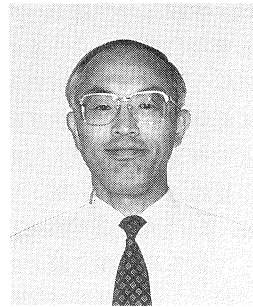


環境地盤工学と廃棄物問題

Environmental Geotechnics and Waste Problems

嘉 門 雅 史* (Masashi Kamon)



環境地盤工学は新しい学問分野として、その確立が要望されている。ここでは環境地盤工学の範囲と分類を解説するとともに、中心的なテーマである廃棄物問題について、廃棄物埋立地盤における地盤工学的課題と、地盤環境の汚染問題とについて詳述した。まず廃棄物埋立地盤については、生ごみ埋立地盤・焼却灰埋立地盤・石炭灰埋立地盤・建設発生土埋立地盤等についての知見を整理した。中間処理を施すことによって、廃棄物を処分対象でなく、埋立用土として貴重な材料とみなしうることを示した。更に、廃棄物の有害性に起因する地盤汚染が生じていることを指摘し、現在開発が進みつつある地盤汚染対策工法・汚染浄化工法をとりまとめた。

キーワード：廃棄物、地盤汚染、埋立、環境、（IGS：B-12）

1. はじめに

近年は地球規模の環境問題が重要な課題となっており、我々が生を営む地球そのものが著しく病みつつあることが一般の人々にも認識されつつある。かけがえのない地球が今ほどその存在の危機に立ち至ったことは、かつて無かったといえるであろう。地球環境が侵されつつあるということが重要視されだした時期として、1972年のストックホルムでの国連人間環境会議をその嚆矢とすることができる。そこでは大気汚染に起因する酸性雨によるヨーロッパ各地の森林の枯死や、湖沼からの魚類の消滅等が取り上げられ、広域的な汚染の実態や対策が議論された。東西の超大国間の冷戦構造が1991年に終結したことによって、国際連合を中心とした新しい世界秩序が実質的に機能しつつあるが、地球環境問題についても国連を中心に世界中の人々が一致協力した体制作りが始まっている。1992年のリオデジャネイロでの国連環境会議ではアジェンダ21をはじめ、地球環境保全のための各種の行動計画が提案され、日本でも各方面からの積極的な取り組みがなされつつある。元来、わが国では1960年代から各種の公害問題、へどろ

汚染問題等が大きな課題であったことから、環境問題には早くから研究開発・対策がなされてきた。しかし、この時点ではあくまでローカルな課題に過ぎないものであった。しかるに今日それらは世界規模の広がりを見せ、母なる大地である地球を蝕んでいる。ギリシャ神話の全能の神ゼウスの母親である大地の神ガイアに地球をたとえて、ガイアの救済に全力を挙げことが求められている。

地球環境問題とは一般に以下の9つの課題に集約される。

- (1) オゾン層の破壊
- (2) 地球の温暖化
- (3) 酸性雨
- (4) 熱帯林の減少
- (5) 砂漠化
- (6) 開発途上国の公害問題
- (7) 野生生物種の減少
- (8) 海洋汚染
- (9) 有害廃棄物の越境移動

これらの問題は相互に密接に関連しあい、政治・経済・社会・文化的問題を含んでおり、かつ現象に対する科学的解析が難しいテーマでもある。例

* 京都大学防災研究所教授

えば、砂漠化の問題を一つとってしても、地盤工学と密接に関連し合うものであるが、地球の温暖化に伴う降水パターンの変化・世界低緯度帯の森林の弱体化・住民の生活様式や現地産業と植林事業との対立・過度の人口増加等が絡んでいる。現在、乾燥地の著しい拡大をきたしており、表土の流亡・耕作地の消失等地球表層地盤への直接問題として緊急の重要課題である。

このように地球環境問題の解明と対策には多くの学問分野の集積が求められる。翻って、我が土質工学の分野では、これまで地球環境問題は直接地盤に影響するものが少ないとして、やや傍観者的立場に終始してきたきらいがあった。しかしながら、土質工学の分野で蓄積された技術成果でもって、多くの地球環境問題解決に貢献しうるものが少なくなく、かつそうすることが責務となりつつある。グローバルな地球環境問題であっても、その解決の手段・手法はローカルに対応していくことが大切であり、"Think globally, act locally." をモットーに活動を広めることが肝要である¹⁾。

2. 環境地盤工学の視点

2.1 環境地盤工学の定義

近年、環境問題に対する意識の向上に基づいて「環境地盤工学」という学問分野の構築が図られている。国際的にもアクティブな活動がなされており、図-1に示すような地盤微生物圏を中心にした地圏・水圏・気圏・生物圏の境界分野における地盤工学、これを環境地盤工学と呼んでいる。そのための学問分野は、広く従来分野を横断的に結び付けた図-2のような相関が考えられる。地球環

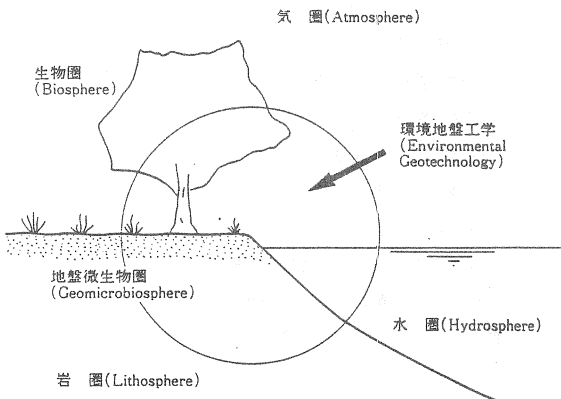


図-1 環境地盤工学の対象領域

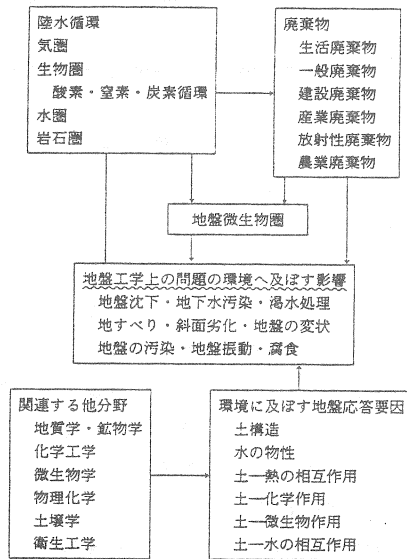


図-2 環境地盤工学と従来の学問分野の関連

境問題として近年取り上げられている、人間活動の結果としてのグローバルな課題、すなわち温暖化・酸性雨・砂漠化等の問題に対して、地盤環境問題としての廃棄物処理・処分は個々のローカルな課題であるが、図では廃棄物との関連で取りまとめているように、その量が膨大であることと、周辺へ及ぼす影響の甚大さから重大な地球環境問題の一つに数えられる。地盤工学の分野では、従来廃棄物に関する取扱はきわめて少ないものであったが、廃棄物埋立の結果として得られる地盤の跡地利用の観点から今後は積極的に関与すべきテーマである。環境に及ぼす地盤応答として、土と物理・化学・生物その他の要因との相互作用の把握が必要であり、優れて総合科学の学問と言えるだろう。

