

# 砂質土地盤における地層区分を考慮した物性値の評価

川越 健\* 浦越 拓野\*  
太田 岳洋\* 井浦 智実\*\*

## Assessment of Physical Property Values based on Lithostratigraphic Classification of Sandy Ground

Takeshi KAWAGOE Takuya URAKOSHI  
Takehiro OHTA Tomomi IURA

Physical property values of sandy ground vary generally depending on difference of facies in it. However, relation between the variation of physical property values and facies has not been made clear yet. Therefore, we studied relation between them aiming to evaluate physical property of the sandy ground more adequately. As a result, we clarified that the degree of variation of physical property values strongly depends on slight difference of facies and it can be shrunken by evaluating geologic division adequately. In addition, it became clear, as a result of the seepage flow analysis, that hydraulic head influenced the distribution of the permeability coefficient around underground structures.

キーワード：砂質土地山，物性値，ばらつき，変動係数，地層区分，透水係数

### 1. はじめに

日本の平野部とその周辺には第四紀に形成された堆積物からなる未固結の地盤が分布しており，そこには鉄道を含めて多くの社会資本が整備されている。このような地盤中に構造物を設計する際には，土質試験から得られる物性値が重要なデータとなる。この物性値は一般的にばらつきを有しており，その原因の一つに地質の不均質性が挙げられる。しかし，物性値のばらつきに対する地質の不均質性の関与の程度など，その関係は十分に解明されていない。この点を明らかにすることは，工学的な地盤の評価を適切に行ううえで必要と考えられる。

以上のことから，本論では砂質土地盤を対象として，まず物性値のばらつきと地質の不均質性の関係を把握したうえで，未固結地盤の評価を行う際に重要な物性値の一つである透水係数に着目して物性値のばらつきが構造物に与える影響を検討した。そして，これらの結果からトンネルなどの線状構造物において事前の地質調査を計画する場合の留意点を整理した結果を述べる。

### 2. 地層区分と物性値のばらつき

地盤の物性値は地質を構成する材料の物理的性質の影響を受けるため，地層ごとに異なる値を示す。また，同

じ地層内でも地盤の異方性などにより様々な物性値をとる。本論ではこのような物性値の変動を「物性値のばらつき」として扱う。なお，データ取得時の技術的問題（試料の乱れ，測定に関する誤差等）は規格，基準に則り実施されていることを前提に，ここでの議論では無視できるものとした。

#### 2.1 検討方法と検討データ

##### 2.1.1 検討方法

一般にデータのばらつきは，平均，分散などの統計量によって表される。ここでは，異なる物性値間の相対的なばらつきを比較するために，(1)式で定義される変動係数を用いる<sup>1), 2)</sup>。

$$\text{変動係数} : CV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (1)$$

ここで， $s$  は標本標準偏差， $\bar{x}$  は平均値である。

変動係数は平均値に対する標準偏差の比であり，単位に依存しない。(1)式からわかるように，変動係数はその値が大きいほど，データのばらつきの程度が相対的に大きいことを示している。

##### 2.1.2 検討に用いたデータ

検討に用いたのは石川県金沢市におけるトンネル工事で掘削対象とされた大桑層上部の物性値<sup>3)</sup>と東北新幹線八戸・七戸間に分布する野辺地層の物性値である。

なお，本論では以下の物性値について検討した。

湿潤密度，乾燥密度，土粒子の密度，間隙比，

\* 防災技術研究部（地質）

\*\* （独）鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 設計技術部

特集：防災技術

相対密度，細粒分含有率，均等係数，透水係数

(1) 大桑層上部の概要

大桑層上部は第四紀に浅海域で堆積した地層を主体とし，粒度組成や地層中に見られる構造（以下，これらの地層中に見られる特徴を「層相」と呼ぶ）により6層に分けられる<sup>4)</sup>。図1に地質縦断図<sup>4)</sup>を示す。Om-1, 2, 4, 6は細粒および中粒砂層，Om-3は泥層と砂層の互層，Om-5は礫層を挟在する砂泥互層からなる。トンネルの延長は約600mであり，この間の15本のボーリングで取得された物性値について検討した。

