

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1252 June 2012

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

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

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 管理型海面廃棄物処分場の遮水工における遮水性能の考え方	4
3. 管理型処分場の跡地利用の現状と問題点	5
3.1 管理型処分場の跡地利用状況	5
3.2 管理型処分場の跡地利用事例	5
3.3 管理型処分場への杭打設事例	5
3.4 管理型処分場への杭打設に関する課題	7
4. 処分場跡地への杭打設に関する検討	8
4.1 杭打設時の課題	9
4.2 粘性土地盤と杭等の境界面における透水特性	13
4.3 保有水の移流拡散による遮水層への影響深度	26
4.4 杭打設後における地震時の影響	29
4.5 杭への塗布材としての膨潤性止水材の効果	31
4.6 まとめ	37
5. 現場での杭打設時に考慮すべき事項	38
5.1 杭打設時にあたって解決すべき課題	38
5.2 杭打設時における検討事項	38
6. 結論	39
7. あとがき	40
参考文献	40

Influence of pile installation on the barrier performance of natural clay layer at offshore waste landfill

Yoshiaki KIKUCHI¹⁾ • Takeo MORIWAKI²⁾ • Takeshi KATSUMI³⁾
Takayuki HIRAO⁴⁾ • Toru TSUTAKAWA⁴⁾ • Akira HATTORI⁵⁾
Koichi OKAMOTO⁵⁾ • Koichi YAMADA⁶⁾ • Kouki SASAKI⁶⁾

Synopsis

Use level of offshore municipal solid waste landfill site (OMSWL) has been low. To utilize OMSWLs intelligently, installation of piles through natural barrier as clay layer will be required. But leakage of wastes or polluted water is anticipated if installation of piles which penetrate through the waste layer and the natural clay barrier layer beneath it. In this research, firstly, summaries of barrier performance required to OMSWL and the states and issues on the use of abolished MSWLs were made. Secondly, effects of leakage of wastes and polluted water during installing piles and long term after installation of piles were studied. From this study, leakage effect can be minimized by appropriate treatment during pile installation. Finally, items to be considered when constructing piles in field were extracted and summarized.

Key words : offshore controlled waste landfill, pile foundation, use of landfill, clay layer

-
- 1) Director for Special Research (Geotechnical and Structural Engineering), Port & Airport Research Institute, 3-1-1 Nagase, Yokosuka 239-0826, Phone: +81-46-844-5037, Fax: +81-46-844-0255, e-mail: kikuchi@pari.go.jp
 - 2) Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kure National College of Technology, 2-2-11 Agaminami, Kure 737-8506, Phone: +81-823-73-8478, Fax: +81-823-73-8485, e-mail: moriwaki@kure-nct.ac.jp
 - 3) Professor, Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University, Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Phone: +81-75-753-9205, Fax: +81-75-753-5116, e-mail: katsumi.takeshi.6v@kyoto-u.ac.jp
 - 4) Seaside Urban Department, Chuden Engineering Consultants CO., LTD., 2-3-30 Deshio, Minami-ku, Hiroshima 734-8510, Phone: +81-82-256-3352, Fax: +81-82-256-1968, e-mail: hirao@cecnet.co.jp, tutakawa@cecnet.co.jp
 - 5) Department of Fine and Specialty Chemicals Sales and Marketing, Performance Chemicals and Materials Research Center, Nippon Shokubai CO., LTD., Head office: Kogin Bldg, 4-1-1 Koraibashi, Chuo-ku, Osaka 541-0043, Phone: +81-6-6223-8907, Fax: +81-6-6223-9239; Research Institute : 5-8 Nishi Otabi-cho, Suita, Osaka, 564-0034, Phone: +81-6-6317-2273, Fax: +81-6-6317-2992, e-mail: akira_hattori@shokubai.co.jp, koichi_okamoto@shokubai.co.jp
 - 6) Institute of Technology, Civil Design Department, Penta-Ocean Construction CO., LTD., Research Institute: 1534-1 Yonku-cho, Nasushiobara 329-2746, Phone: +81-287-39-2116, Fax: +81-287-39-2131; Head Office: 2-2-8 Koraku, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8576, Phone: +81-3-3817-7655, Fax: +81-3-3817-7805, e-mail: Koichi.A.Yamada@mail.penta-ocean.co.jp, Kouki.Sasaki@mail.penta-ocean.co.jp

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

菊池 喜昭¹⁾・森脇 武夫²⁾・勝見 武³⁾・平尾 隆行⁴⁾・蔦川 徹⁴⁾
服部 晃⁵⁾・岡本 功一⁵⁾・山田 耕一⁶⁾・佐々木 広輝⁶⁾

要 旨

管理型海面廃棄物処分場跡地の利活用はこれまでのところ低レベルにとどまっている。管理型海面処分場跡地を高度利用しようとする、海面処分場の底面遮水基盤(粘性土地盤)を貫通するような杭の打設が必要となると考えられる。しかし、廃棄物層と遮水基盤を貫通するような杭の打設を行った場合には、廃棄物を由来とする物質が処分場外に漏れることが懸念される。そこで、底面遮水基盤を貫通するような基礎杭打設が廃棄物を由来とする物質の処分場外への漏出に及ぼす影響を主として室内実験で検討した。本論文では、まず、処分場の遮水性能の一般的な考え方と跡地利用の現状と問題点を整理した。次に、杭を打設することが廃棄物由来の物質の処分場外への漏出に及ぼす影響について、杭打設時と杭打設後の課題に分けて検討した。さらに、杭の打設による廃棄物由来の物質の処分場外への漏出の影響を低減できる工法について検討した。最後に、現場で杭を打設する際に考慮すべき事項の抽出と整理を行った。

キーワード：海面処分場，基礎杭，跡地利用，粘性土地盤

-
- 1)特別研究官(地盤・構造研究担当) 〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5037 FAX：046-844-0255 e-mail：kikuchi@pari.go.jp
 - 2)国立呉工業高等専門学校 環境都市工学科 教授 〒737-8506 広島県呉市阿賀南 2-2-11
電話：0823-73-8478 FAX：0823-73-8485 e-mail：moriwaki@kure-nct.ac.jp
 - 3)京都大学大学院地球環境学堂 教授 〒606-8501 京都市左京区吉田本町
電話：075-753-9205 FAX：075-753-5116 e-mail：katsumi.takeshi.6v@kyoto-u.ac.jp
 - 4)中電技術コンサルタント株式会社 臨海・都市部 〒734-8510 広島市南区出汐 2-3-30
電話：082-256-3352 FAX：082-256-1968 e-mail：hirao@cecnet.co.jp, tutakawa@cecnet.co.jp
 - 5)株式会社日本触媒 精密化学品営業部，機能性化学品研究所
本社：〒541-0043 大阪市中央区高麗橋 4-1-1 興銀ビル 電話：06-6223-8907 FAX：06-6223-9239
研究所：〒564-8512 大阪府吹田市西御旅町 5-8 電話：06-6317-2273 FAX：06-6317-2992
e-mail：akira_hattori@shokubai.co.jp, koichi_okamoto@shokubai.co.jp
 - 6)五洋建設株式会社 技術研究所，土木部門土木設計部
研究所：〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1 電話：0287-39-2116 FAX：0287-39-2131
本社：〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8 電話：03-3817-7655 FAX：03-3817-7805
e-mail：Koichi.A.Yamada@mail.penta-ocean.co.jp, Kouki.Sasaki@mail.penta-ocean.co.jp

1. まえがき

東京湾や大阪湾などわが国の大都市圏では大規模な廃棄物の最終処分場が海面に立地している。これらの海面処分場は建設時には沖合処分場として整備されるが、港湾区域が広がることによって、港湾区域内の重要な区域に立地するようになる。この場合、当該海面処分場の跡地の利用価値は非常に高くなり、交通用地、工業用地等として有効活用することが要求される。

このような海面処分場跡地を工業用地等として有効活用するには、橋梁や建築構造物等を支持する基礎工が必要となる。海面処分場跡地の地盤は一般に廃棄物地盤と未改良の粘性土地盤から構成されており、基礎地盤として適切でないことが多い。特に、管理型海面廃棄物処分場では、粘性土地盤は遮水性確保の観点から必要な地盤であるが、軟弱地盤であることから建物や構造物の基礎を設置するには支持力が不十分である。そこで何らかの地盤改良が必要となるが、粘性土上層部に廃棄物が存在することから地盤改良(深層混合処理等)は困難である。一方、ほとんどの管理型海面廃棄物処分場では底面遮水として自然に堆積した粘性土地盤の遮水性に期待していることから、陸上処分場とは異なり処分場内に遮水シート等の遮水工が設けられる例は少ない。

以上のことから、処分場へ構造物を建設する際の基礎工としては、軟弱地盤下部の支持地盤への基礎杭打設が現実的であると考えられる(図-1.1)。しかし、現時点では処分場の粘性土地盤を貫通して基礎杭を打設することによる粘性土地盤の遮水性能への影響が明らかでなく、杭打設により処分場内の保有水が外部へ漏出し、周辺環境に影響を及ぼす可能性が考えられる。このため、管理型海面廃棄物処分場埋立跡地は、緑地や公園、ゴルフ場等の基礎工が不要な低利用地・未利用地となっているのが現状であり、管理型海面廃棄物処分場跡地を高度利用するための遮水性を確保した杭基礎の開発が望まれている。

なお、適切な施工を行えば処分場内に杭を打設することが可能と考えられ、実際に杭が打設された事例が存在する。しかし、遮水性能に影響を与えず、経済性も有する杭打設方法は確立されていないのが現状である。

そこで、本研究では、管理型海面廃棄物処分場において、杭打設による廃棄物の地下への連込み状況と杭の打設が底面遮水基盤に与える影響を明らかにすることと、遮水基盤の遮水性能を保持できる基礎杭打設方法を見出すことを目的とする。

本論文では、まず処分場の遮水工における遮水性能の

考え方を示し、跡地利用の現状と問題点を整理した。次にそれらを踏まえ、杭打設に関する一連の室内実験結果を示し、その成果をとりまとめるとともに、現場での杭打設時における課題の抽出と整理を行った結果を報告する。

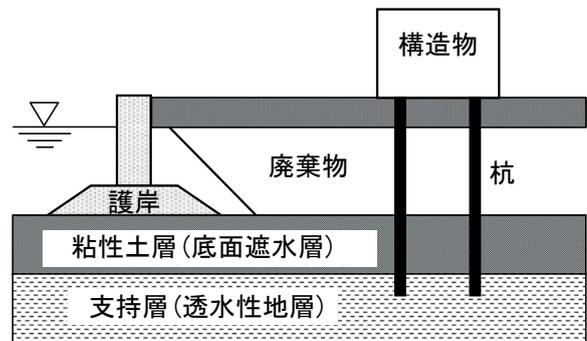


図-1.1 海面廃棄物処分場への杭打設イメージ

2. 管理型海面廃棄物処分場の遮水工における遮水性能の考え方

廃棄物最終処分場における遮水基準は、「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令」(以下、構造基準)で定められている。構造基準における遮水工の要件として、埋立地の底面および側面に、厚さ 5m 以上、かつ透水係数が $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 以下である連続した地層がある場合には、当該地層は不透水性地層とみなされ、別途の遮水工(遮水シート、アスファルト・コンクリート等の敷設)は不要となる。底面に不透水性地層がない場合については、図-2.1 に示す遮水工が別途必要となる。

ただし、構造基準は陸上の処分場を対象としたものであり、この基準を海面処分場に適用しようとする際には海面処分場の特性を十分に考慮する必要がある¹⁾。特に、保有水の移動性に関しては、陸上の処分場では垂直方向の動水勾配が大きいため、保有水の移動性が高いのに対し、海面処分場では、動水勾配が小さいため、移動性が低いという傾向にある。

海面処分場における遮水の考え方は、参考文献 1) にまとめられている。その骨子は以下のようなものである。

- 1) 保有水等の外部への浸出を防ぎ、周辺海域に環境影響を及ぼさないようにする。
- 2) 遮水性能は単に遮水工だけで成立させるのではなく、保有水の水位管理なども考慮することが必要である。
- 3) 海面処分場では複合遮水シートなどの適用が困難で

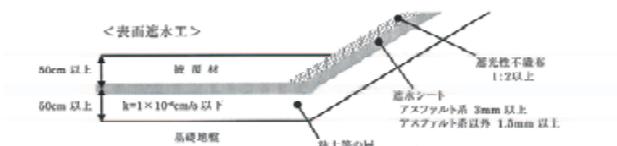
あるので、陸上処分場とは異なる遮水システムを採用することが必要である。

4) 動水勾配が小さいことから、遮水性能の評価には移流のみならず拡散についても考慮する。

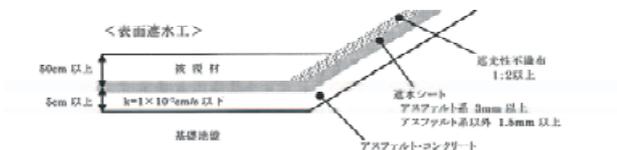
以上を踏まえたうえで、参考文献 1) では、底面の遮水および側面の遮水ともに構造基準に基づき、「厚さ 5m 以上、かつ透水係数が $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 以下」と同等の遮水性能を持たせることが必要であるとしている。なお、ここで同等の遮水性能とは、浸透時間(トラベルタイム)が同等であることとしている。

しかし、トラベルタイムは $T = n_e L / ki$ (i : 動水勾配, n_e : 有効間隙率)として求められ、 k/L が一定であっても動水勾配が変化すればトラベルタイムも変化する²⁾。また、有効間隙率が変わることによってもトラベルタイムが変化する。このような移流現象に加えて、様々な物理的・化学的因子(リダンダンシー、吸着、拡散等)が保有水の浸出に影響することにも考慮が必要である。

(イ) 厚さ 50cm 以上、 $k \leq 1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ の粘土等の層、またはこれと同等以上の層 + 遮水シート



(ロ) 厚さ 5cm 以上、 $k \leq 1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ のアスファルト・コンクリートの層、またはこれと同等以上の層 + 遮水シート



(ハ) 不織布その他の物の表面に二重の遮水シート

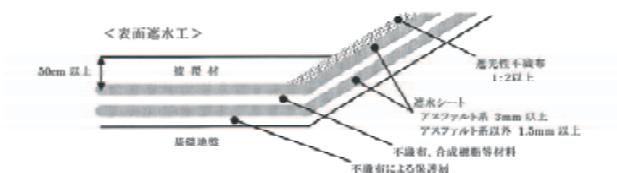


図-2.1 構造基準における遮水工の考え方(底面に不透水性地層がない場合)¹⁾

蔦川ら³⁾は、保有水の拡散に着目した研究を行い、遮水層厚(粘性土層厚)確保の重要性について述べている。拡散の理論式から、拡散による保有水の粘性土層内の移動時間は、粘性土層厚の 2 乗に比例する。このため、拡散による保有水の移動を抑制するためには、遮水層厚(粘性土層厚)の確保が重要であるとしている。

また、実際には粘土粒子は保有水に含まれる有害物質を吸着することが知られており、この影響を考慮すると、粘性土層が出来るだけ厚い方が有害物質の浸出量が減少

する。

Plata ら⁴⁾は処分場モデルの実験を実施し、重金属類の溶出は酸化還元電位の影響を受けることを示している。この研究成果によると、海面処分場のように還元環境下では、重金属類は沈殿を形成するなどして移動しにくい形態にあると考えられる。

3. 管理型処分場の跡地利用の現状と問題点

3.1 管理型処分場の跡地利用状況

管理型処分場を含めた最終処分場の跡地利用の実態については、平成 16 年度に環境省が調査している⁵⁾。当該調査は全国の廃止された最終処分場の跡地利用の状況について調査したものであり、一般廃棄物最終処分場 1,822 件、産業廃棄物最終処分場 1,569 件、昭和 46 年以前の最終処分場 578 件についてとりまとめられている。

当該調査結果の概要を図-3.1 に示す。このうち、管理型処分場に該当するのは、一般廃棄物処分場、及び管理型産業廃棄物処分場である(図の黒枠部)。管理型処分場に限定すると、未利用となっている割合が 2 割程度であり、残りの 8 割は何らかの形で利用されている。しかし、そのほとんどがグラウンド、駐車場、公園緑地、農地といった平面的利用となっており、学校、工業団地等の構造物建設を伴う高度利用は、全体の 10~15%程度にとどまっている。

このように、管理型処分場跡地において、基礎杭が必要となるような構造物の建設を伴う高度利用率は低く、管理型処分場の跡地は必ずしも有効活用がなされていないことがわかる。

3.2 管理型処分場の跡地利用事例

管理型処分場跡地の利用事例について、平野ら⁶⁾が調査を実施している。

表-3.1 に、跡地利用事例のうち高度利用が行われた事例を示す。12 箇所の処分場跡地において、体育館、学校、清掃工場等に利用された事例が確認されている。

これら 12 箇所の建築構造物の基礎構造は明確でないが、少なくとも基礎構造を杭基礎とすることができれば、管理型処分場跡地においてさらなる高度利用が可能になるものと考えられる。

3.3 管理型処分場への杭打設事例

管理型処分場への杭打設事例として、既往論文等の公表資料から管理型処分場への杭打設事例が 2 件ある。

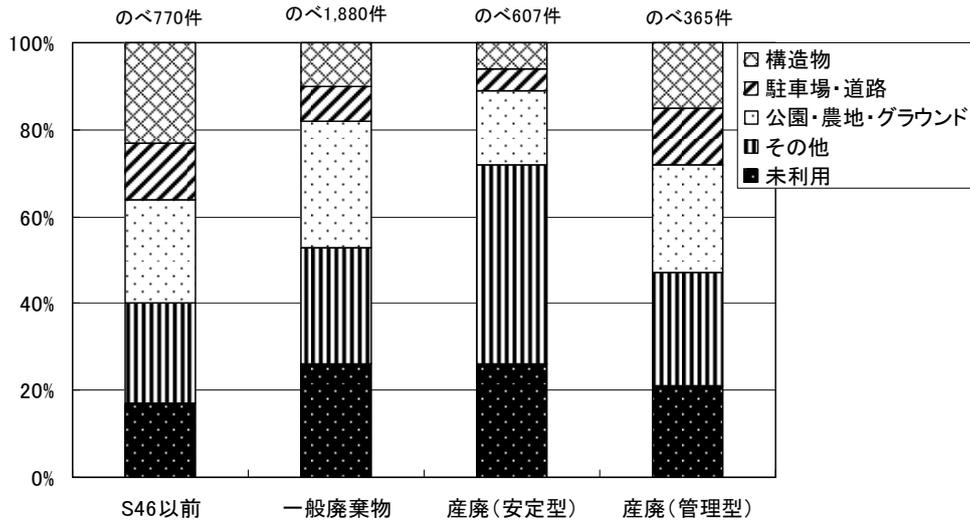


図-3.1 廃止された最終処分場の跡地利用の実態⁵⁾

(1) 第二名神高速道路桑名 IC での橋梁基礎打設⁷⁾

本事例は、日本道路公団の事業として、第二名神高速道路湾岸桑名インターチェンジの建設に伴い、橋梁基礎を処分場内に打設したものである。施工概要等を以下に記述する。

a) 処分場の概要

第二名神高速道路湾岸桑名インターチェンジの大部分が産業廃棄物処分場の埋立地内に位置している。

表-3.1 埋立跡地の利用事例(高度利用)⁶⁾

処分場名	利用方法
津島屋埋立処分地(新潟県)	体育館
末広町地先埋立地(神奈川県)	清掃工場
半田市一般廃棄物処分場(愛知県)	清掃工場
豊田環境保全センター(愛知県)	レクリエーション施設
横大路埋立地(京都府)	清掃工場
前島クリーンセンター最終処分場(大阪府)	清掃工場
龍野市一般廃棄物処分場(兵庫県)	粗大ごみ処理施設
八田処分場(福岡県)	小, 中学校
第一, 二大浦谷埋立地(福岡県)	汚泥再処理センター
今津埋立地(福岡県)	養護学校
今津第二埋立場(福岡県)	スポーツ公園, 体育館
東長崎埋立処分場(長崎県)	体育館, 運動場

産業廃棄物処分場は埋立終了後5年程度経過した管理型処分場で、地下10m程度まで掘り下げて廃棄物を埋め立てた後、最終的に地上4~10mまで廃棄物が嵩上げされている。処分場底面には1.5mm厚の超軟質ビニールシートが敷設されている。

処分場下部には深さ40m程度までN値2~5程度の軟弱粘性土が堆積しているため、高速道路建設には圧密による沈下対策が必要で、IC前後区画の高速道路本線及

びランプ部は、基礎杭を支持層まで打設する構造として高架構造で計画された。

b) 構造形式の選定

構造形式として盛土構造と橋梁構造を検討した結果により、以下の理由等から、橋梁形式(鋼管矢板井筒基礎構造)が選定されている。

- ・盛土構造とした場合、処分場内への雨水の浸透が阻害され、廃棄物が無害化されるまでの時間が半永久的になる可能性があること。
- ・産業廃棄物の性状が不均一であり、盛土構造とした場合の将来沈下量が予測できないこと。
- ・盛土案では、IC工事に伴う処分場形質変更許可が許可権者である三重県から下りないこと。

c) 遮水工破損に関する対応

鋼管矢板井筒基礎を築造することにより、基礎杭は管理型処分場底面に敷設されている遮水シートを貫通し、粘性土層下部の支持層まで打設される。このことにより廃棄物層内に滞留している保有水が周辺に浸透しないような対策が必要となる。

遮水シートの貫入破損部の補修工法に確実性がないため、処分場外周全体に遮水壁(鋼製遮水壁)を不透水層まで打設し(透水係数 10^{-7} cm/sの粘性土層に2m貫入)、外部への浸透防止を図っている。

なお、本事例は、処分場の構造基準が定められた平成10年前後に検討された案件で、杭打設に関する基準が明確でない中で検討されたこともあり、基礎杭が粘性土層を貫通することによる粘性土層下部からの保有水漏出による影響については参考文献7)には記載されていない。

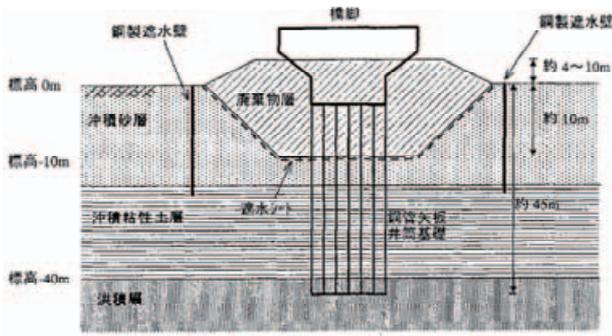


図-3.2 橋脚断面概念図⁷⁾

(2) 東京港臨海道路建設に伴う橋梁基礎杭打設^{8,9)}

本事例は、国土交通省関東地方整備局の直轄事業(東京都港湾局が施工受託)として、東京港臨海道路建設に伴い橋梁基礎杭を海面処分場跡地に打設したものである。

a) 杭打設に至る背景、契機

東京港臨海道路第(II)期事業のうち第4工区については、廃棄物処分場に位置する橋梁工区となっており、橋梁形式に対応した基礎構造物を構築する必要がある。

当該工区では、厚さ10m程度の埋立廃棄物層の下に厚さ20~40mの軟弱な荒川沖積層(沖積粘性土層)が堆積しており、構造物を支える支持層はその下部に位置する。このため、橋梁構造を支える基礎杭はこれらの層を貫いて施工する必要がある。

この厚く堆積する軟弱な荒川沖積層は、処分場の底面遮水基盤となっている。このため、基礎杭がこの層を貫くことで「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」で定められている遮水層としての機能を損なうおそれがあった。そこで、杭が粘性土層を貫いても遮水機能を保持するような基礎杭施工方法が検討された。

b) 基礎杭施工の課題、採用工法

廃棄物層の上から直接基礎杭を打設すると、廃棄物を杭先端に巻き込んだ状態で、廃棄物や保有水を粘性土層下部まで連れ込むことが考えられる。そこで、これらによる汚染拡散を防止するため、廃棄物を取り除いた状態で杭を打設できるよう「三重管基礎杭工法」で施工された。

c) 三重管基礎杭工法の施工概要

三重管基礎杭工法は、オールケーシング工法により廃棄物層を掘削・除去し、その中に外周管および本杭の2本の杭を打設し一体化する工法で、杭打設時の廃棄物の連込みを防止することができる。図-3.3に三重管基礎杭工法の概念図、図-3.4に施工手順を示す。

