

廃棄物処分場の遮水技術

Barrier Technologies for Waste Landfill

勝見 武 Takeshi KATSUMI (京都大学大学院地球環境学堂)



本論文では廃棄物処分場に適用される遮水技術について述べる。まず、廃棄物処分場の遮水の考え方、遮水工に求められる性能を概説する。ここでは、単に遮水をして廃棄物を封じ込めるという機能だけでなく、貯留した廃棄物を、適切な反応の促進により安定化させる考え方を示す。続いて、廃棄物処分場で用いられる粘土ライナーの遮水性能ならびにその評価に関わる問題を述べる。粘土ライナーは難透水性材料であることから、透水試験方法の標準化が重要であることを示すとともに、粘土ライナーの遮水性能試験結果の一例を示す。最後に、廃棄物処分場の運用に関わる問題として、処分場跡地に構造物を建設する場合の支持杭の打設の問題を取り上げる。これらのテーマは、環境保全型社会基盤整備として地盤工学が貢献しうる分野である。

キーワード：廃棄物処分場、遮水、粘土ライナー、透水係数、化学物質 (IGC : D-4, E-7)

1. はじめに

有害物質による土壌・地下水の汚染は蓄積性が高く、一旦汚染が進行すれば、その浄化には多大なエネルギーと費用を要するものとなる。したがって、我々は土壌・地下水を汚染することの無いよう様々な化学物質を扱っていかねばならない。そのような土壌・地下水汚染をおこす原因となりうるものの1つとして、廃棄物処分場がある。廃棄物処分場では様々な不要物を受け入れて埋立がなされ、極めて広範な種類の化学物質の含有の可能性が考えられるため、これによる土壌・地下水汚染を防止しなければならない。そのため、特に1970年代頃から遮水技術が意識されるようになってきた。本論文ではそのような遮水技術について、トピック的に概説を行う。なお、廃棄物処分場における環境問題への対応としては、土壌・地下水汚染防止を対象とした遮水技術のほかにも、発生ガスや臭気、カラス等の飛来、運搬車両の問題など広範にわたるが、本論文では遮水に絞って述べる。

2. 廃棄物処分場における遮水機能

欧米の多くの国で採用されている処分場（一般廃棄物）の構造形式の基本的考え方は、図-1に示すようにライナーとカバーシステムを設けることによる。ライナーは、廃棄物層で発生した浸出水が処分場外部の土壌や地下水に到達するのを防ぐもので、土壌・地下水汚染に対する最終のディフェンスラインといえる。一方、カバーシステムは

廃棄物層への雨水の浸透を最小にすることで、有害物質を含みうる廃棄物浸出水の発生が抑えられ、浸出水がライナーを通過して周辺の土壌や地下水を汚染することのそもその原因を最大限防ぎうる。ところで、カバーシステムは遮水性能が高いため、廃棄物層は水理学的に外界と隔離されてしまい、廃棄物が分解されないため安定化せず、いつまでも廃棄物として残存する問題もある。この現象は、「dry tomb (乾燥した墓)」とも呼ばれる。廃棄物処分場は大きな反応容器のようなものである。我が国では準好気性埋立などとして水と空気を廃棄物層に積極的に導入し、廃棄物の分解と安定化を促進する手法が定着している。一方、欧米各国でも最近ではバイオリアクター (Bioreactor landfill) と称する分解促進型の処分場を指向するようになっている。

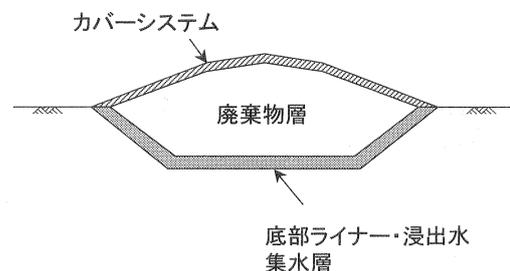


図-1 処分場構造の例 (模式図)

以上の点から、廃棄物層に「水を入れない」カバーの役割は、今後も議論の余地がある。一方の、廃棄物層から「水を出さない」ライナーの機能への認識はほぼ定着している

と言えそうではある。欧米の多くの国では、一般廃棄物処分場の底部ライナーに粘土ライナーとジオメンブレン（遮水シート）が併用されることとなっており、フランス以外の国では筆者が知る限り透水係数 1×10^{-7} cm/s 以下の粘土ライナーが必須で、この粘土ライナーとジオメンブレンとを組み合わせる例が多い。底部ライナーの性能についても十分に検証がなされている。例えば、合衆国では 54 ヶ所の処分場の複合ライナーについて 10 年にわたってモニタリングを行った例が USEPA（合衆国環境保全局）により報告されており、ジオメンブレンと粘土ライナーによる複合ライナーを適切な施工により設けていれば地下水汚染がみられないことが示されている¹⁾。

