

最終処分場の跡地利用のための地盤工学的条件

第42回環境工学研究フォーラム企画セッション
2005年12月2日 鳥取県立県民文化会館

独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 土質研究室長
渡 部 要 一 (わたべよういち)

1. はじめに

最終処分場の跡地は、良質材料で造成された一般の埋立地とは異なり、廃棄物で造成された地盤であることに起因する様々な制約の中で土地を利用しなければならない。土砂処分が主である安定型処分場の場合には、一般の埋立地に準じた土地利用が可能となるが、産業廃棄物や一般廃棄物を受け入れる管理型処分場の場合には、遮水構造や管理方法が構造基準に厳しく規定されている。このように、廃止までの管理はもちろんのこと、廃止後の土地利用に関しても様々な制約を受ける。

海面処分場は、廃棄物埋立護岸で囲まれている。潮汐、波浪、高潮、津波、海流等の時々刻々変化する厳しい外力が作用するこの護岸には、埋立地を海特有の外力から護る「護岸」と、処分場の保有水を外海に漏出させないための「側面遮水」の両者の性能が要求される¹⁾。陸上処分場では、浸出水を効率的に処分場底面で集水し、標高差を利用して最下流で浄化处理する集排水システムが導入されている(図-1)。廃棄物中を雨水が浸透し、余水中に溶け出した廃棄物層からの融解・浮遊物質は定期的にモニタリング(人の健康診断でいえば尿検査のようなもの)が実施され、2年間にわたって排出基準を満足することを確認できれば処分場としての使命を終えて跡地利用される。一方、海面処分場は、地下水位が高く、かつ、平面的な(標高差がない)ため、出口のない器のようなものである(図-2)。

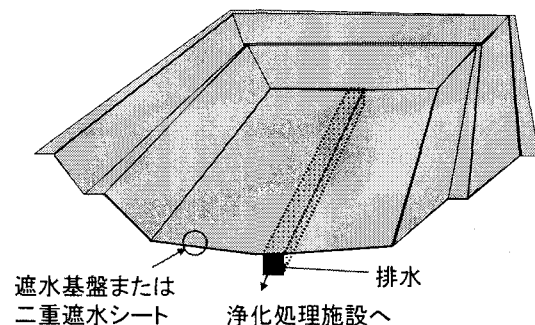


図-1 陸上処分場のイメージ

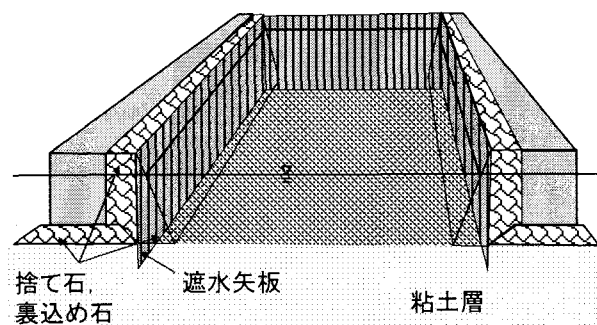


図-2 海面処分場のイメージ

海面処分場では、管理水位以深では水の流れが緩慢なため、浄化はほとんど進行しない。人体の隅々で新陳代謝を可能にする血液と同等の役割を、処分場においては保有水が担っているとして、その流れが悪い状態を考えるとわかりやすい。廃止前の処分場では、余水を浄化处理する際に水質検査をしているが、その余水の大部分は排水ポンド周辺を浸透してきた水で占められてい

る。このシステムでは、処分場全体の浄化・安定化の程度をモニタリングできてはいない。 Pondからの余水処理だけではなく、保有水循環システムの構築など、何らかの対策をしなければ、深部が不健全な地盤が将来に残されてしまう。陸上処分場と海面処分場を同等に扱うのではなく、海面処分場の場合には地表面からどの程度の深さまで浄化できれば良いのかなど、新たな議論も必要であろう。人の健康状態を診断するのに血液検査を行うように、処分場の浄化がどの程度進行しているか、濃度が高い場所が残っていないか等を調査・モニタリングするためには、処分場内の保有水を採取して場所ごとに検査することが望ましい^{2),3)}。

