

環境問題における地盤工学の役割

On the Role of Geotechnical Engineering in Environmental Problems

陶 野 郁 雄 (とうの いくお)

山形大学教授 理学部地球環境学科

1. はじめに

著者は、1967年から東京工業大学で地盤沈下問題に取り組むようになり、1981年からは国立公害研究所において全国の地盤沈下問題を取り扱うようになった。さらに、1990年からは国立環境研究所において地盤内で生じた様々な環境問題について対処してきた。このような経験を基として、環境問題への地盤工学的な取り組みやその役割について述べることにする。なお、本文は文献^{1)~3)}を参考にし、新たな知見を加えて述べている。

2. 地域の環境問題

最近、「公害」という言葉をあまり目にしない。その代わり、「地域環境」という言葉をよく耳にする。1993年に「環境基本法」が誕生したことにより、公害という言葉が使われなくなったようである。前身ともいえる「公害対策基本法」が1970年に改正された。その中で、地盤沈下はいわゆる典型七公害の一つとされた。環境庁（現在は環境省）の誕生はその翌年の1971年である。

2.1 生物多様性の保全と持続可能な利用

我が国は島国である。複雑で変化に富んだ海岸と浅海は、水質浄化の場であると共に、豊かな生物資源の場ともなっている。ところが、海岸付近に人口や産業が集中したこともあり、埋立てや水質の悪化などによって著しく環境が劣化した地域となってしまった。海岸線も今では90%以上が人為的なものになってしまっている。

淡水と海水が混じり合う河口付近の浅海域は、栄養価が高く、プランクトンが大量に生まれる所となっている。ところが、世界一の魚の宝庫とも言われた東京湾羽田沖の現状、あるいは諫早干拓事業などの影響を受けた有明海の現状は数十年前とは比べようもないくらい環境が変化している。内湾や大陸棚における魚介類などの生物資源の減少は、乱獲だけでなく、底泥の富栄養化、海洋投棄や埋立てによる影響も大きい。内湾におけるヘドロの堆積や貧酸素水域の発生も防ぐ必要がある。

河川にダムを建設することによっても環境影響は生じる。ダムを造ることによって生じる影響としては、河口付近の浅海への堆積土砂量の減少と海岸線の後退、魚類の移動阻害などがすぐに浮かぶが、それだけではない。土砂や浮遊物と共に河川から浅海に供給される栄養分も減少する。このことは、プランクトンの発生量が低下する可能性が高く、貴重な資源である魚介類を失うことに



写真1 生産量と質の低下が問題となっている有明海の海苔養殖（佐賀県有明町沖）

つながる。

さらに、下流域において蛇行していたものを直線的に流れるように変えてしまったことが、水環境を悪化させ、多様な生物の生息・生育の場を失わせる一因となった。その逆に、利根川遊水池などは、豊かな自然環境を保ち、貴重な生物の生息の場となっており、生物多様性の保全に貢献している。

このような環境劣化に地盤工学の研究者や技術者が少なからず手を貸してきた。これからは、環境破壊者となるのではなく、失われた自然環境の再生や修復に関わり、生物多様性の保全と持続可能な利用に対して寄与できるようにしてほしいものである。

生物多様性を失わせるものとして、最近何かと話題となっているマングースやブラックバスなどの移入種、環境ホルモンやダイオキシンなどによる化学物質による環境汚染が挙げられる。その他、地球規模による温暖化、酸性雨、オゾン層の破壊、熱帯林の減少、砂漠化、および上述のような開発を含む人為的な影響によっても危機的な状態に近づいていく。

環境省において展開しようとしている施策の一例を示す⁴⁾。

- 環境に配慮した農業農村の整備
- 道路整備における生物多様性の保全への配慮
- 下水道事業における生物多様性の保全
- 都市における緑地の保全・創出
- 河川における生物の生息・生息空間の保全・復元による生物多様性の確保
- 水量・水質が確保された清流の復活による生物多様

