

開削工事における地下水流動阻害の評価法

構造物技術研究部 基礎・土構造

研究員 松丸 貴樹

1. はじめに

都市部では既に構造物が密集し、大規模な構造物については地下化が進められている。構造物を地下に構築する際には土留め壁の施工や掘削工事を伴うため、施工中および施工後に地下水環境を大きく変化させる恐れがある。例えば下流側の地下水位低下は周辺の地盤沈下の要因となることから、住宅など周辺に存在する様々な構造物に対し影響を与える可能性がある。したがって、地下構造物の構築に伴う地下水の変化を適切に予測することは、非常に重要となる。

本研究では、開削工事において施工過程を考慮した上で広域な地下水の挙動を評価する手法を構築し、対策工のモデル化や入力パラメータの設定法の提案を行った。そして、構築した手法により対策工を施工した事例や、地下水変動による周辺地盤の変状を伴った事例の検証を試みた。

2. 地下水流動阻害の評価手法の概要¹⁾

地下水に関する問題は影響領域も広範囲にわたることが多く、また開削工事の施工順序・状況によっても地下水の挙動は大きく変化する。本研究では図1に示すような手法を構築しており、以下に示すような特徴を有している。

- ① 数キロオーダーにわたる広域な領域の地下水変動を対象とする。
- ② 開削工事の施工過程を考慮した評価が可能である。
- ③ 通水管を用いた工法など流動阻害対策工の効果を定量的に評価することができる。
- ④ 解析手法の精度に相応した適切な入力パラメータの設定法を備えている。
- ⑤ 解析結果を地盤変形解析に引き継ぐことができ、地盤変状の評価も可能である。

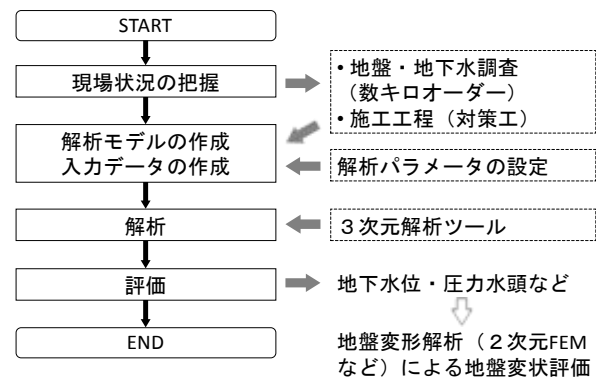


図1 地下水流動阻害評価法の概要図

3. 解析ツールの概要

広域な領域の地下水の挙動を解析するツールは、2次元解析あるいは準3次元解析によるものが大半であるが、これらの手法では精緻な評価を行うことが難しい。ここでは、数キロオーダーの解析が可能な有限要素法による3次元飽和・不飽和浸透流解析プログラムを用いることとした。

開削工事による地下構造物の構築においては、掘削・構造物構築・埋戻しなどの各施工過程において、周辺地盤での地下水流動は大きく変化する。本解析ツールにおいてはこの影響を、有限要素の除去ならびに追加を行うことで考慮できるようにした。

また、流動阻害対策工の既往の施工事例の調査を行ったところ、通水管による対策工が多く用いられていることがわかった¹⁾。これを3次元解析手法によって検討する場合、通水管設置箇所微小な要素を数多く設ける必要があり、非常に煩雑となる。そこで、効率的かつ適切に解析を

行うために通水管として1次元線要素を解析ツールに導入した。

以下では、1次元要素における基礎方程式を示す。通水管の透水係数 k_p は、以下の粘性流体の式によるものとする。

$$k_p = \gamma_w \cdot D^2 / (32\eta) \quad (1)$$

ここに、 γ_w は水の単位体積重量、 D はパイプの直径、 η は水の粘性係数である。また、平均流速 v_{ap} は Darcy 則によるものとして、次式により表される。

$$v_{ap} = -k_p \cdot \partial h / \partial x \quad (2)$$

ここに、 h は全水頭である。質量保存則により基礎方程式として次式が得られる。

$$(\partial / \partial x)(k_p \cdot \partial h / \partial x) = 0 \quad (3)$$

4. 地盤パラメータの設定法¹⁾

地下水流動阻害の評価においては、入力パラメータを適切に定める必要があり、とりわけ透水係数については解析結果に与える影響が大きい。ここでは、土留め壁および地盤の透水係数の設定法について示す。

