

特集 「快適な都市環境をめざして」

建築根切り工事と地盤・地下水環境



清 広歳



元井 康雄



森尾 義彦



上野 孝之



森脇 登美夫

Ground Water Environmental Management under Building Construction

Hiroto Sei

Yasuo Motoi

Yoshihiko Morio

Takayuki Ueno

Tomio Moriwaki

Abstract

The increasing amount of large-scale and large-depth excavation work is having a large environmental impact on ground and ground water. Moreover, society is becoming increasingly concerned with environmental problems. It is therefore necessary to carry out "ground water management" when we process underground water. That is, it is necessary to consider the future ground and ground water environmental impact on surroundings as well as achieving safe and inexpensive excavation work. Safety, low cost and environmental preservation sometimes have contradictory requirements, so it is necessary to set priorities according to the construction condition, to plan excavation and ground water processing, and to set management values. This report describes the necessary investigations, examination items, and flow for ground water management. It also describes various underground water problems of encountering by excavating works in urban area and method of measures while introducing concrete cases.

概 要

近年、建築地下工事の大規模・大深度化等に伴い、地盤・地下水環境へ影響を与えるような根切り工事が増加している。また、環境問題に関する社会の関心も高まっており、地下水処理計画に際しては、当該根切り工事の安全性と低コストを両立させるのみではなく、周辺影響、将来の地盤・地下水環境への影響を最小とする、総合的な「地下水マネジメント」を行うことが要求されている。これら安全性、低コスト、環境保全是必ずしも両立せず、各工事の条件あるいは社会条件に応じて優先順位を判断した上で、山留め・地下水処理計画および管理計画の策定を行わなければならない。そこで本報では、都市部における建築の根切り工事で遭遇した種々の地下水問題とその対策の流れを、具体的な検討・対策事例を紹介しながら示した。

1. はじめに

近年、都市部での建築工事においては、地下空間の有効利用のため、大深度かつ敷地境界ぎりぎりの根切り工事が増加している。また、東京、大阪では1960年代からの揚水規制に伴い、被圧地下水位が上昇傾向にあり¹⁾、根切り底面地盤の安定のために山留め工法と地下水位低下工法を併用する工事も増加している。すなわち、地盤・地下水環境へ影響を与える事例が増加していると言える。また、環境問題に関する社会の関心も高まっており、当該工事の安全確保だけではなく、施工中あるいは竣工後の地盤・地下水環境を保全することも、建設業者としての社会的な責務になってきている。これらの検討・対策が疎かになると、補償問題や信用失墜に発展する恐れもある。したがって、以下のような意識を持って臨む必要がある。

1) 持続的な地盤・地下水環境保全を目指し、環境影響を低減する工夫。

2) 工事場内の安全性・作業性確保。

3) 予算と工期が限られた中で、最大限に効果を発揮する地下水対策の選別。

しかしながら、上記項目すべての要求に対して完全に対応することは困難であり、通常はいずれかを優先した場合、他に妥協点を見出さなければならない。

また、地下水処理計画は、地盤・地下水等の自然条件のみによつては一義的に決まらず、社会条件、建物規模、コスト制約等の諸条件との組合せにより要求される性能が異なり、同一地域で同規模の工事であっても同じ計画が各々の最良案となるとは限らない。つまり、工事毎の諸条件を考慮に入れた総合的な計画・対策、即ち「地下水マネジメント」を講じなければならない。

次章以降には、根切り工事が地盤・地下水環境と主に関わる事項と、その影響検討フローを示す。さらに、実際の山留め計画において、地下水処理コストを考慮して根入れ長さを決定した事例、周辺地盤沈下量を抑制するために揚水管理を行った事例、長期的な地下水環境保全のための評価・対策事例を紹介する。

2. 根切り工事と地盤・地下水環境との関わり

根切り工事期間中における地下水処理の目的は、施工中のドライワーク（場内の作業性）および根切り底面地盤の安定（場内の安全性）の確保である。その手段として、遮水性の高い山留め壁により場内への地下水浸透を抑制する遮水工法や、揚水井により水位を低下させる地下水水位低下工法があり、これらを併用したり、補助工法として地盤改良を行い地盤の透水性を小さくすることもある。

