

全地連創立 40 周年記念特集号

40 周年を迎えて

森 研二 1

■技術の現状とこれから求められるもの■

計測技術の現状と将来展望

中田文雄 2

地盤の変形解析の現状と将来展望

飯塚 敦 10

液状化解析の現状

八嶋 厚 16

流域における土砂環境防災の研究展望

関口秀雄 23

土壌環境修復技術の現状と将来展望

平田健正 30

斜面の安定性評価技術の現状と将来展望

北村良介 35
酒匂一成

大深度地下利用と技術開発の将来展望

中島正人 40

40周年を迎えて

(社)全国地質調査業協会連合会

会長 もり 森 けん 研 じ 二

今年度、(社)全国地質調査業協会連合会は、昭和39年2月の設立より、めでたく40周年を迎えることとなります。これもひとえに会員企業の皆様のご支援とご協力の賜物と心から謝意を表します。

建設産業は今日急速に縮小する市場環境に直面して大変厳しい状況にあります。地質調査業においても同様であり、市場規模は平成7年度を頂点に急速に縮小を続けております。公共事業予算に大きく依存する地質調査業は残念ながら今後も厳しい市場環境が続くことが見込まれます。

戦後我々の業界はほぼ一貫して右肩上がりの市場環境に恵まれました。「建設冬の時代」といわれたオイルショック後の80年代における建設投資ゼロシーリングの時代です。今となつては穏やかな市場環境のように思い出されます。それほど、今日の市場は厳しいものがあり、我々はまさに生き残りをかけた対応を迫られています。

また、業務内容についても戦後の急速な成長期が終わりを告げ安定期に移行しつつある我が国の経済ならびに社会資本整備事業の状況を反映して、従来型の調査業務は縮小傾向にあります。反面今日までに建設された社会資本を今後長期にわたって維持・保全してするための業務、ならびに社会生活の安全を確保するための環境・防災等の新たな分野の需要が確実に立ち上がっています。したがって、従来型の業務が縮小傾向にある一方新しい分野が成長しつつあるというのが現状です。

どのような産業または市場においてもある時期、需要と供給のバランスが著しく損なわれる局面に突入することがあります。このような場合、可及的速やかにこの不釣り合いの状況が改善されることが望ましいのですが、調整期においては多くのひずみが生じます。今まさに、業界はこの調整期のひずみに呻吟しています。我々としては今後、地質調査業の市場が、単に需要と供給の関係が改善されるのを目指すだけでなく、新しい市場環境がより活性化され、地質調査業がさらに、ダイナミックで魅力的な産業になるよう努めていきます。

公共調達を中心とする建設関連業においては、発注者の強い権限と受注者の請負的な関係が長く続きました。近年、国土交通省においては産業の活性化をめざして入札・契約

制度の改定や、建設関連業の展開等について多くの取り組みがなされました。これらの施策により今日我々の産業は確実に変化してきております。しかし、その変化はまだ始まったばかりで今後さらなる取り組みが必要と思います。今日コンサルタントは発注者のパートナーとしての地位が与えられていますが、まだ十分に機能しているとはいえず、これからの期待したいと思います。

これからの地質調査業は従来からの調査業務に限定されることなく、建設業の上流・下流の両面で広く我が国の社会資本整備事業に貢献できる可能性があると思います。近年注目されてきた環境、保全、防災、リスクおよび資産管理等の分野でも活躍できると思います。我々調査業務に従事する者は、発注者に対してこの産業を更に活性化するための制度や在り方を訴えると同時に、我々が今後の社会資本整備事業において具体的にどのような貢献または役割がはたせるのかを示していく必要があります。

建設産業は長い年月により形成された大きな産業であります。その商習慣は我が国固有の文化・価値観を色濃く反映するものであります。したがって、急激な変化は容易ではありません。しかし、今後地質調査業界が活力ある産業として継続的に発展していくためには改革は急務であると思います。そのためにも発注者ならびに受注者が、共に今日の需要と供給の調整期を速く乗り越えると同時に、市場の活性化に取り組んでいく必要があります。

全地連はその40年の歴史において多くの困難を乗り越えて今日まで多くの実績を残してきました。これらの実績を踏まえて協会としては地質調査業がさらに魅力ある産業として展開していくことをめざしていきます。現在地質調査業に従事している者はもちろんのこと、これからこの産業に参加される次世代を担う若者をも魅了する産業でありたいと思っております。そのために、全地連として今日取り組んでいる多くの施策をさらに徹底して執り行うことにより地質調査業の活性化をめざしていきます。

会員企業の皆様には引き続きご支援下さいますようお願いすると同時に、会員各位のますますのご繁栄を祈念致します。

計測技術の現状と将来展望

川崎地質(株)情報企画管理室長

なかだ ふみ お
中田 文雄

1. はじめに

地質調査は、現地調査によって明らかにする事実、地質学や物理探査学などに基づく解釈と、それらから導き出される意見によって構成されている¹⁾。

計測技術は、この事実の部分客観的なデータとして明らかにすることであって、発生する現象を正しくとらえるためには以下の事項を満足することが大切である。

- ・現象を正確に検出できるセンサの選定
- ・十分な能力を持つ計測システムの選定
- ・設置環境への配慮（特にモニタリング装置の場合）
- ・経済性（コスト）への配慮
- ・得られたデータの真偽判定

現在の計測技術的な特徴として、センサや記録器の高性能化、小型・軽量化や低電力化などにより、現場で発生するさまざまな現象を長期間にわたり自動的に記録することが可能になったことがあげられる。また、ノートパソコン、携帯電話やPHSの普及とインターネット環境の整備に伴い、調査現場から事務所まで直接計測データを、距離に関係なく送受信できるようになったことが特徴的である。

これらの計測技術や通信技術の発達に伴い、防災面では「リアルタイムモニタリング²⁾」という用語が使用され始めているくらいである。

しかし、計測技術にとって最も重要なことは、何も高価な計測装置を使用することではなく、客観的な事実を正確に記録することと、発生する現象を正しく理解することであり、その意味から考えるならば、計測システムと計測技術者を総合したものが、計測技術の根幹といえるであろう。

本文は、このような地質調査の計測技術について、その現状や将来展望について述べるものである。

なお、計測技術の範囲はきわめて広範囲であるため、本文の記述範囲は、自然現象の変化を受動的（パッシブ）にとらえる計測技術に限定したい。

2. 計測項目と計測技術

計測システムを設計する場合に最も重要なことは、その計測の対象と目的を正しく理解して、最も適切に現象を検

出することのできるシステム類を選定することである。

また、設置条件や計測時のコストを充分考慮することも重要であって、たとえば、計測が「地質調査の一環として調査期間だけ行われるのか」、「施工管理として実施されるのか」あるいは「防災のモニタリングとして実施されるのか」などによって、計測装置の選定や設置方法を十分吟味する必要がある。

検討項目の例を表1に示し、以下に重要と考えられる検討内容を略記する。

(1) 長期計測時の検討課題

- ・センサの安定性と耐久性。たとえば、ボーリング孔に埋設する場合の長期的な防水性、メタルケーブルを使用する場合の耐雷性など。
- ・システムとしてのメンテナンスの容易さと、故障時の対応性（交換部品のストックなど）。
- ・異常時には過去のデータを検証・評価する必要が生じるが、その際の表示・グラフ・印刷などの迅速性。

(2) 設置環境への対処

- ・センサ自体に温度補正がなされていても、基準と異なった取り付け方やジグを使用している場合は、温度

表1 計測項目と計測技術の選定

分類	項目	主な検討内容	
計測対象	地盤	変位(鉛直・水平)、傾斜、変形、強度、水位、物性値(弾性波速度、電気、温度)、間隙水圧	
	気象	温度、湿度、風速、気圧、雨量、積雪、日照	
	河川等	水位、潮位、流量(流速)	
	構造物	変位(鉛直・水平)、傾斜、変形、応力、温度	
計測装置	総則	統一性、メンテナンス、故障時の対応	
	センサ	精度、安定性、分解能、計測範囲、周波数特性、直線性、温度特性、再現性、耐久性	
	収録装置	記録方式	コンピュータ、磁気媒体、記録紙
		出力形式	デジタル、アナログ
		計測方法	自動、手動
伝送方式	光、電波、電気、超音波、記録紙(野帳)		
装置	操作性、耐久性、形状、重量		
設置条件	設置場所	箇所数、期間、スペース、保護条件	
	設置環境	水、温度、湿度、圧力、振動・衝撃、粉塵	
経済性	コスト	センサ、収録装置、収録装置、処理装置、周辺機器	
	人件費	設置工事、ソフト開発、計測、データ処理・可視化	

の影響は無視できないことが多い。計測データに温度の影響が現われている場合は、その影響を取り除くデータ処理が必要となるばかりでなく、その処理自体がデータを加工するため、真の変化を見逃すことにもなりかねない。したがって、工事しやすいからといって、センサ類を安易に地表面に設置しない方がよい。

(3) 計測システムの信頼性

- ・計測システムに ISO 9000 s シリーズに基づく検定済みのマークがあればより信頼性が増すであろう。

3. 計測システムの将来展望

3.1 計測システムの動向

図1は、現在～近未来の計測システムのイメージである。

(1) A：半自動計測

- ・データロガーに IC カードなどの記録装置を内蔵したもので、IC カードリーダを使用して室内のコンピュータにデータを移動する方式である。
- ・現在も計測装置の主流であるが、比較的手軽であるところから、リアルタイム監視の必要のない現場では、将来的にも使用されるものと思われる。
- ・12成分を超える多成分を計測できる製品や、数年程度の長期計測にも充分耐えうる装置が市販されている。

(2) B：半自動計測（携帯電話方式）

- ・データロガーに携帯電話などへの通信ユニットを内蔵させて、遠隔地にデータを送信したり、データロガーの制御を行うことができる装置である。図2は、動作状況の例である。
- ・徐々に計測事例が増えており、携帯電話等の通話範囲が広がるにつれ、使用の機会は増えるものと思われる。
- ・携帯電話の場合、通信速度が 9600 bps と低速であるが、1時間に数回程度の計測間隔であれば、充分データ転送が可能である。
- ・リアルタイム計測が可能な計測装置は、災害発生など

名称	場所	状況
1) 1111点 (標準AE)	D:\Data\1111点 (標準AE-9917A)	正常
1) 1112点 (標準AE)	D:\Data\1112点 (標準AE-9917A)	正常
標準 (標準AE-9917A)	D:\Data\標準 (標準AE-9917A)	正常
標準 (標準AE-9917A)	D:\Data\標準 (標準AE-9917A)	正常

日時	名称	状況
2000/11/21 09:10:01	1) 1111点 (標準AE)	データ更新
2000/11/21 09:10:01	Result list	更新完了
2000/11/21 09:10:01	1) 1112点 (標準AE)	データ更新
2000/11/21 09:10:01	Result list	更新完了
2000/11/21 09:10:01	標準 (標準AE-9917A)	データ更新
2000/11/21 09:10:01	Result list	更新完了
2000/11/21 09:10:01	標準 (標準AE-9917A)	データ更新
2000/11/21 09:10:01	Result list	更新完了
2000/11/21 09:10:01	標準 (標準AE-9917A)	データ更新
2000/11/21 09:10:01	Result list	更新完了
2000/11/21 09:10:01	標準 (標準AE-9917A)	データ更新
2000/11/21 09:10:01	Result list	更新完了
2000/11/21 09:10:01	標準 (標準AE-9917A)	データ更新
2000/11/21 09:10:01	Result list	更新完了
2000/11/21 09:10:01	標準 (標準AE-9917A)	データ更新
2000/11/21 09:10:01	Result list	更新完了
2000/11/21 09:10:01	標準 (標準AE-9917A)	データ更新
2000/11/21 09:10:01	Result list	更新完了
2000/11/21 09:10:01	標準 (標準AE-9917A)	データ更新
2000/11/21 09:10:01	Result list	更新完了
2000/11/21 09:10:01	標準 (標準AE-9917A)	データ更新
2000/11/21 09:10:01	Result list	更新完了

図2 携帯電話による計測制御の例

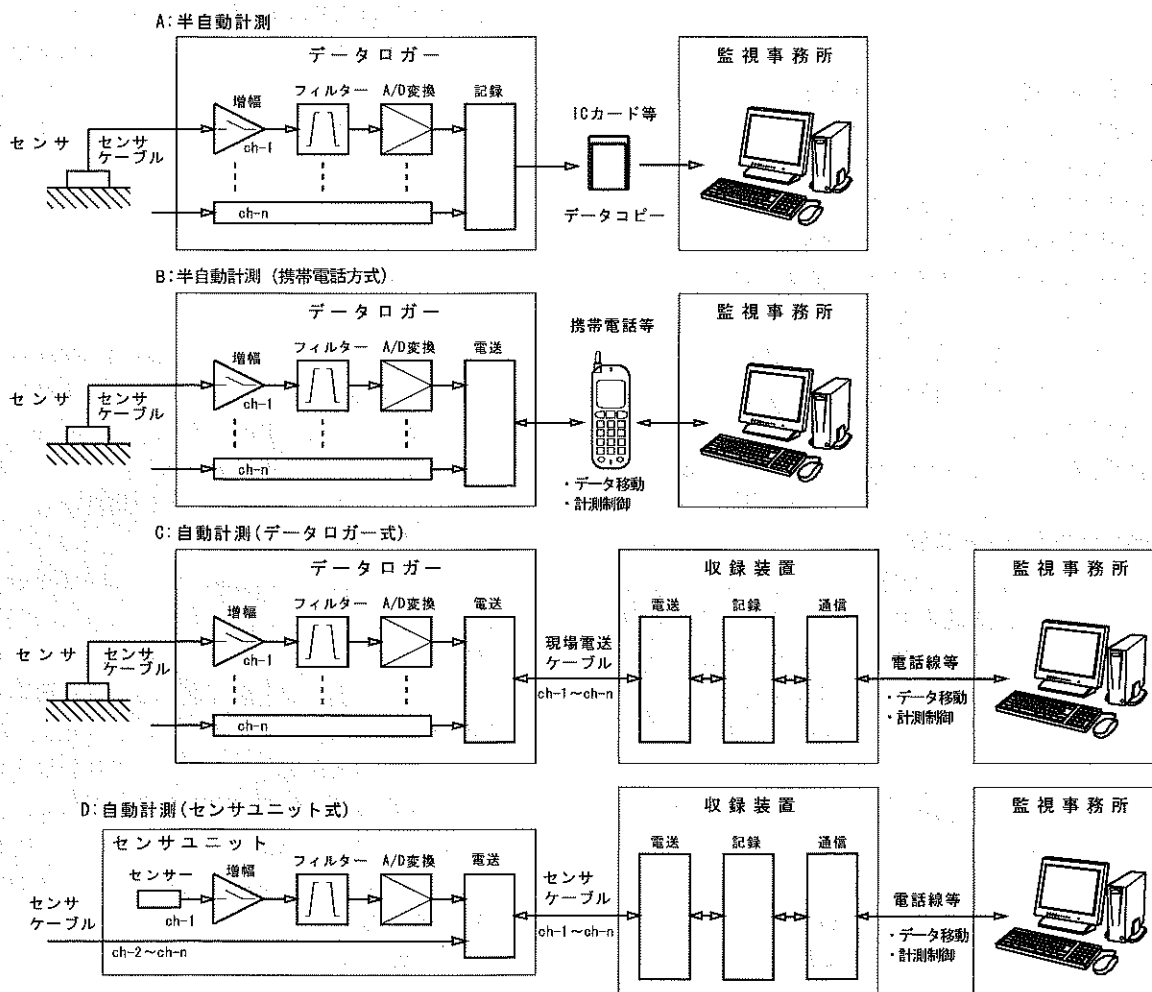
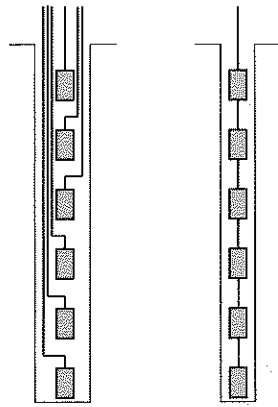


図1 計測システムの将来像



従来（従来の設置方法） 新方式（新方式の設置方法）

図3 固定式多段傾斜計のケーブル接続方式の変化

の緊急時の計測にも使用できるものと考えられる。

(3) C：自動計測（データロガー方式）

- ・センサ～データロガー間を個別のケーブルで接続する方式であって、センサの数だけケーブルが必要となる。
- ・成分数が少ない場合や短距離の場合には、D：の方式より低コストになる場合がある。
- ・データロガーと事務所のコンピュータの間はケーブル等によって接続されているため、計測データをリアルタイムで監視することができるとともに、計測間隔の変更などの設定も容易になる。
- ・現在では、現場での電送ケーブルはメタルケーブルが使用されているが、今後は、耐雷性を増すために光ケーブルの使用が多くなると思われる。

(4) D：自動計測（センサユニット方式）

- ・複数存在するセンサを1本の多芯ケーブルで直列に連結することができように、センサユニットの中にセンサと電子回路を組み込んだ形式である。
- ・たとえば多段式の傾斜計の場合、従来方式では孔内に傾斜計の数だけケーブルを束ねて挿入することになり、段数を増やすには大きな掘削孔径を必要とした。
- ・図3のシステムでは、1本のケーブルを使用するため、小さなボーリング孔径で済む上、同一孔内に多くの傾斜計を設置できる。
- ・その他の特徴については、C：の方式に同じである。

3.2 計測システムの将来展望

平成13年度から適用になった国土交通省の電子納品要領（案）により、地質調査報告書は全て電子ファイルで提出されている。現場で計測した計測（生）データについては提出しなくてもよい場合があるが、報告書本文中に引用するには電子納品を考えたデータの保存方法を考えねばならない。

この事実などを含めて、計測システムの将来像を以下のように予測してみた。

- ・記録用紙にインクで記録するアナログ方式の計測システムは、データ処理に適さないばかりでなく、報告書中に引用する際はスキャナが必要なため、今後は単なる確認計測に限定して使用されるものと思われる。
- ・図1(B)の半自動計測の場合、携帯電話などを使用す

るため、計測データをリアルタイムで入手できる小型のモニタリング装置を構成でき、システムが規格化・汎用化されたならば用途は広がる可能性がある。

- ・センサを内蔵したセンサユニット、あるいはユニットの近傍にセンサを配置したシステムは、1本の光ケーブルで全データの転送が可能となり、大規模のモニタリングシステムを構築する場合に有利である。ただし、光ケーブルの場合では、センサユニットへの電源供給はソーラパネルにする必要があるかもしれない。
- ・温度の変化により計測値に影響の出やすいセンサの場合、必ず温度センサを組み込む必要がある（理由後述）。

4. 計測技術の将来展望

防災のために利用される主な計測技術を表2にまとめた。ここでは、同表を例にとり、計測技術の将来展望を述べることにしたい。

4.1 3次元変位計測

斜面などの精密な地形変化をとらえる技術であって、以下に示す5手法が提案されている。それぞれのイメージを図4に示した。

(1) 地表設置型のスキャン式レーザ測距儀

- ・反射鏡が不要な距離測定装置であって、技術者の立入りが不可能な場所に対する計測（測量）に使用する。
- ・角度エンコーダにより俯仰角と水平角検出でき、対象斜面の高密度な3次元位置データが得られる。
- ・カタログ上の測距精度は2～3 cm程度であるが、1時間に数千点以上の計測が可能である。
- ・測距儀からターゲットを確実に見通す必要があるため、長期計測の場合では立木の成長や人工構築物の建設など、あらかじめ障害を予測して計画を立てる必要がある。
- ・応用例を図5³⁾に示す。また、大規模急傾斜岩盤斜面の変動計測⁴⁾、道路斜面の地形調査⁵⁾や地すべりの移動量計測⁶⁾などで実施の報告がある。
- ・斜面の細密地形図を描くとともに、定期的に計測して地形変化をとらえることにより、異常箇所の発見に役立てることができる可能性がある。

(2) SPT (Spot Projection Triangular Surveying)^{7),8)}

- ・2台のリモコン式セオドライトにレーザ投影機とCCDカメラを個別に搭載した装置であって、対象斜面にレーザスポットが多数存在するように撮影する。
- ・2台のセオドライトとスポットとの角度を計測することにより、各スポットの3次元座標を計算する。
- ・本計測技術も対象斜面に立ち入ることなく、変位計測が可能となり、災害予知面での利用が期待される。
- ・カタログ上の測距精度は1 mm程度、作業効率率は1時間60点程度である。
- ・2台のセオドライトから対象斜面を確実に見通す必要がある。
- ・利用目的は(1)と同様である。

表2 地盤における計測技術例

計測項目	計測形式	計測対象	計測装置名	計測原理等	基準類	最新	備考
水平変位	地表設置	地すべり・人工地盤	機械式・電気式変位計	めき板・クラックゲージ			センサ使用しない場合は物差し等を使用する
		地すべり	機械式・電気式変位計	伸縮計(インナー線、ロッド)	JGS 1725		温度補正が必要な場合あり
	ボーリング孔	地すべり・盛土	電気式ひずみ計	地中ひずみ計	JGS 1731		ひずみから変位量を計算する
			挿入型電気式傾斜計	可とう管の傾斜量を手動検出			傾斜変動量から変位量を計算する
			電気式傾斜計*	固定式(多段)傾斜計		(○)	傾斜変動量から変位量を計算する
鉛直変位	地表設置	盛土・軟弱地盤	機械式・電気式変位計	沈下板	JGS 1712		沈下板に接続するロッド頂部の高さ変化を測定する
	地中埋設	盛土・人工構造物	機械式・電気式変位計	クロスアーム式沈下計	JGS 1718		クロスアームは盛土に伴って埋設する
			電気式傾斜計*	傾斜計		(○)	傾斜変動量から変位量を計算する
		電気式水圧計	水管(流通管)中の水位変化			温度補正が必要、水の蒸発に注意	
	ボーリング孔	盛土・軟弱地盤	機械式・電気式変位計	沈下板・ロッド・ワイヤ			構造物(アンカー)などへの応用可能
			機械式・電気式変位計	孔壁アンカー			固定方法にシタグラフや油圧アーム等がある
電気式位置検出装置			マーカ			土中に検出可能なマーカを埋設する	
3次元変位	リモートセンシング(非接触)	急傾斜地(岩盤斜面)	(スキャン式) レーザ測距儀	無反射板レーザ距離計測		○	航空レーザスキャナの応用、危険箇所への立入不要
			SPT	レーザ光とデジタルカメラ		○	空中三角測量の応用、危険箇所への立入不要
			ステレオ写真	デジタルカメラによる			空中写真の応用、危険箇所への立入不要
			赤外線サーモグラフィ	赤外線サーモグラフィ			人工構造物への適用可能、危険箇所への立入不要
	地表設置	地すべり・急傾斜地 地すべり・人工地盤 急傾斜地(岩盤斜面) 盛土	変位杭	トータルステーション	JGS 1711		今後は固定式反射鏡方式に変わると思われる
			GPS	複数の人工衛星からの電波		○	最初にアンテナ設置、要2台1組以上のシステム
			固定式反射鏡	(自動) トータルステーション		○	最初反射板を設置、以後立入不要
			精密写真測量計測システム	マーカとデジタルカメラ		○	複数の撮影画像からマーカ位置を計算する
無次元変位	ボーリング孔	岩盤・盛土・地すべり	機械式・電気式相対変位計	アンカー(ロッド、ワイヤ)			必要な点間の相対変位を計測する
傾斜変動量	地表設置	造成地盤・地すべり	水管式地盤傾斜計	水管中の気泡の位置	JGS 1721		水準器の応用
	ボーリング孔	造成地盤・地すべり	電気式傾斜計(気泡検出)	気泡位置を電気的に検出		○	高感度、地表設置可能
			電気式傾斜計(加速度検出)	加速度計(重力加速度)の応用		○	コイル方式と静電容量方式あり、地表設置可能
ひずみ	地表・地中設置	地すべり・急傾斜地	光ファイバーセンサ	光伝達特性のひずみ依存性		○	位置計算可、要温度補正、温度検出可
	地中設置		電気式ひずみ計	地中ひずみ計	JGS 1731		多点設置によりひずみの大きな場所を特定する
圧力	地中設置	軟弱地盤・人工地盤	土中土圧計	土圧計を不動地盤上に埋設する			土粒子の直径や支持地盤の強度等に留意
水文関係	ボーリング孔	地すべり	地下水位計	水圧から水位を換算	JGS 1312		参考: JGS 1311
		軟弱地盤・盛土	電気式潤滑水圧計	飽和土の潤滑水圧の直接計測	JGS 1313		フィルタの目詰まりに留意
		岩盤地下水	多成分多孔式地下水検出機	多成分の電気伝導度計測		○	トレーサー試験に使用される
水分量変化	地表設置	地すべり・急傾斜地	土壌水分計	水分量の変化			表層崩壊の予測、脱気水の蒸発に留意
			(固定式) 比抵抗二次元探査	電極(電圧・電流)			土壌水分計の代替
震動・破折	地表・地中設置	地すべり・急傾斜地	メタルケーブル	ケーブル破折による通電障害			落石検知器として汎用化
			ケーブルセンサ(振動センサ)	ケーブルの静電容量変化		○	通常、位置は不明、落石検知器の高感度版
震動	ボーリング孔	急傾斜地・陥没地	落石(崩落)検出システム	振動検出器(小型地震計)			亀裂等の近傍でよい、位置は推定計算による、陥没地の危険予知システムとして実用化
			AE検出システム	AEセンサ			

* 電気式傾斜計は「傾斜変動量」の計測装置と同じものである。

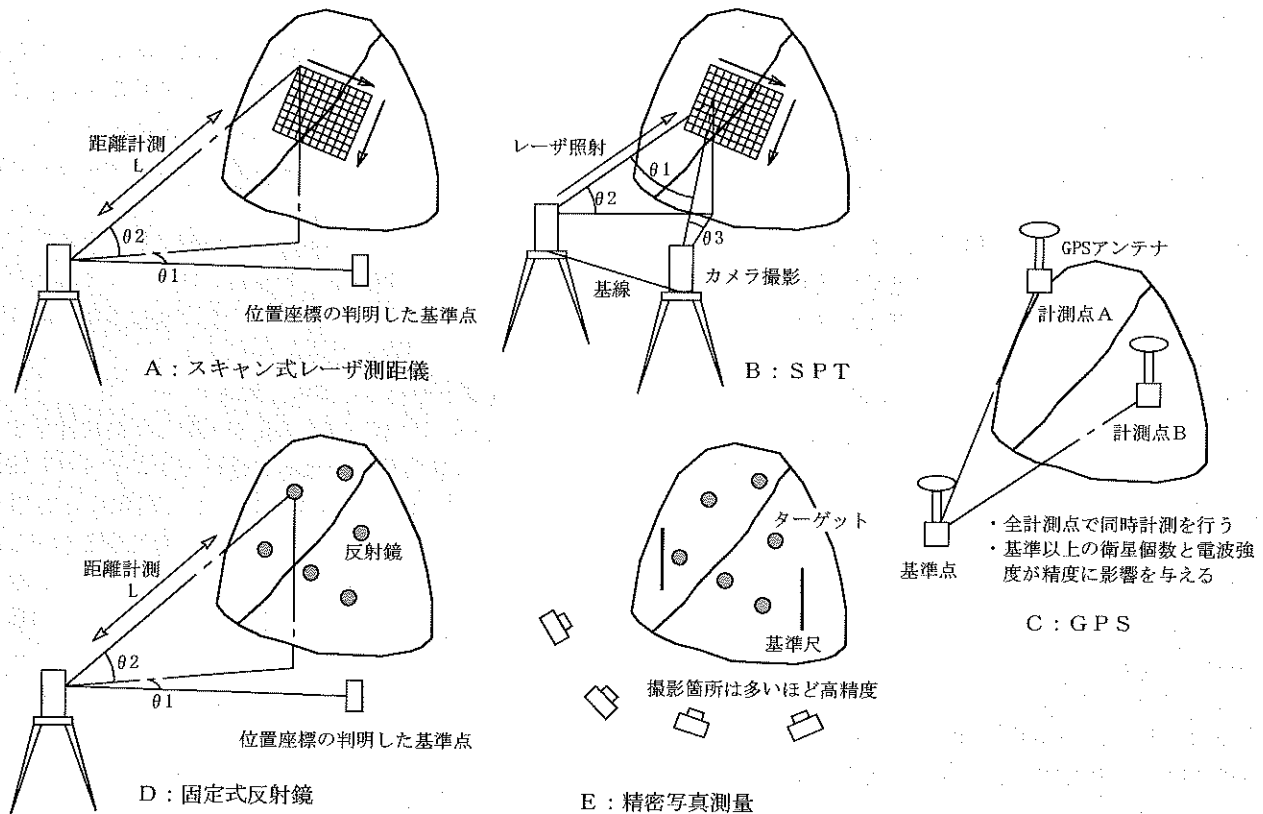


図4 3次元変位計測のイメージ

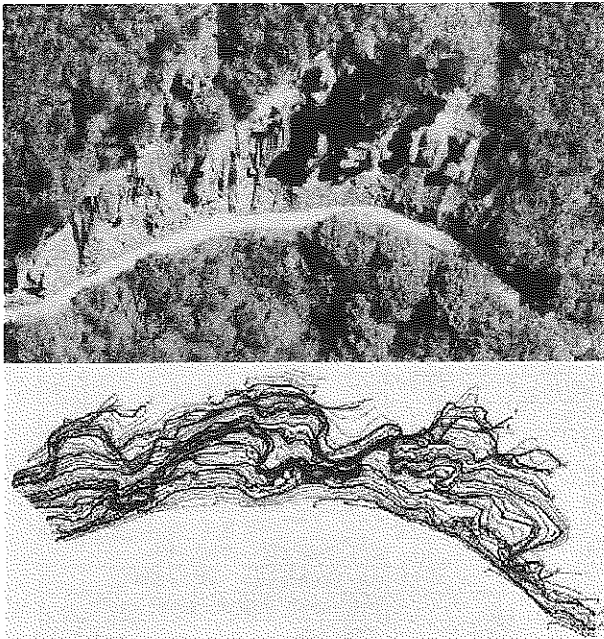


図5 地上型スキャン式レーザ測距儀の計測事例⁹⁾

- ・高精度ではあるが比較的能率が低いため、狭い範囲の斜面の変位計測が有利である。

(3) GPS (Global Positioning System)