(2) 野辺地層の概要

野辺地層も上述した大桑層と同様な時期に主に浅海域で堆積した地層<sup>5)</sup>で，下位より細粒～中粒砂からなるNos2層，粘性土を主体とするNoc層，細粒砂を主体とするNos1層に区分される<sup>6)</sup>（図2）。このうち，Nos1層は層相の異なる3層に分けられ，ここでは上位よりNos1-1, Nos1-2, Nos1-3と呼ぶ。Nos1-1は主に塊状を呈する細～中粒砂層からなる。Nos1-2は斜交層理が認められ，粒径が揃った細粒砂からなる。また，Nos1-3は粒径が異なる砂の薄層が水平に堆積している。なお，ここでは東北新幹線八戸・七戸間のうち六戸トンネルから牛鍵トンネル間（約11km）における51本のボーリングおよび切羽などで採取した試料から得られた物性値について検討した。

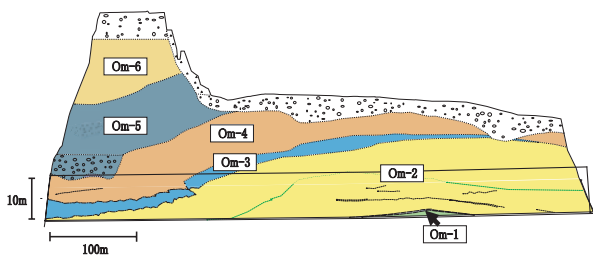


図1 涌波トンネルの地質縦断図（大桑層上部）  
Kitamura and Kawagoe<sup>4)</sup>を編集

2.2 物性値のばらつきの地質学的な検討

地質は岩種や形成された時代などの違いにより区分される。一般に，その区分の単元は小さいものから，部層，累層，層群と呼ばれる。部層は連続して堆積した地層が複数集まったもので，層相上ほぼ均一性や他と区別しうる明確な特徴が認められる。また，累層は複数の部層から，層群は複数の累層から構成される。2.1.2で示した大桑層，野辺地層における本論での地層区分を図3に示す。本節では図3に示した地層区分を踏まえて，地層が累重する鉛直方向と地層が連続する水平方向における物性値のばらつきについて検討する。鉛直方向では累重する部層ごと，および地層区分の単元の違いによる物性値のばらつきを検討し，水平方向として部層単元におけるトンネル延長方向での物性値のばらつきについて検討する。

2.2.1 部層別の物性値のばらつき（大桑層での例）

詳細に地層区分の研究がなされている大桑層上部を対象として，部層別の物性値のばらつきについて検討する。

図4に大桑層上部の各部層（Om-1～6）における物性値の変動係数を示す。湿潤密度，乾燥密度，土粒子の密度の変動係数は各部層で同様に小さい値を示すが，細粒分含有率，均等係数，透水係数の変動係数は大きい。また，部層により変動係数の値が異なる。これらのことから部層ごとに物性値のばらつきの程度が異なることがわかる。地層は堆積環境などによって層相がおおむね決まることが明らかにされている<sup>7)</sup>。大桑層上部で見られる各部層の物性値のばらつきの程度の相違は，地層が堆積した時の諸条件の違いを反映していると考えられる。

2.2.2 地層区分と物性値のばらつき（野辺地層での例）

ここでは八戸・七戸間のうち三本木原トンネルの一部区間（図2(b)）を対象に，地層区分の単元の違いと物性値のばらつきについて検討する。図2(b)に示した区間における物性値の平均値と変動係数を野辺地層全体（Nos1

