

## 地盤環境分野の将来の課題

## Future Direction of Geoenvironmental Issues

西垣 誠 Makoto NISHIGAKI

(岡山大学大学院環境学研究科)



本文は地盤環境に関する研究分野で今度どのような課題があるかについて論じたものである。すなわち次の環境問題を、人口問題、地球温暖化問題、廃棄物問題、既存土構造物の課題について、具体的な例を挙げて説明した。人口問題は全ての環境問題に関する重要な課題で、食料、水、エネルギー、廃棄物等と地盤環境問題との関連について説明した。地球温暖化による気象変化、また豪雨災害、枯渇は防災上も地盤環境上も最も重要な課題であるが、行政も研究者もこれに関しての関心が低いことを指摘した。最後に、既設土構造物のメンテナンスからモニタリング、そして解体工学的な技術の確立の重要性を示した。

キーワード：環境、地盤、地球温暖化、防災、廃棄物

(IGC : B-3, B-12)

## 1. はじめに

地盤環境問題を議論する前に、人口増加問題を議論する必要がある。現在、世界で最も大きな社会的問題は、人口増加問題である。人口が増加することは地球上の大きな課題であり、人口増加問題から我々は表-1 のような問題を検討する必要があるが生じてくる。

表-1 人口増加問題から派生する課題

- (1) 食糧問題
- (2) 水問題
- (3) エネルギー問題
- (4) 廃棄物問題
- (5) 住居問題
- (6) 教育問題
- (7) 医療問題

また一方では、地球温暖化の原因によるのか、気候変化が生じ豪雨災害の増加がこれから大きな課題になってくる。また、既存の構造物の管理も大きな課題である。本報告では、今後、これら我々の周囲で生じるであろう地盤環境分野の課題に対して、どのように対処するかについて論述する。

## 2. 食糧問題と地盤環境

この人口問題の中で食糧問題を解決するために、単位面積当たりの穀物の収穫を上げるために肥料を多く使っていくと、それによる土壌・地下水汚染が発生する。このような肥料による土壌・地下水汚染は、窒素肥料によるものであり、日本でも静岡、岐阜、宮崎そして鹿児島等で生じている。

また、農地を得るために山林を開墾することは、土砂災害の増加や地球温暖化に対しての森林の減少として社会的課題となっている。農作物を生産するためには、太陽と水が必要である。このため農業用水として多くの表流水や地下水が利用され、中国では黄河揚水(黄河断流)というような現象が生じている<sup>1)</sup>。このような食糧問題と人口増加、そして人間の生活様式の変化の問題、これらは根本から世界中で考え、地球規模で検討すべき課題である。

生活用水、農業用水として地下水を利用して、その地下水の枯渇が中国、インド、北米で生じている。医療制度が整備され、人口がこれからも地球上でどんどん増加すると、次の世代のために陸上だけの食物でなく、地球の大半を占める海からの食糧補給システムを本気で考えていく必要がある。

また、生活用水としてどんどん表流水や地下水を利用していくと、その排水を十分にしないと河川や海洋また地下水汚染が発生する。「水を利用する場合には、自分で処理できる範囲の水しか利用しない」というくらいの哲学が必要である。これは、十分な経済力があるかないかにも大きく関係する課題であり、我が国とて、やっと下水が完備されて川、海がきれいになってきている。

## 3. 地球温暖化と地盤環境

## 3.1 地球温暖化による気候変化

地球は温暖になっている。しかし、地球の過去 30 万年の歴史を南極の氷のボーリングデータから調査すると、3 回温暖な気候になっている。いちばん最近が約 6000 年前でアダムとイヴが生きていた時代であり、日本では縄文時代である。このとき地球は暖かく、北極、南極の氷が解けて、海の水が膨張し海水面が高くなって海がずいぶん内陸部まで入ってきていた(縄文海進と言われている)。その時

