

27. 基礎杭打設時期が廃棄物処分場の底面遮水工に及ぼす影響

呉工業高等専門学校 ○ 龍尾 一海
 広島工業大学 森脇 武夫
 呉工業高等専門学校 重松 尚久

1. はじめに

我が国では大量の廃棄物が埋立処分され、多くの最終処分場では埋立の完了時期を迎えようとしている。そのため、最終処分場跡地を土地資源として有効利用することが求められている。しかし、現状では海面埋立型廃棄物処分場の跡地利用は、運動場や緑地などに利用されることが多く、建築用地等の高度利用はほとんど行われていない¹⁾。本研究では海面埋立型廃棄物処分場を取り上げるが、一般に海面埋立処分場では底面遮水基盤として在来粘土に期待することが多く、土中における保有水等の浸透経路長として透水係数 $k=10^{-5}\text{cm/s}$ 以下の地層が層厚 5m 以上確保されていることが求められている。処分場跡地を高度利用するために大規模構造物を構築した場合は、図-1 のように粘性土層を貫通して基礎杭を打設することになるため、遮水工の健全性の確保が問題となる。

これまでの研究で圧密が完了した粘性土地盤では、基礎杭打設が底面粘土層の遮水機能に及ぼす影響については問題ないことが小型土層を用いた実験的な検討によって確認されている^{2),3)}。しかし、地盤の圧密が完了するにはかなりの時間を要するため、廃棄物の埋立が完了した跡地を早期に有効利用することができないという問題点がある。

そこで本研究では、未圧密地盤において大規模構造物を建設する際の基礎杭打設が底面粘土層の遮水機能へ及ぼす影響について、異なった圧密度において杭を打設する小型模型実験を行い、遮水機能の有効性を検討した。

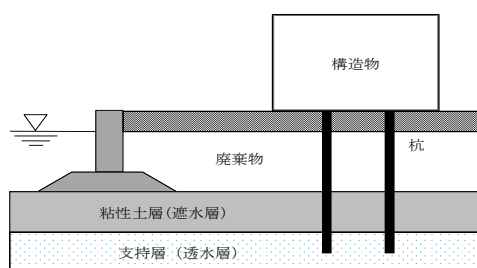


図-1 海面埋立型廃棄物処分場のイメージ図

2. 実験方法

2.1 実験に用いた試料

本実験で使用した粘土は、岡山県水島港より採取した沖積粘土で、その物理特性を表-1 に示す。

2.2 実験装置

実験装置の概略図を図-2 に示す。実験装置は直径 150mm、高さ 340mm の筒型モールドの装置を用いる。実験の手順は以下の通りである。

表-1 粘土試料の物理特性

土粒子の密度	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.744
液性限界	$w_L(\%)$	80.5
塑性限界	$w_P(\%)$	31.8
塑性指数	I_p	48.7