4.1 土留め壁の透水係数

土留め壁の透水係数は土留め壁の遮水性を示すものであり、解析における施工中の地下水流動の挙動に大きく影響する。これまでの試験や解析による検討から、土留め壁の種類によって表1に示す値を用いるとよい。

表1 土留め壁の透水係数

土留め壁の種類	透水係数 (cm/s)
鋼矢板土留め壁	$10^{-4} \sim 10^{-5}$
柱列式地下連続壁	$10^{-5} \sim 10^{-7}$
地下連続壁	$10^{-7} \sim$

4.2 地盤の透水係数

地下水流動阻害の評価においては、マクロな地盤の透水係数が必要となる。これを精緻に求める試験として現場揚水試験が挙げられるが、試験の規模が大掛りとなるため、実施される場面は少ない。このため、原位置での単孔式透水試験、あるいは室内透水試験によって透水係数を求めることが多いが、試験法によるばらつきが大きいのが現状である。ここでは、両試験から得られた試験値を収集・整理し、統計解析を行ったうえで、試験値を補正する方法について検討した。

対象とする試験法は、単孔式透水試験（非定常回復法、非定常注水法、定常揚水法）、室内透水試験（定水位法、変水位法）とした。データ整理においては、透水係数 k を 20% 粒径 D_{20} で正規化して評価することとした。 k/D_{20} が対数正規分布に従うものとし、試験法ごとに k/D_{20} の平均値 (10^μ) と上限値 ($10^{\mu+\sigma}$) および下限値 ($10^{\mu-\sigma}$) を図2に示すようにプロットした。この図から、 k/D_{20} の分布幅は試験法の違いによって大きくは変わらないものの、平均値が2オーダー程度ばらつくことがわかる。

透水係数の評価に関する既往の研究²⁾では、単孔式透水試験の中で現場揚水試験に近い結果が得られるものは定常揚水法であるとされている。そこで、定常揚水法から得られる透水係数の平均値に、その他の試験法から得られる透水係数の平均値を揃える

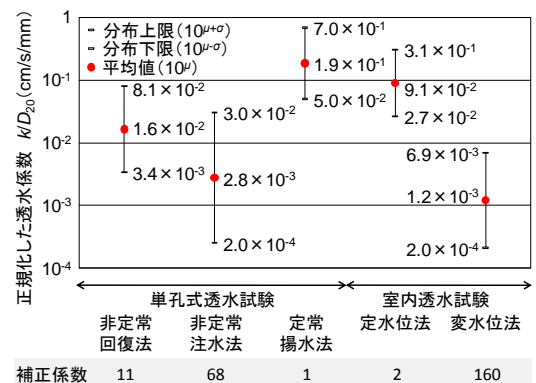


図2 試験法ごとの平均値・分布上下限と提案した補正係数

補正係数を求めた。試験法ごとの補正係数は図 2 中に示した値となる。

5. 事例による検証

5.1 事例 1 - 対策工の検証¹⁾

事例 1 は、2つの河川により形成された透水性の良い扇状地堆積層に、開削工法で地下構造物の新設を行った工事である。開削区間では、工事施工時及び完了後にわたり継続的に地下水流動阻害対策を行うため、土留め壁内部に集水・涵養機能を有し、掘削領域内部に通水管を通して上流側から下流側へと流す通水工法が採用されている。図 3 に掘削土留め工及び対策工の概要を示す。土留め壁には柱列式地下連続壁が用いられている。

