

砂地盤への回収油の浸透機構に関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON PERMEATION MECHANISM OF RECOVERED OIL INTO SANDY GROUND

金編康平¹・近藤浩文²・大塚夏彦³・佐伯浩⁴

Kohei KANAAMI, Hirofumi KONDO, Natuhiko OTSUKA, Hiroshi SAEKI

¹石川県 土木部 道路建設課 企画係(〒920-8580 金沢市鞍月1丁目1番地)

²北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 工博 北日本港湾コンサルタント(株)(〒003-0029 札幌市白石区平和通2丁目北11番18号)

⁴フェロー 工博 北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

In the oil recovery operation of Nakhodka oil spill, recovered oil was temporary stored in the storage pit that excavated on the backland of quay wall. In the case of using the temporary oil storage pit, the oil contamination of sandy ground was to be considered. In this paper, a series of experiments on permeability coefficient of sand against oil, capillary height of oil against sand and 2-dimensional oil distribution into sand were carried out. And characteristics of oil permeation into sand were discussed.

Key Words: Oil spill, crude oil, permeation, sand

1. はじめに

1999年夏より、サハリン島東の大陸棚において原油の生産が開始された。生産された原油はタンカーに積み、北海道近海やオホーツク海を通過して韓国・中国・米国および一部は日本に運ばれている。こうした北海道近海におけるタンカー航行の増大に伴い、原油流出事故の危険性が増大していることが指摘されている¹⁾。1997年冬に島根県沖で発生したナホトカ号からの重油流出事故における流出油回収作業においては、冬期日本海的环境下では既存の回収機材はあまり役に立たなかった。一方、これとは対照的にグラブ船やガット船が活躍したことは良く知られている²⁾³⁾。しかしこの際に、回収油と海水を混合した状態で回収したため、陸上への輸送回数が増え、回収油貯蔵用ピットの容量の増大が余儀なくされ、その後の産業廃棄物としての処理にも高額の費用がかかった。そこで著者らは、密度差を利用し、油と海水を分離する方法として、オイルフェンスを用いた一時貯蔵ピットを考案して(図-1)、流出した油を効率的に一時貯蔵する方法を提案している⁴⁾。

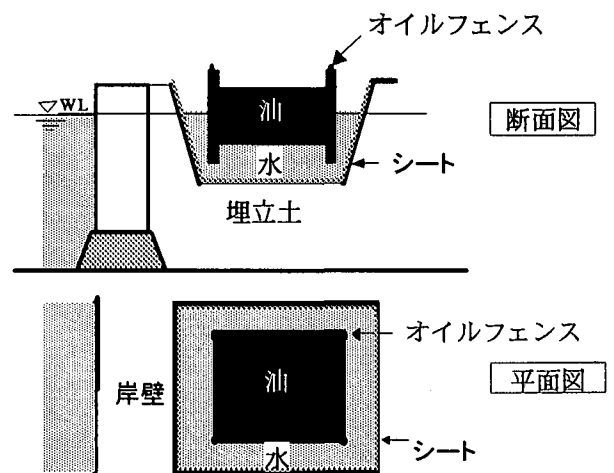


図-1 回収油一時貯蔵用ピットの概念図

本方法は、回収した原油を一時貯蔵するピット内にオイルフェンスを展張して回収油を集積し、油と海水を分離して保管するものである。ピット内での水面は波も無く穏やかであるため、オイルフェンスの設置、操作が容易である。これによりピット内において海水と油を分離して保管できる事から、その後油だけを効率良く回収し処理する事が可能となる。しかし、回収作業中にピットから溢れたり、漏れた

りした油が地盤に浸透して環境汚染を引き起こす危険性がある。そこで本研究は、砂の油に対する浸透係数、油の砂に対する毛管現象と2次元的な浸透性状についての実験を通じて、ピットから溢れた油の浸透特性を把握することを目的として実施したものである。

