

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

嘉門雅史*・濱田 悟**・勝見 武*・乾 徹*

*京都大学大学院地球環境学堂

**京都大学大学院工学研究科（現：京都市）

要 旨

廃棄物処分場跡地の高度利用を図るためには構造物の基礎として支持杭を用いることが考えられるが、海成粘土層を底部遮水層としている場合が多く、構造物基礎として杭を打設することによる粘土層の遮水性能への影響について検討を行う必要がある。そこで本研究では、粘土と鋼管杭を想定した粘土-金属の界面における透水性を実験的に評価することを目的として、粘土に作用する鉛直応力および粘土-金属間の密着状態と透水性の関係について検討を行い、粘土と金属の間にフリクションが作用している状態では漏水は生じないことを明らかにした。さらに、実験結果を用いて、杭の打設が粘土層の遮水性能に及ぼす影響について定量的な評価を試み、その評価方法を提案した。

キーワード：海面埋立処分場、粘土層、杭、摩擦力、遮水性、透水係数

1. はじめに

1.1 研究背景

廃棄物最終処分場の役割は汚染物質等の封じ込めにあるが、貴重な土地資源として跡地を有効利用することも我が国における処分場の重要な役割と考えられる。近年、山間部に処分場を新しく建設することが難しくなり、都市部を中心に海面処分場の建設が盛んになっている。この海面処分場は広大な埋立面積を有するため、跡地利用として大規模施設の建設に期待が寄せられる。近年は廃棄物地盤の特性が明らかになってきたこともあり跡地利用の高度化が進んでいるが、廃棄物埋立地盤は軟弱でありその下に遮水工構造として粘土層が存在するため、大規模構造物の建設には杭基礎の利用が想定される。この際、杭が粘土層を貫通することによって粘土層の遮水性能に与える影響について検討する必要がある。

1.2 処分場管理に関する法的規制

廃棄物処分場は処分される廃棄物の種類や有害性に応じて構造形式・管理方式が異なり、廃棄物処理法によって安定型処分場、管理型処分場、遮断型処分場に分類されている。本研究で検討の対象としたのは、管理型海面埋立処分場である。管理型海面処分場の概要をFig. 1に示す。

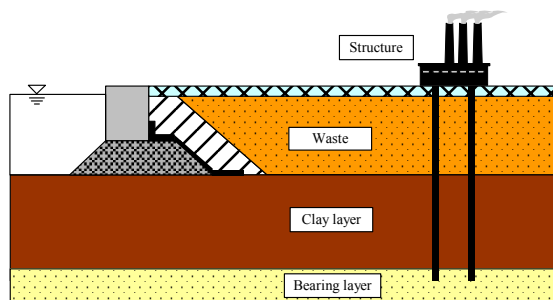


Fig. 1 Typical cross section of coastal landfill sites

管理型廃棄物処分場の遮水工に要求される構造は平成10年6月に改正された「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命令」に記述されており、層厚5 m以上、透水係数 1.0×10^{-5} cm/s以下、またはルジオン値1以下の難透水性地層が全面に確保されているか、そうでない場合は、遮水シートや遮水層による表面遮水工を設置することが求められている。海面処分場においては、天然の海成粘土層が不透水性地層として機能することが多い。

廃棄物が一般環境と同程度にまで無害化されるまでは遮水機能は健全に維持されなくてはならない。Fig. 2は管理型処分場の建設から跡地利用までの法的規制・基準を示したものである。処分場の埋立開始から廃止までは廃棄物処理法が適用され、汚染物質の濃度に関する基準として、廃棄物の受け入れに対して受入基準、埋立中には維持管理基準、廃止の可否については廃止基準が設けられている。これらは汚染物質が漏出した際に地下水によって薄められるという考えによって環境基準値の10倍（受入基準は30倍）になっているものが多い。処分場の廃止後は廃棄物処理法の適用から外れ、処分場跡地にも周辺地盤と同じく環境基準が適用されることになっている。しかし、廃止直後に環境基準値をクリアする可能性は極めて低い。現在のところ、処分場の廃止後も遮水構造を健全に保ち廃棄物層と周辺環境を区別することでできれば、環境基準の適用を外れることができるので、処分場廃止の有無に関わらず、早期跡地利用を計ることができる。なお、跡地の

高度利用を行うとなれば基礎工事が必要であり、その際に廃棄物の攪乱が生じることは避けられない。廃棄物の攪乱を許す代わりに、何らかの制約条件を設けることによって、処分場の跡地利用を可能にしようという提案もある（地盤工学会、2000）。

1.3 本研究の目的

杭の打設によってスミアゾーンが形成され、杭周辺の地盤の間隙比が減少し、粘土層自体の透水係数は低下することが予想されるが、杭周面と粘土層の境界面における漏水がどの程度生じるかということに関しては知見が得られていない。本研究では粘土と杭の境界面における漏水を評価することを目的として、これまでの軟弱地盤における杭打設後の観測データと周面摩擦力の発生に関する研究から杭と地盤の密着について考察し、実験から密着状態における境界面の透水性を調べた。さらに、実験結果を用いて杭の打設が本来の遮水性能にどの程度の影響を及ぼすのかということについて定量的な評価を試み、その評価方法を提案した。

2. 軟弱地盤における杭と粘土の密着に関する考察

杭に働く周面摩擦力のうちで一般に支持力として期待されるような、杭を持ち上げようとする上向きの力は正の摩擦力である。これに対して、逆に地盤の方が沈下量が大きく杭に対して下向きに変位する時、杭を地中に引きずり込むような力が杭周面に働く。これが負の摩擦力（ネガティブ・フリクション（以下NF））と呼ばれているものである。軟弱地盤

