

ドレーン工法を用いた油回収技術

間宮 尚¹・大塚 誠治¹・関 弘¹・河合 達司²・石神 大輔²
三成 昌也³・小柳 勇也⁴

¹正会員 鹿島建設株式会社 環境本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂6-5-11)

E-mail:mamiya@kajima.com

E-mail:otsukas@kajima.com

E-mail:hiroseki@kajima.com

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

E-mail:kawait@kajima.com

E-mail:ishigamd@kajima.com

³正会員 ⁴非会員 錦城護謨株式会社 土木事業本部技術部 (〒581-0068 八尾市跡部北の町1-4-25)

E-mail: masaya.minari@kinjogomu.jp

E-mail: yuya.koyanagi@kinjogomu.jp

油汚染土壌の原位置浄化は困難と認識されており、汚染土を置換する掘削除去も経済的負担が少なくないことから進んでおらず、汚染源の除去よりも、揚水や遮水壁によって拡散防止を図る対策が主流である。地盤中にプラスチックドレーン材を高密度で打ち込み、負圧によって地盤中の水や油を回収するドレーン工法は、ドレーン材と油の相性の良さから油回収率が高く、地盤中の透油環境によっては、本工法で油層を短期間に薄くできることを土槽試験により検証した。特に粘性の小さい軽質油(灯油等)では油の選択的回収が高い収率で可能となることが確認された。回収後の試験土壌の油濃度は10,000mg/kg程度と生物処理による浄化が可能なレベルであることから、今後、本手法の適用限界の検討と合せて原位置での油汚染浄化が進むことが期待される。

Key Words : oil contaminated soil, plastic drain, oil separation and recovery, soil purification

1. はじめに

これまで実効的な解決策がなかった大規模油汚染に対して、本報で紹介するプラスチックドレーン工法(以下、ドレーン工法)を用いることで油層として溜まっている油回収することが可能となり、生物処理と合わせることで土壤環境基準まで浄化できる道筋が技術的に検証・構築されつつある。不均質な土壌への対応や具体的な生物処理の検討、さらにはドレーン工法の有する選択回収のメカニズムの解明はこれからであるが、土壌中の間隙油を効率的に除去するという最も困難な工程が、技術的に解決されつつあることの意味は大きい。

油汚染は製油所や油貯蔵施設、ガソリンスタンド跡地などで発生し、周辺への影響が懸念されたり、その土地の利用を阻んだりして、社会に対して好ましくない影響をもたらしている。特に大規模油汚染サイトでは、揚水や遮水壁等の拡散防止措置で当座をしのいでいるものの、いつまでも揚水に大量のエネルギーを消費し続けたり、

遮水壁で汚染を隔離し続けたりするわけにはいかない。我が国のように地震や豪雨による自然災害が多い国では、早期浄化がリスク管理から見て望まれることもある。

ドレーン工法は、VOC汚染の浄化工事ですすでに効果確認と実用化が完了しており、これを油汚染へ適用した場合の効果、多様な油種と異なるレベルの試験により把握してきた。今後は、実際の油汚染現場での検証を行って実務上の課題を把握し、改善することによって実用化する工程に入る。本報では、ドレーン工法の既往の成果と適用限界を紹介し、油汚染浄化の今後の展望を示す。

2. 油土壌汚染と油回収ドレーン工法の開発概要

油が漏洩し、地盤に浸透して地下水面まで達すると、地下水の上部付近に油層として滞留することが多いが、この油層は地下水流動により、河川や海等の公共用水域に達して油膜を生じさせる原因となることがある。油層

の油回収や拡散防止の対策方法としては、揚水工法や遮水壁が採用されているが、筆者らは幅約100 mm、厚さ約4 mmのボード状のプラスチック製ドレーン材を小間隔で地盤中に設置し、真空ポンプを用いた負圧によって油層から油を吸引・回収することで、油層の厚さを低減する技術（ドレーン工法）（図-1）の可能性を検討してきた。

一昨年度は流動パラフィンを模擬油とし、大型土槽を用いてドレーン工法が機能することを確認し¹⁾、昨年度は灯油を対象とし、室内実験によって実用性を検討し²⁾、模擬地盤中の油層の油回収がドレーン工法によって可能であることを定量的に確認した。本報では油粘性の違いによる油の吸引回収効率の違いや油回収時のマテリアルバランスを大型土槽を用いた吸引実験にて比較・検証した結果と、土壌の透水（透油）性状の各種油回収への影響に関して机上計算結果を行って得た課題について報告する。