2. 実験方法

(1) 原油の砂地盤への浸透係数実験

ピットは岸壁背後等に空間的余裕を必要とし、通常は埋立地を掘削して作成される。一般に埋立て地盤は浚渫により発生した種々の土砂により築造されている事が多い。これらの地盤に対する浸透係数は、砂の粒径、粒径分布、相対密度等によって変化すると考えられる。そこで、種々の粒径の砂に対する油の浸透係数を求めるため、以下の方法により実験を行った。

図-2 に実験装置を示す。実験には底面にポーラスストーンを取りつけたアクリル円形容器(L=300mm×r=100mm、底面厚さ 20mm)を用いた。容器に実験砂をいれ、砂面上部から原油を注入した。その後、アクリル容器の上面に蓋をはめ、エアコンプレッサーにより加圧し、シリンダーの底面から流出してくる油の流量を計測した。実験は、砂の粒径、間隙比、飽和度、そして原油の粘度をそれぞれ変化させて行った。実験に用いた砂は中央粒径がそれぞれ0.167mm、0.554mm、1.387mmの計3種類とした。原油にはイラニアンライト原油を用い、粘度は $14 \sim 190 \times 10^3 \text{Pa} \cdot \text{s}$ の範囲で変化させ使用した。アクリル容器内にかけた圧力は全てのケースにおいて39.2kPaとした。原油の注油量は各ケースにおいて一定ではなかったが、空気圧を油層厚に置きかえると4.0m以上に相当するため、シリンダー内の油層厚の変化による流出量への影響は僅かであると見なした。また、ポーラスストーンのみの場合の実験も行ない、その浸透係数を計測した。

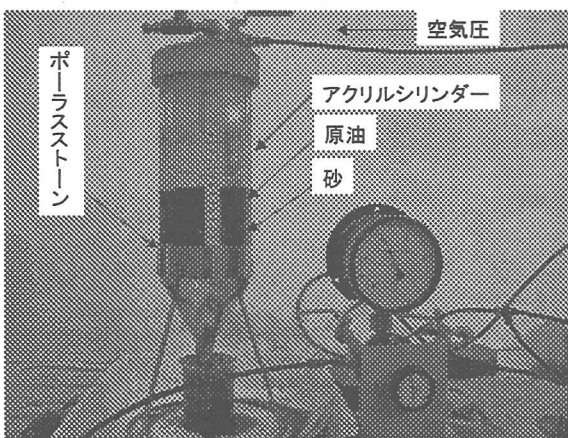


図-2 浸透係数実験の実験装置

(2) 原油の砂地盤への毛管現象実験

実験装置を図-3 に示す。底面を布で蓋をしたアクリル円筒容器(内径 2.4cm)に砂を入れ、アクリル容器を原油(イラニアンライト)の入ったピーカーに入れ浸透高さを測定した。実験に用いた砂は、中央粒径0.167, 0.554, 1.387mmの3種類とし、含水比、間隙比をそれぞれ変化させ実験を行った。原油の粘度は $12 \times 10^3 \text{Pa} \cdot \text{s}$ (揮発前の原油) $\sim 68 \times 10^3 \text{Pa} \cdot \text{s}$ (揮発させた原油)とした。

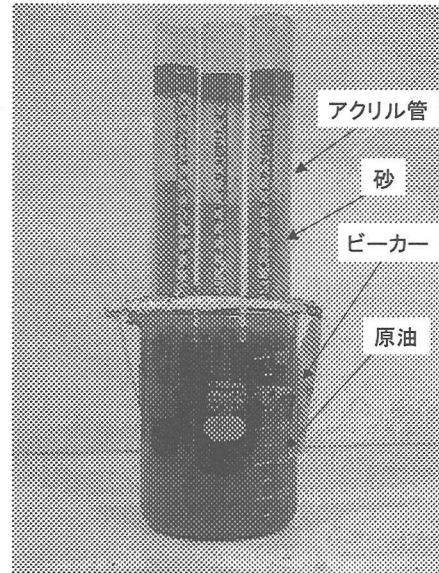


図-3 毛管現象実験の実験器具

(3) 原油の砂地盤への2次元浸透性状実験

原油の砂への2次元的な浸透性状実験を以下の方法により行った。図-4 に実験装置を示す。実験には、長さ1m、幅0.1m、高さ0.25mの水槽を使用した。水槽の側壁から100mmの所にガラス製仕切り板を立てて原油の投入口とした。原油は砂面より50mmを保つようにして行った。実験は2ケース行い、case1は底面から2cmまでを水で浸し、その上方は乾燥した砂を用いた。case2には砂全体に一度水を注ぎ、その後で水を水槽から排出した湿潤砂を使用した。

