

18. 地盤環境・リサイクル技術

嘉門 雅史
京都大学防災研究所

1. 地盤環境問題への地盤工学会の係わり

近年は地球環境問題が重大な課題としてクローズアップされており、地盤工学の分野でのより一層の貢献が求められるようになっている。

地盤工学会では20年以上も前から、地盤工学と環境問題との係わりに関する研究に取り組んできた。環境保全と地盤工学（昭和58年）、廃棄物埋立地盤の跡地利用（平成3年）、土質工学と環境問題（平成4年）等のシンポジウムにおける研究発表を初め、平成5年度に設けられた「環境地盤工学と地球環境問題」と、「産業廃棄物の処理と有効利用」の二つの研究委員会が共同で平成6年に「第1回環境地盤工学シンポジウム」を、さらに平成9年には京都大学防災研究所との共催で「第2回環境地盤工学シンポジウム」を開催するなど着実な取組みがなされてきた。

一方国際的には、昭和52年（1977年）に開催された第9回東京会議以降の国際土質基礎工学会議では毎回の会議で主要テーマの一つとして取り上げられ、多方面にわたる議論がなされてきている。平成6年（1994年）にはエドモントン市（カナダ）で第1回環境地盤工学国際会議（International Congress on Environmental Geotechnics: ICEG）が開催され、その後平成8年（1996年）には大阪市で、平成10年（1998年）にはリスボン市（ポルトガル）で第2回、第3回会議が開かれ、国際地盤工学会（ISSMGE）の技術委員会（TC5）を中心とした多くの貢献等に反映されている。ICEGは今後は4年ごとの継続した国際会議として開催されることになっており、次の第4回会議はブラジルのリオデジャネイロ市で2002年に開かれる予定である。これらの地盤環境に係わる成果は、現在では「環境地盤工学」という学問分野として確立されつつある。

2. 環境問題の50年史と地球規模での環境問題

元来、我が国では昭和40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。環境問題との係わりで過去50年間の時代史をまとめると表-1のようになる。50年以上前からの重大な地盤環境問題としては唯一広域にわたる地盤沈下があり、地下水の過剰揚水に起因することから大都市部を中心に揚水規制がなされてきたが、この50年間は社会を取り巻くあらゆる環境問題が陽の形で具現化した時代であるといえ

るであろう。

当初の公害問題、へどろ汚染問題等の環境問題はあくまでローカルな課題に過ぎないものであったが、今日のそれ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ることが求められている。地球環境問題とは一般に以下の九つの課題に集約される。

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

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もある。例えば、砂漠化の問題を一つとっても、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。我が国でも沖縄県では赤土流出問題として大きな課題となっており、緊急の解決策の確立が求められている。

環境問題との係わりを考えるうえでの現行の法体系の中心となるものに、従来の公害対策基本法（昭和42年制定）をより広範な内容に拡充して平成5年に制定された環境基本法がある。さらに平成6年には環境基本計画が閣議決定され、初めて法律用語としての「地盤環境」が定義された。近年は地盤環境の汚染の著しいことが判明しており、汚染物質の種類も極めて多様となっている。このような地盤環境の汚染等の影響を評価するための基準類は総理府令に示されており、直接の影響としての溶出試験は環境庁告示で詳細に規定されている。地下水については質的問題だけでなく、先にもふれた地下水の過剰揚水による広域地盤沈下問題や、大規模地下建設工事に伴う地下水流況阻害対策等についての量的問題も、依然として環境地盤工学上の重要課題である。建設工事の施工に際しては環境アセスメント制度があり、これは環境基本法の主旨を具現化して、公害の防止および自然環境の保全を目的としている。昭和58年に行政措置を講じるための「環境影響評価の実施について」が閣議決定され、各省庁や地方自治体の協力のもとに環境アセスメントが実施されていたが、平成9年に環境影響評価法として正式の法整備がなされた。

3. 地盤汚染とその対策

「我が国は山紫水明の国であった」というように、今や過去形で物語られねばならない状況にまで国土は広く汚染されている。山間谷地部には有害物をも含めた産業廃棄物処分場が設置されているほか、不法な投棄処分が