3. 水槽を用いた吸引試験

(1) 実験装置

鉄枠アクリル製の大型土槽（幅1,000 mm×奥行600 mm×高さ1,500 mm）を屋外の架台上に設置して、土槽底面から7 m高い位置に吸引用の真空ポンプを設置した。大型土槽内に真空ポンプに連結した一組のドレーン材を設置してから模擬土を投入することで、固液混合相の状態での吸引試験を行うことができる実験装置（図-2）を準備した。

(2) 試験方法

大型土槽内にフラタリーサンド（乾燥密度1.56 g/cm³、透水係数 1.6×10^{-2} cm/s、50%粒径0.23 mm）を土層として充填し、土層の下半分が水層、上半分が油層（灯油または流動パラフィン）になるように実験系を形成した（図-3）。さらに土層の形成に際しては、ドレーン材の吸引部（有効長30 cm）と油層の接触割合を接触率と定義して複数の接触率を変えた試験を実施した（図-4）。

吸引の際には、土層の最下部から適宜注水を行って、試験中の水位が一定に維持されるように注水量の制御を実施したので、接触率は時々刻々と変化したことになる。真空ポンプを稼働すると水と油がドレーン材を経由して吸引され、上部で回収されるが、その時の回収油量の変化から油の回収速度を求めるとともに、回収された水と油のマテリアルバランスを把握してドレーン工法の性能を確認した。

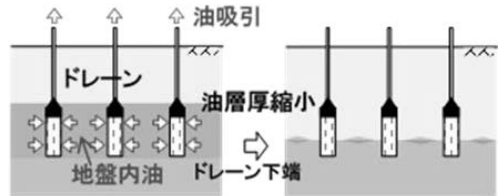


図-1 ドレーン工法を用いた油回収技術のイメージ



図-2 実験装置外観



図-3 大型土槽外観（吸引前）

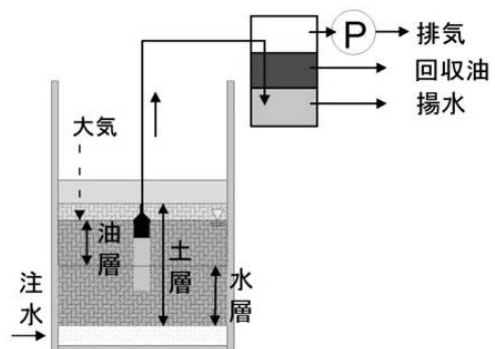


図-4 吸引・回収のイメージ

4. 吸引試験結果

(1) 油回収速度

灯油または流動パラフィンをお層とする土層を形成し、ドレーン材を用いて油水吸引試験を行い、油・水の積算揚水・揚油量の変化を把握した(図-5、図-6)。粘性の小さい灯油の場合、初期接触率50%から開始したが吸引開始から常に揚油量が揚水量を大きく上回り、回収液の油含有率は80%以上と高い選択性が確認された。一方、粘性の大きい流動パラフィンについては、初期接触率100%からの開始であったが、吸引開始直後のみ揚油量が揚水量を上回り、その後は揚油量と揚水量がほぼ同じ値となり、回収液のうちの油含有率は約50%であった。

回収量の傾向を見ると、灯油も流動パラフィンも時間経過に対して回収速度の微増が見られるものの、両者の比較に際してはほぼ等速だったと仮定し、灯油と流動パラフィンの平均油回収速度を算出した。灯油では約6.40 L/min、流動パラフィンでは約0.53 L/minとなり、粘性の小さい灯油の回収が約12倍も速かった。実際には、水と油が同時に回収されており、灯油と水では約7.93 L/min、流動パラフィンと水では約1.07 L/minの平均回収速度となり、前者の回収が約7.4倍速かった。

(2) マテリアルバランス

吸引試験における灯油のマテリアルバランスを表-1に示す。土槽に入れた初期油量は52 Lで、油回収率は排気中の油を含めて71.4%、土槽中に残った油は27.4%、試験後に所在が同定された油は98.8%であった。吸引試験後に油層があった部分の土試料を採取して測定した土壌油分濃度は約10,000 mg/kg (約1.0 w-%) であった。