USEPA のこの報告¹⁾では、複合ライナーとして通常の締固め粘土ライナーとジオメンブレン（遮水シート）の組み合わせの他に、ジオシンセティッククレイライナー（GCL）とジオメンブレンの組み合わせによる処分場も含まれている。GCL とは、図-2 に示すように 2 枚のジオテキスタイルにベントナイトを挟み込んだり、ジオメンブレンの片側にベントナイトを貼り付けたりして製造される、いわば粘土のシートである。工場製品であることから現場での品質管理の労が軽減できること、薄いため廃棄物受け入れ容量を増加できること等のメリットがある。ベントナイトの著しい水和膨潤性により低い透水係数が得られ、純水に対して 1×10^{-9} cm/s 程度の透水係数が報告されているが、薄いことから希釈効果（Attenuation capacity）には疑問があり、果たして締固め粘土ライナーと同程度の遮水性能が期待してよいのかが議論となっていた。この USEPA の報告では、GCL が締固め粘土ライナーと同等の遮水性能を有することが示されたわけである¹⁾。

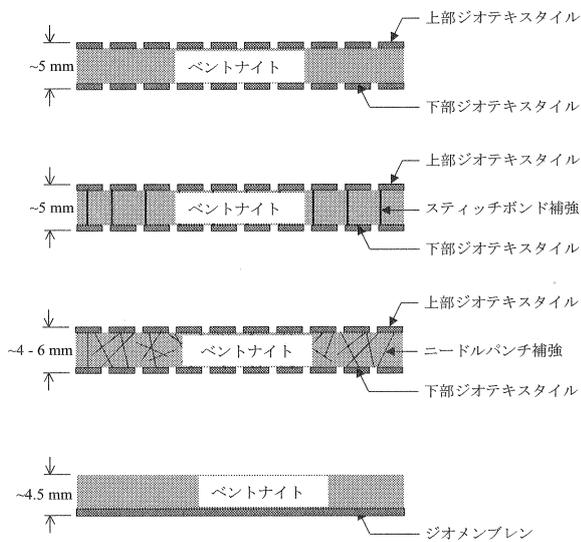


図-2 ジオシンセティッククレイライナーの例

さて、このように粘土ライナーとジオメンブレンの組み合わせによる複合ライナーによる遮水工は、処分場において十分に機能しているとの見解が一般的となってきているが、それに相対する悪いニュースもある。揮発性有機塩素化合物（VOC）が複合ライナーによる遮水工を通過し外部に漏洩しているデータが報告されているのである。ウィスコンシン大学の T.B. Edil 教授の地盤工学会での講演²⁾では、ウィスコンシン州の複数の処分場で行われたモニタリングで、埋め立てられた廃棄物から発生した VOC が遮水工を通過して、処分場外部の地下水や土壌から検出された例が報告された。有機化学物質は、健全なジオメンブレンを分子拡散によって通過しうることが既に報告されており^{3),4)}、その効果が現場で現れたものとして注目される。なお、日本では多くの場合、一般廃棄物は焼却処理して埋め立てるので、問題となる化学物質はほとんどが重金属などの無機化学物質と考えられ、この報告による影響は少ないと考えられる。Edil 教授のデータはまだ公式な報告や論文として発表されていないが、このデータについて今後の展開を見守る必要がある。

3. 粘土ライナーの遮水性評価

3.1 粘土ライナーの透水試験

処分場の遮水材料の適用にあたっては、遮水性能の評価が必要である。粘土系の材料については透水係数の測定が通常行われるが、この透水試験の方法について我が国ではオーソライズされたものがなく、機関ごとに独自の方法でなされている感がある。表-1 には、粘土ライナーをはじめとする対象となる粘土バリアの種類を示した。

表-1 粘土バリア・粘土系遮水材の種類

種類	定義	適用
天然の粘土層	現場に存在している粘土の層	主に海面処分場
締固め粘土ライナー（CCL）	粘土を現場で締め固めたもの	内陸処分場の底部ライナー
ベントナイト混合土	CCL のうち、ベントナイトを混合して施工するもの	内陸処分場の底部ライナー
ジオシンセティッククレイライナー（GCL）	ベントナイトのシート	主に内陸処分場の底部ライナー
ソイルベントナイト	土とベントナイトを混合	汚染地盤封じ込め
圧縮ベントナイト	ベントナイトを締め固めて圧縮したもの	放射性廃棄物地中処分

このような難透水性の土質材料の透水試験を行う際の問題点は図-3 のように整理できる。透水試験の実行を難しくしているのは、透水係数が低いことと、主体となる構成材料の粘土が物理化学的・化学的に敏感であることに起因する。したがって、難透水性であるため供試体の初期飽和が難しいことに加え、廃棄物浸出水に対する遮水性能を評価する際の初期飽和に蒸留水や脱イオン水、純水を使うことの是非が問題となる。また、透水係数が低いため水が流れにくく、実験には長時間を要し、試験をいつ終了したらよいかの問題もある。試験時間の短縮のために動水勾配を大きくし過ぎると側壁漏れが生じることは十分に認識されているが、供試体の上下での有効応力の差が無視しえなくなることはあまり議論されていない。特に圧縮性の材料を用いる場合は、過剰な動水勾配は供試体の有効応力の著しい差異を生じさせ、要素試験とみなせなくなることに注意が必要である。