- ・人工衛星を利用した位置計測システムである。アンテナと受信器を計測点に設置するとともに、データ電送のケーブル工事を必要とする。
- ・1台だけでは十分な位置精度が確保できないため、2台以上のGPSアンテナ・受信機を使用する干渉測位法を採用するのが一般的である。干渉測位法は、搬送波の位相差を利用して2点間の相対変位を計算するものであって、以下の二つの測位法が一般化している。
- ・スタティック測位法は、60分間程度の計測時間が必要であるが1cm程度の測位精度が得られる。一方、キネマティック測位法(K-GPS)は、数分程度の計測時間で済むが、2cm程度の精度となるため主として移動計測に向いている。
- ・地すべり地での適用例が報告されている^{たとえば8)}。
- ・(1)と(2)とは異なって、固定点から見通す必要はないが、GPS衛星からの電波を確実にとらえる場所を選定する必要がある。
- ・また、複数のGPS衛星の電波を同時に受信できない場合には位置データを計算できないため、計測不能となる時間帯が存在する。

(4) 固定式反射鏡 (トータルステーション)

- ・計測条件や設置時の留意点は(1)や(2)と同様であるが、反射鏡を対象斜面等に設置する作業が必要である。
- ・トータルステーションを固定して経時変化を計測する場合、自動追尾式を使用すると無人で計測ができる。
- ・カタログ上の測距精度は1mm~2mm程度、作業効率は1時間50点~60点程度である。
- ・岩盤斜面での適用例⁹⁾があるが、地すべりにも適用できると考えられる。
- ・地すべり土塊の移動量計測に使用されている変位杭を

使用する計測方法(JGS I711)は、原理的に同じであるところから、将来的には本方法に替わるかもしれない。

(5) 精密写真測量システム^{10),11)}

- ・広い視界が確保されている場所で応用が可能な3次元変位計測システムである。
- ・対象斜面にターゲットと基準尺を設置し、複数の場所からデジタルカメラで対象斜面を撮影し、計算によりターゲットの位置座標を計算する。
- ・カタログ上の測距精度は1cm程度、作業効率は1時間に数10点程度である。
- ・撮影箇所の3次元測量データとレンズのひずみ補正值があれば、より高精度の位置計算が可能である。
- ・現地での作業時間が短いことより、特定斜面を繰り返し監視する方式が向いている。

4.2 電気式傾斜計¹²⁾

- ・ボーリング孔内に設置可能な固定式傾斜計には、図6に示すような二つの系統がある。
- ・水管中の気泡位置を検出する方式(バブルセンサ)は、単純であるがきわめて高感度である。
- ・小さな振子(重り)を傾斜させると、地球重力の分力成分に比例する加速度が発生する。この加速度を電気信号として取り出して、傾斜角度を表示するセンサが電気式傾斜計である。
- ・動コイルを使用する高感度のサーボ型加速度計と、半導体を使用した中感度の静電容量式があり、小型軽量という特徴に加え低価格であることから、静電容量方式が普及し始めている。
- ・図7は半導体加速度センサを使用した孔内傾斜計の例である。 $\phi 86$ mmの掘削孔の中に、傾斜計を内蔵した $\phi 52$ mmのアルミパイプを挿入して固定する。傾斜計の間隔は、0.5mないしは1.0mである。
- ・カタログ上の精度は 0.02° 、 $\pm 20^\circ$ までの傾斜に対応可能である。
- ・従来の傾斜計は、傾斜計ごとに独立した多芯ケーブルを必要としたが、最近の傾斜計は1本の多芯ケーブルで全ての傾斜計が駆動できるようになった(図3)。

4.3 光ファイバ(ひずみ)センサ¹³⁾

- ・光ファイバに単一パルス光を入射した時に発生するブリルアン散乱光の周波数特性は、光ファイバに加わっている長さ方向のひずみによって変化する性質がある。よって、入射端でブリルアン散乱光を検出し周波数のシフト量と検出時間を求めることにより、光ファイバに加わっている長さ方向のひずみとその位置を推定できる(図8)。
- ・長距離の光ケーブルを設置することにより、地すべりや斜面の崩壊などの前兆である地盤ひずみの変化を効率よく計測できる可能性がある^{14),15)}。
- ・温度計としても使用可能できるほど温度の影響を受けらるので、設置工事にあたっては留意すべきである。

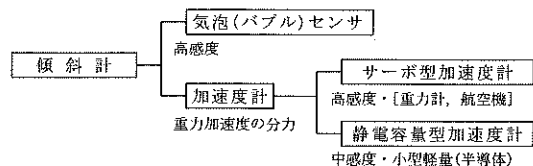


図6 電気式傾斜計の系統図

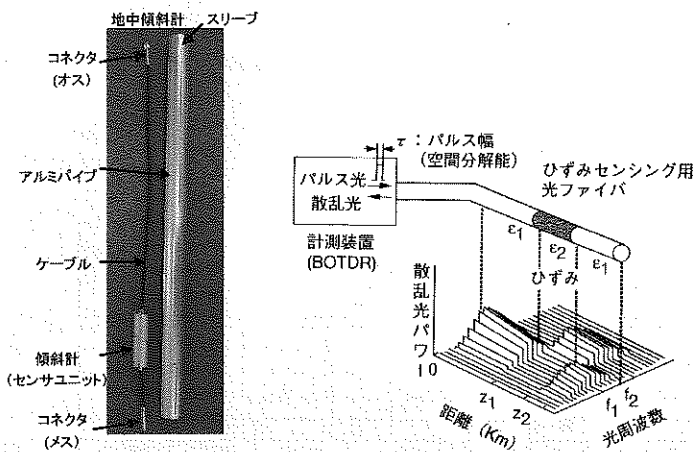


図7 半導体加速度センサを使用した固定式多段階傾斜計(一部) 図8 光ファイバ(ひずみ)センサのイメージ¹³⁾

- ・ケーブル自体に立ち木などが接触すると風による振動ノイズが発生する一方、動物が接触すると大きなノイズになるため、これらに充分留意する必要がある。

4.4 多成分多孔式地下水検層システム¹⁶⁾

- ・最新の地下水検層システムは、120成分程度の同時計測が可能である(6孔×20深度)(図9)。
- ・4電極方式を採用するとともに、校正試験を行って全電極の感度特性を求めているため、電気伝導度の時間変化だけでなく絶対値の比較・評価が可能となり、地下水汚染のモニタリングなどに利用範囲が拡大した。
- ・通信技術の革新で1本の多芯ケーブルでボーリング孔内の全電極を駆動できるようになるとともに、全点同時計測が可能になっている。

4.5 ケーブルセンサ

- ・単芯のシールド線と同じ構造をしているが、絶縁体に特殊な素材を使用して静電容量を持ったケーブルである。ケーブルに震動が伝わると電気信号が発生する。
- ・ケーブルの位置にかかわらず震動を検出できるため、長い守備範囲を持つ落石検知センサとしての利用などが期待される¹⁷⁾(図10)。
- ・一般的な落石検知センサは、通電されている細いケーブルが落石により切断された現象(事実:時刻)を検出するが、断線を起こさない程度の微少な落石は検出できない。しかし、ケーブルセンサは震動を検出できるため、岩盤崩壊に先立って発生する落石を検出できる可能性がある。
- ・震動計測に位置づけられるため、動物の活動による震

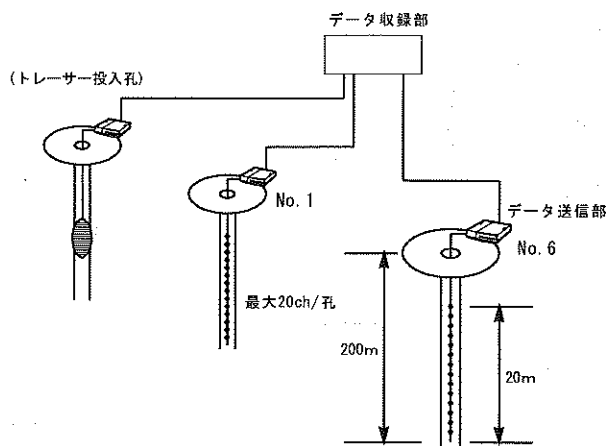


図9 多成分多孔式地下水検層システムのイメージ

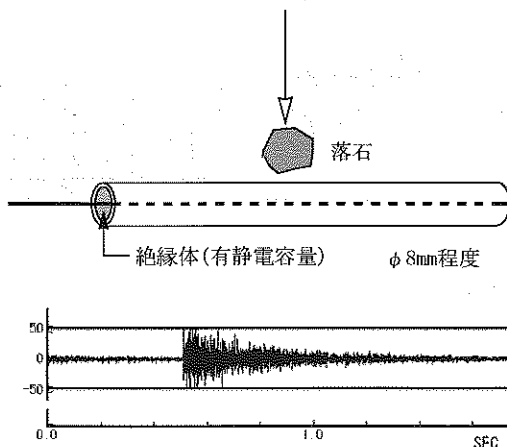


図10 ケーブルセンサのイメージと落石震動の例

動や立木の風による震動などがノイズになるので、設置にあたっては充分留意する必要がある。

5. 計測システムに与える影響

計測データを正しく評価するためには、電気信号に含まれる偽信号(以後、ノイズ)を極力少なくするように装置を設計すると共に設置工事を行う必要がある。

計測データに影響を与える主な影響を図11にまとめた。

5.1 雷

雷はノイズとしての影響も大きいですが、計測システム特にセンサ、データロガーやプリアンプなどの故障の原因となるので、最も注意すべき自然現象である。

電源線や電話線などにも落雷することがあり、データロガーや収録装置から外部に出るメタルケーブルの全てに耐雷装置を取り付けておくといよい。

5.2 温度の影響

図12は、ボーリング孔内に設置したアンカー棒のひずみを計測したデータである。比較のために現場の気温を併記した。ひずみ変化には、1年間の温度変化の影響が顕著であるが、よく観察するとひずみの方が気温より約1カ月遅れて変化しており、気温による補正は不可能である。

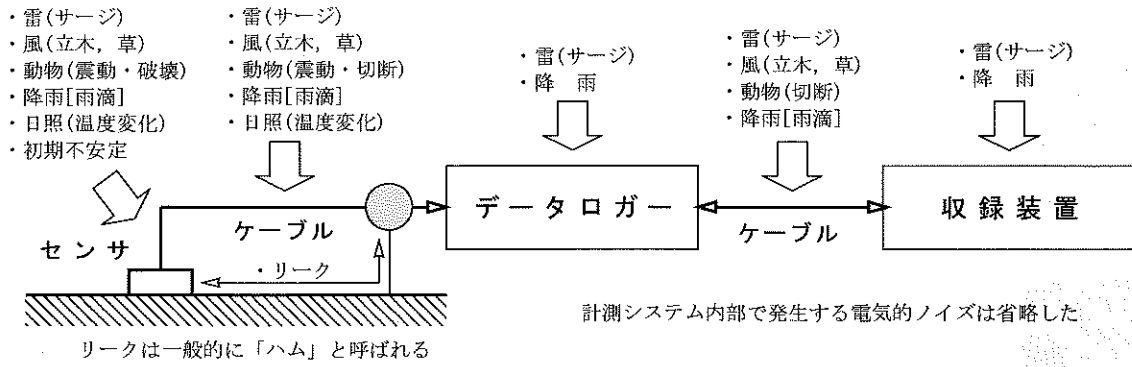


図 11 計測データに与える主な影響

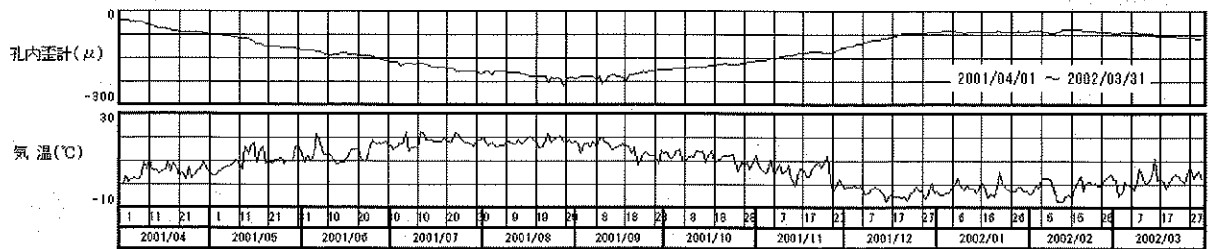


図 12 孔内ひずみ計(アンカー)と気温

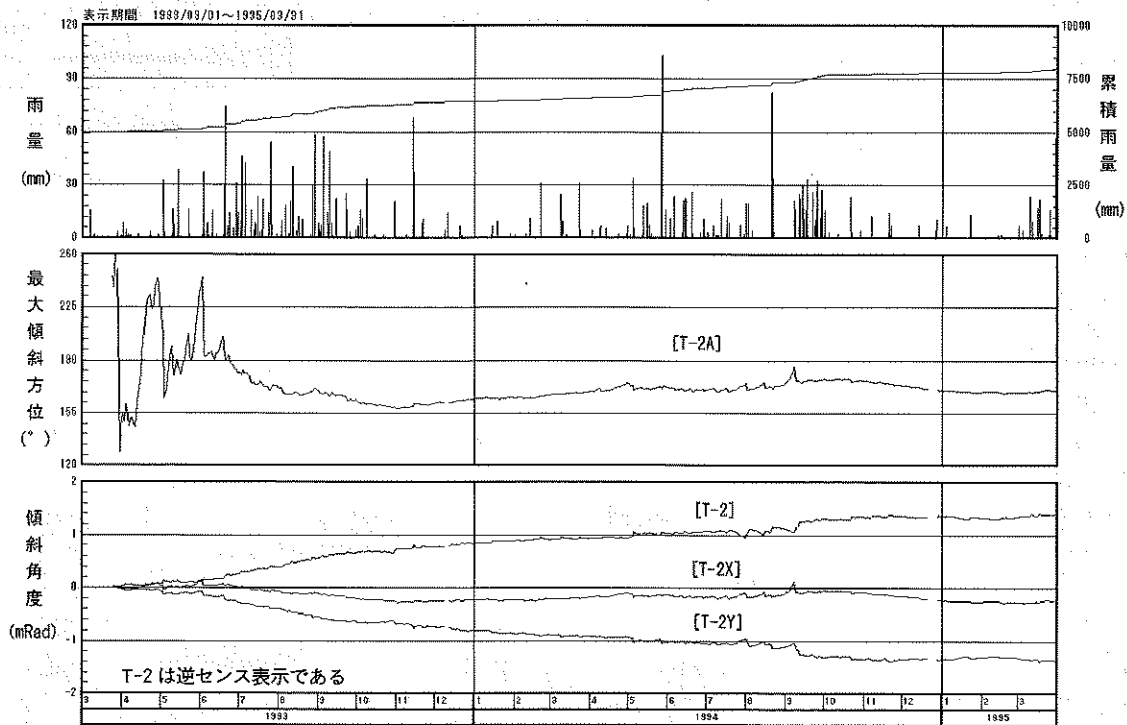


図 13 傾斜変動量の計測事例

よって、補正を行う場合にはひずみセンサに密着させた温度計が必要であることがわかる。

5.3 設置直後の初期変動

センサを地盤に取り付けた場合、接地工事に伴う人工改変やセメントなどの固化などに時間がかかり、落ち着くまでに時間がかかることが多い。その事例を図 13 に示す。

設置工事に伴う初期変動が7月始めまで検出されている。

なお、1993年7月～9月と1994年9月では最大傾斜角度が増加したが、これらは大量に降った雨の影響である。

6. おわりに

今年の夏に発生した九州と北海道の土砂災害などの予知・予測や、万一発生したときの避難信号の発生など、計測技術の果たす役割は大きいと考えられる。

しかし、これら最新の計測システムや計測技術は、まだ

特殊な技術者でないと扱えないという段階である。特に、通信技術については本文でも利点ばかりを記載したが、現実には扱える技術者が一握りであることも事実である。

したがって、これらの新しい計測技術を広く汎用化させるには、従来の計測技術者の養成とは異なった教育内容、すなわちセンサ技術、(光)通信技術、計測機器の設計技術、設置工事に関する技術やデータ処理技術などを専門に教育するシステムの導入が必要ではないだろうか。

ここで提案であるが、これらの新技術を採用した場合には、技術フォーラムで発表して地質調査に従事する技術者全員で議論を重ね、その結果を全員で共有したらどうだろうか。

参考文献

- 1) (社)全国地質調査業協会連合会：報告書作成マニュアル [土質編], p. 3, 1994年11月.
- 2) (社)全国地質調査業協会連合会編：地質と調査, '00第2号, (株)土木春秋社, 2000年6月.
- 3) 国際航業(株)(2003)：ホームページ
- 4) 桑野 建・佐々木靖人・脇坂靖彦：地上スキャン式レーザー測距儀による急崖岩盤斜面の計測, 情報地質, Vol.14, No.2, pp.166-167, 2003.
- 5) 小野尚哉・藤井 哲・渡子直記・畑 和宏・佐藤和志：3Dレーザミラースキャナを用いた迅速な地形調査, 全地連「技術フォーラム2001」新潟, pp.63-64, 2001.
- 6) 浅野広樹・石井靖雄・網木亮介：3Dスキャナによる地すべり移動量計測の検討, 第40回日本地すべり学会発表講演集, pp.279-283, 2001.
- 7) 池山洋二郎・伊藤 洋・大西有三：岩盤変位のモニタリング装置の開発, 土木学会論文集 No.624/III-47, pp.183-190, 1999.
- 8) 五十嵐正信・小林健一・三石 晋・島山正則・佐々木利明・針生真也：GPSを利用した大規模地すべり動態観測事例, 全地連「技術e-フォーラム2002」よなご, 2002.
- 9) 建設省土木研究所他：AEによる斜面動態計測システムに関する共同研究報告書, 第228号, 1999.
- 10) 大西有三・西山 哲：岩盤斜面崩壊対策としてのリアルタイムモニタリング技術, 地質と調査'00第2号, pp.22-27, 2000.
- 11) 岡本 厚・大西有三・張 春：精密写真測量による岩盤変位計測方法について, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.229-232, 1998.
- 12) 緒方健治：高速道路におけるのり面の健全度調査技術, 地質と調査'02第2号, pp.20-25, 2002.
- 13) 成瀬 央：光ファイバひずみ計測技術, 地質と調査'00第2号, pp.28-29, 2000.
- 14) 脇坂嘉治・宮倉由起夫・山田洋正：光ファイバ歪計によるすべり面の判定, 全地連「技術フォーラム2001」新潟, pp.31-32, 2001.
- 15) 大川 滋・佐藤 朗・森山正廣・石橋悦治：光ファイバセンサを用いた斜面監視システムについて, 全地連「技術フォーラム2001」新潟, pp.67-68, 2001.
- 16) 阿部博昭・古田俊夫：「水」の監視—多層多孔電気伝導度温度計測の実施例, 基礎工, Vol.30, No.4, 2002.
- 17) 駒崎征明・浦田健司・伊藤史人・氏平増之・徳永哲信・今野慎也・川村洋平・樋口澄志：スチールワイヤ型ケーブルセンサの実斜面への適用に関する研究, 応用地質, Vol.42, No.5, pp.264-273, 2001.

地盤の変形解析の現状と将来展望

神戸大学助教授 工学部建設学科

飯塚 敦

1. はじめに

数値解析とは、微分方程式系で表現される数理モデルを解く技法およびその理論体系のことである。何の数理モデルを解こうとするのか、その対象によって様相は大きくかわる。本稿では、もっぱら静的な外力作用に伴う地盤の力学応答を対象とし、地盤を土/水連成場の連続体モデルとして取り扱い、有限要素法を用いることによって、複雑な初期値・境界条件や非線形な材料特性を考慮しながら、解(地盤の変形)を得よう(予測しよう)とする。これを総して地盤の変形解析とよぶ。ここでは、この地盤の変形解析の中味、特に他と何が同じで何が違うのか、を概観した後、地盤工学の実務では、どのように役立つのか、役立つためにはどのような点に留意しなければならないのか、さらには、将来、どのように発展するであろうか、または発展すべきであろうか、考えてみようと思う。

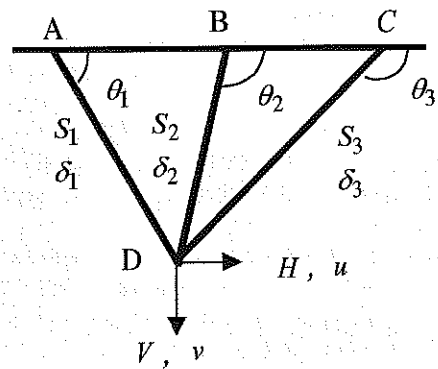


図1 3本トラスの問題

2. 地盤の変形解析の構造

2.1 理論のフレームワーク

まずは、理論の構造と地盤のモデル化の要点を、簡単な例題を示しながら説明する。図1に示すような3本トラスの問題を考える。部材1, 2, 3の下結点Dに、水平および鉛直方向にそれぞれHとVの力を作用させる。この時のD点の変位uとv、各部材の伸び δ_i と軸力 S_i ($i=1, 2, 3$)を知りたい。釣り合い式を書くと、

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_1 & \cos \theta_2 & \cos \theta_3 \\ \sin \theta_1 & \sin \theta_2 & \sin \theta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \mathbf{B}^T \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H \\ V \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、力の境界条件として、D点での作用外力が既知である。未知数が3つに対して式が2本しかない。一方、幾何学的な適合式(伸びと変位の関係)は、

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ \cos \theta_3 & \sin \theta_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \mathbf{B} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ただし、変位の境界条件として、A, B, Cの各点では変位が固定されている。これでも未知数が5つに式が3本であ

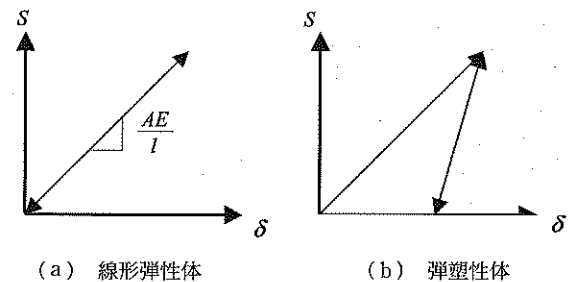


図2 異なる2つの材料特性(構成式)

る。式(1)と式(2)をあわせても、未知数が8つに式が5本となっており、方程式が足りず解が決まらない。これを補うのが材料特性であり、今の場合、線形弾性体(図2の(a))を考えると、

$$\begin{pmatrix} \frac{A_1 E_1}{l_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A_2 E_2}{l_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_2 E_3}{l_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

が与えられる。ここに、 A_i , l_i と E_i は、それぞれ部材 i ($i=1, 2, 3$)の断面積、部材長、ヤング率である。この式(3)を得て、未知数と方程式の数がそろそろ。すなわち、材料特性式(構成式という)が、力の世界(つりあい系)と変位の世界(適合系)との橋渡しをしているのである。未知数と方程式の数を合わせてくれているのである。力学問題における普遍的な理論構造である。

2.2 地盤の特殊性

先の例題において、下結点Dで水平方向作用力 H が作用した後、さらに反対向きに H' が作用したとしよう。この時は、先の解に、D点での外力 H' に対する解を足し合わせ（重ね合わせ）ればよい。ただし、このような重ね合わせが成り立つのは、方程式系が線形の場合のみである。図2の(b)のような材料、すなわち、载荷した後に除荷すると、永久変形（塑性変形という）を残すような材料では、重ね合わせは成り立たなくなる。このような材料を対象とする場合には、D点において、 (H, V) が作用した場合と、それに続く $(H', 0)$ が作用した場合を順番に追跡して計算してゆかねばならない。この载荷重の順番を荷重履歴という。図2(b)のような材料特性を仮定すると、荷重履歴の違いによって、3本トラスの問題でも、解が異なってくるのが容易に想像されよう。さてここで、地盤材料を思い起こしてみよう。どの教科書にも載っているが、土の圧縮特性は、図3に示すような $e-\log p'$ が関係に代表される。図の縦軸は間隙比であるから、その変化は体積変形。横軸は応力である。縦横の軸を逆転させると、図2(b)のような材料応答を表わしていることに気づく。すなわち土は荷重履歴の違いによって、変形が異なってくる材料なのである。正確には「土の変形は荷重履歴に依存する」のである。

土が土たる所以には、もう一つ重要な要素がある。土の間隙を占める水（間隙水）の存在である。当分、話題を飽和土に限るが、この存在によって、間隙水圧という新たな未知数が加わり、またしても方程式が1本足りなくなる。これを解決しているのがダルシー則である。間隙水圧の変化が土の体積変化に結び付けられ、未知数と方程式の数とが等しくなっている。間隙水圧は場に課せられた体積拘束条件に見合うように定まる拘束圧として決定される。ラグランジュの未定乗数を用いることによって、このことは明快に説明されるが、詳細は他に譲る⁹⁾。圧密に伴う間隙水圧の変化は、ダルシー則に制御されながら刻々と変化する体積拘束条件に対して、そのつどに定まる拘束圧の時系列に他ならない。飽和土の変形問題は、間隙水の流出入に伴って体積変化が拘束されるという「体積変化に拘束条件が課された力学場の問題」なのである。

2.3 地盤の数理モデル

地盤の変形問題では、土/水連成解析という言葉をししばし耳にする。間隙水の移動を考慮して、間隙水圧（または全水頭）を解として求める解析であることを明示した言い

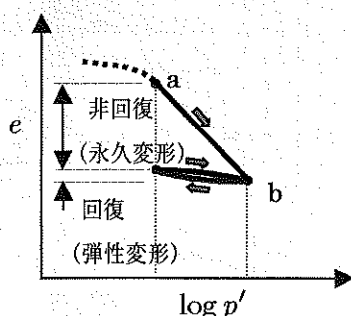


図3 土の $e-\log p'$ 関係

方であるが、実は、間隙水（の物質点）がどこからどこへ移動するかには全く留意していない。間隙水は、ダルシー則に支配されて、場に体積拘束条件を与える役割しか与えられていない。地盤が変形して、その移動が明示されると対照を成している。地盤の変形解析では、主役はあくまでも「地盤（土自身の骨格）の変形」なのである。以上をまとめると、地盤の変形解析とは、

- (1) 体積変化に拘束条件が課された力学場の問題であって、その体積拘束条件に見合う拘束圧として、間隙水圧が定まる。
- (2) 体積変化は、地盤からの間隙水の流出入で決まり、間隙水の流出入はダルシー則で記述される。
- (3) 作用外力は、間隙水と地盤自身の変形に見合っ発生する応力（有効応力とよぶ）との和に釣り合う。この時、地盤自身の変形は、少なくとも弾・塑性的な非線形特性（図3など）に支配される。

となろう。作用外力に対して、間隙水圧や有効応力がそれぞれ単独に決定されるのではないことに注意しなければならない。作用外力に対して土は変形しようとする。その変形に見合った体積変化の下で間隙水圧が発生する。間隙水圧の変化は、ダルシー則を介して、間隙水の流出入量を決定し体積変化を定めようとする。その体積変化は、土自身の応力変化（有効応力変化）を促し、間隙水圧と共に作用外力と釣り合おうとする。以上の相互作用が同時進行できて（連成できて）はじめて、ある作用外力に伴う土の変形が決定されるのである。さらに、土はせん断によっても体積変化を生じる性質（ダイレイタンシー特性）を有することにより、せん断変形に対しても、間隙水との連成が必要となる。土/水連成解析手法の具体的な内容（有限要素定式化など）は他の文献⁹⁾を参照されたい。

このような土/水連成弾塑性（弾粘塑性）問題を解く有限要素コードは数多く開発されているが、世界では、土の構成式に Cam-clay モデル¹⁰⁾を用いた CRISP や関口・太田モデル⁹⁾を用いた DACSAR⁹⁾などが広く使われているようである⁹⁾。

3. 実際問題への適用

解析の醍醐味は「予測」と「解剖」にある。将来どのようになるのか、地盤や構造物の内部では何が起きているのか、などを知る手立てとして威力を発揮する。この内「将来予測」は、昨今の性能設計、維持補修や品質評価などをキーワードとする社会動向の中で、ますます重要度が増してきている。性能設計には将来予測が不可欠であって、しかも陽な形に時間軸が取り込まれていなければ機能しない。時間の経過と共に刻々と変化する地盤や構造物の性状を予測しなければならないからである。性能設計における地盤の変形解析の役割や利用については、たとえば、第38回地盤工学研究発表会（平成15年7月）DS12への投稿論文⁵⁾が参考になる。時間の経過と共に刻々と変化する地盤や構造物の性状予測は、維持補修の検討でも重要となる。

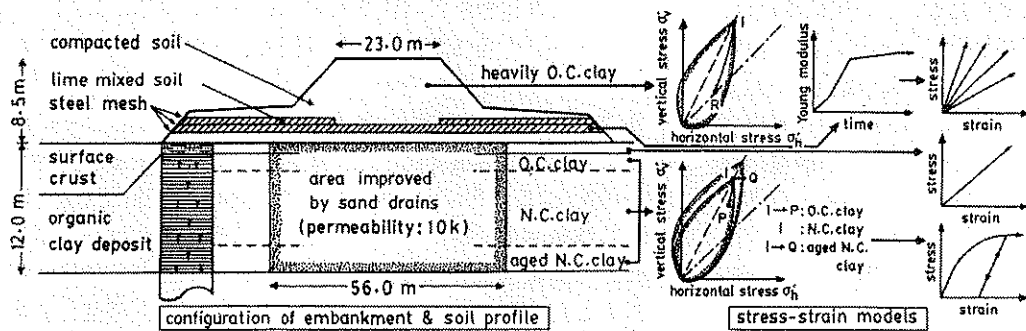
以上を踏まえ、「予測」に関する実務への適用事例と、「解

剖」に関する解析事例を紹介してみたい。

3.1 大沢郷高速道路盛土

JH 高速道路盛土施工に伴う変形解析事例である⁶⁾。山間部の溺れ谷をわたるかたちで高速道路盛土が施工された。溺れ谷部分は、深さ約13mにおよぶ有機質軟弱地盤である。盛土本体下にはサンドドレーンを打設し圧密を促進させ、石灰処理を施した押しえ盛土を両側に配置して、地盤の側方流動および破壊を押しえする計画であった。沈下計、間隙水圧計などを設置し、動態観測を行い、並行して、有限要素シミュレーションによる将来予測と計測データと突きあわせながら、施工が進められた。図4に解析対象地盤および盛土の概要と有限要素モデルがまとめられている。計算に必要な入力パラメータは土質調査結果から決定され

