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

Effects of Surface Roughness of Pile on Barrier Performance of Offshore Controlled Waste Landfill Site

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))
 森脇武夫 Takeo MORIWAKI (呉工業高等専門学校)
 鹿瀬宏希 Kouki KANOSE (呉工業高等専門学校専攻科)

本研究は、管理型海面処分場の底面遮水工(在来粘性土層)を貫通する基礎杭の打設を想定し、杭打 設時に生じる杭周辺粘性土の乱れが遮水機能へ及ぼす影響について、杭の表面粗度の違いに着目して実 験的に検討した.実験は、小型土槽に海性粘性土を投入して底面遮水工を模したモデル地盤を作成し、 その中にアルミ杭およびアルミ杭にølmmのガラスビーズを付着させたディンプル杭(それぞれ杭径 10mm,杭長100mm)を貫入した後、モデル地盤上部からトレーサー(臭化物イオン)を9日間浸透さ せ、臭化物イオン濃度の深度分布やモデル地盤の透水量、透水係数を求めることにより、杭種(表面粗 度)の違いによる粘性土中の保有水移流拡散状況を確認した.その結果、杭の表面粗度の違いによって 杭周面の遮水性に影響を与えるが、一方で杭打設に伴い周辺粘土の密実化も併せて生じることから、杭 の無い場合とほぼ同等な遮水性が確保されていることが確認された.

キーワード:管理型海面処分場,基礎杭,表面粗度,遮水機能

1. はじめに

1.1 研究の背景

管理型海面処分場の多くは臨海部に立地し、その跡地 は広大な土地面積を活かした物流用地や工業用地への活 用が期待されている.このような跡地の有効活用を考え る場合、杭基礎を有する構造物等の建設が必要となる.

一般に管理型海面処分場の底面遮水工は,在来粘性土 層を利用していることが多く,遮水工の構造基準として 透水係数 *k*=10⁻⁷m/s 以下の地層が層厚 *H*=5m 以上確保さ れていることが求められている.

更に,処分場の埋立終了後も,処分場としての遮水機 能を保持する必要があり,図-1のように底面遮水工であ る在来粘性土層を貫通して杭を打設するような形質変更 を行う場合においても遮水工の健全性を確保する必要が ある.

しかし,このような遮水工を貫通して杭を打設した場 合の遮水機能に与える影響は,未だ不明確な点が残され ており,処分場跡地は緑地や公園等,地盤改良や杭基礎 が不要な比較的低レベルでの施設利用,場合によっては 跡地そのものが未利用に留まっているのが現状である.

このような背景から,処分場跡地の高度利用を可能と するための工法の開発が望まれているところである.

本研究においては、これらの高度利用を可能とする技 術のうち、比較的処分場への影響が小さく、技術開発の 可能性がある杭基礎工法に着目するものとする.

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 性土層)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.

(IGC : E-7)

菊池ら¹⁾は、杭周辺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回復することを確認している。

勝見ら²⁾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、杭と粘性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、粘性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.

また,菊池ら³⁾は,杭打設に伴って生じた杭周辺地盤 の乱れが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,中規模実験の結果なども踏まえ,杭打設に伴う廃棄 物の連込み状況や,室内実験と現場挙動との相関性の検 討など,原位置実験の必要性について言及している.



1.3 本研究の目的

以上の実験的研究は、杭打設後の杭周辺の透水性に対 してひとつの見解を示しているものと考えられるが、い ずれも圧密容器を用いて比較的滑らかな杭界面と地盤と の間の付着性や、杭周辺地盤に生じる乱れや空隙に着目 したものである.しかし、実際に打設される杭は杭外周 面に溶接痕や継手部の不連続部等、異物や粗度の異なる 部位が存在するとともに、場合によっては杭の打設に伴 い廃棄物の一部を巻き込んでいる可能性もある.このよ うな、杭外周面の状態や打設に伴って生じた周辺地盤の 攪乱等が遮水機能へ与える影響については未だ不明な点 が残されている.

このような背景から、本研究においては、杭の表面粗 度の違いに着目し、杭外周面にガラスビーズを貼り付け て粗度を変化させ、杭打設時に生じる杭周辺地盤の乱れ が遮水機能へ及ぼす影響を実験的に検討するものである.