上述の地下水処理は、自然の地下水の流れを遮断したり、あるいは水位を強制的に低下させるため、程度の差はあるものの、周辺の地盤・地下水環境に影響を与えることになる。その程度によっては、Fig. 1に示すように地盤沈下や井戸枯れ等の障害が生じる場合がある。障害を未然に防ぐには、地下水処理計画にあたり、場内の作業性と安全性の確保のみではなく、周辺地盤・地下水環境の保全を視野に据える必要がある。

また、都市部の根切り工事では、地下水位低下工法を採用すると、地下水処理費用と障害発生リスクが増大する傾向にある。

地下水処理計画の検討項目は、以下に大別できる。

- a) 根切り工事中の場内の安全性、作業性の確保
 - b) 根切り工事中の地盤・地下水環境への影響
 - c) 竣工後の長期的な地盤・地下水環境保全
- 通常の検討順序としては、以下の通りである。

1) 場内の安全性、作業性を確保できる地下水処理計画をコストを考慮した上で立案する。主な検討項目としては、揚水設備設置・撤去コスト、公共下水道への排水や水質処理費等の排水処理コスト、山留め壁の根入れ長さ変更に伴う工期とコスト増減等がある。

2) 立案した地下水処理計画が、施工中・竣工後に周辺地盤・地下水環境に有害な影響を与えないかを確認。問題がある場合は、1)の地下水処理計画を再検討する。

なお、周辺の水質環境に対する基準が厳しく、セメント系山留め壁の使用が禁止されていたり、根入れ深さが制限されている場合には、それらを考慮した上で地下水処理計画を立てる必要がある。

一方で、上記a)～c)すべてに対し、理想的な対応を行う計画はコストや工期が膨大となり現実性がない。計画者は、限られた予算と工期の中で、これらに妥協点を見出しながら、最良と考えられる選択肢を判断しなければならない。

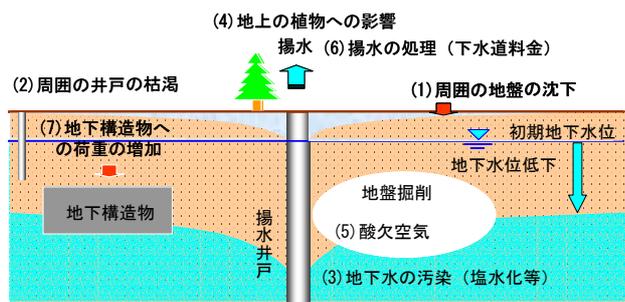


Fig. 1 地下水処理に伴う障害²⁾
Troubles Because of Ground Water Processing

3. 地盤・地下水環境への影響検討フローと調査

根切り工事に伴う、地盤・地下水環境への影響検討フローをFig. 2に示す。

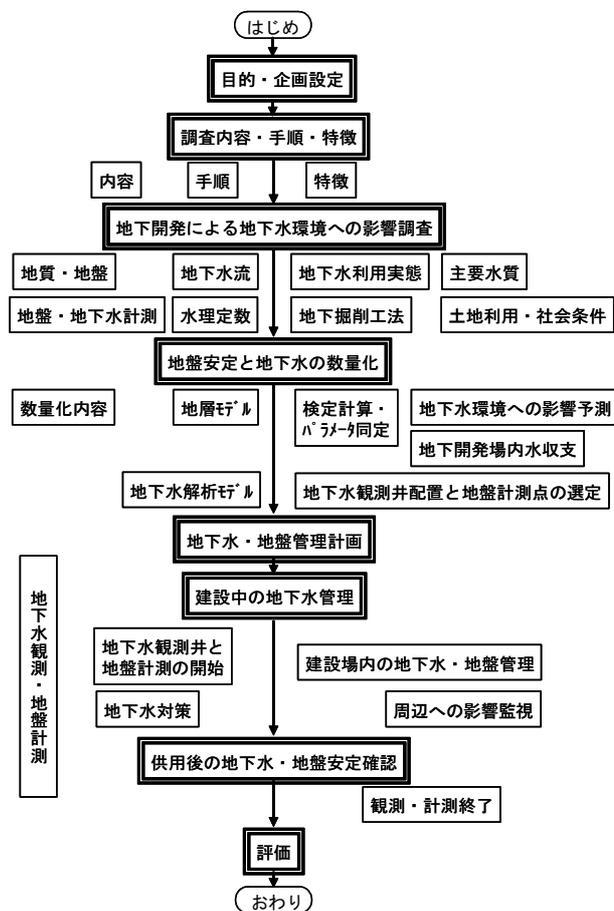


Fig. 2 地盤・地下水環境への影響検討フロー³⁾
Flow of Impact Examination for Ground and Ground Water Environment