た。表層のクラスト層、サンドマットおよび石灰処理部分を弾性体、特に石灰処理部分は弾性定数の時間変化を考慮している。基礎の軟弱地盤は弾粘塑性体、盛土本体を弾塑性体（関口・太田モデル⁹⁾）としてモデル化された。サンドドレーン改良部については、打設に伴う地盤物性の変化の見積もりが困難なことから、透水性の改良だけが考慮されている。図5に、有限要素メッシュと解析の結果がまとめられている。有限要素メッシュは、道路の縦断方向に平面ひずみ条件が仮定され、さらに横断面の対称性から片側半分を解析領域としている。荷重履歴が図5(n)に示されている。図5の(b)から(h)に、実測と計算によって予測された沈下が比較されている。(i)から(m)は間隙水圧の実測と予測の比較である。盛土中央付近の地表面沈下は実測値と良くあっている。しかし、盛土中央から外れるにした



Modelling of materials in the fill-subsoil system

図4 地盤のモデル化

がって、計算値は実測値と合わなくなってゆく。押しえ盛土の法肩下の地表面沈下(f)を見ると、計算値の示す沈下曲線が滑らかであるのに対し、実測値は少なくとも3カ所で(図中の①②③)、急激に折れ曲がっている。この実測値の急激な折れ曲りは、数回にわたり小規模なすべりが基礎地盤に生じたことを意味してい

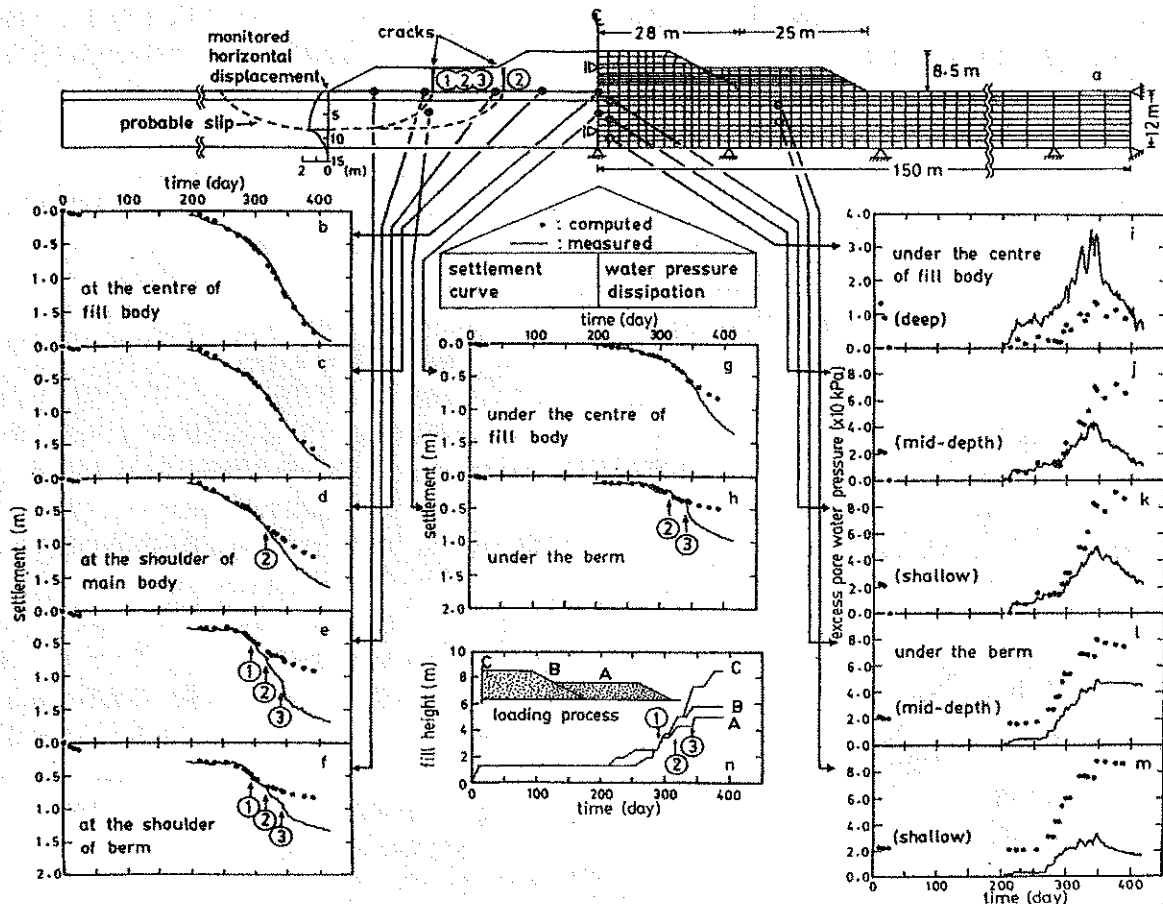


図5 シミュレーション結果

る。ここで用いた解析手法では、すべりのような不連続場の発生を表現することはできないから、実測値の特異な挙動がよけいに浮き彫りにされる結果となっている。事実、現場では、押さえ盛土表面の2カ所で、クラックの発生が見られた。さらに、押さえ盛土法尻に埋設された水平変位計には、深さ8m地点で、1.8mもの水平変位が記録されていた。これらから予想されるすべり線を描くと、図5(a)の左側に示すようになる。動態観測結果を有限要素シミュレーション結果と逐一比較しながら、施工管理が行われ、破壊ギリギリのところで施工を完了できた事例である。

3.2 供試体圧縮せん断シミュレーション

土の強度や剛性を測るために、現場からサンプリングしてきた試料を、室内で、成型し圧縮せん断する。試験に供された供試体をエレメント（要素）と見なして、得られた応力経路や応力ひずみ関係から、その土の強度や剛性を決定する。エレメント（要素）では、応力やひずみの分布が均質一様であることが要求される。載荷キャップやペダスタルなど、土供試体と接触する部分の摩擦を取り除くためにいろいろな工夫が考案されてきた。しかし、破壊近傍では、供試体はバルジ型に変形するのは避けられないし、最後には、供試体全体を通して斜めに、多くの場合、共役にすべり線の発生をみる。エレメントとはほど遠い姿である。粘土の供試体がどのように破壊に至るのか、すべり線はどのように生成されるのか、エレメントの仮定はどの程度のズレを生むのか、土/水連成有限要素解析によって調べた^{7,8)}。ただし、供試体内の不均質場や局所化の生成シミュレーションをターゲットにするため、物質点の基準配置と変位後の現配置とを区別し、供試体内の近傍の2点間の相対移動と回転を厳密に考慮できる有限変形増分理論を用いている。したがって材料非線形性ばかりでなく幾何的非線形性も含まれた計算となっている。図6に供試体を模擬し

レーションをターゲットにするため、物質点の基準配置と変位後の現配置とを区別し、供試体内の近傍の2点間の相対移動と回転を厳密に考慮できる有限変形増分理論を用いている。したがって材料非線形性ばかりでなく幾何的非線形性も含まれた計算となっている。図6に供試体を模擬し

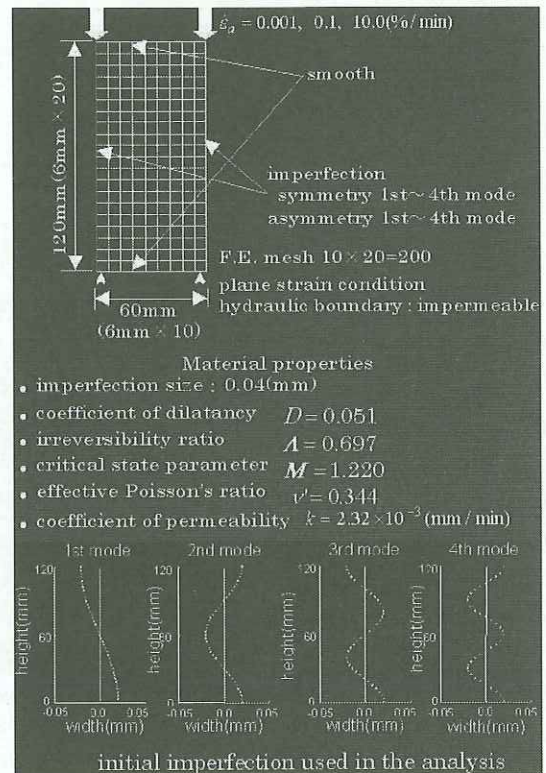
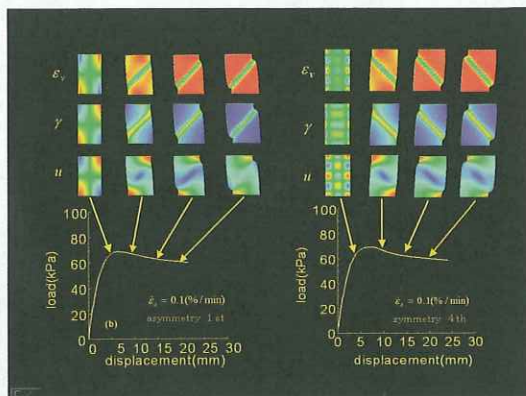
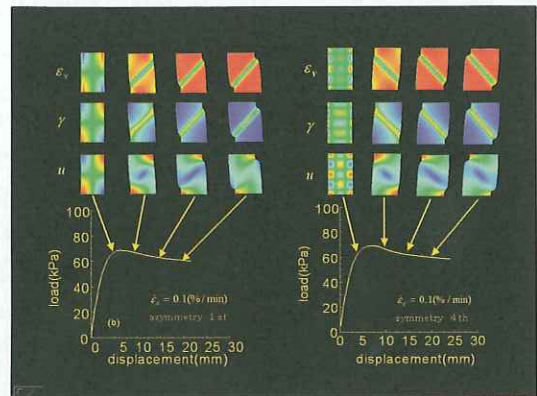


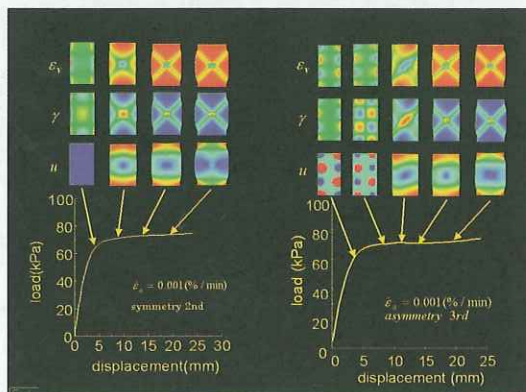
図6 3軸試験供試体も有限要素モデル



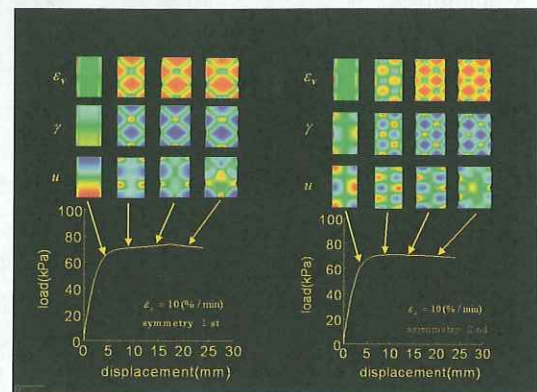
(a) せん断速度 $\dot{\epsilon}_a=0.1\%/min$ (その1)



(b) せん断速度 $\dot{\epsilon}_a=0.1\%/min$ (その2)



(c) せん断速度 $\dot{\epsilon}_a=0.001\%/min$



(d) せん断速度 $\dot{\epsilon}_a=10\%/min$

図7 せん断に伴う局所化の変化

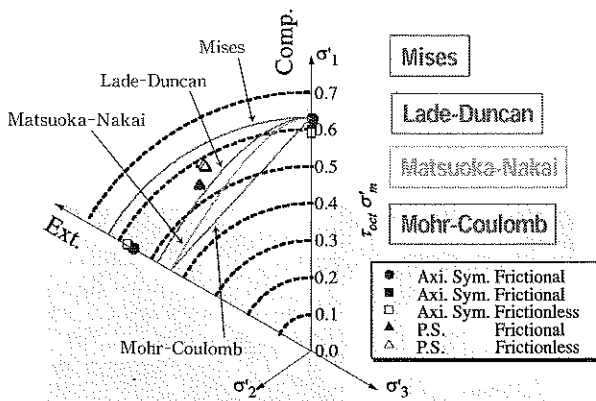


図8 3軸供試体の強度

た有限要素モデルを示す。土材料は Cam-clay モデル^{10),11)} による弾塑性体 (正規圧密粘土) とした。非排水圧縮せん断を対象に、供試体の境界からの水 (間隙水) の出入りはないものとした。また、供試体成型時のトリミングの影響を考慮し、図6下段に示すような、微小な初期不整を供試体側面に与えた。初期不整ばかりなく圧縮せん断速度の影響も調べた。図7に有限要素シミュレーションの結果を示す。体積ひずみ ϵ_v 、せん断ひずみ γ 、そして間隙水圧 u の供試体内分布が示されている。せん断速度が同じでも、与えられた初期不整の違いによって、最終的なすべり線 (局所化のパターン) が異なっている。初期不整および圧縮せん断速度の違いによって、供試体の不均質化は大きく異なることがわかる。ところが、実験で得られる応力ひずみ関係、すなわち計測される「載荷力」と「軸変位」の関係には大きな違いは現われない。供試体のサイズの「程よさ」を得て、局所化のパターンの違いが、最終耐荷力 (計測される供試体の強度) にさほど影響を与えていないことが分かる。

さらに、3次元の有限要素法を用いて、土の供試体の境界非排水3軸圧縮/伸張せん断の計算も行い、土質試験法に定められている方法に従って、それぞれの供試体の強度を π 面上にプロットすると、図8を得た¹²⁾。エレメント (要素) は、Mises 型の Cam-clay モデルに厳密に従うが、供試体という境界値問題となると、圧縮と伸張とで不均質場の生成や局所化の発生に違いが生じるため、供試体全体としての強度は Mises 型とはならず、むしろ Mohr-Coulomb 型となっている。どの教科書にも書かれている「土の強度は Mohr-Coulomb 型に従う」という固定概念に、一石を投じる結果である。

4. 不飽和状態の重要性

構造物を造るための地盤の変形解析から、地球環境圏の一部である地圏の性状変化を予測する解析への発展を考えたとき、気圏との境界に必ず存在する不飽和状態の考慮が重要となる。地圏は不飽和状態にある地盤を介して気圏とつながっており、水循環をはじめさまざまな物質がこの薄層を通して循環している。地球規模から見れば、高々数十センチから数メートルの超薄層であるが、力学的な相互作用ばかりでなく、地上の生態活動や物質循環を支配してい

る。本稿では、まだ緒についたばかりであるが、著者らの研究グループが行っている不飽和状態を考慮した地盤の変形解析を紹介する。

図9に示すように、幅174m、深さ30mほどの谷を埋めたところ、降雨によって不等沈下が生じた¹³⁾。Brandonらは水浸沈下実験により、沈下は不飽和土のコラスによると報告している。この問題を、不飽和状態を考慮した土/水連成弾塑性解析手法を用いて計算してみる¹⁴⁾。不飽和状態における間隙水分布の形態の違いを考慮することによって、土中に発生するサクシオンが、土を等方的に拘束するばかりでなく、土自身の剛性を変化させる効果も取り入れる。よって、このようなサクシオン効果を考慮できる不飽和土用の弾塑性構成モデル¹⁵⁾を用いている。さらに、雨水の流出入の影響を検討したいので、湿潤と乾燥でヒステリシスを描く水分特性曲線モデル¹⁶⁾を採用している。このような「不飽和特性」を考慮した土/水連成弾塑性有限要素解析手法を開発した¹⁷⁾。予測結果が図10に示されている。連

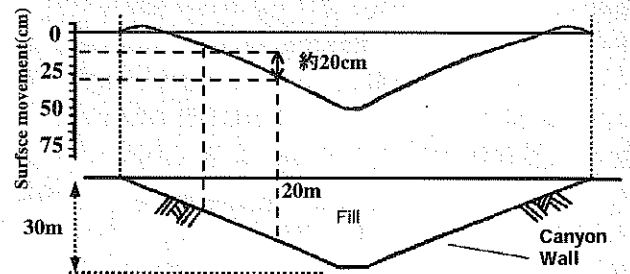


図9 谷の埋め立てと降雨による陥没

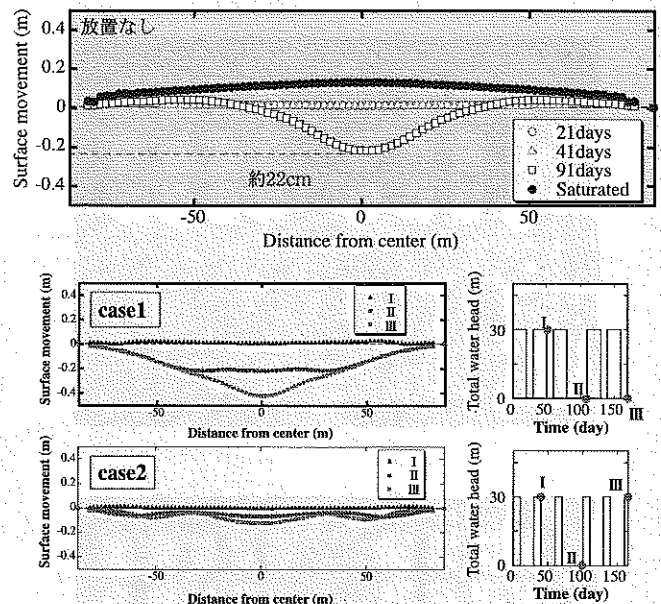


図11 断続降雨の繰り返しと地表面沈下予測

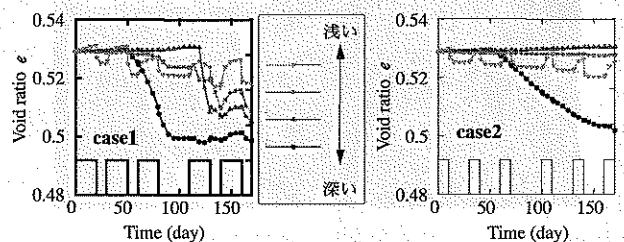


図12 埋め土内部の体積変化

続降雨を仮定しているが、時間経過に伴って不等沈下が顕在化している。参考のため、Cam-clay 飽和モデルによる予測も示されているが、事実と全く異なる結果となっている。不飽和状態の考慮の重要性を示唆している。次に、降ったり止んだりを繰り返す断続的な降雨の影響を検討するため、図 11 の右側に示すような降雨を仮定して計算を行った。地表面の沈下予測が図 11 の左側に示されている。降雨時間の違いによって、地表面の不等沈下のパターンが大きく異なることが予想される結果となった。埋め土の中央部内部の体積変化予測を示したのが図 12 である。地表面からの距離の違いによって、体積変化性状が大きく異なっている。

5. おわりに

地盤の変形解析は、土/水連成弾粘塑性有限要素コード DACSAR などの普及⁹⁾に見られるように、地盤工学 (Geotechnical Engineering) の分野では普遍的な技術として受け入れられつつある。しかし現在、地盤の変形解析はそれ自身が単独で機能するだけでなく、計算力学 (Computational Mechanics) の一翼を担いながら、他分野との連携を深め、より広い分野に適用可能な体系へ脱皮する質的変換をはからねばならない時期にきていると考えられる。文明社会の社会基盤整備のための技術 (Geotechnique) から、地球環境問題の一翼を担える地球科学 (Geoscience) への積極的な参画である。人為的な力学的・化学的作用が、現在かろうじて平衡状態にある系にどのような影響を及ぼし、将来どのような別の平衡状態もしくは不安定状態に遷移するかを定量的に予測できねばならない。地球科学に貢献するためには、広域的な相互作用の理解が不可欠であって、しかも、「予測」を求める以上、数理モデルの構築とその解析、さらに検証が重要となる。

参考文献

- 1) たとえば、飯塚 敦: 5. 土と水の連成問題, 講座: 有限要素法の基礎と地盤工学への応用, 土と基礎, 地盤工学会, Vol. 49, No. 7, pp. 37-43, 2001. 7.
- 2) たとえば、飯塚 敦: 6. 地盤の変形, 講座: 有限要素法の基礎と地盤工学への応用, 土と基礎, 地盤工学会, Vol. 49, No. 8, pp. 31-36, 2001. 8.
- 3) Iizuka, A. and Ohta, H.: A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 27, No. 3, pp. 71-87, 1987. 9.
- 4) Mastat, P.: A database for the numerical modeling of embankments on soft soils and the comparison between computational results and in-situ measurements, Bulletin Laboratoires des Ponts et Chaussees, 232, pp. 45-60, 2001.
- 5) 第 38 回地盤工学研究発表会講演概要集, 論文 674~論文 684, 地盤工学会, pp. 1347-1367, 2003. 7.
- 6) Ohta, H., Iizuka, A., Monda, S., Kuwahara, M. and Muta, T.: Progressive failure of soft clay under embankment, Proc. of 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE), ISSMGE, Vol. 2, pp. 751-754, 1994. 1.
- 7) Iizuka, A., Kobayashi, I. and Ohta, H.: Dilatancy localization in clay specimen under shearing, Proc. of 4th International Workshop on Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, pp. 345-354, 1998. 11.
- 8) 小林一三・飯塚 敦・太田秀樹: 正規粘土供試体せん断時における局所変形の遷移, 土木学会論文集, No. 617/III-46, pp. 1-18, 1999. 3.
- 9) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency of clay, Proc. Specialty Session 9, Proc. of 9th Int. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 229-239, 1977.
- 10) Schofield, A. N. and Wroth, C. P.: Critical state soil mechanics, London, McGraw-Hill, 1968.
- 11) Yatomi, C., Yashima, A., Iizuka, A. and Sano, I.: General theory of shear bands formation by a non-coaxial Cam-clay model, Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 29, No. 3, pp. 41-53, 1989. 9.
- 12) 橋 進也・飯塚 敦・河井克之・太田秀樹: Mises 規準から見た境界非排水粘土供試体の破壊シミュレーション—Mises 型か Mohr-Coulomb 型か—, 第 38 回地盤工学研究発表会講演集, 地盤工学会, CD-ROM 147 (pp. 293-294), 2003. 7.
- 13) Brandon, T. L., Duncan, J. M. and Gardner, W. S.: Hydrocompression settlement of deep fills, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 116, No. 10, pp. 1536-1548, 1990.
- 14) Kawai, K., Iizuka, A., Hayakawa, E. and Wang, W.: Non-uniform settlement problem of deep fills due to rainfall, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, under submitting.
- 15) 本田道識・飯塚 敦・河井克之・軽部大蔵: 不飽和土の応力—ひずみ関係式, 土木学会論文集, No. 659/III-52, pp. 153-164, 2000. 9.
- 16) 河井克之・軽部大蔵・芦田 渉・嘉戸善胤: 間隙比を考慮した水分特性曲線モデル, 土木学会論文集, No. 666/III-53, pp. 291-302, 2000. 12.
- 17) 飯塚 敦・本田道識・西田博文・河井克之・軽部大蔵: 間隙水分分布の違いを考慮した不飽和土/水連成解析, 土木学会論文集, 土木学会, No. 659/III-52, pp. 165-178, 2000. 9.

液状化解析の現状

岐阜大学教授

やしま あつし
八嶋 厚

1. はじめに

一つの統一された解析手法を用いて、地震前の初期状態から液状化の発生、液状化後の挙動までを連続して解析し、永久変形や地中構造物への設計外力となる流動圧等を予測することが理想的である。しかしながら、現状の液状化解析手法では、一つの手法で初期状態から液状化後の大変形までを予測することは困難である。現状の液状化解析手法の適用範囲を土の構成則や場の方程式に関してまとめたものを図1に示す。

まず、土の構成則について、固体力学に基づく有効応力法による液状化解析では、繰返し载荷中の非線形履歴特性やダイレイタンス特性を再現できる構成則が広く用いられている。このような構成則はサイクリックモビリティ状態での土の挙動（せん断ひずみ10%程度）を予測すること

はある程度可能であるが、完全液状化に至った後の大きなひずみ領域での挙動を再現できるかどうかは十分に検証されていない。このため、地震時の大変形を扱うために、地震後の挙動のみを対象とした構成則が用いられることもある。

場の方程式の扱いについては、固体力学あるいは流体力学に基づいた解析手法が考えられる。一般に液状化解析では、固体力学に基づき、微小ひずみの仮定のもとで土と間隙水の連成を考慮して定式化された場の方程式が用いられている。しかしながら、液状化に伴う流動によって発生する地盤のせん断ひずみは数10%を越えるものであり、時には100%を越える場合もある。それゆえ、微小ひずみの仮定に基づいた手法では、このような大変形を再現することはできなくなる。また、地中構造物周辺のように変形が局所的に大きく変化する場所では、有限変形まで扱うとしても固体力学に基づくLagrange系の表現では変形に追従できない可能性もある。したがって、流動圧などを予測するには流体力学に基づいた解析手法が必要となることも考えられる。

本報では、液状化解析手法の現状について、1) 地震前の初期状態から地震中の液状化発生の過程、すなわち固体から液体へ変化する過程について、固体力学に基づく有効応力法の適用性について論述する。2) 地震後の液状化地盤の大変形過程、すなわち液体から固体へ変化する過程について、流体力学に基づく流動解析法の適用性について論述する。ここで紹介する解析事例は、非常に限られたものであるが、解析手法の最新の情報を含んでいる。

2. 有効応力解析法の現状

2.1 液状化解析に用いられる構成則

地震前の初期状態から液状化に至る過程では、過剰間隙水圧の上昇に伴い土の有効応力が減少し、剛性や強度が低下する。液状化が発生してもサイクリックモビリティ現象などのため、有効応力は変動し、これに伴い剛性や強度は大きく変化する。このように土の有効応力が変化する液状化現象を解析するには、有効応力解析がもっとも適切な方法である。

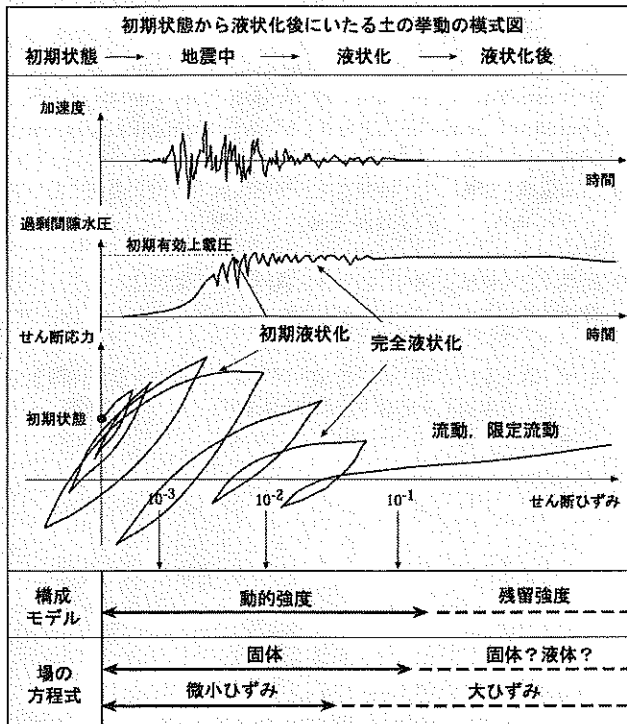


図1 液状化解析手法の適用範囲のイメージ

表1 液状化解析で用いられる根成則の種類

	非弾塑性タイプ	弾塑性タイプ
一次元	双曲線+Martin・Finn・Seed	Prevost
	双曲線+Ishihara・Towhata R・O+社本ら	Pastor・Zienkiewicz Nishi・Kanatani
多次元	双曲線+Martin・Finn・Seed	Tobita・Yoshida
	R・O+福式・松岡 双曲線+Iaiら 吉田ら	伊藤 Cubrinovski・Ishihara Okaら

液状化解析で用いられる基礎方程式の成り立ちと離散化の方法は、たとえば吉田^{11,2)}によって詳しく述べられているのでここでは省略する。また、さらに詳細な基礎方程式の記述はたとえば文献3)を参照されたい。

地盤の応力とひずみの関係を記述する構成則は、有効応力解析において最も重要な位置を占める。液状化解析で用いられる砂の繰返しせん断挙動を対象とした構成則は基本的に以下の性能を有する必要がある。

- I) 有効応力に依存したせん断変形特性
- II) ダイレイタンスー特性および有効応力に依存した体積変形特性

土の構成則全般については文献4), 5)を、液状化で用いられている構成則については文献6), 7), 8), 9)等を参照されたい。なお、構成則は次第に改良が加えられ変わっていくのが常なので、同じ名前でも使われていても実質は異なっていることも多い。ここでは、構成則を表1に示すように形式上、非弾塑性タイプと弾塑性タイプに分類して示してみた。紙面の都合上各モデルの参考文献については省略しているが、詳細は文献10)を参照されたい。弾塑性タイプでは、ひずみを弾性成分と塑性成分に分ける。一方、非弾塑性タイプでは、ひずみを弾性・塑性成分に分けず、せん断応力とせん断ひずみの関係を一つの数式で表現する場合が多い。なお、表1中の非弾塑性タイプは、一部を除いて上記「I)のモデル+II)のモデル」の形で示されている。

2.2 モデルパラメータの設定

構成則そのものの挙動と同様に設定されたパラメータのよしあしも有効応力解析の結果を左右する重要な要素である。実務においてパラメータを設定する際、個々の構成則によって差はあるが、通常、以下のようない地盤調査・室内試験が必要となる。

