

地下水流動予測モデル構築における地盤物性値 推定手法について

METHOD FOR EVALUATING GEOPHYSICAL PROPERTIES OF ROCK MASS WITH NUMERICAL MODELING OF GROUNDWATER FLOW

玉井信也* 入江彰** 小畑大作***

Shinya TAMAI, Akira IRIE and Daisaku OBATA

This report is the method of evaluating geophysical properties of rock mass with numerical modeling of groundwater flow. Recently they research the analytical method transferring the elastic wave velocity and the electrical resistivity of the ground mass to the geophysical properties. On the other hand we develop the numerical modeling of the groundwater flow based on the geophysical exploration data so that we can foresee an effect of the underground construction in the groundwater. So we studied the presumption method of the geophysical properties (especially hydraulic conductivity) using this conversion analytical method and the application of this method for the model.

As second conclusion of this study, we found out the possibility of lowering the cost of the investigation into the ground using this conversion analytical method.

Key Words: resistivity, elastic wave velocity, volumetric water content, hydraulic conductivity

1. はじめに

一般的にトンネル等の地下工事に起因する水の問題は、その設計・施工に大きな影響を及ぼし、工事の安全と経済性の面で非常に重要となるとともに、周辺の地下水位低下は水源枯渇を引き起こし、住民の生活に大きな影響を与えることとなる。このため地下水分布やその流動を把握することはこれらの対策を検討するものとして非常に有益となる。そこで、当社では、最近進歩している探査技術を用いた地下水調査や水文気象調査などの現地調査により、地下水分布やその流動状況を把握し、適切に地点特性が表現できる地下水流動予測モデルの構築を行っている。

一方、近年、弾性波探査および高密度電気

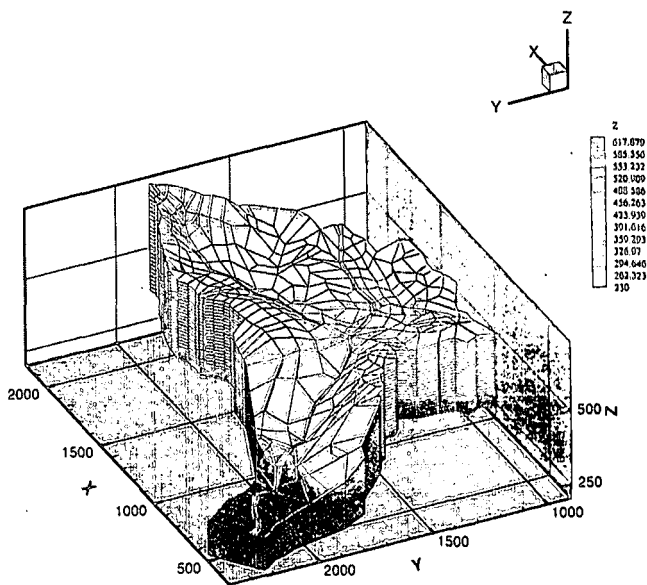


図-1 モデル概要

*正会員 中国電力(株) 土木部水力計画担当副長

**正会員 中国電力(株) 奥津第二発電所建設所

***正会員 中国電力(株) 土木部水力計画担当

探査の物理探査結果を複合的に解析する（複合解析）ことにより、新たな観点から地質性状を検討する試みとして、地盤の定量的な物理量を推定する評価手法が研究されている。さらに、弾性波探査および高密度電気探査については本研究の現地調査のなかで既に実施していた。そこで、当該解析モデル構築の一環として、弾性波探査結果と高密度電気探査結果による複合解析を採用し、これに基づく地盤の物性値推定手法および解析モデルへの適用性について検討を行った。

2. 地下水流動予測モデルの概要

本研究では、当社水力発電所開発地点の導水路計画ルートを試験地として、各種の現地調査により試験地の地下水分布やその流動形態などを把握するとともに、この結果を踏まえて地下水流動予測が可能となるモデルの構築を行っている。

予測モデルについては、現在多くの種類が提案されているが、本研究では、特に、山岳トンネルという境界条件等が複雑な問題を対象とすることおよび近年の計算機の進歩を考慮して3次元有限要素法を採用することとした。また水みちを多孔質体として扱ったものと亀裂モデルを扱ったものがあるが、既に適用実績のある多孔質体モデルで解析を実施することとした。

現在までに、試験地において地下水分布やその流動を把握するために以下の調査を実施している（図-2）。なお、弾性波探査および高密度電気探査については、試験地の地盤特性を3次元的に把握しやすいように、直交する2測線で実施している。

- ・ボーリング調査
- ・透水試験
- ・弾性波探査
- ・高密度電気探査
- ・フローメーター検層
- ・ボーリング孔を利用した地下水位の常時観測および溪流流量常時観測

