

延長の長い地下構造物建設に伴うダムアップ現象のFEM解析

山 岸 克 彰 上 野 孝 之
西 田 憲 司

Groundwater Analysis of Damming Effect of Underground Construction

Katsuaki Yamagishi Takayuki Ueno
Kenji Nishida

Abstract

In a certain subway construction, there was concern that changes in groundwater level downstream from the construction would influence wells, because the subway was to cross the path of groundwater flow. This paper discusses groundwater analysis in an area of 20 km². First, we carried out hydrogeological modeling of groundwater level at the pre-construction, and groundwater analysis in consideration of underground construction and pumping. The result was compared with the observed results, and the hydrogeological model was modified. We simulated the groundwater level at post-construction using the modified model. It was shown that the water level goes down in stations and open-cut areas, and does not change in shield areas.

概 要

地下水の流れに直交する方向に地下鉄が建設されることから、完成後は周辺の地下水流動環境が変化し、路線の下流域では地下水低下による井戸への影響が懸念された。そこで、FEM解析により、地下鉄路線を含むおよそ20km²の範囲について、工事前後の地下水位分布変化の予測を行った。最初に、地盤調査結果、ディープウェル揚水による地下水位低下分布から、解析領域、地盤水理モデルおよび境界条件を設定し、工事前の自然地下水位分布のシミュレーション解析を行った。つぎに、地下構造物条件、工事中の条件を考慮した解析と観測値とを比較し、解析モデルの修正を行うとともに地盤水理モデルの妥当性を検討した。最終的に、このモデルを用いて、完成後の地下鉄構造物条件を考慮した水位分布の予測解析を行った。その結果、止水壁で遮断された駅舎部および開削区間は地下水位変化が大きく(最大4m)、シールド区間では水位変化があまり生じないことが判明した。

1. はじめに

地下水の流れに直交して延長の長い地下構造物が構築されるため、完成後には地下水流動阻害、いわゆるダムアップ現象が発生する可能性があり、下流域では井戸への影響が懸念された。現場周辺において工事前から継続的に観測されている地下水位データをもとに、FEM平面二次元定常解析によって、工事前の自然地下水位および

工事中の水位分布をシミュレートできる地盤水理モデルを構築した。このモデルで完成後の地下水位分布を予測し、構造物の地下水流動阻害の程度を検討した。本報文では、これらの解析手法の手順、および解析結果と観測結果の比較について述べる。予測解析のフローをFig. 1に、地下構造物の代表断面をFig. 2に示す。

2. 初期地盤水理モデルの設定

2.1 解析領域

水位変化の及ぶ範囲すなわち解析領域の設定が解析精度に大きく影響する。実現象においては水位の変動が零となる境界は自然に決まるが、解析では水位の変化しない境界を解析領域として設定する必要がある。ここでは以下の手順で解析領域の設定を行った。

1) 工事前と工事中の地下水位分布から水位差等高線分布図を作成し、もともと水位差が大きい地点(以後中

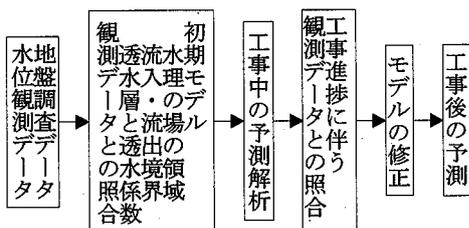


Fig. 1 解析フロー
Flow of Analysis

心点と呼ぶ)より下流, 上流, 西, 東南方向に直線を引く。

2) 各方向ごとに, 中心点からの距離と水位差を読みとる。

3) 各方向ごとに, 値を片対数のグラフにプロットする。(Fig. 3参照)

4) 各プロットを対数近似直線で表し, 水位差が0mになるところの距離R(m)を読みとり, 各方向の影響範囲とする。

これより, 設定した解析領域(初期モデル)をFig. 4に示す。東西に約3.5km, 南北に5.5kmをとり, 南北の流入・流出境界は水位等高線(全水頭)分布形状にあわせた。東西のモデル境界は水位等高線に直交するように設定し, 境界の法線方向の水の出入りはないものとした。