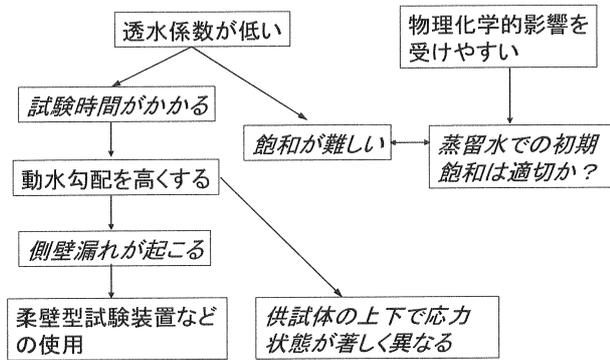


図-3 難透水性材料の透水試験における問題点の整理⁵⁾

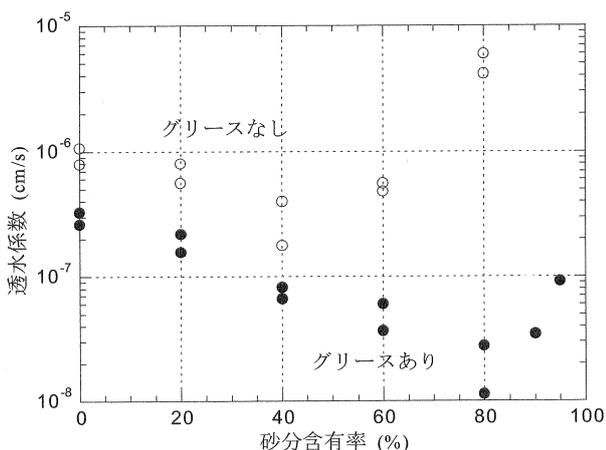


図-4 ソイルセメントの透水試験の結果の例^{5),6)}

透水試験の装置は柔壁型（三軸試験装置を含む）と剛壁型とに大別される。柔壁型装置は、供試体側面をメンブレンで覆い、作用水頭圧よりも大きなセル圧をかけることにより、メンブレンを供試体側面に密着させて側壁漏れを防

ぐものである。ASTM では、難透水性材料の試験には柔壁型装置を用いることとされている。しかし、柔壁型装置は側壁漏れ防止に完璧という訳ではなく、ソイルセメントやアスファルトコンクリートのように固い材料を試験した場合、メンブレンが供試体側面に充分に食い込まないため側壁漏れを生じうることに注意が必要である。これは、供試体側面にグリースを塗ることなどで解決が図られる^{6),7)}。図-4 はソイルセメント供試体の透水係数の例で、土の砂分と粘土分の割合を変化させた上で、フロー値が一定となるよう水分量を調整して作製した供試体について柔壁型透水試験装置を用いて透水係数を求めたものである。横軸の砂分含有率の増加に伴い、グリースなしの場合（図の○のプロット）とありの場合（●）との差が広がっている。図の○と●のプロットの差異は、側壁漏れと考えられる。側壁漏れの有無は、試験終了時に染料を流し、供試体への染み具合をみることによって確認できる。砂分が多くなると供試体側面が粗になり、メンブレンが供試体に食い込まず側壁漏れが起こったが、グリースを塗布することにより側壁漏れは回避できたという結果である。

一方、剛壁型透水試験装置は機構上側壁漏れが起こりやすい。しかし、樹脂等を用いて側壁処理を施すことによって側壁漏れはかなり回避できる。剛壁型装置のもう1つの短所としては、柔壁型装置ではセル圧を調節することによって供試体に作用する有効応力を制御できるが、剛壁型では供試体への作用応力を制御できない。柔壁型透水試験装置の方が、現場における作用応力を考慮した透水試験が実施できるということになる。しかし、供試体の圧縮性が低ければ有効応力の大小が透水係数に及ぼす影響は無視しうるほど小さいと考えられるので、ソイルセメントや高密度のベントナイト混合土などの比較的固い材料は、側壁漏れの回避が保証できるなら剛壁型装置は充分使用に耐えうると考えられる。

化学物質溶液を透水させる場合、粘土表面の拡散電気二重層の発達が阻害されるため、透水に寄与する間隙体積は増加し、透水係数は増加する。しかし、柔壁型装置を用いた場合、セル圧が供試体を圧縮するため、化学作用により本来できてしまった空隙が埋められてしまい、透水係数が増加せず、危険側評価を与える例も示されている⁸⁾。このような場合は、剛壁型装置の方が原位置に近い状況を再現できると考えられる。