地下水処理に伴う地盤・地下水環境への事前の影響検討は、地盤・地下水・周辺条件と地下掘削工法の仕様を適切に数値化・モデル化して、場内の地下水収支や地下水環境への影響を定量的に解析することであり、その結果によっては山留めおよび地下水対策工法の仕様や数量の見直しをすることもある。数値化・モデル化の根拠となる事前調査の項目は、地層構成、地下水位、水理定数、水質、周辺の地下水・土地利用実態等多岐にわたり、これら調査の頻度・精度が高いほど予測解析の精度も向上する。

現実的にはすべての調査項目を数多く行うことはできないので、先行ボーリングや近隣の既存ボーリング調査結果から地層の層序を読み取り、当該工事に必要となる調査項目、数量、位置を絞っていくことが必要になる。

また、工事中の地下水・地盤管理を確実にを行うことにより、計画時に仮定したモデルや水理定数が適切であったかを確認するとともに、将来の工事計画の参考となるように記録をストックしていくことも、永続的に地下工事の合理化を図っていく上で非常に重要である。

4. 根切り工事中の安全性評価と事例

2章で述べたように、根切り工事の安全性と作業性を確保する手段として、遮水工法、地下水位低下工法、あるいはそれらの併用や地盤改良による遮水性向上等がある。これらの工法の選別や仕様・数量の決定の際、地盤・周辺条件を考慮した上で、実現の可能性がある複数案を挙げ、それらのコスト・工期を比較することで、総合的に最も有効な案を選別することができる。

以下に、地下水処理計画の初期段階から関係各部門が連携し、排水処理コストおよび山留め壁の根入れ長変更によるコスト・工期の差異を総合的に比較して、山留め根入れ深さ・地下水処理計画を決定した事例の概要とそのプロセスを紹介する。

4.1 総コスト・工期比較により根入れ長を決定した事例

ボーリング柱状図の記述だけでは明確な遮水層を見出せず、遮水壁としての山留め壁の根入れ長さや、必要揚水量を設定できない場合がある。筆者らによるこれまでの実工事での地下水処理計画の経験上、コアサンプルの詳細な目視観察、帯水層の粒度分析、電気検層による地盤の比抵抗分布が、水理定数の推定精度を高め、山留め壁の根入れ長さや揚水井の設置深度、本数、配置を、実地盤に即して計画するための有力な手段となっている。また、柱状図の記述では厚い洪積粘性土とあり、遮水層として取り扱ってしまう地層でも、コアサンプルを丁寧に観察すると、盤膨れの要因の一つとなる挟み砂層や亀裂の存在が明らかとなり、事前に揚水計画を見直した事例もある。

詳細な地盤調査を行い、総コスト・工期比較により山留め壁の根入れ長を決定した事例AをFig. 3, Table 1に示す。コアサンプルの観察と電気検層、粒度分析を実施し、既存の地盤調査と照合した結果、透水性の低い粘性土層は存在するものの、層厚が薄く、不連続であると判断された。根入れ長さを十分長くして完全な遮水工法とするとコスト・工期が膨大になるため、下位に位置する帯水層から場内へ地下水の流入(湧水)をある程度許容し、これをディープウェルで揚水する計画を検討した。根入れ長さに応じた湧水量を算定し、各ケースの根入れ長さで排水処理の総コストと工期を試算・比較した。その結果、根入れ長さはやや長くなるものの、許容範囲内の工期で排水処理費用を含めた総コストが抑制でき、水替えリスクも比較的小さいCASE2(根入れ38m)を採用した。