- ・標準貫入試験（土質柱状図、地下水位、 N 値）
- ・速度検層（せん断波速度）
- ・物理試験（密度、粒度分布、間隙比）
- ・せん断試験（内部摩擦角、変相角）
- ・繰返しせん断試験（動的変形特性、液状化強度）
- ・透水試験（透水係数）

- 性、液状化強度）
- ・透水試験（透水係数）

以上の調査結果がそろっていれば、構成則のモデルパラメータを精度よく決定することができる。しかしながら、標準貫入試験結果のみからすべてのモデルパラメータを推定する試みもなされている。やむを得ず N 値等による液状化強度のみからモデルパラメータを設定する場合には、類似の材料を対象とした既往の室内試験結果を参考にすることで、密度や細粒分の違いによるひずみの発生傾向を把握しておくことが大切である。いずれにしろ、このような場合には、有効応力解析といえども、解析結果の信頼性はかなり低くなることを覚悟しておかなければならない。

せん断試験では、良質な不攪乱試料を用いることが望ましい。液状化強度は試料の攪乱の影響を受けやすく、試料が攪乱を受けた場合の液状化強度は、緩い砂では過大に、密な砂では過小に評価される可能性がある¹¹⁾。また、不攪乱試料はある深度で得られたものであり、必ずしも同一材料からなる土層全体の特性を表現したものではない場合もある。よって、モデルパラメータを設定する際には、原位置試験から推定される情報も考慮して、土層を代表した力学特性を把握することが望ましい。

2.3 有効応力解析例

液状化の発生をもっとも簡単に予測するのは、 F_L 値を計算することである¹²⁾。兵庫県南部地震以降、 F_L 値算定方法に改良が加えられてきたが、本節ではまず F_L 値の予測する液状化被害（直接的な指標として液状化指数 P_L 値が用いられる）と有効応力解析が予測する液状化被害について概観しておく。2.2で述べたように有効応力解析の精度は設定するモデルパラメータの精度に依存する。 N 値等の簡単な情報のみを用いて実施された液状化解析の信頼性が低いことは先に述べたとおりである。しかしながら、有効応力解析においては、入力地震動の継続時間を直接考慮することができる。今後予想される東海地震や東南海地震は、

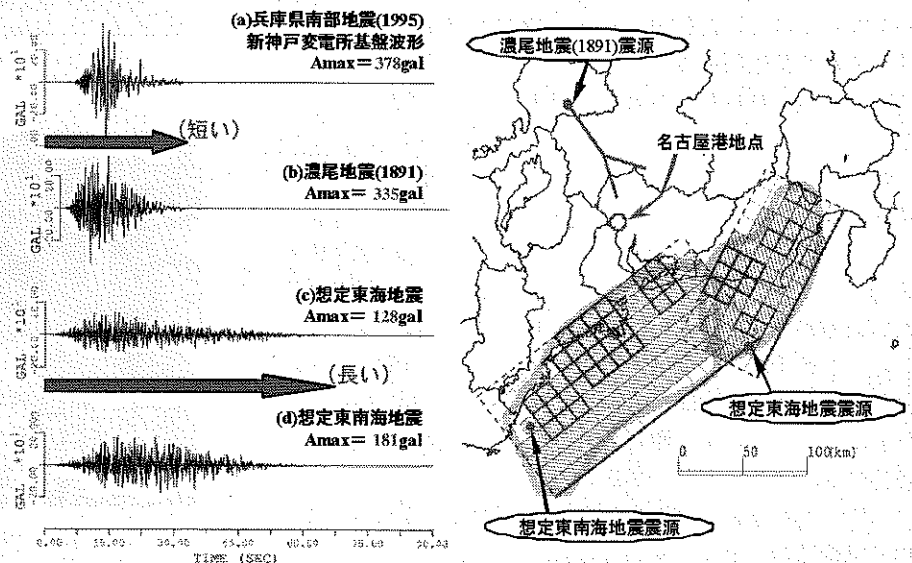


図2 名古屋港地点（工学的基盤）におけるシミュレーション波形と兵庫県南部地震(1995)、濃尾地震(1891)の記録との比較

表2 各構造物の残留変位の比較

断面	入力波	最大入力 加速度 (Gal)	継続時間 (秒)	着目点での応答 最大水平加速度 (Gal)	残留変位 (m)	実測残留 変位 (m)
六甲南岸壁	PI, GL-32 m, NS成分	543	30	404	2.8	4.0~5.0
	東海波	128	90	145	2.3	
	東南海波	181	90	162	3.2	
	濃尾地震	335	90	249	1.8	
淀川左岸西島	大淀, 引戻し波	147	40	201	2.7	約3.0
	東海波	128	90	132	4.3	
	東南海波	181	90	111	4.9	
	濃尾地震	335	90	167	3.4	
東灘区商船大	深江浜, GL-32 m, NS成分	446	25	551	0.8	約1.0
	東海波	128	90	121	1.8	
	東南海波	181	90	133	2.5	
	濃尾地震	335	90	255	1.8	

兵庫県南部地震のような内陸型地震とは異なり、破壊断層領域が広域的であることから、地震動の継続時間がきわめて長くなることが想定される。このような状況下において、液状化によって引き起こされる被害はどのようなものとなるのかを試算してみた。

兵庫県南部地震の際に基礎地盤の液状化により多大な残留変形を見た、六甲アイランド南岸壁、淀川左岸西島堤防、神戸市東灘区神戸商船大学建物のそれぞれについて、兵庫県南部地震の実入力地震動と、想定東海、東南海地震、また比較のために1891年濃尾地震のそれぞれについて、有効応力解析法 LIQCA¹³⁾を用いた解析を実施した。名古屋港地点の工学的基盤における入力地震動を図2に示す。これらの入力地震動は、兵庫県南部地震における観測記録を除き、杉戸らの方法¹⁴⁾によって用意されたものである。これらの図からわかるように、内陸型地震の兵庫県南部地震および濃尾地震の最大加速度は、東海、東南海地震に比べてかなり大きいことがわかる。一方、継続時間は東海、東南海地震の方がかなり長くなっていることがわかる。当該地盤の液状化程度を表現する PL 値の算定は、最大加速度に依存していることから、名古屋港地点に上記三つの構造物が存在している場合(あり得ないことではあるが)、内陸型地震の兵庫県南部地震および濃尾地震の方が、想定東海、東南海地震よりもかなり大きな液状化被害を予測することとなる。

表2に、実際の解析結果を示す。どの構造物においても、東海、東南海地震を想定した解析の方が、内陸型地震に比べて大きな残留変形を予測することがわかる。液状化に至る過程で軟化した基礎地盤に長い継続時間のもとの繰り返し荷重が加えられることによって、大きな残留変形が生じることは容易に想像できる。このように、有効応力解析法は、簡便的な PL 値といった指標で表される液状化被害予測にくらべて、構造物の残留変形を高精度に予測できる可能性があることがわかる。

以下、各種構造物ごとに液状化解析における地盤-構造物挙動の特徴、液状化解析法の現状、液状化解析を適用する際のモデル化や結果を解釈する上での留意点などについて述べる。また、最後に3次元解析の有効性と2次元モデ

ル化の可能性について述べる。

(1) 盛土構造物

盛土構造物を対象として液状化解析を行う場合、盛土と基礎地盤の変形予測が目的となる場合が多い。盛土構造物の液状化解析における着目点を図3に示す。なお、これらは盛土構造物の挙動に影響する要因でもある。液状化地盤上の盛土構造物の特徴的な挙動を理解するため、動的遠心模型実験を対象とした2次元解

析結果¹⁵⁾を示す。模型全体の過剰間隙水圧比(過剰間隙水圧を初期有効土被り圧で除した値)の分布を図4に示す。図4に示すように、盛土直下では過剰間隙水圧比が1に達しないくさび形の領域がみられる。なお、実験で計測された盛土直下地盤での過剰間隙水圧も、初期有効土被り圧に達することなく頭打ちとなっている。この現象は盛土直下地盤の初期応力異方性と側方地盤の液状化に起因している。

液状化地盤上の盛土の変形予測を行うには次の点が重要になる。① 盛土荷重に起因した初期応力分布を適切に評価する必要がある。② 1次元液状化解析で用いられるような単純せん断挙動のみを表現できる土の構成則では不十分であり、軸差応力によるせん断も含めた一般応力状態でのせ

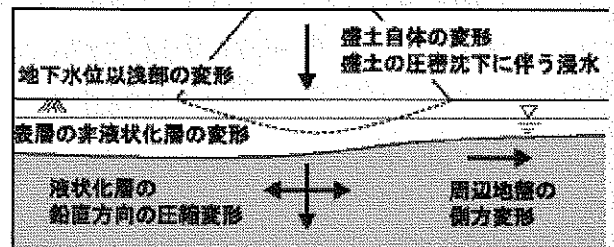


図3 盛土構造物の液状化解析における着目点

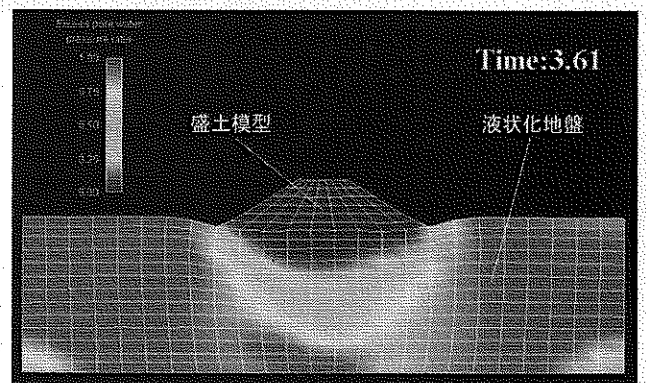


図4 液状化地盤上の盛土の遠心模型実験に対するシミュレーション結果¹⁴⁾
加振中の変形図と過剰間隙水圧比(過剰間隙水圧を初期有効土被り圧で除した値)の分布図

ん断挙動を表現できる構成則を用いる必要がある。

(2) 基礎構造物

基礎構造物のうち、直接基礎のような浅い基礎については(1)の盛土構造物と同様な挙動を示すと考えられることから、ここでは深い基礎の代表である杭基礎について述べる。

杭基礎の液状化解析における着目点を図5に示す。多くの模型実験や杭基礎の被害事例の分析から、地震時に杭に作用する主な力は、① 上部構造物の慣性力、② 液状化地盤の水平変位の二つであることが明らかになっている。よって、杭基礎の液状化解析を行う際には、これらを精度良く予測することが重要になる。一般に、上部構造物からの慣性力の影響は杭頭付近に限られ、地中部では地盤変位の影響が大きいと考えられる。また、液状化層と非液状化層との境界部ではせん断ひずみが大きくなり、杭が損傷する可能性が高くなることから、地盤変位の深度方向分布にも留意する必要がある。さらに、護岸近傍などのように地盤変位分布が同一建物の杭位置によって異なる場合は、杭基礎の変形モードが一様でなくなる場合があるので、変位量を予測するためには護岸構造物も含めた2次元以上の解析が必要となる。

(3) 地中構造物

地中構造物の種類はさまざまであるが、ここでは断面の

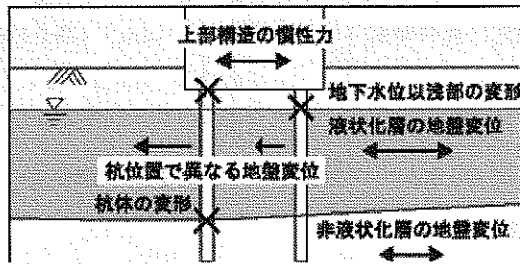


図5 杭基礎構造物の液状化解析における着目点

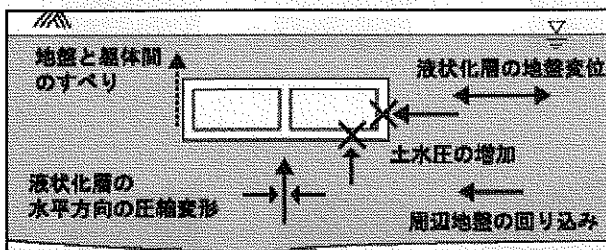


図6 地中構造物の液状化解析における着目点

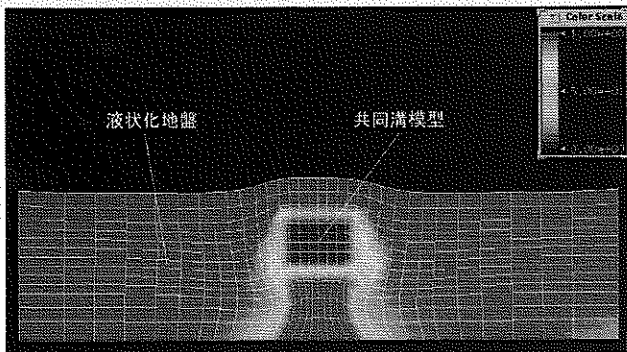


図7 共同溝の遠心模型実験に対するシミュレーション結果¹⁷⁾ 加振後の変形図と過剰間隙水圧比(過剰間隙水圧を初期有効土被り圧で除した値)の分布図

比較的大きいトンネル、共同溝などの線状構造物を対象とする。地中構造物の液状化解析における着目点を図6に示す。これらは次のような被害を引き起こす要因となる。① 地震中の過大な地盤変位や流動変位による縦断方向の継手部抜け出し、② 土圧増加による躯体損傷、③ 周辺地盤の回り込みやすべりによる浮上りなど。

①の地中構造物の縦断方向について検討する場合には、延長が長い場合、面的な地盤変位の予測が必要となる。正攻法でいくと3次元解析が必要となるが、そのような事例はほとんどない。一方、②、③の影響については、横断方向断面に対して2次元解析による検討が可能であると考えられる。しかしながら、実際の被害に対する有効応力解析事例はほとんどなく、②、③の影響について定量的な予測がなされていない。

浮上りについて、(1)と同様に有効応力解析では初期応力分布に起因した変形問題として扱っている。盛土などの重量構造物の場合は構造物直下地盤が鉛直方向に圧縮変形するが、地中構造物の場合は水平方向に圧縮変形となる。共同溝の遠心模型実験¹⁶⁾のシミュレーション結果¹⁷⁾を図7に示す。液状化した周辺地盤が構造物直下へ回り込む傾向がみられ、模型に浮上りが発生している。このような浮上り現象を再現するには、(1)の盛土構造物と同様に初期応力状態を適切に評価すること、一般応力状態でのせん断挙動を表現できる構成則を用いることが必要になる。

(4) 護岸構造物

護岸構造物にはさまざまな構造形式があるが、ここでは一般によくみられる重力式護岸と矢板式護岸を取り上げる。護岸構造物は海側へのはらみ出しや背後地盤の沈下といった被害形態を示す。重力式護岸の変形に影響を与える要因として、護岸構造物自体の慣性力、底面でのすべり、背後の液状化地盤の動土圧、支持地盤の液状化などが考えられている。また、矢板式護岸の場合はこれらに加えて、矢板の変形性能、控え杭の支持力なども考えられる。これらが護岸構造物の液状化解析における着目点となる。

まず、置換砂を基礎とする重力式護岸の変形のメカニズムについては、置換砂部を盛土直下地盤に見立てれば、(1)の盛土構造物の変形メカニズムと基本的には同じである。したがって、重力式護岸の変形予測においても、初期応力分布を適切に評価し、(1)で述べたような挙動を表現できる構成則を使用する必要がある。

健全な支持地盤上の矢板式護岸は、地震時増分荷重に対して抵抗する形となることから、その荷重の算定がポイントになる。背後地盤が完全液状化に至れば土圧係数1.0の土水圧が作用し、これから地震前の土水圧を差引いた値が地震時増分荷重となる。液状化解析において、背後地盤が完全液状化に至れば、その土水圧の予測を大きく見誤ることはないから、むしろ重要なのは地震前の土水圧の算定である。したがって、矢板式護岸の場合も地盤内の初期応力分布を適切に評価することが重要であり、さらに矢板などの構造部材に非線形要素を用いる場合には、構造部材の初期応力評価も重要となる。

(5) 2次元解析と3次元解析

最近では計算機の高速度・大容量化に伴い3次元有効応力解析も実施されるようになってきている。既往の3次元解析事例はその特徴が生かせる以下のような問題に適用されている。

(a) 多方向入力

外力としての地震動は通常3次元の成分を有しており、また地盤も一方向せん断と多方向せん断では挙動が異なる。よって、これらの影響を直接扱う場合、3次元解析が必要となる。1995年兵庫県南部地震での鉛直アレー記録を対象として、3次元有効応力解析コードによるシミュレーションが実施されている。2次元解析で代用する場合は、地震動水平成分を強軸成分と弱軸成分に分け、強軸成分のみを入力として用いる方法もある。

(b) 杭基礎構造物

1次元・2次元の解析では群杭としての挙動を考慮することができない。たとえば、福武ら¹⁸⁾は杭基礎を有する円形構造物を対象として2次元・3次元有効応力解析を実施し、2次元解析では群杭の曲げモーメント分担率を適切に評価できないことを示している。基礎形状が矩形で杭配置が規則的な場合は2次元解析と3次元解析で結果に大きな違いはみられないが、タンクなどの円形基礎構造物などでは3次元効果が顕著になるようである。

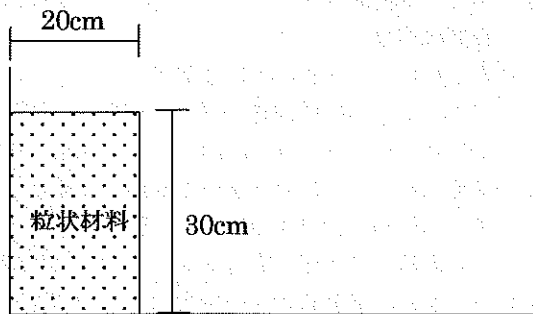
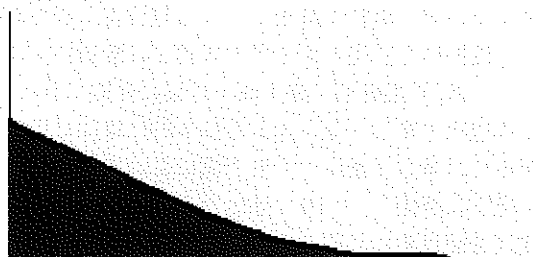
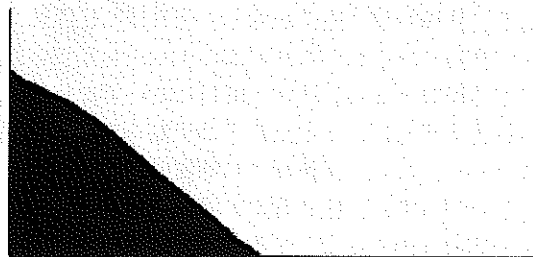


図8 解析モデル



(case1)



(case2)

図9 流動後の最終形状

(c) 液状化対策効果

既設タンクの液状化対策工の一つである鋼矢板リング工法を対象とした2次元・3次元解析が実施されている。2次元解析で3次元解析と同等な結果を得るために、鋼矢板リングの3次元拘束効果と等価な平面ひずみ要素をタンク直下地盤の要素に貼り合わせる工夫がなされている。

地盤改良による液状化対策工法は地盤中に杭状、格子状の改良体を造成することから3次元的な評価が必要になる。そのため、締固め工法、排水工法、格子状固結工法などを対象として2次元でのモデル化あるいは対策工の3次元的效果が検討されている。

3. 液状化地盤の流動解析の可能性

ここでは、地震後の液状化地盤の大変形過程、すなわち液体から固体へ変化する過程について、流体力学に基づく流動解析法の適用性について紹介する。液状化地盤は、ある程度の粘性を有し、また土特有の粘着成分と摩擦成分を

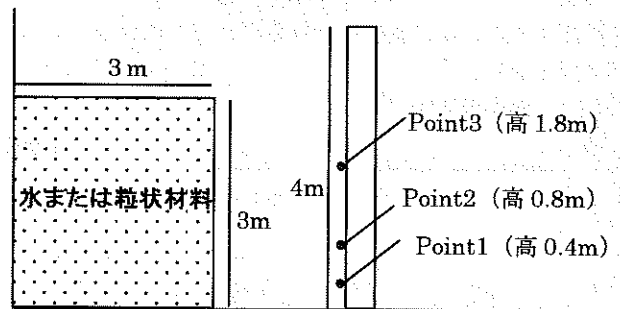


図10 水または粒状材料の壁面への衝突解析モデル

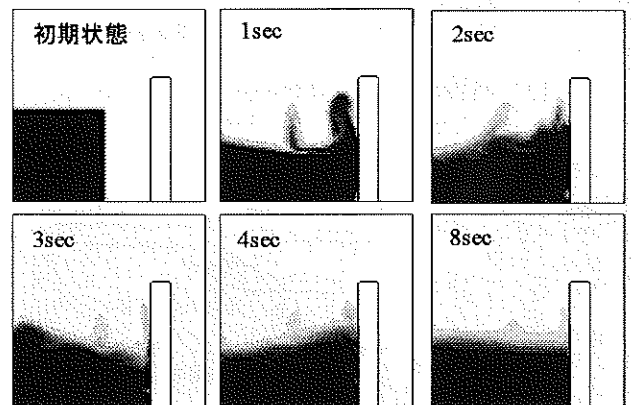


図11 水の衝突解析の時間的变化

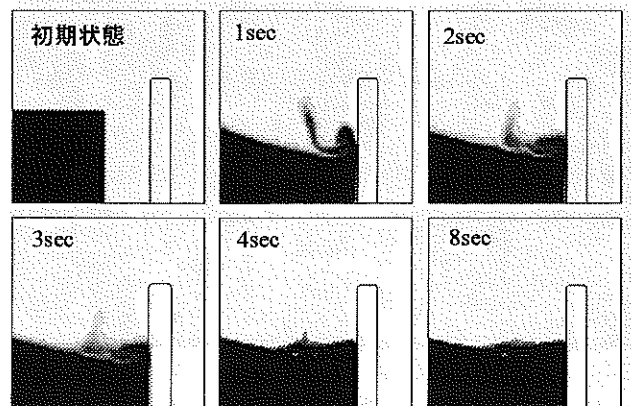


図12 粒状材料の衝突解析の時間的变化

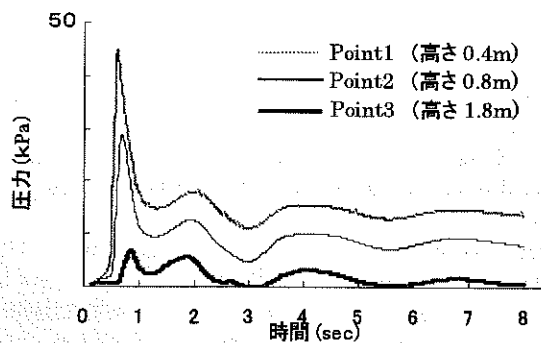


図13 水の壁面への衝突によって生じる圧力の時間変動

有する材料と仮定する。こう仮定すると、液状化地盤を Bingham 粘性¹⁹⁾を用いてモデル化できる。この材料の時間変化を解くために、VOF 法²⁰⁾などを用いた手法も提案されているが、本報では CIP 法²¹⁾による解析例を示し、流体力学に基づいた解析手法の適用性について理解していただきたい。なおこの種の解析にはさまざまな手法が提案されており、ここで紹介する解析例はその一部であることをお断りしておく。

(1) 摩擦材料の安息角の再現

粘着力 c をゼロとして、せん断抵抗成分として内部摩擦角 ϕ のみを考えた場合、粒状材料の流動後の安息角が再現できるはずである。実際に解析してみた。図8に解析モデルを示す。解析では、2種類の内部摩擦角 (30度と45度) を用いて解析を行った。30度の内部摩擦角を用いた解析を Case 1, 45度の内部摩擦角を用いた解析を Case 2 とした。図9は、それぞれのケースについて流動後の最終形状を示したものである。この図より、流動後の粒状材料の表面角度を求めたところ、27.0度および43.4度が求まった。結果から得られた安息角は内部摩擦角をよく表現できていることがわかる。

(2) 流動圧の算定

液状化地盤中に存在する地中構造物や基礎に作用する流動圧は、設計外力となる。ここでは、簡単のために、同様の解析手法を用いて、水と粒状材料の壁面への衝突を再現し、水と粒状材料の変形挙動および壁面に与える衝撃圧力について比較を行った。図10は解析に用いたモデルである。水を用いた解析を Case A, 粒状材料を用いた解析を Case B とする。Case B の粒状材料の内部摩擦角は20度とした。比較を簡単にするために、水と粒状材料で同じ密度 (1 t/m^3) を用いた。衝撃時に壁面に作用する圧力を調べるために、図10中の3点 (Point 1, 2, 3) で圧力の時間変化を調べた。

図11, 12に両 Case の初期形状および1, 2, 3, 4, 8秒後の変形形状を示す。図11より、Case A では水を用いているために、壁面衝突後に水面が振動していることがわかる。これに対して、粒状材料を用いた Case B (図12) では、壁面衝突後にすぐに変形が収束し、振動は発生していないことがわかる。

図13, 14に両 Case の解析から得られた3点 (図10中の Point 1, 2, 3) の圧力の時刻歴を示す。両図より、壁面に衝突した瞬間に圧力の最大値が発生していることがわか

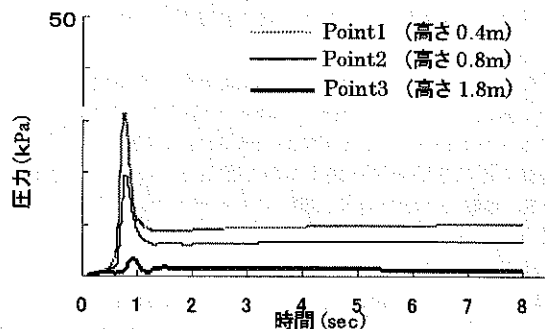


図14 粒状材料の壁面への衝突によって生じる圧力の時間変動

る。また、この圧力の時刻歴からも、水の場合には、衝突後に振動が発生しているのに対して、粒状材料の場合は衝突後に振動が発生していないことがわかる。さらに、粒状材料の衝突時の圧力が、水に比べて小さいことがわかる。これは、粒状材料は流動中にもせん断抵抗を有し、流動を妨げる効果が働くためと考えられる。

以上のように、液状化した地盤を摩擦成分を有する粘性流体と仮定すれば、大変形や流動圧が予測できることがわかる。

4. おわりに

本報では、液状化解析を図1に示すような二つの過程、つまり固体力学に基づく過程、流体力学に基づく過程に分離して論述した。しかしながら、図1に示した液状化過程は一つの土要素に着目した理想的なものであり、実際の現象では、このような液状化過程が空間的にも時間的にも不均一に発生する。したがって、ある時刻においては、固体的な性質をもつ領域と流体的な性質をもつ領域が混在することになる。このような問題に対応するためには、固体力学と流体力学で表現可能な領域の間の遷移領域を考慮した解析手法を開発する必要がある。現在、遷移領域を考慮した解析手法に関する研究が鋭意進められている。

また本報では説明を略したが、固体力学に基づく解析においては、有限変形理論の枠組みで場の方程式を定式化し、大きな変形まで追従できる解析手法の開発が進められている。一方、流動解析では、連続体力学の枠組みを用いず、粒状体をそのままモデル化する個別要素法 (DEM) を用いた解析手法に関する研究も継続されている。これら種々の解析手法の適用性が明らかとなり、実務において用いられることが切に望まれる。

参考文献

- 1) 吉田 望：有限要素法の基礎と地盤工学への応用，7. 動的問題に対する有限要素法 (その1)，土と基礎，Vol. 49, No. 9, pp. 35-40, 2001.
- 2) 吉田 望：有限要素法の基礎と地盤工学への応用，7. 動的問題に対する有限要素法 (その2)，土と基礎，Vol. 49, No. 10, pp. 33-38, 2001.
- 3) 吉田 望：6.1 液状化解析の基礎方程式，6.2 有限要素法への定式化，液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp. 52-72, 1999.

- 4) 土質工学会：土の構成式入門，講座，土と基礎，1983.6-1984.4.
- 5) 粒状体力学に関する国内委員会：粒状体の力学，土質工学会，1993.
- 6) 地盤と土構造物の地震時の挙動に関する研究委員会：地盤および土構造物の有効応力解析，地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム，土質工学会，pp. 50-136, 1989.
- 7) 地盤の液状化防止策に関する研究委員会：液状化に関する一斉計算，地盤の液状化対策に関するシンポジウム，土質工学会，pp. 77-190, 1991.
- 8) Dafalias, Y. F.: Overview of constitutive models used in VELACS, Proc. Int. Conf. on the Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Davis, California, Balkema, pp. 1293-1304, 1994.
- 9) 吉田 望・八嶋 厚：6.4 有効応力解析に用いられる構成則，液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp. 78-88, 1999.
- 10) 渦岡良介・吉田 望・八嶋 厚：液状化メカニズム・予測法と設計法，7. 液状化解析法（その1），土と基礎，Vol. 51, No. 1, pp. 37-42, 2003.
- 11) 吉見吉昭：砂の乱さない試料の液状化抵抗，土と基礎，Vol. 42, No. 4, pp. 63-67, 1994.
- 12) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，pp. 91-94, 1996.
- 13) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ：LIQCA 2D 01 (2001年公開版) 資料，2002.
- 14) Sugito, M., Furumoto, Y. and Sugiyama, T.: Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, (CD-ROM), Oakland, New Zealand, 2000.
- 15) Matsuo, O., Shimazu, T., Uzuoka, R., Mihara, M. and Nishi, K.: Numerical analysis of seismic behavior of embankments founded on liquefiable soils, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 2, pp. 21-39, 2000.
- 16) 近藤浩市・松尾 修・佐々木哲也：共同溝の浮上りに関する動的遠心模型実験，第33回地盤工学研究発表会，pp. 873-874, 1998.
- 17) 佐々木哲也・松尾 修・立石 章・古池章紀：有効応力解析による共同溝の遠心模型実験における浮上りのシミュレーション，土木学会第54回年次学術講演会，pp. 292-293, 1999.
- 18) 福武毅芳・大槻 明・鈴木 健：円筒形構造物の杭基礎の液状化挙動（その1，その2），土木学会第49回年次学術講演会，pp. 1636-1639, 1994.
- 19) Bingham, E. C.: Fluidity and plasticity, McGraw-Hill, New York, 1922.
- 20) Hilt, C. W. and Nichols, B. D.: Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, J. Computer Physics, Vol. 39, pp. 201-225, 1981.
- 21) Yabe, T. and Aoki, T.: A universal solver for hyperbolic equations by cubic polynomial interpolation, Comput. Phys. Commn., Vol. 66, pp. 219-232, 1991.