試験装置のほか、試験条件もクリティカルであり、供試体のサイズ、セル圧・拘束圧、初期飽和の方法、動水勾配、試験継続時間等を注意して決定する必要がある。供試体寸法については、現地採取したサンプルの場合、直径 30 cm 以上あれば品質の空間的ばらつきを考慮しうるとされて

いる⁹⁾。セル圧や拘束圧は、現地の条件等を考慮して設定すればよいと考えられる。動水勾配については、ASTMでは標準締固めモールドサイズの供試体で動水勾配30以下としており、これは供試体上下の有効応力の差を34 kPa以下にすることと等価である。よって、GCLのように薄い材料では動水勾配を大きくしても差し支えないことが示されているが¹⁰⁾、このことは必ずしも、現地の層厚を無視して、薄い供試体に大きな動水勾配をかけてもよいということではない。GCLのように1~2 cm程度の厚さの材料であればその厚さで実験して良いが、締固め粘土ライナーのように現場で50~100 cm程度の厚さで用いられるものを、実験室では1~2 cmレベルの厚さの供試体で実験して良いということではない。厚い遮水層は、ある程度の厚さのある供試体で実験すべきである。

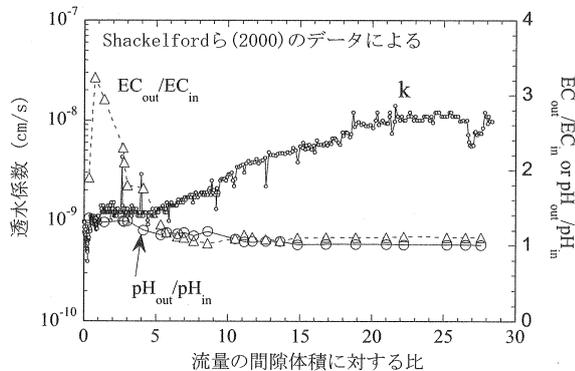


図-5 0.012 M CaCl₂ 溶液に対する GCL の透水試験結果¹⁰⁾

試験終了のための判断条件として ASTM 規格では、(1) 流入量と流出量がほぼ等しくなること (比が 25%以内)、(2) 透水係数値が安定すること (計測値 4 回以上について 25~50%以内の変動) とされている。さらに、廃棄物浸出水など物理化学的・化学的影響の考慮が必要な場合には、(3) 供試体の間隙の体積の 2 倍の流出量を得ること、(4) 流出量と流入水の化学特性がほぼ等しくなること、等により、化学物質と粘土との反応のやり取りが充分に進んだことを保証する必要がある。図-5 は、GCL に低濃度の CaCl₂ 溶液を透水させた場合の実験結果である。間隙体積の 5 倍分の流出量を得るまでは透水係数は 1×10^{-9} cm/s で落ち着いている。ここまでで試験時間は 1 年を要したが、実はまだ流出水と流入水の電気伝導度は等しくなっていない。試験開始後 1 年経過して流出量が間隙体積の 5 倍を超えたところで漸く電気伝導度は等しくなり、同時に透水係数が増加し始めた。したがって、化学物質と粘土との反応のやり取りを充分に進ませること、すなわち化学平衡を確保することは正しい透水係数値を把握する上で重要であるだけでなく、非常に時間がかかるものである。このような長

期の試験を個別の設計目的で実施することは非現実的であり、各機関で行われている試験結果の集約化と有効活用が求められる。GCL については、このような長期の透水試験がいくつかの機関によって行われており、データも報告されている^{11), 12)}。次節では著者らの報告データを中心に紹介する。

以上のように、透水試験の実施にあたっては、各方法、試験条件の長所短所・特徴を理解した上で試験装置や条件を選択・決定するとともに、既往のデータを有効に活用・参照することが推奨される。

3.2 粘土ライナーの遮水性評価の例

前節で述べたように、粘土ライナーの透水試験には長時間を要するため、個別の設計目的で実験を実施することは非現実的な場合がある。著者らは粘土ライナーの様々な化学物質溶液に対する透水試験を実施しており¹¹⁾、その一例を以下に紹介する。

