

油で汚染された滞水地盤からの油回収に関する土槽実験

嶋田浩一* 門倉伸行** 土路生修三** 内藤 敏*** 岡田久雄* 上間紀幸*

油で汚染された滞水地盤から油分を回収する油汚染土壌対策工事において、通常の揚水では十分な効果が得られないことが課題の1つとなっている。そこで地盤中における油分の挙動を把握するために模擬地盤による土槽実験を実施した。その結果、土壌中の地下水位の変化に対する油分の流動状況を把握でき、自然水勾配のみでは油分の移動は極めて緩慢であり、効果的な油分回収を実施するためには強制力をともなった地下水流等を利用するなど、施工方法に対する工夫の必要性についての知見が得られた。なお、本実験は立命館大学の協力を得て実施したものである。

キーワード：油 汚染土壌 油回収 土槽実験

1. はじめに

近年、燃料等の貯留設備・配管設備の老朽化に伴い、維持管理作業が困難な地下配管設備からの油漏洩が発生し、その多くは漏洩が顕在化するまでにはかなりの時間を要しているため、大量の油分が地盤中に流出した事故が増加している。浸透した油分は地下水面にまで達していることも多く、比重の軽い油分は地下水表面を漂いながら下流方向へ拡散していく。このような油汚染土壌に対しては、油汚染の拡散防止、および原状回復するための油分除去等の対策工事が必要となるが、地下水が存在する地盤中での油分の挙動は複雑で、十分解明されていない。

当社が取り組んできた灯油漏洩による油汚染対策工事においても、大量に存在する地盤中の油分回収が容易ではなく、地下水が存在する地盤における油分の挙動を把握する必要があると感じた。

そこで筆者らは、模擬地盤中の地下水と油分の状況を観察することを目的とした土槽実験を行い、①地盤中の観測孔内の油分と地盤内の油分の状況、②地下水位変動時の油分の挙動、③揚油後の地盤中の油分の残留性について検討したので、結果について報告する。

2. 実験装置概要

2.1 実験土槽

実験に使用した小型土槽は、内寸で幅 700 mm×奥行き 150 mm×高さ 1,200 mm の透明塩ビ製である。土槽の左右には、透水板（厚さ 10 mm）で仕切られた観測井戸（幅

30 mm）が設けられており、土槽左端の観測井戸を MW-L、右端の観測井戸を MW-R と呼ぶこととする。なお、MW-L は揚水井戸としても使用し、MW-R は揚水時の補給水の注入井戸としても用いた。Fig. 1 に実験土槽の概要図を示す。

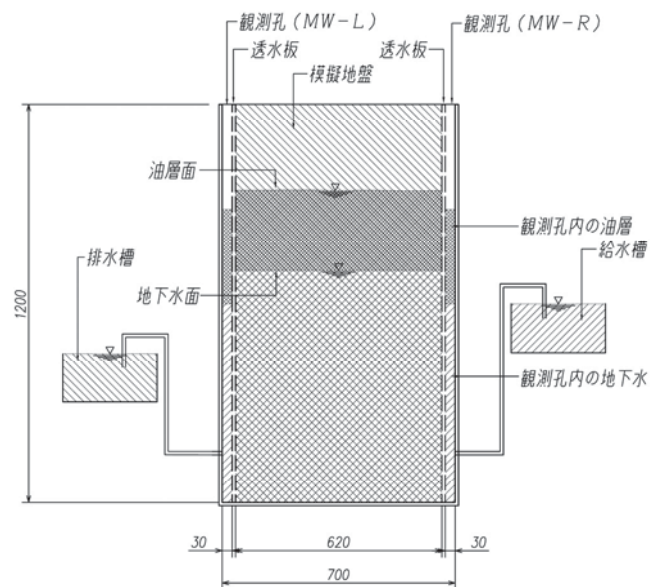


Fig. 1 実験土槽

2.2 供試土壌

土槽実験に用いた土壌材料は珪砂5号（土粒子密度：2.615 g/cm³）であり、模擬地盤作製にあたっては土壌を水中落下にて投入し、型枠バイブレーターで土槽を振動させながら作製した。模擬地盤の乾燥密度は1.40 g/cm³であり間隙率は0.484であった。なお、土質試験における透水試験結果から、透水係数は約 2.0×10^{-1} cm/sec であった。