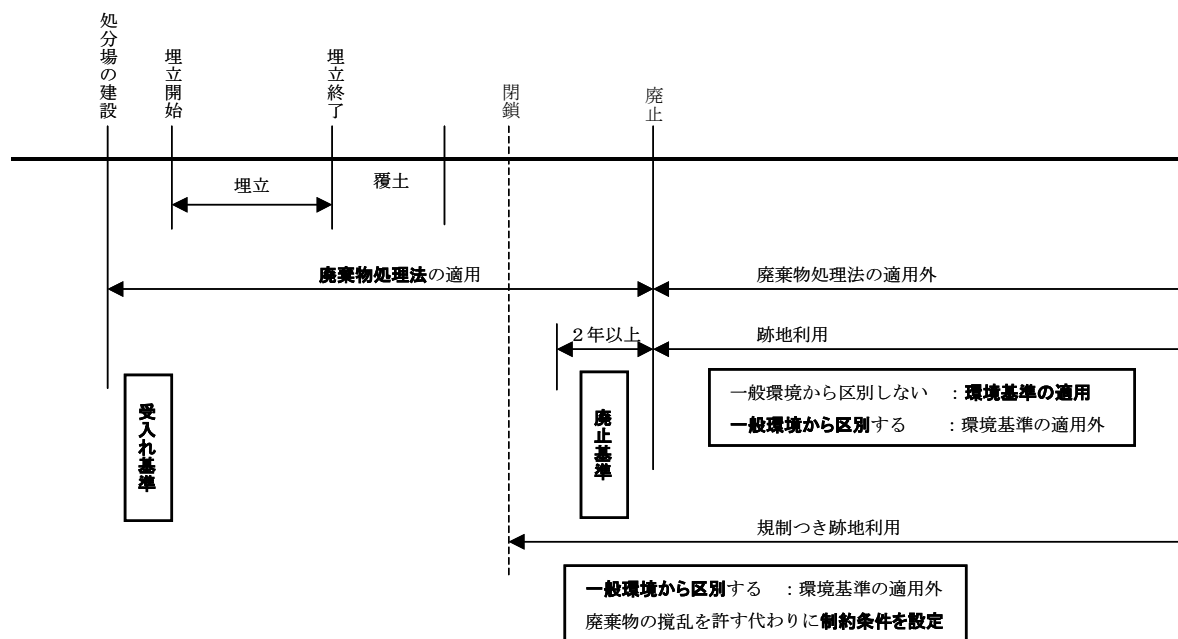


Fig. 2 Legal controls on management of controlled landfill sites

では周辺地盤の沈下量が大きいと、杭周面には大きなNFが発生する。数十メートルに及ぶ長尺杭では軸力の増大が設計上の制約となることもあるため、これまでも多くの研究が行われている。

NFが発生するためには、杭と地盤の密着が大前提である。その後、杭と粘土がずれようとする、つまり相対変位が生じることによって摩擦力が発生する。摩擦力の向きは、この相対変位の向きによって支配される。したがって、軟弱地盤においても、打ち込み杭の打設直後や杭頭への載荷直後などには正の摩擦力が杭周面に作用するが、地盤の沈下と共に摩擦力が正の向きから負の向きへと変化していくことになる。また、摩擦力の大きさも相対変位の大きさに正比例する形で増加することが知られており、相対変位が大きくなり、周辺地盤が塑性変形領域に達した時点で最大摩擦力を発揮することになる。杭と粘土の密着度を評価するためにはこの最大摩擦力度が重要である。この最大摩擦力度の大きさは、Bjerrum (1973)によって杭と地盤の境界面における摩擦角と水平方向有効応力を用いて (1)式で表す方法が提案された。

$$\tau_a = \sigma'_h \tan \phi'_a = \sigma'_v \cdot K \tan \phi'_a \quad (1)$$

ここで、 τ_a : 杭と粘土間のせん断抵抗、 K : 土圧係数、 σ'_h : 水平方向有効応力、 ϕ'_a : 杭と地盤の摩擦角、 σ'_v : 鉛直方向有効応力である。

しかし、粘性土地盤では土の粘着力を無視することはできないとしてBjerrum (1973)が改良を加えている。また、有効応力を求めるためには間隙水圧の測定も必要になる。

我が国の「道路橋示方書」等による設計基準では、粘性土中に打設された基礎杭に作用する周面摩擦力度の最大値は地盤の粘着力に等しいとされている。現場における軸力の観測データから求められる周面摩擦力度と設計基準式による摩擦力度（つまり粘着力）を比較すると、長期間が経過した後は観測データによる周面摩擦力度の方が基準式による摩擦力度よりも大きい値となる傾向がみられる（斉藤ら1975、田中1975、岡部ら1973、宮沢ら1981）。設計値が過小評価となっている原因は、粘着力を求める際に用いられている $q_u/2$ 法にある。一軸圧縮強さ q_u の1/2の値を粘着力とする方法であるが、一軸圧縮試験に供する試料採取の時に試料が乱されること、試料採取後に原地盤の圧密が進行することによって、原位置よりも過小に評価されることが指摘されている。どの程度の過小評価であるか定量的な議論は難しく、この観点から原位置において最大摩擦力が発

揮されていると言い切るには問題がありうる。しかし、周辺地盤が塑性領域に達するために必要な相対変位量は数mm程度であるという報告もあるため、原位置における杭と粘土の相対変位は十分であり、最大摩擦力が発揮されていると考えられる。

3. 実験手法

3.1 実験目的

前章において述べたような杭と地盤の密着状態において、遮水性能に問題をきたすような漏水が生じるとは考えにくい。そこで、空隙の閉塞状況、また摩擦力の大きさによって杭と地盤の密着度を評価し、透水性と関係付けることが本実験の目的である。また、廃棄物処分場は一般の埋立地盤とは異なり、埋立完了後10年以上が経過した後に杭打設を行う場合も考えられるため、杭打設後の圧密進行がわずかとなっても杭と粘土の密着が得られるか否かという点についても検討した。

