鉛直方向に埋設した吸引・圧入孔を用いた油汚染地盤の浄化

Purification of oil polluted soil using the vacuum and injection nozzles laid under the ground in vertically

寺田曉彦[1]，佐野豊生[1]，清宮崇寛[1]，棚橋秀行[2]

1　大同大学・大学院工学研究科都市環境デザイン学専攻
2　大同大学・工学部建築学科　土木・環境専攻・tanahasi@daido-it.ac.jp

概　　要

近年，油による地盤汚染が問題となっており，様々な浄化技術が研究されている。しかし，粘性が小さく揮発性に富む油に関する浄化の研究は進んでいるが，機械油などの高粘性で揮発しにくい油に対してはあまり進んでいないのが現状である。そのため本研究室では，界面活性剤で機械油を乳化させ非掘削浄化する技術について研究を行っている。今までの実験では，界面活性剤の浸透の際，土壌の状態等により，浸透しやすい領域と浸透しにくい領域が現れ，浄化ムラが発生してしまう問題を抱えていた。また，鉛直方向よりも水平方向の界面活性剤の流れにおいて，浄化ムラが発生しやすい傾向が分かってきた。そのため，本研究では確実性を考え鉛直方向に埋設した吸引・圧入孔を用いこれまでの間隙内二液反応発泡を応用した油汚染地盤の浄化土槽実験の結果を報告する。

キーワード：油汚染地盤，浄化，非掘削，界面活性剤，間隙内二液反応発泡

1.　はじめに

1.1　研究の背景

油による地盤汚染が問題となっている。このうちトリクロロエチレンなどの有機塩素化合物，あるいは燃料といった揮発性に富み粘性の小さな油に対する浄化は進んでいるが，機械油などの揮発性に乏しい高粘性油に対しての浄化技術開発はあまり進んでいない。多くの機械工場で用いられるこうした機械油の地盤汚染が今後問題になるといわれており，我が国の中小の事業所数から考えても，浄化需要は非常に大規模である。機械油は潤滑油として対象物に膜状に付着することを目的に作られているため，土粒子に対する付着性が高く，かつ揮発性にも乏しいため，非掘削で除去する有効な技術は現在までのところ確立されていない。そのため，機械油で汚染された地盤は，汚染土壌を掘削して運搬し産廃処理するしかないが，埋め戻すための土も別途必要であるから，運搬費は汚染土壌の単純に約2倍必要であり膨大な額となる。また，埋め戻し土を採取するには場合によると貴重な自然を破壊しなければならなくなるうえ，産廃処理が適正に行われず新たな汚染問題を引き起こしてしまうケースも懸念されている[1)]。非掘削浄化が可能になればこういったリスクを回避できるだけでなく工場を操業したまま行うことが可能になり，社会的な貢献度は高いものと考える。

本研究の目的は大同大学・棚橋研究室がこれまでに開発した，地盤に浸透した重曹・界面活性剤・酢酸水溶液の反応による発泡で機械油を乳化させる浄化技術「間隙内二液反応発泡」を用いることで，機械油汚染地盤の効率のよい非掘削浄化技術の確立を目指すことである。

従来の界面活性剤を効率よく浸透させる方法として，図-1 のように界面活性剤と地上であらかじめ発生させた気泡をともに地盤に注入する工法が存在するが，この手法では，泡状の界面活性剤は小間隙にトラップされた油汚染部位内部に対しては浄化しきれない恐れがある[2)]。これに対し，「間隙内二液反応発泡」は重曹を添加した界面活性剤と酢酸を添加した界面活性剤を油汚染領域に浸透させ，間隙内で二液が反応して発生する二酸化炭素により界面活性剤を発泡させることで，図-2 のように小間隙内にトラップされた油の乳化を促進させるものである。

「間隙内二液反応発泡」による化学反応式を以下に示す。

重曹($NaHCO_3$)+酢酸(CH_3COOH)→
　　酢酸ナトリウム(CH_3COONa) + 炭酸(H_2CO_3)
炭酸(H_2CO_3)　→　$H_2O + CO_2$(気体)