より、地球は氷河期に入っているとしていたため、今から数万年後には海面が現在より 120m 程度低下すると予測されている。

このように、地球全体の温度が低下する方向の中で地球温暖化現象が生じている。2008 年は我が国で環境問題に関するサミットがあり、IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)が地球温暖化と水問題と題するシンポジウムを 2008 年 5 月に世界先進国(G8)の環境大臣が集まって議論をしている。地球温暖化が進むと、どのような地盤環境問題が生じるのかについて、今、我々は各自で考える必要がある。それらの問題を表-2 に整理してみた。以下に各項目について説明する。

表-2 地球温暖化と地盤環境問題

- (1) 豪雨災害の増加
- (2) 洪水災害
- (3) 河川水の枯渇
- (4) 地下水位の低下
- (5) 植生変化による土砂流出量の増加

### 3.2 地球温暖化と地盤環境問題

#### (a) 豪雨災害の増加

地球温暖化のためか、最近の降雨パターンが過去のデータとは異なる様式になってきており、集中豪雨時の時間降雨が 100mm という記録的な雨が普通に降っている。一般の都市の雨水排水の既存の施設は時間降雨が 50mm を対象に設計してあるため、設計値以上の豪雨が降ると当然、都市の排水不良が生じ、低地での浸水が至る所で生じてくる。

また、豪雨による斜面崩壊や地すべり現象が生じ、過去に土砂災害をあまり経験していない地域ほど、これからは気候変化による集中豪雨によって地盤災害が生じやすいため、それに対する対策が必要となる。豪雨災害だけでなく、竜巻による災害も増加する可能性がある。

#### (b) 洪水災害

ミャンマーでの大水災が生じているが、気候変動によって台風やサイクロン、ハリケーンのルートにも少しずつ変化が生じている。しかし、我が国でも集中豪雨による大洪水災害は 2005 年に新潟、福井、兵庫で生じている。日本の場合は洪水期間が 1 日程度と短い場合が多いが、河川の堤防が決壊して河川水が民家に流入する洪水というより、現在では 1000ppm 程度泥を含んだ泥水が流入してくる「洪泥災害」が生じている。これらの災害で、新潟での死者の大半が老人であったという事実は、これからの少子高齢化の日本に新しい課題を投げかけている。

100mm/hr に対処できる堤防を築き市民を災害から守ることは、行政の大きな課題であるが、国も自治体も予算がないため、堤防に対する 100 年の計を考えた抜本的な対策はまだ考えられていない。

日本中の堤防の総点検が 2009 年に終了して、その後、危険度の高い所から修復していくことになっているが、財

源がないということで具体的にこれから起こり得る集中豪雨に対してどのような対策をするかを市民とともに考える必要が出ている。

市民を安全にするためにどれくらいの財源が必要かを検討し、対象となる市民から毎年財源を集めても、目的がきっちりしており、自分たちを守るためであると考えれば、対策のための財源は十分に集まると考えられる。

#### (c) 河川水の枯渇

降雨パターンが地球温暖化によって変化してきていることによって、ダム等によって流量が制御できる河川は良いが、ダムのない河川では豪雨時に大量の水が流れ、渇水時には水のない河川となる可能性が出てくる。

また、地球温暖化によって、山の積雪量が減少してくると、一層河川の基定流量が低下して、降雨のない時には枯渇した河川となってしまう。このように河川が枯渇していくと、河川水を水源として生活用水や農業用水、工業用水を利用していたそれぞれの機関での水利用システムが破綻してしまう。

水のない河川では、河川の環境はたちまち破壊され、後に戻れない環境になる。このような状況の中で河川の環境を守るには、変動した気象状態に追従できるような河川流を制御するダムシステム等を再考する必要がある。また、人工降雨に関しても、これからもっと重点的に研究すべきである。

#### (d) 地下水位の低下

地下水の水源は、降雨や融雪が地中に浸透したり、河川水や水田の水、池の水が浸透して地下水となる。雪は春先にゆっくり解けるため、地中に適量涵養される最高の地下水水源である。また地中に浸透した水が徐々に河川に流出して、それが基定流量となる。また、降雨も昔の日本の梅雨のようにシトシトと小降りの雨が降ると、それは地下水にとって最高の涵養法である。しかし、近年の降雨パターンは、あるときに集中して降り、一方で渇水期が続くという、地下水への降雨涵養パターンとしては極めて悪い条件になっている。