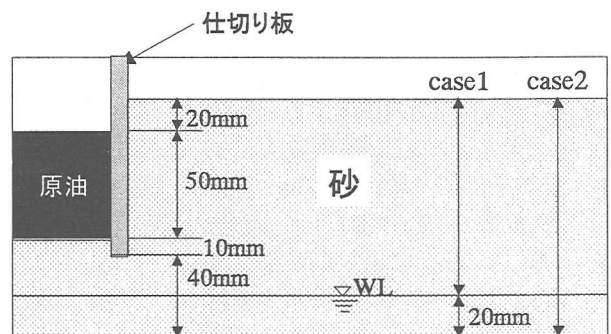


図-4 2次元浸透性状実験の実験装置

3. 実験結果

(1) 浸透係数

(1)式は、実験結果より砂層とポーラスストーンを合わせた系に対する浸透係数 k をダルシー則⁵⁾にて求めるものである。これをもとに、砂層・ポーラスストーンによる2層系の浸透モデルより、(2)式にて砂層の浸透係数を算出した。

$$k = \frac{4}{\pi\phi^2} \cdot \frac{\omega H}{P} \cdot \frac{Q}{\Delta t} \quad (1)$$

$$k_s = H_s \left/ \frac{H}{k} - \frac{H_i}{k_i} \right. \quad (2)$$

ここに、 ϕ ：シリンダーの内径、 ω ：油の比重、 H ：底盤+砂層の厚さ、 P ：内圧、 Δt ：計測時間、 Q ： Δt 間における油の流下量、 H_s ：砂層の厚さ、 k_s ：砂の浸透係数、 k_i ：底盤の浸透係数、 H_i ：底盤の厚さ

中央粒径と浸透係数の関係を図-5に示す。図より、中央粒径の増加に伴い、浸透係数も増大することがわかる。

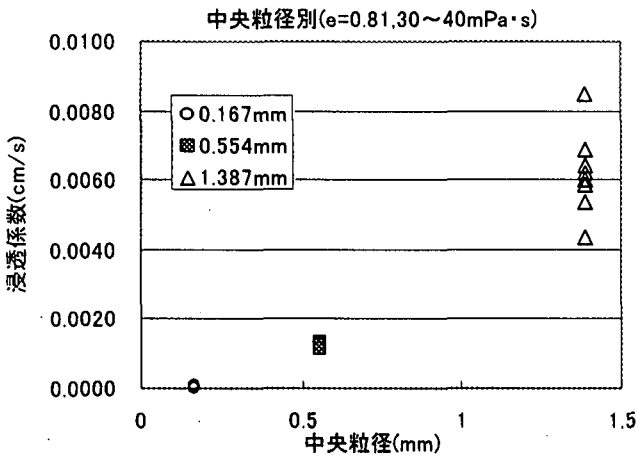


図-5 中央粒径と浸透係数の関係

次ぎに、間隙比を一定としたときの原油の粘度と浸透係数の関係を図-6に示す。粘度の増加に伴い、浸透係数は減少した。

このように浸透係数は粘度の影響を受ける。水に対する砂の浸透係数の場合、粘度の影響は式(3)により考慮することができる⁶⁾。これを油の浸透実験に適用し、図-6中の曲線に示す。ただし、基準値は最も多く実験に使用した原油の粘度 ($40 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$) とし、曲線を求めた。実験値は概ね曲線に乗っており、式(3)を用いた粘度の比較によって、種々の粘度の油のおおよその浸透係数を求めることができると考えられる。

$$k = \frac{\mu_0}{\mu} k_0 \quad (3)$$

ここに、 μ ：使用した液体の粘度、 μ_0 ：基準値(水の場合は20度のときの粘度)、 k ：粘度 μ のときの砂に対する浸透係数、 k_0 ：基準値(粘度 μ_0 のときの砂に対する浸透係数)

