

土質基礎工学研究連絡委員会報告
「環境地盤問題に関する報告」

平成 6 年 7 月 1 5 日
日 本 学 術 会 議
土質基礎工学研究連絡委員会

この報告は、第15期日本学術会議土質基礎工学研究連絡委員会の審議結果を取りまとめて発表するものである。

委員長	福岡	正巳（東京理科大学理工学部教授）
幹事	松尾	稔（日本学術会議第5部会員、名古屋大学工学部教授）
	青木	滋（新潟大学積雪地域災害研究センター教授）
委員	網干	寿夫（㈱網干寿夫研究所所長）
	石原	研而（東京大学工学部教授）
	遠藤	正明（㈱竹中工務店専務取締役）
	岸田	英明（東京理科大学工学部教授）
	佐武	正雄（東北学院大学工学部教授）
	柴田	徹（京都大学工学部教授）
	谷本	喜一（㈱建設工学研究所常務理事）
	中瀬	明男（㈱日建設計特別顧問）
	山内	豊聡（九州産業大学工学部教授）

目 次

はじめに	1
1. 本報告作成の経過	2
2. 環境地盤問題の現状と将来	2
3. 汚染地盤対策	
3.1 対策の手法と課題	3
3.2 汚染土、汚染地盤の改良	4
3.3 産業廃棄物の処理	4
4. 処理場施設	
4.1 ランド・フィル（廃棄物の最終処分場）	5
4.2 大深度地下空間への有害廃棄物の処分	5
5. 廃棄物の活用	
5.1 建設残土の活用	6
5.2 産業廃棄物の活用	6
5.3 家庭廃棄物の物理的・化学的経時的変化と跡地利用	7
6. 建設と環境地盤問題	
6.1 建設工事と環境問題	7
6.2 開発工事が誘因となる環境変化	8
6.3 ジオシンセティックを利用した環境対策	9
7. 自然災害と環境地盤問題	
7.1 自然災害と地盤問題	10
7.2 自然災害防止対策や環境対策の効果の評価	10
8. 境地盤工学のための力学と設計	
8.1 新しい力学の在り方—マクロメカニックスの提案—	11
8.2 使用エネルギーを考慮した地盤設計法	12
9. 研究・技術開発のための体制上の問題点	13
10. 結び	15

はじめに

人類が地球上で生活する場は主として土の上であり、生活の基盤である道路、鉄道、港湾、空港、建築物、工場、通信施設、防災施設、リクリエーション施設等すべてこの地盤の上に建設されている。より便利で快適な生活が送られるようにするためにはこれらの施設を建設しなければならない。人口の増加と科学技術の発達に伴って施設建設の規模、速度は著しく増大している。施設の建設は自然条件の改変を伴う。また生活、産業活動の結果として大量の廃棄物が発生する。廃棄物は土中に捨てられ、土壌、地下水、地表水を汚染して、人体に吸収され、時には健康を害することもある。土の工学である土質基礎工学は1920年代に体系化された学際的な新しい工学であるが、創設当時に地下水の汲み上げによる地盤沈下の理論を提唱するなど環境と深い関わりを持ってきた。1977年に東京で行われた国際土質基礎工学会議以来、環境問題を真剣に討議し、関連の技術の開発に貢献してきた。

この様な背景のもとに本土質基礎工学研究連絡委員会では第15期の課題として環境問題を取り上げた。まず問題の所在を明らかにし、解決の手法を探り、研究の手段、研究の体制等にメスを入れた。委員各自が得意とする分野についてレクチャーを行い、これを討議して委員会の意見をまとめるという方式を採用し、最後にこの報告書を取りまとめた次第である。

平成6年 月

土質基礎工学研究連絡委員会
委員長 福岡正巳

1. 本報告作成の経過

土質基礎工学研究連絡委員会では、第14期に「土質基礎工学の在り方－21世紀に向けて」と題する報告を提出した。第15期においては、これを受けて特に重点的に取り組むべき課題として、環境に関する土質基礎工学の問題点を取り上げた。また、第16期からは研連の名称も土質基礎工学研連から地盤環境工学研連へと変更することにした。

環境地盤関連諸問題は多種多様で、緊急の研究、技術開発を必要とする事項が山積みしている。しかもこれらは、広範な他分野と深い関係をもつ学際的、横断的分野であり、従来の土質力学、土質基礎工学では取り扱ってこなかった未知の問題を多く含んでいる。