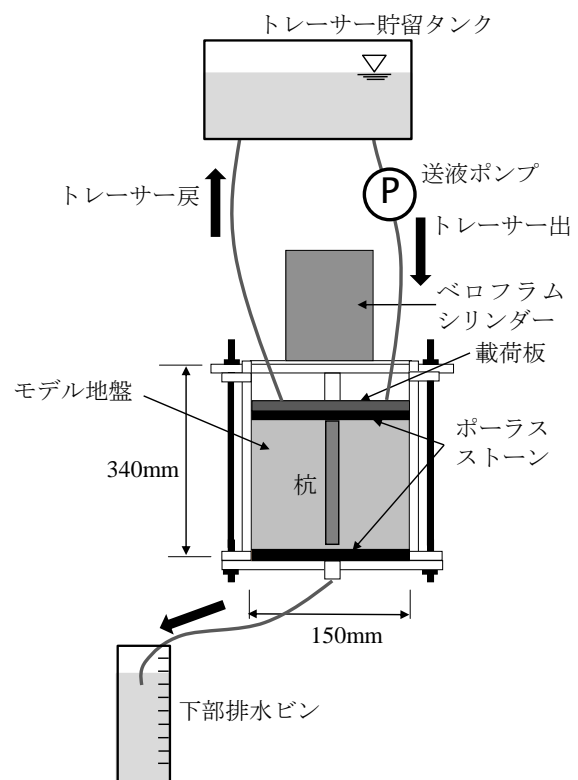


図-2 実験装置概要図

2.3 モデル地盤の作成

使用する粘性土を液性限界の 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、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った。表-2 に実験ケースを示す。シリーズ 1 では、24 時間サイクルで 0 (自重)、10、20、50kPa の圧密圧力を載荷させ圧密を行った。最終荷重 (50kPa) においては、3t 法により決まる圧密終了時間を満足するまで圧密を行い、最終沈下量及び含水比を測定し、この地盤を圧密度 100% のモデル地盤とした。この時の沈下量と時間の関係をもとに、 \sqrt{t} 法により圧密度 90% の時の沈下量及び経過時間を求めた。また、圧密度 90% の時の沈下量をもとに圧密度 80、70% における沈下量及び経過時間も求めた。

シリーズ 2、シリーズ 3 では、シリーズ 1 で得られた結果をもとに、圧密時間を調整してモデル地盤の作成を行った。今回の実験ではモデル地盤の目標圧密度を 90、80、70% として圧密を行い、その結果、圧密度が 94、88、81、77、69、54% のモデル地盤となった。表-3 にそれぞれのモデル地盤を作成した際の圧密時間を示す。

2.4 杭打設、トレーサー循環、試料採取

杭を打設するシリーズ 2、シリーズ 3 では、作成した粘土地盤に上部から長さ 90mm の模型杭 ($\phi 10\text{mm}$) を粘土層上端から打設速度 30mm/min で打設する。なお、杭を打設する際は粘土層の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によって押さえてある。

汚染モデル物質を粘土試料に浸透させるために、トレーサー循環を行った。粘土試料上部においてトレーサーの循環を送液ポンプにより 9 日間行った。試料下端からの排水は排水ビンに導き、排水量の測定を行った。汚染物質のトレーサーについては臭化物イオン (Br^-) を用いた。本研究で用いたトレーサー溶液の臭化物イオン濃度は全て 5,000mg/l とした。一般的に、廃棄物処分場の保有水には、イオンとして、 Cl^- や SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} などが含まれており、臭化物イオンは微量である。ただし、これらの主要なイオンは土中において土粒子へ吸着されたり、生物分解等による変動が大きく、本研究では実験利用には適さない。このため、実験期間中における吸着や分解による変動が小さく、実験結果を安全側に評価できる臭化物イオンを用いるものとする⁴⁾。

トレーサー循環後、汚染物質の粘土地盤への浸透を検討するため、試料採取を行う。図-3 に試料採取の流れを示す。最初に底板を取り除いたモールドを上下反転させ、載荷に利用したベロフラムシリンダーを使用して試料を 10mm 押し上げる。

含水比、臭化物イオン濃度を測定するために杭周辺、試料外縁部(杭より十分離れた位置)、試料中間部に内径 30mm のアルミ製の円筒を手動で粘土に挿入し(挿入深度: 10mm)、筒を粘土と一緒に引き抜き、試料を採取する。挿入した深度まで残った粘土を除去し、これらの作業を試料がなくなるまで繰り返す。図-4 に含水比と臭化物イオン濃度を測定するための粘土試料の採取平面位置を示す。試料については、片側を含水比測定用、もう片側を臭化物イオン濃度測定用とする。また、杭周辺の粘土については、円筒の中にある粘土を押し出し、片側を含水比測定用、もう片側を臭化物イオン濃度測定用として採取する。