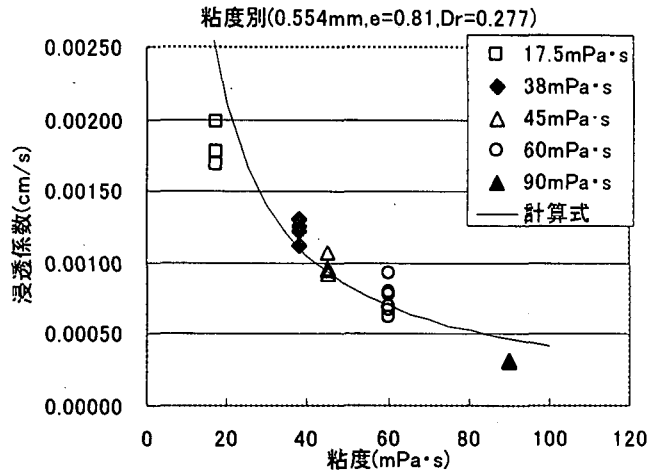


図-6 粘度と浸透係数の関係(中央粒径 0.554mm)

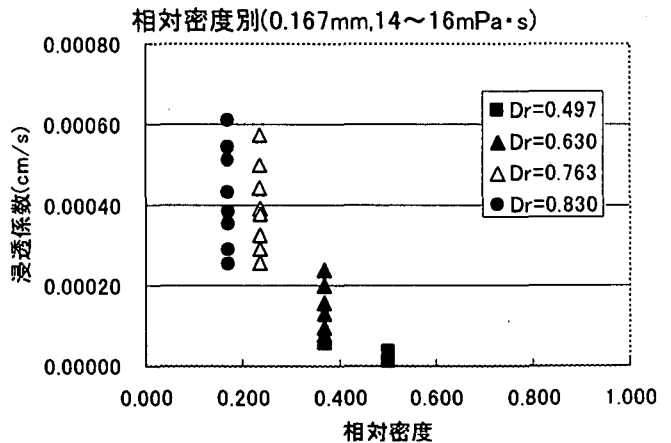


図-7 相対密度と浸透係数の関係(0.167mm)

図-7に低粘度原油を用いた時の相対密度と浸透係数の関係を示す。図より、相対密度が大きくなると浸透係数は小さくなるのが分かる。

図-8に中央粒径 0.554mm における飽和度と浸透係数の関係をそれぞれ示す。中央粒径 0.167mm については、含水させると浸透係数が小さくなりすぎ測定が不可能であった。図より、飽和度が大きくなると浸透係数は小さくなり、飽和度が30~40%になると乾燥時の1/5よりはるかに小さくなる。

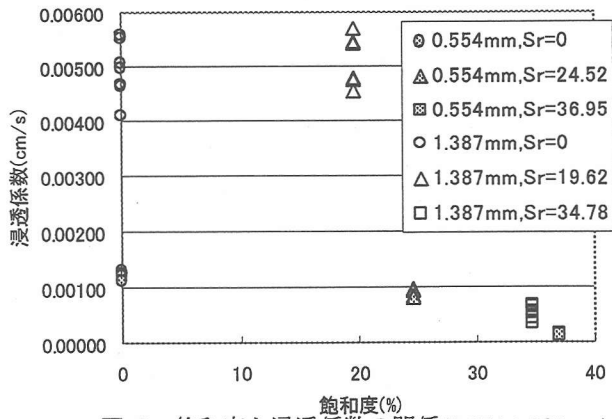


図-8 飽和度と浸透係数の関係(0.554,1.387mm)

