

# 地下水の流れを探る

小島 謙一

構造物技術研究部(基礎・土構造 主任研究員)

松丸 貴樹

同(同 研究員)



こじま けんいち



まつまる たかき

## はじめに

地下水とは地下や地中に存在する水のことで、私たちの足元にある地盤や近くに見える斜面などの土中を流れています。しかし、その姿については、土の中にあることから流れの様子や経路、水質などを正確に捉えることは容易ではありません。

近年、都市部では地上における構造物は飽和状態となり、大規模な構造物が必要となる鉄道や道路のインフラ設備や大型の複合施設などの都市開発では、地下部における構造物の構築が進められる場合が多くなっています。また、山間部においても、インフラ設備としてのトンネルや宅地造成などの大規模開発として切土工事などが行われています。このような工事においては、新たな地中構造物の構築による水のせき止め、掘削工事時の出水など地中にある水の動きやそれに伴う影響を考えながら、設計・施工を進めることが重要となります。地下水の挙動を変えることは、地盤の変状や崩壊につながることもあり、事故など大きな問題へと発展する恐れもあります。また、地球レベルでの環境

問題が強くうたわれるようになってきており、工場排水などによる汚染の影響が深刻化しており、かつては飲料用として生活に使用することができた地下水の水質の保持・復元も重要な課題となってきています。

このように地下水は私たちの生活に密着しており、この動きを正確に把握することが大切となります。これから新しくインフラ整備などを行うためには、まだ開発されていない山中か地下空間を利用することが増加していくことが考えられ、少なからず地下水への影響を評価することが重要となります。そのため、地表面からは見ることのできない地下水の動きを「探る」技術が求められています。ここでは、地中や地下を流れる水の動きを求める手法について述べることにします。

## 地下水と生活

地下水は降雨が地盤に浸透することによって生じ、地中を流れ、川や海へと出ていき、その過程で蒸発散を行い大気中の水蒸気となり再び降雨となり、水の循環が成り立っています(図1)。地下水は、昔から飲み水や工業用水など様々な用途に使われてきており、私たちの生活を支えています。今でも昔ながらの街並みが残るところでは、井戸をくみ上げるポンプが街角に見られ、地下水を生活水として用いているところもあります。最近では、健康における関心の高まりから、山あいできみ上げた地下水がミネラルウォーターとして飲まれています。

地下水の工業用水への適用については、高度成長期において過剰なくみ上げにより水の循環が損なわれ、地下水位の低下やこれに伴う地盤沈下が発生し、大きな社会問題となっています。都市部においては地下水のくみ上げ規制を行い、地下水位を回復させる対策を行ってきています。

地下構造物の構築による地下水の動きの変化は、流動阻害と呼ばれています。流動阻害により生じる影響もさまざまなものがあります。代表的な現象を表1に示します。こ

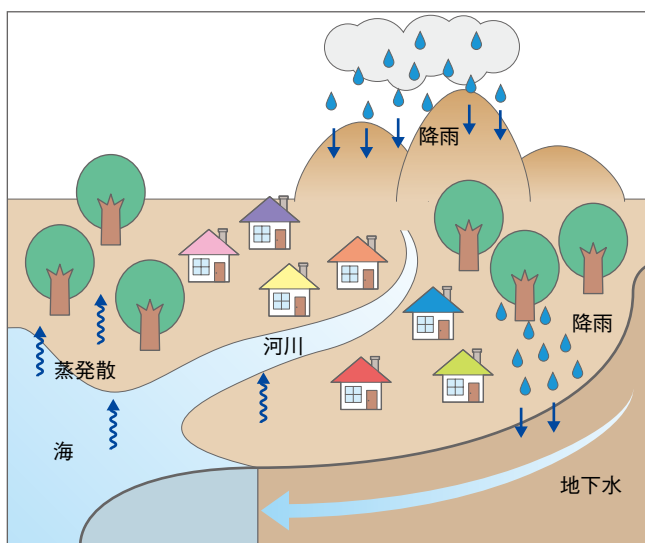


図1 水の循環の模式図

表1 流動障害による影響事例

影響対象		影響現象例
地下水	水量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水量の増加 (U)</li> <li>・水量の減少 (L)</li> <li>・井戸枯れ (L)</li> <li>・水田減水深増加 (L)</li> </ul>
	水質	<ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染物質の拡散 (U)</li> <li>・塩水化 (L)</li> <li>・酸化 (L)</li> </ul>
周辺構造物	地盤	<ul style="list-style-type: none"> <li>・湿潤化 (U)</li> <li>・圧密沈下 (L)</li> <li>・地表面の陥没 (L)</li> <li>・乾燥化 (L)</li> </ul>
	構造物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・浮き上がり (U)</li> <li>・漏水の増大 (U)</li> <li>・杭のネガティブフリクション (L)</li> </ul>
環境・生態系	環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・池などの氾濫 (U)</li> <li>・地表の気象変化 (U・L)</li> <li>・湧水の枯渇 (L)</li> <li>・河川・湖水の減水 (L)</li> </ul>
	生態系	<ul style="list-style-type: none"> <li>・根腐れ (U)</li> <li>・植物の枯死 (L)</li> <li>・水生動植物への影響 (L)</li> </ul>

