

地盤環境

Geo-Environment

嘉 門 雅 史 (かもん まさし)

国立高松工業高等専門学校 校長

1. 地盤工学と地盤環境

地盤工学の取り扱う範囲は工学、農学、理学の多様な領域にわたっており、建設の場だけに限定しても、およそすべての建設工事は地盤上あるいは地盤内部で実施されるから「地盤環境」へ少なからず影響を及ぼす。したがって、地盤環境への負の影響を出来る限り避けるよう努力しなければならないし、また一方、正の影響を与えるような工夫も可能である。一般に、地盤環境と生態環境とはしばしば対立軸で議論されており、両者の相関を適正に保持する手法の確立が求められる。結果として、地盤工学で扱う「地盤環境」課題は極めて多様で、かつ多彩なものとなる。地球環境の保全の重要性が高く喚起されている今日、地盤にかかわる環境問題をおろそかにできない。

そもそも「地盤環境」という用語が公式に使われたのはそれほど古い話ではなく、1994（平成6）年12月に環境基本計画が閣議決定され、初めて法律用語として定義されたものである。ここで対象となる地盤環境の保全は、従来の公害対策基本法（1967（昭和42）年制定）で扱っていた、いわゆる典型7公害である騒音・振動・水質汚濁・土壌汚染・地盤沈下・大気汚染・悪臭を、時代の変遷によって広範な内容に拡充して1993（平成5）年12月に制定された環境基本法に基づいて、人間活動による地盤の環境への負の影響を防止することを目指すものである。特に、地盤環境が近年著しく汚染されていることから、汚染等の影響を評価し、浄化することが求められるほか、固体系廃棄物の適正処理処分と建設材料としてのリサイクルの課題を挙げることが出来る。地盤環境の構成要素である地下水の量的、質的課題も重要であり、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が環境地盤工学の課題であるだけでなく、地下空間開発とも関連して地下水資源マネジメントの考え方の導入が必要となっており、地球の水循環の中で再生可能資源として今後より一層大切に扱っていかねばならない¹⁾。

我が国では「地盤環境」を広義に解釈して、生態系との正の相関についても地盤工学の取り扱う範囲に入れていくことは特筆するべきである。建設事業の環境インパクトは規模の差はあっても避け得ないものであるが、従来は副次的な対応に終始していた嫌いがあった。しかしながら、環境保全や良好な環境創出の視点が見直される

ようになり、1987年の米国の環境条例でミティゲーションが導入されたことによって、地盤環境の保全の意味から建設事業における環境インパクトの軽減のために自然環境と生態系の保全がクローズアップされている²⁾。地盤を取り囲む境界条件としての自然環境を適切に保全することが、生物多様性を残した生態系の保全につながるものである。このような視点から、ミティゲーションは極めて重要であり、地盤環境との関連から多様な取り組みがなされている。

2. 環境地盤工学の成立

我が国では1960年代半ばから各種の公害問題、へどろ汚染問題等が大きな課題としてクローズアップされ、地盤工学の分野でも環境問題には早くから研究開発・対策がなされてきた。地下水の過剰揚水による広域地盤沈下問題は重大な地盤環境問題であり、大都市部を中心に揚水規制がなされたが、このほか大気汚染や水質汚濁など20世紀後半は社会を取り巻くあらゆる環境問題が具現化した時代であった。さらに近年では地盤環境問題がそれぞれの地域環境問題だけに留まらず、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おり、砂漠化の問題や、酸性雨による地盤への影響、国境を越えた廃棄物移動の防止問題など、多様な展開を見せている³⁾。

地盤工学会では環境問題との係わりに関する研究に比較的早期から取り組み、環境保全と地盤工学（1983（昭和58）年）、廃棄物埋立地盤の跡地利用（1991（平成3）年）、土質工学と環境問題（1992（平成4）年）等のシンポジウムにおける研究発表を初め、1993（平成5）年に設けられた「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1994（平成6）年に「第1回環境地盤工学シンポジウム」を開催し、以後環境問題を取り扱う研究委員会が担当して、隔年の開催を継続している。この経緯の中で、「地盤工学における生態系を考慮した環境評価に関する研究委員会」活動なども展開されてきた⁴⁾。国際的には、1977（昭和52）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。1994（平成6）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1996（平成8）年に大阪で、1998