表-2 実験ケース

バッチ	No.1	No.2	No.3
シリーズ 1	杭なし $U=100\%$	杭なし $U=100\%$	杭なし $U=100\%$
シリーズ 2	杭あり $U=94\%$	杭あり $U=81\%$	杭あり $U=77\%$
シリーズ 3	杭あり $U=88\%$	杭あり $U=69\%$	杭あり $U=54\%$

表-3 モデル地盤作成時の圧密時間

圧密時間(min)	圧密度(%)
19,780	100
2,520	94
2,030	88
1,320	81
1,080	77
880	69
590	54

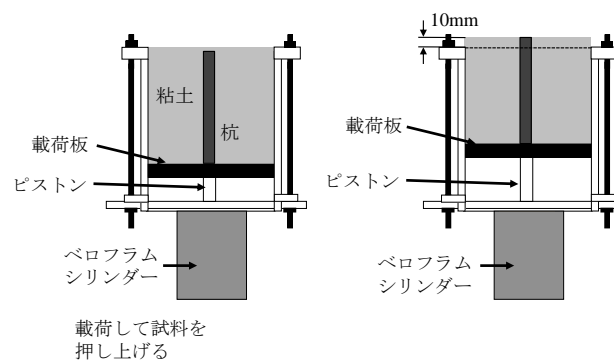


図-3 試料採取作業の流れ

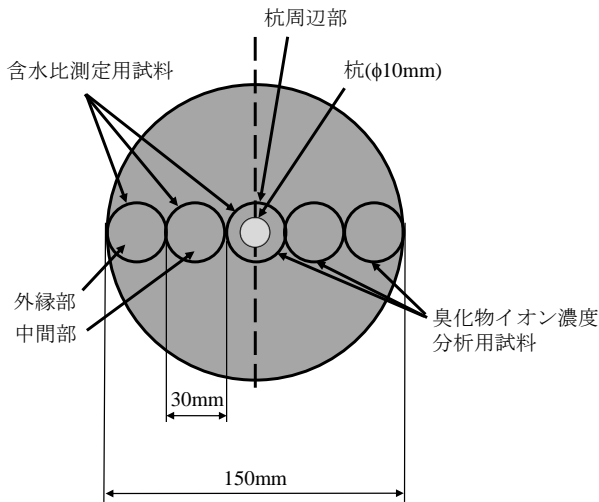


図-4 粘土試料の採取平面位置

2.5 排水量の測定

試料上部を循環させたトレーサーの液面から排水ビンとして利用したメスシリンダー内の水面までの水位差は、 $\Delta h=1,680\text{mm}$ とし、トレーサー循環を9日間行った。その間の排水量を容量1,000mlのメスシリンダーで1日ごとに測定した。

2.6 結果の整理

各実験終了後に採取した粘土試料については、含水比と臭化物イオン濃度を測定するとともに、沈下量、排水量、透水係数とトレーサーの移流距離を算出したが、紙面の都合上、沈下量、排水量、透水係数と移流距離に関しては省略する。測定された臭化物イオン濃度の整理方法は以下の通りである。

臭化物イオンは、もともと海水中に61mg/l程度含まれているため、式(1)を用いて臭化物イオン濃度の変化を臭化物イオン相対濃度 C/C_0 として評価する。臭化物イオン相対濃度は供給液の濃度と採取した試料から測定された濃度の比で表される。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{C_m - C_1}{C_2 - C_1} \dots\dots\dots (1)$$

ここに $\frac{C}{C_0}$: 臭化物イオン相対濃度

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)

さらに杭打設による周辺地盤への影響を検討するため杭周辺部と外縁部、中間部と外縁部の臭化物イオン相対濃度差 $\Delta C_N/C_0$ 、 $\Delta C_M/C_0$ を式(2)、(3)で算定する。相対濃度差は杭打設の影響が少なく、トレーサーの浸透が少ないと考えられる外縁部に比べ、杭周辺部、中間部での杭打設による影響の有