また、杭周面からの保有水の浸出の長期的影響は、遮水層の浸透流解析と模型杭を用いた実験により検討され、

その影響がほとんどないことが確認されている。

施工に当たっては、有毒ガス対策、ケーシングと外周管との隙間の充填などの課題があった。

3.4 管理型処分場への杭打設に関する課題

処分場跡地へ基礎杭を打設する際に生じる課題としては、大きく以下の2つの項目が想定される。

(1) 杭打設時の課題

処分場跡地への杭打設時の課題の一つとして、杭打設に伴う廃棄物等の連込み等に代表される比較的短期間で生じる問題がある。イメージ図を図-3.5に示す。

廃棄物層の上から基礎杭(既成杭や場所打杭のケーシング等)を直接打設すると、その先端部や側面に廃棄物等の物質を巻き込んだ状態で、廃棄物や保有水が粘性土層下部の透水層(支持層)まで連れ込まれ、透水層を通じて周辺環境へ影響を及ぼすことが懸念される。

3.3(2)で述べた、東京港臨海道路建設に伴う橋梁基礎杭打設の事例のように、予め廃棄物層を掘削除去した後、杭を打設すれば、杭打設時の廃棄物の連込みを防止することができるが、多大な施工費用を要すること、及び掘削した廃棄物の処理が必要となる等の問題がある。

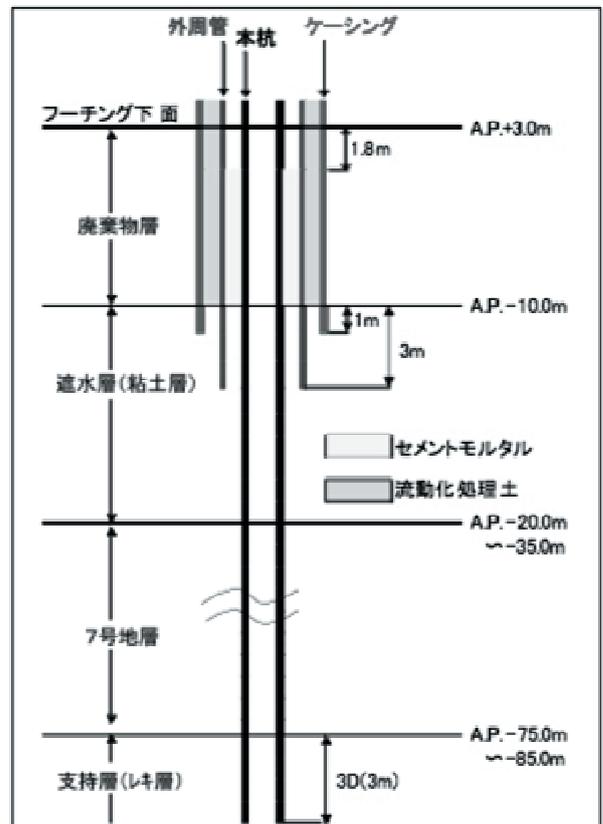


図-3.3 三重管基礎杭工法の概念図⁸⁾

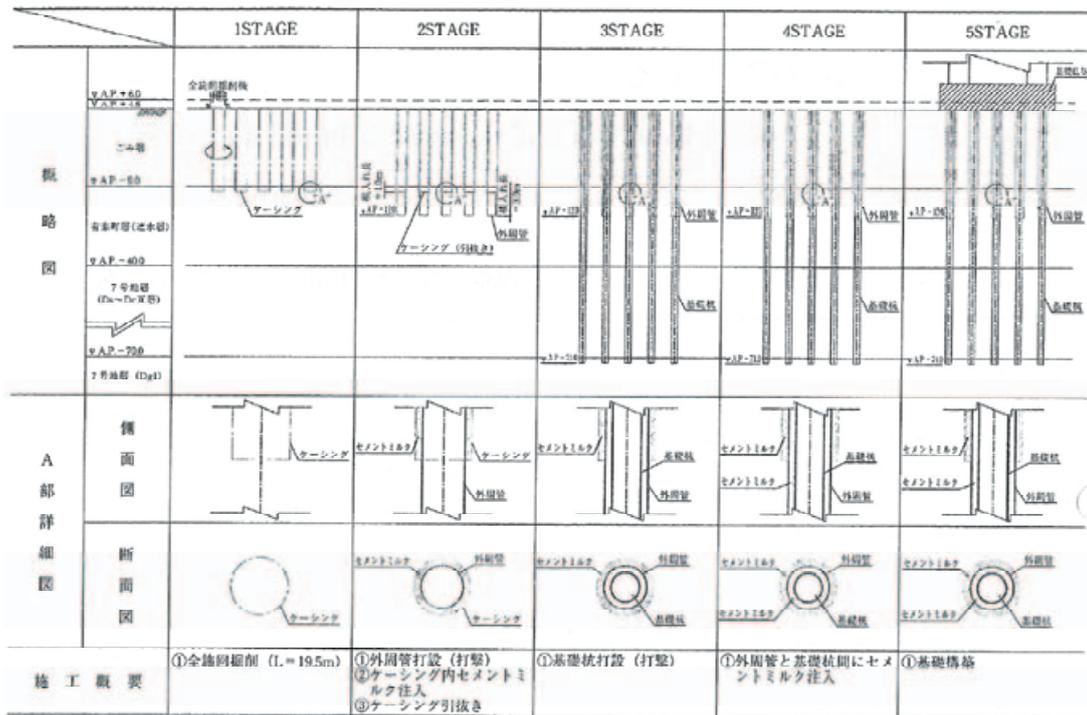


図-3.4 三重管基礎杭工法の施工手順⁹⁾

以上のことから、廃棄物層を事前に掘削せず直接杭を打設でき、かつ廃棄物や保有水等を粘性土層下部へ連れ込まないような、環境安全性が確保できる効果的、経済的な杭打設技術の開発が必要となる。

(2) 杭打設後の課題

課題の二つ目としては、図-3.6 に示すように、杭打設後に杭と地盤との境界面を通じて保有水が流れるなどの杭を打設した後に比較的長期間にわたり生じる問題がある。また、杭を打設した後に地震に遭遇した場合には杭と地盤との間に空隙が発生するおそれがあるという問題がある。

前者については、遮水層である粘性土層を貫通して支持層まで杭を打設することにより、杭と粘性土層の境界面に隙間や透水性の高い部分が生じ、この部分を通じて処分場内の保有水が漏出し、周辺環境へ影響を及ぼすことが懸念される。このため、杭打設による杭と粘性土層との境界面の透水性に及ぼす影響を確認することが必要となる。また、境界面の透水性を低減させる経済的で効果的な杭打設技術の開発が求められている。

後者の地震時の問題については、処分場へ杭を打設した後に地震が発生した場合、地盤(底面遮水基盤)や杭に変形が生じることが想定され、その結果、地盤と杭に隙間ができる可能性がある。

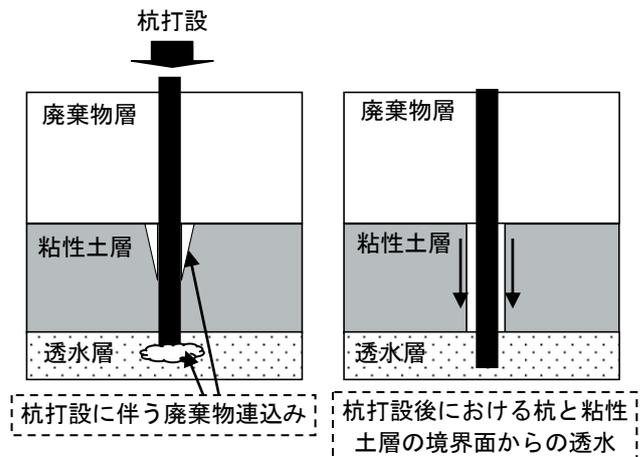


図-3.5 杭打設時の影響イメージ図

図-3.6 杭打設後の影響イメージ図

この隙間の発生により、杭と地盤との境界面の透水性が高くなり、保有水が処分場外へ浸出し、周辺環境へ影響を及ぼすことが懸念される。

4. 処分場跡地への杭打設に関する検討

3.4 に示した課題を解決するため、「杭打設時の課題」、「杭打設後の課題」、「膨潤性止水材の効果」の3点について検討した。特に、「杭打設後の課題」については、

さらに、「粘性土地盤と杭等の境界面における透水特性」、
「保有水の移流拡散による遮水層への影響深度」、
「杭打設後における地震時の影響」に細分して検討した。

4.1 杭打設時の課題

杭打設時においては、杭周面及び先端部から廃棄物や保有水を下方に連れ込むことが懸念される。そこで、杭打設時の問題として、杭打設時の廃棄物等の連込み状況を確認するため、廃棄物を砂で模した室内実験を実施した。なお、廃棄物は様々な性状を呈するため、実験に用いる廃棄物により実験条件や実験結果が異なったものとなる。このため、廃棄物の代用として、砂を用いたのでは、様々な性質を持つ廃棄物のすべての性質を再現することはできない。しかし、ここでは、実験条件を統一でき、かつ連込み状況を確認しやすいとの理由から、砂を用いることとした。

杭打設時には、処分場の粘性土地盤は圧密が始まる前の場合、圧密途中である場合、圧密が完了している場合など様々な状態が想定され、これら圧密状態によって廃棄物等の連込み状況に違いがあることが想定される。そこで実験条件として、粘性土地盤の圧密状態が過圧密状態と正規圧密状態の2パターンを設定し、廃棄物等の連込みについて検討した。

(1) 粘性土地盤が過圧密状態での廃棄物等の連込み¹⁰⁻¹²⁾

a) 実験概要

ここでは、土槽で作成した模型粘性土地盤の上載荷重を作用させない条件で杭の貫入実験を行った。この状態では粘性土地盤は過圧密状態にあるため、杭の貫入実験をすると、粘性土地盤表層の攪乱が生じやすく、また粘土と杭との付着性が低いため杭と粘土との間に隙間が生じやすいものと考えられる。このため、この条件は、杭打設に伴う廃棄物等の連込みの影響が大きい条件となっているものと考えられる。

ここでは、杭の形式(開端杭か閉端杭か)と杭先端の形状を変えて杭の貫入実験を行い、杭打設に伴う粘性土層への廃棄物等の連込み状況を実験的に検証した。

1) モデル地盤材料

モデル地盤は、遮水基盤を粘性土で、廃棄物を砂で模して作製した。粘性土は山口県徳山下松港沖から採取した沖積粘性土、砂は宇部珪砂(6号)を利用した。粘性土及び砂の諸元を表-4.1に示す。

なお実験にあたり杭打設によって連れ込まれる砂と

粘性土をふるいにより分離する必要があるため、粘性土は250 μ m以下、砂は宇部珪砂を250 μ m以上に調整して利用した。

表-4.1 粘性土及び砂の諸元

○粘土

土粒子密度	2.773 g/cm ³	塑性限界	47.9%
液性限界	95.9%	塑性指数	48.0
透水係数	50kPa : 1.0~2.0 $\times 10^{-7}$ (cm/s) 120kPa: 0.6~0.7 $\times 10^{-7}$ (cm/s)		

○砂

品目	宇部珪砂:6号		
粒度分布		化学組成	
フルイ目	フルイ残(%)	成分	(%)
700 μ m	0	Igloss	1.1
590 μ m	0	SiO ₂	96.2
420 μ m	22	Al ₂ O ₃	1.4
300 μ m	34	Fe ₂ O ₃	0.7
210 μ m	26	CaO	0.1
150 μ m	12	MgO	0.2
105 μ m	5		
75 μ m	1		
75 μ m以下	0		
計	100		98.7

2) 実験装置、実験方法

実験装置の概略図を図-4.1に示す。図-4.1に示す実験装置に、海水を加え含水比を調整して(w=200%)脱気した粘土を投入し、一次的に3t法による予圧密(圧密応力50kPa)を行い、粘性土層(h \approx 8cm)を作成し、一旦除荷した後に、粘性土層上部に海水で飽和させた砂(h=10cm)を水中落下により敷設した。

その後、除荷した状態のままモデル地盤中央部にアルミ杭(L=17cm, ϕ 10mm)を3cm/minの速度で粘性土層下部まで圧入打設した。

杭打設後、即座に杭周縁の粘土試料を深度方向に1cmずつ採取し、試料をふるい(250 μ m)により粘土と連れ込まれた砂に分離し、深度毎に試料中の砂重量を測定することで、粘土中の砂の連込み量の深度分布を確認した。

3) 実験ケース、実験条件

実験実施にあたり、杭先端形状を変化させて、杭打設時の砂連れ込み状況を確認するものとした。

用いた杭は、先端閉塞杭と開端杭(パイプ杭:肉厚0.5mm)、及びペンシル杭とした。ペンシル杭は図-4.5に示すように、先端角度 θ を0度、30度、45度、60度、75度の5ケースに変化させた。 θ が大きいほど先端が鋭

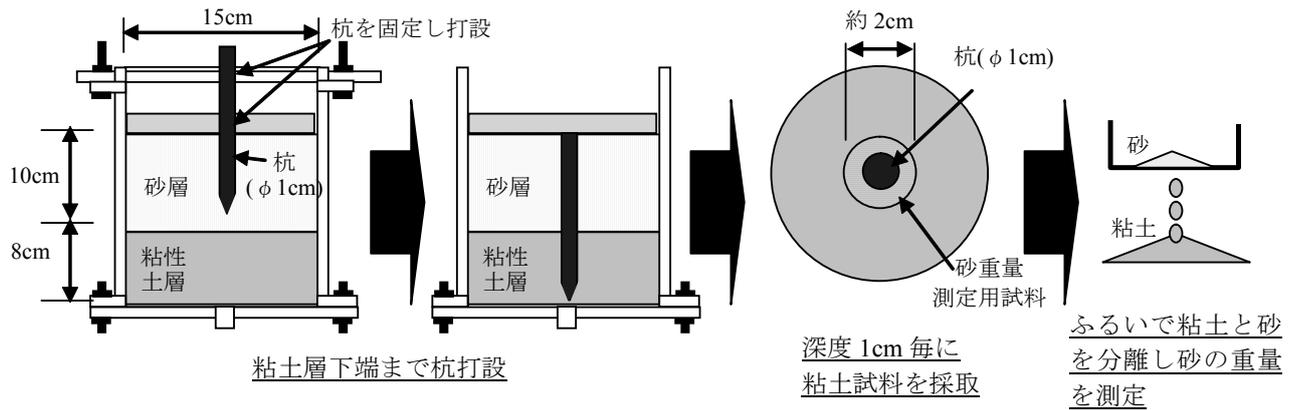


図-4.1 実験装置概略図

角であることを意味している。

b) 実験結果

1) 先端閉塞杭と開端杭における砂の連込み深度分布

先端閉塞杭と開端杭における砂の連込み深度分布を図-4.2に示す。

粘性土地盤が過圧密状態で杭を打設した場合には、先端閉塞杭では深度6cmまで砂の連込みが確認されたのに対し、開端杭では3cm以深で砂の連込みがほとんど確認されなかった。これは、杭径に換算すると、それぞれ杭径の6倍、3倍となる。

これらにより、杭打設による杭側面部からの砂の連込み低減には開端杭が優位であることが確認された。それは以下の理由によるものと考えられる(図-4.3参照)。

- ・先端閉塞杭の場合には、杭打設時に杭が砂を押し退けることにより杭と砂との間に摩擦力が働くとともに、杭先端部に砂を連れ込んだまま杭が打設され、杭側面及び先端部に付着した砂が粘土深部まで連れ込まれる。
- ・開端杭の場合には、杭打設時に杭内部に砂や粘土が入ることで、先端閉塞杭に比べ杭外周面での砂との摩擦が小さくなり、また杭先端部における砂の連込みが起こりにくいことから、結果的に杭に付着した砂の連込み量が少なくなる。

2) ペンシル杭における杭先端部の砂の連込み量

閉塞杭及びペンシル杭の杭側面における砂の連込み量の深度分布を図-4.4に示す。傾向としては前述の閉塞杭と同様で、杭先端の形状によらず、杭打設による砂の連込みは深度6cm程度に留まっていることが確認された。

ペンシル杭における杭先端部の砂の連込み量を図-4.5に示す。なお、先端角度を変化させた5ケース(ケース1~5)のそれぞれで2回ずつ実験を実施した(ケースA,B)。

実験の結果、杭先端部分からの砂の連込みについては、最も砂の連込みが多いケース1($\theta=0$ 度)で約0.5gの砂が連れ込まれたのに対し、最も先端が鋭角であるケース5($\theta=75$ 度)では約0.1gと連込み量は1/5に低減されるなど、ペンシル杭で先端が鋭角となるほど砂の連込み量は低減された。

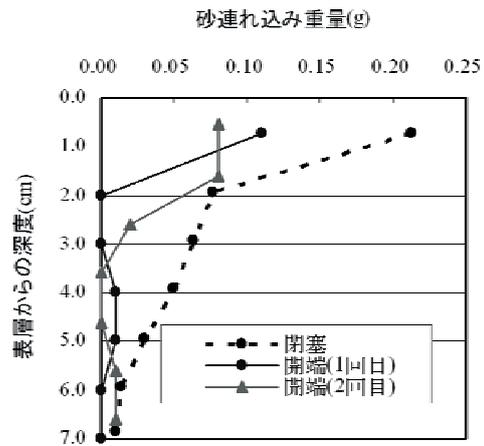


図-4.2 杭側面における砂連込み量の深度分布

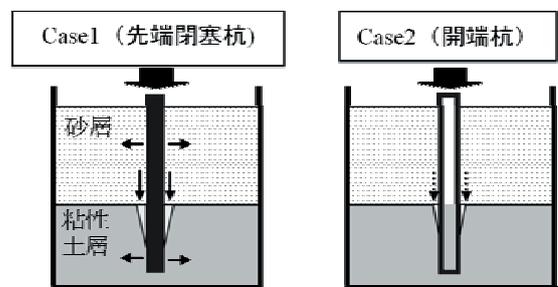


図-4.3 杭打設時の砂連れ込み状況イメージ

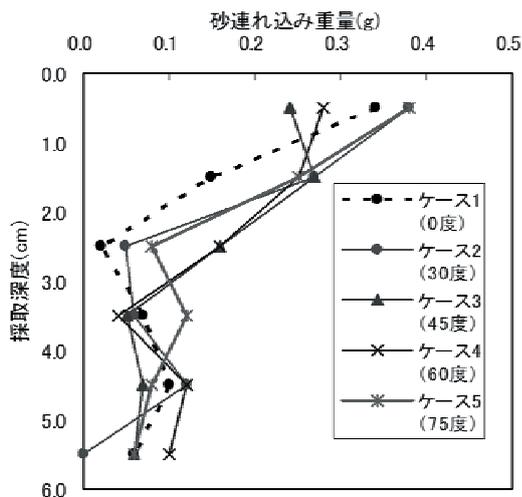


図-4.4 杭側面における砂連込み量の深度分布

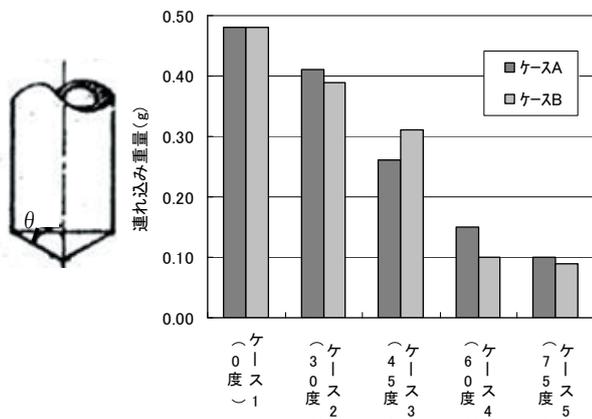


図-4.5 杭先端部における砂の連込み量

これらから、杭先端をペンシル型にしても杭周面での連込み状態にはほとんど変化がないものの、杭先端部への砂の連込み低減には杭先端が鋭角なペンシル型の杭が有効であることが確認された。これは以下の理由によるものと考えられる(図-4.6 参照)。

- ・先端閉塞杭の場合には杭先端部に砂による主働くさびが形成され、粘性土層に到達した後もこの砂が主働くさびとして連れ込まれる。
- ・ペンシル杭の場合には杭先端部に砂による主働くさびが形成されず、砂がほとんど連れ込まれない。

(2) 粘性土地盤が正規圧密状態での廃棄物等の連込み¹³⁾

a) 実験概要

(1)では粘性土地盤が過圧密状態での実験を実施したが、実際の処分場では、粘性土地盤へ載荷圧が与えられ、

正規圧密状態となっている。この場合は、(1)の実験条件に比べると杭打設時に粘土表面の攪乱や杭と粘土との境界面の隙間は発生しにくく、廃棄物等の連込み量は少なくなると考えられる。ここでは、粘性土地盤へ載荷圧を与え正規圧密状態とした場合における粘性土地盤に杭を貫入する際の透水性の変化および廃棄物等の連込み状況を確認するため、小規模実験と中規模実験に分けて実施した。小規模実験は、中規模実験に先立ち、杭先端形状や貫入方法による違いを検討するために4ケース(パイプ、先端閉塞、ペンシル、中堀り)を実施した。また、中規模実験では、小規模実験の結果を受け、特徴的な結果を示した2ケース(先端閉塞、中堀り)を実施した。

1) 実験方法

実験装置の概要図を図-4.7、図-4.8 に示す。試料(粘性土+覆砂)に圧密圧力を作用させ、圧密完了後に載荷圧を保ちながら杭を貫入させ、杭貫入前後の透水系数の変化により、遮水機能への影響を確認した。透水系数は、小規模実験および中規模実験とも、装置下部から定期的に測定した透水量から算出した(透水量の測定は概ね1日に1回)。なお中規模実験土槽は、側壁から流れる水の影響を考慮して、集水域を中央部と周辺部に分けて透水量を計測できる構造としている。また実験終了後、目視により杭貫入による砂(廃棄物を模擬)の連込み状況を確認した。

2) 実験条件

実験に使用した粘性土の物性を表-4.2 に示す。なお、上部覆砂には珪砂8号(中央粒径 $D_{50}=0.08\text{mm}$)を使用した。小規模実験に使用した粘性土は、名古屋粘土を含水比110%のスラリー状に加水調整して、 75kg/m^3 のベントナイトを添加し、初期透水系数 $k=1.0 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ に調整した。中規模実験に使用した粘性土は、宇部粘土を原料土として含水比調整し透水系数 $k=1.0 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ に調整した。

設定土圧や動水勾配、杭打設方法などの実験条件を表-4.3 に示す。小規模実験では深度20m相当の土圧、中規模実験では深度10m相当の土圧を再現した。透水量は模擬地盤を作成後、所定の圧力にて粘性土層の圧密が