流域における土砂環境防災の研究展望

京都大学防災研究所教授 災害観測実験センター

せきぐち ひでお
関口 秀雄

1. はじめに

地表はわれわれにとって最も身近な環境である。美しく安全で安心できる国土のランドデザインを具現化していくには、水域環境のみならず、堆積物の循環 (sediment cycle) に関する深い理解が必要である^{1),2)}。

地表には起伏があり、山地を縫って河が流れ海に注ぐ。森林の保全には岩石の風化に由来する土壌層の存在が不可欠であり、降水の一部は地中に浸透し、地下水を涵養して水文サイクルの重要な一翼を担う。流水とともに移動し、水域に運び込まれた砂礫や粘土などの碎屑物は、沈降し、地質時間スケールのもとでゆっくりと地層を形成していく。波浪や潮流条件によっては、堆積物は河口部や海岸域に滞留し、絶妙の動的平衡のもとに、河口砂州や干潟や砂浜を形成する。

地表では、これらの地質現象が絶え間なく進行している。斜面域では重力の作用のもとで、斜面の破壊に伴いマスマーブメントが生じる (図1)。その中で土砂災害を引き起こす可能性の高い形態には、地すべり、崩壊、崩落、土石流がある³⁾。水工学や水文学分野では、マスマーブメントに対応する術語として、土砂生産 (sediment yield) を用いてい

る⁴⁾。この表現は物質収支の視点から示唆に富んでいる。すなわち、河川から源流部をみたとき、山腹斜面で生じるマスマーブメントは、最終的には河川への土砂供給に帰着する可能性が高い。実際、山地部からの土砂生産と洪水流出は、河道における河床変動や洪水の流下挙動を解析するうえで上流端の境界条件を与える⁵⁾。

我が国の地形的特徴としては、山地河川が多く内湾が発達しているうえに、活構造であるため、土砂の生産/流出が活発であることがあげられる。一方、海岸沿岸域では海岸侵食の問題をはじめ、水際低平地に展開する都市の氾濫浸水や液状化災害のリスク軽減施策が重要課題になっている。いずれも流域における水と堆積物の挙動が深く関わる環境防災上の課題である。

以下では、流域における土砂環境防災に関わる二、三の話題をとりあげ、読者諸賢のご批判に供したい。

2. 流域動態を認識するための技術の進歩

2.1 基盤観測網

わが国では、近年、気象・水文および地象基盤観測網の充実が目覚ましい。いくつかの例をあげると、次のようである。

- ◎気象レーダ観測網 (気象庁)：全国に20基配置；全国約1300地点に展開されているアメダス (地域気象観測システム) と連携して、詳細な降雨情報などを提供。
- ◎レーダ雨量計 (国土交通省)⁶⁾：内陸部の山頂26カ所に配置；5分ごとに雨量測定値を更新、1km四方の面積単位で観測値を提供；局地的な豪雨の観測にも対応。
- ◎GEONET (国土地理院)：GPS (Global Positioning System) すなわち衛星技術を活用した地殻変動連続観測システム；約25km間隔で電子基準点を展開、リアルタイムに近い状態で全国の地殻変動の様子をモニタできる。
- ◎K-NET (防災科学技術研究所)：強震観測点を全国約25km間隔で配置；強震動波形データの取得、提供；観測点における弾性波速度を含む地盤情報あり。空間情報データの整備、提供システムの充実も特筆される。たとえば、国土地理院は、財団法人日本地図センター

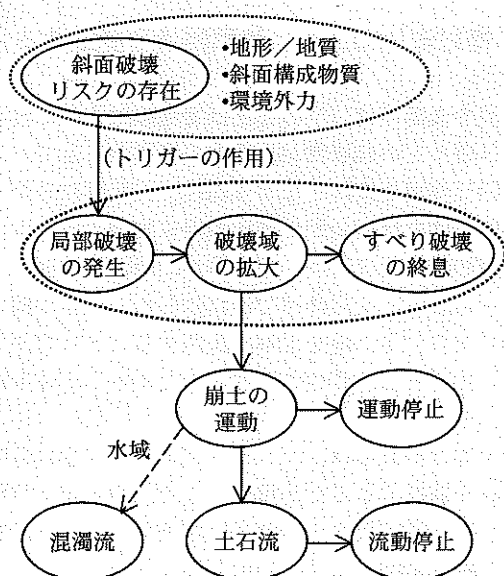


図1 斜面の破壊とマスマーブメント

を通じて以下のような情報を提供している。

◎数値地図 50 m メッシュ (標高) ; 数値地図 250 m メッシュ (標高)

◎数値地図 10 m メッシュ (火山標高)

◎数値地図 5 m メッシュ (標高) ; 現在のところ 1 地域 ; 今後、主要都市圏、河川流域について整備が予定されている。特徴は、航空機搭載型のレーザースキャナ計測による数値標高モデルデータ。標高値の表示は 0.1 m 単位。災害危険度図 (ハザードマップ) の高度化に繋がる。

土砂環境防災の技術の向上には、上述のような公共の空間情報データの活用法に関する進歩から目を離せない。たとえば、数値地図 50 m メッシュ (標高) データの活用例として、守利ら⁹⁾の研究をあげておきたい。彼らは、50 m メッシュ標高データに基づいて詳細な流域の数値地形モデルを作成し、山地部 (土砂生産と洪水流出) と河道部 (土砂移動) のそれぞれの解析モジュールを結合し、山腹斜面の表層崩壊を考慮した土砂移動過程と洪水流出過程の予測を可能とした。土質力学の見地から参考になる点も多い。たとえば、表層崩壊におけるすべり厚さは 1 m 程度、崩壊幅は数 m ~ 10 m 程度、崩壊長さは数十 m 程度になることが多いとして、斜面素片 (おおむね 50 m 四方) の破壊条件式に、有効応力に基づく無限長斜面安定解析法を適用し、上述の流域数値地形モデルへ組み込んだこと。そして、中間流・表面流統合型の kinematic wave モデルを用いることにより、表層土層内の地下水位算定ルーチンを定式化し、有効応力法の適用を可能にしたこと。

分布型土砂流出解析コードの発展の方向性に関して、守利ら⁹⁾は次のような指摘を行っており、興味深い。

◎より細かいメッシュサイズの数値地図データを使用した場合、解析のパフォーマンスはどうか。

◎山腹斜面の表層崩壊による生産土砂がただちに河道に移動するとして現在のモデル化に、生産土砂の一時的な堆積プロセスを導入した場合、解析のパフォーマンスはどうか。

2.2 レーザースキャナ技術による精密地形計測・解析

地形計測は、土砂環境の動態を把握するうえにも不可欠な基礎技術である。最近、航空機搭載型のレーザ測距儀を用いて精密かつ迅速に広範囲の地形計測を行うことが可能になってきた。

レーザ光を用いた環境計測システムとしては、LIDAR (Light Detection and Ranging) が有名である。その適用例としては、流体中の浮遊粒子によるレーザ光の散乱現象に着目した気圏科学分野の研究が多い¹⁰⁾。それに対して、レーザプロファイラーやレーザースキャナとよばれるシステム (これらも LIDAR の一種であり、実際 LIDAR とよばれることもある) では、航空機から地上に向けてレーザ光パルスを照射し、検知した反射光パルスとの時間差から、地上点までの距離を精密に測るのが特徴である。レーザ光のビーム幅を精細に保ち、ビーム走査技術を活用して短時間の内に一挙に多数の地表点の距離計測を行うことができる。その背景には、航空機の精密な姿勢計測を可能

とする慣性航法システム、そして航空機の精密な測位を行う GPS 技術がある。

ここでは、政春ら⁹⁾によって実施された航空レーザースキャナ技術による精密地形計測・解析の例を紹介する (図 2)。対象地域は静岡県の口坂本地すべり地域である。レーザースキャナ技術の進歩により、地形計測における樹木の影響をフィルタリングで取り除くことができるようになったことは画期的である。図 2-B は 1/25,000 の地形図に基づく等高線図 (等高線間隔 10 m) である。一方、図 2-A は、レーザースキャナによる計測データに基づいて数値地形モデルを作成し、その成果を改めて 10 m 間隔の等高線図に表現したものである。微地形の把握が格段に容易になり、谷線や遷急線などの地形的特徴もより明瞭になっている。

航空レーザースキャナ技術の地形計測・解析への適用は陸域にとどまらない。実際、LIDAR 測深機が開発されてきている^{9),10)}。航空機搭載型のレーザ測深機では近赤外レーザ光と緑色レーザ光を照射する (図 3)。近赤外レーザ光は大部分が海面で散乱されるので、それを受光装置で検出することにより、海面までの距離、すなわち海面高度を決定することができる。一方、緑色レーザ光パルスは水中への透過能力が高いため、海底面において反射、散乱し、受光装置に到達する。すなわち、海面からのレーザ光反射パルス (第 1 反射パルス) と海底面からのレーザ光反射パルス (第 2 パルス) の時間差を計測して、水深を求める⁹⁾。その際、大気中と水中での光速の違いを考慮する必要がある。

航空レーザ測深機の適用は、現在のところ、透明度の高い浅水域 (水深 50 m 程度以内) に限られるようである。この場合にも、台風や津波などの来襲直後に緊急調査を行い、海岸沿岸域の急激な地形変化の実態を迅速に把握し危機管理に資することは可能であろう。さらなる技術の高度化と普及により、航空レーザースキャナによる精密地形計測・解析を陸域と水域の境界域においてシームレスに行うことが可能になれば、湖岸や海岸や湿原など、水辺環境の動態に関する知識の飛躍的な増進が期待できよう。

3. 複雑流体の流れと堆積特性を認識する技術

土石流や混濁流は力学のことばでは複雑流体に当たる。岩石や砂礫などの碎屑物が、重力の作用のもとで、流体と複雑な相互作用を及ぼしながら高速で長距離にわたって流出し、最終的には緩勾配の地形の場に堆積する。固体のように静止していた碎屑物の集合体が、降雨や地震動などをトリガーにして、突然高速で流れはじめ、そして再び粒状堆積物に戻るサイクルを理解、説明することは容易ではない。言い換えると、このことを可能とする力学体系が求められている。

土砂災害の軽減には、マスマーブメント発生の危険度の高い地域を認識することが重要になる。2001 年 4 月施行の「土砂災害防止法 (災害土砂警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律)」の記述からも、そのことは読み取ることができる。斜面環境との共生を模索するうえに、

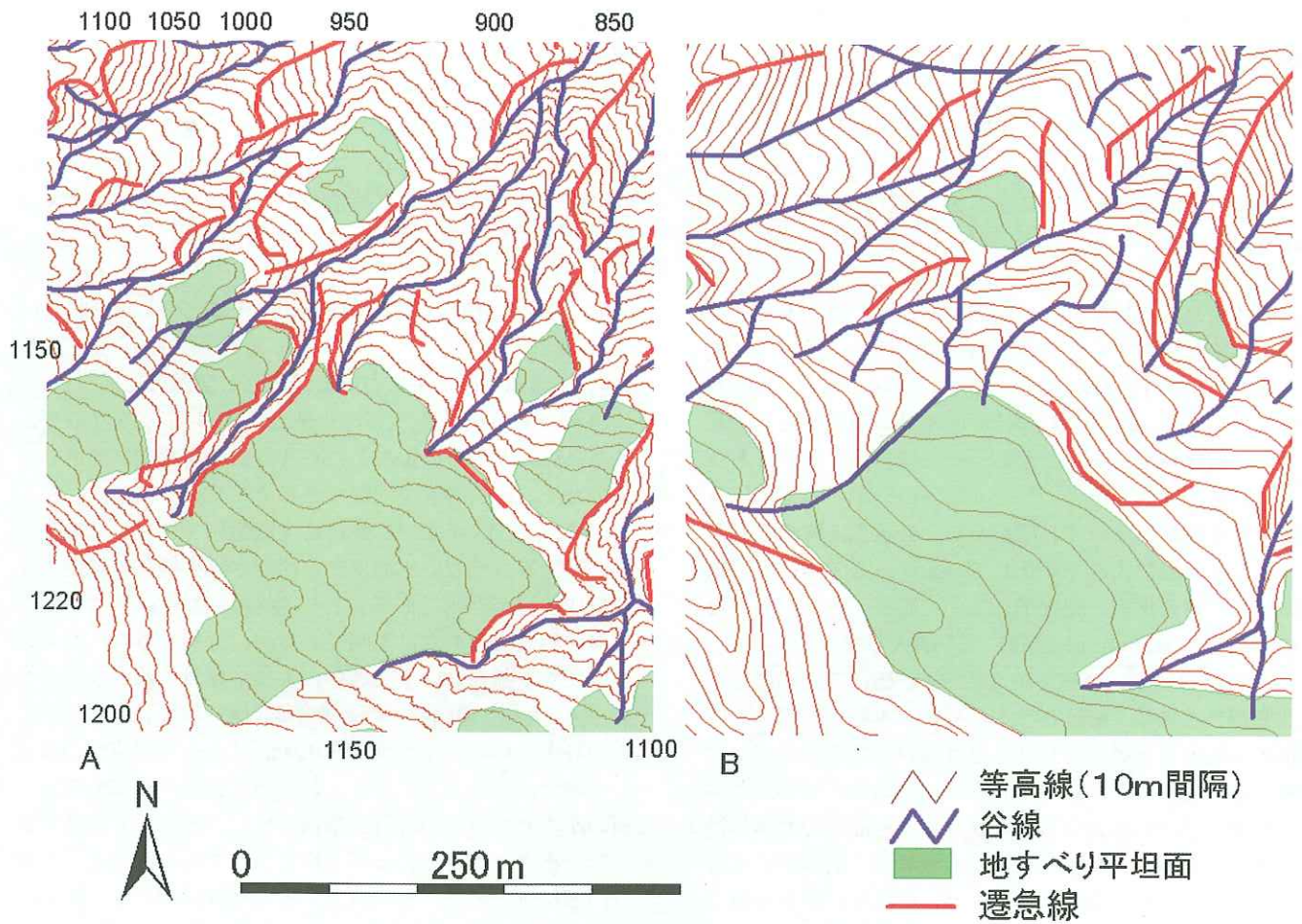


図2 山地の地形表現の例 (Masaharu らによる)

A: レーザースキャナ計測データに基づく等高線表示; B: 1/25,000 地形図の等高線表示

やはり、碎屑物の集合体の流れと堆積特性に関する知識を集積していく必要がある。

このような認識のもとに、筆者らが行っている複雑流体系の研究の一端を以下にかいつまんで述べる¹¹⁾。

崩壊とそれに引き続く流れを、一つの力学モデルで整合的に解くことは実は必ずしも容易ではない。従来の土石流解析の多くは、すでに溪流に不安定土砂が堆積しており、上流端からの流水を境界条件として、その後の土砂の動的な再配分過程を取り扱っている。ここでは、単純化した天然ダムの決壊問題を考える (図 4(a) 参照)。簡単のために

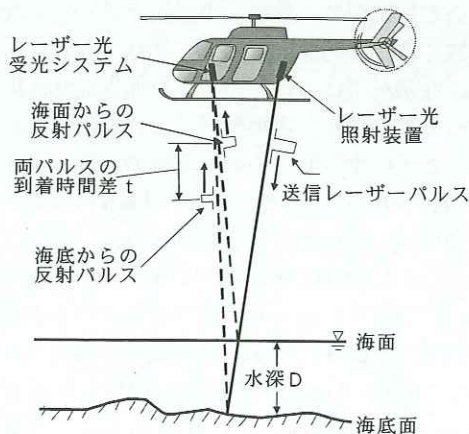


図3 航空レーザ測深のイメージ (Irish らによる)

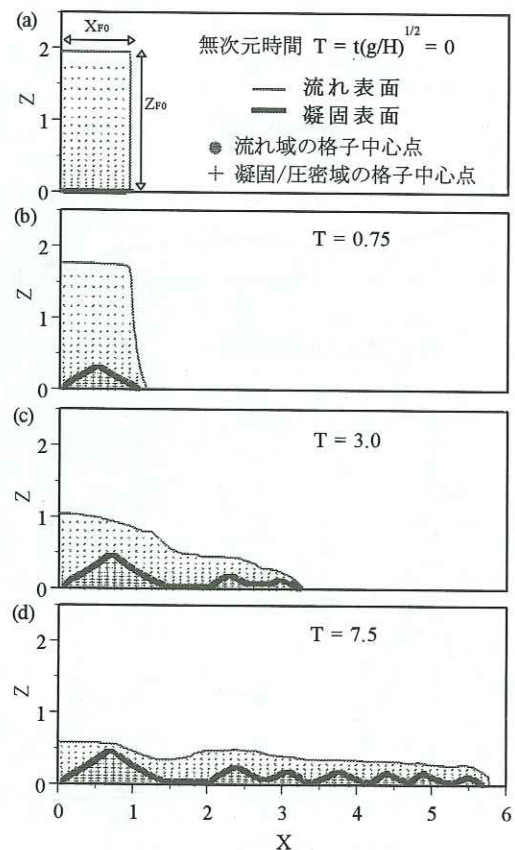


図4 液状化土塊の崩壊とそれに引続く重力流れ

矩形形状の土砂が水域内に堆積しているとする。地震動などの誘因により、この水中土砂ダムが瞬時に強度を失なったとする(一種の液状化を想定)。その結果、重力の作用により、液状化土塊は崩れはじめ、時間の経過とともに大きく流動する(図4(b)~(d))。

本解析モデルの特徴を図5に示す¹⁴⁾。液状化土塊の流動はNavier-Stokes式にしたがう。ただし、液状化土はあくまで二相物質とモデル化しており、有効応力がゼロであるため、固体摩擦抵抗はゼロになっている。言い換えると、過剰間隙水圧が消散すると液状化土は弾塑性土(固体)に変相する。この弾塑性土の領域が凝固/圧密域であり、圧密方程式にしたがう。液状化域と凝固/圧密域の境界面における有効応力はゼロである。ただし、その境界面の推移はあらかじめわかっているわけではなく、解の一部として全体系の解とともに求めていく必要がある。液状化土塊の表面形状も流れとともに大きく変化していくが、その推移も移動境界として定式化し、逐次求めていく必要がある。そのために、VOF (volume of fluid) 法を導入している。

Navier-Stokes式にしたがう領域と、圧密方程式にしたがう領域を矛盾なく接続させるために、本解析モデルでは液状化土域の最下層に、「有効応力はゼロであるがわずかな剛性を持つ遷移層」を設けている。その結果、遷移層と接する弾塑性土の剛性も有限値となり、圧密能力を発揮し得る。遷移層を導入しない場合には、液状化土層は剛性を持たないために圧密係数はゼロとなり、液状化状態から抜け出すことができない。

本解析モデルの特徴は、堆積物重力流れ内の平均全応力と過剰間隙水圧の鉛直分布を比較するとわかりやすい(図

6)。液状化域では有効応力はゼロであるが、その下位の凝固/圧密域では有効応力が発達している。実際、凝固/圧密域が流れの表面まで拡大したときに、流れは停止する。

土石流の流動機構の検討においても、最近、間隙水圧の重要性が認められるようになってきた^{12),13)}。堆積物重力流れに対する流体力学や堆積学からのアプローチを融合する一つの視点として、今後の調査研究に期待したい。

4. 親水空間における安全性モニタリング技術

4.1 護岸一砂浜系における吸出しと空洞の形成

砂浜は消波機能や水質浄化機能を有するのみならず、人々に潤いと憩いの場をあたえる貴重な親水空間である。そのため、砂浜の安全管理はきわめて重要である。しかしながら、平成13年12月30日に大蔵海岸で発生した人工砂浜の陥没事故¹⁴⁾は、水面変動に伴う水際不飽和地盤内の空洞形成機構が不明であることを端的に示した。事故現場の空洞の精確な大きさは不明であるが、近接するケーソンのジョイント部において突き棒によって発見され、ウレタンの注入、型どりの結果判明した空洞は縦長の円筒状であり、その高さは約2m、直径は約0.9mであった。空洞の形成の端緒は、ケーソンのジョイント部に設置されていた防砂板の平均水面以下の部位が損傷を受け、そこから裏込め砂が吸い出されたことによると推定されている。吸出しに伴う内部侵食の結果、平均海面以上の養浜砂領域に、上述のような大きな空洞が形成されたわけである。ただし、その進行速度や形成時期は不明である。また、事故の発生前に特たる地表面変状は観察されていない。

筆者らの室内実験の結果によると、乾燥した砂は重力の作用下でよく流れるため、空洞の形成には至らない。すなわち、鉛直壁の欠陥部から砂が流出しはじめると、その影響は容易に地表面にまで達し、すり鉢状の斜面を形成してしまう。一方、水面下で飽和砂内に空洞を形成することも現実的ではない。結局、地下水面より上位の適度に湿った不飽和砂地盤の場合には、吸出しに伴い空洞が形成され自立することが認められた。ただし、通常の1G場の小規模室内実験であったため、空洞の高さは最大で10cm程度にとどまった。いかにスケールアップを実現するかは本質的な課題である。また、空洞の保持に土中のサクシオンが効いていることは確かであるが、小規模実験では毛管上昇の影響が大きく、定性的な観察にとどまっている。

このような状況下において、国土交通省姫路河川道路事務所によって実施された現地砂浜における潮位変動に伴うサクシオンと土中水分変化の動態観測の結果は貴重である(図7)。観測点の位置を図8に示す。観測期間は、大潮と小潮を含む2002年4月28日から6月3日までの約1カ月である(10分ごとの自動観測)。観測結果の一例として、地点1(地盤高さ:TP+2.66m)における異なる3標高のサクシオンの時刻歴を図9に示す。潮位変動に伴う最高水位は大潮の時にTP+0.8m、最低水位はTP-0.8mとなっている。そのため、設置標高がTP+0.8m以下のサクシオン計は潮位レベルに応じて水没を経験し、サクシオン値が負

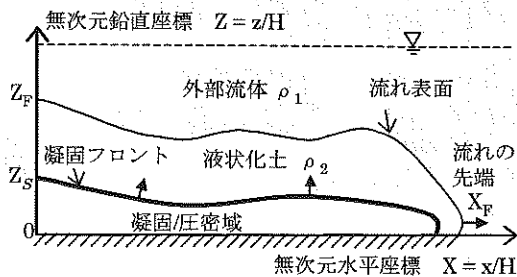


図5 液状化堆積物の重力流れモデル

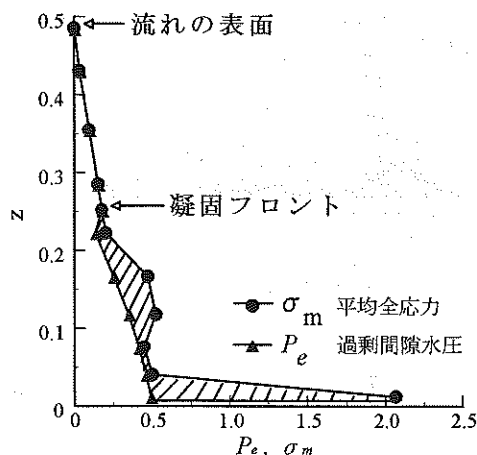


図6 堆積物重力流れ内の平均全応力と過剰間隙水圧の鉛直分布

(すなわち正の間隙水圧) になっている。

図9中の細実線は、筆者らが最近開発した連成有限要素解析コードに基づくサクシオン変動の予測結果である¹⁵⁾。本解析コードによると、水際不飽和地盤におけるサクシオン、土中水分、間隙空気圧の変動、間隙流体の流動特性、

および土骨格の弾塑性変形特性(コラプスを含む)を整合的に予測することが可能である。図9においても、潮位変動によるサクシオンの動態を大局的によく再現している。今後、波浪負荷や降雨に対する砂浜の応答、特に空洞の規模と保持時間に及ぼすサクシオンの影響を解析するうえで有望である。

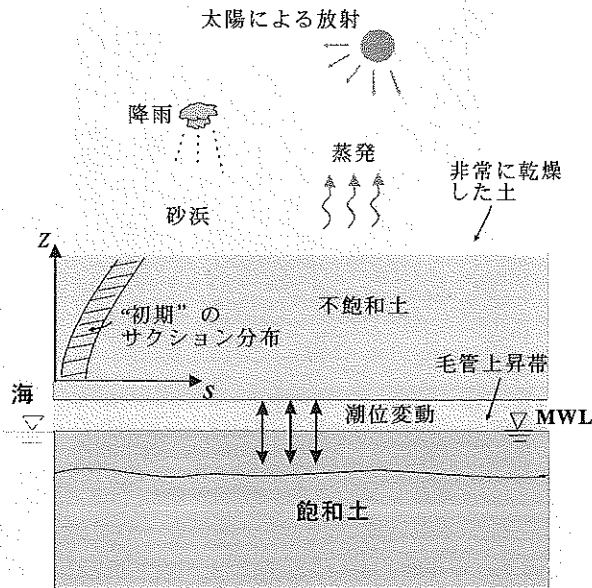


図7 砂浜におけるサクシオン分布と環境因子のイメージ

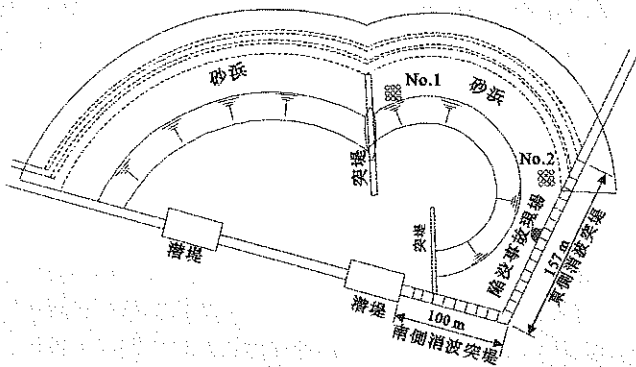


図8 大蔵海岸砂浜の平面図

4.2 海浜親水空間における安全性モニタリング技術

海浜親水空間における安全性を担保するには、たとえば、地表面変状を伴わないような砂浜内の空洞形成を日常点検の中で逸早く探知し、適切な対応を講じるシステムの確立が望まれる。従来、リモートセンシングによる空洞の探査技術として、表面波探査、高密度電気探査、電磁波探査(地下レーダ)、重力探査などが適用されている。しかしながら、環境変化の激しい砂浜を対象にした空洞探査技術の適用例は少なく、今後の課題になっている。

砂浜のサクシオンは土中水分と深い関係がある。水分移動はまた地表面付近の熱伝達特性とも深く関わる¹⁶⁾。したがって、砂浜の温熱環境に着目したモニタリング技術の適用も興味深い

4.3 堤防の安全性モニタリング技術

流域における水防システムの中で堤防は重要な位置を占める。河川堤防は延長が長く、長年にわたって拡張やかさ上げなどの改修が行われてきた事例が多い。設計高水レベルの出水が発生する頻度が低いため、実際に高水位が長期間継続した場合、堤防がどの程度の耐水性(ねばり強さ)を有するかについては実証データが少ないようである。土構造物の性能評価法の確立が要望される今日、河川堤防の安全性評価に関する調査研究は重要である。

竹下ら¹⁷⁾は砂質堤体モデルに対する水位上昇実験を行い、土中水分分布をTDRプローブ(時間領域誘電率反射計)で測定するとともに、堤体内の自由水面の挙動を地表

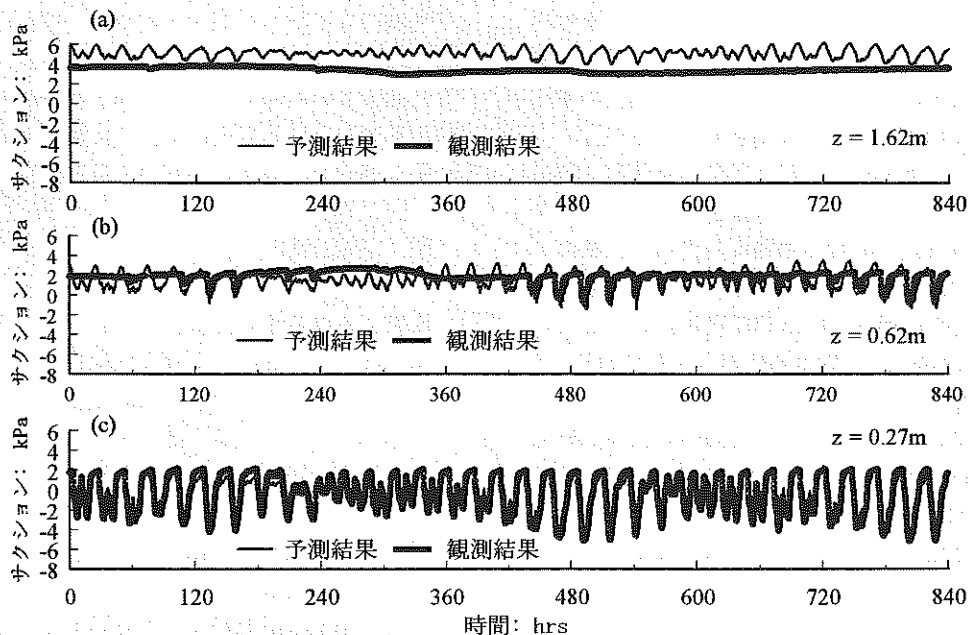


図9 潮位変動による大蔵海岸砂浜内のサクシオン変化

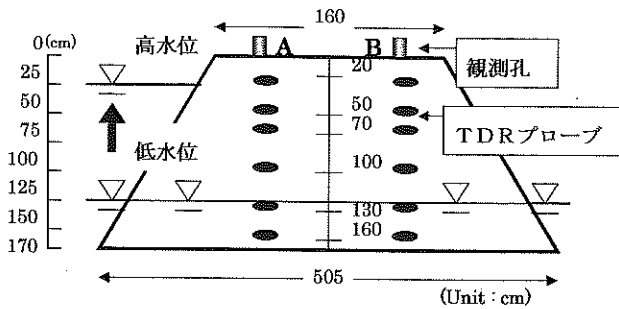


図10 地中レーダによる水分動態計測のための堤体モデル(竹下らによる)