このように、海面処分場では、管理水位以深には、浄化されない廃棄物地盤が水中に保存された状態が将来にわたって、すなわち廃止後においても、ずっと存在し続けるという前提に立って、土地利用の方策を考えなければならないことになる。以下では、土地利用に関する地盤調査、適用可能な基礎形式、不同沈下防止のために適用可能な地盤改良工法について述べる。

2. 廃棄物埋立て地盤の調査計画

2. 1 効率的な調査の計画

廃棄物により埋め立てられた土地を利用する場合、焼却灰、粘性土、砂質土、金属片、コンクリート片、プラスチック片などが混在し、一般的な沿岸域の地盤と異なり地盤材料の不均質性が際だっていることが多い。その上、長い年月を経て形成された自然堆積状態の地盤と違い、また、人工的に締め固めて造成された土地とも違い、非常に緩い堆積状態になっている。このため、廃棄物埋立て地盤に盛土を行うと廃棄物層の沈下量が多く、さらに不均質性に起因して不同沈下も引き起こされる。したがって、廃棄物埋立て地盤を利用する際には、地盤の不均質性に対応して、均質なエリアでは粗く、不均質なエリアでは密に地盤調査をし、十分な沈下対策・不同沈下対策ができるように、設計上の配慮が不可欠である。そのためには、対象地盤の概略を把握するための調査を最初に実施し、その結果、不均質な特徴が現れる箇所については密に調査地点を設けるといったメリハリを付けた詳細調査を実施することが効率的である。概略調査は、お手軽でしかも広範囲のデータを取得できるものが理想であり、次に述べる表面波探査の活用もその一つとして考えられる。詳細調査については、ボーリング調査、コーン貫入試験、掘削調査などが考えられる。

2. 2 表面波探査技術の活用

資源探査の手法として発展してきた弾性波探査のうち、表面波（表面波の一つであるレイリー波）を利用した探査は、地震計やコンピュータの性能向上とともに安く簡単に実施できる手法となり、土木の分野でも用いられる機会が多くなってきている。調査手法が手軽であるとともに、測定（推定）している値がせん断波速度（S波速度）という分かりやすい物理量であることも、近年注目されるようになった理由の一つであると思われる。

臨海部の廃棄物処分場において実施した表面波探査により得られたS波速度構造の例を図-3に示す⁴⁾。そもそも、レイリー波を利用した表面波探査手法は、測定原理からも明らかのように、深さとともに硬くなるような（剛性が増してせん断波速度 v_s が大きくなる）地盤に対して精度良くせん断波速度構造を推定することができる弾性波探査方法である。廃棄物埋立地盤の多くは不均質であり、浅いところに硬い廃棄物層があったり、ある程度の深さに軟らかい廃棄物層があっ

たりするため、特に深さ方向の分布に対する推定精度は悪いと言わざるを得ない。また、25m程度の長さに地震計を並べて設置する程度の測定規模では、その長さのおよそ半分である10～15mの深度が測定の限界でもある。このため、表面波探査のような手法で廃棄物層の下端、すなわち旧海底地盤表面を精度良く把握することは困難である。しかしながら、別途実施したコーン貫入試験により得られた先端抵抗 q_t の深度分布とせん断波速度構造を比べると、C8とC9の軟らかい層と、C2、C3、C4、C5、C6の硬い層を表面波探査でも捉えられている。

したがって、表面波探査は廃棄物地盤の不均質性をマクロな視点から大まかに評価するには効率的な手法であるといえ、ボーリングやコーン貫入試験による詳細調査に先立ってこれを実施し、全体像を把握した上でボーリングやコーン貫入試験の計画の策定（どこで重点的に調査すべきかなどの判断）に役立てることが有効であると考えられる。