3.2 実験方法

実験は、Fig. 3 に示す剛壁型透水試験器の側壁を杭表面に模擬し、杭打設によって杭周面に空隙が発生した場合における、打設後の空隙の閉塞と透水性の関係を検討することを目的とするものである。剛壁型透水試験における側壁漏れをもって粘土と金属の境界面の漏水を考慮できると考え、側壁漏れを防いだ柔壁型透水試験の結果と剛壁型透水試験の結果を比較した。

試料には、深草粘土（250 μm 通過分、土粒子密度 2.69 g/cm^3 、液性限界 41.9 %、塑性限界 21.4 %）を用いた。予備圧密を完了した供試体を剛壁セルよりも直径で 2 mm 小さめに成形し、粘土と側壁の間に約 1 mm の空隙のある状態を剛壁型透水試験の初期状態とした。これは、仮に杭と周辺地盤との間に空隙が生じた場合の透水性を検討するためである。

予備圧密応力と本圧密の載荷段階は Table 1 に示す通りである。case R1 と R2 では剛壁型透水試験器内で圧密荷重を与え、各荷重段階で一日経過後に動水勾配 ($i = \text{約 } 30$) を与えて透水試験を行った。一方、case R3 と R4 では動水勾配を与えて透水を続けながら圧密荷重を段階的に増加させた。剛壁型透水試験装置は上下面で土圧を測定できるようになっており、上下面の土圧差から粘土と側壁の摩擦力を算出した。

Table 1 Loading steps of rigid-wall permeability test

Case	Initial thickness	Pre-consolidation pressure	Consolidation pressure									
			11.25 kPa	22.5 kPa	33.75 kPa	45 kPa	67.5 kPa	90 kPa	135 kPa	180 kPa	270 kPa	360 kPa
case R1	3.99 cm	90 kPa	—	—	—	—	—	○	○	○	—	—
case R2	4.04 cm	180 kPa	—	—	—	—	—	○	○	○	—	○
case R3	2.99 cm	90 kPa	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
case R4	3.11 cm	180 kPa	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○

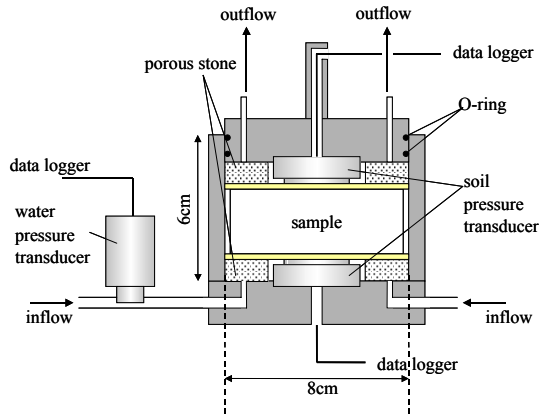


Fig. 3 Rigid-wall permeability test apparatus

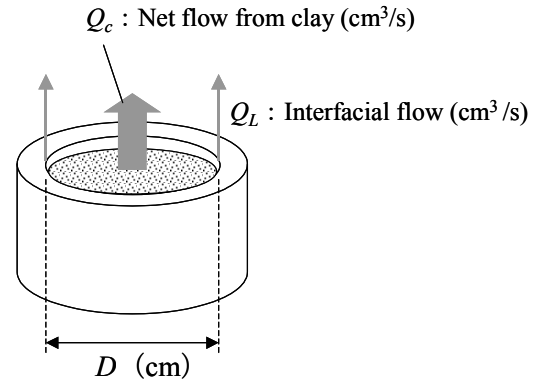


Fig. 4 Water flow through clay and interface

3.3 密着状態の評価方法

側壁と粘土の密着状態は、空隙の閉塞以前における粘土と側壁の間の空隙の厚さ d (cm) による評価と、閉塞後の粘土上下面の土圧から供試体に作用する力のつり合いを考慮して求められる摩擦力度の大きさによる評価の2つの段階に分けて行った。

3.4 界面透水性の評価方法

Fig. 4 に示すように、剛壁型透水試験において得られる流量 Q (cm^3/s) は粘土正味を通過するものと壁面と粘土の間の空隙を通過するものとの合計であるため、(2)式によって表される。

$$Q = Q_c + Q_L \quad (2)$$

$$= k_c \frac{\pi D^2}{4} i + K_L \pi D i$$

ここで、 Q : 計測された透水量 (cm^3)、 Q_c : 粘土自体からの透水量、 Q_L : 粘土-金属境界面における透水量、 D : 供試体直径 (cm)、 k_c : 粘土自体の透水係数 (cm/s)、 i : 動水勾配、 K_L : 界面透水量係数 (cm^2/s)、 t : 計測時間 (s) である。

粘土自体の透水係数 k_c を求めるために、剛壁型試験の本圧密の圧密応力と同じ大きさで予備圧密を行い作製した深草粘土供試体について、Fig. 5 に示す柔壁型透水試験装置を用いて、それぞれ柔壁型透水試験を行った。 k_c が求めれば、(2)式より K_L を (界面透水量係数 (cm^2/s)) 算出することができ、この K_L を界面に

おける透水性の指標とすることができる。柔壁型透水試験は、メンブレンを介して液圧で側圧を与えることで側壁漏れを防止できる試験方法で、粘土ライナーなど難透水性材料の透水試験に適した方法である。本実験の柔壁型透水試験は鉛直方向も水平方向も等しく液圧が作用する等方圧密状態であり、剛壁型試験との応力状態の完全な一致は得られていない。ただし、剛壁型試験において $K_0 = 0.5$ と仮定して平均主応力が等しくなるように柔壁型試験の拘束圧を調節した。柔壁型透水試験の各供試体の予備圧密の応力に対応する拘束圧を Table. 2 に示す。