型レーダ(GPR)により計測した(図10)。水平な定常自由水面の状態では、GPR(ground penetrating radar)によって明瞭な電磁波の反射面が確認され、水位観測孔によって計測された自由水面位置よりも約10 cm上部に位置していることを明らかになった。用いられた堤体土は広島県太田川砂である(平均粒径=0.9 mm)。比較的粗粒な砂質土であり、上述の10 cmの範囲はおおむね毛管上昇帯に対応する。この解釈はTDRプローブによって計測された土中水分分布とも調和的である。

次いで、竹下ら¹⁷⁾は上流側の水位を急速に上昇させ、堤体内の非定常浸透流の発達状況を観測した。GPR計測には225 MHzの送受信アンテナを堤頂部に設置している。アンテナ間隔は0.5 m、サンプリングタイムは1分である。実験の結果、水位観測孔によって計測された自由水面位置とGPRによる電磁波の反射面位置は、時間の推移によらず良く対応することが明らかになった。GPRによる自由水面位置が観測孔による測定水面位置よりも約10 cm高くなったことは、水平な定常水面状態の場合の計測結果と同様である。

今後、実大規模の河川堤防へ適用に向けた技術課題の着実な解決を期待したい。

4.4 地域の表層地質環境を認識する技術

遺跡調査は地域における表層地質環境をはじめ、土地利用の変遷や地震環境の理解を深める貴重な機会である。実際、考古学における遺跡の発掘調査の過程で、過去の激しい地震に伴う液状化の痕跡が多く検出されている¹⁸⁾。

最近、筆者らは寒川旭博士の指導を得て、京都府久御山町の佐山遺跡における噴砂脈の剥ぎ取り調査を行う機会を得た。トレンチ調査段階における噴砂脈を含む鉛直断面を写真1に示す。鎌倉時代と同定された土器片を含む粘土層中に、高さ約1 m、平均幅約10 cmの噴砂脈が貫入している。噴砂脈には最大粒径2 cm程度の礫が含まれており、上方に向かって細粒化している(上部は平均粒径1 mm以下の砂)。この噴砂脈は、液状化の物理の視点からも興味深い。①噴砂脈が地表には達せず、粘土層内にとどまっていること。②噴砂脈が砂礫層から発していること。

観察事実①は、地盤の液状化が常に地表面に噴砂跡をもたらすわけではないことを示している。成層地盤の特性として留意しておきたい現象である。

観察事実②は、礫質土の液状化ポテンシャルが必ずしも



写真1 佐山遺跡における噴砂脈

低くないことを示唆している。礫質土が緩く堆積し、かつ透水性の小さい粘性土層に被覆されているのであれば、その礫質土層の液状化ポテンシャルは一般にかなり高い。礫質土層には、その成因からして小石や玉石が分布している場合が多い(氾濫原堆積物あるいは土石流堆積物)。このような場合には、標準貫入試験によるN値分布の解釈には慎重を要する。

我が国では一般に河川流路の変遷や、付替えによる流路変更の事例が少なくない。旧河道跡が造成された場合、若令地盤となるため、その周辺の在来地盤と動特性が異なることがあり得る。最近、武村¹⁹⁾によって古文献史料解析等に基づいて、神田川の旧河道造成地において関東大震災時の震度階が7レベルに達していたことが明らかにされた。この推定震度は周辺地域よりも一際大きい。

地域の地盤特性を把握するには、地質過程の認識とあわせて、土地利用に関する地道な資料解読が有効であることを物語っている。デジタル空間情報解析力とともに、地域の地形の成立ち・変遷に関する史料にも日頃からアンテナを張り巡らしておきたいものである。

5. あとがき

流域における水と堆積物の関わりは、人と自然との共生の鍵を握っている。マクロな堆積物収支の視点からは、地殻変動による山地の流域平均面積当たりの隆起量と削剝量との相関に思いが至る。数百年あるいは数千年に一度発生する大規模崩壊イベントのとらえ方も流砂系の科学の重要な命題の一つである。斜面都市域においては高速マスムーブメントの脅威が顕在化してきている。微地形の研究とあわせて、火山灰質土や風化残積土などの地域土の成因、堆積環境に関する研究が重要性を増すであろう。

水域は堆積物の落ち着き先である。ベッドフォームや地

層の形成過程をはじめ、健全な堆積物による水質浄化機能からも多くを学びたいものである。

本稿をまとめるに当たり、政春尋志氏からは図2の原図を快く提供していただいた。寒川 旭氏には佐山遺跡の噴砂脈に関する懇篤なご指導をいただいた。椎葉充晴、橋本学、福岡 浩、小野 徹、佐々真志、李風英の諸氏からは有益なご教示をいただいた。ここに厚く感謝の意を表します。

現地砂浜海岸におけるサクシオン観測結果を提供していただいた国土交通省姫路河川道路事務所の関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 平 朝彦：日本列島の誕生，岩波新書，pp. 41-73, 1990.
- 2) Siever, R. (立石雅昭訳)：砂の科学，東京科学同人，pp. 37-67, 1995.
- 3) 中澤 努：土砂災害の概要，地質学ハンドブック，pp. 494-497, 2001.
- 4) 土木学会：水理公式集平成11年度版，p. 138, 1999.
- 5) 守利悟朗・椎葉充晴・堀 智晴・市川 温：流域規模での水・土砂動態のモデル化及び実流域への適用，水工学論文集，第47巻，pp. 733-738, 2003.
- 6) 防災情報通信システム研究会：防災情報通信システム，山海堂，pp. 126-132, 2003.
- 7) Vaughan, G., Wareing, D. P., Jones, S. B., Thomas, L. and Larsen, N. : Lidar measurements of Mt. Pinatubo aerosols at Aberystwyth from August 1991 through March 1992, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 21, No. 13, pp. 1315-1318, 1994.
- 8) Masaharu, H., Hasegawa, H. and Okamatsu, K. : Detailed slope topography measurement by airborne laser scanning. In: *DEMs and Geomorphology*, Special Publication of the Geographic Information Systems Association, vol. 1, pp. 38-39, 2001.
- 9) 浅田 昭・山本富士夫・徳山英一・矢島広樹：測深技術の現状，海洋調査技術，第15巻第1号，pp. 37-77, 2003.
- 10) Irish, J. L. and White, T. E. : Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry, *Coastal Engineering*, Vol. 35, pp. 47-71, 1998.
- 11) Sassa, S., Miyamoto, J. and Sekiguchi, H. : The dynamics of liquefied sediment flow undergoing progressive solidification. In: *Submarine Mass Movements and Their Consequences*, Kluwer Academic Publishers, pp. 95-102, 2003.
- 12) Iverson, R. H. : The physics of debris flows, *Reviews of Geophysics*, Vol. 35, No. 3, 245-296, 1997.
- 13) Major, J. J. : Gravity-driven consolidation of granular slurries-implications for debris-flow deposition and deposit characteristics, *J. Sediment. Res.*, Vol. 70, No. 1, pp. 64-83, 2000.
- 14) 土木学会海岸工学委員会：大蔵海岸 陥没事故調査報告書，2002.
- 15) Sassa, S., Li, F. and Sekiguchi, H. : Response of saturated/unsaturated gravelly sand to tidal fluctuations, *Proc. 1st Japan-U. S. Workshop on Testing, Modeling and Simulation*, Boston, 2003 (to appear).
- 16) 近藤純正：地表面に近い大気科学，東京大学出版会，pp. 235-275, 2000.
- 17) 竹下祐二・小林弘明・田中謙次・田尾一憲・開発一郎：地中レーダによる地盤の水分動態の非破壊計測方法，土木学会論文集，No. 729/III-62, pp. 169-176, 2003.
- 18) 寒川 旭：遺跡に見られる液状化現象の痕跡，*地学雑誌*，Vol. 108, No. 4, pp. 391-398, 1999.
- 19) 武村雅之：関東大震災，鹿島出版会，pp. 120-122, 2003.

土壌環境修復技術の現状と将来展望

和歌山大学教授 システム工学部

ひら た たて まさ
平田 健正

1. 土壌汚染の経緯

土壌地下水汚染に限らず環境汚染が顕在化するたびに、なぜ汚染されるのか、が問われる。とりわけ土壌地下水汚染問題は、汚染物質の浸透や溶解など現象そのものが直接目視できない地下空間で生じており、さらに水や物質の移動速度は表流水に比べて格段に遅いため、難分解性の化学物質は長く残留する傾向がある。このように土壌地下水汚染は、汚染物質の漏洩など汚染原因を取り除いてもすぐには汚染状態は改善されず、蓄積性の汚染と言われている。土壌汚染は工場敷地内といった私権の認められた私有財産の範囲内で生じていることも汚染問題を複雑にしている。土壌や地下水の汚染修復は、行政指導はあっても企業の自主的な取り組みに委ねられてきたからである。

農用地の重金属汚染に加えて、水質汚濁防止法に基づく地下水質の常時監視や都市再開発などに伴って、市街地土壌汚染が次から次へと発見されている。これらの汚染状況に対処するため環境基準の制定と強化が進められ、1999年には重金属類と揮発性有機化合物に分けて調査・対策指針が策定された。こうした法制度の下で汚染の有無を判定するのは土壌環境基準であり、浄化対策の実施も浄化目標も土壌環境基準であった。その一方で、わが国独自に開発した技術や欧米から移入された技術を含めて、さまざまな修復技術が開発実用化されている。革新的技術を用いれば、修復期間が短縮できることも事実である。ただ一般論として、環境基準を満たすには長い時間と多額の経費がかかる。土地取引には土壌調査は不可欠な契約事項になり、汚染が発見された場合には修復対策の実施や契約そのものを解除する、などが盛り込まれつつある現状にあって、技術的にも、経費の面からも、環境基準の達成が難しいとなれば、市街地中心に位置する一等地でも汚染が放置される可能性がある。さらにコスト軽減を追求するあまり、水面下での対策で、結果として汚染を助長したり一般環境へ汚染を拡散させるおそれもある。

こうした背景から汚染地の管理状態や地下水の利用形態に即した、現実的で実効のあがる土壌地下水保全対策として、2003年2月に土壌汚染対策法(2002年5月制定)が施行された。この新しい法制度には、汚染土壌の直接摂取と

地下水摂取のリスク管理をベースに、汚染土壌の浄化に加えて土地利用状況に応じた大きな経費負担を伴わない柔軟な健康リスクの低減措置が含まれている。このように、一律に環境基準達成を目標とした対策から健康リスク低減のための有害物質管理といったより現実的な施策が導入されつつある現状にあって、本小論では土壌地下水汚染修復のための技術開発の現状や将来の課題について紹介したい。

2. 土壌汚染の現状

2.1 汚染物質の存在形態

土壌地下水中に侵入した有害物質は、その性状に応じて、① 土壌粒子に吸着する、② 水に溶解する、③ 土壌ガスに気化する、の形で存在する。さらに、液状の汚染物質が大量に侵入した場合には、④ 間隙中に汚染物質そのものが原液状態で存在することもある。いずれの場合も、汚染物質と土壌の性状により定まる分配特性に支配される。ここでは、重金属類と揮発性有機化合物について修復対策につなげる視点から、土壌地下水での存在形態について説明する。

鉱物資源の多くは、地殻変動や熱水挙動の偏在によって形成され、高濃度に濃縮された元素を資源として利用している。そのため含有量の多寡を別にすれば、たいいていの金属元素は土壌に含まれていると考えてよい。砒素や鉛は溶出基準値で0.01 mg/lとかなり低いところに設定されており、事実、2001年度の自治体調査でも高濃度砒素汚染の多くは自然由来と判定されている。

地質由来の汚染であれば、その存在形態から考えて薄く広く拡がる傾向があろう。平均的な地殻存在量をみると、鉛：13 mg/kg、クロム：100 mg/kg、砒素：1.8 mg/kgとなっている。特に砒素については、半導体や農薬など幅広い用途がある一方で、わが国でも自然の地質にも広く分布している。地下水を例にとれば、仙台市¹⁾や高槻市²⁾の調査にみることができる。重金属汚染の中で、六価クロムは報告事例の多い物質の一つである。クロム鉱滓からの溶出やメッキ廃液による汚染事例などであるが、負に帯電している六価クロム化合物は、地中を移動しやすく、地下水汚染をも引き起こすことが多い。ただ一般的に重金属は、陽イオンとして存在するものが多く、表層土壌から高濃度で検

出される。さらに地質由来の場合、薄く広く広がる性質のあることを指摘したが、人為由来の重金属汚染でもこの傾向が認められる。一例として、図1には工場敷地内で検出された鉛や砒素など重金属の表層土壌濃度分布を描いている。部分的に第二溶出量基準（重金属類は環境基準値の30倍）を超える高濃度域は存在するが、多くは第二溶出量基準から土壌溶出量基準（環境基準値）の範囲に分布していることが分かる³⁾。

トリクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物は、水より重く、表面張力や粘性は水より小さい、サラサラした液体である。こうした性質から DNAPLs (denser-than-

water non-aqueous liquids) と称されることもあり、その対比として水より軽いベンゼンなどは LNAPLs (lighter-than-water non-aqueous liquids) と称される。液体の表面張力や粘性は、小さな隙間に浸透するときの抵抗となる要素であり、浸透能を高めるには小さいほどよい。その意味でトリクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物は、洗浄剤として他に勝る性質を保持している。逆に隙間のある多孔体、特に空気を含む不飽和土壌では水より浸透しやすいことは容易に想像できる。コンクリートであっても、乾燥していればあたかも吸い込まれるように浸透する⁴⁾。

さらに土壌空隙中に空気（土壌ガス）が存在すれば、土壌ガス中に気化する。この土壌ガスを採取分析すれば、その値からただちに土壌や地下水の濃度はわからなくとも、相対的な濃度分布は描ける。その手法として、高感度から低感度まで、調査の目的や対策の場面に応じて適切な技術を選択することになる。揮発性有機塩素化合物による汚染調査では、高濃度土壌ガス地点にボーリングを行い、土壌試料や地下水試料の採取と分析を行う。典型的な事例として、図2にはトリクロロエチレンで汚染された火砕流堆積物地域の調査結果を描いている。この調査では、トリクロロエチレン土壌ガス濃度のコンター図からボーリング地点を選定し、土壌・地下水試料の採取と分析を行った。土壌濃度の最大値は地表面下46mで138 mg/kgに達し、地下水濃度の最大値も同じ地点で294 mg/lを観測している。特に注目されるのは土壌汚染の広がりであり、10 mg/kgの等濃度線で見れば、40m以上トリクロロエチレンが浸透してもその範囲は45m程度に収まっている。100 mg/kgの等濃度線では、その範囲はさらに狭く10m程度であり、土壌中に侵入したトリクロロエチレンは横方向にはあまり広がらず、ほとんど真っ直ぐ下に浸透することが理解できる。いくつかの調査資料から土壌濃度10 mg/kgの汚染範囲を求めると、おおむね汚染物質が1m浸透するごとに汚染範囲は1m広がることを示している。

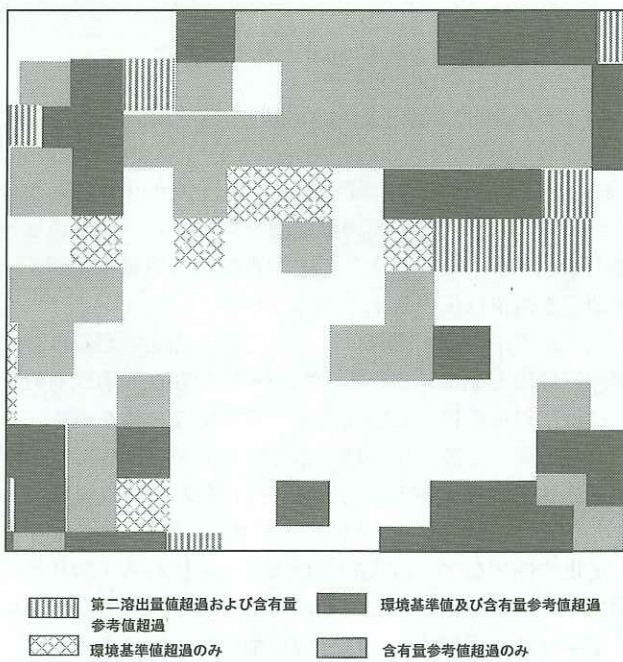


図1 工場敷地内の表層土壌に見られる重金属汚染(縦150m, 横170m)

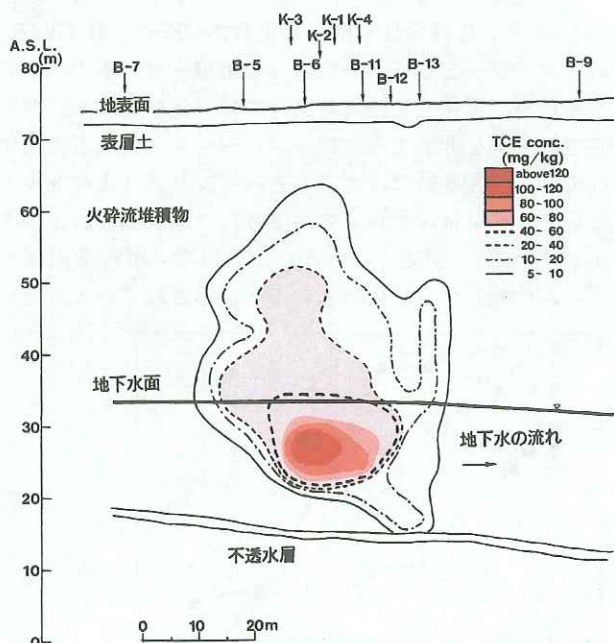


図2 火砕流堆積地域で観測された土壌中のトリクロロエチレン濃度分布

2.2 土壌汚染の現状

工場敷地内の土壌汚染をはじめとして、工場跡地や市街化地域の再開発など、土地の売買や形質変化に伴い数多くの土壌汚染が発見されている。環境省では毎年度、都道府県等が把握した土壌汚染事例数を公表している。2000年度未までの調査・対策事例について、累積の調査・対策事例数は1097件、超過事例数は574件に上っている。調査・対策指針に分類されている調査の契機別に整理すると、現況把握型が急増しており、2000年度までの3年間合計で、調査事例数：400件、超過事例数：260件に達し、それぞれ3年間の68.5%、68.2%を占めている。これは、土地の売買には土壌調査が必須事項になりつつあることに加えて、ISO 14000 シリーズ取得に伴う環境管理や環境への配慮が反映された結果とみることができる。

図3に示したように、土壌汚染判明数は土壌環境基準が設定された1991年以降増加傾向にある。特に1998年以降急増していることがわかる。超過事例574件を溶出基準項目別にみると(図4)、重金属類では鉛：170件と最も多く、

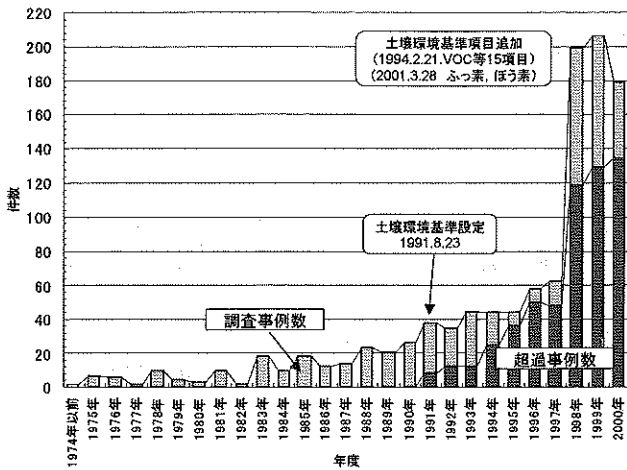


図3 土壌汚染判明数の経年変化

砒素：143件、六価クロム：95件、総水銀：77件が続き、揮発性有機化合物ではトリクロロエチレン：178件、テトラクロロエチレン：152件、これらの分解生成物であるシス-1,2-ジクロロエチレン：105件などとなっている。

また超過事例574件の78.7%は私有地であり、工場・事業場の敷地や跡地が68.2%を占める。業種区分では、累積調査・対策事例数のうち、電気器具機械製造業：159件、金属製品製造業：148件、洗濯・理容等：105件、化学工業：96件、非鉄金属製造・鉄鋼業：90件などとなっており、これら業種で598件（55%）に上る。

累積調査・対策事例数1097件のうち、地域別には、関東：636件、近畿：191件、北陸・中部：118件となっており、事業活動の規模に依存することはもちろん、条例・要項等に基づく調査など地域行政の土壌汚染に対する認識の程度にも依存している。

3. 土壌地下水汚染の修復技術

3.1 ささまざまな修復技術

土壌地下水の汚染現場から、さまざまな物質が検出されている。たとえば硝酸汚染のように、継続的にしかも過剰な施肥供給に起因している場合には、適正な肥料の施用が対策として直接的な地下水質の改善効果をもたらす。ニンジン栽培で知られる各務原台地では、慣行施用量であった400 kg/ha/yの窒素肥料施用量を300 kg/ha/yにまで減量し、比較的短期間で硝酸汚染の改善に成功している⁶⁾。対策

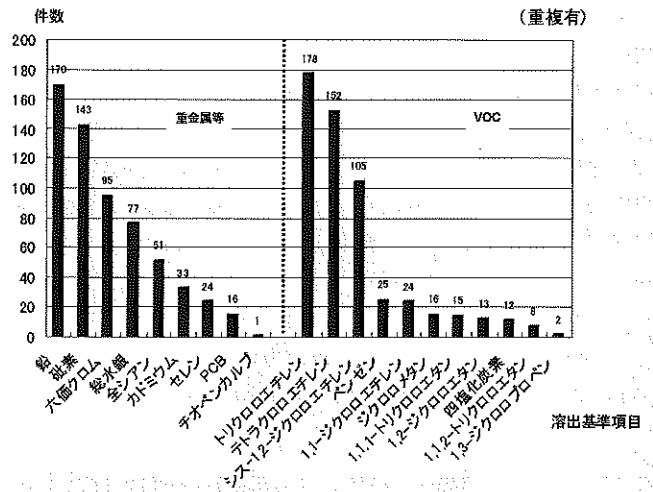


図4 物質別の累積土壌汚染判明数

の始まった1989年以前には東部畑作地域で25 mg/lを上回っていた汚染ブルームが、対策開始後5年程度で25 mg/lを超える高濃度域が消滅するまでに回復させることができた。こうした汚染物質の供給源を制御する、あるいは現に土壌地下水中に存在する汚染物質の除去や無害化が、土壌地下水汚染修復の基本である。

地下環境中の化学物質は、その性状に加えて地質依存の水利特性に支配される。そのため多様な存在形態に対処するには、対策の目的と場面に応じて適切な技術を選択することが重要である。土壌地下水汚染の対策は欧米で技術開発が始まり、特に米国のSITEプログラムが知られている⁹⁾。米国のスーパーファンド法の下で、封じ込め、固化・安定化や焼却などの古典的な修復技術に代わる革新技術の開発と評価が進められており、すでにわが国で普及している土壌ガス吸引技術などはその典型的な技術である。

この土壌ガス吸引技術は、不飽和土壌中の空気（土壌ガス）に気化した揮発性有機塩素化合物を土壌ガスを吸引除去して修復する技術であり、数カ月から1年の対策で数百kgから1トンの揮発性有機塩素化合物が除去されている。このアナロジーとして、汚染された土壌・地下水中に空気を吹き込み、揮発性有機塩素化合物の気化や有酸素状態での微生物分解を促進するエアースパーキング技術も実用化されている。図5には、エアースパーキングによりトルエンとテトラクロロエチレンで汚染された地下水の修復事例を示している⁷⁾。空気の注入から100日で2桁程度濃度が低下し、比較的早く浄化の進むことが示されている。ただ

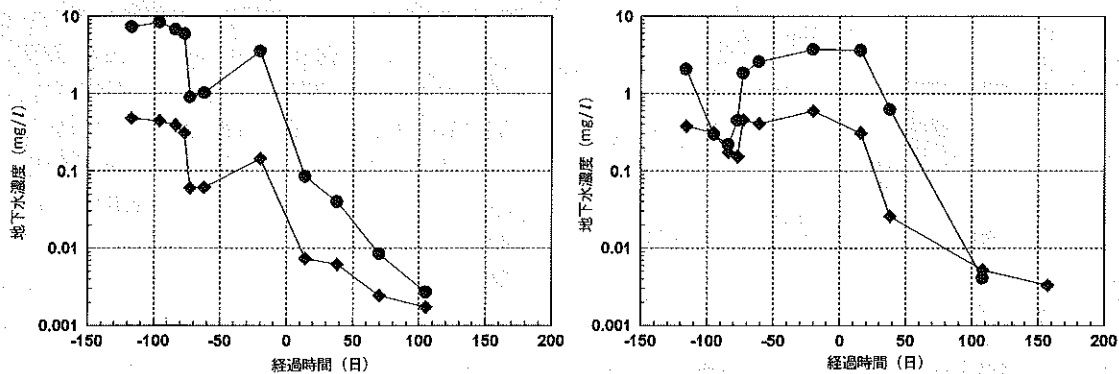


図5 エアースパーキングによる汚染地下水の修復（図中、●：トルエン、◆：テトラクロロエチレン）

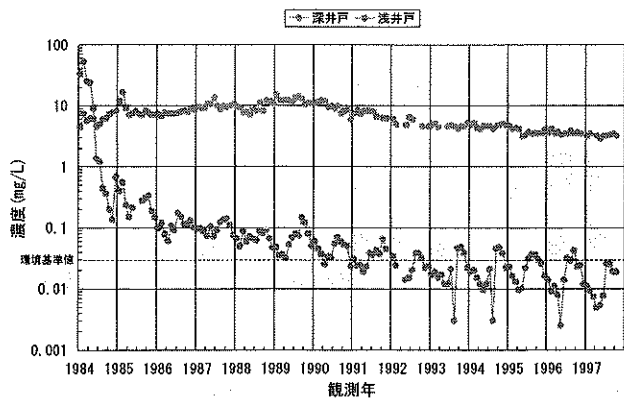


図6 汚染土壌除去(1984年5月)後に実施された地下水揚水による水質の回復状況

エアースパーキング技術を適用するには、少なくとも空気が注入できる程度に透過度のよい地質であること、さらに空気を注入することによって地下水の流れ場を攪乱するため、汚染状態を助長することのないよう、地下水の流れ場の制御と十分なモニタリングが必要になる。

一方、地下水揚水技術は欧米ではP & T (pump and treat) と呼ばれ、時間と経費がかかる割には修復効果が上がらず、技術としての評価は高くない。ところが、わが国では15年間の揚水で27トンに上るトリクロロエチレンを除去し、当初10 mg/lを超えていた工場内の浅層地下水質を環境基準値0.03 mg/l以下にまで回復させた実績がある(図6)。地下水揚水技術で汚染地下水を修復するには時間はかかるが、確実に汚染物質を回収することができ、地下水対策には欠くことのできない技術として普及している⁹⁾。

土壌ガス吸引や地下水揚水など物理的な修復技術と比較して、微生物分解能を利用したバイオレメディエーション技術は、処理に伴う二次廃棄物の発生がないこと、処理に要するエネルギーが少ないこと、などが期待される修復技術である。バイオレメディエーションには、栄養分のみを注入し現場に生息する土着微生物を活性化する方法(bio-stimulation)と栄養分とともに微生物を注入する方法(bioaugmentation)があり、前者についての実証試験がわが国でも実施されている。現場に生息する土着微生物を活性化させた実証試験では、40日の対策で1.4 kgのトリクロロエチレンが分解できたと報告されている⁹⁾。

3.2 最適な修復技術は存在するのか

数万種に上る化学物質が産業規模で製造されており、その全てが有害でないにしても、顕在化しているか、将来に汚染の懸念される物質が数多く存在する。多環芳香族炭化水素や油類などは、懸念の物質群である。さらに対象とする汚染物質の挙動は、地質や地質依存の水理特性に強く影響され、汚染の形態は多様である。こうした状況にあって、修復コストはもちろんのこと、修復後の土地利用まで視野に入れた最適な修復技術は存在するのであろうか。

現在顕在化している土壌や地下水の汚染は、過去の行為に由来しており、汚染原因を除いてもすぐには汚染状況は改善されない。土壌地下水汚染は蓄積性の汚染であることが最大の特徴であり、その意味でも汚染された土壌地下水

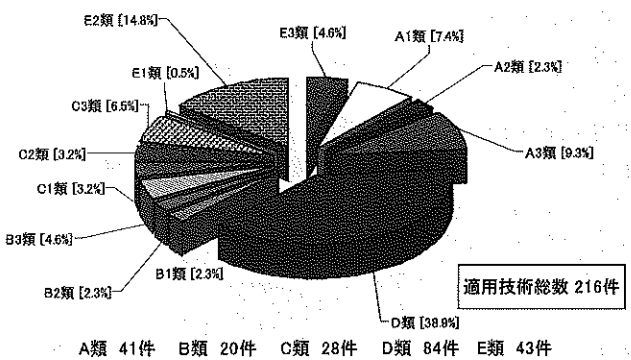


図7 修復技術の類型別割合⁹⁾

の対策は、原位置から汚染物質の除去・無害化を行うことが基本である。こうした土壌地下水汚染の改善のため、環境省では「土壌・地下水汚染対策事例等調査(新技術調査)」として、汚染物質の除去・無害化技術の開発と評価を行ってきた。1993年から1999年までの7カ年に、実証試験を行った対策技術は調査技術を含めて41件になる。