2.2 地盤定数

地盤調査の結果(揚水試験, 透水試験, 粒度試験, 等)を整理し, 地盤定数を決定した。今回実施した解析は, 平面二次元定常浸透流解析であるため, 深さ方向の層厚および透水係数の変化を平均化し, 単一地盤としてモデル化する必要があり, 以下の手順で透水係数を決定した。

1) 解析領域のボーリング調査データから層構成, 帯水層の各層厚と透水係数を調べる。透水係数は揚水試験および現場透水試験の結果を用いる。揚水試験, 現場透水試験が行われていない帯水層については, 粒度試験の結果よりCreager法を用いて求める。

2) 各帯水層の透水量係数(層厚×透水係数)を求める。

3) 各調査地点ごとに深度方向の透水量係数の総和を

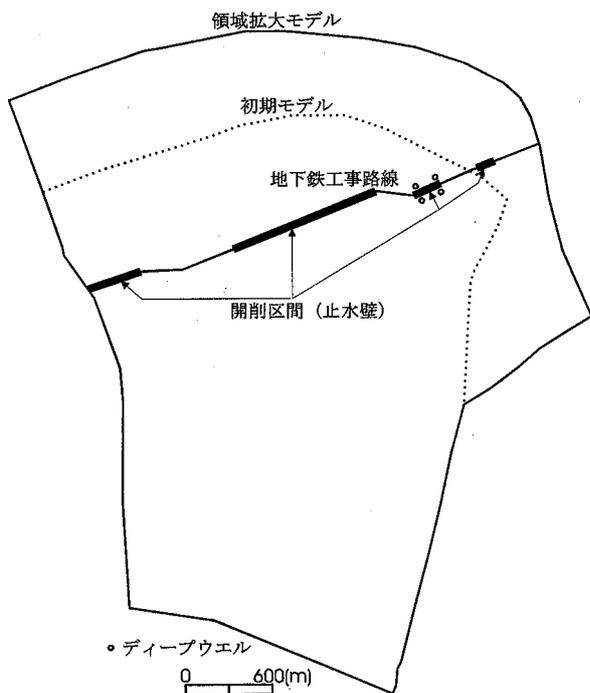


Fig. 4 解析領域 Analytical Area

全層厚で除し調査点の透水係数とする。

2.3 解析条件の決定・変更

2.1節および2.2節より決定した各条件から初期の地盤水理モデルを作成した。要素分割をFig. 5に, 透水係数

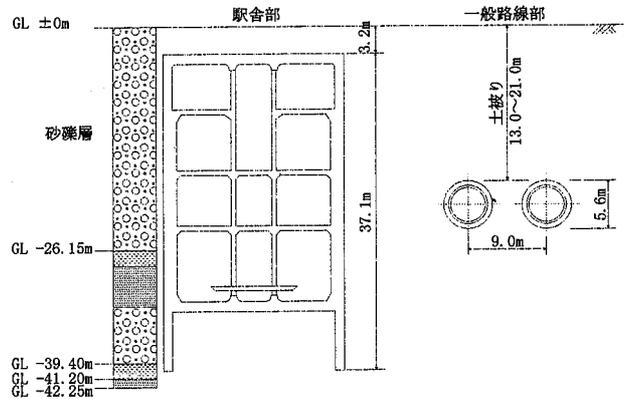


Fig. 2 地下構造物断面 Section of Underground Construction

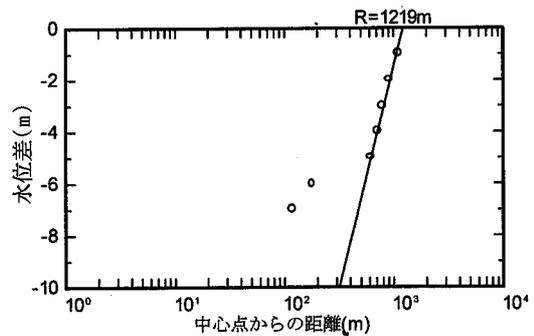