第15期の10回にわたる研連委員会においては、各委員が特定のテーマについて順次報告するとともに、随時外部から講師を招いてレクチャーを聞き、議論を重ねた。

各委員は、自己の報告テーマについて委員会討論も含めた内容の要点をまとめた。これら、いわば分担執筆されたものを取りまとめて編集したのが本報告である。

2. 環境地盤問題の現状と将来

1) 地球規模の環境問題の中で特に大きく取り上げられているものに、CO₂による地球温暖化、酸性雨による植物の枯死、フロンガスによるオゾン層の破壊、原子力の廃棄物、熱帯樹林の減少、砂漠化等の問題がある。そのほか人為的なものとしては、人口、食糧、戦争、政情不安等がある。その中で土質基礎工学の環境への貢献はいかにあるべきかを考える必要がある。建設省に建設大臣の私的諮問機関として建設開発会議が設置されているが、そこで最近取り上げられたのは、建設型枠の問題であった。1970年代までは型枠は鉄であったがその後アメリカ式に軽くて使いやすく、かつ、経済的なベニヤの型枠を使うようになり、その量は次第に増え続け、ただ今では大変な量になっている。型枠の量を減らす方法としてはなるべく型枠を使わないようにするとともに、同じ型枠を何回も繰り返して使う工夫をする。例えばジオテキスタイルを内側に張るのもよい。修繕をして使ってもよい。基礎や土工事には沢山の材料を使うが、リサイクルをしないで新しいものを使うケースがほとんどである。新しい材料を使う方が便利で労力が省け、工事期間も短く、経済的だからである。しかしながら、工夫次第でリサイクルした材料を使う方法が見いだせるはずである。

2) 土工や基礎工事では大量の資材と燃料を使う。建設機械やダンプトラックの燃料の節約が環境改善に必要であることは、容易に理解できよう。建設資材を製造するために、大量のエネルギーが消費されていることはあまり認識されていないが、工事関係に直接使うエネルギーの5倍以上も使われているのである。土の材料にどれだけエネルギーが使われているかを分析し、これを公示し、設計者に知らせておき、エネルギー消費量がなるべく少なくなるようにすればよい。発注者も多少の経費高になっても協力するようにすればよい。事故を恐れる余り、あ

るいは官庁や学会の示方書に縛られて過大設計をしている例が多い。学問が未熟なために工事期間中並びに竣工後の使用中の構造物のビヘービヤの予測ができず、そのため過大な安全率を見込まなければならなくなり、結局不経済で、エネルギーの無駄使いをしている。このような弊害をなくするため技術の研究が必要である。基準や規格をエネルギー節約という視点から見直す必要がある。

3) 産業廃棄物、都市廃棄物、下水汚泥、建設廃材、建設残土の処理は正に土工、基礎関係者の仕事である。産業廃棄物、都市廃棄物は政府の環境基準がアメリカほど厳しくなっていないので、環境汚染の心配がある。これらを解決するためには、土質基礎工学の一分野としてのジオシンセティック工学の研究と利用が必要であろう。下水汚泥は改良して有効利用するが、大量に出るので、埋め立てに使われることになる。ここでも産業廃棄物や都市廃棄物と同様な取り扱いが必要になる。建設残土は、量的には一般の廃棄物よりはるかに多い。その有効利用はこの分野の課題である。

4) 基礎、土工関係は範囲が広く、環境改善に短期的に大幅の改良をすることは困難である。一見小さな改善でもたゆまず積み重ねていくのがよいと思う。最近の成果の一端を次に述べる。

関西空港の工事では海洋汚染を防ぐために、ジオメンブレンの遮断幕を張り巡らした。東京港横断道路の工事では鋼管セルで人工島の周りを最初に囲んで泥水が外に流れないようにした。都市内のトンネル工事はシールドとし、シールド発進のために使う縦坑の数を少なくするためドッキングの技術を開発した。残土の量を減らし、使用するエネルギーを減らした。シールドの代わりに NATM 工法を都市にも使うようになって、材料とエネルギーの節約に役立っている。アースドリル工法、逆打ち工法、ソイル柱列工法、埋め立て地盤の杭打ちをやめて、ジャッキアップを使う工法、液状化防止工法、気泡シールド工法、仮設 H 鋼をそのまま永久構造物の一部に使うこと、超流動コンクリート、ジオテキスタイル、EPS 等を使う。日本では山を切り取って道路、鉄道、住宅の建設をすることが多い。その際なるべく自然を破壊しないようにするためには、アンカー工法、グラウト工法の一層の研究開発が必要である。また緑化工法も重要である。

5) 自然災害も、人間の環境を破壊する。災害による被害を極力減らすための科学技術の開発に、環境地盤工学が役立つ面が多い。1964年の新潟地震で世界的に注目を浴びた液状化地盤の問題は、対策面で各種基礎工法が開発されるとともに、地盤の特性から、各地で液状化発生予測地域の防災図（バザードマップ）が作られている。

以上述べたように、環境、エネルギー、防災などの点でも、環境地盤問題は、いろいろなテーマを抱えており、今後、多角的かつ継続的に科学技術の開発と諸問題の解決に取り組む必要がある。

3. 汚染地盤対策

3.1 対策の手法と課題

先端的産業の盛んな地域では、その廃棄物（特に有害物質）によって周辺地盤

が汚染されることが多いと思われる。地盤が既に汚染されている場合、汚染物質、汚染の現状並びにその範囲などが明らかにされていることが少なく、不確定要素が非常に多いことがその特徴である。そのため、この汚染地盤修復の問題は、状況を十分に把握して対策を講ずることが可能な新設の廃棄物処理場の場合のように、将来を見越した環境問題とは大きく異なっている。実際に汚染された地盤が特定できれば、各種の地盤調査を行って汚染要因に応じた修復対策を講ずることになるが、汚染物質が不明であれば採用した対策がかえって新たな汚染問題を起こす可能性もある。また、汚染状況が既知であっても、作業員の健康管理の面から見て、在来の地盤調査手法がそのまま適用できない場合も有り得る。