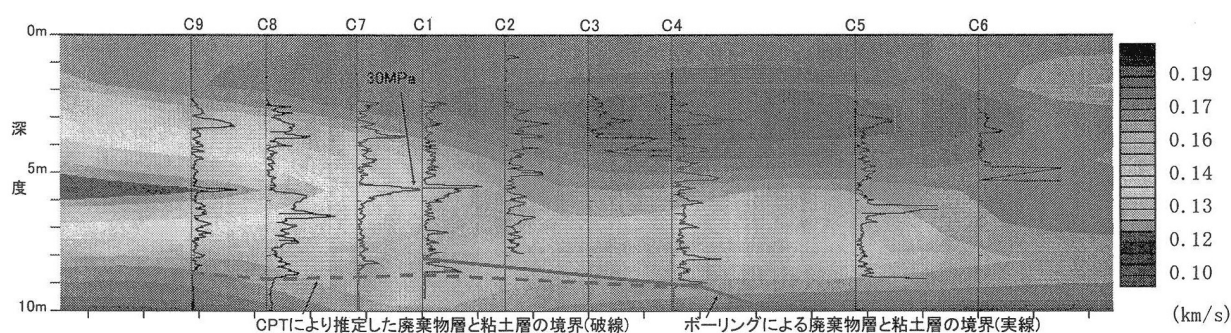


図-3 海面処分場におけるS波速度構造の例

3. 海面処分場の跡地利用に適用できる基礎構造

処分場建設予定地に遮水基盤が存在しない場合には、人工的に遮水基盤を構築して廃棄物を投入しなければならないという構造上の基準が定められている。また、処分場の廃止基準も明文化されており、遮水工が構造基準を満足していることが前提となっている。このため、処分場として供用中に土地を利用することはもとより、廃止後においても遮水工の機能に損傷があってはならないため、跡地利用をする際には処分場としての遮水性能を維持した上で、適切な基礎の構築工法を選択しなければならない。

3. 1 自然堆積粘土層が底面の遮水基盤となっている場合

廃棄物埋立地盤そのものも軟弱であるが、底面遮水層としての自然堆積粘土層も非常に軟弱であるため、ある程度大きな構造物を建設するためには、杭基礎によりこれを支持する必要がある。ここで注意しなければならないのは、杭打設時に自然堆積粘土層を乱すことによって、その遮水機能を損なうことがあってはならないことである。杭の打設（図-4）によって杭周辺の粘土層が乱れたり、杭と粘土との境界が水みちとなって漏水が起こったりするようでは、遮水性能が損なわれてしまう。最近の研究では、複数の研究グループがそれぞれ独自の模型実験を通じて、粘土地盤に杭を打設しても、そこが弱部となって漏水が生じることはないという共通の結論を導き出している^{5),6),7)}。しかしながら、ここで実験に用いられている遮水層は、透水係数が 10^{-6}cm/s や

10^{-7}cm/s といった十分に小さな値を示す高塑性粘土で構成されている場合である。このような場合には十分な遮水性能とともに、杭が打設された場合の変形追随性、杭との付着性も十分にあることになる。一方、構造基準をようやく満足しているシルト分や砂分を多く含む低塑性の粘性土で、例えば 10^{-5}cm/s の層が5m強あるような場合、乱れに対しても弱く、変形追随性や杭との付着性にも劣ることが予想される。このような場合には、杭の打設に伴う遮水性能低下の可能性について十分に配慮し、漏水等が懸念される場合には、杭周辺への薬液注入による固化などの漏水対策を必要に応じて取らなければならない。なお、杭基礎には鋼管が用いられることが多いが、防食塗装あるいは海水中であれば電気防食を施すことにより、防食対策をとらなければならないこともある。