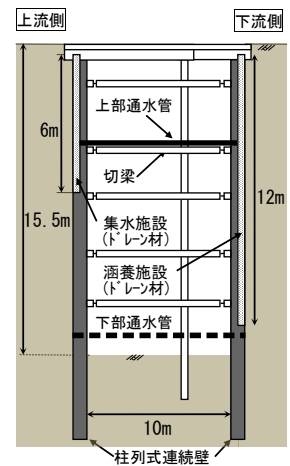


図 3 土留め工断面

対象地区は、透水性の高い砂礫を主体とした地盤である。図 4 に構築した解析モデルを示す。既往の水位調査データや水位変動の情報を基に、2.5km×2.5kmの範囲を解析領域とした。地下水流動阻害対策工として、対象地区では通水管（図 4 中の上部通水管、管径 200mm）を概ね 10m 間隔で設置している。これを 1次元線要素でモデル化するが、解析では実施工で用いられた通水管 3本に対し 1本の通水管モデルとした。解析は実施工にあわせて、土留め壁の施工から掘削、対策工の稼働を考慮して実施した。

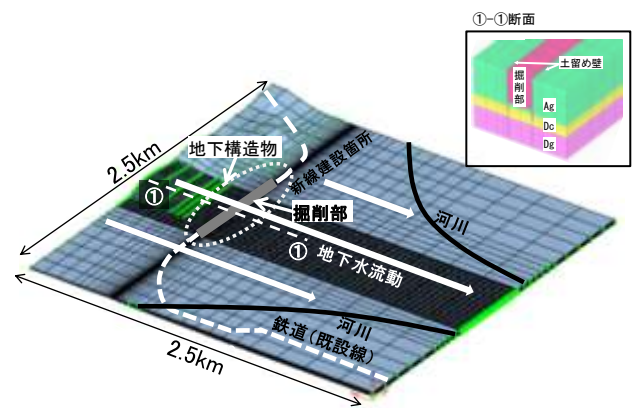


図 4 解析モデルの概要

各施工段階の断面水位を図 5 に示す。土留め壁施工後（遮水状態）に、施工箇所上流側で約 1.7m の水位上昇，下流側で約 5.8m の水位低下が生じた想定され、遮水時の地下水流動阻害状態を表現できている。一方、対策工稼働後は対策工稼働前と比較して、上流側で約 0.7m の水位低下，下流側で約 3.2m の水位上昇が生じ、双方で水位が回復している。図中には対策工稼働後の実測値も示すが、解析値と実測値はよく整合しており、対策工効果を評価可能であることがわかる。

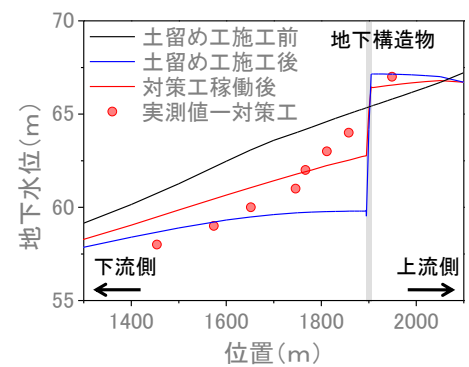


図 5 各施工段階の断面水位

また、本事例では上部通水管のみの流動阻害対策工が実施されているが、ここでは新たに下部通水管（図 3 参照）を追加した場合の効果について検討する。図 6 は対策工稼働時において、上部のみ通水させた場合（現状）と上部・下部両方に通水させた場合の地下水水位を表している。上部通水の場合と比較して、上部・下部両方に通水させた場合は、対策工の上流側，下流側双方で、顕著な地下水水位回復効果が表れ、ほぼ初期水位に近い状態まで回復していることがわかる。

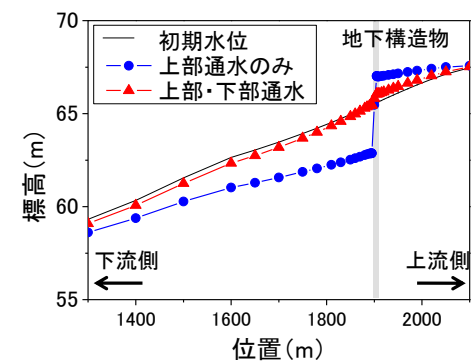


図 6 断面水位（対策工の比較）

5.2 事例2－周辺地盤沈下の影響評価³⁾

事例2は開削工法で行われた地下構造物の構築であり、延長200～250m、掘削幅20mで掘削深さは20mである。市街地であることや、地下水位は表層から0.4mの位置と非常に高いこともあり、土留め壁には柱列式地下連続壁が採用されている。地盤は、上部に4～5m程度の軟弱粘性土があり、その下に砂礫層が2～3mの層厚で分布している。特に、砂礫層は全領域に分布しているわけではなく、当現場における地下水挙動に大きな影響を与えることが予想された。