(平成10)年にリスボン(ポルトガル)で、それ以後は4年ごと国際会議として開催され、2002(平成14)年にリオデジャネイロ(ブラジル)で、2006(平成18)年にカーディフ(英国)で開かれた。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したといえるだろう⁵⁾。

3. 持続可能な循環型社会への地盤工学の貢献

循環型社会の構築は来世紀に向けた持続可能社会(Sustainable Development Society)のための必須の課題であるが、資源やエネルギー(とくに化石燃料)の使用や廃棄物を減らし、環境再生を最優先する方向へ社会経済活動を転換しなければならない。このためには

① 3R(Reduce:発生抑制, Reuse:再利用, Recycle:リサイクル)への取り組み

② バイオマスなどの再生可能エネルギーの利用の促進

③ 廃棄物の適正処理処分・不法投棄からの原状回復などの施策がわが国では取り上げられ、各方面で積極的に取り組んでいる。地盤工学の分野では、社会基盤整備への取り組みの中で、地盤材料の資源循環型を省エネルギーの下で達成しうる施策を確立することが、持続可能な社会を構築する上で有効である⁶⁾。

人間活動の結果として排出される廃棄物や建設工事によって生じる発生土は、近年でもなお莫大な量であり、その処理・処分問題は依然として重要な課題である。循環型社会構築のために、様々な分野で廃棄物等の有効利用が進展している。掘削工事等で発生する土は廃棄物には分類されないが、有効利用されずに処分される量が建設工事に必要とされる量を大幅に上回っている。さらに、廃棄物の多くを最終的には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である。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、3Rを標榜しているにもかかわらず、ここ20年間ほとんど減少しておらず、一般廃棄物は5000万t、産業廃棄物は約4億t程度排出しているが、廃棄物の再利用、リサイクル量は大きく進展し、最終処分量は2500万t程度に減少して、新規建設が極めて難しい最終処分場への負荷の軽減によって、処分場の残余容量に改善が見られている。しかしながら、浸出水の存在を前提として厳正な管理が求められる管理型処分場への排出量は少なくないことから、これまで以上に厳正な処分場の構築と管理が求められる。

浸出水の遮水工構造は平成10年に厚生省等から改正命令が出されたが、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。その不完全性を地盤工学の側から提言することによって、性能規定方式が採用されるように改変された。今後も長期安定性を確実に担保しうる処分場構造を提案していく必要があり、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の高度化と、より耐久性のある遮水工の構築

とその欠陥評価ならびに修復技術の開発が課題である。地盤環境の保全が今後ますます求められる状況からみて、より一層厳格な地盤工学的管理と適正な構造基準の策定が必要であろう。

2004(平成16)年の廃棄物処理法の改正によって、廃棄物が地下にある土地の形質の変更を行う場合に適正な施行を確保し、もって生活環境の保全および公衆衛生の向上を図ることを目的として、施行ガイドラインが出されている。都道府県知事等が廃棄物処分場を指定区域として指定することにより、当該区域において土地の形質の変更を行おうとする者が、事前にその内容を都道府県知事等に届け出ることを義務付けるとともに、都道府県知事等はその届出内容が施行方法の基準に適合しないと認める場合には当該施行方法に関する計画の変更を命ずることができるようになった。ここでの指定の対象となる区域は、現に生活環境保全上支障が生ずるおそれがない廃棄物の最終処分場の跡地であって、土地の形質の変更に伴い生活環境保全上支障(廃棄物の飛散・流出、ガスの発生、公共の水域または地下水への汚染等)が生ずるおそれがある跡地その他の埋立処分の場所であり、最近の建設工事において、関西地区を始め各地でこれに抵触する事例が増加している。慎重な施工計画の策定と実施が望まれる。

廃棄物等の地盤工学的有効利用も大切な課題である。

近年は一般廃棄物や下水汚泥などの産業廃棄物の多くが焼却処分・熔融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、処理物の環境安全性の向上が見られる。したがって、結果として排出されるスラグ材料は極めて良好な地盤材料と言える。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地盤材料にするための低コスト技術の開発が大切である。建設系廃棄物の排出量は2005(平成17)年度統計で7700万tであるが、その再利用等の割合は現在92%に及び、建設リサイクルの実が上がっているといえるであろう。コンクリート・アスファルト廃材の再利用率は98%に及んでいるのに対し、建設汚泥はその排出量600万tの内の60%弱に止まっており、再利用率等の一層の向上と建設発生土の有効利用率の促進を図らねばならない。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るが、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⁷⁾。