4. 実験結果と考察

4.1 透水試験結果と界面透水性の評価

剛壁型試験における透水係数と鉛直応力の関係を Fig. 6 に示す。柔壁型試験は等方圧密状態であるが、剛壁型透水試験と平均主応力が等しくなるように拘束圧を調節してあるので、予備圧密時の鉛直応力をもって Fig. 6 中に示した。

柔壁型透水試験では剛壁型試験の各载荷段階に対応する供試体を別個に作製したため、鉛直応力が増加したにも関わらず透水係数が増加することがあったが、おおむね、鉛直応力の増加に伴い透水係数が減少する傾向がみられた。case R3, case R4 の 90 kPa より小さい载荷段階においては、側壁漏れが激しかったため、透水係数として Fig. 6 には示していない。予備圧密が 180 kPa であり、本圧密の载荷を 90 kPa

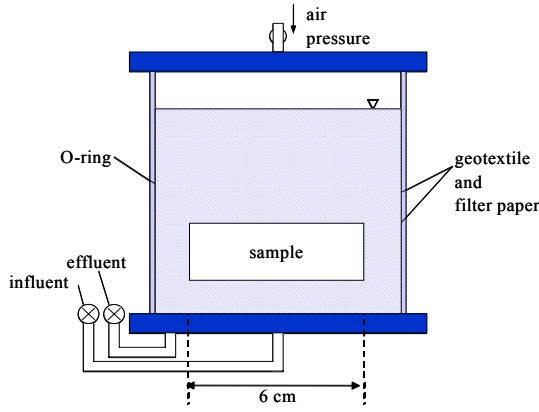


Fig. 5 Flexible permeability test apparatus

Table. 2 Confining stress at flexible permeability test

vertical stress at pre-consolidation	confining stress at flexible permeability test
90 kPa	60 kPa
135 kPa	90 kPa
180 kPa	120 kPa
270 kPa	180 kPa
360 kPa	240 kPa

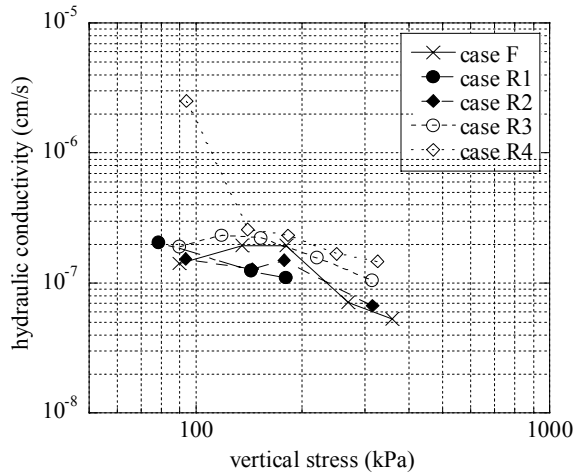


Fig. 6 Hydraulic conductivity values vs. vertical stress

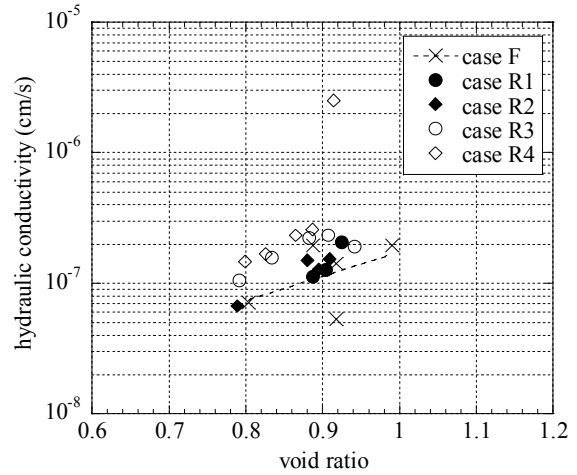


Fig. 7 Hydraulic conductivity values vs. void ratio

以下から徐々に行った case R4 の 90 kPa では側壁漏れの影響が残っている。これに対して、case R1, R2, R3 では 90 kPa の載荷段階において、鉛直応力の増加に伴い透水係数が減少することは、当然推測され得ることである。この透水係数の変化を、粘土自体の間隙比が減少したことによるものと、粘土と側壁の密着度の増加による側壁漏れの減少によるものに分離して考えることで、界面における透水性の評価が可能になる。Fig. 7 に示すように、透水係数の対数値と間隙比の間には、線形的な関係がみられる。これは、Tavenas ら (1983) の実験によっても得られている関係であり、(3)式のように表される。

$$\log k = \log k_0 - \frac{e_0 - e}{C_k} \quad (3)$$

ここで、 k : 透水係数, k_0 : 初期間隙比, e : 間隙比, e_0 : 初期間隙比, C_k : 透水係数の変化率である。

本実験における柔壁型透水試験の結果から最小二乗法により近似を行いグラフ上に直線 (4)式を得た。

$$k = 2.3561 \times 10^{-9} \cdot \exp(4.3033 \times e) \quad (4)$$

この (4)式を用いて、剛壁型透水試験の各載荷段階における間隙比に対応した粘土自体の透水係数 k_c を算出した。次に、(2)式を用いて K_L を算出した。

4.2 側壁摩擦力の発達と界面透水性の関係

Fig. 8 に示すように、側面摩擦力度が明確に計測されるのは case R1, case R2, case R3 において 90 kPa 以上の載荷段階、case R4 においては 180 kPa 以上の載荷段階となる。前節の剛壁型透水試験結果と合わせて考えると、本実験においては側面摩擦力が計測される以前に、空隙の閉塞によって大部分の側壁漏れが抑制されたことになる。しかし逆に、摩擦力が発生するためには側壁と粘土が全周面にわたって密