\*U：上流側の現象，L：下流側の現象

のように地下水の変化は単に水位や水の流れが変わるといっただけではなく、いろいろな問題を起こすことがあります。

様々な工場排水などにより、汚染物質が分散し地下水の水質の悪化も懸念されています。地下水は最終的には河川などへと流れていくわけですから、直接、地下水を生活水として使用しない場合においても、自然環境の変化や食物連鎖による人間への影響が考えられ、単にその場における地下水の変化だけではとどまらないものとなります。このように、地下水は直接、触れたり、目にすることは少ないものの、私たちの生活や環境に対して非常に密接に関連しており、また大切なものでもあります。

### 地下水の調査

地下水は、3次元的に複雑な層構成をなしている土の間を流れていきます。したがって、地下水の動きを捉えるには土の性状、構成を正確に求める必要があります。しかし、水が地盤に浸透し浸出していくまでには非常に広い範囲の領域を動くことから、検討対象も非常に広いものとなります。広範囲な検討対象領域について、地下中の層構成や土の特性を詳細に調べる作業は容易ではありません。さらに、みなさんも良く知っているように土というものは非常に不均一なものであり、面的な情報を正確に捉えることが難しいものです。これらの点から、地下水の動きを見たり、調べたりすることは簡単ではないことがわかるかと思えます。

実際に現地で地下水の状態や動きを求める方法としては既設や新設の井戸を用いて水位や水質を調べる方法や、トレーサーと呼ばれる色素などを水の中に入れ、その流れを見る方法などがあります。しかし、井戸の情報は広い空間において点での情報であり、いくつかの情報を重ねあわせないと全体の挙動を捉えることはできません。トレーサーにおいても、始まりと終わりの状況は把握できるものの途中の経路を適切に求めることは難しいものです。実際に地下水の動きを見ようとする、時間やコスト、作業量のどれをとっても非常に大きなものになってしまいます。

### 土の中を流れる水の特性

土はそれぞれ特性の違う土の粒子、水、そして空隙の3相構造で成り立っています。したがって、日常的によく目にする「雨が降って、地盤の中に入って行く」という、極めて簡単そうに見える現象も単純なものではありません。

図2に土の中に水が浸透していく特性（水分特性関係）を示します。横軸は体積含水率といい、土の中に含まれて

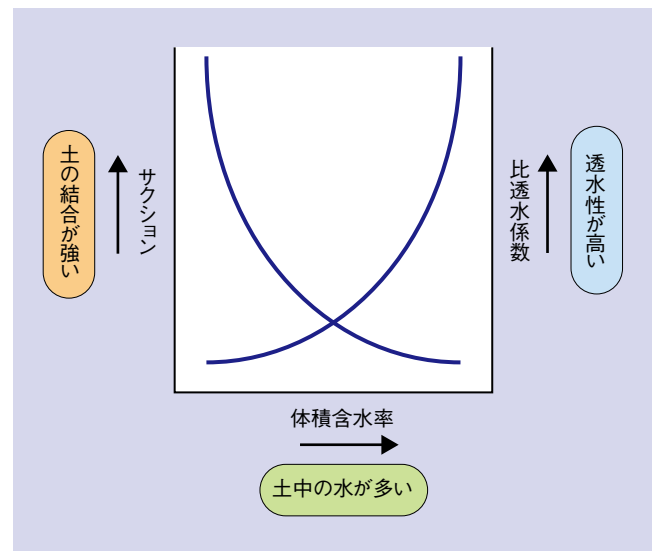


図2 水分特性曲線

いる水の割合を示します。左側の縦軸はサクシオン、右側は比透水性係数と呼ばれるものです。サクシオンは土粒子を結合させる化学的な力、比透水性係数は飽和時（土と水のみで空隙がない状態）における透水性係数に対するある体積含水率における透水性係数の比です。透水性係数とは水の流れや