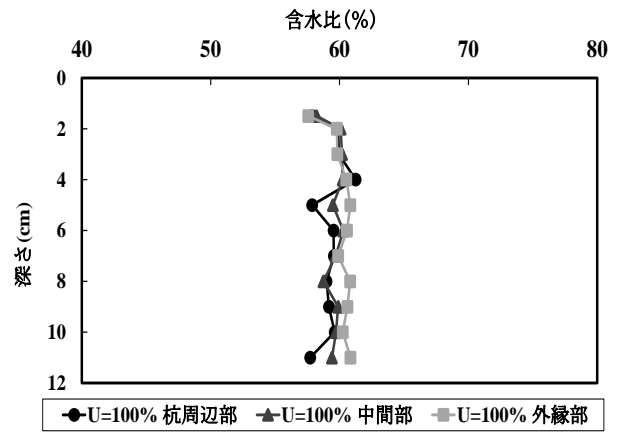


図-5 含水比の深度分布(圧密度 100% No. 1)

無を表す指標である。

$$\Delta \frac{C_N}{C_0} = \frac{C_1}{C_0} - \frac{C_3}{C_0} \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta \frac{C_M}{C_0} = \frac{C_2}{C_0} - \frac{C_3}{C_0} \dots\dots\dots (3)$$

ここに $\Delta \frac{C_N}{C_0}$: 杭周辺部と外縁部の臭化物イオン相対濃度差

$\Delta \frac{C_M}{C_0}$: 中間部と外縁部の臭化物イオン相対濃度差

$\frac{C_1}{C_0}$: 杭周辺部の臭化物イオン相対濃度

$\frac{C_2}{C_0}$: 中間部の臭化物イオン相対濃度

$\frac{C_3}{C_0}$: 外縁部の臭化物イオン相対濃度

3. 実験結果と考察

3.1 含水比の深度分布

図-5 に圧密度 100%で杭を打設しなかった場合の含水比の深度分布を示す。なお、この図では代表としてNo.1の実験の含水比深度分布のグラフを示すが、圧密度 100%で杭を打設しなかった場合、含水比の深度分布は 60~65%の間にまとまり、杭周辺部、中間部、外縁部で大きな差はなかった。このことから、圧密度 100%の地盤では含水比の深度分布に半径方向の違いは現れず、ほぼ均質な地盤であることがわかる。

図-6~図-11 に杭を打設した場合のトレーサー循環後の各試料の含水比の深度分布を示す。杭を打設した場合は、圧密度に関係なく杭周辺部の含水比が中間部、外縁部に比べて小さくなっている。この原因として、杭を打設したことにより、杭の体積に相当する粘土が杭の側方に押し上げられるため、杭周辺で圧密が進行し、間隙が減少したため

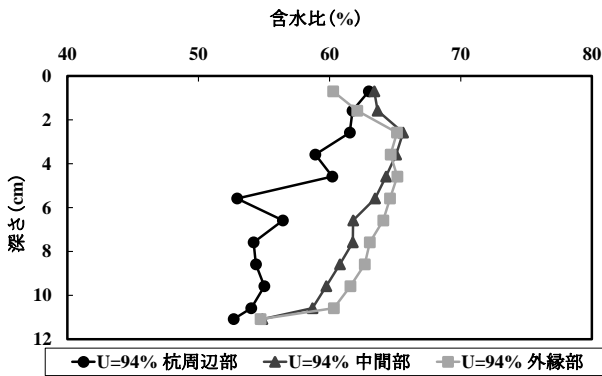


図-6 含水比の深度分布 (圧密度 94%)

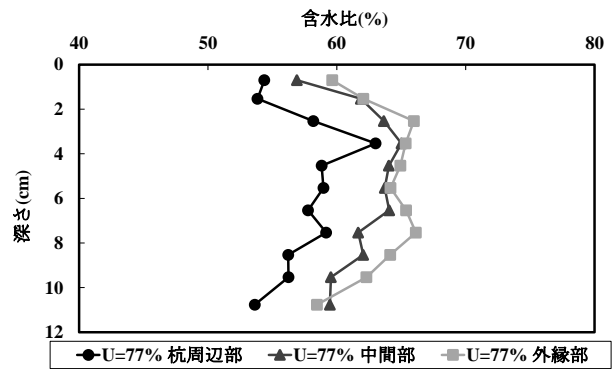


図-9 含水比の深度分布 (圧密度 77%)