総 説

性の確保

- 海岸環境の保全・整備，砂浜の保全・回復，および渚の創生
- 干潟・浅場・藻場および臨海部の大規模緑地の保全・再生・創造
- 汚泥浚渫，覆砂事業などによる水質等海域環境の改善

このような施策に地盤工学は深く関与していかなければならないと考える。

2.2 健全な水循環と地盤環境

水はよく「みどりの地球」の血液といわれている。更新可能な水循環は持続可能な社会を構築するためには不可欠なものとなっている。このためには，地下水を中心とした流域の健全な水循環を確保していく必要がある。

地下水は水質が良好で取水も容易に行えることなどから，身近な水源として利用され続けている。最近では，都市用水の約30％を地下水に頼っている。

1960年代末から地下水の過剰揚水に伴う地盤沈下や地下水障害に対処するため，地下水採取規制などの取り組みがなされてきた。このようなこともあり，最近では地下水位がかなり回復してきており，それに伴って地盤沈下も沈静化してきている。

このようなことを背景として，地下水の有効利用を求める声が高まってきている。そこで，地盤沈下を起こさない安全地下水位に関するデータや知見を集積している。後述するような消雪用や渇水時など一時的に地下水の利用が急増することなどにも対処し，より適切な地下水管理が行われるようになってきている。

59豪雪と言われている1984年の豪雪によって全国一の年間沈下量10.1 cmを記録した上越市では，同年の12月から上越地域地盤沈下緊急時対策を実施した。緊急時対策とは，地下水位の低下が著しく，地盤沈下が進行する恐れがある時に，注意報や警報を発令するものである。雪を消すために地下水を多量に揚水することから，12月1日からの地下水位低下量によって発令している。地下水位などの測定からデータ処理までをリアルタイム化したことにより実現化した。地下水位の低下が注意報の範囲であれば，年間沈下量は1 cm程度であり，最大でも2 cmを超えることがないように設定した。これに使われている地盤沈下監視電話装置（写真—2）は，地盤沈下のテレホンサービスともなっており，冬期間0255(22)1040に電話すると，1分刻みで高田 G2 観測井の基準日からの地下水位低下量や地層収縮量などが分かるようになっている。

今冬はおよそ20年ぶりの豪雪となった。20年前とは比べものにならないくらい消雪パイプが敷設されている。しかし，新潟県の上越市や南魚沼市などの豪雪地帯では，様々な対策が施されており，年間沈下量は20年前に比べると，非常に小さくなるものと思われる。

上越市の高田 G2 観測井の記録をみると，2005年3月3日に最大値を記録しており，12月1日からの地下水位（水頭）低下量が8.2 m，地層収縮量が2.73 cm となって



写真—2 新潟県上越市にある高田 G2 観測井の地盤沈下監視電話装置

いる。注意報ラインを少し突破したが，雪が降らなくなれば，地下水位も回復していき，地層も少し膨張するので，年間沈下量は2 cm 以内に収まるものと推測される。

富山県は各地域の平野部に広範囲な自噴地帯が存在している。しかし，近年少しずつ自噴が減ってくるようになった。そこで，全県の地下水流動解析を行って，地下への涵養量を地下水揚水量が上回らないよう，平野部に地下水区を細かく設け，地区ごとに地下水の年間適正揚水量を1992年に設定した。その後も地下水の塩水化，地盤沈下，冬期間の地下水位低下などを考慮したさらに細かい揚水量の設定を行うための調査研究を行っている。

東京は都市化が進み，コンクリートやアスファルトなどによって地表が覆われるなど雨水が地中に浸透しにくくなり，地下水の涵養が減少してきた。一方，地下水を多量に揚水したことにより，地下水位が大きく低下してきた。このことにより，都市の環境に大きな影響を及ぼすこととなった。極めて顕著な地盤沈下が発生しただけでなく，数多くの地点で湧水が枯渇し，その上ヒートアイランド現象なども生じてきた。

