

# 砂質土地盤における透水係数の分布が 地下水流動に及ぼす影響

浦越 拓野\* 川越 健\*

## Influence of Hydraulic Conductivity Distribution of Sandy Ground on Groundwater Flow

Takuya URAKOSHI Takeshi KAWAGOE

Sandy ground has hydraulic conductivity distribution corresponding to facies distribution because hydraulic conductivity depends on facies. The hydraulic conductivity distribution governs groundwater flow, which may cause collapses of tunnel faces. Thus, groundwater simulation considering the hydraulic conductivity distribution is desirable. In this research, we simulated groundwater table on models considering the hydraulic conductivity distribution. As a result, we revealed conditions under which sandy ground can be regarded as homogeneous.

キーワード：地下水，透水係数，数値解析，砂質土，層相

### 1. はじめに

砂質土地盤中の地下構造物では、例えばトンネル掘削時の地下水の湧出による掘削面の不安定化や、供用後の構造物背面における空洞の発生など、地下水の浸透力に起因する問題が生じる場合がある。この浸透力の大きさは地盤中の地下水流動の結果である全水頭分布に支配される。そのため、地下構造物の建設や維持管理においては、地下水流動を予測し、必要な対策を講じることが重要となる。地盤中の地下水流動は、地盤の水理特性に支配される。地盤の水理特性のうち透水係数は、地下水の流れやすさを示す物性値であり、地下水流動を検討する上での重要な指標のひとつである。

砂質土地盤は、土質分類上は砂質土に分類される一連の砂層であっても、粒度組成や露頭表面で観察される模様などの特徴（以下、このような特徴を「層相」と呼ぶ）が異なる層から構成されている。透水係数は粒度組成や間隙比などの堆積物の物性に強く依存する<sup>1)</sup>ことから、地盤中での透水係数分布は層相の違いの影響を受けると考えられる。

筆者らはこれまでに更新世の砂層を対象として、砂層内の透水係数の相違の程度やそれが地下水流動に与える影響について検討してきた<sup>2, 3)</sup>。その中で、土質分類上は一律に砂質土に分類される土からなる砂層内において、層相の違いにより透水係数が場所ごとに異なることを現地調査および室内透水試験により示した。さらに、その透水係数の違いが、地下構造物周囲の地下水位に影

響を及ぼす場合があることを、数値計算による事例検討から示した。しかし、透水係数の分布が地下構造物周辺の地下水流動に及ぼす影響は一般化されていないため、地下水流動解析を行う上で層相の違いによる透水係数の分布をどの程度まで考慮すべきであるかという点については明らかになっていない。

そこで、本研究では、まず単純な水理モデルを設定し、数値実験により透水係数の分布が地下水流動に及ぼす影響について検討する。次に、この結果から、地下水流動解析を行う際に、層相の違いによる透水係数の分布を考慮する必要性について検討する。また、トンネル建設時に得られた透水係数のデータを用いて、実地盤における水理モデル構築時の留意点について検討する。

### 2. 地下水流動解析

層相の違いによる透水係数の分布が地下水流動に及ぼす影響を検討するために、鉛直2次元断面における定常状態での地下水流動解析を行う。

#### 2.1 透水係数と地下水流動の関係

地盤中の地下水流動は、ダルシーの法則に従うことが知られている。ダルシーの法則は、1次元 ( $x$ ) では、

$$q = -K \frac{dh}{dx} \quad (1)$$

と表される<sup>1)</sup>。これは、単位時間に単位断面積を通過する地下水の流量（以下、流束と呼ぶ） $q$ が、透水係数 $K$ と動水勾配 $-dh/dx$ に比例することを示す。ここで $h$ は全水頭である。式(1)を用いると、鉛直2次元 ( $x, y$ ) にお

\* 防災技術研究部（地質）

特集：防災技術

ける定常状態での地下水流動の支配方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K(x,y) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K(x,y) \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