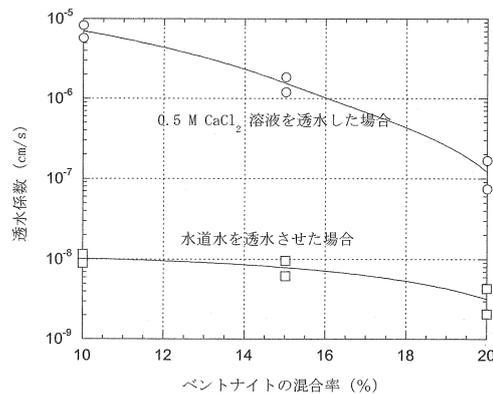


図-6 ベントナイト混合土の透水係数¹³⁾

透水試験は通常、水 (蒸留水、脱イオン水) を用いて行うことが多い。一方、粘土ライナーは実際には廃棄物浸出水に対してのバリア性能が期待されている。廃棄物浸出水には様々な化学物質が含まれるが、粘土ライナーの透水係数は透水溶液に含まれる化学物質の種類や量によって影響を受ける。図-6 は、ベントナイト混合土の透水試験を水道水と塩化カルシウム溶液を用いて行った場合の結果の例¹³⁾であり、同じベントナイト混合土供試体であっても、塩化カルシウム溶液を流した場合は透水係数が 2~3 オーダー増加している。この化学的影響のメカニズムとしては、(1) 酸などによって粘土粒子が溶解し、透水係数が増加する、(2) 粘土粒子表面には拡散電気二重層が形成され、透水に寄与する間隙体積を相対的に小さくしているが、化学物質の存在により形成される拡散電気二重層の厚さが薄くなり、透水に寄与する間隙が大きくなって透水係数が増加する、(3) ベントナイトを用いる場合は、スメクタイト

にみられるオスモティック膨潤（層間膨潤）が難透水性をもたらすが、化学物質の存在によってオスモティック膨潤が阻害される、等がある。

図-7は、図-2に示したうちニードルパンチ補強を施したGCLの透水試験を行った結果で、膨潤試験との関係で示している。約40種類の異なる溶液（廃棄物浸出水あるいは化学物質溶液）を透水溶液とし、図-5に示したような化学平衡も達成させているため、実験ケースによっては3年近くの間試験期間となった。図-7に示すように透水係数の値は、純水レベルの 10^{-9} cm/sのオーダーから、化学物質の影響を受けて透水係数が増大し 10^{-5} cm/sのオーダーまでバラエティーに富んでいる。y軸に示した透水係数を求めるには長期間を要するが、x軸に示した膨潤試験は100 mLの溶液に2gの乾燥した粘土粒子を入れて膨潤量をみるもので、2日で終了する。図-7に示すように透水係数と膨潤量には明瞭な相関関係があり、この関係を用いれば透水試験を実施しなくても膨潤試験のみによって透水係数を予測できる可能性が示唆される。

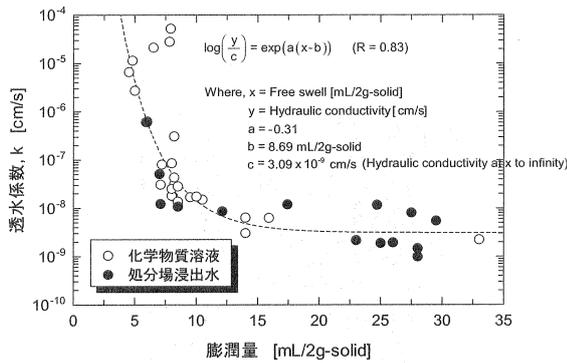


図-7 各種化学物質溶液ならびに廃棄物浸出水に対する粘土ライナー（GCL）の透水試験結果の例¹¹⁾

前節では、透水試験の実施にあたっては動水勾配や拘束圧などの実験条件の設定が重要であることを記した。図-7に示した結果は拘束圧（セル圧）29.4 kPaという比較的低いセル圧で実験を行ったものだが、粘土ライナーを処分場に用いる場合、埋め立てられた廃棄物の荷重の上載圧の影響が遮水性にプラス側に作用することが期待される。図-8は柔壁型試験装置ではなく、圧密試験装置を改良してGCL供試体に透水試験を行った結果を示したもので、上載圧は29.4 kPaから314 kPaまで設定した。透水溶液は6種類である。図から明らかなように、29.4 kPaのように上載圧が小さい場合は透水係数は 10^{-7} ~ 10^{-8} cm/sのオーダーまで増加しているが、314 kPaの場合は透水係数は 1×10^{-9} cm/s程度である。上載圧が大きいと透水係数が低く抑えられるだけでなく、溶液の違いによる透水係数値のばらつきも抑え

られている。したがって、処分場の構造上、底部ライナーに上載圧が作用する場合には、その効果をプラス側に考えることができそうである。

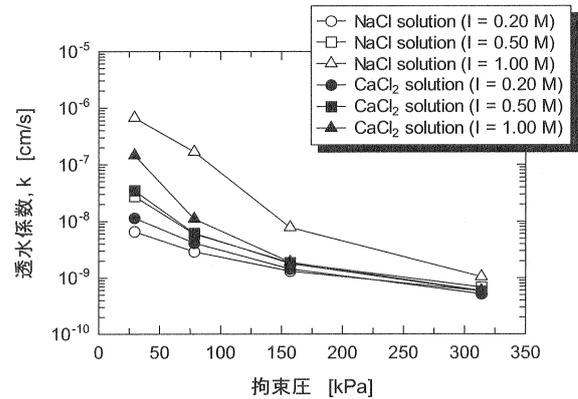


図-8 上載荷重を与えたときの粘土ライナー（GCL）の透水試験結果の例¹⁴⁾

表-2 土中における重金属の希釈効果の分類¹⁵⁾

分類	機構	対象となる重金属類
物理的効果	ろ過	Cr(III), Hg
	分散	Cr(III), Pb, Hg, Cu, Zn, Cd
	希釈	Cr(III), Cu, Zn, Cd
	揮発	Hg
物理化学的効果	吸着	Pb, Hg, Cu, Zn, Cd
	凝固	Pb, Cu, Zn
化学的効果	沈殿	Cr(III), Pb, Hg, Zn
	加水分解	Cr(III), Pb, Cu, Zn, Cd
	錯体化	Cu, Cd
	酸化	Cr(III), Hg, Cu
	還元	Cr(III), Hg, Cu, Zn
生物学的効果	細菌反応	Zn
	細胞への吸収	Cr(III), Hg