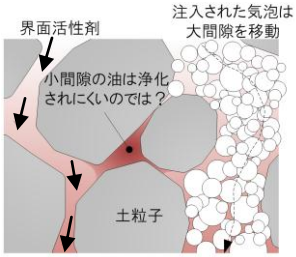

図-1 気泡を圧入した場合

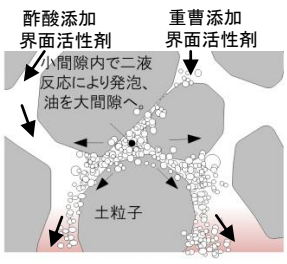

図-2 間隙内二液反応発泡

従来の実験では,界面活性剤を水平方向へ浸透させる,浄化実験を行ってきたが,界面活性剤が浸透しやすい領域ばかり浸透してしまい,浄化ムラが発生してしまう傾向にあった。現場を想定した大型三次元土槽による実験からも,界面活性剤の水平方向への浸透はコントロールが難しく,実際の現場では,よりコントロールが困難になることが予想される。

1.2 研究の目的

これらの背景から我々は,水平方向への浸透ではなく,鉛直方向への浸透の方が,シンプルかつコントロールがしやすいのではないかと考えた。そのため今回の実験では,鉛直方向に圧入孔と吸引孔を設置し,「間隙内二液反応発泡」によって,微小間隙内の汚染油を回収すると共に,発泡による低飽和度領域の形成によって,界面活性剤が広範囲へ浸透することを期待した。最終目標は現場レベルでの実用化であるが,まずは比較的小型である薄型二次元土槽内で予想通りの挙動を示すかどうかを検証する。

2. 薄型二次元土槽を用いた浄化実験

2.1 実験方法と目的

実験には薄型二次元土槽(内寸幅 62cm×高さ 72cm×奥行 5cm)を用いた。充填試料は豊浦砂とズダンⅣによって赤く着色したエンジンオイルで汚染させた豊浦砂を使用した。写真-1 のように圧入孔と吸引孔を設置し,圧入孔 1 からペレソフト 205(ミヨシ油脂製)3%＋重曹 5%を,圧入孔 2 からペレソフト 205(ミヨシ油脂製)3%＋酢酸 3%を圧入した。地表面には CMC(カルボキシメチルセルロース)を散布し,空気の侵入を防ぎ吸引圧の低下を防いだ。

実験目的でも触れたように,「間隙内二液反応発泡」を用いて,界面活性剤の浸透範囲の拡大を期待したものである。圧入孔 1 から重層添加界面活性剤を圧入し,圧入孔 2 から酢酸添加界面活性剤を圧入することで,圧入孔 1 と圧入孔 2 の間に重曹と酢酸による化学反応が生じ,発泡現象すなわち,「間隙内二液反応発泡」が生じる。これが低飽和度領域を形成し,上から圧入される重層添加界面活性剤がその低飽和度領域を避けるように浸透し,結果的に広範囲に浸透させる事が可能になると予想したものである。

2.2 実験経過

写真-2 は実験開始 2 時間後の様子である。既に重曹添加界面活性剤と酢酸添加界面活性剤が接触しており,「間隙内二液反応発泡」が発生していることが分かる。しかし,この時点では界面活性剤が広範囲に浸透しているとは言い難い。写真-3 は実験開始 4 時間後の様子である。全体的に界面活性剤が広範囲に浸透していることが確認され,2 時間後の様子と比べて全体的な浸透の拡大が進んでいることが分かる。写真-4 は実験終了時の様子である。4 時間後の様子と比べて広範囲に界面活性剤が浸透し,初期汚染領域の汚染油が十分に乳化されていることが目視できる。