Fig. 3 影響範囲の推定 Presumption of Influence Area

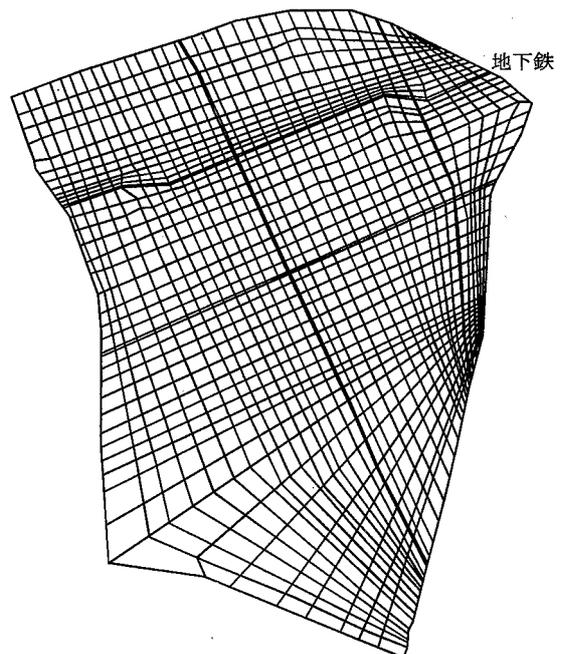


Fig. 5 解析メッシュ(初期モデル) Finite Element Mesh(Original Model)

の分布をFig. 6 (カラーページ) に示す。これらの条件を用いて自然状態 (工事前) のシミュレーション解析を行った。平面的な全水頭分布の実測値と解析値をFig. 7 に示す。同図は流入境界と流出境界の水頭差を100%とし、流入境界と各地点の全水頭との差を割合で示している。全水頭分布の解析値と実測値は差が大きく、透水係数の設定が適切でないと考えられた。

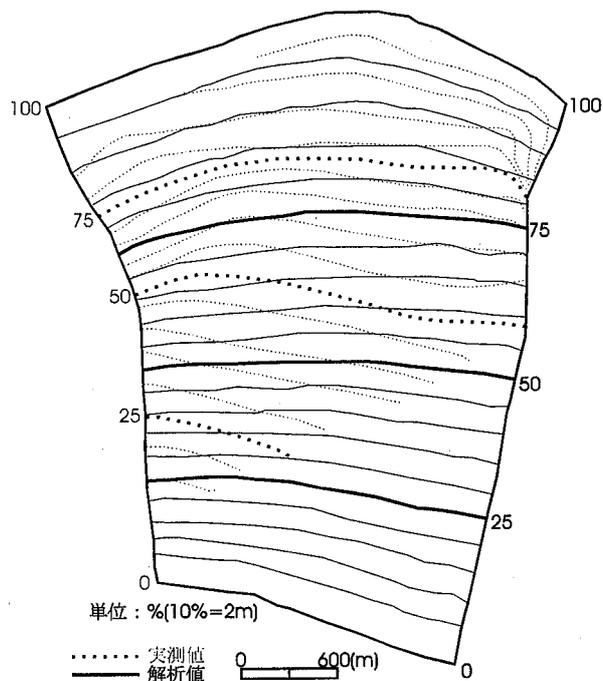


Fig. 7 工事前の全水頭分布 (初期モデル)
Total Water Head Contour of Pre-construction
(Original Model)

そこで、実測の初期全水頭分布から透水係数を逆算した。得られた透水係数の逆解析値をFig. 8 (カラーページ) に示す。その値を用いて解析した全水頭分布をFig. 9に示す。右上の領域で、若干、実測値と解析値に差があるものの、解析値と実測値はほぼ近似していることから、これを二次の地盤水理モデルとした。