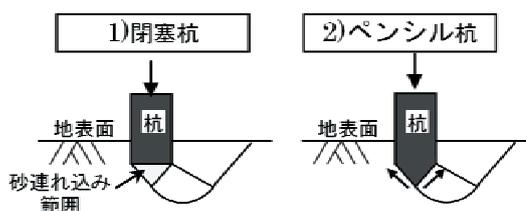


図-4.6 杭打設時の砂連込み状況イメージ

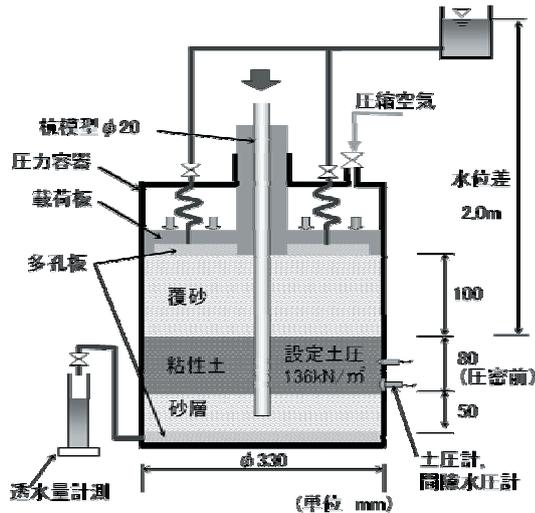


図-4.7 小規模実験装置概略図

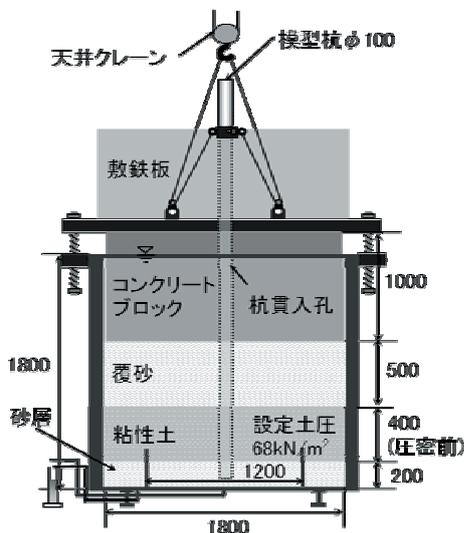


図-4.8 中規模実験装置概略図

表-4.2 粘性土の物性

実験ケース		小規模実験	中規模実験
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)		2.65	2.59
原料土の初期含水比 w (%)		77.7	122.1
粒度組成	砂(%)	6.2	7.5
	シルト(%)	68.6	41.2
	粘土(%)	25.2	51.3
コンシステンシー	W_L (%)	65.4	111.6
	W_p (%)	33.0	45.4
	I_p	32.4	66.2

十分完了した後に、圧力をかけたまま杭打設日を挟んで前後1週間計測した。粘性土層構築時には $k=1.0 \times 10^{-6}$ cm/s程度であるが、圧密終了時には $k=4.0 \times 10^{-8}$ cm/s

程度まで低下した。なお、透水係数の算出にはダルシー則を用いた。

本実験で用いた杭は、小規模実験では $\phi 20$ mm、中規模実験では $\phi 120$ mmの金属製のものである。

表-4.3 実験の条件

実験ケース	小規模実験	中規模実験
設定土圧(kN/m ²)	136 (深度20m相当)	68 (深度10m相当)
動水勾配	40	7
杭打設方法	打撃 中掘り	圧入 中掘り

b) 実験結果

小規模実験(パイプ型および中掘り)における透水係数の経時変化を図-4.9に示す。杭貫入前後で、全体としての遮水性には変化がないことが分かる。しかしながら、写真-4.1に示すようにパイプ型の実験終了後の解体断面をみると、粘性土層へ杭径程度の深さまで砂の連込みが生じていることが分かる。このことは、局所的ではあるが粘性土層厚の減少によりトラベルタイムが小さくなっていることを示唆している。一方、中掘り型の解体断面では砂の巻き込みは生じていない。

中規模実験(先端閉塞型および中掘り)の透水係数の経時変化を図-4.10に示す。透水量は中央部と周辺部でそれぞれ計測し、透水係数の算出を行ったが、側壁からの流れの影響は生じていなかったため、全断面から集水さ

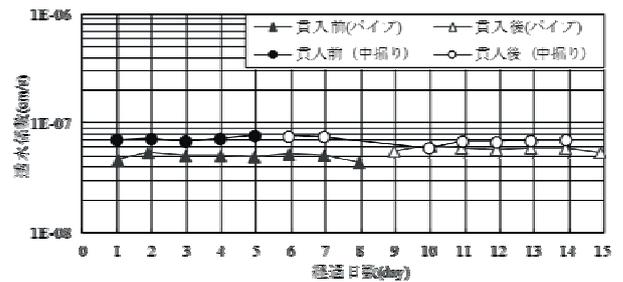


図-4.9 透水係数の経時変化(小規模実験)

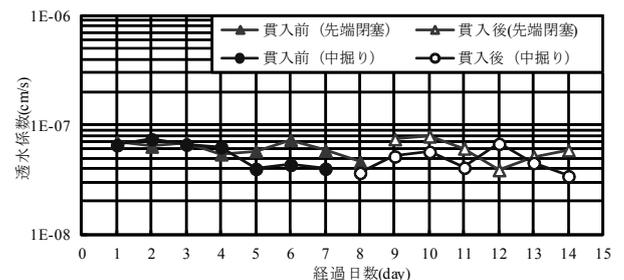


図-4.10 透水係数の経時変化(中規模実験)

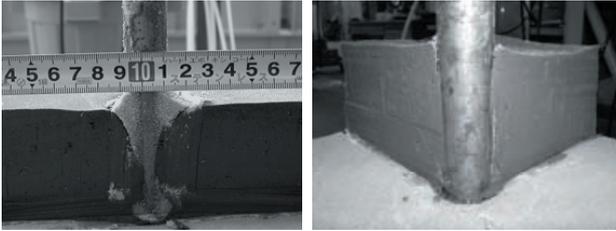


写真-4.1 解体断面:小規模実験
(左:パイプ型, 右:中掘り型)

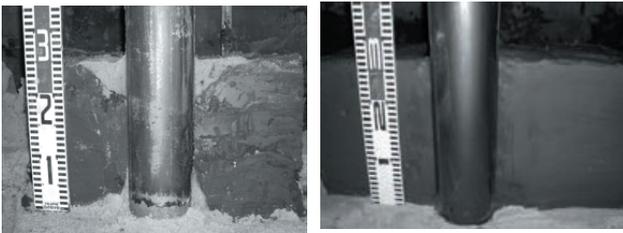


写真-4.2 解体断面:中規模実験
(左:先端閉塞型, 右:中掘り型)

れる透水量をもとに透水係数を算出した。小規模実験と同様に、杭打設に伴う遮水性の低下はみられなかった。しかしながら、写真-4.2 に示すように先端閉塞型の実験終了後の解体断面をみると遮水基盤へ杭径程度の深さまで砂の連込みが生じていることが分かる。一方、中掘り型の場合には、砂の連込みが生じていない。

小規模実験結果および中規模実験結果から、底面遮水基盤(粘性土層)に損傷を与えず遮水性を維持する杭打設工法としては、透水性には違いが見られなかったが、砂の連込み特性から見て中掘り工法が適しているといえる。

(3) 杭打設時に関する研究の結論

(1), (2)から、杭側面における粘性土層への砂の連込み深度は、杭打設時の粘性土層の圧密状態の違いにより異なり、載荷圧を与えていない過圧密状態である(1)では連込み深度が杭径の 3~6 倍であったのに対し、粘性土層が正規圧密状態である(2)では杭径程度と、(2)の方が優位となった。

また、(1)に示すとおり、杭先端部においては一定量の砂が連れ込まれたが、杭の形状をペンシル杭とする等の工夫をすることにより、杭先端部における連込み量が低減できることが確認された。また杭打設方法に着目すると、中掘り工法が適しているということが確認された。

杭打設時の粘性土層の圧密状態の違いにより砂の連込み深度が異なった理由としては、以下の事項が考えられる。

- ・ 載荷圧のない状態(過圧密状態)での杭の打設では、杭と粘土との境界面に空隙が生じやすく、杭周面に付着

した砂が深部まで連れ込まれるものと考えられる。

- ・ 杭打設時に粘性土地盤へ載荷圧を加えた場合(正規圧密状態)では、粘土と杭との境界面への直応力が働き、結果的に粘土と杭との境界面の隙間が閉塞し、砂の連込みが杭径程度に留まるものと考えられる。

なお、実験では廃棄物ではなく、廃棄物を模した砂を用いており、定性的には連込み現象の特徴を把握していると考えられるものの、実際の廃棄物の連込み現象とは異なる可能性があることに留意する必要がある。

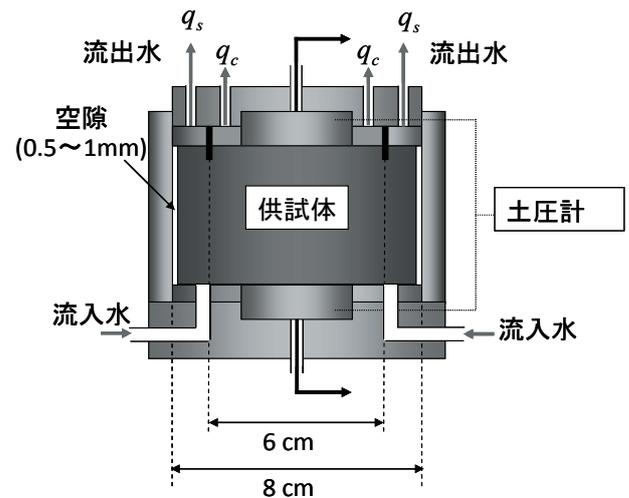


図-4.11 剛壁型透水試験装置¹⁷⁾

表-4.4 実験に用いた粘土試料の物性¹⁷⁾

	海成粘土	カオリン粘土	深草粘土	混合土
液性限界 (%)	43.9	36.8	58.2	41.9
塑性限界 (%)	24.0	19.4	29.2	21.4
塑性指数	19.9	17.4	29.0	20.5
土粒子密度 (g/cm ³)	2.64	2.42	2.67	2.69

4.2 粘性土地盤と杭等の境界面における透水特性

杭打設後の問題として、粘性土地盤と杭等の境界面の透水特性について、圧密状態、杭と地盤との隙間の存在、及び鋼材の粗度の違いの影響の観点から検討した。

(1) 粘性土地盤と側壁の境界面の透水特性¹⁴⁻¹⁷⁾

a) 実験概要

処分場への杭打設による遮水基盤への影響を評価するため、剛壁型透水試験装置を用いて透水試験を行い、試験装置の側壁と粘性土との境界を粘性土地盤と杭との境界にみたてて、境界面における透水特性の評価を行った。

実験装置は図-4.11 に示す通りである。主な検討項目

は、①打設前の粘土の圧密度の違いが透水・周面摩擦に与える影響、②粘土の種類の違いが透水に与える影響、③杭に働く周面摩擦と透水との関係、である。

①に関しては、杭打設前の粘土の圧密状態による影響を検討するために、供試体作製時の予備圧密における最終圧密応力(先行圧密応力 P_{pre})を 90 kPa と 180 kPa の 2 種類で行った。これは廃棄物の埋立深さを 10 m～20 m、廃棄物層の単位体積重量を 10 kN/m³ として圧密進行中の地盤を想定したものである。

②に関しては、海成粘土、カオリン粘土、深草粘土、ベントナイト混合土(深草粘土：ベントナイト = 100：5)の 4 種類の土試料を用いて実験を行っている。実験に使用した土試料の物性値は表-4.4 に示す通りである。

③に関しては、杭打設後の粘土の圧密の進行によって周面摩擦が増加することはすでにネガティブフリクションとして知られているところであるが、この周面摩擦力が杭と粘土界面の透水と直接の関係があるか検討したものである。

b) 実験方法

図-4.11 に示す剛壁型透水試験装置は、圧密装置にセットすることにより供試体を圧密することができ、その際に上下面の土圧計から供試体側面に働く摩擦力を算定できるとともに、ビューレットにより水頭差を与えることで供試体の透水性を測定できる。また、この透水試験装置では、透水試験時に排出側となる上部ペダスタルの中心から直径 6 cm より内側部分の透水量 q_c と外側部分の透水量 q_s が別々に計測できるようになっており、その差から、後述の界面透水量係数を算出している。

なお、深草粘土および混合土については、 q_c と q_s と

を分けて計測できていないことから、粘土自体の透水係数は柔壁型透水試験を別途実施して求め、界面透水量係数の値を得たものである¹⁶⁾。

試験方法は以下の通りである。海成粘土については採取時の含水比(55%)、他の試料については液性限界の約 1.5 倍の含水比にそれぞれ調整したスラリー状の粘土試料を、試験装置とは別の圧密リングに充填し、所定の圧密応力により予備圧密を実施する。予備圧密時の最終圧密応力(先行圧密応力 P_{pre})は杭打設前の粘土層の応力状態(圧密途中であれば圧密度も考慮した)に対応すると考えた。

予備圧密を終えた供試体を圧密リングから取り出し、試験装置の金属セル($\phi = 8$ cm)よりも 1～2 mm 程度小さめに成形する。これにより、杭打設直後に鋼管杭と粘土層の境界面に空隙が生じた状況を想定した。また、case-5 は、供試体周囲の空隙に加えて直径 4 mm の水みちを供試体側面に意図的に設けた供試体を用いて実験を行ったものである。これは、杭打設時に杭周囲の粘土に水みちが生じた場合に、粘土層の圧密沈下によって水みちが閉塞するか否か、および水みちによる透水への影響を検討したものである。

その後、本圧密過程として所定の鉛直荷重(本圧密応力 P)を載荷し供試体を圧密・変形させることにより、原地盤と空隙閉塞の向きは異なるものの杭打設後の粘土地盤の圧密沈下による空隙の閉塞状況を模擬したものとした。その際に、上下の土圧計により供試体上下面の土圧を測定し、その差を圧密時の供試体側面に働く摩擦力とした。

表-4.5 剛壁型透水試験における試験ケースと荷重段階

No.	実験内容	試料	先行圧密応力 P_{pre} (kPa)	荷重段階 本圧密応力 P (kPa)
case-1	空隙あり	海成粘土	90	40, 90, 120, 150
case-2			180	180, 210, 240
case-3		カオリン粘土	90	40, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 330, 390
case-4			180	90, 180, 210, 240, 270, 330, 390
case-5	空隙+水みち	海成粘土	180	10, 40, 90, 180
case-F1	空隙あり	深草粘土	90	90, 135, 180
case-F2			180	90, 135, 180, 360
case-F3		90	11.25, 22.5, 33.75, 45, 67.5, 90, 135, 180, 270, 360	
case-F4		180	11.25, 22.5, 45, 67.5, 90, 135, 180, 270, 360	
case-M1		混合土	90	11.25, 22.5, 33.75, 45, 67.5, 90, 135, 180
case-M2			180	90, 180, 270, 360

本圧密応力による載荷を 24 時間実施した後、動水勾配約 30 で変水位透水試験を行った。透水試験終了後に、次の載荷段階へと移り、載荷と透水を最終載荷段階まで繰り返した。

なお、各載荷段階における透水試験終了の判断基準として、流入量と流出量がほぼ等しくなること(流量比 0.75～1.25)、および透水係数の値が安定すること(25～50%以内の変動)の 2 条件を満たすデータを 4 回以上取得できることとした。

試験ケースは表-4.5 に示す通りであり、本圧密過程における各載荷段階は基本的に先行圧密応力 P_{pre} よりも小さい過圧密状態で試験を行った後に、予備圧密による先行圧密応力 P_{pre} よりも大きい、すなわち正規圧密領域となる本圧密応力 P を載荷し、過圧密領域から正規圧密領域に至る界面透水特性の試験を行った。

本圧密中に供試体側面に働く摩擦力は、供試体に働く鉛直方向の力のつりあい(図-4.12 参照)から (4.1) 式により算出した。

$$\sigma_i \cdot A + \gamma_{sat} \cdot L \cdot A = \sigma_b \cdot A + F \cdot L \cdot U \quad (4.1)$$

ただし、 σ_i : 供試体上面における全応力 (kPa)

A : 供試体断面積 (m^2)

γ_{sat} : 供試体の飽和単位体積重量 (kN/m^3)

L : 供試体高さ (m)

σ_b : 供試体下面における全応力 (kPa)

F : 側面摩擦力 (kPa)

U : 供試体周長 (m)

図-4.11 に示した透水試験装置では、上部ペDESTAL の直径 6 cm の内側部分の透水量 q_c と外側部分の透水量 q_s を別々に計測することから、内側部分の透水量と外側部分の透水量の流出量比 q_c/q_s と流入貯留槽であるビュレットの断面積比 a_c/a_s が等しいとして a_c, a_s を求め、この a_c と a_s を用いて (4.2)～(4.5) 式により粘土自体の透水係数 k_c と側壁漏れを含んだみかけの透水係数 k_s を算出した。

$$k_c = \frac{a_c \cdot L}{A_c \cdot (t_2 - t_1)} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (4.2)$$

$$a_c = \frac{q_c}{q_c + q_s} a \quad (4.3)$$

$$k_s = \frac{a_s \cdot L}{A_s \cdot (t_2 - t_1)} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (4.4)$$

$$a_s = \frac{q_s}{q_c + q_s} a \quad (4.5)$$

ただし、 k_c : 粘土自体の透水係数 (m/s)

k_s : 側壁漏れを含んだみかけの透水係数 (m/s)

A_c : 内側部分の供試体断面積 (m^2)

A_s : 外側部分の供試体断面積 (m^2)

a : ビュレットの断面積 (m^2)

h_1 : 計測開始時刻 t_1 における水頭差 (m)

h_2 : 計測終了時刻 t_2 における水頭差 (m)

さらに、これらの実験では以下の(4.6)式を用いて界面透水量係数 $K_L(m^2/s)$ を算出し、側壁漏れの指標とした。

$$Q_m = \left(\frac{\pi D^2}{4} k_c + \pi D \cdot K_L \right) \cdot i \quad (4.6)$$

ただし、 Q_m : 流入量(m^3/s)

D : 供試体直径(m)

k_c : 粘土自体の透水係数(m/s)

i : 動水勾配

K_L : 界面透水量係数(m^2/s)

すなわち、供試体に流入した流量 Q_m は、「直径 D の供試体からの透水量」と「金属セルと供試体界面からの透水量」の合計であるとして、界面透水量係数 $K_L(m^2/s)$ を求めたものである。

c) 実験結果

海成粘土・カオリン粘土における剛壁型透水試験により得られた粘土自体の透水係数 k_c 、および側壁漏れを含んだみかけの透水係数 k_s と本圧密応力の関係を図-4.13 に示す。case-3, case-4, case-5 の初期段階においては、得られた流量のほとんどが側壁漏れによるものであり、 q_c はほぼゼロであったことから、グラフには側壁漏れを含んだみかけの透水係数 k_s のみを表示した。

海成粘土(case-1, case-2, case-5)、カオリン粘土(case-3, case-4)ともに先行圧密応力と等しい本圧密応力($P = P_{pre}$)となる載荷段階で、外側部分のみかけの透水係数 k_s は粘土自体の透水係数と同じオーダーとなっていることから、正規圧密領域で空隙および水みちの大部分は閉塞していると考えられる。また、全ての載荷段階において側壁漏れを含んだみかけの透水係数が粘土自体の透水係数よりも大きくなっていることがわかる(k_s

> k_c). 粘土供試体中の透水が一次元と仮定すると、この k_s と k_c の差は金属セルと粘土界面からの透水の影響と考えられる。

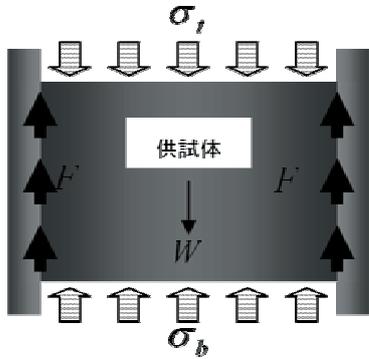


図-4.12 供試体側面に働く力のつりあい¹⁷⁾

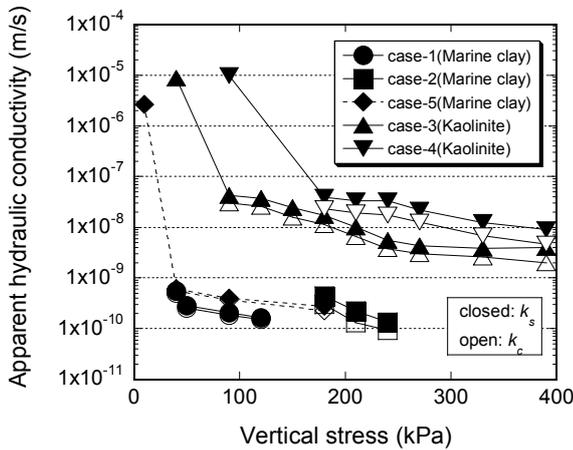


図-4.13 海成粘土とカオリン粘土を用いた場合のみかけの透水係数¹⁷⁾

界面透水量係数と本圧密応力の関係を海成粘土・カオリン粘土について図-4.14 に示した。空隙が閉塞する以前の過圧密領域では側壁漏れが生じ界面透水量係数が高くなっているが、空隙閉塞とともに界面透水量係数が減少し、側壁漏れが抑制されていることがわかる。

先行圧密応力の違いによる界面透水量係数の大きな違いがみられないことから、杭打設前の粘土の圧密度の違いが界面透水に与える影響はほとんどないと考えられる。水みちを作った case-5 に関して、界面透水量係数は各载荷段階において同じ海成粘土を用いた case-1, case-2(水みちなし)における値と大きな違いがみられないため、空隙閉塞後は水みちによる透水への影響はほとんどないと考えられる。

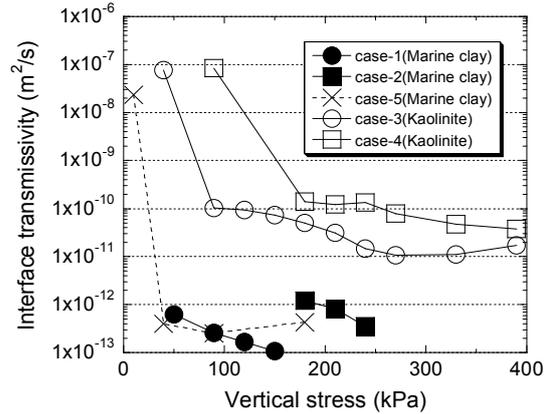


図-4.14 海成粘土とカオリン粘土を用いた場合の界面透水量係数¹⁷⁾

得られた界面透水量係数から遮水性能を議論するには、透水係数との比較が必要となるが、透水量係数と透水係数は次元が異なるため直接比較できない。そこで、直径 D (m) の杭を打設したときの杭周面からの透水量 $Q_L (= K_L \cdot \pi D \cdot i)$ と、杭の体積分に透水係数 k_c' の粘土が存在すると仮定したときの粘土を通過する透水量 $Q_c' (= k_c' \cdot \pi D^2 / 4 \cdot i)$ が等しいと仮定すると、後者の仮想粘土の透水係数は $k_c' = (4/D) \cdot K_L$ で表される。この k_c' (m/s) は前者の杭周面を伝う透水量と等しい透水量を得る、杭と同体積の仮想粘土の透水係数であり、すなわち換算透水係数と考えることができる。

杭径 $D = 0.5$ m として、実験で得られた透水量係数の値から換算透水係数 k_c' を算出すると、海成粘土で 10^{-12} m/s オーダー、カオリン粘土・深草粘土・混合土で $10^{-10} \sim 10^{-11}$ m/s オーダーとなり、構造基準の 1×10^{-7} m/s と比べると非常に低い値であった¹⁷⁾。

このことから、換算透水係数で評価する限りは杭打設による空隙閉塞後の透水の影響はほとんど問題にならないレベルであると言える。

海成粘土・カオリン粘土における側面摩擦力の最大値と本圧密応力の関係を図-4.15 に示した。海成粘土に関しては各载荷段階で側面摩擦力は約 0 kPa となり計測できていないケースもみられたが(case-1, case-5)、カオリン粘土に関しては鉛直応力の増加に対して側面摩擦力が線形的に増加する傾向がみられた。

また、case-3($P_{pre} = 90$ kPa)と case-4($P_{pre} = 180$ kPa)を比較すると、先行圧密応力に関係なく側面摩擦力の大きさはほぼ同じ値となっている。このことから、杭打設前の粘土の圧密度の違いが周面摩擦に与える影響はほとんどないと考えられる。