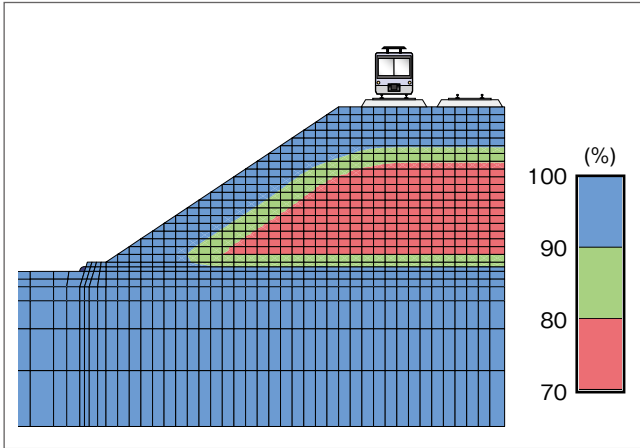


図3 解析結果例(飽和度のコンター)

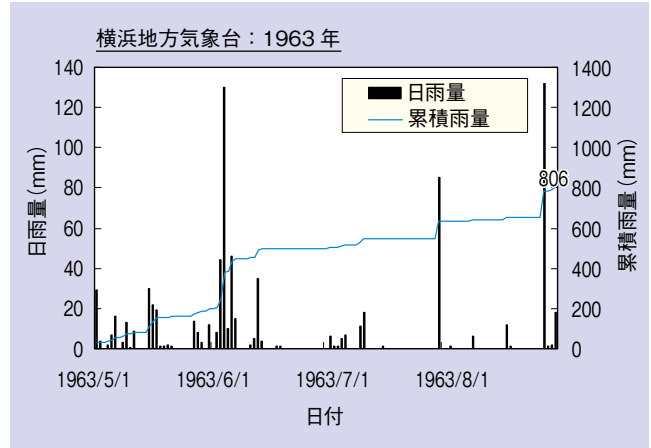


図4 解析に用いた降雨

すさを示す係数であり、値が大きいと水が流れやすく、小さくなるにつれ流れ難くなります。土中の水の流れはこの透水係数を使って、式(1)で示されます。

$$v=ki \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $v$ は流速、 $k$ は透水係数、 $i$ は動水勾配です。この関係はダルシー則といい、土の中を流れる水の基本的な関係を示したものです。

水分特性関係から土中の水の量が増えていくと(横軸の体積含水率が増加する)、サクションが小さくなり、比透

水係数は大きくなります。つまり、土中の水の流れは、土の中に含まれる水が増えれば増えるほど、流れやすくなります。非常に乾燥したカラカラの土ではなかなか水は浸透していきませんが、比較的、湿った土であれば早く土中に浸透していくということになります。したがって、雨が降れば降るほど、土の中に水は入りやすくなってきます。水分特性関係は土の種類(例えば、粘土や砂など)によっても大きく変わり、土中の水の動きを求めるのに非常に大切な特性です。その特性を求めるには、試験を行う必要があります。保水性試験と呼ばれる試験から得ることができます。

