海面廃棄物処分場に貫入する粒状廃棄物 連込み挙動

野村 理樹¹・菊池 喜昭²・兵動 太一³・野畑 俊介⁴・
平尾 隆行⁵・竹本 誠⁵・松村 聡⁶

¹ 学生会員 東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: 7617615@ed.tus.ac.jp

² フェロー会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

E-mail: kikuchi_y@rs.tus.ac.jp

³ 正会員 東京理科大学助教 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

⁴ 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

⁵ 中電技術コンサルタント(株) 都市整備部 (〒734-8510 広島市南区出汐二丁目 3-30)

⁶ 正会員 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

海面廃棄物処分場跡地を高度利用する際には、構造物を支持する基礎工として支持地盤への杭打設が必要となると考えられ、その場合、遮水基盤(粘性土地盤)を貫通するような杭の施工が必要である。杭を打設した場合には廃棄物を遮水基盤以下へ連れ込むこと懸念される。本研究では、杭の肉厚と廃棄物の粒径の大小関係の違いによる連れ込みメカニズムの違いから、小粒径の廃棄物については、廃棄物層とその下の粘性土層の剛性の違いによる廃棄物の連れ込み状況に及ぼす影響を検討した。大粒径の廃棄物については杭から受ける力の偏心量の違いによる、連れ込み挙動の違いを検討した。実験の結果、小粒径の廃棄物では粘性土地盤の剛性が相対的に低下することで廃棄物の連れ込み量は増加すること、大粒径の廃棄物については偏心量が異なると連れ込み深さが異なることがわかった。

Key Words : use of landfill, pile foundation, X-ray CT analysis, offshore controlled waste landfill

1. はじめに

わが国では、大規模な管理型廃棄物処分場が数多く建設されている。これらは、建設時には沖合の処分場として整備されるが、港湾区域の拡大によって港湾区域内の重要な場所に立地するようになる。そのため、処分場跡地は将来、工業用地や交通用地として有効利用する期待が高くなる。

管理型海面処分場の多くは遮水基盤として粘性土層を利用しており、この場合遮水シートは用いられない。また、遮水基盤としての粘性土層は遮水性を確保するため、粘土地盤が未改良のまま利用されることが多く、構造物の基礎を設置するには支持力が不十分となる。そこで、処分場跡地を高度利用する場合には、何らかの地盤対策が必要になる。しかし、サンドコンパクションパイルやサンドドレーン工法等の地盤改良では、処分場内部の廃棄物や保有水を処分場外に排出してしまうことになるため、遮水基盤に対する地盤改良を行うことは困難である。そのため、地盤対策としては軟弱地盤下部の支持層への基礎杭を打設することが妥当であると考えられる。

これまでも、実際の海面処分場に杭が打設された事例が存在する¹⁾が、これまでの工法では、ケーシング等によって杭周辺の廃棄物を取り除き、杭が廃棄物を遮水基盤層内に連れ込まない条件で施工されていた。また、遮水基盤に貫入された杭の杭面と粘性土地盤の遮水性が問題となる可能性があったため、その点に着目した研究^{2), 3)}がなされている。その結果、粘土地盤と杭の境界面における透水性は粘土地盤が正規圧密状態になれば非常に低くなることが分かっている。さらに、杭打設後の保有水の移流拡散による粘土地盤への影響は限定的であることが分かっており、杭打設後に地震が発生した場合も杭の存在による遮水性能の低下や処分場外への保有水の拡散はほとんどない⁴⁾ものと考えられる。

その後、廃棄物層を貫通して遮水基盤である粘性土地盤に基礎杭を打設することによる廃棄物と保有水の遮水基盤以下への連れ込みの課題に関する研究が行われた⁵⁾。

また、現場試験の結果から、杭打設に伴い大きな塊やひも状の廃棄物の遮水基盤への連れ込みが多く確認されており⁶⁾、それらの廃棄物を遮水基盤へ連れ込まないような基礎杭の形状や打設方法の検討が必要となっている。