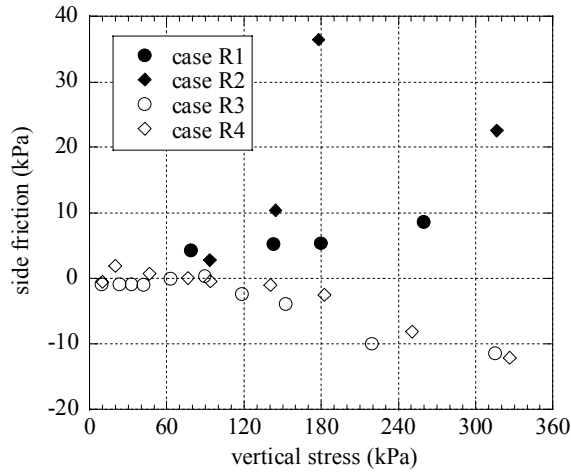


Fig. 8 Side friction versus vertical stress

着する必要はなく、case R3 の 135 kPa, 180 kPa の載荷段階のように側面摩擦力の発生後も局所的な漏水が発生したとみられる計測結果もある。

摩擦力度の大きさは鉛直応力の増加に伴い線形的に増加する傾向がみられた。また、摩擦力度の大きさに関しては予備圧密応力の違いによる影響はみられない。本圧密において極端な過圧密状態でなければ、粘土と側壁の間の空隙は閉塞し、その後の摩擦力度の大きさは、予備圧密応力の大きさによらず本圧密における鉛直応力によると考えられる。

界面透水量係数と側面摩擦との関係についてFig. 9に示した。載荷段階が90 kPaよりも小さい段階で、明らかに側壁漏れが卓越しているものについては、計測された流量の全てが境界面における透水量であるとして透水量係数 K_L を算出した。Fig. 9によると、側面摩擦が計測される以前の空隙の閉塞によって透水量係数が大きく減少し、粘土と側壁が密着し摩擦力が計測されるようになってからの変化はそれに比べてわずかである。

4.3 空隙の閉塞と界面透水性の関係

粘土と側壁の間の空隙が閉塞せずに残っている状態で、側壁と粘土との空隙の厚さを d (cm) と表すことにする。すると、 $d > 0$ の場合、剛壁型試験における空隙比 e_L は粘土自体の間隙以外に、粘土と側壁の間隙を含んで算出している。従って、粘土自体の間隙比 e_c は柔壁型透水試験の供試体を作製した時の予備圧密における空隙比であると仮定すれば、以下のように剛壁型試験における粘土と側壁の間隙を算出することができる。

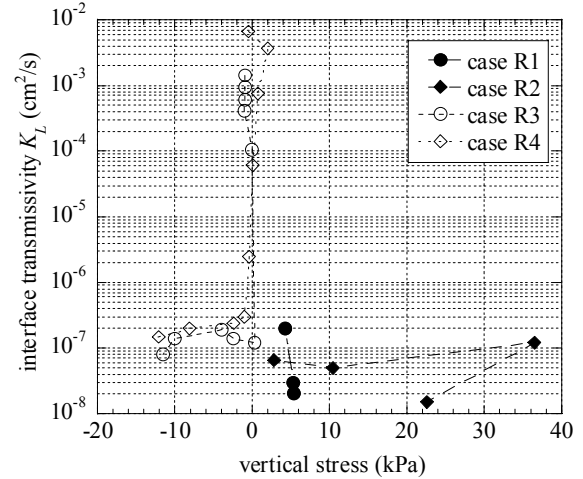


Fig. 9 Interface transmissivity, K_L , versus side friction

Fig. 10 に示すように

$$\frac{\pi \times 8^2}{4} : \frac{\pi \times (8-2d)^2}{4} = 1+e_L : 1+e_c \quad (5)$$

という関係が得られるので、

$$64(1+e_c) = (8-2d)^2(1+e_L)$$

$$8-2d = 8 \sqrt{\frac{1+e_c}{1+e_L}}$$

$$d = 4 \left(1 - \sqrt{\frac{1+e_c}{1+e_L}} \right) \quad (6)$$

として d (cm) を求めた。

柔壁型試験の供試体を作製した時の予備圧密は通常の圧密試験であり、 K_0 圧密状態であるが、剛壁型試験において、空隙の閉塞以前は水平方向の拘束圧が作用しない状態にあるため、柔壁型透水試験の供試体を作製した時の予備圧密における空隙比を剛壁型試験における粘土自体の間隙比として用いれば、厳密には誤差を生じることになる。つまり、 e_c として過小評価された値を代入することになり d は過大評価となることが考えられる。また、この考え方によると $d=0$ という状態は、単に粘土と側壁が接触していることを表すのではなく、剛壁型試験における粘土の状態が、通常の圧密試験の粘土の状態と等しくなるほどの粘土と側壁の密着が得られていることを表す。したがって(6)式をもって $d=0$ となる条件を決定することに論理的問題はない。

計測結果の整理にあたっては、先に述べた理論的に予想される誤差とは別に、計測上の誤差を小さく

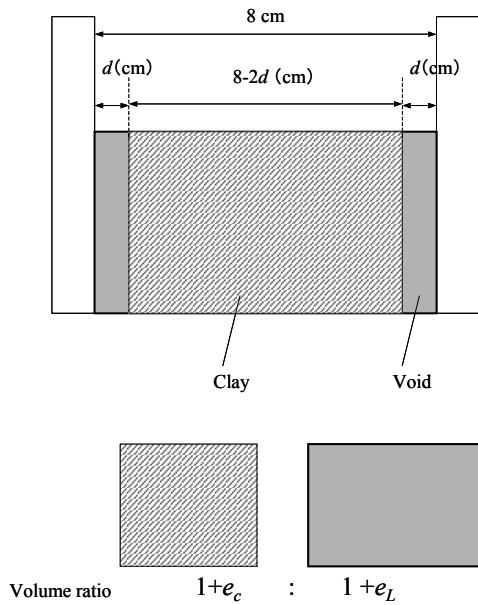


Fig. 10 Clay void ratio, e_c , and apparent void ratio e_L

するために、360 kPa の载荷段階では $d=0$ であるとして補正を行った。

d を求めた結果を Fig. 11 に示す。 d は鉛直応力の増加に伴い減少し、側面摩擦が計測されはじめる载荷段階と $d=0$ となる载荷段階が近いことが推測される。ただし、 $d=0$ となった後、つまり空隙が完全に閉塞し、粘土と側壁の密着度が通常の圧密試験のものと同程度になった後で再び $d>0$ となることは考えにくく、 d が非常に小さく 0.02 cm 以下となる部分の評価は困難であると考えられる。