2.2 環境地盤工学の分類

地球環境問題のキーワードとして「持続可能な開発」; "Sustainable Development" が広く使われており、これは1982年の国連東京会議以来のものである。環境地盤工学でもこの持続可能な開発を基本的な立場としなければならない。したがって、地盤環境工学が対象とする分野として、よりよい環境づくりのために地盤工学がどのように貢献しうるかを第1の目標とし、第2に各種の人間活動が環境に悪影響を及ぼさないように、かつ修復す

表-1 環境地盤工学の分類

環境地盤工学の種類	内 容 区 分	対 象 の 例
積極的な環境創造のための工学	地盤環境の全体システムの良化を目指した開発	リゾート空間の創造 神戸方式（山、海へ行く）
人間行為による環境の危険の防止のための工学	行為に伴う周辺への影響防止	地盤沈下 地下水汚染 湧水処理 地すべり 斜面劣化 地盤の変状 地盤の汚染 地盤振動
	廃棄物の処理・処分と高度利用ならびに環境汚染地域の修復	一般廃棄物・産業廃棄物の埋立処分 有害物質の固化・溶融 微生物処理 泥水処理・地下水処理 地中処分・地下保管
自然災害による人間生活の危険の防止のための工学	防災工学の分野	洪水 地すべり 土石流 地震 沈下 火山災害

るための地盤工学，第3に自然営力に基づく各種の災害の防止のための地盤工学という，表-1にまとめるような3つのターゲットが中心となる¹⁾。

ここでは，環境地盤工学の原点を明確にすることを念頭にして，廃棄物問題と地盤環境汚染問題とに重点を置いて，現状と対策及び将来の課題等を示すものである。

3. 廃棄物問題の現状と廃棄物最終処分場の構造基準

産業・社会構造の変遷に伴って，廃棄物処理・処分の必要性が飛躍的に増大し，最終的には廃棄物の多くを地盤内に受け入れざるを得ないことから，その安全性・安定性に関する地盤工学的考察が必須となっている。しかし，新しい土地造成のための埋立の実施に際して，環境保全の見地から山土を安易に掘削取得することが難しくなりつつある現状のもと，廃棄物も見方を変えればきわめて重要な埋立用材でもある。したがって，大都市部における土地需要に対する緊急の要請から，廃棄物によって埋め立てられた地盤を早期に安定化

するための地盤改良技術の開発と跡地利用の方策が地盤工学上の大きな課題となっている。有害な浸出水の漏出防止や悪臭ガス・爆発性ガスの発生対策などが廃棄物埋立地盤の跡地利用の前提条件となっている。

人間活動に伴って排出される物質は，有効利用される副産物と利用されない廃棄物とに区分される。さらに廃棄物は図-3のように，一般廃棄物と

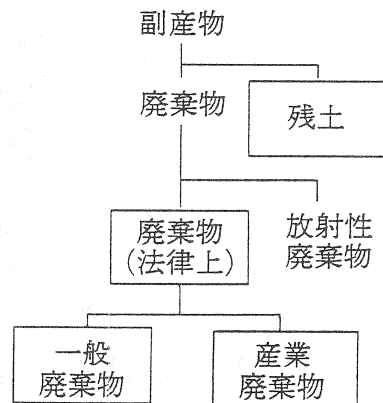


図-3 廃棄物の法的分類

産業廃棄物とに大別される。廃棄物排出量は、一般廃棄物が平成元年に5000万tに達し、産業廃棄物は約3億7000万tと推定される。わが国の廃棄物処理は「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」

(廃棄物処理法と略される)に基づいて実施される。廃棄物処理法では家庭から出るごみやし尿、事務所から出る紙ごみ等の一般廃棄物と、事業活動に伴うもので特定の種類の産業廃棄物とに区分され、更に、平成4年度から特別管理廃棄物として毒性・感染性・爆発性等から、より健康や生活環境に影響の与える恐れのある廃棄物の処理に関する規制強化が図られている。

なお、放射性廃棄物はきわめて重要な地盤工学上の処分問題を有しているが、取り扱いが特殊であることから廃棄物処理法上では除外されている。

このような廃棄物の処理施設の設置は年々困難となっており、廃棄物処理施設整備緊急措置法に

よって平成2年度までの第6次5か年計画に引き続き、平成3年度から第7次5か年計画が総額2兆8300億円規模で進行中である。しかしながら最終処分場の残余容量は、現在のところ一般廃棄物で8年分、産業廃棄物で1.5年分とされている²⁾。一般廃棄物は管理型処分場に処分され、産業廃棄物は安定型・管理型・遮断型の処分場に処分される。このような3種類の最終処分場の特徴は表一2のとおりである。処分場の分類の中では管理型が最も多い。浸出水の存在を前提とする管理型の処分場での遮断工法の現状は必ずしも十分なものとはいえず、粘土層があればそれだけで遮断効果が得られるとしている。また降雨の表面流出は処分の対象としているが、表面からの流入についてはほとんど考慮外となっているし、発生ガスについての対策にも特別の基準が無い等、従来の遮断工法は地盤工学的にみて多くの問題を有している。処分場を埋

表一2 廃棄物最終処分場の特徴

記号	最終処理場の種類	個 別 の 種 類
ア	遮断型処分場	(1) 埋立地の周囲には、地表水が埋立地の開口部から流入するのを防止することができる開渠その他の設備が設けられていること。 (2) 外周仕切り設備は、産業廃棄物投入のための開口部を除き、次の要件を備えていること。ただし、これと同等以上の効力を有する岩盤等がある部分については、外周仕切り設備は必要でない。 (ア) JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) により測定した一軸圧縮強度が 250kgf/cm² 以上のコンクリートで造られ、かつ 15cm以上の厚さであること。ほかの材料による場合は、これと同等以上の遮断効力を有すること。 (イ) 自重、土圧、水圧、波力、地震力等に対して構造耐力上安全であること。 (ウ) 埋め立てる産業廃棄物、地表水、地下水および土壌の性状に応じた有効な腐食防止が講じられていること。 (3) 内部仕切り設備は、次の要件を備え、一区画の面積がおおむね 50m² 以下、または埋立容量がおおむね 250m³ 以下になるように区画すること。 (ア) 一軸圧縮強度が 250kgf/cm² 以上のコンクリートで造られ、かつ 10cm 以上の厚さであること。ほかの材料による場合はこれと同等以上の遮断効力を有すること。 (イ) 自重、土圧、水圧、波力、地震力等に対して構造耐力上安全であること。 (ウ) 埋め立てる産業廃棄物、地表水、地下水および土壌の性状に応じた有効な腐食防止対策が講じられていること。
イ	安定型処理場 (3千m ² 以上のもの)	擁壁等は、埋め立てる産業廃棄物の流出を防止することができ、次の要件を抑えていること。 (ア) 自重、土圧、水圧、波力、地震力等に対して構造耐力上安全であること。 (イ) 埋め立てる産業廃棄物、地表水、地下水および土壌の性状に応じた有効な腐食防止措置が講じられていること。
ウ	管理型処理場 (1千m ² 以上のもの)	(1) 擁壁等は、埋め立てる産業廃棄物の流出を防止することができ、次の要件を備えていること。 (ア) 自重、土圧、水圧、波力、地震力等に対して構造耐力上安全であること。 (イ) 埋め立てる産業廃棄物、地表水、地下水および土壌の性状に応じた有効な腐食防止対策が講じられていること。 (2) 埋立地からの浸出液による公共の水域および地下水の汚染を防止するため、次に掲げる水域汚染防止措置が講じられていること。ただし、水域汚染防止措置を講じた産業廃棄物のみを埋め立てる埋立地については、水域汚染防止措置は必要ない。 (ア) 産業廃棄物投入のための開口部および集水設備(水面埋立処分場においては排水設備)の部分を除き、保水等のある埋立地からの浸出を防止できる遮断工を設けること。ただし、遮断工と同等以上の効力がある不透水性の地層の部分については、遮断工は必要ない。 (イ) 保水等を有効に集めることができる堅固で耐久力を有する構造の集水設備(水面埋立処分場においては排水設備)を設けること。ただし雨水防止のための措置が講じられている埋立地(水面埋立処分場を除く)については集水設備は必要でない。 (ウ) 集水設備により集められた保水等(水面埋立処分場においては、排水設備により排出される保水等)にかかわる放流水の水質を「排水基準を定める総理府令第1条に規定する排水基準」に適合させることができる浸出液処理設備を設けること。この場合、放流水が 50m³/日以下であっても浸出液処理設備が必要である。ただし、これら保水等を貯留するための十分な容量の耐水構造の貯留槽が設けられ、かつ貯留された保水等が浸出液処理設備と同等以上の性能の水処理設備で処理される最終処分場においては、浸出液処理設備は必要でない。 (3) 埋立地の周囲には、地表水が埋立地の開口部から流入するのを防止することができる開渠その他の設備が設けられること。

