらの水や泥水が周辺に拡散する懸念がある。しかし、掘削に使用する水量および掘削孔内から土壌中に浸透する水量は少ないため、新たな土壌汚染の発生は無視できる範囲であると判断した。

土壌ガス吸引の影響半径は水平方向で4.9m、垂直方向で3.9mであった。水平井戸は横方向に長いスクリーンを設置できるため、横方向に広がった汚染の浄化に対して水平井戸は有利であると考えられる。

キーワード：水平井戸掘削技術、水平井戸、土壌ガス吸引、土壌・地下水汚染、揮発性有機塩素化合物、浄化

1. はじめに

近年、人間の活動に伴う廃棄物あるいは漏洩物質として、環境中に排出された有害物質による土壌や地下水の汚染が大きな社会問題となっている。1994年度までの環境庁の調査では、全国232箇所で深刻な土壌・地下水汚染が発見されている。さらに、民間の調査ではこの100倍を超える汚染地域があると推定されている。このため、有害物質に汚染された地盤環境を再生し、保全していくためのアプローチがなされている。

しかしながら、浄化を必要とするサイトは井戸を含めた浄化設備の設置が困難な稼働中の工場建屋内であることが多く、これが地盤環境再生の阻害要因の1つとなっている。

水平井戸とは、地上から斜めに掘削を進め、必要な深度において掘削方向を水平に変換し、水平方向に設置した井戸である。本工法を用いることにより、

工場建屋やタンク直下の土壌・地下水汚染に対して、生産ラインを止めることなく建屋やタンクの外から汚染ゾーンに浄化用の井戸を設置することができる。筆者らは、ガス管理設技術を用いて、揮発性有機塩素化合物の浄化を目的とした水平井戸を設置して、浄化実験を行った。本論では、水平井戸の設置方法および水平井戸を用いた土壌ガス吸引による浄化方法の検討について報告する。

2. 水平井戸掘削技術及び水平井戸の特徴

筆者らが用いた水平井戸掘削技術は、従来ガスの敷設に用いられていた工法である。図1に示すようにパワーユニットおよび掘削機からなり、掘削はドリルヘッドの先端から高圧水を噴射して地層を切り崩して小口径のパイロット孔を形成する。パイロット孔掘削後、リーマーを使用して拡孔し、同時に井戸材料を引き込んで浄化用水平井

図1 水平井戸の設置と浄化方法

Fig. 1 Conceptual diagram of drilling and remediation using horizontal well

戸を設置する。

本掘削技術は、米国では1970年代から電線や電話線の埋設用に使用されて、1980年代後半から土壌・地下水汚染の浄化用水平井戸の設置技術として使用されてきた。1995年で約200本を超える浄化用水平井戸があるといわれている。

浄化用の水平井戸は、在来工法である垂直井戸に比べ以下の特徴があり、浄化効果が高いとされている。

- ①建屋の外側から、建屋の下に、浄化やモニタリング用の水平井戸を設置することができる。
- ②掘削は、誘導しながら、任意の方向に進めることができる。埋設管を避けたり、汚染の分布に沿った井戸を設置することができる。
- ③横方向に拡がった汚染に対し、効率的にスクリーンを配置することができる。また、ポンプ等の地上設備が少なくなる。
- ④1箇所の孔口から、多方向へ井戸を設置することができる。

また、本工法には、ドリルヘッドの位置を測定し、必要な方向へ誘導しながら掘進を進めることができるといった特徴がある。位置測定方法は次の2つの方法がある。

①Walkover タイプ

ドリルヘッドには電波発信器が取り付けられており、そこから送信される信号を地上の受信機で受け、ドリルヘッドの水平位置および深度を測定する。この技術では、地下の被覆状況や地質状況によって検知可能深度は変わるが、通常は深度2 m までの誘導が可能である。近くに金属製のもの(床下の鉄筋や金属製の機械)があると信号が乱されてしまうため、探査の障害となる場合がある。

②Wire-line タイプ

深度2 m よりも深い掘削、地上探査オペレータが入れない建物、タンク、河川、廃棄物、池や湖の下を掘削する場合に用いる。本誘導システムでは、ドリルヘッドに組み込まれた角度計がワイヤーを通じて地上のディスプレイに接続されている。ディスプレイに表示されたドリルヘッドの回転角とピッチ角を読みとり、ドリルヘッドの位置を推定する。