このような降雨や雪の状態と相まって河川水が枯渇してくると、当然地下水位が自然に低下してしまう。地下水位が低下することによる地盤環境問題を整理すると表-3 のようになる。

表-3 地下水位が低下することによる地盤環境問題

- (1) 地盤沈下
- (2) 地盤の塩害
- (3) 地表の気象変化
- (4) 土壌・地下水の汚染

#### (1) 地盤沈下

地下水位が低下すると軟弱な粘土地盤のある所では地盤沈下が生じる。これは、今まで地下水位があった時には浮力が作用していたため地盤の荷重が軽減されていたが、地下水位が低下したために土への荷重が大きくなり、地盤

沈下が発生する。

このような地盤沈下は広域に生じるために、その被害は莫大なものとなる。道路が沈下して、下水道からの漏洩が生じたり、水道管が壊れたり、ガス管が切れることもある。また、道路の陥没も至る所で生じたりする。最も危険なことは堤防が沈下したり、堤防内の樋門や樋管の下の地盤が沈下して洪水時にパイピング現象の原因になることがある。

地下水位の広域にわたる低下による地盤災害は世界中で現在も生じているが、日本では色々な地下水利用の制御によって、年間に2cm以上沈下する所は少なくなったが、気候変動によって再びそのような地盤災害が起こる可能性がある。

このような現象に対しての対策として、地表水を十分に制御して、その地表水をいかに地下水に涵養するかが課題である。洪水時の余った水を地下に涵養させる人口涵養は世界中で行われているが、毎回、涵養設備が目詰まりするという現状である。もっと効率のよい人口涵養システムを研究することが今後の課題である。

ちなみに、地下水が枯渇すると、地下水を利用していた種々の水利用も不可能になることに留意する必要がある。おいしいお酒も飲めなくなり、美味なる豆腐も食べられなくなる。

#### (2) 地下水の塩害

沿岸地区では、地下水位が低下すると、塩水が遡上してきて地下水の塩分濃度が高くなる塩害現象が生じる。このような地下水利用時の地下水の塩害を防ぐ方法として、淡水の地下水を利用する際にその揚水井戸の下の塩水の中にも揚水井戸を設けて、淡水を揚水する際に同時に塩水も揚水して淡水を揚水している井戸の中に塩水が浸入するのを防ぐ方法(二重井戸工法)がある。

しかし、広域の地下水の塩水化を防止するには、河川の河口堰により河川に淡水を貯留してその水を地下水へ涵養する方法のように、地下水全体に人口涵養をどのようにするかを検討するのが最も良い対策である。

#### (3) 地表の気象変化

地下水位が低下すると、地表からの地下水の蒸発量が少なくなるために地表面の気温が高くなる。また、この地表面の気温の上昇は、地表の植物にもそこに生存している生物にも大きな影響を与える。当然、表面の草が枯れると、地表の土の風化が進行し、豪雨時に地表の土砂が浸食されやすくなる。

#### (4) 土壌・地下水の汚染

地下水位が低下すると、還元場であった地盤内に新しく地表からの酸素が侵入してきて、地中の鉱物と化学反応を起こして、時には酸化することによって水に溶けやすい毒性を持つ汚染物質になることがある。すなわち、地下水位の低下によって新しい地下水汚染が生じるのである。

#### (e) 植生変化による課題

地球温暖化による気候変化によって、地表の植生が変化する可能性がある。このような地表の植生変化が生じてい

る途中過程において地表の土砂が風化したり、変化する前の植物の地下の根による風化等が生じ、豪雨時に侵食を受けて、土砂流が生じる。一度侵食を受けた地表は、地表の乱れが生じ、どんどん不安定な状況に変化していく。

