

管理型海面廃棄物処分場における在来粘土地盤の遮水機能に及ぼす基礎杭打設時期の影響

Influence of Pile Installation Period on the Barrier Performance of Natural Clay Layer at Offshore Waste Landfill Site

龍尾一海	Kazumi RYUO	(東北大学大学院環境科学研究科)
森脇武夫	Takeo MORIWAKI	(広島工業大学工学部環境土木工学科)
重松尚久	Takahisa SHIGEMATSU	(呉工業高等専門学校環境都市工学分野)
平尾隆行	Takayuki HIRAO	(中電技術コンサルタント(株))
竹本誠	Makoto TAKEMOTO	(中電技術コンサルタント(株))

管理型海面廃棄物処分場の埋立跡地を早期に高度利用する際には廃棄物の埋立完了後、速やかに基礎杭を打設することが必要となる。このとき、杭打設によって粘土と杭の境界に水みちが形成され、遮水粘土層の遮水性が低下することが懸念されている。本研究では異なる圧密度の粘土モデル地盤に杭を打設した場合の遮水機能への影響を検討することを目的として室内模型実験を行い、杭打設時期の影響を検討した。その結果、杭打設時に粘土と杭の境界にできた水みちは杭打設後、早い段階で閉塞し、粘土の遮水機能に影響を及ぼしていなかった。また、圧密度の低い段階で杭を打設しても杭を打設することで杭周辺の粘土地盤が密実化し、遮水効果を期待できることが示唆された。

キーワード：廃棄物処分場、遮水層、杭基礎

(IGC : E-07, H-10)

1. はじめに

1.1 研究背景

今日、我が国では大量の廃棄物が排出され、最終的には埋立処分されているが、多くの最終処分場では埋立完了の完了時期を迎えようとしている。そのため、貴重な土地資源として跡地を有効利用することも我が国における処分場の重要な役割といえる。本研究で取り上げる管理型海面廃棄物処分場は東京湾や大阪湾などの大都市圏に立地していることに加え、広大な敷地面積を有しているため処分場跡地の利用価値は非常に高いといえる。このような土地資源を活かして処分場跡地を交通用地や工業用地などに有効利用することが必要である。

処分場跡地の有効活用を考える場合、基礎工が必要となる。図-1に管理型海面処分場のイメージ図を示す。一般に海面処分場跡地の地盤は廃棄物地盤と未改良の粘土地盤から構成されている。そのため処分場跡地に構造物を建設する際の基礎工としては、杭基礎を用いることが現実的であると言われている。しかし、杭を打設する際は廃棄物層と粘土層を貫通して支持層まで杭を打ち込むため、これによって廃棄物層の保有水が外部へ漏出することが懸念されている。また、現状の遮水工としては図-1中の在来粘土層の遮水性に期待する部分が多いことから、杭打設による周辺地盤への影響を検討する必要がある。処分場跡地に基礎杭を打設することによる影響について大きく2つの課題が挙げられている^{1), 2)}。1つ目は杭を打設する際に廃棄

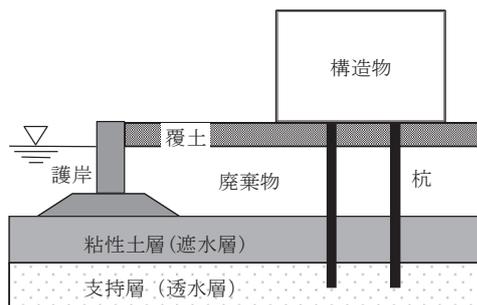


図-1 管理型海面処分場のイメージ図

物を遮水層以下への連れ込むという短期的問題¹⁾、2つ目は杭打設後において粘土と杭の境界から保有水が浸透する長期的問題である²⁾。処分場跡地を有効利用するためにはこれら2つの課題を解決することが必要となる。本研究では特に長期的問題に焦点を当て、室内模型実験を実施して検討を行った。

1.2 既往の研究

海面処分場において、廃棄物層と底面遮水層（在来粘土層）を貫通して基礎杭を打設することに対して、これまでに以下のような研究が行われている。

菊池ら³⁾は、杭周辺の粘土地盤の透水性の変化について検討するため、圧密リング内に杭を設置した状態で透水試験を実施している。その結果、過圧密状態で杭周辺に隙間を作った場合には境界面を相当量の通水が確認されるが、正規圧密領域まで載荷すると、空隙は閉塞し透水量も問題にならない程度まで減少し、遮水機能は保持されていることを確認している。

富士ら⁴⁾は、剛壁型透水試験装置を用いて、試験装置の内径よりやや小さな直径の粘土供試体を設置して透水試験を実施し、杭と粘土との隙間の影響について検討している。その結果、正規圧密領域では隙間は完全に閉塞し、粘土の遮水性も構造基準を十分に満たすことを確認している。

菊池ら⁵⁾は、杭打設に伴って生じた杭周辺地盤の乱れが粘土地盤の遮水性に与える影響について、実験的に研究を行っている。これは地盤内に模型杭を打設し、この杭に強制変位を与えて杭周辺に人為的に空隙を作成した上で透水試験を実施したもので、変位の影響は認められるものの、影響深度は限定的であることを示している。さらに、杭打設時の廃棄物の連込みの影響についても実験的に検討を行い、杭の形状をペンシル杭にする等、先端形状を鋭角化することや、杭打設工法として中掘り工法を採用することで廃棄物の連込み量を低減できることを示した。

1.3 本研究の目的

1.2 で述べた先行研究では粘土モデル地盤の圧密が完了した状態で杭を打設した場合については、杭打設の影響が無いことが示されている。しかし、実際の現場において処分場跡地の粘土地盤の圧密を完了するためにはかなりの時間を要することが課題として挙げられている。また、埋立跡地は早期に有効利用する方が都市計画の観点からも望ましいといえる。埋立跡地を早期に有効利用するためには粘土地盤の圧密が完了していない状態での杭打設が必要となるが、未圧密地盤への杭打設が粘土層の遮水機能に及ぼす影響については明らかにされていない部分が多い。