と表される。この式は、ある領域内の全水頭分布が透水係数分布と境界条件によって決定されることを示す。なお、不飽和状態では、透水係数  $K$  に比透水係数  $K_r$  を掛けあわせ、かつ、全水頭  $h$  がマトリックスサクションを表すとするので、式 (2) を用いることができる。

2.2 解析領域および境界条件と解析手法

本研究では、解析領域および境界条件を単純化するために、解析領域を鉛直2次元矩形領域(水平方向1,000m、鉛直方向40m)とした。

境界条件として、解析領域の片方の側面を地下水の浸出を許す境界(以下、浸出境界)とし、他方の側面を全水固定境界として40mの全水頭を与えた(図1(a))。また、解析領域の上辺と下辺の境界を不透水境界とした。

解析メッシュは、浸出境界付近で水平方向2.5m、鉛直方向1mとし、全水頭固定境界側へ向けてメッシュを大きくしていき、全水頭固定境界付近では水平方向10m、鉛直方向2mとした。ただし、後述するランダムモデルにおいては、領域全体を水平方向2m、鉛直方向1mの長方形メッシュに区分した。

数値計算には、有限要素法による地下水流動解析コード UNSAF3D<sup>4)</sup> が組み込まれた 3D-Flow (地層科学研究所) を用いた。

2.3 透水係数の分布を考慮した水理モデル

2.3.1 モデルの設定

層相の異なる層が累重している地層での透水係数の分布に対応させた水理モデルとして、複数の層が水平に累重する「水平多層モデル」を設定した(図1(b))。ただし水平多層モデル内の各層は均質とした。これに対し、層相の違いを考慮せず全体を均質な1層とみなしたものを「均質モデル」として設定した。さらに、実際の地盤では、同じ層相を呈する層準の中でも透水係数が場所によって異なる<sup>3)</sup>ことをモデル化し、同じ層相を呈する層

準内において透水係数がランダムに分布していると仮定した「ランダムモデル」を設定した。

2.3.2 各モデルでの透水係数の設定

均質モデルの透水係数は、砂層の一般的な透水係数<sup>4)</sup>を参考として  $10^{-5} \text{m/s}$  とした。また不飽和領域での水理特性(比透水係数およびマトリックスサクションと飽和度の関係)は van Genuchten のモデル<sup>5)</sup> を用いて算出することとし、van Genuchten の  $\alpha$  を 5.22、 $n$  を 5.69 とした<sup>6)</sup>。なお、本研究では、これらの不飽和領域での透水特性は固定値とした。そのため、均質モデルにおいては透水係数を変化させても、式(2)から全水頭分布は変化しない。

水平多層モデルについては、2層モデル、3層モデル、5層モデルの3種類を作成し、それぞれのモデルは、A層およびB層の2種類の層からなることとした。透水係数は先に示した砂層における一般的な値の範囲<sup>4)</sup>を参考とし、A層を  $10^{-5} \text{m/s}$  で固定し、B層を  $10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-6}, 10^{-7} \text{m/s}$  に変化させた。よって水平多層モデルでのB層の透水係数の値は、A層の透水係数の0.01倍~100倍である。A層およびB層の不飽和領域での透水特性は、透水係数によらず均質モデルと同様とした。

ランダムモデルでは、各メッシュに上述のA層またはB層と同じ物性値を一様乱数に従って割り振った。

3. 解析結果

解析結果を、モデル下面からの地下水面の高さ(以下、地下水位と呼ぶ)に注目して整理し、図2に示す。以下では、均質モデルの地下水位と、その他のモデルの地下水位とを比較する。

3.1 領域全体の地下水位

ここでは領域全体での地下水位の分布に注目する。均質モデルの地下水位は、水平距離1,000mの位置では境界条件として固定した全水頭に一致する値(40m)となり、浸出境界の位置ではほぼ0mとなる。両境界の間の地下水面は上に凸の曲線を呈し、浸出境界側ほど勾配が急になっている。このことは、浸出境界側ほど動水勾配が大きくなり、流束が大きくなっていることを示している。