2. 実験概要

2.1 実験に用いた材料

(a) 地盤材料

底面遮水工をモデル化する地盤材料として,岡山県水 島港で採取した在来粘性土(高液性限界粘土)を用いた. その物理特性及び圧密特性を表-2.1及び表-2.2示す.

(b) トレーサー (溶液)

廃棄物層内の保有水を模す材料として、粘土粒子への 吸着や微生物分解がない臭化物イオンを用いる.実験に おいては、臭化カリウム溶液(KBr)として臭化物濃度 を 5000mg/L に調整して使用する.

(c) 杭

杭については、杭周面の異物や廃棄物等の連れ込み等 を表面粗度を変えることでモデル化し、図-2.1に示す二 種類の模型杭を使用する.ひとつは加工を施していない ø10mmのアルミ杭(異物がない状態を想定)、もうひと つはø8mmのアルミ杭周面にø1mm(杭径の1/8)以下 のガラスビーズを接着したディンプル杭(異物がある状 態を想定)である.

土粒子の密度	液性限界	塑性限界	塑性指数
ρ_s (g/cm ³)	W_L (%)	$_{WP}$ (%)	I_p
2.744	80.5	31.8	48.7

表-2.2 地盤材料の圧密特性

圧密降伏応力	圧縮指数	膨張指数
<i>pc</i> (kPa)	<i>Cc</i>	<i>Cs</i>
45	0.507	

表-2.3 実験ケース

ケース	No.1	No.2	No.3
杭の種類	アルミ杭	ディンプル杭	杭なし



図-2.1 杭の表面形状



図-2.2 実験装置概念図

2.2 実験条件

実験においては、前述した模型杭を用いて実施するが、 比較対象として杭の無いケースも併せて実施する.実験 ケースを表-2.3に示す.

2.3 実験装置

実験装置の概念図を図-2.2 に示す.実験装置は,直径 15cm,高さ34cm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-2.4 モデル地盤と杭の諸元

ケース	No.1	No.2	No.3
杭の種類	アルミ杭	ディンプル杭	杭なし
地盤高さ (cm)	10.6	10.4	10.3
平均間隙比	1.651	1.674	1.714
杭長 (cm)	9.6	9.8	—



(a) モデル地盤の作成

現地から採取した粘性土を,まず 2mm ふるいで貝殻 や粗粒分を取り除き,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-2.2に 示す実験装置に投入した後,24時間サイクルで,0kPa (自重),10kPa,20kPa,50kPaの圧密圧力を載荷させ両 面排水で圧密を行う.最終荷重(50kPa)においては,3TE 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, その後,同じ装置を用いて各種実験を行う.

(b) 杭の打設, トレーサー循環, 試料採取

2.3 (a) の方法で作成したモデル地盤に杭を打設する ため、モデル地盤作成後、一度ベロフラムシリンダーと 載荷板を取り外す. その後、模型杭 (Ø10mm)を粘性 土層(圧密終了時のモデル地盤厚さは約10cm)に打設速 度30mm/minで打設する. 杭の打設にあたっては、10秒 間で杭の打設長が5mmとなるようにストップウォッチ の秒針の動きに合わせて手動で打設する. また、杭の打 設によるモデル地盤表面の乱れやひび割れの発生を防止 するため、図-2.3に示すようにモデル地盤の表面を反力 板(アクリル板)で押さえた状態で行う.

以上の方法によって作成したモデル地盤の高さと平 均間隙比および打設した杭の長さを表-2.4に示す.

杭の打設後,反力板を取り外し,再び載荷板とベロフ ラムシリンダーを取り付け 50kPaの圧密圧力を載荷させ る.

その後,載荷ピストン内部のポーラスストーン内にポ ンプで定常的にトレーサーを循環させる.循環時間は, モデル地盤内におけるトレーサーの拡散現象を考慮し, モデル地盤の上下端の濃度差が明確に確認できる拡散時 間(拡散によりトレーサーが下端に伝わる時間)として 9日間を設定する⁴⁾.また,循環に際しては,上部トレ









ーサー供給タンクと下部排水ビンの水位差を *Δh*=168cm とする.