そこで本研究では、粘土地盤の圧密が完了していない状態で杭を打設した際に周辺地盤の遮水機能に及ぼす影響について小規模の室内模型実験を実施し、検討を行った。

2. 実験方法

2.1 試料の物理特性、圧密特性および透水特性

底面遮水工をモデル化する地盤材料として、岡山県水島港より採取した沖積粘土を用いた。その物理特性を表-1、圧密特性を表-2に示す。また、透水特性に関しては、定ひずみ速度圧密試験により、間隙比 e と透水係数 k の間に次式の関係が得られている²⁾。なお、この式と実験データとの相関係数は $R = 0.997$ である。

$$k = 7.78 \times \exp(2.34 \cdot e) \times 10^{-10} \quad (1)$$

ここに k : 透水係数(cm/sec)

e : 間隙比

表-1 粘土試料の物理特性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_P (%)	塑性指数 I_p
2.744	80.5	31.8	48.7

表-2 粘土試料の圧密特性

圧密降伏応力 p_c (kPa)	圧縮指数 C_c	膨張指数 C_s
45	0.507	0.070

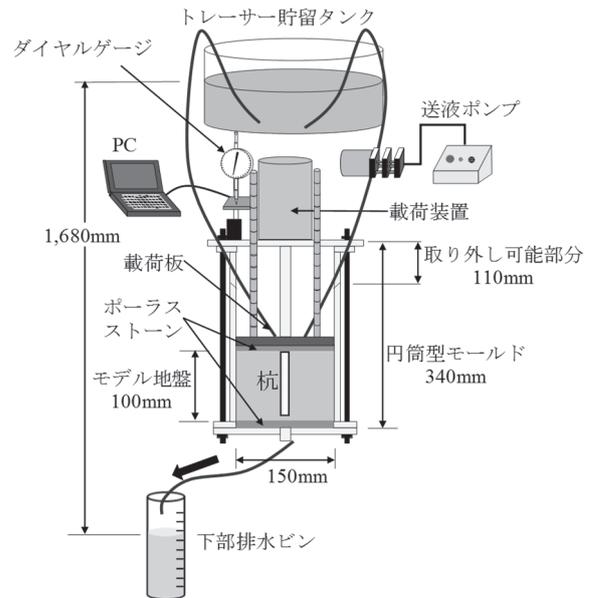


図-2 実験装置概略図

2.2 実験装置

図-2 に実験装置の概略図を示す。実験装置は直径 150mm、高さ 340mm（上部 110mm は取り外し可能）の円筒型モールド、載荷装置、トレーサー循環装置の 3 つからなる。実験の流れとしては円筒型モールド内に試料を投入し、ペロフラムシリンダーで載荷することで圧密を行う。圧密が進行すると、モールドの上部 110mm の部分を取り外してさらに圧密を行う。載荷中はひずみゲージタイプのダイヤルゲージにより沈下量を測定し、PC にデータを収録できるようになっている。杭打設後、トレーサー貯留タンク内のトレーサーを送液ポンプによって粘土層上面のポーラスストーンを介して循環させる。なお、トレーサー循環中に粘土層下部から排水された排水を下部排水ピンに集水する仕組みとなっている。本実験において直径 150mm、高さ 100mm の粘土試料を使用した理由としては、既往の研究²⁾の寸法効果の検討において、直径 150mm、高さ 100mm の粘土試料に直径 10mm の杭を打設した場合と直径 460mm、高さ 500mm の粘土試料に直径 50mm の杭を打設した場合で、同じ実験ケースの場合には寸法が小さい方が杭打設の影響がやや大きくなることが分かっているため、結果を安全側に評価できる小規模実験により検討を行った。実験手順の詳細を以下に示す。

2.3 モデル地盤の作成

使用する粘土を液性限界の 2 倍の含水比 ($w=160\%$) で練り返して調整する。その後、脱気を行い、図-2 に示す実験装置の円筒モールド内に試料を投入した。モデル地盤の圧密は両面排水で行い、目標圧密度 100, 90, 80, 75, 70, 60% のモデル地盤を作成した。圧密度 100% のモデル地盤を作成する際の荷重方法は、24 時間サイクルで 0kPa (自重), 10kPa, 20kPa までは段階的に 24 時間ずつ圧密し、最終荷重段階の 50kPa については、 $3Te$ 法により決まる圧密終了時間まで圧密を行った。圧密度 60~90% のモデル地盤を作成する際は、0kPa (自重), 10kPa, 20kPa は同様に 24 時間ずつ圧密を行い、最終荷重段階の 50kPa については荷重時間を調整し、目標圧密度となるよう圧密を行った。なお、このときの荷重時間は \sqrt{t} 法により圧密度を決定して算出した。

2.4 杭打設, トレーサー循環, 試料採取

2.3 で作成したモデル地盤に対して杭ありのケースについては杭打設を行った。図-3 に杭打設の様子を示す。杭打設を行う際はベロフラムシリンダーと荷重板を取り外し、長さ 90mm の模型杭 ($\phi=10\text{mm}$ のアルミ製中実杭) を打設速度 30mm/min で圧入した。なお、杭打設時に粘土層表面にひび割れや亀裂が生じないように、粘土層表面を反力板とアクリル板で固定した状態で杭を圧入した。模型杭の材質については、既往の研究⁹⁾でアルミ杭の他に、杭の溶接痕や継部の不連続部を想定してアルミ杭周面にガラスビーズを接着したディンプル杭を用いて同様の実験を行った。その結果、杭の表面粗度が粗い場合は粘土層の遮水機能が低下するものの、杭の打設によって周辺地盤が密実化するために杭の無い場合と同等な遮水性が確保できることが確認されていることから、本実験ではより一般的であるアルミ杭を用いて実験を行った。