(注) 最終処分場の種類は、令第7条第14号に掲げられている。

(ア) 「遮断型処分場」とは、有害な燃え殻、ばいじん、汚泥、鉱さい、13号廃棄物を埋立処分するものをいう。

(令第7条第14号イ)

(イ) 「安定型処分場」とは、廃プラスチック類、ゴムくず、金属くず、ガラスくずおよび陶磁器くず、建設廃材、環境庁長官および厚生大臣が指定する産業廃棄物を埋立処分するものをいう。(令第7条第14号ロ)

(ウ) 「管理型処分場」とは、廃油(タールピッチ類に限る)、紙くず、木くず、繊維くず、動植物性残渣、動物のふん尿、動物死体および無害な燃え殻、ばいじん、汚泥、鉱さい、13号廃棄物の埋立処分するものをいう。(令第7条第14号ハ)

め立てた後に有害な浸出水の域外への流出事故が生じた場合、その流出箇所の解明は電磁氣的測定法等の可能性が検討されているが現状ではほとんど不可能に近いし、このような処分場の修復等には莫大な時間と費用がかかるものである。厳格な環境保全が今後益々求められることになるであろう状況からみて、後述のような米国型の構造基準の策定が緊急に必要と考えられる³⁾。

4. 廃棄物埋立地盤の地盤工学的諸課題

廃棄物を中心とした各種の埋立材料の特性をまとめると表-3のようである。ここでは主として地盤としての特性と問題点について示しているが、一般の土砂材料との大きな差として、埋立中に材料分解が生じることである。これが地盤として廃棄物を利用する際の不安定性の原因であり、また周辺環境へ種々の影響について注意しなければな

らない³⁾。

廃棄物埋立地盤の跡地利用に際しては、対象とする埋立地を構成する廃棄物材料の現況と将来の変化の予測を行うことが肝要である。従来の土質工学における調査手法や設計手法をそのまま廃棄物埋立地盤に適用することには疑問があるが、構造物を設計するためには地盤定数の決定が不可欠である。廃棄物埋立地盤の設計に際して、埋立用護岸とその後の跡地利用における構造物建設に当たって検討すべき諸点は以下のとおりである。

- (1) 埋立護岸構造 ——— 周辺環境への影響の防止への配慮
- (2) 土地利用計画の策定 ——— 埋立前に埋立跡地利用計画の策定
- (3) 埋立地盤定数の決定 ——— 一般の地盤における土質定数と同様な手法の適用性
- (4) 構造物の基礎形式 ——— 杭基礎の適用の必

表-3 廃棄物を含む各種の埋立材料の特性

埋立材の種類	埋立地盤の工学的性質	単位体積質量 空中(水中) t/m ³	地 盤 性 状	問 題 点
良質土砂 がれき類 金属類 ガラス類 鉍滓類	良質土砂を主体とした混合物は一般に単位質量が大きく、締固めによる密度増大、透水性改良効果大である。	1.8 (1.0)	沈下や支持力に関しても十分安定な地盤を造成することができる。	安定な地盤を造成できるので、構造物の建設上問題は少ない。粗大がれき類の捨込みは地域を定めて行うことが必要である。
灰 焼却残渣 石炭ガラ	各工場より排出される灰類及び焼却場からの焼却残渣である。粒度は細砂から礫程度である。単位質量が小さく一部浮遊することもあるが、透水性は良い。	1.2 (0.4)	十分に締固めを行う事によって、安定な地盤を造成することができる。締固めが不足すれば流動化をきたす。	1. 締固め程度により、基礎地盤としての判定を行う必要がある。 2. 焼却残渣による水質汚濁がある。
不良土 浚渫粘土	高塑性無機質粘土であり締固性、透水性、強度など不良である。	1.45 (0.45)	沈下、強度とも不良であり、また圧密時間も非常に長く、不安定な地盤となる。1~2年放置後1m程度の覆土をすることにより、機材の搬入が可能である。	1. 軟弱土のみの場合施工時トラフィカリティーが悪く他の良質材と混合する必要がある。 2. 重量構造物に対しては沈下が著しいので、サドレーなどの地盤改良が必要である。
紙屑 屑 繊維屑 ワラ屑 合成樹脂屑 動物性残渣 植物性残渣 雑ゴミ	これらの廃棄物は一般に間隙が多く、単位質量小である。放置しておけば、次第に圧縮していくが、締固めは困難であることから、腐敗化によって断続的な沈下や水質汚濁を伴う。	1.0 (0.3)	完成後、最初の10年間は、腐敗による沈下が著しく、強度的にも不安定な地盤となる。また、構造物に対しては腐食を考えて設計を行う必要がある。	1. 跡地利用としては、緑地、公園、駐車場として計画できる。 2. 沈下安定後は軽量構造物程度の建設も可能である。 3. 発生ガスや浸出水などの対策を必要とする。

然性とその合理性の有無

(5) 設計支持力の推定 ——— N 値や載荷試験結果の適用性

(6) 施工管理 ——— 変形・沈下対策や発生ガス、浸出水の処理、腐食対策

上記の(1)及び(2)は、新規埋立時に必ず考慮すべき事項であり、(3)以降は既存の廃棄物埋立地盤の跡地利用に際しても適用しうる事項である。

最近では家庭からの生活廃棄物や下水汚泥などの産業廃棄物は、そのほとんどが焼却処分されるようになっており、廃棄物の減量化の点で飛躍的な向上がみられている。焼却に伴う重金属の浸出水中への溶出やダストの飛散の問題、ダイオキシンの発生等の課題が一方では生じているものの、総体として焼却灰は良好な地盤材料と言えるものである。さらに、産業廃棄物のうちでも最も多量に発生する汚泥や建設廃材などについても、このように前処理を施してなるべく良質な埋立材料にするため技術開発が今後の大きな課題である。廃棄物埋立における最終処分場の構造基準が明らかな現在、管理型・安定型のそれぞれについて将来の跡地利用を想定した形での埋立、すなわち受け入れる廃棄物の種別を明確にして各区分ごとの埋立の実施求められる。