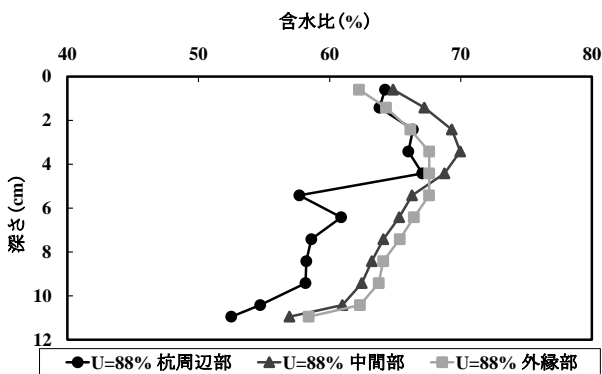


図-7 含水比の深度分布 (圧密度 88%)

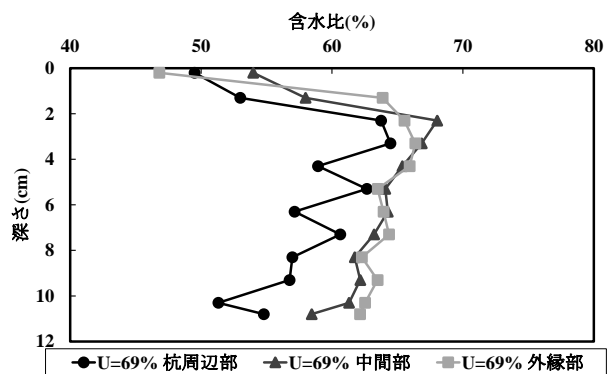


図-10 含水比の深度分布 (圧密度 69%)

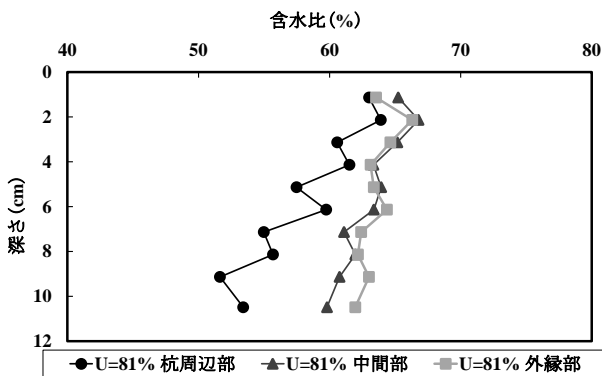


図-8 含水比の深度分布 (圧密度 81%)

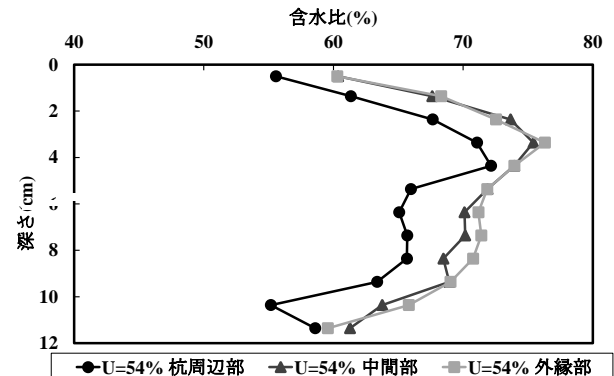


図-11 含水比の深度分布 (圧密度 54%)