井戸設置方法には次の2つの方式があるが、通常は前者のDouble-Entry タイプを用いる。

①Double-Entry タイプ

掘削孔の入口(発進坑)と出口(到達坑)が有るタイプである。スクリーン設置区間を超え、到達坑まで掘削するため掘削長が長くなる欠点があるが、井戸の設置が比較的容易にできる。今回筆者らが用いたガス管敷設工法も本タイプでガス管の埋設を実施している。

②Single Entry タイプ

Double-Entry タイプと同じ掘削機を使用するが、パイロット孔掘削後の拡孔(リーミング)はForward Reamer を使用して掘削する。本工法では貫入坑からスクリーン区間までの掘削とし、到達坑までは掘削しない。井戸は発進坑から押し込む方法で設置する。本工法は必要な掘削長が短いといった長所があるが、前者と比べ孔壁が崩壊しやすく、井戸材料挿入が困難である。本工法は、地上や地中の障害物等により、到達坑が設置できない場合または到達坑まで掘削できない場合に用いられる。

3. 水平井戸設置

実験サイトの地質はロームからなり、地下水位

はGL-7.0~-10m付近に位置している。筆者らは、稼働中の工場建屋下を通し、スクリーンが不飽和帯および飽和帯に位置する2本の水平井戸(H-1井戸・全長96m、スクリーン区間の深度6.0m、スクリーン区間長15m。H-2井戸・全長93m、スクリーン区間の深度11.0mスクリーン区間長15m)を設置した(図2、表1)。井戸材料はポリエチレン(PE)管または高密度ポリエチレン(HDPE)管を使用した。H-1井戸は全長を100A-PE管とした。H-2井戸は発進坑側の無孔管が150A-PE管、スクリーン部分は100A-HDPE管、到達坑側の無孔管を100A-PE管とした。

図2 水平井戸の配置

Fig. 2 Schematic diagram of horizontal well

3.1 掘削と水平井戸の設置

井戸の設置と掘削は、従来ガス管の敷設に用いている Double-Entry タイプの工法を用いた。また、掘削方向の誘導は Walkover タイプ誘導と Wire-line タイプ誘導を併用して行った。発進坑付近と到達坑付近は Walkover タイプの誘導によりロッド先端の深度と水平位置測定して誘導を行った。その他の区間は深度が2.0m以深となるため、Wire-line タイプの誘導を使用して、ドリルヘッドの角度と押込みロッド長から、ロッド先端部分の水平距離と深度を算出した。

(1) パイロット掘削

井戸設置予定ラインに沿って、径10cm程度の小口径パイロット孔を次の手順にて掘削した。

- ①事前に掘削機位置と掘削予定ラインを測量し、マーキングしておく。
- ②掘削機を掘削予定ライン方向に配置し、発進坑を掘削する。
- ③発進坑よりドリルヘッドを貫入して掘削する。スクリーン設置予定深度(6、11m)で掘削方向を水平に修正する。
- ④スクリーン管設置区間を水平に掘削する。スクリーン区間の掘削終了後、ドリルヘッドの方向を上向きに修正し、地上方向に掘削する。

表1 水平井戸の仕様

Table 1 Spec of horizontal well

水平井戸	H-1	H-2
推進深度	6m	11m
推進延長	96m	93m
口 径	全線 100φ (外径114mm、内径92mm)	発進坑側 無孔管150A (外径165mm内径133mm) スクリーン管、到達坑側無孔管 100A (外径114mm、内径92mm)
材 料	PE管 (中密度ポリエチレン管)	無孔管・PE管 (中密度ポリエチレン管) スクリーン管・HDPE管(高密度ポリエチレン管)
スリット管	管長 15m 横スリット (5mm×40mm)	管長 15m 縦スリット (5mm×40mm)
開口率	約6%	約2%
フィルター	無	管内巻きフィルター

⑤到達坑は Walkover タイプの探査でドリルヘッド位置を確認してから掘削する。

(2) プレリーミング

井戸挿入孔の口径確保と井戸材料を引き込み時の摩擦抵抗の低減を図るために、掘削孔を拡孔した。プレリーミングの手順は次に示すとおりである。

- ①到達坑側で、ドリルヘッドをはずし、ロッドにリーマー(12inch)を装着する。
- ②リーマーを引き込み、リーマーのビットおよびリーマーから噴出する高圧水にて掘削し、掘削孔を拡孔する。
- ③1回から数回のリーミングを行った後に、井戸材料を孔内に引き込む。

