

開削工事の施工過程を考慮した 地下水流動阻害の評価

坂本 寛章* 小島 謙一*
松丸 貴樹** 後藤 幸司***

Evaluating Influence of Underground Construction on Groundwater Flow Interruption

Hiroaki SAKAMOTO Kenichi KOJIMA
Takaki MATSUMARU Kouji GOTO

This paper describes an evaluation method for groundwater flow preservation caused by an underground construction in urban area. We proposed coefficient to modify the discrepancy by each testing method after the evaluation of hydraulic conductivity. We implemented a model to consider appropriate countermeasures by construction method in the proposed program, and conducted verification. We developed an analytical tool to consider staged-construction and large area, and conducted verification to use the actual measured data.

キーワード：地下水，流動阻害，対策工法，透水係数，影響範囲，有限要素法

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工の施工や掘削工事が伴うため、施工時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悪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が、非常に重要となる。

ここでは主に開削工事において、施工過程を考慮した上で地下水の挙動を評価する手法について検討を行い、解析による評価手法や解析時のパラメータ設定方法の提案を行った。また、地下水流動阻害における対策工法について評価できる飽和・不飽和三次元浸透流解析プログラムを用いて、パソコンレベルでの対策効果に関する検討を可能とした。

2. 地盤の透水係数の評価法

2.1 既往データの整理

地下水流動阻害の評価手法を構築するにあたっては、用いる解析手法に対応した入力パラメータを適切に定める必要がある。地下水流動を評価する際、土の浸透・透

* 構造物技術研究部（基礎・土構造）
** 前構造物技術研究部（基礎・土構造）
*** ジェイアール東海コンサルタンツ株式会社

水特性は重要な要素となるが、とりわけ地盤の透水係数については解析結果に与える影響が大きい。透水係数は粒度分布などから推定する他、原位置や室内での透水試験から求めることができるが、得られる透水係数は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、原位置や室内での透水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、試験法毎の透水係数のばらつきを考慮した補正方法について検討する。

対象とする試験法は、原位置における単孔式透水試験（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）である。収集したデータ（全て20%粒径（ D_{20} ）が得られている）の一覧を表1に示す。土の種類は砂および砂礫とした。単孔式透水試験（定常揚水法）は砂礫のみを評価の対象とし、室内透水試験については再構成した供試体を用いた。

データ整理を行うにあたり、同一の試料に対して必ずしも複数の試験での評価がなされていないことから、異なる土質における透水係数を横並びで評価する必要がある。そこで、土の物理特性として従来から透水係数 k と

表1 収集した試験法のデータ数

試験法		データ数	
		砂礫	砂
単孔式透水試験	非定常・回復法	112	202
	非定常・注水法	47	51
	定常・揚水法	23	3
室内透水試験	定水位	21	57
	変水位	-	69

特集：構造物技術

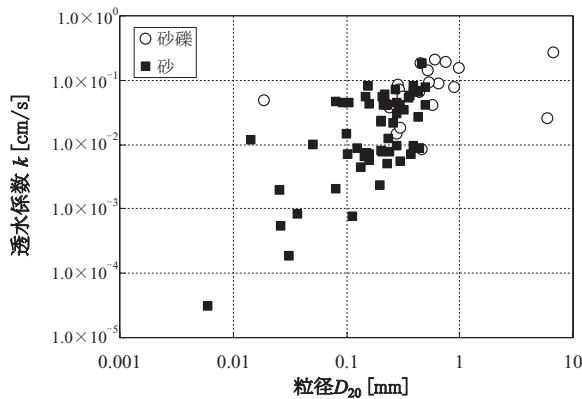


図1 D_{20} と透水係数の関係(室内透水試験(定水位法))

の相関性が示されている20%粒径 (D_{20}) で正規化して評価することとした。図1に D_{20} と透水係数の関係を示す。データにばらつきはあるものの、 D_{20} と透水係数には正の相関がある。また、両者の関係について砂と砂礫で大きな傾向の違いは見られなかったことから、以降の検討では砂・砂礫の分類は行わないこととした。収集したデータについて透水係数を D_{20} で正規化し、その対数値 ($\log(k/D_{20})$) について統計解析を行った。試験法ごとの $\log(k/D_{20})$ のヒストグラムを図2に示す。いずれの試験法から求まる透水係数についても、 k/D_{20} が対数正規分布形状を示している。図中には $\log(k/D_{20})$ の平均値 μ と分散 σ も併せて示しているが、試験法によって平均値や分散の分布が異なることがわかる。そこで、試験法ごとの 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3に示す。これより、 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。