あると考えられる。このことは、杭打設時の圧密度が大きいほど顕著に表れている。この原因として、杭打設時の圧密度が高いほど杭を打設するときの粘土層内の間隙が少なく、杭を打設したことによりその間隙がさらに少なくなったためと考えられる。また、粘土地盤の上下端部での含水比は小さく、粘土層中層部の含水比が高くなっていることがわかる。この原因として、今回の実験では両面排水で圧密を行っており、圧密が上下端から進行していくため、上下端部では排水が促進されるが粘土層中層部では圧密の進行が遅れ、排水が十分に行われていないことが考えられる。

3.2 杭打設による深度及び杭周辺地盤への影響

図-12～図-17 は表-2 のシリーズ 2, シリーズ 3 に示す地盤条件で杭を打設し、トレーサーを循環させたときの臭化物イオン相対濃度差の深度分布を表したグラフである。臭化物イオン相対濃度差が小さいほど杭打設による影響が小さいことを意味する。また、本研究では臭化物イオン相対濃度差 0.10 を閾値⁵⁾として検討を行った。

圧密度が 94, 88, 81% と高い場合は全深度において臭化物イオン相対濃度差が 0.10 以下である。これは、含水比のときと同様に、杭を打設するときの圧密度が高いほど、粘土層内の間隙が少ないた

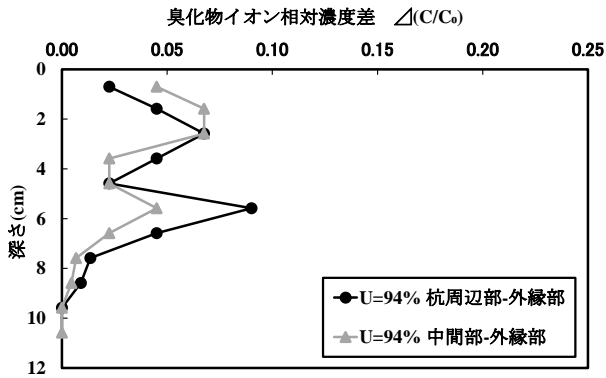


図-12 臭化物イオン相対濃度差の深度分布 (圧密度 94%)

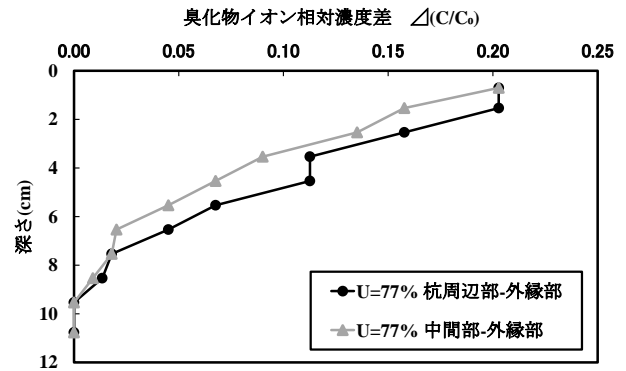


図-15 臭化物イオン相対濃度差の深度分布 (圧密度 77%)

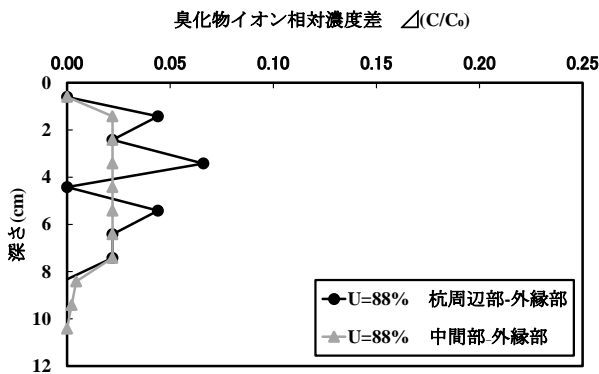


図-13 臭化物イオン相対濃度差の深度分布 (圧密度 88%)