トレーサー循環後,モデル地盤内への浸透状況を確認 するため,図-2.4に示す平面位置で,深さ1cmピッチで 試料採取を行う.採取した試料については,後述する方 法によって含水比と臭化物イオン濃度を測定する.

試料採取の具体的な方法は以下のとおりである.

まず,図-2.5に示すように底板を取り外したモールド を逆さに設置し、ベロフラムシリンダーによりモデル地 盤を1cm押し上げる(粘土材料は底板から1cm突出する). この状態で、図-2.4に示す「杭周辺部」と「外縁部(モ ールド端部)」、及び「杭周辺部と外縁部の中間部」の三 か所において、外径3cmのアルミ製の円筒を粘性土層に 1cm挿入することで、試料を定量採取する.試料採取後、 残りの突出部は取り除く.

その後、これらの作業を全深度について繰り返す.採 取した試料は、図-2.4に示すように、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、 杭周辺の粘土試料については、円筒の中にある試料を半 分にして、それぞれ含水比測定用と臭化物イオン濃度測 定用とする.これらの試料から、2.4 に示す方法により 含水比と臭化物イオン濃度を測定し、杭打設によるモデ ル地盤への影響を評価する.

(c) 排水量の測定

実験期間中,図-2.2に示す下部排水ビンへの排水量を 容量1000mLのメスシリンダーで1日ごとに測定する. 2.4 結果の整理

採取した粘土試料については,以下に示す方法により 含水比と臭化物イオン濃度を計算するとともに,カラム 下部からの排水量をもとにモデル地盤の平均的な透水係 数とトレーサーの移流距離を算出する.

(a) 含水比の測定

採取した試料毎に,次式により含水比 w (%) を算定 する.

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100$$
ここに w:含水比 (%)

ma:試料と容器の質量(g)
 mb:乾燥試料と容器の質量(g)
 mc:容器の質量(g)

(b) トレーサーの分析方法

モデル地盤内に拡散,あるいは流入した臭化物イオン は、下記の方法により分析し濃度を算定する.

採取した粘性土試料 (2g 程度) をスクリューキャップ 付き 50mL ディスポーザブル遠心管に入れ,ガラスビー ズ10 個程度と精製水 20mL を加え,振とう機(振とう幅 4cm,200rpm) で2時間振とう抽出する.静置後 7000rpm で20分間遠心分離し,上澄を20mL のシリンジに付けた 0.45µm のディスポーザブルフィルタでろ過してろ液を 得る.それを精製水で適宜10~20倍に希釈後,イオンク ロマトグラフにより臭化物イオン濃度を測定する.

(c) 臭化物イオンの相対濃度

2.4 (b) により測定した臭化物イオン濃度は,実験に 用いた海水や間隙水にもともと含まれているため,これ らの影響を除外するため,次式を用いて臭化物イオンの 相対濃度 *C*/*C*₀を計算する.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{C_M - C_1}{C_2 - C_1} \tag{2.2}$$

ここに C:粘性土中の臭化物イオン濃度 (mg/L)
 C₀:トレーサー中の臭化物イオン濃度 (mg/L)
 C_M:粘性土中の臭化物イオン濃度の実測値 (mg/L)
 C₁:初期間隙水中の臭化物イオン濃度 (61 mg/L)
 C₂:トレーサー中の臭化物イオン濃度の実測値 (mg/L)

(d) 透水係数の算出

カラム下部からの排水量より,モデル地盤の平均的な透水係数k(m/s)を次式により計算する.

$$k = \frac{Q \cdot D}{A \cdot \Delta h \times 24 \times 60 \times 60 \times 100}$$
(2.3)
ここに k:透水係数 (m/s)
Q:1日ごと排水量 (cm³/day)
A:杭の断面積を除いた試料の断面積 (cm²)
D:試料の厚さ (cm)
 $\Delta h: 水頭差 (cm)$

(e) トレーサーの移流距離の算出

実験期間中(9日間)におけるモデル地盤内でのトレー サーの移流距離 *L*(cm)を次式で算定する.