埋立地盤に適用されるべき調査技術手法に関する検討も重要である。

(1) サンプルング手法 ―― 埋立地盤の条件によって適用性が異なる。不攪乱試料の採取のためにブロックサンプリングや固定式ダブルチューブサンプラー等が用いられる。

(2) 原位置試験手法 ―― 標準貫入試験，現場せん断試験，平板載荷試験等が用いられる。ばらつきの評価を適切に行うことが求められる。

(3) 地盤支持力の評価 ——— 不攪乱試料による室内試験結果と原位置試験結果とに基づいて、埋立地盤の支持力を決定する。さらに将来の長期沈下挙動の推定も重要でかつ難しい課題である。

(4) モニタリングシステム ----- 発生ガスや浸出水の処理は廃棄物埋立地の利用に際しての重要な課題である。構造物等へ腐食が生じたり、地下水の汚染などの悪影響を防止するために十分な管理が必要である。

廃棄物埋立地盤の跡地利用に際して、支持力が大きく、沈下量の少ない地盤への改良が求められる。

る。廃棄物埋立地盤の改良には強制圧縮タイプの地盤改良工法が有効であり、次のような従来工法を挙げることが出来る。

(1)置換え工法――良質の砂と入れ換える。
ただし、掘削除去した廃棄物の処分場を確保しなければならない。

(2) プレロード工法 ―― 廃棄物層厚の2倍程度の盛土荷重で圧密する。盛土中に80%程度圧密するが、粗大物が多い場合や層厚が大きい場合には効果が少ない。

(3) 重錘落下締固め工法 ―― 10~40 t の重錘を高さ10~30mから落下させて、このエネルギーで締固める。打設時のガス抜き効果が大い。

(4) サンドコンパクションパイル工法 ―― 締固めた砂杭を地盤中に打設して、埋立地盤を締固める。粗大物が多いと圧入が困難になる。

(5) その他の充填工法

騒音・振動があまり問題にならない地域では、

(3)の重錘落下締固め工法がよく用いられている。

5. 埋立材料としての廃棄物の特殊性

廃棄物を埋立材料とした場合の対処すべき課題として、構造物の腐食対策や浸出水の防止、ならびに発生するガス対策が重要である。

杭や構造物等に使用される鋼材やコンクリートは廃棄物中において化学的に劣化させられたり、腐食を生じたりする。鋼材の腐食対策としては電気防食や被覆によるものが中心となり、一方、コンクリートの劣化防止についても主として硫酸塩や酸性溶液からの隔離に努めることが求められる。

浸出水の対策として、粘土層やジオメンブレン等（ライナーと呼ばれる）による埋立処分場外への漏出防止が図られる。公有水面の埋立においては我が国の臨海部に一般的な沖積粘土層が有効な止水層とみなされ、従来は特別なライナーの設置

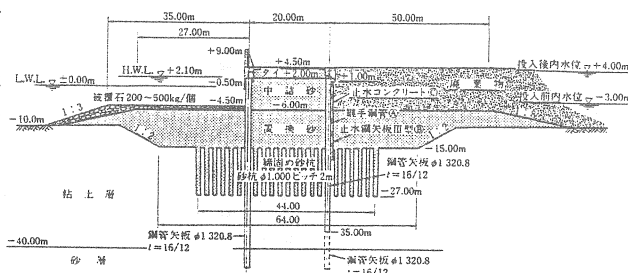


図-4 廃棄物埋立地盤の護岸構造の例

を省略することが多かった。しかしながら、護岸部分では置換え砂層周辺部において浸出水の漏出が避け得ないことから、図-4に示すような止水矢板が設計されるようになっていく。このようなライナー部の健全性のモニタリングは至難のことであり、さらに、たとえモニタリングが可能になったとしても、破損箇所の修復のための費用は莫大なるものである。したがって、安全性の点から多重のライナーシステムを採用して安全性と耐久性の確保に努める必要がある。

さらに、埋め立てられた廃棄物中に含まれる天然の有機物は、ごみ層内の微生物等によって分解され、安定する過程で様々なガスを発生する。好気性分解では二酸化炭素、水、アンモニア等であり、嫌気性分解では二酸化炭素、メタン、アンモニア等である。温度、水分、pH、酸素濃度、基質栄養バランス、阻害物質の有無等の環境条件に大きく影響を受け、ガス発生の特性が異なる。発生ガスの対策のために、ガス抜きパイプ・砕石ドレーンパイプ等が用いられ、閉鎖空間中にガスを滞留させないような配慮がとられている。

米国では廃棄物処分場としてダブルライナーシステムがEPA（環境保護庁）から義務付けられている。これは歴史的に見て、わが国が昭和40年代の公害問題対策の時代から廃棄物処理に対処してきたのに対して、米国での廃棄物対策が有害物質による人身事故の発生によって初めて取り組むことになったという、対応の根本的な遅れへの厳しい反省の上に立ったものであり、環境保全と環境修復への国を上げての取り組みの結果とも言

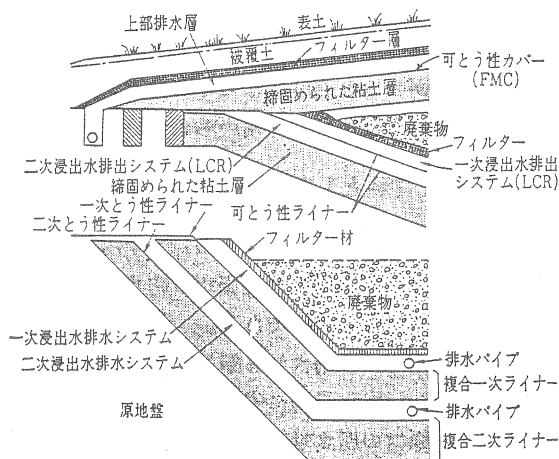


図-5 ダブルライナーシステムの例

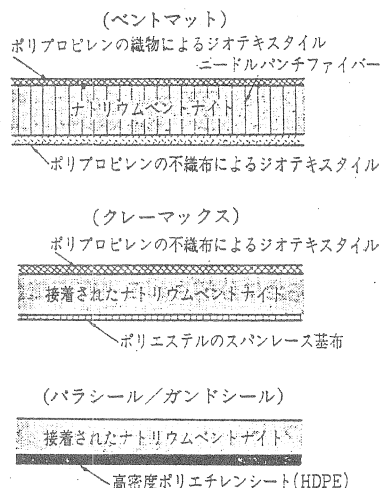


図-6 ジオシンセチック粘土ライナーの例

えるものである。図-5はダブルライナーシステムの例⁴⁾を示したものであり、処分場の表面被覆の仕方まで詳しく定めている。ダブルライナーとして少なくとも90cm厚さの粘土層上に一層の可とう性ライナー(FML)の敷設を求めている。FMLとしては一般に高密度ポリエチレン(HDPE)の使用が求められているが、もしそれが破断しても最低でも30年間は浸出水が管理区域外へ流失しない断面構造としている。浸出水への降雨の影響がきわめて大きいことから、図のように処分場の表面を完全にジオメンブレンで覆うことを標準としている。表面の被覆へ用いるジオメンブレンとしては、地表沈下への追従性から低密度ポリエチレン(LDPE)の効果が大きい。発生するガスは速やかに換気する構造となっていることにも留意する必要がある。