5. 考察

(1) 油回収速度の室内試験との比較

既往報告²⁾において、図-7に示すような一次元土槽を用いた室内試験により同様の油水吸引試験を報告した。本試験と同様に、灯油の油回収速度が流動パラフィンの油回収速度よりも速いという点では同じ結果ではあったものの、その比率が約23倍もあり、本試験の回収速度と2倍近い差が認められた。この要因としては、以下の2点が考えられる。

- ・ 定水位を保つ手法が異なっている(室内試験では上部から注油を、本試験では土槽下部から注水を行った)。
- ・ 室内試験装置の形状により鉛直方向の偏流や壁面短絡による影響が本試験で用いた土槽に比べて大きかった。つまり、油回収試験では実験系の違いも結果に大きく影響する。

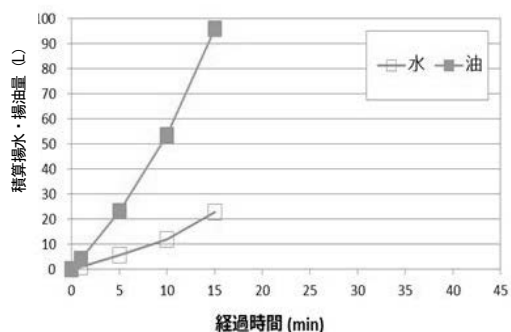


図-5 積算揚水・揚油量 (灯油, 接触率 50%)

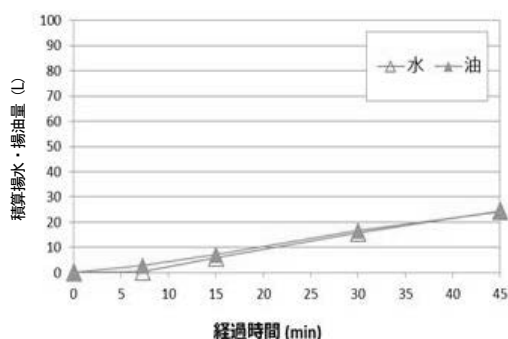


図-6 積算揚水・揚油量 (流動パラフィン, 接触率 100%)

表-1 灯油のマテリアルバランス

油内訳		油量 (L)	初期油量に対する割合	
総回収油	排気中油	5.14	9.9%	71.4%
	回収油	31.90	61.3%	
	揚水中油	0.1	0.2%	
土層中油	土	13.64	26.2%	27.4%
	砕石間隙	0.6	1.2%	
総計			98.8%	

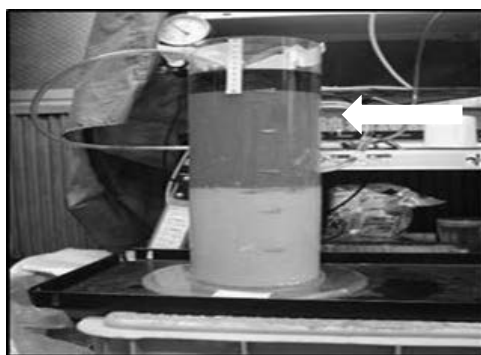


図-7 室内試験装置

(2) 液体の動粘度と透油係数の関係

Taylorによれば、多孔質媒体中の液体の透過係数 k が、式(1)のように流体の粘性係数 μ_l と密度 ρ 、物理的透過係数 K_0 の関係式(1)で表されることが示されている³⁾。

$$k = \frac{\rho g}{\mu_l} K_0 \quad (1)$$

また、西垣らによれば、油の透過係数（透油係数）は粘性係数に反比例し、密度に比例する⁴⁾。ここで、粘性係数 μ_l を密度 ρ で除した μ_l/ρ は液体の動粘度に相当することから、透油係数は動粘度に反比例する。

従って、油の移動速度はダルシー則に従い、動粘度が半分の油は移動速度が2倍速くなる。そこで、表-2に示すように、本試験で使用した灯油および流動パラフィンの粘性係数と密度から動粘度を算出した結果、灯油に対する流動パラフィンの動粘度の比として15.6を得た。

同様に、図-5、図-6の最終段階の油水の混合比を利用して混合油の動粘度を試算したところ、表-3に示すように灯油混合物に対する流動パラフィン混合物の動粘度の比は2程度となった。なお、参考として表-4に主な油の動粘度を水と比較して記す。