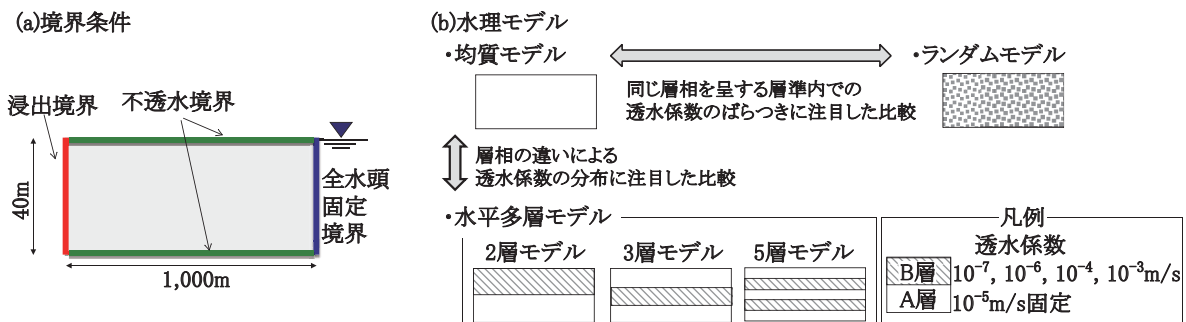


図1 解析に用いた水理モデル

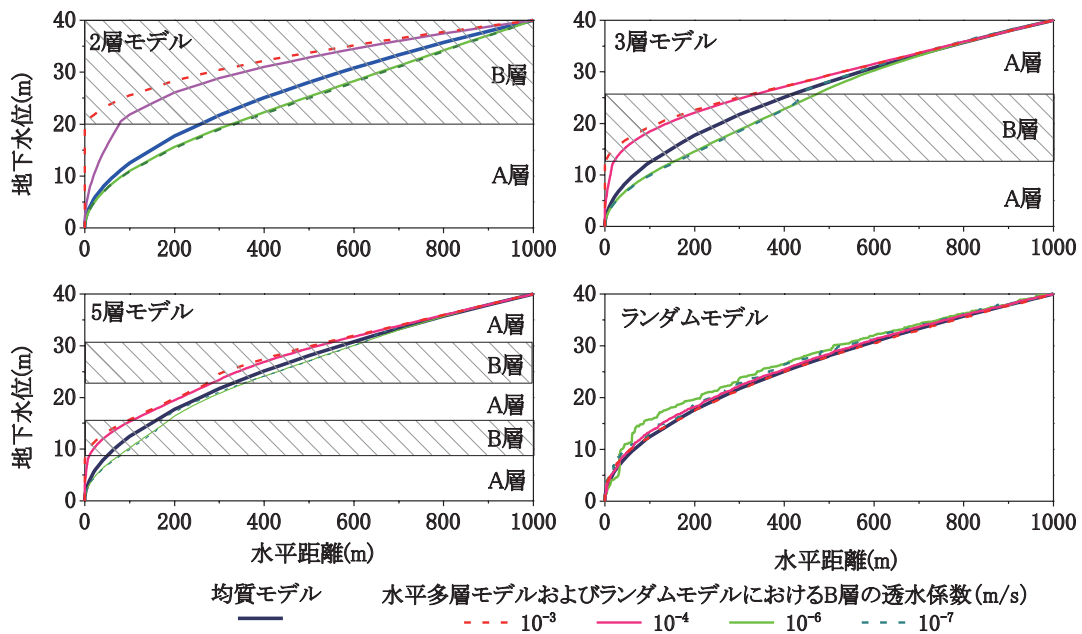


図2 計算された地下水位

注) 地下水位と計算領域の左端が交わる点が湧水点である。

これは、定常状態では、全水頭固定境界側からの流入量と、浸出境界側での流出量が等しいことから、地下水位が低くなるにつれ側方への流束が大きくなるためである。

これに対し、2層モデルでは下位のA層に比べて上位のB層の透水係数が大きい場合に、地下水位が均質モデルの結果に比べて高い位置となる。また、均質モデルと2層モデルとの地下水位の差は、B層の透水係数が大きいほど大きい。一方、下位のA層に比べて上位のB層の透水係数が小さい場合には、地下水位が均質モデルの結果に比べてやや低い位置にある。