今年に入って，東京都北区の沖積低地で千数百 m 掘削した温泉ボーリング地点で火災が発生した。水溶性天然ガスに引火したものであった。この地点は南関東ガス田の中で東京ガス田といわれている地域に隣接した所である。南関東ガス田は千葉県を中心として神奈川県，東京都，埼玉県，茨城県の1都4県にまたがる鉱床面積約4 300 km²の広大な水溶性天然ガス田である⁵⁾。また，地層の割れ目，古い深井戸，ボーリング孔跡を通して沖積層である有楽町層の直下にある更新統上部の砂・礫層まで水溶性天然ガスが上がってきている可能性がある地域でもある。このような地域において，今までときどきガス爆発事故が生じている。

今，南関東は火山性の温泉ではない温泉の掘削ブームといえるほど，温泉掘削申請が多くなっている。環境省資料による源泉数は，埼玉県さいたま市では1999年度末までなかったものが，2001年度末には3と，蕨市と戸田市の合計では2001年度末にはなかったが，2003年度末に3と増えている。また，東京都足立区では1997年度末までなかったが，1999年度末から1に，江戸川区では，1993年度末にはなかったが，少しずつ増え

2003年度末には4に、葛飾区では2002年度末までなかったが、2003年度末には1とそれぞれ増えている。このような温泉水は、大昔の地下水であり、水溶性天然ガスを賦存している可能性がある。かつて、東京都、千葉県、埼玉県では年間20 cm以上沈下していた。特に、東京都江東区で4.5 m、千葉縣市川市で2.1 mの累積沈下量を記録している。1970年代に東京都の江東地区から千葉県の船橋地区において水溶性天然ガスの採取を規制し、廃止させたため、地盤沈下が収まった経緯がある。温泉ボーリングの掘削を何の規制もなく許可し続ければ、これらの地域では地盤沈下問題が再燃する可能性がある。東京都だけでゼロメートル地帯が124 km²もあり、その中に200万人近い人が生活している。これ以上地盤沈下を生じさせれば、海水面下で生活している人がさらに増えることになるだけでなく、海岸堤防の安全性も損なわれることになる。最近、東京直下地震が騒がれているが、もし海岸堤防が壊れるようなことになれば、1959年9月の伊勢湾台風時における濃尾平野の二の舞になる。

化石燃料の大量消費などによって、地球規模の温暖化が生じている。2月にやっと京都議定書が効力を発揮するようになったが、最大消費国であるアメリカが加わっていないことや、成長著しい中国あるいはアフリカ諸国などの発展途上国が対象外となっているため、実際に温暖化が防げるかとなると疑問である。

温暖化により海水面が上昇すると、上昇しただけ世界中の海岸平野が一斉に地盤沈下を起こしたことになる。生活区域の大半を失う可能性があるところは少なくない。海岸付近が海底に沈み、平野が後退して新たな堆積の場が生まれる。温暖化によって、降雨・降雪現象に変化が生じるといわれており、水資源や植生などに影響を及ぼす。堤防で海水の侵入を防ぐと、ゼロメートル地帯が増え、水害をはじめとした災害危険度が増大する。

3. 地下の開発と環境問題

「大深度地下の公共的使用に関する特別処置法」が2001年4月から施行されている。申請されそうな事業はあるが、今のところ1件の申請もなされていない。

東京を例にとると、大深度地下は、①図-1に示した支持地盤上面より10 m以上深いところ、②地下室の建設が通常行われない深さ、つまり地表より40 m以上深いところ、のいずれか深い方の深さの地下を意味している。

今考えられているのは、深くても100 m程度である。このような深さは未だ石化していない堆積層であり、工学的には土質地盤といえ、地盤沈下の対象層でもある。

この法律のメリットとして以下の四つが挙げられている⁶⁾。

- 1) 上下水道、電気、ガス、電気通信のような生活に密着したライフラインや地下鉄、地下河川などの公共の利益となる事業を円滑に行えるようになる。
- 2) 合理的なルートの設定が可能になり、事業期間