## 4. これからの土壌・地下水汚染

気候変動による地盤環境問題とは異なり、現状から将来どのような土壌・地下水汚染が生じるかを整理したものを表-4に示す。以下にそれぞれの項目の課題について論述する。

表-4 これからの地盤環境問題

- (1) 廃棄物最終処分場
- (2) 産業廃棄物の再利用による汚染
- (3) 油汚染(ETBEを含む)

### (1) 廃棄物最終処分場

人間が生活している限り、廃棄物はどんどん増えてくる。人口が増えるほど廃棄物は増えてくる。日本のような島国では、輸入と輸出のマスマランスを考えると、年間に4億トンもの廃棄物が生じている。材料を輸入して製品として輸出するのだから当然、廃棄物は生じる。この4億トンを体積にすると、約2億 $m^3$ になる。岡山と高松の本四連絡橋の距離が約10kmである。瀬戸内海の水深を大きく見て平均50mとすると、この日本中の廃棄物を用いて埋め立てると、毎年幅400mの土地ができることになる。これだけの廃棄物で東京湾を埋め立てると極めて価値のある廃棄物の有効利用となる。

廃棄物を現在は山間部の谷を埋め立てているが、管理されるようになったのは最近であり、それ以前の廃棄物の最終(?)処分場に関しては再度安全性の確認が必要であり、モニタリングも必要である。特に重金属類を遮断型処分場と称する処分場で処分しているサイトでは、その遮断機能が確実になされているかを何万年もモニタリングする必要がある。厚さ35cm以上の鉄筋コンクリートで何年止水できるかは極めて疑問である。数年で亀裂が入って雨水が浸透し、汚染物質が漏洩するのは火を見るより明らかである。

廃棄物の最終処分場は「無害な廃棄物」にして処分する必要がある。廃棄物をガス化溶解処理することはエネルギーがかかる処理であるが、無害なエコスラグなどで処理を全ての廃棄物に対して行うべきであると考えられる。また、数万年間遮断するなら、コンクリートのような人工的ではなく、放射性廃棄物の地層処分を利用して天然のベントナイト等の粘土材料で遮断すべきである。

### (2) 産業廃棄物の再利用による汚染

産業廃棄物を再利用するために種々の無害化処理がなされる。その中で最も危険な処理がセメントで固化する処理である。鉄鋼スラグ等を骨材とするセメント固化体にする処理は安全な材料の体積さえ増やせば含有量基準を満

足する。また、セメント固化しているの、短期間の溶出試験ではこれも基準を容易に満足する。しかし、先にも述べたように、セメントやコンクリートによる固化体は100年、200年もその機能を維持するものではない。したがって、いずれ溶出基準を満足しない状況になるような産業廃棄物は、エネルギーがかかるが再度安全な物質にして、廃棄物として出してくるべきであると考えられる。

### (3) 油汚染(ETBEを含む)

土壌・地下水汚染の今後に関しては、これからは法律も体系づけられているためそれほど多くは生じないと思う。しかし、ガソリンスタンドの地下タンクからの油の漏洩による土壌・地下水汚染は、人類が油をエネルギーとして使う限りこれからも続くと考えられる。油による土壌・地下水汚染はそれほど大きな課題となることは少ないと思うが、油の中のベンゼンを含む汚染した地下水は人体に害のある水になる。

近年、石油価格の高騰により石油に ETBE(Ethyl Tertiary-Butyl Ether)を混合したガソリンが使用されようとしている。この ETBE はエタノールに石油精製過程の副生産物であるイソブテンを合成したもので、将来ガソリンに10%程度混合されることになっている。その混合率は石油の価格に依存するが、この ETBE を含んだガソリンが地下水中に漏洩すると、ガソリンは LNAPL(Light Non-Aqueous Phase liquid)であるので、地下水より軽く地下水面に移動するが、ETBE は地下水に容易に溶解する。昔、ガソリンのオクタン価を上げるためにガソリンに MTBE(Methyl Tertiary-Butyl Ether)を混合していたが、この MTBE を含んだ地下水を飲むとガンが発病したため、2001 年より我が国では MTBE の製造は中止されている。生活用水のほとんどを地下水に依存しているヨーロッパの国々や米国では、現在でも MTBE による地下水汚染が極めて深刻な問題となっている。