3層モデルおよび5層モデルでの地下水位も、2層モデルでの結果と同様の傾向を示す。すなわち、最下位のA層に比べ、直上のB層の透水係数が大きい場合に、地下水位が均質モデルの結果に比べ高い位置にある。

ランダムモデルでの地下水位は、今回設定した透水係数の違いの範囲では、均質モデルの結果に近い。

### 3.2 浸出境界付近の地下水位および地下水の湧出点

ここでは、浸出境界付近の地下水位と地下水の湧出点に注目する。均質モデルでは地下水の湧出点はモデルのほぼ下端に位置している。

これに対し、2層モデルでは下位のA層に比べ上位のB層の透水係数が大きい場合に、湧出点が均質モデルの結果より高い位置にあり、特にB層の透水係数がA層の100倍の場合には湧出点が層境付近に位置する。一方、A層に比べB層の透水係数が小さい場合には、地下水位や湧出点の位置は、均質モデルの結果に近い。

3層および5層モデルでの湧出点も、2層モデルでの結果と同様の傾向を示す。すなわち、最下位のA層に比べ

その上位のB層の透水係数が大きい場合に、湧出点が均質モデルの結果より高い位置となる。B層の透水係数が最下位に分布するA層の100倍になると、湧出点は最下位のA層とその上位のB層の層境付近に位置する。なお、本検討における透水係数の設定範囲では、湧出点がこの層境より高い位置になることはなかった。

ランダムモデルの浸出境界付近の地下水位は、他のモデルの結果に比べて階段状を呈する。これはA層およびB層の透水係数を割り振ったメッシュの分布に対応している。また、ランダムモデルでの湧出点はメッシュごとの透水係数の違いによらず均質モデルの結果に近い。

### 3.3 全水頭分布および地下水の流束分布の比較

均質モデル、2層モデル、5層モデルの水平距離0~100mにおける全水頭分布と流束分布を図3に示す。2層モデルおよび5層モデルについては、均質モデルの地下水位との差が相対的に大きい場合、すなわちB層の透水係数が $10^{-3}m/s$ (A層の透水係数の100倍)である場合を示した。

まず2層モデルの全水頭は、地下水位が高い位置にあることに対応して全体的に均質モデルより大きい。このことは、均質モデルの場合に比べ地下構造物等へ作用する全水頭が大きいことを示す。また、2層モデルの全水頭の等高線間隔が、特に浸出境界付近で均質モデルのそれに比べて密になっており、動水勾配が大きくなっていることが分かる。一般に、地下水は掘削面や地下構造物に対し、動水勾配に比例する浸透力 $f$