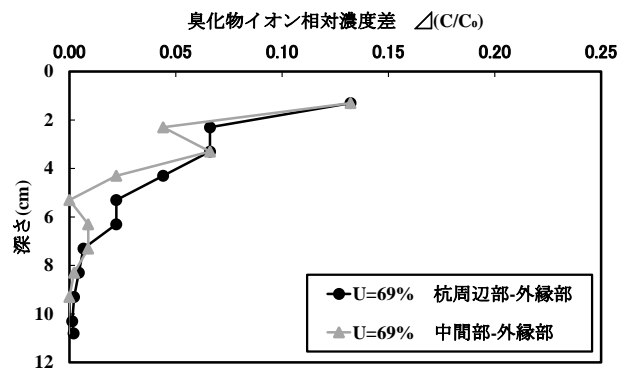


図-16 臭化物イオン相対濃度差の深度分布 (圧密度 69%)

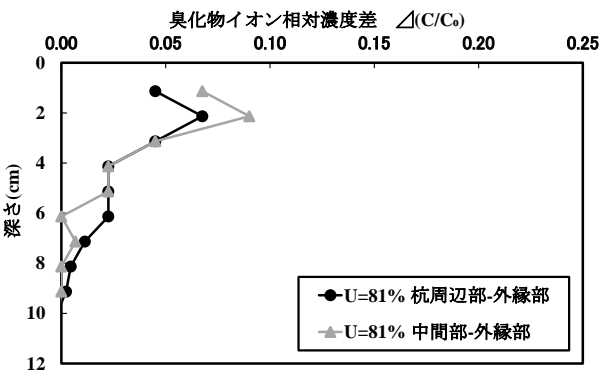


図-14 臭化物イオン相対濃度差の深度分布 (圧密度 81%)

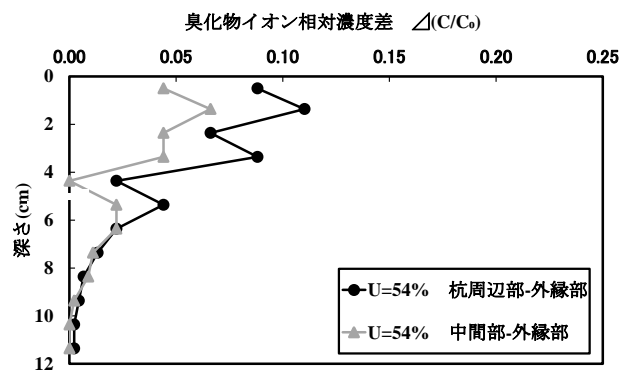


図-17 臭化物イオン相対濃度差の深度分布 (圧密度 54%)

め、杭打設による影響が小さくなったと考えられる。また、圧密度が 77, 69, 54%と低い場合はいずれも臭化物イオン相対濃度差が 0.10 を超える地点が存在することがわかる。これは、杭打設時の圧密度が低いため粘土層内の間隙比が大きく、杭打設によって粘土層内の圧密が進行してもなお、粘土層内に大きな間隙が存在しており、それによってトレーサーが循環しやすくなったため臭化物イオン相対濃度差が大きくなったと考えられる。特に圧密度 77%の場合の臭化物イオン相対濃度差は粘土層上層部では 0.20 となっており、圧密度 69, 54%の時と比べて杭打設時の圧密度は大きいにも

かわらず、臭化物イオン相対濃度差が大きくなっていることがわかる。これは、杭を打設した際に粘土層にクラックが生じたなどの原因でトレーサーが浸透しやすくなったためと考えられる。全体としては、深度 8cm 以深では臭化物イオン相対濃度差が 0 に近い値となっていることがわかる。これは、杭打設により、粘土と杭の間に隙間ができるが、深度が小さい範囲では杭と粘土の密着が悪いため、杭打設による影響が大きくなるが、深度が大きい範囲では杭と粘土の密着が良くなり、杭打設による影響が小さくなったと考えられる。