杭打設完了後または最終荷重段階荷重後に汚染物質を模したトレーサーを循環させた。トレーサーとして使用したものは安定した陰イオンであり、土粒子への吸着や生物分解等の影響を受けにくい、臭化物イオン 5,000mg/L である。トレーサー循環は図-2 中の送液ポンプによってトレーサー貯留タンク内のトレーサーを荷重板内部へ導入し、荷重板に取り付けたもう一方のホースからトレーサーをタンクに戻して循環させた。このとき、モデル地盤には 50kPa の圧密圧力を荷重した状態でトレーサーを循環させた。なお、トレーサー循環は上部トレーサー貯留タンクと下部排水ビンに水頭差 1,680mm を与えた状態で 9 日間行った。実際の現場において、海面処分場内の管理水位は処分場外の平均潮位よりわずかに低く設定されるのが一般的である。そのため処分場内の保有水が外部へ流れ出すことは基本的に生じないが、実験結果をより安全側かつ明瞭に評価するために本実験では水頭差を 1,680mm と高く

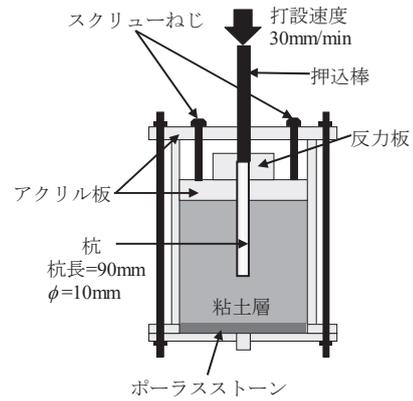


図-3 杭打設の概要

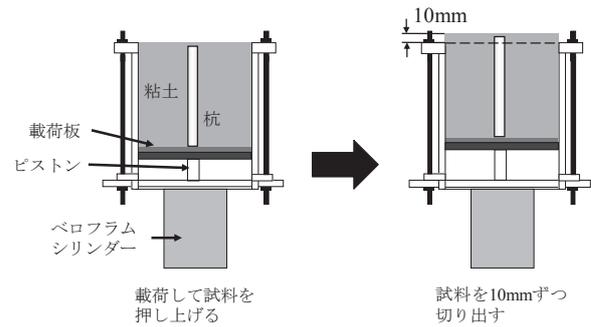


図-4 試料採取の流れ

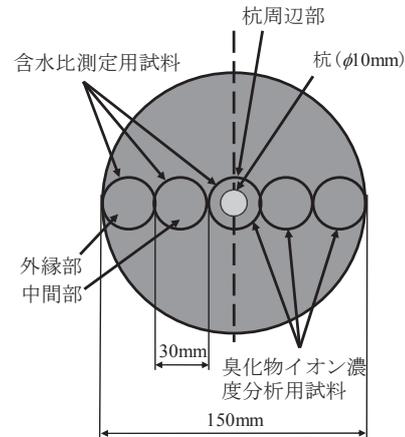


図-5 試料採取平面位置

し、実際に生じる動水勾配よりも大きい動水勾配を設定した。また、既往の研究²⁾においてトレーサー循環期間を 9 日間とすると、拡散によってトレーサーが粘土層下端に達するとともに、移流と拡散によるトレーサー濃度の違いが層厚 100mm の粘土層の中間深度部分で明瞭に観測できることが確認されているため、トレーサー循環期間を 9 日間に設定した。なお循環中に試料下部から排水された排液は下部排水ビンに集水し、1 日ごとに排水量を測定した。

トレーサー循環終了後、試料採取を行った。図-4 に試料採取の流れを示す。試料採取の際はモールドを上下逆にして底板を取り外し、ベロフラムシリンダーの

駆動力により、モールド内の粘土を厚さ 10mm ずつ上方向に押し出し、糸鋸でスライスして採取を行った。この作業を試料がなくなるまで繰り返した。図-5 に試料採取地点を示す。試料採取は杭周辺部、中間部、外縁部の 3 地点で行い、片側半分を含水比測定用、もう片側半分を臭化物イオン濃度分析用として用いた。また、杭周辺部の粘土試料は、円筒内の試料を半分にして、それぞれ含水比測定用試料と臭化物イオン濃度分析用とした。

2.5 結果整理

各実験終了後に採取した粘土試料については、含水比、臭化物イオン濃度を測定するとともに、粘土層下部からの排水については排水量を測定した。また、本研究では測定した臭化物イオン濃度を臭化物イオン相対濃度および臭化物イオン相対濃度差に変換して検討を行ったため、以下にそれらの算出式を示す。

臭化物イオン相対濃度 C/C_0 の算出式を式(2)に示す。臭化物イオン相対濃度が $C/C_0=1.0$ であるということは、粘土層中の臭化物イオン濃度がトレーサの濃度と同じになっており、トレーサ浸透の影響が大きいことを表す。一方で、臭化物イオン相対濃度が $C/C_0=0$ であるということは、臭化物イオン濃度がトレーサ循環前の状態から変化していないことを表す。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{C_M - C_1}{C_2 - C_1} \quad (2)$$

ここに C_M : 濃度の実測値(mg/L)
 C_1 : 初期間隙水中の濃度(61mg/L)
 C_2 : 供給液の濃度(mg/L)

式(2)で算出した臭化物イオン相対濃度より、杭打設による影響を検討するために杭周辺部、中間部と外縁部の臭化物イオン相対濃度差 $\Delta C/C_0$ を式(3)により算出する。なお、臭化物イオン相対濃度差が大きいほど杭打設によるトレーサ浸透の影響が大きいことを表す。

$$\Delta \frac{C}{C_0} = \left(\frac{C}{C_0}\right)_a - \left(\frac{C}{C_0}\right)_b \quad (3)$$