(3) 井戸材料の引き込みと敷設

水平井戸は、発進坑側から到達坑側に貫通したロッドの先端に井戸材料を接続し、掘削機がロッドを引き込むことにより、到達坑側から発進坑側まで井戸材料を掘削孔内に引き込み敷設する。

水平井戸掘削工法では掘削時のスライムの排出が困難である。このため、井戸材料引き込み時にスライムが井戸内に流入するといった問題がある。筆者らは、井戸材料引き込み時にスクリーン部分からのスライムが井戸内に浸入するのを防ぐ目的で、スクリーン区間の内側に、風船状のエアフェンスを挿入して膨らませ、スクリーンの開口部を塞いだ状態にして井戸材料の引き込みを行った。井戸材料の引き込み完了後、エアフェンスを引き抜きスクリーンの開口部が開いた状態にし、引き込みを完了した。

(4) モルタル充填

井戸両端の無孔管部分を閉塞するため、長さ5mの注入ガイドパイプを挿入し、パイプを引き抜きながらPE管と孔壁との間をモルタルにて充填を行った。

3.2 プレリーミングと井戸材料の引っ張り力

水平井戸の敷設は、プレリーミングによる掘削孔の拡孔を行った後、井戸材料を到達坑から発進坑まで掘削孔内を引っ張り込み実施する。このため、敷設時には井戸材料に孔壁からの摩擦抵抗が

作用し、引き側である発進坑側の井戸材料には大きな引っ張り力が発生する。これが要因になり、井戸材料が破断することがある。このため、プレリーミングは井戸径に対して十分な大きさであり、また、掘削孔孔壁が崩壊しないように複数回のプレリーミングが必要となる場合がある。

一方、プレリーミングは掘削孔の孔壁を外側に押しつけることにより拡孔する。このため、孔壁周辺の地層は圧密状態になることが予想され、土壌ガス吸引や揚水を行う浄化用の井戸設置には、プレリーミングの掘削径は小さくまた回数は少なくする必要がある。

各井戸のプレリーミング状況を表2に示した。

(1) H-1 井戸

- ①プレリーミング6inch 1回、井戸材料75A-PE管、外側フィルター巻き

リーマー(6inch)のすぐ後ろに井戸材料を直接接続して、引き込みを行なった。引き込み前半の引き込み力は約930kgで一定の推移を示していたが、外側にフィルターを巻いたスクリーン部分で引き込み力が上昇し、44m挿入した時点で約1860kgとなり管が延び始めた。さらに58mまで引き込んだところで引き込み不可能となり、3200kgの引き圧で破断した。破断後、地中に残された井戸材料の回収を試みるが、大半は回収できず地中に残された。

- ②プレリーミング12inch 1回、井戸材料75A-PE管、外側フィルター巻き

12inchのリーマーでプレリーミングを行ない、井戸材料の引き込みを行なった。引き込み前半の引き込み力は約460kgで一定の推移を示していたが、外側にフィルターを巻いたスクリーン部分で引き込み力が上昇し、管を68.5m挿入した時点で引き込み不可能となり、3200kgの引き力で破断した。破断後、地中に残された井戸材料の回収を試みるが、大半は回収できず地中に残された。

- ③プレリーミング12inch 1回、井戸材料100A-PE管、フィルター無し

12inchリーマーでのプレリーミングを1回、井戸材料の口径を100Aとし、フィルターを巻かない状態で井戸材料の引き込みを行なった。引き込み時の発進坑側の引っ張り力は930~2060kgで推

表2 プレリーミングと引き込み力

Table 2 Relation of tensile strain and reaming.

	H-1①	H-2②	H-3③	H-2
井戸仕様	75A	75A	100A	100A-150A
スクリーンの フィルター	外巻き	外巻き	無し	内巻き
リーマー径(mm)	150	300	300	300
リーミング回数	1	1	1	2
前半の引力(kg)	930	460	930	450
最大引き力(kg)	3200 (破断)	3200 (破断)	2060	700
施工結果	井戸材料破断 引 っ 張 り 力 1860kg で井戸 材料が管伸び始 める	井戸材料破断	完了	完了

移し、引き込みを完了した。

(2) H-2井戸

①プレリーミング12inch 2回、井戸材料150A-PE管、100A-HDPE管、100A-PE管、内側フィルター巻き

12inch リーマで2回リーミングを行ない、井戸材料の引き込みを行った。引き込み時の発進抗側の引っ張り力は450～700kgで推移し、引き込みを完了した。

3.3 プレリーミングの効果と施工性

土壌ガス吸引や揚水を行う浄化用井戸を設置する場合、従来の垂直ボーリング技術では、掘削孔の孔壁保護のためには、掘削孔周辺の透気性や透水性の低下を防ぐためにベントナイトは使用せず、ケーシングを使用している。