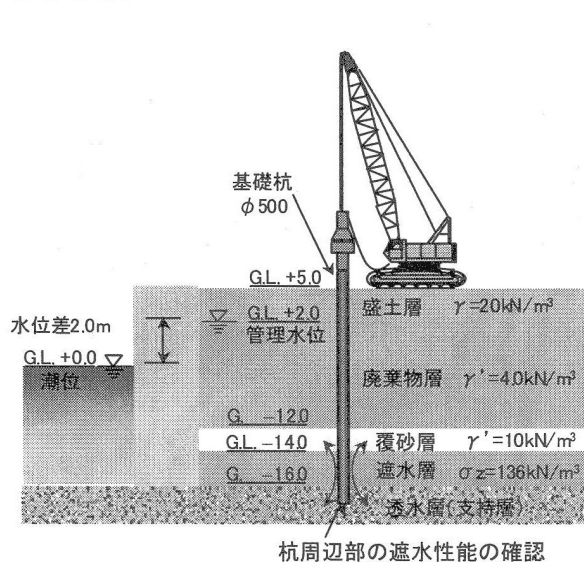


図-4 海面処分場への杭基礎の打設イメージ

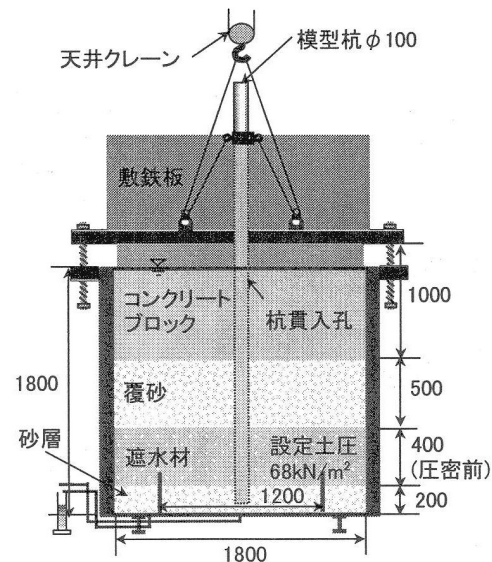


図-5 1／5スケール中規模実験

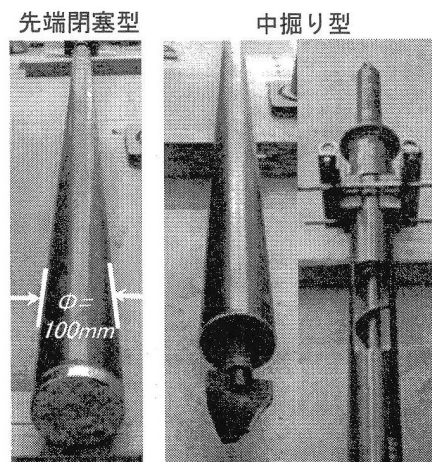


写真-1 中型実験用模型杭

杭先端形状および打設方法の違いが粘土層の遮水性能に及ぼす影響について、実現象により近い状態を再現するために1/5スケールの中規模模型実験（図-5）が実施された⁵⁾。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内部と周辺部に分けて、それぞれの透水量を計測できる構造になっている。

実験に用いた模型杭2ケース（先端閉塞型(Case5)、中掘り型(Case6)）を写真-1に示す。遮水層作製には、塑性指数 $I_p=66$ （液性限界 $w_L=112\%$ ）の宇部粘土を原料土として含水比調整し $k=1\times 10^{-6}\text{cm/sec}$ に相当するものを使用した。想定土圧は深度10m程度を想定して 68kN/m^2 、動水勾配は7と設定した。透水量は模擬地盤を作製後、所定の圧力にて遮水層の圧密を十分に完了させてから、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。いずれの実験においても、遮水層作製時に構造基準を満足する遮水層厚（ $k=1\times 10^{-6}\text{cm/sec}$ 、層厚 $h=1.6\text{m}$ 相当）を確保して初期の層厚を設定した。遮水層構築時にはスラリー状であるため $k=1\times 10^{-6}\text{cm/sec}$ 程度であるが、圧密終了時には $k=4\times 10^{-6}\text{cm/sec}$ 程度にまで低下する。