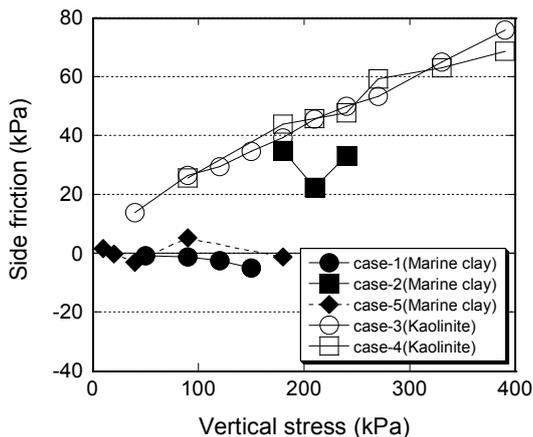


図-4.15 海成粘土とカオリン粘土を用いた場合の側面摩擦力¹⁷⁾

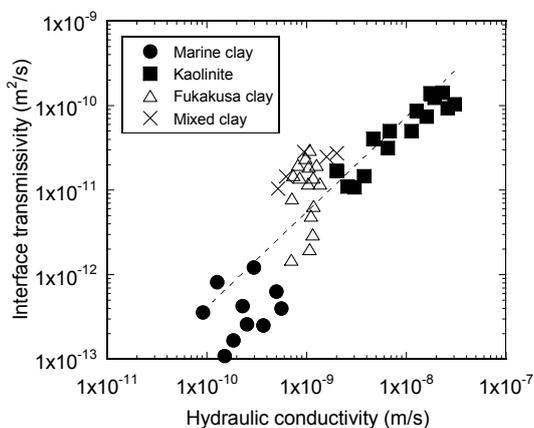


図-4.16 界面透水量係数と粘土自体の透水係数の関係¹⁷⁾

海成粘土・カオリン粘土・深草粘土・混合土における界面透水量係数と粘土自体の透水係数の関係を図-4.16に示す。この図から、界面透水量係数 K_L は粘土自体の透水係数 k_c の低下に伴って線形的に低下していることがわかる。この関係をグラフ上の直線式として表すと(4.7)式が得られる。

$$K_L = 7.38 \times 10^{-2} k_c^{1.125} \quad (4.7)$$

すなわち、杭と粘土界面の透水性は粘土自体の透水係数 k_c に依存しており、粘土の透水性が低いほど界面の透水性は低くなると考えられる。これは、粘土がより密になり間隙の体積が小さい状態になると、杭と粘土界面の間隙の体積も小さくなるためであると考えられる。

以上をまとめると、粘土と側壁に空隙が生じて、粘土と側壁に側面摩擦力が作用するような状態(正規圧

密状態あるいは弱い過圧密状態)であれば、粘土と側壁との空隙が閉塞し、閉塞後の境界面の透水性は非常に低くなることが確認された。なお、粘土と側壁との境界面の透水性は、圧密状態(過圧密,正規圧密)による影響が大きく、杭打設前の圧密度の違いが透水に与える影響はほとんどないと考えられる。

(2) 粘性土地盤と杭の境界面における透水特性^{18~20)}

a) 実験概要

1) 実験装置

図-4.17に試験装置の概要を示す。基本的には、圧密リングを用いた透水試験装置であるが、供試体の中央部に杭を設置し、杭周辺と外側部分とで別々に透水量を測定することで、杭周辺の透水性について測定しようとするものである。この装置では、流量測定用ビューレットを4本用意し、それぞれ杭周側と外側の流入量と流出量を別々に量ることができるようになっている。また、流入用のビューレットは圧力を作用させることができ、圧力を作用させることで数種の動水勾配下で透水試験を行うことができる。この透水試験において、水は流入用ビューレット→キャップ→供試体→ペダスタル→流出用ビューレットの順に流れる。供試体に流入・流出した水量はビューレットの目盛によって計測される。

用いた供試体の鉛直断面のイメージを図-4.18に示す。また、写真-4.3に用いたキャップとペダスタルの例を示す。ここでは、直径10cm高さ4.5cmの圧密リングに高さ3.5cmの供試体を用意し、あらかじめ圧密した後、供試体中央部にステンレス製の模型杭を挿入し透水試験をしようとするものである。このため、キャップおよびペダスタルにはポーラスストーンが取り付けられている。この際、杭周の透水量と外側透水量とが別々に量れるように、キャップおよびペダスタルのポーラスストーンは2つの部分に分離されており、その間は2.5mmの幅の境界リングを設けている。内側は供試体の杭周辺部の領域(杭周)に透水させ、外側は供試体の杭周面部の領域より外側の領域(外側)に透水させることができる。キャップおよびペダスタルの杭周と外側のポーラスストーン断面は使用する杭によって異なったものを使うように3組ずつ用意した。ペダスタルの杭周側(内側)のポーラスストーンの断面積は、使用する模型杭の断面積の約3倍となっている。すなわち杭周のポーラスストーンの外径は、杭径10.0, 20.0, 30.0mmに対しそれぞれ18.0mm, 34.0mm, 52.0mmとしてある。

杭周側のポーラスストーンの断面積の決定は次のような理由による。すなわち、杭周辺の地盤は、杭の設置に

よって多少の乱れを生じる可能性があり、また、杭と粘土の接触面近傍は他の部分と極端に透水性が異なる可能性がある。この実験では、特に、杭と粘土の接触面での透水性に関心を払っている。そのため、本来であれば、杭周側の透水量は、杭周面に近いところだけについて測定したいところであるが、杭周面の収水面積が極端に狭いと透水量が極端に少なくなり、精度に問題がでることが考えられたため、透水量の測定精度を考えて杭周側のポーラスストーンの断面積を決定した。

なお、キャップは杭設置前の圧密時と杭設置後とで異なるものを用いている(写真-4.3)。すなわち、圧密時には、キャップの下面が供試体に全面的に接触するようにしてある。杭設置後は、杭が供試体から突き出すように設置されるため、杭設置後に用いるキャップの杭周側ポーラスストーンとしてドーナツ型のものを用いている。この場合のポーラスストーンの外径はペダスタルと同径であり、内径は杭径よりそれぞれ 1mm 大きく作られている。キャップの直径は 10cm である。ただし、外周に厚さ 2.5mm の金属(外周リング)と O-リングがあるため、外側のポーラスストーンの外径は 95mm となっている。またペダスタルの外周リングの内径は、95mm となっており、ペダスタル側の外側ポーラスストーンの外径は 95mm である。

この種のリングを用いた実験では、外周リングからの透水対策が重要である。そのため、ペダスタルには、図-4.18 に示す位置に O-リングを、キャップには、写真-4.3 に示すように側面に O-リングをつけてある。

圧密透水試験容器をセットした状態を写真-4.4 に示す。圧密透水試験容器は上からキャップ、圧密透水リング、ペダスタルで構成されている。供試体は圧密透水リング内にセットされる。

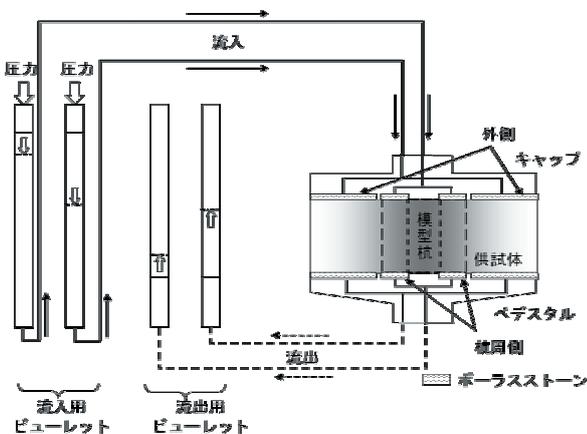


図-4.17 圧密透水試験概要

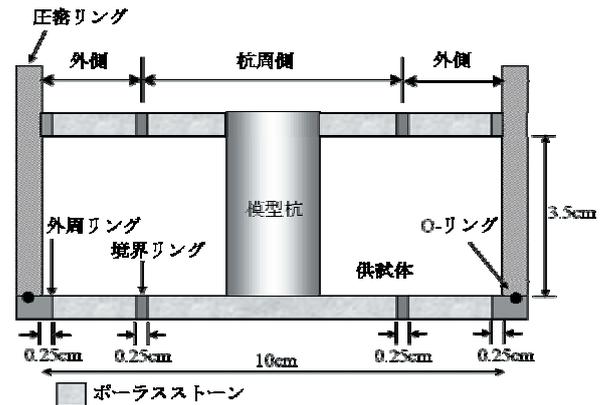


図-4.18 透水試験の断面

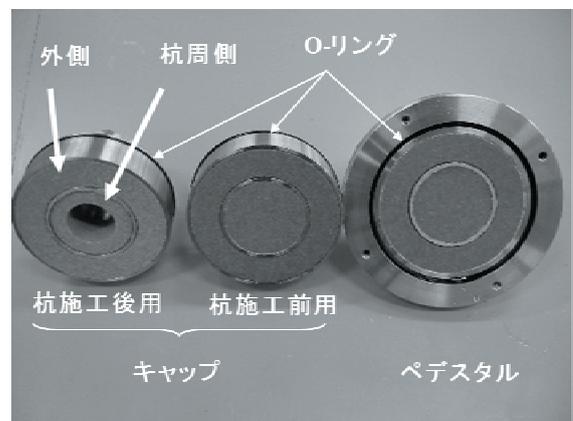


写真-4.3 キャップとペダスタル

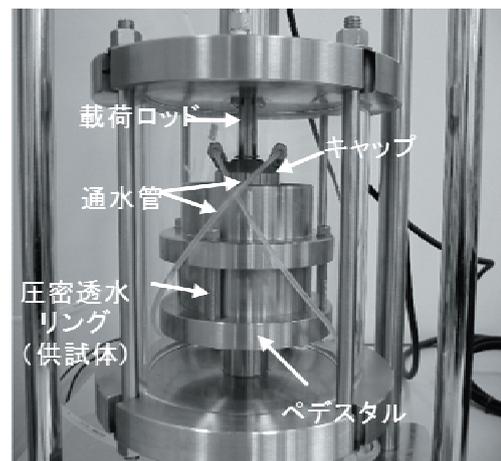


写真-4.4 圧密透水試験容器

2) 実験方法

供試体を使用した試料は川崎粘土($\rho_s=2.706\text{g/cm}^3$, $w_L=58\%$, $w_P=27\%$)である。

含水比 100%のスラリー状にした川崎粘土を十分攪拌・脱気した後、内径 20cm の両面排水の予備圧密槽に

投入し、49kPaの圧密圧力のもとで予備圧密した。

予備圧密完了後の試料を内径10cmの圧密透水リングにトリミングしながら挿入し、高さ3.5cmに整形した後、圧密透水試験装置内に設置した。その後、この供試体に対して100kPaの載荷圧力で圧密を行った。ここでの圧密完了は $\log t$ 法の4Tによって管理した。

杭設置前の粘土の透水性を調べる試験は次の要領で行った。100kPaの圧密圧力で圧密し、圧密終了後、圧密圧力を100kPaに維持して杭未設置の状態で供試体上面につながるビューレットに所定の圧力を加えることによって所定の動水勾配を作用させて透水試験を行った。その後、圧密圧力を50kPaもしくは400kPaに変えて再度圧密を行い、それぞれの圧密圧力下で所定の動水勾配を作用させて透水試験を行った。

杭設置後の透水性を調べる実験は次のようにして行った。所定の圧力での圧密終了後、供試体に作用している圧密圧力を徐荷し、圧密透水試験容器を解体し、キャップをはずした上で、圧密リング上に削孔用モールドをセットした。この削孔用モールドを用いて供試体中央部に使用する杭径と同等(または実験の条件によってはそれ以上)の径で押し抜くことで削孔した。この孔に模型杭を挿入し、圧密圧力を50kPa、100kPa、400kPaの各圧密圧力の各段階で圧密した後、供試体上端に所定の動水勾配(水圧)を作用させて透水試験を行った。

以上の透水実験では、水は供試体の上から下へと流した。

3) 実験条件

実験条件を表-4.6、表-4.7に示す。表-4.6は杭設置前の粘土の透水性を調べる実験の条件を、表-4.7は杭

表-4.6 実験条件(杭設置前)

境界リングの外径 (cm)	載荷圧力 (kPa)	間隙比 e	動水勾配 i	平均透水係数 $k_c(\text{cm/s})$	等価杭周側直径 (cm)
2.30	50	1.263	96	4.64×10^{-8}	2.38
	100	1.233	98	4.36×10^{-8}	2.29
	400	1.019	118	1.75×10^{-8}	2.28
3.90	50 ^(注1)	1.057	111	2.23×10^{-8}	3.84
	100	1.211	103	4.35×10^{-8}	3.82
	400	0.993	115	1.98×10^{-8}	3.99
5.70	50	1.188	95	5.29×10^{-8}	5.65
	100	1.179	95	5.31×10^{-8}	5.59
		1.116	96	4.59×10^{-8}	5.77
	400	0.963	115	1.95×10^{-8}	5.78

(注1)このケースでは400kPa圧密透水後に50kPaで圧密透水した

表-4.7 実験条件(杭設置後)

杭径 ϕ (mm)	載荷圧力 (kPa)	動水勾配 i
10	50	104
	400	190,371, 552,773, 1095
20	50	40,104
	100	41,106,172,270
30	400	45,122, 189, 298, 369, 728,
	50	40,105
19.0	100	41,107,172
	400	36, 119, 192, 374
19.0	10	(水頭 27cm)
	20	(水頭 27cm)
	50	(水頭 27cm)
	100	40,104,168
	300	113,182,286
	400	115,186,292

設置後の透水性を調べる実験の条件を示している。以降、杭設置前の粘土の透水性を調べる実験を「杭設置前」と呼び、杭設置後の透水性を調べる実験を「杭設置後」と呼ぶ。

「杭設置前」では、粘性土地盤の透水性を把握するとともに、杭周側と外側との透過する水の分離状態、外周リング面での透水性の確認、過圧密であることがこの実験に及ぼす影響について調べた。この実験では、動水勾配をほぼ100に固定し、圧密圧力を50~400kPaに変えた。

「杭設置後」は、杭設置後における周辺地盤の透水性の変化を調べることを目的としたもので、主として、過圧密であることの影響、動水勾配の影響、杭の周りに生じる空隙の影響について調べた。このシリーズの実験のパラメータは、模型杭直径、載荷圧力、動水勾配、杭径と削孔径の関係である。

この実験では、杭は地盤に打込むことを前提として考えているため、杭と地盤との間に空隙が生じることは無いと考えているが、施工に伴う不具合の極端な例として、杭と地盤との間に空隙が生じるケースについても検討した。すなわち、杭径10.0mm、20.0mm、30.0mmのケースでは削孔径は杭径と等しくしてあるが、杭径19.0mmの場合には、削孔径を20.0mmとして、わざと杭と地盤の間に空隙を生じさせた。また、杭径19.0mmのケースについては過圧密状態から正規圧密状態に至る過程で空隙が閉塞していくと考えられるが、その間の透水性の変化を詳細に検討するため、圧密圧力よりも小さな載荷圧

力下での透水実験も行った。

b) 実験結果と考察

1) 杭設置前の透水性

図-4.19 に圧密圧力 100kPa, 境界リングの外径が 5.70cm のときの杭周側と外側の流入量と流出量の時間変化の関係を示す。この実験で用いた動水勾配は 96 である。図よりわかるように、それぞれの流出量と流入量はほとんど等しく、どちらも経過時間に比例して増加している。ここでは、流入量と流出量の平均が供試体内を通過した水の量として取り扱うことにする。

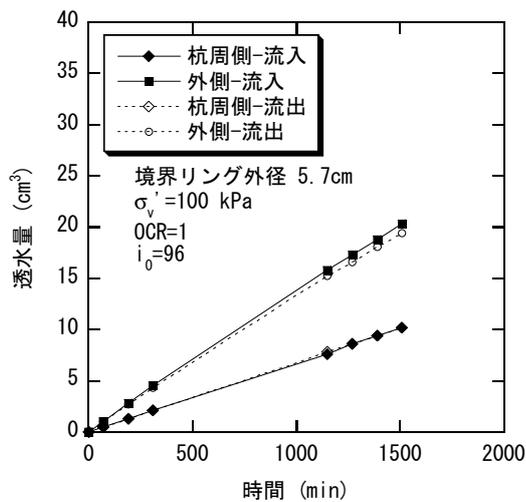


図-4.19 流入出量の時刻歴変化(杭設置前)

はじめに、用いた粘土の透水性を把握した。この実験装置では、供試体の両端面の一部が境界リングと外周リングによって閉塞されているが、そのことを無視して、全断面に渡って均等に水が流れているものとしてすべての実験ケースについて透水係数を求めると、表-4.6 に示す平均透水係数 k_c のとおりとなった。

「杭設置前」の透水試験では、圧密リングと供試体の間に界面があり、その周辺だけが他の部分と異なる透水係数となっていることが懸念される。そこで、まず、杭周側(内側)のビューレットで量った透水量が供試体内のどの部分を通過した透水量であるかを推定するために、全体の透水量から求めた透水係数と一致する透水係数が得られるように杭周側の通過断面積を求め、その結果から等価杭周側直径を求めた結果を表-4.6 に示した。これらの結果をみると、多少ばらつきがあり、中には境界リングの外側に等価直径があるということになってしまうものもあるが、杭周側のビューレットで量られた透水量は、概ね境界リングの外側側までの供試体を通過したものであるらしいことが推測される。また、このことは、

圧密リングと供試体の境界における透水性が他の部分に比較して大きくなってはいないことを推測させるものである。すなわち、もし、圧密リングと供試体の境界の透水性が他の部分より高ければ、杭周側の等価通過断面積は境界リングの内側にあるとする結果となるはずであるからである。

このシリーズにおいて求められた透水係数と間隙比の関係を図-4.20 に示す。図中に示す数字は圧密圧力であり、圧密圧力が 50kPa のものはすべて過圧密状態での試験となっている(表-4.6 参照)。多少のばらつきはあるが、ここに示される傾向は過去に標準圧密試験の結果から求められた関係²⁰⁾とほぼ同程度である。また、この傾向には過圧密の影響がないこともわかった。

なお、この実験のシリーズでは動水勾配がいずれも 100 近くと高く設定しているが、過去の実験結果では、この程度の動水勾配では測定される透水係数に変化が無いことを確認している²⁰⁾。

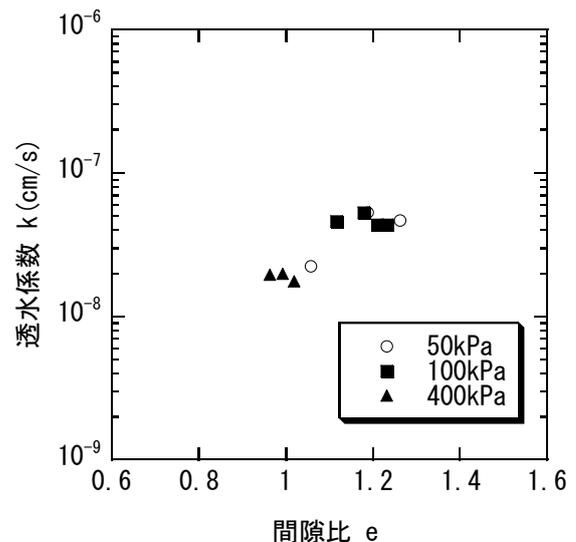


図-4.20 杭設置前の場合の間隙比と透水係数の関係

2) 杭設置後の透水係数

「杭設置前」では、杭周側と外側のビューレットで測定される透水量の境界を境界リングのほぼ外径側であるとする適切であることを述べた。以降、杭周側と外側の境界を境界リングの外側にあるものと仮定して求めた透水係数を示すことにする。

i) 圧密圧力と杭周側の透水係数の関係

図-4.21 から図-4.23 に各杭径の場合の杭周側と外側の透水係数の比と圧密圧力の関係を示す。ただし各図の横軸は圧密圧力の代わりに過圧密比で示している。これらの実験ではすべて 100kPa で圧密した後上載圧を開放

し、杭径と同じ径の穴を開けたところに杭を挿入して、再度図中に示すそれぞれの圧力で圧密して透水したものである。従って、圧密圧力 50kPa は過圧密状態での試験である。圧密圧力 100kPa では、先行圧密圧力と同じ鉛直圧で圧密されており、杭挿入時の乱れが残っている可能性のある状態である。圧密圧力 400kPa では、杭挿入時に生じた可能性のある乱れも消えているものと考えられる。

いずれの杭径においても、過圧密状態のほうが正規圧密の状態よりも透水係数比が大きく、相対的に杭周側の透水係数が大きくなる傾向を示している。また、過圧密状態では、杭径が 20mm と 30mm の場合には杭周側の透水係数が外側の透水係数よりやや大きいという傾向を示している。しかし、圧密圧力が 100kPa と 400kPa のケースでは杭周側の透水係数が外側の透水係数に比べて特別に大きくなるという傾向にはないことが分かる。

ii) 動水勾配と杭周辺の透水係数

図-4.24 に径 20mm、荷重圧力 400kPa における杭周側の透水係数の時刻歴変化を示す。また、図-4.25 には同じ条件の実験の外側の透水係数の変化を示した。これらの結果では、動水勾配の大きさによらず杭周側と外側の透水係数はほぼ同じであり、また、時間が経過しても一定の値となっている。

非常に高い動水勾配で通水させようとする供試体内のどこかに水みちが発生するおそれがある。動水勾配の大きいケースでは特に杭周と供試体の境界面に水みちが発生するのではないかと懸念された。これは境界面が一種の弱面となる可能性があり、仮に弱面であれば、最初に一種のヒドロリックフラクチャリングが発生する可能性があるからである。結果的には、杭面はそのような弱面ではなく、水みちが発生するような現象は起きなかった。

iii) 杭周辺の空隙の影響

この実験では、初めに粘土供試体を 100kPa で一次元圧密した後、圧力を開放して、供試体中心部を径 20mm で削孔し、径 19mm の杭を挿入した。その後、圧密圧力を 10~400kPa の所定の圧力で再度圧密してから透水試験をした。

圧密圧力 50kPa(OCR=2.0, 動水勾配 i_0 =約 9)までの実験では、杭周側で著しく透水量が多かった。このとき供試体部分の水頭損失はほとんどない状態であった。すなわち、ここでは、杭周に空隙が生じていたために大量の水が流れたものと思われる。このように、20mm の削孔径に径 19mm の杭を挿入した場合、過圧密状態では杭と供試体の境界面に空隙(水みち)が存在していることが

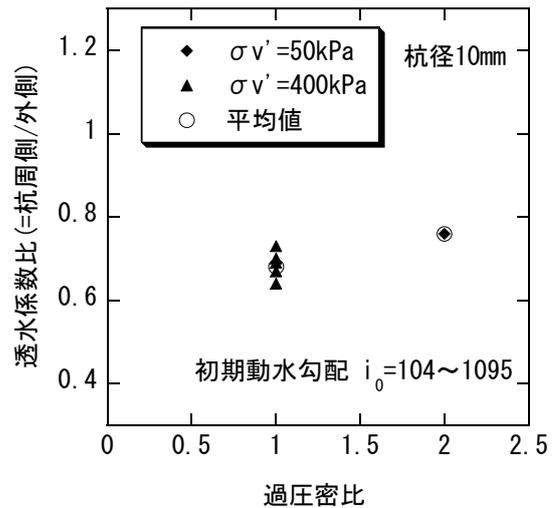


図-4.21 透水係数比(杭設置後：杭径 10mm)

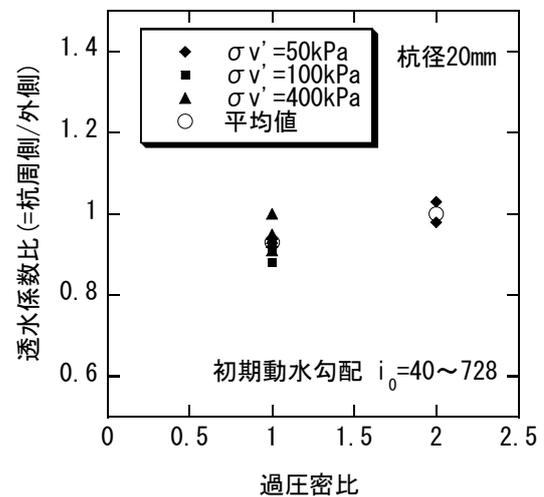


図-4.22 透水係数比(杭設置後：杭径 20mm)