ここに $\left(\frac{C}{C_0}\right)_a$: 杭周辺部または中間部の臭化物イオン相対濃度

$\left(\frac{C}{C_0}\right)_b$: 外縁部の臭化物イオン相対濃度

本研究では、実験中の臭化物イオンの浸透が移流によるものか拡散によるものかを明らかにするために各条件において移流距離を式(4)により算出した。

$$L = k \cdot i \cdot t \quad (4)$$

表-3 実験条件 1

ケース	杭の有無	目標圧密度 U'	実測圧密度 U	圧密時間 (min)	杭打設時間隙比 e'
1	有り	90%	94%	2,520	1.70
2	有り	90%	88%	2,030	1.85
3	有り	80%	81%	1,320	1.85
4	有り	80%	69%	880	1.88
5	有り	70%	77%	1,080	1.78
6	有り	70%	54%	590	2.05
7	無し	100%	93%	18,500	1.62
8	無し	90%	76%	4,110	1.61
9	無し	60%	54%	1,180	1.99

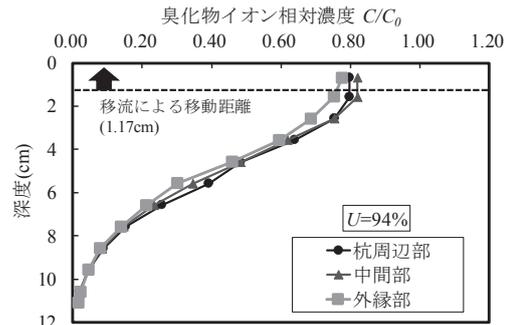


図-6 臭化物イオン相対濃度分布 (ケース 1)

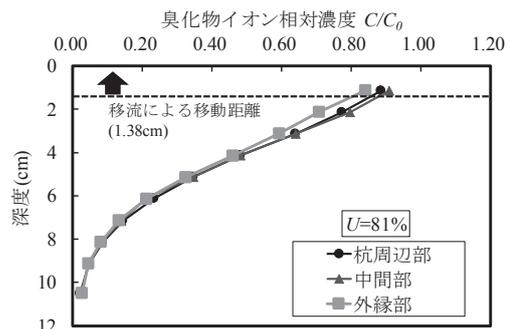


図-7 臭化物イオン相対濃度分布 (ケース 3)

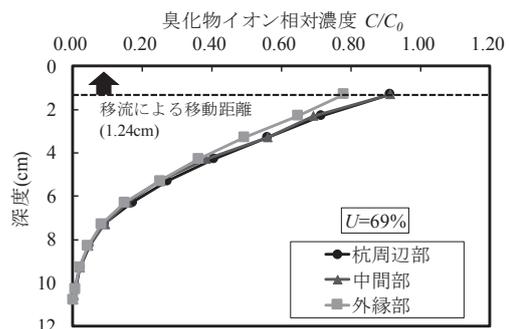


図-8 臭化物イオン相対濃度分布 (ケース 4)

ここに

L : 移流による臭化物イオンの移動距離(cm)

k : 透水係数(cm/sec)

i : 動水勾配

t : 移流時間(sec), ここでは 9 日

3. 未圧密地盤への杭打設による影響

3.1 実験概要

本実験においては2章で述べたとおりモデル地盤の作成から試料採取の一連の実験を行った。なお、本実験では目標圧密度を90, 80, 70%に設定してモデル地盤の作成を行った。また、杭打設の有無による結果の違いを考察するために同程度の圧密度で杭を打設しない条件（ケース7, 8, 9）でも実験を行った。表-3に実験条件と各ケースの実測圧密度の算出結果を併せて示す。なお、本実験では目標圧密度が90%以下の場合の圧密時間は前述したように \sqrt{t} 法で決定している。 \sqrt{t} 法では圧密初期の沈下量から所定の圧密度に達する圧密時間を求めているが、ベロフラムシンダーのピストンの摩擦や載荷板と円筒モールド間の摩擦の影響は実験ケースごと、および圧密の進行によって異なるため、同じ目標圧密度のケースでも圧密時間に違いが出るとともに、圧密を打ち切った時の実際の圧密度も目標圧密度から差が生じている。本検討では主に目標圧密度に近い圧密度となったケースについて検討を行うこととする。また、本実験のトレーサー循環中には移流と拡散の両方の現象が生じており、それを踏まえて検討を行う。

3.2 臭化物イオン相対濃度の結果・考察

本検討では代表として目標圧密度（90, 80, 70%）に近い圧密度となったケース1, 3, 4（圧密度94, 81, 69%）について考察を行う。なお、ケース2の方が目標圧密度の90%に近いが、目標圧密度90%の場合は圧密度の高い状態での挙動を調べることを目標にしているため、より圧密度の高いケース1を代表サンプルとして用いた。

図-6～図-8に各ケースの臭化物イオン相対濃度の深度分布を示す。図中の破線は移流による移動距離を表しており、この破線より深度が大きい範囲では拡散によってトレーサーが浸透していることを意味する。これらの図から、トレーサーは移流によって深度1.17cm～1.38cmまで浸透し、それ以深は拡散によって浸透していると考えられる。また、圧密度の違いによらず臭化物イオン相対濃度の深度分布はほぼ同様な結果を示した。すなわち、相対濃度の深度分布の特徴として、どのケースでも粘土層表層部では相対濃度が0.80～0.90と高くなった。採取地点別に見ると、深度4cm付近までは外縁部の相対濃度が他の地点に比べて小さくなったがその程度はわずかであった。それ以深は深度の増加に伴い相対濃度は連続的に減少し、深度5cm以深では杭周辺、中間、外縁部の3地点の深度分布が重なった。なお、圧密度94%の深度6cm付近において深度分布にばらつきが見られるが、これはその前後の深度においては3地点の深度分布が重なっていることに加え、深度分布の曲線形状がスムーズな形にな