実験（Case-5 先端閉塞型およびCase-6 中掘り型）により計測された透水係数の経時変化について、杭打設に伴う遮水性の低下は見られなかった。写真-2は、Case-5（先端閉塞型）の解体断面であるが、杭径程度の深さまで砂の巻き込みが生じていることが分かる。写真-3はCase-6（中掘り型）の解体断面であるが、砂の巻き込みが生じておらず、杭と遮水基盤が一体化していることが分かる。

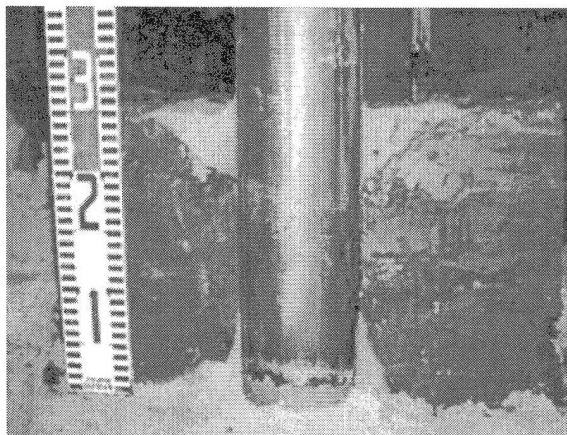


写真-2 実験後断面（Case5 中規模パイプ型）

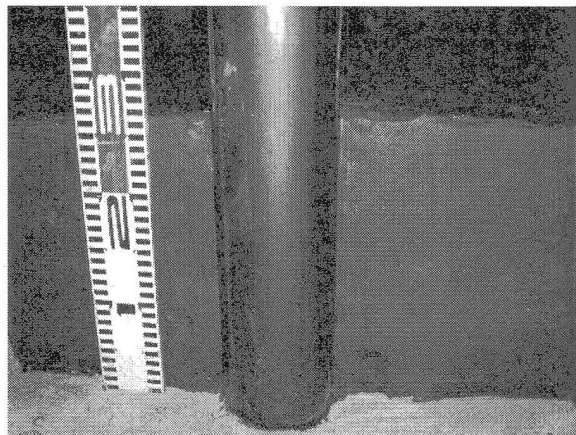


写真-3 実験後断面（Case6 中規模中掘り型）

打設方法により杭径程度の深さまで砂の巻き込みを生じる結果が得られたことから、粘土層からなる遮水基盤であっても層厚が薄い場合には、打設方法を十分に検討する必要があることが分かった。実験をした工法の中では、中掘り工法が粘土層への影響が少なく、遮水層への打設に適していると言える。

3. 2 底面遮水工として遮水シートが用いられている場合

底面遮水工として遮水シートが用いられているような場合には、杭基礎の打設では致命的な遮水工への損傷が生じるため、別の基礎工法を考えなければならない。海底地盤が粘土地盤である場合には遮水シートが不要であることから容易に想像できるように、そもそも、底面遮水工に遮水シートが用いられるようなケースの場合には、処分場下部の地盤が砂質土であることが多く、構造物を支持するという点ではそれほど悪い地盤ではないことが多い。構造物の基礎としては、遮水シートを貫かざるを得ないような基礎工法を避け、基礎幅を増やす、構造物を軽量化するな