また、最近の材料としてベントナイトなどの粘土とジオテキスタイル材料とを合成したジオシンセチック粘土ライナーが開発されている。図-6にその例を3種類示した。このようなジオシンセチック粘土ライナーの透水係数は $10^{-9} \sim 10^{-10}$ cm/sであり、相互の重ね合わせ部分として75~150mmとすると十分な止水効果のあることが知られており、更に本体のジオメンブレンに25~75mmの直径の穴が開いた場合にも粘土ライナーによって止水することが可能であるという報告がなされている⁶⁾。

土中におけるジオメンブレンやジオテキスタイルの長期安定性に影響する要因として、化学的・生物的環境下での安定性、基礎地盤の不同沈下や

斜面安定による影響、材料そのものの耐久性や接合部の安定性等が考慮されねばならない。これらに関する統一的な試験方法や設計施工法・管理法等について今後の整備が必要であるが、少なくとも上述のような厳密な管理の行える廃棄物処分場の整備が求められるところである。

6. 廃棄物埋立地盤の特徴

6.1 ごみ埋立地盤の場合

廃棄物で埋め立てられた地盤の特性は、材料としての廃棄物特性に大きく左右される。したがって統一的な評価は極めて難しい。既存の廃棄物埋立地盤において一般的な生ごみによる埋立地盤特性について概要は以下の通りである⁷⁾。

大口径のボーリングコアサンプリングによって採取された、生ごみ埋立地盤の単位体積重量の測定結果では、埋め立てられたごみの多様性から、地盤定数のばらつきが極めて大きいものである。ごみ層の単位体積重量は $\gamma_t = 0.3 \sim 1.2 \text{ tf/m}^3$ の範囲に分布し、平均的には $0.7 \sim 1.0 \text{ tf/m}^3$ とみなされる。また原位置での支持力試験結果としてのN値の分布は廃棄物の組成に起因するばらつきが著しく、大きな建設廃材などに当たるとN値は極端に大きくなり、また時代とともに分解が進むとN値は小さくなる。図-7に平均N値の揭示変化を示した⁸⁾が、5～10年経過の埋立地盤のN値の減少量が著しく、安定化までには20年以上を要することがわかる。このように廃棄物が分解することによって土質工学的特性が劣化することは、特に留意しておく必要がある。

沈下特性としては、廃棄物の分解によって総量の約40%の圧縮沈下をきたす。廃棄物の圧密係数

は一般の沖積粘土の約1000倍以上であり、通常の盛土では載荷中に一次圧密が終了する。さらに、二次圧密係数($C_{\alpha\epsilon}$)は廃棄物の組成によって変化し、生ごみによる東京都港湾局15号埋立地の 10^{-2} 程度から、不燃物をも含んだ富山市埋立地の 10^{-3} 程度である。過圧密比(OCR)が2以上に及ぶプレロードを与えると、 10^{-4} のオーダーに低下する。

このような圧密特性から明らかなように、ごみ埋立地盤の改良には、バーチカルドレーンのような脱水による工法は全く無力であり、4章で述べたようにサンドコンパクションパイル工法、重錘落下締固め工法などの圧縮による工法の適用性が高い³⁾。

6.2 焼却灰埋立地盤の場合

一般廃棄物焼却灰と下水汚泥焼却灰との混合焼却灰の形で埋め立てられた場合⁹⁾の地盤特性は以下のようなものである。

焼却灰の物理的特性は廃棄物の種類や焼却炉の性能及び焼却温度によって大きく変化する。一般廃棄物焼却灰の比重は2.51～2.68、下水汚泥焼却灰では2.9であり、前者は通常の砂質土と比べほぼ同等か若干軽く、後者は重い。また、統一土質分類法によればそれぞれ「砂質土」と「細粒土」に分類され、どちらも粒度は良くない。焼却灰による埋立地盤の圧縮性は粒径の大きな夾雑物が荷重を受持ち、焼却灰そのものの圧縮性にはあまり影響されない。したがって、上載荷重による地盤の沈下は少なく、盛土等による地盤の強度増加はあまり期待できない。

海面埋立の場合には海上からの直投が一般的であり、試料投入から堆積までに細粒分と粗粒分が

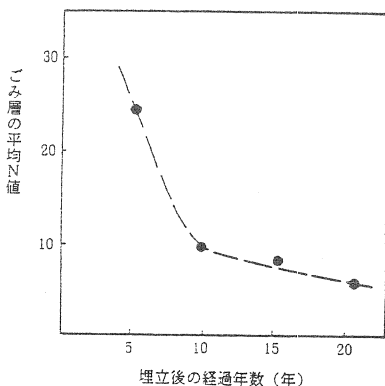


図-7 ごみ埋立地盤の平均N値の経時変化

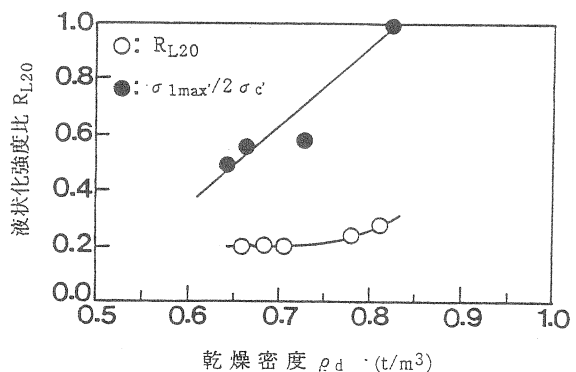


図-8 焼却灰の繰返し三軸試験結果の例

分離が見られることもあるが、その差は 0.15 t/m^3 程度と小さく、堆積時の密度は $1.1 \sim 1.5 \text{ t/m}^3$ と非常に緩い状態であることが多い。このような緩い地盤では地震時等に液状化を起こす危険性があるから、地震時の挙動を把握するため、動的特性を把握しておく必要がある。図-8は繰返し三軸試験結果の例であり、繰返し載荷回数 $N_c=20$ 回で、ひずみ両振幅 $DA=10\%$ に達するときの繰返し応力比を液状化強度比 $RL20$ として、乾燥密度 ρ_d との関係と、CIU試験から得られた応力比 $\sigma_{1\max}/2\sigma_c'$ と ρ_d の関係とを示している。焼却灰は繰返しせん断による体積収縮が非常に大きく、また液状化強度も小さいことから地震時の液状化対策を行う必要がある。

6.3 石炭灰埋立地盤の場合

石炭灰には炉の底に溜る炉底灰（クリンカーアッシュとも呼ぶ）、燃焼経路に溜るシンダーアッシュ、電気集塵機によって捕集されるフライアッシュの3種類があり、石炭火力発電所から全体の約80%の石炭灰が排出される。粒径は上記の順に小さくなり、クリンカーアッシュ、シンダーアッシュはその量も少なく、路盤材としての有効利用が図られている。量の多いフライアッシュについては、特性を活かしてコンクリート分野で有効利用されているものの、総排出量の約55%は埋立処分されている現状である。