上載圧以外にも、現場における様々な状況を考慮した研究がなされている。例えば、プレハイドレーションの影響、廃棄物の分解に伴い発生する熱の影響などである。プレハイドレーションとは、図-6や7の結果は粘土ライナーに化学物質溶液をいきなり透水させているが、化学物質溶液を流す前に純水を流しておけば粘土はあらかじめ膨潤し、その後で化学物質溶液に暴露されても低い透水係数が保たれる可能性がある。このように、浸出水や化学物質溶液に暴露される前に純水で透水させて粘土をあらかじめ膨潤させることをプレハイドレーションという。プレハイドレーションしていれば、化学物質溶液が流れてきても透水係数は低いまま保たれると期待されるが、それがどれくらい低いかということはケースバイケースであり、体系的な研究も実施されている¹⁵⁾。

ここまでの議論ではあくまでも「透水係数」を指標にしているが、実際に「バリア」しなければならないのは水ではなくて有害物質である。化学物質の挙動を予測・把握するには透水係数の評価のみでは不十分であり、粘土と化学物質との間で発揮される物理的、物理化学的、化学的、生化学的効果を把握しておくことも必要である。表-2はこれらの効果を重金属類に対してまとめた例である。表-2に示した機構・メカニズムは、粘土ライナーの設計に直接反映できるわけではないが、現地にて生じうる現象を予測し、土壌・地下水汚染を効果的に防止する上で重要なものである。

4. 廃棄物処分場の運用と跡地利用

処分場の運用にあたっては、限られた処分場のスペースを有効に活用すべく効率的かつ安全に廃棄物を受け入れること、廃棄物の受け入れを終了した処分場跡地の土地資源としての付加価値化に配慮することが重要である。

「遮水」の点で有利な粘土層も、「変形」や「強度・支持力不足」の点で問題を生じる原因となりうるが、これは特に海底粘土層を遮水層とする海面処分場で顕著である。このような問題への対処として、跡地利用における基礎杭の打設の問題が挙げられる。

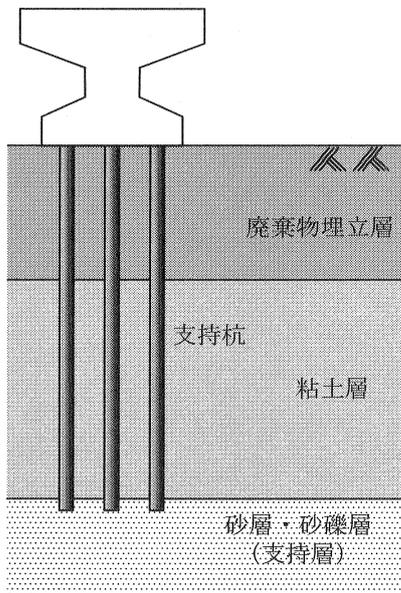
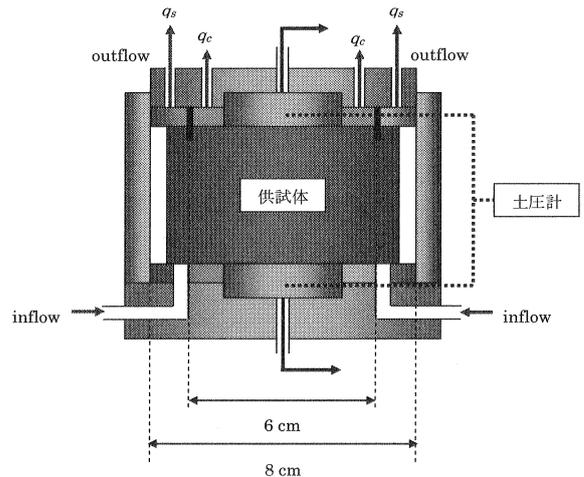


図-9 廃棄物処分場における基礎杭の打設

海面処分場は、廃棄物によって海に新しく土地という空間資源を創出するものである。したがって、廃棄物の受け入れが終了した海面処分場では、積極的な跡地利用が期待される。跡地利用にあたっては交通施設をはじめとするイ