どの対策によって対処する必要がある。

4. 海面処分場跡地利用に必要な地盤技術

沿岸の管理型廃棄物埋立処分場の多く、特に東京、名古屋、大阪の海面処分場では、軟弱粘土地盤を底面遮水層としている。このため、埋め立てられた廃棄物層の自重が圧密圧力となり、廃棄物層の分解・圧縮による沈下よりも遙かに大きな圧密沈下が長期にわたり生じる(図-6)。圧密には数十年から数百年の時間を要するため、処分場の土地を利用する段階になっても沈下が継続することから土地としての利用が困難とならざるを得ない。このため、底面遮水層としての機能は環境省令となっている廃棄物処分場の構造基準を満足したまま底面の軟弱粘土の地盤改良が出来ないと、土地としての高度利用は難しいと言わざるを得ない。特に道路などの線構造物の構築では盛土がなされるため、建設中の沈下はもちろんのこと、供用開始後の残留沈下を対象とした不同沈下対策はきわめて重要である。

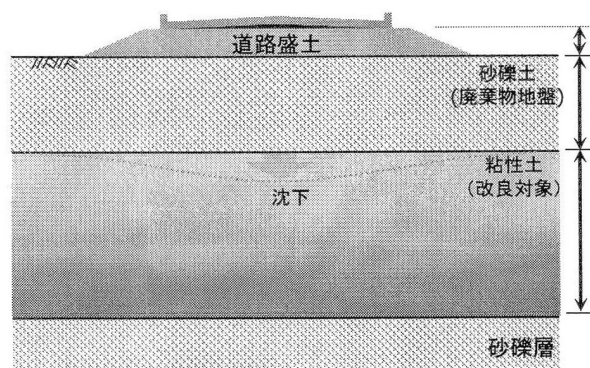


図-6 廃棄物地盤上の盛土の長期的な沈下

4. 1 不同沈下対策(その1): 軽量化

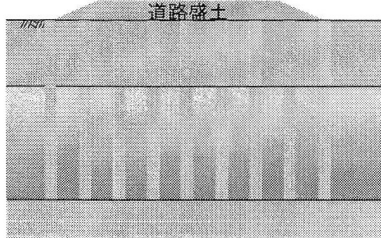
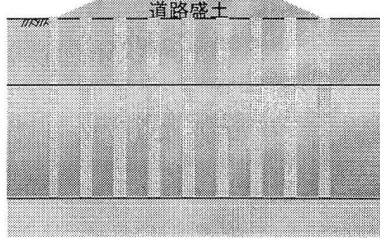
底面遮水層をなす軟弱層の沈下対策、ならびに廃棄物層そのものの沈下対策として、道路建設などで必要になる盛土を軽量化することも有効な方法であると思われる。軽量化の方法には、気泡混合処理土、発泡ビーズ混合処理土、EPSブロックなどがあるが、地下水の影響、耐久性、変形追随性、化学的安定性なども考慮した上で、適切な工法を選択する必要がある。また、軽量化された材料に水が浸潤して密度が増加するようなことがないように、対策を講じることも重要である。

4. 2 不同沈下対策(その2): 地盤改良

底面遮水層をなす軟弱粘土層の地盤改良では、圧密と固化の2つの方法が考えられる。圧密を行うには、バーチカルドレーンを打設してプレロードを作用させる必要がある(バーチカルドレーン工法とプレローディング工法の併用)。一方、固化では、原位置でセメントと攪拌して固化する深層混合処理工法が代表的である。表-1に示すように、深層混合処理工法(=CDM)とバーチカルドレーン工法(サンドドレーン=SD、プラスチックボードドレーン=PVD)を比較すると、

前者は非常に高価であるのに対し、後者は工費が安くなるものの、ドレーンを設置して透水性を高める工法であることから、遮水性能が損なわれる危険があるなどの問題点がある。

表-1 不同沈下対策としての地盤改良工法の利点・欠点

対策	①CDM改良	②SD、PVD
概要		
利点	・確実な改良効果が得られ、遮水性も確保できる	・CDMに比べ安価
欠点	・コストが甚大	・廃棄物層からの滲出水が外部へ拡散する