$$L = \frac{\overline{Q}}{A}t \tag{2.4}$$

ここに L: 移流距離(cm) $\overline{Q}: 9 日間の平均排水量(cm³/day)$ A: 杭の断面積を除いた試料の断面積(cm²)<math>t: 循環期間(9day)

また,間隙水が土粒子部分を流れずに,間隙のみを流 れたとした場合の移流距離*Lv*(cm)を次式で算定する.

$$L_{v} = \frac{Q}{A_{v}}t$$
(2.5)

ここに A_{ν} :間隙の断面積 (cm²)

なお、
$$A_v = \frac{e}{1+e}A$$
 (2.6)
 $e: 粘性土の間隙比$

3. 実験結果と考察

3.1 定ひずみ速度圧密試験結果

2.3 (a) の方法で作成した粘土試料に対して,定ひず み速度圧密試験を行った結果を図-3.1に示す.なお,こ の図には圧縮特性を表す e~logp 関係と透水特性を表す e~logk 関係が併せて示してある.この図の e~logp 関係 から圧密降伏応力を求めると pc=45kPa となる.圧密圧力 として p=50kPa をベロフラムシリンダーによって載荷さ せているが,載荷板とモールド周面の摩擦などによって 5kPa 程度損失していると考えられる.また,この e~logp 関係から粘土試料の圧縮指数 Cc と膨張指数 Cs を求める と, Cc=0.507, Cs=0.070 であった.

一方, *e*~log*k* 関係は過圧密領域を除き,ほぼ直線で 近似でき,次式で表せる.

$$e = 0.677 \log k + 6.399 \tag{3.1}$$

なお,過圧密領域でこの関係式から乖離しているのは, 圧密開始直後で間隙水圧が上昇し,定常状態に至ってい ないためである.





3.2 含水比の深度分布

実験終了後(9日後)のモデル地盤内の含水比の深度 分布を図-3.2に示す.

杭を打設しないケースの結果を図-3.2 (a) に示す.こ の図を見ると、モデル地盤の上下端を除き、含水比は $w=62\sim64\%$ とほぼ一定となっている.上下端で含水比が 小さくなっているのは、上下端面が排水面であり圧密が 進んでいること、および試料を取り出す際に空気に触れ る時間が他の深度より長く乾燥したことが考えられる. また、深度が深くなるほど含水比がやや小さくなる傾向 にあるのは、本実験では水頭差 $\Delta h=168$ cm (動水勾配 *i* =16.8) を保った状態でトレーサーを浸透させており、 下方への浸透圧が作用したためと考えられる. なお, 杭 周辺でばらつきがやや大きいのは, 杭周辺での含水比測 定用試料が図-2.4 に示すように他の位置の半分程度と 少量であるため, 測定誤差がより大きく現れたためと思 われる.

次に,杭を打設したケースを図-3.2 (b), (c) に示す. これらの図をみると,アルミ杭とディンプル杭ともに杭 周辺部の含水比が中間部や外縁部より 5%程度小さくな っている.これは杭を打設することによって粘性土が外 側へ押し拡げられ,杭周辺での圧密が進んだ結果と考え られる.また,深度が深いほど含水比が小さくなる傾向 にあり,これも杭の無いケースと同様に浸透圧の作用に よるものと考えられる.

一方,杭径(*ø*=10mm)の1.5倍(15mm)以上離れた 中間部と外縁部の含水比は,アルミ杭とディンプル杭と もに深さや半径方向の採取位置に関係なく*w*=60%程度 でほぼ一定で,杭打設の影響は杭径の1.5倍以内の杭周 辺に限定されていると考えられる.

3.3 臭化物イオンの相対濃度分布

実験終了後(9日後)のモデル地盤内の臭化物イオンの相対濃度の深度分布を図-3.3に示す.この図において相対濃度が C/Co=1.0 であるということは、粘性土中の臭化物イオン濃度がトレーサーの濃度と同じになっているということであり、相対濃度が C/Co=0 であるということは、試料中の臭化物イオン濃度がトレーサーを循環する前の状態から変化していないことを示している.