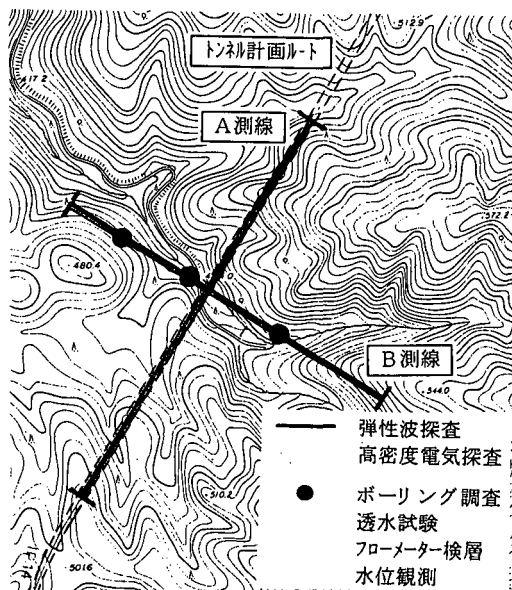


図-2 調査状況

ところで、この基礎モデルで使用するパラメーターの一つである透水係数は、一般的に行われるように解析領域の全地盤で一様である（ 10^{-7}m/sec （ 10^{-5}cm/sec ）という仮定のもとで解析を実施しているが、実際の地質構造においては、異なる透水性を有する地盤が数種類存在することは言うまでもなく、これらを解析モデルに反映することにより、試験地の地点特性の一つをモデルに反映することが可能となり、モデルの精度向上が図れると考えられる。

そこで、地下水利構造（特に透水係数分布）を把握・推定し、それをモデルに反映することで、モデルの精度向上を図る一手法として、複合解析を実施し、解析モデルへの適用性について検証を行うこととした。

3. 試験地付近の地質

試験地上流部には、非～弱変成の古生層、およびこれを貫く岩脈類が基盤岩として分布する。この基盤岩の一部を被覆して、新生代第四紀の崖錐性堆積物が分布する。

当地点の古生層はホルンフェルス化の進んだ（雲母類が生成されている程度）砂岩および粘板岩からなり、B測線より北側では粘板岩、南側では砂岩の分布域となっている。いずれの地層も均質なのではなく、泥岩優勢砂岩互層あるいは泥岩優勢層、またはその逆と表現しても良いものである。これらの地層にみられる堆積構造は

多様である。整層しているもの、微褶曲を繰り返すもの、モザイク状に異種岩片が混在し破碎岩のようにみられるもの、定向配列した扁平な偽礫を混在するスランプ構造状のものなどがあり、本層が付加体の堆積物であることを示唆している。

試験地付近にみられる貫入岩類は、ひん岩のみである。ボーリング地点の周辺では比較的頻繁にひん岩の岩脈を介在するが、その分布は極めて小規模である。

崖錐性堆積岩は礫混じり土を主体とし、谷底や斜面裾部に分布する締まりの緩い地層である。

また、現在実施している水位観測状況（地表付近の地下水位と深層の間隙水圧を計測）から、試験地の地表の地下水位は非常に高く、地表付近までに達していることがわかっている。また深層の地下水の間隙水圧については、地表の地下水水位より高い状況となっている。

4. 複合解析概要および結果

複合解析とは、弾性波探査および高密度電気探査の結果である弾性波速度分布および比抵抗分布を用いて間隙率分布および飽和度分布を数値解析により推定するものである。地盤の弾性波速度分布と比抵抗分布は互いに独立な物理量であるが、ここではそれぞれが間隙率および飽和度の関数として相対的に関係付けられるものと仮定し、この関係式を変換式として解析を行うものである。

今回実施した複合解析では、地盤の弾性波（P波）速度と間隙率・飽和度を関係付ける Wylie 式、比抵抗値と間隙率・飽和度を関係付ける Archie 式を用いて、「間隙率」と「飽和度」、そしてこれらの積である「体積含水率」の推定を行った。実際の解析には、（財）電力中央研究所の変換解析コードを使用した。なお、このプログラムの特徴は、「間隙率」と「飽和度」の厳密な解を求めるものではなく、簡易な繰り返し計算を行い多くの試行的な解析結果を得ることができるものである。調査結果の検討においては、これらの解析結果をもとに、複雑な地質性状への比較検討を行うことを目指しているものである。

解析結果（体積含水率）を見てみると、「体積含水率(相対値)」が試験地付近の地質境界方向および湿原形成の要因と考えられる不透水層（体積含水率が小さい箇所）など現在までの調査で推測されている地下水に係る地質構造をよく再現していることが確認できた。（図－3）