(2) 毛管現象

図-9 に揮発前の原油(低粘度)を使用した場合、図-10 に1日風化させて粘度が増大した原油を使用したときの、乾燥した砂への毛管上昇高さ(毛管上昇高さ)と中央粒径(中央粒径)の関係を示す。図-9より、揮発前の原油においては、粒径が大きくなるほど毛管上昇は小さくなった。また、間隙比が大きくなるほど毛管上昇は低下することがわかる。図-10より、各粒径ともに1日風化させて粘度を大きくした原油においては、毛管上昇は低下し、粒径0.167mmでは、ほとんど上昇は見られなかった。図-11には、含水した砂への原油の毛管上昇高さ(毛管上昇高さ)と中央粒径(中央粒径)の関係を示す。各粒径ともに、飽和度が增大すると、毛管上昇は低下した。

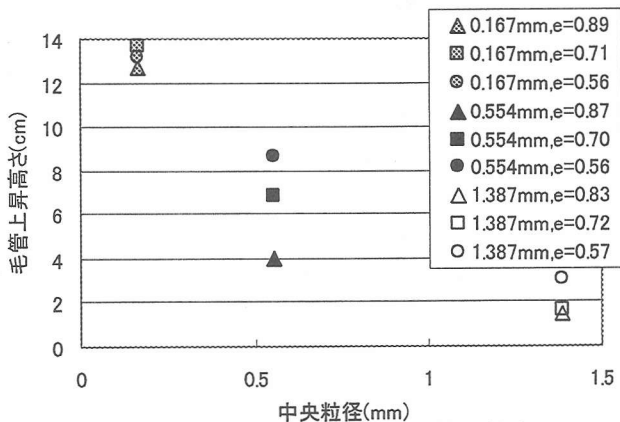


図-9 乾燥砂への低粘度原油の毛管上昇高さ

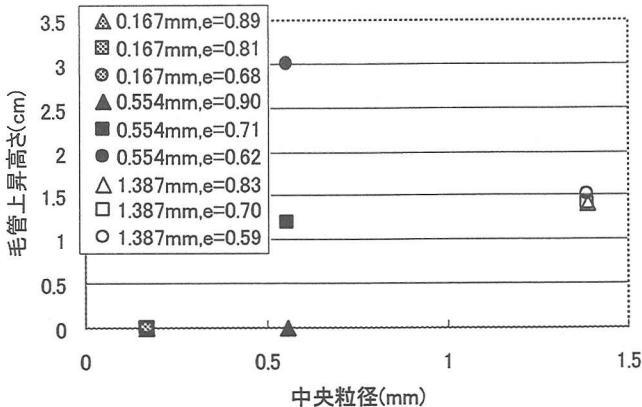


図-10 乾燥砂への高粘度原油の毛管上昇高さ

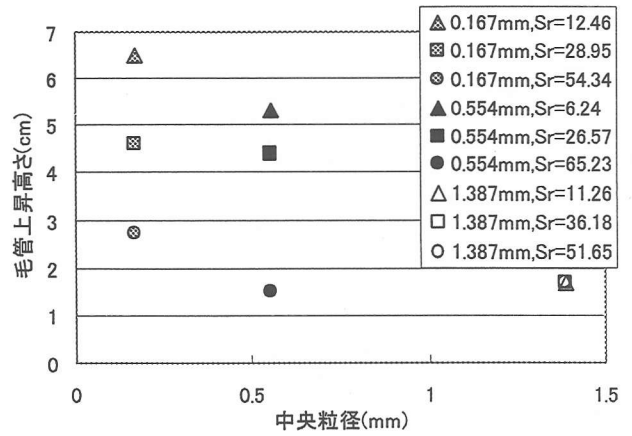


図-11 含水砂への低粘度原油の毛管上昇高さ

(3) 油の2次元的な浸透性状の特徴

a) Case1(乾燥した砂への浸透)

原油の2次元的な浸透状況を図-12に示す。写真からわかるように、油の水位は仕切り板近傍で高く、水平方向に離れるほど、徐々に低下し三角形形状に広がる。また、垂直下方への浸透については、原油は下方の水を押し出して砂へ浸透した。しかし、原油は地中水位より下には浸透せず、飽和した砂により、油の浸透は妨げられた。これより、貯蔵ピット内の回収油の砂への浸透は、貯蔵ピットの周囲の地中水位を境界とし、その上方に限られるものと考えられる。しかし、地中水位より上方の砂層においては、油の浸透を防ぐ為にシート等による浸透防止対策が必要となることわかる。