石炭灰は組成の点からは活性シリカと呼ぶうるが、原材料である石炭の種類と焼却条件とによって、特性の変化が大きい。さらに、近年は環境対策上から燃焼温度を下げる傾向にあり、焼却後の灰中に NO_x や SO_x を多量に含む場合も見られている。アルカリ性の条件下で水に出会うと、反応を起こし、特にフライアッシュでは時間の経過に伴って徐々に固結する。この特性をうまく利用すると、石炭灰埋立地盤の有効利用の可能性は極めて高い。陸上部では乾燥した状態で埋め立てられるため、締固めを伴った盛り上げが可能である。しかしながら、臨海部に立地する石炭火力発電所での廃棄方式は大部分が水中埋立方式であり、石炭灰を無計画に埋め立てると灰の比重が小さいために、密度が $1.1 \sim 1.3$ 程度の低密度地盤となり、地震時の液状化の危険性が大きくなる。

石炭灰を臨海部において埋め立てる方法として

表-4 石炭灰の水中埋立方法

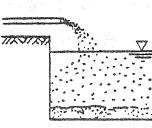
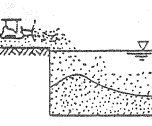
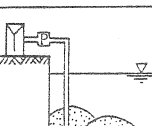
	埋立方法	埋立時の様子	埋立地盤の性状
水 流 式	① 石炭灰に多量の海水を混合し低密度状態でスラリー化する。		密 度 水中をゆっくりと沈降・堆積するため、地盤密度は低い。
	② 低密度スラリーを埋立処分池まで水流輸送する。		強 度 密度が低いため、強度発現もほとんどない。
	③ 低密度スラリーをそのまま水面から投入し、埋立てる。		
乾 灰 式	① 石炭灰を最適含水比付近で加湿する。		密 度 水中での拡散が少なくない。拡散・堆積部分の密度は低い。
	② ベルトコンベヤーやトラックなどを使用して加湿石炭灰を埋立処分池まで輸送する。		強 度 拡散・堆積部分の強度は低い。
	③ 加湿石炭灰を水面から投入し埋立てる。		
打 設 式	① 石炭灰に水を分散添加し、高密度状態でスラリー化する。		密 度 陸上部の圧入埋立と同程度と、埋立密度は高い。
	② 圧送ポンプなどを使用して、高密度スラリーを埋立処分池まで輸送する。		強 度 自己硬化性のある石炭灰であれば数 kgf/cm^2 の強度を発現する。
	③ 高密度スラリーを水底から打設し、埋立てる。		

表-4の3種類の方式¹⁰⁾がある。水流式と乾灰式が従来用いられていたものであり、打設式が高濃度スラリー埋立方式として今後は一般化されるものと期待される。室内試験結果での平均乾燥密度は水流式で 0.61 t/m^3 、乾灰式で 0.89 t/m^3 、打設式で 1.28 t/m^3 とされている。得られた石炭灰埋立地盤の強度として、一軸圧縮強さを乾燥密度との関係で示すと図-9のとおりである。同一密度でも石炭灰の種類によって得られる強度は異なり、石炭灰中の CaO 量によって自己硬化特性が異なることに起因している。なお、水流式のような底密度では強度発現をほとんど期待できない。圧密特性や動的特性に関しての系統的な試験結果は少ないが、打設式によれば圧縮係数 C_c が 0.1 以下の小さな値が得られ、更に自己硬化特性から見かけ上の先行圧密荷

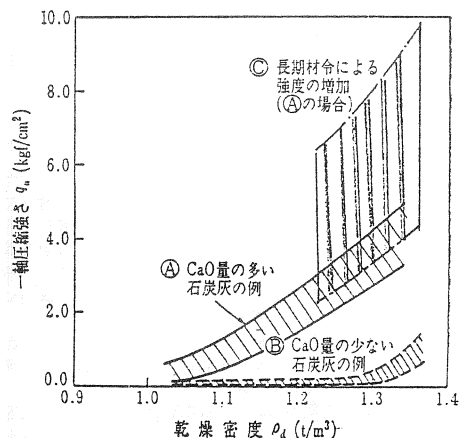


図-9 石炭灰埋立地盤の一軸圧縮強さと乾燥密度

重の上昇が生じるものである。したがって、緩く堆積した石炭灰が液状化を起こしやすいのに対して、打設式による密度増加によって液状化抵抗が相対密度70%の豊浦砂のそれよりも大きくなるとされている¹¹⁾。

6.4 建設発生土埋立地盤の場合

建設発生土は表一5に示すような、構成土材料と含水比の違いによって5種類に分類される¹²⁾。1～3種に該当する土は従来の土材料と同様の取り扱いが可能である。しかしながら、4種の軟弱土や泥土では、得られた埋立地盤が超軟弱となるた

めに、十分な前処理や埋立後の地盤改良が求められる。特にこのような建設発生土によって得られた地盤の土質構成が、複雑で多様な変化を来すことに留意しなければならない。すなわち、海底の沖積地盤では地層構成が水平方向により連続性を持っているのに対して、人工的に軟弱な発生土を埋め立てた地盤では水平方向の地層の連続性はほとんど望むことができない。したがって、場所ごとの土質構成の変化が著しいから、地盤パラメーターの決定に当たっては、設計条件を決定付けるクリティカル値を適切に評価し、これを採用することが重要である。

表一5 建設発生土の土質特性区分

区 分 (建設省令)	土質区分	コーン 指数 qc ^{*3)}	日本統一土質分類		備 考 ^{*2)}	
			中分類	土 質	含 水 比 (地山) wn (%)	掘削方法
第1種建設発生土 (砂、礫及びこれらに準ずるもの)	第1種発生土	—	{G} {S}	礫 砂	—	・排水に考慮するが、降水、浸出地下水等により含水比が増加すると予想される場合は、建設省令の1ランク下の区分とする。
	第1種改良土		(改良土) ^{*6)}		—	
第2種建設発生土 (砂質土、礫質土及びこれらに準ずるもの)	第2a種発生土	8以上	{GF}	礫質土	—	
	第2b種発生土		{SF}	砂質土($F_c=15\sim25\%$)	—	
	第2c種発生土			砂質土($F_c=25\sim50\%$)	30%程度以下	
	第2種改良土		(改良土)		—	
第3種建設発生土 (通常の施工性が確保される粘性土及びこれに準ずるもの)	第3a種発生土	4以上	{SF}	砂質土($F_c=25\sim50\%$)	30～50%程度	
	第3b種発生土		{M}, {C}	シルト、粘性土	40%程度以下	
	第3種改良土		{V}	火山灰質粘性土	—	
	第3種改良土		(改良土)		—	
第4種建設発生土 (粘性土及びこれに準ずるもの (第3種発生土を除く))	第4a種発生土	おおむね 2以上	{SF}	砂質土($F_c=25\sim50\%$)	—	・水中掘削等による場合は、建設省令の2ランク下の区分とする。
	第4b種発生土		{M}, {C}	シルト、粘性土	40～80%程度	
	第4b種発生土		{V}	火山灰質粘性土	—	
	第4b種発生土		{O}	有機質土	40～80%程度	
(泥土) ^{*1)} (浚渫土のうち おおむねqc2以下のもの及び建設汚泥)	泥 土 a	おおむね 2以下	{SF}	砂質土($F_c=25\sim50\%$)	—	
	泥 土 b		{M}, {C}	シルト、粘性土	80%程度以上	
	泥 土 b		{V}	火山灰質粘性土	—	
	泥 土 b		{O}	有機質土	80%程度以上	
	泥 土 c		{Pt}	高有機質土	—	