そこで本研究では、管理型海面処分場に存在する廃棄物のうち、杭の肉厚と廃棄物の粒径の大小に着目し、廃棄物の連れ込み状況について検討した。

杭の肉厚より小さな粒状廃棄物については粘性土地盤の圧密圧力を変えた実験を行った。これまでの研究⁵⁾では、あらかじめ圧密(100 kN/m²)した模型遮水基盤(粘性土地盤)を作製し、この圧密圧力を除去した状態で、上部に廃棄物を模した砂層(層厚 5 cm)を作製して、杭を貫入させて砂の下部粘性土層への連れ込みについて検討してきた。この場合には、粘性土地盤の剛性が砂地盤の剛性に比べてはるかに大きな条件での実験となっている。しかし、実際の処分場の条件を考えたときに、仮に地表面から 15 m 程度廃棄物層があって、その下に、正規圧密状態の粘性土層があるとした場合、廃棄物層がほぼ砂と同じ性状を持つ材であるとする、せん断強さ τ_f はおおよそ 150 kN/m²程度が期待できるのに対し、廃棄物層に接しているところの粘性土層のせん断強さ τ_f はおおよそ 30 kN/m²程度にしかない。この時、 E_{50}/q_u がどちらも等しいとすれば、せん断強さの違いと比例するように地盤の剛性も異なることになり、廃棄物地盤のほうが粘性土地盤よりも剛性が高い状態であり、模型実験と実物とで大きく条件が異なっていることになる。そこで、ここでは、できるだけ粘性土の圧密圧力を下げることで、相対剛性を変動させて実験をすることにより、廃棄物層と粘性土層の剛性比の違いが連れ込み挙動に及ぼす影響を検討した。

杭の肉厚より大きな粒状廃棄物については、杭と粒状体の接触点の位置の違いによって粒状体の回転のしやすさが異なるであろうと考え、粒状体を板でモデル化し、板に偏心荷重を与えることで、板の連れ込みやすさが異なるかどうか観察することにした。

2. 実験概要

実験に用いた粘性土は「青粘土」の 106 μm ふるいを通したものである。物性を表-1 に示す。本研究では、処分場内に存在する廃棄物を杭の肉厚より大きなものと小さなものの二種類に分類し、別々に実験を行った。この 2 つのケースは実験手順が異なるため分割して説明する。

(1) 杭の肉厚より小さな粒状廃棄物の連れ込み実験

図-1 に示す模型杭のうち②の杭を除いて杭軸部の肉厚は 2 mm であり、これより小さな粒径をもつ廃棄物は珪砂 5 号($\rho_s=2.65 \text{ g/cm}^3$, $D_{50}=0.589 \text{ mm}$)で模擬した。実験では珪砂 5 号のうち 250 μm ふるいに残留したものを用いた。これにより、粘性土と珪砂 5 号の粒径の差別化を図った。図-2 に示す試験機に含水比を調整した青粘土($w=100\%$)を投入し、1 日間静置させた後に所定の圧密圧

力(50, 30, 20, 10 kN/m²)で圧密して粘性土モデル地盤(層厚 $h=9 \text{ cm}$)を作製した。作製したモデル地盤上部に珪砂 5 号を水中落下法にて 5 cm の厚さで作製した。その後、模型杭(外径 19 mm, 長さ 150 mm, ステンレス製)を準静的に 8 cm 貫入した。用いた杭は、図-1 に示すもので、杭の先端形状を変えることにより、杭貫入時に粘性土より上層にある砂がどのように粘性土層に連れ込まれるかその違いを観察することにした。