2.2 評価手法の検討

透水係数の評価に関する既往の研究¹⁾においては、原位置透水試験(揚水法, 注水法など)から得られた透水係数に関する比較・検討が行われている。それによると、①揚水法が、比較的、精度の良い試験法であると考えられること、②非定常の試験法は定常の試験法(揚水法)の値と比較すると過小であることなどが示されている。図2, 図3に示す本収集データの整理結果においても、単孔式透水試験の定常・揚水法と比べて、非定常・回復法や注水法の k/D_{20} の値が小さくなっており、既往の研究と概ね一致していることが確認できる。

これらの結果を基に、試験法に関する補正方法として、単孔式透水試験(定常・揚水法)から得られる透水係数を1とした場合の補正係数(α)を検討した。補正係数(α)はそれぞれの試験法から求まる k/D_{20} の平均値が、単孔式透水試験(定常・揚水法)の k/D_{20} の平均値とほぼ同等となるように定めた。各試験法における補正係数の値を表2に示す。この補正を行うことにより、それぞ

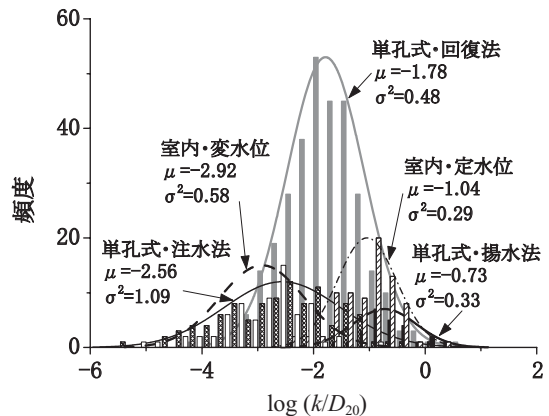


図2 $\log(k/D_{20})$ のヒストグラム

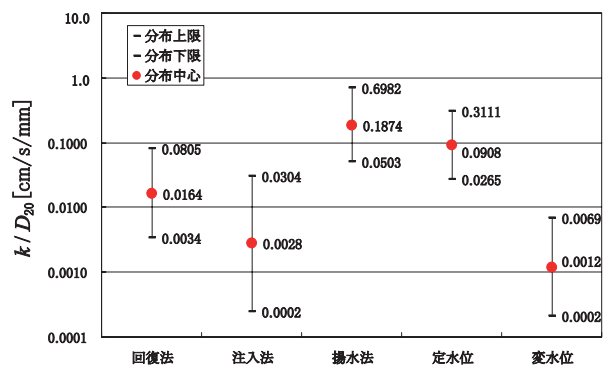


図3 試験法ごとの平均値および分布上・下限

表2 提案した補正係数

試験法		補正係数 α
単孔式透水 試験	非定常・回復法	11
	非定常・注水法	68
	定常・揚水法	1
室内透水 試験	定水位	2
	変水位	160

れの試験から得られた透水係数の値を概ね一致させることができる。

2.3 提案方法の検証

提案した補正係数(α)の妥当性を検証するため、同一の土質材料に対して単孔式透水試験(非定常・回復法)と単孔式透水試験(非定常・注水法)の透水係数が共に得られている128組のデータを用いて、補正した値の整合性について調べた。図4は横軸に単孔式透水試験(非定常・回復法)の透水係数、縦軸に単孔式透水試験(非定常・注水法)の透水係数をプロットしたものである。(a)は補正前、(b)は補正後の関係図である。なお、横軸・縦軸ともに対数軸で示している。補正前は非定常・回復法の方が大きな値(1:1のラインに対して下側に分布)を示しているが、補正後は概ね1:1付近(同一の透水係数)に分布しており、本補正方法が概ね妥当であることがわかる。