この図から、全ての実験ケースにおいて、モデル地盤 から供給されたトレーサーがモデル地盤内に伝播してい ることが確認される.モデル地盤の上端面においては *C/Co*=0.8~1.0で、ほぼ供給したトレーサー濃度と同じ濃 度を示している.深度 z=4~5cm より浅い部分について は、実験ケース毎で相対濃度分布に差異が現れているが、 それ以深においては、全ての実験ケースでほぼ同じ相対 濃度分布を示している.

杭を打設していないケースの深度分布図を図-3.3 (a) に示す.この実験ケースは本来,試料の採取位置によっ て相対濃度の深度分布に差は生じないと考えられる.し かし,深度 z=4cm 以浅では中心部の相対濃度が高く,外 縁部が低くなっていることが確認できる.これは、トレ ーサーをモデル地盤上端へ供給するため,載荷板中に設 けられた放射線状の溝の中を循環させ,ポーラスストー ンを介して供給しているが、トレーサーの流れが中心部 に集中し,主に載荷板の中心付近からモデル地盤に供給 されたものと考えられる.

アルミ杭を打設したケースを図-3.3 (b) に示す. この 図を見ると,深度 z=4cm 以浅での相対濃度は,杭を打設 しない場合(図-3.3(a))より小さいことが確認できる. これは,図-3.2 で示したように,杭を打設することによ って杭周辺部の間隙が減少(含水比が減少)し,トレー サーが浸透および拡散し難くなったためと考えられる.



図-3.3 臭化物イオンの相対濃度

ディンプル杭を打設したケースを図-3.3 (c) に示す. この図を見ると,深度 z=4cm 以浅での相対濃度が試料採 取位置によって差が認められ,杭周辺部が高くなってい る.この値は,杭を打設しない場合(図-3.3 (a))とほ ぼ同程度であり,前述したように杭を打設することによ る杭周辺粘土の間隙比の減少のためと考えられる.

3.4 杭打設による影響

実験終了後(9日後)のモデル地盤内の臭化物イオンの相対濃度(図-3.3)について,杭打設による影響(杭周辺地盤の乱れ等)を評価するために,杭周辺と外縁部の差をとったものを図-3.4に示す.なお,杭を打設しなかったケースを図-3.4(a)に示す.このケースでも試料上端面の中心部からトレーサーの浸透と拡散が進むため,深度 z=4cm 以浅では中心部と外縁部との相対濃度に差が認められる.

アルミ杭を打設したケースを図-3.4 (b) に示す. この 図を見ると,深度 z=5cm 以浅で杭周辺部と外縁部で差が 確認できるが,杭を打設しなかったケースより小さくな っている.これは前述したように,トレーサーの浸透と 拡散はモデル地盤上端面の中心部から進むが,中心部は





杭が打設されることによって間隙が減少し,トレーサー の浸透と拡散が起こり難くなったため,外縁部との差が 出なくなったと考えられる.

ディンプル杭を打設したケースを図-3.4 (c) に示す. この図を見ると,深度 z=4cm 以浅で杭周辺部と外縁部と の差が顕著になっていることが確認できる.

アルミ杭とディンプル杭の場合を比較すると、図-3.5 に示すようにディンプル杭を打設した場合は凹凸のある 杭表面と粘土試料の境界に空隙ができ、トレーサーを含 む間隙水がこの部分を通って浸透しやすくなっていたと 考えられる.一方,アルミ杭とディンプル杭とも,杭打 設によって周辺粘土が撹乱され,透水性の低下したスミ アゾーンが形成され,それがその後の圧密によって密実 化し,トレーサーの浸透が起こり難い現象も併せて起こ っていると考えられる.その結果,図-3.2で示したよう に杭周辺における含水比の減少(間隙比の減少)が大き なアルミ杭では杭を打設しなかった場合より遮水性が高 くなり,ディンプル杭では杭表面と粘土試料の境界に空 隙ができるものの杭周辺においては含水比が減少(間隙 比が減少)するため,杭を打設しなかった場合とほぼ同 等な遮水性となったと考えられる.