界面透水量係数 K_L と d の関係を Fig. 12 に示した。 d の減少とともに K_L は減少し、空隙の閉塞によって側壁漏れが抑制されることが表れている。 K_L 、 d ともに値が小さくなると正確な評価が困難となるため、グラフ左下部の値のばらつきが激しくなっている。理論的には $d=0$ となるとき $K_L=0$ となり、グラフは $d=0$ の直線に漸近する形で低下していくものと考えられる。

5. 実験結果による遮水性能評価

5.1 換算透水系数を仮定し漏水量で評価する方法

Fig. 13 に示すように、杭を打設したときの杭周面からの漏水量と、杭の体積分に仮想的に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とが等しいと考え、その仮想粘土の透水系数を求めることにより杭周面による漏水量の評価を行った。

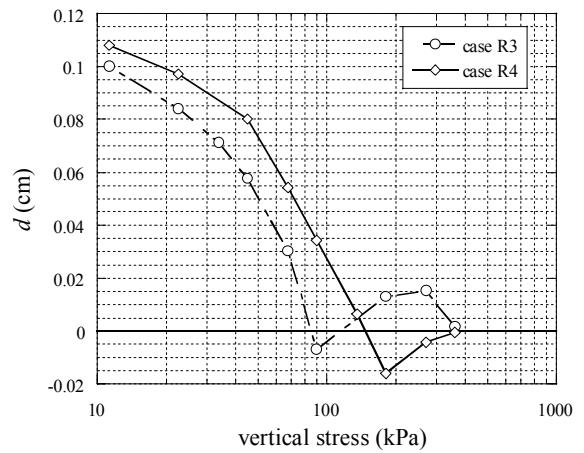


Fig. 11 relation between void thickness d and vertical stress

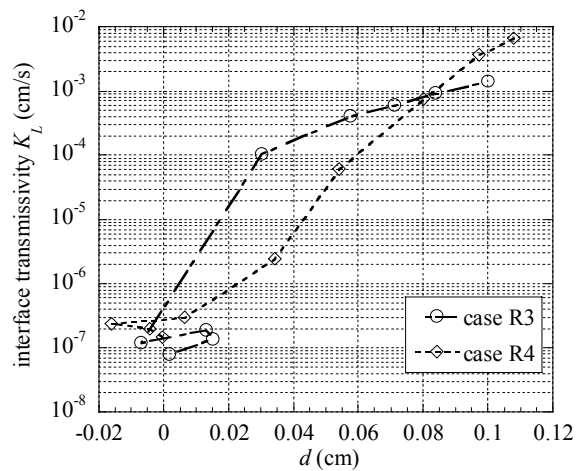


Fig. 12 Interface transmissivity, K_L , and void thickness

粘土自体の透水系数 k_c は断面積を乗じることによって流量の次元となるが、この界面透水量係数 K_L は長さ (杭の周長) を乗じることによって流量の次元となる。したがって、杭径が大きくなるほど遮水層の単位面積当たりからの透水量に及ぼす側壁漏れの影響は小さくなる。

まず、直径 D (cm) の杭を打設した場合の杭周面における透水量 Q_L (cm^3/s) を K_L (cm^2/s) を用いて表すと (7)式になる。

$$Q_L = K_L \cdot \pi D \cdot i \quad (7)$$

また、杭の体積分に仮想的に粘土が存在し、その透水系数が k'_c (cm/s) であるとすれば、仮想粘土柱体からの透水量 Q'_c (cm^3/s) は (8)式によって表される。

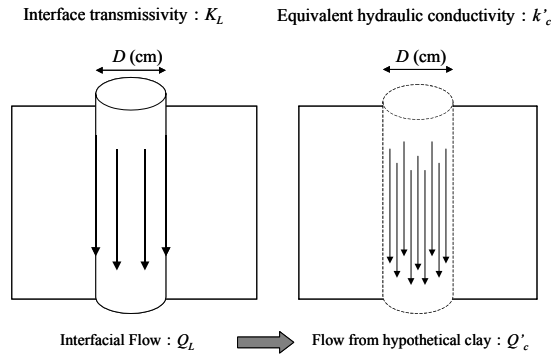


Fig.13 Concept for equivalent hydraulic conductivity

$$Q'_c = k'_c \frac{\pi D^2}{4} i \quad (8)$$

$Q_L = Q'_c$ とおくと、(9)式が得られる。

$$K_L \cdot \pi D \cdot i \cdot t = k'_c \frac{\pi D^2}{4} i \quad (9)$$

よって

$$\frac{4}{D} K_L = k'_c \quad (10)$$

k'_c は杭周界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、いわゆる換算透水係数である。構造基準は層厚（次元L）と透水係数（次元L/T）で規定されており、この換算透水係数を用いることにより、構造基準との比較において遮水性能を評価できると考えた。