このような汚染地盤の修復対策を進めるに当たっては、社会的並びに技術的な両面からの考慮が必要であろう。社会的な問題としては、地盤の汚染修復の実効を挙げるといふ基本的な問題が、汚染の責任を追及する運動によって妨げられる恐れがあることである。汚染地盤修復の問題においては、地域住民の理解とある程度の参加が必要となるが、過去のこの種の社会的問題におけるマスメディアの異常な過熱振りから見ると、この問題の本質を冷静に理解させるための啓蒙運動が必要と思われる。

技術的な問題は、汚染地盤の調査とその修復対策において在来の地盤工学のほとんどの手法が適用できると思われるが、個々の汚染物質に応じた適用法の研究が必要なことである。また、この問題は地盤工学技術者のみでは不十分と思われるので、化学的並びに生物学的な知識を持つ専門家との共同作業が必要と思われる。実際の作業に当たっては、作業員の安全並びに健康管理の問題の重要性が非常に大きくなるので、汚染地盤修復の作業を対象とした研究と教育が必要となる。

3.2 汚染土、汚染地盤の改良

地盤の汚染の原因となる有害物質としては、重金属系のもの、PCBなどの有機合成化合物、メッキ処理に用いられる無機毒物など、種々のものがある。これら汚染地盤に対しては、まず汚染範囲を調べ、その範囲を越えて汚染が拡散しないように汚染地盤を封じ込めることが実際的である。このために有効と思われる手法は、固化剤との混合により汚染物質を固化土の構造内に固定し、汚染地盤を無害化することである。在来の地盤工学では、固化剤を混入して軟弱地盤を改良する技術がある程度まで開発されている。しかし、汚染地盤の修復を対象とする場合には、汚染範囲の調査手法とともに、各種の土と汚染物質に対して、汚染物質の固定を主眼とした地盤固化技術の研究が必要である。

3.3 産業廃棄物の処理

有害廃棄物の他に、各種産業から排出される大量のスラリー状あるいは個体状の廃棄物の処理の問題がある。特にスラリー状の廃棄物はその廃棄範囲が大きいことが問題で、その区域を運動場や庭園として使用することなどが要求されている。超軟弱な粘土にセメント系固化剤を混合してある程度の硬さに改良する技術は既に実用化されているが、産業廃棄物としてのスラリーの固化技術の開発は今

後の問題であり、対象とするスラリーに応じた固化剤の選定、その混合方法、固化の効果の経年変化などの研究項目が指摘されている。

4. 処分場施設

4.1 ランド・フィル（廃棄物の最終処分場）

前国際土質基礎工学会会長である J. K. Mitchell は、汚染地盤の矯正 (remediation)、地盤修正 (groundmodification) 及びランドフィルのために、18種の技術の開発を示唆しているが、これらは、在来の土質基礎工学の研究と実際を応用できるものが多い。特に深層混合や地中連続壁工法、注入工法は、日本の技術として評価が高いが、電気浸透もまた実績を持つ。

欧米のランドフィル等への開発指向には、在来の土質基礎工学からの新しい技術転換の意欲がうかがわれる。また日本でも盛んなジオテキスタイル・ジオメンブレンが大いに応用されつつあることにも注目すべきであろう。

日本は北米よりも降雨量が著しく多く、また雨台風が頻繁に襲う。日本は、東アジアモンスーンの影響を直接受ける気象条件の下にある。地盤汚染の矯正は比較的短期間に処理できるであろうが、長年月にわたって維持管理しなければならない欧米流のランドフィル等が、人口稠密で用地の取得が困難、かつ雨量の多い日本において、そのまま応用できるとは思われない。日本の国土・気象条件にも有用なランドフィル等の研究開発が、強く望まれる理由である。当然、固化やコンパクト化の技術が処理過程に加えられるべきであろう。

さらに、東アジアの開発途上国へ製造技術を移す時には、廃棄物処理場の技術をバランスよく伴うべきであるが、現状ではまだ、そうした認識は乏しいように見える。東アジアモンスーン地域に適したランドフィルの技術開発は、日本の果たすべき国策的課題とさえ思われる。

4.2 大深度地下空間への有害廃棄物の処分

原子力発電所における核燃料サイクルの中で、再処理工程から高レベル放射性廃棄物が少量ながら発生する。又、処理水など低レベル放射性廃棄物はかなり多量に出ることが避けられない。その他各種の工業上や医学上の放射性同位体の使用による放射性廃棄物もある。

例えば、我が国の原子力発電所から発生し、地下空間へ処分する必要がある放射性廃棄物の量は低レベルのもので、西暦2000年にはドラム缶で約100万本、2020年には200万本に達するものと見積もられている。一方、核燃料再処理に伴う廃棄物や発電所の解体に伴って発生する高レベル廃棄物の量も、今後ますます増加するものと予想されている。