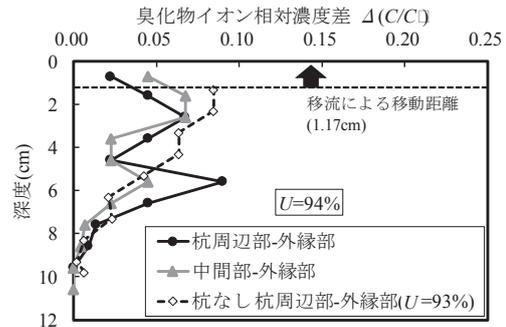


図-9 臭化物イオン相対濃度差分布（ケース1, 7）

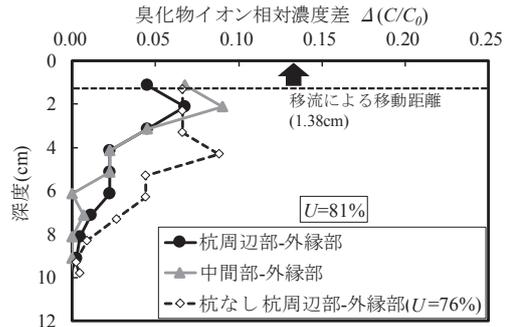


図-10 臭化物イオン相対濃度差分布（ケース3, 8）

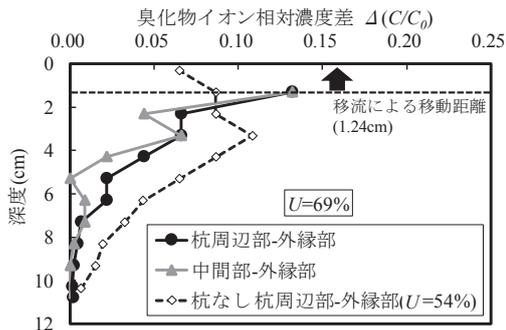


図-11 臭化物イオン相対濃度差分布（ケース4, 9）

っていないことから、本来は3地点の臭化物イオン相対濃度は同程度であると推測される。この地点でデータにばらつきが生じた原因については本実験では明らかにすることができなかった。また、すべての圧密度およびすべての採取地点で深度8cm以深では臭化物イオン相対濃度が小さく、さらに採取場所による相対濃度の差が確認されなかった。本実験では既往の研究²⁾で確認したように拡散によって粘土層下端までトレーサーが到達する循環日数を確保してトレーサー循環を行ったことから、未圧密地盤においても杭打設の影響は粘土層深部までは及んでいないことが示唆された。

以上で示したように、粘土層上層部では移流による浸透が支配的であり、それ以深では拡散による浸透が支配的であった。なお、紙面の都合上、図を掲載しなかったケースについても同様な傾向が確認されている。

3.3 臭化物イオン相対濃度差の結果・考察

図-9～図-11に代表としてケース1, 3, 4（圧密度

94, 81, 69%) の臭化物イオン相対濃度差の深度分布の結果を示す。また、ケース 1, 3, 4 に近い圧密度となった杭なしの条件 (ケース 7, 8, 9) の結果も併せて示す。なお、本研究では杭打設による影響を評価する目安として、既往の研究より臭化物イオン相対濃度差 0.1 を基準値として用いた。この 0.1 という値そのものに工学的な意味はなく、杭打設の影響が 1/10 以下となる範囲を特定するために設定されたものである。この値を超える地点が多ければ相対的に影響があり、少なければ影響が小さいといえ、相対濃度差をできるだけ小さくする方法を選ぶための基礎資料となる。基準値をどの程度まで小さくするかは経済的問題や政策的問題を含んでおり、この研究だけで特定することはできない。

杭打設時の圧密度が 94, 81% の場合は全深度で相対濃度差が 0.1 以下となった。これは杭打設時の圧密度が 80% 以上の場合は粘土層全体がよく締め固まった状態であり、粘土層内の間隙が少ないと考えられる。これによって杭打設時に粘土と杭の境界に水みちができにくくなり、杭打設による遮水機能低下の影響を受けにくくなったと考えられる。一方で、圧密度が 69% の場合は粘土層表層部 (深度 2cm 付近) において相対濃度差が 0.1 を超える地点が存在した。図は省略するが、ケース 5, 6 (圧密度 77, 54%) の場合も同様に粘土層表層部で相対濃度差が 0.1 を超える傾向が見られた。これらの要因として、杭打設時の圧密度が 80% 以下の場合には粘土層の表層部と内部では圧密の進行が異なり、柔らかい粘土の上に硬い粘土が乗っている状態であり、表面から杭を打設する際には乱されやすい状態であると考えられる。これによって杭打設の際に粘土と杭の境界に水みちができやすくなったことが考えられる。しかし、深度 8cm 以深では相対濃度差が 0 に近い値となり、杭打設による影響は粘土層深部までは及ばなかった。

杭打設の有無に着目すると、すべてのケースにおいて杭打設の有無にかかわらず前述したような深度分布が得られた。特にケース 3, 4 では杭を打設した場合のほうがトレーサー浸透の影響が小さいという結果になった。このことから杭打設による遮水機能の低下は発生しておらず、反対に杭打設による周辺地盤の密実化によって遮水機能が向上したことが示唆された。