杭打設後に、杭先端と杭の先端から深度方向 8 mm ごとに杭周辺の粘土をそれぞれ採取し、106 μm ふるいを用いて粘土と砂を分離し、深度ごとに粘性土中に連込まれた砂の質量を計測した。さらに、粒状廃棄物の連れ込み挙動を詳しく検討するため X 線 CT 装置を使って杭貫入中の砂の移動状況も観察した。この際には、土槽(内径 104 mm, 高さ $H=30 \text{ cm}$)に含水比を調整した青粘土($w=47\%$)を投入し、1 日間静置させ地盤(層厚 $h=20 \text{ cm}$)を作製した。作製した粘性土モデル地盤の上に珪砂 3 号($\rho_s=2.67 \text{ g/cm}^3$, $D_{50}=1.28 \text{ mm}$)を水中落下法で 5 cm の厚さで敷設した。その後、閉端杭($\phi=30 \text{ mm}$)を貫入速度 5 mm/min で準静的に貫入し、所定の貫入深さごとに X 線 CT スキャンを行った。

表-1 粘性土(青粘土)の物性

土粒子密度	2.79 (g/cm ³)	塑性限界	24.2 %
液性限界	40.1 %	塑性指数	15.9

図-1 模型杭の概略

図-2 実験模式図

図-3 矩形金属板の模式図

図-4 実験模式図

(2) 杭の肉厚より大きな粒状廃棄物の連込み実験

肉厚より大きな粒状廃棄物は図-3 に示すアルミ製の矩形金属板(模型杭の肉厚の8倍相当)で模擬した。

ここでの実験手順を図-4 に示す。図-4 に示す試験機に含水比を調整した青粘土($w=100\%$)を投入し、1日間静置させた後に圧密圧力 50 kN/m^2 で圧密して粘性土モデル地盤(層厚 $h=9\text{ cm}$)を作製した。作製した粘性土モデル地盤の上に矩形金属板を設置し、金属板に偏心荷重を作用させた。ここでは荷重を作用させた位置と金属板の中心位置の距離を偏心量と定義した(図-5)。偏心量を変化させた複数のケースにおいて、先端形状の異なる模型杭を準静的に 8 cm 貫入した。杭打設後、粘性土を切り出すことで金属板の粘性土内に貫入された深さを計測した。ここではこのようにして、金属板の粘性土への連込みににおける貫入深さの違いを検討した。

杭の肉厚より大きな粒状廃棄物に関しても X 線 CT を使った観察をした。土槽(内径 104 mm 、高さ $H=30\text{ cm}$)に含水比を調整した青粘土($w=47\%$)を投入し、1日間静置させた後に圧密圧力 50 kN/m^2 で圧密して粘性土モデル地盤(層厚 $h=20\text{ cm}$)を作製した。作製した粘性土モデル地盤の上に矩形金属板を設置し、金属板の偏心量を変化させた複数のケースを設定した。金属板の設置後、開端杭($\phi=30\text{ mm}$ 、肉厚 1.5 mm)を静的に貫入した。その際に、所定の貫入深さごとに X 線 CT スキャンを行い、杭貫入による模擬廃棄物層の連込み挙動を調べた。

3. 実験結果

(1) 杭の肉厚より小さな粒状廃棄物の連込み

まず、圧密圧力の違いにより杭貫入に伴う粘性土に連込された砂の総質量がどのように変化するかを検討した。粘性土地盤を作製する際の圧密圧力と粘性土に連込された砂の連込み量の総和の関係を図-6 に示す。四角のプロットが開端杭を用いた場合の砂の連込み量を示し、菱形、下三角、上三角のプロットはそれぞれ開端杭、外細杭、エッジ杭を用いた場合の連込み量を示す。図-6 よ

図-5 金属板の偏心量の定義

図-6 粘性土地盤の圧密圧力と粘性土に連込された砂の総和の関係

り、いずれのケースにおいても圧密圧力が小さくなるほど砂の連込み量が多かった。同じ形状の杭を用いた場合、圧密圧力が 10 kN/m^2 と 100 kN/m^2 の場合の砂の連込み量の差は2~4倍程度あった。また、同じ圧密圧力の条件では閉端杭の方が開端杭よりも砂の連込み量が多く、およそ2~5倍程度の違いがあった。また、エッジ杭を用いた場合が砂の連込み量が一番多くなる結果となった。

図-6 に示した砂の連込み量は、杭の側面に連れ込まれた砂と杭の先端で連れ込まれた砂の総和である。これらは実際には分離して測定されているので、それらを分けて示した結果を以下に示す。