これらの核廃棄物は海洋投棄が認められない現在、地下空間の利用、特に大深度埋設によらざるを得ない。目下のところ、高レベル廃棄物については、ステンレス容器に安定なガラス固化の状態で封入し、30～50年間冷却保管し、放射能が自然放射能レベルまで低下した後に大深度地下に処分する方法が最も採用の可能性が高い。

一方、低レベル放射性廃棄物については、焼却、圧縮、蒸発等のプロセスによって容積を減少した上で、セメント、アスファルト、プラスチックなどで固め、ドラム缶に詰めて密閉する。これらを地下岩盤内に掘削された鉄筋コンクリート製のピットの中に堆積し、覆土して処分する、という方法が考えられている。

放射性廃棄物以外にも、一部の有害廃棄物については単なる埋立処分ではなく、地下空洞へ核廃棄物同様の方法で処分する方向に向かう可能性があるように思われる。これらは核廃棄物に比べて種類が多く、対応についてもその性質に応じた配慮が必要となってくる。

これらの有害廃棄物の大深度地下空間への処分については、地球物理学、地質学と土質基礎工学、岩盤力学の中間的な領域であり、広義的には理学と工学の両領域にまたがった問題であるといえよう。両領域の協力研究に待つところが多いわけであるが、大まかに分ければ地殻変動、活断層、熱水脈等、地質構造に関する分野については主として前者が、又地下空洞ないしはトンネルの周辺応力や変形、地盤、岩盤内の地下水流動等の問題については、後者が対応することとなるが、オーバーラップする研究分野も多いと考えられる。

本研連の関連する分野では、(1)大深度地下に存在する空洞やトンネルに作用する応力や変形、(2)その周辺における地下水流動特性、(3)その他廃棄物処分に関係する現象の追求・解明、によって究極的には、このような処分場のあるべき構造や満たすべき要件、有害物質の流出、浸透とその防止策など、具体的な対応策の確立を目指すこととなろう。

(注) この場合の大深度とは、深度1000～数千メートルの岩石圏も含んでいる。

5. 廃棄物の活用

5.1 建設残土の活用

建設に伴って排出される残土は、その発生源の地盤が汚染されている場合を除けば深刻な汚染の原因となることはなく、むしろ貴重な資源と考えられている。しかし、建設残土は非常に大量に排出されること、またその排出量が地域的、時間的に変化することが、その有効かつ計画的な利用の障害となっている。小規模な建設の場合には、排出された残土をその周辺に盛り立てることによってバランスを探ることができるが、大量になれば新たな埋め立てや人工島の建設を行って処理をすることが必要になる。大量の建設残土を処理する際には、その運搬過程で周辺環境にかなりの影響を与えるため、既往の大規模建設の事例では、環境への負荷の軽減のために各種の試行的手段が採られてきた。今後はこの問題を系統的に研究する必要があるが、その最終処理という面からすれば国土開発計画の問題にもつながるものである。

5.2 産業廃棄物の活用

建設残土以外の大量の産業廃棄物は、発生量の低減、焼却による減量などが進められているが、最終的には残土と同様の処理をすることになる。これらの産業廃棄物を残土と同様に埋め立てや人工島建設に利用する場合の問題は、一般の土

と異なる工学的性質を持っていることである。在来の地盤改良工法が有効でない場合や、改良に成功しても経時的に地盤の強度が減少する場合もある。さらに、廃棄物の種類によっては、有害ガスが発生するなど、在来の地盤工学で未経験の問題も現れている。したがって、産業廃棄物の活用における問題は、在来の地盤工学をこの新しい土材料を対象として拡張することであろう。

5.3 家庭廃棄物の物理的・化学的経時変化と跡地利用

いわゆる家庭の廃棄物については、通常、海岸部や陸地の凹地部が使用されている。廃棄された廃棄物は、30年以上経過するとほぼ土と化し、一般にその跡地を利用しようとする計画が生ずる。既に現在、例えば、東京夢の島熱帯植物館などの実施計画が検討されている。この場合、従来土質力学、地盤工学では経験しなかった未知の問題が多く存在する。具体的に挙げると以下のようである。

- ① 廃棄場の造成後、時間とともに沈下がどのように進行するのか、測定データが非常に少ない。特に、跡地に建物その他の施設を建設した場合、沈下の時間的変化や絶対量等の沈下特性についての知見は何もない。さらに、透水性や強度等に関する基礎的データも全く得られていないに等しい。
- ② メタンなどのガスの発生機構や発生量の経時変化が不明である。100年程度経過すれば、消滅するという説もあるが、未知の点が多い。過去の例としては、昭和40年代に山あいの谷間に約82万㎡の廃棄物を埋土し、客土をして造成した土地に中学校を建設したことがある。昭和48年から地割れした運動場から可燃性ガスが漏れて引火した。そのため、グラウンド周辺に長さ10m位の縦管を埋設し、これを導管につないで処理施設に導き、無害化を確認した上で、高煙突で放出した。このような処理を数年間続けてガスの発生が無くなったことを確かめて処理を中止した。このように、メタンガスについては、跡地利用に際する施工中の安全性、施設供用開始後の長期の安全性の確認の手法などが重要な課題となる。