このプロジェクトの中で実施された実証試験は、試料のサンプリングや土壌ガスなどの調査手法:9件、ガラス固化技術:2件、生物活性を用いた分解処理技術:5件、土壌ガス吸引や注入(エアースパーキング)技術などの原位置抽出技術:8件、分解・処理技術:17件、となっている。こうした実証試験をとおして、技術としての信頼性が実証され、地下水揚水や土壌ガス抽出技術のように、原位置対策技術として普及している技術もある。

これらの技術を含めて、2001年度に学識経験者や環境省実証試験実施企業を含む浄化処理企業に保有する土壌地下水汚染対策技術について、土壌環境センターがアンケート調査を実施した⁹⁾。アンケート送付先は274カ所、回答企業数等は120件、対策技術に関する回答数は216件であった。

アンケートでは、非揮発性重金属等、揮発性重金属等、揮発性有機化合物、残留性有機化合物、農薬、硝酸性窒素等、油類、ダイオキシン類、の8物質を対象とした。アンケート結果を基に、次のAからEまでの5つの要素技術に分類し、図7に適用技術の割合を示した。

- A類: 経路遮断技術, 拡散・流出防止技術
- B類: 原位置分解技術
- C類: 原位置抽出技術
- D類: 土壌浄化技術
- E類: 処理・処分技術

これら5つの要素技術それぞれに数字を付し、対象とする空間や汚染物質の形態も区別した。添え数字1は土壌を対象、添え数字2は地下水を対象、添え数字3は土壌と地下水を対象とする技術群を表している。

環境省の実施した実証試験を含め、回答のあった216件の要素技術を分類すると、D類:84件、E類:43件、A類:41件、C類:28件、B類:20件、の順となっている(図7)。さらに、汚染物質の原位置抽出や分解無害化を対象としたB、C、Dの3分類だけを見ると、D類:84件、C類:28件、B類:20件の132件であり、D類の土壌浄化処理が全体の63.6%を占める(図8)。原位置分解技術のB類や原位置抽

出技術のC類に比べて、実際の汚染現場では圧倒的にD類が優勢であることがうかがわれる。原位置分解や原位置抽出などの対策では、対策に伴う二次的な環境負荷は軽減できるが、対策の効果確認や事後モニタリングなど、浄化完了までに比較的長時間を要することがかなりの負担になっていると考えられる。一方、D類の要素技術は、固化・不溶化、溶融固化、熱分解、酸化還元分解、原位置外生物処理、など汚染土壌の掘削と処理を組み合わせた技術がほとんどであり、経費はかかっても一気に浄化完了できるところにメリットがある。不動産の流動化なども重

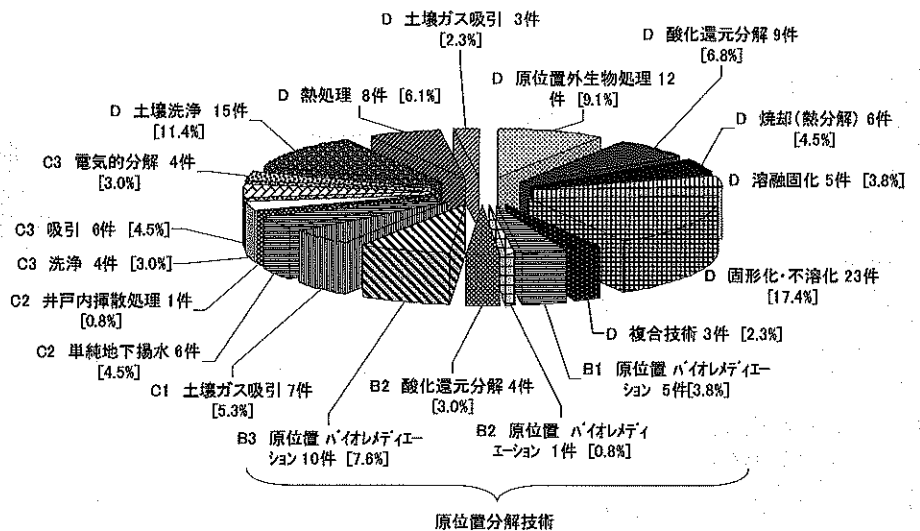


図8 原位置修復技術の類型別割合 (B類: 20件, C類 28件, D類 84件)⁹⁾

なって、できるだけ対策期間が短縮できる浄化技術が実際の修復現場では求められていることの表れであろう。

これらの浄化技術適用状況からみて、浄化対策の短縮できる技術開発、環境負荷の小さい浄化技術の開発が、実際の汚染現場でも求められていることが浮き彫りになってくる。ただ汚染土壌は環境基準を満たさない限り、そのままでは原位置には戻せないし、簡易な浄化では最終処分場しか適切な受け入れ先はない。この受け入れ容量には限りがあり、低負荷・低コストな原位置浄化技術の開発が是非に必要であろう。

4. 将来の展望

土壌地下水汚染をより効率的に修復するため、古典的な技術に替わる革新技術の開発がSITEプログラムなどで精力的に推進されている⁹⁾。ただSITEプログラムをみてもさまざまな技術が分散使用されており、汚染物質の特性や修復段階に応じて適切な技術を選定することが重要であり、画一的に使用できる技術は存在しない。

土壌地下水空間における物質移動の特性や修復技術開発の現状から考えて、多様な汚染物質と汚染状況に画一的に対処することは難しい。その意味で土壌汚染対策法の施行によって、土地の利用状況や管理状態に応じた、実施可能な選択肢の広がることは事実である。汚染土壌の直接暴露と地下水摂取の経路を遮断し、地下環境中の汚染物質を管理することによって、人への健康リスクを低減するところに新しい法制度の最大の特徴がある。ただ原位置不溶化や原位置封じ込め対策では、汚染物質が依然として原位置に残留していることに変わりはなく、こうしたリスク低減措置だけでは措置後に土地利用の制限を受ける。

さらに新しい法制度に加えて、汚染された土壌地下水の修復は、欧米ではすでにビジネスとして成立していることが、修復技術開発に拍車をかけることになろう。一般論として、資金的に余裕のある事業場は積極的に修復対策を進めるが、単に汚染原因者側と請負側の企業活動のみで汚染修復するのであれば、おそらく土地は虫食い状態になり、

かえって土地の流動化を妨げる要因になるおそれがある。ややもすると土壌地下水汚染は、企業活動に伴う負の遺産とみなされることが多い。ただ負の遺産と考える限りは、修復対策を進展させることは難しい。土壌の持つ価値を認め、土地の資産価値を保つためには、汚染土壌の修復は必須であり、土地所有者や汚染原因者の責務である。

汚染があるからといって開発・再開が断念されるような事態は避けたい。修復後の土地利用と企業活動から得る利益を含めたトータルな社会資本整備という視点から、汚染された土壌地下水の修復には、環境として土地としての価値を高めるような公共マインドが是非に望まれる。

本小論をまとめるに際して、自治体や企業から貴重な調査資料と先端的な技術について情報提供を戴きました。土壌地下水汚染問題への真摯な取り組みに対して、心より謝意を表します。

参考文献

- 金子恵美子・菅野 直: 仙台市内の井戸水調査(第2報)―ヒ素について―, 仙台市衛生試験所所報, Vol. 9, pp. 174-178, 1979.
- 殿界和男・鶴巻道二・三田村宗樹・加藤紀代子: 高槻市におけるヒ素含有地下水と浄水処理について, 第3回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp. 135-140, 1994.
- 平田健正: わが国の土壌汚染と対策技術, 廃棄物学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 85-92, 2003.
- 平田健正: 土壌汚染の調査・対策について現地調査の実際から実験に至るまで, (社)土壌環境センター秋季セミナー, pp. 9-17, 2002.
- 寺尾 宏: 岐阜県各務原市の硝酸性窒素による地下水汚染対策, 第41回日本水環境学会セミナー, pp. 130-141, 2001.
- たとえばUSEPA: The Superfund Innovative Technology Evaluation Program, Annual Report to Congress FY 1999, EPA/540/R-01/500, December 2000, 29 p, 2000.
- 江種伸之・平田健正・福浦 清・松下 孝: 地下水中への長期間の空気注入による汚染物質濃度変化について, 水工学論文集, Vol. 43, pp. 193-198, 1999.
- 小山田久実ら: トリクロロエチレン汚染現場への原位置バイオレメディエーションの適用, 第4回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp. 75-78, 1995.
- 土壌環境センター: 土壌・地下水汚染対策事例等調査(新技術), 平成13年度環境省請負業務結果報告書, 81 p, 2002.

斜面の安定性評価技術の現状と将来展望

鹿児島大学 教授 工学部海洋土木工学科

きたむらりょうすけ
北村 良介

鹿児島大学大学院理工学研究科システム情報工学専攻 院生

さこうかずなり
酒匂 一成

1. まえがき

2003年7月20日に熊本県と鹿児島県の県境付近が集中豪雨に見舞われ、水俣市で土石流、鹿児島県菱刈町で斜面崩壊が発生し、21名が亡くなられた¹⁾。1997年7月10日には鹿児島県出水市針原で水俣市宝川内での土石流災害と同じような災害に見舞われた²⁾。このように日本では集中豪雨に伴う斜面崩壊、土石流等が毎年発生し、これらの自然現象に起因する土砂災害によって多くの人命が奪われ、道路・鉄道などの社会資本に被害を与えている^{3),4)}。このような現状を踏まえ、文部科学省は第二期科学技術基本計画(平成13年度~17年度)では国家的・社会的課題に対応した研究開発重点分野として「社会基盤分野」を挙げている。また、2001年4月には「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」(以下、土砂災害防止法と称する)が施行され、警戒区域、特別警戒区域の線引き作業が進められている。このように土砂災害を防止・軽減するために各種の対策が講じられてきている。

本稿では考察の対象を土砂災害の一つである降雨に伴う表層すべり型斜面崩壊(崩壊深が2m程度以下)に限定する。そして、北村らが実用化にむけて開発中の斜面崩壊予知システムの紹介を通して斜面の安定性評価技術の現状を説明し、将来展望を試みることにする。

2. 表層すべり型斜面崩壊の予知システム

図1は降雨に伴う表層すべり型斜面崩壊を予知するシステムを示したフローチャートである⁵⁾。「斜面崩壊予知」とは、通常「どこで(場所)」、「いつ(時刻)」、「どのような(規模)」斜面崩壊が発生するかを事前に知ることを意味しているが、図1で示した手順は時刻と規模のみの予知であり、「どこ(場所)」は含まれていない。崩壊場所を事前に知るためには、従来から行われてきている地質・地形踏査等に付け加え、リモートセンシング技術の応用⁶⁾、過去の崩壊事例の資料収集・データベース化、データの統計処理技術の応用などが必要であろう。

本システムは、1) 室内土質試験、2) 数値力学モデル、3) 現地計測、4) 室内浸透・崩壊土槽試験、5) 地盤調査・

原位置試験から構成されている。以下、各項目について簡単な説明を行う。

室内土質試験では、不飽和せん断試験(図1の(4))、不飽和透水試験・土の保水性試験(図1の(5))、物理試験(図1の(6))を行う。不飽和せん断試験は、安定解析に必要な土のせん断強度パラメータ(見掛けの粘着成分 c 、内部摩擦角 ϕ)を求めるために行われる。不飽和透水試験・土の保水性試験の結果は、間隙モデルの妥当性を検討するために使われる。本システムに必要な物理試験は、粒度試験、土粒子の密度試験、含水比試験、土の湿潤密度試験であり、数値力学モデル(間隙モデル、粘着モデル)の入力パラメータを決定するために行われる。

数値力学モデルには、間隙モデル(図1の(1))、粘着モデル(図1の(1))、浸透モデル(図1の(2))および斜面安定解析モデル(図1の(3))がある。これらの数値力学モデルは、本システムの骨格をなしている。間隙モデルは、不飽和土中の間隙水の浸透挙動を計算するためのモデルであり、土粒子レベルでの力学的・確率的考察により間隙比、体積含水率(飽和度)、不飽和・飽和透水係数、サクシオンが導かれ、水分特性曲線や飽和度-不飽和・飽和透水係数の関係が得られる。粘着モデルは、飽和度の変化に伴う見掛けの粘着成分の変化を計算するモデルである。後述する斜面安定解析を行うためには、事前に同定された潜在すべり面上の含水状態におけるせん断強度パラメータ c 、 ϕ を室内土質試験で求めておき(図1の(4))、飽和度と見掛けの粘着成分増分の関係を用いることによって、降雨による飽和度の変化に対する見掛けの粘着成分の変化を定量的に評価する。なお、本システムでは飽和度の変化によって c のみが増加し、 ϕ は一定であると仮定し、斜面の安定度の計算(図1の(16))を行っている。浸透モデルでは、間隙モデルの結果を用いて差分法や有限要素法による2次元不飽和浸透解析を行い、降雨浸透や地下水変動などによる地盤内飽和度分布の変化を時系列で求めている。斜面安定解析モデルでは、非円弧すべり面に対する安定解析手法(Jambu法)を用いて安定解析を行っている。また、浸透モデルと粘着モデルを安定解析モデルに組み合わせることによって、間隙水の浸透に伴う安全率の変化を時々刻々と計算することが可能となる。入力パラメータのパラツキを考

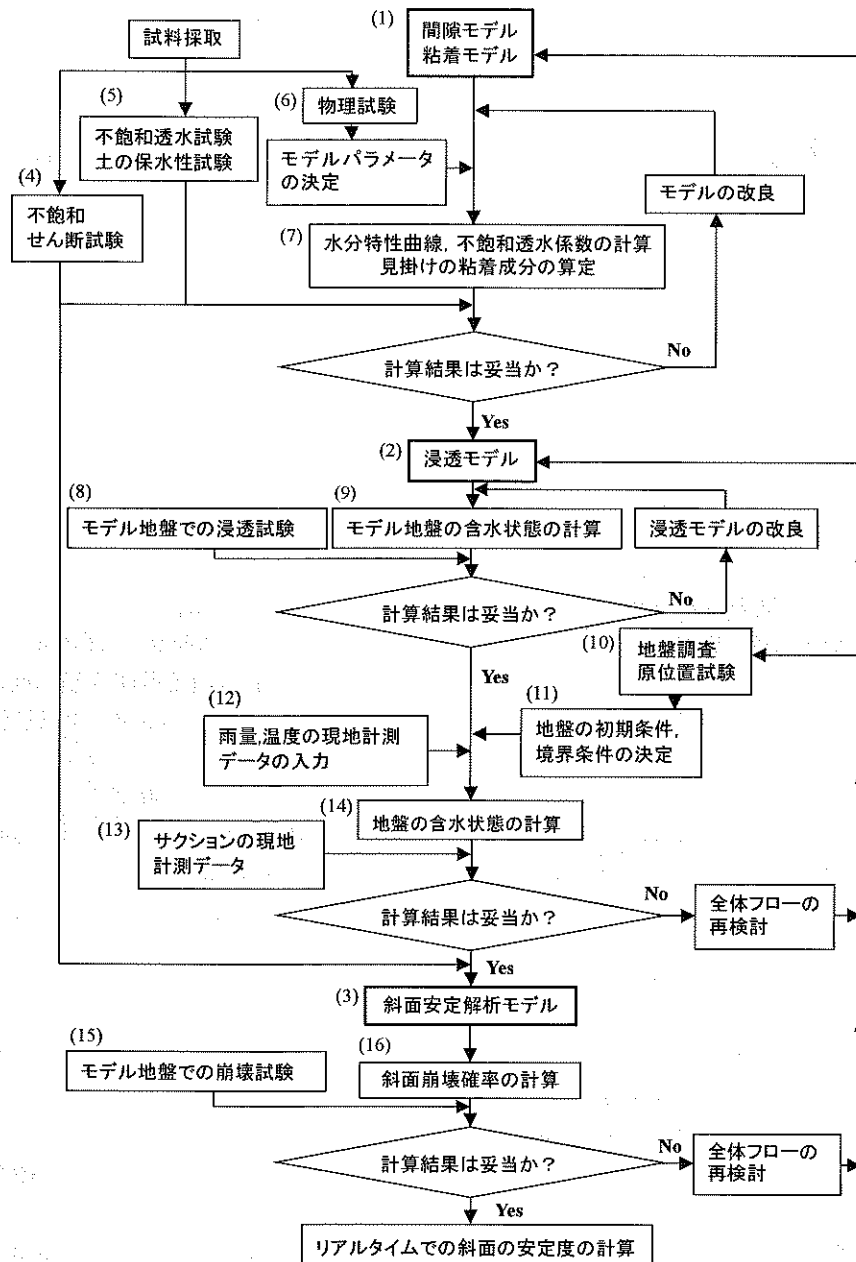


図1 崩壊予知システムのフローチャート

慮して、新しい斜面の安定性の定量的な指標として崩壊確率の導入を試みている⁷⁾。

室内浸透・崩壊土槽試験(図1の(8)、(9))は、初期条件や境界条件の制御が可能であるため浸透モデルや斜面安定解析モデルの妥当性を明らかにするために行われる。

地盤調査・原位置試験(図1の(10))は、斜面の土層構成を明らかにし、解析領域の設定、解析領域の初期・境界条件を決定するためや安定解析に必要な潜在すべり面の同定のために行われる。

現地計測(図1の(12)、(13))では、現地のサクシジョン、雨量や地中温度の計測を行っている。計測された雨量(雨天時)や地中温度(晴天時)は浸透モデルによる計算の入力値となる。計測されたサクシジョン(実測値)は計算されたサクシジョンが妥当かどうかをチェックするためのモニタリングデータとして用いられる。浸透モデルによる数値シミュレーションにおいて、地盤調査や原位置試験の

データだけでは初期条件・境界条件の正確な決定が困難であるため、サクシジョン(実測値)は計算値が合うように初期条件・境界条件を逆解析によって修正するためにも使われる。

3. 技術の現状と将来展望

3.1 不飽和土の力学特性解明に関する技術

(1) 土の保水性試験

土の保水性試験は不飽和土の水分特性曲線を得るために行われる。図2は水分特性曲線の模式図を示している。水分特性曲線はサクシジョン～体積含水率関係を表す曲線であり、不飽和土の含水状態を定量的に評価するために必要である。体積含水率は、含水比、飽和度と一意的な関係があるので、同じ試験データから体積含水率を含水比、飽和度に置き換えた曲線を得ることができる。試験方法には吸引

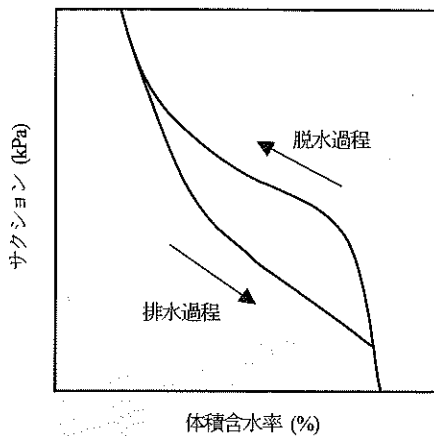


図2 水分特性曲線の模式図

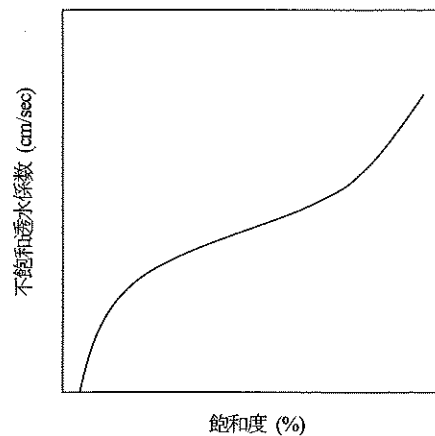


図3 不飽和透水係数～飽和度関係の模式図

い見かけの粘着成分が得られる不飽和土のせん断試験方法の確立が必要である。従来のせん断試験装置（たとえば、三軸試験装置、一面せん断試験装置等）の改良によって超低拘束圧での精度の高いデータを得る試験方法に関する研究を進めるとともに、発想の異なるせん断試験方法の開発が望まれる。

(4) モデル地盤での浸透試験

法（水頭法，減圧法），加圧法（加圧板法，加圧膜法），遠心法，蒸気圧法，サイクロメータ法等がある⁹⁾。同じ土試料による試験でも試験の種類によって得られる水分特性曲線が異なることが多い。また，脱水過程・吸水過程で生じるヒステリシス曲線の定量的な評価法は確立されていない。試験装置の特性を把握し，これらの問題を解決していかなければならない。斜面の安定性を評価するために最適な土の保水性試験法の選択，試験方法のマニュアル化が今後必要である。

脱水過程における空気侵入値，吸水過程における水侵入値は，後述するように斜面崩壊予知のために重要な物理量になることが予想される。そのため，飽和度70～95%あたりで表われる空気侵入値，水侵入値を得るための精度の高い実験データが必要である。

(2) 不飽和透水試験

不飽和透水試験は，不飽和透水係数～飽和度（含水比，体積含水率と一意的関係がある）関係を求めるための試験である。図3は，不飽和透水係数～飽和度関係の模式図を示している。不飽和透水係数は水分特性曲線とともに不飽和土の保水・浸透特性を定量的に評価するために必須の物理量である。地盤工学会では不飽和透水試験はいまだ規格化されていない。今後，不飽和地盤の浸透特性を定量的に評価するための不飽和透水試験装置の開発，試験方法の規格化が必要である。

(3) せん断試験

表層すべり型斜面崩壊の崩壊深は2 m程度以下である。このことはすべり面での有効土被り圧が数十 kPa 以下であることを意味している。このような超低拘束圧下でのせん断試験によって正確なせん断強度パラメータである c （見かけの粘着成分）， ϕ （内部摩擦角）を求めることは，現在の土質試験では非常に困難である。図4は，酒匂らが提案している見かけの粘着成分に関する数値力学モデル（粘着モデル）⁹⁾を用いて導かれた c （見かけの粘着成分）～サクシオン関係を示している。図5は，図4の関係を想定した斜面に適用して計算された安全率と見かけの粘着成分の関係を示している。図5より安全率は見かけの粘着成分が1 kPa程度変化すると安全率は0.3程度変化していることがわかる。このようなことから超低拘束圧下での精度の高

図6は土槽を用いた浸透試験結果の一例である¹⁰⁾。傾斜角45度に成形したシラス斜面の上部から注水した。斜面頂部の深さ10, 20, 30, 40, 50 cmに設置したテンシオメータによって測定されたサクシオンと土槽底面に設置した間隙水圧計によって測定された間隙水圧の時系列変化を示している。試験条件・手順等の詳細は参考文献10)を参照されたい。図に示すように斜面頂部からの注水に伴いサクシオンは浅部から徐々に低下し，3 kPa付近でいったん平衡状態がしばらく継続している。そして，サクシオンの平衡状態の後半部で間隙水圧が増大し始め，斜面法尻部で斜面が崩れ始める。サクシオン3 kPaはシラスの水侵入値（空気侵入値）と対応しているようである。実際の斜面においても崩壊前にすべり面付近の土中で数 kPa程度のサクシオンでの平衡状態がしばらく続き，さらに含水量が増えると崩壊が発生するものと推測される。このような事実の検証をモデル地盤，実地盤で検証することが望まれる。

3.2 不飽和地盤のサクシオン（土壌水分量）の測定に関する技術

提案している予知システムでは，図1の(13)に示すように斜面の含水状態をモニターするためにサクシオンを計測している。サクシオンの計測にはテンシオメータを使用している。図7に示すようにテンシオメータには脱気水が圧力を伝える媒質として用いられている。寒冷地では冬期に脱気水が凍結してしまう。また，脱気水の定期的な補給が必要である。テンシオメータに関してはこのような問題を解決しなければならない。不飽和土の土壌水分量を測定する装置としては誘電率の含水比依存を利用した TDR や FDR が使用されている。これらの装置の精度，耐久性等に関する検討を行い，土質の異なる斜面の崩壊予知に最適な測定装置の選定基準の確立が望まれる。

3.3 潜在すべり面を同定するための技術，斜面安定解析手法

急傾斜地危険箇所，特別警戒区域等のように斜面崩壊が生じると土砂災害となる可能性の高い斜面が特定されれば，その斜面において潜在すべり面の同定を行わなければならない。潜在すべり面の同定には簡易貫入試験装置，土

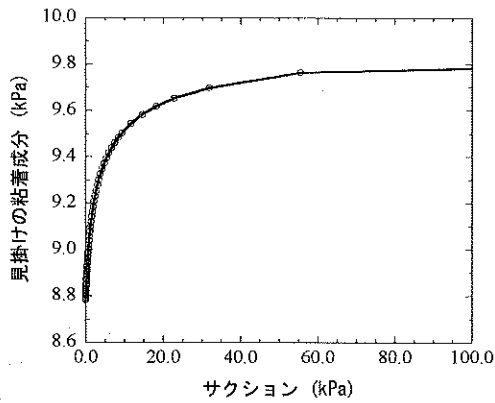


図4 c (見かけの粘着成分)~サクシオン関係

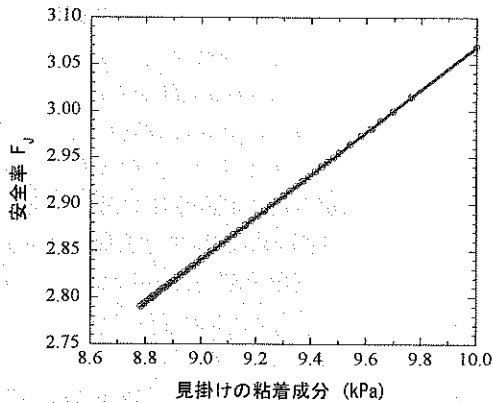


図5 安全率 F_s ~c (見かけの粘着成分) 関係

層強度検査棒、検土杖などが用いられている。北村らは三成分コーン貫入試験装置を改良して斜面での潜在すべり面を同定することを試みている¹¹⁾。潜在すべり面を同定するための最適な試験装置(持ち運びが容易、斜面での操作が簡単、精度が高い)の開発、試験方法の確立が望まれる。

同定された潜在すべり面をもとに斜面安定解析が行われる。従来の斜面安定解析手法(極限つり合い法)では、土塊を剛体とみなした静力学を基本としている。分割法による解析は不静定問題となり、いくつかの力学的仮定をもうけて解くことになる。これら仮定の妥当性の検討、含水比分布に対応したすべり面での見かけの粘着成分の分布を考慮した解析手法の開発が望まれる。また、極限つり合い法にかわる手法(FEM, DEM, 上界・下界定理を適用した極限解析法等)の発展が望まれる。

3.4 データの保存・転送に関する技術

図8は、北村研究室で採用しているデータ転送システムである。現地で計測した雨量、サクシオン、地中温度の測定データはデータロガーにファイルされ、携帯電話を介して研究室のパソコンに回収されるようになっている。携帯電話は安価で有効な通信手段であるが、消耗品であり(耐用年数は5年程度か?)、また、災害時に正常にアクセスできない可能性がある。そのため、実用化段階でのリアルタイムでのデータの転送・回収方法としては専用回線を利用することが考えられる。現在、国土交通省では光ファイバーケーブルを収納する情報ボックスを全国的に埋設する作

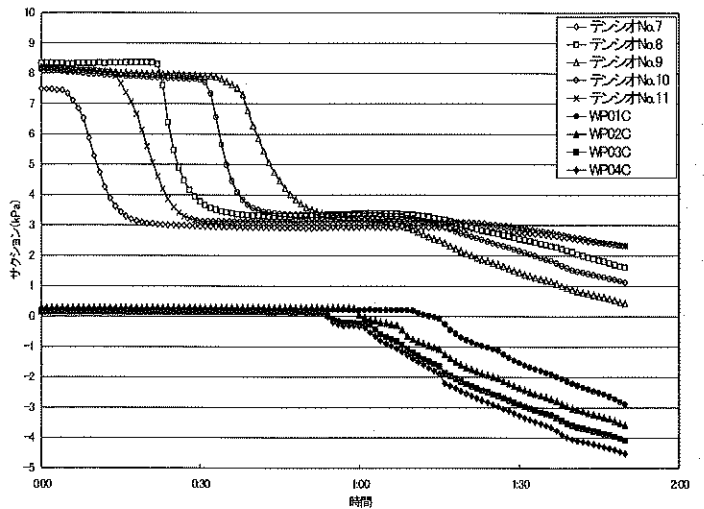


図6 サクシオン・間隙水圧の時系列変化

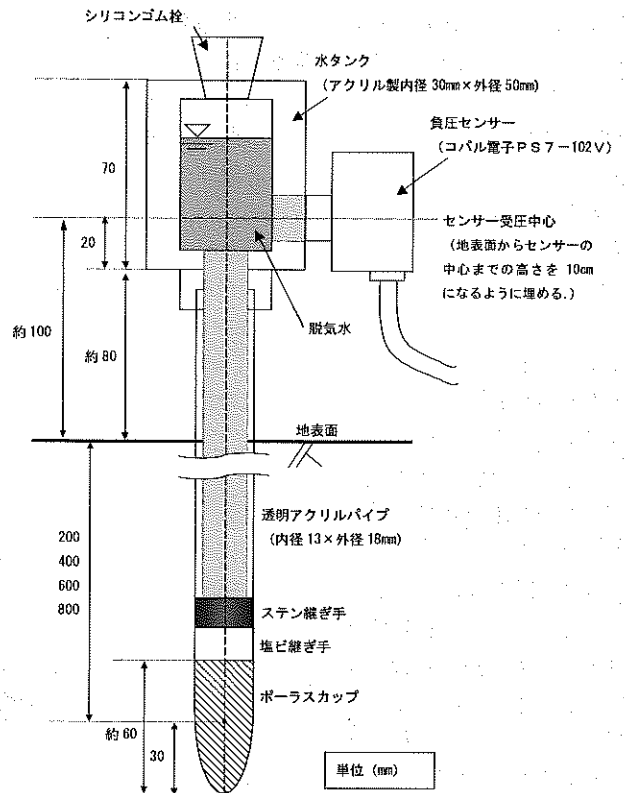


図7 テンシオメータの概略図

業を進めている。したがって、光ファイバーケーブルを利用した情報の転送が有望である。すなわち、現地計測地点から最寄りの光ファイバーケーブルまでは無線を利用し、その後は光ファイバーケーブルを通してデータを国土交通省・都道府県の防災機関のコンピュータに入力・解析し、得られた結果を出先事務所、市町村に分かりやすい図表などに加工して配信するシステムが考えられる。