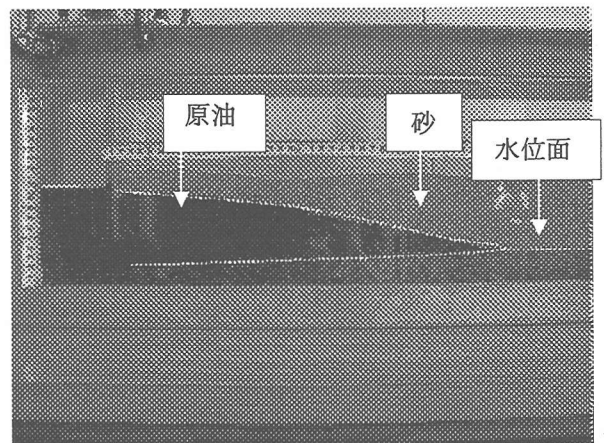


図-12 乾燥した砂への原油の浸透(粒径0.71mm)

原油の水平方向への浸透距離と底面からの浸透高さを図-13に示す。この実験では、粒径0.25mmと0.71mmの試験砂を使用した。実験結果より、粒径が大きくなるにつれて、水平方向への浸透速度が大きくなることわかる。

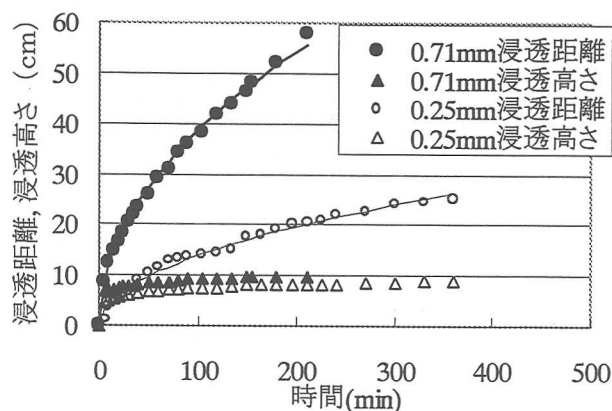


図-13 乾燥砂への浸透 (粒径 0.71mm, 0.25mm)

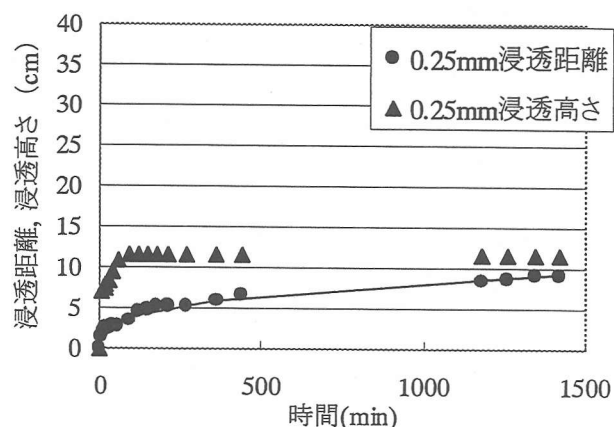


図-15 湿潤砂への浸透 (粒径 0.25mm)

b) Case2(湿った砂への浸透)

中央粒径 0.25mm の湿った砂への原油の浸透状況を図-14, 原油の水平方向への浸透距離と底面からの浸透高さを図-15 に示す. 油は図-14 に見られるように, 仕切り板の底部より上方に浸透している. また, 仕切り板近傍では浸透した油の水位は注入口での油の水位よりも高くなった. 油の浸透距離や浸透範囲は乾いた砂の場合よりも小さくなった. 図-15 でプロットされた線は最小二乗法で引いたものである.

以上のように, 一時貯留ピットから回収油が漏れた場合, 油の粘度が低く, かつ乾燥した砂層があると, 油の圧力に応じて水平方向に浸透する. また毛管現象により油液面よりも上方への浸透も生じる. しかし地盤が含水しているとその範囲は大きく制限される. また, 油は水で飽和した砂層内には浸透しないことから, 埋立地盤中の残留水位面よりも下方では, 油の浸透による極端な汚染は回避されると考えられる.