地盤工学的利用可能な廃棄物としては、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事前の把握が求められる。

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

論 説

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

4. 地盤環境の汚染の防止

地盤の汚染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。また、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他、不法な投棄処分が各地でなされており、これらから漏出する浸出水は河川を著しく汚している。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。このように人間活動の結果として生じる地盤環境の汚染は数多い。したがって、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る、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⁸⁾。したがって、従来地盤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。地盤の汚染物質である重金属や人工化学物質の種類と量、地盤中での挙動などに適合した調査と対策、さらにその後のモニタリングによって、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。

地盤環境の汚染はわ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とがある。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が、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の取組みは、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の限界から、封じ込めに重点を置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な浄化手段を指向して、汚染リスク評価を実施して対応策を開示することによって住民の理解を得る方向に進んでいる⁹⁾。

2003（平成15）年2月からわが国で施行された土壌汚染対策法は、特定有害物質を取り扱っていた工場跡地を再開発する場合には、土壌が汚染されていないかどうかについて必要な調査を行い、有害性が認められれば指定された方法で対策を図る、あるいは都道府県知事が土壌汚染の調査対策を必要と認めた時に適用されるというように、ある程度限られたものであった。しかしながら、

この土壌汚染対策法が施行されたことによって、不動産取引上や、企業のCSRとの関連で、地盤汚染の調査事例が激増するとともに、地盤汚染対策の実施事例も飛躍的に増加した。このような法に基づかない調査事例や対策が極めて多く、土地取引上においてはゼロリスクを求められることが一般となっており、どのような条件でも汚染土はすべて掘削除去するべしというような過度の要請につながるが多くなり、著しいコスト増加となっている。また、自主的調査では情報開示義務がないために、一部に不適切な対応が生じているとされる。さらに、建設リサイクルの推進の立場から建設発生土の工事間有効利用が求められるが、建設発生土中に含まれる重金属による環境汚染のリスクも避け得ない。したがって、建設工事で重金属を含有する土に遭遇した場合の適正な対処方を明示する必要がある。

このような背景を受け、土壌汚染対策法が施行されてから5年が経過したことに基づき、環境省では2007（平成19）年度に土壌環境施策のあり方の懇談会が設置されて、改正の必要性が明確にされた。2008（平成20）年度にその結果を受けて中央環境審議会土壌農業部土壌制度小委員会で審議され、土壌汚染対策法の改正に係る最終報告書が示された。これらの検討に基づいて、改正土壌汚染対策法が2009（平成21）年4月17日の通常国会で成立したところである。

今回の改正では、一定規模以上の土地であって、土壌汚染の恐れのある土地の形質変更時には、都道府県知事による土壌汚染の調査命令を行う。自主調査にあっても土壌汚染が判明した場合は、土地の所有者等の申請に基づき、土地の形質変更時に届出が必要な区域を形質変更届出区域とし、盛土、封じ込め等の対策が必要な区域を措置実施区域として指定し、適正に管理する。さらに指定区域内の土壌の搬出を規制（事前届出、計画の変更命令、措置命令）する。搬出土壌に関する管理票の交付および保存を義務付けるとともに、搬出土壌の処理業についての許可制度も新設された。

このように、搬出汚染土の適正処理が明文化されたことから、自然由来の重金属を含む土に遭遇することの多い建設工事の現場での適切な対応が求められる¹⁰⁾。

5. 地盤工学から生態系への配慮

わが国における20世紀後半からの自然環境創生事業として、臨海部における埋立事業と山間部における植林事業をあげることが出来る。特に植林事業は第2次大戦後の荒廃した国土を緑化によって甦らせ、二次林としての見事な森を再生した。関西周辺でも六甲山の植林事業はその代表例といえるであろう。現在は少子高齢化によって、各地の森の荒廃が再び進みつつあるのは誠に残念であり、自然災害の防止の視点から地盤環境保全としての取組みが、農林業との共同連携によって求められる。