6. 建設と環境地盤問題

6.1 建設工事と環境問題

人間の活動、特に各種建設行為、開発行為による地域環境破壊に対しては、昭和40年頃から、公害問題として注目され、現在では、環境影響に関する観測と対策がかなり進められている。昭和59年には、「環境影響評価の実施」についての閣議決定がなされ、それ以来、国及び自治体が決めた「実施要綱」に基づいて、大規模工事や開発行為に対して、影響評価作業が実施されつつある。また、平成5年11月12日に環境基本法が国会で可決し、第五節第二十条で、環境影響評価の推進がうたわれている。これらの動きを通じて、いわゆる“環境にやさしい”建設行為が進歩し、“災害を起こさない”開発行為が、一層進められようとしており、今後もこれらの研究開発が重要である。

例えば、建設工事における騒音や振動は法的規制が行われており、一応の目標値が定められている。杭打ち工事ではこの目標値を満足するために杭打ち機械に

防音カバーを被せる等の技術的改良が行われている。また杭打ちを行わないで、地盤に孔を掘りコンクリートを孔の中に打設して杭体を作成する場所打ちコンクリート杭の普及が最近では目覚ましい。

騒音・振動の代わりに、場所打ちコンクリート杭の排土が新しい環境問題として浮上してきた。この工法は地盤に孔を掘削するときに粘土鉱物（ベントナイト）を混入した泥水を使用するので、排土がベントナイトを含んだ泥土となる。この泥土は通常の土としての使用が不可能であり、現在では産業廃棄物として扱われている。地中連続壁を施工する時の排土も同様な取り扱いである。

最近では地下室を作るために掘削した土も土捨て場に困っており、工事現場から遠く離れた場所まで運搬するが多い。このために道路を土砂を積載したダンプカーが走り廻り、道路を汚すことになる。

建設工事では、騒音・振動が環境問題の中心的課題であったが、今後は工事現場からの排土が住環境を悪化させる大きな問題になると思われる。

6.2 開発工事が誘因となる環境変化

宅地造成などの開発に伴う建設工事が誘因となる地滑りや崩壊は、文字通り工事施工すなわち人為的要因による環境変化が主要な誘因となる場合を指し、自然的要因による一般の地滑りや崩壊と対照して見ると、安定性の検討において異なる取り扱いが要求されることがある。前者の特徴として次のようなことが考えられる。

- ①例えば山腹切取あるいは天端掘削などの施工によって地山に応力変化や水理変化を与えて不安定化を招く恐れがある。
- ②地滑りの発生後、特に災害を伴った場合、その復旧は急がれるので、対策工法を立案するための調査工事の種類や期間が制約を受けることが多い。

上記の①について補足すると、設計に役立つ調査・試験において得られたせん断強度が施工中あるいは施工後に著しく低下し、設計断面が不安定になることがある。この強度低下が顕著に、しかも急速に進行するような地質が問題となるが、新しい生成時代の第三紀層や第四紀層などはこれに該当するものと考えられる。それは生成時代が新しいので固結土が低く、応力低下や水の作用によって風化されやすいためである。

次に②については、緊急対策を施した後に調査・試験を実施することになる。地滑り面の推定と地滑り粘土の強度の決定は重要であるが、乱さない試料の採取と高精度の試験を実施することは容易ではない。また間隙水圧についてはかなり長期の測定期間を要する。したがって、緊急の場合には経験による推定値または逆解析による計算値を用いて対策工法を決定し、動態観測を重視しながら施工することになる。

上記のように、この問題は設計に inputs する地盤情報の決定が極めて重要で、単に通常の調査試験データをそのまま採用することなく、施工中及び施工後の実態に応じたデータを採用すべきである。実際問題として、これはかなり困難ではあるが、解決のための手法を確立することが望ましい。

6.3 ジオシンセティックを利用した環境対策

(1) ジオシンセティックとは

ジオシンセティック（ス）というのは、石油化学製品で土木工事用に使用するもので、ジオテキスタイル、ジオメンブレンに大別され、前者には、ジオネット、ジオグリッド、ジオウォーブン、ジオノンウォーブンなどがある。ジオメンブレン以外は透水性がある。

用途から分類すると

a) 安定及び補強

ジオウォーブン・ジオグリッド

b) フィルター及び排水

ジオノンウォーブン・ジオネット

c) 遮水

ジオメンブレン

(2) ジオシンセティックの利用

① ランド・フィル

ジオシンセティックは、その材料特性を利用し廃棄物最終処分場で遮水層、排水層、ガス抜き層あるいは保護層として広く活用されており、今後もそのニーズは多様に増加するものと考えられる。しかし、これらジオシンセティック材料は基本的に工場生産であることから品質的には優れているものの、廃棄物最終処分場での活用にあたってはその施工、廃棄物の埋立造成及び維持管理の各段階において様々な解決すべき課題が生じている。