表一 過去50年間の我が国の産業構造の変化と地盤環境問題

時代層	年 代	事 項	概 要
重 化 学 工 業 化 の 時 代	昭和24年	土質工学会の設立	日本経済の回復が進む。
	昭和27年(1952年)	初の公害防止協定の締結	高度成長に伴う産業活動の結果、大気汚染や水質汚濁が多発した。
	昭和31年(1956年)	水俣病の発見	工場排水中の有機水銀による公害病の発生。
		工業用水法の制定	地盤沈下対策として地下水の揚水規制が始まる。
	昭和32年	水道法の制定	
	昭和33年	所得倍増計画発表	池田内閣による高度経済成長の確認。
	昭和42年(1967年)	公害対策基本法の制定	岡山水島コンビナートの公害問題など各地のコンビナートでのへどろ公害問題などが深刻化した。
	昭和45年(1970年)	地盤沈下拡大	東京江東地区での沈下が4.5 mを記録した。
		環境庁の設置	農用地土壤汚染防止法、廃棄物処理法、水質汚濁防止法の制定。
	昭和47年	環境影響評価始まる	環境影響評価に関する閣議了解。
	昭和48年(1973年)	オイルショック	オイルショックによるエネルギー価格の高騰が、重化学工業から組立産業や情報産業へと脱皮が図られた。
	昭和49年	薬注事故発生	地盤凝固剤による地下水汚染による健康障害が生じた。
	昭和50年	工業跡地の地盤汚染	六価クロムによる汚染の発覚。
	昭和52年(1977年)	東京会議	第9回国際地盤工学会議の特別部会で環境地盤工学に関する議論がなされる。
素材 産業 から 組立 て 産業へ 情 報 ・ 先 端 技 術 産 業 の 時 代		処分場構造の定義	廃棄物最終処分場構造に関する総理府・厚生省共同命令。
	昭和53年	ラブキャナル事件	米国における大規模地盤汚染の発覚。
	昭和58年(1983年)	地下水汚染の拡大	環境庁の調査によって、揮発性の有機化合物による地下水汚染の拡大が判明した。
	昭和62年(1987年)	持続可能な発展の考え	国連の世界委員会で東京宣言として、「持続可能な発展」というキーワードが示された。
	平成元年	建設汚泥の定義	建設廃棄物処理ガイドラインが出される。
	平成3年(1991年)	リサイクル法の制定	再生資源の利用の促進を図ることが定められた。
		土壤汚染基準	土壤汚染に係わる環境基準の告示。
	平成4年(1992年)	地球サミットの開催	環境と開発に関する世界会議がブラジルで開催される。
		廃棄物処理法の改正	特別管理廃棄物の制定、マニフェストの義務化など。
		汚染対策指針	国有地に係わる土壤汚染対策指針の制定。
情報 ・ 先 端 技 術 産 業 の 時 代	平成5年	環境基本法の制定	環境保全の基本理念が提示された。
	平成6年(1994年)	ゼロエミッションの考え方	国連大学からトータルに廃棄物を出さないゼロエミッション構想が出された。
		エドモントン会議	カナダのエドモントンで第1回環境地盤工学国際会議が開催される。
		発生土の定義と利用	建設発生土利用技術マニュアルによって、発生土の区分や用途が明確になった。
	平成8年	大阪会議	大阪で第2回環境地盤工学国際会議が開催される。
	平成9年(1997年)	環境影響評価法の制定	平成11年から環境影響評価法が施行される。
		建設リサイクルの推進計画'97の発表	公共工事からの廃棄物のリサイクルを発注者の責務として推進する。
	平成10年(1998年)	リスボン会議	ポルトガルのリスボンで第3回環境地盤工学国際会議が開催される。
		処分場構造の改正	共同命令の改正によって遮水工構造の明確化。
	平成11年(1999年)	汚染対策指針の改正	土壤・地下水に係わる調査・対策指針および運用基準の制定。

各地でなされており、これらから漏出する浸出水は清冽な河川を著しく汚している。また、農地への過剰な施肥や農薬は依然として大きな汚染源となっている。さらに、都市部の工場跡地などにおける有害物質による地盤汚染の状況は各地で報告されるようになっている。有害な廃棄物の排出は文明社会の発達と表裏一体をなすものであるが、このような状況が放置されたまま容認されるととても思えない。しかしながら、状況は逆であり、国土の汚染は年を追って厳しくなっている。地盤は黙して語らないが、人類が野放図に汚染を続けると、来るべき21世紀の地表は有害な廃棄物に覆われてしまうことに

なるであろう。

地盤環境の汚染源は数多い。イタイイタイ病の原因となったカドミウムをはじめとする六価クロム、砒素、水銀、鉛などの重金属、ハイテク汚染の原因であるトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンなどの人工化学物質のほか、シアンや農薬、油類、放射性物質、酸性雨など汚染物質は多岐に及んでいる。近年では、ベトナム戦争で枯葉作戦に用いられたダイオキシンによる地盤汚染が明らかになっている。