4.2 遮水工法と地下水位低下工法を比較した事例

Fig. 4は、根切り底以深に透水性の高い砂礫層が堆積する地盤で地下水対策を検討した事例Bの断面概要である。

検討時の砂礫層の観測水位では、盤膨れの危険性はないが、水位観測時期が湧水期にあたることと、周辺で大規模掘削工事に伴い揚水中であったことから、工事中の水位上昇が生じる恐れがあることを前提として検討した。

CASE1の山留め壁で砂礫層を遮水する場合、壁施工費用

と工期が増加するが、排水費用は低減できる。一方、CASE2のように、砂礫層の被圧水を減圧して盤膨れ対策とする場合、山留め壁の施工費と工期の低減となるが、排水費用がかさむことになる。そこで、両者の工期・工費を詳細に検討した上で、地下水位の上昇がなければ無駄になる対策になることを勘案してCASE2案を採用した。対策案決定後、地下水位低下工法の設計と揚水試験からディープウェル3本で揚水できることを確認した。さらに、盤膨れ安定のための地下水位低下量は、根切り深度の進捗に応じて段階的に設定し、揚水量が必要最小限となるように管理して排水費用を抑制することとした。

これら2つの工事は、各関係者が計画早期から水替えに対する意識を高く持っていたので、山留め壁の長さ変更という大幅な計画変更に対応でき、根切り工事の安全性確保と工期短縮、コストダウンを両立することができた事例である。

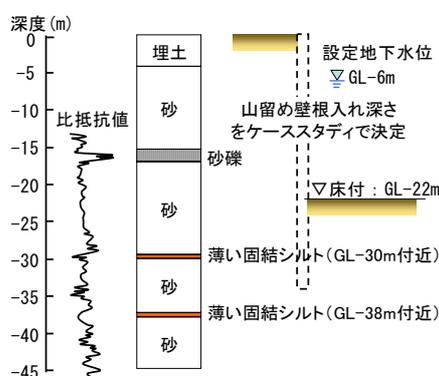


Fig. 3 地盤概要と電気検層結果 (事例A)
Outline of the Ground and Electrical Logging Result (Case A)

Table 1 根入れ長さ判定表 (事例A)
Judgment Table of Length of Walls (case A)

	CASE1	CASE2(採用案)	CASE3
モデル図			
山留め+DW+排水総コスト	1.0(基準)	0.68	0.66
山留め工期増	0(基準)	+17日	+37日
水替えリスク	大	中~小	小

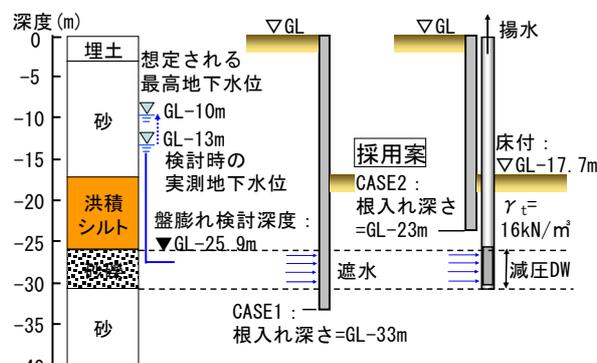


Fig. 4 根入れ長の検討断面 (事例B)
Section for the Examination of Length of Walls (case B)

5. 根切り工事時の環境影響評価と事例

地下工事に場内の地下水位を低下させたり、山留め壁により地下水流を一部遮断する場合、少なからず周辺地盤・地下水環境へ影響を与えることになる。特にFig. 5に示す減圧DW（ディープウェル）のように、山留め壁先端以深の地層の地下水位を低下させた場合、その影響が広範囲に及ぶこともある。地下水位低下が原因の、都市部で懸念される障害の主なものの一つに地盤沈下が挙げられる。地盤沈下量は、当該工事による場外各地点の水位低下量分布と、土の圧縮性を表す地盤定数から予測が可能である。これを周辺構造物の許容沈下量や自主管理値と照合して、揚水量や揚水期間の設定を行う必要がある。

5.1 周辺地盤の圧密沈下量を予測し対策した事例

地下水位低下工法を採用するとき、圧密沈下の検討が必要となる地層構成は、揚水対象とする砂質地盤の上位あるいは下位に正規圧密粘土が堆積している場合である。圧密沈下量を抑制するには、地下水位低下量を小さくすると同時に、揚水期間を短くすることが効果的な対策となる。粘性土が上位に存在する層厚の厚い被圧帯水層（砂礫層）を減圧したときの沈下対策事例を紹介する。