② 法面保護

切土法面にはコンクリートの吹き付けが行われていたが、景観・自然保護の立場から植生が望ましい。最近、ジオテキスタイルに種子を埋め込んだものを張り付けるようになった。

さらに強い法面を造るためにいろいろな技法が開発されている。例えば、ジオウェブ（geo-web）という工法では、プラスチックの板を使って蜂の巣に似た孔の空いたマットを造り、これを法面に張り付ける。孔に土を詰め、土の表面に種子を付ける。

ソイルネイルというのは、法面に鉄棒を挿し込んで補強するものであるが、鉄棒の代わりにストレーナの付いたパイプを挿し込み、地中の排水を行い、地面にはジオネットと種子を植え付けたジオテキスタイルを張り付ける。

砂と長センイを混ぜ合わせる工法はフランスで発明され、日本に導入されている。砂の代わりに肥料を含んだ土と種子とを混合したものを扱い、しかも種子は草だけではなく、小灌木の種子を用いる工法が日本で発明されている。この他短センイを用いるもの、センイのメッシュを使うものもある。

③ 地滑り防止

降雨・融雪水の浸透を防止することによって地滑りを防止する工法が研究されている。この工法ではジオメンブレンを地表面下1～2 mに敷設する。また傾斜

がある場合には擁壁を設けてヒナ段のようにし、傾斜を緩くする。必要に応じて他の工法と併用する。

7. 自然災害と環境地盤問題

7.1 自然災害と地盤問題

自然災害は、最近になっても減少しておらず、最近20年間の全世界の自然災害による死者は、280万人、被災者は2,000万人、直接被害額は1,000億ドル以上といわれ、被害の8割強が、アジアと南・西太平洋地域に集中している。

自然災害の研究は、いろいろな専門分野によって進められ、発生機構や予知・予測の研究が主として行われているが、今後は、災害から人命・財産に対する危険性を軽減させる方向で、防災の研究の推進が必要である。

また現在、研究上の組織が異なる自然災害科学と地球環境問題とは、融合されるべきではないかと考えられる。1964年の新潟地震はもとより、最近のアメリカのノースリッジの地震（1994年1月17日）でも、建物や構造物の被害に、地盤の性質が深く関係している。地盤の問題に深い関係をもつ土質基礎工学関連分野は、被害軽減の工学的手法や、地盤条件から土地の災害危険度の判定（ハザードマップの作成）などの点で優れたノーハウを持っていることから、防災の研究を一つの柱として、研究・教育の推進が望まれる。また、開発途上国などの被害集中地域に対する減災への国際貢献も、関連した重要課題である。

7.2 自然災害防止対策や環境対策の効果の評価

自然災害の防災・減災対策や環境問題の対策は、人間の生活、地球の生態を保全していくために最も基礎的で重要なものである。それにもかかわらず、新しい施設の建設などに比べると、アピールが小さいことや、対策の効果が完全であって当たり前、効果が完全でなければマイナスといった消極性のために、往々、経費の配分が十分には行われていない。さらに注目しなければならないことは、大学や企業における研究においても、専門家の養成の困難さ、研究効果のアピール性や確実性の低さなどのため、よい研究者が育ち難く、また研究費の配分も少ない。

以上のことを考慮すると、防災対策や環境対策について、もっと積極的にまた正しく評価することが緊要の課題と考えられる。そのためには、防災対策や環境対策を正しく評価する手法の研究を推進することを提言したい。

そのための一つの方法は、もしその対策が行われなかった場合を想定し、対策が行われた場合と比較してその損失を算定する方法である。構築物の被害に比べ、人命や動植物の被害、心理的精神的被害などの算定には困難があるが、対策のために要する（または付加される）費用と損失被害額とを比較すれば、対策の効果の一つの評価基準を作ることができる。技術の進展や社会環境の変化に対応して、この基準は常に動的に見直していくことが必要である。この場合、データベース化によって、見直しを自動的に行うことも考えられる。

ここに提案した評価基準を応用し、評価に従って現在の対策を推進するととも

に将来の対策を策定することができる。また、個々の対策について、その評価を高める研究を遂行していくことが課題となる。

自然災害や環境問題に対する基礎的な研究については、単純な評価基準や実効だけによって評価することは適当ではない。しかし、一般的に言えば、対策の効果を評価することによって、研究の成果が明確になり、前述したような消極的評価でなく、積極的な評価が行われれば、研究の推進・活性化にも役立つと考えられる。

最近の一つの例として、1993年釧路沖地震の際、釧路港において液状化対策の施された岸壁には被害がほとんど無く、そうでない箇所が大きい被害を被った。この例は、災害対策の効果を評価できる好例と思われる。

8. 環境地盤工学のための力学と設計

8.1 新しい力学の在り方—マクロメカニックスの提案—

従来の材料力学・土質力学は対象が限定されているので、そのままでは広い環境地盤の問題に対応することが難しい。力学の手法を生かし、しかも環境地盤のような広い工学の問題理論を究明していくためには、新しい力学のアプローチが必要である。