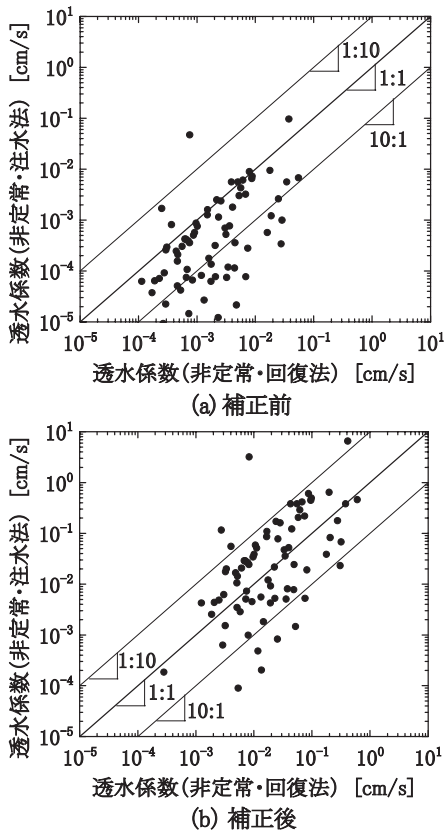


図4 提案した補正係数による透水係数の比較

3. 対策工のモデル化

3.1 既存の対策工法

既存の地下水流動阻害対策工を評価することを目的として、過去に実施された地下水流動阻害対策工に関する文献等を整理した。地下水流動阻害対策工法は、構造物の上流側でダムアップされる水を集める集水施設と、その水を下流側へ流す通水施設、通水施設から送られた水を集め下流側の地盤へ浸透させる涵養施設に分類される。通水施設は、表3に示すように (A) 構造物の上部を透水層として通水させる方式、(B) 構造物の中に管きよを設けて通水させる通水管方式、(C) 構造物下部に透水層を設けて通水させる方式の3種類に分類される。調査結果より、通水方式では半数以上の事例で通水管方式が採用されていることがわ

かった。これは、上部・下部の通水層方式では施工中の流動阻害に対して対応不可能であるためと考えられる。

3.2 対策工の評価方法

地下水流動阻害対策工を設計する際に、その効果を事前に適切に評価する必要があるが、実験的な評価が難しいことから有限要素法などの数値解析による検討が重要となる。数値解析においては対策工のモデル化が重要であり、解析結果に与える影響も大きいことから、ここでは対策工のモデル化について示す。

既往の施工事例では、通水管による対策工が多く用いられていた(表3参照)ことから、通水管を用いた対策工の評価を行うこととした。三次元有限要素解析手法を用いて通水管による工法の検討を行う場合、実際の施工にあわせてモデル化を行うと通水管設置箇所に微小な要素を数多く設ける必要があることから、モデルが非常に煩雑となり解析時間も多大となる。そこで効率的かつ適切に解析を行うために、一次元線要素を適用した通水管のモデル化にあたっては、一次元線要素の両端の節点を三次元要素構成節点に繋ぐ形式とした²⁾。

3.3 通水管工法の対策効果の検証

導入した通水管の解析モデルを用いて通水管工法の対策効果を評価するために、単純な3次元地下水流動モデルによる検討を行った。

解析モデルは図5、6に示すような帯水層と難透水層からなる水平2層地盤とし、モデル中心部に土留め工による流動阻害部分を設定した。

地下水流動阻害対策工として、帯水層に集水・涵養施設(井戸)を設置し、構造物下部に通水管で結合する形式とした。解析に用いた透水係数を表4に示す。

解析手法は飽和・不飽和非定常三次元有限要素解析とし、表5に示すように通水管径と設置本数をパラメータとする解析を行った。施工過程を模擬し表6で示す解析ステップを設定した。

図7にCASE-3における各解析ステップ毎の地下水位コンター図を示す。step2に示す土留め壁の施工により、土留め壁周辺で地下水位変動が生じ、上流側で水位の上昇、