ンフラストラクチャーを整備しなければならない。廃棄物地盤における構造物の建設は、昨今の大きな技術課題となっている。埋立地に重要構造物・施設をつくる際には、地盤の強度不足への対応も重要な課題となる。廃棄物層は種々雑多なもので埋め立てられていることが多く、土質パラメータを求め、支持力を評価するのが難しい。東畑ら¹⁷⁾は海面処分場からサンプリングした廃棄物試料について体系的な実験を行い、土質パラメータの取得に努めている。しかし、分解性の廃棄物が主体である場合は、廃棄物の分解・経年変化によって支持特性が劣化し、支持層としては期待しえない。また、廃棄物層の下にある天然の粘土層は通常は遮水層としての機能が期待されているが、一般に軟弱であり支持層としては期待できない場合が多い。したがって、図-9に示すように粘土層の下にある支持層に到達する杭基礎を打設して、構造物を支える必要が生じてくる。ところが支持杭を施工する場合、遮水層である粘土層に杭が穴を開けてしまうことが懸念事項として指摘され、杭と粘土の密着性に関する研究が行われている¹⁸⁻²³⁾。



(供試体の上下面はろ紙で覆う)

図-10 金属-粘土間の界面透水を計測する試験装置¹⁸⁾

例えば嘉門ら¹⁸⁾は図-10に示すような実験装置を用いて、杭に見立てた金属壁と粘土の界面の摩擦と漏水量を計測する手法を提案している。実験装置は粘土供試体の上載圧を載荷させながら透水を行うもので、2つの特徴を持っている。1つは供試体の上下面に土圧計を設けており、2つの土圧計から測定される値の差が、粘土と金属との間で生じるフリクションとして算定される。もう1つは、上面の流出水を供試体の外側と内側とで分離して測定することにより、内側流出量からは界面の影響を受けない粘土正味の透水係数を算出でき、外側流出量からは粘土中の透水と界面漏水とを計測する。この研究では次式により界面透水

量係数 K_L (m^2/s) を定義して、界面漏水量の指標を提案している。

$$Q_{in} = \left(\frac{\pi D^2}{4} k_c + \pi D \cdot K_L \right) \cdot i \quad (1)$$

Q_{in} : 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)

この式は、供試体に流入した流量 Q_{in} 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漏水量」の合計であるとして、界面透水量係数 K_L (m^2/s) を求めるものである。

実験結果によると、過圧密の粘土に杭を打設して、その結果粘土と杭に隙間ができた場合は粘土と杭の密着性の確保は難しいが、粘土が正規圧密状態であれば、打設された杭と粘土の間の密着性は充分にはかられ、杭—粘土境界面の漏水は無視しうる傾向があることが示されている。また、提案した指標 K_L の値は、上記の正規圧密領域では $1 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-10} m^2/s$ の範囲にあった。これは漏水量に換算すると、 $10^{-8} \sim 10^{-10} cm/s$ オーダーの透水係数の粘土層と等価であり、粘土ライナーの遮水構造基準（層厚 5 m 以上で透水係数 $1 \times 10^{-5} cm/s$ 以下）に比べて十分に低い。

その他の研究例はそれぞれアプローチは異なるが、杭と粘土の密着性は確保されるであろうという結論が概ね導かれている^{19~22)}。Amatya ら¹⁹⁾、長澤ら²⁰⁾、菊池ら²¹⁾は、いずれも室内実験によって杭と粘土間の界面漏水特性を検討しているが、特に Amatya ら¹⁹⁾の研究は遠心力载荷実験装置を用いたところに特徴があり、杭の水平方向移動など様々な実験条件でのモデル試験を行っている。長澤ら²⁰⁾は、杭の表面処理などの効果を多くの実験ケースによって詳細に調べている。外国ではイタリアで類似の研究プロジェクトが進められており、Manassero ら²²⁾がトレーサーを用いた現地試験施工・モニタリングの結果を報告している。このような研究に基づいて、海面処分場における基礎杭の打設が遮水の面からも許容できることがより明確になれば、処分場の跡地利用に大きな可能性が広がるものである。東京港の処分場跡地では鋼管杭の打設が実際に行われている。

5. おわりに—今後の展開

「処分場の遮水技術」というテーマで、特に粘土系遮水材についての評価の方法、廃棄物処分場跡地利用に関連し

た杭打設の問題などを述べた。環境中に有害物質は無いにこしたことはない。しかし、廃棄物の発生量をゼロにすることや、環境中に拡散してしまった有害物質を全て集めることなどが現実的な方法とは考えられない。したがって、「遮水技術」が有害物質の移動を制御する技術としてその地位を高めていくものと期待される。特に、本文では述べなかったが土壌・地下水汚染サイトや不適正処分場、不法投棄現場などの対応策として、遮水壁の適用がもっと注目されてくるものと考えられる²⁴⁾。そのためには、遮水層、遮水壁の品質管理の問題などの解決が図られる必要があると考えている。

謝辞

本論文の作成にあたっては、研究室の嘉門雅史教授をはじめとする多くの方々とのディスカッションによるところが大きい。それでも内容の不十分な点は筆者の力不足・認識不足による。多くの方々からのご意見を頂ければ幸いです。