* 1) 泥土のうち建設汚泥は、廃棄物処理法に定められた手続きが必要である。

* 2) 計画段階(掘削前)において土質区分を行う必要があり、コーン指数を求めるために必要な試料を得られない場合には、日本統一土質分類と備考欄の含水比(地山)、掘削方法から概略の土質区分を選定し、掘削後、所定の方法でコーン指数を測定して、土質区分を決定する。

* 3) 所定の方法でモールドに締固めた試料に対し、ポータブルコーンベネトローメータで測定したコーン指数(表3-3参照)。

* 4) 表中の第1種～第4種改良土は、土(泥土を含む)に改良材を混合し、化学的に性状を改良したものである。例えば、第3種改良土は、第4種発生土または泥土を安定処理し、コーン指数4以上の性状に改良したものである。

* 5) 含水比低下、粒度調整など物理的な処理を行った場合には、処理後の性状で再度判定し、改良土としてではなく、発生土として土質区分を判定する。

* 6) 第1種改良土は、礫、砂状を呈するもの。

更に、近年では建設系廃棄物を広く副産物として捉え、流動化処理土、EPS混合処理土、繊維混合処理土などの高付加価値を与えた有効利用が実施されている。これらの材料は裏込めや空洞充填、道路盛土や河川築堤、宅地造成材料等へ積極的に応用されつつあり、耐久性を含めた長期の安定性評価が今後求められる。

7. 廃棄物によって汚染された地盤環境の浄化対策

7.1 地盤環境汚染の概要

地盤環境の汚染は明治20年代からの足尾鉍山の鉍毒問題がその始まりとされる。神通川流域のカドミウム汚染によるイタイイタイ病に代表されるような農用地の汚染問題は、客土などに基づく対策でほぼ対応がとられているが、市街地における重金属汚染は工場跡地の再利用の際などで明らかとなり、例えば、東京都六価クロム鉍毒汚染など二次汚染が生じないような安全対策が求められる。また、最近ではPCBやダイオキシン、トリクロロエチレン(TCE)など人工化学物質による地盤や地下水の汚染が深刻になっており、環境の汚染が人の健康に影響を及ぼしかねない事例が発生している。このような地盤環境の汚染に対して、汚染状況を正しく把握するための調査法の確立が早期に求められており、3次元的な汚染分布の把握を速やかに実施しうる手法の開発が必要である。更に汚染対策として、従来の固結工法のような地盤改良の手法がそのまま適用しうるが、有害物質を高度に分解したり固定したりする技術の開発が、地盤改良工法の延長線上で取り組まれている。地盤汚染を未然に防止することはもちろんであるが、汚染対策の考え方として以下のような汚染の拡散防止や、地盤浄化という2つの基本的視座がある。

(1)汚染の封じ込め——汚染物質の拡散を防止するために、不溶化による封じ込めや遮水工による地下水との接触を防止する。

(2)汚染地盤の浄化——地盤中から汚染物質を除去する。

有害物質として対象となる重金属や人工化学物質の種類は千差万別であり、地盤中での挙動も異なっている。したがって、汚染対策には汚染物質の種類に適合した新しい発想に基づいた手法開発も求められており、また対策後におけるモニタリ

ングについても必ず実施して、汚染物質の広がりや防止効果を十分確認しなければならない。

7.2 地盤汚染対策技術¹³⁾

7.2.1 固定化工法

汚染された土を安定化するために、汚染物質や廃棄物に結合材を混合してその物理的性質を改善し、有害物質を固定化する方法である。固化化材料として、従来から使用されている石灰・セメント系材料やエポキシなどの有機系材料、その他の新しい材料がある。対象汚染物質としては種々の重金属・石油スラッジ等があるが、室内試験等で溶出試験等を行って耐久性を十分確認してから実施する必要がある。

7.2.2 薬液等による化学処理工法

汚染された地域の土を、有害な廃棄物を生じることなく洗浄あるいは安定化する工法である。掘削した土をプラント処理によって浄化する場合と、掘削はせずに原位置で浄化する場合の2つの方法がある。アルカリ溶液により前処理した汚染土にトリエチルアミンを加え、固液分離することにより有機汚染物質を除去する工法が提案されている。また、不飽和帯に水を通過させて土を洗浄し、回収された水を処理する化学洗浄工法もあり、洗浄効果を上げるために水に化学物質を混ぜることもある。この方法は揮発性・半揮発性有機物、石油炭化水素、PCB、種々の重金属にも適用可能である。

7.2.3 真空抽出工法

TCEなどの揮発性の有機塩素化合物で汚染された地盤を物理的に浄化する工法である。浄化には、真空抽出のみを利用したVacuum Extraction工法、真空抽出に空気注入を併用したSoil Vapor Extraction(SVE)工法、真空抽出に加熱蒸気注入を併用したVacuum Extraction/Steam Injection工法がある。地下水の浄化には、空気と接触させガスと水とに分離するAir Stripping工法と、加熱した蒸気を送ってガスと水とに分離するSteam Stripping工法がある。これらの内SVE工法は米国において実績があり、TCEなどの揮発性有機塩素化合物(VOC)の除去に有効な方法であり、原位置浄化システムである。図-10に示すように抽出井からのガスの吸い出しと、汚染域内および汚染域外に設けられた注入井を通じて正常な空気(または窒素ガス)を送り込むことにより、土中のVOCを抽出するものである。

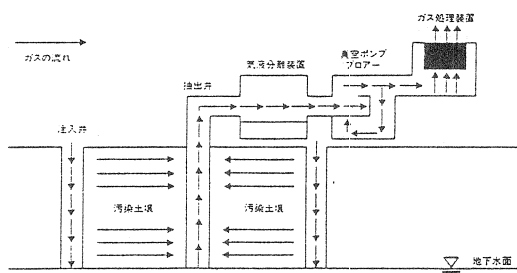


図-10 真空抽出工法のシステム

一般に汚染現場は揮発性の異なる何種類もの汚染物質により汚染されていることが多く、汚染物質は揮発性が高くかつ水に対する溶解度が非常に低いために、その存在形態や汚染のメカニズムは非常に複雑である。このため、簡便な浄化効率予測モデルや、土・地下水中のVOCの挙動をシミュレーションできるモデルを開発して、その対策に役立てることも重要である¹⁴⁾。

7.2.4 生物処理工法

微生物による人工化学物質の生物分解は、毒性のある化学物質を環境から除去する有効な方法として昔から知られており、比較的安価でしかも非常に有効な方法である。地盤中から有毒な化学物質を除去するために、バイオ技術を応用して創出した微生物等を利用する「バイオレメディエーション」は、単独で、あるいは他の物理的、化学的処理とあわせて利用される。ガソリンや原油等の石油系炭化水素の除去が可能であり、殺虫剤や塩素溶剤、ハロゲン芳香族炭化水素やPCB等の処理にも有効である。バイオレメディエーションとして次のような3つの方法がある。