3.4 排水量・間隙比の結果・考察

図-12 にトレーサー循環中 9 日間の粘土層下部からの排水量とトレーサー循環後の粘性土モデル地盤の平均間隙比および透水係数の結果を併せて示す。なお、間隙比は含水比から飽和度を 100% と仮定して算出した。図より、圧密度 88% のケースを除外すると圧密度が低いほど粘土層下部からの排水量が多くなる傾向があるものの、圧密度と排水量の関係には明確な傾向を読み取ることができなかった。また、本実験では杭打

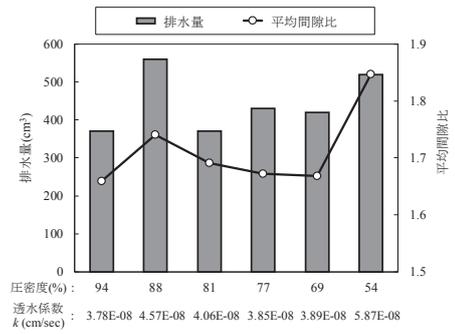


図-12 排水量および平均間隙比の結果 1

表-4 実験条件 2

ケース	杭の有無	目標圧密度 U'	実測圧密度 U	圧密時間 (min)	杭打設時間間隙比 e'
10	有り	100%	97%	18,620	1.62
11	無し	100%	93%	18,500	1.62
12	有り	90%	79%	4,430	1.59
13	無し	90%	76%	4,110	1.61
14	有り	60%	55%	1,160	1.83
15	無し	60%	54%	1,180	1.99

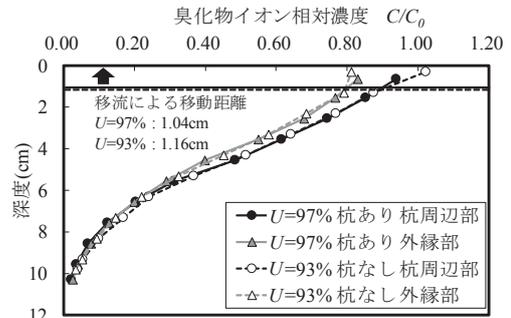


図-13 臭化物イオン相対濃度分布(ケース 10, 11)

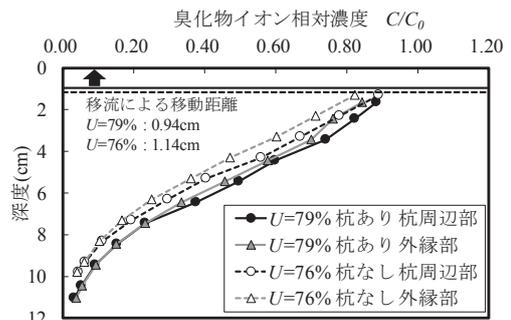


図-14 臭化物イオン相対濃度分布(ケース 12, 13)

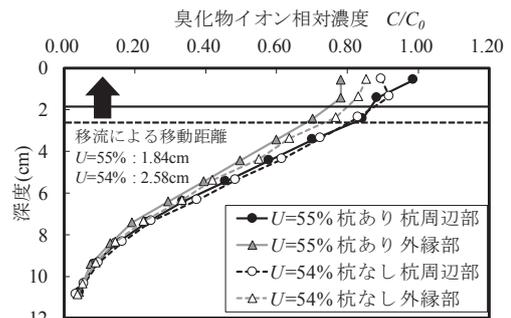


図-15 臭化物イオン相対濃度分布(ケース 14, 15)

設後のトレーサー循環中にも最終圧密圧力 50kPa によって圧密が生じるため、トレーサー循環中の排水が圧密によるものであるかまたはトレーサーの浸透によるものであるかを明らかにできなかった。そのため、今後のさらなる検討の必要性が示された。

トレーサー循環後の平均間隙比は圧密度 54% の時に 1.85 で最大となったが、排水量のとときと同様に明確な傾向は確認されなかった。前述したように、トレーサー循環中にも最終圧密圧力 50kPa が载荷されているため、トレーサー循環中に圧密が進むとトレーサー循環前の圧密度の違いにかかわらず間隙比は最終的に同じ値に落ち着くことが予想されるが、打設した杭が载荷板の沈下に抵抗すると考えられるため、トレーサー循環前の圧密度が低い場合は間隙比が大きくなったと推測される。

式(1)に示した間隙比と透水係数の関係から、平均間隙比に対応する透水係数を求めて図-12 に示す。この図から、平均間隙比が大きくて透水係数が大きくなると排水量も増加する傾向が読み取れる。

4. 杭打設による遮水機能の影響評価

4.1 実験概要

3 章で得られた結果より、未圧密地盤への杭打設が粘土層の遮水機能に及ぼす影響について明らかになった。しかし、3 章ではトレーサー循環中の排水が圧密によるものであるかトレーサーの浸透によるものであるかを明らかにすることができなかったため、粘土層下部からの排水についても濃度分析を行った。表-4 に本実験の条件を示す。本実験では杭打設時の目標圧密度を 100, 90, 60% とした。さらに、3 章で得られた結果より、杭周辺部と中間部の臭化物イオン相対濃度に大きな差が確認されなかったことから、本実験では臭化物イオン濃度測定用試料の採取地点を杭周辺部と外縁部の 2 地点とした。本検討でも移流と拡散の両方の現象が同時に起こっていることを踏まえて検討を行う。

4.2 臭化物イオン相対濃度の結果・考察

図-13～図-15 に各ケースの臭化物イオン相対濃度の深度分布を示す。図中の破線は移流距離を表している。これらの結果から 3.2 で得られた結果と同様に、粘土層表層部では外縁部の相対濃度が杭周辺部の相対濃度に比べて小さくなる傾向が見られた。一方で、杭打設の有無による深度分布の違いはなく、同じような深度分布の挙動を示した。図-13、図-15 よりケース 10, 11 およびケース 14, 15 では深度 8cm 以深では杭ありと杭なしの深度分布が重なり、杭打設が粘土層の遮水機能に影響を及ぼしていないことが示唆された。一方、図-14 よりケース 12, 13 では深度 8cm 付近において深度分布に差が見られるがその程度はわずか(0.1 以下)