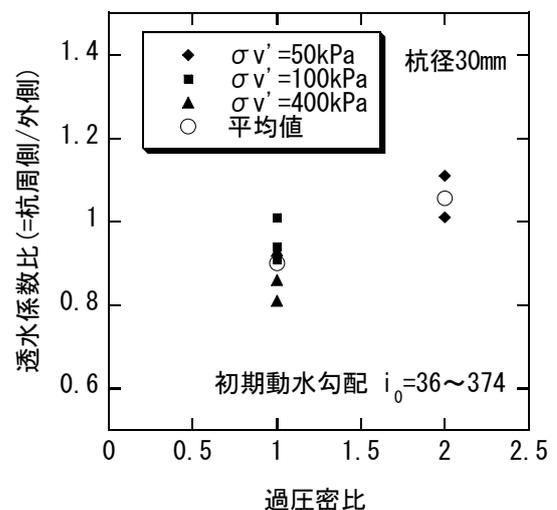


図-4.23 透水係数比(杭設置後：杭径 30mm)

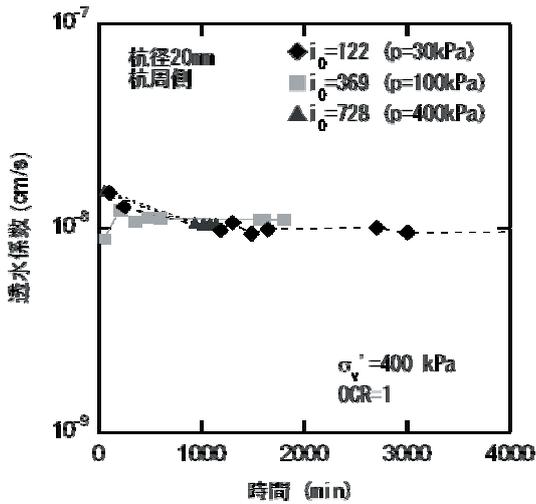


図-4.24 杭周側の透水係数の時刻歴変化(杭径 20mm)

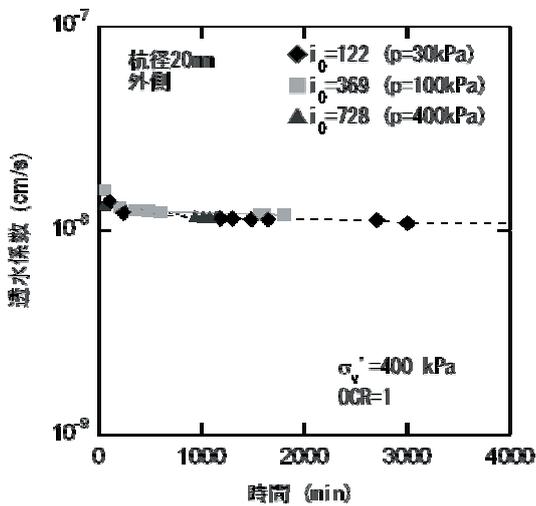


図-4.25 外側の透水係数の時刻歴変化(杭径 20mm)

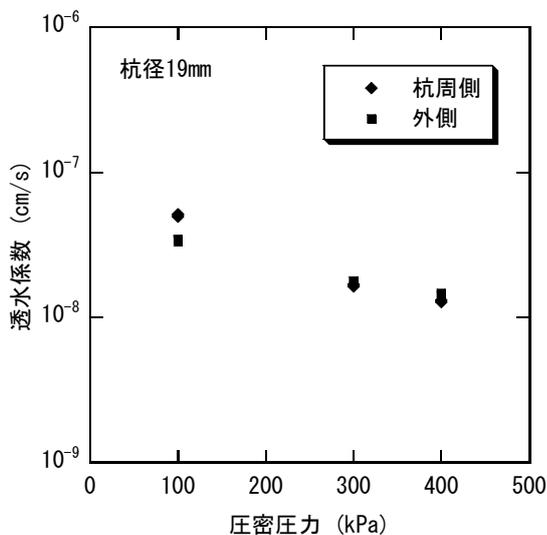


図-4.26 載荷圧力と透水係数(杭径 19mm, OCR1.0)

わかった。

次に正規圧密領域(100~400kPa)での透水係数の変化について検討する。

図-4.26 に正規圧密状態での杭周側と外側の透水係数と圧密圧力の関係を示す。ここで用いた圧密圧力は 100, 300, 400kPa である。杭周側と外側の透水係数を比較すると、載荷圧力が 300, 400kPa では杭周側と外側の透水係数はほぼ一致しているのに対し、100kPa ではやや杭周側の透水係数が外側の透水係数に比べて大きくなっている。このことから、20mm の削孔径に径 19mm の杭を挿入した場合、供試体に作用させる載荷圧力が初期圧密圧力に戻っただけでは、杭と供試体が完全に密着していないものと推察される。

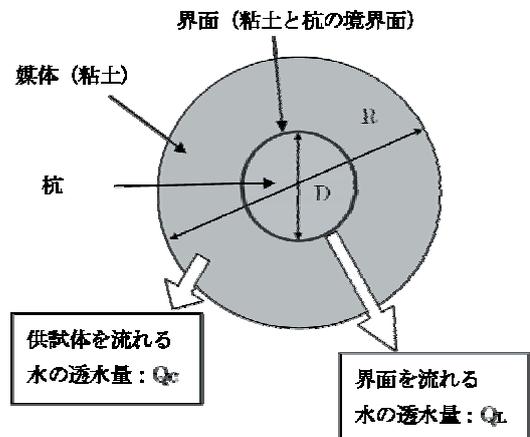


図-4.27 界面透水係数の概念図

杭周側の透水係数が大きい時には、杭周面付近の透水量が著しく多くなっていると考えられる。すなわち、このような場合には、杭周側では、杭の近傍とそれ以外のところとは明らかに透水特性が異なっている。つまり、図-4.26 の杭周側は見かけの透水係数 $k_p(=4(Q_c+Q_i)/((R^2-D^2)\pi i))$ を示していることになる(図-4.27 参照)。そこで、このような場合の見掛けの透水係数の変化と杭周辺の透水性の変化について考察するため、4.2(1)に示した、界面透水量係数 K_L を導入する。界面透水量係数は、界面の厚みを厳密に特定することができないため、単位長さあたりの透水量に関する指標として次のように定義したものである。

$$Q_L = K_L \pi D i \quad (4.8)$$

ここに、

Q_L : 界面での単位時間当たりの透水量

πD : 界面の流れと直行する面での周長

i : 平均的な動水勾配

である(図-4.27 参照).

今回測定している杭周側の透水係数 k_p は, 界面透水係数の概念を導入すると次式のように表せられる.

$$k_p = K_L \frac{4D}{(R^2 - D^2)} + k_c \quad (4.9)$$

ここに,

D : 杭の外径

R : 平均として考えている杭周側の外周面の杭の外径からの長さ

$$k_c = 4Q_d / ((R^2 - D^2)\pi i)$$

である. なお, ここでは, $D=1.9\text{cm}$, $R=3.9\text{cm}$ である.

図-4.28 には図-4.26 に示した杭周側と外側の透水係数の比をとり, これと圧密圧力の関係を示した. このとき, 外側の透水係数は k_c であると考えてよいであろう. すなわち, 図-4.28 の縦軸は k_p と k_c の比であると考えることが出来る.

そこで, (4.9)式を k_p と k_c の比で示すと次式となる.

$$\frac{k_p}{k_c} = \frac{K_L}{k_c} \cdot \frac{4D}{(R^2 - D^2)} + 1 \quad (4.10)$$

図-4.28 から, 圧密圧力が 100kPa の場合は, $K_L/k_c = 0.67$, それ以外は $K_L/k_c \approx 0$ であった.

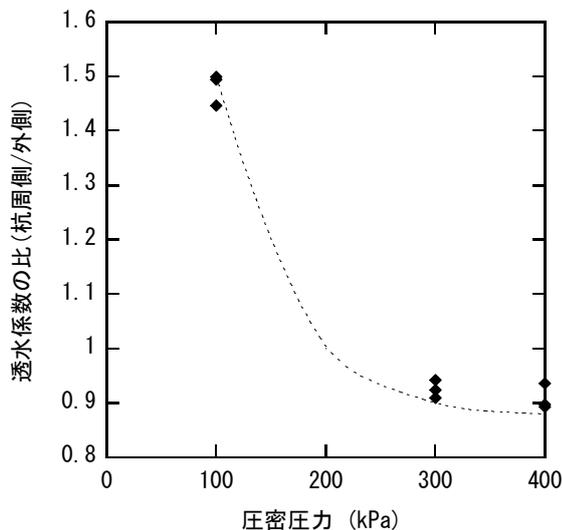


図-4.28 載荷圧力と透水係数比 (杭径 19mm, OCR1.0)

しかし, (4.10)式は, K_L/k_c がわずかであれ, 存在するとなれば, 杭周辺では, 透水性が高くなっていることを意味している. しかし, この場合であっても, 4.2(1)の

ように考えると, 杭部分と杭周の見かけの透水係数 $k_{pile}(=4Q_d/(D^2 \pi i))$ は, 透水量係数 K_L を用いて, $k_{pile}=(4/D)K_L$ とあらわされることから, $K_L/k_c=0.67$ の時に, $k_{pile}=(2.68/D)k_c$ となる. この場合, D が 2.68cm 以上であれば, k_{pile} が k_c を下回る事となる.

つまり, 杭周辺の空隙は, OCR が 1 程度であれば, かなり塞がっており, また, 実験データはないが, およそ 200kPa あたり, すなわち先行圧密圧力の 2 倍程度の圧力で K_L/k_c はほとんど 0 となるものと思われ, このような状態であれば, 杭周辺での透水性の増加はほとんど生じないと考えられる.

3) 実物への展開

上記を拡張し, 杭を含む直径 R 全体の透水量は次式のように表せる.

$$Q = k'' \cdot i \cdot A_0 = k'' \cdot i \cdot \pi R^2 / 4 \quad (4.11)$$

ここで,

k'' : 杭を含む全体領域の透水係数(cm/s)

A_0 : 想定領域 R の面積(cm^2)

この Q と杭周辺の透水性の変化を考慮した Q とを同値であるとして整理すると次式となる

$$\frac{k''}{k_c} = \left(1 + \frac{k_L}{k_c} \cdot \frac{4D}{(R^2 - D^2)} \right) \cdot \frac{R^2 - D^2}{R^2} \quad (4.12)$$

以上の実験結果をもとに, 透水量の増加量を考えてみる.

2)iii)で示した, 杭周辺に空隙が生じるような可能性は極めて低いのでここでは検討する余地はないと考えられる. そこで, 図-4.23 に示した実験結果から, OCR が 2 程度あったとして, K_L/k_c はたかだか 0.2 であるとする. また, ここでは, 界面透水係数の影響を定量化するために, 杭の周辺の 10cm 付近の見かけの透水係数の変化量を求める. その場合, (4.12)式は,

$$\frac{k''}{k} = \left(1 + \frac{k_L}{k} \cdot \frac{4}{(20 + 100/D)} \right) \cdot \frac{20D + 100}{(D + 10)^2} \quad (4.13)$$

となる.

この結果, 想定範囲全体の見かけの透水係数比は 0.18 となり, 一般部の 2 割程度の水しか流れないことになる. なお, この場合, K_L が k_c の 24 倍となると一般部と同じだけ水が流れるようになる.

c) まとめ

杭と地盤の境界の透水性について検討するため、杭が挿入された地盤をモデル化した要素に対する室内透水実験を行った。実験では杭径、動水勾配、載荷圧力および杭の設置方法(杭径と杭打設用の孔径)をパラメータとし、杭界面での透水性の変化について検討した。

実験の結果では、杭打設時に杭と地盤の間に空隙ができないように施工した場合でも、先行圧密圧力よりも上載荷重が小さいような環境では、杭境界面での透水性が多少上昇する傾向が見られた。しかしそれはわずかであり、ほとんど問題とならない変化である。さらに、同じ施工で正規圧密状態であれば、杭境界面での透水係数の上昇はほとんど見られない。

杭界面に明らかに空隙が生じるような施工が実施された場合で、明らかに空隙が存在すると考えられる場合には、相当量の通水が杭境界面で生じる。しかし、施工時に生じた空隙が完全に閉塞する状況となれば、界面での透水性の増加はほとんどないことがわかった。過圧密状態で杭周辺に空隙を生じさせたとしても、正規圧密領域まで荷重を載荷すれば、杭周辺の空隙はほとんど閉塞し、問題にならない程度の透水量の増加しかもたらさない。

なお、(1)、(2)については、実験条件、内容は類似しており、ほぼ同様の実験結果(過圧密状態では杭(側壁)と粘土の空隙は残るが、正規圧密状態では空隙は閉塞し、境界部の透水性は非常に低くなるという結果)が得られている。

(3) 鋼材の粗度の違いが境界面での透水特性に及ぼす影響^{21,22)}

a) 実験方法

実験装置の概要図を図-4.29に示す。この実験では、給水槽から計測容器までの管路と圧密容器は、背圧 $u_{B.P}$ をかけて試料を飽和させた。給水槽の水位が変動しても飽和容器中のシャーレの上面との水位差 h が一定となるようにマリオット管を設けた。圧密圧力 P は周面に Oリングを設けた載荷板を介して空圧で載荷する。圧密容器の構造は上部がステンレス、下部はアクリルである。ここでは、下部のアクリル円筒(内径 200mm)に、径 d_g の異なるガラスビーズ(径 $d_g=153, 513\mu\text{m}$)を貼り付けてアクリル円筒の粗度を変えて実験を行った。

b) 実験条件

実験に使用した試料の物性と実験ケースは表-4.8、表-4.9のとおりである。実験装置の管路を飽和させた後、試料の初期高さ H_0 が 90mm となるように含水比 120% に調整した試料を投入した。圧密圧力 $p=20, 40\text{kPa}$ で

の一次圧密が終了した後に、動水勾配 $i=2.6\sim 7.0$ の範囲で変化させて定水位透水試験を実施した。

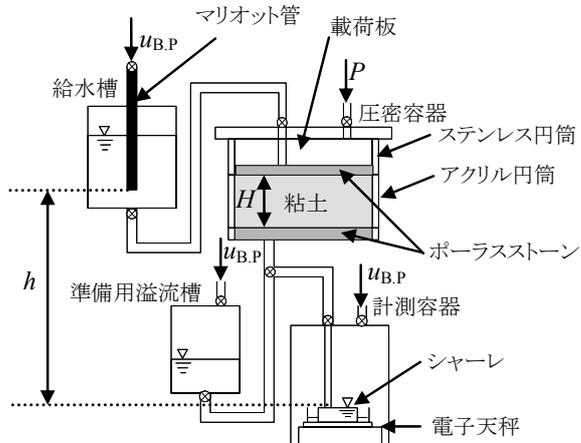


図-4.29 実験装置概要図

表-4.8 原料土の特性

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)		2.59
原料土の初期含水比 w (%)		122.1
粒度組成	砂 (%)	7.5
	シルト (%)	41.2
	粘土 (%)	51.3
コンシステンシー	W_L (%)	111.6
	W_P (%)	45.4
	I_P	66.2

表-4.9 実験ケース

ケース	d_g (μm)	p (kPa)	i			e
1	0	20	2.6	3.6	6.6	2.41
		40	2.9	3.9	6.9	1.92
2	153	20	2.8	3.8	6.8	2.39
		40	3.0	4.0	7.0	2.02
3	513	20	2.7	3.7	6.7	2.31
		40	3.0	4.0	7.0	1.92

c) 実験結果

ダルシー則に従って求めた平均的な透水係数 k とガラスビーズ径 d_g との関係を図-4.30に示す。平均的な透水係数 k はガラスビーズの径 d_g が大きくなると高くなる傾向があり、境界面が粗くなると水が流れやすくなることが確認された。

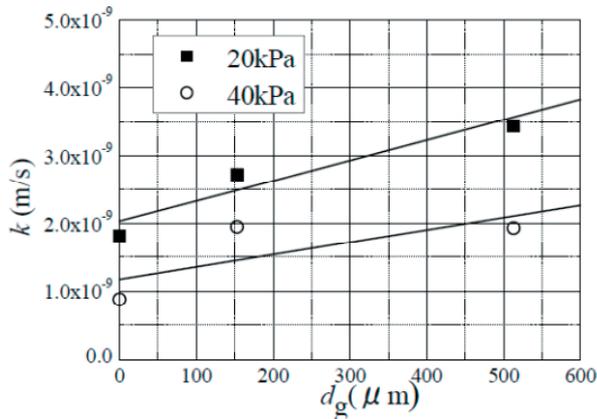


図-4.30 ガラスビーズ径と平均透水係数との関係

図-4.31 に示すように、境界面に沿って粗度の影響を受ける幅 t の境界部(透水係数 k_t)と影響を受けない非影響部(透水係数 k_c)からなる二層モデルを仮定した。両層の透水則としてダルシー則を仮定し、連続の式を連立させることにより、次式が得られる。

$$k_t / k_c = \frac{(k / k_c)(D/2)^2 - (D/2 - t)^2}{(D/2)^2 - (D/2 - t)^2} \quad (4.14)$$

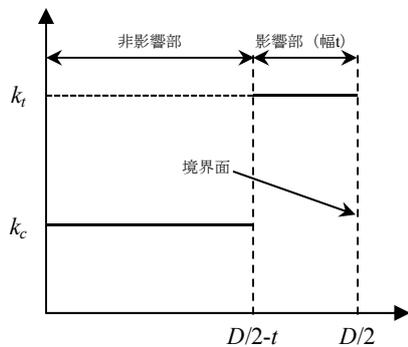


図-4.31 ダルシー則を仮定した二層モデル

上式に $D=200\text{mm}$ と図-4.32 に示す $e\text{-log}k$ 関係より推定される非影響部の k_c と図-4.30 に示す平均的な透水係数 k を代入して、境界部の透水係数 k_t と非影響部の透水係数 k_c との比 k_t/k_c と境界部の幅 t の関係を求め図-4.33 に示す。 t が小さいと k_t/k_c の値が非常に大きい。また、 $t=D/2=100\text{mm}$ のとき、すなわち容器全体が境界部と仮定したとき、 k_t/k_c の値は k/k_c となり、透水試験から得られた平均的な透水係数 k は圧密試験から推定された k_c に比べて、ガラスビーズを貼り付けないケース ($d_g=0\text{mm}$) においても 2~3 倍大きい。本実験では、影響部の幅 t の大きさを把握していないため、境界部の透水

性が粘土自体の透水性に比較してどの程度大きくなるのかは明らかでない。しかし、図-4.33 より、ダルシー則が成立すると仮定した境界部では、粘土自体(非影響部)よりも透水性が高いことが分かる。

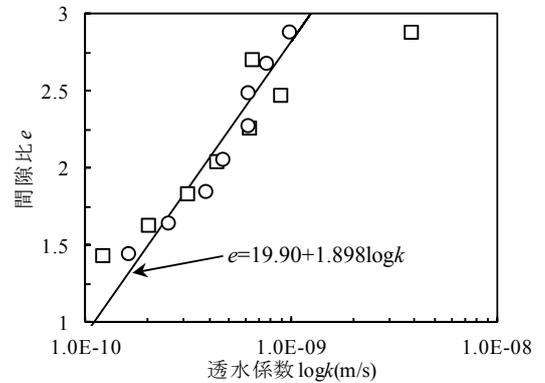


図-4.32 原料土の標準圧密試験結果($e\text{-log}k$)

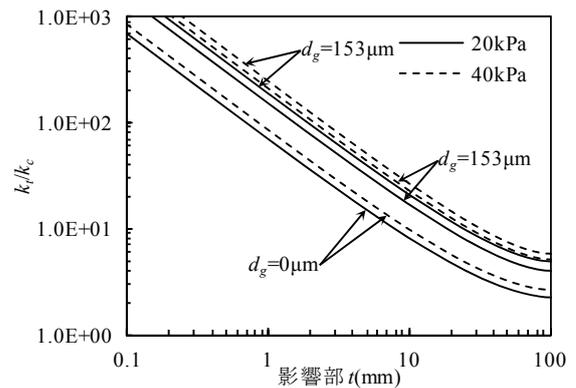


図-4.33 k_t/k_c と t との関係

(4) 地盤と杭等の境界面における透水特性に関する結論

(1), (2)の研究成果より、地盤と杭等の境界面における透水特性について、以下の結論が得られた。

- ・杭打設時に杭と粘土の間に空隙ができないよう施工した場合でも、粘土が過圧密状態であれば、杭境界面での透水性が多少上昇するが、それはわずかであり、ほとんど問題にならない。また正規圧密状態であれば、杭境界面での透水係数上昇はほとんどない。
- ・粘土と杭に空隙が生じるような施工を行った場合には、相当量の通水が杭境界面で生じるが、粘土と杭に側面摩擦力が作用するような状態(正規圧密状態)、まで載荷すれば、粘土と杭との空隙はほとんど閉塞し、閉塞後の境界面の透水性は非常に低くなる。
- ・粘土と杭との境界面における透水性は、圧密状態(過圧密、正規圧密)による影響が大きく、杭打設前

の圧密度の違いが透水に与える影響はほとんどない。
 また(3)の研究成果より、杭の粗度が大きくなるほど、杭と粘土との境界面の透水係数が大きくなり、境界面では粘土自体より透水性が高くなることが確認された。

なお(3)の研究成果で、境界面の粗度が大きいほど透水係数が大きくなることが確認されているが、実際に打設する杭の粗度等を考慮すると、(1)、(2)の研究成果のように、杭と粘土との境界部からの透水量は極めて少なく、周辺環境への影響はほとんどないものと考えられる。

4.3 保有水の移流拡散による遮水層への影響深度

杭打設後に生じる問題に関する研究のうち、保有水の移流拡散による遮水層への影響深度に着目した研究を実施した^{23~26)}。

(1) 実験概要

地盤中に杭が存在することによる遮水基盤へ与える影響(遮水層への影響深度)について、保有水の移流拡散現象に着目して実験的(小規模・中規模実験)に検討した。

a) モデル地盤、トレーサーの選定

試料は山口県徳山下松港沖から採取した沖積粘性土を使用した。供試体の作成に当たっては、粘土に海水を加えて液性限界の約2倍の含水比(200%)で練り返し、脱気したものを利用した。

また、保有水の移動状況を把握するために用いるトレーサーとして、粘土粒子への吸着や微生物分解が無く、安定した陰イオンである臭化物イオン(Br⁻、濃度5000mg/l)を使用した。

粘土およびトレーサーの諸元を表-4.10に示す。

b) 実験方法

小規模実験の概要図を図-4.34に、中規模実験の概要図を図-4.35に示す。

実験方法は以下のとおりである。

表-4.10 粘土・トレーサーの諸元

○粘土試料

土粒子密度	2.773 g/cm ³	塑性限界	47.9%
液性限界	95.9%	塑性指数	48.0
透水係数	50kPa : 1.0~2.0×10 ⁻⁷ (cm/s) 120kPa: 0.6~0.7×10 ⁻⁷ (cm/s)		

○トレーサー

使用トレーサー	粘土粒子への吸着が無く安定した陰イオンである臭化物イオン(Br ⁻)
濃度	5000mg/l

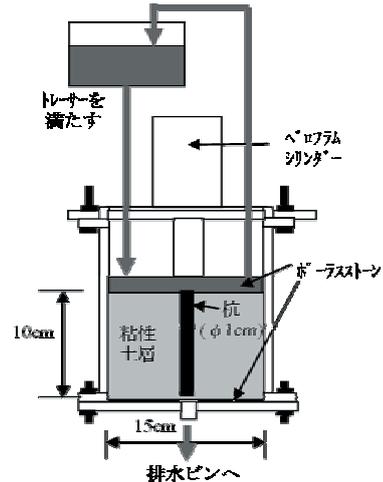


図-4.34 実験装置概要図(小規模実験)

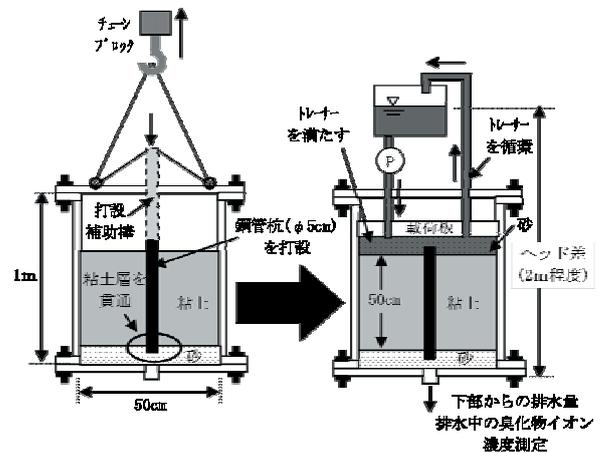


図-4.35 実験装置概要図(中規模実験)