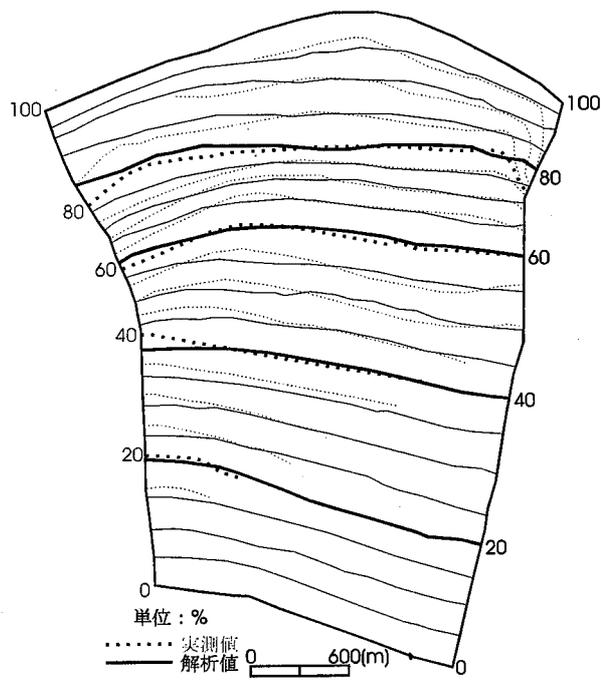


Fig. 9 工事前の全水頭分布 (透水係数変更)
Total Water Head Contour at Pre-construction
(Coefficient of permeability is modified.)

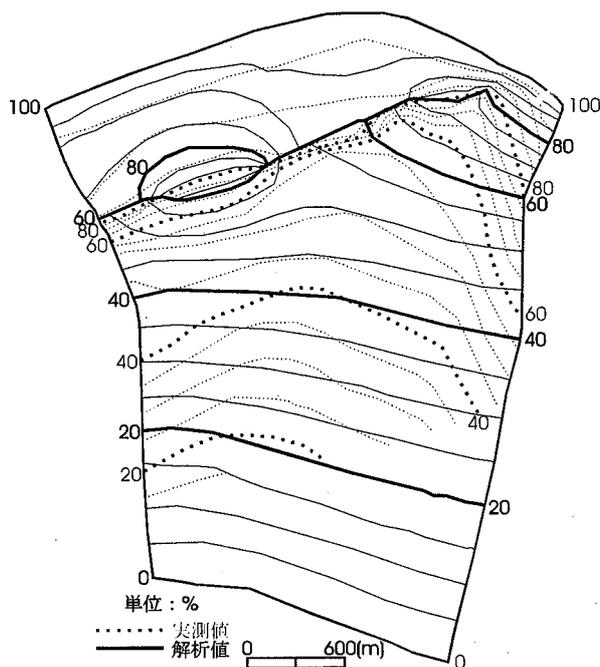


Fig. 10 工事中の全水頭分布 (透水係数変更)
Total Water Head Contour During Construction
(Coefficient of permeability is modified.)

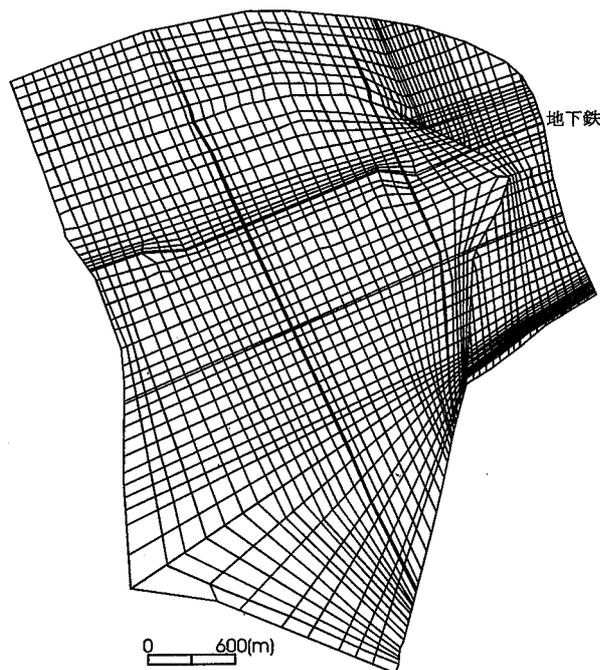


Fig. 11 解析メッシュ (領域変更)
Finite Element Mesh (Modified Area)