表3 通水方式の分類

形式区分	(A) 構造物上部通水	(B) 通水管	(C) 構造物下部通水
概念図			
施工事例数	7件	12件	2件

特集：構造物技術

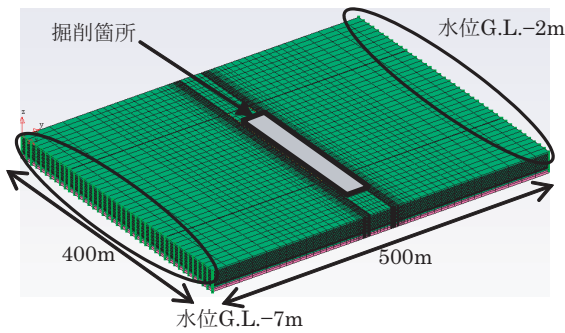


図5 有限要素解析メッシュ

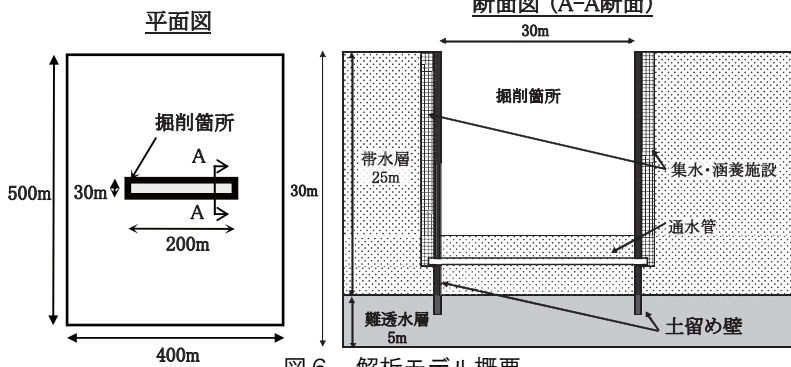


図6 解析モデル概要

下流側で水位が低下している。通水管による対策工の稼働後 (step3) には水位変動が概ね解消し、土留め壁施工前とほぼ変わらない状態に回復していることがわかる。

図8にCASE-3における土留め壁中心位置での断面水位図を示す。土留め壁施工で遮水状態となり約1m程度の水位変動が生じていたが、通水管稼働後は上流側で約60%、下流側で約80%程度水位が回復している。

図9に通水管径を200mmとした場合の100mあたりの通水管設置本数と水位回復率の関係を示す。通水管の設置本数が5本程度までは、通水管本数に概ね比例して水位回復率が上昇するが、本数がそれ以上になると効果が少なくなることがわかる。また、通水管本数が10本の場合下流側ではほぼ初期水位まで回復するが、上流側では80%程度までしか回復しないこともわかる。対策工を設計する際は、このような対策工の効果と経済性、施工性を考慮して行う必要がある。

4. 地下水流動阻害評価手法

4.1 評価手法の概要

地下水に関する問題は地盤の物性や地層構成、水の供給源などが複雑に関連しており、影響範囲も広範囲にわたることが多い。したがって、より正確な評価を行うためには地盤特性を考慮し、広範な三次元的な流れを適切に評価することが重要となる。また、施工の順序、状況によっても地下水の挙動は変わる。ここでは、前述の検

表4 解析に用いた透水係数

名称	透水係数 (cm/sec)
帯水層	1.0×10^{-3}
難透水層	1.0×10^{-6}
土留め壁	1.0×10^{-7}
集水・涵養施設	1.0×10^{-2}

表5 解析ケース

解析ケース	通水管径 (mm)	設置本数 (本/100m)
CASE-1	200	1
CASE-2	200	3
CASE-3	200	5
CASE-4	200	10

表6 解析ステップ

解析ステップ	施工状態
step1	土留め壁施工前 (初期状態)
step2	土留め壁施工後 (遮水状態)
step3	対策工稼働 (通水状態)

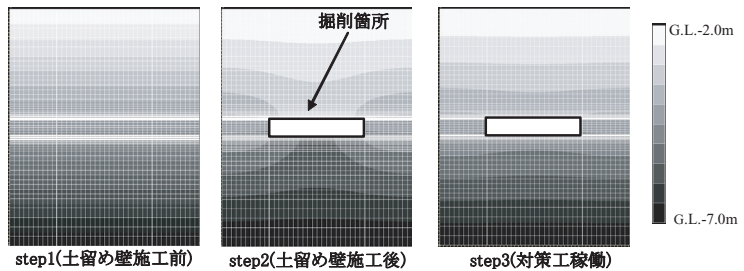


図7 地下水位コンター (step1～step3)