2.3 供試油種

模擬地盤中での油分の挙動を把握するために灯油を用

* 北陸支店 土木事業部

** 技術研究所 地球環境研究部

*** プロジェクトエンジニアリング室

いて実験を行った。また供試灯油には、観察をし易くするために染料 (Oil-Red O) を 0.01% 添加し着色 (赤色) した。Table 1 に供試灯油の物性を示す。

Table 1 供試灯油の物性

比重 (15°C)	0.808	—
動粘度 (20°C)	1.860	mm ² /sec
〃 (0°C)	2.787	mm ² /sec
表面張力 (25°C)	25.4	mN/m

3. 実験方法

3. 1 模擬地盤への灯油投入 (油分浸透過程)

地下水面が GL-60cm (模擬地盤上端面を GL とする) と なるよう調整した模擬地盤に、土槽上部から着色した灯油 10 L を一定圧力で連続投入した。Photo. 1, 2 に灯油浸透状況を示す。

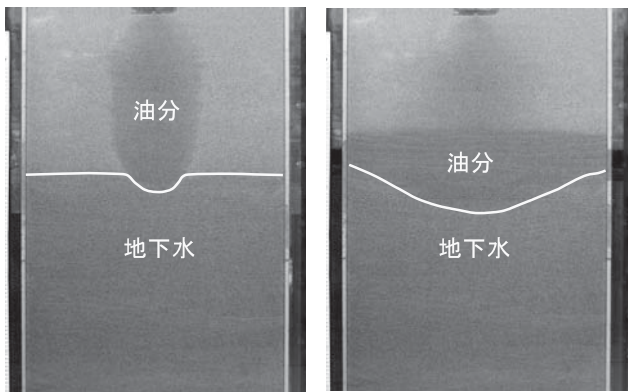


Photo. 1 灯油投入直後

Photo. 2 灯油投入 3 時間後

3. 2 水位の低下 (揚水過程)

揚水過程では、片方の観測井戸から揚水を行って水面勾配を発生させることにより、井戸にどの程度油分を引き込むことができるかの確認を行った。模擬汚染地盤製作後の定常状態から、揚水井戸 (MW-L) の水位 (約 GL-35 cm) を GL-50cm, および -80cm と段階的に低下させ、観測井戸内の油層厚と地盤内の油分の挙動を観察した。揚水流量は約 0.2 L/min, および約 0.6 L/min で、それぞれ 120 分間および 90 分間揚水を行った。なお、MW-R には給水を行い定水位に保った。

3. 3 水位の回復 (水位変動過程)

地下水位を GL-90 cm まで急激に低下させ、一晩静置して安定させた後、模擬汚染地盤製作後の定常状態の水位 (約 GL-35 cm) となるように給水し水位を回復させた。なお、油分の状況については、水位回復後 3 時間静置した後観察した。

3. 4 揚油・揚水 (井戸からの油回収過程)

まず両側の観測井戸に滞留している灯油を回収した。

その後左右の観測井戸の水位差が 5 cm 程度の緩やかな勾配を与え 60 分間通水し、MW-L に引き込まれた油を回収した。さらに、強制的に大きな勾配 (両端井戸水位差: 13~27 cm) を与え同様に油を回収した、なお、強制給排水を行った際には、給水に染料 (Brilliant Blue) を溶かし着色した水を通水し地下水の流れの可視化を行った。

4. 実験結果

4. 1 土槽内の滞油状況について

土槽内に灯油を投入した後、定常状態での状況を測定した結果を Photo. 3 および Table 2 に示す。

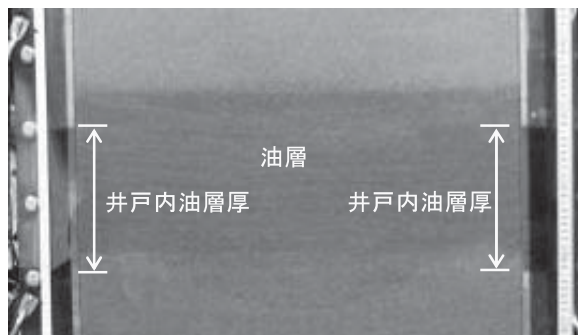


Photo. 3 灯油投入 3 日後

Table 2 観測井戸内と地盤内の液面高

	観測井戸内	地盤内	毛管圧による上昇量
水位	GL-51.0cm	GL-48.2cm	2.8cm
油位	GL-31.2cm	GL-26.5cm	4.7cm
油層厚	19.8cm	21.7cm	