3. 地盤水理モデルの修正

3.1 工事中のシミュレーション解析

工事中の地下水分布のシミュレーション解析では、二次の地盤水理モデルに、地下鉄工事の構造物条件（止水壁の不透水条件）を加え、さらに、掘削工事に伴うディープウェル揚水量とリチャージ量を流束境界条件として解析を行った。なおディープウェルとリチャージウェルはGL-39.4mより浅い帯水層を対象に設置された。全水頭分布の解析結果と実測値をFig. 10に示す。この結果から、地下鉄工事位置より上流側では水位が上昇し、下流側で水位が低下する「ダムアップ現象」が生じていることが分かる。しかし、右上の領域の全水頭分布は実測値と比べ大きな差が生じている。この原因として、解析領域すなわち流入境界の位置の設定が適切でないと考え、解析領域を拡大して、解析精度を向上させることとした。

3.2 地盤水理モデルの修正

解析領域は、工事前と工事中の観測水位データから、両者の水位差がほぼ零となる部分まで流入境界を拡大した。拡大前後の解析領域をFig. 4に示す。拡大領域部の透水係数は、2.3節に述べた方法を用いて決定した。要素分割をFig. 11に、透水係数の分布をFig. 12（カラーページ）に示す。このモデルを用いて再度、工事中の水位分布のシミュレーション解析を行った。

平面的な全水頭分布の実測値と解析値をFig. 13に示す。また、同図中に示している流線に相当する断面1、2

に沿った全水頭分布についての実測値と解析値の比較をFig. 14に示す。断面1、2の流入境界から流出境界までの間の全水頭は、実測値と解析値がほぼ一致しており、また、断面1の地下鉄開削区間では上流側と下流側とで大きい水位差が生じ、ダムアップ現象が表現できていることがわかる。この段階の地盤水理モデルで工事の実測結果とよい対応が得られたことから、このモデルを用いて再度、工事前の自然状態の水位分布のシミュレーションを行い、地盤水理モデルの妥当性を検討した。自然状態の平面的な全水頭分布の解析結果をFig. 15に示す。右側の部分で実測値と解析値の整合性がとれていないが、この部分の水位の実測データが少ないため、これ以上の解析モデルの修正は困難であった。この領域はシールド区間に相当し、ダムアップ

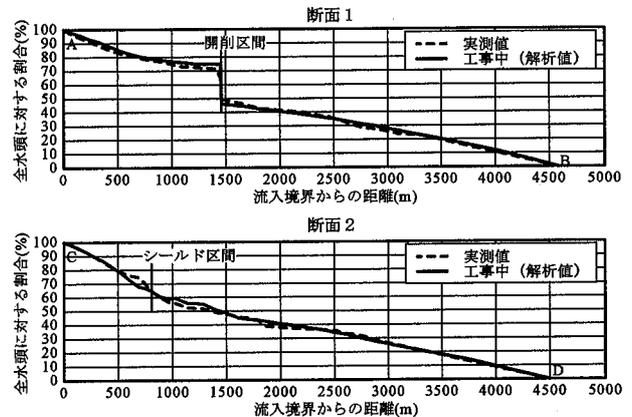


Fig. 14 断面1,2の全水頭
Total Water Head Along by The Section 1 and 2
During Constiruction