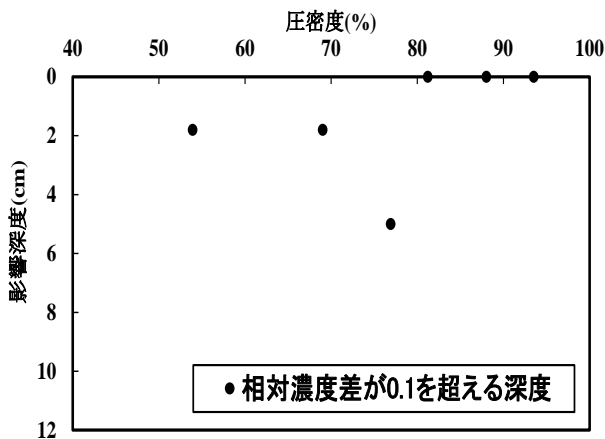


図-18 圧密度と影響深度の関係

3.3 圧密度と影響深度の関係

図-18 は臭化物イオン相対濃度差が 0.10 を超えるときの深度を影響深度として、圧密度と影響深度の関係を表したものである。この図より圧密度 80%以上では影響深度が 0 であり、圧密度が 77%では影響深度が 5cm となっている。また、圧密度が 54, 69%では影響深度が約 1.8cm となっている。理論上では圧密度が大きくなるほど影響深度が小さくなると考えられるが、圧密度 77%の影響深度が大きくなった。この原因として、杭打設の際に粘土層にひび割れが入ったなどのことが考えられる。このことから、圧密度が 80%を超えた状態で杭を打設すると杭打設による汚染水浸透の影響はないといえる。また、圧密度が 70%以下で杭を打設した場合は、粘土層上層部～中層部にかけては杭打設の影響がみられるが、底部では影響深度が 0 になっているため杭打設による汚染水の浸透の影響はないと考えられる。

4. 結論

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 圧密度 94%のモデル地盤を作成する場合、3t 法で決定される圧密度 100%の圧密時間の約 1/10 まで圧密時間を短縮することが可能である。94%より低い圧密度のモデル地盤を作成する場合もさらなる圧密時間の短縮が期待できるといえる。
- (2) 粘性土モデル地盤に杭を打設すると、杭周辺の粘土が外に押し出され圧密が進行するため、杭周辺部の含水比が中間部、外縁部に比べて小さくなる。このことは圧密度が異なるすべてのモデル地盤において同様の結果となった。
- (3) 杭打設時の圧密度が高いほど臭化物イオン相対濃度差が小さくなり、杭打設時の圧密度が低いと粘土層上層部では臭化物イオン相対濃度差が大きくなった。そのため、圧密度が低い

状態で杭を打設すると深度が小さい範囲では杭打設により汚染水が浸透する可能性がある。

- (4) 圧密度が 80%を超えた状態で杭を打設すると臭化物イオン相対濃度差が 0.10 を超えることがなかったため、杭打設による汚染水浸透の影響はないといえる。
- (5) 圧密度が 80%以下で杭を打設した場合には、粘土層上層部で臭化物イオン相対濃度差が 0.10 を超える地点が存在したため、粘土層上層部～中層部にかけては杭打設により汚染水が浸透する可能性があると考えられる。しかし、粘土層底部では臭化物イオン相対濃度差が 0 に近い値となっていることから、圧密度が低い地盤でも杭を打設することによる遮水層への影響はないと考えられる。

参考文献

- 1) 菊池喜昭, 菅野高弘: 環境リスク面からとらえた廃棄物の地盤工学的利用, 地盤工学会誌 pp.28-29, 2008.
- 2) 蔦川徹, 森脇武夫, 岡本拓, 渡辺修士, 平尾隆行: 基礎杭打設による海面処分場の底面遮水工に与える影響, 第 17 回廃棄物学会研究発表会, pp.916-918, 2006.
- 3) 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, 港湾空港技術研究所 資料 No.1252, 2012.
- 4) 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 (海洋開発), Vol.73, No.1, 67-82, 2017.
- 5) 平尾隆行, 下所諭, 福原和頭, 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.