3.5 底部からの排水量と試料の透水係数

図-3.6に底部からの排水量の日変化を示す.なお、本 研究のトレーサー浸透実験では全てのケースで水頭差を Δh=168cm (動水勾配 i≒16.8) に保っている. 図から分 かるように、実験開始直後の1日目の排水量が多いもの の、2日目以降はほとんど変動が無く、Q=20~30cm³/day で推移している.1日目の排水量が多いことに関しては, 杭を打設しなかった場合の排水量も多いことから杭の打 設による影響ではなく、トレーサーの循環を開始する前 にモデル地盤を作成した際の圧密応力 p=50kPa を再び載 荷したことによる再圧密によって排水されたものと考え られる.2 日目以降は、前述したように杭の有無および 杭の種類の違いによる差は認められず、ほぼ定常状態と なっている.9日目に排水量がやや減少する傾向にある ように見えるが、メスシリンダーの計量目盛が 10cm³刻 みで, 読み取りを 5cm³単位で行っているため, 読み取り 誤差の範囲内であると考えることができる.

図-3.7は、図-3.6の排水量から試料の透水係数を算出 したものである. なお, 算出の際には水頭差は *Δh*=168cm で,試料の厚さは実験終了後に実測した値を用いた.ま た, 杭を打設した場合の試料の断面積は杭の断面積を除 いた面積を用いた.前述した理由によって1日目の透水 係数は他に比べて大きな値となったが、2 日目以降の透 水係数は杭の有無や杭の種類の違いに依らず k= 6.5×10⁻¹⁰~1.3×10⁻⁹m/s の範囲で、ほぼ一定であった. 各 ケースの2日目以降の透水係数の平均値を表-3.1に示 す.この表には、図-3.2に示した各試料の含水比から求 めた間隙比に対応した透水係数を定ひずみ速度圧密試験 で得られた式(3.1)から算出した値 kc と, その比 k/kc も併せて示してある.図-3.7および表-1からトレーサー 循環試験で得られた透水係数 k と圧密試験で得られた透 水係数 kcの比 k/kc を見ると、いずれの場合もトレーサー 循環試験で得られた透水係数 k の方がやや小さくなって いる. さらに、この値も杭を打設した場合と杭を打設し なかった場合で同程度であり、このことから杭を打設す ることによるモデル地盤の遮水性の低下はないものと考 えられる.



図-3.6 排水量の経時変化



図-3.7 透水係数の経時変化

次に、実験期間中の排水量より平均流速 v を算出し、 それを基にトレーサーの移流距離 L を算出した結果を表 -3.2 に示す.この流速 v は粘土試料の断面積 A を用いて 算出しているが、間隙水は土粒子部分は流れずに間隙部 分のみを流れていると考えられるため、間隙の断面積 A_v = $A \cdot e/(1+e)$ を用いて間隙での流速 v_v を算出し、その流 速を用いて求めた移流距離 L_v も併せて示している.この 表-3.2 から、モデル地盤の断面全体を流れた場合の移流 距離は $L=1.2\sim1.7$ cm で、間隙のみを流れた場合の移流 距離は $L_v=1.9\sim2.7$ cm と、後者の方が 1.6~1.7 倍程度深 くなっている.

ー方,図-3.3の相対濃度の深度分布をみると,深度 z=1 ~2cm での相対濃度は C/Co=0.6~0.9 であり,理論上では トレーサーが到達しているものの,間隙水が完全にトレ ーサーに置き換わっていないことがわかる.また,深度 z=3~4cm でも相対濃度は C/Co=0.5~0.7 程度あり,移流 だけでなく拡散によってかなりの深度までトレーサーが 浸透していることがわかる.

アルミ杭とディンプル杭を比較すると両者の差はほとんどなく、杭を打設しなかったケースの移流距離より短くなっている.これは表-3.1で示すように、杭を打設したケースの間隙比が杭を打設しなかった場合より小さく、透水係数が小さかったためと考えられる.