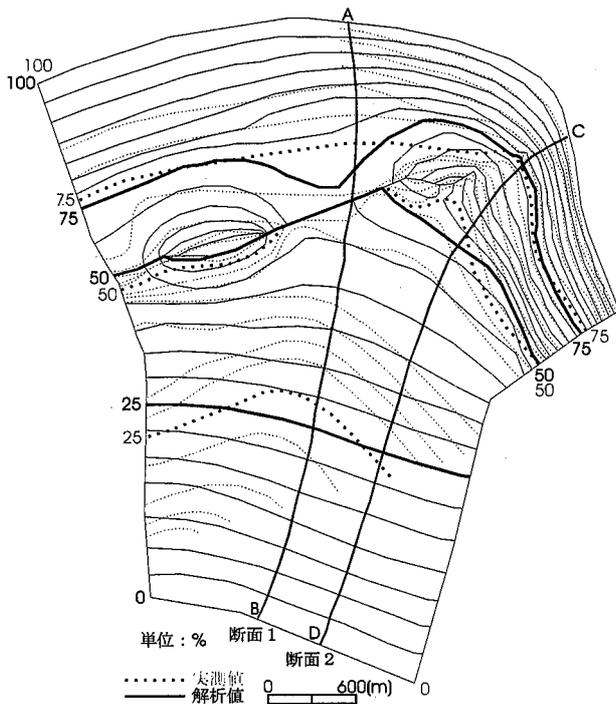


Fig. 13 工事中の全水頭分布
Total Water Head Contour During Construction

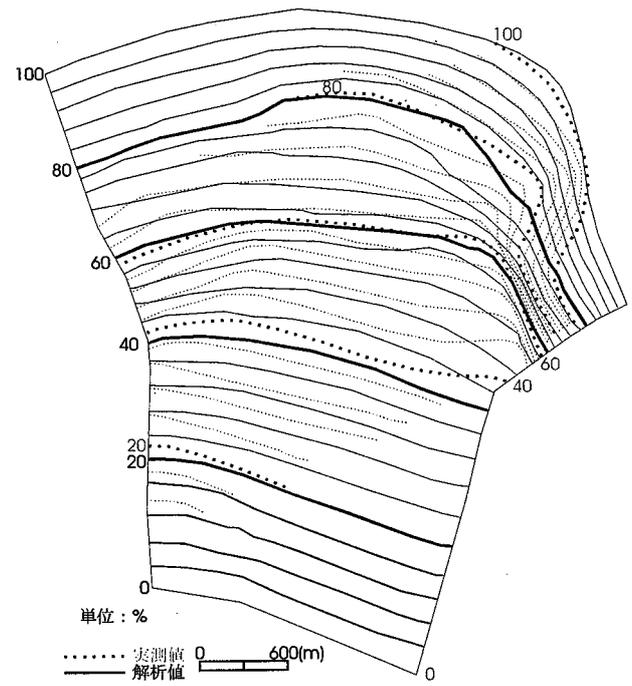


Fig. 15 工事前の全水頭分布
Total Water Head Contour at Pre-construction

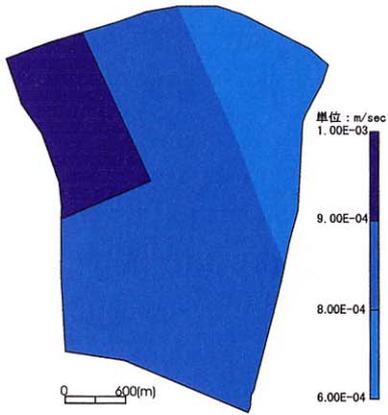


Fig. 6 透水係数 (初期モデル)
Coefficient of Permeability
(Original Model)

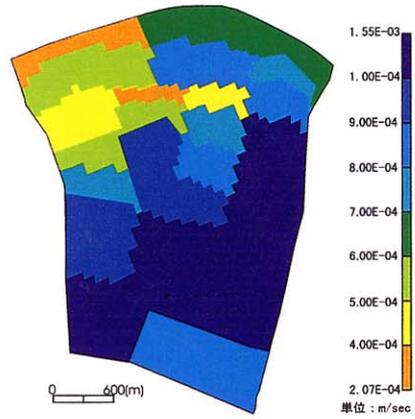


Fig. 8 透水係数 (逆解析値)
Coefficient of Permeability
(Back Analysis)

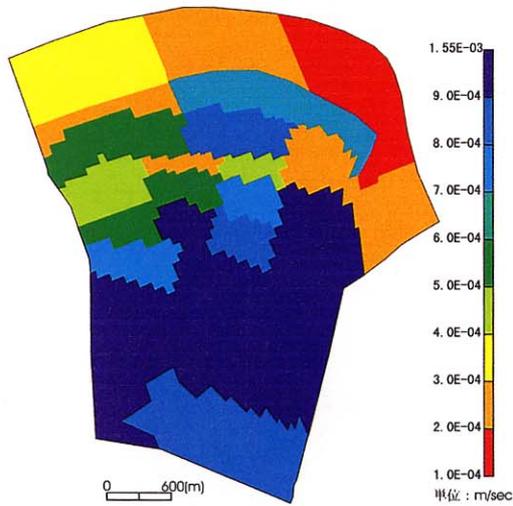


Fig. 12 透水係数 (領域変更)
Coefficient of Permeability
(Original model is expanded.)