水平井戸掘削技術においては、ケーシング等の使用で孔壁を保護、安定化させることができない。このため、掘削後には孔壁が崩壊する前に迅速な井戸設置が求められる。また、プレリーミングは掘削孔壁周辺の地層を圧密させ透気性や透水性を低下させることが懸念された。一方、引き込み時に井戸材料にかかる摩擦抵抗低減と井戸材料の破断を防ぐために、十分なプレリーミングが必要である。

今回の作業においては、パイロット孔の掘削は

H-1、H-2ともそれぞれ8時間程度で終了しており、深度の違いによる掘削時間の有意な差は認められなかった。しかしながら、プレリーミングの開始から水平井戸設置完了までに要した時間は、H-1(③、リーミング回数1回)で9時間、2回のH-2(リーミング回数2回)で14時間であった。プレリーミング開始から井戸設置まで迅速な作業が求められる水平井戸設置では、この作業を1日で終了させることが望まれる。プレリーミング2回の場合で14時間要することから、今回のように90mクラスの井戸を設置する場合のプレリーミング回数は最大でも2回までしか実施できないと判断される。

一方、井戸材料引き込み時の引っ張り力は、井戸材料が同一径である場合は、プレリーミングの径が大きい方が井戸材料の引き込み力が小さい。また、プレリーミングを2回行なった場合は、1回しか行なわなかった場合と比べて、引っ張り力が半分以下になっている。プレリーミング1回の場合であるH-1③の場合では、引っ張り力は最大2060kgに達しており、この力は75A-PE管が伸び始めた引っ張り力を超えている。径100Aの井戸材料の強度は75Aと比較すると肉厚から1.5倍程度(2900kg程度)であると推定される。しかし、井戸材料が一度破断すると地中に残された井戸材料の回収は困難であるため、施工は十分な安全率を取り入れて実施することが必要である。した

がって、径100A、全長90m 程度の水平井戸の設置に当たっては、プレリーミングは径を12inch とし、2 回実施することが適当であると判断される。

4. 水平井戸設置時の影響

パイロット掘削時及びプレリーミング・井戸材料引き込み時には、水を送水して掘削を行う。送水した水および泥水による汚染拡散の危険性について検討するために送水量、泥水戻り量、泥水中の揮発性有機塩素化合物濃度、地下水モニタリング井戸の水位・濃度についてモニタリングを行った。なお、揮発性有機塩素化合物濃度は、ヘッドスペースガス検知管法で測定し、溶出濃度に換算した。

4.1 地下浸透量と戻り泥水濃度

送水した水の地下浸透量、泥水戻り量および泥水濃度の状況を表3に示した。

(1) H-1井戸

掘削開始から管挿入終了までの間に合計1900リットルを送水し、そのうち180リットルが発進坑側および到達坑側に泥水(粘土、シルト粒子が懸濁した液体)として戻ってきた。泥水量を全量水と換算すると、送水した水の地下浸透量は約

1720リットルとなる。また、土壤中の高濃度地点は発進坑側孔口から10m 付近に存在しているが、戻り泥水が最高濃度を示したのはドリルヘッドが高濃度汚染箇所を通過した直後であった。

(2) H-2井戸

送水量と泥水戻り量から地下浸透量を算出した。掘削開始から管挿入終了までの間に合計3900リットルを送水し、そのうち374リットルが泥水として戻ってきた(図3)。泥水量を全量水と換算すると、送水した水の地下浸透量は、3526リットルとなる。また、戻り泥水が最高濃度を示したのは、ドリルヘッドが高濃度汚染箇所を通過した直後であった。

4.2 地下浸透量と地下水位及び地下水濃度

地下水位と地下水濃度との関係を表4に示した。

(1) H-1井戸

地下水分析用試料の採水の影響及び前日からの降水の影響があり地下浸透量と地下水位関係については有意な関係は得られなかった。しかしながら、周辺の観測井の地下水濃度はほぼ同じような濃度で推移していることから、H-1設置時の地下浸透による地下水への直接的な影響は無いと考えられる。

表3 地下浸透量と泥水戻り量

Table 3 Percolation and discharge drilling muddy water.