この結果から、実地盤においても油分の滞留範囲は、観測井戸で観測した油層範囲より毛管圧により上方に広がっていると予想できる。また、観測井戸内の油層厚に対し、地盤内のみかけの油層厚が大きいのは、地下水と油層の境界、油層の気層の境界付近に、それぞれの飽和度の遷移帯が存在していることによると考えられる。

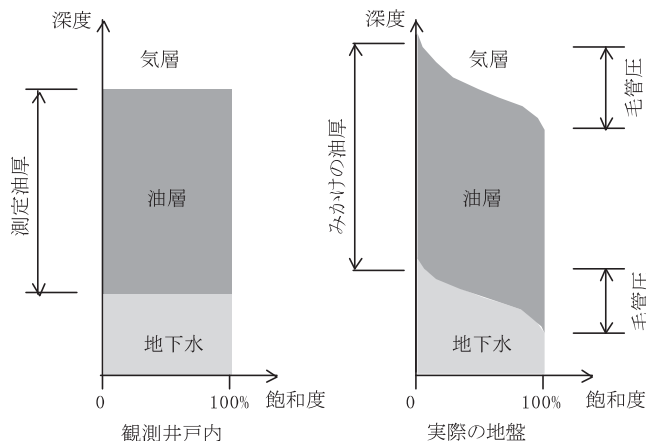


Fig. 2 地盤中の水と油分の飽和度のイメージ図

4. 2 観測井戸の油層厚と地盤内油分量の関係

測定した観測井戸内の油層厚から、地盤内の油分量を推定した結果、下記のようになった。

$$\begin{aligned} \text{地盤内の滯油量 } V &= A \times a1 \times n \\ &= 1050 \times 19.8 \times 0.484 \\ &= 10062 \text{ cm}^3 \approx 10 \text{ L (投入量)} \end{aligned}$$

ここに A : 土槽水平断面積
 a1 : 観測井戸内の油層厚
 n : 模擬地盤の間隙率

したがって、実地盤においても複数の観測井戸内の油層厚と対象面積および間隙率を把握すれば、地盤中に滞留するおよその油分量を推定することができる。

4. 3 揚水過程における油分の挙動

観測井戸内の水位低下（揚水過程）における MW-L での揚水量と油層厚さの測定結果を Fig.3 に示す。また、Photo. 4 に揚水中の土槽状況を示す。MW-L から揚水して水位を低下させた結果、揚水初期段階では MW-L 内に油分が湧出し、油層厚が増加したが、地下水水位が定常状態（揚水量 0.2 L/min）になると油層厚に変化はなく、観測井戸 MW-L への油分の移動が停止した。さらに地下水水位を低下させると、地下水水位が下降中には油層厚は増加するが、定常状態（揚水量 0.6 L/min）になるとともに油層厚の