地盤や地下水の汚染は、その程度が深刻になってはじめて発覚することも多く、環境の汚染が人の健康に甚大

地盤工学50年の歩みと展望

な影響を及ぼしかねない事例が生じている。地盤の汚染の原因は、一般に汚染物質を含む材料の貯蔵施設や埋設管などからの漏洩、ならびに廃棄物の投棄などの事業活動に伴って副次的に派生するものである。地盤汚染の調査は対象物質ごとに各種の方法を有機的に組み合わせて的確に実施する必要があり、地形と地盤条件とを加味して考察することが必須である。

このような地盤環境の汚染に対して、従来土質工学の分野で多用されてきた地盤中の流体・熱移動解析技術が、汚染機構の調査・解明にきわめて有力である。しかしながら、地盤の汚染物質であ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調査手法の開発が求められており、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。有害物質を管理するために、土壤環境基準が整備されつつあり、人の健康に係わる汚染物質は今後さらに追加されるものと予想される。管理され得ない領域へ有害物質が漏出しないように十分な配慮を行ふと共に、汚染された地盤の浄化に早急に着手する必要がある。

地盤環境の汚染は我が国のみならず欧米諸国においても多発しており、汚染地盤の管理や修復に向けた取組みがなされている。汚染対策手法としては、汚染源を封じ込める方法と汚染地盤を浄化する方法がある。後者の方法は本質的に地盤環境から汚染物を除去する点で修復技術としては望ましいものである。しかしながら、除去のレベルをどのように設定するかが重要な課題であり、効果の永続性の評価などの視点を考えると、むしろ前者の方法が有利となることもある。最近の欧米での研究では、バイオ化学を用いた浄化手法などの原位置での積極的な浄化手段に限界があることが知られるようになっている。そこで、封込めに重点をおき、公共域へ漏出しないように境界部分で浄化をするといった、消極的浄化手段を指向するようになっている。いずれにしても地盤汚染修復技術は今後一層多方面での研究開発が進むことが求められ、具体的な取組みも確実に進展すると期待される。

地盤汚染問題は今や社会問題としてとらえねばならない。汚染者としての企業は、自社のイメージが低下することを恐れて可能な限り汚染の事実を秘密にするように試みがちである。当初は汚染物質であるとは全く認識されずに、逆に有用物質として用いられていたものも少なくないのである。地盤環境は一度汚染されてしまうと、汚染浄化費用は莫大である。地盤汚染の浄化への取組みを汚染企業へ求めるることは当然のことであるが、汚染浄化を実施することは優良企業の証明であるといった世論の喚起も必要であろう。さらに、汚染物によっては複数の汚染者によることもあり、公的な資金を投入して積極的な汚染浄化の推進を行うなどの法制度の整備も必要であろう。地盤汚染は今世紀における飛躍的な科学技術の発展の結果として生み出されたものであるが、このよう

な21世紀への負の遺産を出来る限り少なくするために、環境地盤工学に係わる多くの技術者の貢献が大いに期待されるところである。

4. 廃棄物の適正処理と地盤工学的有効利用

4.1 廃棄物問題の現状と廃棄物最終処分場の構造

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。一口に廃棄物と言っても、その種別は千差万別であり、一般廃棄物と産業廃棄物とに2分される。廃棄物排出量は、一般廃棄物が5 000万t、産業廃棄物は約4億tに達している。我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を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。

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、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。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。処分場の分類の中では管理型が最も多く、浸出水の存在を前提として厳正な管理が求められる。しかしながら、浸出水の遮水工構造は平成10年に改正命令が厚生省から出されたが、地盤工学的な見地からは必ずしも十分なものとはいえない。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について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の対象外となっているし、発生ガスについての対策にも特別の基準が無い等、現在の遮断工法は多くの問題発生の危険性を有している。処分場を埋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、その流出箇所の検知手法の開発がなされているが現状では耐久性の点で不十分であり、このような処分場の修復には莫大な時間と費用がかかるものである。したがって、遮水工の欠陥評価ならびに修復技術の確立のみでなく、浸出特性に関する二次元・三次元問題としての移流・拡散・吸着解析の実施と検証を通じて、確実に長期安定性を担保しうる構造を提案していく必要がある。

厳格な環境保全が今後ますます求められることになるであろう状況からみて、より一層厳格な地盤工学的管理と地盤工学的に適正な構造基準の策定が求められる。

4.2 廃棄物の地盤工学的有効利用

最近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から、今後は溶融スラグ化の方向への一層の進展がみられるであろう。したがって、結果として出来るスラグ材料は極めて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、適切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。建設系廃棄物は、平成7年度統計で9900万tに達している。このほかに地盤の掘削時に発生する土（建設発生土）は年間約4.5億m³に及んでいる。掘削時に発生する土等は元来地盤として存在していた材料であるから積極的に再利用されるべきものであり、建設副産物（by-product）とみなされている。これらは廃棄物ではないことから、積極的な有効利用が図られつつある。しかしながら、産業廃棄物の一部とみなされる高含水比汚泥状態のものやアルカリ性の建設汚泥などは現状では廃棄物と分類されており、今後の大深度地下空間の利用の拡大に伴って、掘削時の発生土が必然的に大量に生じることから、廃棄物から有用材料への転換を図らねばならない。