4. あとがき

斜面崩壊による土砂災害を防ぐことを目指す工学(斜面防災工学)は、従来の土質力学、地盤工学ではあまり注目されていなかった課題(不飽和土の力学、超低拘束圧下で

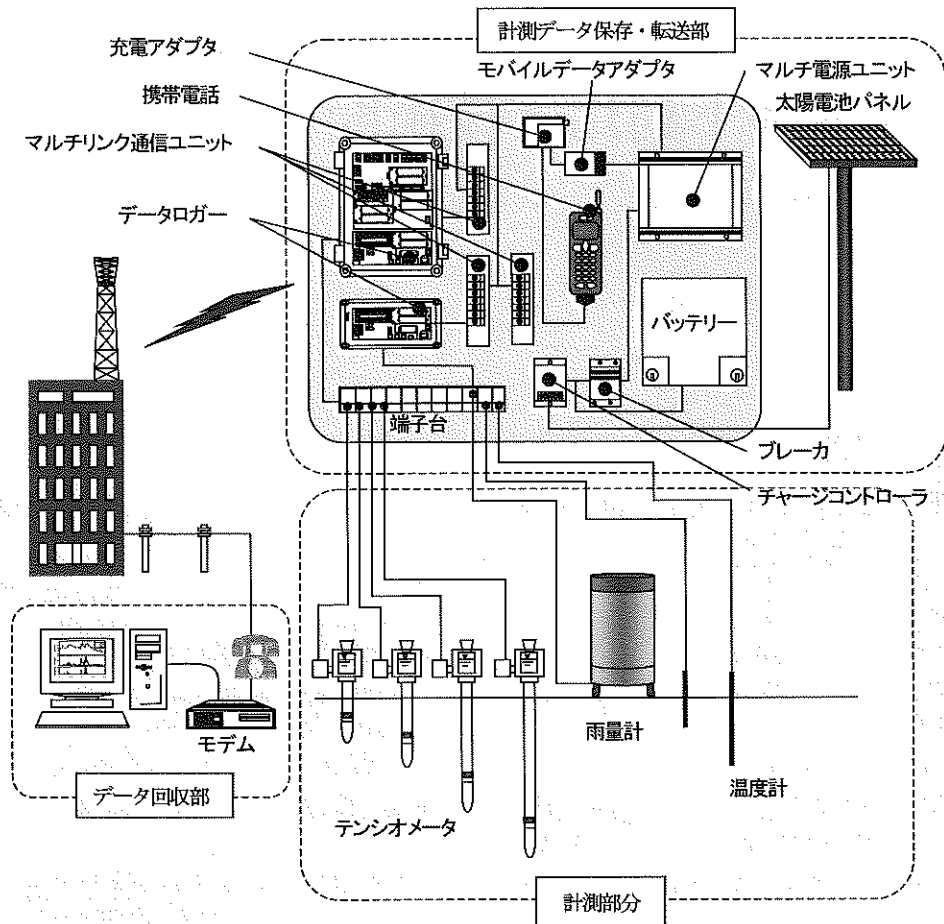


図8 携帯電話を利用したデータ転送システム

の圧縮・せん断試験等) に関する研究開発が必要であること、また、計測工学、情報工学など工学全般の成果を利用しなければならないことを認識させた。今後はこれらの課題を解決していくための研究、技術開発が土質力学、地盤工学という学問分野でなされることが望まれる。

本稿では、降雨に伴う表層すべり型斜面崩壊に限定し、斜面の安定性の評価技術の現状と将来展望について説明をしてきた。斜面崩壊には表層すべり型以外の形態をとる崩壊が多数ある。また、土砂災害には斜面崩壊による災害の他にもいろいろな災害がある。したがって、ここで述べた内容は限られた対象の防災対策の一手法にすぎない。しかし、この手法の有用性が明らかになれば、汎用性を高めることは容易であると考えている。

本提案手法を多くの地盤工学の技術者(実務者)に理解していただき、使っていただくことが実用化の第一段階として行わなければならない。ご質問等があれば、メール(kitamura@oce.kagoshima-u.ac.jp)等にてご連絡いただければ幸甚である。

参考文献

- 1) 地盤工学会・土木学会合同調査団：平成15年7月梅雨前線豪雨による九州各地の土砂災害調査速報，土と基礎，2003（掲載予定）。
- 2) 地盤工学会出水市土石流災害調査団編：1997年7月10日鹿児島県出水市土石流災害調査報告，地盤工学会，1998。
- 3) 北村良介：講座「豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測 2. 近年における豪雨災害の特徴（その1）」，土と基礎，51-5，pp. 59-62，2003。
- 4) 梅村 順・森脇武夫・杉井俊夫：講座「豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測 2. 近年における豪雨災害の特徴（その2）」，土と基礎，51-6，pp. 53-58，2003。
- 5) 松尾和昌・酒匂一成・北村良介：斜面崩壊予知戦略—南九州シラス地帯を例として—，自然災害科学，21-1，pp. 25-33，2002。
- 6) 小島尚人・北村良介・大林成行・伊代田尚志：衛星リモートセンシングデータを導入したシラス自然斜面の崩壊危険箇所評価精度の向上，土木学会論文集，No. 707/VI-55，pp. 165-176，2002。
- 7) 荒木功平・酒匂一成・松尾和昌・北村良介・阿部廣史：降雨に伴う斜面崩壊確認について，「豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関するシンポジウム」発表論文集，pp. 77-84，2003。
- 8) 地盤工学会「土質試験の方法と解説」改訂編集委員会編：土質試験の方法と解説—第一回改訂版—，地盤工学会，pp. 118-135，2002。
- 9) 酒匂一成・山田満秀・北村良介：新しいしらす斜面の安定解析手法，土木学会応用力学論文集，Vol. 3，pp. 497-503，2000。
- 10) 村田秀一・北村良介・田中秀明・横山陽一・今西 肇・大河内保彦・水島俊基・酒匂一成：降雨によるシラス斜面の浸透・崩壊に関する模型土槽試験，「豪雨時の斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測に関するシンポジウム」発表論文集，pp. 39-48，2003。
- 11) 小屋敷洋平・北村良介・松尾和昌・高田 誠：ミニ・コーン貫入試験装置の降雨による斜面崩壊予知への適用に関する一考察，第36回地盤工学研究発表会，pp. 135-136，2001。

大深度地下利用と技術開発の将来展望

国土交通省都市・地域整備局大都市圏整備課
大深度地下利用企画官

なかしま まさと
中島 正人

1. 大深度地下の公共的使用に関する特別措置法の制定

(1) 法律の概要

大深度地下利用については、平成12年5月19日に「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」(平成12年法律第87号)(以下「大深度地下法」という。)が成立し、平成13年4月1日より施行されている。

この法律は、通常使用されることのない「大深度地下」について、原則として事前の補償を行うことなく、公共的な目的のために使用できる特別の手続きを定めたものである。

大深度地下とは、土地の所有者等による通常の使用が行われない深さの地下として、① 地下室の建設のための利用が行われない深さ(地下40m以深)、② 建築物の基礎の設置のための利用が通常行われない深さ(支持地盤上面から10m以深)のいずれかの深い方の深さにより定義される。

すなわち、大深度地下は少なくとも地下40mより深い地下で、その深さは支持地盤の状況によって決まる。また、大深度地下は、地上の土地利用が進んだ都市部においては、限られた利用可能な空間であるため、適正かつ計画的に利用するための利用調整の仕組みも設けられている。

法律の対象地域は、土地利用の高度化・複雑化が進んでいる三大都市圏(首都圏・近畿圏・中部圏)の既成市街地、近郊整備地帯等であり、対象事業は、道路、河川、鉄道、電気通信、電気、上・下水道等の公共性の高い事業となっている。

この法律の施行で、大深度地下利用が事業実施段階に入ったことにより、都市再生や都市機能の強化などの目的に対して、空間利用に関する新たな選択肢が加わったことになる。

大深度地下法においては、大深度地下空間を利用するために必要な大深度地下における環境の保全および安全の確保への配慮や、大深度地下を適正かつ合理的に利用するための事業間調整および事業実施の基礎となる情報の整備が重視されている。

(2) 大深度地下利用における環境の保全

大深度地下法第5条においては、「大深度地下の使用に当っては、その特性にかんがみ、安全の確保及び環境の保全に特に配慮しなければならない」とされており、また、大深度地下法第6条第2項においては、国が定める大深度地下の公共的使用に関する基本方針において、「安全の確保、環境の保全その他大深度地下の公共的使用に際し配慮すべき事項」を定めることとされている。大深度地下の公共的使用にあたっては、このように環境の保全について特に配慮が求められている。

大深度地下法に基づき、平成13年4月3日に閣議決定された基本方針においても、大深度地下を使用する事業の特性として、地上・浅深度地下と比較して環境影響が小さくなる一方、大深度地下の使用に伴う配慮事項があるとされており、環境影響評価手続きまたは環境対策の必要性が示されている。この基本方針においては、地下水(地下水位・水圧低下による取水障害・地盤沈下、地下水の流動阻害、地下水の水質)、施設設置による地盤変位、化学反応、掘削土の処理等の事項を踏まえた環境保全のための措置を講ずるべきこととされている。大深度地下の実際の使用にあたっては、個々の施設ごとの詳細な調査分析や計画、設計、施工、供用・維持の各段階での環境対策の検討を実施し、各地域で土地利用状況、地盤状況等の実態を踏まえた対策を講じることが必要であるとされている。

(3) 大深度地下における地盤の情報、地下の利用状況等に関する情報の収集および提供

大深度地下法第8条では、「国及び都道府県は、公共の利益となる事業の円滑な遂行と大深度地下の適正かつ合理的な利用に資するため、対象地域における地盤の情報、地下の利用状況等に関する情報の収集及び提供その他必要な措置を講ずるように努めなければならない。」とされている。

大深度地下法における大深度地下の深さを特定する場合、支持層の位置等を特定する必要があるため、詳細な地盤調査を行うことが必要である。しかしながら、複数のルートを検討している段階など構想段階で地盤調査を詳細に行うことは非効率的である。一方、地盤の詳細なデータなしに大深度地下の深さの判断を行うと、地盤調査の結果、

大深度地下の深さが計画と異なるといったことも想定される。また、大深度地下は施設の作り直しが困難な空間であること、大都市地域において残された貴重な空間であることから、適正かつ合理的な利用が求められているが、どの空間が大深度地下になるのかをおおむね即地的に判断できなければ、適正な施設配置を図るための事業間の調整も不可能である。

このため、三大都市圏において、あらかじめ大まかな大深度地下の深さを明示する大深度地下マップを国土庁（現国土交通省）は、関係機関の協力を得て作成し、平成12年11月に公表している。

さらに、大深度地下における地盤情報、地下に設置された施設の情報等に関する情報システムについても現在整備中である。

このように大深度地下における地盤情報等情報の整備は大深度地下利用には欠くことのできない分野である。

2. 大深度地下利用に関する技術開発ビジョンにおける検討

(1) 技術開発ビジョンの検討経緯

大深度地下法の成立・施行を契機として、各方面から大深度地下利用に関する構想が提案されてきており、現段階では、大深度地下利用制度の利点を活かした事業が計画されているところである。現在まで実際の地下施設の利用事例においては、すでに大深度地下に相当する深さの空間が利用されており、大深度地下利用の技術は存在するが、今後、より高度で多様な大深度地下利用を効率的に進めるためには、大深度地下の特性を踏まえた一層の技術の開発が不可欠と考えられる。このため、大深度地下法の施行に併せて閣議決定された基本方針では、「国は、大深度地下を利用する各事業が横断的に必要とする汎用性の高い技術開発を推進するため、大深度地下利用に関する技術開発ビジョンをとりまとめ、公表すること等により、民間の技術開発の促進を図ることとする。」とされている。

大深度地下利用に関するこのような課題認識に基づいて、平成12年度から「大深度地下利用に関する技術開発ビジョン検討委員会」（委員長：黒川洸東京工業大学名誉教授）において検討が重ねられ、平成15年1月には「大深度地下利用に関する技術開発ビジョン」が国土交通省において策定され、首都圏、近畿圏、中部圏の大深度地下使用協議会において報告されている。

この「大深度地下利用に関する技術開発ビジョン」は、大深度地下利用のための幅広い技術開発を促進するため、大深度地下利用に必要な技術開発の方向性、具体的な技術開発項目について検討を行ったものであり、22の技術分野において必要な検討が行われている。

(2) 大深度地下利用に必要な技術開発の視点と検討条件

技術開発ビジョンにおける大深度地下利用に関する技術開発の視点としては、

- ①（浅・中深度と同等以上に）よりよく・安全に使うための技術開発
- ②（浅・中深度と同等以上に）環境に配慮してよりよく作るための技術開発
- ③（大深度地下利用を）適正に評価するための技術開発の3点があげられている。

また、技術開発の検討条件としては、現状の大深度地下に相当する深さの地下利用の現状などを踏まえた上で、今後の地下利用の方向も考慮して、検討条件を設定し、検討テーマの抽出および具体的な技術開発項目について検討を行っている。具体的な検討条件としては、大深度地下の特徴を生かし、都市再生への利用ニーズが想定される線状（トンネル系）幹線施設ならびにこれらと地上との連絡施設を主な検討対象施設とし、以下のように設定している。

検討条件

- ① 利用する大深度の範囲；地下40mからおおむね100m
- ② 設置する施設
；外形15m程度のトンネル（典型的には単円形シールド、検討テーマによっては点的施設も含め他の工法、形態も想定）
- ③ 施設利用の目的
；大深度地下法の対象事業（道路、河川、鉄道、電気、ガス、水道、下水道等）
- ④ 利用する地盤の土質等
；支持層以下の土丹層または砂礫層（検討テーマによっては地下水位を含めさらに詳しく検討）

3. 大深度地下利用の技術開発の今後の方向性

技術開発ビジョンでは、先に述べた技術開発の3つの視点に基づき、先に整理した大深度地下利用の課題に対して、技術的に対応すべき技術開発の方向性を以下のように整理している。

- ①（浅・中深度と同等以上に）よりよく・安全に使うための技術開発

大深度地下利用にあたっては、深さのデメリットを克服するために、浅・中深度同等以上に利用者の安全、利便性、快適性に配慮する必要がある。

このため、快適な内部空間を設計する技術や、地上環境の改善にも配慮した換気技術、避難・救助・消火等の活動が制約されることに対する防災対策技術、人や物の安全で効率的な垂直移動や垂直・水平の組み合わせ移動のための移動方策技術等について、技術開発を進める必要があると考えられる。また、作り直しが非常に困難であることから、長期的な耐久性や維持管理についても技術開発を進める必要がある。

地下施設をよりよく・安全に使うために必要な技術開発の分野としては、以下の分野があげられている。

目的

大深度地下利用に求められる視点

対応技術分野

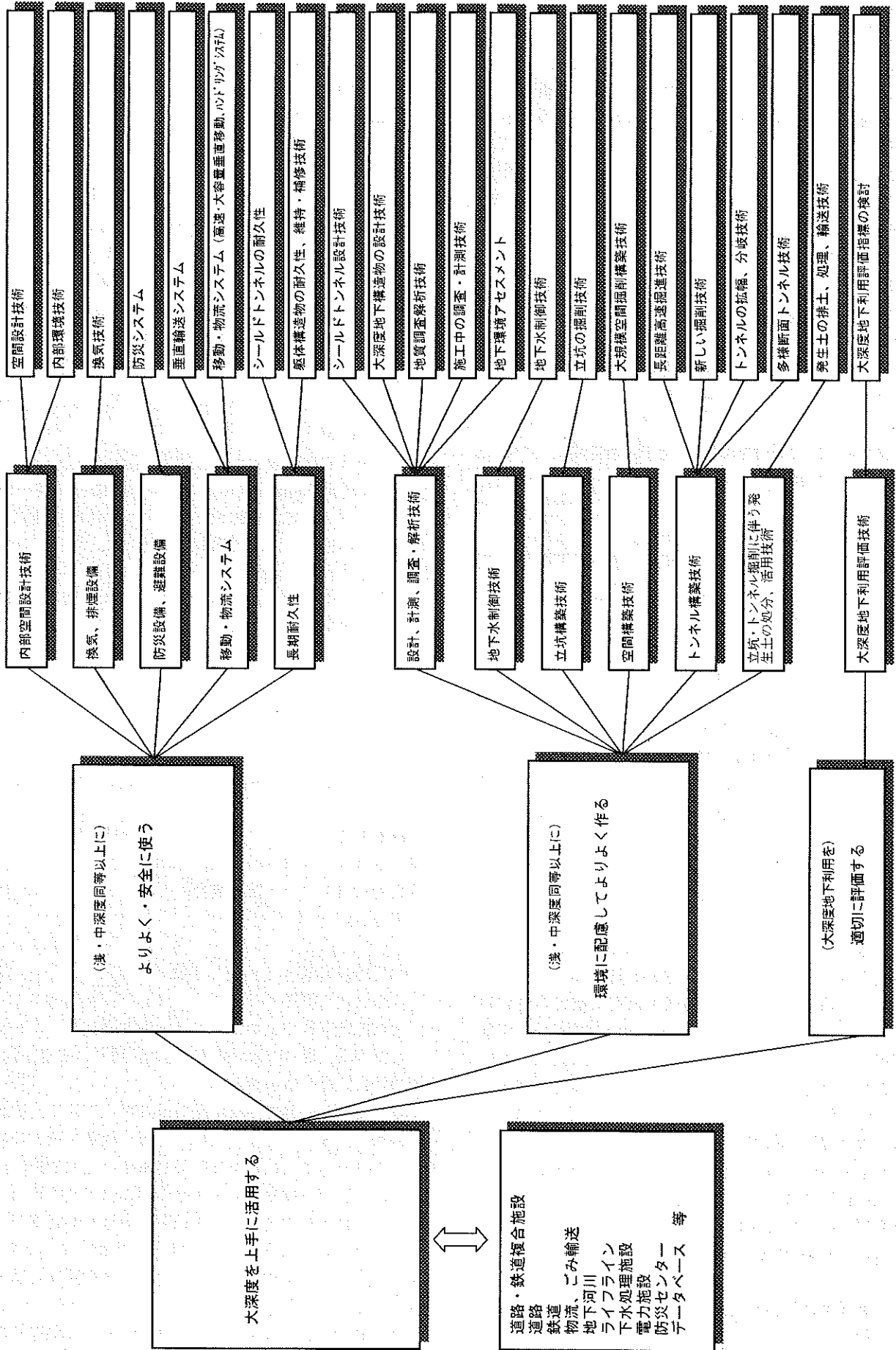


図1 大深度地下利用の技術的課題

- ・内部空間の設計技術（空間設計技術，内部環境向上技術）
- ・換気・排煙設備技術（換気技術）
- ・防災・避難設備技術（防災システム）
- ・移動・物流システム技術（垂直輸送システム，移動・物流システム）
- ・長期耐久性（耐久性，維持補修）技術（シールドトンネル，躯体構造物）

②（浅・中深度と同等以上に）環境に配慮してよりよく作るための技術開発

大深度地下利用にあたっては，利用者の安全，利便性の確保とともに，地下利用が環境に与える影響についての適切な配慮や影響の制御，求められる空間をより合理的に構築する技術開発の検討が求められる。

このため，地下施設を適切かつ合理的に設計するためのシールドトンネルや立坑の設計技術，地下の地盤の状況や環境への影響を適切に把握するための調査・解析技術，地盤沈下などにつながる地下水変動を適切に制御するための技術などの開発が必要と考えられる。また，地上とのアクセス部となる立坑やより大規模な地下空間を合理的に構築するための技術，施設ごとの空間ニーズにあった形状の地下空間を安全かつ高速で合理的に構築するためのトンネル構築技術，地下を掘削することにより発生する大量の土砂を環境負荷を小さくしつつ，合理的に処理するための技術などの環境に配慮してよりよく作るための技術開発が必要と考えられる。

地下施設を環境に配慮してよりよく作るために必要な技術開発の分野としては，以下の分野があげられている。

- ・大深度地下の実態に即した設計，計測，調査・解析技術（施設設計，地質調査解析，施工中の調査・計測，環境アセスメント）
- ・地下水制御技術（地下水制御）
- ・立坑構築技術（立坑の掘削）
- ・空間構築技術（大規模空間構築）
- ・トンネル構築技術（長距離高速掘進，新しい掘削技術，トンネルの分岐・拡幅，多様断面トンネル）
- ・立坑・トンネル掘削に伴う発生土の処分，活用技術（発生土の排土・処理・輸送）

③（大深度地下利用を）適正に評価するための技術開発
大深度地下利用は，浅・中深度に比べて一般に建設コストは増加するが，一方では，浅・中深度では実施困難な事業が可能となることや地上環境への影響を軽減できるなど有利な点も考えられる。大深度地下利用にあたっては，その事業による効果および周辺環境への影響等について，地下利用や浅・中深度地下利用と適切に比較するための評価手法に関する技術（大深度地下利用評価技術）が必要とされる。

このように3つの技術開発の視点「よりよく・安全に使う」，「環境に配慮してよりよく作る」，「適切に評価する」と技術開発の方向性と整理すると，12の対応技術分野と22の技術開発テーマにまとめられる（図1）。

これらのテーマは事業の計画，構築，利用の各段階に対

表1 主な技術開発項目の例示

技術開発テーマ	主な技術開発項目
①空間設計技術	・迷路性改善のための歩行者に対するナビゲーション技術や災害時の情報提供，誘導技術，移動弱者にも安全なバリアフリー化技術など
②内部環境技術	・快適な光・視環境形成のための省エネルギー，低発熱，長寿命のLED面発光照明など
③換気技術	・安全な内部環境維持や地上環境の保全のための集塵，脱硝技術など
④防災システム	・非接触型認識技術による残留者位置確認システムや大深度で一時的に避難できる一次滞留避難施設，早期火点検知システム，煙流動制御など
⑤垂直輸送システム	・連続輸送可能なニアモーターを利用した垂直輸送システムや急傾斜エスカレータ，地上出入口の設置位置の自由度確保のための急傾斜エスカレータなど
⑥移動・物流システム	・エレベータ・クレーン技術を融合させることによる輸送システムの高速度化や循環機構による大量化の技術など
⑦シールドトンネルの耐久性	・高耐久セグメントの開発やライフサイクルコスト（LCC）に配慮した耐久性設計手法
⑧躯体構造物の耐久性，維持，補修	・地下構造物の長寿命化のためのひびわれの発生しにくいコンクリートやライフサイクルコストに配慮した耐久性設計手法など
⑨シールドトンネル設計技術	・大深度地下シールドトンネルの実測データに基づく既往の設計手法の検証と検証と適切な地盤特性評価手法の開発など
⑩大深度地下構造物の設計技術	・立坑やNATM工法トンネルの大深度地下の実測データの蓄積による設計法の検証と適切な地盤特性評価
⑪地質調査解析技術	・調査位置の直上の土地が確保できない場合にも対応可能な曲線的なボーリングやトモグラフィ，地上から調査可能な浅層反射法などの調査技術，地盤状況の3次元表示などを可能とする既往のボーリングデータに関するデータベースの構築
⑫施工中の調査，計測技術	・施工中のリアルタイム計測技術や施工後の管理を合理的にするための長期対応計測等技術など
⑬地下環境アセスメント	・地下水予測技術など地下水の質的・量的変化を調査，予測する技術，地盤や構造物などの変状を観測する技術など
⑭地下水制御技術	・地盤沈下，地下水変動を回避するための地下水モニタリング技術やシールドトンネルの止水技術のさらなる開発など
⑮立坑の掘削技術	・大深度立坑の効率的な構築のための自動化技術や合理的に立坑を構築するための材料開発など
⑯大規模空間掘削構築技術	・大規模地下空間を掘削するための地山補強等技術や周辺への影響解析手法など
⑰長距離高速掘進技術	・各機器の高耐久化による長距離シールドマシンの開発や高速かつ大量の資材・土砂搬送技術の開発など
⑱新しい掘削技術	・複数の地盤に対応した複合地質型シールドマシンの開発や山岳工法とシールド工法を組み合わせた新しい掘削工法の開発など
⑲トンネルの拡幅分岐技術	・拡幅，分岐部に山岳工法や補助工法を併用した技術，分岐可能なシールドマシンの開発など
⑳多様断面トンネル技術	・単円形に対し同じ断面積を小さい高さで確保することができる非円形・多円形シールドトンネルの開発など
㉑発生土の排出，処理，輸送技術	・効率的で環境負荷の少ない土砂運搬のための輸送技術や土砂処理のためのリサイクル技術の開発など
㉒大深度地下利用評価技術	・地上の大気，騒音に与える効果や景観，土地の有効利用，大深度地下施設の耐震性などによる効果を適切に評価するための手法の開発

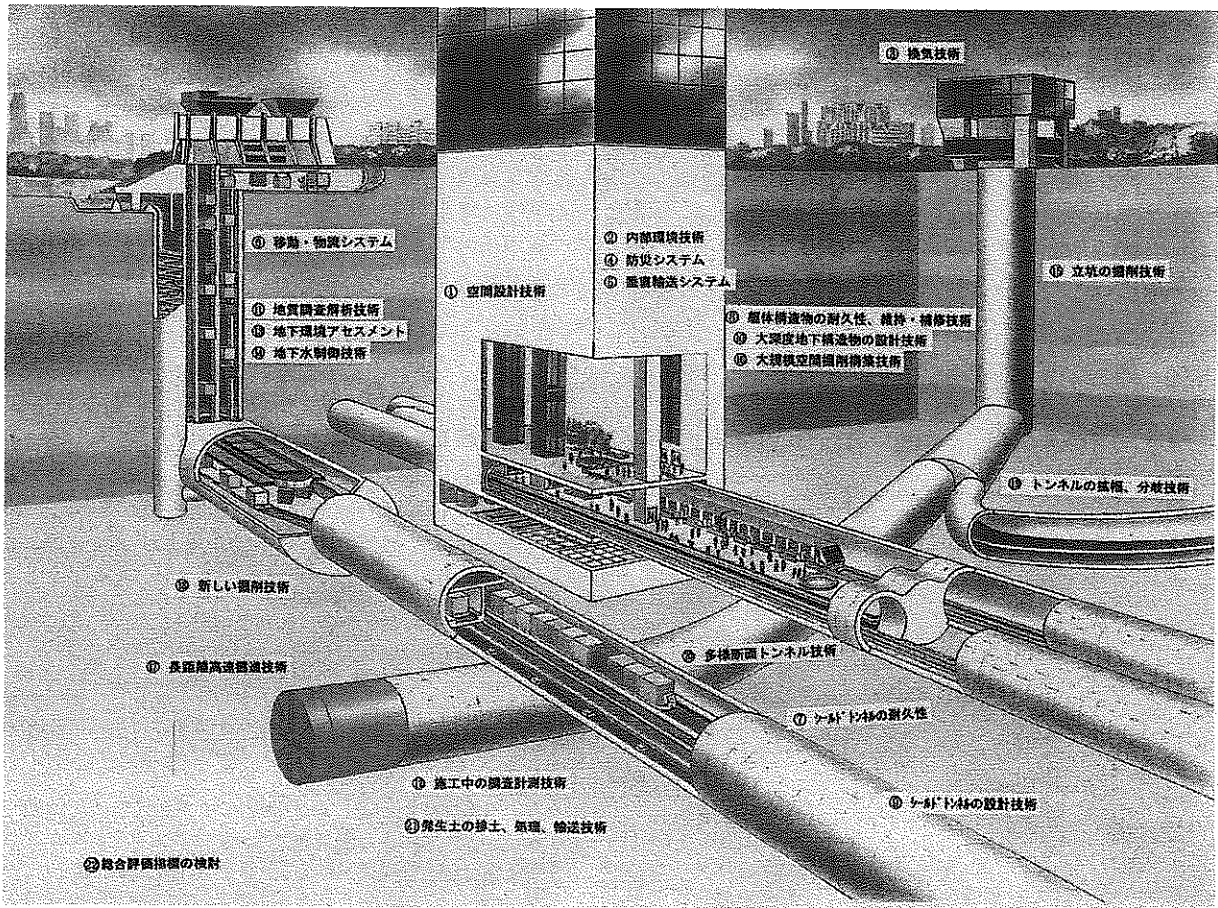


図2 技術開発による大深度地下利用のイメージ

応したものであり、大深度地下利用全般にわたる技術的課題に対応したものとなっている。これらの技術開発テーマに対応した主な技術開発項目を例示すると表1のとおりとなる。

特に、環境に配慮してよりよく作るための技術においては、大規模空間掘削構築技術、長距離高速掘進技術等とともに、シールドトンネル設計技術、大深度地下構造物の設計技術、地質調査解析技術、施工中の調査・計測技術、地下環境アセスメント等の大深度地下における的確な設計、計測、調査・解析技術が求められている。

4. 大深度地下利用の実現に必要な技術開発

このように、今度の大深度地下のよりよい利用にあたっては、上にあげたような内部環境から掘削技術、評価など幅広い分野における技術開発が必要とされるが、大深度地

下から、施設の設置、環境対策等さまざまな分野において地質調査データがその基本データとなる。

大深度地下利用については、道路、鉄道、上下水道、電力、ガス、通信等生活に密着した社会資本整備の円滑化、社会資本整備のための利用可能な空間が道路の地下に限定されないための合理的なルート設定および事業期間の短縮やコスト縮減、地震に対する安全性の向上、騒音・振動の減少、景観の保護等さまざまな利点があり、今後の技術開発により大深度地下利用はさらに進むと考えられる(図2)。

現在、大都市における大深度地下を利用とした社会資本整備も具体化しつつある。我が国における大都市の稠密な土地利用状況をみると、大深度地下利用の実現のための地質調査の的確な実施がこれまで以上に求められている。地質調査技術の今後のさらなる発展が大深度地下の適正かつ合理的な利用に寄与することに期待したい。