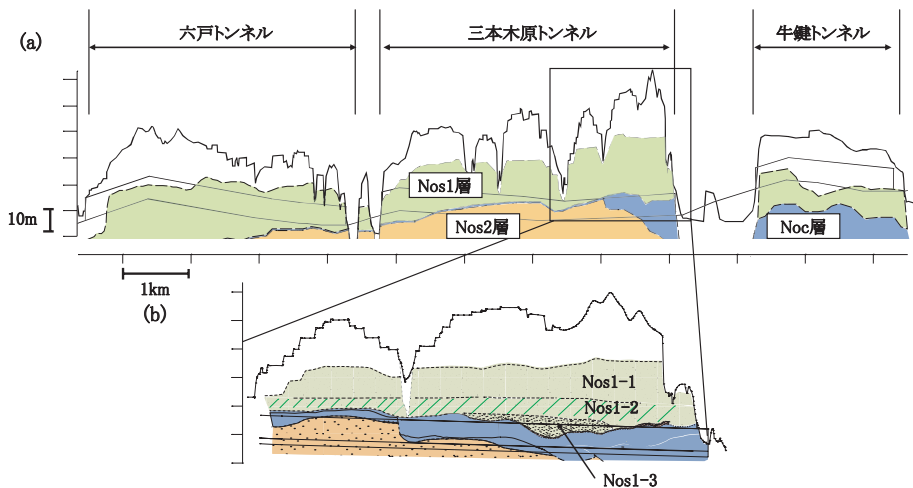


図2 六戸トンネル～牛鍵トンネルの地質縦断図（野辺地層）  
(社)日本トンネル技術協会<sup>6)</sup>を編集

層, Noc層, Nos2層), Nos1層, Nos1層中の各部層 (Nos1-1~3) ごとに整理した結果を図5に示す。図から層群の単位である野辺地層全体に比べて累層の単位であるNos1層の物性値の変動係数は小さいかほぼ等しく、特に細粒分含有率, 透水係数では顕著に小さい。また, Nos1層と各部層の変動係数を比較すると, Nos1層に比べて各部層における物性値の変動係数はほとんどの場合で小さい。

以上のことから, 物性値を層群の単位で評価すると, 岩種や成因の異なる累層や部層を一括することから, 変動係数が大きくなる。一方, 地層区分の単位を細分化して物性値を評価すると, 類似した岩種, 同様の堆積環境で形成された部層が対象となるため物性値の変動係数, つまりばらつきは小さくなると思われる。

### 2.2.3 水平方向の物性値のばらつき(野辺地層での例)

ここではトンネル直上付近や切羽に分布するために多くのデータが取得された野辺地層中のNos1-2について検討する。検討方法として, まず図2(a)に示した六戸トンネル~牛鍵トンネルの区間を水平距離で約11km (1区間), 5.0km (2区間), 2.5km (4区間), 1.0km (6区間), 0.5km (9区間) に区間分けを行い (図6), 設定した区間ごとに各物性値の変動係数 (1式) を算出した。次に, ここで算出した各区間の変動係数を用いて, それぞれの区間の長さにおける変動係数の平均値 (以下, 平均変動係数) を求めた。また, トンネル延長方向での物性値のばらつきに対して, 鉛直方向の物性値のばらつき (1地点での深度方向のばらつきに相当) を比較するために, 各ボーリング孔でNos1-2に区分した箇所の物性値の変動係数を算出し, それらの平均を鉛直方向の平均変動係数として求めた。

図6に統計量を算出した区間の長さと平均変動係数の関係を示す。統計量を算出した区間の長さが短くなると, 各物性値の平均変動係数は小さくなる傾向を示し, 特に細粒分含有率, 均等係数で顕著である。また, ボーリング孔の変動係数は統計量を算出した区間の長さが0.5kmの場合に比べて相対密度, 細粒分含有率, 均等係数で半分程度の値を示している。

これらのことは, 部層内では物性値が鉛直方向と同様に水平方向にもばらつきを有することを示している。また, 統計量を算出する区間の長さが長いほど物性値のばらつきの程度が大きい。これは, 水平方向に連続する部層内を広範囲で見た場合, 平面的な堆積環境が変化していることを示すと考えられる。さらに, 一地点での深度方向の物性値のばらつきを示すボーリング孔の平均変動係数に比べて, 統計量を算出する区間の長さが0.5kmの場合でも大きな値を示している。このことは鉛直方向の物性値のばらつきに対して, 水平方向の物性値のばらつきは無視できないことを示唆している。