項目	杭なし	アルミ杭	ディンプル杭
実験期間における 平均透水係数 k (m/s)	9.98E-10	8.45E-10	7.76E-10
試料の平均間隙比 e	1.714	1.651	1.674
圧密試験からの 透水係数 k_c (m/s)	1.20E-09	9.68E-10	1.05E-09
k/k_c	0.83	0.87	0.74

表-3.1 透水係数の比較

表-3.2 トレーサー循環期間における移流距離

項目	杭なし	アルミ杭	ディンプル杭
平均流速 v(cm/s)	2.15E-06	1.66E-06	1.51E-06
移流距離 <i>L</i> (cm)	1.7	1.3	1.2
間隙での流速 _{vv} (cm/s)	3.41E-06	2.66E-06	2.41E-06
間隙での移流距離 L_y (cm)	2.7	2.1	1.9

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) 粘性土モデル地盤内に杭を打設すると,杭を貫入した部分の粘土が側方に押し出されるため,杭周辺の間隙比(含水比)が減少した.その程度は杭の表面粗度には関係なく,深度の増加に伴い大きくなる傾向にあった.また,杭周辺で間隙比(含水比)が減少する範囲は杭径の約1.5倍であった.
- (2) 臭化物イオンをトレーサーとしてモデル地盤に 9 日間循環させた結果, 臭化物イオンの相対濃度は深 度 z=4~5cm まで影響があり, 杭の有無や種類によ り濃度差が確認されたが, それ以深においては, ほ ぼ同じ分布となった.
- (3) アルミ杭を打設した場合,深度z=5cm以浅で杭周辺 部と外縁部で臭化物イオンの相対濃度に差が確認 された(杭打設の影響がある)が,杭を打設しない 場合より小さくなった.これは,杭周辺部は杭が打 設されることによって間隙が減少し,トレーサーの 浸透と拡散が起こり難くなったためと考えられる.
- (4) ディンプル杭を打設した場合,アルミ杭と比較して, 深度 z=4cm 以浅で杭周辺部と外縁部で相対濃度の 差が顕著となった.これは,ディンプル杭を打設し た場合は凹凸のある杭表面と粘土試料の境界に空 隙ができ,トレーサーを含む間隙水が浸透しやすい 状態であると考えられるが,一方で,杭打設によっ て周辺粘土に透水性の低下したスミアゾーンが形 成され,トレーサーの浸透が起こり難い状態も併せ て起こり,結果として杭を打設しなかった場合とほ ぼ同等な遮水性となったと考えられる.
- (5) トレーサー循環中の排水量から求めた透水係数は 定ひずみ速度圧密試験から求めた値とほぼ一致し

た.また,杭を打設した場合の透水係数は打設しな かった場合と同程度以下であり,杭を打設すること によって遮水性が低下することはない.

- (6) トレーサー循環中のトレーサーの移流距離は 1~3cm 程度と推定され,杭を打設した場合の移流距 離が杭を打設しなかった場合より短くなった.これ は,杭を打設した場合には試料の間隙比が杭を打設 しなかった場合より小さくなり,透水係数が小さく なったためと考えられる.
- (7) 実験期間中、トレーサーが移流によって到達したと 考えられる深度 z=1~2cm での相対濃度は C/Co=0.6 ~0.9 であり、間隙水はトレーサーで完全に置き換 わっていなかった.また、トレーサーが移流によっ て到達していない深度 z=3~4cm でも相対濃度は C/Co=0.5~0.7 程度あり、移流だけでなく拡散によ ってかなりの深度までトレーサーが移動すること も確認された.

以上で示したように、打設した杭の表面粗度の違いに よって杭周面の遮水性に影響を与えるが、一方で杭打設 に伴い周辺粘土の密実化も併せて生じることから、杭の 無い場合とほぼ同等な遮水性が確保されていることが確 認された.

謝辞

本研究の遂行にご尽力いただいた呉工業高等専門学校 環境都市工学科5年生(現(株)NIPPO)の藤原昂洋様 に深く御礼申し上げます.

参考文献

- (1) 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, 2005.
- (2) 冨士暁之,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.
- 菊地喜昭,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.
- 高川徹,福原和顕,平尾隆行,下所諭,森脇武夫, 小松登志子:管理型処分場の底面遮水工における汚 染物質の拡散防止効果に関する考察,第14回廃棄 物学会研究発表会講演論文集,pp.1102-1104,2003.

(2016年6月20日 受付)