図-7 には連れ込まれて杭側面にあった砂の質量を示した。ここで、杭の側面での砂の連込みとは杭先端から深さ方向に 8 cm 切り出した際の杭側面の粘性土に対する連込み量である。図-7 を見ると、圧密圧力が減少していくと杭側面の砂の連込みが増加する傾向にあることが分かる。

次に、杭の側面のどの深さにおいて砂が多く連込まれたのかを示すために深度ごとの砂の連込み量の測定結果を図-8 と図-9 に示す。図-8 は圧密圧力 20 kPa の粘性土地盤の場合の結果である。図中の太い実線は層厚 8 mm ごとに測定した砂の連込み量の深さ 1 mm あたりの平均連込み量である。折れ線は、それを平均深さで代表させてつないだものである。なお、深さの最も浅い部分の連込みに関しては、粘土層と砂層との境界部分にあたり、粘土層が軟弱のため粘土層を乱してしまうおそれから表層の砂を取り除くことができないため、表層に残った砂と連込みの砂の区別ができなくなってしまう。そのた

図-7 粘性土地盤の圧密圧力と粘性土に連込まれた杭側面の砂の質量の関係

図-8 圧密圧力 20 kPa の粘性土地盤における貫入深さと砂の連込み量の関係

図-9 圧密圧力 50 kPa の粘性土地盤における貫入深さと砂の連込み量の関係

め、最も浅い部分にあたる粘土層表層から 0~0.8 cm までの砂の連込みに関しては不明として、示していない。図-8を見ると、いずれの杭でも深度の浅い部分の砂の連込み量が最も多くなっており、深度が深くなるにつれて徐々に連込み量が減少していき、ある深さ付近で再び連込み量が増加していく傾向にあった。

図-9には、圧密圧力 50 kN/m² の場合の結果を示す。粘性土層の上面に近いほど砂の連込み量が多く、下層に行くほど連込み量は小さくなるものの、下端部付近でまた、連込み量が多くなるという傾向は圧密圧力 20 kN/m² の時と同様であるが、全体として、連込み量が小さくなっていることが分かる。特に、閉端杭と外細杭ではほとんど連込みが見られない状況にあった。

図-10 粘性土地盤の圧密圧力と粘性土に連込まれた杭先端の砂の質量

(a) 圧密圧力 10 kPa (b) 圧密圧力 100 kPa

図-11 粘性土地盤に閉端杭が貫入したときの杭先端の状況(X線CTによる鉛直断面画像)

なお、図-8と図-9で共通して、エッジ付きの連れ込み量が多く、しかもかなり深いところまで連れ込む現象がみられているが、これは、エッジが杭の外側に突き出していることが原因である。粘性土が過圧密の条件であるため、エッジの上の部分に空洞ができ、そこに砂が落下してくることが原因である。なお、実際の原位置地盤では、正規圧密地盤であることから杭打設による空隙は早期に閉塞する⁴⁾と考えられるので、比較的小さなエッジであれば、連れ込み量はそれほど大きくはならないと考えられる。また、閉端杭では、閉端杭よりも連れ込む量が大きくなるのは、杭先端部に残る砂が徐々に側面に出てくるためではないかと思われる。

図-10に粘性土地盤の圧密圧力と粘性土に連込まれた杭先端の砂の質量の関係を示した。ここで、杭先端に連込まれた砂の連込みとは、杭の先端より 1 cm 下までの部分に連込まれた砂の質量である。図-10を見ると、閉端杭には杭先端に多くの砂の連込みが確認でき、その他との差は歴然である。特に、圧密圧力が小さい程、砂の連込み量が増加する傾向にある。

図-11に粘性土の圧密圧力 10 kPa と 100 kPa における閉端杭を貫入した場合の X 線 CT による鉛直断面画像を示す。図-11は砂層表面からの貫入深さが 70 mm の時のものである。なお、上層の砂層の層厚はいずれも 50 mm であった。この画像からすると、圧密圧力 10 kN/m² の場合には、粘性土層の上面が杭貫入に伴って低下したようである。また、粘性土の圧密圧力 10 kPa のケースの方が