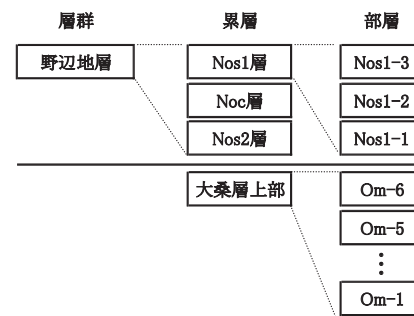


図3 地層の単元

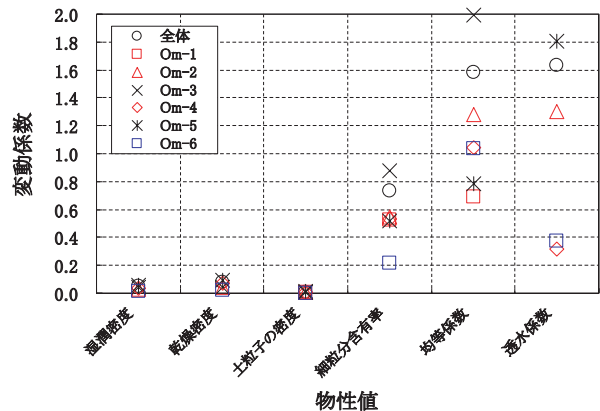


図4 大桑層における物性値の変動係数

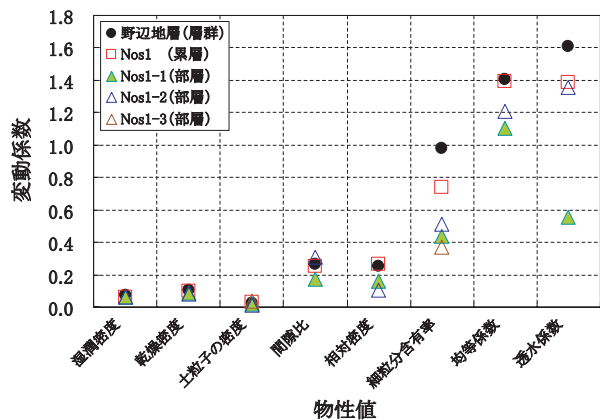


図5 野辺地層における物性値の変動係数

### 2.3 地層区分と物性値のばらつきの関係

大桑層における部層ごとの物性値のばらつきの検討から, 部層ごとに物性値の平均値やばらつきの程度が異なることがわかった。また野辺地層における検討から, 累層の単位に比べて部層での物性値のばらつきが小さいことがわかった。これらのことは, より細かな単元に地層を区分することで地層の物性値のばらつきの程度の原因を説明でき, またばらつきの程度を小さくできることを示している。そのため, 層相に基づき地層を区分して平均値や物性値のばらつきを検討することは設計定数の決定や地山分類を行ううえで有効と考えられる。

また, 粒度組成に関する物性値や透水性に関する物性値の変動係数が乾燥密度や土粒子の密度の変動係数に比

特集：防災技術

べて大きい結果を得た。このことは、地層ごとの物性値を検討する場合に、これらの物性値については特に留意する必要があることを示唆している。

さらに本論で設定した最も小さい地層区分の単位である部層内でも鉛直方向および水平方向ともに物性値はばらつきを有しており、水平方向では統計量を算出する区間の長さが短いほど物性値のばらつきは小さくなる。このことは、事前調査段階におけるボーリング調査の間隔は要求される精度に応じてできるかぎり狭くする必要であることを示すと考えられる。

3. 物性値のばらつきが構造物に与える影響の検討

未固結の堆積物からなる地盤では地下水が関与した地下構造物に対する障害が様々な形態で生じており、その一つとして建設中のトンネルなどでの浸透水による地山の崩壊が挙げられる。この浸透水に対する地山の安定性評価方法の一つとして、限界動水勾配を用いる方法がある<sup>8)</sup>。地盤中の動水勾配は全水頭に依存するが、全水頭は透水係数のばらつきの影響を受ける<sup>9)</sup>。前章の検討結果から、物性値のばらつきを評価するためには細かな単位で地層区分を行うことが有効であること、また透水係数は他の物性値に比べて相対的にばらつきが大きいことがわかった。そこで、実地盤で求めた部層ごとの透水係数の違いや部層内での透水係数の異方性を考慮して、飽和・不飽和浸透流解析により透水係数のばらつきが構造物周辺地盤の全水頭分布に与える影響について検討する。

3.1 解析条件

3.1.1 解析方法

解析には有限要素法プログラム UNSAF3D<sup>10)</sup> をベースとした 3D-FLOW (地層科学研究所製) を用いた。ここでは既存の地下構造物周辺の全水頭分布に着目して、定常解析を行った。

3.1.2 解析条件

検討対象として、首都圏周辺の洪積台地を形成する下総層群の木下層とその下位の藪層を取り上げる。これらの地層は2章で述べた大桑層上部や野辺地層と同様に砂質土を主体としており、木下層ではトンネル施工中に浸透水の湧出による地山の崩壊などの障害事例<sup>11), 12)</sup> が報告されている。調査を行った露頭において確認できる範囲では、木下層は4部層 (部層1~4) に分けられる。この露頭での観察結果を参考にして地盤モデルを作成した。さらに、この木下層中の深度30mに新幹線複線断面程度 (半径4.75m) のトンネルを設けた場合についてモデル化を行った (図7)。計算領域は鉛直2次元断面 (鉛直42m, 水平800m) とした。ここで、トンネルが地下