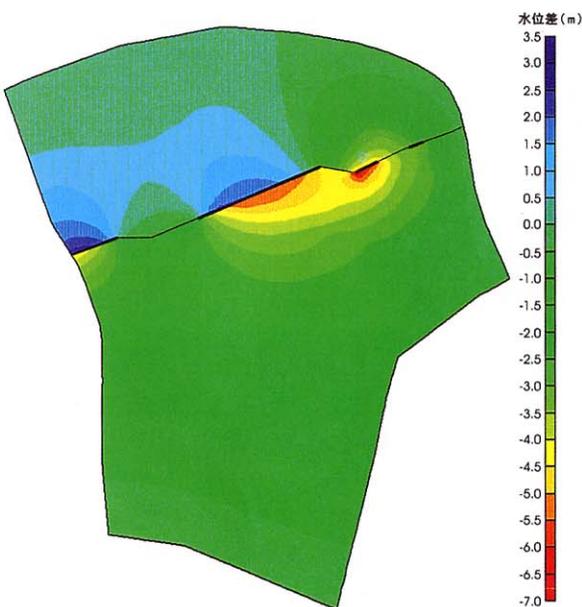


Fig. 16 工事前と工事中の水位差分布
Differential Total Water Head between Before and
During Construction

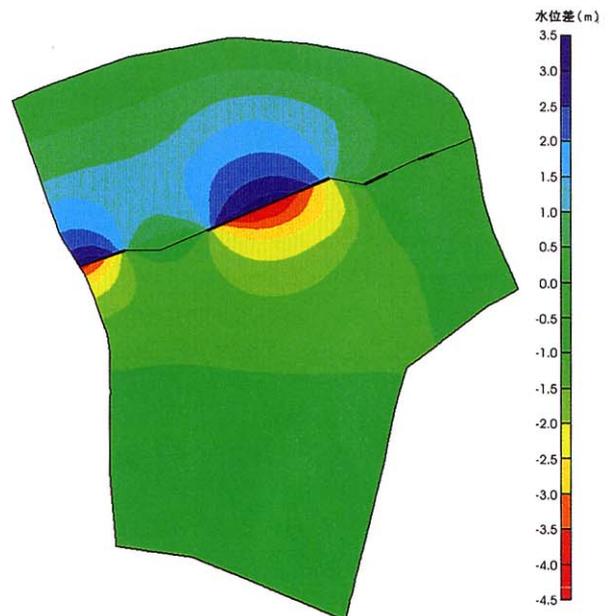


Fig. 19 工事前と工事後の水位差分布
Differential Total Water Head between Before and
Post Construction

ブ現象が生じる可能性が小さいことと、全体的には実測値と解析値とのよい対応が得られていることから、三次の地盤水理モデルとした。工事前と工事中の水位差分布をFig. 16に示す。水位観測結果は工事中に既に地下鉄駅舎部の上流側で水位が上昇し、下流側で水位が低下する「ダムアップ現象」が生じており、これに対して、解析もディープウェル揚水を行っている区域では、上流側でも水位低下しているものの、流動障害が表現できている。

4. 工事後の地下水分布の予測

3.2節の工事中の解析条件のうち、揚水量およびリチャージ量を0として三次の地盤水理モデルを用いて工事後のシミュレーション解析を行った。ここで示す工事後とは、揚水を完全に停止してから水位が回復し、定常状態になった時期である。

全水頭分布の実測値と解析値をFig. 17に示す。同図中に示す断面1、2に沿った全水頭分布の実測値と解析値の比較をFig. 18に示す。また、工事前と工事後の解析結果の水位差分布をFig. 19に示す。

工事完了後は、止水壁は残存し、透水層を遮断したままであるので、駅舎部および開削区間では、上流側で地下水位が最大3.5m上昇し、下流側で地下水位が最大4m低下するダムアップ現象が生じることが分かる。