①汚染土を掘り起こし、環境条件をある程度管理しうる処理区画にいて、固形状のまま微生物によって生物処理をする方法

②土の固形物が20%程度となるように汚染土と水とを装置内に加えて攪拌し、スラリー状にして生物処理をする方法

③汚染土は掘り起こさずに、地下の汚染土の位置にまで井戸を掘って必要物を注入し、分解関与微生物の密度が高いゾーンを作ってその汚染位置で生物処理を行う方法

6.2.5 熱処理工法

有害な人工化学物質の原位置熱処理は、埋設処

理に要する費用と比べてしばしば高額な処理方法と考えられている。しかしながら、汚染土の廃棄処理に対する既存の制限や将来の制限を考慮すると将来的には有望と考えられる。PCBやダイオキシンのような処理が難しい人工化学物質も高温を使えば破壊することができる。この方式には種々あり、ロータリーキルンやプラズマ焼却を使ったり、原位置で高温ガラス化して固める方式などが提案されている。

原位置ガラス固化技術は、汚染土を掘り起こさずに土中に挿入した電極に通電・加熱するだけで、土をガラス状に溶融・固化するものである。基本原理を図-11に示す¹⁵⁾。所定の場所に電極を設置し、始めに電気を通すために、地表面にグラファイトなどの導電性の材料を敷設する（一般に土は電気を通しにくい）。通電が行われ高温で溶融が開始すると、土に含まれるSiが溶け出し地盤が導電性を示すようになり、順次溶融領域が拡大していく。深さ方向へは、電極の位置を上下にコントロールすることによって制御できる。溶融した地盤の中心温度は1600～2000℃にも達するが、溶融が進む周辺部では1200℃程度であり、そこから30cm離れると100℃以下に低下し、少し離れた周辺地盤への熱的影響はほとんど起こらない。電気溶融処理の実施された米国の例では、溶融処理土の圧縮強度は3tf/cm²程度、引張り強度は300kgf/cm²以上となり、25～40%の体積収縮によって、大規模な陥没穴が形成される。この穴は客土され、跡地は通常の地盤と同じように有効利用できる¹⁵⁾。

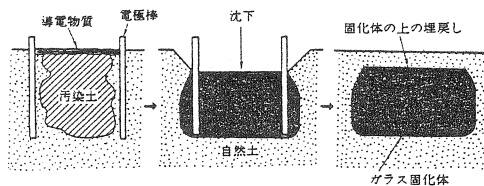


図-11 原位置ガラス固化技術の原理

この技術は、地盤が本来含有するSiを利用してガラス固化体を形成するものであり、特別な場合を除いて新たに薬剤などの添加物を注入する必要はない。コンクリートや瓦礫の類もその対象となるから、地盤中に金属やコンクリート塊などの埋設物がある場合にも適用されうる。溶融処理中に発生する水蒸気や有機物・無機物の気化物質は、地

表面に設置されたオフガスフードにより回収され、放射性物質が含まれる場合にはフィルターなどを通して処理される。また、土中の有害化学物質の多くは1600~2000℃の高温によりほぼ完全に分解される。有害重金属はガラス固化体中に均質に分散し、1千年から1万年の間安定に閉じ込められると考えられている¹⁶⁾。問題は地中の水の処理である。地下水位が高く、地盤の透水係数が大きいときには、水分が蒸発するまでに余分の電力を消費するため、あらかじめ止水壁を設置するなど、周辺からの地下水の流入を防止する措置が必要である。透水係数が 10^{-4} cm/s以下の場合には防止措置は不要とされている。また、熔融した地盤が冷却・固化する過程で多数のクラックが発生する。さらに、有機物を大量に含む地盤では、熔融時に有機物が分解され、処理施設で対処できないほどのガスが発生する場合があります、事前に対応策を講じておく必要がある。

原位置ガラス固化技術は、本来汚染地盤の修復を目的として開発されたが、今後は環境保全や予防の観点から、その適用分野はますます広がるものと予想される。

8. おわりに

地盤環境の劣化に対して何とか早く手を打って、21世紀に向けて希望ある展望を開きたい。このような願いの達成のために、我々は如何に貢献しうののかという点に環境地盤工学への取組の重点が置かれねばならないだろう。「大地の女神、ガイアの愁眉を開くことができるのか」はきわめて重い命題である。本来地盤とそれを取り巻く生態系は多くの浄化作用を有している。我々人間が生存のために、これらの作用のバランスを崩し、破壊してきたのである。地盤は黙して語らないが、野放図な取扱には痛烈なしっぺ返しがあるだろう。一部には地球環境を護るためには人類さえいなければ良いのだという意見もある。しかしながら、人間生存の全否定からは何ら建設的な回答は得られない。如何に環境との共存を図り持続可能な開発を担保するかに重点的に取り組まねばならない。

参考文献

1) 嘉門雅史：環境地盤工学とは一環境地盤工学入門，土質工学会，p.3-7，1994.

- 2) 環境白書：平成5年版，ぎょうせい，1993.
- 3) 嘉門雅史：廃棄物と地盤改良，土と基礎，Vol.41，pp.19-24，1994.
- 4) EPA：Geosynthetic Design Guidance for Hazardous Waste Landfill Cells and Surface Impoundments，1986.
- 5) 嘉門雅史：廃棄物埋立地盤における地盤改良，土と基礎，Vol.42，No.2，pp.19-24，1994
- 6) Estornell, P. and Daniel, D.E.：Hydraulic Conductivity of Three Geosynthetic Clay Liners, Jour. Geotech. Eng., ASCE, Vol.118, No.10, pp.1592-1606, 1992.
- 7) 清水恵助：東京圏に見る地盤の高度利用，3.3 ゴミ地盤の利用，土と基礎，Vol.39，No.4，pp.81-84，1992
- 8) 嘉門雅史：地盤の環境—一般廃棄物・建設残土の有効利用，次世代へのすばらしい環境創造，土木学会関西支部講習会テキスト，pp.63-79，1990.
- 9) 岩谷文方ら：尼崎沖フェニックスにおける焼却灰の力学的特性，土と基礎，Vol.40，No.6，pp.5-10，1992.
- 10) Sugimoto, T., et al.：Effective method for underwater dispersal of coal fly ash, Proc. of 2nd Int. Symp. on Environmental Geotechnology, Vol. 1, pp.428-437, 1989.
- 11) 安原一哉・平尾和年・兵動正幸・堀内澄夫：石炭灰の埋立地盤への有効利用に関する基礎的研究，第34回土質工学シンポジウム論文集，pp.341-348，1989.
- 12) 建設省監修：建設発生土利用技術マニュアル，土木研究センター，150p.，1994.
- 13) 末岡 徹：人工化学物質汚染—環境地盤工学入門，土質工学会，pp.163-171，1994.
- 14) 長藤哲夫・薮田英俊・今村 聡：揮発性有機塩素化合物に汚染された土壌・地下水の浄化対策，土木学会誌，Vol.79，No.12，pp.10-13，1994.
- 15) Hansen, J.E. and Fitz Patrick, V.F.：In Situ Vitrification Applications, 3rd Forum on Innovative Hazardous Waste Treatment Technologies; Domestic and International, June, pp.1-17，1991.
- 16) 金子直哉・村岡元司・田坂広志：原位置ガラス固化技術の環境保全技術としての将来性，日本原子力学会誌，Vol.34，No. 9，pp.838-843，1992.