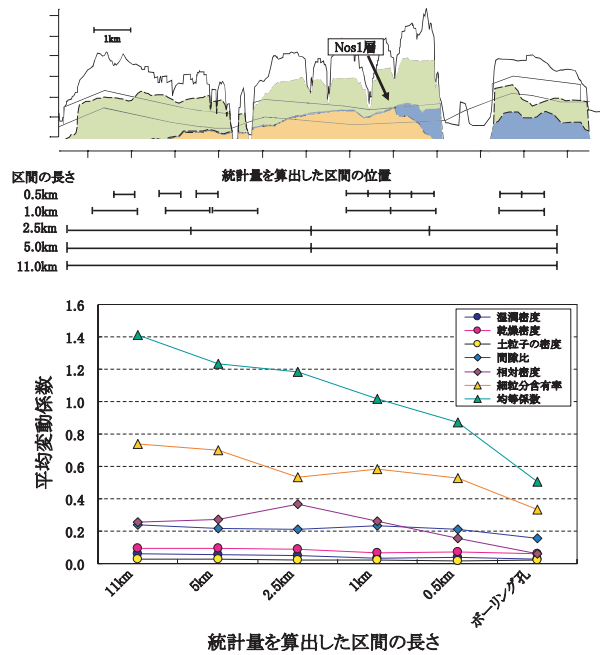


図6 統計量を算出した区間の長さの変動係数の関係

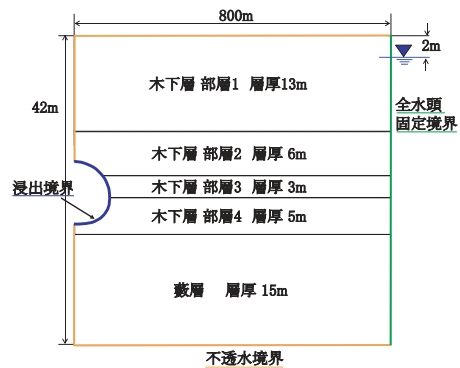


図7 地盤モデル

水面の低下に影響を与える半径は Sichardt の式<sup>13)</sup> ((2)式) から約700m程度であるため、図7に示すように今回設定した境界は無縁遠と見なせる。

$$\text{水位低下の影響半径 (m)}: R = 3000S\sqrt{k} \quad (2)$$

ここで、 $S$ は水位低下量 (m),  $k$ は透水係数 (m/s) を表す。この境界で地下水面を解析領域の底面から40mの高さに固定した。またトンネル外周では浸出を許し、トンネル覆工による遮水は考慮していない。メッシュの1辺はトンネル中心から10mまでは0.5m以下、100mまでは2.0m以下、それ以遠は10mとした。

3.1.3 入力データ

各メッシュに、透水係数、間隙比、比貯留係数、不飽和透水係数およびサクションを入力した。ここで透水係数と間隙比は露頭で採取した乱れの少ない試料から得た値<sup>14)</sup>を用いた。比貯留係数は木下層と同等の地層 (成田層) の値である  $10^{-4} \text{ m}^{-1}$  を与え<sup>15)</sup>、不飽和透水係数と

サクシオンは van Genuchten の関数モデル<sup>16)</sup> から算出した。

### 3.1.4 解析ケース

部層の存在を考慮せず木下層全体を1層とみなした場合(ケース1)と、部層の存在を考慮した場合(ケース2)について解析を行った。表1に両ケースの透水係数と間隙比を示す。ケース1では、木下層および敷層をそれぞれ透水係数について等方かつ均質な地盤とした。ケース2では、実測値をもとに部層ごとに水平、鉛直方向で異なる透水係数を与えた。

### 3.2 解析結果

両ケースでのトンネル近傍の計算結果を図8に示す。なお、全水頭の基準面はトンネル底面とした。図から、ケース1、ケース2ともにトンネルから地下水が湧出することにより地下水面は低下している。しかし、ケース1ではトンネル底面まで地下水位が低下しているのに対して、ケース2ではトンネル直近まで高い地下水位が存在している。そのためケース2ではケース1に比べ、トンネル内での地下水の湧出位置が高くなる。また、ケース2ではケース1に比べてトンネル周辺の全水頭が全体的に高くなっている。