ETBE は現在のところ、これを含む地下水を飲用しても、人体には無害となっている。しかし、地下水中に ETBE が溶け込むと、地下水の水質が悪くなり、20ppm 程度でも、強いベンゼンに類似した悪臭がする。したがって、純粋な地下水の水質を悪化させることになり、地下水の価値を低下させてしまう。石油の価格が高騰するからと言って ETBE の含有量をどんどん増していくと、それによる地下水汚染がどんどん拡散していくことは目に見えている。このような現状から、ガソリンスタンドの地中タンクに対して厳密な漏洩モニタリングシステムの確立が急務となっている。

## 5. 既存土構造物の課題

既存の土構造物の課題を整理すると、表-5 のようになる。ここでは、これらの課題と、これから何をすべきかについて論述する。

表-5 既存の土構造物の課題

- (1) 盛土の安定評価
- (2) 堤防の安定評価
- (3) ロックフィルダム、アースダムの安定評価
- (4) 斜面の安定評価

### (1) 盛土の安定評価

鉄道、道路盛土に対しての安定評価の必要性があるかの議論がある。一般に土構造物は自然材料であり、時間が経てば経つほど安定になってくる。しかし、盛土材料として、無理をしてコンクリートを併用していたり、種々の金属材料を用いているような盛土に関しては、当然、その耐用年数が来るまでにその機能のチェックをする必要がある。土構造物の盛土材料は、表面水の処理と内部に浸透してきた水の排水が鉄則である。しかし、表面は草が生え、表面排水路の接続部が変形していることがある。排水路の変形は盛土の変形に対して剛なコンクリート構造物の変形が追従していないために生じる。このような変形箇所には豪雨時、表面水が集中し、土構造物が侵食され、より一層表面が変形し、水路によって周囲から表面水が一層集まる状況になってくると、盛土の安定は難しくなる。今後は、盛土のこのような変形に関して、表面を「光ファイバー」等によりモニタリングする方法が考えられる。盛土の沈下、変形も IC タグを内蔵した杭で計測する手法や、GPS の精度が良くなると宇宙から斜面全体の計測が可能となる時代が来ると考えられる。

盛土のもう一つの危険な点は、盛土内に施工時に放置した盛土内の排水用のドレーンの目詰まりである。排水用のドレーンが目詰まりして、盛土内の地下水位が上昇していると、近年岩国であったような大規模な盛土崩壊が生じる。また、地下水位が上昇すると、地震時の盛土の強度も弱くなる。

このような盛土内部の状況の変化を、全体的な物理探査によって計測する方法も考えられる。また、ただ単に水位計測用の井戸が複数あれば、それだけでも盛土内の状況が推測できる。しかし、現実には、盛土施工時の図面もなく、観測井で長期にわたって地下水位をモニタリングしている盛土もほとんどない。これからは既存のこのような盛土の安定性の評価のための総合的なモニタリング技術の開発とその修復技術の開発が必要である。

### (2) 堤防の安定評価

河川堤防の安定性の評価に関しては、国のマニュアルができて少しずつではあるが良くなっている。しかし、長い堤体そのものの全体の構造すら分からない状況であり、堤防の安全性の評価はまだまだこれからの課題と言える。堤体の構造を知り、それぞれの材料の浸透と力学特性を知ったとしても、過去に経験したことの無いような洪水時の安定評価をするためには、不飽和土の力学が確立されていないので、安全率等の評価はまだ無理であると言ってもよい。しかし、現状では既存の技術で安定評価を行っている。

堤防の場合も「堤防の中に水を入れない、入った水はす

みやかに排水する」と考えるのが鉄則である。したがって、河川と反対側の法尻に排水用ドレーンを設置することは極めて有効である。また、そのドレーンの機能のモニタリングが必要である。