Fig. 6は、鉄道に近接する工事場での圧密沈下計算の一例である。被圧層水頭低下量分布をFEM解析により算出し、これを過剰間隙水圧とし圧密係数、排水条件、層厚を用いて最終圧密沈下量を算出している。さらに揚水日数に対応した圧密度をFig. 7のように求め、これに最終圧密沈下量を乗じることで揚水期間中の沈下量を予測した。この結果を用いて鉄道や周辺構造物に有害な沈下を与えない揚水量・揚水期間となるよう工夫するとともに、周辺の地表面沈下観測を行い、根切り工事を無事完了した。

5.2 周辺地盤の即時沈下量を管理計測した事例

帯水層（砂地盤）の地下水位を低下させると、有効応力が増加し、即時沈下が生じる。弾性的な沈下であるため、水位回復とともにほぼ元の状態に戻る性質のものであるが、近接する構造物等に、過度の変状を与えた場合、ひび割れ等の損傷を誘発する恐れもある。帯水層の水位低下と弾性沈下量の相関を把握し、揚水及び沈下管理した事例を以下に紹介する。

某工事場では地下鉄道が近接するため、根切り開始前に群井の揚水試験を行い、揚水量と複数の観測井の水位低下量および地下鉄道の沈下量を観測した。水理定数を同定した後、群井で揚水したときの工事場外の水頭低下分布を算定し、被圧水頭低下量と地下鉄道の沈下量との相関性を整理した。その結果、Fig. 8に示すように被圧水頭が1m低下すると即時沈下量が約0.1mmとなる地盤特性を得た。これをもとに、地下鉄道の沈下量が最小となるようディープウェルの揚水管理を実施し、地下鉄道に有害な変状を生じさせることなく地下工事を完了できた。

5.3 リチャージウェル（還元井）工法による対策

周辺変状対策あるいは揚水の排水対策として、還元井工法を採用する場合がある。揚水井と還元井の設計理論は同じであるが、実績の多い揚水井に比較して還元井の設計精度は低い。そこで、いくつかの工事場で採用されている還元井工法について、種々のデータを収集しているが、現状では同じ地盤・地層であっても井の揚水能力に比較して還元能力は0.5~0.3と小さくなること、また地下水の還元量は目詰まりにより時間とともに減少することなどの知見が得られている。