本試験で確認した灯油と流動パラフィンの回収速度とその比は、灯油および流動パラフィン単体の動粘度と各々の水との混合物の動粘度の中間に位置する。動粘度が大きいくほど回収速度は遅くなる傾向は確認されたものの必ずしも一致しないのは、油に加えて水と空気を含む多相流であることから動粘度以外にも隙内の飽和度等の影響を受けるためと思われる。さらに物理的透過係数 K_0 も均一ではないことを考慮して、実用化に際しては評価・解析を行って、ドレーン工法の適用範囲を把握する必要がある。

(3) 回収率の妥当性

米国石油協会（API）の多相流解析ツールLNASt[®]を用いて、吸引試験における総回収油量を試算したところ、試験結果とよく合うとともに、吸引時間を無限大にした時の吸引量（上限量）として39.3Lが得られた（図-8）。地盤中の水が自由水と結合水に区分されるように、土壌空隙中の油にも容易に移動して油膜を生じさせる油と土粒子表面への吸着や土壌の細孔中に毛管力で吸い込まれて動かない油がある。LNAStを用いた試算で得られた39.3Lは、動く油の上限值を示している。

従って、ドレーン工法による吸引試験で得られた37.2Lの回収油量は油膜発生に寄与する油（39.3L）の約95%に相当する。本吸引試験では、移動する油の大半を回収できたことから、ドレーン工法は有効な油汚染浄化手法と認められる。

表-2 灯油、流動パラフィン、水の物性

	粘性係数 (20℃) mPa・s	密度 g/cm ³	動粘度 mm ² /s
灯油	1.40※	0.800※	1.75
流動パラフィン	23.01※	0.845※	27.23
水	1.02※	0.998※	1.004

※メーカー規格値から

表-3 油水混合物の動粘度

	水の割合	油の割合	混合物の 動粘度 mm ² /s
灯油と水	19.3	80.7	1.55
流動パラフィンと水	50.0	50.0	3.08

※二成分系混合油の動粘度計算による

表-4 各種油の動粘度

	温度 (℃)	動粘度 (mm ² /s)
ガソリン	30	0.5
水	30	0.8
	20	1.0
灯油	30	1.3
軽油	30	3
A重油	30	5
B重油	30	45
C重油	30	400

※理科年表⁵⁾などを参照

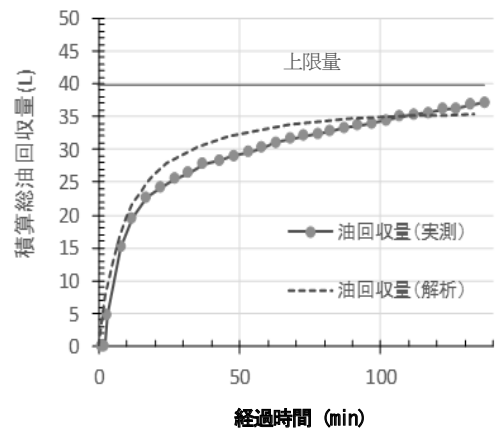


図-8 積算油回収量の実測値と解析値の比較

(4) 多様な地盤・油への適用可能性

本試験で用いたフラタリーサンドは、透水係数が $1.6 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ と大きく、実際の油汚染地盤への適用性を検討するためには透水係数をパラメータとした検討が必要である。そこで透水係数 $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ の時に灯油回収速度が 400 L/h であったとして、油種と土の種類の違いが油の回収速度に与える影響を表-5にまとめて記した。なお、油回収量は、上記の議論から動粘度だけでは判断できないが、油の動粘度に反比例すると仮定して計算した。

ガソリンからA重油の動粘度は1オーダーの範囲にあるが、土の透水係数は数オーダーも異なり、飽和度への影響もあるため、油回収への土質の影響は無視できない。砂質土であれば、A重油であっても回収できるが、シルト・粘土になるとガソリンか灯油の回収が限界で、粘土では適用限界外となる可能性がある。まずは油層が問題となっている油汚染地盤の特徴を把握することが重要と考えられる。