材料科学では、近年、マイクロメカニックスによって材料の特性や力学定数の解明が進められている。このアプローチは新素材の開発にも応用され、大きい成果を挙げている。しかし、我々の目指す地盤環境工学に対しては、マイクロメカニックスとは逆に、マクロの立場から広域的に現象を把握するマクロメカニックスとも言うべきアプローチが必要と考えられる。

環境地盤工学では、現在、主としてケーススタディによって研究が進められている。この場合、注目して検討がなされる点は、例えば、支持力、耐災害性（地滑り、液状化など）、経年安全性（沈下など）、有害物質対策などである。また、モデルによるシミュレーション解析も行われ、数十年後あるいは数百年後の変化について検討がなされている。こういう研究が有用であることは論を待たないが、一方、現象の中に存在する一般性や力学法則を見だし、指導原理を発見して理論を構築していくことはさらに重要と思われる。

ここで提言する環境地盤工学のためのマクロメカニックスでは、

- (1)単に純粋な力学要素（力、変形、破壊強度など）ばかりでなく、騒音、地盤汚染、有害物質の発生などの環境要素も加えた多次元的解析を行う。多次元空間の幾何学や解析学が応用される。また、現象を微視的にとらえる従来の微分方程式を用いる解析だけではなく、むしろ現象をマクロに把握する積分形の理論が主体となると考えられる。
- (2)目的を力学要素として明確に表現し、時空間的に要因間の関係や限定条件、拘束条件を探究する。社会や科学技術の発展、気象の変化などを取り入れた動的解析も必要である。
- (3)スーパーコンピュータなど研究のためのコンピュータの応用を推進する。

環境地盤工学に対応するこのようなマクロメカニックスの研究を推進していく

ためには、地盤力学の研究者ばかりでなく、関連する分野の工学・理学の学者、さらに実務者も交えた研究組織を作り、集中的に研究を進めることが必要であろう。

以上に述べたマクロメカニクスは、単に地盤環境の保全という消極的な面ばかりでなく、例えば「砂漠の緑化」のような積極的な地盤環境の改良も含む大きい意味の環境地盤工学の基礎となるものと考えている。

8.2 使用エネルギーを考慮した地盤設計法

地盤に関する最適設計案の決定は、信頼性設計法にその典型を見るように、従来は、力学的な安全度と費用を評価尺度としてなされてきた。上部構造、例えば、橋梁などの上部構造では、近年、景観を考慮するようになったとはいえ、意志決定の原則は上記と変わらない。

地球規模の環境問題は多種多様で、その広がりや、政治・社会・経済問題にわたり、その系統だった解決は非常に困難である。しかしながら、特に工学分野においては可能と考えられる事項から、それもできるだけ原理的な方向性をもって、将来の設計概念を提示し得るような研究技術開発を早急に進めるべきである。

主要環境問題の一つにCO₂問題がある。CO₂の発生や、それが環境に与える定量的な影響については、いまだ諸説があって当面納得のいく学説は固まりそうにないが、これらが環境に負荷を与えることは確かである。

ところで、最近、エネルギーの使用量とCO₂の発生量との関係の分析が少しずつ進んできて、両者の間に強い正の相関関係が存在することが明らかになってきた。これまでの分析の結果を参考にすると、社会基盤の建設及び維持には、我が国の場合、国全体のエネルギー使用量の1/3近くが使用されていることになる。このことは、発生CO₂の約1/3が、社会的基盤建設に起因していることを示している。この意味では、エネルギーの使用量を低減させることは、環境負荷を軽減させるための重要課題であるといえる。

一方で、現在のエネルギーの主要源である化石燃料が有限であることは、自明であり、近年の国連の調査では、石油の可採年数が約45年、天然ガス約56年、石炭約328年とされている。ひとり環境問題だけではなく、経済の持続的発展のためにも、“エネルギーの使用量”が大問題であることに異論を挟む余地はない。

21世紀の社会基盤施設の設計案採択には、従来の“物理的安全度と費用”に加えて、“エネルギーの使用量”を評価尺度として取り入れなければならなくなるに違いない。研究の内容としては、まず、エネルギー使用の実態の分析が必要である。建設分野で使われる資材、施工、維持管理等に関するエネルギーの分析である。その場合、エネルギーの定義が必要であり、例えば非化石燃料はオイル換算にするのか、その他の尺度に置き換えるのか、そのアプローチの方法から議論を進めなければならない。同時に、設計の基本的な考え方（コンセプト）を作り上げていかなければならない。そこでは、特にエネルギー問題に関しては、世論やある種の政策的誘導も議論の対象になるであろう。

数学的に間違いのない、新しい意志決定理論（最適決定法）を構築することも、

最も重要な課題の一つである。二軸（例えば安全度と費用）での決定理論は完成に近いものがあるが、エネルギーなど評価軸が増えてくる場合の理論構築には非常に大きな困難が予想される。