圧密圧力 100 kPa の地盤に比べ、杭の先端部分に形成されるお椀型の楔の貫入方向の高さが大きいことが分かる。この違いは粘性土の剛性の違いによるものと考えられる。この二つのケースは圧密圧力の違いから粘性土地盤の剛性が異なり、杭の貫入によって杭と粘性土地盤に挟まれた砂が、粘土を押したときに圧密圧力が小さいほうが粘土表面がよりたわみやすい状況になっていたため杭先端の砂の大きさに違いが生じたと考えられる。

図-11 からすると、杭の先端には高さが杭径の 0.4~0.7 倍程度の長さでお椀状に砂が残るようである。つまり、残った砂の体積は $(0.2\sim0.35)DA$ 程度と考えられる。ここで、 D は杭径、 A は杭の断面積である。この体積をもとに図-10 に示した閉端杭のケースでの砂の質量を概算すると 2~3 g の砂が先端に残ることになる。このような簡易な計算結果と図-10 に示した砂の量はおおむね同程度であることから、杭寸法によらず図-11 に示したような形状の砂が杭先端に残ることが想定される。開端杭でも相似的に同じような形状で砂が残るとして、 D を杭の肉厚、 A を杭材部の断面積であるとして $0.35 DA$ の体積の砂が残るとして概略計算をすると、0.12 g 程度砂が先端に残ることになる。これを仮に直径 1000mm 肉厚 15mm の鋼管杭を想定すると、260g 程度の廃棄物を連れ込むことになる。ただし、実地盤では、廃棄物層と粘性土の剛性比がもっと小さくなるので、この数字の数倍程度までは連れ込み量が増えることが想定される。仮に、図-1 の③や④のように先を尖らせた杭でその先端部分にだけ廃棄物が残るとすると、連れ込む量は 250g の 20 分の 1~10 分の 1 程度に減らすことも不可能ではないと考えられる。

(2) 杭の肉厚より大きな粒状廃棄物の連込み

図-5 に示した偏心量と杭貫入に伴い粘性土中に連込まれた金属板の貫入深さの関係を図-12 に示す。実験では 2 枚の金属板を貫入させたため各金属板の貫入深さを白抜きのプロットで示し、2 枚の平均値を色塗りのプロットで示している。図-12 より、どの杭を用いた場合にも偏心量が小さい程貫入深さが深く、偏心量が大きくなると貫入深さが浅くなる。このことは、偏心量が大きい程浅い深さで金属板が杭から外れることを意味している。開端杭における偏心量を変化させた複数のケースにおける金属板の貫入の状態を X 線 CT 装置を使って観察した。図-13 には粘性土への杭の貫入深さが 15mm と 18mm の状態を示している。いずれの図とも左側の金属板の偏心量は 2.55mm、右側の偏心量は 0.78mm である。図-13 より、偏心量の違いによって杭の貫入による金属板の傾斜の度合いが異なっていることがわかる。特に、偏心量が大きい場合の方が早期から金属板の傾斜が大きくなる傾向にあった。特に貫入深さ 18mm では、偏心量の大きい写真の左側の金属板に関して金属板と杭とが接してい

た部分がスライドし、金属板が杭の中心から外側に向かって逃げていくような滑動の挙動が起こっていた。

次に、金属板の角度や金属板が杭との設置点から外側方向に滑り出す滑動距離を求めた。まず、杭の粘性土への貫入量と金属板の傾斜角度の関係を図-14 に示す。緑で示した点は偏心量 0.78mm の時のものであり、赤、青がそれぞれ偏心量 2.01mm と 2.55mm の時の結果を示している。図-14 から偏心量が少ない偏心量 0.78mm の場合は、貫入量が大きくなっても金属板の傾斜角度が他の二つのケースに比べると小さく、その後も小さい角度のまま貫入が進んでいた。それに対し偏心量が 2mm 以上である二つのケースは貫入初期から偏心量に 0.78mm に比べ金属板の傾斜角度が大きくなって貫入が進んでいた。