参考文献

- 1) USEPA: *Assessment and Recommendations for Improving the Performance of Waste Containment Systems (CR-821448-01-0)*, 2002.
- 2) Edil, T.B.: *Environmental geotechnics for sustainability and environmental protection*, 地盤工学会国際部特別講演会, 2007.
- 3) Park, J.K., Sakti, J.P., and Hoopes, J.A.: *Transport of aqueous organic compounds in thermoplastic geomembranes*, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol.122, No.9, pp.807-813, 1996.
- 4) 勝見 武・C.H. Benson・G.J. Foote・嘉門雅史：廃棄物処分場遮水ライナーの性能評価について，*廃棄物学会誌*，Vol.10, No.1, pp.75-85, 1999.
- 5) 勝見 武・嘉門雅史：粘土ライナーの透水試験と遮水性能の評価について，*土と基礎*，Vol.51, No.8, pp.23-24, 2003.
- 6) 勝見 武・渡部允人・住永 巖・深川良一：連続地中壁に適用されるソイルセメントの遮水性能と配合条件，*材料*，Vol.51, No.1, pp.19-24, 2002.
- 7) Bowders, J.J., Neupane, D., and Loehr, J.E.: *Sidewall leakage in hydraulic conductivity testing of asphalt concrete specimens*, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.25, No.2, pp.210-214, 2002.
- 8) Bowders, J.J. and Daniel, D.E.: *Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals*, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.113, No.12, pp.1432-1448, 1987.
- 9) Benson, C.H.: *Liners and covers for waste containment, Creation of New Geo-Environment, Fourth Kansai International Geotechnical Forum*, JGS Kansai Branch, pp.1-40, 2000.

- 10) Shackelford, C.D., Benson, C.H., Katsumi, T., Edil, T.B., and Lin, L.: Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquid, *Geotextiles and Geomembranes*, Elsevier, Vol.18, Nos.2-3, pp.133-161, 2000.
- 11) Katsumi, T., Ishimori, H., Ogawa, A., Yoshikawa, K., Hanamoto, K., and Fukagawa, R.: Hydraulic conductivity of nonprehydrated geosynthetic clay liners permeated with inorganic solutions and waste leachates, *Soils and Foundations*, JGS, Vol.47, No.1, pp.79-96, 2007.
- 12) Jo, H.Y., Benson, C.H., Shackelford, C.D., Lee, J.-M., and Edil, T.B.: Long-term hydraulic conductivity of a geosynthetic clay liner permeated with inorganic salt solutions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.4, pp.405-417, 2005.
- 13) Stern, R.T. and Shackelford, C.D.: Permeation of sand-processed clay mixtures with calcium chloride solutions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.3, pp.231-241, 1998.
- 14) 勝見 武・石森洋行・深川良一：ジオシンセティッククレイライナーの遮水性能に及ぼす諸要因，ジオシンセティックス論文集，第21巻，pp.307-314, 2006.
- 15) Lee, J.M. and Shackelford, C.D.: Concentration dependency of the prehydration effect for a geosynthetic clay liner, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.4, pp.27-41, 2005.
- 16) Kamon, M., Zhang, H., Katsumi, T., and Inui, T.: Biochemical effects on the long-term mobility of heavy metals in marine clay at coastal landfill sites, *Journal of ASTM International*, Vol.3, No.7, Paper ID JA113326, 2006.
- 17) 東畑郁生・鶴野雅明：都市一般廃棄物処分場跡地の空間リサイクル資源化，第21回環境工学連合講演会講演論文集，pp.1-8, 2007.
- 18) 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，Vol.54, No.11, pp.1100-1104, 2005.
- 19) Amatya, B.L., Takemura, J., Ruhull Amin Khan, M., Kusakabe, O.: Centrifuge tests to evaluate effects of pile construction on post closure landfill sites with geological barrier, *5ICEG Environmental Geotechnics*, H.R. Thomas (ed.), Thomas Telford Publishing, London, UK, pp.353-360, 2006.
- 20) 長澤 信・平尾隆行・鳶川 徹・森脇武夫・尾崎則篤・佐々木康：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（その2），第39回地盤工学研究発表会，pp.1183-1184, 2004.
- 21) 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発表論文集，地盤工学会，pp.217-224, 2005.
- 22) Manassero, M., Dominijanni, A., Artico, G., and Biral, L.: Field evaluation of the risk of cross contamination through a natural barrier due to foundation pile construction, *GEE07 - Seventh Japanese-Korean-French Seminar on Geo-Environmental Engineering*, pp.311-318, 2007.
- 23) 富士暁之・勝見 武・嘉門雅史・乾 徹：改良型透水試験装置を用いた鋼管杭-粘土境界面における透水量の評価，第7回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.281-286, 2007.
- 24) 勝見 武：廃棄物処分の適正化と地盤工学，土と基礎，地盤工学会，Vol.53, No.7, pp.1-4, 2005.

(2007年6月29日 受付)