写真-1　初期状態

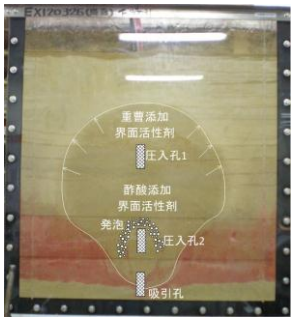

写真-2　2 時間後

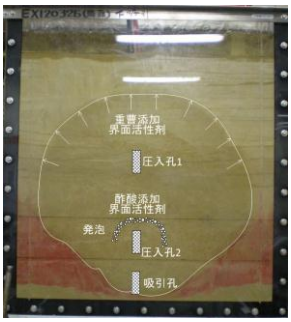

写真-3　4 時間後

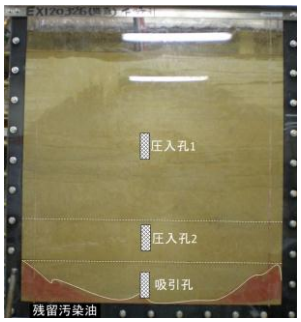

写真-4　実験終了時

2.3 考察

今回の実験目的である,「間隙内二液反応発泡」による界面活性剤の広範囲への浸透は,おおむね達成されたと考えられる。その根拠は,写真-4 の実験終了時の様子を見れば分かるが,土槽内の約 9 割程度を界面活性剤が浸透し,初期汚染領域の汚染油の多くを回収しているからである。これらの事を踏まえ,次章では今回使用した薄型二次元土槽よりも大型である,幅広薄型二次元土槽でも,同様に界面活性剤の広範囲の浸透が可能かどうかを検証する。

3. 幅広薄型二次元土槽による浄化実験(3unit)

3.1 実験方法

実験には幅広薄型二次元土槽(内寸幅 200cm×高さ 100cm×奥行 5cm)を用いた。充填試料は豊浦砂とズダンⅣによって赤く着色したエンジンオイルで汚染させた豊浦砂を使用した。写真-5 のように圧入孔 1,2 と吸引孔をそれぞれ 3 ユニット設置し,圧入孔 1 からペレソフト 205(ミヨシ油脂製)3%＋重曹 5%を,圧入孔 2 からペレソフト 205(ミヨシ油脂製)3%＋酢酸 3%を圧入した。地表面には CMC(カルボキシメチルセルロース)を散布し,空気の侵入を防ぎ吸引圧の低下を防いだ。

また,実験終了後に土槽を解体し,図-3 の様に 57 ブロックに分け,それぞれ土壌サンプルを採取する。それを,ノルマルヘキサンによる汚染油の抽出を行い,清浄土壌 1g 中に何%の汚染油が残留しているかを示す,「残留油分質量比」を求めた。

3.2 実験経過

写真-6 は実験開始 6 時間後の様子である。土槽中央部を中心として,重曹添加界面活性剤が広く浸透しており,また,

右側では既に重曹と酢酸が混じり合っているため,「間隙内二液反応発泡」が発生している事が分かる。写真-7 は実験開始 12 時間後の様子である。土槽内の約 7 割に界面活性剤が浸透していることが確認できる。設置した 3 ユニット全てが発泡現象を起こしており,多くの乳化油を回収していることも目視できる。写真-8 は実験終了時の様子である。土槽の両端に残留汚染油が見られるが,初期汚染領域から降下している事から,界面活性剤は浸透しており,汚染油を乳化している事が分かる。中央部は比較的乳化油が回収されているのが見受けられ,ユニット間での浄化は比較的効果が高いと考えられる。図-4 はノルマルヘキサン分析によって求めた,「残留油分質量比」である。図には記載していないが両端以外は全て 1%未満であり,乳化油が残留する両端では 1%を超える数値が出ている。

また,一つ気になる点に触れるが,右端の残留汚染油が写真-7 の 12 時間後と写真-8 の実験終了時と比べ,終了時の方が増している様に見えるが,これは土壌内部に散らばっていた乳化油が実験終了時までに降下し,集積されたものである事をここに記しておく。