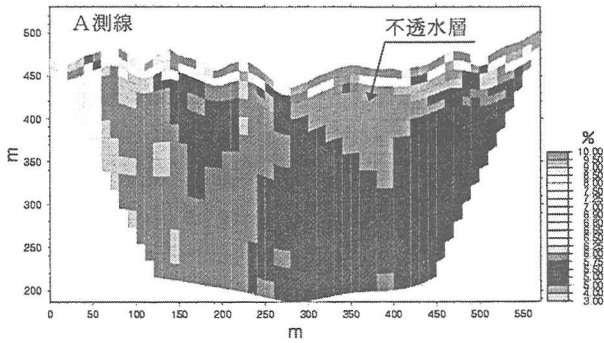


図-3 複合解析結果(体積含水率)

5. 「体積含水率」からの透水係数の推定

試験地の地下水利構造を推定し、解析モデルへ反映することで解析モデルの精度向上を図ることを目的として、今回実施した複合解析による「体積含水率」とボーリング孔において既に実施している透水試験による透水係数に着目し、「体積含水率」と透水係数の関係について検討を行った。

透水試験を行った箇所とその位置に該当する「体積含水率」をプロットしたものが図－4である。これによると、多少ばらつきは見られるものの、透水係

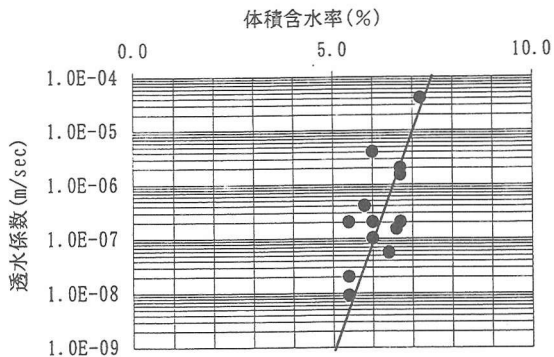


図-4 体積含水率と透水係数の関係

数と「体積含水率」の間には相関関係があると考えられる。

現在構築している解析モデルにおいては、その目的を考えた場合、モデルに反映させる透水係数は、メッシュごとに細かく設定する必要はなく、モデル全体で数種類の透水係数にゾーニングする程度でよいと考えられる。このことから複合解析結果をモデルに反映することは十分可能であると考えられる。

上記検討結果から、図-4に基づき、解析領域において透水係数別にゾーニングを行った。ゾーニングの種類は、「体積含水率」分布を参考に、透水係数 10^{-6}m/sec (10^{-4}cm/sec) 以上、 10^{-7}m/sec (10^{-5}cm/sec)、 10^{-8}m/sec (10^{-6}cm/sec)、 10^{-9}m/sec (10^{-7}cm/sec) 以下の4種類とした。ゾーニング結果は図-5のとおりである。なお、モデルは3次元であるため、直交する2測線でゾーニングを行い、その他の箇所についてはこの2測線から補完することとした。なお、透水係数別にゾーニングを実施した地質を複合地質、ゾーニングを実施せず透水係数は1種類の地質を均等地質と呼ぶこととする。

A 測線

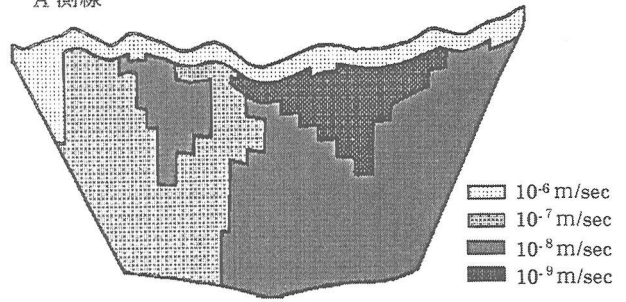


図-5 ゾーニング結果

6. 解析結果

均等地質および複合地質（ゾーニングに基づく）による解析結果を図-6～8に示す。初期状態においては、現地調査どおり地下水位が非常に高く地盤内は地下水で満たされており、表層地下水と深層地下水に明確な区別はない状態となっている。トンネル掘削後においては、複合地質の場合は湿地帯の下の不透水層（透水係数： 10^{-9}m/sec (10^{-7}cm/sec ））の存在により地下水位低下量が均等地質と比較して小さいことがわかる。つまり、透水係数の小さい箇所でも均等地質の場合と比較して表層の地下水位の低下量は小さくなる。一方、深層の地下水については両ケースとも今回のゾーニング結果ではトンネル掘削の影響でトンネル付近