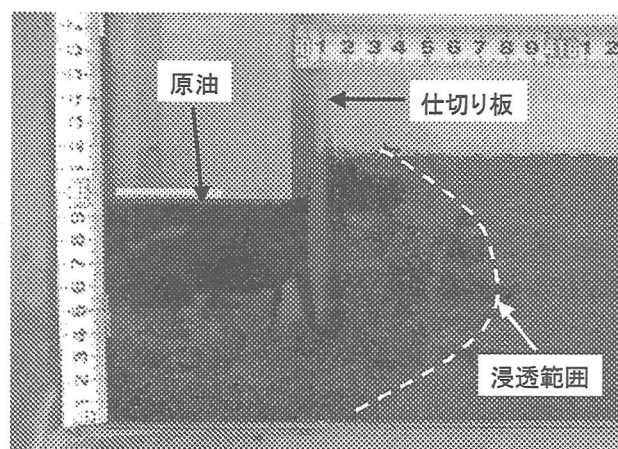


図-14 湿った砂への原油の浸透 (粒径 0.25mm)

4. 結論

- 1) 原油の砂に対する浸透係数を原油の粘度, 砂の中央粒径, 飽和度, 相対密度を変化させて実験した. その結果, 油に対する砂の浸透係数は中央粒径 0.167mm~1.387mm, 飽和度 0~37%, 相対密度 0.1~0.7, 油の粘度 $14 \times 10^{-3} \sim 70 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ の範囲において, 0.0001~0.03cm/s 程度であった.
- 2) 砂の粒径が大きくなると浸透係数も大きくなり, 砂の相対密度, 飽和度が大きくなると浸透係数は小さくなることを確認した. また, 浸透係数は粘度の逆数に比例し, 基準となる粘度とそのときの浸透係数より, (3)式にて求めることができることを確認した.
- 3) 油の砂への毛管現象について原油の粘度, 砂の中央粒径, 飽和度, 相対密度を変化させて実験した. 低粘度の原油では, 砂の中央粒径, 相対密度, 飽和度が大きくなるにつれ, 毛管上昇高は減少した. 一方高粘度の原油では, 毛管現象は起こりにくいことを確認した.
- 4) 側面をガラス面とした矩形断面の水路を用いて, 原油の砂層への2次元浸透特性を確認した. 原油は飽和している層には浸透せず, 水位面に沿って水平に広がった.
- 5) 以上より, 一時貯留ピットから回収油が漏れた場合, 油の粘度が低く, かつ乾燥した砂層があると, 油の圧力に応じて水平方向に浸透する. また毛管現象により油液面よりも上方への浸透も生じる. このため, 特に残留水位よりも上方においては, 一時貯留ピットからの漏洩防止対策に注意することが必要である. しかし地盤が含水していると, その範囲は大きく制限される. また, 油は飽和した砂層内には浸透しないことから, 埋立地盤中の残留水位よりも下方では, 油の浸透による極端な汚染は回避されると考えられる.

参考文献

- 1) 大塚夏彦, 大島香織, 宇佐美宣拓, 多田英彦, 米田克

- 幸, 高橋伸次郎, 佐伯 浩: "オホーツク海における原油流出事故による被害予測", 土木学会海洋開発論文集, Vol.15, pp.547-552, 1999.
- 2) Suzuki, Y.: Recovery of Oil Spilled from The NAKHODKA and Equipment Used, Proceedings of International Symposium on Marine Oil Spill Response, pp.33-40. 1997.
- 3) 海洋工学研究所編: "重油汚染・明日のために", pp.346-347, 1998.
- 4) 金編康平, 高橋伸二郎, 米田克幸, 大塚夏彦, 荻原浩二, 近藤浩文, 佐伯浩: "原油の砂地盤への浸透に関する実験的研究", 寒地技術論文・報告集, Vol.18, pp.454-458, 2002.
- 5) Darcy, H.: Les fontaines publiques de la ville de Dijon, Paris, 1856.
- 6) 河上房義: 土質力学・第6版, 森北出版, pp.57, 1992.