(5) 今後の課題

本報では、ドレーン工法によって動粘度が相対的に高い灯油が水よりも多く回収されたが、この現象の理由は解明されていない。飽和度に加えてドレーン材の材質（プラスチック）と対象油あるいは水との相性（接触角、表面張力）のようなものが、選択性に影響しているものと推察している。この知見が定量的に検証されれば、油種に応じてドレーン材の材質を変えることも考えられ、今後の油汚染土壌の浄化に寄与するものと思われる。

6. まとめ

本報で得られた知見を以下に列記する。

- ・砂質土槽中の灯油層の灯油はドレーン工法で選択的に回収でき、その回収速度は対象油の動粘度の影響を受ける。
- ・灯油を用いた砂質土槽試験から、ドレーン工法は油膜発生に寄与する動く油の約95%を回収できる有効な油回収技術である。
- ・ドレーン工法で油回収した後の元油層部分の土壌の油濃度は約 $10,000 \text{ mg/kg}$ で、さらなる処理が必要ではあるが生物処理が適用できるレベルである⁷⁾。
- ・油の回収に影響する因子として油の動粘度と土の透水係数が挙げられるが、後者の幅が大きいことからドレーン工法の適用に際しては土質の調査が重要である。
- ・砂質土であればドレーン工法でA重油の回収が可能だが、シルト・粘土ではガソリン・灯油が限界となる可能性がある。

表-5 油種と土質の油回収への影響

土の種類	● フラタリーサンド									
	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
透水係数 (cm/s)										
ガソリン				1000	100	10	1	0.1	0	
灯油			4000	400	40	4	0.4	0		
A重油			1000	100	10	1	0.1	0		
B重油		1111	111	11.1	1.1	0.1	0			

※ ■は100L-油/L以上で回収可能（他の凡例：■は100未満 1以上、■は1未満）

- ・ドレーン工法における油の選択的回収のメカニズムはまだ定量的には解明されておらず、今後、これが解明されることで、回収率の向上や適用範囲の拡大が期待される。
- ・ドレーン工法の普及には、ユーザーサイトでの実証により実績を積むことで現象の理解を進め、現場特性を反映した技術の適用方法を完成させていくシナリオが必要である。

今後は現場で実証を行い、実地盤における油の吸引回収効果を確認し、ドレーン工法による油回収技術の確立を目指す。本手法の展開の次なるステップは、実際の油汚染地盤にて試験を行い、実際の油、地盤条件で実効性を確認することである。

参考文献

- 1) 増田真佑, 関弘, 河合達司, 川端淳一, 三成昌也, 小柳勇也: ドレーン工法を用いた油回収に関する検討, 第22回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.380-385, 2016.
- 2) 大塚誠治, 関弘, 河合達司, 川端淳一, 三成昌也, 小柳勇也: ドレーン工法を用いた油回収に関する検討 (その2), 第23回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.511-514, 2017.
- 3) Taylor, D.W.: Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., pp.104-122, 1961.
- 4) 西垣誠他: 地盤への油の浸透に関する基礎的研究, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.1, pp.249-268, 2007.
- 5) 理科年表
- 6) <https://www.api.org/oil-and-natural-gas/environment/clean-water/ground-water/inapl/evaluating-hydrocarbon-removal>
- 7) 大塚誠治, 関弘, 河合達司, 石神大輔, 三成昌也, 小柳勇也: ドレーン工法を用いた油回収に関する検討 (その3), 第24回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 投稿中, 2018.

(2018.8.24 受付)

OIL RECOVERY DRAIN METHOD WITH PLASTIC BOARD

Takashi MAMIYA, Seiji OTSUKA, Hiromu SEKI, Tatsushi KAWAI, Daisuke
ISHIGAMI, Masaya MINARI and Yuya KOYANAGI

In-situ purification of oil-contaminated soil is noticed as difficult and soil displacement by excavation and removal as cost-consuming. Countermeasures as emission prevention by suction and seepage control have been accepted rather than removal of source of contamination. Paper drains composed of plastic board were set with small interval and oil and water in the ground were sucked by pump in the series of experiments. Lipophilic character of plastic board and oil leads to high recovery rate. Short term purification of oil-contaminated soil was verified to be feasible under high permeable conditions. Especially, light oil like kerosene with small viscosity was observed to be recovered selectively and effectively. Oil concentration of the soil of ex-oil layer was around 10,000 mg/kg to be further treated biologically. Hereafter, it is expected that plastic board is widely accepted as in-situ countermeasures against oil-contamination.