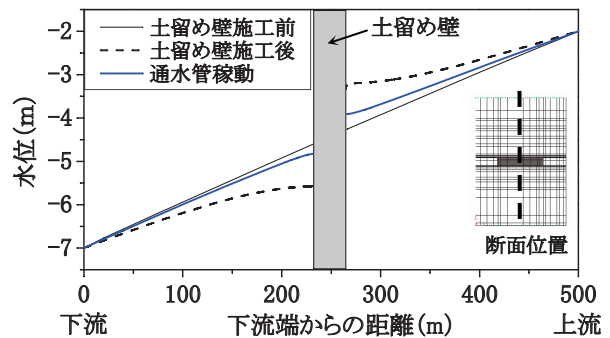


図8 断面水位図 (CASE-3)

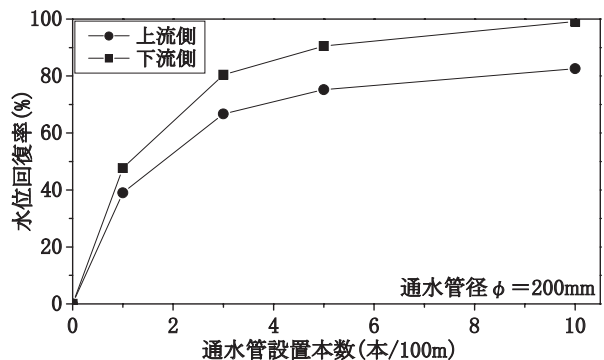


図9 通水管本数と水位回復率

討結果をふまえて、地盤内の地下水の特性や地下構造物の施工過程を考慮でき、対策工効果の検討も可能な評価手法を構築した。本手法の特長は、以下のとおりである。

- ① 数km オーダーにわたる広域な領域の地下水変動について、パソコンレベルでの解析が実施できる。
- ② 例えば掘削においては、施工前、施工後、対策工稼働後といった施工過程を考慮した評価ができ、施工途中での状況を求めることが可能である。
- ③ 試験法などによるばらつきの多い透水係数について、2章でその補正方法を提案したように、解析手法の精度に相応した適切な入力値の評価手法を有している。
- ④ 3章で流動阻害対策工のモデル化や試算を行い、その評価手法や効果について検討を実施したように、対策工の効果を定量的に評価することができる。

4.2 事例³⁾による検証

本手法の妥当性について検証するため、実事例を用いて検討を行った^{4) 5)}。対象事例は、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（地下鉄駅部および開削トンネル）の新設を行った工事である。図10に施工の概要を示す。図で示す開削区間では、工事施工時及び完了後にわたり継続的に実施できる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11に掘削土留め工及び対策工の概要を示す。切梁式の土留め工であり地下水位が高いことから、土留め壁には柱列式連続壁が用いられている。

対象地区は、透水性の高い砂礫を主体とした地盤である。既往の水位調査データや水位変動の情報を基に、境界の影響が及ばない領域を考慮して、2.5km×2.5kmの解析モデルを構築した。図12に代表的な地質柱状図を、図13に構築した解析モデルを示す。地盤に設定する透水係数は、対象地区で行われた現場透水試験等をもとに、帯水層である砂礫層（Ag層及びDg層）の透水係数を設定した。表7に解析で使用する透水係数を示す。

地下水流動阻害対策工として、対象地区では通水管（管径200mm）を約10mに1本の間隔で設置している。図14に対策工を含むモデルの概要を示す。モデル化においては、メッシュ数や形状の関係から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。解析は実際の施工工程にあわせて、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。ここでは表8の各解析の施工工程にあわせて、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。ここでは表8の各解析ケースについて示す。