$$f = -\rho g \frac{dh}{dx} \quad (3)$$

として作用する<sup>1)</sup>。ここで、 $\rho$ は地下水の密度、 $g$ は重力

特集：防災技術

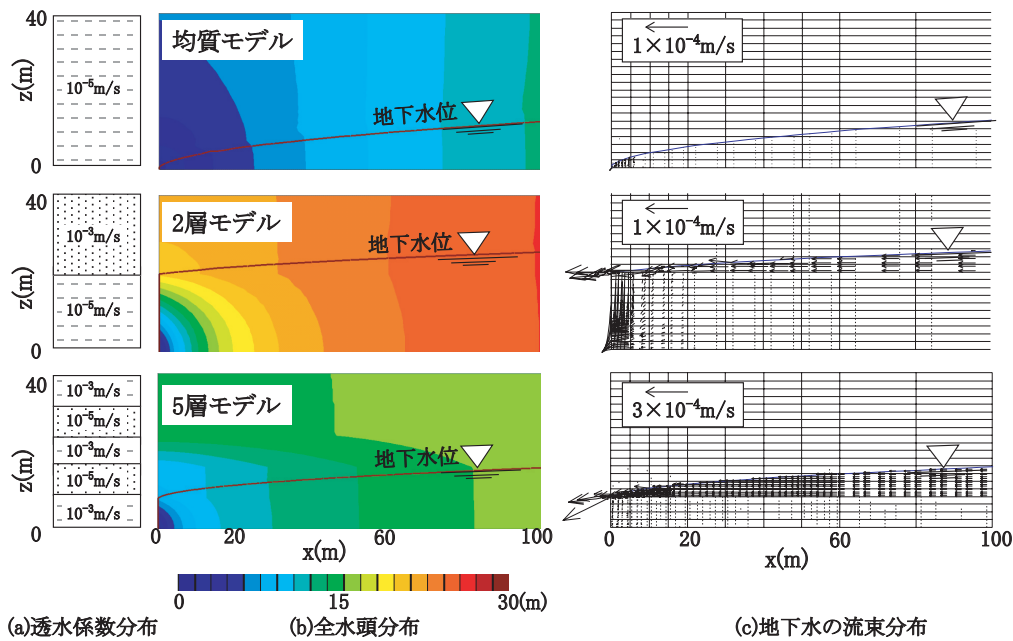


図3 全水頭分布および地下水の流束分布の比較

- 注1) 全水頭の基準はモデル領域の底面である。
- 注2) ▽で示す曲線は地下水位を示す。
- 注3) 流束の凡例が均質および2層モデルと5層モデルとで異なっていることに注意。

加速度である。よって、2層モデルの場合、均質モデルに比べて、地山へ作用する浸透力が大きいといえる。5層モデルでも、均質モデルに比べて全水頭や動水勾配が大きい。ただし、均質モデルとの全水頭や動水勾配の差は、5層モデルの方が2層モデルより小さい。

次に流束は、2層モデル、5層モデルともに均質モデルに比べて大きい。これは均質モデルに比べて透水係数の大きい層を有するためである。また、浸出境界付近を除けば、透水係数の大きいB層で流束が大きい。さらに、2層モデルや5層モデルの湧出点が層境付近に位置し、かつ層境付近において湧出量が大きいことが分かる。

#### 4. 考察

ここでは、均質モデルと他のモデルとの地下水位の差を整理し、この水位差を指標として、数値解析により地下水位を予測する際の均質モデルの適用性を検討する。次に、この検討結果に基づき、同一層相を呈する層の水理モデルや層相の異なる層が累重した地盤の水理モデルについて議論し、さらに実地盤で得られた透水係数のデータを用いて考察する。

##### 4.1 地下水位を予測する際の均質モデルの適用性

地下水流動解析を行うために水理モデルを構築する際、一般には均質モデルの方が他のモデルに比べて簡易に構築できる。均質モデルと他のモデルとで計算された地下水位の差を、他のモデルの地下水位を均質モデルにより予測した場合の誤差と捉えると、この誤差が地下水位を予測する

目的に照らして許容できる値であれば、他のモデルの地下水位を簡便な均質モデルで予測可能であると考えられる。

このような考えに基づき、地下水位を予測する際の均質モデルの適用性を検討するために、3章の計算結果からこの誤差を求め、表1に水理モデルおよびA層とB層の透水係数の比によって、均質モデルの適用性を整理した。表1では、地下構造物周辺に相当する浸出面近傍（水平距離0～10m）と比較的遠方（400～600m）に分け、地下水位の誤差の最大値を示した。また、誤差の大小の目安として、新幹線の複線トンネル断面を想定し、インバートからスプリングラインまでの高さに相当する約3mと、インバートから天端までの高さに相当する約8mを基準として、誤差を大（水位差8m以上）、中（水位差3m～8m）、小（水位差3m未満）に区分した。さらに、許容できる地下水位の誤差を3m未満の範囲とする条件での均質モデルの適用性を示した。なお実際には、地下水位予測の目的に応じて、許容できる地下水位の誤差を決定する必要がある。また、表1は本研究で対象とする砂質土の条件を考慮して設定した透水係数の範囲に適用するものとし、現段階では100倍以上異なる透水係数が分布する地盤（粘性土の層を挟在する場合など）については適用外とした。