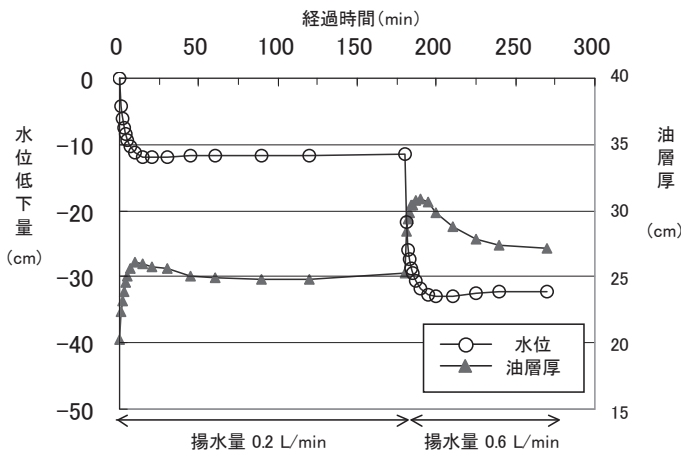


Fig. 3 観測孔 MW-L 内の水位と油層厚の測定結果

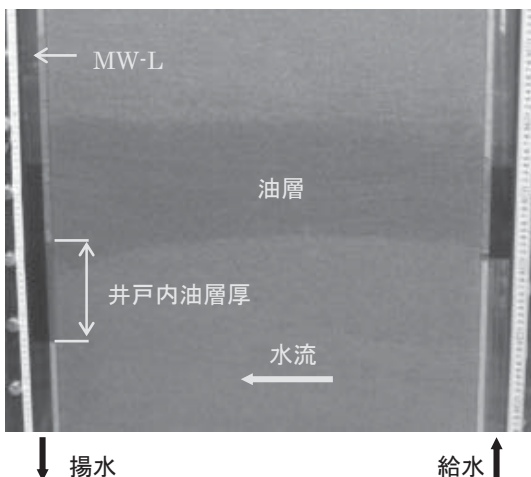


Photo. 4 揚水中の状況

増大も止まり油分の移動は減少した。

このことから、実地盤においても油層が存在する地盤に井戸を設置し、揚水を継続しながら水位を低下させても定常状態では大きな油分の回収は見込めず、後述するようなトレンチとの併用や他の洗浄促進工法などとの組み合わせが必要になると考えられる。

4. 4 水位変動過程における油分の挙動

(1) 水位低下時の状況

両側の観測井戸内の水位を急激に低下させると、模擬地盤内の油分は一樣には低下せず、観測井戸の近傍のみ先行して下降した。また、この時透水板からの油分の湧出はほとんど見られなかった (Photo. 5 参照)。

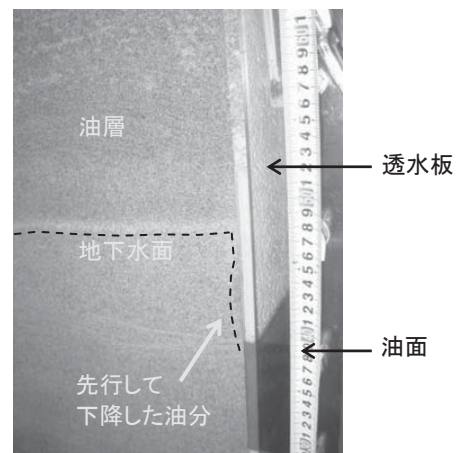


Photo. 5 水位変動 (低下) 時の状況

(2) 水位回復時

Photo. 6 に GL-90cm まで水位を低下させた後の定常状況を示し、Photo. 7 に GL-35cm まで水位を回復させた状況を示す。

地下水の上昇に伴い地盤間隙中の油分は浮上しているが、油分の一部は地盤中に拘束されていることが写真に示されている。また両側の観測井戸の油量は当初の 66% にとどまり、残りは模擬地盤中に残留している。実地盤においても地下水水位の変動により地下水面より下方にも油汚染があることを裏付けている。

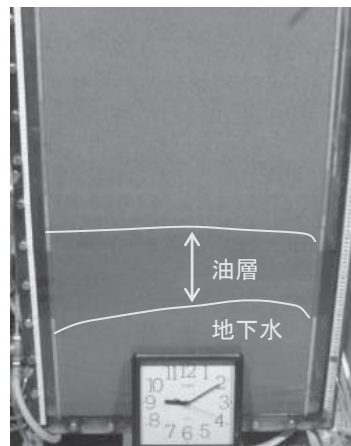


Photo. 6 水位回復前の状況

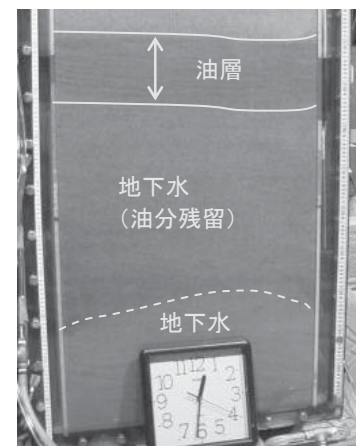


Photo. 7 水位回復状況 (開始 155 分後)

4. 5 揚油状況

Photo. 8 に揚油開始前の状況を示し、Photo. 9 に強制給排水中の揚油状況を示す。また、Fig. 4 に観測孔において揚水しながら回収した油分量の経時変化を示す。Fig. 4 に示すように揚油開始時に MW-L と MW-R から回収した油分量は、約 1.1L であった。最初の 60 分間は緩やかな水面勾配での湧出油分を回収し、その後、回収率を向上させるために強制給排水を行った。揚油は約 280 分間実施したが、最終的に回収できた油分は合計約 4.45 L であり、当初注入した油分量 10 L に対して回収率は 45% であった。