図15に、各施工段階（Case-1～3）の断面水位の解析値を示す。Case-2の土留め壁施工後（遮水状態）では、

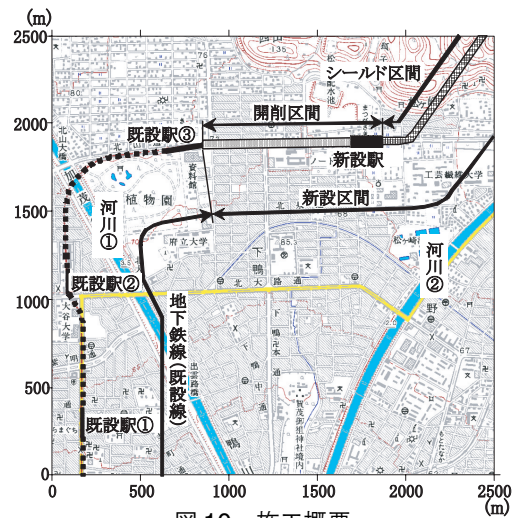


図10 施工概要

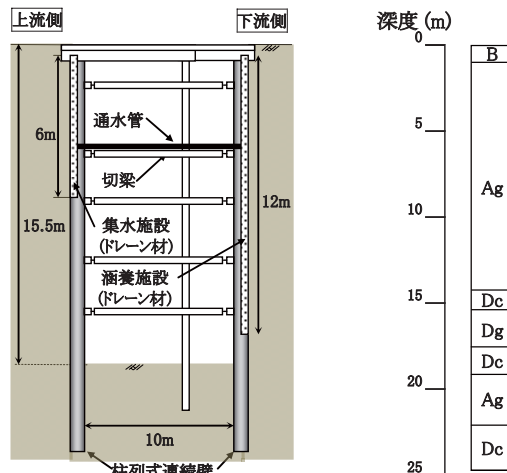


図11 土留め工断面

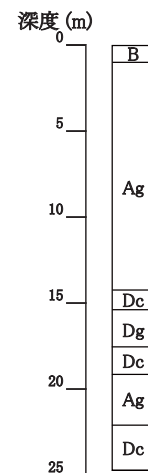


図12 地質柱状図

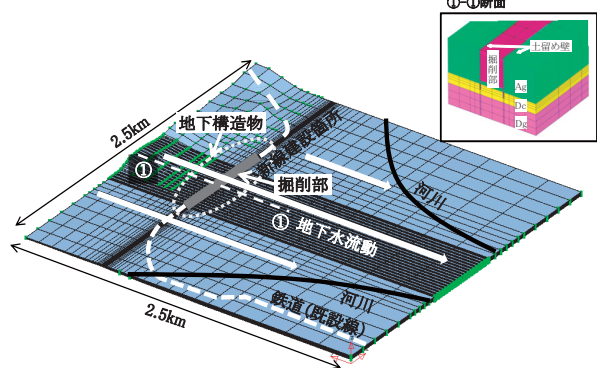


図13 解析モデル概要

表7 地盤・構造物の透水係数

対象	透水係数 (cm/sec)
Ag	1.0×10^{-1}
Dg	1.0×10^{-2}
Dc	1.0×10^{-6}
土留め壁	1.0×10^{-6}
地下構造物 (本体)	1.0×10^{-11}

施工箇所の上流側で約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

特集：構造物技術

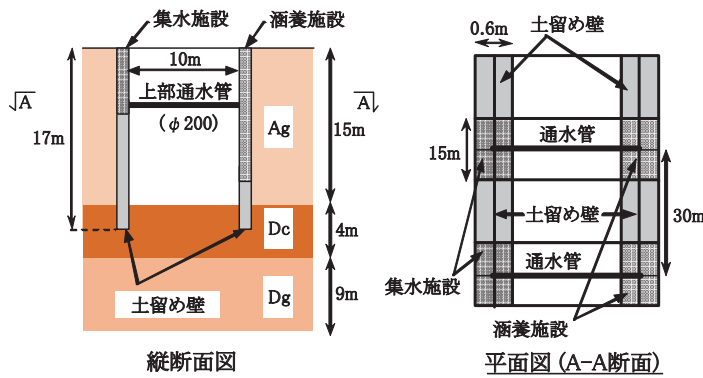


図 14 対策工モデル化概要

表 8 解析ケース

解析ケース	施工状態
Case-1	土留め壁施工前 (初期状態)
Case-2	土留め壁施工後 (遮水状態)
Case-3	対策工稼働後 (通水状態)