杭径 $D = 60$ cm, 70 cm, 100 cmのそれぞれの場合について k'_c と K_L の関係をFig. 14に示す。本実験の90 kPa以上の載荷段階において得られた界面透水量係数 K_L は最大でもcase R4の上載圧90 kPaの場合の 2.5×10^{-6} cm²/sである。すると、最も界面透水量係数の影響が大きく現れる杭径60 cmの場合においても、 $k'_c = 1.7 \times 10^{-7}$ cm/sとなり構造基準の値を上回ることはない。したがって、粘土層の層厚が5 m以上さえ確保できれば、構造基準を満足することになる。また、もともとの粘土の透水係数 k_c と k'_c を比較すると、 $k_c = 1.2 \times 10^{-7}$ cm/sであり、杭の打設によってわずか1.5倍程度に遮水性を損なう程度である。さらに K_L が 1.0×10^{-6} cm²/s以下であれば、 k'_c はもとの粘土の k_c よりも充分低く、杭打設による遮水材の低下はみられないと考え得る。

この評価方法は実際には水が流れていない杭内部の断面積を用いて透水係数 k'_c を求めることにより、

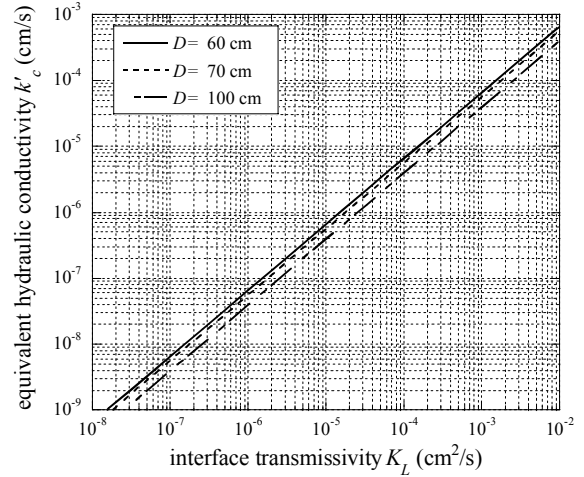


Fig. 14 relation between equivalent hydraulic conductivity and interface transmissivity on diameters of pile

かなり小さな値を得る。そして、この透水係数 k'_c を用いた計算から得られる到達時間は現実のものよりもかなり過大な評価となる。このように、現行の構造基準は処分場底部全面に一樣に遮水機能が確保されていることを前提に設定されているもので、仮に杭打設などによって局所的な漏水が発生し到達時間が減少する可能性も考慮すべきである。

5.2 杭表面の空隙体積に基づいて流速あるいは到達時間で評価する方法

前節では、杭-粘土界面の水が流れるスペースの厚さは非常に小さく、水は限られた断面積部分を通るのに関わらず、換算透水係数を求めるにあたっては杭の断面積の全てを水が透過すると仮定したため、非常に低い換算透水係数が計算的に得られた。そこで、Fig. 15 のように実質水が流れる部分、すなわち杭と粘土の間の空隙の厚さ d を考慮し、粘土-杭界面における透水係数 k' (cm/s)を求める方法を考えた。

粘土と杭の間の空隙 d (cm)は、界面を流れる水層の厚さと考えることができる。杭周面における透水量 Q_L (cm³/s)を k' (cm)を用いて表すと(11)式になる。

$$Q_L = k' \cdot \pi D \cdot d \cdot i \quad (11)$$

となり、流量 Q_L から直接にL/Tの次元をもつ透水係数 k' を得ることができ、これを用いて流速 $k'h/L$ や到達時間 $L^2/k'h$ を求めることができる。

また、この(11)式と(7)式から次式が得られる。

$$\frac{K_L}{d} = k' \quad (z)$$

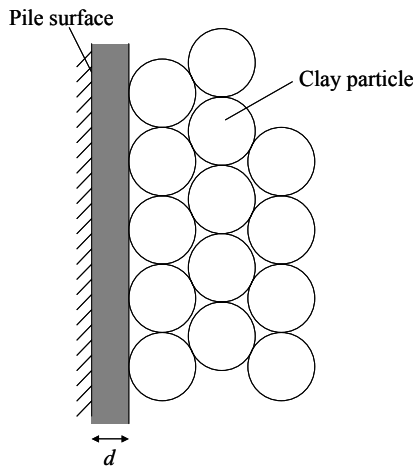


Fig. 15 Concept of thickness d

k' と鉛直応力の関係を Fig. 16 に示した。4.3 で求めた d の値に信頼性がある領域で、最も低い k' を示しているものは case R4 - 90 kPa で $k' = 7.0 \times 10^{-5}$ cm/s である。このように、流速あるいは到達時間による評価は、前節で示した透水量による評価よりも厳しいものとなるが、構造基準に近い値にまで k' が低下したことになる。

本研究においては d , K_L の評価の精度に問題があることが考えられるため、計算結果の絶対値としての妥当性はさらに検討の余地がある。

6. 結論

本研究では、廃棄物海面処分場の跡地利用において大規模構造物を建設する際、利用が想定される杭基礎の粘土層への貫入が粘土層の遮水性能に与える影響について実験的に検討を行った。杭周面と周辺地盤との間に空隙が存在するような状態と、杭周面と周辺地盤が密着し摩擦力が発生する状態における杭-粘土界面の透水性を実験により評価した。また、その結果に基づいて、処分場の構造基準との比較、また比較方法についての提案を行い、廃棄物埋立地盤における杭打設が遮水性能に及ぼす影響について評価を行った。

本研究において得られた成果を以下にまとめる。

1. 剛壁型透水試験装置による土圧の測定結果より、鉛直応力の増加に伴い側面摩擦力度が線形的に増加することが分かった。また、透水係数についても、多少のばらつきがみられたが鉛直応力の増加に伴い減少する傾向にあった。
2. 剛壁型透水試験から得られた透水係数 k と柔壁型透水試験から得られた粘土自体の透水係数 k_c を比較し、剛壁型透水試験において計測した流量から