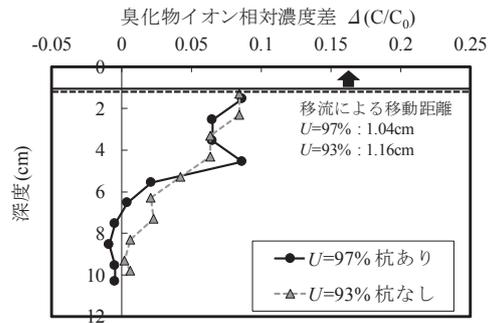


図-16 臭化物イオン相対濃度差分布(ケース 10, 11)

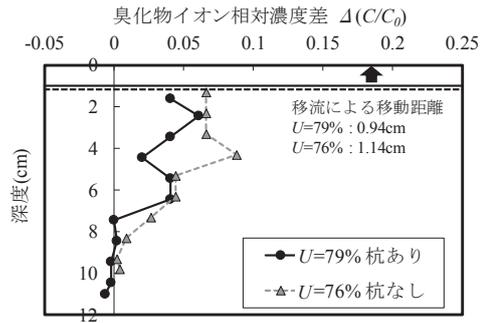


図-17 臭化物イオン相対濃度差分布(ケース 12, 13)

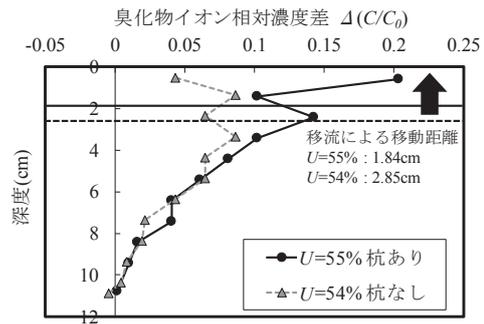


図-18 臭化物イオン相対濃度差分布(ケース 14, 15)

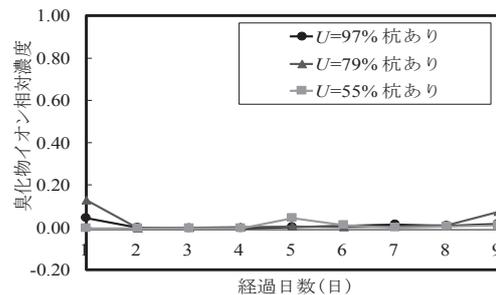


図-19 排液の臭化物イオン相対濃度の経時変化 (ケース 10, 12, 14)

であることに加え、深度 10cm 付近では相対濃度が 0 に近い値となっていることから、杭打設による遮水機能の影響はないと考えられる。

移流による浸透は 3.3 の時と同様に粘土層上層部までであり、拡散による浸透の影響がより大きいという結果になった。

4.3 臭化物イオン相対濃度差の結果・考察

図-16～図-18 に各ケースの臭化物イオン相対濃度差の深度分布を示す。本検討においても杭打設によるトレーサー浸透の影響を検討する目安として、既往の研究より臭化物イオン相対濃度差 0.1 を基準値として用いた。図-16、図-17 よりケース 10, 11 およびケース 12, 13 では臭化物イオン相対濃度差がおおむね 0.1 以下となった。一方、図-18 より圧密度 55%杭ありの条件では深度 4cm 付近までは臭化物イオン相対濃度差が 0.1 を超える地点が存在した。しかし、深度 8cm 以深では臭化物イオン相対濃度差は 0 に近い値となっており、3.3 で得られた結果と同様に杭打設による影響は粘土層深部までは及んでいないことが確認された。

杭打設の有無に着目すると、図-16 より圧密度 97%杭ありおよび圧密度 93%杭なしでは全深度において相対濃度差の深度分布は同じ挙動を示しており、杭打設による影響はないと推測される。図-17 より圧密度 79%杭ありおよび圧密度 76%杭なしでは深度 4cm 付近において杭ありと杭なしで相対濃度差が 0.075 程度と大きくなった。しかし、それ以深の杭ありと杭なしの深度分布は重なっており、杭打設による影響は粘土層深部までは及んでいなかった。図-18 より圧密度 55%杭ありおよび圧密度 54%杭なしでは粘土層表層部から深度 3cm 付近にかけて杭ありと杭なしに明確な差が確認された。その差は最大で 0.15 になり、杭打設による粘土層の遮水機能の低下が発生していると考えられる。その後、深度 4cm 以深では深度分布は重なっており、深度の大きい地点では杭打設による影響は確認されなかった。

4.4 排液の臭化物イオン相対濃度

図-19 に杭ありの条件におけるトレーサー循環中に下部排水ピンから採取した排液の臭化物イオン相対濃度の経時変化の結果を示す。この結果、トレーサー循環を行った 9 日間を通して排液の臭化物イオン相対濃度は 0.10 以下となった。トレーサー貯留タンク内の相対濃度がおよそ 1.00 であることを考慮すると浸透量はわずかであるといえる。よって杭打設の際に粘土と杭の境界に生じた水みちからのトレーサーの流出は起きておらず、早期段階で水みちが閉塞したと推測された。また、図は省略するが杭を打設しないケースにおける粘土層下部からの排液の臭化物イオン相対濃度も 9 日間を通して 0 に近い値で推移しており、杭を打設した場合における影響は杭を打設しない場合と同程度であった。

4.5 排水量・間隙比の結果・考察

図-20 にトレーサー循環中 9 日間の粘土層下部からの排水量とトレーサー循環後の粘土モデル地盤の平均間隙比および透水係数の結果を併せて示す。なお、間隙比は含水比から飽和度を 100%と仮定して算出した。