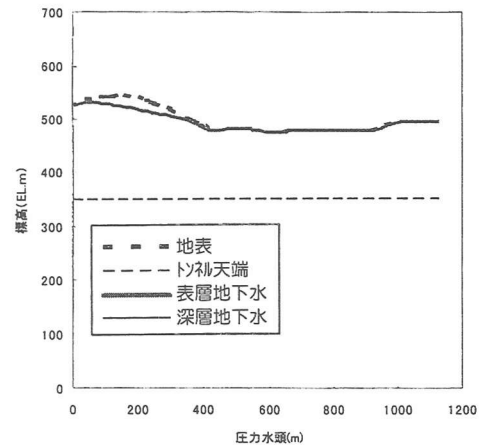


図-6 初期状態

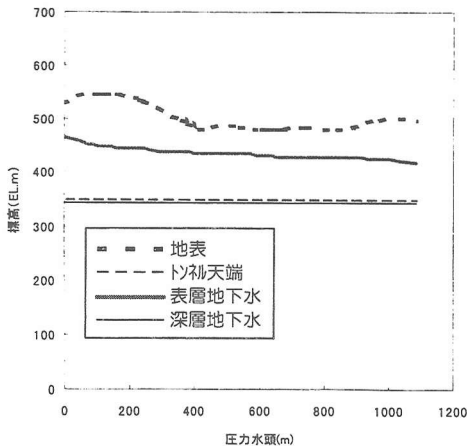


図-7 均等地質

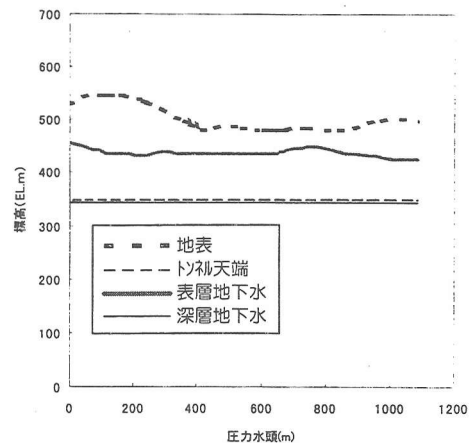


図-8 複合地質

(EL.350m)まで地下水位が低下することとなる。

今回の結果は、現在構築段階のモデルで解析を行ったものであり、トンネル掘削中および掘削後の実際の地下水の流動状況については、今後、水位観測等の現地調査により把握する予定である。また、この把握結果と解析結果を比較しながら、このゾーニングという手法の更なる検証を進め、さらにはモデルも精度向上も図って行きたいと考えている。

このゾーニングという考え方は、このモデルで解析結果により、地下水問題が発生することが判明した場合、その対策を検討するのにも使用できることが考えられる。例えばグラウトを実施する場合、グラウトを実施する箇所を透水係数を非常に小さくしたゾーニングを追加し、解析を行うことで、グラウトを考慮した解析を行うことができる。またゾーニングの種類をグラウトの計画検討ケースごとに変えることで効率的なグラウトを実施することが可能となる。

7. 合理的な調査方法

複合解析を利用することで、モデルの精度向上に使用する以外にも、これを基にした合理的な調査方法が可能となり、コストダウンが図れることが判明した。

ボーリング調査を例にあげると、現状では、ボーリング調査を実施する場合、地表踏査結果等を基にその位置の選定を行っていたが、複合解析結果からある程度、対象地盤の水理地質構造の推定を行うことができることから、これを参考にすることで調査の目的にあった最適なボーリング位置の選定が可能となる。またその本数や深度についても同様に、複合解析結果からボーリングの本数を絞ったり、その深度を限定するなど、合理的な調査を実施することが可能であり、コストダウンを図ることができる。

8. おわりに

現在、試験地においては、トンネルの掘削が始まっており、現在、試験地付近にトンネルがせまっている状況である。トンネル掘削の進捗に伴う地下水流動状況の変化を水位観測・高密度電気探査等の各種調査により追跡・把握し、解析モデルの妥当性の評価および精度向上を図っていききたいと考えている。

今回のこの検討は砂岩・泥岩という堆積岩系の地質を対象に実施しており、この手法の有用性が確認できたが、今後は、この手法の汎用性の検討を行っていききたいと考えている。

また、今回の解析は定常状態でやっているが、新たに間隙率についてもゾーニングを行うことにより、地下水の流動についても把握できる非定常解析を実施したいと考えている。

最後に、本研究にあたり適切な指導・ご助言を頂きました岡山大学環境理工学部環境デザイン科教授西垣誠先生および電力中央研究所地質部中川上席研究員、猪原上席研究員、宮川主任研究員に感謝の意を表します。

参考文献：

- 1)宮川他(1996) 水ミチ推定を目的としたフローメーター検層の適用性評価 電力中央研究所研究報告 U96047
- 2)宮川公雄(1997) 超音波フローメーターの開発とその適用性 電力土木 No.271
- 3)猪原芳樹(2000) 弾性波速度と比抵抗値による間隙率・飽和度への変換解析手法の開発 電力中央研究所研究報告 U99037