解析モデルは、地下水の変動が発生している領域や、現場における観測井や周辺の河川などから定められる境界条件を基に、約600m×400mの領域の範囲とし、図7に示すモデルを作成した。浸透流解析による掘削開始から床付けに至るまでの水位変動量の経時変化を図8に示す。この図から、どちらのポイントにおいても解析は実測の地下水低下を概ね再現できていることがわかる。

この地下水低下に伴う周辺地盤の挙動を、図7に示す断面1・2において2次元土-水連成弾・粘塑性有限要素変形解析手法により評価を行った。解析においては、地下水低下として浸透流解析で得られた水位低下量を鉛直方向の増加荷重として与えた。一例として、断面1および2の解析結果として、両断面の交点に位置する観測点での沈下量の経時変化を図9に示す。いずれの断面の解析においても、観測値に近い地盤の沈下挙動を再現できおり、地下水低下に伴う周辺地盤の変状の評価が可能であることがわかる。

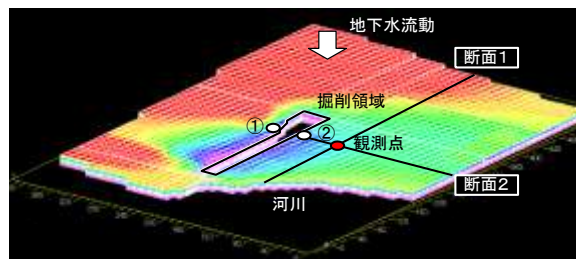


図7 解析モデルの概要

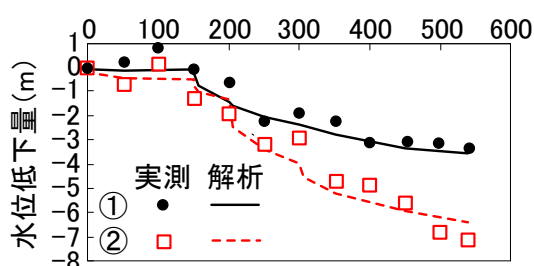


図8 水位低下量の経時変化

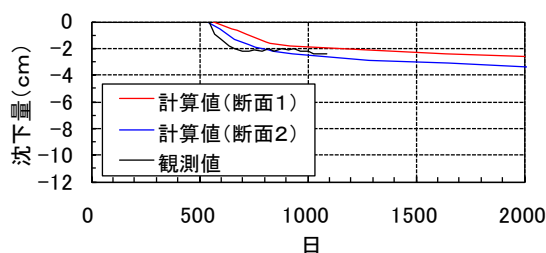


図9 地盤沈下量の経時変化

6. おわりに

本研究では、開削工事の施工過程を考慮できる地下水流動障害の評価法を構築し、対策工の施工事例や地盤変状を伴った事例の検証を通じて妥当性を確認した。今後は更なる事例への適用を通じて高精度化を図るとともに、流動障害と地盤変状の連成評価法の構築することを考えている。

参考文献

- 1)坂本寛章，小島謙一，松丸貴樹，後藤幸司：開削工事の施工過程を考慮した地下水流動障害の評価，鉄道総研報告，Vol.23，No.12，pp.53-58，2009。
- 2)乾一幸，石川明，三宅紀治，石崎長俊，清水孝昭，古茶直己：建築分野での透水性評価1－砂礫層における簡便法（単孔式透水試験とCreager法）の精度－，日本建築学会大会学術講演概要集，2005。
- 3)小島謙一，松丸貴樹，伊佐見孝夫，上杉知：開削工法による地価構造物の施工に伴う周辺地盤挙動の評価，土木学会第64回年次学術講演会概要集，2009。