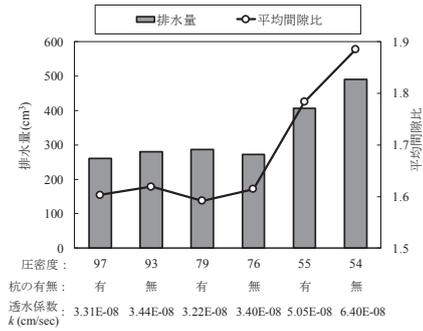


図-20 排水量および平均間隙比の結果 2

図より、圧密度が 76～97%においては杭打設の有無によらず排水量が 260～290cm³ の範囲にまとまっていた。一方で圧密度 55%杭ありでは約 400cm³、圧密度 54%杭なしでは約 490cm³ の排水が生じ、他の 4 ケースに比べて明らかな排水量の増加が確認された。また、圧密度 55%杭ありの排水量が圧密度 54%杭なしに比べて約 90cm³ 少ないという結果が得られた。この要因として圧密度が 76～97%と高い場合は杭打設前の圧密によって粘土層内の排水がほぼ完了しているため、杭打設の有無による排水量の違いが生じなかったことが考えられる。それに対し、圧密度が 54, 55%と低い場合は杭打設時点における粘土層内の圧密が進行し、圧密による排水量が増加したと考えられる。さらに、圧密が十分でない粘土モデル地盤に杭を打設することで杭周辺部の粘土が外側に押し広げられ、粘土層内の圧密が進行したことも要因として考えられる。

平均間隙比の結果を比較すると、圧密度 76～97%では平均間隙比は杭の有無によらず 1.60 付近であり同程度であった。一方で圧密度 55%杭ありと圧密度 54%杭なしの結果を比較すると、杭ありの平均間隙比が杭なしと比較して約 0.1 小さくなった。これは、圧密度が低い粘土モデル地盤への杭打設による周辺地盤の密実化が要因として考えられる。一方で圧密度が高い粘土モデル地盤に杭を打設する際は、粘土層内の間隙が少ないため、杭打設による間隙の減少がそれほど起こらなかったと考えられる。このことは表-4 の杭打設時の間隙比の結果と比較しても明らかである。透水係数については 3.4 と同様に平均間隙比が増加すると透水係数は上昇し、それに伴って排水量も増加する傾向が認められた。

5. 結論

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 臭化物イオン相対濃度の深度分布は深度の増加に伴い減少傾向を示し、深度 8cm 以深では 0 に近い値となった。
- (2) 杭を打設した場合と杭を打設しない場合の臭化物イオン相対濃度の深度分布を比較すると、粘土

- 層表層部では杭を打設しない場合のほうが相対濃度は小さくなったが、中間深度付近からは杭の有無によらず同様の深度分布を示した。
- (3) 杭打設時の粘土層の圧密度が高い場合は臭化物イオン相対濃度差がおおむね 0.1 以下であり、杭打設による遮水機能への影響は確認されなかった。
 - (4) 杭打設時の粘土層の圧密度が低い場合は粘土層表層部では臭化物イオン相対濃度差が 0.1 を超えており、杭打設による遮水機能の低下が見られたが、深度 8cm 以深では臭化物イオン相対濃度差は 0 に近い値となった。
 - (5) トレーサー循環を行った 9 日間を通して排液の臭化物イオン相対濃度は非常に小さい値 (0.10 以下) となり、杭打設の際に粘土と杭の境界に生じた水みちはトレーサー循環初期で水みちが閉塞したことが確認された。
 - (6) 圧密度の低い粘土地盤に杭を打設すると杭を打設しない場合と比較して粘土層下部からの排水量の減少および粘土地盤の平均間隙比が減少する傾向が見られたことから、杭打設による杭周辺地盤の圧密効果が確認された。
- 2) 平尾隆行, 森脇武夫, 菊池喜昭: 管理型海面廃棄物処分場の底面遮水基盤に打設された杭周辺地盤の遮水性, 土木学会論文集 B3, Vol.73, No.1, pp.67-82, 2017.
 - 3) 菊池喜昭, 橋爪秀夫: 杭周辺地盤の透水性に関する室内透水試験, 第 5 回環境地盤工学シンポジウム, pp.217-224, 2003.
 - 4) 富士暁之, 勝見武, 嘉門雅史, 乾徹: 改良型透水試験装置を用いた鋼管杭-粘土境界面における透水量の評価, 第 7 回環境地盤工学シンポジウム, pp.281-286, 2007.
 - 5) 菊池喜昭, 森脇武夫, 勝見武, 平尾隆行, 蔦川徹, 服部晃, 岡本功一, 山田耕一, 佐々木広輝: 管理型海面廃棄物処分場に打設する基礎杭が底面遮水基盤に与える影響, 港湾技術研究所資料, No.1252, 2012.
 - 6) 平尾隆行, 竹本誠, 森脇武夫, 鹿瀬宏希: 基礎杭の表面粗度が管理型海面処分場の底面遮水機能に及ぼす影響, 公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集, 地盤と建設, Vol.34, No.1, pp.133-140, 2016.
 - 7) 平尾隆行, 下所諭, 福原和顕, 蔦川徹, 森脇武夫, 小松登志子: 海面管理型廃棄物処分場の底面遮水工に及ぼす基礎杭打設の影響, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.1212-1214, 2003.

参考文献

- 1) 平尾隆行, 森脇武夫, 菊池喜昭: 管理型海面廃棄物処分場における基礎杭打設が底面遮水基盤に与える影響, 土木学会論文集 B3, Vol.73, No.1, pp.1-10, 2017.

(2019 年 6 月 7 日 受付)