この解析結果は、地下構造物周辺の全水頭の分布を把握するためには透水係数の分布に関してある程度の調査精度が必要であることを示している。透水係数の分布のモデル化を行うには、まず層相に基づいた部層単元での地層区分を行い、部層ごとの透水係数の相違や部層内での透水係数のばらつきを十分に検討したうえで行うことが重要であるといえる。

## 4. 物性値のばらつきを考慮した地質調査法

前章の数値解析結果から、透水係数について部層による相違や部層内でのばらつきを考慮することで構造物周辺の全水頭分布がより詳細に把握できることがわかった。このことは、建設時や供用後の地下構造物周辺の地盤の状況を把握するためには地質工学的に意味をもつ程度に細かく地層を区分し、その中で物性値のばらつきを評価することが必要であることを示している。そこで、ここでは地盤の物性値のばらつきを把握するために必要な地質調査の方法について整理する。

### 4.1 地層区分の単元を考慮した調査

物性値のばらつきは、層相を基に区分した部層ごとに異なり、また地層区分を細分化することで小さくなることわかった。これらのことから、層相などの違いを考慮した地層区分を行ったうえで、物性値のばらつきを評価して工学的なモデルを作成する必要があると考えられ

表1 解析ケースと入力値

累層	部層	ケース1		ケース2		
		透水係数 ( $\times 10^{-5}$ m/s)	間隙比	透水係数 ( $\times 10^{-5}$ m/s)		間隙比
				水平方向	鉛直方向	
木下層	1	3.5	0.55	6.1	5.1	0.56
	2			4.9	4.4	0.59
	3			3.6	3.4	0.55
	4			0.39	0.39	0.86
敷層	-	0.94	0.83	0.79	1.1	0.83

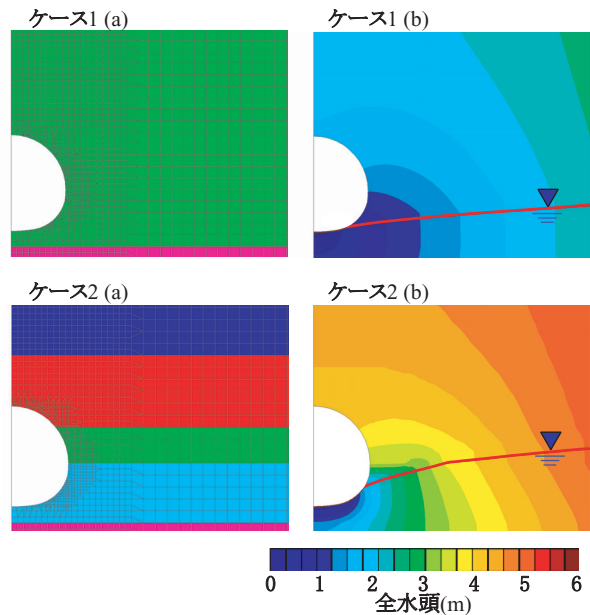


図8 解析結果

(a) 地盤モデル (b) 解析結果

る。一方、累重する複数の部層が種々の物性値において同程度の平均値、変動係数を有する場合は、これらは同様の物性の特徴を有すると捉えることができる。このような場合は、それらの部層を一括して工学的に区分できると考える。

### 4.2 水平方向の物性値のばらつきを考慮した調査

水平方向における物性値の変動係数の大きさを検討する目的で行ったトンネル延長方向における物性値の変動係数を比較した結果(図6)、部層内では統計量を算出する区間の長さが短いほど物性値のばらつきが小さくなる。このことからトンネルなどの線状構造物においてボーリング調査の間隔を決定するには、水平方向での物性値のばらつきを考慮する必要があると考える。一般に事前調査では、まず弾性波探査などの物理探査とともに、ある間隔でボーリング調査を実施して地質や物性値に関する概略の情報を把握した後に、追加のボーリング調査を行い詳細な検討がなされる。その場合のボーリング実施間隔の一つの目安として、今回の野辺地層における検討から、鉛直方向の物性値のばらつきと同程度にトンネル延長方向での物性値のばらつきを収束させるに

特集：防災技術

は、0.5km以下の間隔での事前のボーリング調査が最低限必要と考えられる。また、地下に埋没谷などの特殊な条件が存在する場合、地質の不均質性がより顕著になり物性値のばらつきも大きくなる。このような場合、調査におけるボーリング間隔をより狭める必要がある。しかし今回の検討では、設計定数の決定や地山分類を行うために必要な物性の代表値を決定するうえで、工学的に許容できる物性値のばらつきの程度を明らかにするには至っていない。そのため、地層の不均質性を考慮したトンネル延長方向における調査精度については今後の課題である。