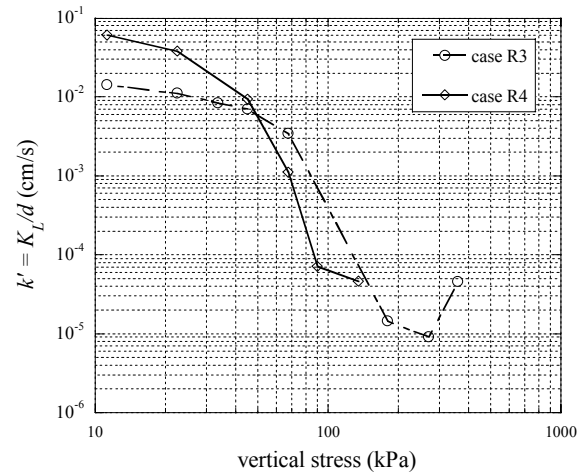


Fig. 16 relation between equivalent hydraulic conductivity k' and vertical stress

側壁漏れによる流量を分離し、側面における界面透水量係数 K_L を得た。その結果、側面摩擦力度が大きいほど粘土-金属界面における透水量係数 K_L が小さい値となる傾向がみられた。

3. 粘土と側壁の間の空隙の閉塞によって漏水の大部分は抑制され、粘土と側壁の間に側面摩擦力が作用するような状態では、明らかな側壁漏れは生じない。鉛直応力の増加に伴う空隙の閉塞、すなわち d の減少につれて界面透水量係数 K_L が減少すること、さらには実流速を表す透水係数 $k' = K_L/d$ が低下することが確認できた。
4. 粘土と側壁の間の空隙が閉塞した後では透水性、側面摩擦力度ともに予備圧密応力の違いはみられなかった。また、本圧密における鉛直応力が予備圧密後の供試体の一軸圧縮強さを下回るような過圧密状態でないかぎり空隙は閉塞する。そのため、杭の打設は埋立完了後長期間が経過していても問題はないと考えられる。
5. 界面透水量係数を用いて、処分場で杭を打設した際に粘土層の遮水性に与える影響の評価を行った。界面透水量係数 K_L を杭と同体積の仮想粘土柱の透水係数 k'_c に換算することによって構造基準と比較した場合には、周面における局所的な透水を杭の断面積全体の透水として計算するため、実流速が小さくなり到達時間は過大に評価される。また、杭周面の界面透水部分の厚さ d を考慮して透水係数 k' を算出する方法では、先の k' による評価よりもかなり厳しい評価となる。

杭と粘土の境界面の遮水性を評価するにあたって問題となった点を今後の課題として以下にまとめる。

1. 剛壁型透水試験装置における側面摩擦力度の計測、透水係数の計測ともに水圧の変化、もしくは浸透力がなんらかの影響を及ぼしていることが確認できたが、定量的な評価はできなかった。実験では原地盤よりも大きな動水勾配を与えているため流速が大きくなる。特に密着度の小さい載荷段階において、水の流れが粘土側面の状態に与える影響などを考慮する必要がある。
2. 界面における透水断面積を考えることによって透水係数 k を求め、処分場の構造基準と到達時間の比較を行う際には、界面を浸透する水の流れる厚さ d の値が重要となる。 d の減少につれて、界面透水量係数 K_L ならびに k が減少し、構造基準をクリアするような値となるためには d がごく微小な値となることが推測された。この際の d の正確な評価を行う必要がある。
3. 現場における周面摩擦力の発生状況に比べて、本実験における側面摩擦力は小さいと考えられる。実験における摩擦力度を現場のものと比較するためには応力状態のみならず相対変位も現場に近づける必要がある。実験における沈下量と摩擦力度の関係を、現場における杭-粘土の相対変位と周面摩擦力の関係と結びつけることができれば、現場における杭と粘土の密着度を評価できる可能性がある。また、摩擦力発生後の局所的な漏水を考慮するためにも、大きなスケールの模型実験の実施も考えられる。

謝 辞

本研究の実施に際し、日本鉄鋼連盟から研究補助を受けた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- Bjerrum, L. (1973): Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others), *Proc. 8th ICSMFE*, pp.151-152.
- Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., and Leroueil, S. (1983): The permeability of natural soft clays. Part II: Permeability characteristics, *Can. Geotech. J.*, 20(4), pp.645-660.
- 岡部達郎・鬼頭 誠・坂東 弘・山本博之 (1973) : 土木施工 14 卷, 14 号, pp.20-27.
- 斉藤 彰・石神公一・亀井敏雄・福屋智亘 (1975) : 土と基礎, 地盤工学会, vol.23-7, pp.35-42.
- 地盤工学会 (2000) : 廃棄物の地盤材料としての利用に関する研究委員会報告書.
- 田中邦熙 (1975) : 鹿島建設技術研究所年報, 0391 号, pp.75-80.
- 宮沢康生・大石末広・久保誠一 (1981) : 土と基礎, 地盤工学会, Vol.29-4, pp.5-42.

Experimental study on the Effect of the Pile Installation on the Hydraulic Barrier Performance of Landfill Bottom Clay Layer

Masashi KAMON*, Satoru HAMADA**, Takeshi KATSUMI* and Toru INUI*

*Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University

**Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

To promote the land use of the coastal landfill site after the waste reclamation, structures and facilities may require pile foundations to assure the sufficient bearing capacity. Since the marine clay functions as bottom barrier in landfill sites, it is required to know how much leakage could occur due to the installed piles penetrating clay layer. This research is aimed to clarify the barrier performance with installed piles across the clay layer. Interface transmissivity between the clay and the steel is evaluated by using newly developed rigid-wall permeameter, which is able to determine the side-wall friction by measuring the soil pressures on the top and the bottom of the specimen. The more vertical stress increases, the larger friction between clay and steel occurs and the lower hydraulic conductivity is achieved. It was obvious that leakage could hardly occur from the interface between clay and steel, when friction could work. By using the methods proposed in this research, the hydraulic barrier performance of clay layer with pile foundation can be clearly seen.

Keywords: coastal landfill, clay layer, pile foundation, interface friction, barrier performance, hydraulic conductivity