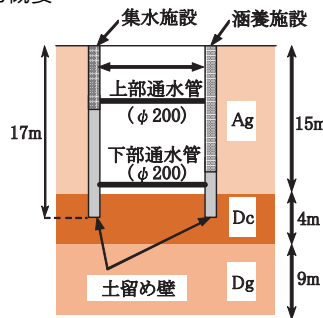


図 16 追加対策工概要

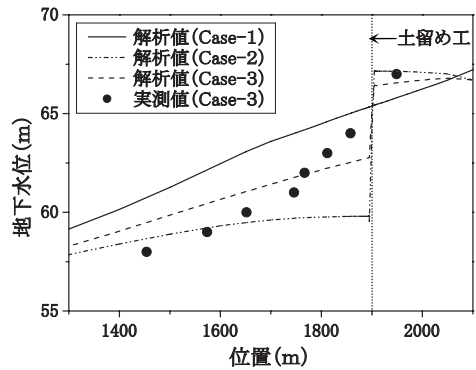


図 15 断面水位 (Case-1 ~ 3)

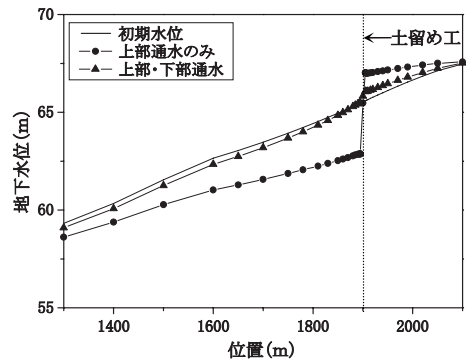


図 17 断面水位

(Case-3) 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。対策工稼働後の実測値もあわせて示すが、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。

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、ここでは新たに通水管を追加した場合の効果について検討する。図 16 に、検討した追加対策工の概要を示す。現状の通水管に加えて、構造物の下部 (深さ 12m) にも同数の通水管 (管径 200mm) を設置した。図 17 は、対策工稼働時における、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位を表している。上部通水のみの場合と比較して、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。

5. まとめ

本研究では、地下水流動阻害に関する評価手法について検討を行った。

- ① 有限要素法に基づく飽和・不飽和三次元浸透流解析手法を用いて、広範な領域においても時々刻々と変化する施工状況に対応できる検討方法を提案した。
- ② 入力定数に関しては特に解析結果に与える影響が大きく、試験法により結果が大きく異なる透水係数について検討を行い、試験法毎に簡易に補正する手法を提案した。

③ 地下水流動阻害対策の検討では、対策工を含めた施工前後において評価できるモデルを提案した。

今後は、透水係数の各試験法におけるデータの蓄積を行い補正係数の高精度化を図るとともに、掘削現場をはじめとする各種現場において、本手法を地下水流動の挙動予測や対策工の検討に適用していく所存である。

文献

- 1) 乾一幸ほか：建築分野での透水性評価Ⅰ－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, pp.551-552, 2005
- 2) 大東憲二, 植下 協, 市川悦男：掘削構造物周辺の地下水流動状態保全に関する研究, 土木学会論文集, No.535/Ⅲ-34, pp.13-21, 1996
- 3) 出口博一ほか：京都市地下鉄丸線における通水工法を用いた地下水位変動低減対策, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'96, pp.123-134, 1996
- 4) 坂本寛章, 小島謙一, 後藤幸司ほか：3次元解析モデルを用いた地下水流動阻害評価法, 土木学会第64回年次学術講演会, Ⅲ-281, pp.561～562, 2009
- 5) 坂本寛章, 小島謙一, 後藤幸司ほか：3次元解析モデルを用いた地下水流動阻害評価法, 第44回地盤工学研究発表会, pp.899～900, 2009
- 6) 土橋浩ほか：目詰まりを考慮した通水井の設計, 地下水地盤環境に関するシンポジウム'99, pp.79～96, 1999