	工程	送水量 (リットル)	泥水戻り 量 (リットル)	地下浸透 量 (リットル)	地下浸透 率 (%)	戻り 泥水濃度
水平井戸 H-1	パイロット孔 掘削	230	13	217	94	最高濃度
	プレリーミング～管 挿入終了	1670	167	1503	90	—
	合計	1900	180	1720	91	—
水平井戸 H-2	パイロット孔 掘削	450	71	379	84	最高濃度
	プレリーミング～管 挿入終了	3450	303	3147	91	—
	合計	3900	374	3526	90	—

図3 H-2水平井戸 送水量、泥水戻り量および地下水位

Fig. 3 Diagram showing groundwater table, quantity of drilling water and discharge drilling muddy water. (H-2)

(2) H-2井戸

観測井 JD-2は、送水時には水位は初期水位から0.34m(掘削時)～0.55m(管挿入時)上昇し、送水停止後に徐々に水位が低下している。観測井 JD-1は、送水時には水位の変化が見られなかったが、送水停止2時間後に0.06m(管挿入後)上昇し、その後に徐々に水位が低下している。

地下水濃度のモニタリング結果をみると JD-1、JD-2とも送水中は、濃度が徐々に高くなり、送水停止後、徐々に低くなる傾向にある(JD-1が濃度の上昇、低下のタイミングが後ろにずれる)(図4)。

したがって、H-2設置時の地下浸透による地下水への影響は、まず、H-2近傍の JD-2に現われ、続いて、距離の離れた JD-1に現われるものと考えられる。

4.3 水平井戸設置時の汚染拡散の危険性

これまでのモニタリング結果から、水平井戸を設置する際に、地下に浸透する水及び戻り泥水に

よって汚染が拡散する経路は、以下に示す通り、3つ考えられる(図5)。

- ① 土壤汚染箇所を浸透水が通過し、周辺の土壤に汚染を拡散する。さらに、地下水の中に入り込み、地下水汚染を引き起こす。
- ② 土壤汚染箇所を通過した水が、戻り泥水として汚染されていない土壤を汚染する。
- ③ 地下水の中に浸透水が侵入して水位が高まり、局部的に周辺への地下水の流れが生じ、汚染が拡散する。

①、②については、表5に示すように 1 m^2 あたりの浸透量でみると H-1で $16\text{ リットル}/\text{m}^2$ 、H-2で $33\text{ リットル}/\text{m}^2$ と少ない。このため、戻り泥水の濃度が低い場合は、新たな土壤汚染を引き起こす危険性は、ごく限られた範囲になるものと考えられる。

③の場合については、H-2設置時に水位の上昇と濃度変化が見られたことから、地下水面または地下水面付近に水平井戸を設置する際には、地

表4 地下浸透量と地下水

Table 4 Percolation and Groundwater.

工程	地下浸透量(リットル)	時期	JD-1 水位 (GL-m)	*JD-1 地下水 水相対濃度	JD-2 水位 (GL-m)	*JD-2 地下水 水相対濃度
H-1	217	前	43.62	1.00	43.38	1.00
		後	43.42	1.00	43.28	1.39
		翌朝	43.81	1.14	43.58	1.79
	1503	前	43.81	1.14	43.58	1.79
		後	43.65	1.07	43.45	1.39
		2日後	43.81	0.93	43.42	1.33
H-2	379	前	—	—	43.86	1.09
		後	—	—	44.20	1.45
		翌朝	—	—	44.06	0.33
	3147	前	44.28	1.00	44.06	0.33
		後	44.26	3.50	44.61	1.30
		翌朝	44.28	1.50	43.92	0.55

* H-1 および H-2 推進時・前 (H-2 プレリーミング～管挿入完了工程では同工程の前) の地下水濃度を 1.00 としたときの各時期の濃度比として表示。H-1, H-2 スクリーンからの水平最短距離: JD-1 7m、JD-2 1m

図4 H-2水平井戸 地下水位と地下水濃度

Fig. 4 Diagram showing groundwater table and groundwater concentration.

図5 水平井戸設置時の汚染拡散の危険性

Fig. 5 Risk of contamination by construction of well.

表5 掘削孔壁単位面積当たりの水浸透量

Table 5 Percolation at unit of area in borehole.