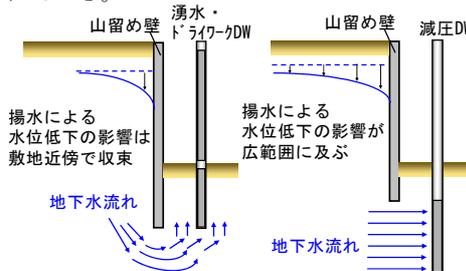


Fig. 5 揚水による周辺地盤への影響
Influence on Surrounding Ground by Pumping

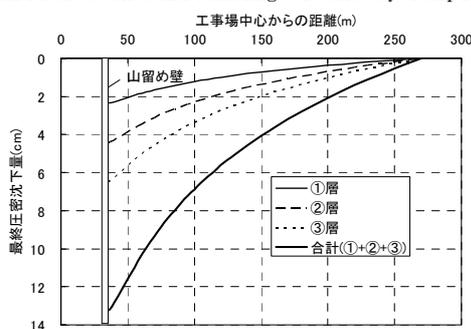


Fig. 6 圧密沈下量予測結果
Forecast Result of Consolidation Settlement

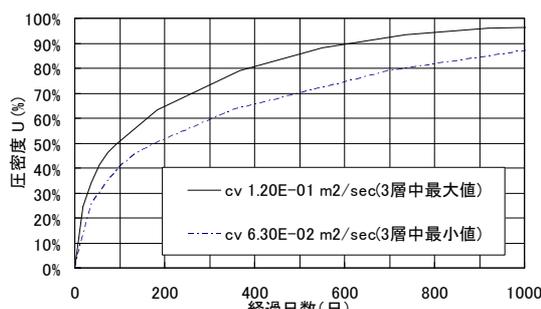


Fig. 7 圧密度
Degree of Consolidation

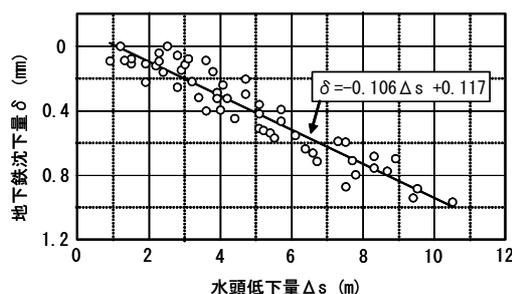


Fig. 8 即時沈下量と水位低下量の関係
Relation between Elasticity Settlement and Water Level

6. 地下水環境保全評価と事例

本章では、地下水環境に影響を与える山留め壁による地下水流動阻害に起因する問題を挙げ、この流動阻害の評価法について述べ、さらに対策工法について紹介する。次いでこの流動阻害に対する調査、解析により評価を行った事例を紹介する。

6.1 地下水環境保全に関する問題点・評価・対策

山留め壁が地下水の流動を阻害する場合、発生する問題を模式的にFig. 9に示す。地下水の上流では、地下水が堰き止められ水位が上昇（ダムアップ）し、植物の根腐れ、液状化（地震時）、建物への揚圧力増加（建物浮き上がり）、および地下構造物の漏水量の増加等が発生する可能性がある。また、地下水の下流では、水位が下降（ダムダウン）し、恒常的な井戸の枯渇、地盤沈下、湧水の枯渇、および植物の根の乾燥化等が発生する可能性がある。

上述のような問題点が惹起される地下水の流動阻害を評価して、適切な対策を講じるためには、まず適切な調査を実施する必要がある。以下に、重要な調査項目を挙げ、留意点を示す³⁾。

- 1) 地質・地盤については、地下水低下や地盤沈下は数100～数1000mに及ぶことがあるので、工事場から1000m程度まで調査範囲を拡げ、地下水の帯水層、難透水層を平面・断面で調査することが望ましい。
- 2) 地下水流については、地下水流況を表す層別の地下水位・水頭コンター図、地下水文区（境界条件）、および気象データ（降水、気温、蒸発散量等）を必要に応じて調査する。
- 3) 地盤・地下水計測は建設敷地の内外で行う必要があるが、建設敷地の境界付近で密に、離れるにつれて疎になる。また、施工中より施工後に力点を置く。
- 4) 水理定数（透水係数と貯留係数）のほか周辺地盤沈下を予測するためには、体積圧縮係数等の地下水水頭（間隙水圧）の変化と地盤変状の相関を与える定数も重要である。
- 5) 工事場から数100mの範囲にある井戸、水路、池等は、枯渇、水位上昇等の影響が出る可能性がある。また、これらの井戸、水路、池等は広域な地下水状況を知る上で極めて有効である。従って、周辺の井戸の位置、仕様（深さ、採水している帯水層）、水位、利用状況（目的、頻度）について可能な限り調査する。さらに、地下水位の変化によって地下水質の変化や潜在的な水質汚染が表面化し、問題になることもあるので、水道（飲料水）の水質基準にある項目と地下水汚染に係わる代表的な水質項目は、検査することが望まれる。
- 6) 山留め平面の形状や寸法、山留め壁の種類や寸法（根入れ深さ、厚さ等）が、地下水流動阻害の解析や対策工法の選定に必要である。
- 7) 土地利用・社会条件については、工事場が鉄道や重要構造物に近接している等の場合、流動阻害の検討や

対策工法の選定にあたりこれらへの影響を十分考慮する必要がある。また、地域によっては、名水や湧水があり地下水環境が行政的に保護されていることもあるので、こういったことについても調査しておく。