1) 小規模実験

図-4.34に示すカラム(内径15cm、高さ34.3cm)にスラリーを投入し、一次的に予圧密(圧密圧力50kPaと120kPa)を行って試料を作成した。その後、アルミニウム製の杭(φ10mm)を試料中央部に圧入し、実験ケースに応じて強制的に杭頭変位(杭頭の位置で1mm,3mmの水平変位)を与えた。

その後、再び圧密圧力作用下で、カラム上部のポーラスストーン内にポンプで定期的にトレーサーを9日間循環させた。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に水頭差(動水勾配 $i=170/10=17$)を与えて行った。

循環実験の実験中(9日間)は、上部トレーサー供給タンク内の臭化物イオン濃度、及び下部排水ビンへの排水量を測定した。

循環実験終了後、図-4.36に示すように、杭周辺部

(杭周辺の 5mm 厚)及びカラム端部(カラム側面から 2.5cm 内側)から深度方向に 1cm ずつ試料を採取し、臭化物イオン濃度、粘土試料の含水比(間隙比)を測定し、粘土中の臭化物イオン濃度の深度分布を求めることにより、杭打設による粘土中への保有水拡散状況(影響深度)を確認した。

実験条件、実験ケースを表-4.11 に示す。

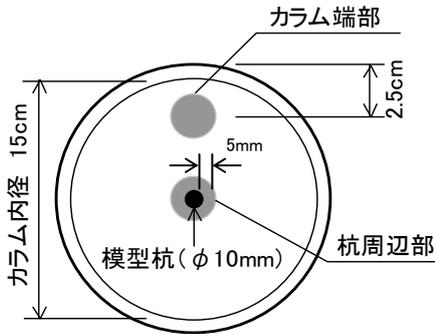


図-4.36 試料採取位置(小規模実験)

表-4.11 実験条件(小規模実験)

模型杭	アルミ杭φ1cm	粘土直径	15cm
粘土厚	圧密前：23cm (含水比：200%)		
	圧密後：約10cm (含水比：65.80%)		
水頭差	約1.7m (動水勾配：17)		
実験期間	杭打設後9日間		

実験ケース	1	2	3	4
圧密荷重	50kPa		120kPa	
杭の有無	有	有	有	有
杭頭変位	3mm	0mm	3mm	1mm

表-4.12 実験条件(中規模実験)

模型杭	鋼管杭 φ 5cm	
モデル地盤直径	50cm	
モデル地盤厚	圧密前：80cm (含水比：150%)	
	圧密後：50cm (含水比：約80%)	
動水勾配	約1.3 (=67cm/50cm)	
杭頭水平変位	77日後	0.25cm
	104日後	1.0cm
	167日後	実験終了

2) 中規模実験

図-4.35 に示すカラムに粘土を投入し、一次的に予圧密(圧密応力 50kPa)を行ってモデル地盤を作成した。なお、粘土の上部、下部には透水層として砂を敷設した。

その後、モデル地盤中央に杭を打設し、実験期間中に段階的に杭頭変位を与えた。その他の実験条件を表-

4.12 に示す。

循環実験は 167 日行い、循環実験中は、粘土上部にポンプで定期的にトレーサーを循環させ、カラム下部の排水量を 2 日毎に測定した。

循環実験終了後、杭周辺部及びカラム端部から深度方向に 2cm ずつ試料を採取し、臭化物イオン濃度、粘土試料の含水比(間隙比)を測定し、粘土中の臭化物イオン濃度の深度分布を求めることにより、杭打設による粘土中への保有水拡散状況(影響深度)を確認した。

なお中規模実験では、除荷した状態で(粘性土層が過圧密の状態)実験を実施した。

(2) 実験結果

a) 小規模実験について

1) 移流拡散への影響

図-4.37 に、杭打設 9 日後の粘土中の深度別トレーサー相対濃度(上部供給トレーサー濃度を 1 とした時の濃度： C/C_0)について、杭周辺とカラム端部との差を示す。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。なお、杭打設 9 日後のトレーサー相対濃度の深度分布は、図-4.39 と同じようなグラフ形状を示し(表層部は相対濃度がほぼ 1 であり、深部になるにつれ相対濃度が減少し、粘土底部では相対濃度がほぼ 0 となる)、杭周辺とカラム端部との濃度差が明確に確認できる循環時間として 9 日間を設定している。

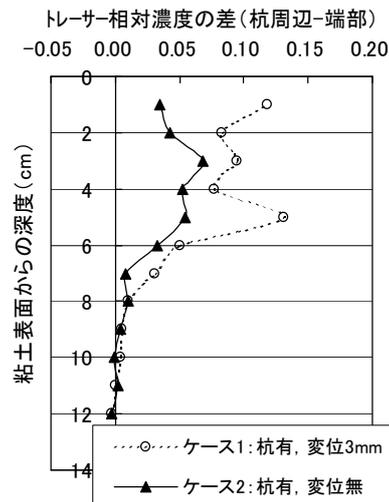


図-4.37 粘土中のトレーサー相対濃度差深度分布(小規模実験：実験 9 日後)

粘土表層から深度 6cm までの部分で杭周辺と端部で 5~15%の濃度差が確認でき、特に杭打設時に変位を与え

たケース 1 で顕著であった。しかし、深度 8cm 以深では、変位の有無に係らず明確な濃度差は確認できず、杭打設による遮水基盤への影響はほとんどないことが確認された。

よって、本実験において杭打設後 9 日間トレーサーを循環させた結果では、杭打設により表層から深度 6cm(杭径の 6 倍)の部分までは粘土が攪乱されて遮水機能は低下したが、8cm 以深では杭を打設しても粘土層の遮水機能は保持されていたものと考えられる。

2) 排水量への影響

図-4.38 に各ケースの下部排水量(9 日間合計)を示す。杭頭変位の有無(ケース 1 と 2)による排水量の差は 10% 程度で、杭頭変位の違い(ケース 3 と 4)では 7%程度の差が確認された。

このことから、杭打設時に杭頭変位を与えた場合、変位が大きいかほど遮水層への影響は大きくなる。しかし、その影響は、杭頭変位を多大に与えた場合(杭径 10mm に対して変位 3mm)でも粘土全体で見た透水係数が 10% 増加する程度とわずかである。

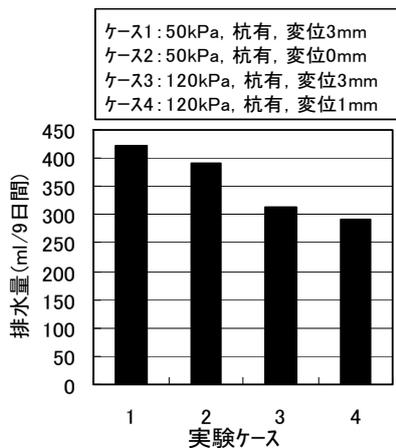


図-4.38 装置下部からの排水量
(小規模実験：9 日間)

b) 中規模実験について

1) 移流拡散への影響

図-4.39 に、杭を打設し 167 日経過した実験終了後に採取した粘土中のトレーサー相対濃度深度分布を示す。

図より、粘土表面から 10cm~30cm の深度において、杭打設による影響が想定される杭周面部と、影響がないと考えられる装置側面部(カラム端部 1~3)との相対濃度差が 10%程度確認された。

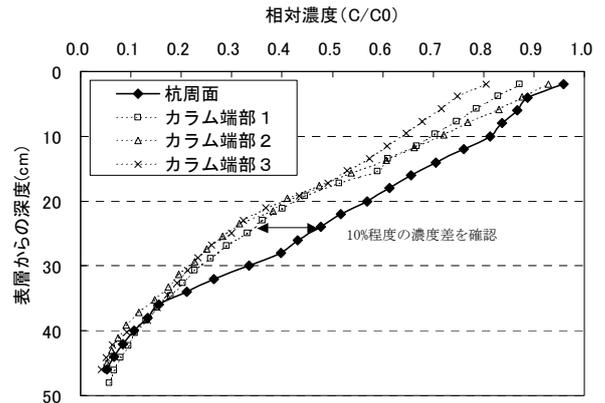


図-4.39 粘土中のトレーサー相対濃度深度分布
(中規模実験：実験約 160 日後)

よって、杭打設後 167 日間トレーサーを循環させた結果では、大きな杭頭変位を与えることで形成される杭と粘土との隙間が閉塞されず、粘土表面から一定深度(本実験では 35cm 程度、杭径に換算すると杭径の 7 倍)まで粘土の遮水機能に影響が及んだが、それ以深では、杭打設により粘土の遮水機能に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

2) 排水量への影響

杭打設有りのケース(ケース A)と杭打設無しケース(ケース B)との比較により(後述の図-4.60 参照)、杭頭変位が無い場合は、小規模実験と同様に、杭打設が排水量に与える影響はほとんどないことが確認された。しかし、杭頭変位を 10mm 与えた場合は 20%~50%の排水量の増加が認められた。

これは、杭自体が剛でほとんど曲がらないため、杭頭変位を与えることにより杭下端が支点となり杭が傾くものと想定され、これにより杭と粘土との間(表層から深度 35cm 程度)に隙間が生じて水みちとなり、結果的に有効遮水層厚が減少し排水量が増加したためと考えられる。

(3) 保有水の移流拡散による遮水層への影響深度に関する結論

実験結果から、小規模及び中規模実験とも、杭打設時に一定深度(杭径の約 6~7 倍程度)までは杭と粘性土層との間に隙間が生じて保有水が浸入するが、それ以深では杭と粘性土層とは密着しており保有水の浸入は抑えられることが確認された。

なお、杭頭変位を与えた場合、小規模実験では 10% 程度、中規模実験では最大 50%の排水量増加が確認された。これは、杭頭変位を与えることにより粘性土の上

層部で杭と粘土との間に隙間が発生し、有効遮水層厚が大幅に減少したことが原因と考えられる。

4.4 杭打設後における地震時の影響

処分場へ杭を打設した後に地震が発生した場合には、地盤と杭基礎に隙間ができる可能性があり、この隙間により保有水が処分場外部へ浸出することが懸念される。

ここでは、杭打設後の問題に関する研究のうち杭が存在することによる地震時の影響について、廃棄物処分場跡地をイメージした検討を実施した。

本検討では、室内実験に基づいた杭周辺地盤の透水係数把握、保有水拡散状況の将来予測、保有水の拡散に対する数値解析、及び地震時の影響に関する検討を行った。

(1) 想定した地盤構成と地震時のせん断変形

まず、地震時の変形解析を行い、地盤に発生するせん断ひずみを把握し、地震および地震後の保有水拡散の影響について数値解析を行った。

図-4.40 に検討した地盤の断面を示す。ここで想定している地盤では、GL0mから GL-5mまでは廃棄物地盤であるとした。ただし、廃棄物地盤の物性を決定するのは難しいため、GL-5mまでの廃棄物地盤部分はモデル化せずに GL-5m以深を GL-54mまでモデル化し、GL-54m以深を工学的基盤(地震波を入力する基盤)とした。

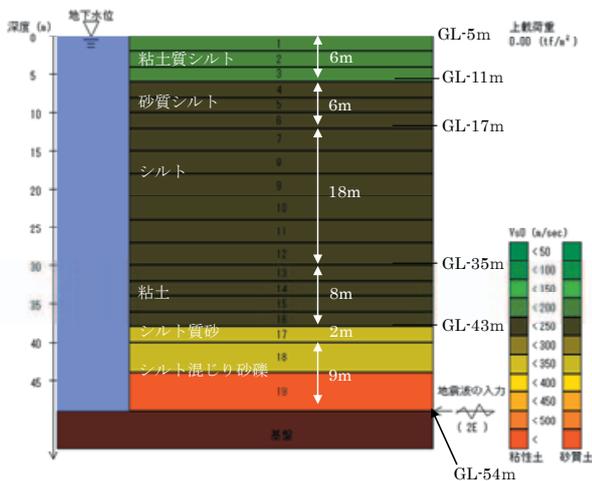


図-4.40 解析断面

検討に用いた地震波は、八戸波、大船渡波、ポートアイランド波であるが、非常に大きなせん断ひずみが GL-40m 付近で発生するポートアイランド波のケースについて検討を進めた。図-4.41 に地震時発生する地盤の最大せん断ひずみの震度分布を示す。

杭は一般的には、地盤の変形に追随する形で変形する

と考えられるが、せん断ひずみの急変部分では、地震の直後には地盤と杭の間に剥離が生じることを想定した方が安全側であると考えられる。

杭の変形は、地盤の応答によるもののほかに、上部工からの水平力によるものがある。上部工からの水平荷重による変形量の予測には、杭の材質、断面、水平力のレベル、地盤反力係数などが必要である。ここでは、杭の断面として一般的な条件を想定し、地表面における杭の変位量が 2cm であり、鋼杭を用いた場合の曲げモーメント第一 0 点の深さが 5m であるとする。杭の断面剛性が 100 倍程度変化すると曲げモーメント第一 0 点の深さは倍程度となるが、それでも 10m 程度である。

以上、地震時の検討結果からすると、杭が大きく変位する範囲では地盤のせん断ひずみが小さく、杭が変位しないところで地盤のせん断ひずみが大きいことからして杭による遮水性能の低下はあまり考えられないが、移流分散解析では、地震によって杭と粘性土層に大きなせん断ひずみが発生し、これに伴いこの付近の杭と地盤の密着性が小さくなることを想定し、地盤境界の透水係数が増加したと考えることとした。具体的には粘性土層の杭周部における透水係数は、常時での粘性土層の杭周部における透水係数の 5 倍とした。

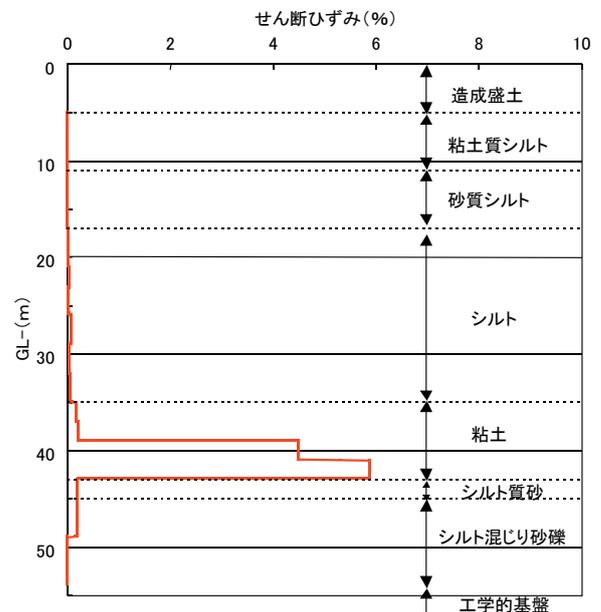


図-4.41 せん断ひずみの深度分布(ポートアイランド波)

(2) 浸透流解析

図-4.42 に示す護岸構造を持つ廃棄物処理場を想定し、廃棄物層の陸側上端に一定の水位として CDL+3.5m(GL0m)を与えた。海底地盤面の高さは CDL-

5.4mとした。海側については図-4.43に示すように、平均水位を CDL+0.9m とし、1.8m の潮汐を考慮した変動水位を与えた。潮汐の変化はサイン波、1 日の水位の変動を 2 周期と仮定した。また、1 日の水位と時間の関係を 16 点によりモデル化した。

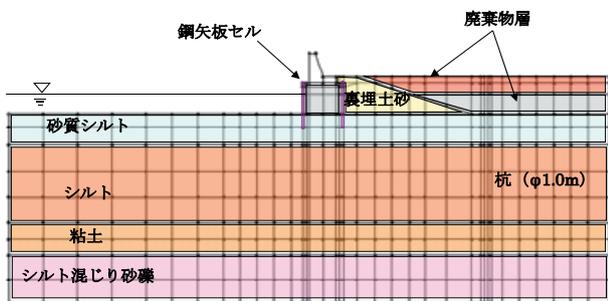


図-4.42 解析に用いた護岸の断面

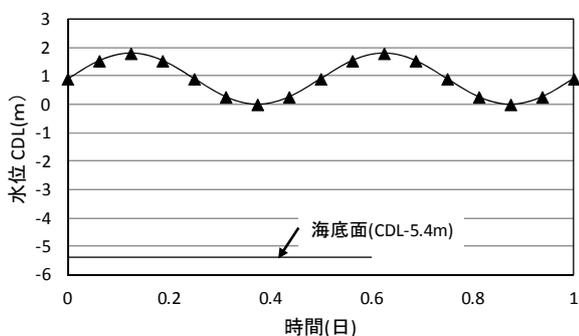


図-4.43 海側の変動水位

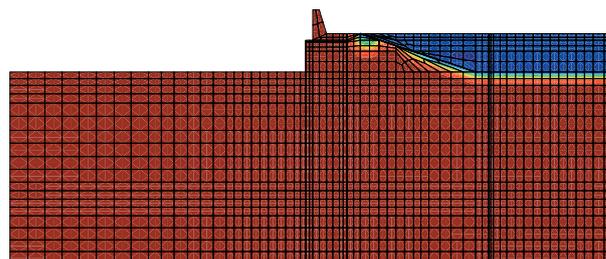
(3) 解析結果

a) 常時の検討

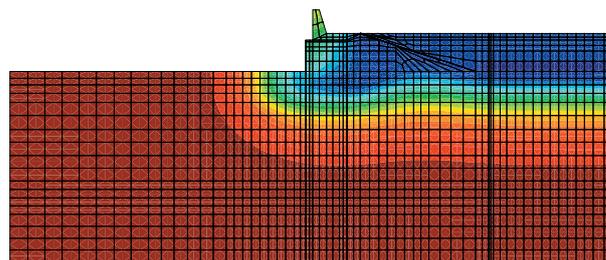
図-4.44 に 0.3 年後と 20 年後の杭未設置(現況)における保有水の濃度拡散状況を示す。ここで、示した濃度は、処分場内における保有水の濃度を 1 とした場合の濃度比である。図-4.47 に図-4.44~46 までの濃度のカラーチャートを示した。図-4.45 に杭設置における保有水の濃度拡散状況の結果を示す。図-4.45 では、全層にわたり、杭周辺 0.1m の部分の透水性が高くなったものとして、その部分の透水係数が周辺地盤の透水係数の 5 倍であるとして計算したものである。図-4.44 と図-4.45 の比較から、杭設置による保有水拡散への影響はほとんど見られないことがわかる。

b) 地震による地盤変形を考慮した検討

図-4.41 に示したように、GL-39m から GL-43m までの粘性土層で大きなせん断ひずみを生じていることから、この範囲では杭と地盤の間に剥離が生じることが懸念される。そこで、この区間の杭周辺の地盤の透水係数が高くなると仮定し、杭と地盤の境界部 0.1m の範囲の地盤

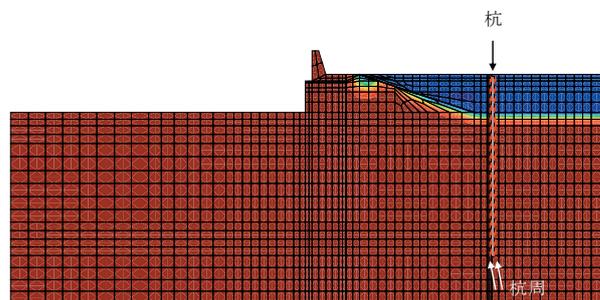


a)0.3 年後

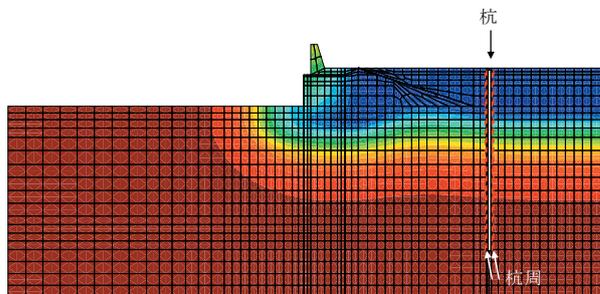


b)20 年後

図-4.44 現況での保有水の拡散状況

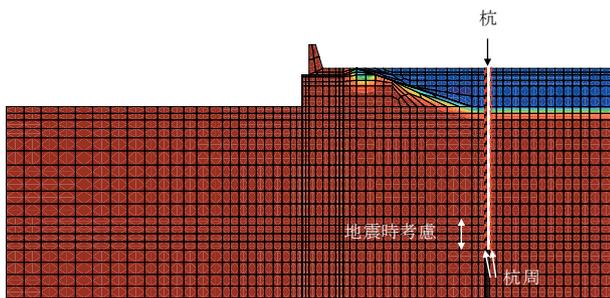


a)0.3 年後

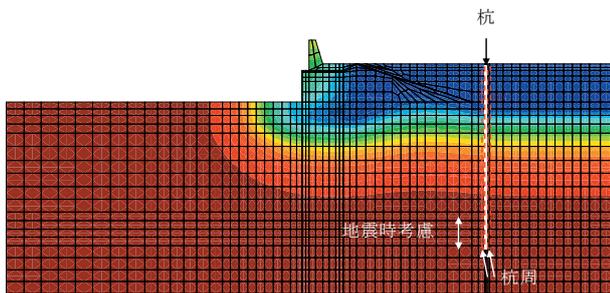


b)20 年後

図-4.45 杭設置における保有水の拡散状況



a)0.3年後



b)20年後

図-4.46 杭設置における保有水の拡散状況

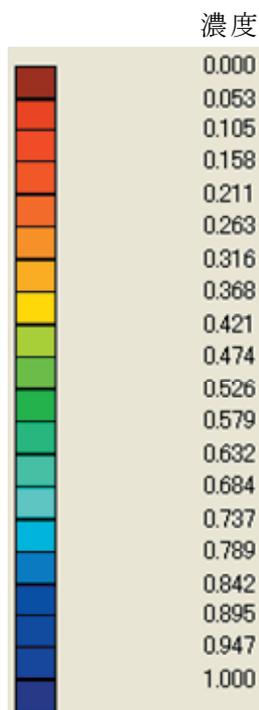


図-4.47 用いたカラーチャート

の透水係数が原地盤(粘性土層)に比べて仮に50倍大きいと仮定して、同様の移流拡散計算を実施した。その結

果を図-4.46に示す。地震時による地盤変形による剥離が永久に生じているとした解析結果をみても杭打設によって保有水の拡散には影響を与えていないことが分かる。

c) 杭先端の濃度分布

杭先端の濃度分布の時刻歴変化について図-4.48に示す。Y軸に濃度、X軸に時間を示した。ここでY軸の濃度の最大値は0.01である。図-4.48より、杭を設置しても濃度の時刻歴変化は現況とほとんど変化が見られないことがわかる。また、地震時に生じる可能性のある杭と地盤の剥離が永久に生じたままであるという極端な仮定をした場合でも少なくとも20年間剥離が無い場合と比べて変化が見られなかった。なお、ここでは地盤の剥離が生じたと考えられる個所周辺の保有水濃度が上昇する以前の期間の解析となっている。ただし、これまでの解析でも図中に地震時考慮と書かれている深さの部分では透水係数が大きいことを仮定しているが、保有水の広がり速度にほとんど違いがないということからして、海面処分場の基礎地盤では、流れがほとんど生じていないことを意味しているものと考えられる。

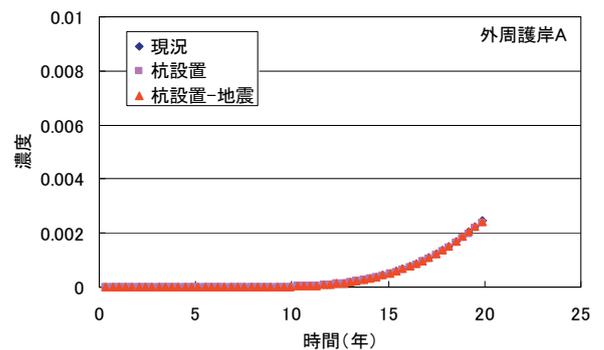


図-4.48 保有水の拡散の時刻歴変化

4.5 杭への塗布材としての膨潤性止水材の効果

4.4までの実験結果より、杭打設後に杭が粘性土層内に存在することによる遮水基盤への影響はほとんどなく、杭打設中には廃棄物が連れ込まれるが、その影響は一定深度に留まることが確認された。