埋立事業は東京湾、伊勢湾、大阪湾をはじめわが国の大都市部における産業基盤造りのために、自然環境をほとんど顧慮することなく大規模に進められ、20世紀の

興隆の基礎となった。その結果、自然海岸や干潟、浅場の消失、青潮や赤潮の発生など生態系を破壊してしまうことにつながった。また、内陸部では洪水対策としての河川治水事業のダムや堰の建設が、結果としての土砂流出を防止し、人々の水辺からの隔離や海岸線の浸食の増大をもたらしていた。これらの反省を受けて、新たな水辺環境の創出事業が現在では進められ、多自然型河川事業や、ビオトープの導入、人工養浜事業の実施、湿地造り、人工干潟の造成、浅場の再生等、数多くの水域の地盤環境を保全して、これが新たに多様な生態系を創出している。これらの諸事業におけるミティゲーションの考え方は1999（平成11）年に施行された環境影響評価法に示されたが、最近の開発事業において必須の取組みになっていることは評価しうるものである。しかしながら、生態系の保全は極めて動的、永続的なものであるから、それぞれの事業で息の長い取組みが求められ、地域住民を巻き込んだ活動が大切であるといえる。

6. 酸性雨による地盤環境への影響

地球環境問題の一つとなっている酸性雨は、わが国でも環境省の調査によれば年度別の平均 pH 値が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の方が課題であり、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¹¹⁾、酸性の程度に応じて処理土の中性化が進行し、併せてせん断強さが場合によっては1/6にまで低下する。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。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、将来検討が必要とされるであろう。

7. おわりに

地球環境は存亡の危機に直面しつつあり、その中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。地盤材料として固体系廃棄物等のリサイ

クルを一層推進するためには、高品質化による用途の拡大や、低品質地盤材料として利用する際の環境安全性の確保が重要である。そのためには、固化処理に伴う環境影響の抑制と管理、および利用条件、環境条件を反映した溶出試験に基づいて、実際の環境影響や適切な利用形態を明らかにしなければならない。また、建設工事のサイトがたまたま地盤汚染されていたというような事態に遭遇した時であるとか、自然起源の汚染土にぶつかって、これを有効利用する際には、先に触れたように建設発生土の掘削運搬に際して適切な処理を行う必要があり、再利用の前に無害化を実施しなければならない。

さらに、廃棄物埋立地盤の早期跡地利用に関する取組みは、その緊急性・重要性から首都圏や近畿圏ではマスコミ等でもしばしば取り上げられている。この背景として、人間の住む範囲における開発の適正規模からの逸脱があり、個々の人間の利害が自然環境の保全や保護というものと必ずしも一致していないという現実を挙げることができ、場当りのな対処療法が長期的な視野で有効とはいえない。したがって今後の展望として、21世紀の人類文明の継承といった立場から持続可能な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、人類生存の道を模索しなければならない。

参 考 文 献

- 1) 佐藤邦明・佐藤正之：健全な地下水の保全・利用に向けて、土と基礎，Vol. 55, No. 8, pp. 1～4, 2007.
- 2) 森本幸裕・亀山 章編著：ミティゲーション，ソフトサイエンス社，354p., 2001.
- 3) 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，pp. 3～7, 1994.
- 4) 後藤恵之輔：地盤工学における生態系の重要性と課題，土と基礎，Vol. 49, No. 9, pp. 1～3, 2001.
- 5) 嘉門雅史：地盤環境・リサイクル技術—地盤工学50年の歩みと展望，土と基礎，Vol. 47, No. 10, pp. 74～77, 1999.
- 6) 嘉門雅史：固体系廃棄物の地盤材料としてのリサイクル，土と基礎，Vol. 55, No. 10, pp. 1～4, 2007.
- 7) 地盤工学会編：廃棄物と建設発生土の地盤工学的処理と有効利用，地盤工学会，330p., 1998.
- 8) Kamon, M.: Remediation of contaminated land, *Jour. of Disaster Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 173～187, 2007.
- 9) 地盤工学会編：土壌・地下水汚染の調査・予測・対策，地盤工学会，270p., 2002.
- 10) 嘉門雅史：改正土壌汚染対策法と自然由来重金属を含有する土への対策，環境・エネルギー，政策研究所 5月号，pp. 62～63, 2009.
- 11) Kamon, M., Ying, C. N. and Katsumi, T.: Effect of acid rain on lime and cement stabilized soils, *Soils and Foundations*, Vol. 36, No. 4, pp. 91～99, 1996.

（原稿受理 2009.7.3）