写真-5　初期状態

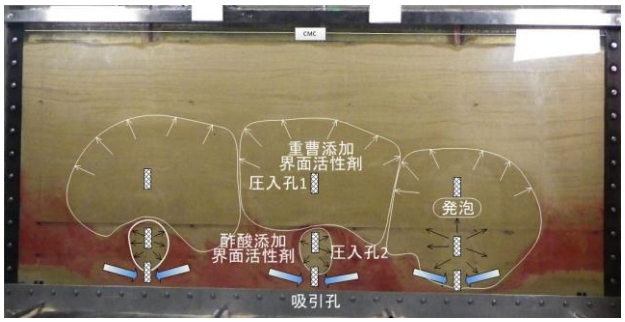

写真-6　6 時間後

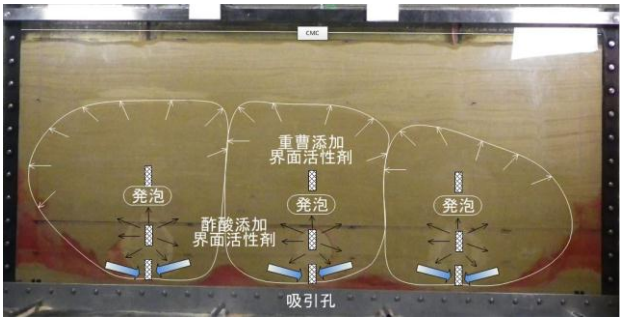

写真-7　12 時間後

写真-8　実験終了時　(40 時間後)

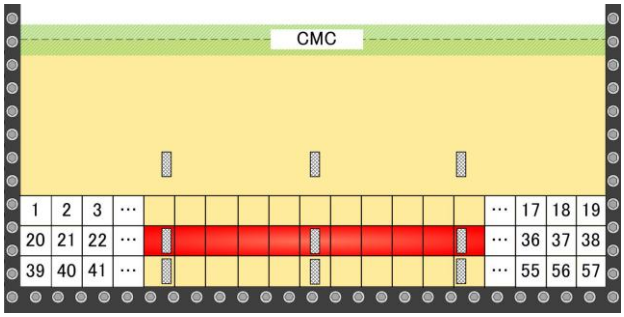

図-3　土壌サンプル採取による 57 ブロック分割図

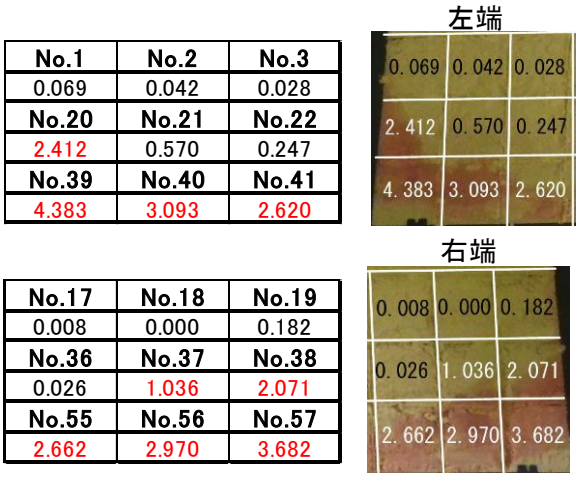

図-4　残留油分質量比　両端

3.3　考察

今回の実験目的である,土槽サイズを広げた幅広薄型二次元土槽での界面活性剤の浸透範囲の拡大は,おおかた成功したといえる。理由としては前回の実験と同様に,界面活性剤が土槽内の多く範囲に界面活性剤が浸透し,初期汚染領域の汚染油を回収することが出来たからである。

また,「残留油分質量比」は多くの領域では 1%を下回っており,ユニット間での浄化効果が高いことを示している。1%を超えた箇所は両端の底部に集まっているが,まずこの手法によりどこまで浸透し浄化が可能なのかどうかを重視するため,今回は解消方法の考案を見送ることにした。

そのため,次章の実験では今回 3 ユニットで行ったものを,2 ユニットで行い,界面活性剤の圧入量の抑制,圧入間隔を広げても同様に界面活性剤が広範囲に浸透するかどうかを検証する。

4. 幅広薄型二次元土槽による浄化実験(2unit)

4.1 実験方法

実験には幅広薄型二次元土槽(内寸幅 200cm×高さ100cm×奥行 5cm)を用いた。充填試料は豊浦砂とズダンⅣによって赤く着色したエンジンオイルで汚染させた豊浦砂を使用した。写真-9 のように圧入孔 1,2 と吸引孔をそれぞれ 2 ユニット設置し,圧入孔 1 からペレソフト 205(ミヨシ油脂製)3%＋重曹 5%を,圧入孔 2 からペレソフト 205(ミヨシ油脂製)3%＋酢酸 3%を圧入した。地表面にはCMC(カルボキシメチルセルロース)を散布し,空気の侵入を防ぎ吸引圧の低下を防いだ。また,初期汚染領域は前回よりも10cm 高い位置に充填をした。これは,前回では初期汚染領域の下層部分が 10cm しかなく,乳化油がすぐに底面に降下してしまうため,20cm の余裕を与える事で,乳化油が降下しきる前に回収ができるのではないかと考えたからである。さらに前回と同様,実験終了後に土壌サンプルを採取し,ノルマルヘキサン分析を行うが,現在分析中のためここでは結果を割愛する。