図-12 金属板の偏心量と粘性土地盤への貫入深さの関係

図-13 粘土地盤に開端杭が貫入したときの杭先端の状況(X 線 CT による鉛直断面画像)

図-14 金属板の傾斜角度と杭の貫入深さの関係

図-15 金属板の傾斜角度と滑動距離の関係

先に述べたように X 線 CT による画像から金属板がある程度傾斜すると金属板が杭から滑り出し、外側へ滑動する現象が見られた。そこで図-15 に金属板の傾斜角度と滑動距離の関係を示した。ここでの滑動距離とは、金属板の杭との貫入初期の接触位置から、金属板の滑動が発生し外側方向に滑り出した金属板の水平方向の移動距離とする。先ほどの図-14 と同様に三種類の偏心量をそれぞれ色分けしてプロットしている。ここでは、貫入を止めて X 線 CT による撮影を行ったため、連続データはとれていない。そのため、滑動が発生した厳密な傾斜角度の算出はできていない。図-15 を見ると偏心量が異なる全てのケースにおいて金属板の傾斜角度が 40~50° の範囲内において金属板の滑動が発生していることが分かる。さらに、滑動が発生した後も滑動距離と傾斜角度の関係はおおむね等しい傾向を示していることが分かる。このことから、金属板の傾斜角度がある一定以上大きくなることで滑動が発生する可能性があることが分かった。

4. 結論

本研究では、廃棄物層を貫通して打設される杭が廃棄物を下層の粘性土地盤に連れ込む挙動について検討した。杭の肉厚よりも小さな粒径を持つ廃棄物については、砂でモデル化し、粘性土地盤と廃棄物地盤の剛性の違いに着目するために、粘性土地盤の圧密圧力を変えて実験を行った。その結果、粘性土の圧密圧力が小さい程、全体的な砂の連込み量が大きくなる傾向にあることが分かった。また、杭の肉厚より大きな廃棄物の連込みについては、金属板でモデル化し金属板に作用する杭の貫入力偏心量の違いの影響を検討した。金属板は偏心量が大きい程、杭の貫入深さが浅いところで回転し始め杭から外れるのも貫入深さの浅いところとなることが分かった。

参考文献

- 1) 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, 第 42 巻第 4 号, pp.43-46, 2008.
- 2) 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, pp. 217-224, 2005.
- 3) 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, pp.1100-1104, 2005.
- 4) 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, 第 56 巻第 8 号, pp.28-29, 2008.
- 5) 平尾隆行: 海面処分場跡地の高度利用のための基礎杭打設工法に関する研究, 東京理科大学学位申請論文, 226p, 2018.
- 6) 渡部要一, 水谷崇亮, 金子崇, 増門孝一: 海面処分場における杭基礎の適用性—未処理廃棄物地盤における打設実験と杭周面透水試験—, 港湾空港技術研究所資料, No.1321, 34p, 2016.

(2018.2.8受付)

MECHANISM OF GRANULUR WASTE DRAGGING BY PILE DRIVING THROUGH WASTE LANDFILL

Riki NOMURA, Yoshiaki KIKUCHI, Taichi HYODO, Shunsuke NOBATA, Takayuki HIRAO, Makoto TAKEMOTO, and Satoshi MATUMURA

In order to use the premises of the off shore waste disposal site highly, it is necessary to construct piles into the bearing layer. In such a case, piles penetrate through impermeable layer. At that time, the pile is thought to bring the waste below the impermeable layer. In this study, for the waste of small particle size, the influence of the difference in rigidity between waste layer and underlying impermeable layer on waste dragging was investigated. For the waste of large grain size, the difference of bringing in due to the difference in eccentricity was investigated. As a result of experiments, it was confirmed that in the case of small particle size waste, the rigidity of the impermeable layer relatively decreases, so that the amount of waste brought increases, in the case of large grain waste, the penetration depth was found to be different according to the difference of eccentricity.