5. まとめ

砂質土地盤の物性値のばらつきと地層区分との関係を把握し、それに基づいて浸透流解析を行い地盤の透水性のばらつきが構造物に与える影響を検討した。さらに、これらの結果を踏まえ、物性値のばらつきを考慮した事前地質調査を計画するうえでの留意点を整理した。

得られた結果を以下に示す。

(1) 物性値のばらつきの地質学的検討

- ①地盤を層相に基づいて細分化することで物性値のばらつきは小さくなる傾向がある。
- ②層相に基づき区分した部層ごとに物性値のばらつきは異なる。
- ③同一の部層内においても、物性値は鉛直方向、水平方向にばらつきを有する。

(2) 透水係数のばらつきが地下構造物に与える影響

モデル化を行ううえでは、部層ごとの透水係数の相違や部層内での透水係数のばらつきを十分に検討することが必要である。

(3) 物性値のばらつきを考慮した地質調査法

- ①岩種のみならず、地層が形成された場所の環境に基づく地層区分を行う必要がある。
- ②同様の平均値やばらつきを示す地層が累重する場合は、工学的にこれらを一括して区分できる。
- ③トンネルなどの線状構造物で、水平方向における調査の間隔を決定する際には、水平方向の物性値のばらつきを考慮する必要がある。

上記の結果から、工学的に地山を分類するためには、層相に基づく地層区分を行い、それぞれの物性値に基づく地盤の評価やモデル化を行う必要があることがわかった。今後の課題として、地層区分に基づく物性値を設計定数の決定や地山分類などに適用する場合の問題点を明らかにし、物性値のばらつきと実務的な許容限度を工学的に検討することが必要である。さらに、これらの結果を踏まえた具体的な地質調査手法についても提案をしていく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、大桑層上部の物性値について石川県土木部から貴重なデータを提供していただきました。末尾ながら記して謝意を表します。

文献

- 1) 伊藤洋, 北原義浩: 地盤物性のパラツキの評価法(その1) - 地盤物性のパラツキの実態とその表示法 -, 電力中央研究所報告(研究報告:384025), (財)電力中央研究所, p.69, 1985
- 2) Alfredo H-S.Ang., and Wilson H.Tang [伊藤學, 亀田弘行, 能島暢呂, 阿部雅人訳]: 改訂土木・建築のための確率・統計の基礎, 丸善, p.605, 2007
- 3) 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
- 4) 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, 25, pp.323-335, 2006.
- 5) 鎌田耕太郎, 齋藤奈津子: 東北日本弧東北部の中部更新統に関する研究の現状と課題, 弘前大学大学院地域社会研究科年報, 第1号, pp.81-93, 2004
- 6) (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
- 7) 例えば, 保柳康一, 公文富士夫, 松田博貴: フィールドジオロジー 3 堆積物と堆積岩, 共立出版, p171, 2004
- 8) 木谷日出男, 太田岳洋: 砂質土トンネル切羽の自立性評価試験法に関する研究, 応用地質, Vol.40, No.5, pp.270-280, 1999
- 9) 例えば, Freeze, R.A. and Cherry, J.A.: Groundwater, Prentice Hall, p.604,1979.
- 10) 西垣誠, 白石知成, 猪瀬二郎, 河村志朗: 地下鉄建設による多層地盤での複数地下水変動の3次元浸透解析による予測, 地下水学会誌, Vol.32, No.4, pp.231-240, 1990
- 11) 高山博文, 吉田義雄, 前田正一: 未固結層でのNATM施工のための地下水処理, トンネルと地下, Vol.18, pp.185-193, 1987
- 12) 吉村恒, 増田裕, 内藤清治, 阿曾満寿男: 砂地盤に挑む大断面NATM, トンネルと地下, Vol.11, pp.627-635, 1980
- 13) Sichert,W., and W.Kyrieleis : Grundwasserabsenkungen bei Fundierungsarbeiten, Berlin,1930.
- 14) 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年度研究発表会講演論文集, pp.23-24, 2008
- 15) 改訂地下水ハンドブック編集委員会: 改訂地下水ハンドブック, 建設産業調査会, p1503, 1998
- 16) 登坂博行: 地圏水循環の数理, 東京大学出版会, p.342, 2006