なお、工事が完了して約1年経過した時点での観測結果は、解析予測値と同様に地下鉄の上流側で地下水位が上昇し、下流側では低下しており、水位変化の程度も実測値と解析値はほぼ合っていることが確認された。

5. まとめ

地下構造物工事において、止水壁等を用いて地下水の流れを遮断した場合、何らかの対策を行わないと、工事中および工事後にダムアップ現象による周辺地域の地下水環境の変化が生じる。

某地下鉄工事において開削工事を行うに当たり、工事中および工事後の地下水環境の変化を予測するため、平面二次元浸透流解析を行った。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 工事中のシミュレーション解析で、開削部分では上流側で最大2mの水位上昇、下流側で最大5mの水位低下が確認できた。
- 2) 工事後のシミュレーション解析で、揚水およびリチャージを停止することで、水位の回復が見られた。
- 3) 工事後も止水壁は残存する。止水壁は透水層を遮断したままであるので、地下水位が上流側で最大3.5m上昇、下流側で最大4m低下するダムアップ現象が継続する

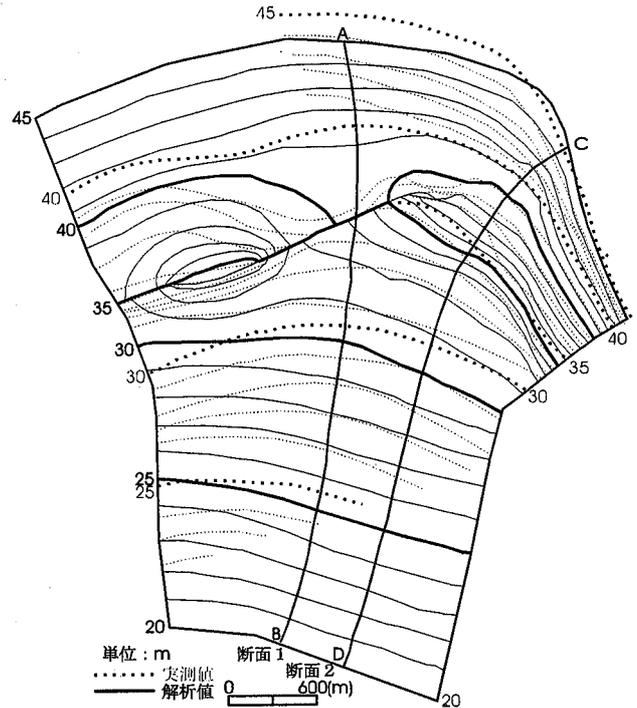


Fig. 17 工事後の全水頭分布
Total Water Head Contour at Post-construction

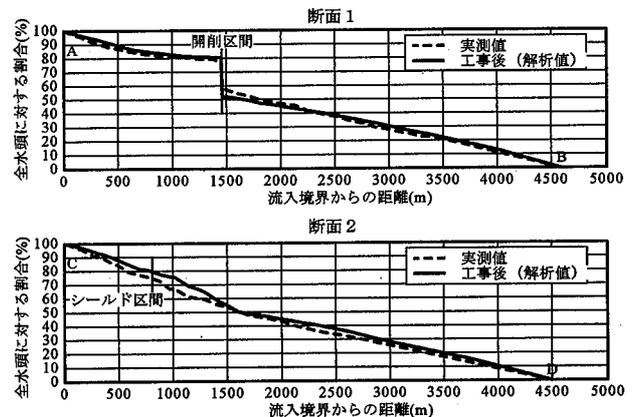


Fig. 18 断面1、2の全水頭(工事後)
Total Water Head Along by The Section 1 and 2
(Post-construction)

ことが推定される。

4) 止水壁がないシールド部分では工事前後の地下水位の変化量が小さい。

環境保全意識が高まりつつある現在、建設工事に伴う地下水流動阻害に対する対策を講じる事例が増加してきている。適切な対策を採るためには、地下水の流動を精度よく解析する必要がある。ここでは比較的精度よく予測できた事例を報告したが、これらの現象は広域の地下水流動を扱う必要があり、さらに、地盤調査法、解析モデルの構築法などを改善することが必要であろう。