建設系廃棄物の再利用率等の割合の現状は、コンクリート・アスファルト廃材の再利用率が65～81%に及んでいるのに対し、建設汚泥はその排出量1000万tの内のわずか6%弱という低さにとどまっている。平成11年には建設汚泥リサイクル指針が発刊され、建設工事に伴って発生する建設汚泥の有効利用の促進が図られている。

廃棄物の地盤工学的利用は広範囲にわたっており、セメントなどの建設材料や路盤材などの地盤材料などの分野での貢献が期待されている。したがって、廃棄物の性状、特性、発生量、発生場所、時期的特徴などを考慮して地盤工学的有効利用分野を選定しなければならない。さらに、利用形態としては廃棄物をふるい分け程度で利用する場合から、加工して利用する場合、あるいはほかの材料と混合して利用する場合などがある。

地盤工学的利用例のみられる廃棄物としては、製鋼スラグ、非鉄スラグ、石炭灰、廃プラスチック、廃タイヤ、ペーパースラッジ、一般廃棄物焼却灰、下水汚泥焼却灰などが挙げられるが、環境汚染との関連で注意が必要であり、二次利用することが地盤環境を汚すことにならないように、処理後の溶出性状の把握が求められる。用途としては、以下のようなものが代表的である。

- (1) 埋立、盛土への利用
- (2) 路盤材、路床材などへの利用
- (3) 地盤改良材としての利用

このように廃棄物の有効利用の促進に当たって、大量に活用できる分野として建設、特に地盤工学的分野が注目される。この際に、物性改良のために地盤改良技術の一つである固化処理が極めて有効であり、今後ますますこの分野への廃棄物利用が進むものと思われる。地盤工学的利用がリサイクル社会の柱となり、同時に地盤環境が他産業の廃棄物によって汚染されないためにも、地盤

工学の側での受け入れのための条件提示が必要であり、そのための視点として以下の整備を早急に進めねばならない。

- a) 要求性能、品質の明確化
- b) 期待する効果の持続時間、耐用年数の明確化
- c) 新材と廃棄物利用材のランク分け
- d) 廃棄物利用を前提とした試験、基準の整備
- e) 廃棄物利用先の追跡調査、モニタリング
- f) 有害成分の排除

5. 酸性雨による地盤汚染

地球環境問題の一つとなっている酸性雨は、我が国でも過去10年間の年度別の平均pH値が全国23箇所で4.3～5.3と欧米なみの酸性を記録している。土には、酸性雨に対する緩衝作用により、地盤を浸透する過程で地下水や湧水等の流出水を中和化あるいは弱アルカリ性に変える役割がある。典型的な表土であるロームや黒ぼく土は緩衝作用が高く、土が酸性化するのを防いでおり、我が国の地盤環境に対する酸性雨の影響はそれほど目立っていない。しかし、セメントや石灰系安定材による処理土は、その固結度がコンクリート構造物などと比較して著しく小さいことから、酸性雨に直接さらされると劣化を避けがたい。

一般にセメントや石灰系安定処理土のpHは11～12程度の高pHを呈することによって、浸出水のアルカリ性が地盤環境へ及ぼす影響が課題とされている。したがって、酸性雨の影響を考慮しなければならない状況とは数10年から100年のオーダーでのものである。人工酸性雨を長期間にわたって流下させた時の安定処理土の劣化の実験例では、酸性の程度に応じて処理土の中性化が進行し、併せてせん断強度が場合によっては1/6にまで低下すると報告されている（Kamonら、地盤工学会論文報告集、Vol. 36, No. 4, 1996）。この実験では安定処理土が直接降雨に接する場合を示しており、実際の適用における被覆作用の重要性が理解されるものである。さらに、酸性雨の浸潤は固化処理土中のカルシウム分を溶出させ、その再結晶化によって側溝や排水路が閉塞される恐れがあり、今後の検討が求められる。

6. おわりに

いよいよ過密化する地球で生きて行くためには、環境の維持や汚染処理に高度な技術が必要である。今後の展望として、21世紀への人類文明の継承といった立場からサステイナブル（持続的な）発展システムの構築とそれに基づいたアプローチが必要であり、従来の制約に拘束されない抜本的な発想が求められる。地盤工学に携わる私達も、今後は地盤環境への各種の負荷をできる限り少なくし、地盤環境全体系の保全を図りながら、持続可能な開発・発展の道を進まねばならない。

（原稿受理 1999.7.19）