実験はここで打ち切ったが、その後継続させたとしても、回収率をさらに上げるためには長時間を要すると推測できる。

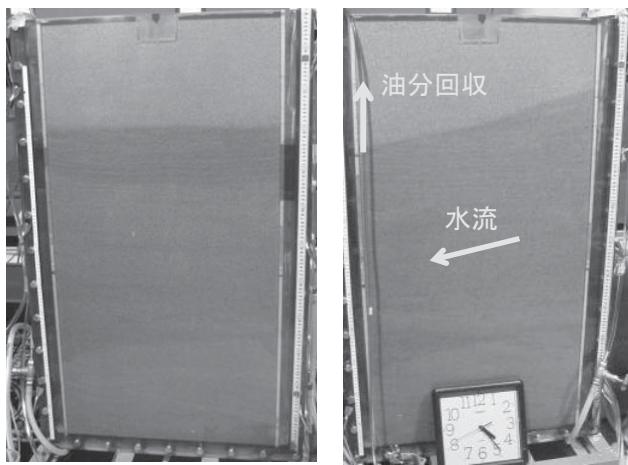


Photo. 8 揚油開始前の状況

Photo. 9 強制給排水時の状況

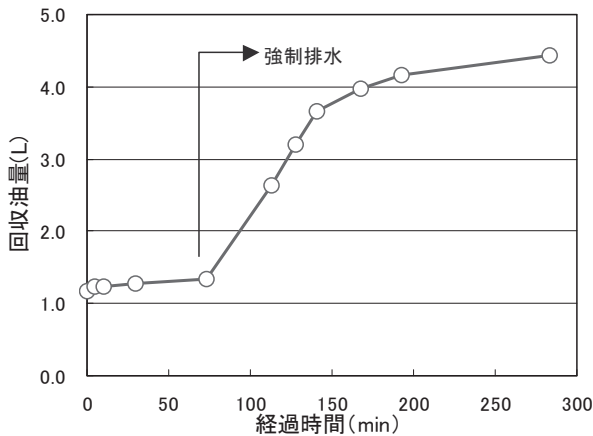


Fig. 4 揚水による油分回収量の揭示変化

4. 6 残留油分量測定結果

揚油実験後、Fig. 5 に示す位置における土槽内模擬地盤の油分量を測定した。測定結果を Table 3 に示す。その結果、残留油分量は下部ほど濃度が高く、13,000～21,000mg/kg であった。したがって実地盤においても、流速が緩慢な状態で揚水を継続した場合、相当量の油分が土壌中に残留する可能性がある。

Table 3 土槽内の油分量測定結果

サンプリング位置	石油系炭化水素量 (TPH) mg/kg			
	C6～C12	C12～C28	C28～C44	合計
No.1 GL-35cm	8,000	5,300	<100	13,300
No.2 GL-50cm	10,000	6,700	<100	16,700
No.3 GL-65cm	13,000	8,800	<100	21,800

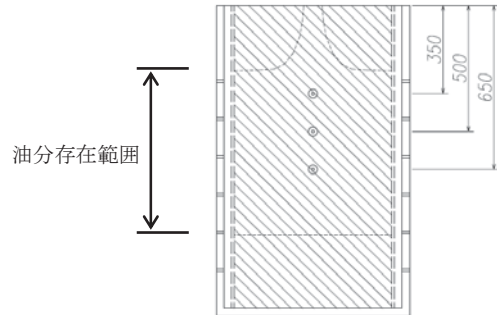


Fig. 5 サンプリング位置

4. 7 油汚染地盤内の地下水の挙動

Photo. 10 は、揚油実験時に地下水の流れを可視化した状況である。地下水の流れは MW-R から MW-L に向かっていているが、その流れは油分が浸透していない土槽下部を優先的に流れていることが確認できる。着色した供給水の移動分布を見ると、油分が残留している水面付近や地下水の低下・回復により浸透履歴を受けた部分の流速は、油分を含まない土槽下部と比べて 1/2～1/3 程度と推測された。すなわち水飽和度が低くなっており、土粒子中に油分がトラップされているため地下水の移動を阻害していると示唆された。