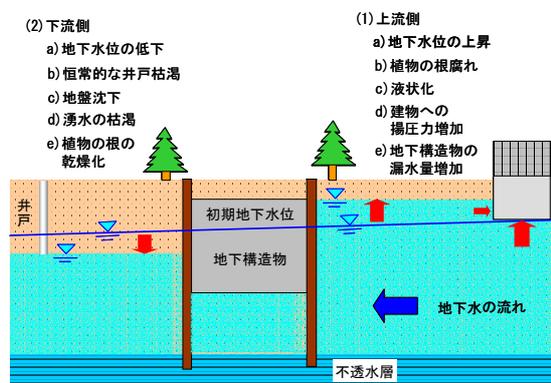


Fig. 9 流動阻害²⁾
Obstruction of Ground Water Flow

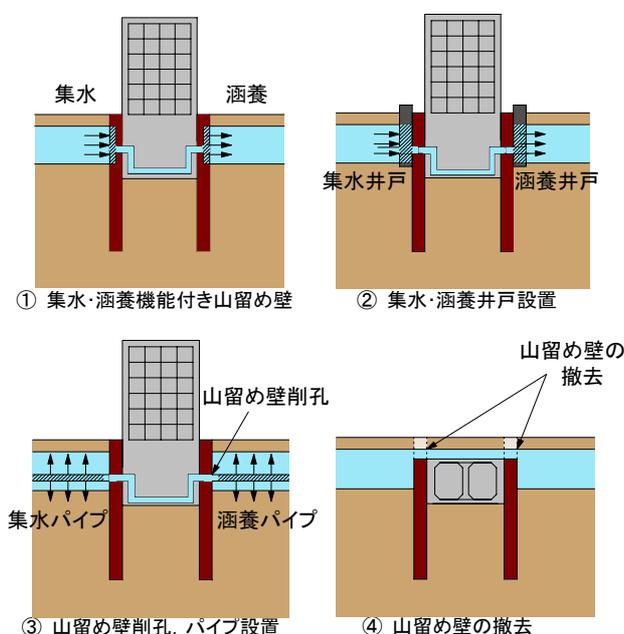


Fig. 10 流動阻害対策^{4), 5)}
Prevention Treatment of Obstruction of
Ground Water Flow

以上のような調査を行い、地層構成と帯水層の規模、帯水層の水理定数および地下水流況（流向・流速）を把握し、場合によっては6.2節で紹介するようなFEM解析を行い、山留め壁による流動阻害の影響を予測し、地下水環境が保全されるか評価する。その評価の結果、地下水環境の保全ができない場合は、対策工を採用する（Fig. 10参照）。同図は、実績のある種々の対策工について、上流の地下水の集水方法と、下流の地盤の涵養（還元）方法の観点から対策工法を分類したものである。図中①は、一部分が集水・涵養機能を持つ山留め壁を施工する工法である。集水・涵養の面積を広く取れる特徴がある。②は、山留め壁外周に集水・涵養用の井戸を設置する工法である。一般的な井戸が主体であるため、不明点が少なく確実な効果が期

待できる。③は、根切り後の地下躯体構築時に山留め壁を削孔して集水・涵養用のパイプを設置する工法である。施工時期が地下躯体構築時であることから、山留め壁による流動障害が発生した事後の対策として利用できる。なお、④の山留め壁を撤去する対策工法は、建築での適用ケースはほとんどないと考えられるが、参考までに示しておいた。

6.2 地下水環境保全評価の事例

建設地から半径500mの範囲内に、200本を超える井戸があるという状況で、約100m×110mの平面を深さ20mまで根切りする建築工事の例を紹介する。山留め壁は、ソイルセメント柱列壁が採用され、近隣の井戸が地下水を汲上げている帯水層を遮断する深さまで根入れされている。このことから、山留め壁により地下水の流動が阻害されダムアップ、ダムダウン現象が発生し、近隣の井戸が枯渇したり、水質変化を起こすこと等が懸念された。また、山留め壁施工時におけるセメント粒子による水質汚濁も懸念された。

この工事では、建設敷地境界において地層構成と帯水層の規模、帯水層の水理定数、および地下水流況（流向・流速）の把握を目的としてボーリングによる地質、地下水調査を実施した。流速・流向試験では流速が測定精度の限界値 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ を下回り、この結果を用いて流況解析を行うことは困難であった。そこで、地形図や近隣井戸の構造と水位を基に、流動障害の対象となる帯水層の広域的な地下水分布および流速を同定した。さらに、これらのデータを基に解析モデルを作成し、FEM解析を行い、山留め壁による流動障害の影響を定量的に予測した（Fig. 11, 12参照）。検討の結果、山留め壁による流動障害の影響（ダムダウン、ダムアップ）は小さく、また地下水の流速が遅いことからセメント粒子の移流・分散による水質汚濁もほとんどないと結論付けられた。まだ不確定要因もあることから、工事中は工事場内に設けた観測井戸および近隣井戸のモニタリングを行って、異状があった場合に対策を講じることとした。