4.2 実験経過

写真-10 は実験開始 6 時間後の様子である。右側のユニットでは既に重曹と酢酸が混じり合っており,「間隙内二液反応発泡」が発生している事が分かる。写真-11 は実験開始 12 時間後の様子である。左側のユニットも「間隙内二液反応発泡」が発生しており,界面活性剤の浸透範囲も拡大していることが観測される。写真-12 は実験終了時の様子である。ユニット間では乳化油はおおむね回収されているが,両端底部には乳化油が回収されていない事が目視される。

写真-9　初期状態

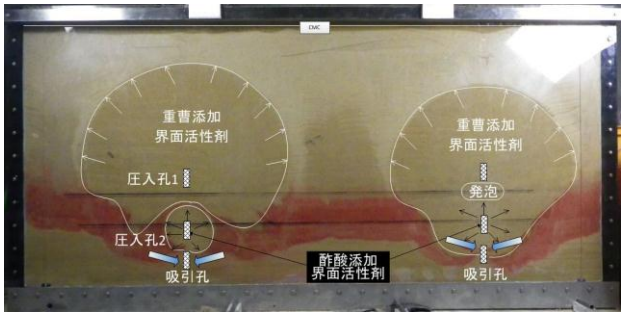

写真-10　6 時間後

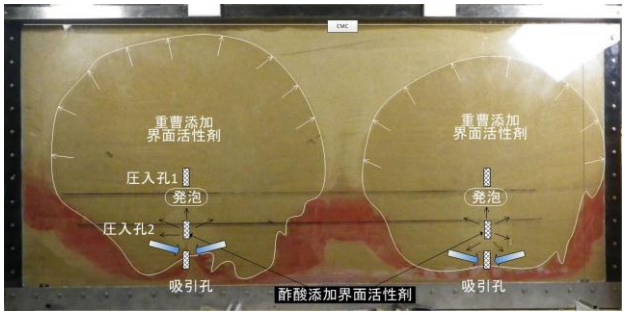

写真-11　12 時間後

写真-12　実験終了時　(40 時間後)

4.3 考察

今回の実験目的である,3ユニットから2ユニットへのスリム化で,同様な界面活性剤の浸透領域の確保が可能かどうかに関しては,おおむね成功ではないかと捉えている。理由は写真-8 と写真-12 を比較すると,残留汚染油の分布に大きな違いは見られず,前回と同様にユニット間での浄化は依然として効果的である事が示されたからである。

しかし,依然として乳化油が土槽底部に降下し残留する現象が見られる。これはユニット数の増減に関連が無いと考えられ,また,下層高も 20cm と前回の 2 倍にしたが大きな違いが見られない事から,一度降下した乳化油の回収は困難である事が分かる。

5. まとめ

圧入孔,吸引孔の鉛直方向での埋設及び,「間隙内二液反応発泡」による界面活性剤の浸透範囲の拡大は,ひとまず二次元土槽では実現可能である事が今回の研究によって明らかになった。そのため今後も引き続き今回の手法を採用し,研究を進めていく。しかし,今回の研究によって得られたものは成功だけではない。それは,吸引孔より下部に降下した乳化油の回収は極めて困難であるから,それをいかに確実に解消するのかという課題である。そのため今後は地盤改良も兼ねて,初期汚染領域の下層地盤を水ガラスで固め,乳化油の降下を防ぎ回収を試みる研究を行う。

参考文献

1)環境省水・大気環境局土壌環境課：改正土壌汚染対策法の概要と留意点，第16回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会・特別講演-1，資料p. 1，2010.

2) Stephanie Fiorenza et.al : NAPL Removal: Surfactants, Foams, and Microemulsions, *Lewis Publishers*, 2000.