(1) バーチカルドレーン

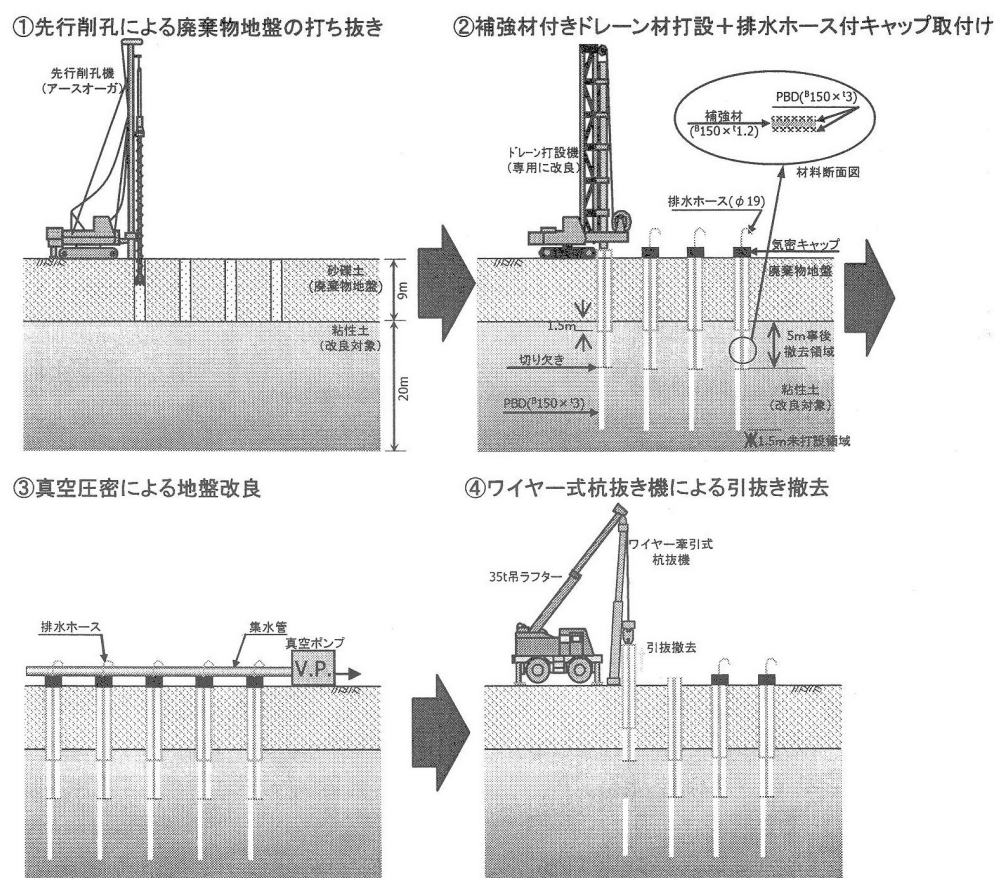
軟弱粘土地盤も圧密により地盤改良することで良質な地盤とすることができ、圧密には長い時間がかかることから、サンドドレーンやプラスチックボードドレーンなどのバーチカルドレーンを打設し、さらに地盤を過圧密にして残留沈下を小さくするために盛土によりプレロードを作用させて圧密を促進する。廃棄物層を打ち抜いて下部粘土層を地盤改良する場合には、プラスチックボードドレーンの方が効率的かつ効果的な地盤改良ができると考えられる。

従来のプラスチックボードドレーン工法では、ドレーン材は地中に埋め捨てるのが一般的であったため、例えば廃棄物処分場の底面遮水層となっている軟弱粘土地盤にドレーンを打設すると遮水機能が損なわれ、環境省令に示された構造基準を満足しなくなってしまう可能性がある。しかしながら、ドレーン材を引き抜くにも、粘土との付着により膨大な引き抜き力が必要とされ、引き抜き力およびドレーン材そのものの引張り強度という両面から、処分場への適用は、そのままでは不可能であると考えられる。