なお、別の某工事場では、周辺に湧水のある公園があり工事による流動障害が学識経験者から指摘された事例がある。この工事場では先に示したFig. 10の②の山留め壁外周に集水・涵養井戸を設置する対策工法を施工した。観測の結果、流動障害が解消されていることが判明した。

7. まとめ

都市部における建築の根切り工事で遭遇する種々の地下水問題とその対策の流れを、具体的な検討・対策事例を紹介しながら示した。

工事計画初期の段階で、地下水処理計画が検討、提案されれば、山留め壁の根入れ長等の大きな計画変更にも対応が可能となり、対策の選択肢も増える。逆に事前検討が不十分で、トラブルが起きた時点ではじめて対応策を考えるような事態となった場合、対応の遅れや誤った対策の選択につながり、緊急対策費用や工期への影響が甚大となる

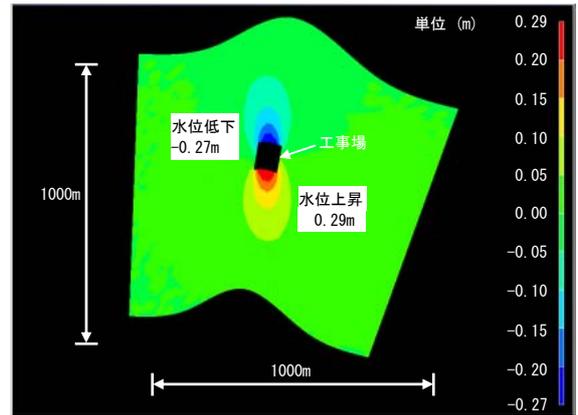


Fig. 11 地下水位変化量コンター図⁶⁾
Contour Chart of Amount of Change of Ground Water Level before and after Construction

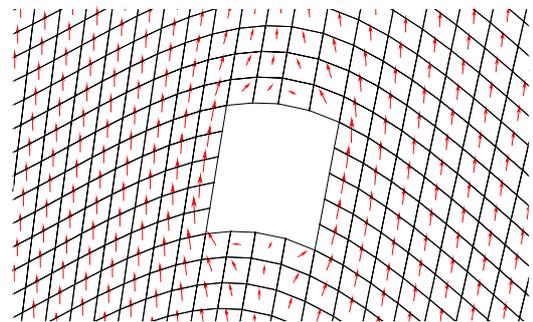


Fig. 12 流速ベクトル図
Vector Diagram at Flow Velocity of Ground Water

ばかりではなく、周辺地盤・地下水に対する二次的なトラブルが生じたり信用失墜を招く恐れもある。

根切り工事の安全と周辺環境保全に対する対策は工事条件、周辺環境条件によって種々の方法が考えられる。そこで、対策の実施時期に関しては、工事費用の低減という観点から次のような配慮が必要である。即ち、計画された対策には、実行する可能性の低いものもあり、このような対策をすべて実施することは、不経済である。したがって、初期段階で、対策案が準備されていれば、その実施はトラブル回避に間合う時期であれば十分である。ただし、常にトラブルの予知と適切な対策が実施できる準備を整えておく必要がある。

参考文献

- 1) 平成14年東京都土木技術研究所年報, pp.198~201
- 2) 地盤工学会:実務者のための土と基礎の設計計算演習講習会配布資料, (2004)
- 3) 佐藤邦明 編著:地下水環境・資源マネジメント, 埼玉大学出版会, (2005), pp.37~126
- 4) 地下水地盤環境に関する研究協議会:地下水流動保全工法, pp.3-6, (2001・9)
- 5) 深見, 須藤, 上野:地下水流動障害対策に関する考察, 土木学会第55回年次学術講演会, pp.512~513, (2000)
- 6) 山岸, 上野, 西田: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, 大林組技術研究所所報 No.57, pp.67~72, (1998)