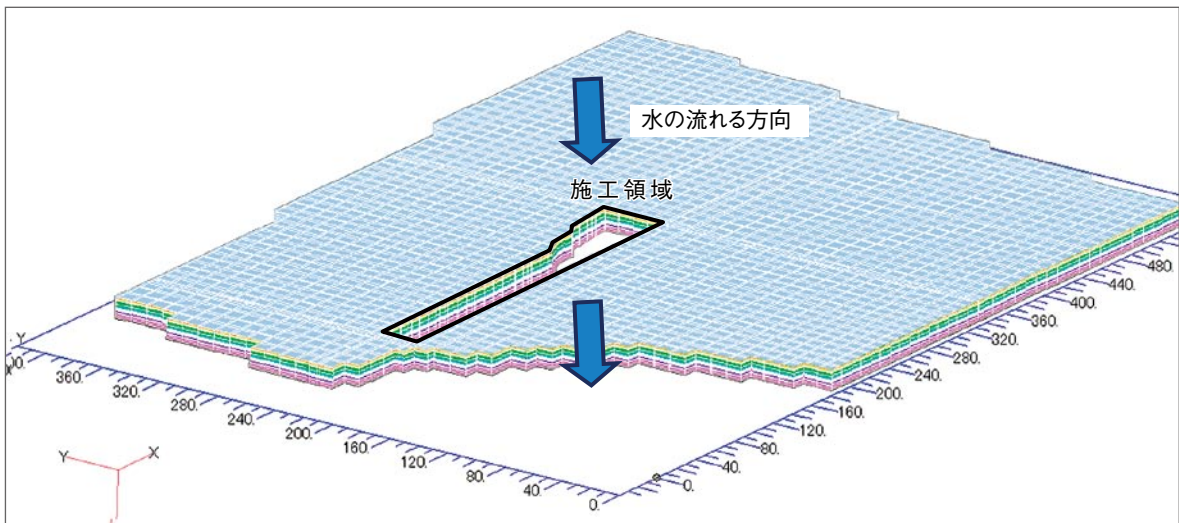


図5 解析モデル

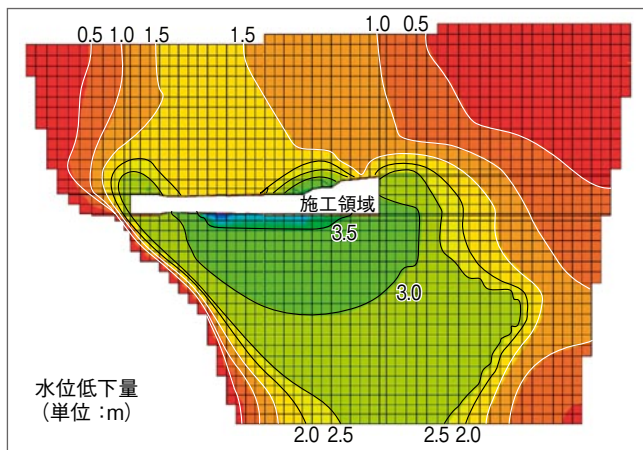


図6 解析結果例(水位低下量のコンター)

### 数値解析で地下水の動きを見る

様々な分野においてコンピュータの進展に伴う技術開発は目覚ましいものがあり、地下水や地盤環境の分野においても大きく影響しています。前述のように、地下水の動きを評価することは現地での計測を実施しても非常に難しく、工事などによる影響を事前に評価することは大きな課題となっています。

地下水の流れを評価する解析技術は、浸透流解析と呼ばれております。浸透流解析は土に中を流れる水の動きを求めるものです。土やその中にある物体をモデル化し、水分特性関係やダルシー則などの土の中を流れる水の使用により、これらの中を流れる水の状況が得られます。

浸透流解析を用いると、様々な土中の水の流れを求めることができます。ここでは、浸透流解析による土中の水の浸透の様子を求めた事例を示します。図3は降雨が土に浸透していく様子を解析したものです。盛土と呼ばれる土で作った構造物（ここでは、電車や車が盛土上部を走る構造物を想定）の上に図4に示す雨が降ったとしたときの、降雨終了直後における盛土の中の浸透状態です。結果は飽和度（飽和状態に対する程度）で浸透状態を示しており、100%が飽和の状態です。雨が直接入りこむ盛土の表面は非常に飽和度が高く（例えば青色の領域）、盛土の中央部に入っていくほど低くなっている（あまり水が浸透していない）ことが分かります。

次に、地盤の中の地下水の流れについて求めたものを示します。地盤の中（地下）に構造物を作ったときの地下水の変化の状況について解析した結果です。図5には解析に

使用したモデル、図6は結果の一例として地下水位がどのくらい変化したのかについて(地下水位低下量のコンター)図示しています。図3に示した盛土の場合は、同じ構造物が連続的に続く場合を考えていることから2次元モデルで解析しましたが、地下水の流れを評価する場合には地層の構成や周辺を含めた領域全体からの水の動きが状況を大きく左右することから、3次元解析を行うことが多くなります。ここに示した結果も、3次元解析によるもので、調査で求めた地層構成を3次元的に評価し解析モデルを作成しています(図5参照)。図6の地下水位低下量のコンターは、多くの水位が低下した箇所を緑や黄緑で示しています。構造物に対して下流側では、構造物があるために非常に大きく水位が低下していることが分かります。

浸透流解析は実際に、目で見ることのできない土の中の流れを詳細に求めることが可能となります。

### おわりに

私たちは地盤の上で生活しており、周辺には山や盛土など多くの土に囲まれて生活しています。地盤の中では降雨が浸透した地下水が流れており、川や海に注がれ、人の生活における大切な水環境を構築しています。したがって、地下水は自然の水循環系において重要な部分の役割を担っており、土に対し何らかのアクションを起こそうとする時には、地下水に与える影響を考える必要があります。

浸透流解析は土中の水の状態を求めるのに、非常に有効な手法です。様々なアクション（構造物の施工など）に対する影響を、適切に評価することが可能となります。近年では、コンピュータの普及により、3次元解析でかつ数kmにわたるような非常に広域な計算を行うことも可能となってきており、ますます、その用途が拡大しています。今後は、より手法の高精度化を進め、水環境に影響の少ない工法や対策工の検討を進めていく予定です。RRR