	水浸透量 (リットル)	孔表面積 (m^2)	単位水浸透量 (リットル/ m^2)
H-1	1503	94	16
H-2	3147	94	33

下水汚染を周辺に拡散する可能性がある。

5. 土壌ガス吸引による浄化実験

スクリーンを不飽和帯に設置した H-1 井戸を土壌ガス吸引井とした場合の効果を確認する試験を行った。試験では吸引圧を $2000\text{mmH}_2\text{O}$ とし、水平井戸のスクリーンから水平方向および垂直方向に距離を変えて設置した土壌ガス観測井の負圧を測定した。この測定結果に基づき、土壌ガス吸引による影響半径(負圧 $1\text{mmH}_2\text{O}$ の範囲)について、検討を行った。

なお、スクリーンを飽和帯に設置した H-2 井戸を使用した揚水による浄化実験は、今回の実験時期が渇水期で地下水位が低くてスクリーン深度と地下水位との差が小さかったため、地下水位の高

い時期に行うこととした。

図6、7にスクリーンからの距離と負圧の関係を示した。土壌ガス観測井の負圧から推定される影響半径(負圧 $1\text{mmH}_2\text{O}$ の範囲)は、深度 6m の水平方向では 4.9m 、垂直方向では 3.9m の結果が得られた。この影響範囲は水平方向に延びるスクリーン区間で発生する。このため、横方向に広がった汚染に対しては、水平井戸による浄化は効果が高いといえる(図8)。

水平井戸による土壌ガス吸引による影響半径は、山内 他(1998)によると、土壌ガス吸引により $10\text{mmH}_2\text{O}$ の減圧効果が及ぶ範囲を水平方向で 10m 以上、垂直方向では 3m 以上としている。しかしながら、同実験では、地上部分はアスファルトで被覆されていた状態であった。垂直方向の負圧の分布を見ると、アスファルトに近い部分の減圧が水平井戸近くの部分より大きくなっており、アスファルトによる被覆効果が大きく作用したことが考えられる。

したがって、水平井戸による土壌ガス吸引を行う場合、地表面をアスファルトやベントナイト等で被覆した方が、より大きな土壌ガス吸引効果が期待できると判断される。

図 6 H-1水平井戸 水平方向の影響半径

Fig. 6 Horizontal influenced areas of soil vapor extraction.

図 7 H-1水平井戸 垂直方向の影響半径

Fig. 7 Vertical influenced areas for soil vapor extraction.

図 8 水平井戸と影響半径

Fig. 8 Influenced area of soil vapor extraction by horizontal well.

6. 将来の浄化方法

水平井戸は工場建屋下等の汚染に対して、建屋外から浄化用の水平井戸を設置することができる。本工法は、事業所が稼働を続けながらの井戸設置や水平方向に広がった汚染に対して高い浄化効果を期待することができる。従来は、水平井戸を用いた土壌ガス吸引や揚水用井戸として使用さ

れていた。しかしながら、次に示す新しい利用法が提案される。

①暗渠型水平井戸による重金属・硝酸態窒素土壌汚染の浄化

不飽和帯に存在する硝酸態窒素及び重金属等の汚染物質除去に効果が期待される工法である。

不飽和帯に存在する汚染帯の下方に複数の水平井戸を設置し、地表から汚染帯を通過して汚染物

質が溶解した重力水を水平井戸に強制的に集水し、排水する。重力水を強制的に収集する方法は、水平井戸内部の空気を吸引して空気の流れを作り、井戸周辺の地層の含水比を減少させ乾燥させる。この乾燥ゾーンに生じる毛管現象により周辺地下水を集水する。

②水平井戸掘削技術を使用した浄化物質設置による浄化

水平井戸掘削技術を用い、地中に浄化物質を供給する方法である。

水平井戸掘削技術を使用してパイロット孔を掘削し、到達坑側から浄化物質を充填した容器を汚染帯の土壌中に水平に送り込み、汚染土壌中で浄化物質を暴露する。または、水平井戸中に浄化物質を送り込み、汚染土壌中で浄化物質を暴露する。

送り込む浄化物質としては活性炭等の吸着物質や汚染物質浄化微生物の栄養源等が挙げられる。

参考文献

山内 仁・笠水上光博(1998)：水平井戸を用いた土壌・地下水汚染の浄化対策、日本地下水学会春季講演会講演要旨、88-91.

Robert M. Conger and Keith Trichel (1993): A Groundwater Pumping Application for Remediation of a Chlorinated Hydrocarbon Plume with Horizontal Well Technology, Ground Water Management Book 15 of the Series., 47-60.

(受付：1998年7月1日、受理：1998年10月12日)