堤防の安定性をさらにリアルタイムで評価するには、堤防内の間隙水圧をモニタリングすることや、堤防内の浸潤状況を知るために飽和度の変化のモニタリングも実施できると良い。前者については光ファイバーを用いた計測システムが実施されており、後者についても光ファイバーによる新しい土壌水分のモニタリングシステムの開発がなされようとしている。

### (3) ロックフィルダム、アースダムの安定評価

土構造物の中で最も良く管理されているのは電力、治水や農業用のこれらのダムである。ダムの変形のモニタリングもなされており、内部の間隙水圧の分布の計測もされている。そして、底部からの漏水量の計測とその濁度の計測もなされている。このような土構造物の管理での課題は、近くで地震等があった時に内部や外部でどのような変状があり、それが安定にどのように関係するかを判断することである。したがって、雪が降っているような状況においても、評価できるようなシステムの構築が必要である。無論、漏洩水の濁度は内部侵食が生じているかいないかの貴重な評価データであり、これに関しての精度の向上も期待する。

### (4) 斜面安定の評価

斜面の安定評価は、これからの大きな課題になる。人工斜面にしても、自然斜面にしても、気候変動による集中豪雨に耐えられるかどうかは、本当に分からない状況である。過去の経験が使えないような気象の中で、何を基準にすべきかが、大きな課題になる。

斜面の安定のためにモルタル噴き付けをしている所も多いが、あれは表面だけの処理である。今後は、斜面の内部の土にセメントを注入して、斜面の強度を補強するような工法が考えられる。また、斜面安定を補助しているロックボルトやグラウンドアンカーの管理も重要であり、コンクリートと金属を用いて斜面を安定させている多くの長大斜面の診断手法の確立を期待する。このような斜面の安定診断は盛土と重複するのでここでは割愛するが、斜面内にも「水を入れない、そして入った水はすみやかに排水する」ことが基本である。

今日では画像による変形のモニタリングが可能になってきている。また、その手法も安価になってきているので、IC タグを内蔵した杭等を組み合わせた変形の自動モニタリングが可能なのはそれほど先とは思われない。ただ、斜面内部の地下水のモニタリングをもっと進めるようにする必要がある。

斜面安定の中に落石の問題がある。落石の危険性のある石はある程度判明しているので、いつその石が動くかが大きな課題である。これに関しても、IC タグを用いてそれぞれの石の動きをモニタリングして、道路や列車に通報できる時代がすぐに来ると考えられる。

## 6. おわりに

地盤環境分野の将来に関して何が必要であるかを私見も含めて論述した。気候変化による災害に対してどこまで「防災」できるだろう。「防災」するだけの財力が国にはないので、「減災」を考え、一番大切な命を守れば良いから「避災」を進めている。災害が起こった時に住民にアナウンスをして避災するのがいちばん良いかもしれない。しかし、「少子高齢化」のこの日本において老人を誰が助けて避災させてくれるのか。助けてくれる人がいなくて、「地すべり」で老人ホームの老人が被災した例もある。「避災」に関しての根本からの考え方を変えておく必要がある。

災害に対して、平素からのトレーニングが必要である。いくら危機管理の立派なマニュアルを作っても、何回か訓練をしないと何もならない。本来、訓練は面白くないものである。先人は、災害時の訓練のために「祭」を行っていたと思う。一つのことをなすために皆がお金を出し、協力し合って楽しい集団行動をする。それを伝統とする。それが祭りである。皆が協力し合って行動すると、お互いのことが分かり、その地区の住民の顔が見えてくる。これによって、危機の時に相互補助ができると思う。「避災」をするには「祭」を大切にすることが必要である。

災害に対してのモニタリング技術は電子機器の進歩でどんどん進化している。しかし、修復技術等はまだまだ進化していない。「科学は人を幸せにするためにある」のだと考えると、「人の命を守る研究」がもっとなされるべきであるような気がする。

## 参考文献

- 1) 福嶋義宏, 谷口真人編: 黄河の水環境問題—黄河断流を読み解く—, pp259, 2008.