このような問題点を解決するための技術開発もなされており、例えば、ある程度の引き抜き力に耐えるように補強されたドレーン材に対して、埋め捨て部と撤去部とに分離出来る構造を施し、ドレーン材を上部から引き抜くことにより、「撤去部」のみを地盤から撤去できる工法が提案されている。その概要を図-7に示すが、一部のドレーン材を撤去することにより、遮水層としての所用の機能を損なうことなく、底部軟弱粘土地盤の地盤改良（圧密促進）を行う工法である。

ドレーンを全長にわたって引き抜くには、非常に大きな引抜き力が必要であるとともに、ドレーン材に対しても非現実的な補強が必要となるが、図の方法では、ドレーン材は引き抜き時に所定の位置で切断する構造になっているので、打設に必要な引張り耐力を有し、かつ、切断部より上部においてのみ引き抜き力に耐える強度を有していれば、遮水層の機能を残したまま、小さな引抜き力で効率的に地盤改良ができるようになる。

バーチカルドレーンによる地盤改良の多くは、盛土によるプレロードが併用されているが、廃棄物処分場における下部地盤の改良では、廃棄物層からの排水によって盛土材料が汚染されてしまうことも懸念され、できれば、将来撤去する盛土を処分場内に搬入することは避けたいものである。そこで、バーチカルドレーンの上部を気密性の高い材料で覆い廃棄物層からの浸出水が流入することを防いだ上で集水管を通じて真空ポンプで排水し、負圧を負荷することにより、いわゆる真空圧密を併用することが効果的であると考えられる。廃棄物処分場内ではなく、地層構造がこれと似た埋立地盤内での試験施工ではあるが、現場施工実験によりこの工法の有用性について確かめられている。



※必要に応じて抜跡処理を行う。

図-7 上部を回収可能なプラスチックボードドレーン工法と真空圧密工法の併用による海面処分場下部粘土地盤の地盤改良のイメージ

(2) 深層混合処理

深層混合処理により地盤を固化する工法は、高価ではあるが、確実に効果を得られる工法であると考えられる。ここで注意しなければならないのは、自然堆積粘土層を乱すことによって、その遮水機能を損なうことがあってはならないことである。深層混合処理工法では、粘土地盤を攪乱すると同時にセメントを混入するため、遮水性能は維持されることが考えられる。しかしながら、工費が高くなることに加え、廃棄物埋立地盤そのものの改良には適用できるか不明な点も多いた

め、粘土地盤の改良はできても廃棄物層に対しては別の対策が必要になる可能性もある。

参考文献

- 1) 渡部要一, 土田 孝, 山田耕一, 鶴飼亮行: 海面処分場の特徴と変形追従性遮水材の開発, 土と基礎, Vol.51, No.8, pp.32-33, 2003.
- 2) 織田幸伸, 渡部要一, 土田 孝: 地盤環境モニタリングコーンの開発, 港湾技研資料, No.975, 2000.
- 3) Watabe, Y., Tsuchida, T., Tanaka, M., Oda, Y. and Sakai, Y.: Geo-environmental cone penetrometer with efficient ground water sampling, *Proceedings of the 4th International Congress on Environmental Geotechnics*, Rio de Janeiro, 71-76, 2002.
- 4) 白石保律, 田中政典, 渡部要一, 村上智英, 椎名貴彦, 林 宏一 (2005): 廃棄物埋立地盤の表面波探査結果について, 第40回地盤工学研究発表会.
- 5) 福田賢二郎, 上田正樹, 杉原広晃, 渡部要一 (2004): 海面管理型廃棄物処分場の遮水基盤への杭基礎打設の影響, 第39回地盤工学研究発表会講演集, pp.2267-2268.
- 6) 嘉門雅史, 勝見 武, 濱田 悟, 乾 徹 (2004): 配意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, pp.2265-2266.
- 7) 菊池喜昭, 橋爪秀夫 (2005): 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論文集.