##### 4.2 ランダムモデルと均質モデルの比較

同一の層相を呈する層で、層内の透水係数がランダムに分布する層の水理モデルについて検討する。これに対応する水理モデルはランダムモデルである（図1(b)）。表1から、本研究で設定した透水係数の範囲では、ラン

表1 砂質土地盤を対象として地下水位を予測する際の均質モデルの適用性（案）

水理モデル		A層とB層の 透水係数の比	均質モデルで地下水位を予測した 場合の地下水位の誤差の程度 <sup>注1)</sup>		地下水位を予測する際の 均質モデルの適用性 <sup>注2)</sup>		誤差の程度
			浸出境界からの距離		浸出境界からの距離		
			近傍(0~10m)	遠方(400~600m)	近傍	遠方	
水平多層モデル	2層モデル	10倍または 0.1倍	中 (3.5m)	中 (5.9m)	×	×	大 (8m以上) 中 (3m~8m) 小 (0m~3m)
	3層モデル		中 (5.2m)	小 (2.0m)	×	△	
	5層モデル		中 (4.9m)	小 (1.8m)	×	△	
ランダムモデル	-		小 (1.8m)	小 (0.6m)	△	△	
水平多層モデル	2層モデル	100倍または 0.01倍	大 (18.5m)	中 (7.1m)	×	×	適用性 △ 条件により 適用可能 × 適用不可能
	3層モデル		大 (11.0m)	小 (2.1m)	×	△	
	5層モデル		中 (6.7m)	小 (2.3m)	×	△	
ランダムモデル	-		小 (2.3m)	小 (1.8m)	△	△	

注1) 誤差の程度の各欄の( )内は地下水位の誤差の最大値である。これを、新幹線の複線トンネル断面でのインバートからスプリングラインまでの高さ(約3m)とインバートから天端までの高さ(約8m)を基準とし、大・中・小に区分した。

注2) 数値解析で地下水位予測を行う際に許容できる地下水位の誤差を3m未満とする条件での均質モデルの適用性を示した。実際には、地下水位を予測する目的に応じて許容できる誤差を決定し、均質モデルの適用性を検討する必要がある。

注3) この表は一般的な砂質土地盤を対象とし、地盤中の透水係数の違いが $10^{-3} \sim 10^{-7} \text{m/s}$ の範囲のうち100倍までである地盤に適用する。

ダムモデルでの結果は均質モデルと概ね一致している。したがって、同一の層相を呈する層準において、層内の透水係数にある程度のばらつきがあっても、砂質土の範囲であれば均質な1層とみなしてよいと考えられる。

#### 4.3 水平多層モデルと均質モデルの比較

層相の異なる層準が累重した地盤の水理モデル（水平多層モデル）（図1 (b)）について検討する。表1から、3層モデルや5層モデルにおいて、各層の透水係数の比が100倍以内で、検討対象とする領域が浸出境界から遠方である場合には、これらのモデルと均質モデルとの地下水位の差は3m未満である。地下水位を予測する目的に照らしてこの誤差を許容できる場合には、水平多層モデルを均質モデルで近似できる。一方、2層モデルでは、2層の透水係数の比が10倍以上であれば、均質モデルの適用は適切ではないと判断される。よって、層相の違いにより透水係数の異なる層が累重する場合のモデル化には、層の数や各層の透水係数の比、検討対象とする領域の浸出境界（トンネル等の構造物）からの距離などを条件とし、解析の目的に応じて、層相の違いによる透水係数の分布を考慮する必要があると考えられる。