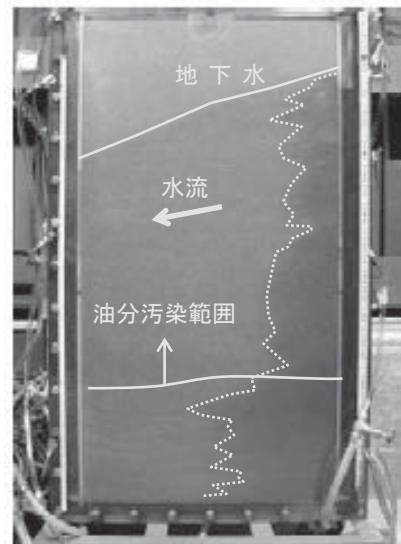


Photo. 10 地下水の流れ可視化状況

地下水は、透水係数の相対的に高い箇所を選択的に流れる特徴をもち、また、地盤の透水係数は水飽和度の影響を受ける。すなわち、水飽和度の高い地下水帯では地盤の透水係数は高いが、間隙中に油分が混入している地盤は水飽和度が低下するため、地下水帯に比べると透水係数は低いと考えられる。さらに、水に比べ粘性および

表面張力の高い油分は、土粒子間にトラップされ、緩慢な水流下では容易に移動しない。そのため、自然流や揚水により生じる地下水の流れは、油分で汚染されていない水飽和度の高い部分を優先的に流れると考えられた。

これらのことから、定常的な地下水流では地盤内の油分の効果的な移動が望めないと予想できる。

5. 実験結果のまとめ

今回の土槽実験結果から、下記の知見が得られた。

- ① 観測井戸内に溜まった油分の油厚により、地盤中の滯油量を推定することができる。
- ② 地盤内の油分は毛管圧により上昇し、観測井戸内の油面高より高い位置まで油分が存在する。
- ③ 油分は地下水水面より下方の地盤間隙中に残留する場合がある。
- ④ 地盤内では地下水の移動速度に対し、油分の移動速度はかなり小さい。
- ⑤ 油分が残留する部分は透水性が小さい。
- ⑥ 自然重力下での地盤からの油分回収にはかなり長時間を有し、回収率を上げるには他の工法との併用が必要である。
- ⑦ 地盤内の油層消滅後においても、1～2%の濃度の油分が残留する可能性がある。

今後、滞水地盤中の油分を回収する必要がある対策工事においては、これらの地下水と油分の関係をふまえる

と、油汚染域内において定常的な地下水流では地盤内の油分の移動・回収には時間を要するため、例えば、面的な上部からの注水、地下水位の大きな変動をともなう反復洗浄や、真空圧を利用した強制的な集水を行う等の方策を併用する等の対策も効果的と予想できる。本報告では定性的な議論に限られているが、今後は上記の方策を含めた効果的な油分回収工法についてさらに検討していきたい。

謝辞

この実験は、立命館大学理工学部 石森洋行工学博士のご指導のもと、実験場所・設備のご提供、研究室所属の学生の皆さんに多大なご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 石森洋行, 深川良一, 嶋田浩一, 土路生修三, 門倉伸行, 久保幹 : 地下水揚水処理による油汚染土壌の浄化効率に関する実験的評価, 第 43 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 2101-2102, 2008 年 7 月
- 2) Ishimori, H., Shimada, K., Torobu, S., Katsumi, T., Fukagawa, R. and Kubo, M. : Removal of LNAPL distributed on groundwater table by pump-and-treat, 8th Japan-Korea-France Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering, pp. 175-178, 2008.6
- 3) 土路生修三, 嶋田浩一, 石森洋行, 門倉伸行, 岡田久雄, 久保幹 : 実験土槽を用いた地下水揚水における地盤中の油分の挙動に関する検討, 第 15 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp. 109-112, 2009 年 6 月

Research and experimental work in construction measures of LNAPL pollution

Koichi SHIMADA, Nobuyuki KADOKURA, Shuzo TOROBU, Satoshi NAITO, Hisao OKADA and Noriyuki UEMA

Abstract

A soil tank test was conducted to evaluate the efficiency of pump-and-treat remediation to remove LNAPL distribution on groundwater table. As a result the main results are shown as follows. (1)Some LNAPL was remained in soil porous media beneath the groundwater table when the groundwater was changed. (2)The removal rate of LNAPL was gradually decreased with time when pump-and-treat remediation was continuously conducted. The phenomena is attributed to residual property of LNAPL in soil porous media and heterogeneity of groundwater flow.

Keywords : LNAPL, Pollution, Groundwater, Remediation