ここでは、より安全を期すために、前者に対しては杭と粘土との境界部の隙間に対する補強のための膨潤性、後者に対しては杭打設中に廃棄物を連れ込まない変形性の両者の機能を併せ持つ材料として、通常は固体であるが吸水すると膨潤してゲル状になる膨潤性止水材に着目し、この適用性について検討した。

当該材料は、海水およびセメント改良地盤(カルシウムイオンなどの多価金属イオン含有)にも適用でき、長期間膨潤機能を維持するように改良されたアクリル系吸

水性高分子材料である。

このような特徴から、膨潤性止水材を予め杭へ塗布して打設することにより、廃棄物等の連込み防止効果、及び杭と地盤との透水性低減効果が期待される。

(1) 膨潤性止水材の膨潤，透水，劣化特性の検証²⁷⁾

a) 実験概要

膨潤性止水材が杭への塗布剤として有効かどうかを確認するため、カラム型試験装置を用いて膨潤性止水材の膨潤・透水試験を実施し、拘束圧下における膨潤性止水材の膨潤特性、遮水剤としての透水特性及び劣化による透水性性能への影響を実験的に検証した。

1) 膨潤性止水材の特徴

膨潤性止水材は、特殊バインダー樹脂と吸水性ポリマーを有機溶剤に分散させたもので、主剤の吸水性ポリマーは、地下水との接触により吸水膨潤しゲル化する。

本試験で使用した吸水性ポリマーは、海水やセメント水に対しても高吸水性を発現するように改良した非イオン性基を持つアクリル系架橋共重合体である。

0.2wt%塩化カルシウム水溶液に 5 日間浸漬後の吸水倍率は 15 倍(g/g)~20 倍(g/g)である。吸水倍率は以下の方法で測定する。まず、市販のティーバッグの中に、できるだけ均一になるように約 0.2g の吸水性ポリマーの粉末を入れ、ティーバッグを塩化カルシウム水溶液中に浸漬し吸水膨潤させる。そして、5 日後にティーバッグを引き上げ 5 秒間水切り後、10 秒間トイレットペーパーの上に置いた後に、吸水膨潤したティーバッグの重量を測定する。

吸水倍率は、吸水倍率 P (g/g)=(吸水膨潤後のティーバッグの重量 - ティーバッグの重量)/吸水性ポリマーの重量、として計算する。

また、地中における吸水性ポリマーは、劣化の要因となる紫外線が当たらず、地中温度も 15°C程度(標準的)と比較的低温であり、非常に大きな分子量をもつため長期に渡り膨潤止水効果を保持するものと考えられる。

2) 実験装置，実験条件

試験には図-4.49 に示すカラム型膨潤・透水試験装置を用いた。膨潤性止水材は、調合直後と 10 年および 100 年劣化相当のものを用いた。劣化した膨潤性止水材は、純水を加えてゲル化させ 95°Cで所定時間加熱(密閉状態)して劣化を促進させた後に固化し粉碎して得られた吸水性ポリマーより作製した。95°Cで 24 時間加熱した場合を 10 年劣化相当とし、95°Cで 10 日間加熱した場合を 100 年劣化相当とした。

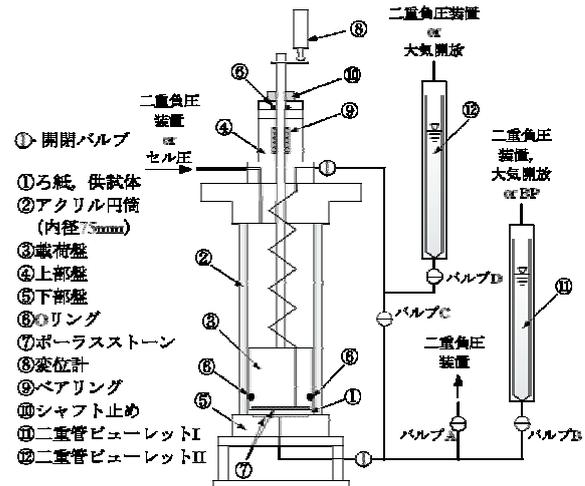


図-4.49 実験装置の概要図

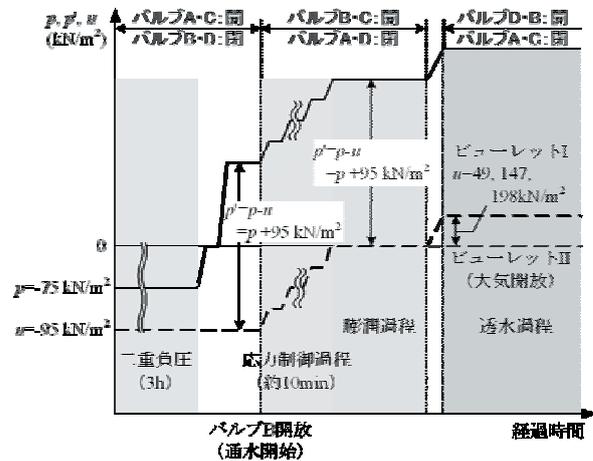


図-4.50 試験手順(膨潤・透水過程)

3) 実験方法

膨潤性止水材をろ紙(厚さ 0.21mm, 保留粒子径 1μm)に塗布して供試体とした(塗布厚さ: $H_f=0.2\text{mm}$ 程度(調合直後), 0.6mm 程度(劣化)). 膨潤性止水材を塗布したろ紙を下部盤に、塗布していないろ紙を載荷盤に、それぞれシリコン系充填剤により接着した。

図-4.50 に実験時のバルブ操作と載荷圧の変化の手順を示す。まず、管路に通水して膨潤性止水材を吸水膨潤させるために、バルブ A, C を開けてバルブ B, D を閉じた状態で、二重負圧法(セル圧 $p=-75\text{ kN/m}^2$, 供試体から二重管ビューレット I(図-4.49 ⑪)までの管路内圧力 $u=-95\text{ kN/m}^2$)により 3 時間真空脱気した。そして、管路内の真空圧 $u=-95\text{ kN/m}^2$ を保った状態で p を一旦ゼロに戻し、供試体に所定の有効拘束圧 $p'=p-u=p+95\text{ kN/m}^2$ が載荷されるように p を載荷した。そして、バルブ A を閉じてバルブ B を開け、 p' を一定を保ちながら $u=0$ になるまで u と p を段階的に増加させた。 $u=0$ となった後に、

ビューレット I(図-4.49⑩)を大気開放した。

バルブ B を開けた本過程において、ビューレット内の水が管路を通じて载荷盤および下部盤から流入し膨潤性止水材が吸水膨潤する(膨潤過程)。膨潤過程終了後、载荷盤を固定し(図-4.49⑪)、バルブ C を閉じてバルブ D を開け、透水試験を実施した。ビューレット II(図-4.49⑫)を大気開放した状態で、 p' を一定を保ちながら、水頭差としてビューレット I(図-4.49⑩)の u を 49, 147, 198kN/m² と段階的に増加させ、供試体の下面から透水を行った。

b) 実験結果

図-4.51 に鉛直ひずみ ε_s (膨潤を正)の経時変化を示す。拘束圧約 50kPa の状態では、16~17 時間でほぼ膨潤が完了し、調製直後の状態で約 7 倍膨潤した。

図-4.52 に有効拘束圧 p' と膨潤量 ε_s の関係を示す。拘束圧が大きいほど膨潤量が小さくなり、両者の関係は図のような直線で近似できる。膨潤量がゼロである拘束圧を膨潤圧 p_s と定義すると $p_s=400\text{kN/m}^2$ 程度である。劣化の度合いが大きくなると膨潤量は小さくなるが、いずれも直線で近似でき、膨潤圧は同じである。

図-4.53 に有効拘束圧 p' と透水係数 k の関係を示す。透水係数は $k=10^{-7}\sim 10^{-11}\text{cm/s}$ 程度とかなり小さく、劣化を想定した場合も同様の値であり、遮水剤としての適用が期待できる。

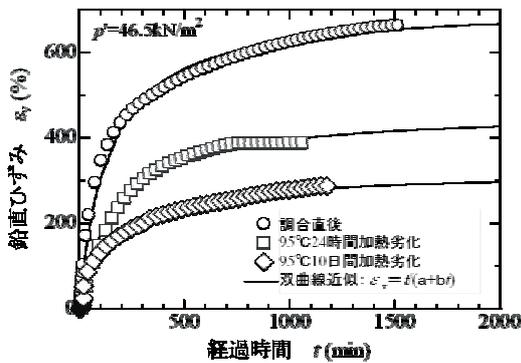


図-4.51 鉛直ひずみの経時変化

c) まとめ

拘束圧下における膨潤性止水材の膨潤・透水特性とその劣化の影響について検討し、以下の知見が得られた。

- ・膨潤性止水材の膨潤量と拘束圧の関係は、直線で近似でき、膨潤圧は $p_s=400\text{kN/m}^2$ である。
- ・劣化の度合いが大きくなると膨潤量は小さくなるが、同様に直線で近似でき、膨潤圧は調査直後と同じ

400kN/m²である。

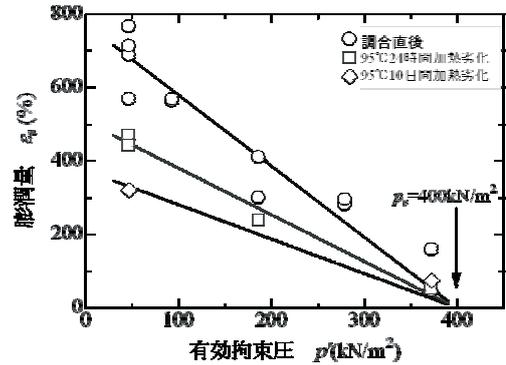


図-4.52 有効拘束圧と膨潤量の関係

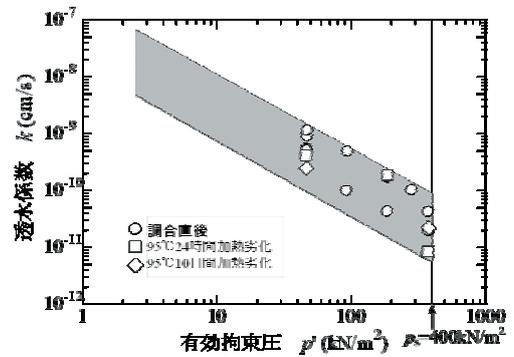


図-4.53 有効拘束圧と透水係数の関係

・膨潤性止水材の透水係数は、劣化の有無によらず $k=10^{-7}\sim 10^{-11}\text{cm/s}$ 程度とかなり小さく、膨潤性止水材の膨潤後の劣化を想定しても、杭と粘土との隙間を埋める遮水剤としての適用が期待できる。

(2) 杭打設における膨潤性止水材の効果の検証^{28~30)}

(1)で確認した膨潤性止水材の遮水剤としての特性を踏まえ、杭への膨潤性止水材の塗布による、杭打設時の廃棄物等の連込み低減効果、及び遮水機能への影響低減効果を小規模、中規模実験により検証した。

a) 杭の表面処理

杭の表面に塗布する材料として、杭の表面摩擦力の低減効果を持ち、杭打設時には砂の連込み量低減が期待され、杭打設後には材料の膨潤により、杭と粘土との隙間を埋める遮水剤としての適用が期待できる、(1)に示す膨潤性止水材を用いた。

b) 実験方法

実験装置は、前述の図-4.34、図-4.35 に示すものを

使用した。

実験方法を以下に示す。粘土の作製方法は基本的に4.1(1)および4.3に示す内容と同様である。

なお、実験内容は前述の4.1(1)および4.3で整理した「杭打設に伴う廃棄物等の連込み」、及び「保有水の移流拡散による遮水層への影響」に分け、前者については小規模実験、後者については小規模実験、中規模実験により検証した。

1) 杭打設時の廃棄物等の連込みに関する小規模実験

4.1(1)と同様の方法で粘性土層を作製し、その粘性土層上部に水で飽和させた砂層を作製した。その後容器の中心部に、膨潤性止水材を0.1~0.2mm厚で塗布した杭を砂地盤下部まで打設した。

その後砂地盤で2時間静置し、砂地盤内で膨潤性止水材を膨潤させた後に粘性土層まで打設速度3cm/分で打設した。その後、即座に杭周縁の粘土試料を深度方向に1cmずつ採取し、深度毎に試料中の砂重量を測定することで、粘土中の砂の連込み量の深度分布を確認した。実験概要を図-4.54に示す。

膨潤性止水材を塗布しないケース(case1)と、塗布したケース(case2)の実験を行った。

また、ペンシル型の杭の先端角度の違い(ケース1~5)による、膨潤性止水材を塗布した場合の砂の連込みの低減効果も確認した。

2) 保有水の移流拡散による遮水層への影響に関する

小規模実験

4.3と同様の方法で作製した粘土の中央部に膨潤性止水材を1mm厚で塗布した杭を粘性土層下部まで打設した。

その後、再び圧密圧力作用下で、トレーサーを9日間循環させ、実験終了後、杭周辺部及びカラム端部において深度方向に1cmずつ試料を採取し、粘土中の臭化物イ

オン濃度の深度分布を求めることにより、杭打設による粘土中への保有水拡散状況(影響深度)を確認した。

実験条件を表-4.13に示す。

表-4.13 実験条件

(保有水の移流拡散による遮水層への影響：小規模実験)

実験ケース	1	2	3	4
圧密荷重	50kPa		120kPa	
杭頭変位	3mm	3mm	3mm	3mm
表面処理	あり	なし	あり	なし

3) 保有水の移流拡散による遮水層への影響に関する
中規模実験

4.3に示した中規模実験の実験方法に基づき作製した粘土の中央部に膨潤性止水材を1mm厚で塗布した杭を粘性土層下部まで打設した。実験は167日間継続し、杭頭変位を77日目に2.5mm、104日目に10mmと段階的に与え、粘土上部にポンプで定常的にトレーサーを循環させ、カラム下部の排水量を2日毎に測定した。

実験終了後には、杭周辺部及びカラム端部から深度方向に2cmずつ試料を採取し、粘土中の臭化物イオン濃度の深度分布を求めることにより、杭打設による粘土中への保有水拡散状況(影響深度)を確認した。

なお中規模実験では、除荷した状態で(粘性土層が過圧密の状態)実験を実施した。

c) 実験結果

1) 杭打設時の廃棄物等の連込み

図-4.55に、小規模実験によって得られた、膨潤性止水材塗布の有無による砂の連込み量の深度分布を示す。未塗布の場合(case1)、表層より5~6cmまで砂の連込み

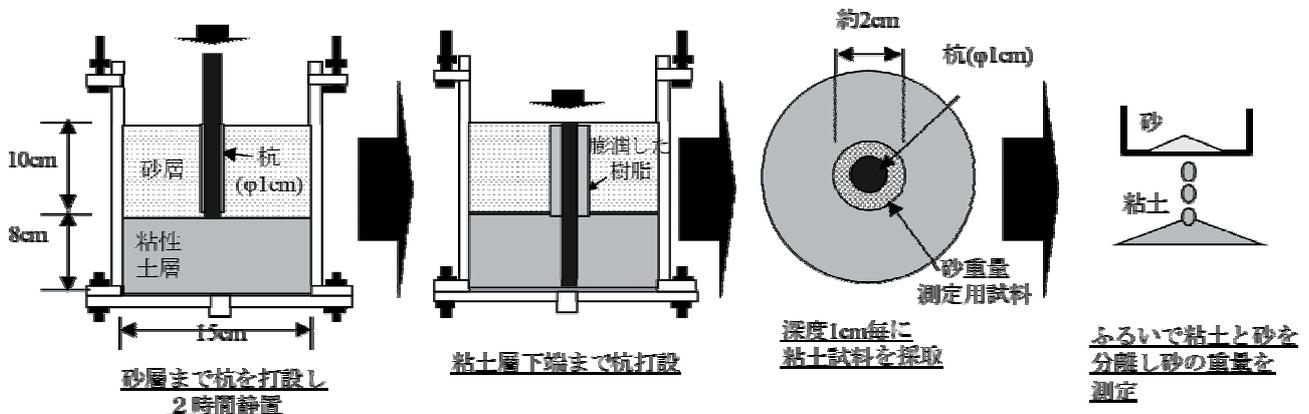


図-4.54 実験概要図(杭打設に伴う廃棄物等の連込み：小規模実験)

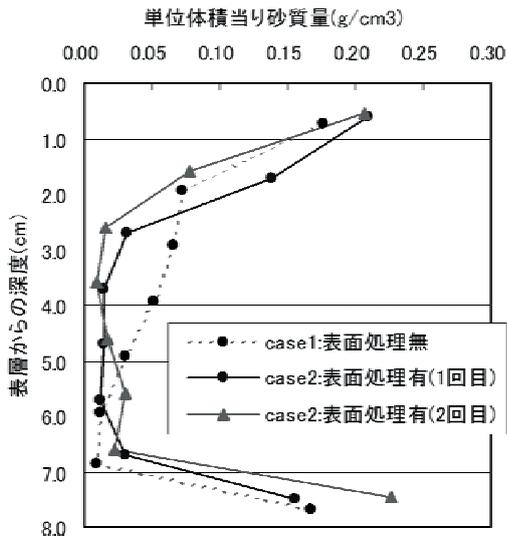


図-4.55 杭への塗布の有無による砂連込み量深度分布の比較(小規模実験)

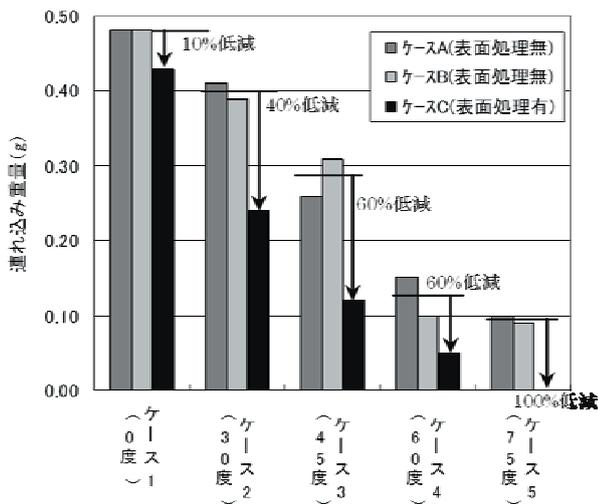


図-4.56 杭への塗布の有無による杭先端部への砂連込み量の比較(小規模実験)

が確認されたが、膨潤性止水材を塗布することで(case2)、砂の連込みは表層より2~3cm程度と、半分以下の深度に抑えられた。

また図-4.56は、小規模実験において杭先端形状が異なる場合の杭先端部への砂の連込み量の違いを示したものである。図から分かるように、膨潤性止水材を塗布することにより、全てのケースで未塗布の場合と比べて、杭先端部の砂の連込み量も低減されることが確認された。その低減効果は、先端角度が鋭角になる程、低減効果が顕著に表れた。

最も先端が鋭角であるケース5(75度)では、膨潤性止

水材の塗布により砂の連込みが完全に抑えられた。

これらのことから、杭に膨潤性止水材を施すことで、杭打設による粘性土層への廃棄物等の連込み量の低減が確認された。杭への膨潤性止水材塗布の有無による砂の連込みイメージ図を図-4.57に示す。杭に膨潤性止水材を塗布しない場合には、杭打設時に杭と砂との摩擦力により杭に付着した砂が粘性土層内へ連れ込まれるが、塗布した場合には、砂層で樹脂が膨潤してゲル状となり、粘性土への杭打設時に樹脂が杭から剥がれることにより樹脂周面に付着した砂は粘性土層内へ入らず、粘性土層への砂の連込み量が低減される。

2) 保有水の移流拡散による遮水層への影響

i) 排水量に関する考察

図-4.58に、小規模実験によって得られた、杭への膨潤性止水材の塗布の有無による9日間の合計排水量の違いを示す。実験の結果、杭表面に塗布したケース(ケース1, 3)が、塗布していないケース(ケース2, 4)に比べ、粘性土層下部からの排水量が5%程度軽減された。

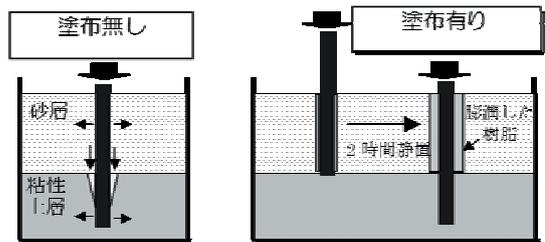


図-4.57 杭への膨潤性止水材塗布の有無による砂連込みイメージ図

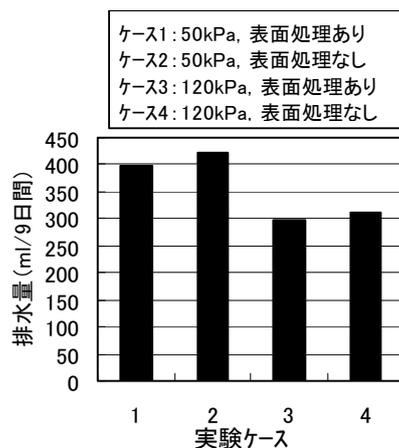


図-4.58 杭への塗布の有無による排水量(小規模実験: 9日間合計)

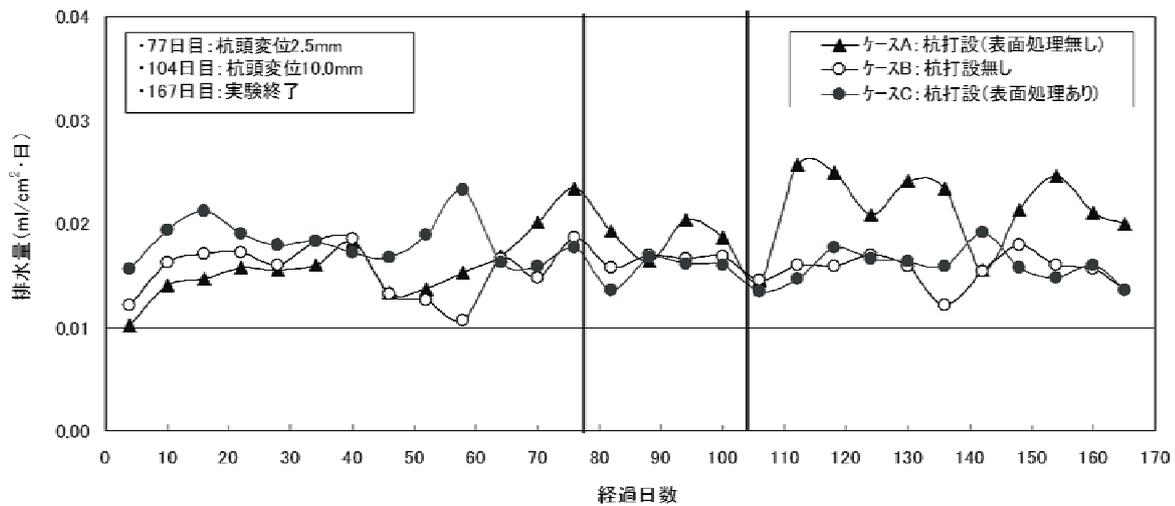


図-4.59 杭への塗布の有無による排水量経時変化(中規模実験)

図-4.59 に、中規模実験によって得られた、実験装置底部からの排水量の経時変化を示す。図に示した排水量は、単位断面積当りの日排水量の実測値を別途実施した定ひずみ速度圧密試験から得られた e - $\log k$ 関係を用いて同一の透水係数を持つ粘性土層に換算したものである。