なお、実務的な例として、層相の違いによる透水係数の分布を考慮すべき解析において、均質モデルで予測せざるを得ない場合には、地下水位が実際と異なって計算されることとなる（図2）。この場合には、均質モデルでの計算結果に比べ、実際の全水頭や動水勾配が大きくなる可能性や、湧水点の位置が高くなり、かつ湧水量が大きくなる可能性があることに注意を要する（図3）。

#### 4.4 実地盤での透水係数のデータを用いた水理モデルの検討

実地盤での層相の観察結果と透水係数のデータについて

表1を適用し、実地盤における水理モデル構築時の留意点について整理する。ここでは、砂質土地盤を地層区分する場合に、層相の違いを考慮せず地盤を一括して扱った場合（以下、一括ケースと呼ぶ）と、層相の違いにより地盤を細分した場合（以下、細分ケースと呼ぶ）の透水係数のばらつきの幅を検討対象とし、一般的なトンネル周辺地山の地下水位予測を目的として、以下の検証を行った。

検討には青森県でのトンネル工事で掘削対象とされた野辺地層<sup>7)</sup>中のNos1層<sup>3)</sup>と、石川県でのトンネル工事で掘削対象とされた大桑層上部<sup>8, 9, 10)</sup>での層相の観察結果と透水係数のデータを用いる。Nos1層は層相の違いからNos1-1~Nos1-3に細分され、大桑層上部はOm-1~Om-6の6層に細分される。図4にこれらの地層の一括ケースと細分ケースごとの透水係数の最小値、最大値、中央値を示す。なお、細分ケースについては、透水係数の値が十分に得られている層についてのみ示した。

ここでは透水係数の最小値と最大値の比を、表1のA層とB層の透水係数の比と対応させて議論する。一括ケースでの透水係数の最小値と最大値の比はNos1層も大桑層上部も100倍以上であり（図4）、これらの透水係

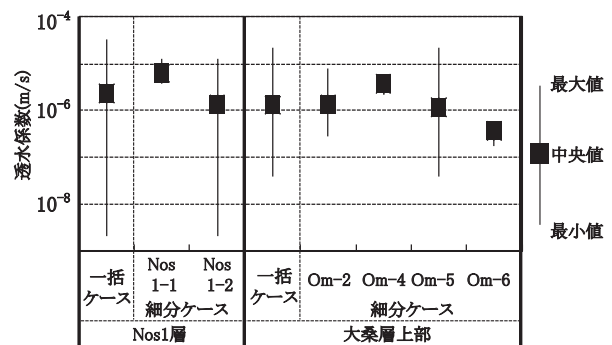


図4 一括ケースと細分ケースでの透水係数のばらつき

特集：防災技術

数のばらつきの幅は表1の適用条件外である。ただし浸出境界の近傍について、以下のことを指摘できる。表1からA層とB層の透水係数の比が100倍の場合は水平多層モデルと均質モデルとの浸出境界の近傍の地下水位の差は6.7m以上であり、透水係数の比が100倍以上となれば地下水位の差はより大きくなると予想される。よって、浸出境界に対応する構造物の近傍の地下水位を予測する際に、砂質土地盤中の層相の違いを考慮せずに地盤を一括して扱うことは適切でなく、地層を細分化して水理モデルを構築する必要があると判断される。

次に、細分ケースでの各層内の透水係数の最小値と最大値の比は、Nos1-1, Om-4, Om-6では10倍以内、Om-2では100倍以内、Nos1-2とOm-5は100倍以上であった。細分ケースでの各層内の透水係数はランダムに分布していると仮定すると、表1から浸出境界の近傍でも遠方でも、各層の水理モデルとして均質モデルを採用できると判断される。ただしNos1-2やOm-5については透水係数のばらつきの幅が表1の適用条件より大きいため、現状までの検討からは均質モデルの適用性を判断できない。この問題については、今後、Nos1-2で取得されている $10^{-8}$ m/s未満といった低透水性の層を含む水理モデルでの検討を行う必要がある。