この問題の解決のための方策や開発すべき手法面について列挙しておく以下のようなになる。

- (a) エネルギーの正確な使用量評価
- (b) 環境負荷の定量的評価
- (c) プロジェクトの評価関数と評価基準
- (d) 最適化評価の手順
- (e) 建設及び維持管理の新手法
- (f) 経済的インセンティブの導入

9. 研究・技術開発のための体制上の問題点

土木、建築の中の一部門として位置付けられている土質基礎工学の研究開発は、今後は今まで以上に環境に指向されなければならない。それにはまず問題点を明確にしておかなければならない。

土木、建築工事は人が快適で便利、しかも安全な生活を送ることができるように自然を改善するという目的で行われるはずである。時として自然を著しく破壊するという危険性をはらんでいる。また局部的ではあるが、地域住民に多大の被害を与え、または迷惑を及ぼす。建築物や土木構造物はすべて大地の上に造られてるので、土木建築の基礎に関する土質基礎工学ないしは地盤工学の環境部門の研究開発は極めて重要である。この技術によって他の産業、交通、通信、生活、娯楽、等のあらゆる人間活動によって生じる廃棄物等の不用物を地盤の上若しくは地中、時には海底に閉じ込める等して処分し、破壊された自然を回復し、また一方では工事によって引き起こされる自然破壊や、地域住民に与える被害を最小限にとどめようとするものである。

一般に環境問題として、大気汚染、水質汚濁、騒音、振動、地盤沈下等は公害という範疇に挙げられているが、災害や景観も環境の中に入れてもよいのではなかろうか。大気汚染の問題と炭酸ガスによる地球温暖化の問題は共にエネルギーの節約によって、解決を図るべきである。建設業では鉄、セメントを始め大量の材料を使う。これらの材料の製造に使用するエネルギーは直接工事に使うエネルギーよりもはるかに多いのである。設計に当っては工費を最小にする従来の方式ではなく、エネルギーを考慮した設計をしなければならない。リサイクルによって造られた材料を使用し、仮設物として使った材料を本体の一部として取り入れることにすれば材料の節約になる。コンクリートは鉄よりもエネルギーの面では有利であると言われているが、コンクリートを打つ時には必ずベニヤ板の型枠がいる。このベニヤは熱帯林を伐採して造るので、自然破壊によって生産されたものである。この型枠を繰り返して使えるようにすればよいのであるが、それには研究開発が必要である。

環境を考慮に入れた設計、施工をする場合、在来工法を用いた場合よりもコス

トが高くなる。大ざっぱに見ても2倍高くなる。建設業における研究開発では民間企業の占める割合が極めて大きいですが、せっかく開発した新技術もこれでは実用に供することができない。これが企業が研究開発を渋る理由である。そこで官公庁またはこれに準ずる機関では何らかの方法で民間の研究開発を積極的に援助しなければならない。研究費の援助といった直接的なものに限らず、パイロット事業を起こすこと、環境技術の評価をし、優秀なものには賞を与えること、工事の発注に際して環境に配慮した設計と施工計画を組み入れさせ、工費が最低価格であるというだけでなく、環境の点も発注の条件に組み入れること、官学民の共同の研究組織をつくり、広く知識を集め、施設の活用を図ること、研究の成果を基準、規格、仕様書に取り入れること等も重要である。官庁の研究所や大学等の研究室が貧弱であると言われているが、研究費の増額と研究員の養成にはさらに力を注がなければならない。特に基礎研究や学際的な研究はこれらの機関で行うべきであろう。

研究開発課題の例と主として取り扱う機関を示すと次のようになる。

1. 基礎的技術 …………… 大学、国立の研究所
2. 地球規模の環境問題
 - 2.1 エネルギー消費 …………… 材料の製造に使われる原単位の調査とその結果公表、それをもとに省エネルギー設計法の研究 …………… 民
 - 2.2 熱帯樹林の保護 …………… コンクリート型枠 …………… 民
3. 地域的な環境問題
 - 3.1 湖底、浅海のヘドロの処理 …………… 官、民
 - 3.2 地盤沈下 …………… 官、学
 - 3.3 地下水の枯渇と汚染 …………… 官、学
 - 3.4 地滑り、崩壊、土石流 …………… 官、学
4. 土質材料
 - 4.1 建設残土の固化 …………… 民
 - 4.2 下水汚泥の処理 …………… 民
 - 4.3 切取り、盛土の法面緑化 …………… 民
 - 4.4 液状化土の強度 …………… 民
5. 建築、土木構造物の基礎 …………… 官、学、民
(無騒音・無振動杭、地下連壁)
6. 地下構造物(トンネル掘削技術) …………… 民
7. リサイクル …………… 官、学、民
8. 仮設物の本工事への適用
9. 廃棄物の処理(ジオテキスタイル) …………… 官、学、民
10. 環境アセスメント(計測器と手法) …………… 官
11. 環境施工管理 …………… 官、民
12. 景観設計 …………… 官、学、民

10. 結び

今回、土質基礎工学研究連絡委員会において、環境地盤工学に関する諸問題について、討論を重ねてきた。今回の報告は、その第一歩としての現状の問題点と将来の展望の一端をまとめたものである。今後のこの分野の一層の発展を望むものである。