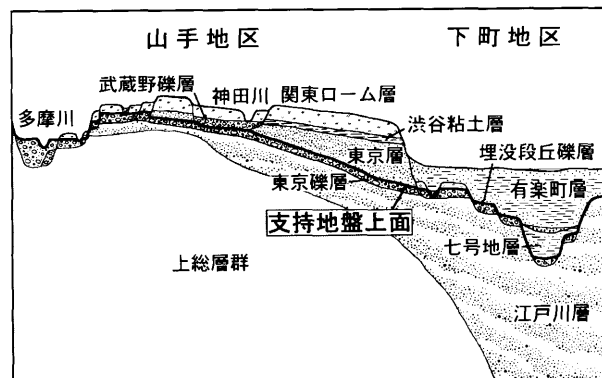


図-1 東京の地盤、陶野郁雄 (1990)¹⁾に加筆

の短縮、コスト縮減にも寄与することが見込まれる。

- 3) 「早い者勝ち」や「虫食い」的な利用による大深度地下の無秩序な開発を防ぐことができる。
- 4) 大深度地下は地表や浅い地下に比べて、地震に対して安全であり、騒音・振動の減少、景観保護にも役立つ。

自然の中に人工の構造物を造れば程度の差はあるが、必ず自然環境に影響を及ぼす。したがって、構造物の建設によって自然環境がどの程度影響を受けるのかを的確にとらえておく必要がある。このことは、地下においても同じである。

大深度地下の開発に伴う地盤・環境への影響については、今までの地下開発で経験を有しており、ある程度予測がつくものと、事例はないが、過去の調査研究成果から発生が懸念されるものと、現状では全く想像がつかない不測の出来事とがある。事例がないものについては、不安が先行する恐れもあるし、大きな過ちを犯す可能性もある。

一般に、酸素の供給が欠乏した地下水面下にある地層は、軟らかい土が硬い岩になる続成過程にある。逆に、酸素の供給が十分な地下水面上にある地層は、硬い岩が軟らかい土になる風化過程にある。地下水面下にある酸素が欠乏した地層に、酸素が供給されると、様々な環境の変化が生じるだけでなく、地盤の強度や剛性も低下する。よく知られたことであるが、酸素が欠乏した還元状態の砂・礫層を掘削すると、砂・礫層は急速に酸化され、酸欠層となる。酸欠層から酸欠空気が噴出して事故を招いている。このような事故は1950年代から現在まで発生し続けている。地下水位が上がってきたこともあり、1970年代後半から地下水面上に溜まっている酸欠空気が地下室に侵入して事故が発生している。

酸欠層を空気に触れさせると、1 m³ 当たり約600 lの酸素を大気中から吸収することになる。地下を掘削することにより、酸化される地層の体積を計算してみれば、いかに多量の酸素が失われるか分かると思う。また、残土の捨て場の確保が年々困難になってきている。新たな残土の使い道や処理方法を早急に開発していく必要がある。

総 説

地下水面下にある海成粘土層の中には黄鉄鉱 (FeS_2) などの形で硫黄が多く含まれている。それが、開発などによって、酸化することになると、発熱現象を伴うので、地盤が著しく高温になるだけでなく、地下水は強酸性を呈するようになる。地下水が強酸性を呈するようになると、埋設された鉄管や鋼管杭の腐食を著しく促進させることになる。

地下構造物は、その役目を終えても造り直しが難しいという大きな問題がある。大深度地下空間を利用する場合、その中に存在する構造物には耐用年数があっても、空間自体は半永久的に陥没などの大変形を生じさせてはいけない。20年近く言い続けていることであるが、その解決策の一つとして、地下空間の利用が終了したら、その空間をふさぐため、元（施工前）の地盤と全く同じ地盤を造るという技術開発を行う必要がある。

少々苦言も呈したが、安全で快適な環境の下で大深度地下空間利用がなされることを願っている。

4. 地球と人類

これも、ずっと以前から言い続けていることであるが、地球に何らかの作用を及ぼそうとするときには、常に「自然との調和」を図っていくことが肝要である。環境を破壊し、子孫につけを回すようなことは許されることではない。20世紀後半は環境を破壊し続けた半世紀ともいえる。21世紀の地盤工学は環境に優しいものであってほしい。

4.1 人類の系

地球は今から46億年前に誕生した。これを1年と仮定すると、人類は数時間前に誕生したことになる。1時間前に火を使うようになってから自然を破壊するようになったが、ほんの1秒前までは地球の系の中で活動していた。ところが、20世紀に入ると、人類は地球の系を飛び出し、独自の系を構成し始めた。この人類の系が自然の摂理をしばしば破壊し、地球の系を脅かすようになってきた。地球規模の環境問題がその代表的な例といえる。

宇宙・海洋・地下の三つの空間をターゲットにして開発を進めようとしているニューフロンティア構想も人類が独自の系を誇示しようとしている表れかも知れない。できれば、人類は独自の系をあまり誇示しないで、地球の系に優しい系であってほしい。

4.2 我が国の自然環境と災害

日本は、地球上で最も地殻変動の活発な地域の一つであり、地下では幾つものプレートが押し合いへし合いしている。しかも、活発に地殻変動が生じていることによ

り、山地の斜面や河川の勾配は一般に急峻で、斜面崩壊を起こしやすい地形となっている⁷⁾。

プレートが押し合いへし合いしているため、地震活動や火山活動が活発となり、これに伴う災害の危険性が常につきまとうことになる。その反面、美しい景観や豊かな自然環境を生む源にもなっている。

縄文海進による著しい海面上昇とその後生じた若干の海退のお陰で最も新しい地形面である沖積平野が誕生した。平野は広く分布しており、その地盤は軟弱な地層によって構成されている。表層は豊かな土壌となっており、良質な水が豊富に得られることもあり、今日ではその上に1億人近くが生活している。また、降雨量が多く、夏や秋には集中豪雨や台風、冬には日本海沿岸地域で豪雪にしばしば襲われる。災害を防ぐ必要性の高い所ともなっている。地すべり地は、豊かな土壌と良質な水を豊富に得られるところである。沖積平野も地すべり地も昔から人が集まり、集落を形成しており、豊かな自然環境と災いの両者とつきあいながら生活してきた所といえる。災いを減らし、自然との調和がとれた社会を築いていくことに、地盤工学はもっと貢献してほしい。

最後に、プレートの持つエネルギーを利用しない手はない²⁾。このエネルギーはクリーンエネルギーであり、その量は莫大であり、半永久的に活用できる。実現すれば、地球環境の破壊因子の一つである原子力や石油に頼らなくてよくなる。しかも、うまく活用すれば大地震の発生を妨げる可能性がある。これこそ真の大深度地下利用といえるのではないか。この事業を開始すれば、様々な技術が飛躍的に発展することが期待でき、しかも学問分野への貢献も絶大であると考ええる。

参 考 文 献

- 1) 陶野郁雄：大深度地下開発と地下環境，鹿島出版会，pp. 1～234, 1990.
- 2) 陶野郁雄：地球環境と地下空間－自然環境と都市地下空間の環境問題－，地下空間利用シンポジウム1993，土木学会，pp. 5～14, 1993.
- 3) 陶野郁雄：地球工学的な環境問題，巻頭言，基礎工，Vol. 23, No. 2, p. 1, 1995.
- 4) 環境省自然環境局自然環境計画課編：新生物多様性国家戦略，pp. 1～268, 2002.
- 5) 河井興三：南関東ガス田地帯についての鉱床地質学的研究，石油技術協会誌，Vol. 26, No. 5, pp. 212～266, 1961.
- 6) 国土交通省：大深度地下，パンフレット，pp. 1～13, 2002.
- 7) 陶野郁雄編：災害予測図作成手法に関する基礎的研究，文部省科研費重点領域研究成果報告書，pp. 1～126, 1991.

(原稿受理 2005.3.10)