5. まとめ

砂質土地盤における層相の違いによる透水係数の分布が地下水流動に与える影響を明らかにすることを目的として、2次元定常条件での地下水流動解析を行い、地下水位に着目して整理した。この結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 計算領域全体の地下水位について、水平多層モデルの結果は、透水係数の値の幅が大きいほど均質モデルの結果からかい離する。一方、ランダムモデルの結果は均質モデルの結果に近い。
- 2) 浸出境界での湧出点について、均質モデルでは地下水の湧出点は浸出境界のほぼ下端に位置している。これに比べ、水平多層モデルの浸出点は高い位置となる場合がある。一方、ランダムモデルの結果は均質モデルの結果に近い。
- 3) 均質モデルと他の水理モデルで計算された地下水位の差を整理し、この水位差を指標として、地下水流動解析により砂質土地盤の地下水位を予測する際の均質モデルの適用条件をまとめた。
- 4) 実地盤での透水係数のデータに上記の結果を適用し、地下水位の予測を行う際に、層相の異なる層準が累重する地層を一括して均質な層とモデル化することは一般に要求される解析精度上は適切ではなく、地層を細分化した水理モデルを構築する必要があることを示した。また、同一層相を呈する層準内で透水

係数がランダムに分布する層については、均質な層とモデル化できることを示した。

砂質土地盤でのトンネル建設時の透水係数を整理すると $10^{-8}$ m/s未満といった一般的な砂質土より小さな透水係数を呈する土質が含まれていた。本研究では、砂質土を対象として透水係数を設定したが、今後、実際の地盤を評価するために、粘性土のような低透水性の層を含む地質についてもモデル化の適用条件を検討する必要がある。

また、地下水流動解析を行う上で、層相の違いを考慮した地層区分が必要な場合があることが示された。今後、3次元非定常条件での地下水流動解析を行い、地下掘削工事において実測された地下水位データと比較することで、地下水流動を再現するために必要な地層区分の考え方を含めた適切な地盤のモデル化の方法について検討を進める計画である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、石川県土木部ならびに独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構にはデータを提供して頂きました。末尾ながら記して謝意を表します。

文献

- 1) Bear, J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Dover Publications, 764p, 1972.
- 2) 浦越拓野・川越健: 砂質堆積物を対象とした層相と水理特性, 応用地質学会平成20年度研究発表講演会論文集, pp.23-24, 2008
- 3) 川越健・浦越拓野・太田岳洋・井浦智実: 砂質土地盤における地層区分を考慮した物性値の評価, 鉄道総研報告, Vol.23, No.3, pp.47-52, 2009
- 4) Freeze, R.A. and Cherry, J.A., *Groundwater*, Printice Hall, p29, 1979.
- 5) 登坂博行: 地圏水循環の水理, 東京大学出版会, pp.184-186, 2006
- 6) 西垣誠・竹下祐二: 室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究, 岡山大学工学部土木工学科, pp.28-95, 1993
- 7) (社)日本トンネル技術協会: 東北新幹線トンネルの設計施工の研究報告書 [鉄道建設・運輸施設整備支援機構鉄道建設本部盛岡支社委託], 2004
- 8) 石川県金沢土木事務所: 山側幹線技術検討委員会報告書, 1999
- 9) Kitamura, A. and Kawagoe, T., "Eustatic sea-level change at the mid-Pleistocene climate transition: New evidence from the shallow-marine sediment record of Japan", *Quaternary Sciences Reviews*, Vol.25, pp.323-335, 2006.
- 10) 高橋裕之・川越健・田中志人・中北昭浩: 金沢市の大桑層を低土被りで貫くめがねトンネルにおける先行アーチ支保工法の採用, 土と基礎, Vol.53, No.5, pp.14-16, 2005