図-4.59 より、実験開始から 104 日目までの間の、杭頭変位を与えていないあるいは小さい時には各ケースともほぼ同等の排水量であった。しかし、10mm の杭頭変位を与えた 104 日目以降では、膨潤性止水材を塗布していないケース A では排水量が 1.5 倍程度増大したのに対し、塗布したケース C では杭頭変位を与える前と排水量の変化はほとんどなく、杭を打設していないケース B と同等の排水量に抑制された。膨潤性止水材を塗布していないケース A の排水量が 1.5 倍に増大し、塗布したケース C では排水量が変わらなかった理由としては、前者は杭頭変位を与えることにより、杭と粘土の境界面に隙間が生じ、有効遮水層厚が減少したが、後者は杭頭変位を与えることにより生じた隙間が、膨潤性止水材により閉塞されたものと考えられる。

これらの結果より、杭への膨潤性止水材の塗布により排水量は低減し、特に杭頭変位を与えた場合はその傾向が顕著であり、膨潤性止水材の有効性が確認された。

ii) 移流拡散に関する考察

図-4.60 に、小規模実験によって得られた、杭打設 9 日後の粘土中のトレーサー相対濃度(上部供給トレーサー濃度を 1 とした時の濃度)の差(杭周辺部と装置端部との差)の深度分布を示す。濃度が小さいほど杭打設による影響が小さいことを意味している。

膨潤性止水材を塗布していないケース 2 では粘土表面

から深度 5cm 程度まで濃度差が 10%程度、深度 7cm 程度まで濃度差が確認できるが、塗布したケース 1 では、表面から 3cm 以深で濃度差が確認されなかった。

このことから、小規模実験においては、膨潤性止水材を塗布した杭の打設による遮水層への影響深度は、杭打設時の連込みの結果と同様に、塗布していない場合(杭径の約 7 倍)の半分以下(杭径の約 3 倍)に抑制されることが確認された。

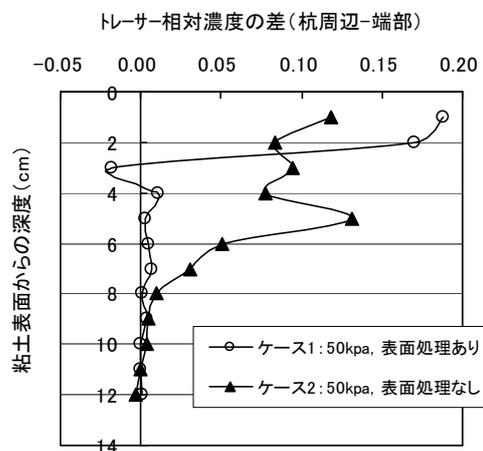


図-4.60 杭への塗布の有無によるトレーサー相対濃度の深度分布(小規模実験：9 日後)

図-4.61 に、中規模実験により得られた、杭へ膨潤性止水材の塗布を行ったケースにおける、実験終了後に採取した粘土中のトレーサー相対濃度の深度分布を示す。

膨潤性止水材の塗布を行っていないケース(前述の図-4.39)では、粘土表面から 10cm~30cm の深度において、杭打設による影響が想定される杭周面部と、影響がない

と考えられる装置側面部(カラム端部 1~3)との相対濃度差が 10%程度確認された。しかし、塗布を行ったケース(図-4. 61)では、杭周面部と装置側面部でほぼ同様の相対濃度分布が得られた。これらから、杭に膨潤性止水材を塗布して打設することにより、塗布しない場合に比べて遮水層への影響が抑制されることが確認された。

i), ii)より、膨潤性止水材を塗布した杭を粘性土層に打設した場合、杭打設後に粘性土層内において膨潤性止水材が膨潤することにより、膨潤性止水材が杭と粘土の隙間の閉塞し、杭と粘土との境界面の遮水性が保持されるものと考えられる。杭への膨潤性止水材塗布による膨潤イメージ図を図-4. 62 に示す。

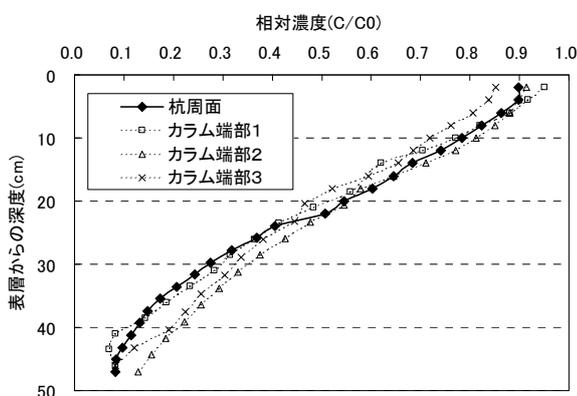


図-4. 61 粘土中のトレーサー相対濃度深度分布(塗布あり)(中規模実験：実験約 160 日後)

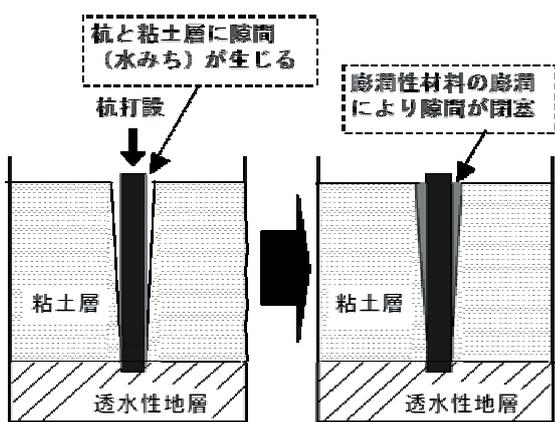


図-4. 62 杭への塗布による膨潤イメージ図

(3) 杭への塗布材としての膨潤性止水材の効果に関する結論

(1), (2)の結果から、膨潤性止水材の膨潤後における材料自体の透水係数は $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下と遮水性が高く、膨潤性止水材の膨潤後の劣化を想定しても、杭打設後の

杭と粘土との隙間を埋める遮水剤として十分に効果があることが確認された。また、膨潤性止水材を塗布した杭を廃棄物層(実験では砂層)内で膨潤させた後に、粘性土地盤へ打設することで、杭側面へ付着する廃棄物等の粘性土層への連込みが低減されることが確認された。

よって、杭打設に伴う廃棄物等の連込み低減、及び杭打設後における杭と粘土の隙間からの保有水漏出抑制の双方で、膨潤性止水材の効果が期待できるものと考えられる。

4.6 まとめ

4.1 から 4.5 までの検討結果をまとめると以下の通りである。

1) 杭打設に伴う廃棄物等の連込み

- ・廃棄物等の連込みによる遮水層への影響深度は、粘土の圧密状態の違いにより異なり、正規圧密状態であれば杭径程度、過圧密状態の場合杭径の 3~6 倍程度まで影響があるが、それ以降への影響はほとんどない。
- ・杭先端部においては一定量の砂が連れ込まれるが、杭の形状をペンシル杭とする等の工夫をすることにより、杭先端部における連込み量は低減できる。
- ・廃棄物等の連込み低減の観点からは、杭打設方法として中掘り工法が最適である。

2) 粘性土地盤と杭等の境界面における透水特性

- ・杭打設時に杭と粘土の間に空隙ができないよう施工した場合でも、粘土が過圧密状態であれば、杭境界面での透水性が多少上昇するが、それはわずかであり、ほとんど問題にならない。また正規圧密状態であれば、杭境界面での透水係数上昇はほとんどない。
- ・粘土と杭に空隙が生じるような施工を行った場合には、相当量の通水が杭境界面で生じるが、粘土と杭に側面摩擦力が作用するような状態(正規圧密状態)、まで載荷すれば、粘土と杭との空隙はほとんど閉塞し、閉塞後の境界面の透水性は非常に低くなる。
- ・粘土と杭との境界面における透水性は、杭打設後の圧密状態(過圧密、正規圧密)による影響が大きい、杭打設前の圧密度の違いによる影響はほとんどない。
- ・実際の処分場内部の動水勾配は極めて小さいため、遮水基盤に杭打設程度の乱れを与えても、粘性土地盤から保有水が漏出する可能性は極めて低い。
- ・杭の粗度が大きくなるほど、杭と粘土との境界面の透水係数が大きくなるが、実際に打設する杭の粗度等を考慮すると、杭と粘土との境界部からの透水量は極めて少なく、周辺環境への影響はほとんどない。

3) 保有水の移流拡散による遮水層への影響深度

- 杭打設時には、一定深度(杭径の約 6~7 倍程度)までは杭と粘性土層との間に隙間が生じ、その内部に保有水が浸入するが、それ以上では杭と粘性土層とは密着しており、杭打設による粘性土層の遮水機能への影響は限定的である。
- 杭頭変位を与えた実験では、変位を与えない場合に比べて 10%~最大 50%の排水量増加が確認された。

4) 杭打設後における地震時の影響

- 地震時による地盤変形を考慮した解析によれば、杭打設によって保有水の拡散に影響を与えない。
- 地震時には杭と地盤との剥離が生じる可能性は否定できないが、この剥離が永久に生じたままであったとしても、20 年間には地震が発生しない場合等と比べても保有水拡散の違いは見られない。
- これらから、地震時に杭が存在することによる遮水性能の低下は考え難く、処分場外への保有水の拡散もほとんどないものと考えられる。

5) 杭へ塗布した膨潤性止水材の効果

- 膨潤性止水材の膨潤後における材料自体の透水係数は $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下と遮水性が高く、膨潤性止水材の膨潤後の劣化を想定しても、杭打設後の杭と粘土との隙間を埋める遮水剤として十分に効果がある。
- また、膨潤性止水材を塗布した杭を廃棄物層内で膨潤させた後に、粘性土地盤へ打設することで、杭側面へ付着する廃棄物等の粘性土層への連込みが低減できる。
- これらから、杭打設に伴う廃棄物等の連込み低減、杭打設後における杭と粘土の隙間からの保有水漏出抑制の双方で、膨潤性止水材の効果が期待できる。

5. 現場での杭打設時に考慮すべき事項

4. の結果を踏まえ、現場での杭打設時に考慮すべき事項を「杭打設時にあたって解決すべき課題」、「杭打設時における検討事項」に区分して抽出するとともに、内容を整理した。これらの事項を解決することにより、海面処分場における杭打設が現実的になるものと考えられる。

5.1 杭打設時にあたって解決すべき課題

本研究において、実験レベルでは杭打設による遮水機能への影響はほとんどないことは確認できたが、1)~4) に示す内容について、実現場での杭打設試験により確認することが望まれる。

1) 効率的で安価な杭打設方法の開発

3.3(2) で述べたような三重管を用いて基礎杭を打設することにより、杭打設時の廃棄物の連込みを防止することが可能である。しかし、当該工法は多大な施工費用を要することから、処分場跡地での利用は限定的になるものと考えられる。

このため、処分場跡地の高度利用の推進にあたっては、比較的安価に施工可能な杭打設方法を実規模レベルで検証する必要がある。

本研究において、杭打設時に粘性土地盤の遮水機能への影響が少ない最適な杭の種類や施工方法は確認しており、鋼管杭や PHC 杭を打撃工法や中掘工法等の標準的な工法により施工できることが望ましいと考える。

具体的には、杭と粘性土地盤との周面摩擦係数低減や、廃棄物の粘性土層下部への連込み防止のため、杭周面への膨潤性止水材の塗布、或いは杭の回転打設による、繊維ごみ等の切断等が考えられる。

2) 廃棄物の連込み状況の検証

4. において、杭打設時における液体や砂の連込み状況を実験的に検証したが、様々な形状や性状を持つ廃棄物の連込み挙動については不明な点が多い。

このため、廃棄物の種類に応じた連込み状況や、メカニズム等について更なる整理が必要である。

3) 室内試験と実現場との相関性の検証

室内実験では、杭打設による粘性土地盤の遮水機能への影響はほとんどないという結果が得られているが、実現場においても同様の結果が得られるかどうか実物大試験等により検証し、室内試験と実現場での現象の相関性について確認する必要がある。

4) 膨潤性止水材の透水性担保の検証

4.5 の結果から、室内実験では、膨潤後の膨潤性止水材は $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 程度の遮水性は確保できるという結果が得られているが、実現場レベルで同様の遮水機能が確保できるかどうかは不明であることから、実現場レベルで膨潤性止水材の遮水性を確認する必要がある。

5.2 杭打設時における検討事項

1) 杭打設に影響を与える条件の整理

処分場における杭打設方法は、処分場に関する以下の条件の影響を受けると想定されることから、これらの条件に適合した杭打設方法を選択する必

要がある。

- ・ 処分場：埋立場所の立地条件，埋立後の経過年数(廃棄物安定状況)
- ・ 廃棄物層：廃棄物の種類，埋立層厚
- ・ 粘性土層：層厚，透水係数，含水比，圧密度

2) 膨潤性止水材へ影響を与える因子，塗布条件等の整理

処分場内に杭を打設する際に，膨潤性止水材へ影響を与える因子を事前に整理する必要がある。

(例えば，隙間厚，塗布厚，載荷条件，地盤条件(土質，含水比)，水中の物質濃度等)

また，膨潤性止水材には，杭打設時の摩擦低減(廃棄物の連込み低減)効果と，粘性土地盤内での遮水効果(膨潤により隙間を塞ぐ効果)が期待される。

よって，膨潤性止水材の効果を最大限に発揮するために，用途に応じた膨潤性止水材の塗布条件(塗布厚，反応時間)，塗布方法の検討が必要である。例えば，杭へ塗布する膨潤性止水材を3層構造(膨潤性止水材，トップコート，膨潤性止水材)とすることにより，杭打設時の摩擦低減と杭打設後の粘性土地盤内での遮水効果の双方が期待できると考えられる。

3) 遮水機能への影響の確認方法の検討

現場レベルでの杭打設による粘性土地盤の遮水機能への影響は明確でないことから，杭打設後における遮水機能保持の長期的な信頼性を確保するため，杭打設後(特に地震時)の遮水機能への影響を確認する方法(モニタリング方法)を検討する必要がある。例えば，杭に採水装置を施して，杭側面及び杭下部の水を採水できる工夫や，モニタリング用の捨て杭の設置等が考えられる。

またモニタリングの際には，杭周面部や杭先端部の水質ほか，バックグラウンドとして処分場外の水質を確認することで，杭打設による遮水機能への影響の有無を確認する必要がある。

4) 処分場毎の地震時の遮水機能担保についての検討

4.4の廃棄物処分場跡地をモデルとした検討では，地震時においても杭と粘性土地盤との剥離が起きず，遮水機能は保持されるという結果となったが，地震時の地盤変形により杭と粘性土地盤との剥離が起きるかどうかは，各処分場の様々な条件に依存すると考えられる(地震動条件，地盤条件，杭打設条件，上載荷重等)。

よって，地震時の遮水機能担保についての検討

に当たっては，杭打設の対象となる処分場毎に検証する必要がある。

6. 結論

廃棄物処分場において廃棄物による埋立て終了後の跡地の高度利用率は低い状態となっている。なかでも港湾区域内に位置する管理型海面廃棄物処分場を高度利用しようとする際には底面遮水工である粘性土地盤に杭を打設することが必要となることが考えられる。本稿では，そのような場合を想定し，杭の打設が処分場の保有水および廃棄物の場外への漏出の問題についてどのような影響が生じるか，実験室レベルで検討を行った。以下にその結果得られた主な結論を述べる。

1) 杭打設に伴う廃棄物等の連込み

廃棄物等が遮水層に連れ込まれる深度は，粘土の圧密状態の違いにより異なる。また，杭先端部においては一定量の廃棄物が連れ込まれるが，杭の先端形状をペンシル状にすると杭先端部における連込み量は低減できる。また，中堀杭工法を用いると廃棄物等の連れ込みを低減できる。

2) 粘性土地盤と杭等の境界面における透水特性

杭と粘土の間に空隙ができないよう施工した場合には杭と粘土の間を流れる水の量は少ない。過圧密状態の場合で粘土と杭の間に空隙が生じると，相当量の通水が杭境界面で生じるが，正規圧密状態になれば，粘土と杭との空隙はほとんど閉塞し，境界面の透水性は非常に低くなる。

実際の処分場内部の動水勾配は極めて小さいため，多少遮水基盤を乱しても粘性土地盤から保有水が漏出する可能性は極めて低い。

3) 杭打設後における地震時の影響

地震時には杭と地盤との剥離が生じる可能性は否定できないが，この剥離が永久に生じたままであったとしても，剥離の発生部位の深度によっては，剥離が保有水の拡散に及ぼす影響は小さい。

4) 杭への塗布材としての膨潤性止水材の効果

膨潤性止水材の膨潤後における材料自体の透水係数は $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 以下と遮水性が高く，膨潤性止水材の膨潤後の劣化を想定しても，杭打設後の杭と粘土との隙間を埋める遮水剤として十分に効果がある。また，膨潤性止水材を塗布した杭を廃棄物層内で膨潤させた後に，粘性土地盤へ打設することで，杭側面へ付着する廃棄物等の粘性土層への連れ込みが低減できる。これらから，杭打設に伴う廃棄物等の連

込み低減、杭打設後における杭と粘土の隙間からの保有水漏出抑制の双方で、膨潤性止水材の効果が期待できる。

7. あとがき

本研究は、(独)港湾空港技術研究所と呉工業高等専門学校、京都大学大学院、(株)日本触媒、五洋建設(株)、中電技術コンサルタント(株)が実施した共同研究「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に関する研究」の成果を取りまとめたものである。ここでは、管理型海面廃棄物処分場における杭打設が底面遮水基盤に与える影響に関する一連の室内実験に基づく研究内容を一元化して整理し、取りまとめた。

今後は、これまでに得られた知見をもとに、現場における杭打設時に考慮すべき事項を解決するため、技術的課題を満足するような海面処分場跡地への杭打設方法を確立することにより、海面処分場跡地の高度利用等の積極的活用が期待される。

最後に、本共同研究を実施するに当たり、著者以外でメンバーとしてご尽力いただいた方の氏名を公表し、関係各位のご協力に対する感謝の意を表したい。(敬称略)

渡部 要一、水谷 崇亮、杉本 貴之 ((独)港湾空港技術研究所)

乾 徹(京都大学大学院)

三藤 正明(五洋建設(株))

(2012年1月27日受付)

参考文献

- 1) 管理型廃棄物埋立護岸 設計・施工・管理マニュアル (改訂版), (財)港湾空間高度化環境研究センター, 2008年, p.35.
- 2) 勝見武, 乾徹, 嘉門雅史: 廃棄物処分場底部遮水工の遮水性能の等価性評価に関する基本的考察, 第16回廃棄物学会研究発表会, 2005年, pp.950-952.
- 3) 葛川徹, 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, 2003年, pp.1102-1104.
- 4) Plata, H., Inui, T., Katsumi, T., Oya, Y., and Kamon, M.: Speciation and mobility of zinc in coastal landfill sites with MSW incinerator ash, Journal of Environmental Engineering, ASCE, 2010年, Vol.136, No.8, pp.762-768.
- 5) 樋口壯太郎: 最終処分場跡地利用の現状と課題について, 最終処分場跡地利用に関するセミナーテキスト, 2005年, pp.39-48.
- 6) 平野文昭, 長野修治, 松藤康司, 立藤綾子, 熊野秀明, 前田伊瑞実: 最終処分場の適正化方法および跡地利用に関する研究, 循環型社会における埋立地のあり方を考える講演論文集, 第15回廃棄物学会研究発表会, 2004年, pp.39-44.
- 7) 加藤照己, 砂金克明, 岡田寿, 阪本廣行, 山田裕己, 伊藤剛, 瀧宏史, 小野諭, 石川浩次, 福原誠: 産業廃棄物処分場跡地における工事への環境保全技術の適用, 土木建築技術シンポジウム 2002 論文集, 2002年, pp.41-46.
- 8) 片山廣明, 手塚博治, 山下公平: 廃棄物処分場における三重管基礎杭, 橋梁と基礎, 2008年, pp.43-46.
- 9) 上野雅明: 廃棄物処分場を通過する道路の建設, 基礎工, 2006年, pp.54-56.
- 10) 平尾隆行, 葛川徹, 眞田一磨, 森脇武夫, 服部晃, 岡本功一: 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(短期的現象)の考察, 第44回地盤工学研究発表会, 2009年, pp.1907-1908.
- 11) 葛川徹, 森脇武夫, 岡本拓, 服部晃, 岡本功一, 渡辺修士, 平尾隆行, 眞田一磨: 基礎杭打設時の表面処理が海面処分場の底面遮水工に与える影響(短期的影響), 第20回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2009年, pp.403-404.
- 12) 葛川徹, 森脇武夫, 服部晃, 岡本功一, 平尾隆行, 眞田一磨: 基礎杭打設による海面処分場の底面遮水工に与える短期的影響(杭先端部)の考察, 第21回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2010年, pp.483-484.
- 13) 福田賢二郎, 上田正樹, 杉原広晃, 渡部要一: 海面管理型処分場の遮水基盤への基礎杭打設の影響, 第39回地盤工学研究発表会, 2004年, pp.2267-2268.
- 14) 嘉門雅史, 勝見武, 濱田悟, 乾徹: 廃棄物埋立地盤における杭打設が粘土層の遮水性能に及ぼす影響の評価に関する研究, 第39回地盤工学研究発表会, 2004年, pp.2265-2266.
- 15) 嘉門雅史, 濱田悟, 勝見武, 乾徹: 杭打設による粘土層の遮水性能への影響に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報 第47号 B-21, 2004年, pp.133-142.
- 16) 嘉門雅史, 勝見武, 乾徹, 濱田悟: 鋼管杭打設粘土地盤と杭境界面における漏水量とその評価, 材料別冊 第54巻 第11号, 2005年, pp.1100-1104.
- 17) 富士暁士, 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, 2007, pp.281-286.
- 18) 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 6 回環境地盤工学シンポジウム, 2005 年, pp.217-224.
- 19) 菊池喜昭, 菅野高弘: 海面廃棄物処分場の遮水基盤を貫通する杭の施工可能性に関する研究, 地盤工学会誌, 2008 年 8 月, pp.28-29.
- 20) 菊池喜昭, 吉野博之: 気泡混合処理土の透水特性, 港湾技術研究所報告第 37 巻第 1 号, 1998 年, pp.33-56.
- 21) 福谷準也, 大向直樹, 谷和夫, 上野一彦: 粘性土における境界面の粗度の影響を考慮した透水特性の実験的検討, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 2006 年, pp.495-496.
- 22) 若尾和俊, 谷和夫, 上野一彦, 大向直樹: 壁面に接する粘土の境界近傍の透水特性の実験的検討, 第 42 回地盤工学研究発表会, 2007 年, pp.1043-1044.
- 23) 平尾隆行, 下所諭, 福原和顕, 葛川徹, 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, 2003 年, pp.1212-1214.
- 24) 近藤良, 平尾隆行, 葛川徹, 森脇武夫, 尾崎則篤: 管理型処分場の底面遮水工における汚染物質の移流拡散現象に関する考察, 第 15 回廃棄物学会研究発表会, 2004 年, pp.1157-1159.
- 25) 葛川徹, 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, 2006 年, pp.916-918.
- 26) 葛川徹, 森脇武夫, 岡本拓, 服部晃, 岡本功一, 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(その 2), 第 18 回廃棄物学会研究発表会, 2007 年, pp.703-705.
- 27) 岡本功一, 梅崎健夫, 河村隆, 詠田晋伍, 服部晃: 鋼材表面に塗布される摩擦低減剤の拘束圧下における膨潤・透水特性, 第 45 回地盤工学研究発表会, 2010 年, pp.1257-1258.
- 28) 近藤良, 平尾隆行, 渡辺修士, 葛川徹, 森脇武夫, 岡本拓, 岡本功一, 服部晃: 杭基礎の表面処理方法が海面処分場の底面遮水工に与える影響, 第 41 回地盤工学研究発表会, 2006 年, pp.1177-1178.
- 29) 平尾隆行, 渡辺修士, 葛川徹, 近藤良, 森脇武夫, 服部晃, 岡本功一: 杭基礎の表面処理方法が海面処分場の底面遮水工に与える影響(その 2), 第 42 回地盤工学研究発表会, 2007 年, pp.2137-2138.
- 30) 葛川徹, 森脇武夫, 岡本拓, 服部晃, 岡本功一, 渡辺修士, 平尾隆行: 表面処理を施した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 19 回廃棄物学会研究発表会, 2008 年, pp.678-680.

港湾空港技術研究所資料 No.1252

2012.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2012) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています